

SỬ DỤNG PHƯƠNG PHÁP CHẤT CHỈ THỊ TRONG NGHIÊN CỨU ĐỊA CHẤT THỦY VĂN KARST Ở VIỆT NAM

VŨ THỊ MINH NGUYỆT¹, NICO GOLDSCHIEDER²,
OKKE BATELAAN³, F. HILAIRE DE SMEDT³

¹Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản, Km 9, Thanh Xuân, Hà Nội;

²University of Neuchâtel, Rue Emile-Argand 11, 2009 Neuchâtel, Switzerland

³Vrije Universiteit Brussel (VUB) Pleinlaan 2, B-1050 Brussels, Belgium

Tóm tắt: Phương pháp chất chỉ thị đã và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau tại nhiều nước trên thế giới. Đặc biệt phương pháp này được sử dụng phổ biến như một phương pháp chuyên dụng để giải quyết các nhiệm vụ khác nhau trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst, nghiên cứu hang động như xác định sự tồn tại dòng ngầm, ranh giới lưu vực, các thông tin về nguồn ô nhiễm... Bài báo này giới thiệu kỹ thuật, các bước tiến hành thí nghiệm chất chỉ thị, kết quả và khả năng áp dụng các thí nghiệm chất chỉ thị trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst ở Việt Nam.

I. MỞ ĐẦU

Thí nghiệm chất chỉ thị bán định lượng đầu tiên (sử dụng muối ăn và chất nhuộm màu) được áp dụng trong khảo sát địa chất thủy văn tầng chứa nước karst lưu vực sông Aach nước Đức từ thế kỷ 19. Hiện nay phương pháp chất chỉ thị đã và đang được ứng dụng trong nhiều lĩnh vực khác nhau từ địa chất, địa chất thủy văn đến các lĩnh vực khác như hóa học, vật lý và sinh học [3].

Phương pháp chất chỉ thị được ứng dụng trong nghiên cứu thủy văn và địa chất thủy văn môi trường của mọi loại tầng chứa nước khác nhau nhằm thu thập các thông tin liên quan tới sự vận động và nguồn gây ô nhiễm. Đặc biệt hiện nay phương pháp này được sử dụng phổ biến như một phương pháp chuyên dụng trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst tại nhiều nước trên thế giới. Việc sử dụng phương pháp chất chỉ thị kết hợp với quan sát địa chất và địa chất thủy văn là một trong số các phương pháp tối ưu nhất để xác định ranh giới lưu vực của các nguồn lộ karst cũng như xác định nguồn ô nhiễm và sự di chuyển các chất ô nhiễm tới và trong tầng chứa nước karst [2, 3].

Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản cùng với các đối tác bạn lần đầu tiên đã ứng dụng phương pháp chất chỉ thị trong nghiên cứu địa chất thủy văn vùng karst tại khu vực Bắc Bộ. Kết quả nghiên cứu cho thấy đây là một phương pháp khả thi, phù hợp và có thể áp dụng hiệu quả ở Việt Nam.

II. GIỚI THIỆU PHƯƠNG PHÁP

1. Khái niệm

Phương pháp chất chỉ thị (tracer technique) là phương pháp sử dụng bất kỳ một loại vật chất nào hòa lẫn vào dòng nước hoặc dòng chảy, sau đó xác định sự tái xuất hiện của chúng nhằm trả lời các câu hỏi sau: 1/ Có hay không sự kết nối giữa hai địa điểm hoặc nguồn nước; 2/ Nguồn gốc của nguồn nước chảy từ đâu; 3/ Nguồn nước này sẽ chảy đi đâu; 4/ Đặc tính thủy lực của dòng chảy và lượng ô nhiễm có thể ảnh hưởng tới các nguồn lộ nước này.

Các bước tiến hành thí nghiệm chất chỉ thị bao gồm: lựa chọn chất chỉ thị và trọng lượng thả, lựa chọn điểm thả và điểm lấy mẫu, phân tích mẫu và luận giải kết quả. Chi tiết kỹ thuật của từng bước này được trình bày trong các phần dưới đây.

2. Lựa chọn chất chỉ thị và trọng lượng thả

Hiện nay có rất nhiều loại chất chỉ thị khác nhau dưới dạng bột, dạng hòa tan (dung dịch) hoặc dạng hạt. Việc quyết định lựa chọn chất chỉ thị loại nào phụ thuộc vào mục tiêu và điều kiện cụ thể của thí nghiệm, yêu cầu về bảo vệ môi trường, giá thành và khả năng phân tích của thiết bị hiện có. Khi tiến hành thí nghiệm chất chỉ thị trong điều kiện phải tránh gây màu sắc, nên dùng chất chỉ thị nhạt màu hoặc không màu; hoặc trong điều kiện thí nghiệm trên bề mặt với khoảng cách xa không nên dùng chất chỉ thị màu nhằm tránh hấp thụ ánh sáng làm giảm tính chính xác của thí nghiệm.

Các chất chỉ thị phổ biến dùng trong nghiên cứu thủy văn karst là nhóm các chất nhuộm màu huỳnh quang như uranin, rhodamin, eosin, trinopal, ... trong đó uranin được sử dụng rộng rãi nhất. Ví dụ tại Thụy Sĩ, khoảng 70% thí nghiệm sử dụng nhóm chất nhuộm màu, trong đó sử dụng uranin chiếm 40%. Có 67% thí nghiệm chất chỉ thị sử dụng nhóm chất nhuộm màu, trong đó tới 30% thí nghiệm sử dụng uranin [4]. Uranin hay còn gọi là sodium-fluorescen đã được xác định là chất hoàn toàn không độc hại với môi trường, hệ sinh thái cũng như sức khỏe con người [3]. Ngoài ra nhóm muối (ví dụ, muối ăn thông thường NaCl) cũng được sử dụng trong thí nghiệm các chất chỉ thị với những đặc điểm về tính dễ hòa tan, không độc hại và giá thành thấp.

Bên cạnh đó nhóm chất chỉ thị đồng vị bền, nhóm vi khuẩn và nhóm ăn vi khuẩn cũng được sử dụng trong một số điều kiện thuận lợi. Các chất chỉ thị tự nhiên như nhiệt độ, độ đục, độ tổng khoáng hóa, đồng vị bền, ... đã và đang được sử dụng khá phổ biến.

Để xác định trọng lượng chất chỉ thị sử dụng công thức thực nghiệm của Käss [3] dưới đây: $M = L \times k \times B$

trong đó: M = trọng lượng chất chỉ thị (kg); L = khoảng cách từ điểm thả đến điểm lấy mẫu (km); k = hệ số của chất chỉ thị (k lấy bằng 1 đối với chất chỉ thị uranin, k lấy từ 2 đến 15 đối với các chất nhuộm màu khác và 1000-20000 đối với chất chỉ thị nhóm muối); B = hệ số điều kiện địa chất thủy văn (từ 0,1 đến 0,9).

Hoặc sử dụng công thức của Worthington & Smart [9] như sau:

$$M = 1,9 \times 10^{-5} (IQC)^{0,95}$$

trong đó: Q = lưu lượng của dòng chảy (l/s); C = hàm lượng chất chỉ thị (dự kiến) xuất lộ tại điểm lấy mẫu ($\mu\text{g/l}$).

Tuy nhiên, khi xác định trọng lượng phù hợp ngoài công thức thực nghiệm trên còn đòi hỏi thêm thông tin địa chất, địa chất thủy văn của khu vực thí nghiệm và kinh nghiệm của người tiến hành thí nghiệm. Khi xác định trọng lượng thả cũng cần cân nhắc và tham khảo thêm thông tin của các thí nghiệm đã tiến hành từ trước. Tránh thả quá nhiều chất chỉ thị (đặc biệt đối với chất chỉ thị màu) vừa lãng phí, gây màu sắc quá ấn tượng hoặc phản cảm tại nơi lấy mẫu và tốn nhiều thời gian khi phân tích mẫu. Ngược lại, việc thả quá ít chất chỉ thị sẽ gây khó khăn cho việc phân tích mẫu (đặc biệt đối với những thiết bị phân tích có độ xác định và độ nhạy thấp) và làm ảnh hưởng thậm chí sai lệch kết quả thí nghiệm.

3. Điểm thả và điểm lấy mẫu

Việc lựa chọn điểm thả và phương pháp thả phụ thuộc vào mục đích của thí nghiệm, cũng như điều kiện tự nhiên của vùng nghiên cứu. Các điểm mất nước, hố sụt, hang nước, lỗ khoan, ... là những vị trí thuận lợi để thả chất chỉ thị. Trong trường hợp đặc biệt, khi nghiên cứu sự di chuyển của nguồn ô nhiễm qua đới epikarst chất chỉ thị có thể được trải rộng trên bề mặt, sau đó tạo mưa nhân tạo (Hình 1). Sau khi thả, tuyệt đối không được đến điểm lấy mẫu tránh gây ô nhiễm “chủ động” giữa điểm thả và điểm lấy mẫu.

Mẫu nước thường được lấy tại các nguồn xuất lộ nước, các dòng chảy xuất hiện trên mặt hoặc các hang nước chảy ra theo 3 phương pháp sau:

1/ Sử dụng túi than hoạt tính (1 lần) tại điểm lấy mẫu (Hình 2a). Mẫu lấy theo phương pháp này chỉ cho thông tin có hay không sự kết nối giữa điểm thả và điểm lấy mẫu, mà không cho biết thông tin về thời gian di chuyển cũng như tốc độ dòng chảy.

2/ Lấy mẫu theo khoảng cách thời gian nhất định và sau đó phân tích trong phòng thí nghiệm (Hình 2b, 2d).

3/ Lấy mẫu liên tục từ vài giây đến vài phút bằng thiết bị xác định trực tiếp chất chỉ thị ngoài thực địa (Field flow through fluorometer) (Hình 2c).

4. Phân tích mẫu và luận giải kết quả

Tại các nước tiên tiến như Thụy Sĩ, Bỉ, Mỹ và Pháp thường sử dụng khối phổ huỳnh quang để phân tích mẫu của nhóm chất chỉ thị nhuộm màu trong phòng thí nghiệm. Đây là một thiết bị rất ưu việt cho phép xác định đồng thời sự có mặt của từng chất chỉ thị trong cùng một mẫu và có thể chất chỉ thị ở hàm lượng rất thấp (tới 10^{-3} $\mu\text{g/l}$). Chi tiết về phương pháp phân tích mẫu đối với các loại chất chỉ thị khác nhau được đề cập chi tiết trong tài liệu tham khảo [3].

Hàm lượng các chất chỉ thị có trong mẫu nước từ kết quả phân tích mẫu được thể hiện theo thời gian gọi là đường cong thu hồi chất chỉ thị (Hình 3). Từ hình dạng đường cong này sẽ xác định được kết quả thí nghiệm chất chỉ thị và các thông số thủy lực của dòng ngầm. Để luận giải kết quả hiện nay thường sử dụng các phần mềm chuyên dụng, ví dụ như Traci [8] hoặc QTRACER2 [7].

Hàm lượng chất chỉ thị thu hồi là lượng chất chỉ thị xuất lộ tại điểm lấy mẫu được thể hiện dưới dạng tổng trọng lượng hay tỉ lệ phần trăm. Đây một trong những thông số hữu dụng để đánh giá mức độ tin cậy của thí nghiệm và mức độ phức tạp của hệ thống dòng ngầm. Một số thí nghiệm chất chỉ thị trong vùng karst cho hình dạng đường cong thu hồi chất chỉ thị có nhiều đỉnh khác nhau, điều này có thể giải thích do sự tồn tại của nhiều hay còn gọi là hệ thống dòng ngầm giữa điểm thả và điểm xuất lộ [1]. Trong đa số trường hợp khác, đường cong thu hồi chất chỉ thị có dạng đuôi dài do sự lưu các chất chỉ thị tại các khu vực không lưu thông hoặc do sự thấm và nhả ra một cách từ từ các chất chỉ thị [2].

Để xác định lượng chất chỉ thị thu hồi sử dụng công thức sau:

$$R_M = Q \cdot \int_{t=0}^{\infty} c \cdot dt = Q \cdot I$$

trong đó: M_R = trọng lượng chất chỉ thị (thu hồi); Q = lưu lượng tại điểm lấy mẫu; c = hàm lượng chất chỉ thị; I = diện tích bề mặt của đường cong thu hồi chất chỉ thị.

Thời gian xuất lộ chất chỉ thị (t_1 , t_2 và t_3) theo đường cong thu hồi cho phép đánh giá được vận tốc dòng ngầm theo công thức (4).

$$v = \frac{x}{t}$$

trong đó: v = vận tốc của dòng chảy; x = khoảng cách (theo đường thẳng) từ điểm thả chất chỉ thị tới điểm lấy mẫu hoặc quan trắc; t = thời gian di chuyển của chất chỉ thị.

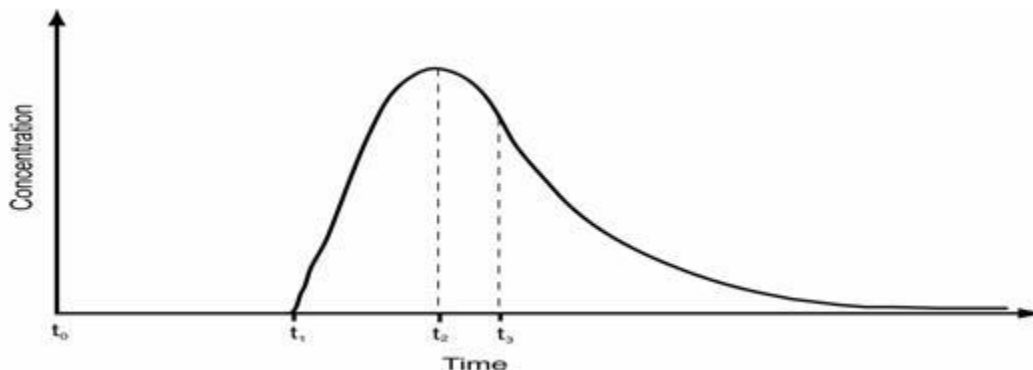


Hình 1. Lựa chọn điểm thả chất chỉ thị tại điểm mắt nước (trái) và rải đều trên bề mặt (phải)



Hình 2. Ví dụ về sử dụng các phương pháp lấy mẫu thí nghiệm chất chỉ thị.

Vận tốc lớn nhất của dòng ngầm được xác định tương ứng với thời gian bắt đầu xuất hiện chất chỉ thị, vận tốc trung bình của dòng ngầm xác định tương ứng với thời gian chất chỉ thị xuất hiện với hàm lượng trung bình.



Hình 3. Đường cong thu hồi chất chỉ thị.

Ghi chú: t_0 là thời điểm thả chất chỉ thị; t_1 : thời điểm bắt đầu xuất hiện chất chỉ thị; t_2 : thời điểm chất chỉ thị xuất hiện nhiều nhất; t_3 : thời điểm chất chỉ thị xuất hiện với hàm lượng trung bình..

III. ÁP DỤNG PHƯƠNG PHÁP CHẤT CHỈ THỊ TRONG VÙNG KARST Ở TÂY BẮC BỘ

Ở Việt Nam, Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản cùng với các các đối tác Bỉ và Thụy Sĩ đã áp dụng phương pháp chất chỉ thị trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst tại một số vùng karst ở Tây Bắc Bộ [5, 6]. Trong bài báo này, chúng tôi xin giới thiệu kết quả thí nghiệm chất chỉ thị ở Sơn La thực hiện trong khoảng thời gian từ năm 2000 đến 2003 (Bảng 1).

Mục đích sử dụng các chất chỉ thị được áp dụng nhằm: 1. Thử nghiệm việc sử dụng phương pháp chuyên dụng này trong điều kiện cụ thể của Việt Nam; 2. Xác định có hay không các dòng ngầm và đặc điểm thủy động lực của chúng, và 3. Xác định đặc điểm địa chất thủy văn của tầng chứa nước, mối liên hệ giữa địa tầng, cấu trúc địa chất và dòng chảy ngầm. Trên cơ sở đó, cung cấp các thông tin cho phép xác định ranh giới lưu vực sông và các vấn đề liên quan đến sự di chuyển của các chất ô nhiễm và việc bảo vệ tầng chứa nước karst.

Thông tin chi tiết về chất chỉ thị đã lựa chọn, liều thả, trọng lượng thả và điểm lấy mẫu của từng thí nghiệm được trình bày trong Bảng 1. Mẫu được lấy đều theo khoảng cách thời gian, cụ thể là cứ 30 phút hoặc 1 giờ lấy một mẫu và lấy liên tục trong thời gian 2 đến 4 ngày tùy theo từng thí nghiệm. Đặc biệt tại thí nghiệm Bon Phặng, quá trình lấy mẫu đã tiến hành đồng thời với việc đo xác định tổng độ khoáng hóa nhằm thử nghiệm khả năng sử dụng thông số này như chỉ thị “tự nhiên” để giảm chi phí phân tích mẫu đối với các thí nghiệm sử dụng mẫu ăn trong tương lai.

Bảng 1. Các thí nghiệm chất chỉ thị đã tiến hành tại Sơn La

Tên thí nghiệm	Chất chỉ thị	Điểm thả	Trọng lượng thả (kg)	Điểm lấy mẫu
Suối Muội	Uranin Muối ăn	Trong hang Thẩm Hán Cửa hang Thẩm Hán	4,660 200	Mạch lộ Bản Sảng
Bon Phặng	Uranin Muối ăn	Hang Bản Láy	1,400 200	Mạch lộ Long Ngợ
Nậm La 1	Uranin	Hang Nhà Tù	1,485	Mạch lộ Hang Dơi
Nậm La 2	Uranin	Bản Ái	1,950	Mạch lộ Hang Dơi

Mẫu nước phân tích chất nhuộm màu được phân tích bằng khối phổ huỳnh quang kế tại Bỉ và huỳnh quang kế tại Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản. Mẫu phân tích muối được gửi phân tích tại Trung tâm Phân tích Thí nghiệm địa chất, Hà Nội.

1. Đường cong thu hồi chất chỉ thị

Đường cong thu hồi chất chỉ thị tại nguồn lộ Bản Sảng thể hiện trong Hình 4a. Kết quả này đã chứng minh sự tồn tại của dòng ngầm karst giữa điểm thả và điểm lấy mẫu. Chất chỉ thị uranin thả trong hang Thẩm Hán tái xuất hiện tại nguồn lộ Bản Sảng sau 17 giờ, và khi thả ngoài cửa hang nó xuất hiện tại điểm lấy mẫu sau 20,5 giờ. Hàm lượng chất chỉ thị đạt đỉnh cao nhất sau khi thả 24 giờ đối với uranin và 26 giờ đối với muối ăn. Tổng lượng chất chỉ thị uranin thu hồi được là 96% và đối với muối ăn là 71%.

Kết quả thí nghiệm chất chỉ thị tại Bon Phặng cũng đã chứng minh sự tồn tại của dòng ngầm tại đây 4b. Chất chỉ thị muối ăn xuất hiện tại nguồn lộ Bản Sảng sau 2 giờ, và uranin xuất hiện sau 3 giờ. Vận tốc lớn nhất của dòng chảy ngầm đạt tới 200 đến 214 m/giờ. Tổng lượng chất chỉ thị uranin thu hồi được là 29% và với muối ăn là 44%.

Chất chỉ thị uranin được phát hiện tại điểm lấy mẫu nước Hang Dơi sau 17 giờ và sau 25,5 giờ kể từ lúc thả, chất chỉ thị đạt đỉnh cao nhất. Hình 4c thể hiện hàm lượng chất chỉ thị uranin có trong mẫu nước theo thời gian với tổng lượng chất chỉ thị thu hồi được là 42%. Kết quả này đã chứng minh có dòng chảy ngầm giữa Hang Nhà tù và Hang Dơi. Tuy nhiên, cũng tại Hang Dơi không phát hiện được chất chỉ thị thả tại điểm mất nước Bản Ái (thí nghiệm Nậm La 2) và chưa chứng minh được sự tồn tại của dòng ngầm giữa Bản Ái và Hang Dơi.

2. Chất chỉ thị muối ăn và tổng độ khoáng hóa trong nước

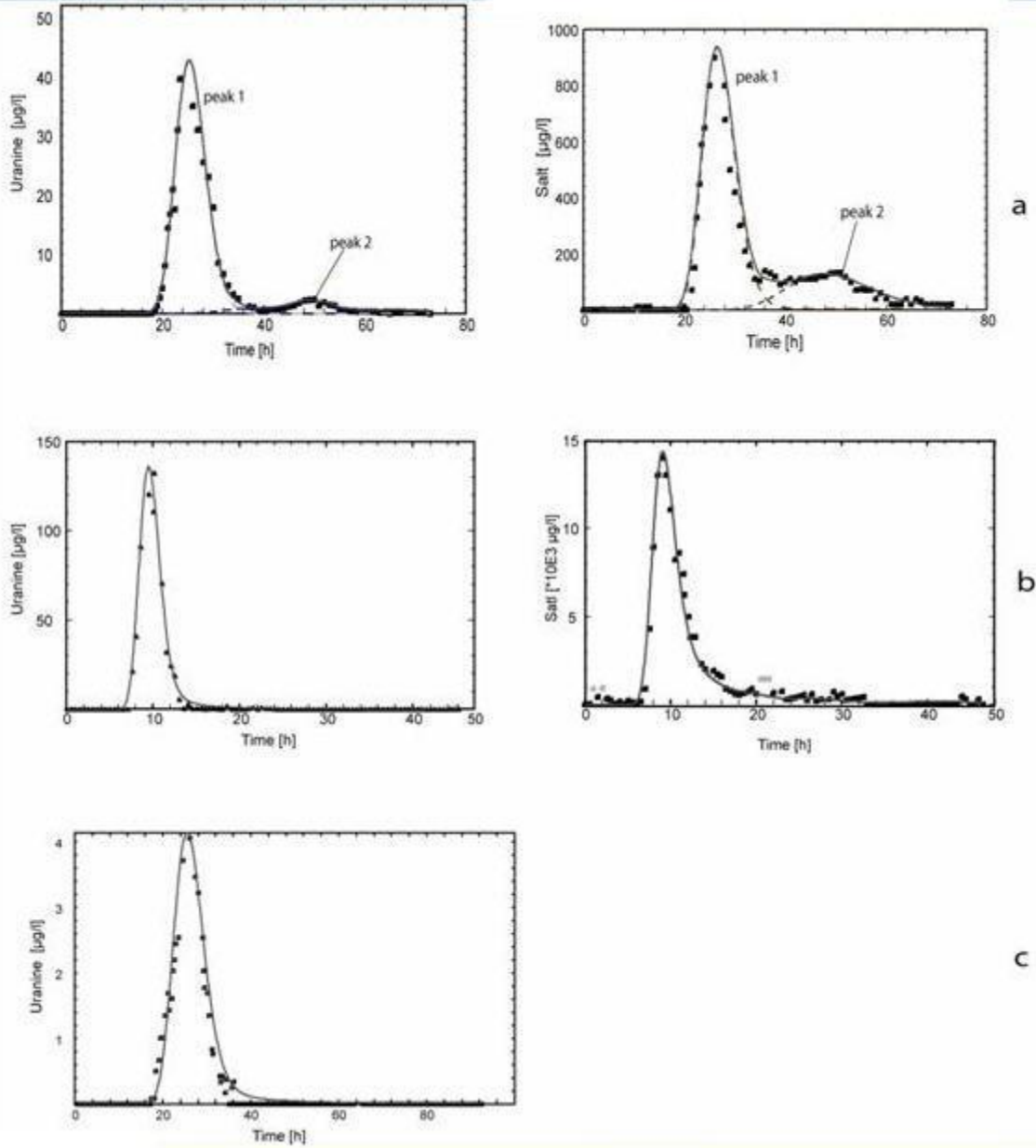
Trên Hình 5 thể hiện kết quả đo trực tiếp tổng độ khoáng hóa theo thời gian lấy mẫu chất chỉ thị tại nguồn lộ Long Ngợ. Sự thay đổi tổng độ khoáng hóa theo thời gian này rất tương đồng với đường cong thu hồi chất chỉ thị và có thể được xem như là “đường cong thu hồi tổng độ khoáng hóa”. Cụ thể thời gian khi tổng độ khoáng hóa bắt đầu tăng lên và tổng độ khoáng hóa đạt đỉnh gần như trùng khớp với thời gian chất chỉ thị muối ăn bắt đầu xuất hiện và đạt đỉnh tại điểm lấy

mẫu. Do vậy, nhằm giảm chi phí phân tích mẫu đối với các thí nghiệm sử dụng muối ăn có thể đo tổng độ khoáng hóa để xác định lượng chất chỉ thị (muối ăn) ngay ngoài thực địa, đồng thời chỉ nên phân tích một lượng mẫu nhất định nhằm kiểm chứng kết quả khi cần thiết.

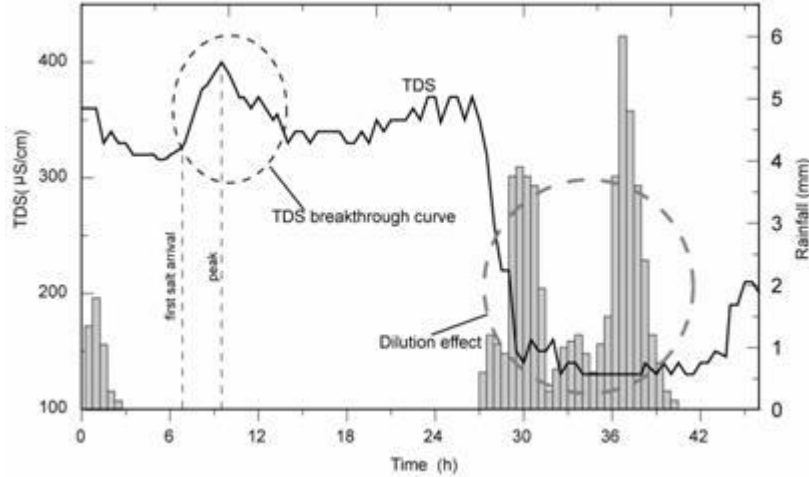
Hơn thế nữa, đối sánh kết quả đo tổng độ khoáng hóa với lượng mưa đo tại nguồn lộ Long Ngõ còn cho biết thêm thông tin về đặc điểm thủy văn của hệ thống sông ngầm karst tại đây. Tại Hình 5 này thể hiện rõ hiệu ứng pha loãng (dilution effect) biểu thị cho sự có mặt của nước mưa thấm trực tiếp tới nguồn lộ chủ yếu qua các điểm mất nước (điểm thả chất chỉ thị) và đồng thời cho chúng ta thấy nguồn nước cấp cho nguồn lộ karst này chủ yếu được cấp qua điểm nạp lại nước (point recharge). Đây là những thông tin khoa học, làm cơ sở cho việc thành lập bản đồ tiềm năng ô nhiễm và bảo vệ tầng chứa nước karst.

3. Hòa trộn các tầng chứa nước ngầm

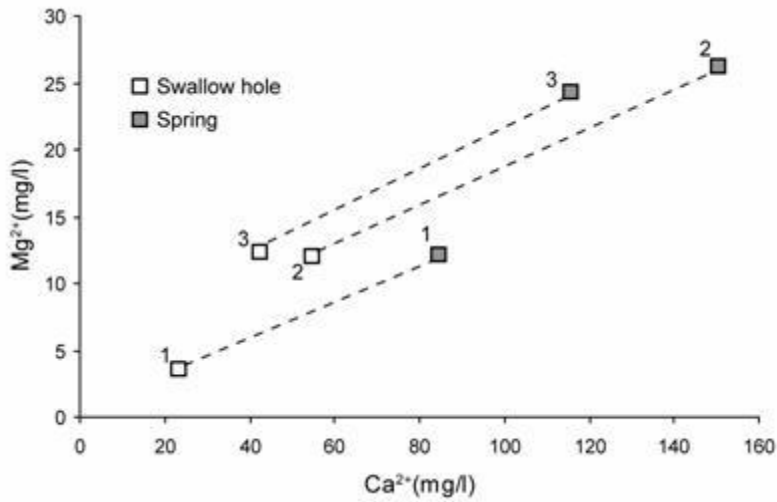
Trên Hình 6 thể hiện tương quan về hàm lượng Ca^{2+} và Mg^{2+} giữa hang mất nước (swallow hole) và mạch lộ nước (spring) của từng dòng ngầm. Do quá trình hòa tan rửa lũa các đá carbonat, hàm lượng Ca^{2+} và Mg^{2+} thường tăng lên dọc theo hướng dòng chảy ngầm. Tuy nhiên, theo Hình 6, hàm lượng Ca^{2+} và Mg^{2+} giữa hang mất nước và mạch lộ tại 3 dòng chảy ngầm lượng tăng rất đột biến. Chỉ từ quá trình hòa tan rửa lũa đá gốc dọc theo dòng ngầm với khoảng cách ngắn từ 1,5 tới 4 km và thời gian dòng chảy lưu thông xấp xỉ 24 tiếng không thể tạo ra lượng cation lớn như vậy. Do đó, ở đây đã có sự hòa trộn nguồn nước giữa các dòng ngầm và tầng chứa nước sâu. Cụ thể là các dòng ngầm chảy từ hang Thâm Hán, Bản Lầy và Nhà Tù đã hòa trộn với tầng chứa nước có hàm lượng các cation rất cao trước khi xuất lộ tại các mạch lộ Bản Sảng, Long Ngõ và Hang Dơi.



Hình 4. Đường cong thu hồi chất chỉ thị: a. Tại mạch lộ Bản Sàng; b. Tại mạch lộ Long Ngợ; c. Tại mạch lộ Hang Dơi.



Hình 5. Tổng độ khoáng hóa đo tại mạch lộ Long Ngõ và lượng mưa.



Hình 6. Tương quan hàm lượng Ca^{2+} và Mg^{2+} giữa hang mát nước và hang lộ nước:
 1. Dòng ngầm giữa hang Bản Lầy - Long Ngõ; 2. Nhà Tù - Hang Dơi; 3. Thẩm Hán - Bản Sáng

IV. KẾT LUẬN VÀ KIẾN NGHỊ

Việc tiến hành thí nghiệm chỉ thị theo các bước như sau: 1. Lựa chọn chất chỉ thị và trọng lượng thả; 2. Lựa chọn điểm thả và điểm lấy mẫu; 3. Phân tích mẫu và luận giải kết quả. Tùy theo mục tiêu của thí nghiệm và điều kiện cụ thể của vùng nghiên cứu mà quyết định tiến hành ở quy mô khác nhau.

Các kết quả thu được từ thí nghiệm chất chỉ thị tại Sơn La cho thấy đây là phương pháp chuyên dụng, đặc biệt cần thiết trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst. Phương pháp này được sử dụng không chỉ để chứng minh sự tồn tại của dòng chảy ngầm trong điều kiện không thể tiếp cận được bằng khảo sát hang động mà còn cho chúng ta các thông tin về đặc tính thủy lực của dòng ngầm, cũng như các thông tin thủy văn liên quan tới tầng chứa nước. Kết hợp phương pháp chất chỉ thị với các phương pháp khác, ví dụ như thủy địa hóa, sẽ cung cấp các thông tin toàn cảnh về đặc điểm địa chất thủy văn, về nguồn và sự di chuyển các chất ô nhiễm tới tầng chứa nước karst.

Dưới sự hướng dẫn của các chuyên gia nước ngoài, các cán bộ Viện Khoa học Địa chất và Khoáng sản đã học hỏi, cập nhật và làm chủ được phương pháp. Đặc biệt đã tích lũy được kinh nghiệm thực tế khi tiến hành thí nghiệm chất chỉ thị trong điều kiện cụ thể của Việt Nam. Với các thiết bị phân tích đã có hiện nay như phân tích chất chỉ thị màu tại thực địa (Flow through Fluorometer FL30) và trong phòng thí nghiệm (Fluorometer FM 109510-33), chúng tôi hoàn toàn làm chủ được phương pháp và mong muốn ứng dụng rộng rãi phương pháp này trong nghiên cứu địa chất thủy văn karst tại Việt Nam.

VĂN LIỆU

1. **Brown M.C., Wigley T.M.L., 1969.** Water budget studies in karst aquifers. *J. of Hydrology*, 9/1 : 113-116.
2. **Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C., 2008.** Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *Intern. J. of Speleology*, 37/1 : 27-40.
3. **Käss W., 1998.** Tracing technique in geohydrology. *A.A. Balkema, Rotterdam*, 581 p.
4. **Meus Ph., Käss W., Schnegge P.A., 2006.** Background and detection of fluorescent tracers in karst groundwater. In: *Durán J.J., Andreo B.Y., Carrasco F. (Eds.). Karst, climate change and groundwater. Hidrogeologia y Aguas Subterráneas*, 18 : 65-75.
5. **Nguyet V.T.M., Batelaan O., De Smedt F., 2004.** Contribution to the karst hydrogeology of Son La, Vietnam by artificial tracer experiments. *Intern. Transdisc. Conf. Devel. and Conserv. of Karst Regions*, pp. 13-18. Hà Nội.
6. **Nguyet V.T.M., Goldscheider N., 2006.** Tracer tests, hydrochemical and microbiological investigations as a basis for groundwater protection in a remote tropical mountainous karst area, Vietnam. *Hydrogeology J.*, 14/7 : 1147-1159.
7. **QTRACER.2** Software tool for the evaluation of tracer breakthrough curves (free download): <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=549>.
8. **Werner A., 1998.** TRACI, an example for mathematical tracing-interpretation model. In: *Käss W. (Ed.) Tracing techniques in geohydrology*, pp. 376-381. *Balkema, Rotterdam, Brookfield*.
9. **Worthington S.R.H., Smart C.C., 2003.** Empirical equations for determining tracer mass for sink to spring tracer testing in karst. In: *Beck B.F. (Ed.). Sinkholes and the engineering and environmental impacts of karst*, pp.287-295.