Quan sát của vệ tinh cho thấy 13 năm của chiến lược làm đầy hồ chứa, các nguyên tắc điều hành, và những thay đổi thủy học ở Thượng lưu vực Mekong

(Satellite observations reveal 13 years of reservoir filling strategies, operating rules, and hydrological alterations in the Upper Mekong River basin)

Dung Trung Vu, Thanh Duc Dang, Stefano Galelli, and Faisal Hossain – Bình Yên Đông lược dịch

Hydrology and Earth System Sciences- 5 May 2022

14/6/2022

Đập Xiaowan trên sông Lancang (Mekong) ở Trung Hoa. [Ảnh: almreal]

1. PHẦN GIỚI THIỆU

Trong nhiều lưu vực sông xuyên biên giới, động lực xung đột giữa các quốc gia duyên hà thường đưa đến những quan điểm về phát triển và quản lý hạ tầng cơ sở khác nhau (Warner and Zawahri, 2012). Những động lực như thế thường được kết hợp với việc thiếu minh bạch về cách mà hạ tầng cơ sở quan trọng, chẳng hạn như đập, được điều hành. Tình hình trong lưu vực sông Lancang-Mekong không phải là một ngoại lệ: trong 3 thập niên qua, lưu vực đã chứng kiến việc phát triển thủy điện nhanh chóng (Chowdhury et al., 2021), đã thay đổi chế độ thủy học (Dang et al., 2016; Räneäsen et al., 2017), và thay đổi ngân sách phù sa (Kondolf et al., 2018; Binh et al., 2020), vì thế làm suy thoái các hệ sinh thái ven sông và đe dọa các cộng đồng duyên hà (Sabo et al., 2017; Soukhaphon et al., 2021). Tiếp theo, những thay đổi sâu đậm và phân nhánh nầy thách thức mối liên hệ giữa các quốc gia duyên hà (Wei et al., 2021). Trong việc quản lý nước-năng lượng "hỗn độn" nầy, Trung Hoa đóng một vai trò quan trọng. Trước hết, sông bắt nguồn ở Cao nguyên Tây Tạng và chảy bên trong biên giới Trung Hoa khoảng 2.000 km, tạo nên một sức mạnh thiên nhiên không tương xứng với các quốc gia duyền hà khác (Kattelus et al., 2015). Thứ nhì, Trung Hoa đã xây một số đập có giới hạn – chỉ có 11 trong số 100 hay nhiều hơn hiện đang đánh dấu toàn thể lưu vực (Hecht et al., 2019). Nhưng, một ít đập nầy ở thượng lưu vực Mekong, hay Lancang, có khả năng trữ nước khổng lồ (~42 km3) và kiểm soát một phần đáng kể của lưu lượng sông (khoảng 55% lưu lượng trung bình hàng năm ở Bắc Thái Lan). Thứ ba, Trung Hoa hợp tác với các tổ chức đa quốc gia, chẳng hạn như Ủy hội Sông Mekong (Mekong River Commission (MRC)) (Kattelus et al., 2015; Williams, 2020). Thứ tư, Trung Hoa chưa chia sẻ dữ kiện chi tiết và tổng thể về việc điều hành đập; các thỏa thuận về chia sẻ dữ kiện và kiểm phẩm

chỉ ở thời kỳ sơ sinh (Jonhson, 2020). Vì những lý do nầy, các đập Lancang đã trở thành một nguồn tranh cãi giữa Trung Hoa và các quốc gia ở hạ lưu (IRN, 2002; Eyler and Weatheerby, 2002; Kallio and Fallon, 2020). Nhưng để đánh giá ảnh hưởng thật sự của chúng và thông báo các nỗ lực hợp tác, trước hết chúng tôi phải định lượng và tìm hiểu làm thế nào những đập nầy được điều hành.

Có ít nhất 2 cách để đối phó với thách thức nầy. Cách đầu tiên được xây dựng trên ý tưởng tạo dữ kiện về lưu lượng chảy vào hồ chứa, dự trữ, và xả nước bằng cách mô phỏng bằng một mô hình quản lý nước-thủy học dựa trên tiến trình, một giải pháp vừa được khám phá cho lưu vực Mekong bởi Dang et al. (2020a), Yun et al. (2020) và Shin et al. (2020). Dĩ nhiên, đây chỉ là sửa chữa một phần, vì mô phỏng dự trữ của hồ chứa nước và việc điều hành vẫn đòi hỏi một số tin tức căn bản về tiêu chuẩn thiết kế và chiến lược điều hành. Cách thứ hai là viễn thám vệ tinh, cung cấp một phương tiện để quan sát trực tiếp một vài biến số then chốt. Các vệ tinh đo cao độ, thí dụ, cung cấp dữ kiện mực nước có độ phân giải cao của hồ thiên nhiên và hồ chứa nước (Schwatke et al., 2015; Busker et al., 2019; Biswas et al., 2019), trong khi hình ảnh vệ tinh quang học có thể được chế biến để vẽ bản đồ và khám phá những thay đổi trong vùng nước mặt (Pekel et al., 2016; Zhao and Gao, 2018; Pickens et al., 2020). Hơn nữa, dữ kiện mực nước và vùng có thể được kết hợp với tin tức về độ sâu (thí dụ đường cao độ-diện tích) để suy diễn việc trữ nước theo thời gian (xem nhận định của Gao, 2015). Tính có sẵn rộng lớn của dữ kiện vệ tinh quả thật đã châm ngòi cho nghiên cứu theo dõi việc điều hành hồ chứa trong một vài lưu vực không được đo đạc trên khắp thế giới (Gao et al., 2012; Duan and Bastiaanssen, 2013; Bonnema et al., 2016; Busker et al., 2019), kể cả lưu vực sông Mekong. Thí dụ, Liu et al. (2016) dùng vệ

tinh đo chiều cao bằng radar và hình ảnh Landsat để ước tính mực nước của 2 hồ chứa nước trên Lancang (Xiaowan (Tiểu Loan) và Jinghong (Cảnh Hồng)) trong thời kỳ 2000-2015. Phân tích của họ bị hạn chế bởi hình ảnh Landast không có mây, vì thế loạt thời gian phát xuất từ cách nầy có độ phân giải không đồng nhất. Ngay sau đó, Bonnema and Hossain (2017,2019) ước tính thay đổi dự trữ nước cho một số vị trí của Mekong chú trọng chủ yếu đến các nhánh ở hạ lưu.

Quan trọng hơn, những cách và dữ kiện được nói ở trên đã bắt đầu đi vào các hệ thống hỗ trợ quyết định được sử dụng bởi các quốc gia hạ lưu Mekong. Thí dụ thứ nhất là Theo dõi Đập Mekong, một diễn đàn trên mạng để theo dõi đập gần tức thời được phát triển bởi Trung tâm Stimson và Eyes on Earth (https://www.stimson.org/project/mekong-dam-monitor/, last access: 20 January 2022). Đặc biệt, diễn đàn dùng hình ảnh Sentinel 1 và 2 được phóng trong tháng 4 năm 2014 và tháng 6 năm 2015, theo thứ tự, loạt thời gian có được tương đối ngắn và không bao gồm thời gian làm đầy của 2 hồ chứa nước lớn nhất trên Lancang, Nuozadu (Nọa Trát Độ) và Xiaowan (để có thêm chi tiết về sự khác biệt giữa phương pháp được dùng trong nghiên cứu nầy và phương pháp được dùng bởi Theo dõi Đập Mekong, xin tham khảo Text S1 trong Phụ đính). Một thí dụ khác là Dụng cụ Đánh giá Hồ chứa nước (Reservoir Assessment Tool (RAT)) (RAT, https://depts.washington.edu/saswe/rat_beta/, last access: 20 January 2022), một dụng cụ trên mạng để theo dõi gần tức thời và phân tích ảnh hưởng của các hồ chứa nước hiện hữu và dự trù (Biswas et al., 2021). RAT dùng hình ảnh vệ tinh Landsat 5 và 8 để theo dõi ~1.500 hồ chứa nước ở Nam Mỹ, Phi Châu và ĐNA, bao gồm 6 trong lưu vực sông Lancang.

Vậy mà những tiến bộ gần đây nầy, một sự hiểu biết sâu rộng của việc điều hành hồ chứa trong lưu vực sông Lancang cần được thông báo với các quốc gia ở hạ lưu và tìm các giải pháp hợp tác trên toàn lưu vực. Phức tạp thứ nhất là thiếu dữ kiện mực nước và trữ nước theo thời gian (cho mỗi hồ chứa nước trong lưu vực Lancang) với độ phân giải thời gian thích hợp và phạm vi – một cách lý tưởng, mỗi loạt thời gian có ít nhất một điểm dữ kiện cho mỗi tháng và bao trùm toàn thể đời sống của mỗi đập. Ở đây, một thách thức quan trọng là tính có sẵn của dữ kiện. Hình ảnh Landsat có sẵn cho bất cứ hồ chứa nước và kéo dài trên 3 thập niên nhưng bị mây ảnh hưởng (Busker et al., 2019; Biswas et al., 2021), vì thế đòi hỏi một tiến trình nâng cao hình ảnh (Gao et al., 2012; Zhang et al., 2014; Avisse et al., 2017). Ngược lại, các quan sát của vệ tinh cao độ ít bị chi phối bởi các xáo trộn bên ngoài. Tuy nhiên, chúng có độ bao phủ không gian thưa thớt (vệ tinh cao độ radar) – dữ kiện không có cho tất cả các hồ chứa nước vì độ bao phủ ở dưới đất hẹp và quỹ đạo – hay có thời gian trở lại dài (vệ tinh cao độ lasser). Loạt ICESat (vệ tinh cao độ laser), thí dụ, có thời gian trở lại là 91 ngày. Thứ nhì, chúng tôi cần khám phá chiến lược làm đầy của những đập nầy, đó là, tốc độ chúng được làm đầy. Khám phá những chiến lược nầy có thể giúp hiểu được những thay đổi trong quá khứ của tính có sẵn nước ở hạ lưu và chuẩn bị các kế hoạch đối phó với bất ngờ, vì Trung Hoa đang dự trù xây thêm 10 đập trên Lancang (MRC, 2020b). Thứ ba, tính có sẵn của dữ kiện trữ nước hàng tháng là một tiền đề cho bất cứ sự kiện phân tích về hạn hán và mưa. Nói cách khác, tin tức chi tiết về việc điều hành các đập Lancang có thể giúp chúng tôi giải thích

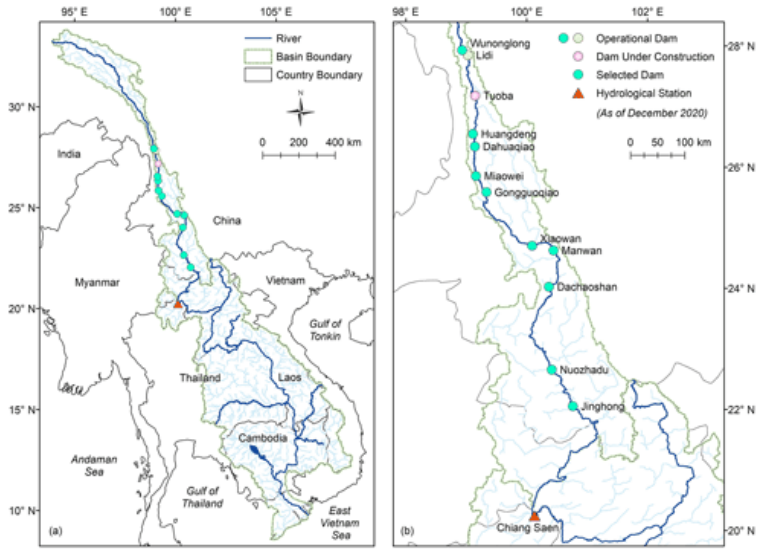
liệu hay làm thế nào chúng góp phần vào các sự kiện cực đoan gần đây (Keovilignavong et al., 2021).

Trong nghiên cứu nầy, chúng tôi đề cập đến 3 khoảng trống kiến thức được nói ở trên. Với mục đích nầy, chúng tôi dựa trên mô hình cao độ số có độ phân giải 30 m (DEM) từ Sứ mạng Shuttle Radar Địa hình (Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)), hình ảnh vệ tinh (Landsat 5,7, và 8), và dữ kiện mực nước cao độ (Jason and Sentinel) (Phần 2). Đặc biệt, chúng tôi dùng dữ kiện DEM để xác định các đường cao độ-trữ nước và diện tích-trữ nước và chế biến các hình ảnh của Landsat để tạo nên loạt thời gian hàng tháng của diện tích mặt nước cho mỗi hồ chứa nước. Trong phân tích nầy, chúng tôi cải thiện tiến trình được giới thiệu bởi Gao et al. (2012) – và được cải thiện bởi Zhang et al. (2014) – để chế biến hình ảnh có mây và cắt xén nó với dữ kiện Landsat. Đoạn, chúng tôi suy đoán loạt thời gian của trữ nước trong hồ chứa bằng cách kết hợp tin tức của diện tích mặt nước với đường diện tích-trữ nước (Phần 3). Với loạt thời gian trữ nước trong tay, chúng tôi khám phá chiến lược làm đầy, suy đoán các đường quy định, và liên quan đến những thay đổi thủy học ở hạ lưu với chiến lược quản lý hồ chứa (Phần 4). Xây dựng trên kiến thức nầy, chúng tôi xác định và thảo luận các cơ hội để cải thiện việc quản lý tài nguyên ở hạ lưu Mekong trong các tình huống hiện tại và tương lai (Phần 5 và 6).

2. VÙNG NGHIÊN CỨU VÀ DỮ KIỆN

2.1. Vùng nghiên cứu

Mekong là một sông xuyên biên giới chảy qua Tây nam Trung Hoa và Đông Nam Á (ĐNA) (Hình 1a). Sông bắt nguồn từ Cao nguyên Tây Tạng ở cao độ khoảng 5.200 m amsl và chảy theo hướng tây bắc-đông nam qua 6 quốc gia (Trung Hoa, Myanmar, Lào, Thái Lan, Cambodia và Việt Nam) trước khi đổ ra Biển Đông. Mekong có diện tích lưu vực rộng 795.000 km2 với một lưu lượng trung bình hàng năm khoảng 475 km3. Phần thượng lưu dài 2.410 km và thoát nước cho một diện tích 176.400 km2. Núi cao và các thung lũng thấp tạo thành lưu vực sông Lancang góp phần vào sự biến đổi lượng mưa theo không gian, với trung bình hàng năm thay đổi từ 750 đến 1.025 mm trên khắp lưu vực. Mưa cũng được phân phối không đồng đều trong năm, với 2 mùa rõ rệt: khô (tháng 12 đến tháng 5) và mưa (tháng 6 đến tháng 11). Dòng chảy phản ánh theo mùa tương tự (Yun et al., 2020). Mặc dù diện tích thoát nước của sông Lancang chiếm khoảng 22% diện tích toàn lưu vực, Lancang chỉ đóng góp khoảng 16% lưu lượng trung bình hàng năm của toàn thể sông Mekong (MRC, 2009).

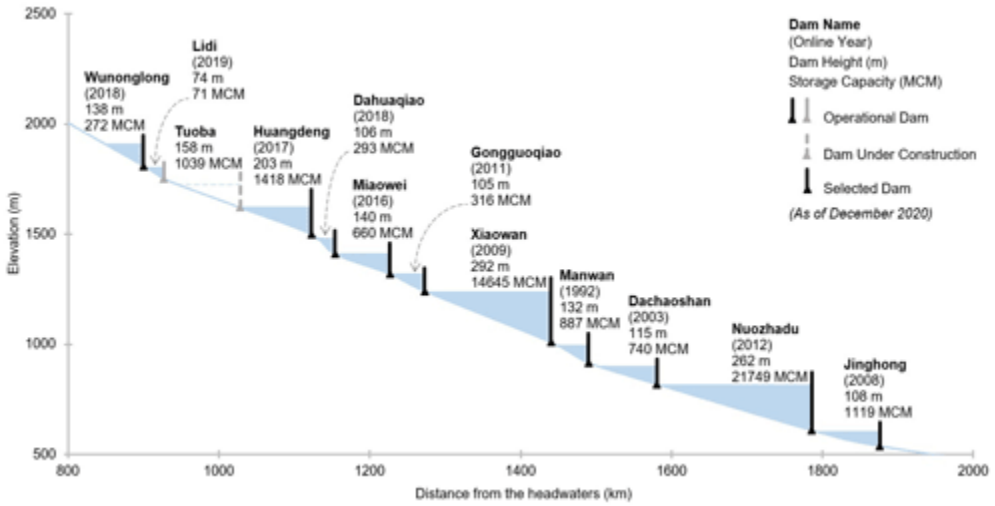


Hình 1. Lưu vực Mekong và Lancang (a và b, theo thứ tự). Trong 2 bản đồ, chúng tôi trình bày vị trí của các trạm thủy học cũng như các đập thủy điện trên dòng chánh Lancang. Tất cả các đập được điều hành tính đến tháng 12 năm 2020, với ngoại lệ là Tuoba, đang được xây cất. Các đập được phân tích trong nghiên cứu của chúng tôi được ghi bằng vòng tròn xanh lá cây.

Địa hình thuận lợi và có nhiều nước khiến lưu vực sông Lancang là nơi lý tưởng của kỹ nghệ thủy điện (Dang et al., 2020a). Đập đầu tiên trên dòng chánh Lancang (Manwan (Mạn Loan)) bắt đầu hoạt động trong năm 1992, theo sau bởi Dachaoshan (Đại Chiếu Sơn) trong năm 2003 và Jinghong (Cảnh Hồng) trong năm 2008. Hai đập lớn nhất (Xiaowan (Tiểu Loan) và Nuozhadu (Nọa Trát Độ)) bắt đầu hoạt động trong năm 2009 và 2013, theo thứ tự. Và kể tử năm 2016, it nhất 1 đập tham gia vào hệ thống hồ chứa Lancang mỗi năm. Nói chung, việc biến chuyển nhanh chóng nầy của lưu vực tạo thành một hệ thống gồm có 11 đập đang hoạt động và 1 đập được dự trù (Hình 1b).

Thiết kế của chuỗi hồ chứa nước phản ánh các đặc tính địa hình của lưu vực. Đặc biệt, sự hiện diện của các thung lũng hẹp với các thành dốc cần phải xây các đập cao (xem Hình 2 và danh sách các tiêu chuẩn thiết kế trong Phụ đính, Bảng S1). Lần lượt, điều nầy tạo nên các hồ chứa nước có khả năng trữ nước lớn so với lưu lương chảy vào, các bờ dốc, và dài và hẹp chiều ngang. Khả năng trữ nước tổng cộng là 42.170 triệu m3, khoảng 55% lưu lượng trung bình hàng năm ở trạm thủy học Chiang Saen, trạm thủy học ở hạ lưu đầu tiên với dữ kiện được công bố (Hình 1). Những hồ chứa nầy tạo nên một chuỗi dài và phức tạp, vì thế bằng

cách nghiên cứu toàn bộ chúng tôi có thể hiểu làm thế nào cách trữ nước được tiến hóa trong thập niên qua.



Hình 2. Chuỗi hồ chứa nước trên sông Lancang. Chi tiết thêm về các tiêu chuẩn thiết kế được trình bày trong Bảng S1.

2.2 Dữ kiện

Trong nghiên cứu nầy, chúng tôi chú trọng đến 10 hồ chứa nước lớn nhất đang hoạt động (với một khối lượng lớn hơn 100 triệu m3), tất cả nằm trên dòng chánh của sông Lancang. Chúng tôi chọn 2008-2020 là thời kỳ nghiên cứu vì nó bao gồm năm hoạt động của hầu hết đập (8 trong 10), một chọn lựa cho phép chúng tôi nghiên cứu việc điều hành của chúng trong thời gian làm đầy cũng như trong điều kiện họa động bình thường. Nới rộng phạm vi thời gian để bao gồm năm hoạt động của 2 đập còn lại (Manwan và Dachaoshan, bắt đầu hoạt động trong năm 1992 và 2003) sẽ làm phức tạp việc phân tích không cần thiết, vì khả năng trữ nước của chúng chỉ có 2,14% của hệ thống hiện nay. Cho thời ký

nghiên cứu được nói ở trên, chúng tôi thu thập dữ kiện trên mô hình cao độ số (DEM), hình ảnh vệ tinh và mực nước dựa trên cao độ radar.

2.2.1. Mô hình cao độ số

Các mô hình cao độ số chứa tin tức về cao độ địa thế cần thiết để đại diện chiều sâu của hồ chứa, vì thế chúng thường được dùng để thiết lập mối liên hệ giữa mực nước và diện tích mặt nước (Bonnema et al., 2016; Zhang and Gao, 2020). Trong nghiên cứu nầy, chúng tôi dùng DEM có độ phân giải 30 m của SRTM. Mô hình SRTM-DEM cung cấp cao độ địa thế bên trên mặt nước vào thời gian quan sát của sứ mạng SRTM (tháng 2 năm 2000) trong dạng chuỗi số chẳng. Mô hình SRTM-DEM là chọn lựa tốt nhất để đại diện chiều sâu của hồ chứa trên sông Lancang vì nó có độ phân giải cao, thời gian thu thập (9 trong 10 hồ chứa được chọn được xây dựng sau tháng 2 năm 2000), và có thể được tiếp cận tự do. Chúng tôi ghi nhận rằng viêc xây cất hồ chứa nước có thể thay đổi một ít chiều sâu, nhưng những thay đổi nầy không đáng kể trong vùng nghiên cứu của chúng tôi. Điều đó vì 2 lý do. Trước hết, các hồ chứa nước của Lancang hẹp và dài. Chiều dài của chúng thay đổi từ 25 km (Dachaoshan) đến khoảng 198 km (xem Hình 2). Vì những đặc tính nầy, các vị trí xây đập (thường được làm gần vị trí đập) chỉ ảnh hưởng một phần rất nhỏ chiều sâu của hồ chứa. Thứ hai, các hồ chứa nước Lancang có dung tích chết rất lớn, từ khoảng 32% (Xiaowan) đến 87% (Wunonglong). Do đó, chiều sâu của hồ chứa trong tầm thay đổi của các hồ chứa không ảnh hưởng việc xây đập.

2.2.2. Ảnh vệ tinh

Chúng tôi dùng hình ảnh của Landsat 5, 7 và 8 để ước tính diện tích mặt nước của các hồ chứa Lancang. Đó là do 4 lý do. Thứ nhất, hình ảnh Landsat đã được thu thập một thời gian dài, vì thế nó bao trùm thời kỳ nghiên cứu của chúng tôi. Thú hai, các hình ảnh Landsat có độ phân giải cao (30 m), thích hợp để khám phá những thay đổi trong diện tích mặt nước của hồ chứa với hình dạng hẹp và dài, như các hồ chứa trong vùng nghiên cứu của chúng tôi. Thí dụ, chiều ngang (cao nhất) của các hồ chứa Xiaowan và Nuozhadu, 2 hồ chứa nước lớn nhất trên sông Lancang, chỉ có ~1.500 và ~1.000 m. Thứ ba, tần suất của hình ảnh Landsat (16 ngày) đủ để đánh giá sự thay đổi của diện tích mặt nước của hồ chứa với thời khoảng 1 tháng – một độ phân giải thời gian hợp lý cho các hồ chứa có dung tích khổng lồ (xem Hình S1). Hơn nữa, chúng tôi có thể gấp đôi số hình ảnh cho mỗi tháng vì thời gian hoạt động của Landsat 7 (1999-ngày nay) trùng hợp với thời gian hoạt động của Landsat 5 (1984-2013) và Landsat 8 (2013-ngày nay). Thứ tư, hình ảnh Landsat được sử dụng thành công trong các nghiên cứu khác để ước tính diện tích mặt nước của hồ chứa nước (thí dụ, Duan and Bastiaanssen, 2013; Avisse et al., 2017; Bonnema and Hossain, 2017). Các hình ảnh được dùng trong nghiên cứu nầy được lưu trữ ở Landsat Collection-1 Level-2 (Surface Reflectance) của United States Geological Survey (USGS) (Cơ quan Khảo sát Địa chất Hoa Kỳ). Cũng cần lưu ý ở đây là (công khai) hình ảnh cung cấp bởi các sứ mạng khác, chẳng hạn như MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) và Sentinel, có thể không thích hợp cho nghiên cứu nầy. Hình ành MODIS có tần suất cao (2 lần một ngày) nhưng có độ phân giải không gian thấp hơn (250 m), khiến nó không thích hợp để ước tính diện tích mặt nước của các hồ chứa nước nhỏ và trung bình hay lớn, nhưng hẹp (chiều ngang của tất cả hồ chứa, ngoại trừ

2 hồ lớn nhất, thay đổi từ 300 đến 600 m). Trong khi đó, Sentinel đã hoạt động từ 2015, vì thế chiều dài không đủ cho các phân tích của chúng tôi. Chi tiết thêm liên quan đến việc so sánh giữa hình ảnh của Landsat, MODIS và Sentinel được trình bày trong Bảng S2.

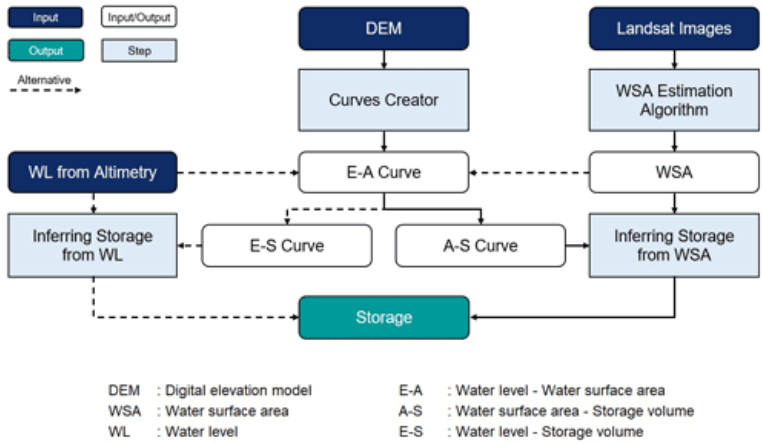
2.2.3. Dữ kiện mực nước bằng radar cao độ

Vệ tinh đo cao độ bằng radar đã được dùng từ nhiều thập niên để theo dõi đại dương và các hồ chứa nước lớn (Schwatke et al., 2015) – xem Bảng S3 để có thêm chi tiết về vệ tinh cao độ. Vì dữ kiện vệ tinh cao độ của mỗi vệ tinh không có cho tất cả các hồ chứa nước, chúng tôi dùng tất cả nguồn dữ kiện cao độ radar có sẵn được chế biến thành loạt mực nước theo thời gian trước đây – và được công bố bởi Global Reservoirs and Lakes Monitor (G-REALM) (Theo dõi Hồ chứa nước và Hồ Toàn cầu) (Birkett et al., 2010). Đặc biệt, chúng tôi dùng Jason-2 (2008-2018) cho Nuozhadu, Xiaowan, và Huangdeng (Hoàng Đăng), Jason-3 (2016-2020) cho Xiaowan và Huangdeng, Sentinel-3A (2016-2018) cho Nuozhadu, và Sentinel-3B (2019-2020) cho Jinghong. Như sẽ thấy, thiếu dữ kiện mực nước cao độ radar cho các hồ chứa nước còn lại không ảnh hưởng đến kết luân của nghiên cứu, vì chúng tôi chỉ dùng chúng cho mục đích kiểm chứng kết quả thu thập qua hình ảnh vệ tinh.

3. PHƯƠNG PHÁP

Phương pháp của chúng tôi chủ yếu nhằm để ước tính (và kiểm chứng) loạt trữ nước theo thời gian của mỗi hồ chứa nước. Với mục đích nầy, chúng tôi theo 3 bước chánh, được trình bày trong Hình 3. Chúng tôi bắt đầu bằng cách chế biến tin tức trong DEM để ước tính mối liên hệ giữa mực nước (WL) và diện tích mặt

nước (WSA) cho mỗi hồ chứa nước. Với liện hệ nầy, cũng được gọi là đường cao độ-diện tích (E-A), chúng tôi tính đường cao độ-dung tích (liên hệ giữa WL và dung tích) và đường diện tích-dung tích (A-S) (liên hê giữa WSA và dung tích). Đoạn, chúng tôi ước tính WSA của từng hồ chứa nước từ hình ảnh Landsat có sẵn cho thời kỳ nghiên cứu của chúng tôi. Để thực hiện bước nầy, chúng tôi dựa vào một biến thể mới lạ của trình tự ước tính WSA được phát triển bởi Gao et al. (2012) và được điều chỉnh bởi Zhang et al. (2014). Sau cùng, chúng tôi dùng đường A-S và loạt thời gian WSA để suy đoán làm thế nào dung tích của mỗi hồ chứa thay đổi trong thời kỳ nghiên cứu. Chúng tôi kiểm chứng phương pháp của chúng tôi trên 2 hồ chứa nước nằm ngoài lưu vực Lancang. Hồ chứa nước Bhumibol trong lưu vực sông Chao Phraya và hồ chứa nước Ubol Ratana ở hạ lưu vực Mekong, mà dữ kiện mực nước và dung tích được công bố (xem Hình S2 và S3). Giải thích chi tiết của những bước nầy được trình bày trong Phần 3.1 và 3.2. Trong Phần 3.3 và 3.4, chúng tôi mô tả các phương pháp toán học được dùng để ước tính các chiến lược làm đầy hồ chứa và phân tích ảnh hưởng của việc điều hành hồ chứa đối với lưu lượng ở hạ lưu.



Hình 3. Lưu đồ đại diện phương pháp của chúng tôi. Hai bước then chốt là tính các đường E-A, E-S và A-S (từ DEM) và ước tính WSA (từ hình ảnh Landsat). Với tin tức nầy trong tay, chúng tôi ước tính dung tích theo thời gian cho từng hồ chứa nước. Dữ kiện mực nước bằng radar được kết hợp với đường E-S để tái ước tính dung tích theo thời gian bằng dữ kiện độc lập, vì thế kiểm chứng ước tính dựa trên hình ảnh Landsat.

3.1. Ước tính đường E-A, A-S và E-S

Nhắc lại rằng 9, trong 10 hồ chứa nước, SRTM-DEM có thể cung cấp tin tức đầy đủ về chiều sâu (Phần 2.2). Để ước tính đường E-A của các hồ chứa nước nầy, trước hết chúng tôi cô lập dữ kiện DEM với đường đồng cao độ tương ứng với mực nước tối đa và đỉnh đập. Mục đích của bước nầy là để tính đường E-A bên trong phạm vi của hồ chứa và tránh sai số vì bao gồm các vùng ở chung quah. Đoạn, chúng tôi tính diện tích mặt tương ứng với mỗi 1 m cao độ của DEM. Đặc biệt, với mỗi trị số cao độ (mỗi m) từ cao độ thấp nhất bên trong phạm vi của hồ chứa nước đến mực nước tối đa, chúng tôi đếm số pixels có trị số bằng hay nhỏ hơn trị số cao độ đó. Đó là vì, khi nước đạt đến cao độ đó, diện tích tương ứng với những pixels đó bị ngập. Đoạn, chúng tôi nhân số pixels với kích thước của pixel (30 m x 30 m) để có diện tích mặt nước. Sau cùng chúng tôi làm ăn khớp với đa thức 5 độ (fifth-degree polynomial) (độ được xác định bởi thử) các điểm dữ kiện đạt được. Đối với hồ chứa nước còn lại, Manwan, chúng tôi áp dụng một thủ tục tương tự nhưng chỉ cho phần nằm trên mực nước được ghi nhận bởi SRTM. Để phỏng đoán đường E-A nằm dưới mực nước, chúng tôi làm ăn khớp đa

thức 5 độ với phần nằm trên mặt nước và rồi nới rộng xuống dưới mặt nước, như trong Bonnema et al. (2016) và Bonnema and Hossain (2017).

Với đường E-A trong tay, chúng tôi tính dung tích trữ nước tương ứng với mỗi m cao độ của DEM. Nó được thực hiện bằng cách dùng ước tính hình thang sau đây (Gao et al., 2012; Bonnema and Hossain, 2019; Li et al., 2019; Tortini et al., 2020):

$$V_i = \sum_{j=I+1}^{i} (A_j + A_{j-1})(E_j - E_{j-1})/2,$$

trong đó V là dung tích trữ nước tương ứng với mực nước E, và diện tích mặt nước A, và I là cao độ thấp nhất của chiều sâu hồ chứa (đó là A=0). Ước tính hình thang được dùng ở đây thay vì tính toán trực tiếp từ DEM vì nó không được áp dụng cho Manwan – mặc dù nó được ưa chuộng để tối thiểu hóa sự khác biệt trong việc chế biến dữ kiện cho tất cả các hồ chứa nước. Ngoài ra, với các đường E-A đươc kiểm chứng bởi các quan sát mực nước (từ dữ kiện radar) và diện thích mặt nước (từ hình ảnh Landsat), chúng tôi có thể phát triển đáng tin cậy các đường E-S và A-S từ các đường E-A bằng cách dùng ước tính hình thang (nhắc lại, chúng tôi không có dữ kiện dung tích được quan sát để kiểm chứng đường E-S và A-S ước tính trực tiếp từ DEM). Để tăng cường lý lẽ để dùng ước tính hình thang, chúng tôi so sánh kết quả đạt được với 2 phương pháp. Những khác biệt trong dung tích tương ứng với mỗi mực nước trong tầm biến đổi không quá 1% (cho Jinghong, Miaowei, Huandeng, và Wunonglong) và 2% (cho Nuozhadu, Dachaoshan, Xiaowan, Gongguoqiao, và Dahuaqiao). Chi tiết so sánh cho hồ chứa nước Nuozhadu và Xiaowan có thể thấy trong Bảng S4 và Hình S4. Cuối cùng, chúng tôi dùng các điểm dữ kiện của dung tích trữ nước để làm ăn khớp

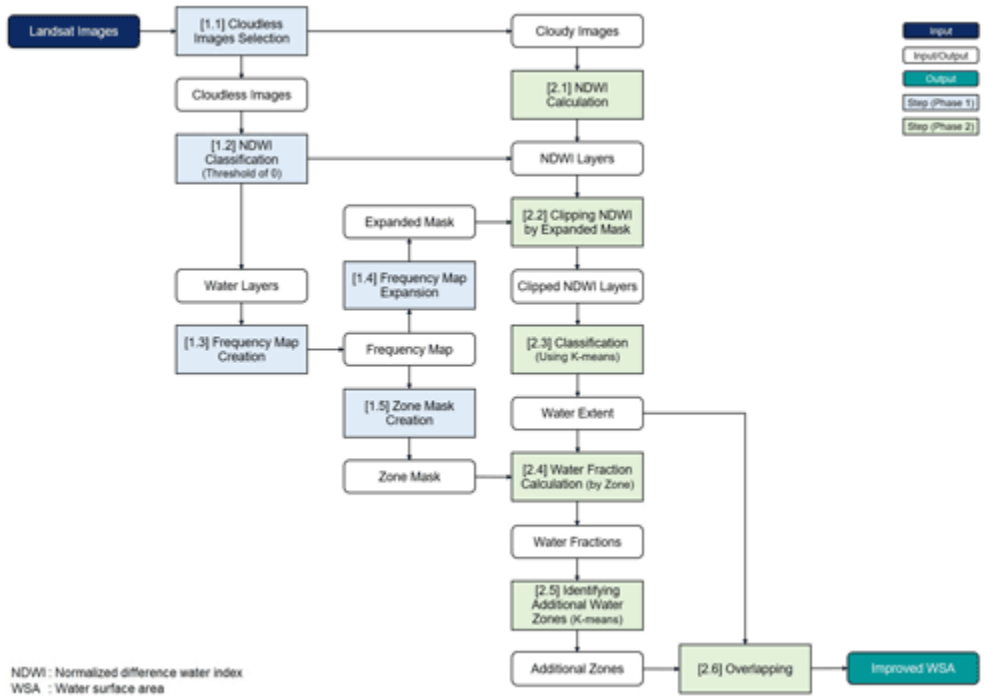
đườngA-S và E-S. Tất cả tính toán kể trên được thực hiện trong Python 3.7 với sự trợ giúp của thư viện OSGeo.

3.2. Phỏng đoán diện tích mặt nước

Dữ kiện mặt nước có thể được phỏng đoán từ hình ảnh Landsat bằng cách xếp hạng mỗi pixel với một băng quang phổ duy nhất (thí dụ, băng cận hồng ngoại) hay một chỉ số quang phổ được tính từ nhiều băng (xem Bảng S5 để có danh sách của những chỉ số thông dụng nhất). Nói chung, việc sử dụng băng quang phổ duy nhất làm giảm việc tính toán đòi hỏi (Li et al., 2019), nhưng các chỉ số quang phổ có khuynh hướng cung cấp kết quả vững chắc hơn (Liu et al., 2016). Bất kể phương pháp được dùng, một thách thức then chốt của hình ành Landsat là sự hiện diện của mây, bóng mây, và các pixels không có dữ kiện (cho Landsat 7), có thể đưa đến xếp hạng sai các pixels nước và ước tính thấp diện tích mặt nước. Để đối phó với vấn đề nầy, chúng tôi dùng biến thể mới lạ của trình tự ước tính WSA được giới thiệu bởi Gao et al. (2012) và Zhang et al. (2014), được xem lúc ban đầu để lấy diện tích mặt nước từ lớp chỉ số sự khác biệt cây cối được bình thường hóa (NDV) – được bao gồm trong các chỉ số cây cối MODIS toàn cầu (MOD13Q1), một sản phẩm MODIS Level-3 do NASA cung cấp.

Giống như phiên bản được điều chỉnh bởi Zhang et al. (2014), tiến trình của chúng tôi gồm có 2 giai đoạn chánh: tạo mặt nạ và cải thiện xếp hạng nước, được trình bày trong Hình 4 với các hộp màu xanh và xanh lá cây nhạt. Trong giai đoạn đầu, các hình ảnh không có mây được chế biến cùng với việc tạo thành 2 sản phẩm: mặt nạ nới rộng và mặt nạ vùng. Hai mặt nạ được dùng trong giai đoạn 2, nơi các hình ảnh Landsat được chế biến từng cái để có diện tích mặt

nước tương ứng với thời gian thu thập của mỗi ảnh. Các điều chỉnh quan trọng đối với phiên bản của Zhang et al. (2014) là sự lựa chọn các hình ảnh không có mây (Bước 1.1) và xác định các vùng nước thêm (Bước 2.5), 2 đều chỉnh cần thiết để bảo đảm rằng tiến trình tiến hành tốt với hình ảnh Landsat (thay vì lớp NDVI của MOD13Q1). Chi tiết thêm cho mỗi giai đoạn và bước được trình bày dưới đây.



Hình 4. Tiến trình ước tính WSA. Giai đoạn đầu nhằm tạo nên một mặt nạ nới rộng và mặt nạ vùng, trong khi giai đoạn thứ hai chú trọng đến chế biến mỗi hình ảnh để có diện tích mặt nước.

(1.1) Chọn các hình ảnh không có mây. Hình ảnh không có mây là những hình ảnh không có chứa mây hay ít mây trên mặt hồ chứa nước. Đối với áp dụng của chúng tôi, chúng tôi định nghĩa hình ảnh không có mây là một hình ảnh có ít hơn

20% mây bao phủ trên phạm vi tối đa của mặt hồ. Để xác định những hình ảnh nầy, chúng tôi dùng băng BQA (băng đánh giá có phẩm chất), chứa tin tức về pixels mây. Như được thấy, làm việc trên một bộ hình ảnh Landsat không có mây rất cần để bảo tồn phẩm chất của bản đồ tần suất và mặt nạ được tạo ra trong các bước sau. Ghi chú rằng phiên bản của Zhang et al. (2014) không bao gồm bước nầy vì ảnh hưởng của mây một phần được loại bỏ từ lớp NDVI trong MOD13Q1 (Didan and Munoz, 2019). Đây là kết quả của việc chọn các trị số pixel tốt nhất (mây thấp và trị số NDVI cao nhất) từ tất cả thu thập hàng ngày trong thời gian 16 ngày.

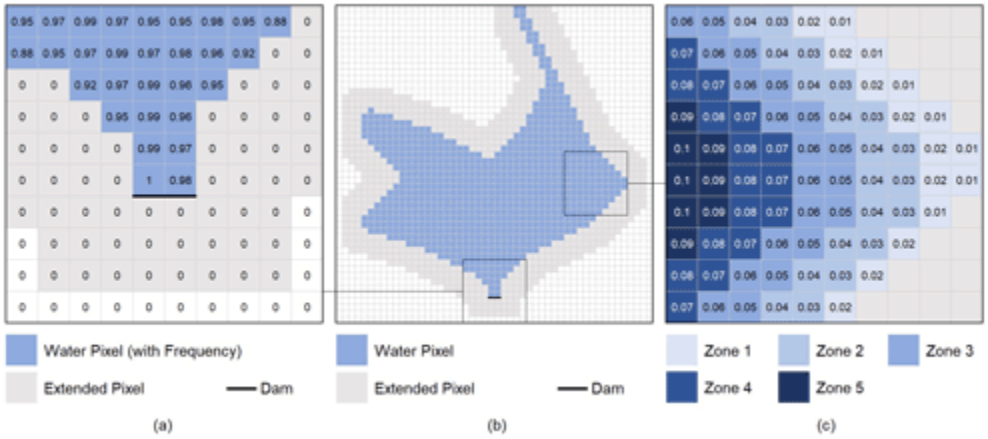
(1.2) Xếp loại dựa trên NDVI. Để xếp loại các pixels nước và không phải nước, chúng tôi dùng chỉ số nước khác biệt bình thường hóa (normalized difference water index (NDWI)) với trị số ngưỡng là 0. Sự chọn lưa chỉ số và ngưỡng tương ứng dựa trên một phân tích sơ khởi, trong đó chúng tôi so sánh thành tích của NDWI, NDVI, và MNDWI (modified normalized difference water index (chỉ số nước khác biệt bình thường hóa được điều chỉnh)) cho tất cả 10 hồ chứa nước. Kết quả, được trình bày trong các Hình S5-S9 cho 60 hình ảnh Landsat không có mây cho mỗi hồ chứa nước, cho thấy rằng việc xếp loại dựa trên NDWI phù hợp với phạm vi nước tối đa được trình bày trong bộ dữ kiện Phạm vi Nước Tối đa, được phát triển bởi Trung tâm Nghiên cứu Hỗn hợp của Ủy hội Châu Âu (Pekel et al., 2016). Mặt khác, NDVI và MNDWI có khuynh hướng cung cấp kết quả ít tin cậy hơn. Đối với trị số ngưỡng, 0,05 và 0,1 (cho NDWI) có khuynh hướng ước tính thấp các pixels nước, vì tổng số lần một pixel nước được xếp loại đúng là nước thí ít hơn 60. Chúng tôi cũng kiểm soát bằng tay các lớp nước đạt được với hình ảnh

màu thật sự Landsat cho số hình trước khi quyết định dùng NDWI. Các lớp NDWI được tính toán cách nầy sau đó được dùng trong Bước 2.2.

(1.3) Tạo ra bản đồ tần suất. Để tạo ra bản đồ tần suất, trước hết chúng tôi tính bách phân của số lần trong đó một pixel được xếp loại là nước (dựa trên trị số NDWI của nó) trong tất cả hình không có mây được chọn. Việc nầy được thực hiện cho tất cả pixels bên trong khung giới hạn của phạm vi hồ chứa nước. Đoạn, chúng tôi tạo ra bản đồ tấn suất bằng cách chọn các pixels với tần suất lớn hơn 0. Bước nầy được trình bày trong Hình 5a,b.

(1.4) Nới rộng bản đồ tần suất. Chúng tôi nới rộng bản đồ tần suất bằng cách đệm nó với 3 pixels; nói cách khác, chúng tôi thêm 3 pixels chung quanh các pixels nước (xem Hình 5a,b). Việc nới rộng nhằm mục đích bảo đảm rằng không có pixels nước nào bị bỏ qua. Vùng đệm 90 m chung quanh bờ chỉ có tên có vẻ đủ cho trường hợp nghiên cứu của chúng tôi, vì các hồ chứa nước trong Lancang nằm trong địa thế dốc, nơi việc trữ nước được kiểm soát bởi cao độ hơn là diện tích. Bản đố tần suất nới rộng được dùng trong Step 2.2 để cắt lớp NDWI; từ đây, chúng tôi gọi nó là mặt nạ nới rộng.

(1.5) Tạo ra mặt nạ vùng. Trong bước cuối cùng của giai đoạn 1, chúng tôi biến bản đồ tần suất thành mặt nạ 50-vùng. Như được trình bày trong Hình 5c, zone ith chứa các pixels được xếp loại là nước với tần suất lớn hơn % và thấp hơn hay bằng 2.i% (với). Thí dụ, Vùng 1 chứa các pixels được xếp loại là nước từ 0% đến 2% thời gian, trong khi Vùng 2 chứa những pixels được xếp loại là nước từ 2% đến 4% thời gian. Vào cuối giai đoạn nầy, chúng tôi có được 2 nhập kiện cho giai đoạn kế tiếp, đó là, mặt nạ nới rộng và mặt nạ vùng.

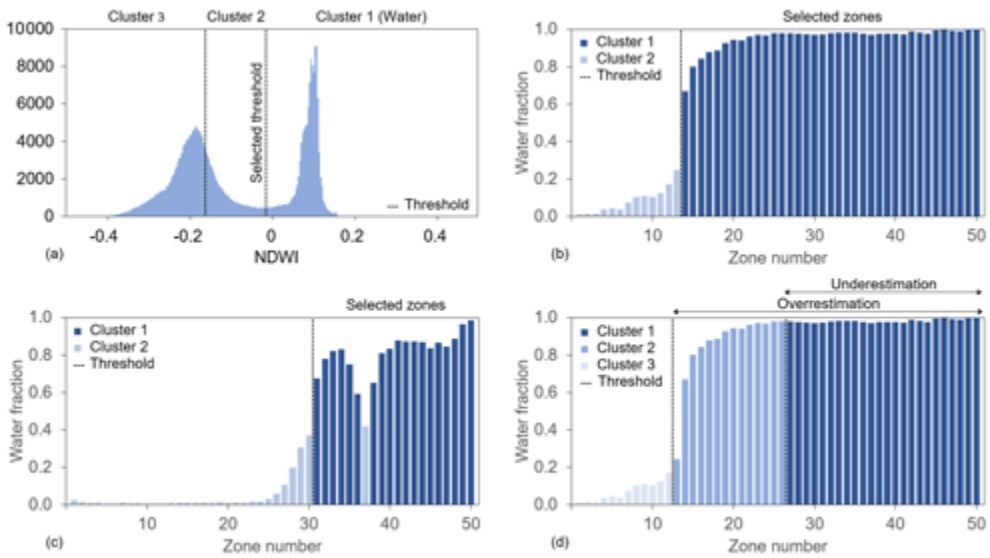


Hình 5. Thí dụ của bản đồ tần suất (a,b), mặt nạ nới rộng (a,b) và mặt nạ vùng (c).

(2.1) Tính toán NDWI. Ở đây, chúng tôi tính toán chỉ số NDWI cho các hình ảnh Landsat còn lại – với mây, bóng mây, và không có pixels – và đưa chúng qua bước kế tiếp trong dạng của một lớp raster (hình 2 chiều) cho mỗi hình ảnh. Lưu ý rằng mục tiêu của giai đoạn 2 là cải thiện việc xếp hạng mặt nước của các hình ảnh, và để tối đa hóa số điểm dữ kiện có sẵn trong thời gian nghiên cứu của chúng tôi, nhất là mùa gió mùa khi quan sát của Landsat bị ảnh hưởng nặng nề bởi mây. Nếu không cải thiện hình ảnh có mây có thể làm cho ước tính diện tích mặt nước không chính xác.

(2.2) Cắt lớp NDWI bằng mặt nạ nới rộng. Lớp raster NDWI có được trong Bước 1.2 và 2.1 được cắt bởi mặt nạ nới rộng được tạo ra trong Bước 1.4.

(2.3) Xếp hạng các pixels nước dựa trên k-trung bình. Vì sự hiện diện của mây, và các xáo trộn khác, việc sử dụng cùng một ngưỡng NDWI (bằng 0) trong tất cả hình ảnh Landsat có thể ước tính cao hơn hay thấp hơn sai số của diện tích mặt nước. Để tìm ngưỡng cho mỗi hình ảnh Landsat, chúng tôi nhờ k-trung bình. Đặc biệt, chúng tôi đặt k bằng 3 (một trị số được tìm thấy bằng thử và sai số) và áp dụng k-trung bình cho tất cả pixels trong lớp NDWI (Hình 6a). Các pixels nước có khuynh hướng rơi vào chùm với trị số NDWI cao nhất vì NDWI của các pixels nước có trị số cao hơn các pixels không phải nước. Kết quả được kiểm chứng bằng tay lớp nước được xếp loại với hình ảnh Landast màu thật sự.



Hình 6. Biểu diễn của việc xếp loại k-trung bình được dùng trong Bước 2.3 và 2.5. Phần (a) cho thấy việc xếp loại các pixels nước dựa trên trị số NDWI (Bước 2.3), trong khi phần (b,c) cho thấy việc xác định các vùng nước thêm dựa trên 2 nhóm (Bước 2.5). Phần (c) cho thấy các vấn đề nổi lên khi dùng 3 nhóm trong Bước 2.5.

(2.4) Tính toán phần nước (theo vùng). Mặt nạ vùng được tạo ra trong Bước 1.5 được dùng ở đây để chia lớp phạm vi nước (có được trong bước trước) thành 50 vùng. Đối với vùng ith, chúng tôi định nghĩa phần nước p như sau:

$$p_i = n_i/N_i,\ i = 1,2,\ldots,50,$$

trong đó pi đại diện cho tỉ số giữa số ni của pixels được xếp loại là nước trong zone i (với chùm k-trung bình dựa trên NDWI) và tổng số N của các pixels trong vùng i (rút ra từ mặt nạ vùng). Tin tức được cung cấp bởi phần nước của mỗi vùng được dùng trong bước kế tiếp để cải thiện việc xếp loại các pixel nước.

(2.5) Xác định các vùng nước thêm. Chúng tôi cải thiện việc xếp loại các pixels nước bằng cách xác định thêm các vùng nước dựa trên phần nước của chúng. Để làm thế, chúng tôi nhờ vào một lần nữa tiến trình kết chùm k-trung bình. Hơn nữa, vì sự liên tục của phạm vi nước (nước nới rộng từ vùng có tần suất cao đến vùng có tần suất thấp), chúng tôi cũng cứu xét số vùng (hay trị số tấn suất). Đoạn, chúng tôi hình thành một vấn đề kết chùm trong không gian 2 chiều của phần nước và số vùng. Chúng tôi giải vấn đề kết chùm với trị số k bằng 2, được tìm bởi thử và sai số. Hình 6b và c cho thấy 2 thí dụ với k=2, trong khi Hình 6c cho thấy một thí dụ với trị số không thích hợp của k. Vùng thấp nhất trong nhóm cao hơn (vùng 14 trong Hình 6b và vùng 31 trong Hình 6c) là ngưỡng trên vùng đó đến pixels nước và, ở mỗi thời gian quan sát, chúng rơi vào một trong 2 tình huống: (1) chúng là các pixels không phải nước, hay (2) chúng là các pixels nước (ngay cả khi phần nước của vùng đó dưới 100%, vì mây bao phủ). Dĩ nhiên, có thể có một sai số nhỏ từ vùng ngưỡng. Thí dụ, Vùng 14 trong Hình 6b chứa các

pixels với 26%-28% xác suất ngập úng, nhưng thỉnh thoảng, ngưỡng của xác suất ngập úng không chính xác 26% (thí dụ, 26,5%, 27%...). Lưu ý rằng chúng tôi có thể tăng thành tích bằng cách chia bản đồ tần suất thành một số vùng lớn hơn, nhưng nó đòi hỏi một số hình ảnh không có mây lớn hơn. Bước nầy đại diện cho viêc điều chỉnh thứ nhì của tiến trình ước tính WSA ban đầu, dùng một thông số có phẩm chất không thích hợp cho các hình ảnh Landsat – vì ảnh hưởng của mây không được giảm nhẹ, không giống như lớp NDVI trong MOD13Q1.

(2.6) Chồng chéo. Sau cùng, lớp pixels nước thêm được chồng lên lớp phạm vi nước có được từ Bước 2.3. Xuất kiện cuối cùng là việc xếp loại nước được cải thiện cho mỗi hình ảnh được tiêu biểu bởi mây bao phủ hay các xáo trộn khác. Tất cả các công việc được nói ở trên được thực hiện trong Python 3.7 với sự trợ giúp của các thư viện OSGeo và SKLearn.

3.3. Phỏng đoán các chiến lược làm đầy hồ chứa nước

Xác định chiến lược làm đầy một hồ chứa nước có nghĩa là xác định vận tốc mà hồ chứa nước được làm đầy và, do đó, một phần của lưu lượng chảy vào được giữ lại trên căn bản hàng tháng, trong trường hợp của chúng tôi. Vấn đề được bình thường hóa bởi phương trinh cân bằng khối lượng như sau:

$$S_t = S_{t-1} + \theta \cdot Q_t - E_t,$$

trong đó St là dung tích của hồ chứa vào thời điểm t, Qt là dung tích chảy vào trong thời khoảng, Et là bốc hơi trong thời khoảng, và θ là thông số thay đổi giữa 0 và 1 và đại diện tỉ lệ của khối lượng chảy vào được giữ bởi hồ chứa. Trong

trường hợp của chúng tôi, mục tiêu là để xác định trị số của θ (trong mỗi tháng) cho Nuozhadu và Xiaowan trong thời kỳ 2012-2013 và 2009-2010, theo thứ tự.

Dữ kiện lưu lượng chảy vào được quan sát không có sẵn, vì thế chúng tôi nhờ vào các trị số được mô phỏng. Đặc biệt, chúng tôi dùng dữ kiện lưu lượng chảy vào hang ngày được mô phỏng bởi mô hình VIC-RES (Dang et al., 2002a,b), một biến thể của mô hình khả năng thẩm thấu thay đổi (variable infiltration capavity (VIC)) – một mô hình thủy học bán phân phối đại qui mô được phát triển đầu tiên bởi Liang et al. (2014). Tương tự như VIC, VIC-Res chứa một phần mưa-chảy tràn và một phần di chuyển. Trong phần đầu, vùng nghiên cứu được tổ chức như những ô tính toán với kích thước của ô có thể được chọn (0,0625 trong trường hợp của chúng tôi), trong đó các tiến trình thủy học then chốt (bốc thoát, thẩm thấu, dòng chảy căn bản, và chảy tràn) được tính toán như một hàm số của những lực thủy khí tượng (mưa, nhiệt độ, vận tốc gió, v.v.) và các thông số đất. Đoạn, mô hình di chuyển chuyển dòng chảy căn bản và nước chảy tràn được mô phỏng qu hệ thống sông bằng phương trình thẳng Saint-Venant (Lohmann et al., 1996,1998). Trong VIC-Res, tiến trình di chuyển gồm có một đại diện chi tiết của việc điều hành hồ chứa nước: cho mỗi hồ chứa nước ở nơi nghiên cứu, mô hình tính toán cân bằng khối lượng và xả nước, với việc xả nước được xác định bởi quy tắc điều hành hay thời gian xả nước được định trước. VIC-Res được thử nghiệm ở vài nơi, gồm có lưu vực sông Lancang (trong thời kỳ 1996-2005). Đặc biệt, Dang et al. (2020a) báo cáo kết quả của việc điều chỉnh mô hình với lưu lượng quan sát ở trạm Chiang Saen và kiểm chứng mô hình với lưu lượng quan sát được ở trạm Jiuzho, nằm ngay trên thượng lưu của hồ chứa nước Xiaowan.

Ở đây, chúng tôi dùng mô hình VIC-Res tương tự, được kiểm soát bởi dữ kiện mưa và nhệt độ (tối đa và tối thiểu) được lấy từ bộ dữ kiện CHIRPS-2.0 và ERA5. Dữ kiện sử dụng đất và bao phủ đất được lấy từ bộ dữ kiện Đặc tính Bao phủ Đất Toàn cầu, trong khi dữ kiện đất được rút ra từ Kho Dữ kiện Đất Thế giới Được Hòa hợp (Harmonized World Soil Database). Chỉ số diện tích lá hàng tháng và độ phản chiếu ánh sáng (albedo) được lấy từ hình ảnh vệ tinh Terra MODIS, cung cấp sự thay đổi trong độ bao phủ tuyết và tàng cây theo thời gian. Bản đồ chiều chảy được dùng bởi VIC-Res được dựa trên SRTM-DEM. Vì Dang et al. (2020a) cứu xét các đập được xây trước 2005 và dùng các đường quy định được đề nghị bởi Piman et al. (2013), chúng tôi áp dụng nhẹ mô hình để đối phó với 2 thách thức của nghiên cứu của chúng tôi: (1) cứu xét thêm hồ chứa nước (tất cả đập trên dòng chánh được xây đến 2013) và (2) nâng cao dữ kiện trữ nước thật sự rút ra từ dữ kiện vệ tinh. Để thiết lập VIC-Res trong nghiên cứu của chúng tôi, do đó chúng tôi tiến hành như sau: Đối với mỗi hồ chứa nước, chúng tôi lấy dữ kiện lưu lượng chảy vào (được mô phỏng), dung tích trữ nước (ước tính từ dữ kiện vệ tinh), và bốc hơi (được mô phỏng bằng cách dùng diện tích mặt nước được ước tính và mức bốc hơi được tính bằng phương trình Penman). Rồi chúng tôi đảo ngược phương trình cân bằng khối lượng để tính số nước xả ra, được dùng như nhập kiện cho VIC-Res để mô phỏng động năng của việc trữ nước của mỗi hồ chứa nước. Tiến trình được lặp lại theo thứ tự - bắt đầu với đập ở trên cùng – để bảo đảm rằng ảnh hưởng chuỗi của các đập được nắm lấy đúng. Để bảo đảm sự tin cậy của phân tích nầy, chúng tôi nới rộng việc kiểm chứng mô hình ở Chiang

Saen cho thời kỳ làm đầy của Nuozhadu và Xiaowan (2009-2013), xem Hình S19. So sánh giữa dung tích được mô phỏng được trình bày trong Hình S11.

3.4. Các chỉ số của thay đổi thủy học

Tính có sẵn của dữ kiện trữ nước cũng cho phép chúng tôi giải đoán ảnh hưởng của viêc điều hành đập đối với lưu lượng (được do đạc) ở hạ lưu. Để làm thế, chúng tôi tính 2 chỉ số thay đổi theo thời gian của sự thay đổi thủy học (I1 và I2). I1 đại diện phần của lưu lượng thiên nhiên được giữ lại trong hệ thống hồ chứa cho mỗi tháng trong đó hệ thống giữ nước (thí dụ khi $\Delta S_t = S_t - S_{t-1} > 0$). I2 đại diện phần lưu lượng thiên nhiên được xả từ hệ thống hồ chứa nước cho mỗi tháng trong đó hệ thống xả nước (thí dụ, ΔSt < 0). I1 và I2 được tính như sau:

$$I_{1,t} = \frac{\Delta S_t}{\Delta S_t + Q_t}, \quad (4)$$

$$I_{2,t} = \frac{\Delta S_t}{Q_t}, \quad (5)$$

Trong đó Qt là lưu lượng quan sát được ở hạ lưu của hệ thống hồ chứa nước (ở Chiang Saen) trong tháng t. Lưu ý rằng mẫu số trong Phương trình (4) phỏng đoán lưu lượng thiên nhiên trong tháng t (nó là tổng số của lưu lượng thật sự và khối lượng nước được giữ lại ở thượng lưu trong một khoảng thời gian.

4. KẾT QUẢ

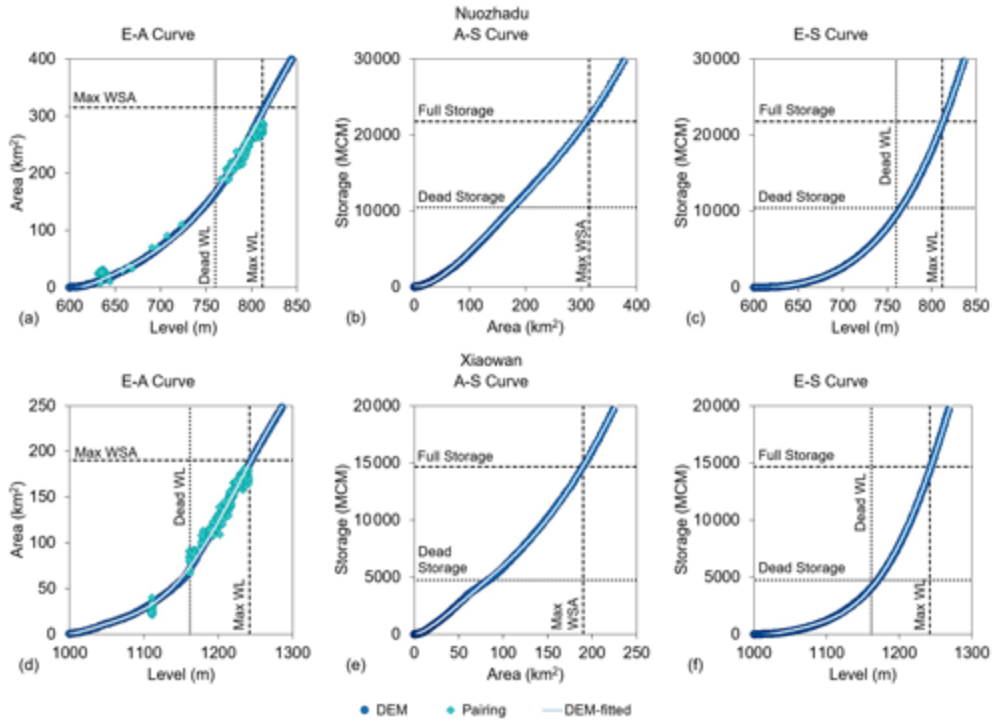
Chúng tôi bắt đầu phần nầy bằng cách báo cáo kết quả của phân tích DEM và hình ảnh vệ tinh, đó là, các đường E-A, A-S và E-S (Phần 4.1) và diện tích mặt nước (Phần 4.2). Rồi chúng tôi trình bày dung tích theo thời gian cho mỗi hồ

chứa nước, tin tức chúng tôi dùng để rút ra những chánh sách điều hành đập trong điều kiện làm đầy và ổn định (Phần 4.3). Cuối cùng, chúng tôi nâng cao những kết quả nầy để phân tích ảnh hưởng của việc điều hành hồ chứa nước đối với lưu lượng ở hạ lưu (Phần 4.4).

4.1. Các đường E-A, A-S, và E-S

Các đường E-A của hồ chứa nước Nuozhadu và Xiaowan được trình bày trong Hình 7 (phần a và d), nơi các vòng tròn xanh đại diện các điểm dữ kiện rút ra từ DEM, và các đường màu xanh nhạt là đa thức 5 độ được làm ăn khớp với chúng. Lưu ý rằng cả 2 đường gaio nhau chính xác tại điểm xác định bởi mực nước tối đa và diện tích mặt nước tối đa, rút ra từ Do et al. (2020). Một lượng định tương tự được thực hiện cho đường A-S và E-S (Hình 7, phần b,c,e,f) nhưng lần nầy dùng các tiêu chuẩn thiết kế cho đầy nước (đường A-S và E-S) và dung tích chết (đường E-S).

Chúng tôi thực hiện kiểm chứng thêm cho đường E-A bằng cách so sánh chúng với mực nước và diện tích mặt nước được quan sát từ dữ kiện cao độ radar và hình ảnh Landsat. Những quan sát nầy, được trình này trong Hình 7a và d bởi các hình thoi màu xanh lam, theo sau các đường được xác định bằng DEM rất gần. Tự nhiên, các điểm màu xanh lam tập trung giữa mực nước chết và tối đa, tiêu biểu tình trạng điều hành bình thường. Như sẽ thấy sau đây, các điểm ở dưới mực nước chết tương ứng với thời kỳ làm đầy nước.



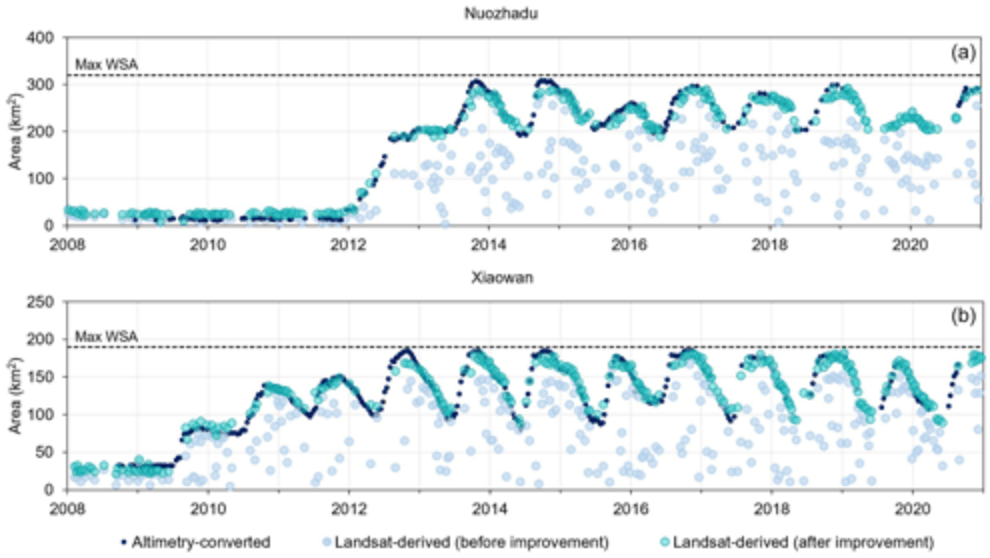
Hình 7. Các đường E-A, A-S và E-S của hồ chứa nước Nuozhadu (a-c) và Xiaowan (d-f). Các đường được đại diện bởi đường màu xanh nhạt, được làm ăn khớp với các diểm dữ kiện được xác dịnh bởi mực nước tối đa, diện tích mặt nước tối đa, và khối lượng chứa đầy (đường đứt đoạn) cũng như đường xác định mực nước chết và dung tích chết (đường chấm). Các hình thoi màu xanh lam trình bày trong phần (a) và (d) tương ứng với mực nước và diện tích mặt nước được quan sát lấy từ dữ kiện cao độ radar và hình ảnh Landsat.

Các đường E-A, A-S và E-S của 8 hồ chứa nước còn lại được trình bày trong Hình S12 và S13. Ngoài các đường của Jinghong và Huangdeng, được lượng định bằng cách dùng mực nước cao độ radar, các đường của các hồ chứa nước khác chỉ có thể được lượng định bằng cách so sánh với các tiêu chuẩn thiết kế được báo cáo bởi Do et al. (2020). Lượng định như thế chỉ thành công một phần, vì chúng tôi không thấy một sự ăn khớp tuyệt hảo giữa các đường và tiêu chuẩn

thiết kế cho các hồ chứa nước Jinghong, Gongguoqiao, Miaowei, Dahuaqiao, và Wunonglong. Xét rằng thủ tục được dùng để ước tính các đường đã được sử dụng thành công trong vài nghiên cứu (Bonnema et al., 2016; Bonnema and Hossain, 2017; Zhang and Gao, 2020), chúng tôi nghi rằng lý do ở phía sau sự lệch lạc có thể nằm trong tin tức của tiêu chuẩn thiết kế được công bố. Lần lượt, điều nầy tăng cường sự cần thiết để nghiên cứu nhằm mục đích thu thập dữ kiện của hạ tầng cơ sở đại qui mô trong các luu vực sông xuyên biên giới. Chúng tôi cũng lưu ý rằng nguồn bất định nầy không ảnh hưởng nghiêm trọng nghiên cứu của chúng tôi, vì 5 hồ chứa nước đó chiếm 1 phần nhỏ của dung tích của toàn hệ thống (2,36%, 0,74%, 1,55%, 0,69% và 0,64%, theo thứ tự).

4.2. Diện tích mặt nước

Nhắc lại rằng trình tự ước tính WSA xây dựng trên ý tưởng dùng hình ảnh không có mây để tạo nên mặt nạ nới rộng và mặt nạ vùng, rồi được dùng để sửa chữa việc xếp loại các pixels nước trong hình ảnh bị ảnh hưởng bởi mây và các xáo trộn khác. Trong trường hợp của chúng tôi, cải thiện như thế cần thiết cho 56% của 3.004 hình ảnh Landsat có sẵn cho thời kỳ nghiên cứu của chúng tôi (con số hình có thể dùng được gia tăng từ 26% đền 82%). Như có thể tưởng tượng, việc sửa chữa xếp loại rất quan trọng trong mùa mưa, khi độ bao phủ của mây rất thường xuyên – con số hình ảnh có thể dùng được gia tăng 54% của 1.770 hình ảnh (từ 30% đến 84%) trong mùa khô và 58% của 1.234 hình ảnh (từ 21% đến 79%) trong mùa mưa. Thành tích của tiến trình cho mỗi hồ chứa nước được tóm tắt trong Bảng S6.



Hình 8. Diện tích mặt nước của hồ chứa nước Nuozhadu (a) và Xiaowan (b). Lưu ý là sự khác biệt lớn lao trong các trị số WSA trước (các điểm màu xanh nhạt) và sau (các điểm màu xanh lam) khi cải thiện xếp loại. Các trị số được sửa chửa của WSA rất phù hợp với các trị số rút ra từ dữ kiện mực nước cao độ và các đường E-A (các điểm màu xanh đậm).

Loạt WSA theo thời gian của hồ chứa nước Nuozhadu và Xiaowan được trình bày trong Hình 8. Kết quả đầu tiên để ghi nhận là thay đổi hoàn toàn trong các trị số WSA trước (các điểm màu xanh nhạt) và sau (các điểm màu xanh lam) khi cải thiện việc xếp loại. Loạt thay đổi theo thời gian của các trị số WSA được sửa chữa cũng bắt đầu cho thấy lề lối điều hành các hồ chứa nước: sự gia tăng lớn lao bắt đầu trong năm 2012 (Nuozhadu) và 2009 (Xiaowan) biểu hiệu điểm khởi đầu của thời kỳ làm đầy hồ chứa, trong khi dao động lớn hàng năm đề nghị sự hiện diện của điều kiện điều hành rộng lớn – diện tích mặt nước tối đa chỉ đạt được váo cuối mùa mưa, trong khi phần còn lại của năm có vẻ được dùng để làm đầy và

làm cạn các hồ chứa nước. Trong Phần 4.3, chúng ta sẽ thấy làm thế nào biến đổi như thế diễn dịch thành lề lối trữ nước.

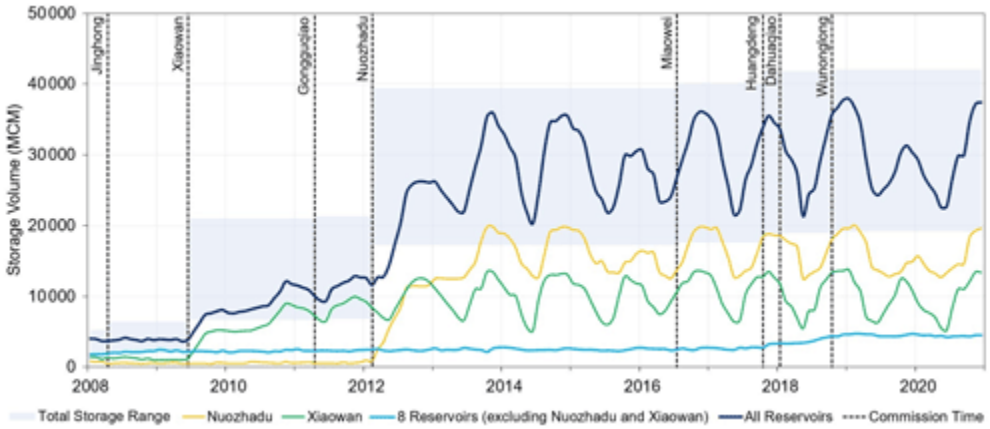
Để lượng định kết quả có được với hình ảnh Landsat, chúng tôi tận dụng dữ kiện mực nước cao độ radar và đường E-A để có 2 loạt WSA theo thời gian độc lập. Như được trình bày trong Hình 8, cả 2 mô phỏng cung cấp các kết quả rất giống nhau. Kết quả tương tự có thể thấy trong loạt WSA theo thời gian của hồ chứa nước Huangdeng và Jinghong (xem Hình S14). Chúng tôi cũng cung cấp một so sánh định lượng của WSA phát xuất từ Landsat và đổi từ cao độ cho tất cả 4 hồ chứa nước được nói ở trên (xem Bảng S7). Với phân tích thêm nầy, chúng tôi nhằm 2 mục đích: xoi mói các trị số WSA cho các hồ chứa nước chánh và kiểm chứng phương pháp dựa trên hình ảnh Landsat, dữ kiện duy nhất cho các hồ chứa nước còn lại.

4.3. Dung tích của hồ chứa nước

4.3.1. Lịch sử của biến đổi dung tích hồ chứa nước

Sử dụng tin tức về đường hồ chứa nước và diện tích mặt nước được mô tả ở trên, chúng tôi ước tính dung tích theo thời gian cho mỗi hồ chứa nước cũng như trị số kết hợp của chúng (Hình 9). Lưu ý rằng số hình ảnh có thể dùng được cho mỗi tháng không giống nhau. Để có dung tích thay đổi theo thời gian bằng nhau, chúng tôi chọn một trị số WSA (trị số tối đa) cho mỗi tháng để phỏng đoán dung tích của hồ chứa nước. WSA (đường màu xanh đậm) cho thấy một lịch sử biến chuyển nhanh chóng, tiêu biểu bởi 2 điểm thay đổi quan trọng: việc khánh thành của hồ chứa nước Xiaowan và Nuozhadu. Sau khi khánh thành Xiaowan, chúng tôi ghi nhận một sự gia tăng đều đặn trong dung tích tổng cộng (xem thời kỳ giữa

2009 và 2012), một sự gia tăng trở nên rõ rệt hơn sau khi khánh thành Nuozhadu trong năm 2012. Thật vậy, chỉ sau khi việc làm đầy 2 hồ chứa nước hoàn tất trong năm 2014, dung tích tổng cộng theo thời gian bắt đầu cho thấy một lề lối có chu kỳ-đứng hơn – hệ thống hồ chứa nước được làm đầy trong mùa mưa và làm cạn sau đó. Việc xây cất thêm một vài đập trong thời kỳ 2016-2018 không thay đổi lề lối nầy nhiều. Thật vậy, 8 hồ chứa nước còn lại có vẻ duy trì một dung tích cố định hớn (Hình S15).



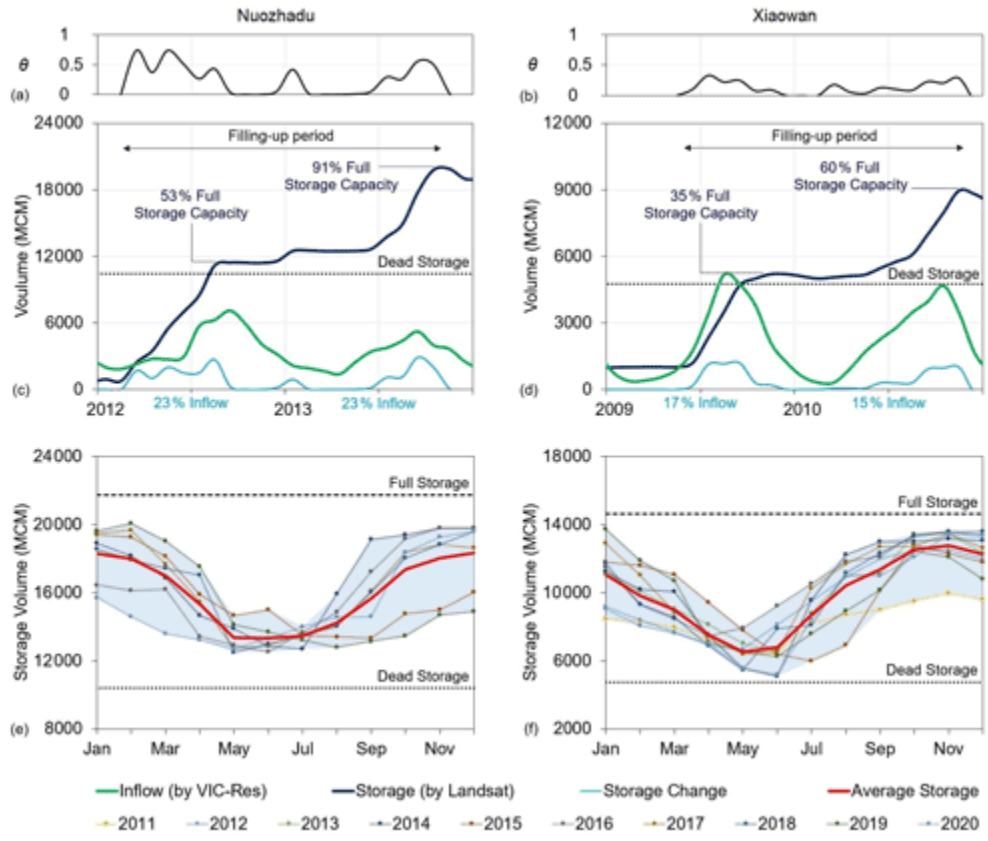
Hình 9. Diện tích màu xanh đại diện tầm biến đổi của dung tích của toàn hệ thống (giữa dung tích chết và đầy), trong khi động năng dung tích thật sự được biểu diễn bởi đường xanh đậm. Năng động dung tích của Nuozhadu, Xiaowan, và 8 hồ chứa nước còn lại được diễn tả bởi các đường màu vàng, xanh lá cây và xanh. Đường đứt đoạn thẳng đứng diễn tả năm khánh thành của mỗi hồ chứa nước. Lưu ý rằng Manwan và Dachaoshan bắt đầu hoạt động trong năm 1992 và 2003, theo thứ tự. Chúng tôi cung cấp dung tích theo thời gian của mỗi hồ chứa nước trong Hình S15.

Thêm 2 thành phần then chốt được khám phá khi so sánh động năng dung tích tổng cộng với tầm biến đổi tiềm tàng, đó là, không gian giữa dung tích chết và đầy (diện tích tô màu xanh). Trước hết, các nhà điều hành có vẻ không dùng toàn thể dung tích – mức dung tích chết và đầy chưa bao giờ đạt đến trong suốt thời kỳ nghiên cứu. Một sự giải thích hợp lý cho chiến lược quản lý nầy có thể được thấy trong sự cần thiết để tránh tranh chấp thêm với các quốc gia ở hạ lưu (Eyler and Weatherby, 2020) hay làm giảm bớt việc cắt giảm thủy điện (Liu et al., 2018). Thứ hai, hệ thống hồ chứa nước được dùng chỉ có ½ khả năng trong năm 2015-2016 và 2019-2020, với hồ chứa nước Nuozhadu đóng một vai trò quan trọng (đường màu vàng). Như sẽ thấy trong Phần 4.4, điều nầy có thể là kết quả của tình trạng hạn hán kéo dài (Yu et al., 2020; Ding and Gao, 2020), thay vì đáp ứng với các động cơ xã hội-kỹ thuật được nói ở trên.

4.3.2. Chiến lược làm đầy và quy tắc điều hành

Trong Hình 10, chúng tôi chú trọng đến các chiến lược làm đầy và các quy tắc điều hành của Nuozhadu và Xiaowan: phần (a) và (b) cho thấy các trị số θ (thông số diễn tả phần của lưu lượng chảy vào được giữ bởi hồ chứa nước), trong khi phần (c) và (d) diễn tả khối lượng trữ nước (đường màu xanh đậm), lưu lượng chảy vào được mô phỏng (đường xanh lá cây), và thay đổi dung tích (đường màu xanh nhạt) – đó là, St-St-1 , diễn tả mức độ mà hồ chứa nước được làm đầy. Con số đề nghị rằng các nhà điều hành áp dụng các chiến lược làm đầy giống nhau: các hồ chứa nước được làm đầy trong khoảng 2 năm (bất kể dung tích khác nhau), với mùa mưa thứ nhất được dùng để làm đầy dung tích chết và mùa mưa thứ nhì được dùng để tăng gấp đôi dung tích. Rất ngạc nhiên, kết quả cho thấy

rằng trị số hàng năm của θ được giữ cố định trong thời gian làm đầy. Đối với Nuozhadu. Các nhà điều hành giữ 23% lưu lượng chảy vào hàng năm (cho cả năm); đối với Xiaowan, trị số đó được giữ từ 17% đến 15%. Lưu ý rằng chúng là những trị số lớn cực đoan: giữ 23% lưu lượng chảy vào hàng năm cho Nuozhadu có nghĩa là trữ khoảng 9.880 triệu m3, ~12% lưu lượng trung bình hàng năm ở Chiang Saen. Chiến lược làm đầy của các hồ chứa nước còn lại thí khác: vì chúng có khả năng trữ nước nhỏ hơn – tương đối với lưu lượng chảy vào – chúng được làm đầy trong một vài tháng (xem Hình S15).



Hình 10. Chiến lược làm đầy (a,b,c,d) và các đường quy tắc (e,f) của hồ chứa nước Nuozhadu (a,c,e) và Xiaowan (b,d,f). Phần (a) và (b) cho thấy trị số của θ. Trong phần (c) và (d) dung tích trữ nước (đường nàu xanh đậm) được rút ra từ

DEM và dữ kiện Landsat, trong khi lưu lượng chảy vào hồ chứa nước (đường màu xanh lá cây) được tính với mô hình thủy học VIC-Res. Thay đổi dung tích (đường màu xanh nhạt) được định nghĩa như sự khác biệt trong dung tích trữ nước giữa 2 tháng liên tục. Trong phần (e) và (f), mỗi đường với dấu tròn diễn tả dung tích trữ nước cho từng năm. Đường màu đỏ đậm đại diện dung tích trữ nước trung bình hàng tháng, được xem là đại diện của đường quy tắc. Tất cả dữ kiện được thấy ở đây có độ phân giải hàng tháng.

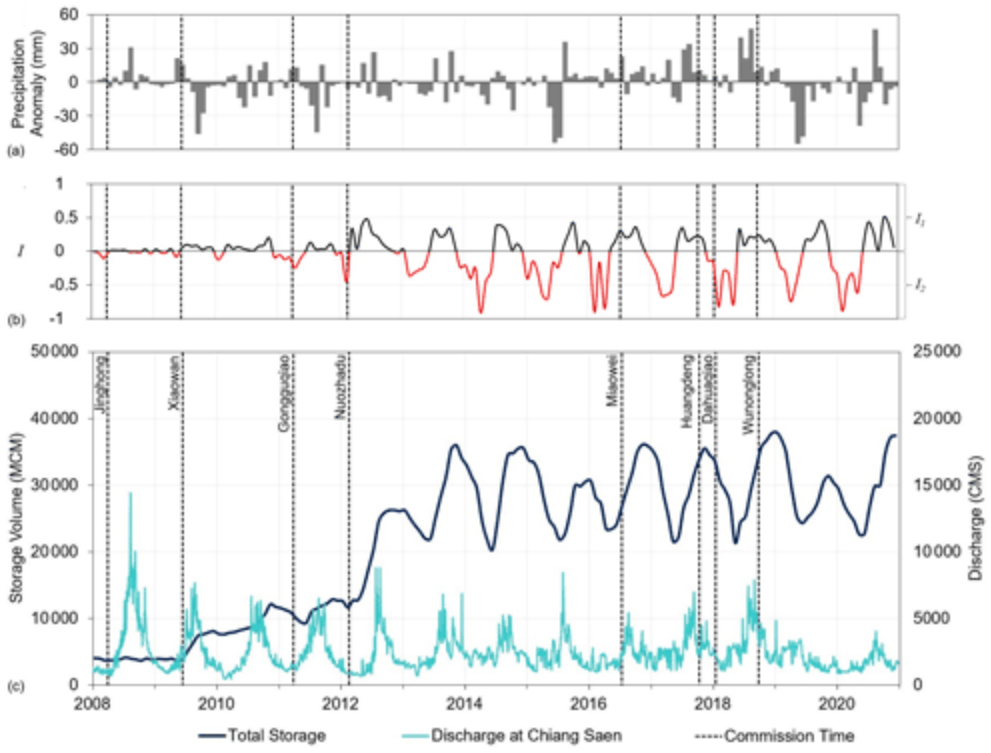
Bằng cách nhìn vào dữ kiện trữ nước của Nuozhadu và Xiaowan trong điều kiện điều hành bình thường (đó là, khi việc làm đầy hoàn tất), chúng ta có thể có một vài cái nhìn thêm về chiến lược quản lý hiện nay (Hình 10e,f). Điều đầu tiên được ghi nhận là sự xuất hiện của lề lối theo mùa được trình bày trong phần trước, các hồ chứa được làm cạn trước mùa mưa và làm đầy sau đó. Thứ hai, biến đổi khá rộng rãi, có nghĩa là các nhà điều hành có thể đi lêch khỏi lề lối lâu dài được đại diện bởi đường màu đỏ đậm. Chênh lệch như thế thì phổ biến trên khắp lưu vực Mekong (xem Bonnema and Hossain, 2017, 2019) và được gây ra bởi biến đổi từ năm nầy qua năm khác trong lưu lượng được châm ngòi bởi các động cơ đại dương (Nguyen et al., 2020). Cuối cùng, phân tích xác định rằng Nuozhadu và Xiaowan chưa bao giời được sử dụng hết khả năng. Tuy nhiên, điều nầy đủ để giữ dung tích của các hồ chứa nước khác nằm trong tầm hẹp hơn (Hình S16).

4.4. Ảnh hưởng của việc điều hành hồ chứa đối với lưu lượng ở hạ lưu

Đã biết làm thế nào các hồ chứa nước trong lưu vực Lancang được làm đầy và điều hành, chúng tôi có thể giải thích ảnh hưởng thay đổi theo thời gian đối với lưu lượng được đo đạc ở Chiang Saen (Phần 2.1). Phân tích biểu đồ của dung

tích tổng cộng và lưu lượng (Hình 11c) làm nổi bật những thay đổi hợp lý trong chế độ dòng chảy đối với gia tăng của việc trữ nước ở thượng lưu. Chế độ dòng chảy thay đổi lớn lao vào cuối năm 2103, khi việc làm đầy Xiaowan và Nuozhadu hoàn tất. Bằng cách xả nước trong mùa khô và giữ nước trong mùa mưa, các đập thủy điện gia tăng phần lớn lưu lượng thấp và giảm lưu lượng cao (Bảng S). Thí dụ, trung bình của lưu lượng đỉnh hàng năm giảm từ 11.157 (1990-2008) xuống 6.186 m3/sec (2013-2020) (-45%), trong khi trung bình của lưu lượng thấp nhất tăng từ 638 đến 1.003 m3/sec (+57%). Các con số tương tự được thấy cho các thống kê khác (Bảng S8). Chúng tôi cũng có thể ghi nhận một thay đổi vi mô trong lế lối lưu lượng theo mùa từ vô số dao động hàng năm đến thay đổi lưu lượng nhanh chóng. Tất cả những quan sát nầy được xác nhận bởi phân tích gợn sóng được trình bày trong Hình S17.

Như được thấy trong Hình 11b, mức độ thay đổi dòng chảy ở Chiang Saen gây ra bởi các đập Lancang gia tăng đáng kể với thời gian trong 3 giai đoạn khác nhau: giai đoạn thứ nhất (trước khi đập Xiaowan bắt đầu hoạt động). giai đoạn giữa, và giai đoạn cuối (sau khi đập Nuozhadu bắt đầu hoạt động). Điều đó có nghĩa là tầm thay đổi của I1 (màu đen) và I2 (màu đỏ) gia tăng theo thời gian: [0, 0,04] và [-0,10, 0] trong giai đoạn 1, [0, 0,20} và [-0,44-0] trong giai đoạn 2, và cuối cùng [0, 0,50] và [-0,91, 0] trong giai đoàn cuối cùng. Với con số hồ chứa nước gia tăng nhanh chóng trong thập niên qua, lưu lựng ở hạ lưu trở nên được kiểm soát gia tăng bởi việc điều hành đập.



Hình 11. Ảnh hưởng của việc điều hành hồ chứa nước đối với lưu lượng ở hạ lưu. Phần (a) cho thấy lượng mưa hàng tháng bình thường trong lưu vực sông Lancang, được tính từ bộ dữ kiện CHIRPS-2.0. Phần (b) trình bày 2 chỉ số thay đổi thủy học về lưu lượng ở Chiang Saen: I1 – phần lưu lượng tự nhiên được giữ lại trong hệ thống hồ chứa cho mỗi tháng trong đó hệ thống trữ nước – màu đen, và I2 phần của lưu lượng tự nhiên được xả ra từ hệ thống hồ chứa nước cho mỗi tháng trong đó hệ thống xả nước – màu đỏ. Trong phần (c), đường màu xanh đậm đại diện tổng số dung tích của hệ thống hồ chứa nước, trong khi đường màu xanh lam đại diện lưu lượng quan sát được ở Chiang Saen.

Bằng cách mang những khác biệt của lượng mưa hàng tháng (cho lưu vực sông Lancang) vào hình ảnh tổng quát (Hình 11a), chúng tôi có thể hiểu rõ hơn làm thế nào các nhà điều hành đập đóng góp một phần vào hạn hán và lũ lụt ở hạ

lưu. Trường hợp trong điểm nầy là hạn hán trong thời kỳ 2019-2020. Những khác biệt của lượng mưa hàng tháng cho thấy rằng, trong mùa mưa năm 2019, lưu vực sông Lancang nhận được mưa ít hơn, nhất là trong tháng 5 và 6 (khoảng 50 mm thấp hơn trung bình của những tháng đó). Tuy nhiên, các trị số của I1 cho thấy rằng hệ thống hồ chứa nước giữ phần lưu lượng chảy vào trong những tháng giữa của năm (đến khoảng 46% trong tháng 10). Vì sự kết hợp của hạn hán và chiến lược điều hành đập, hạ lưu trải qua một thời kỳ khô nguy kịch, với trạm thủy học Chiang Saen ghi nhận những dòng chảy cực thấp trong những tháng hè (MRC, 2020a). Việc xả nước trong mùa khô tiếp theo chỉ làm giảm một phần ảnh hưởng của hạn hán đang diễn ra, vì lượng mưa dưới trung bình kéo dài đến giữa năm 2020. Quan trọng hơn, dữ kiện 2019-2020 đề nghị rằng chiến lược điều hành đập không ảnh hưởng lớn bởi điều kiện khí tượng: các đập Lancang hiện trữ khoảng 46% dòng chảy tự nhiên được ước tính trong mùa mưa (bất kể cường độ của mưa mùa) và rồi xả ra trong mùa khô, kiểm soát đến 89% dòng chảy trong mùa khô – một lề lối đã xuất hiện kể từ Xiaowan và Nuozhadu bắt đầu hoạt động. Những kết quả nầy cũng nhấn mạnh tầm quan trọng của việc xả nước khẩn cấp từ các hồ chứa nước ở thượng lưu, chẳng hạn như việc xả nước được thực hiện trong năm 2016 (Tiezzi, 2016; Hecht et al., 2019). Về những việc xả nước khẩn cấp đó, cần lưu ý rằng hạn hán năm 2016 có cường độ nhỏ hơn hạn hán 2019-2020 rất nhiều và rằng hạn hán xảy ra trong ½ năm đầu, khi hệ thống hồ chứa nước đang xả nước theo việc điều hành thông thường. Tóm lại, tính có sẵn của dữ kiệm trữ nước (suy đoán) có thể giúp chúng tôi đặt hạn hán, xả nước khẩn cấp và lũ lụt vào một khía cạnh rộng hơn. Nhưng, những phân tích như thế

nên được bổ sung bởi các nỗ lực chia sẻ dữ kiện giữa tất cả các quốc gia duyên hà, một điểm được tăng cường mới đây bởi Keovilgnavong et al. (2021).

5. THẢO LUẬN

Nghiên cứu của chúng tôi tạo nên dung tích hàng tháng theo thời gian cho mỗi trong 10 hồ chứa nước lớn đươc xây trong lưu vực sông Lancang trong những thập niên qua. Những loạt thời gian nầy mô tả tiến hóa của hệ thống chuỗi đập khổng lồ và nhấn mạnh vai trò bản lề của các hồ chứa nước Xiaowan và Nuozhadu. Cùng nhau, hai hồ chứa nước nầy có thể chiếm ~85% tổng số dung tích trữ nước trong Lancang, đo đó, kiểm soát phần lớn nước của Bắc Thái Lan và Lào. Cho biết tin tức về các quy tắc điều hành – được kết hợp lý tưởng với việc theo dõi dung tích gần tức thời – là tầm quan trọng tối cao cho nhiều thành phần kinh tế xã hội ở hạ lưu. Cứu xét, thí dụ, kỹ nghệ thủy điện của Lào, quốc gia xuất cảng điện lớn nhất trong vùng: kể từ khi xây cất đập Xayaburi (1.285 MW) trên dòng chánh Mekong, một phần của việc sản xuất thủy điện quốc gia đã dựa vào tình trạng của các hồ chứa nước Lancang. Tin tức chi tiết về dung tích và quy tắc điều hành của chúng do đó có thể được kết hợp vào các mô hình hệ thống năng lượng của Lào (Chowdhury et al., 2020), cũng như để giải quyết mối liên hệ không cân xứng giữa Trung Hoa và Lào. Đi về hạ lưu, một thành phần khác có thể được lợi từ nghiên cứu của chúng tôi là đất ngập nước của Mekong, một điểm nóng đa dạng sinh học là nơi cư trú của kỹ nghệ đánh cá trị giá nhiều tỉ USD (Arias et al., 2014; Dang et al., 2016). Một lần nữa, tin tức về tình trạng của các hồ chứa nước Lancang có thể giúp thông báo các nhà điều hành của nhiều đập ở hạ lưu, do đó giúp thực hiện chiến lược xả nước ít gây nguy hại cho môi trường

(Sabo et al., 2017). Tóm lại, các đường quy tắc được suy đoán có thể được dùng để tiên đoán lưu lượng chảy ra từ hệ thống hồ chứa nước Lancang và thích ứng việc điều hành của các đập ở hạ lưu.

Phân tích của chúng tôi cũng cung cấp một mô tả chi tiết chiến lược làm đầy Nuozhadu và Xiaowan. Nay chúng tôi biết rằng cả 2 hồ chứa nước đạt đến việc điều hành ổn định trong khoảng 2 năm bằng cách giữ lại từ 15% đến 23% lương nước chảy vào hàng năm. Tin tức nầy rất cần để giải thích những khác thường trong lưu lượng nước ở hạ lưu và, quan trong nhất, để chuẩn bị cho những thay đổi hạ tầng cơ sở trong tương lai trong hệ thống chuỗi đập Lancang. Trung Hoa đã xây 1 đập mới (Tuoba: 1.039 triệu m3) và dự trù xây cất thêm 10 đập (MRC, 2020b). Tất cả những đập nầy khá lớn (thí dụ, Ru Mei: 13.385 triệu m3; Ban Da: 12.902 triệu m3; Gu Xue: 10.127 triệu m3), và cùng nhau, chúng có một dung tích tổng cộng vào khoảng 64.950 triệu m3 (Schmitt et al., 2019). Nếu chiến lược làm đầy tương tự được thực hiện một lần nữa, các quốc gia ở hạ lưu nên mong đợi một sự sụt giảm tạm thời, nhưng đáng kể, tính có sẵn của nước nhưng cũng có thể thiết kế các kế hoạch thích ứng và khẩn cấp. Thí dụ, Lào và Cambodia có thể tạm thời thay đổi các chiến lược quản lý nước khi 1 đập mới bắt đầu hoạt động ở Lancang. Tự nhiên, tin tức về chiến lược làm đầy trong quá khứ cũng có thể được dùng khi thương thảo với việc làm đầy các đập mới – như trường hợp của đập Grand Ethiopien Renaissance (Zhang et al., 2016; Basheer et al., 2020) – một chánh sách ưa thích và hợp tác hơn không có vẻ xuất hiện ở chân trời.

Trong nhiều lưu vực không được đo đạc hay tranh chấp, như Mekong, đặc tính của những thay đổi thủy học thường dựa trên các chỉ số "tĩnh" liên quan đến khả năng trữ nước đối với lưu lượng trung bình hàng năm (Grill et al., 2014,2015). Bằng cách kết hợp trữ nước thật sự theo thời gian với dữ kiện lưu lượng, chúng tôi có thể đi ra ngoài đặc tính đầu tiên và cơ bản nầy và cung cấp một con đường cho sự hiểu biết tinh vi hơn về làm thế nào, và khi nào, viêc điều hành hồ chứa nước ảnh hưởng các tiến trình thủy học ở hạ lưu (Bonnema and Hossain, 2017). Về điểm đó, phân tích của chúng tôi cho Lancang cho thấy rằng một phần của dòng chảy tự nhiên được kiểm soát tích cực bởi các đập (ở Bắc Thái Lan và Lào) thay đổi trên căn bản hàng tháng: các hồ chứa nước giữ lại từ ~50% dòng chảy tự nhiên trong mùa mưa và kiểm soát gần 89% dòng chảy trong mùa khô của Lancang. Đáng ngạc nhiên, chúng tôi cũng thấy rằng lề lối có chu kỳ nầy không bị ảnh hưởng nhiều bởi các điều kiện thủy khí tượng – như hạn hán 2019-2020 – giải thích một phần những than phiền và lo sợ của các quốc gia ở hạ lưu (Eyler and Weatherby, 2020).

Từ khía cạnh kỹ thuật hơn, một lãnh vực nghiên cứu khác có thể bị ảnh hưởng bởi kết quả của chúng tôi là việc phát triển các mô hình thủy học đại qui mô cho lưu vực Mekong. Các nhà thủy học quả thật gia tăng quan tâm trong việc đại diện trữ nước trong hồ chứa và việc điều hành, một vấn đề mô phỏng từ lâu đã dựa trên kế hoạch xả nước tổng quát (Hanasaki et al., 2006). Nghiên cứu gần đây đã cho thấy rằng sự khác biệt tinh vi của việc điều hành ở các đập riêng biệt được ghi nhận tốt hơn bởi các mô hình thủy học khi xây dựng trên dữ kiện có độ phân giải cao có sẵn cho mỗi đập (Turner et al., 2020). Về phần nầy, chúng tôi tin rằng loạt trữ lượng và mực nước theo thời gian của chúng tôi cung cấp một cơ

hội để thử nghiệm và cải thiện nhiều mô hình thủy học được phát triển cho lưu vực Mekong (Hoang et al., 2019; Yu et al., 2019; Dang et al., 2020a; Yun et al., 2020; Shin et al., 2020; Do et al., 2020). Một khuynh hướng nghiên cứu bổ sung là việc tạo thêm những bộ dữ kiện cho các biến số then chốt khác, chẳng hạn như nhiệt độ của nước hay nồng độ của phù sa lơ lững, cũng có thể được quan sát, hay phỏng đoán, từ các quan sát vệ tinh (Beveridge et al., 2020; Bonnema et al., 2020; Ahmad et al., 2021).

Như bất cứ nghiên cứu mô phỏng toán học khác, công việc nầy cũng xây dựng trên một vài giả thiết mô phỏng nên được thảo luận. Trước hết, loạt dung tích theo thời gian chúng tôi phát triển có độ phân giải hàng tháng. Như được trình bày trong Hình S1, độ phân giải nầy đủ để nghiên cứu động năng của dung tích hồ chứa trong Lancang – cũng như ảnh hưởng của chúng đối với lưu lượng ở hạ lưu – nhưng chắc chắn rằng tính có sẵn của dữ kiện hàng tuần hay hàng ngày sẽ nới rộng thêm phạm vi nghiên cứu trên các lưu vực xuyên biên giới. Dữ kiện hàng ngày có thể được dùng, thí dụ, để nghiên cứu của sự khác biệt tinh vi của việc xả nước khẩn cấp hay thay đổi thình lình trong lưu lượng của sông. Thứ nhì, hình ảnh Landsat cung cấp một thỏa hiệp tốt nhất cho độ phân giải không thời gian và thời gian, nhưng chúng đòi hỏi tiến trình nâng cao hình ảnh. Việc phát triển các trình tự WSA là một lãnh vực bảo đảm nghiên cứu thêm, vì nghiên cứu đập trong những thập niên qua hầu như phải được xây trên hình ảnh của Landsat. Đây là một yếu tố không thể bỏ qua khi cứu xét rằng nhiều đập được xây cất gần đây ở vùng nhiệt đới, nơi có mây bao phủ trong mùa mưa. Thứ ba, phân tích chiến lược làm đầy hồ chứa nước đòi hỏi việc sử dụng lưu lượng được mô phỏng, một vấn đề có thể tránh nếu các quốc gia duyên hà chia sẻ dữ kiện

lưu lượng sông. Kiểm chứng mô hình đề nghị rằng đặc tính của chiến lược làm đầy không bị ảnh hưởng bởi việc sử dụng mô hình, rất quan trọng, được thúc đẩy trực tiếp bởi dữ kiện trữ nước được phỏng đoán. Như đã nói ở trên, việc kết hợp dữ kiện như thế với các mô hình thủy học dựa trên tiến trình là một lãnh vực nghiên cứu rất tích cực hy vọng sẽ đưa đến những mô hình chính xác hơn.

Nhìn tới trước, chúng ta nên nhắm đến các nghiên cứu lặp đi lặp lại như nghiên cứu nầy ở qui mô toàn lưu vực. Làm như thế sẽ tạo nên một con đường để một phân tích có thẩm quyền vững chắc của những trận hạn hán gần đây đã ảnh hưởng các quốc gia Mekong. Cũng nên lưu ý rằng phân tích như thế là một xác suất không nằm trong tầm vói của chúng ta: chúng ta biết làm thế nào việc nước chảy tràn được phân phối theo không gian (Shin et al., 2020), và chúng ta đang thu thập tin tức về viêc điều hành nhiều hồ chứa nước (Biswas et al., 2021), nhưng chúng ta vẫn có dữ kiện hạn chế về những can thiệp của con người được cho là có ảnh hưởng đến sự cân bằng nước tổng quát, chẳng hạn như các hoạt động thủy nông trong phần phía tây của lưu vực. Lần lượt, điều nầy nhắc lại sự cần thiết của dữ kiện có độ phân giải cao trải rộng trên khắp các quốc gia và các thành phần kinh tế xã hội.

6. PHẦN KẾT LUẬN

Chỉ trong một vài thập niên, lưu vực sông Mekong đã trải qua việc phát triển hạ tầng cơ sở nhanh chóng đã giúp tăng trưởng kinh tế nhưng cũng gây thiệt hại cho môi trường và thách thức mối liên hệ giữa các quốc gia duyên hà. Một sự thay đổi trong tình trạng hiện tại nầy có nghĩa là nhận thức các chánh sách hợp tác nước-năng lượng trải rộng trên khắp các quốc gia và các thành phần kinh tế

xã hội (Schmitt et al., 2019; Siala et al., 2021). Ngoài ý chí chánh trị, một mảng quan trọng của câu đố là tính có sẵn của các bộ dữ kiện công khai mô tả làm thế nào các hạ tầng cơ sở lớn được điều hành. Vì thỏa thuận về chia sẻ dữ kiện chỉ cung cấp tin tức từng phần (Johnson, 2020), việc sử dụng hình ảnh vệ tinh có vẻ là cách duy nhất để tạo nên các quan sát không thiên vị có sẵn cho cộng đồng nghiên cứu và các bên liên hệ ở địa phương. Về mặt nầy, công việc của chúng tôi bổ sung những nỗ lực hiện hữu cho khu vực, mang chúng ta một bước gần hơn đến sự hiểu biết đầy đủ các chiến lược quản lý các đập Lancang của Trung Hoa. Quan trọng hơn, các bài học học được ở đây có thể được áp dụng cho các lưu vực sông xuyên biên giới khác, nơi thiếu tin tức của các đập hiện hữu hay dự trù là một chướng ngại vật cho khoa học mở và hợp tác tổ chức.

DỮ KIỆN VÀ CHƯƠNG TRÌNH ĐIỆN TOÁN

Nguyên bản Python được dùng trong nghiên cứu nầy và xuất kiện tương ứng (đường E-A-S và dung tích theo thời gian) có thể tìm thấy ở https://doi.org/10.5281/zenodo.6299041 (Vu, 2022).

Dữ kiện lưu lượng hàng ngày ở Chiang Saen được lấy từ trang mang của Ủy hội Sông Mekong (Mekong River Commission (MRC)) ở https://portal.mrcmekong.org/ (MRC, 2021).

Mực nước được quan sát và dữ kiện dung tích của hồ chứa nước Bhumibol và Ubol Ratana được thu thập từ trang mang của Electricity Generating Authority of Thailand ở http://water.egat.co.th/follow.php (EGAT, 2022).

Dữ kiện mưa CHIRPS-2.0 từ University of California, Santa Barbara, cò thể tìm thấy ở https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/ (University of California, 2021).

Dữ kiện nhập kiện khác của mô hình VIC-RES gồm có dữ kiện nhiệt độ được rút ra từ bộ dữ kiện ERA5 (https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/; ECMWF, 2021), dữ kiện sử dụng đất và bao phủ đất được thu thập từ bộ dữ kiện Global Land Cover Characterization dataset (https://earthexplorer.usgs.gov/; USGS, 2022a), dữ kiện đất lấy từ Harmonized World Soil database (http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/; FAO et al., 2022), và hình ảnh vệ tinh Terra MODIS (được dùng để tính chỉ số diện tích lá hàng tháng và độ phản chiếu ành sáng) có thể tìm thấy ở https://earthexplorer.usgs.gov/ (USGS, 2021a).

Tất cả hình ảnh Landsat được dùng trong nghiên cứu của chúng tôi có thể tìm thấy ở https://earthexplorer.usgs.gov/ (USGS, 2021b).

Dử kiện mực nước cao độ được rút ra từ Global Reservoirs and Lakes Monitor (G-REALM) at https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/ (IPAD et al., 2021).

PHỤ ĐÍNH

Phụ đính liên quan đến bài viết nầy có thể tìm thấy trên mạng ở https://doi.org/10.5194/hess-26-2345-2022-supplement.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

Ahmad, S. K., Hossain, F., Holtgrieve, G. W., Pavelsky, T., and Galelli, S.: Predicting the likely thermal impact of current and future dams around the world, Earth's Future, 9, e2020EF001916, https://doi.org/10.1029/2020ef001916 , 2021.a

Arias, M. E., Cochrane, T. A., Kummu, M., Lauri, H., Holtgrieve, G. W., Koponen, J., and Piman, T.: Impacts of hydropower and climate change on drivers of ecological productivity of Southeast Asia's most important wetland, Ecol. Model., 272, 252–263, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.10.015 , 2014.a

Avisse, N., Tilmant, A., Müller, M. F., and Zhang, H.: Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas, Hydrol. Earth Syst. Sci., 21, 6445–6459, https://doi.org/10.5194/hess-21-6445-2017 , 2017.a, b

Basheer, M., Wheeler, K. G., Elagib, N. A., Etichia, M., Zagona, E. A., Abdo, G. M., and Harou, J. J.: Filling Africa's largest hydropower dam should consider engineering realities, One Earth, 3, 277–281, https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.08.015 , 2020.a

Beveridge, C., Hossain, F., and Bonnema, M.: Estimating impacts of dam development and landscape changes on suspended sediment concentrations in the Mekong River Basin's 3S tributaries, J. Hydrol. Eng., 25, 05020014, https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0001949 , 2020. a

Binh, D. V., Kantoush, S., and Sumi, T.: Changes to long-term discharge and sediment loads in the Vietnamese Mekong Delta caused by upstream dams, Geomorphology, 353, 107011, https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.107011 , 2020.a

Birkett, C. M., Reynolds, C., Beckley, B., and Doorn, B.: From Research to Operations: The USDA Global Reservoir and Lake Monitor, in: Coastal Altimetry, edited by: Vignudelli, S., Kostianoy, A. G., Cipollini, P., and Benveniste, J., Springer, Berlin, https://doi.org/10.1007/978-3-642-12796-0_2 , 2010.a

Biswas, N. K., Hossain, F., Bonnema, M., Okeowo, M. A., and Lee, H.: An altimeter height extraction technique for dynamically changing rivers of South and South-East Asia, Remote Sens. Environ., 221, 24–37, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.10.033 , 2019.a

Biswas, N. K., Hossain, F., Bonnema, M., Lee, H., and Chishtie, F.: Towards a global Reservoir Assessment Tool for predicting hydrologic impacts and operating patterns of existing and planned reservoirs, Environ. Modell. Softw., 140, 105043, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105043 , 2021.a, b, c

Bonnema, M. and Hossain, F.: Inferring reservoir operating patterns across the Mekong Basin using only space observations, Water Resour. Res., 53, 3791–3810, https://doi.org/10.1002/2016wr019978 , 2017.a, b, c, d, e, f

Bonnema, M. and Hossain, F.: Assessing the potential of the Surface Water and Ocean Topography mission for reservoir monitoring in the Mekong River Basin, Water Resour. Res., 55, 444–461, https://doi.org/10.1029/2018wr023743 , 2019.a, b, c

Bonnema, M., Sikder, S., Miao, Y., Chen, X., Hossain, F., Pervin, I. A., Rahman, S. M. M., and Lee, H.: Understanding satellite-based monthly-to-seasonal reservoir outflow estimation as a function of hydrologic controls, Water Resour. Res., 52, 4095–4115, https://doi.org/10.1002/2015wr017830 , 2016.a, b, c, d

Bonnema, M., Hossain, F., Nijssen, B., and Holtgrieve, G.: Hydropower's hidden transformation of rivers in the Mekong, Environ. Res. Lett., 15, 044017, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab763d , 2020.a

Busker, T., de Roo, A., Gelati, E., Schwatke, C., Adamovic, M., Bisselink, B., Pekel, J.-F., and Cottam, A.: A global lake and reservoir volume analysis using a surface water dataset and satellite altimetry, Hydrol. Earth Syst. Sci., 23, 669–690, https://doi.org/10.5194/hess-23-669-2019 , 2019.a, b, c

Chowdhury, A. K., Dang, T. D., Bagchi, A., and Galelli, S.: Expected benefits of Laos' hydropower development curbed by hydro-climatic variability and limited transmission capacity: Opportunities to reform, J. Water Res. Plann. Man., 146, 05020019, https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001279 , 2020.a

Chowdhury, A. K., Dang, T. D., Nguyen, H. T. T., Koh, R., and Galelli, S.: The Greater Mekong's climate-water-energy nexus: How ENSO-triggered regional droughts affect power supply and CO2 emissions, Earth's Future, 9, e2020ef001814, https://doi.org/10.1029/2020ef001814 , 2021.a

Dang, T. D., Cochrane, T. A., Arias, M. E., Van, P. D. T., and de Vries, T. T.: Hydrological alterations from water infrastructure development in the Mekong floodplains, Hydrol. Process., 30, 3824–3838, https://doi.org/10.1002/hyp.10894 , 2016.a, b

Dang, T. D., Chowdhury, A. F. M. K., and Galelli, S.: On the representation of water reservoir storage and operations in large-scale hydrological models: implications on model parameterization and climate change impact

assessments, Hydrol. Earth Syst. Sci., 24, 397–416, https://doi.org/10.5194/hess-24-397-2020 , 2020a.a, b, c, d, e, f

Dang, T. D., Vu, D. T., Chowdhury, A. K., and Galelli, S.: A software package for the representation and optimization of water reservoir operations in the VIC hydrologic model, Environ. Modell. Softw., 126, 104673, https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104673 , 2020b.a

Didan, K. and Munoz, A. B.: MODIS vegetation index user's guide (MOD13 Series), Vegetation Index and Phenology Lab, The University of Arizona, https://vip.arizona.edu/documents/MODIS/MODIS_VI_UsersGuide_09_18_2019_C61.pdf (last access: 20 May 2021), 2019.a

Ding, T. and Gao, H.: The record-breaking extreme drought in Yunnan Province, Southwest China during spring-early summer of 2019 and possible causes, J. Meteorol. Res., 34, 997–1012, https://doi.org/10.1007/s13351-020-0032-8 , 2020.a

Do, P., Tian, F., Zhu, T., Zohidov, B., Ni, G., Lu, H., and Liu, H.: Exploring synergies in the water-food-energy nexus by using an integrated hydro-economic optimization model for the Lancang-Mekong River Basin, Sci. Total Environ., 728, 137996, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137996 , 2020.a, b, c

Duan, Z. and Bastiaanssen, W. G. M.: Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data, Remote Sens. Environ., 134, 403–416, https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.010 , 2013.a, b

ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: ECMWF Reanalysis v5 (ERA5), https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#! , last access: 20 May 2021.a

EGAT – Electricity Generating Authority of Thailand: Dam Monitoring, http://water.egat.co.th/follow.php , EGAT [data set], last access: 20 January 2022.a

Eyler, B. and Weatherby, C.: New evidence: How China turned off the tap on the Mekong River, The Stimson Center, https://www.stimson.org/2020/new-evidence-how-china-turned-off-the-mekong-tap/ (last access: 20 May 2021), 2020.a, b, c

Eyler, B., Basist, A., Carr, A., and Williams, C.: Mekong dam MZonitor: Methods and Processes, The Stimson Center, https://www.stimson.org/2020/mekong-dam-monitor-methods-and-processes/ (last access: 20 May 2021), 2020.a

FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, and JRC: Harmonized World Soil Database (version 1.2), FAO, IIASA, ISRIC, ISSCAS, and JRC [data set], https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v12/en/ , last access: 20 January 2022.a

Gao, H.: Satellite remote sensing of large lakes and reservoirs: From elevation and area to storage, Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2, 145–157, https://doi.org/10.1002/wat2.1065 , 2015.a

Gao, H., Birkett, C., and Lettenmaier, D. P.: Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing, Water Resour. Res., 48, w09504, https://doi.org/10.1029/2012wr012063 , 2012.a, b, c, d, e, f

Grill, G., Dallaire, C. O., Chouinard, E. F., Sindorf, N., and Lehnera, B.: Development of new indicators to evaluate river fragmentation and flow regulation at large scales: A case study for the Mekong River Basin, Ecol. Indic., 45, 148–159, https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.026 , 2014.a

Grill, G., Lehner, B., Lumsdon, A. E., GrahamKMacDonald, Zarfl, C., and Liermann, C. R.: An index-based framework for assessing patterns and trends in river fragmentation and flow regulation by global dams at multiple scales, Environ. Res. Lett., 10, 145–157, https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/1/015001 , 2015.a

Hanasaki, N., Kanae, S., and Oki, T.: A reservoir operation scheme for global river routing models, J. Hydrol., 327, 22–41, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.11.011 , 2006.a

Hecht, J. S., Lacombe, G., Arias, M. E., Dang, T. D., and Piman, T.: Hydropower dams of the Mekong River Basin: A review of their hydrological impacts, J. Hydrol., 568, 285–300, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.045 , 2019.a, b

Hoang, L. P., van Vliet, M. T. H., Kummu, M., Lauri, H., Koponen, J., Supit, I., Leemans, R., Kabat, P., and Ludwiga, F.: The Mekong's future flows under multiple drivers: How climate change, hydropower developments and irrigation expansions drive hydrological changes, Sci. Total Environ., 649, 601–609, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.160 , 2019.a

IPAD, FAS, and USDA: Global Reservoirs and Lakes Monitor (G-REALM), https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir/ , last access: 20 May 2021.a

IRN: China's Upper Mekong dams endanger millions downstream, International Rivers Network, https://www.irn.org/files/pdf/mekong/MekongFactSheet2002.pdf (last access: 20 May 2021), 2002.a

Johnson, K.: China commits to share year-round water data with Mekong River Commission, Reuters, https://www.reuters.com/article/us-mekong-river/china-commits-to-share-year-round-water-data-with-mekong-river-commission-idINKBN277135 (last access: 20 May 2021), 2020.a, b

Kallio, M. and Fallon, A.: Critical Nature: Are China's dams on the Mekong causing downstream drought? The importance of scientific debate, The Center for Social Development Studies, https://www.csds-chula.org/publications/2020/4/28/critical-nature-are-chinas-dams-on-the-mekong-causing-downstream-drought-the-importance-of-scientific-debate (last access: 20 May 2021), 2020.a

Kattelus, M., Kummu, M., Keskinen, M., Salmivaara, A., and Varis, O.: China's southbound transboundary river basins: A case of asymmetry, Water Int., 40, 113–138, https://doi.org/10.1080/02508060.2014.980029 , 2015.a, b

Keovilignavong, O., Nguyen, T. H., and Hirsch, P.: Reviewing the causes of Mekong drought before and during 2019–20, Int. J. Water Resour. D., https://doi.org/10.1080/07900627.2021.1967112 , in press, 2021.a, b

Kondolf, G. M., Schmitt, R. J. P., Carling, P., Darby, S., Arias, M., Bizzi, S., Castelletti, A., Cochrane, T. A., Gibson, S., Kummu, M., Oeurng, C., Rubin, Z., and Wild, T.: Changing sediment budget of the Mekong: Cumulative threats and management strategies for a large river basin, Sci. Total Environ., 625, 114–134, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.361 , 2018.a

Li, Y., Gao, H., Jasinski, M. F., Zhang, S., and Stoll, J. D.: Deriving high-resolution reservoir bathymetry from ICESat-2 prototype photon-counting lidar and Landsat imagery, IEEE T. Geosci. Remote, 57, 7883–7893, https://doi.org/10.1109/tgrs.2019.2917012 , 2019.a, b

Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., and Burges, S. J.: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res.-Atmos., 99, 14415–14428, https://doi.org/10.1029/94jd00483 , 2014.a

Liu, B., Liao, S., Cheng, C., Chen, F., and Li, W.: Hydropower curtailment in Yunnan Province, southwestern China: Constraint analysis and suggestions, Renew. Energ., 121, 700–711, https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.01.090 , 2018.a

Liu, K.-T., Tseng, K.-H., Shum, C. K., Liu, C.-Y., Kuo, C.-Y., Liu, G., Jia, Y., and Shang, K.: Assessment of the impact of reservoirs in the Upper Mekong River using

satellite radar altimetry and remote sensing imageries, Remote Sensing, 8, 367, https://doi.org/10.3390/rs8050367 , 2016.a, b

Lohmann, D., Nolte-Holube, R., and Raschke, E.: A large-scale horizontal routing model to be coupled to land surface parametrization schemes, Tellus A, 48, 708–721, https://doi.org/10.3402/tellusa.v48i5.12200 , 1996.a

Lohmann, D., Raschke, E., Nijssen, B., and Lettenmaier, D. P.: Regional scale hydrology: I. Formulation of the VIC-2L model coupled to a routing model, Hydrolog. Sci. J., 43, 131–141, https://doi.org/10.1080/02626669809492107 , 1998.a

MRC: The flow of the Mekong, Mekong River Commission Secretariat, Vientiane, https://doi.org/10.52107/mrc.ajhz63 , 2009.a

MRC: Understanding the Mekong River's hydrological conditions: A brief commentary note on the “Monitoring the Quality of Water Flowing Through the Upper Mekong Basin Under Mekong Basin Under Natural (Unimpeded) Conditions” study by Alan Basist and Claude Williams (2020), MRC Secretariat, Vientiane, https://doi.org/10.52107/mrc.ajg4w9 , 2020a.a

MRC: Sub-basins, major rivers and evaluation of the UMB in China, Mekong River Commission, https://www.mrcmekong.org/our-work/topics/hydropower/ (last access: 20 May 2021), 2020b.a, b

MRC – Mekong River Commission: Discharge Time-series, https://portal.mrcmekong.org/time-series/discharge , last access: 20 May 2021.a

Nguyen, H. T. T., Turner, S. W., Buckley, B. M., and Galelli, S.: Coherent streamflow variability in Monsoon Asia over the past eight centuries – links to oceanic drivers, Water Resour. Res., 56, e2020wr027883, https://doi.org/10.1029/2020wr027883 , 2020.a

Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., and Belward, A. S.: High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, Nature, 540, 418–422, https://doi.org/10.1038/nature20584 , 2016.a, b

Pickens, A. H., C.Hansen, M., Hancher, M., Stehman, S. V., Tyukavina, A., Potapov, P., Marroquin, B., and Sherani, Z.: Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series, Remote Sens. Environ., 243, 111792, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111792 , 2020.a

Piman, T., Cochrane, T. A., Arias, M. E., Green, A., and Dat, N. D.: Assessment of flow changes from hydropower development and operations in Sekong, Sesan, and Srepok Rivers of the Mekong Basin, J. Water Resour. Plan. Man., 139, 723–732, https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000286 , 2013.a

Räsänen, T. A., Someth, P., Lauri, H., Koponen, J., Sarkkula, J., and Kummu, M.: Observed river discharge changes due to hydropower operations in the Upper Mekong Basin, J. Hydrol., 545, 28–41, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.12.023 , 2017.a

Sabo, J. L., Ruhi, A., Holtgrieve, G. W., Elliott, V., Arias, M. E., Ngor, P. B., Räsänen, T. A., and Nam, S.: Designing river flows to improve food security futures in the

Lower Mekong Basin, Science, 358, eaao1053, https://doi.org/10.1126/science.aao1053 , 2017.a, b

Schmitt, R. J. P., Bizzi, S., Castelletti, A., Opperman, J. J., and Kondolf, G. M.: Planning dam portfolios for low sediment trapping shows limits for sustainable hydropower in the Mekong, Science Advances, 5, eaaw2175, https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw2175 , 2019.a, b

Schwatke, C., Dettmering, D., Bosch, W., and Seitz, F.: DAHITI – an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry, Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 4345–4364, https://doi.org/10.5194/hess-19-4345-2015 , 2015.a, b

Shin, S., Pokhrel, Y., Yamazaki, D., Huang, X., Torbick, N., Qi, J., Pattanakiat, S., Ngo-Duc, T., and Nguyen, T. D.: High resolution modeling of river-floodplain-reservoir inundation dynamics in the Mekong River Basin, Water Resour. Res., 56, e2019wr026449, https://doi.org/10.1029/2019wr026449 , 2020.a, b, c

Siala, K., Chowdhury, A. K., Dang, T. D., and Galelli, S.: Solar energy and regional coordination as a feasible alternative to large hydropower in Southeast Asia, Nat. Commun., 12, 4159, https://doi.org/10.1038/s41467-021-24437-6 , 2021.a

Soukhaphon, A., Baird, I. G., and Hogan, Z. S.: The impacts of hydropower dams in the Mekong River Basin: A review, Water, 13, 256, https://doi.org/10.3390/w13030265 , 2021.a

Tiezzi, S.: Facing Mekong drought, China release water from Yunnan Dam, The Diplomat, https://thediplomat.com/2016/03/facing-mekong-drought-china-to-release-water-from-yunnan (last access: 20 January 2022), 2016.a

Tortini, R., Noujdina, N., Yeo, S., Ricko, M., Birkett, C. M., Khandelwal, A., Kumar, V., Marlier, M. E., and Lettenmaier, D. P.: Satellite-based remote sensing data set of global surface water storage change from 1992 to 2018, Earth Syst. Sci. Data, 12, 1141–1151, https://doi.org/10.5194/essd-12-1141-2020 , 2020.a

Turner, S. W. D., Doering, K., and Voisin, N.: Data-driven reservoir simulation in a large-scale hydrological and water resource model, Water Resour. Res., 56, e2020WR027902, https://doi.org/10.1029/2020wr027902 , 2020.a

University of California: CHIRPS: Rainfall Estimation from Rain Gauge and Satellite Observation, University of California [data set], https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/ , last access: 20 May 2021.a

USGS – United States Geological Survey: Space Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM, https://earthexplorer.usgs.gov/ (last access: 20 May 2021), 2021a.a

USGS – United States Geological Survey: Landsat Collection-1 Level-2, https://earthexplorer.usgs.gov/ (last access: 20 May 2021), 2021b.a

USGS – United States Geological Survey: Global Land Cover Characterization (GLCC), https://earthexplorer.usgs.gov (last access: 20 January 2022), 2022a. a

USGS – United States Geological Survey: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), https://earthexplorer.usgs.gov/ (last access: 20 January 2022), 2022b.a

Vu, D. T.: Codes and Data of Satellite Observations Reveal 13 Years of Reservoir Filling Strategies, Operating Rules, and Hydrological Alterations in the Upper Mekong River Basin, Zenodo [data set and code], https://doi.org/10.5281/zenodo.6299041 , 2022.a

Warner, J. and Zawahri, N.: Hegemony and asymmetry: Multiple-chessboard games on transboundary rivers, Int. Environ. Agreem.-P., 12, 215–229, https://doi.org/10.1007/s10784-012-9177-y , 2012.a

Wei, J., Wei, Y., Tian, F., Nott, N., de Wit, C., Guo, L., and Lu, Y.: News media coverage of conflict and cooperation dynamics of water events in the Lancang–Mekong River basin, Hydrol. Earth Syst. Sci., 25, 1603–1615, https://doi.org/10.5194/hess-25-1603-2021 , 2021.a

Williams, J. M.: Is three a crowd? River basin institutions and the governance of the Mekong River, Int. J. Water Resoour. D., 7, 720–740, https://doi.org/10.1080/07900627.2019.1700779 , 2020.a

Yu, Y., Zhao, J., Li, D., and Wang, Z.: Effects of hydrologic conditions and reservoir operation on transboundary cooperation in the Lancang-Mekong River Basin, J. Water Res. Plann. Man., 145, 04019020, https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001075 , 2019.a

Yu, Y., Wang, J., Cheng, F., Deng, H., and Chen, S.: Drought monitoring in Yunnan Province based on a TRMM precipitation product, Nat. Hazards, 104, 2369–2387, https://doi.org/10.1007/s11069-020-04276-2 , 2020.a

Yun, X., Tang, Q., Wang, J., Liu, X., Zhang, Y., Lu, H., Wang, Y., Zhang, L., and Chen, D.: Impacts of climate change and reservoir operation on streamflow and flood characteristics in the Lancang-Mekong River Basin, J. Hydrol., 590, 125472, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125472 , 2020.a, b, c

Zhang, S. and Gao, H.: Using the digital elevation model (DEM) to improve the spatial coverage of the MODIS based reservoir monitoring network in South Asia, Remote Sensing, 12, 745, https://doi.org/10.3390/rs12050745 , 2020.a, b

Zhang, S., Gao, H., and Naz, B. S.: Monitoring reservoir storage in South Asia from multisatellite remote sensing, Water Resour. Res., 50, 8927–8943, https://doi.org/10.1002/2014wr015829 , 2014.a, b, c, d, e, f, g

Zhang, Y., Erkyihum, S. T., and Block, P.: Filling the GERD: Evaluating hydroclimatic variability and impoundment strategies for Blue Nile riparian countries, Water Int., 41, 593–610, https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1178467 , 2016.a

Zhao, G. and Gao, H.: Automatic correction of contaminated images for assessment of reservoir surface area dynamics, Geophys. Res. Lett. 45, 6092–6099, https://doi.org/10.1029/2018gl078343 , 2018.a

https://mekong-cuulong.blogspot.com/2022/06