

MÔ PHỎNG XỬ LÝ AMONI PHÁT THẢI TỪ NGHĨA TRANG CÔN ĐẢO ĐẾN TẦNG CHỨA NƯỚC PLEISTOCEN CỦA ĐẢO CÔN SƠN

Nguyễn Thị Minh Trang, Nguyễn Lê Duy Luân

Đại học Kiến trúc Tp. Hồ Chí Minh

Tóm tắt: Sự phát thải liên tục tại các nghĩa trang lâu năm (hay tại các bãi chôn lấp) cùng với sự thiếu vắng các giải pháp ngăn chặn và xử lý lan truyền ô nhiễm xuống các tầng chứa nước dưới đất bên dưới đã và đang gây ra những mối lo ngại về chất lượng nước dưới đất. Trong bài báo này, với mục tiêu chính là loại bỏ NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng chứa nước Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn, đề xuất ứng dụng biện pháp xử lý ô nhiễm tại nguồn (bơm và xử lý NH_4^+ ngay tại nghĩa trang Côn Đảo) và quá trình xử lý NH_4^+ được mô phỏng trên mô hình RT3D thuộc phần mềm GMS 10. Kết quả mô phỏng cho thấy hiệu quả xử lý ô nhiễm NH_4^+ trong tầng Pleistocen không chỉ tùy thuộc vào vị trí, số lượng và lưu lượng của các giếng bơm hút và bơm đẩy mà còn liên quan đến sự dao động mực nước dưới đất, cụ thể là độ hạ thấp mực nước dưới đất.

Từ khóa: Mô hình nước dưới đất, GMS, lan truyền ô nhiễm.

Summary: In addition to the continuous emission of contaminants into groundwater at the old cemeteries (or landfills), the lack of treatment measures to prevent and decrease the contaminant transport has caused the concerns of the groundwater quality which is beneath these cemeteries. In this paper, according to the main goal is to remove NH_4^+ arising from the Con Dao cemetery to Pleistocene aquifer of Con Son Valley, the in-situ treatment of NH_4^+ (pump and treat measure) is proposed to apply and the treatment process of NH_4^+ is simulated on RT3D code of GMS 10. The simulation results show that NH_4^+ treatment efficiency depends not only on location, quantity and flow rate of the extraction - injection pumps, but also on the fluctuations of groundwater level, namely the groundwater drawdown.

Keywords: groundwater model, GMS, contaminant transport.

1. GIỚI THIỆU

Trong nguồn nước dưới đất (NDĐ), sự hiện diện của ion amoni (NH_4^+) là một trong những dấu hiệu cho thấy nguồn nước bị ô nhiễm. Để loại bỏ NH_4^+ trong nguồn NDĐ, cần thiết chuyển hóa NH_4^+ thành nitrat (NO_3^-) và sau đó khử NO_3^- thành khí nitơ (N_2) nhẹ và dễ bay hơi ra khỏi NDĐ. Tuy nhiên do NDĐ thường có độ oxy hòa tan thấp nên NH_4^+ tồn tại trong NDĐ không đủ khả năng tự chuyển

hóa. Vì vậy, việc cung cấp oxy nhân tạo cùng với dưỡng chất thiết yếu để vi sinh vật (VSV) hiếu khí sống trong đất và NDĐ giúp chuyển hóa NH_4^+ thành NO_3^- và tiếp đó là cung cấp môi trường kỵ khí - không có oxy và dưỡng chất cho VSV kỵ khí phát triển nhằm hỗ trợ phân hủy NO_3^- thành N_2 là một trong những biện pháp hữu hiệu để xử lý ô nhiễm NH_4^+ trong NDĐ.

Trong nghiên cứu này, dựa trên mô hình mô phỏng lan truyền NH_4^+ từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn đã được thiết lập và hiệu chỉnh, biện pháp

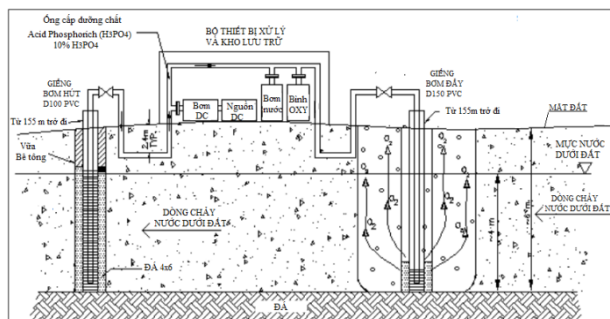
Ngày nhận bài: 30/8/2017

Ngày thông qua phản biện: 24/10/2017

Ngày duyệt đăng: 29/11/2017

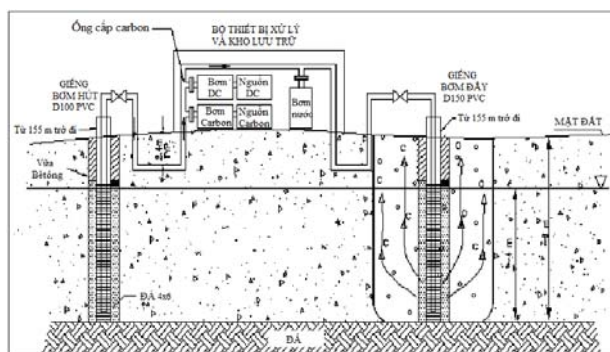
Bơm và xử lý tại nguồn (In-situ Pump and treat) được đề xuất sử dụng với mục tiêu loại bỏ hoàn toàn NH_4^+ ra khỏi tầng chứa NĐĐ ngay dưới nghĩa trang Côn Đảo. Xử lý NH_4^+ tại nguồn (ngay tại nghĩa trang Côn Đảo) bao gồm hai quá trình chính: quá trình nitrat hóa và quá trình khử nitrat. Trong đó:

- Quá trình nitrat hóa tại nguồn được thực hiện theo ba bước: bơm hút NĐĐ lên; châm oxy và dưỡng chất vào nước; bơm đẩy NĐĐ đã xử lý về lại nguồn (xem Hình 1) [1].



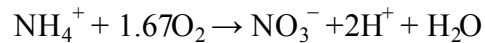
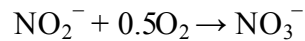
Hình 1. Sơ đồ công nghệ nitrat hóa tại nguồn

- Quá trình khử nitrat tại nguồn cũng gồm ba bước: bơm hút NĐĐ lên; châm dưỡng chất có gốc carbon vào nước; bơm đẩy NĐĐ đã xử lý về lại nguồn (xem Hình 2) [1].

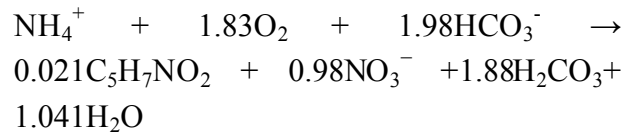


Hình 2. Sơ đồ công nghệ khử nitrat tại nguồn

Quá trình nitrat hóa diễn ra theo các phương trình sau:



Khi bổ sung dưỡng chất thì các vi sinh hiếu khí trong đất sẽ phát triển và thúc đẩy quá trình nitrat nhanh hơn theo phương trình sau (với $\text{C}_5\text{H}_7\text{NO}_2$ - là sinh khối vi sinh):

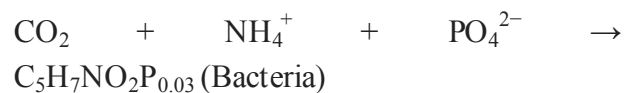


Quá trình nitrat hóa là quá trình hiếu khí và tiêu thụ oxy, cụ thể là tiêu thụ 3.3kg O_2 cho mỗi kilogram $\text{NH}_4\text{-N}$ bị phân hủy (3.3kg O_2 /1kg $\text{NH}_4\text{-N}$). Điều này cho thấy sự nitrat hóa yêu cầu sự cung cấp oxy liên tục. Tuy nhiên, hàm lượng sinh khối sản sinh từ quá trình nitrat hóa thì thấp (0.13kg/1kg $\text{NH}_4\text{-N}$) - nghĩa là sự phát triển của vi sinh vật nitrat hóa cũng chậm.

Quá trình khử nitrat diễn ra theo phản ứng như sau:



Tương tự như quá trình nitrat hóa thì việc cung cấp thêm dưỡng chất là carbon và acid phosphoric vào trong NĐĐ sẽ tạo ra vi khuẩn nitrat tự dưỡng. Với sự tham gia của các vi khuẩn tự dưỡng này thì quá trình nitrat hóa và khử nitrat sẽ xảy ra hiệu quả hơn.



So sánh với các biện pháp xử lý NH_4^+ như làm thoáng, xử lý sinh học, trao đổi ion, phản ứng với clo tạo điểm dừng, màng lọc... thì biện pháp bơm và xử lý nitrat hóa - khử nitrat tại nguồn có ưu điểm nổi bật như sau [1] [2]:

- Là giải pháp xử lý có chi phí thấp;
- Loại bỏ phần lớn nồng độ NH_4^+ thành N_2 nhờ

công nghệ xử lý trên mặt đất;

- Thiết kế nhỏ gọn và ít gây ảnh hưởng đến môi trường xung quanh;

- Quy trình xử lý quanh năm;

- Không cần bổ sung các tác nhân sinh hóa học xuống tầng chứa NĐĐ;

- Tiêu chuẩn NĐĐ sau xử lý thường tương đồng với tiêu chuẩn nước ăn uống. Riêng đối với NH_4^+ thì tiêu chuẩn NĐĐ sau xử lý bằng biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn có thể thấp hơn so với tiêu chuẩn NĐĐ sau xử lý và được xả thẳng ra nguồn tiếp nhận nước mặt.

- NĐĐ sau khi được xử lý và bơm đẩy ngược về tầng chứa nước có thể được sử dụng để tăng cường ngăn chặn thủy lực hoặc đẩy nguồn gây ô nhiễm nhanh về phía các giếng bơm hút lên xử lý.

- NĐĐ sau khi được xử lý và bơm đẩy ngược về tầng chứa nước giúp bổ cập NĐĐ - một nguồn tài nguyên thiên nhiên, trong đó đặc biệt có lợi ích ở những nơi nguồn NĐĐ là nguồn duy nhất cung cấp cho nhu cầu sinh hoạt của con người, điển hình như ở vùng Côn Đảo.

Tuy nhiên, công nghệ bơm và xử lý NĐĐ tại nguồn cũng tiềm ẩn những hạn chế như sau [1]:

- Việc bơm đẩy NĐĐ sau xử lý vào khu vực ô nhiễm có thể làm vùng ô nhiễm phân tán ra xa khu vực xung quanh. Do đó các phân tích địa chất thủy văn bổ sung có thể cần thực hiện (hoặc mô phỏng trên mô hình) nếu lựa chọn công nghệ bơm và xử lý tại nguồn.

- Các giếng bơm đẩy và bộ phận lọc có thể cần bảo trì nhiều hơn so với phương án xả thẳng NĐĐ sau xử lý ra nguồn tiếp nhận nước mặt, đặc biệt là do tắc nghẽn các chất rắn hoặc tắc

nghẽn sinh học.

- Nếu việc xử lý không tuân thủ đúng nguyên tắc và dẫn đến khả năng xả thải chất gây ô nhiễm ngay tại hiện trường khu vực xử lý thì có thể dẫn đến khả năng tái phân tán chất gây ô nhiễm và làm tăng chi phí xử lý.

Theo kết quả nghiên cứu thực địa của [1], nồng độ amoni giảm 66 - 89% sau quá trình nitrat hóa tại nguồn và nồng độ NO_3^- giảm 78 - 99% sau quá trình khử nitrat tại nguồn. Các kết quả này cho thấy việc xử lý ô nhiễm NH_4^+ trong tầng chứa nước Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn bằng biện pháp xử lý nitrat hóa và khử nitrat trên công nghệ bơm hút - bơm đẩy ngay tại nghĩa trang Côn Đảo có tính khả thi cao.

Với mục tiêu nghiên cứu chính là mô phỏng hóa biện pháp xử lý ô nhiễm NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn cũng như thiết lập phương thức quan sát trực quan quá trình làm suy giảm và ngăn chặn nồng độ NH_4^+ lan truyền trong tầng chứa NĐĐ, do đó nghiên cứu không phát triển sâu theo hướng xác định các chất hóa sinh (như oxy, dưỡng chất...) cần cung cấp và đáp ứng cho hai quá trình nitrat hóa và khử nitrat cũng như hàm lượng của các chất này tham gia vào các phản ứng, mà tập trung vào việc giải quyết bài toán mô phỏng biện pháp xử lý tại nguồn bằng mô hình RT3D (thuộc phần mềm GMS 10.) với giả định rằng sau khi được bơm hút lên và xử lý cục bộ trên mặt đất (qua hai quá trình nitrat hóa và khử nitrat) thì NĐĐ khi bơm tuần hoàn lại tầng Pleistocen có nồng độ NH_4^+ giảm xuống bằng 0.1mg/l (theo QCVN 09:2008/BTNMT).

2. CƠ SỞ LÝ THUYẾT CỦA MÔ HÌNH RT3D

RT3D (Reactive Transport in 3-Dimension) thuộc phần mềm GMS 10. là mô hình mô phỏng các phản ứng xảy ra theo dòng chảy NĐĐ Modflow và theo sự lan truyền chất ô nhiễm trong môi trường bão hòa ba chiều MT3DMS. Mô hình RT3D cung cấp các gói xử lý chất ô nhiễm khác nhau, ví dụ như bơm và xử lý tại nguồn, xử lý suy giảm sinh học tại nguồn, xử lý oxy hóa học tại nguồn, ước tính suy giảm tự nhiên, ... tương ứng với các chất ô nhiễm khác nhau. Kết quả của RT3D sẽ xác định vùng thu giữ chất ô nhiễm và nồng độ các chất nhiễm bẩn còn lại theo từng bước tính toán ở trạng thái cân bằng với hệ thống dòng chảy NĐĐ và điều kiện thủy hóa được xác định trong mô hình.

Phương trình mô phỏng sự lan truyền chất ô nhiễm trong NĐĐ có bao gồm các phản ứng hóa học được mô tả bằng phương trình sau [3][4]:

$$R_w \frac{\partial C_w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij,w} \frac{\partial C_w}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (v_i C_w) + \frac{q_s}{\theta} C_{s,w} \pm G_{R,w}$$

(1)

Trong đó: C_w : nồng độ của chất ô nhiễm W, (mg/m^3); t : thời gian, (ngày); x_i : khoảng cách theo ba phương x, y, z, (m); $D_{ij,w}$: hệ số phân tán, ($\text{m}^2/\text{m}^3 \cdot \text{ngày}$); q_s : lưu lượng thêm vào hoặc mất đi trên một đơn vị thể tích, ($\text{m}^3/\text{m}^3 \cdot \text{ngày}$); θ : hàm lượng nước theo thể tích; $C_{s,w}$: nồng độ mất đi hoặc được bổ sung của chất ô nhiễm, (mg/m^3); v_i : vận tốc dòng chảy qua lỗ rỗng (m/ngày); R_w : nhân tố tri hoãn chất ô nhiễm, được tính theo công thức:

$$R_w = 1 + \frac{\rho_b}{\theta} K_d$$

Với ρ_b : khối lượng riêng của đất, (kg/m^3); K_d : hệ số phân vùng, (m^3/kg); $G_{R,w}$: tổng các phản

ứng hóa học diễn ra trong dung dịch đất và NĐĐ. Trong trường hợp sự lan truyền ô nhiễm chỉ xét đến phản ứng hấp phụ xảy ra trong dung dịch đất và NĐĐ thì $G_{R,w}$ được mô tả theo công thức [5][6]:

$$G_{R,w} = \frac{\rho_b}{\theta} \alpha [(1 - F) K_d C_w]$$

Với F : thông số vùng hấp phụ; α : hệ số chuyển đổi chất, (1/h).

Việc tìm ra lời giải cho phương trình (1) thường là rất khó. Trên thực tế, phương trình (1) được giải bằng phương pháp gần đúng. Phương pháp giải gần đúng được áp dụng trong RT3D là phương pháp đường đặc trưng Eulerian - Lagrangian với thuật toán MMOC (Modified Method of Characteristics).

Trong phạm vi nghiên cứu, với biện pháp xử lý NH_4^+ được đề xuất sử dụng là bơm và xử lý tại nguồn thì gói xử lý ô nhiễm tương ứng được đề xuất lựa chọn trong mô hình RT3D là gói Rate-Limited Sorption Reaction hay Mass-transfer Limited Sorption Model - mô hình hấp phụ có giới hạn chuyển đổi chất của RT3D.

Đối với mô hình hấp phụ có giới hạn chuyển đổi chất, sự trao đổi các chất gây ô nhiễm giữa đất và NĐĐ được giả định là có tốc độ giới hạn. Tốc độ chuyển đổi được quyết định bởi giá trị của hệ số chuyển đổi chất (α). Khi giá trị α cao thì mô hình RT3D được xem như mô hình tri hoãn ô nhiễm (ví dụ đối với đất sét), hoặc ngược lại, khi giá trị α rất thấp thì các chất ô nhiễm trong pha đất được giả định là không bị hấp phụ và không bị mắc kẹt vào các lỗ rỗng của đất (ví dụ đối với đất cát) [7]. Trong trường hợp của NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo, với giá trị α ước tính (dựa trên thí nghiệm trên các ống cột đất Côn Sơn và nhờ sự hỗ trợ của phần mềm Hydrus 1D) rất thấp

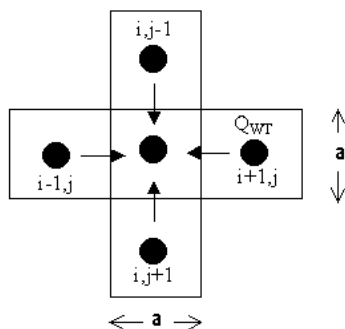
[8] thì việc làm sạch NH_4^+ trong tầng Pleistocen cũng như loại bỏ NH_4^+ dính bám trong dung dịch đất hoàn toàn khả thi, bởi do khi giá trị α thấp thì NH_4^+ không thể gây bất kỳ nguy cơ tiềm ẩn nào đối với dung dịch đất và NĐĐ, khi đó biện pháp bơm và xử lý tại nguồn là sự lựa chọn tốt nhất để khắc phục ô nhiễm NĐĐ.

Để mô phỏng cụ thể biện pháp xử lý đã được lựa chọn vào trong mô hình RT3D, cần thiết lập bổ sung thêm hệ thống các giếng khoan bơm hút và bơm đẩy trên mô hình lan truyền chất ô nhiễm MT3DMS. Các giếng này được xem như các ô lưới phản ứng - “Reaction Cells”. Mỗi “Reaction Cell” được gắn thuộc tính của một giếng là “Well” (xem Hình 3).

Lưu lượng giếng khoan đơn lẻ đặt trong các tầng chứa nước khác nhau có thể được lựa chọn trước hoặc được xác định theo công thức [7]:

$$Q_{i,j,k} = T_{i,j,k} (Q_T / (\sum T_{i,j,k}))$$

Trong đó: $T_{i,j,k}$: hệ số dẫn nước của tầng chứa nước, ($\text{m}^2/\text{ngày}$); Q_T : lưu lượng của các giếng khoan trong ô lưới chính là bằng tổng lưu lượng của các giếng khoan hoặc các đoạn ống lọc của các lỗ khoan đặt trong các tầng chứa nước khác nhau $\sum Q_{i,j,k}$, ($\text{m}^3/\text{ngày}$); $\sum T_{i,j,k}$: hệ số dẫn nước tổng cộng cho tất cả các lớp mà giếng khoan khoan qua, ($\text{m}^2/\text{ngày}$).



Hình 3. Các ô lưới sai phân hai chiều

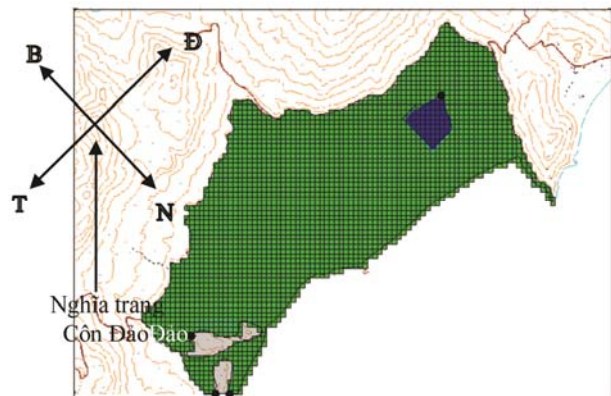
xung quanh ô có giếng khoan

3. MÔ PHỎNG BIỆN PHÁP XỬ LÝ AMONI TỪ NGHĨA TRANG CÔN ĐẢO ĐẾN TẦNG CHỨA NƯỚC DƯỚI ĐẤT CÔN SƠN

3.1. Sơ đồ hóa vùng nghiên cứu

- Căn cứ trên mô hình dòng chảy NĐĐ Modflow của Thung lũng Côn Sơn đã được thiết lập và hiệu chỉnh [8], vùng nghiên cứu ứng dụng biện pháp xử lý NH_4^+ tại nguồn (RT3D) được chọn tương ứng như mô hình Modflow và mô hình lan truyền NH_4^+ MT3DMS (xem Hình 4).

- Các lớp tính toán, đặc điểm thủy lực và điều kiện biên của mô hình RT3D được giữ nguyên theo mô hình Modflow của Thung lũng Côn Sơn và mô hình lan truyền NH_4^+ MT3DMS (Chi tiết tham khảo tại [8][9]).



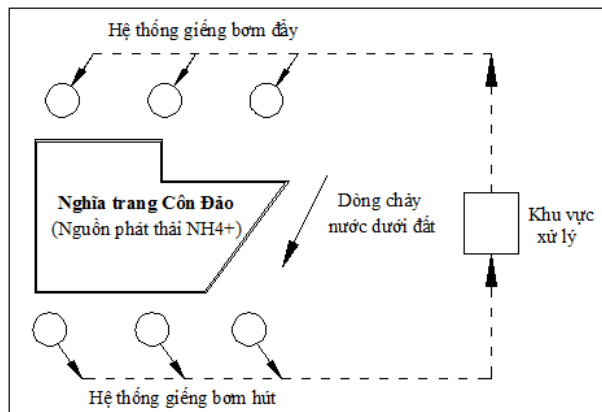
Hình 4. Sơ đồ hóa vị trí nghĩa trang Côn Đảo tại Thung lũng Côn Sơn

3.2. Sơ đồ vị trí sơ bộ các giếng xử lý ô nhiễm NH_4^+ tại nguồn

Theo [11], trong khuôn viên nghĩa trang Hàng Dương hiện có 9 lỗ khoan tư nhân đang khai thác và bao quanh phía ngoài nghĩa trang đang vướng đất tư, vì vậy nhằm đạt mục tiêu thu giữ và xử lý nhanh nhất nồng độ amoni phát thải

từ nghĩa trang, đề xuất vị trí xây dựng các giếng khoan xử lý ô nhiễm tại nguồn nằm bao quanh sát rìa bên ngoài nghĩa trang, cụ thể như sau (xem Hình 5):

- Các giếng khoan bơm hút ô nhiễm đặt ở rìa dưới (hay rìa phía đông nam) nghĩa trang theo hướng dòng chảy NĐĐ với mục đích ngăn chặn hướng ô nhiễm lan truyền từ nghĩa trang;
- Các giếng khoan bơm đẩy nước sau xử lý đặt ở rìa trên (hay rìa phía tây bắc) nghĩa trang nhằm hoàn lưu lại lượng NĐĐ vừa được bơm hút và xử lý.



Hình 5. Sơ đồ vị trí sơ bộ hệ thống giếng khoan xử lý NH_4^+ bằng biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn

3.3. Lựa chọn lưu lượng, số lượng, dạng công trình và khoảng cách giữa các giếng khoan xử lý ô nhiễm tại nguồn

o Lựa chọn lưu lượng

Trong thung lũng Côn Sơn đã có nhiều công trình nghiên cứu và đang khai thác NĐĐ. Theo kết quả thực bơm của các giếng G1÷G7, GK1÷GK3 hay GKM1÷GKM5 bên hồ Quang Trung [12], lưu lượng khai thác đang từ 200 - 250 $\text{m}^3/\text{ngày}$, do đó lưu lượng các máy bơm hút và bơm đẩy đề xuất lựa chọn tương ứng bằng 250 $\text{m}^3/\text{ngày}$ với công suất hoạt động là 15 $\text{m}^3/\text{giờ}$, chiều sâu đặt máy 11 - 12m. Tuy nhiên

để phù hợp với giả thuyết của bài toán mô hình hóa biện pháp xử lý ô nhiễm amoni tại nguồn: amoni được xử lý triệt để trước khi được bơm đẩy ngược vào tầng chứa NĐĐ thì lưu lượng các máy bơm hút và bơm đẩy sẽ được điều chỉnh trong quá trình thiết lập mô hình để đảm bảo quá trình xử lý amoni trên mặt đất đạt hiệu quả cao nhất.

o Dạng công trình giếng khoan

Theo [11], các công trình khai thác hiện cung cấp cho Trạm Điện - Nước Côn Đảo và phần lớn các công trình khai thác NĐĐ nhỏ lẻ thuộc hộ gia đình tại Thung lũng Côn Sơn là dạng giếng khoan ống. Do đó, đề xuất thiết lập các giếng khoan bơm đẩy và bơm hút để xử lý ô nhiễm amoni tại nghĩa trang Côn Đảo cũng theo dạng giếng ống. Mối quan hệ giữa đường kính giếng khoan và lưu lượng bơm theo công nghệ Bơm và xử lý tại nguồn được [13] đề xuất như sau (xem Bảng 1):

Bảng 1. Đường kính giếng khoan theo lưu lượng bơm [13]

Lưu lượng bơm		Đường kính giếng khoan	
(gal/phút)	($\text{m}^3/\text{ngày}$)	(in)	(mm)
< 100	< 545	≤ 6	≤ 152
75 - 175	409 - 954	8	203
150 - 350	818 - 1910	10	254
300 - 700	1640 - 3820	12	305
500 - 1000	2730 - 5450	14	365
800 - 1800	4360 - 9810	16	406
1200 - 3000	6540 - 16400	20	508

Tham khảo từ Bảng 1 ở trên, ứng với lưu lượng là $250\text{m}^3/\text{ngày}$, đề xuất chọn đường kính giếng bơm hút và bơm đẩy tương ứng là $\Phi 100\text{mm}$ và $\Phi 150\text{mm}$. Khi đó, chiều dài ống lọc được tính theo công thức sau [14]:

$$L = \frac{Q_{gk}}{2\pi r_o V_d}$$

Trong đó: Q_{gk} : lưu lượng một giếng khoan, (m^3/s); r_o : bán kính giếng, (m); V_d : tốc độ nước chảy tới giếng, (m/s) được xác định theo công thức Abramốp:

$$V_d = \frac{\sqrt[3]{K}}{30}$$

và K : hệ số thấm, $K = 7,5\text{m}/\text{ngày} = 8,68 \cdot 10^{-5} \text{m/s}$.

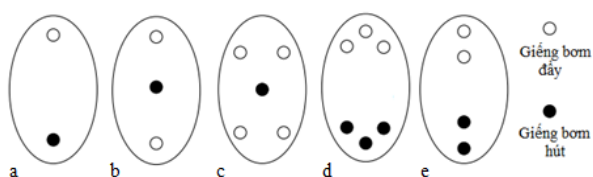
Vậy chiều dài ống lọc tính cho:

- Giếng bơm hút: $L_{bom\ hút} = 6.23\text{m}$

- Giếng bơm đẩy: $L_{bom\ đẩy} = 4.15\text{m}$

o *Số lượng giếng và khoảng cách giữa các giếng khoan*

Dựa theo kết quả nghiên cứu của [15], sơ đồ vị trí lắp đặt hiệu quả các giếng khoan bơm hút và bơm đẩy trong biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn được thể hiện ở Hình 6 dưới đây.



Hình 6. Sơ đồ lắp đặt và số lượng các giếng khoan trong biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn

a. 01 giếng đẩy, 01 giếng hút;

b. 02 giếng đẩy, 01 giếng hút;

c. 04 giếng đẩy (tại đỉnh của hình vuông), 01 giếng hút ở giữa hình vuông;

d. 03 giếng đẩy và 03 giếng hút (tại đỉnh của

hai hình tam giác khác nhau);

e. 02 giếng đẩy và 02 giếng hút (theo đường thẳng).

Bên cạnh đó, [15] cũng cho thấy sơ đồ lắp đặt và số lượng giếng khoan có ảnh hưởng đáng kể đến thời gian làm sạch vùng ô nhiễm, cụ thể như sau:

- Sơ đồ a, b, e có hiệu quả với vùng nghiên cứu có gradient thủy lực nhỏ (~ 0.0008) và giảm tối đa thời gian làm sạch ô nhiễm, lượng nước cần tuần hoàn lại và lượng nước đã được xử lý.

- Sơ đồ d làm việc tốt trong vùng có gradient thủy lực cao (~ 0.008), độ hạ thấp mực nước lớn ($> 3,05\text{m}$) và hệ số phân tán có thể cao hoặc thấp.

- Sơ đồ c có hiệu quả thấp nhất so với các sơ đồ được [14] nghiên cứu.

- Không có sơ đồ nào làm việc tốt trong điều kiện gradient thủy lực cao, độ hạ thấp mực nước nhỏ ($< 1,525\text{m}$) và hệ số phân tán cao ($> 9,15\text{m}$).

Căn cứ theo kết quả thí nghiệm bơm chùm trong báo cáo [11] và kết quả thí nghiệm lan truyền NH_4^+ trong các ống cột đất Côn Sơn [8]:

- Với bề dày trung bình tầng Pleistocen $H = 16,5\text{m}$, độ hạ thấp mực nước cho phép tại Thung lũng Côn Sơn phải nhỏ hơn $0,5H$ nghĩa là $S_{cp} \leq 8,25\text{m}$.

- Gradient thủy lực $i = 6,726 \cdot 10^{-5} \div 1,073 \cdot 10^{-3}$, trung bình $i = 3,438 \cdot 10^{-4}$.

- Hệ số phân tán $D = 8.40 \text{ cm}^2/\text{h}$.

Đối chiếu và so sánh các đặc điểm thủy văn và thủy lực của tầng Pleistocen Thung lũng Côn Sơn với các sơ đồ của [15] có thể nhận thấy sơ đồ d tương thích với khu vực nghiên cứu. Để

kiểm định khả năng tương thích của sơ đồ d với điều kiện địa chất thủy văn của Thung lũng Côn Sơn, cần thiết xác định mức độ ảnh hưởng của các giếng bơm hút lên toàn bộ hệ thống giếng đang khai thác tại Thung lũng, cụ thể là so sánh độ hạ thấp mực nước tại các giếng bơm hút với độ hạ thấp mực nước cho phép tại Thung lũng Côn Sơn.

Các nghiên cứu của [16][17] về ảnh hưởng của giếng trong bãi giếng đều cho rằng độ hạ thấp mực nước trong một bãi giếng tại một thời điểm bất kỳ bằng tổng độ hạ thấp mực nước do từng giếng gây ra. Do vậy, để xác định trị số hạ thấp mực nước của hệ thống giếng khoan trong sơ đồ d, đề xuất quy đổi về “Giếng lớn”.

Khi đó tổng mực nước hạ thấp tại giếng tính toán là:

$$S = S_{ht} + S_{gk}$$

Trong đó: S_{ht} : độ hạ thấp mực nước tại các giếng khoan tính toán do hệ thống các giếng khoan gây ra, phụ thuộc vào sự phân bố của hệ thống và điều kiện biên của tầng chứa nước, (m); S_{gk} : độ hạ thấp mực nước bổ sung trong giếng khoan tính toán do chính giếng khoan đó gây ra, phụ thuộc vào vị trí của các giếng khoan bên trong hệ thống, mức độ không hoàn chỉnh của giếng và lưu lượng của mỗi giếng khoan, (m).

Thung lũng Côn Sơn là một thềm cát dài, phần phía bắc - tây bắc giới hạn bởi các đá tuổi Mesozoi cứng chắc không chứa nước ($q = 0$), phần phía nam - đông nam giới hạn bởi đường bờ biển Đông ($H = \text{constant}$). Từ đặc điểm trên, đề xuất chọn công thức tính độ hạ thấp mực nước theo điều kiện biên: tầng Pleistocen được giới hạn bởi 02 biên song song, một biên có áp lực không đổi, một biên không thấm

nước. Khi đó độ hạ thấp mực nước của hệ thống giếng được tính theo công thức [11]:

$$S_{ht} = H - \sqrt{H^2 - \frac{Q_t}{\pi K} \ln \frac{1,27 \cot g \frac{\pi Z_1}{2Z}}{R_0}}$$

Trong đó: L : chiều dài tuyến giếng, (m); R_0 : bán kính vùng ảnh hưởng, (m), $R_0 = 0,2L$ [9]; Z : khoảng cách trung bình từ hệ thống giếng đến biên không chứa nước ($q = 0$), (m); Z_1 : khoảng từ trung bình từ hệ thống giếng đến biên biển, (m); H : bề dày trung bình tầng chứa nước Pleistocen, (m); Q_t : tổng lưu lượng các giếng, ($\text{m}^3/\text{ngày}$);

Kết quả độ hạ thấp mực nước của hệ thống giếng bơm hút gồm 03 giếng với lưu lượng bơm hút mỗi giếng bằng $250\text{m}^3/\text{ngày}$ được trình bày ở Bảng 2 dưới đây.

Bảng 2. Độ hạ thấp mực nước của hệ thống giếng khoan

Tổng lưu lượng các giếng bơm hút Q_t ($\text{m}^3/\text{ngày}$)	K ($\text{m}/\text{ngày}$)	Z_1 (m)	Z (m)	R_0 (m)	H (m)	S_{ht} (m)
750	7.50	710	843	64	16.5	1.46
1000						1.83
1750						3.10

Độ hạ thấp mực nước bổ sung do chính giếng bơm hút gây nên được tính theo công thức [11]:

$$S_{gk} = H^2 - \sqrt{H^2 - \frac{Q_{gk}}{\pi K} \ln \frac{\delta}{2\pi}}$$

Trong đó: Q_{gk} : lưu lượng mỗi giếng, ($\text{m}^3/\text{ngày}$); δ : khoảng cách giữa các giếng, (m). Theo [11],

khoảng cách giữa các giếng khai thác hiện hữu trên Thung lũng Công Sơn, cung cấp nước cho trạm Điện Nước là 150m. Do đó, đề xuất chọn khoảng cách giữa các giếng bơm hút trong phạm vi nghiên cứu tương ứng bằng 150m. Vậy độ hạ thấp mực nước bổ sung do chính giếng bơm hút gây nên là $S_{gk}=1.05m$.

Kết quả độ hạ thấp mực nước toàn phần tại giếng bất kỳ được trình bày ở Bảng 3 dưới đây.

Bảng 3. Độ hạ thấp mực nước toàn phần tại các giếng

Tổng lưu lượng các giếng bơm hút Q_t (m^3/n ngày)	Độ hạ thấp mực nước (m)		
	S_{ht}	S_{gk}	S
750	1.46	1.05	2.51
1000	1.83		2.88
1750	3.10		4.15

Nhìn nhận kết quả từ Bảng 3 cho thấy độ hạ thấp mực nước do 03, 04 và 07 giếng bơm hút với $Q_{gk} = 250m^3/ngày$ đều nhỏ hơn $S_{cp} = 8,25m$. Vậy sơ đồ phù hợp với vùng nghiên cứu.

3.4. Nồng độ NH_4^+ trước xử lý (tại các giếng bơm hút) và sau xử lý (tại các giếng bơm đẩy)

Bên cạnh các yếu tố quan trọng quyết định đến hiệu quả xử lý NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo như sơ đồ, vị trí, số lượng - lưu lượng các giếng khoan bơm hút - bơm đẩy thì việc xác định được nồng độ NH_4^+ trước và sau xử lý tại nguồn cũng là một yếu tố chính yếu ảnh hưởng đến thời gian xử lý và ngăn chặn dòng lan truyền ô nhiễm NH_4^+ trong tầng Pleistocen.

Bằng việc bơm NĐĐ lên và xử lý NH_4^+ qua các công trình trên mặt đất, trên thế giới đã ghi

nhận nhiều công trình nghiên cứu thành công khi loại bỏ hoàn toàn NH_4^+ trong NĐĐ [1][2]. Tại Việt Nam, với sự kết hợp giá thể vi sinh cùng quá trình nitrat hóa - khử nitrat, kết quả nghiên cứu xử lý NH_4^+ có trong NĐĐ tại Hà Nội [18] đã cho thấy việc loại bỏ NH_4^+ có trong NĐĐ với nồng độ NH_4^+ ban đầu trên 20mg/l xuống còn $0 \div 0.53mg/l$ hoàn toàn khả thi và đạt hiệu suất xử lý $93.2 \div 99.9\%$.

Trong phạm vi nghiên cứu, với tiêu chí đơn giản hóa bài toán mô phỏng biện pháp xử lý NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn, đề xuất nhìn nhận quy trình xử lý NH_4^+ trong NĐĐ diễn ra hoàn toàn. Điều này có nghĩa là NĐĐ sau khi được bơm hút và đưa qua quy trình xử lý trên mặt đất sẽ loại bỏ NH_4^+ xuống dưới mức cho phép của QCVN 09:2015/BTNMT là 1mg/l. Từ đây có thể xác định được nồng độ NH_4^+ trước và sau khi áp dụng biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn như sau:

- Trước xử lý: nồng độ NH_4^+ tại các giếng bơm hút bằng nồng độ NH_4^+ phát thải lớn nhất từ nghĩa trang đến tầng chứa nước dưới đất là 415.2mg/l;
- Sau xử lý: NĐĐ được bổ cập ngược lại vào tầng chứa nước từ các giếng bơm đẩy có nồng độ NH_4^+ bằng 1mg/l.

Điều này có nghĩa là NĐĐ được bơm hút từ xung quanh nghĩa trang có nồng độ bằng với nồng độ NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang là 415.2mg/l và sau khi được xử lý trên mặt đất (chuyển hóa NH_4^+ thành N_2) NĐĐ bơm đẩy về tầng Pleistocen có nồng độ NH_4^+ tuân hoàn lại tầng chứa nước có giá trị bằng 1mg/l.

3.5. Điều kiện mô hình RT3D

- Mô hình RT3D được xây dựng trên cơ sở của

mô hình Modflow và mô hình lan truyền NH_4^+ MT3DMS từ 1940 đến 2015 đã được thiết lập và hiệu chỉnh.

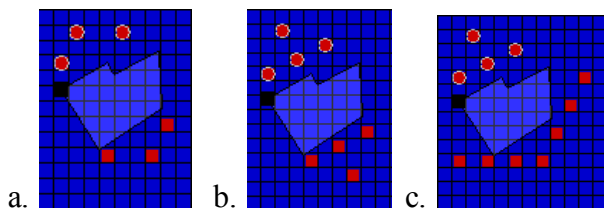
- Bước tính toán trong mô hình RT3D tương ứng với 01bước/01ngày.

- Lưu lượng khai thác hiện hữu, các thông số địa chất thủy văn, các thông số cơ lý đất và các hệ số ảnh hưởng đến sự lan truyền NH_4^+ trong dung dịch đất và NĐĐ Côn Sơn không thay đổi trong suốt thời gian tính toán.

- Nồng độ NH_4^+ ban đầu tại nghĩa trang được giả định bằng 415.2mg/l - đây là giá trị được xác định dựa trên lịch sử hình thành của nghĩa trang Côn Đảo cũng như kết quả mô phỏng hồi tố từ mô hình lan truyền NH_4^+ MT3DMS [10].

- Các dữ liệu đầu vào cần bổ sung cho mô hình RT3D bao gồm vị trí, lưu lượng các giếng khoan bơm hút - bơm đẩy, nồng độ NH_4^+ trước và sau xử lý tại các giếng và hệ số chuyển đổi chất (α). Trong đó:

+ Sơ đồ lắp đặt, số lượng và lưu lượng các giếng khoan được thể hiện ở Hình 7 dưới đây.



Hình 7. Sơ đồ hóa vị trí các giếng bơm hút và bơm đẩy tại nghĩa trang Côn Đảo

a. 03 giếng bơm hút và 03 giếng bơm đẩy với lưu lượng mỗi máy bơm là $250\text{m}^3/\text{ngày}$;

b. 04 bơm hút và 04 giếng bơm đẩy với lưu lượng mỗi máy bơm là $250\text{m}^3/\text{ngày}$;

c. 07 giếng bơm hút và 04 giếng bơm đẩy với lưu lượng mỗi máy bơm hút và bơm đẩy tương

ứng là $250\text{m}^3/\text{ngày}$ và $437.5\text{m}^3/\text{ngày}$;

Ghi chú: - Giếng bơm hút; - Giếng bơm đẩy.

+ Tổng lưu lượng các giếng bơm hút và bơm đẩy trong từng sơ đồ luôn bằng nhau:

Sơ đồ a: $\sum Q_{\text{bơm hút}} = \sum Q_{\text{bơm đẩy}} = 750\text{m}^3/\text{ngày}$.

Sơ đồ b: $\sum Q_{\text{bơm hút}} = \sum Q_{\text{bơm đẩy}} = 1000\text{m}^3/\text{ngày}$.

Sơ đồ c: $\sum Q_{\text{bơm hút}} = \sum Q_{\text{bơm đẩy}} = 1750\text{m}^3/\text{ngày}$.

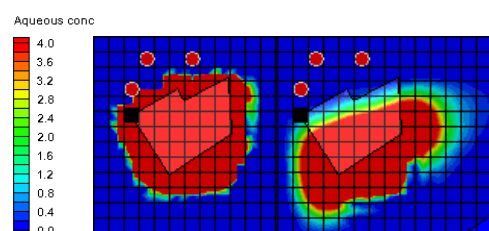
+ Nồng độ NH_4^+ trước và sau xử lý tại các giếng bơm hút và bơm đẩy được lấy tương ứng bằng 415.2mg/l và 1 mg/l.

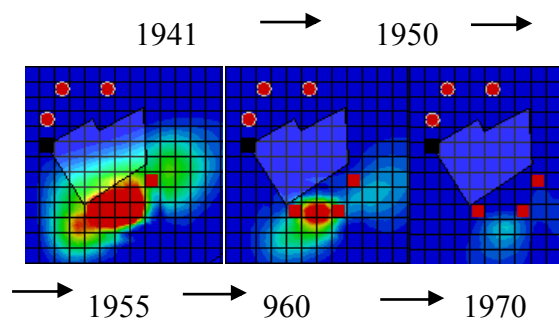
+ Hệ số chuyển đổi chất được xác định dựa trên kết quả thí nghiệm lan truyền NH_4^+ trên các ống cột đất Côn Sơn D90mm, được thu nhỏ theo tỷ lệ 1/30 so với phần diện đất thực tế của trạm quan trắc CS9 - trạm quan trắc NĐĐ nằm ngay trước cổng nghĩa trang Côn Đảo [8].

3.3. Kết quả mô phỏng xử lý amoni

Mô hình RT3D được mô phỏng theo 27.484 bước tính toán từ năm 1940 đến 2015 tương ứng với 03 sơ đồ bố trí các giếng bơm hút và bơm đẩy khác nhau (xem Hình 7). Kết quả của mô hình đã thể hiện khả năng ngăn chặn dòng lan truyền ô nhiễm NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo ra các khu vực xung quanh cũng như khả năng giảm thiểu nồng độ ô nhiễm NH_4^+ xuống dưới mức cho phép của QCVN 09:2008/BTNMT (xem từ Hình 8 đến Hình 10).

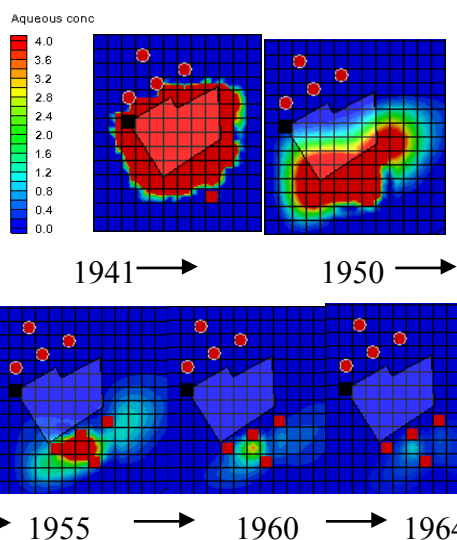
Sơ đồ a (SDa):





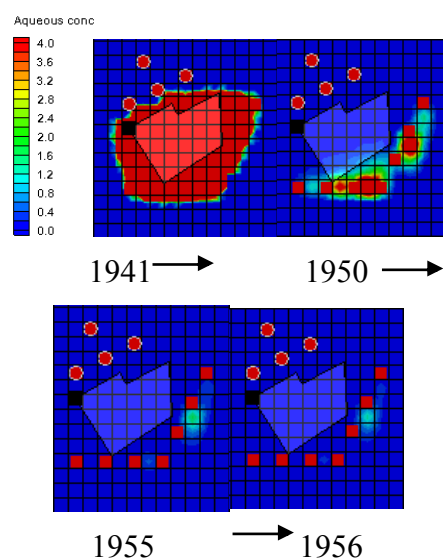
Hình 8. Mô phỏng xử lý NH_4^+ từ 1941 đến 1970 - SĐa

Sơ đồ b (SĐb):



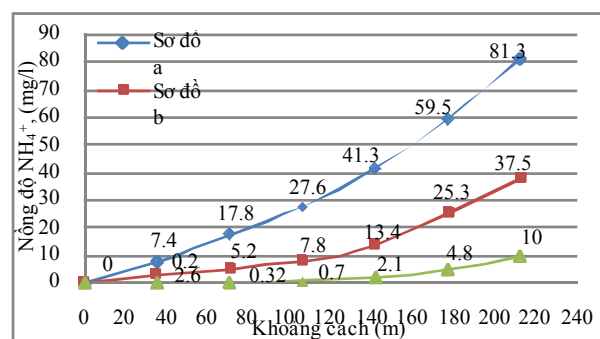
Hình 9. Mô phỏng xử lý NH_4^+ từ 1941 đến 1964 - SĐb

Sơ đồ c (SĐc):



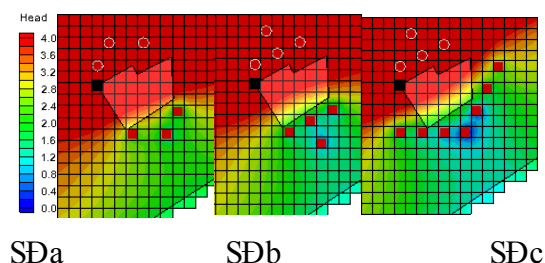
Hình 10. Mô phỏng xử lý NH_4^+ từ 1941 đến 1956 - SĐc

Tương ứng với mỗi sơ đồ lắp đặt các giếng bơm hút - bơm đẩy khác nhau thì hiệu quả xử lý NH_4^+ tại mỗi thời điểm cũng có sự khác biệt. Sự phân bố nồng độ NH_4^+ được xử lý tính từ trung tâm nghĩa trang Côn Đảo đến các giếng bơm hút, dọc theo hướng trục lan truyền ô nhiễm chính - hướng Đông Nam vào năm 1950 điển hình được thể hiện ở Hình 11 dưới đây.



Hình 11. Biểu đồ phân bố nồng độ NH_4^+ từ trung tâm nghĩa trang Côn Đảo dọc theo hướng trục lan truyền chính Đông Nam vào năm 1950

Bên cạnh việc mô phỏng quá trình xử lý NH_4^+ , mô hình RT3D còn thể trường mực NĐĐ khi tiến hành bơm hút liên tục. Kết quả mô phỏng cao trình mực nước tầng Pleistocen tại Thung lũng Côn Sơn sau một năm bơm hút (vào năm 1941) được thể hiện ở Hình 12 dưới đây.



Hình 12. Cao trình mực nước tầng Pleistocen tại và xung quanh nghĩa trang khi

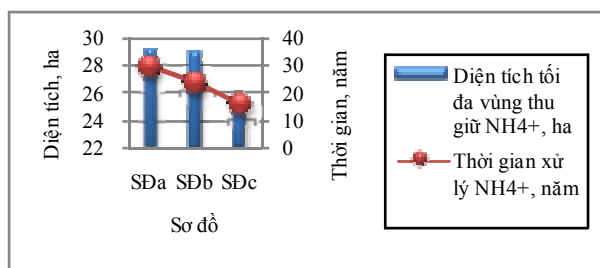
áp dụng biện pháp xử lý NH_4^+ tại nguồn vào năm 1941 theo các sơ đồ khác nhau

3.4. Đánh giá kết quả

Với việc thay đổi sơ đồ bố trí và số lượng các giếng bơm hút - bơm đẩy và giữ nguyên tổng lưu lượng bơm hút - bơm đẩy trong từng sơ đồ đề xuất thì diện tích vùng thu giữ và thời gian xử lý hoàn toàn NH_4^+ ở nghĩa trang Côn Đảo có sự thay đổi rõ nét (xem Bảng 4 và Hình 13).

Bảng 4. Bảng so sánh hiệu quả xử lý NH_4^+ ở nghĩa trang Côn Đảo tương ứng với các sơ đồ vị trí giếng bơm hút - bơm đẩy khác nhau

Sơ đồ	Diện tích tối đa vùng thu giữ NH_4^+ , ha	Thời gian xử lý hoàn toàn NH_4^+ , năm
a	29.25	30 (1940 ÷ 1970)
b	29.00	24 (1940 ÷ 1964)
c	24.75	16 (1940 ÷ 1956)



Hình 13. Đồ thị so sánh hiệu quả xử lý NH_4^+ ở nghĩa trang Côn Đảo ứng với các sơ đồ vị trí các giếng xử lý khác nhau

Nhìn nhận từ kết quả ở các Hình 8 ÷ 10, 13 cho thấy, khi số lượng bơm hút - bơm đẩy, đặc

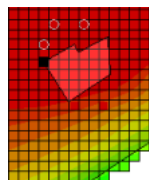
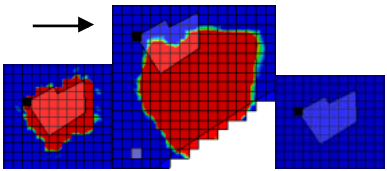
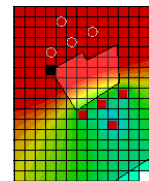
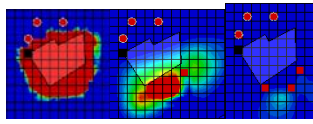
biệt là số lượng bơm hút càng tăng thì diện tích thu hẹp vùng ô nhiễm NH_4^+ càng nhỏ và thời gian xử lý hoàn toàn NH_4^+ càng ngắn. Điều này cho thấy, việc bố trí, lựa chọn số lượng và lưu lượng giếng khoan bơm hút - bơm đẩy thuộc biện pháp Bơm và xử lý tại nguồn có ý nghĩa quan trọng trong việc nâng cao hiệu quả xử lý ô nhiễm NH_4^+ ngay tại nghĩa trang Côn Đảo.

Tuy nhiên, song hành cùng với hiệu quả xử lý NH_4^+ gia tăng bằng cách tăng số lượng và lưu lượng các bơm hút- đẩy thì khả năng sụt lún xung quanh khu vực nghĩa trang cũng như khả năng xâm nhập mặn vào tầng Pleistocen ở trong đất liền cũng gia tăng nhanh (xem Hình 12: mực nước tại các giếng bơm hút giảm dần từ SĐa đến SĐc và hình thành các phễu hạ thấp mực nước xung quanh một số giếng bơm hút nằm gần biển). Điều này xảy ra là do sự cộng hưởng hạ thấp mực nước từ việc gia tăng số lượng và lưu lượng bơm đã vượt quá mực nước hạ thấp cho phép của tầng chứa nước Pleistocen, dẫn đến phễu hạ thấp nằm ngang dưới mực nước biển. Đây chính là nguyên nhân làm đất bị sụt và là điều kiện thuận lợi giúp nước biển mặn xâm nhập vào sâu trong tầng Pleistocen.

Để xác định hiệu quả của việc ứng dụng biện pháp xử lý ô nhiễm tại các nghĩa trang lâu năm nói riêng hay các bãi chôn lấp nói chung, cần thiết so sánh sự khác biệt về thời gian và vùng thu giữ NH_4^+ khi có và không ứng dụng biện pháp xử lý NH_4^+ tại nghĩa trang Côn Đảo. Kết

quả thống kê sự khác biệt theo sơ đồ a (SĐa) được thể hiện ở Bảng 5 dưới đây.

Bảng 5. Bảng thống kê sự khác biệt khi có và không ứng dụng biện pháp xử lý NH_4^+ tại nghĩa trang Côn Đảo theo SĐa

Ứng dụng biện pháp xử lý NH_4^+	Diện tích vùng ảnh hưởng, ha	Thời gian loại bỏ NH_4^+ , năm	Sơ đồ hóa
Không	42.25	58	Trường mực nước 
			Lan truyền NH_4^+  1941 → 1955 1998 →
Có	29.25	30	Trường mực nước 
			Xử lý NH_4^+  1941 → 1955 1970 →

4. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Với mục tiêu chính là loại bỏ hay làm sạch NH_4^+ (với nồng độ ban đầu bằng 415.2mg/l) phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng chứa nước Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn, biện pháp xử lý tại nguồn bao gồm bơm NĐĐ lên, xử lý NH_4^+ (chuyển hóa NH_4^+ thành N_2) trên mặt đất và cuối cùng là bổ cập NĐĐ sau xử lý lại vào tầng Pleistocen đã được ứng

dụng. Dựa trên sự giả định NĐĐ sau khi được xử lý trên mặt đất đã làm giảm nồng độ NH_4^+ xuống bằng 1mg/l thì kết quả mô phỏng xử lý NH_4^+ ngay tại nghĩa trang đã cho thấy việc ứng dụng biện pháp xử lý tại nguồn đã giúp giảm thời gian lan truyền NH_4^+ trong tầng Pleistocen ở Thung lũng Côn Sơn từ 58 năm theo lan truyền tự nhiên xuống còn 16, 24 và 30 năm tương ứng với sơ đồ xử lý đề xuất

SĐc, SĐb và SĐa. Tuy nhiên, qua phân tích tác động quan lại giữa hiệu quả xử lý ô nhiễm tại nguồn (bao gồm vị trí, số lượng và lưu lượng các bơm hút- đẩy) và sự hạ thấp mực nước tầng Pleistocen ngay dưới nghĩa trang Côn Đảo cũng cho thấy, để có thể xác định được giải pháp hợp lý đối với từng bài toán xử lý ô nhiễm tại nguồn trong NĐĐ, đặc biệt là ở khu vực ven biển, cần thiết nghiên cứu song hành mối quan hệ giữa các yếu tố quyết định hiệu quả xử lý ô nhiễm tại nguồn và sự dao động mực NĐĐ để giảm thiểu các tác động tiêu cực phát sinh.

Nghiên cứu ứng dụng biện pháp xử lý NH_4^+ phát thải từ nghĩa trang Côn Đảo đến tầng Pleistocen của Thung lũng Côn Sơn là một bài toán xử lý ô nhiễm thiết thực. Kết quả bài toán đã góp phần bổ sung các cơ sở khoa học để công tác triển khai các biện pháp xử lý ô nhiễm tại các nghĩa trang lâu năm nói riêng hay các bãi chôn lấp nói chung có thể thực thi vào thực tế. Đồng thời kết quả mô phỏng xử lý ô nhiễm tại nguồn, điển hình là NH_4^+ trên phần mềm RT3D - GMS có

thể hỗ trợ đắc lực cho các đơn vị chức năng trong việc định hướng và tìm ra giải pháp xử lý ô nhiễm phù hợp với thực trạng ô nhiễm của các bãi chôn lấp tại Việt Nam.

Nhằm tăng hiệu quả xử lý ô nhiễm NĐĐ tại các nghĩa trang lâu năm hay các bãi chôn lấp, kiến nghị thực hiện các công việc sau:

- Quan trắc chất lượng NĐĐ định kỳ nhằm kiểm soát vùng thu giữ ô nhiễm và xác định được hiệu quả xử lý.
- Kiểm soát sự phát thải ô nhiễm tại nguồn để tránh tái lan truyền ô nhiễm.
- Thiết lập vùng khai thác NĐĐ an toàn cho các cư dân đang sinh sống xung quanh các bãi chôn lấp để tránh xâm nhập ô nhiễm khách quan từ quá trình sinh hoạt của người dân xuống tầng chứa NĐĐ và đồng thời hạn chế khả năng mở rộng vùng thu giữ ô nhiễm do tác động các bơm hút của người dân.
- Nâng cao ý thức của người dân về việc chôn lấp để tiến đến một môi trường xanh, xã hội xanh.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] S.B. Mailath and A.C. Chu, “In-situ groundwater nitrification and de-nitrification remediation system,” University Technologies International, US 11/090, 380, 2008.
- [2] Options for Discharging Treated Water from Pump and Treat Systems, EPA 542-R-07-006, May 2007.
- [3] C. W. Fetter, “Contaminant Hydrogeology,” New York: Macmillan Publishing Company, 1992.
- [4] M.Th.Van Genuchten, R.J. Wagenet, “Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: theoretical development and analytical solutions,” Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 1989, pp.
- [5] H.M. Selim, J.M. Davidson, R.S. Mansell, “Evaluation of a Two-site Adsorption-desorption Model for Describing Solute Transport in Soils,” In: Proc. Summer Computer Simulation Conf., Washington, D.C, 1976.
- [6] D.A. Cameron, A. Klute, “Convective-Dispersive Solute Transport with a Combined

- Equilibrium and Kinetic Adsorption Model,” Water Resour. Res. 13, 1977, pp.183–188.
- [7] T.P. Clement, N.L. Jones, “RT3D Tutorials for GMS Users,” Pacific Northwest National laboratory-11805, Feb. 1998.
- [8] Nguyễn Thị Minh Trang, Lê Đình Hồng, Võ Khắc Trí, “Mô phỏng thí nghiệm lan truyền amoni trong các cột đất Côn Sơn,” Tạp chí Khoa học và công nghệ Thủy lợi số 35, 12/2016.
- [9] Nguyễn Thị Minh Trang, Lê Đình Hồng, Võ Khắc Trí, “Dự báo dòng chảy nước dưới đất ở đảo Côn Sơn theo kịch bản Biến đổi khí hậu,” Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi số 33, 06/2016, trang 39–49.
- [10] Nguyễn Thị Minh Trang, Lê Đình Hồng, Võ Khắc Trí, “Lan truyền ô nhiễm amoni từ nghĩa trang Côn Đảo đến các tầng chứa nước dưới đất đảo Côn Sơn,”
- [11] Đề tài: “Nghiên cứu đánh giá hiện trạng, đề xuất các giải pháp phát triển, khai thác, sử dụng và quản lý tổng hợp tài nguyên nước cho huyện Côn Đảo”, Liên đoàn Quy hoạch và Điều tra Tài nguyên nước Miền Nam, 2005.
- [12] Báo cáo vận hành mạng quan trắc tài nguyên nước trên địa bàn Huyện Côn Đảo, Liên đoàn Quy hoạch và Điều tra Tài nguyên nước Miền Nam, 2015.
- [13] J.D. Istok, K.J. Dawson, “Aquifer Testing: Design and Analysis of Pumping and Slug Tests,” CRC Press, 1991, pp.368.
- [14] TCVN 9903:2014 - Công trình thủy lợi. Yêu cầu thiết kế, thi công và nghiệm thu hạ mực nước ngầm, Hà Nội 2014.
- [15] R.L. Satkin, P.B. Bedient “Effectiveness of various aquifer restoration schemes under variable hydrogeologic conditions,” Ground Water, 1988, 26(4)488-499.
- [16] Dupuit J., Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux decouverts et a travers les terrains permeables, 2eme edition; Dunot, Paris, 1863.
- [17] Forchheimer P., Groundwasserbeneuxg in hydraulik, B.G. Tubrier, Leipzig, 1930.
- [18] Nguyễn Việt Anh và cộng sự, “Nghiên cứu xử lý nước ngầm nhiễm Amôni bằng phương pháp sinh học kết hợp nitrat hóa và khử nitrat với giá thể vi sinh là sợi Acrylic,” Tuyển tập các báo cáo khoa học Hội nghị Môi trường toàn quốc 2005, trang 898 - 911.