TẠP CHÍ
KHÍ TƯỢNG THỦY VĂN

Check for updates

Bài báo khoa học

Ứng dụng mô hình MODFLOW xác định lượng bổ cập cho khai thác nước dưới đất vùng đồng bằng sông Hồng

Đặng Trần Trung[1]*, Nguyễn Thị Hoa[1], Nguyễn Thanh Kim Huệ[1,3], Trần Đức Thịnh[1], Lê Việt Hùng[2], Phạm Quý Nhân[2]

[1] Trung tâm Cảnh báo và Dự báo tài nguyên nước; dtrung@gmail.com; hoanguyen.dctv@gmail.com; nguyenthanhkimhue95@gmail.com; tranducthinhtv@gmail.com

[2] Đại học Tài nguyên môi trường Hà Nội; lvhung@hunre.edu.vn; pqnhan@hunre.edu.vn

[3] Trường Khoa học Liên ngành và nghệ thuật - Đại học Quốc gia Hà Nội; nguyenthanhkimhue95@gmail.com

*Tác giả liên hệ: dtrung@gmail.com; Tel.: +84–983397833

Ban Biên tập nhận bài: 5/2/2024; Ngày phản biện xong: 4/3/2024; Ngày đăng bài: 25/6/2024

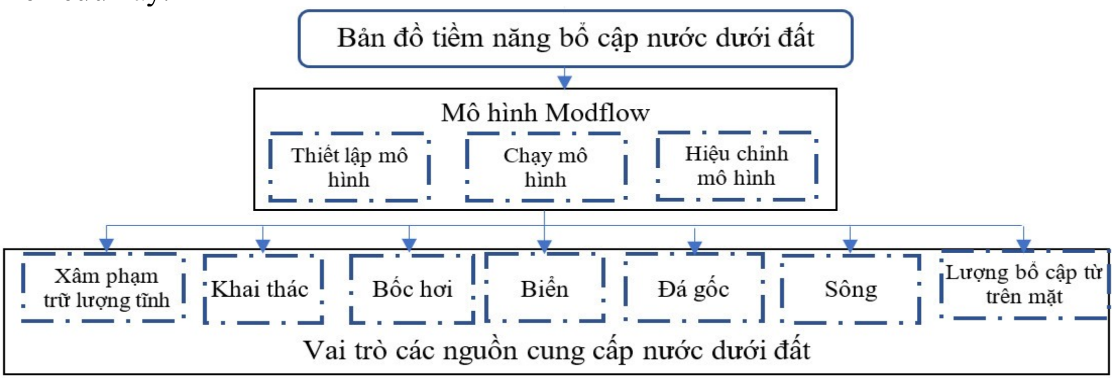
Tóm tắt: Đồng bằng sông Hồng (ĐBSH) đang khai thác khoảng 1,5 triệu m³/ngày chủ yếu trong các tầng chứa nước (TCN) Đệ tứ. Một số địa phương như Hà Nội và Nam Định đã xuất hiện các vấn đề suy giảm mực nước, sụt lún đất, xâm nhập mặn và ô nhiễm NDĐ. Việc bổ cập NDĐ chủ yếu đến từ các nguồn khác nhau, bao gồm mưa, tưới tiêu và hệ thống sông hồ. Mô hình ba chiều (3D) MODFLOW xây dựng ở khu vực nghiên cứu và được hiệu chỉnh với số liệu quan trắc thực tế, kết quả tính toán cân bằng nước từ mô hình MODFLOW cho thấy lượng bổ cập từ mưa và sông đến các TCN Đệ tứ. Trong đó lượng bổ cập tối đa vào mùa mưa (khoảng 68% lượng mưa) và tối thiểu trong mùa khô (khoảng 10% lượng mưa). Trong mùa mưa, hệ thống sông chủ yếu bổ sung cho các TCN Đệ tứ, đóng góp khoảng 9,51-17,36% vào tổng cân bằng nước của các TCN. Dòng chảy từ các TCN nứt nẻ ở rìa bồn đồng bằng đến các TCN Đệ tứ chỉ chiếm một lượng rất nhỏ. Để đảm bảo công tác quản lý, khai thác NDĐ bền vững cần phải xét xét đến vai trò của nguồn bổ cập tự nhiên cho NDĐ cần được đánh giá một cách toàn diện, đây cũng là mục tiêu của nghiên cứu này.

Từ khóa: Bổ cập nước dưới đất; Mô hình MODFLOW; Tầng chứa nước Đệ tứ; Đồng bằng sông Hồng.

1. Giới thiệu

Bổ cập nước dưới đất (NDĐ) là quá trình nước thấm vào đất, tăng lượng trữ lượng NDĐ [1]. Có ba loại bổ cập cho NDĐ: i) Bổ cập trực tiếp xảy ra khi độ ẩm trong đất cao thấm xuống theo phương thẳng đứng đi qua đới không bão hòa và xuống đến mực nước ngầm. ii) Bổ sung gián tiếp xảy ra khi nước thấm qua lòng sông hoặc hồ iii) Bổ cập cục bộ là quá trình thấm của nước xảy ra ở các khu vực cụ thể, như các khớp nối, lỗ hổng, hố sụt, hoặc rãnh nước nhỏ [2, 3]. Bổ cập NDĐ là một thành phần quan trọng trong bài toán cân bằng nước góp phần vào việc khai thác bền vững NDĐ trên một lưu vực sông. Bổ cập cho NDĐ một cách trực tiếp là rất khó xác định [4]. Để đánh giá bổ cập NDĐ cần sử dụng nhiều phương pháp và sau đó so sánh kết quả của từng phương pháp với nhau [5]. Xác định bổ cập của NDĐ vào hệ thống dòng chảy NDĐ khu vực là cần thiết cho mục đích quản lý và kinh tế [6, 7]. Vùng ĐBSH với diện tích trên 21260 km^2 gồm 11 tỉnh thành phố, là một trong hai đồng bằng lớn nhất với mật độ dân số cao là nơi sinh sống của khoảng 22,9 triệu người. Các tầng chứa NDĐ ĐBSH là một trong những nguồn nước chính phục vụ nhu cầu cho sinh hoạt và sản xuất. Các nghiên cứu khác nhau đã đánh giá việc bổ cập NDĐ ở ĐBSH, thường tập trung vào các điểm cụ thể hoặc khu vực nhỏ, chưa có nghiên cứu khu vực toàn diện nào. Nghiên cứu trước đây đã sử dụng mô hình hóa trên MODFLOW để ước lượng bổ sung nước ngầm, gán 87% cho mùa mưa và 56,28% cho mùa khô [8]. Tuy nhiên, trong nghiên cứu này do hạn chế dữ liệu và sự thiếu kiểm chứng từ các phương pháp khác như đồng vị bền. Phương pháp đồng vị bền sau này đã được sử dụng để xác định bổ cập NDĐ ở Đan Phượng, Hà Nội cho các TCN Đệ tứ và cho thấy trong mùa mưa sông cấp cho NDĐ và mùa khô NDĐ thoát ra sông [9]. Đối với các bãi giếng khai thác Hạ Đình, Mai Dịch và Pháp Vân kết quả nghiên cứu trước cho thấy nước sông Hồng đóng góp 50%, 52% và 57% tương ứng cho trữ lượng khai thác [10]. Phương pháp đồng vị Tritium/Helium định tuổi NDĐ đã được sử dụng xác định lượng cấp từ sông Hồng đến các TCN ở khu vực Nam Dư [11]. Sử dụng kết hợp đồng vị và mô hình để đánh giá bổ sung từ sông Hồng và nước mưa đến các TCN Đệ tứ ở khu vực Đan Phượng [12]. Nghiên cứu sử dụng kết hợp MODFLOW và phương pháp dao động mực nước ở các công trình quan trắc để đánh giá tài nguyên NDĐ ở ĐBSH [13]. Gần đây nhất, việc xác định lượng bổ cập và lượng thoát biên đá gốc phần Tây Nam, thành phố Hà Nội bằng phương pháp mô hình MODFLOW cho thấy lượng bổ cập này là rất nhỏ [14]. Kết hợp GIS và viễn thám để phân tích các yếu tố để xây dựng bản đồ phân vùng bổ cập nước ngầm ở ĐBSH [15], nghiên cứu lượng bổ cập được định lượng bằng phương pháp định tuổi bằng đồng vị 3H. Tuy nhiên, vai trò trong cân bằng đối với hệ thống TCN trong nghiên cứu này vẫn còn chưa rõ ràng.

Như vậy từ các nghiên cứu trong và ngoài nước cho thấy để xác định lượng bổ cập cho NDĐ cần thực hiện với nhiều phương pháp khác nhau. Các nghiên cứu trước đây mới chỉ tập trung theo khu vực nhỏ hay theo điểm, chưa có phân vùng bổ cập từ nước mưa cho nước dưới đất trên toàn vùng ĐBSH. Việc kết hợp phương pháp viễn thám, GIS và thủy văn đồng vị để phân vùng tiềm năng bổ cập từ nước mưa cho nước dưới đất và xác định lượng bổ cập vùng ĐBSH là phương pháp mới, khả thi [15]. Từ các kết quả phân vùng tiềm năng bổ cập [15], ứng dụng mô hình MODFLOW là phương pháp hiệu quả và toàn diện trong xác định vai trò của nước mưa, nước sông trong thành phần cung cấp thấm đối với sự hình thành trữ lượng khai thác nước dưới đất các trầm tích Đệ tứ ĐBSH. Mô hình MODFLOW được phát triển bởi tổ chức *US Geological Survey (USGS)* [16] có uy tín trong lĩnh vực nghiên cứu và quản lý tài nguyên nước, đã và đang sử dụng phổ biến tại Việt Nam. Trong đó, mô hình MODFLOW đã được Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước quốc gia (NAWAPI) xây dựng từ năm 2005 cho vùng ĐBSH liên tục được cập nhật và phát triển cho đến nay phục vụ cho công tác thông báo, cảnh báo dự báo tài nguyên nước hiện tại được sử dụng trong nghiên cứu này.



Hình 1. Sơ đồ nghiên cứu bằng mô hình MODFLOW vùng ĐBSH.

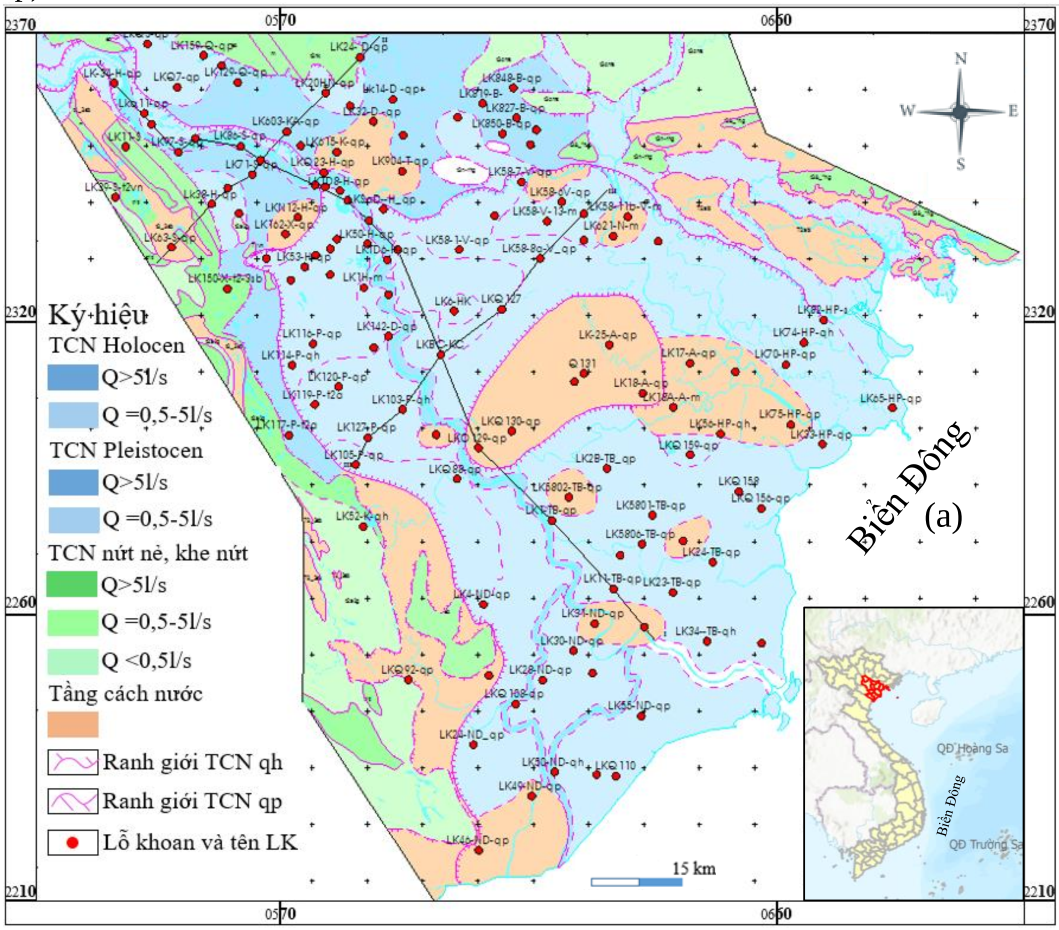
2. Phương pháp nghiên cứu và dữ liệu sử dụng

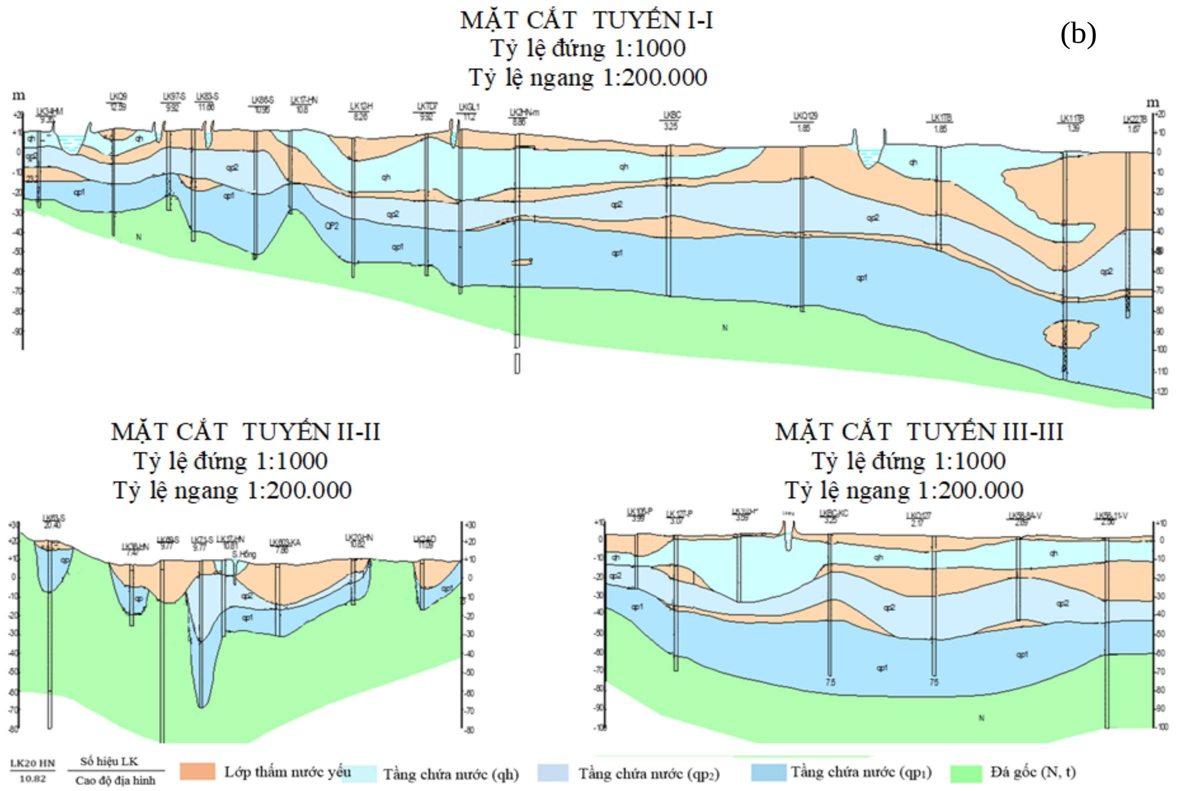
2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

Đặc điểm vị trí địa lý tự nhiên: Khu vực nghiên cứu nằm trong vùng ĐBSH, khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa. Mùa khô chiếm 15% lượng mưa năm (từ tháng XI đến tháng IV) và mùa mưa chiếm 85% lượng mưa năm (từ tháng V đến tháng X). Theo không gian, ĐBSH có lượng mưa trung bình năm biến động rất mạnh so với yếu tố khí tượng khác, giá trị cực tiểu, cực đại của lượng mưa có thể chênh nhau từ hai đến ba lần. Lượng mưa trung bình năm cho toàn vùng giao động từ 1200 mm đến 2700 mm, theo đó là lượng bốc hơi từ 828,2 đến 1057,1 mm/năm. Nhiệt độ thể hiện sự đối lập theo mùa, với nhiệt độ không khí cao nhất đạt từ 35°C đến 39°C, trong khi nhiệt độ trung bình hàng năm ổn định ở mức từ 23°C đến 23,5°C. Đáng chú ý, có sự chênh lệch nhiệt độ trong ngày đáng kể, đo được từ 8°C đến 15°C vào mùa hè và từ 4°C đến 13°C trong mùa đông. Hệ thống sông ngòi ĐBSH phức tạp với mật độ trung bình từ 0,4 đến 0,7 km/km^2 với hai hệ thống sông chính là hệ thống sông Hồng và hệ thống sông Thái Bình.

ĐBSH có địa hình đa dạng bao gồm các khu vực ven biển dưới 1m, các vùng sông bậc thang từ 7-8 m đến 15m, các khu vực đồi núi ở độ cao 50-100 m trong đồng bằng, và các dãy núi cao đến 900 m dọc theo biên giới phía Tây và Tây bắc. Địa hình bị ảnh hưởng bởi hệ thống đứt gãy, đặc biệt là các đứt gãy Tây Bắc - Đông Nam, Đông Bắc - Tây Nam và các đứt gãy theo hướng bắc - nam, điều khiển hoạt động kiến tạo và phân chia đồng bằng. Bờ biển kéo dài khoảng 200 km ở phía Đông và Đông Nam từ Quảng Ninh đến Thanh Hóa, trải qua sự xâm nhập mặn do sóng, thủy triều và hệ thống sông. Sự xâm nhập này ảnh hưởng đến hệ sinh thái ven biển, việc tưới tiêu và các TCN nông.

Đặc điểm địa chất thuỷ văn (ĐCTV): ĐBSH có 2 TCN chính. Trong đó TCN Holoxen (qh) là TCN thứ nhất từ trên xuống, có tuổi trẻ nhất được cấu thành từ các trầm tích cát hạt trung đến hạt mịn của hệ tầng Thái Bình và phần trên của hệ tầng Hải Hưng. TCN Pleistoxen (qp) phân bố rộng khắp đồng bằng, đa phần bị phủ bởi các trầm tích qh trẻ hơn chỉ lộ ra chủ yếu ở phần đỉnh đồng bằng. TCN qp được cấu thành từ các trầm tích hạt thô đến hạt trung. Nằm xen kẽ với các TCN Đệ tứ là các trầm tích thấm nước yếu tuổi Holoxen sớm giữa hệ tầng Hải Hưng ($Q_2^{1\text{-}2}$hh) và các trầm tích cách nước Pleistoxen muộn hệ tầng Vĩnh Phúc (Q_1^3vp).





Hình 2. a) Bản đồ ĐCTV và b) Các mặt cắt ĐCTV ở ĐBSH [17].

2.2. Cơ sở lý thuyết phương pháp

Mô hình số được xây dựng và sử dụng để phân tích, đánh giá vai trò các nguồn cung cấp thấm đối với sự hình thành trữ lượng NDĐ. Sự biến đổi độ cao mực nước dưới đất được mô tả bằng một phương trình đạo hàm riêng [16] duy nhất sau:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(K_{xx}\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_{yy}\frac{\partial h}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_{zz}\frac{\partial h}{\partial z}\right)\pm W = S_s\frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

Trong đó $K_{xx} = K_{xx}$ (x, y, z), $K_{yy} = K_{yy}$ (x, y, z), $K_{zz} = K_{zz}$ (x, y, z) là các hệ số thấm của TCN theo các phương x, y, z; H là chiều cao mực nước dưới đất tại vị trí (x, y, z) ở thời điểm t; W là giá trị bổ cập hoặc thoát đi của nước nước dưới đất tính tại vị trí (x, y, z) ở thời điểm t, W = W(x, y, z, t); $S_s = S_s$(x, y, z) là hệ số nhả nước.

Phương trình (1) được giải với các điều kiện biên:

+ Điều kiện biên loại I (biên Dirichlet) là các ô mà mực nước được xác định trước và giá trị này không đổi trong suốt thời gian tính toán H = h(t).

+ Điều kiện biên loại II (biên lưu lượng Neuman) là các ô mà lưu lượng dòng chảy qua biên được xác định trước trong suốt bước thời gian tính toán Q = q(t).

+ Điều kiện biên loại III (biên hỗn hợp Cauchy) là điều kiện biên mà lưu lượng trên biên phụ thuộc vào mực nước Q = f(H).

2.3. Dữ liệu đầu vào và xây dựng mô hình vùng ĐBSH

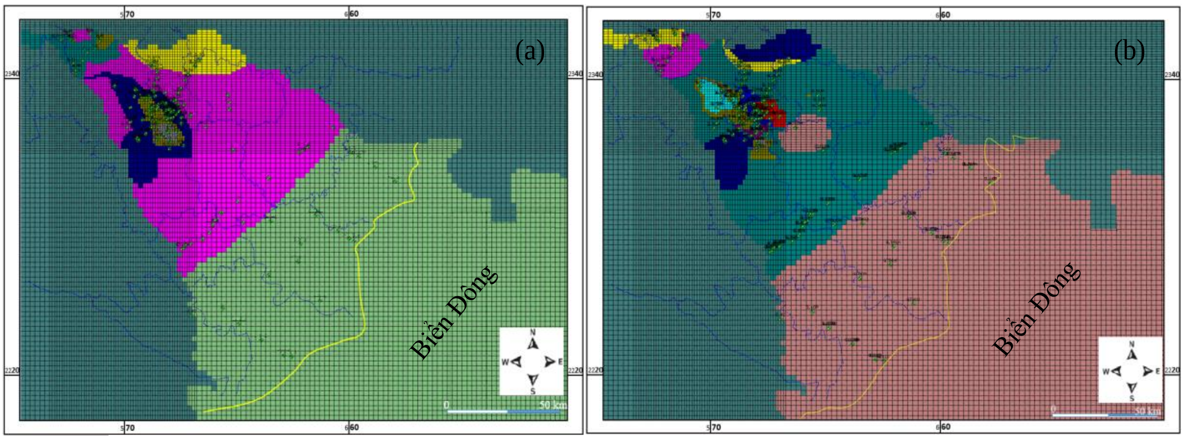
Để đánh giá vai trò của việc bổ sung nước ngầm trực tiếp đối với việc khai thác nước ngầm vùng ĐBSH, chúng ta dựa vào dữ liệu nghiên cứu gần đây làm nguồn đầu vào cơ bản để xây dựng mô hình dòng chảy nước ngầm. Các nguồn dữ liệu này bao gồm:

- Dữ liệu bản đồ ĐCTV tỷ lệ 1:200.000 (hình 1) [17].
- Dữ liệu về bề mặt địa hình: Trên mô hình, bề mặt địa hình được xây dựng dựa trên các điểm độ cao của bản đồ địa hình tỷ lệ 1:50.000 và các điểm cao độ của các giếng quan trắc và các giếng thăm dò được điều tra trước đây.

- Dữ liệu về hiện trạng khai thác NDĐ hiện nay (nguồn: Cục quản lý tài nguyên nước - DWRM).
- Dữ liệu về điều tra NDĐ tại các tỉnh vùng ĐBBB (nguồn: NAWAPI).
- Dữ liệu về bổ cập nước ngầm được tính toán và xác định bởi [15].
- Dữ liệu về bổ cập từ biên đá gốc và tương tác thuỷ lực giữa nước sông Hồng và NDĐ ở Hà Nội và vùng lân cận được nghiên cứu bởi [14].
- Đánh giá toàn diện về ảnh hưởng của đô thị hoá đến bổ cập NDĐ ở Hà Nội được nghiên cứu bởi [18].

Dữ liệu trên được sử dụng làm nền tảng và cơ sở cho mô hình dòng chảy NDĐ đã được xây dựng [19]. Mô hình được xây dựng bằng phần mềm Visual MODFLOW của hãng Schlumberger [20, 21] và được chỉnh lý trên cơ sở số liệu quan trắc quốc gia và địa phương (Hà Nội, Nam Định và Thái Bình) và một số các kết quả điều tra mới nhất gần đây. Sau khi hiệu chỉnh mô hình, tính toán bổ cập cho NDĐ được thực hiện thông qua gói Zone Budget trong mô hình. Kết quả đánh giá cân bằng nước và các kịch bản dự báo làm rõ vai trò của các nguồn bổ cập NDĐ trong quá trình hình thành trữ lượng khai thác NDĐ vùng ĐBSH.

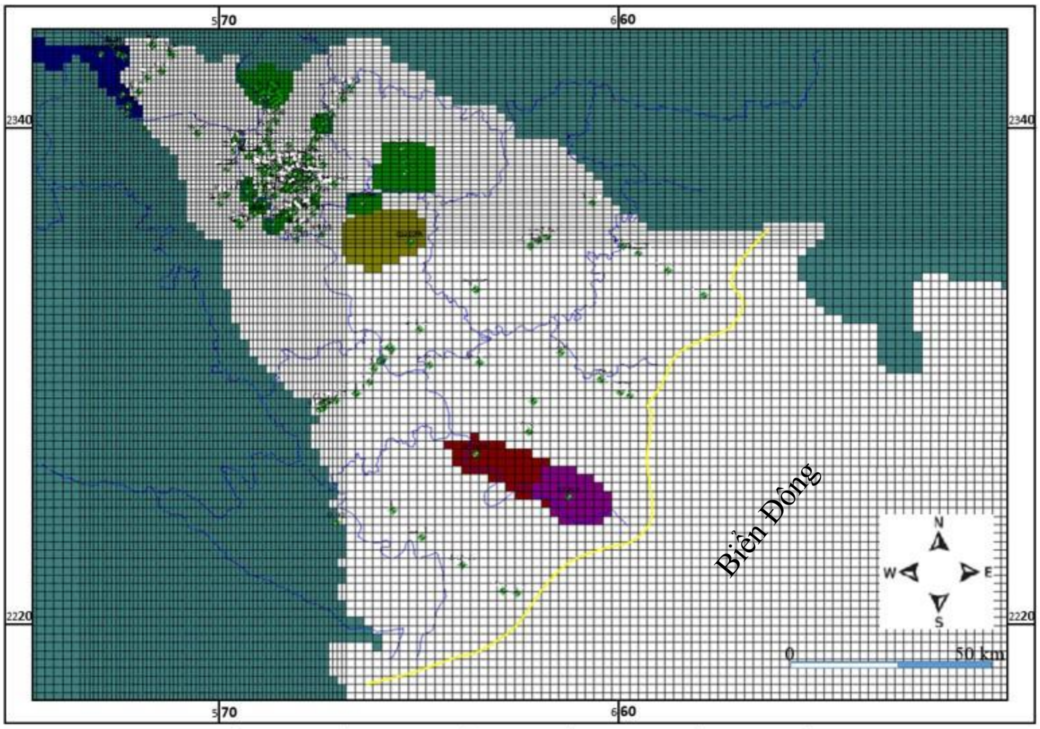
- Thiết kế lưới cho mô hình: Diện tích lập mô hình là 14860 km^2 được nới rộng ra so với mô hình cũ nhằm mục đích mở rộng biên ở phía Đông TCN Pleistoxen. Theo một số kết quả điều tra cho thấy phía Đông của vùng ĐBSH, TCN Pleistoxen mở rộng ra về phía biển chứ không bị giới hạn bởi đường bờ biển do đó việc mở rộng mô hình là cần thiết. Lưới của mô hình được chia thành 162 hàng và 223 cột với kích thước hình vuông là 1000×1000m, riêng khu vực Hà Nội, lưới được chia với kích thước là 500×500m để đảm bảo độ chính xác do khu vực này nhiều bãi giếng khai thác nước tập trung.
- Dữ liệu về phân tầng địa chất thủy văn: Dữ liệu được sử dụng để phân chia các lớp của mô hình bao gồm các 728 lỗ khoan điều tra giai đoạn trước [15]. Cấu trúc phân tầng ĐCTV được chia thành 4 lớp trong mô hình, trong đó gồm lớp thấm nước yếu bề mặt (lớp 1), TCN Holoxen (qh) (lớp 2), lớp thấm nước yếu bề mặt (lớp 3) và TCN Pleistoxen (qp) (lớp 4).
- Các thông số ĐCTV: Các thông số ĐCTV bao gồm hệ số thấm (K) và hệ số nhả nước (S) được gán trong mô hình dựa theo các nghiên cứu trước đó đã được cập nhật gần đây nhất [15]. Đối với TCN Holoxen, hệ số thấm nằm trong khoảng 0,02-158 m/ngày, trung bình 26,1 m/ngày. Đối với TCN Pleistoxen, hệ số thấm nằm trong khoảng 0,5-184 m/ngày, trung bình 34,75 m/ngày.



	$K_x=K_y=10K_z$		$K_x=K_y=10K_z$		$K_x=K_y=10K_z$		$K_x=K_y=10K_z$
	0.34		27.86		$5x10^{-4}$		$1.68x10^{-4}$
	100.0		13.49		4.0		30.0
	0.02		$363x10^{-4}$		150.0		10^{-4}
	34.76		1.0		40.0		27.40
	$48x10^{-4}$		102.4		60.0		10^{-3}

(c)

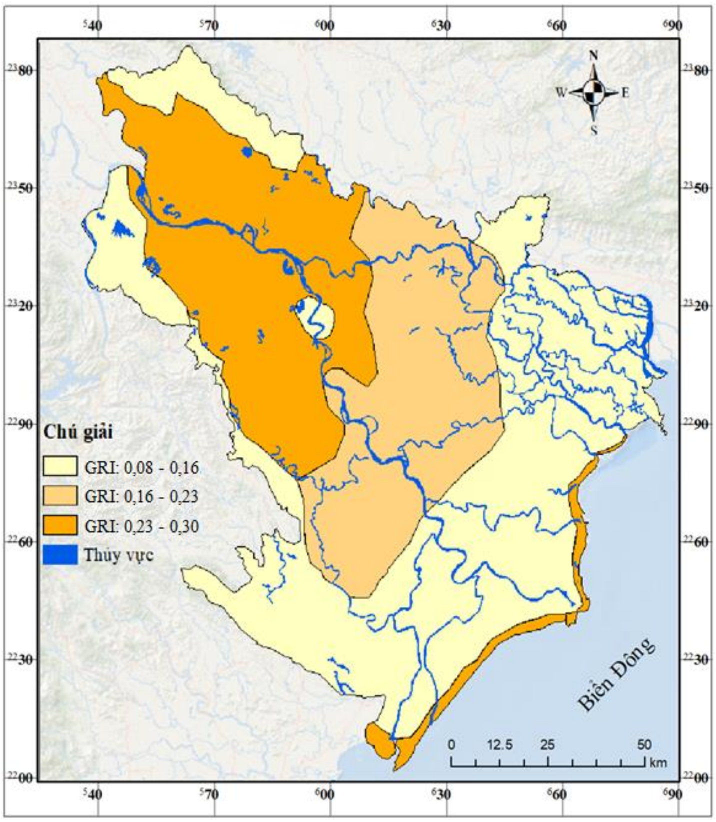
Hình 3. Hệ số thấm K_x, K_y, K_z tương ứng cho TCN: (a) Holoxen, (b) Pleistoxen, (c) Chỉ dẫn màu hệ số thấm.



Vùng	S_s(1/m)	S_y	Eff.Por	Tot.Por
	1E-5	0,2	0,15	0,3
	1E-8	0,2	0,15	0,3
	1E-7	0,15	0,15	0,3
	0,0001	0,15	0,20	0,3
	0,0005	0,2	0,25	0,3
	0,0012	0,2	0,25	0,3
	0,006	0,2	0,25	0,3

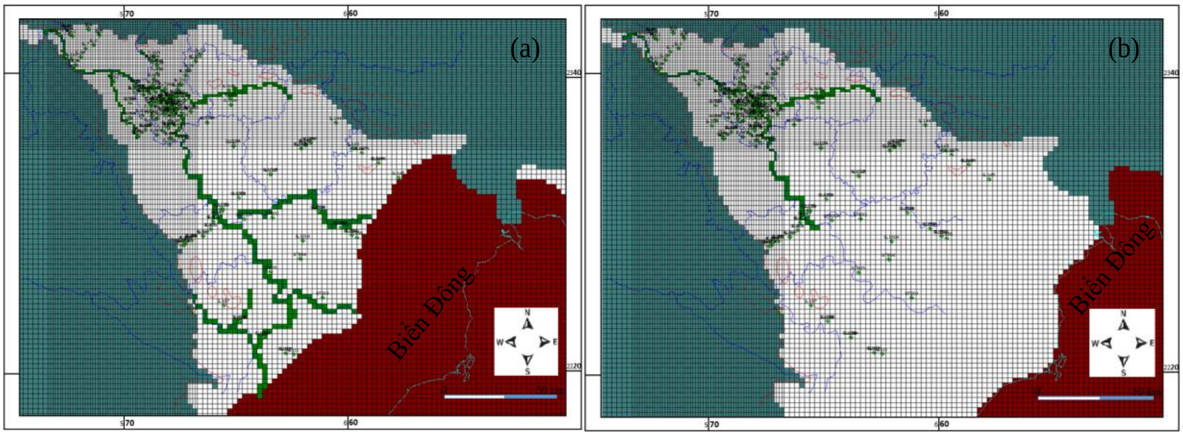
Hình 4. Chỉ số nhả nước đàn hồi (Ss) và trọng lực (Sy) cho TCN Pleistoxen.

- Biên bổ cập (RECHARGE): dựa trên nghiên cứu của [15] bằng cách dựa trên kết quả ảnh viễn thám đối với các yếu tố ảnh hưởng đến bổ cập cho NDĐ và chồng chập các lớp ảnh bằng kỹ thuật GIS. Và để xác định trọng số một cách khác quan các yếu tố ảnh hưởng đến bổ cập NDĐ thông qua mô hình phân tích thứ bậc AHP [22]. Bên cạnh đó còn kiểm chứng lại kết quả bằng phương pháp đồng vị phóng xạ ^{3}H để đảm bảo chính xác.

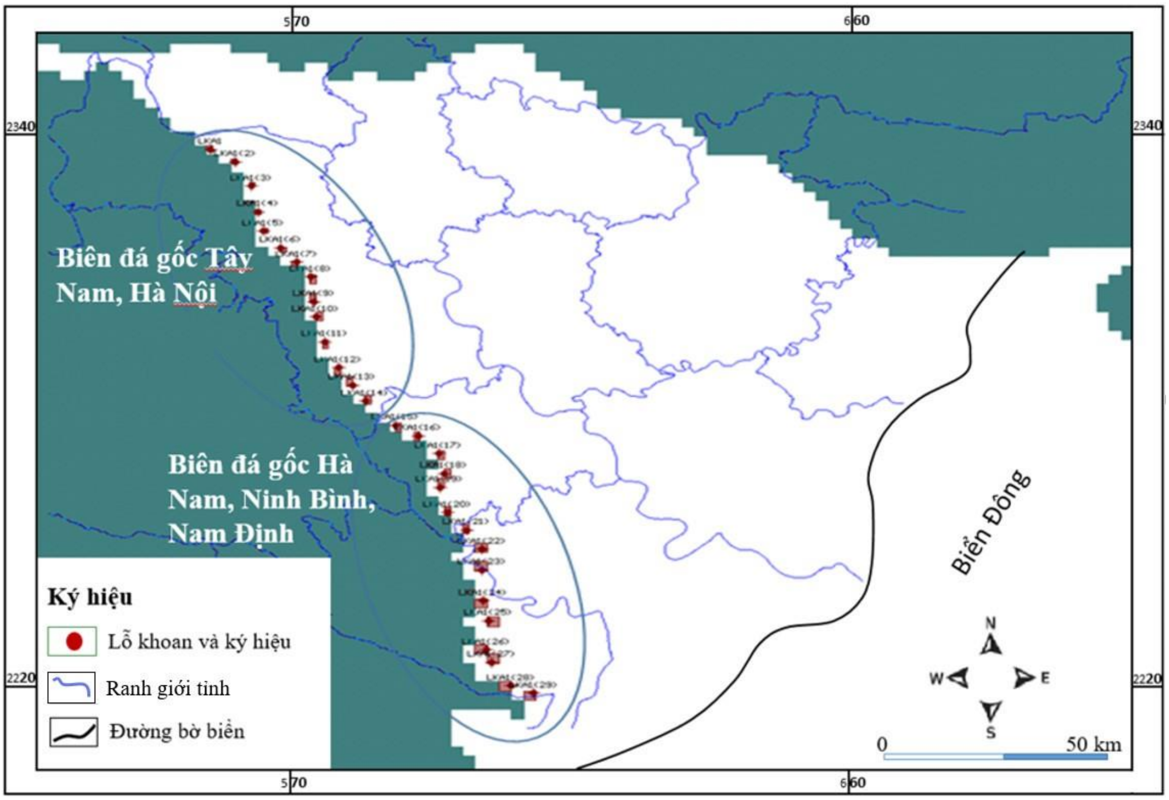


Hình 5. Phân vùng bổ cập cho NDĐ cho vùng ĐBSH dựa trên chỉ số GRI được phân chia thành 3 khoảng: 0,08-0,16; 0,16-0,23 và 9,23-0,30. Các khoảng cách này tương ứng với lượng bổ cập cho NDĐ 188, 372 và 429 mm/năm [15].

- Các điều kiện biên: Điều kiện biên của mô hình đã được chỉ ra ở mục 3.1, kết hợp với các nghiên cứu mới nhất. Đối với việc mô phỏng hệ thống sông Hồng - Thái bình được mô phỏng bằng điều kiện biên tổng hợp (*General Head Boundary*), sức cản lòng sông được xác định theo [8, 14]. Biên bốc hơi sử dụng dữ liệu khí tượng tại các trạm thuỷ văn. Đối với điều kiện biên đá gốc được xác định dựa theo nghiên cứu gần đây [14]. Điều kiện biên biển dựa theo giả thiết của [23] với giả thiết rằng TCN mở rộng ra biển do đặc điểm độ cao và chiều sâu phân bố của đáy TCN Pleistoxen và điều này dẫn đến mô phỏng điều kiện biên loại I, mực nước xác định (*Constant Head* - *CH*) với giá trị mực nước dựa theo mực nước biển tại trạm Hòn Dấu ở ngoài khơi [19].



Hình 6. Biên biển và biên sông khu vực nghiên cứu: (a) TCN Holoxen, (b) TCN Pleistoxen.

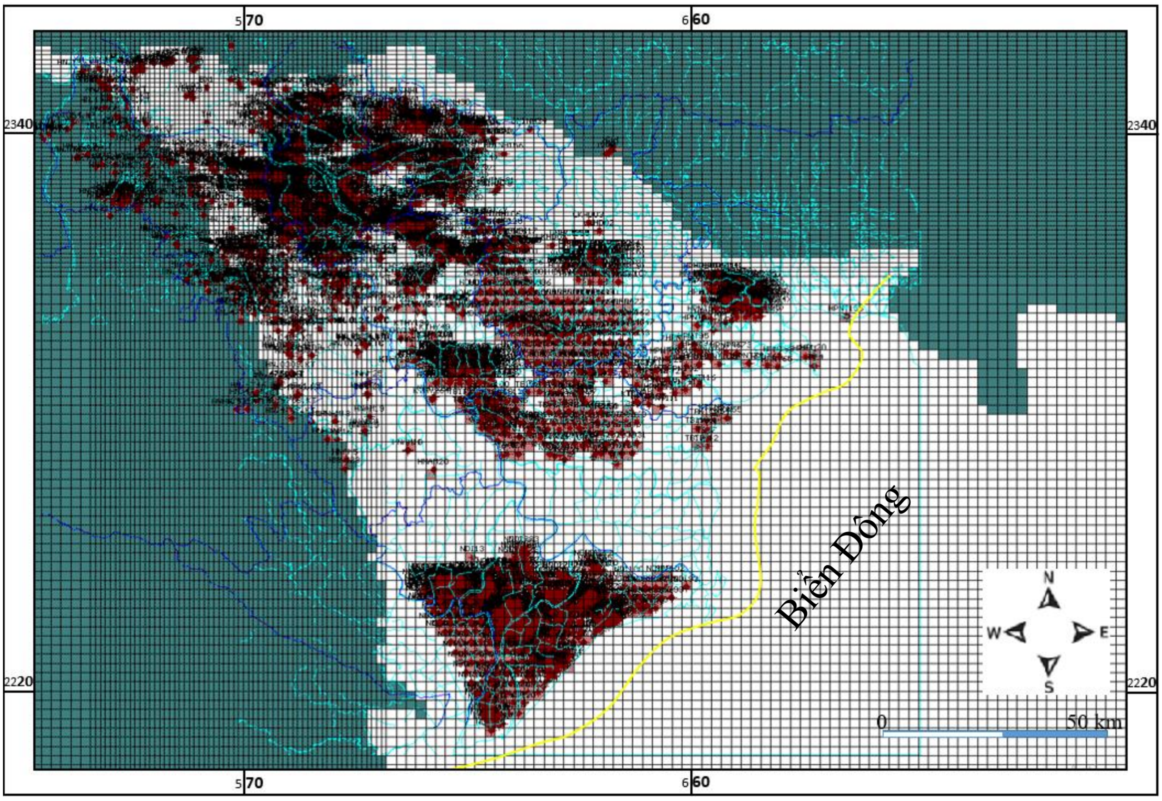


Hình 7. Biên đá gốc khu vực nghiên cứu.

- Hiện trạng khai thác NDĐ: Tình hình khai thác NDĐ từ 2005 đến 2018 được minh hoạ trong hình 7 và bảng 1 cung cấp chi tiết về lưu lượng khai thác NDĐ toàn ĐBSH. Tổng lượng khai thác NDĐ vùng ĐBSH vào khoảng 1.500.000 m^3/day.

Bảng 1. Hiện trạng khai thác NDĐ vùng ĐBSH [19].

TT	Tỉnh/Thành Phố	Lưu lượng khai thác (m^3/day)		
		Khai thác cho công nghiệp	Khai thác cho sinh hoạt	Tổng cộng
1	Hà Nội	670931	124180	795111
2	Vĩnh Phúc	25900	52361	78261
3	Hưng Yên	114490	7800	122290
4	Bắc Ninh	42000	55118	97118
5	Hải Dương	18200	64259	82459
6	Hà Nam	5508	24492	30000
7	Hải Phòng	-	-	34000
8	Thái Bình	9546	39454	49000
9	Nam Định	-	-	120000

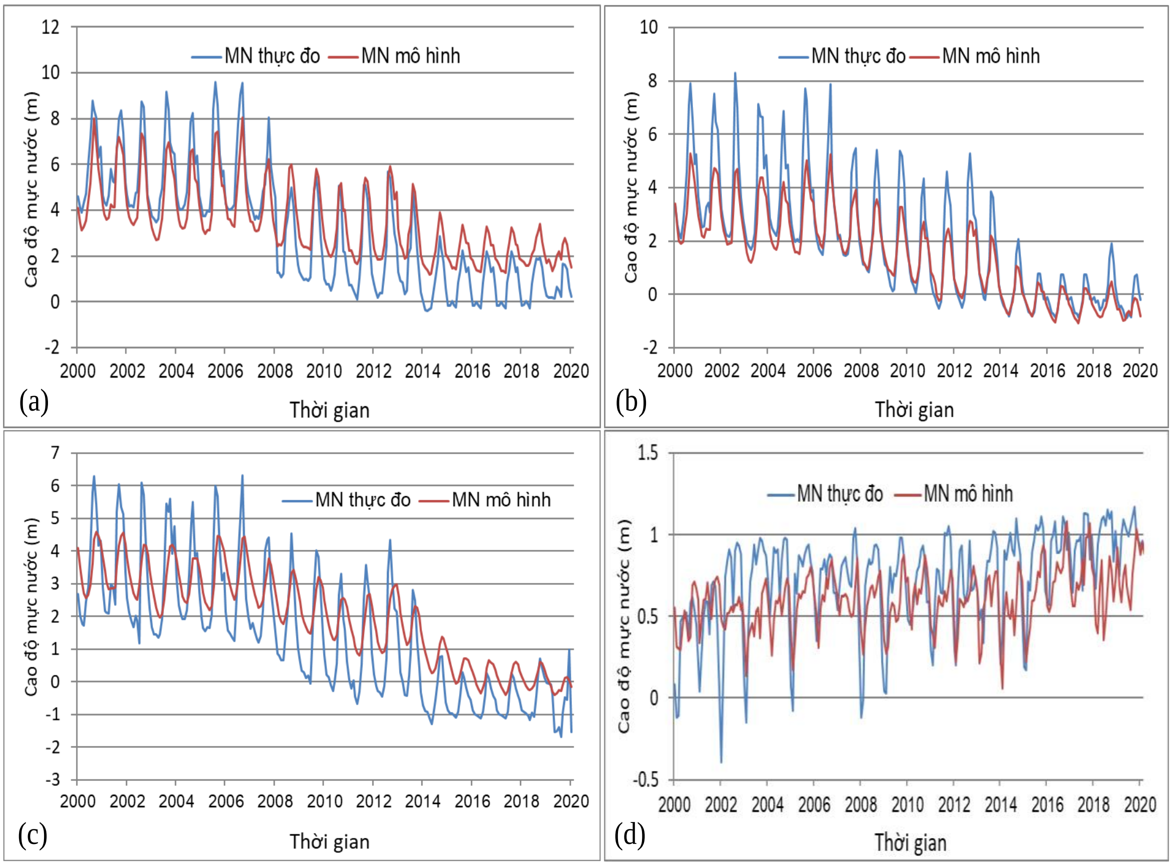


Hình 8. Phân bố các giếng khai thác NDĐ (các giếng khai thác được biểu thị bằng các chấm đỏ) [19].

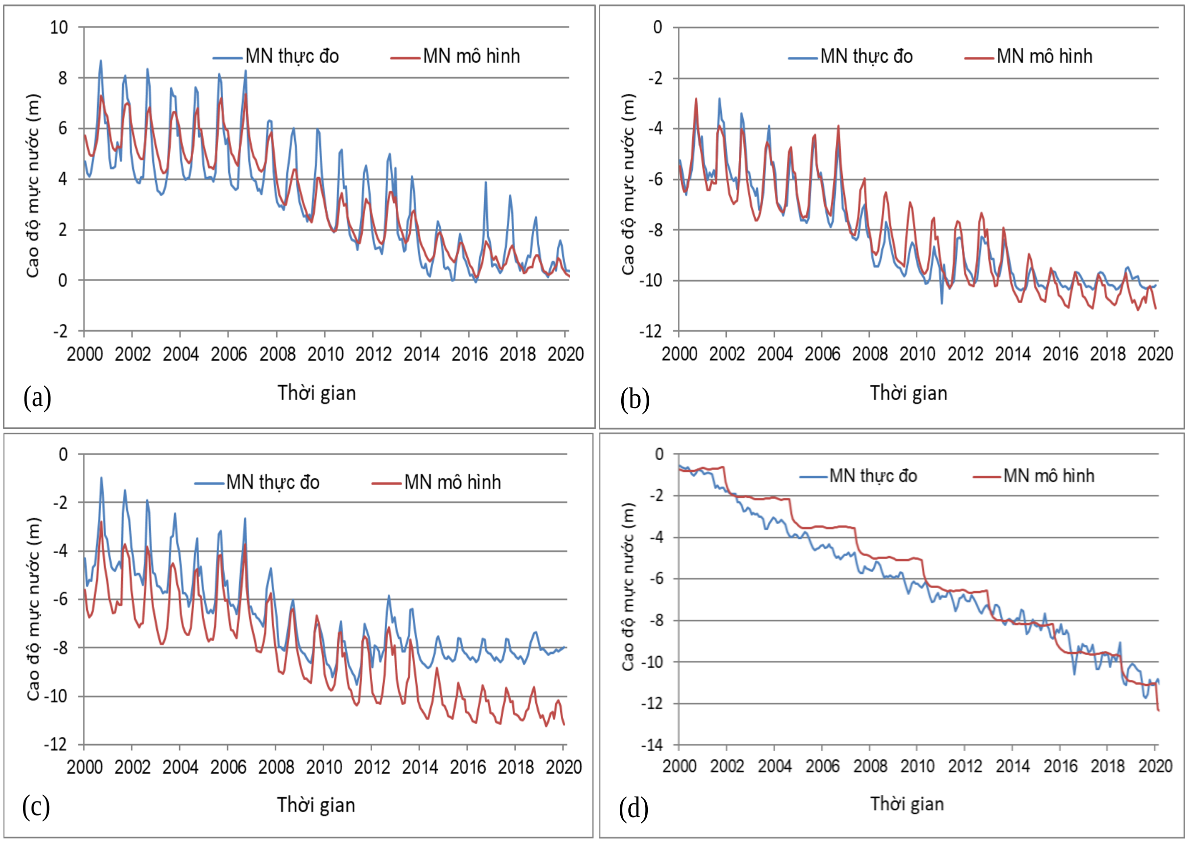
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Kết quả chỉnh ký mô hình

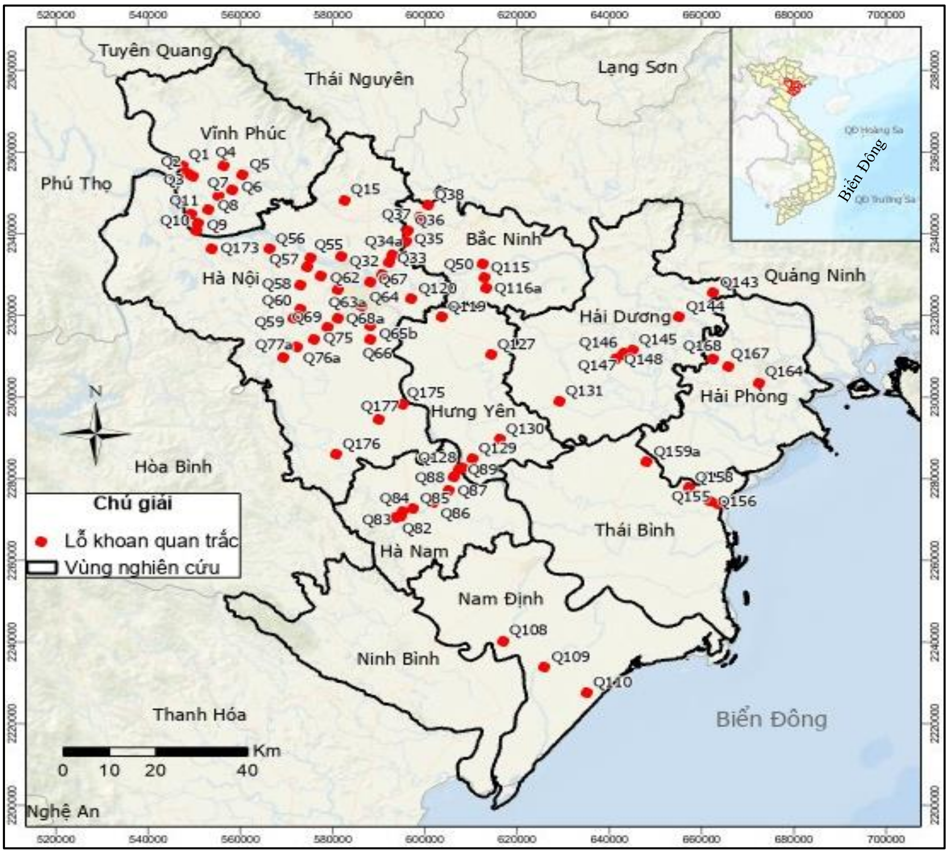
Mô hình được hiệu chỉnh bằng cách so sánh mực nước ngầm tính toán từ mô hình với mực nước quan trắc được thực tế. Việc hiệu chỉnh được thực hiện với bài toán không ổn định và sử dụng các công trình quan trắc quốc gia và địa phương (Hà Nội, Nam Định, Thái Bình) từ 1/1996 đến 1/2020. Số liệu quan trắc được sử dụng để hiệu chỉnh gồm 128 công trình quan trắc trong đó có 88 công trình quan trắc tầng Pleistoxen và 40 công trình quan trắc trong tầng Holoxen (Hình 10). Dữ liệu quan trắc được tổng hợp định kỳ và lưu trữ tại Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước quốc gia (NAWAPI) [24]. Kết quả so sánh mực nước (MN) theo thời gian tại các công trình quan trắc tầng Holoxen (Hình 8, Hình 11) và Pleistoxen (Hình 9, Hình 11) được trình bày ở dưới đây, đánh giá sai số giữa mực nước mô hình và mực nước quan trắc thực tế.



Hình 9. Sai số giữa mực nước mô hình và mực nước quan trắc thực tế trong TCN Holoxen tại các công trình quan trắc: (a) P.33b; (b) P.76b; (c) P.77b; (d) Q.108.

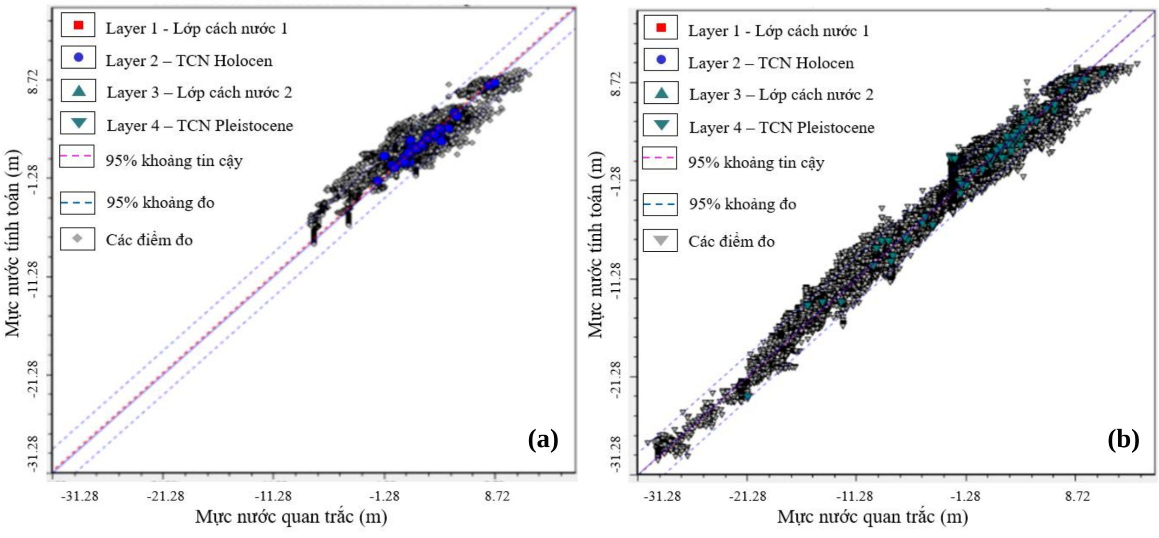


Hình 10. Sai số giữa mực nước mô hình và mực nước quan trắc thực tế trong TCN Pleistoxen tại các công trình quan trắc: (a) Q.23; (b) P.32a; (c) P.35a; (d) Q.109a.



Hình 11. Các công trình quan trắc được sử dụng để chính lý mô hình vùng ĐBBB.

Kết quả đánh giá sai số giữa mực nước thực đo và mực nước quan trắc ở các công trình quan trắc vùng ĐBSH được thể hiện ở hình 11.



Hình 12. Đánh giá sai số giữa mực nước quan trắc thực tế và mô hình trong các TCN vùng ĐBSH: (a) TCN Holoxen; (b) TCN Pleistoxen.

Kết quả đánh giá sai số mô hình cho TCN Holoxen cho thấy sai số lớn nhất là 4,4m tại công trình Q.64, sai số nhỏ nhất là 0,0m tại công trình Q.85, sai số trung bình là 0,197m và sai số trung bình tuyệt đối là 0,861, sai số trung bình quân phương NRMS là 5,9%. Đối với TCN Pleistoxen tại các công trình quan trắc cho thấy sai số lớn nhất là 4,96m tại công trình quan trắc P.73a, sai số nhỏ nhất 0,0m tại Q.164a, sai số tương đối 0,067m, sai số tuyệt đối là 0,906m, sai số quân phương NRMS 2,621%.

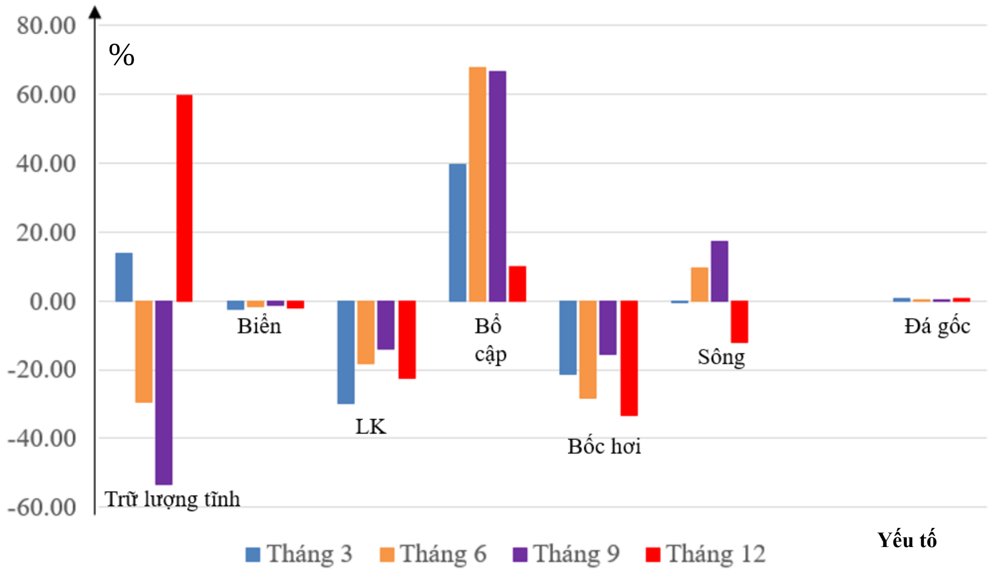
Phần lớn công trình chỉnh lý nằm trong khoảng tin cậy 95%. Mặc dù một số công trình thể hiện giá trị sai số tuyệt đối đáng kể, nhưng giá trị tương đối vẫn nằm trong giới hạn chấp nhận được, đảm bảo ngưỡng cho phép. Đáng chú ý, những công trình này nằm gần các bãi giếng khai thác, nơi mà sự chênh lệch giữa dữ liệu quan trắc và mô hình thường xuyên là đáng kể. Do đó, việc đánh giá sai số mô hình xác nhận rằng tất cả các tham số đều đáp ứng tiêu chí độ tin cậy đã thiết lập. Việc đánh giá sai số mô hình chỉ ra rằng tất cả các tham số đều thoả mãn tiêu chí độ tin cậy của mô hình. Tuy nhiên, khi so sánh với các mô hình trước đây được phát triển cho ĐBSH [8], mô hình hiện tại thể hiện độ tin cậy cao hơn.

3.2. Đánh giá vai trò bổ cập cho NDĐ trong việc hình thành trữ lượng khai thác vùng ĐBSH

Sau khi hiệu chỉnh mô hình, gói Zone Budget được sử dụng để tính toán cân bằng nước một cách có hệ thống cho cả TCN Holoxen và Pleistoxen trong toàn bộ vùng ĐBSH. Thông qua việc phân tích các thành phần được tính toán trong cân bằng nước, xác định được lượng bổ cập NDĐ đối với việc hình thành trữ lượng khai thác NDĐ trong khu vực. Kết quả tính toán cân bằng nước cho hệ thống TCN được thể hiện ở tháng 3, tháng 6, tháng 9 và tháng 12 (xem bảng 2, hình 12). Trong đó từ tháng 10 tới tháng 3 năm sau tương ứng với mùa khô, trong khi đó từ tháng 4 đến tháng 9 là tương ứng với mùa mưa.

Bảng 2. Thành phần tham gia vào cân bằng nước trong trầm tích Đệ tứ vùng ĐBSH (%), lượng chảy vào và chảy ra được thể hiện bằng dấu (+) và dấu (-) tương ứng.

Nguồn / Tháng	Trữ lượng tĩnh	Biển	LK	Bổ cập	Bốc hơi	Sông	Đá gốc
Tháng 3	13,94	-2,47	-29,86	39,47	-21,32	-0,48	0,71
Tháng 6	-29,32	-1,52	-18,38	67,63	-28,34	9,51	0,43
Tháng 9	-53,56	-1,25	-13,91	66,67	-15,63	17,36	0,32
Tháng 12	59,74	-1,86	-22,67	9,75	-33,24	-12,25	0,53



Hình 13. Thành phần tham gia vào cân bằng nước TCN Đệ tứ theo thời gian. Trong đó lượng chảy vào và lượng chảy ra được thể hiện bằng dấu (+) và dấu (-).

Hình 13 minh hoạ các thành phần tham gia vào cân bằng nước trong hệ thống các TCN Đệ tứ. Các giá trị dương biểu thị dòng chảy vào đóng góp cho hệ thống TCN, trong khi các giá trị âm thể hiện dòng chảy ra, Dựa theo kết quả trên có thể rút ra một số kết luận như sau:

- Lượng bổ cập từ nước mưa, nước tưới, nước trên mặt cho NDĐ trầm tích Đệ tứ vào tất cả các mùa trong năm, vào mùa mưa lớn nhất lên đến 67,63% tổng lượng bổ cập, tương ứng 5.607.868 m^3/ngày. Ngược lại vào mùa khô, lượng bổ cập này còn 9,75%, tương ứng

664.326m3/ngày. So sánh giữa lượng bổ sung cho NDĐ và lượng khai thác trong khu vực có thể thấy được sự chênh lệch đáng chú ý đặc biệt là vào mùa khô. Trong giai đoạn này, lượng nước ngầm khai thác lớn hơn lượng bổ cập NDĐ trực tiếp tương ứng, do đó chỉ có thể xâm phạm vào trữ lượng tĩnh trong các TCN làm suy giảm mực NDĐ đặc biệt ở những khu vực ở cách xa sông. Sự xuất hiện các phễu hạ thấp mực nước trong vùng ĐBSH càng làm rõ cho vấn đề này.

- Lượng xâm phạm trữ lượng tĩnh do thành phần khai thác chiếm 13,91% đến 29,86% và do thành phần bốc hơi chiếm 13,94%-59,74%, tương ứng từ 705.693 m^3/ngày đến 4.085.660 m^3/ngày.
- Lượng cấp nước sông cho NDĐ trầm tích Đệ tứ chỉ xảy ra chủ yếu vào mùa mưa chiếm từ 9,51% -17,36%, tương ứng từ 788.378 m^3/ngày tới 1.928.548 m^3/ngày.
- Lượng bổ cập từ biên đá gốc ven rìa đồng bằng, lượng nước thoát ra biển xảy ra ở tất cả các mùa trong năm nhưng với lượng không lớn.

3.3. Thảo luận

Đối với các kết quả nghiên cứu bổ cập trước đây cho vùng ĐBSH, lượng bổ cập từ nước mưa vào trầm tích Đệ tứ chiếm 56,28% (vào mùa khô) và 84,11% (vào mùa mưa) [8]. Tuy nhiên, nghiên cứu này chưa có số liệu để kiểm chứng trực tiếp lượng thấm này do đó độ tin cậy chưa cao. Sau này các nghiên cứu và kỹ thuật đồng vị bền phát triển, việc ứng dụng đồng vị bền xác định lượng bổ cập cho NDĐ ngày càng phổ biến tuy nhiên mới chỉ có thể áp dụng cho những khu vực nhỏ. Nghiên cứu [15] đã kết hợp kỹ thuật GIS, viễn thám để phân vùng bổ cập cho nước dưới đất và có chỉnh lý so sánh với các kết quả đồng vị trước đây. Kết quả nghiên cứu trong bài báo đã sử dụng bản đồ phân vùng bổ cập từ viễn thám, GIS đã được hiệu chỉnh với các kết quả đồng vị và kết quả xác định lượng chảy vào từ biên đá gốc [14] để làm thông số đầu vào cho mô hình tính toán cân bằng nước cho toàn vùng ĐBSH. Kết quả cho thấy lượng bổ cập tối đa vào mùa mưa (khoảng 68% lượng mưa) và tối thiểu trong mùa khô (khoảng 10% lượng mưa) ngoài ra vào mùa mưa, hệ thống sông bổ sung cho các TCN Đệ tứ khoảng 9,51-17,36% vào tổng cân bằng nước của các TCN Đệ tứ. Có thể thấy sự khác biệt khá rõ giữa lượng bổ cập xác định bởi nghiên cứu trước đây [8] và kết quả nghiên cứu này do thời điểm trước đó việc ứng dụng các kỹ thuật đồng còn hạn chế, thiếu các số liệu để kiểm chứng. Như vậy, có thể thấy rằng nghiên cứu này đã kế thừa các kết quả nghiên cứu trước đây bằng các thí nghiệm trực tiếp để làm thông số đầu vào và hiệu chỉnh mô hình do đó cho kết quả tin cậy cao hơn.

4. Kết luận

Nghiên cứu đánh giá xác định nguồn bổ cập cho NDĐ là rất quan trọng cho việc quản lý khai thác NDĐ hiệu quả và bền vững. Các nghiên cứu định lượng gần đây về các nguồn bổ cập NDĐ ở các khu vực khác thuộc vùng ĐBSH hỗ trợ cho việc đánh giá chính xác hơn về ảnh hưởng của chúng trên quy mô đồng bằng thông qua việc áp dụng phương pháp mô hình.

Các nguồn nước đóng góp chính cho hệ thống các TCN Đệ tứ vùng ĐBSH bao gồm nguồn nước mưa, nước tưới và nước sông. Thêm vào đó là dự bổ cập cho TCN từ các đá gốc nứt nẻ ở rìa đồng bằng là những nguồn bổ cập đáng kể.

Sự bổ cập NDĐ đối với các TCN trầm tích Đệ tứ trong ĐBSH thể hiện sự biến đổi theo thời gian và không gian. Lượng bổ cập từ nước mưa, nước tưới, nước trên mặt cho nước dưới đất trầm tích Đệ tứ được diễn ra tất cả các mùa trong năm, lớn nhất vào mùa mưa, chiếm đến 67,63% tổng lượng bổ cập tương ứng 5.607.868 m^3/ngày. Ngược lại vào mùa khô, lượng bổ cập này còn 9,75%, tương ứng 664.326 m^3/ngày. Lượng bổ cập từ nước sông cho NDĐ trầm tích Đệ tứ chỉ xảy ra chủ yếu vào mùa mưa chiếm từ 9,51-17,36%, tương ứng từ 788.378m3/ngày tới 1928548 m^3/ngày. Lượng bổ cập từ biên đá gốc ven rìa đồng bằng, lượng nước thoát ra biển xảy ra ở tất cả các mùa trong năm nhưng với lượng không lớn.

Việc khai thác nước ngầm vùng ĐBSH duy trì ổn định quanh năm. Trong mùa khô, trữ lượng khai thác chủ yếu lấy ra từ trữ lượng tĩnh trong TCN do thành phần khai thác chiếm 13,91% đến 29,86% và do thành phần bốc hơi chiếm 13,94-59,74%, tương ứng từ 705.693 m^3/ngày đến 4.085.660 m^3/ngày.

Một số hạn chế của mô hình là mô hình vùng ĐBSH do đó kích thước lưới còn khá thô do đó sai số mực nước ở khu vực bãi giếng tập trung là không thể tránh khỏi. Độ chính xác của mô hình phụ thuộc nhiều vào kết quả chỉnh lý của các công trình quan trắc, tuy nhiên mật độ các giếng quan trắc còn thưa chủ yếu phân bố theo tuyến phục vụ nghiên cứu động thái.

Tuy còn tồn tại một số hạn chế trên, nghiên cứu cũng đã xem xét được một cách toàn diện vai trò của nguồn bổ cập tự nhiên nước dưới đất cũng như các thành phần cung cấp khác cho kết quả tin cậy giúp cho công tác quản lý, khai thác bền vững và bảo vệ môi trường NDĐ trầm tích Đệ tứ ĐBSH.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: Đ.T.T., L.V.H.; Xử lý, phân tích số liệu: N.T.H., N.T.K.H.; mô hình hoá: Đ.T.T., L.V.H.; Viết bản thảo bài báo: Đ.T.T., T.Đ.T.; Chỉnh sửa bài báo: P.Q.N.

Lời cảm ơn: Bài báo có sự đóng góp từ nguồn dữ liệu và mô hình dự báo thuộc đề tài "Nghiên cứu nghiên cứu phát triển phần mềm phân tích dữ liệu lớn hỗ trợ công tác cảnh báo và dự báo tài nguyên nước". Mã số: TNMT.2023.04.07 của Trung tâm Cảnh báo và Dự báo tài nguyên nước.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. De Vries, J.J.; Simmers, I. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeol. J*. **2002**, *10,* 5–17.
2. Hartmann, A.; Gleeson, T.; Rosolem, R.; Pianosi, F.; Wada, Y.; Wagener, T. A large-scale simulation model to assess karstic groundwater recharge over Europe and the Mediterranean. *Geosci. Model Dev.* **2015**, *8(6),* 1729–1746.
3. Hartmann, A.; Gleeson, T.; Wada, Y.; Wagener, T. Enhanced groundwater recharge rates and altered recharge sensitivity to climate variability through subsurface heterogeneity. *Proc. Nat. Acad. Sci.* **2017**, *114(11),* 2842–2847.
4. Lerner, D.N.; Issar, A.S.; Simmers, I. Groundwater recharge: A guide to understanding and estimating natural recharge. Verlag Heinz Heise, P.O.B. 610407, D-3000 Hannover 61, Germany, 1990, pp. 345. ISBN 3-922705-91-X.
5. Arnold, J.G.; Muttiah, R.S.; Srinivasan, R.; Allen, P.M. Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *J. Hydrol.* **2000**, *227(1-4),* 21–40.
6. Hirata, R.; Conicelli, B.P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. **2012**, *84*, 297–312.
7. Raudsepp-Hearne, C.; Peterson, G.D.; Bennett, E.M. Ecosystem service bundles for analyzing tradeoffs in diverse landscapes. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2010**, *107(11),* 5242–5247.
8. Nhân, P.Q. Sự hình thành và trữ lượng nước dưới đất các trầm tích Đệ tứ đồng bằng sông Hồng và ý nghĩa của nó trong nền kinh tế quốc dân. Luận án Tiến sĩ, Đại học Mỏ - Địa chất, 2000, tr. 126.
9. Lê, T.T. Xác định lượng bổ cập và mối quan hệ giữa các tầng chứa nước trong trầm tích đệ tứ vùng Thạch Thất - Đan Phượng, Hà Nội bằng kỹ thuật đồng vị hạt nhân. Luận văn Thạc sỹ. 2011.

10. Pham, Q.; Dang, T.; Tran, T. Sustainable groundwater development in Hanoi City. *Sci. Tech. Publ. House*. **2019**.
11. Postma, D.; Mai, N.T.H.; Lan, V.M.; Trang, P.T.K.; Sø, H.U.; Nhan, P.Q.; Larsen, F.; Viet, P.H.; Jakobsen, R. Fate of arsenic during Red river water infiltration into aquifers beneath Hanoi, Vietnam. *Environ. Sci. Technol.* **2017**, *51*, 838–845.
12. Larsen, F.; Nhan, Q.P.; Nhan, D.D.; Postma, D.; Jessen, S.; Viet, H.P.; Thao, B.N.; Huy, D.T.; Luu, T.T.; Hoan, N.; Chambon, J.; Hoan, V.N.; Ha, D.H.; Hue, N.T.; Duc, M.T.; Refsgaard, J.C. Controlling geological and hydrogeological processes in an arsenic contaminated aquifer on the Red River flood plain, Vietnam. *Appl. Geochem*. **2008**, *23(11)*, 3099–3115.
13. Cánh, Đ.V. Nghiên cứu đề xuất các tiêu chí và phân vùng khai thác bền vững, bảo vệ tài nguyên nước dưới đất vùng đồng bằng Bắc Bộ và đồng bằng Nam Bộ. Báo cáo tổng kết đề tài nghiên cứu cấp nhà nước. Mã số: KC.08.06/11-15. Bộ Khoa học và Công nghệ, 2015.
14. Huy, T.Đ. Xác định vai trò của sông Hồng và đá gốc đối với lượng bổ cập cho nước dưới đất trong trầm tích Đệ tứ phần Tây Nam thành phố Hà Nội. Luận án Tiến sĩ, Trường Đại học Mỏ - Địa chất, 2022.
15. Nhan, P.Q.; Hung, L.V.; Le, T.T.; Khoa, T.V.L.; Nhan, D.D.; Cuong, T.Q. Zoning groundwater potential recharge using remote sensing and GIS technique in the Red river delta plain. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. **2022**, *964*, 012025.
16. Anderson, M.P.; Woessner, W.W.; Hunt, R.J. Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport. Academic Press, 2015.
17. Minh, T. Thành lập bản đồ Địa chất thuỷ văn vùng Bắc Bộ tỷ lệ 1:200.000. 2005.
18. Tam, V.T.; Nga, T.T.V. Assessment of urbanization impact on groundwater resources in Hanoi, Vietnam. *J. Environ. Manage.* **2018**, *227*, 107–116.
19. Trung, Đ.T.; Hoa, N.T.; Hoàn, T.V. Báo cáo kết quả xây dựng mô hình vùng đồng bằng Bắc Bộ. Trung tâm Quy hoạch và Điều tra tài nguyên nước quốc gia. 2018.
20. Namitha, M.; Devi, K. JS.; Sreelekshmi, H.; Muhammed, A.S. Groundwater flow modelling using visual modflow. *J. Pharmacogn. Phytochem.* **2019**, *8(1)*, 2710–2714.
21. Hariharan, V.; Shankar, M.U. A review of visual MODFLOW applications in groundwater modelling. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng*. **2017**, *263*, 032025.
22. Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* **2008**, *1(1)*, 83–98.
23. Hoan, H.V.; Larsen, F.; Nhan, P.Q.; Long, T.V.; Giang, N.T.T. Recharge mechanism and salinization processes in coastal aquifers in Nam Dinh Province, Vietnam. *VN J. Earth Sci.* **2022**, *44(2)*, 213–238.
24. NAWAPI. Cơ sở dữ liệu quan trắc quốc gia tài nguyên nước dưới đất. Bộ Tài nguyên và Môi trường, Hà Nội, Việt nam, 2023.

Application of MODFLOW for determining the role of groundwater recharge to groundwater exploitation in the Red River Delta Plain

Dang Tran Trung[1]*, Nguyen Thi Hoa[1], Nguyen Thanh Kim Hue[1], Tran Duc Thinh[1], Le Viet Hung[2], Pham Quy Nhan[2]

[1] Centre for Water resources Monitoring and Forecasting; dtrung@gmail.com; hoanguyen.dctv@gmail.com; nguyenthanhkimhue95@gmail.com; tranducthinhtv@gmail.com
[2] Hanoi University of Natural Resources and Environment; lvhung@hunre.edu.vn; pqnhan@hunre.edu.vn
[3] School of Interdisciplinary Study and Arts, Vietnam National University; nguyenthanhkimhue95@gmail.com

Abstract: The Red River Delta (RRD) with a population of over 22.9 million people has a total discharge of approximately 1.5 million m³/day, mostly Quaternary sedimentary aquifers. However, certain localities, such as Hanoi and Nam Dinh, have exhibited signs of over-exploitation, leading to associated issues such as depletion, land subsidence, saltwater intrusion, and water pollution. Groundwater recharge in the study area primarily originates from various sources, including rainfall, irrigation, and the river system. A three-dimensional (3D) model was developed in the study area using the MODFLOW code and calibrated by comparing simulated and observed groundwater levels. The calibrated model's budget code revealed that recharge from rainfall, river, lake to the Quaternary aquifers occurs throughout the year. The maximum recharge occurs during the rainy season (approximately 68% of rainfall) and the minimum during the dry season (approximately 10% of rainfall). During the rainy season, the river system primarily recharges Quaternary aquifers, contributing around 9.51-17.36% to the aquifers' total water balance. Year-round, the flow from fractured aquifers at the plain's edge to Quaternary aquifers is consistently small. To ensure sustainable management and exploitation of groundwater, the role of natural recharge sources for groundwater needs to be comprehensively assessed in this study.

Keywords: Groundwater recharges; Groundwater Modelling; Quaternary aquifer; Red River Delta.