

Effects of climate change on coastal fresh groundwater resources

Priyantha Ranjan^a, So Kazama^a, and Masaki Sawamoto^b

^a Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aoba yama 06, Sendai 980-8579, Japan

^b Department of Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba yama 06, Sendai, 980-8579, Japan

Biển đổi môi trường toàn cầu 16 (2006) 388-399, ScienceDirect, Elsevier,
www.elsevier/locate/ploenvcha

Ảnh hưởng của biến đổi khí hậu đến tài nguyên nước ngầm ven biển

Priyantha Ranjan^a, So Kazama^a, Masaki Sawamoto^b

^a Graduate School of Environmental Studies, Tohoku University, Aoba Yama 06, Sendai 980-8.579, Japan

^b Department Civil Engineering, Graduate School of Engineering, Tohoku University, Aoba Yama 06, Sendai, 980-8.579, Japan.

Tóm tắt

Nghiên cứu này nhằm đánh giá tác động của biến đổi khí hậu đối với tài nguyên nước ngầm bị xâm nhập mặn các trong tầng chứa nước ngầm ven biển. Đánh giá của chúng tôi được dựa trên mô hình khí hậu Hadley Centre, HadCM3, với kịch bản phát thải cao và thấp (SRES A2 và B2) cho giai đoạn năm 2000-2099. Trong cả hai kịch bản, các nguồn tài nguyên nước ngầm bị thiệt hại hàng năm cho thấy xu hướng ngày càng tăng sự thiếu hụt nước ở tất cả các vùng nghiên cứu, ngoại trừ khu vực phía bắc châu Phi/Sahara. Chúng tôi cũng nhận thấy rằng, đơn thuần lượng mưa và nhiệt độ không thể hiện mối tương quan cao với sự giảm sút nguồn nước ngầm. Tuy nhiên, mối quan hệ giữa chỉ số khô hạn và mất nước ngầm lại có mối tương quan nghịch chặt chẽ. Chúng tôi cũng thảo luận về tác động của sự giảm sút tài nguyên nước ngầm với các hoạt động kinh tế-xã hội, chủ yếu về tăng trưởng dân số và bình quân tài nguyên nước ngầm trên đầu người.

Từ khoá: Biến đổi khí hậu; Tài nguyên nước ngầm; Tầng chứa nước; Xâm nhập mặn; Suy giảm nước ngọt

1. Giới thiệu

Nồng độ CO₂ trong khí quyển đã liên tục tăng kể từ những năm 1950. Việc tiếp tục gia tăng CO₂ trong khí quyển có thể dẫn đến làm thay đổi đáng kể đặc điểm khí hậu toàn cầu và địa phương, bao gồm nhiệt độ và lượng mưa. Biến đổi khí hậu có thể có ảnh hưởng sâu sắc đến vòng tuần hoàn nước thông qua lượng mưa, bốc hơi nước và độ ẩm đất khi nhiệt độ ngày càng tăng. Vòng tuần hoàn nước sẽ được tăng cường do lượng nước bốc hơi và lượng mưa ngày càng gia tăng. Tuy nhiên, gia tăng lượng mưa cũng đồng thời làm tăng sự phân bố không đồng đều trên toàn cầu. Ở một số vùng trên thế, giới lượng mưa có thể giảm

đi đáng kể, hoặc có sự thay đổi lớn trong thời gian giữa mùa mưa và mùa khô (IPCC, 2001). Do vậy những thông tin về các tác động của biến đổi khí hậu địa phương hoặc khu vực đối với các quá trình thủy văn và tài nguyên nước sẽ ngày càng trở nên quan trọng. Những tác động của sự nóng lên toàn cầu và biến đổi khí hậu đòi hỏi phải được nghiên cứu một cách toàn diện trên cơ sở đa ngành, đặc biệt là khi xem xét vấn đề thủy văn và tài nguyên nước toàn cầu (Loaiciga et al., 1996; Arnell, 1999, 2004; Hulme et al., 1999; Eckhardta và Ulbrichb, 2003; Gertena et al., 2004; Hitz và Smith, 2004; Labat et al, 2004.).

Các nghiên cứu trước đây thường đề cập đến 2 kịch bản về biến đổi khí hậu cùng với các mô hình thủy văn trên cơ sở điều tra chung về tác động của biến đổi khí hậu đối với tài nguyên nước ở các khu vực khác nhau (Gleick, 1986; Loaiciga et al, 1996; Bobba et al., năm 1997; DETR, 1997; Arnell năm 1999; Najjar, 1999; Mimikou et al, 2000). DETR (1997) và Tony Arnel (1999) đã chỉ ra các vùng sẽ thiếu hụt nước do biến đổi khí hậu trong tương lai. Theo các tác giả này, các vùng thiếu hụt nước chủ yếu ở các quốc gia thuộc miền Nam và miền Bắc châu Phi, xung quanh Địa Trung Hải và Trung Đông, nam châu Á và tiểu lục địa Ấn Độ, Trung Mỹ và một phần rộng lớn ở châu Âu. Họ cũng dự đoán vào năm 2025, các nước thuộc khu vực này sẽ chịu những ảnh hưởng bất lợi của biến đổi khí hậu và gia tăng căng thẳng về tài nguyên nước. Đến những năm thập niên 2050 và 2080, sẽ có nhiều nước ở nam châu Phi cũng sẽ bị thiếu hụt nước. Áp lực về sự thiếu hụt nước sẽ gia tăng nhanh ở châu Phi và một phần nam châu Á và Đông Âu (Arnell, 1999).

Khi xem xét tài nguyên nước ở các vùng ven biển, tầng chứa nước ngầm ven biển là những nguồn nước ngọt quan trọng. Do vậy, sự nhập mặn sẽ là một vấn đề lớn cần quan tâm trong những vùng này. Sự xâm nhập mặn là biểu hiện của sự thay thế nước ngọt trong tầng chứa nước ngầm bởi nước mặn. Nó dẫn đến làm giảm nguồn nước ngầm ngọt hiện có. Sự biến đổi về khí hậu có thể gây ảnh hưởng lớn đến tốc độ bổ sung nguồn nước ngầm ở các tầng chứa nước ngầm quan trọng, vì vậy sẽ ảnh hưởng đến khả năng cung cấp nước ngọt cho các vùng ven biển. Sự mặn hóa tầng chứa nước ngầm ven biển là do sự giảm sút khả năng bổ sung nước cho tầng nước ngầm và kết quả là làm giảm nguồn tài nguyên nước ngầm.

Ước tính về sự nóng lên toàn cầu nói chung được dựa trên mô hình hoàn lưu khí quyển (GCMs), trên cơ sở dự báo tác động của gia tăng nồng độ CO₂ trong khí quyển đối với các biến động thời tiết. Các kịch bản GCM chỉ ra rằng sự nóng lên toàn cầu ngày càng tăng trong những thập kỷ gần đây và xu hướng có thể trở nên mạnh mẽ hơn trong tương lai. Tuy nhiên, do các cơ chế phức tạp và cấu trúc mô hình, các GCM khác nhau sẽ cho các kết quả dự báo khác nhau (Semmler và Jacob, 2004). Mặc dù các kết quả dự đoán có khác nhau, nhưng xu hướng biến đổi khí hậu là vấn đề nóng lên toàn cầu đã được thống nhất (IPCC, 2000). Trong nghiên cứu này, chúng tôi tập trung vào các kết quả từ mô hình Hadley Center GCM (HadCM3) với hai kịch bản SRES, một kịch bản phát thải cao (SRES-A2) và một kịch bản phát thải thấp (SRES-B2). Các kịch bản phát thải được lựa chọn thể hiện các kết quả khác nhau của sự thay đổi khí hậu và gia tăng dân số. Nhìn chung,

kịch bản A2 mô tả về một tương lai bi quan do lượng phát thải cao khí CO₂ và sự liên quan đến các tác động khí hậu cực đoan. Kịch bản A2 cũng mô tả thế giới với tốc độ tăng trưởng dân số cao trong khi sự tăng trưởng kinh tế và công nghệ tương đối chậm. Kịch bản B2 mô tả với một tương lai lạc quan hơn khi dân số tăng trưởng trung bình và giảm dần sự phát thải CO₂, kết quả gây áp lực đối với khí hậu ở mức thấp hơn (IPCC, 2001).

Để đánh giá tác động của biến đổi khí hậu tiềm năng đến tài nguyên nước ngầm, chúng tôi tập trung vào sự biến đổi về khả năng bổ sung nước ngầm và nước biển dâng cao đến sự giảm sút nguồn nước ngầm ở các vùng ven biển.

2. Phương pháp và nguồn dữ liệu

2.1. Mô hình số về sự xâm nhập mặn

Nhiều mô hình đã được phát triển để nghiên cứu quá trình xâm nhập mặn. Chúng bao gồm từ những giải pháp phân tích tương đối đơn giản đến các mô hình số phức tạp. Nghiên cứu liên quan đến sự chuyển động của nước ngọt và nước mặn trong các tầng chứa nước ven biển được chia thành 2 cách tiếp cận khác nhau (Reilly và Godman, 1985). Trong phương pháp tiếp cận thứ nhất, nước ngọt và nước mặn được giả định hoàn toàn không trộn lẫn vào nhau và tồn tại một mặt phân cách rõ rệt giữa hai vùng nước. Trong cách tiếp cận thứ hai, nước ngọt và nước mặn được giả sử được tồn tại trong một trạng thái cân bằng động do sự phân tán trong tầng chứa nước. Vì mục đích chính là đánh giá hành vi lâu dài của hệ thống nước ngầm ven biển, nên mô hình giao diện phân cách sẽ thích hợp hơn cho nghiên cứu này.

Mô hình giao diện phân cách giữa dòng nước ngọt và nước mặn dựa trên tính liên tục của dòng chảy và áp lực. Trong cách tiếp cận này, cùng với cách tính gần đúng Dupuit cho mỗi miền dòng chảy, phương trình dòng chảy liên tục có thể được tích hợp theo chiều dọc để phát triển hệ thống phương trình vi phân sau đây (Bear et al., 1999).

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{fx} (h^f - h^i) \frac{\partial h^f}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{fy} (h^f - h^i) \frac{\partial h^f}{\partial y} \right] + q_f = S_f \frac{\partial h^f}{\partial t} \\ - \theta \left[(1 + \delta) \frac{\partial h^s}{\partial t} - \delta \frac{\partial h^f}{\partial t} \right] + \alpha \theta \frac{\partial h^f}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_{sx} (h^i - z^b) \frac{\partial h^s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_{sy} (h^i - z^b) \frac{\partial h^s}{\partial y} \right] + q_s = S_s \frac{\partial h^s}{\partial t} \\ + \theta \left[(1 + \delta) \frac{\partial h^s}{\partial t} - \delta \frac{\partial h^f}{\partial t} \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Vị trí của độ cao giao diện (h^i) được cho bởi:

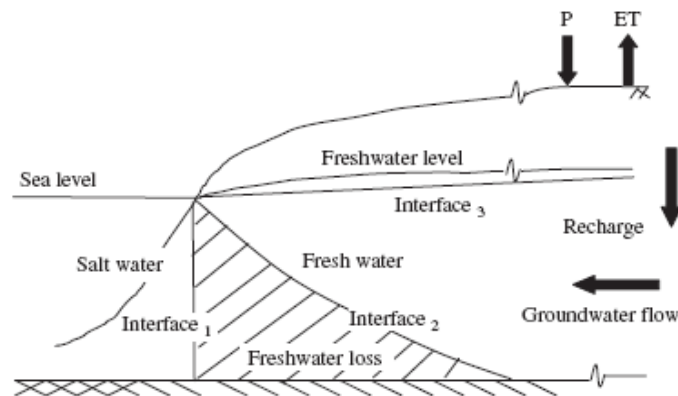
$$h^i = \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_f} h^s - \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h^f, \quad (3)$$

Trong đó K_f và K_s đại diện cho tốc độ dòng chảy trong vùng nước ngọt và nước mặn; h^f và h^s là điểm áp lực của vùng nước ngọt và nước mặn; q_f và q_s là tốc độ dòng chảy của nước ngọt và nước mặn tương ứng. Hệ số lưu trữ trong các vùng nước ngọt và nước mặn được xác định bởi S_f và S_s ; θ là độ rỗng của tầng chứa nước; ρ_f và ρ_s là khối lượng riêng của nước ngọt và nước mặn; α tham số có thể giá trị bằng 1 hoặc 0 phụ thuộc vào loại tầng nước ngầm, $\alpha=1$ cho tầng chứa nước không giới hạn và $\alpha=0$ cho tầng chứa nước bị giới hạn.

Từ phương trình (1) và (2), có thể xây dựng một mô hình số bằng cách sử dụng sự khác biệt hàm ẩn số hữu hạn. Để giải quyết đồng thời hai phương trình đại số tuyến tính khác nhau, các thủ tục (SIP) (Remson et al., 1971) đã được sử dụng như là một kỹ thuật số phù hợp. Những kinh nghiệm thực tế cho thấy rằng đối với trường hợp dòng chảy không đồng nhất hoặc môi trường không đẳng hướng, các thủ tục hàm ẩn số hữu hạn có hiệu quả hơn các phương pháp khác và nó không phụ thuộc vào sự phức tạp của vấn đề (Essaid, 1990).

2.1.1. Sự suy giảm nước ngầm do mặn hóa

Khái niệm về giao diện giữa nước ngọt và nước mặn được sử dụng để ước tính nguồn tài nguyên nước ngọt trong tầng chứa nước ngầm ven biển. Sự gia tăng bổ sung nước ngầm sẽ dịch chuyển giao diện mặn hướng ra biển và làm giảm sự bổ sung độ mặn dịch chuyển về đất liền (giao diện 2). Sự dịch chuyển giao diện này sẽ làm tăng nguồn nước ngọt dưới đất trong tầng nước ngầm. Như minh họa trong hình 1, khi tầng chứa nước hoàn toàn chứa đầy nước ngọt (giao diện 1), sự mất nước ngọt là gần như không xảy ra. Sự dịch chuyển hướng về đất liền của giao diện mặn dẫn đến giảm lượng nước ngọt ở tầng nước ngầm. Khi giao diện mặn trùng với điểm áp lực nước (giao diện 3), toàn bộ tầng chứa nước sẽ bị làm đầy bởi nước mặn, lúc này lượng nước ngọt gần như mất 100%.

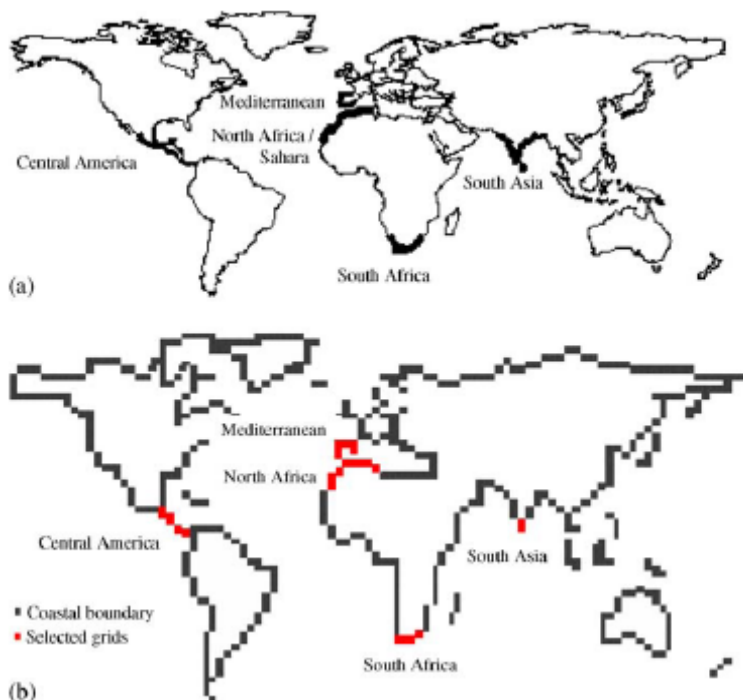


Hình 1. Sơ đồ mô tả sự suy giảm nguồn nước ngầm do xâm nhập mặn ở tầng chứa nước ven biển.

Ghi chú: P- Mưa; ET- bốc hơi tổng số; Sea level- Mức nước biển; Freshwater level: mực nước ngầm; Interface- giao diện; Salt water- nước mặn; Freshwater loss- suy giảm nước ngọt; Groundwater flow- dòng chảy ngầm; Recharge- bổ sung.

2.2. Các vùng thiếu hụt nước

Căn cứ vào mô tả bởi DETR (1997) và Tony Arnel (1999), trên thế giới có năm vùng thiếu hụt nước chính sẽ chịu những tác động cực đoan của biến đổi khí hậu. Các vùng được lựa chọn trong nghiên cứu này để đánh giá sự biến động nguồn nước ngầm do xâm nhập mặn thuộc các vùng khí hậu khác nhau. Bao gồm: Vùng ven biển ở Trung Mỹ (CAM), nam Phi (SAF) và bắc Phi/Sahara (SAH), xung quanh Địa Trung Hải (MED) và trong khu vực nam Á (SAS) (Hình 2a). Dựa trên sự phân loại khí hậu của Köppen (FAO, 1997), năm vùng trên có khí hậu gió mùa/cận nhiệt đới, Địa Trung Hải, nhiệt đới và khí hậu sa mạc.



Hình. 2. (a) Các vùng thiếu hụt nước được lựa chọn (Aller et al., 1999); (b) đại diện ranh giới ven biển trong giải pháp HadCM3.

Các tính chất địa chất thủy văn của các vùng này được lấy từ hệ thống thông tin nước ngầm toàn cầu, được phát triển bởi IGRAC (2004). Để mô phỏng tác động của mực nước biển dâng, các dữ liệu được lấy từ cơ sở dữ liệu PSMSL

(Permanent Service for Mean Sea Level) dựa trên xu hướng trong lịch sử và dự báo trong tương lai. Bảng 1 tóm tắt các tính chất khí hậu, mực nước biển dâng và đặc điểm địa chất thủy văn của năm vùng nghiên cứu.

Bảng 1. Đặc điểm một số vùng thiếu hụt tài nguyên nước trên thế giới

Vùng	Vùng khí hậu*	Vùng nước ngầm liên quan ^b	Đặc điểm tầng ngậm nước		Nước biển dâng (mm/năm)
			Sự hình thành địa chất	Độ dẫn nước	
Trung Mỹ (CAM)	Nhiệt đới	Bắc và Trung Mỹ	Trầm tích và lắng đọng phù sa	$10^{-3} - 10^{-5}$	2,0
Nam Châu Phi (SAF)	Địa Trung hải/Cận nhiệt đới	Cận khu vực Sahara	Đá kết và lắng đọng trầm tích	$10^{-4} - 10^{-5}$	1,5
Bắc Châu Phi/Sahara (SAH)	Sa mạc	Khu vực Bắc Châu Phi	Trầm tích biển, lắng đọng cát do gió và phù sa	$10^{-3} - 10^{-4}$	1,65
Địa Trung hải (MED)	Địa Trung hải	Nam Âu và vùng núi Atlas	Đá vôi, đá cát và trầm tích bờ dồi	$10^{-4} - 10^{-5}$	2,5
Nam Á (SAS)	Nhiệt đới/Gió mùa	Bán đảo Ấn Độ	Đá trầm tích và trầm tích bờ dồi	$10^{-4} - 10^{-5}$	0,9

Nguồn: ^a Phân loại khí hậu theo Koepen (FAO), ^b Global groundwater regions, IGRAC, ^c permanent service for mean sea level PSMSL

2.3. Ước tính sự suy giảm tài nguyên nước ngầm do biến đổi khí hậu

Nghiên cứu này sử dụng các kịch bản biến đổi khí hậu phát triển từ mô phỏng khí hậu Hadley Centre (HadCM3). Các dữ liệu khí hậu được sử dụng ở độ phân giải không gian tại vĩ độ bằng 2,51 và kinh độ 3,751, tương ứng với độ phân giải bề mặt khoảng 417 km - 278 km ở xích đạo. Diện tích nghiên cứu được đại diện bởi một vài điểm lưới ở độ phân giải lớn (2,51- 3,751). Các ô lưới dọc theo hướng bờ biển đã được lựa chọn để đại diện cho các vùng ven biển (Hình 2b).

Chúng tôi tính toán cân bằng nước theo thời gian hàng tháng cho mỗi ô tọa độ và xử lý mỗi ô tọa độ như một lưu vực riêng biệt. Lượng bốc hơi được tính theo công thức Penman Monteith sử dụng mô hình máy tính CROPWAT. Giả sử khi lượng mưa vượt quá lượng bốc hơi thực tế, lượng nước ngầm được bổ sung sẽ tính bằng chênh lệch giữa lượng mưa và lượng bốc hơi. Ước tính lượng nước được bổ sung hàng tháng theo mô hình giả sử tồn tại giao diện nước ngọt và nước mặn, và tính biến động trung bình hàng năm của giao diện cho tầng chứa nước ở 5 vùng ven biển nghiên cứu. Mô hình này đã được chạy để mô phỏng những thay đổi về giao diện theo thời gian hàng tháng, mặc dù các giá trị trung bình hàng năm đã được lưu lại dưới dạng đầu ra. Sự biến động số trung bình hàng năm về giao diện

nước ngọt, nước mặn được sử dụng để ước tính sự thay đổi hàng năm trong nguồn nước ngầm ngọt do xâm nhập mặn trong khoảng thời gian 100 năm.

3. Kết quả và thảo luận

3.1. Suy thoái tài nguyên nước ngầm trong thế kỷ tới

Trong 5 vùng lựa chọn nghiên cứu; Trung Mỹ (CAM), nam Phi (SAF), bắc Phi/Sahara (SAH), nam Á (SAS) và Địa Trung Hải (MED); sự thay đổi trung bình hàng năm trong nguồn nước ngầm thể hiện rất rõ tính phức tạp, các hậu quả và sự phản hồi của biến đổi khí hậu tiềm năng. Các kết quả này chứng minh rằng sự biến động trong tương lai về tài nguyên nước ngầm diễn ra theo xu hướng lâu dài là gia tăng suy thoái nguồn nước, ngoại trừ ở khu vực phía bắc châu Phi/Sahara trong cả hai kịch bản phát thải cao và thấp.

Trong thế kỷ tới, đường hồi quy tuyến tính giữa suy thoái nguồn nước ngầm (% nước mất) và thời gian cho thấy mối quan hệ khác nhau ở 5 vùng nghiên cứu. Như thể hiện trong hình 3a và 4a, lượng nước ngầm ngọt suy thoái hàng năm thể hiện xu thế ngắn hạn ở vùng Địa Trung Hải và nam châu Á, trong khi xu hướng lâu dài lại xuất hiện ở 3 vùng còn lại cho trong cả hai kịch bản. Vùng Địa Trung Hải thể hiện một sự gia tăng mất nước ngầm khoảng 0,028% năm theo kịch bản SRES A2 và 0,0005% theo kịch bản SRES B2. Khu vực nam Á cũng cho thấy các xu hướng biến động ngắn hạn và dài hạn với 0,075 và 0,078% lượng nước ngầm ngọt suy thoái hàng năm tương ứng cho kịch bản A2 và B2.

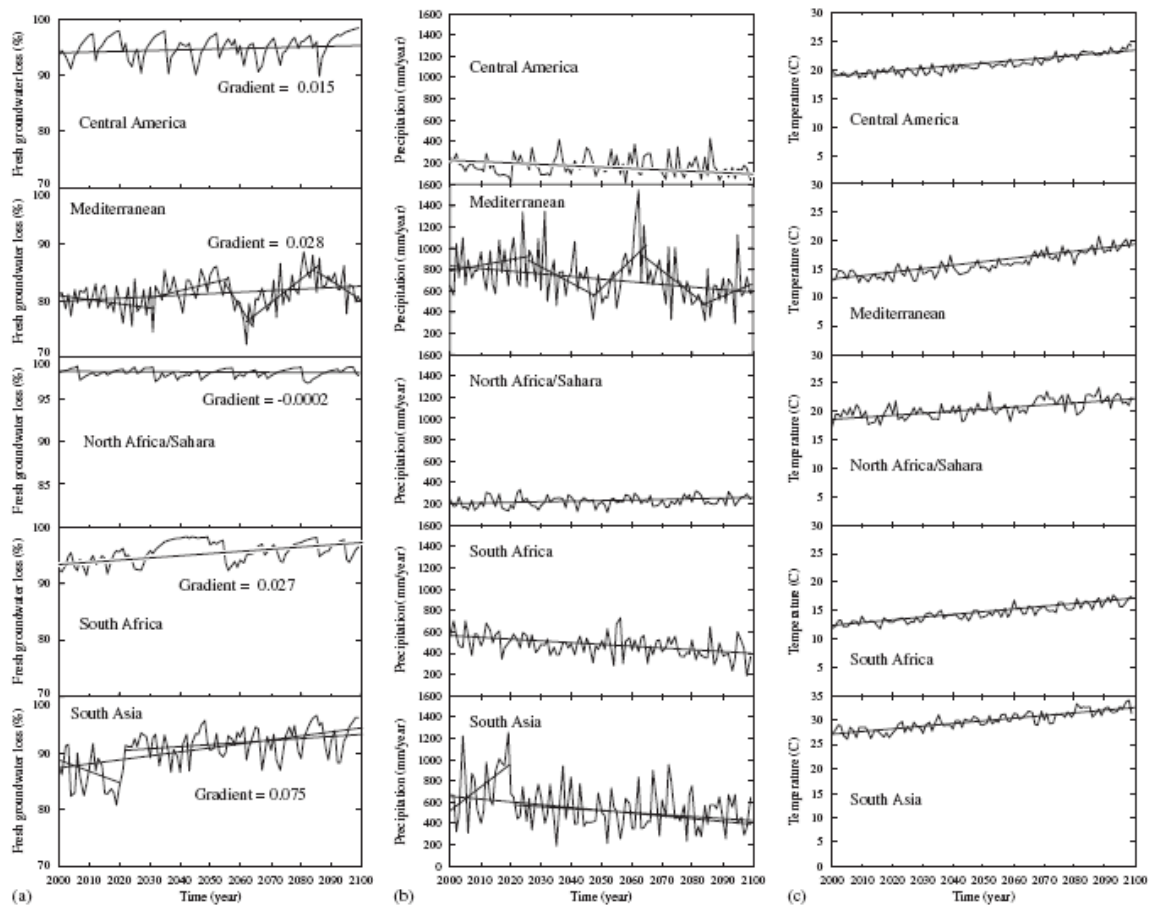
Có sự khác biệt chút ít ở các khu vực phía bắc Phi/Sahara là mối tương quan âm ở mức độ nhỏ. Ở đây có nước ngầm giảm đi hàng năm vào khoảng 0,002% trong kịch bản phát thải cao, và 0,0014% trong kịch bản phát thải thấp. Điều này cho thấy sự gia tăng nguồn nước ngầm ở vùng ven biển bắc Phi và khu vực Sahara trong tương lai. Bảng 2 tóm tắt về sự thay đổi lâu dài về sự suy giảm tài nguyên nước ngầm với các kịch bản phát thải cao và thấp.

Bảng 2. Xu hướng lâu dài mất nước ngầm với các kịch bản cao và thấp

	Tốc độ suy thoái nước ngầm ngọt hàng năm (%)	
	Kịch bản phát thải cao (A2)	Kịch bản phát thải thấp (B2)
Trung Mỹ	0,015	0,02
Địa Trung hải	0,028	0,0005
Bắc châu Phi	-0,0002	-0,0014
Nam châu Phi	0,027	0,022
Nam Á	0,075	0,078

3.2. So sánh sự biến động ngắn hạn suy giảm tài nguyên nước ngầm và thay đổi lượng mưa

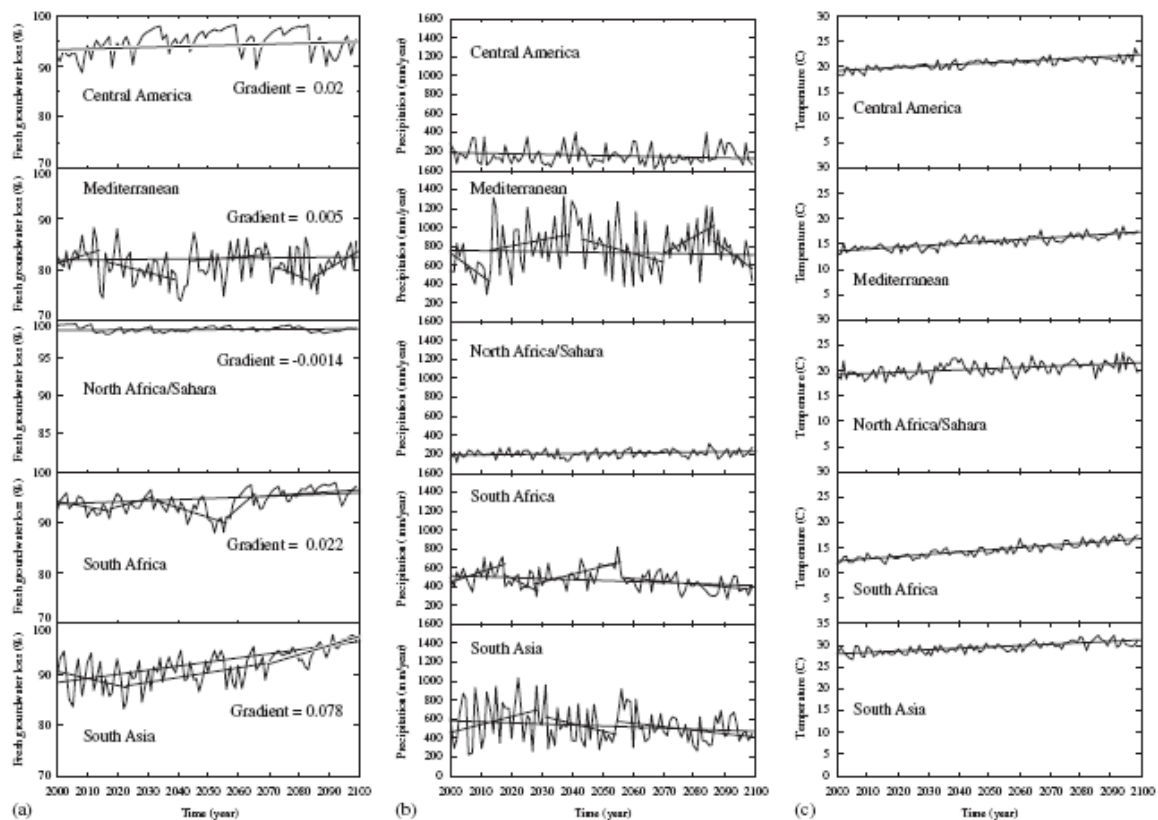
Trên cơ sở đánh giá năm vùng thiếu hụt nước và các kịch bản biến đổi khí hậu, nghiên cứu này đề cập đến một cách nhìn mới về biến động thời gian trong tài nguyên nước ngầm ven biển do các yếu tố khí hậu, đặc biệt là lượng mưa. Lượng mưa, nguồn cơ bản bổ sung cho nước ngầm, là một yếu tố lớn nhất trong cân bằng nước, luôn biến động theo thời gian và không gian. Do đó, sự biến động lượng mưa trong tương lai sẽ kiểm soát sự biến động tài nguyên nước ngầm. Sự suy thoái nước ngầm hàng năm cũng đồng biến với biến động về lượng mưa cho cả 2 kịch bản phát thải cao và thấp (Hình 3b và 4b). Sự gia tăng lượng mưa tạo điều kiện bổ sung thêm cho nguồn tài nguyên nước ngầm (giảm tổn thất tài nguyên nước ngầm). Ngược lại, giảm lượng mưa sẽ làm giảm tài nguyên nước ngầm (tăng mất nước ngầm). Những thay đổi này đã được thấy rõ ở vùng nam Á và Địa Trung Hải. Trong cả 2 vùng này đều có sự biến động lớn về lượng mưa hàng năm trong cả hai kịch bản. Cũng có sự tăng giảm chút ít về lượng mưa được dự báo ở khu vực Trung Mỹ và nam Phi, tuy lượng mưa hàng năm giảm nhưng không dẫn đến thay đổi ngắn hạn về tài nguyên nước ngầm trong kịch bản A2. Tuy nhiên, khu vực nam Phi lại cho thấy biến động ngắn hạn trong kịch bản B2.



Hình. 3. Biến động trung bình hàng năm (a) suy thoái nguồn nước ngầm, (b) lượng mưa và (c) nhiệt độ cho kịch bản SRES A2

Trong đó x - yếu tố khí hậu, y - suy thoái tài nguyên nước ngầm, i - thời gian (năm).

Ở vùng bắc Phi/Sahara có thể lượng mưa sẽ được tăng lên trong tương lai. Xu hướng biến đổi dài hạn về tài nguyên nước ngầm cũng chỉ ra sự gia tăng nguồn nước ngầm trong khu vực này trong cả hai kịch bản. Dự kiến nhiệt độ tăng có khả năng dẫn đến làm tăng bốc hơi nước từ bề mặt nước và mặt đất và tăng khả năng thoát hơi nước từ thực vật. Bốc hơi nước tổng số gia tăng sẽ ảnh hưởng đến khả năng bổ sung cho nước ngầm, khi bốc hơi tổng số tăng sẽ ảnh hưởng đến khả năng bổ sung nước cho tầng chứa nước ngầm, do đó tốc độ mất nước ngầm là thấp hơn tương đối so với lượng mưa ở khu vực bắc Phi. Những thay dự báo về biến đổi nhiệt độ cũng cho thấy xu hướng tăng nhiệt độ trung bình hàng năm ở tất cả 5 vùng nghiên cứu (Hình 3c và 4c). Tuy nhiên, chúng tôi đã không tìm thấy mối quan hệ rõ rệt giữa sự gia tăng nhiệt độ và nguồn nước ngầm.



Hình. 4. Biến động trung bình hàng năm (a) suy thoái nguồn nước ngầm, (b) lượng mưa, (c) nhiệt độ cho kịch bản SRES B2.

3.3. Tương quan giữa khí hậu và suy thoái nguồn nước ngầm

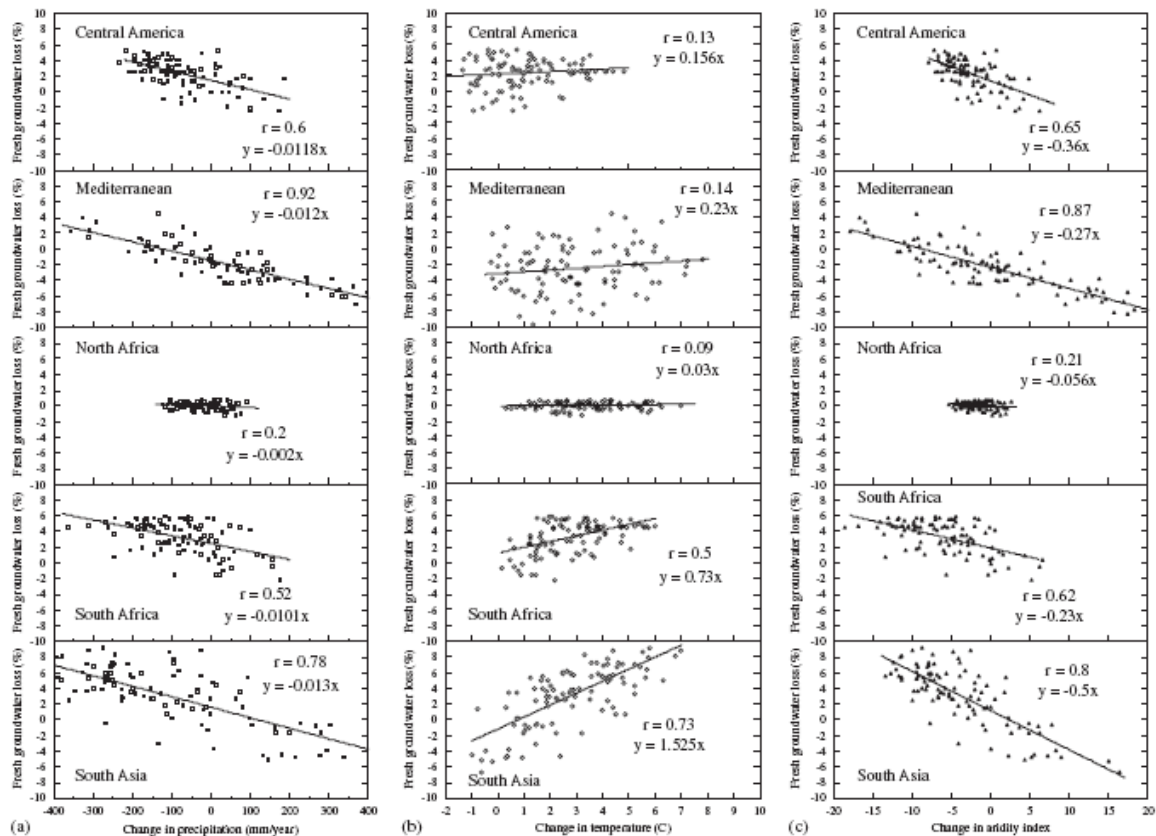
Để đánh giá mối tương quan giữa các yếu tố khí hậu và tài nguyên nước ngầm trong từng khu vực, những dự báo về biến động lượng mưa và nhiệt độ

trong hai kịch bản SRES đã được xem xét. Các hệ số tương quan được tính theo công thức sau:

$$\text{Correlation coefficient } (r) = \frac{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{100} (x_i - \bar{x})^2 \times \sum_{i=1}^{100} (y_i - \bar{y})^2}},$$

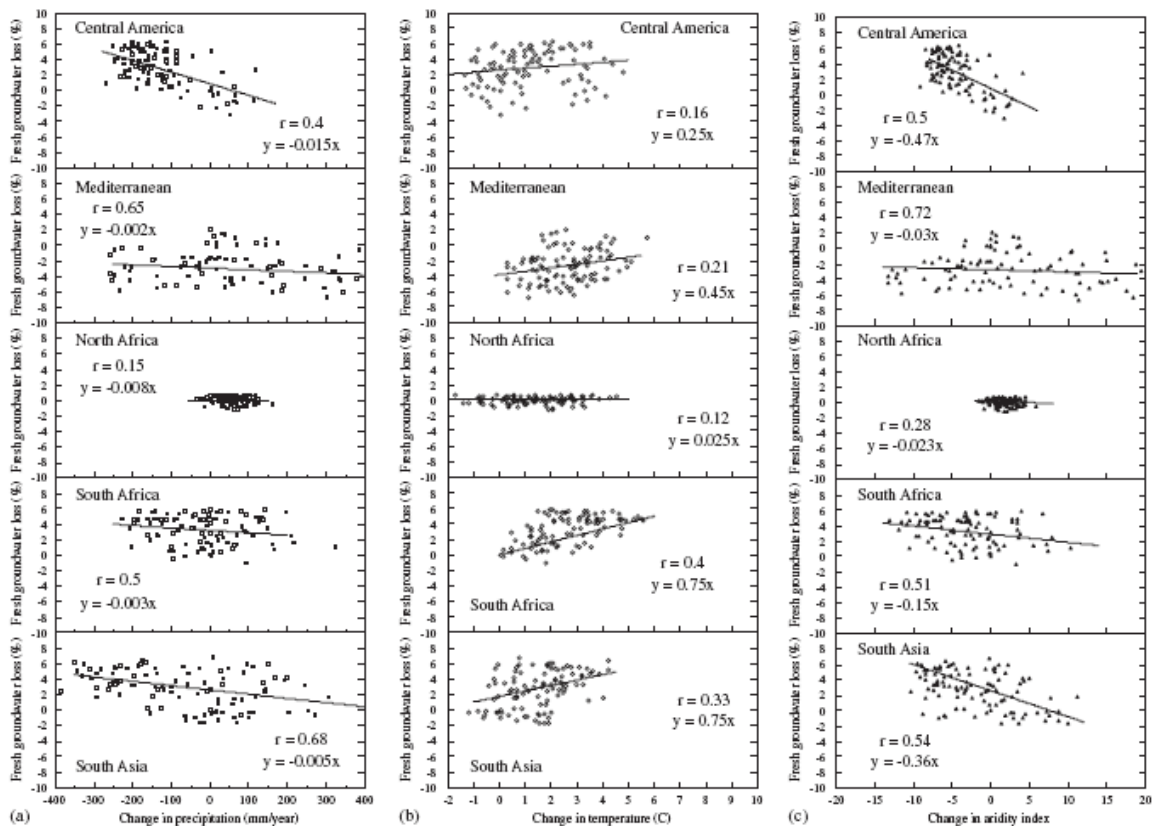
Trong đó: correlation coefficient-hệ số tương quan; x -các yếu tố khí hậu; y -sự suy thoái nước ngầm; i -thời gian (năm)

Sự biến động của các biến số khí hậu và tài nguyên nước ngầm được thể hiện ở hình 5 và 6. Hình 5a cho thấy sự tương quan giữa sự thay đổi lượng mưa và sự suy giảm nguồn tài nguyên nước ngầm; hình 5b cho thấy sự tương quan giữa biến đổi về nhiệt độ và sự suy giảm nguồn tài nguyên nước ngầm cho kịch bản A2. Hình 6a cũng cho thấy mối tương quan giữa sự biến động lượng mưa và sự suy giảm tài nguyên nước ngầm; hình 6b thể hiện mối tương quan giữa biến động về nhiệt độ và sự suy giảm nguồn tài nguyên nước ngầm cho kịch bản B2.



Hình. 5. Sự tương quan giữa (a) lượng mưa so với suy giảm nguồn nước ngầm, (b) nhiệt độ so với suy giảm nguồn nước ngầm và (c) chỉ số khô hạn với suy giảm nguồn nước ngầm cho kịch bản A2.

Như vậy chỉ có vùng Địa Trung Hải và các vùng nam Á là có mối tương quan cao giữa lượng mưa và suy giảm tài nguyên nước ngầm, tương ứng với các hệ số tương quan 0,92 và 0,78 cho các kịch bản phát thải cao; 0,65 và 0,68 cho các kịch bản phát thải thấp. Tuy nhiên, mối tương quan giữa thay đổi về lượng mưa và thay đổi về suy giảm nước ngầm ở vùng bắc Phi là rất nhỏ. Vùng Địa Trung Hải và khu vực nam Á có lượng mưa dao động rất lớn (trên 7.400 mm/năm) sẽ làm cho sự suy giảm nước ngầm cũng khác nhau rất lớn. Lượng mưa khu vực Địa Trung Hải có sự biến động mạnh phụ thuộc vào gió lốc xoáy trong mùa đông ở vùng vĩ độ trung bình. Các vùng nam Á với khí hậu nhiệt đới và gió mùa, lượng mưa cũng biến động lớn phụ thuộc vào chế độ gió mùa. Trong khu vực nam Á, dãy núi Himalaya cũng đóng một vai trò quan trọng trong gió mùa lục địa và sự biến động tương ứng của lượng mưa trong mùa mưa. Johns et al. (2003) đã chỉ ra các mô hình không gian về sự biến động giữa nhiệt độ và lượng mưa là tương tự như nhau ở các vĩ độ như nhau. Ông cũng cho rằng lượng mưa hàng năm tăng lên ở các vĩ độ cao trong khi lượng mưa tăng vào mùa đông ở hầu hết các vùng có vĩ độ trung bình, và nhiệt độ tăng cao hơn tại các vĩ độ lớn.



Hình. 6. Sự tương quan giữa (a) lượng mưa và suy giảm nguồn nước ngầm, (b) nhiệt độ và nguồn nước ngầm, (c) chỉ số khô hạn và suy giảm nguồn nước ngầm cho kịch bản B2.

Mối tương quan giữa nhiệt độ và sự suy giảm nguồn nước ngầm là rất thấp ở tất cả các vùng nghiên cứu cho cả hai kịch bản. Nhìn chung, các hệ số tương quan chỉ ra rằng các yếu tố lượng mưa và nhiệt độ riêng rẽ không có tương quan chặt chẽ với suy giảm nguồn nước ngầm. Vì vậy, các tác động đồng thời của lượng mưa và nhiệt độ sẽ được xem xét trong phân tích này.

3.4. Chỉ số khô hạn và suy giảm nguồn nước ngầm

Chỉ số khô hạn là chỉ tiêu định lượng mức độ thiếu hụt nước tại một vùng nào đó và thường biểu hiện các ảnh hưởng kết hợp giữa nước và năng lượng trong khu vực. Chỉ số khô hạn được sử dụng trong nghiên cứu này là tỷ lệ giữa lượng mưa hàng năm và nhiệt độ trung bình hàng năm (Lang's index) và phiên bản được cải tiến được phát triển bởi E. de Martonne (1925). Chỉ số này còn được gọi là chỉ số Martonne (Martonne index), (Oliver và Fairbridge, 1987; Pahari và Murai, 1999). Chỉ số khô hạn của Martonne được xác định theo công thức:

$$AI = \frac{P}{T + 10}, \quad (5)$$

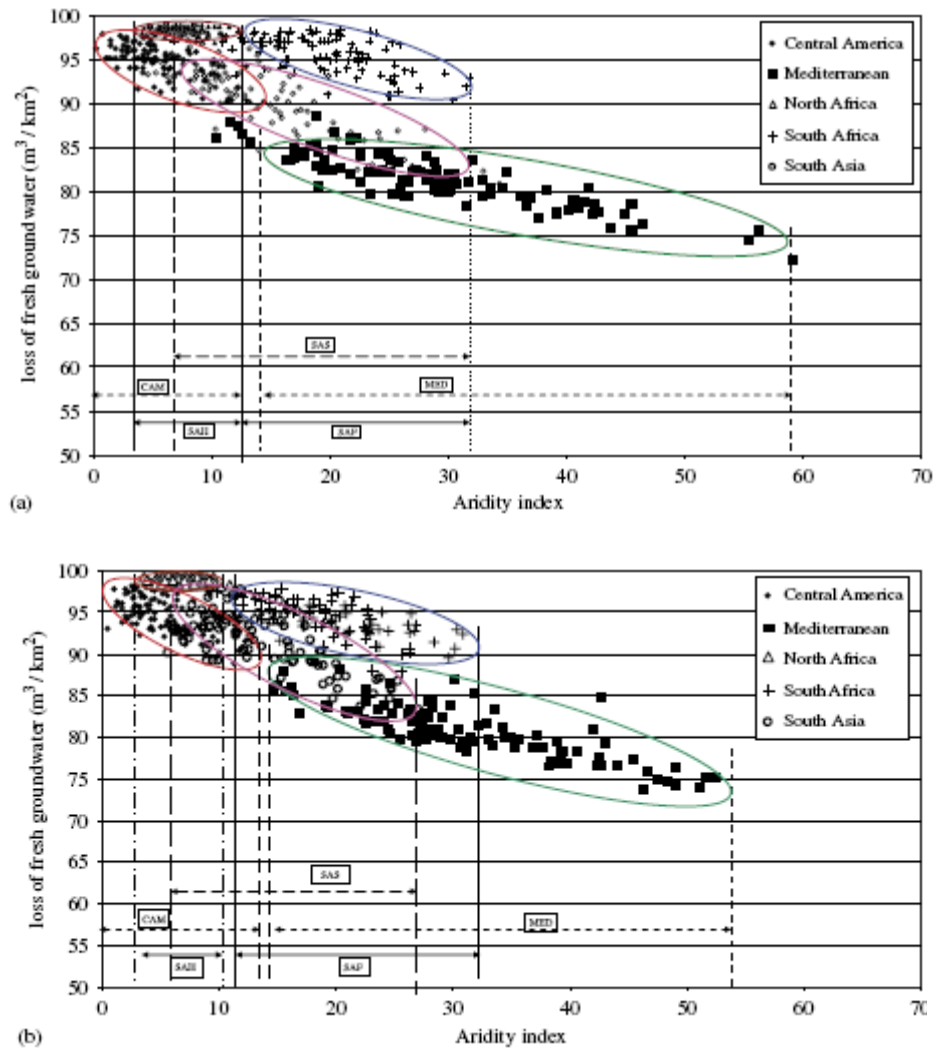
*Trong đó: T là nhiệt độ trung bình năm ($^{\circ}C$),
P là lượng mưa trung bình năm (mm)*

Giữa chỉ số khô hạn và sự suy giảm nguồn nước ngầm thể hiện mối tương quan âm trong cả hai kịch bản SRES (Hình 5c và 6C). Các hệ số tương quan cho thấy sự biến đổi khí hậu và suy giảm nguồn nước ngầm có liên quan với nhau ở vùng Trung Mỹ, Địa Trung Hải, nam Phi và nam Á, với hệ số tương quan lớn hơn 0,5 cho cả hai kịch bản. Trong khu vực bắc Phi/Sahara giữa yếu tố khí hậu và suy giảm nước ngầm có sự tương quan thấp. Tuy nhiên sự biến động về khí hậu và các tác động đến tài nguyên nước ngầm là rất nhỏ và có thể dẫn đến những những ước tính trái ngược nhau giữa lượng mưa và nhiệt độ trong vùng bắc Phi/Sahara.

3.5. Sự phân bố vùng của chỉ số khô hạn và nguồn nước ngầm

Sự biến động vùng trong giá trị tuyệt đối của chỉ số khô hạn và suy giảm nguồn nước ngầm trong 2 kịch bản phát thải cao và thấp được thể hiện trong hình 7. Trong đó miền phân bố các điểm thể hiện quan hệ giữa chỉ số khô hạn và sự suy giảm nguồn nước ngầm theo các vùng khí hậu. Nghiên cứu trong cả hai trường hợp ở vùng Trung Mỹ và bắc Phi/Sahara đều cho thấy khi chỉ số khô hạn thấp cũng tương ứng với tổn thất cao nguồn nước ngầm. Đối với cả hai kịch bản, các khu vực này đều có chỉ số khô hạn dưới 15 và sự suy giảm nước ngầm cũng là cao nhất. Vùng trung Mỹ nằm ở vùng khí hậu nhiệt đới và bắc Phi/Sahara có các sa mạc lớn. Cả 2 khu vực đều có lượng mưa thấp, trung bình dưới 200 mm/năm. Tại

khu vực phía bắc châu Phi/Sahara, lượng mưa có thể còn thấp hơn nhiều do có sự biến động bất thường về nhiệt độ: thông thường nhiệt độ trung bình tháng nóng nhất là trên 30 °C, khi biến động bất thường nhiệt độ có thể lên đến trên 50 °C (IPCC, 1998). Không khí ở vùng sa mạc rất khô do cường độ bức xạ từ Mặt trời và phát xạ từ mặt đất dẫn đến sự dao động mạnh về nhiệt độ và lượng bốc hơi tiềm năng trong ngày. Sự gia tăng bốc hơi tổng số kiểm soát sự bổ sung nước ngầm và suy giảm nguồn nước ngầm.



Hình 7. Miền phân bố các điểm thể hiện tương quan giữa biến động về chỉ số khô hạn và suy giảm nguồn nước ngầm ở các vùng khí hậu khác nhau:
(a) cho kịch bản A2 và (b) cho kịch bản B2.

Chỉ số khô hạn có biến động mạnh ở các khu vực Địa Trung Hải, nam Á, và nam Phi trong cả hai kịch bản. Khu vực nam Phi có sự suy giảm nước ngầm tương đối cao hơn so với hai khu vực còn lại. Sự suy giảm nước ngầm ở khu vực Địa Trung Hải cũng ít hơn so với nam Á. Sự gia tăng hạn hán trong mùa hè cũng

phù hợp với những quan sát về giảm lượng mưa trong mùa hè và gia tăng trong mùa đông và mùa xuân (IPCC, 1998). Sự thay đổi này sẽ gây ảnh hưởng mạnh đến các khu vực nhạy cảm với hạn hán.

Tuy nhiên ở khu vực Địa Trung Hải, lượng mưa trung bình là cao hơn và nhiệt độ trung bình là thấp hơn so với khu vực nam Á. Do vậy sự suy giảm nước ngầm ở khu vực Địa Trung Hải cũng thấp hơn so với khu vực nam Á. Bảng 3 trình bày các số liệu thống kê về suy giảm nước ngầm trong mỗi khu vực, thể hiện các tác động trung bình đến nguồn nước ngầm ở mỗi khu vực.

Bảng 3. Thống kê các tính chất của nguồn nước ngầm

Thông số	Mất nước ngầm (m^3/km^2)									
	Kịch bản phát thải cao (A2)					Kịch bản phát thải thấp (B2)				
	CAM	MED	SAH	SAF	SAS	CAM	MED	SAH	SAF	SAS
Trung bình	96,0	81,5	98,2	93,5	90,5	94,8	81,3	98,8	94,4	91,5
Độ lệch chuẩn	2,0	3,0	0,5	2,1	3,8	2,3	3,3	0,3	2,2	3,4

3.6. Tác động của suy giảm nước ngầm đến các hoạt động kinh tế xã hội

Sự suy giảm nguồn nước ngầm có thể gây thiệt hại cho các hoạt động kinh tế xã hội phụ thuộc vào nước. Đánh giá tác động của suy giảm nguồn nước ngầm đến xã hội đòi hỏi phải ước tính được lượng nước ngầm khai thác trong tương lai. Lượng khai thác này không chỉ phụ thuộc vào dân số trong tương lai mà còn phụ thuộc vào hiệu quả sử dụng nước. Sự suy giảm nguồn nước ngầm gây ảnh hưởng đến người dân địa phương trong các vùng khan hiếm nước do nhu cầu sử dụng nước tăng khi dân số tăng, các mô hình sử dụng nước và phong tục sử dụng nước, và sự suy thoái của lưu vực sông do thay đổi sử dụng đất (Ranjan et al., 2006). Dự báo sử dụng nước trong tương lai sẽ có sự biến động lớn, nó phản ánh sự tăng trưởng dân số tiềm năng khác nhau và hiệu quả sử dụng nước khác nhau (Seckler et al., 1998).

Các kịch bản phát thải SRES cho phép sự dự báo đa chiều về dân số toàn cầu và từng khu vực trong tương lai, và các chỉ số quan trọng khác về số lượng và chất lượng nền kinh tế xã hội toàn cầu. Ngược lại, trong kịch bản A2, những dự báo cho thấy sự yếu kém trong phát triển kinh tế và quá trình toàn cầu hóa. Sự gia tăng dân số trong A2 là cao nhất (15 tỷ người vào năm 2100) nên sự đóng góp tài chính vào phúc lợi, bảo vệ trẻ em, chăm sóc sức khỏe và giáo dục sẽ giảm đi. Trong kịch bản B2, giả sử rằng tốc độ tăng trưởng dân số thấp sẽ tạo điều kiện cho một thế giới lạc quan hơn (IPCC, 2000). Những dự báo dân số khu vực SRES đã được đưa ra ở mức thấp hơn so với dự báo của CIESIN (2002) ở quy mô quốc gia. Chúng tôi ước tính mật độ dân số trong tương lai dựa trên hệ lưới các vùng dân số thế giới (GPW) của CIESIN cho 2 kịch bản SRES (Gaffin et al., 2004).

Bảng 4 cho thấy sự so sánh về dân số, khả năng cung cấp nước ngầm và lượng nước ngầm trên đầu người trên một đơn vị độ dày tầng ngậm nước (1 m) vào năm 2010 và 2100, cho 2 kịch bản SRES lựa chọn. Kết quả cho thấy rằng kịch bản A2 dự báo dân số cao nhất và kết quả nhu cầu nước ngọt cũng cao nhất. Bảng 4 còn chỉ rõ SRES A2 có lượng nước bình quân trên đầu người thấp nhất ở tất cả các vùng. Một điều cần chú ý là mặc dù tài nguyên nước ngầm tại Địa Trung Hải và nam Á là thấp hơn theo kịch bản B2, nhưng lượng nước ngầm trên đầu người lại thấp hơn ở hơn trong kịch bản A2. Điều này làm nổi bật những vấn đề ô nhiễm nước cao do các hoạt động kinh tế xã hội ở các khu vực khan hiếm nước.

Bảng 4. Dân số và tài nguyên nước ngầm ở những vùng hiếm nước

Kịch bản suy giảm nguồn nước	Khu vực	2010			2100		
		Mật độ dân số (người/km ²)	Khả năng nước ngầm (m ³ /km ²)	Lượng nước (m ³ /người/năm)	Mật độ dân số (người/km ²)	Khả năng nước ngầm (m ³ /km ²)	Lượng nước (m ³ /người/năm)
A2	Trung Mỹ	120	64.000	533,3	200	25.000	125,0
	Địa Trung hải	82	195.000	2378,0	150	178.000	1186,7
	Bắc châu Phi	11	12.000	1090,9	18	15.000	833,3
	Nam châu Phi	18	67.000	3722,2	26	39.000	1500,0
	Nam Á	250	117.000	468,0	450	52.000	115,6
B2	Trung Mỹ	116	79.000	681,0	140	45.000	321,4
	Địa Trung hải	80	180.000	2250,0	112	175.000	1562,5
	Bắc châu Phi	10	9.000	900,0	16	15.000	937,5
	Nam châu Phi	12	76.000	6333,3	19	45.000	2368,4
	Nam Á	200	110.000	550,0	300	35.000	116,7

Nhìn chung, khu vực các nước nam Á có mật độ dân số cao nhất trên thế giới và nhu cầu ngày càng tăng trong các lĩnh vực sinh hoạt, nông nghiệp và công nghiệp sẽ tạo áp lực lớn về tài nguyên nước. Mặc dù khu vực nam Á có nguồn nước ngầm tương đối cao nhưng lượng nước ngầm bình quân trên đầu người cho 1 km² ở vùng ven biển lại ít hơn (468m³/người vào năm 2010, theo kịch bản A2) và có khả năng giảm đi trong tương lai (115m³/người trong năm 2100). Trong khi đó, lượng nước ngầm bình quân trên đầu người hiện tại cũng như trong tương lai ở châu Phi là cao hơn do mật độ dân số thấp. Như vậy châu Phi tuy có nguồn tài nguyên nước ngầm không cao, nhưng do mật độ dân số thấp nên lượng nước bình quân trên đầu người là khá cao. Ở châu Phi, do nghèo đói nên những vấn đề môi trường diễn ra rất phức tạp, đặc biệt là ở những nơi mà nền kinh tế chủ yếu dựa vào khai thác tài nguyên thiên nhiên như nước ngầm. Do đó, mặc dù dường như có nguồn nước ngầm bình quân đầu người cao hơn trên lục địa châu Phi, nhưng do nghèo đói nên không có khả năng và công nghệ để khai thác sử dụng các nguồn

nước ngầm ở sâu. Sự suy thoái các nguồn tài nguyên này sẽ làm giảm khả năng sản xuất của người nghèo chủ yếu sống dựa vào nguồn tài nguyên thiên nhiên, làm cho các cộng đồng dân nghèo càng dễ bị tổn thương do các biến động cực đoan gây ra. Nicholls và Lowe (2004) cho thấy số dân ven biển toàn cầu là rất lớn và tăng lên nhanh chóng (tăng dân số ven biển là gấp hai lần tốc độ tăng trưởng dân số cả nước). Do đó, các vấn đề kinh tế xã hội có thể càng trở nên quan trọng hơn đối với các vùng ven biển.

4. Kết luận

Nghiên cứu về mối liên quan giữa biến đổi khí hậu và suy giảm tài nguyên nước ngầm là vấn đề quan trọng để hiểu biết về đặc điểm của các vùng khác nhau. Trong năm vùng khan hiếm nước được lựa chọn nghiên cứu và ở cả 2 kịch bản phát thải cao và thấp đều có các tác động đến nguồn nước ngầm. Các mối quan hệ giữa lượng mưa, nhiệt độ và suy giảm nguồn nước ngầm thể hiện tính phức tạp của các quá trình thủy văn nhưng đều cho thấy sự gia tăng tổn thất về tài nguyên nước ngầm ở tất cả các vùng nghiên cứu, ngoại trừ vùng bắc Phi/Sahara trong cả 2 kịch bản phát thải cao và thấp. Trong hơn 100 năm qua, sự suy giảm nguồn nước ngầm có mối tương quan dương với nguồn phát thải trong cả hai kịch bản ở trung Mỹ, Địa Trung Hải, nam Á và nam Phi.

Sự tương quan giữa biến đổi các yếu tố khí hậu và suy giảm nguồn nước ngầm được đánh giá trong cả 2 kịch bản phát thải cao và thấp. Các mối tương quan này có thể là tích cực hay tiêu cực ở quy mô lục địa, nó chỉ rõ sự phức tạp trong sự phản hồi giữa sự biến đổi về lượng mưa và nhiệt độ trong chu trình thủy văn ở quy mô khu vực. Nhìn chung, các hệ số tương quan cho thấy lượng mưa và nhiệt độ riêng rẽ không có mối tương quan chặt với sự suy giảm tài nguyên nước ngầm. Do vậy, những ảnh hưởng đồng thời của lượng mưa và nhiệt độ đã được xem xét trong các phân tích tiếp theo. Chỉ số khô hạn cũng được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng đồng thời của lượng mưa và nhiệt độ trong phạm vi vùng. Kết quả cho thấy chỉ số khô hạn là đối lập với sự suy giảm tài nguyên nước ngầm, thể hiện ở mối tương quan âm trên phạm vi toàn cầu. Các miền phân bố các điểm thể hiện mối quan hệ giữa sự suy giảm nguồn nước ngầm và chỉ số khô hạn cho thấy có sự khác biệt giữa các vùng nghiên cứu. Vùng có chỉ số khô hạn thấp sẽ tương ứng với sự tổn thất nước ngầm cao hơn, ví dụ như khu vực trung Mỹ và bắc Phi/Sahara. Ở khu vực Địa Trung Hải có sự dao động lớn về chỉ số khô hạn, nhưng sự suy giảm tài nguyên nước ngầm là tương đối thấp.

Hơn nữa, sự suy giảm nguồn nước ngầm, một kết quả của sự nóng lên toàn cầu cũng có tác động đến các hoạt động kinh tế xã hội ở các vùng khan hiếm nước. Sự gia tăng dân số và nhu cầu sử dụng nước ngầm trong tương lai cho các hoạt động sống của con người cũng như các quá trình sản xuất nông nghiệp và công nghiệp sẽ làm cho tình hình càng trở nên phức tạp hơn ở khu vực nam Á. Ở kịch bản SRES A2 với sự tăng trưởng dân số cao nhất, dự báo tác động đến nguồn nước bình quân trên đầu người cũng lớn nhất. Mặc dù bình quân lượng nước ngầm

trên đầu người ở khu vực châu Phi là cao hơn, nhưng các cộng đồng nghèo khó sẽ không có khả năng và công nghệ để khai thác các nguồn nước ngầm này. Sự suy thoái của các nguồn tài nguyên này sẽ tiếp tục làm giảm khả năng sản xuất của cộng đồng người nghèo.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được thực hiện với sự tài trợ của "Grant-in-Aid for Scientific Research for JSPS" (Giáo sư Nobuo Mimura) và "Global Environment Research Fund" của Bộ Môi trường Nhật Bản. Các tác giả xin cảm ơn sự tài trợ này. Chúng tôi cũng gửi lời cảm ơn TS. Brian McGlynn đã cung cấp các thông tin chi tiết góp ý xây dựng cho báo cáo này.

Tài liệu tham khảo

- Arnell, N.W., 1999. Climate change and global water resources. *Global Environmental Change* 9, S31–S49.
- Arnell, N.W., 2004. Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change* 14, 31–52.
- Bear, J., Cheng, A.H.D., Sorek, S., Ouazar, D., Herrera, I., 1999. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers—Concepts, Methods and Practices*. Kluwer, Dordrecht.
- Bobba, A.G., Singh, V.P., Jeffries, D.S., Bengtsson, L., 1997. Application of a watershed runoff model to north-east pond river, Newfoundland: to study water balance and hydrological characteristics owing to atmospheric change. *Hydrological Processes* 12, 1573–1593.
- CIESIN, 2002. Center for International Earth Science Information Network. Columbia University, Gridded Population of the World (GPW), CIESIN, Columbia University, Palisades, NY <http://sedac.ciesin.org/plue/gpw>.
- DETR, 1997. *Climate change and its impacts*. Department for Environment, Transport, and the Regions, The UK Programme, HMSO, The Met Office, London.
- Eckhardt, K., Ulbrich, U., 2003. Potential impacts of climate change on groundwater recharge and stream flow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology* 284, 244–252.
- Essaid, H.I., 1990. A Multilayered sharp interface Model of coupled freshwater and saltwater flow in coastal systems: model development and application. *Water Resources Research* 26, 431–455.
- FAO, 1997. Köppen climate zones, FAO—Environment and Natural Resources Service (FAO-SDRN Agrometeorology group), Global climate maps series, <http://www.fao.org/sd/eidirect/CLIMATE/EIsp0001.html>

- Gaffin, S.R., Xing, X., Yetman, G., 2004. Downscaling and geo-spatial gridding of socio-economic projections from the IPCC Special Report on Emissions Scenarios (SRES). *Global Environmental Change* 14, 105–123.
- Gertena, D., Schaphoffa, S., Haberlandt, U., Luchta, W., Sitcha, S., 2004. Terrestrial vegetation and water balance-hydrological evaluation of a dynamic global vegetation model. *Journal of Hydrology* 286, 249–270.
- Gleick, P.H., 1986. Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic change. *Journal of Hydrology* 88, 97–116.
- Hitz, S., Smith, J., 2004. Estimating global impacts from climate change. *Global Environmental Change* 14, 201–218.
- Hulme, M., Mitchell, J., Ingram, W., Lowe, J., Viner, D., 1999. Climate change scenarios for global impacts studies. *Global Environmental Change* 9, S3–S19.
- IGRAC, 2004. Global Groundwater Regions database, International Groundwater Resources Assessment Centre. (<http://igrac.nitg.tno.nl/homepage.html>)
- IPCC, 1998. The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. In: Watson, R.T., Zinyowera, M.C., Moss, R.H., Dokken, D.J. (Eds.), *Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- IPCC, 2000. Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Nakicenovic, N., Swart, R. (Eds.), *Cambridge Univ. Press*, Cambridge, UK.
- IPCC, F., 2001. In: Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contributions of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Johns, T.C., Gregory, J.M., Ingram, W.J., Johnson, C.E., Jones, A., Lowe, J.A., Mitchell, J.F.B., Roberts, D.L., Sexton, D.M.H., Stevenson, D.S., Tett, S.F.B., Woodage, M.J., 2003. Anthropogenic climate change for 1860–2100 simulated with the HadCM3 model under up-dated emissions scenarios. *Climate Dynamics* 20, 583–612.
- Labat, D., Godd, Y., Probst, J.L., Guyot, J.L., 2004. Evidence for global runoff increase related to climate warming. *Advances in Water Resources* 27, 631–642.
- Loaiciga, H.A., Valdes, J.B., Vogel, R., Garvey, J., Schwarz, H., 1996. Global warming and the hydrologic cycle. *Journal of Hydrology* 174, 83–127.
- Mimikou, M.A., Baltas, E., Varanou, E., Pantazis, K., 2000. Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators. *Journal of Hydrology* 234, 95–109.
- Najjar, R.G., 1999. The water balance of the Susquehanna River Basin and its response to climate change. *Journal of Hydrology* 219, 7–19.

- Nicholls, R.J., Lowe, J.A., 2004. Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change* 14, 229–244.
- Oliver, J.E., Fairbridge, R.W., 1987. The Encyclopedia of Climatology, *Encyclopedia of Earth Sciences*, vol. XI. Van Nostrand Reinhold Publishers, New York, pp. 103–107.
- Pahari, K., Murai, S., 1999. Modelling for prediction of global deforestation based on the growth of human population. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 54, 317–324. PSMSL: Permanent Service for Mean Sea Level data set, Proudman Oceanographic Laboratory (POL), <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>
- Ranjan, P., Kazama, S., Sawamoto, M., 2006. Effects of climate and land use changes on groundwater resources in coastal aquifers. *Journal of Environmental Management* 80, 25–35.
- Reilly, T.E., Goodman, A.S., 1985. Quantitative analysis of fresh-salt water relationship in groundwater systems—a historical perspective. *Journal of Hydrology* 80, 125–149.
- Remson, I., Hornberger, G.M., Molz, F.I., 1971. Numerical methods in subsurface hydrology: with an introduction to the finite element method, pp. 389.
- Seckler, D., Amarasinghe, U., Molden, D., de Silva, R., Barker, R., 1998. World Water Demand and Supply, 1990–2025: scenarios and Issues. International Water Management Institute Research Report 19, SriLanka.
- Semmler, T., Jacob, D., 2004. Modeling extreme precipitation events: a climate change simulation for Europe. *Global and Planetary Change* 44, 119–127.