Mô hình phân bố loài trong bối cảnh biến đổi khí hậu: tiến bộ, hạn chế và triển vọng ứng dụng trong công tác bảo tồn đa dạng sinh học

Nguyễn Hồng Hải[1], Nguyễn Văn Hợp[2], Nguyễn Minh Cảnh[3], Nguyễn Thanh Tuấn[2], Vũ Mạnh[4], Đinh Bá Duy[5], Trần Văn Tiến[4], Nguyễn Trung Đức[4], Nguyễn Văn Lâm[2,6], Phạm Thanh Hà[1], Nguyễn Văn Quý[4*]

[1]Trường Đại học Lâm nghiệp
[2]Trường Đại học Lâm nghiệp – Phân hiệu Đồng Nai
[3]Trường Đại học Nông Lâm TP. Hồ Chí Minh
[4]Chi nhánh Phía Nam, Trung tâm nhiệt đới Việt – Nga
[5]Trung tâm nhiệt đới Việt – Nga
[6]Viện Môi trường và Tài nguyên, Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh

Species distribution models under climate change: advances, limitations, and future directions for biodiversity conservation

Nguyen Hong Hai[1], Nguyen Van Hop[2], Nguyen Minh Canh[3], Nguyen Thanh Tuan[2], Vu Manh[4], Dinh Ba Duy[5], Tran Van Tien[4], Nguyen Trung Duc[4], Nguyen Van Lam[2,6], Pham Thanh Ha[1], Nguyen Van Quy[4*]

[1]Vietnam National University of Forestry
[2]Vietnam National University of Forestry – Dongnai Campus
[3]Nong Lam University
[4]Southern Branch of Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center
[5]Joint Vietnam-Russia Tropical Science and Technology Research Center
[6]Institute of Environment and Resources – Vietnam National University Ho Chi Minh City
**Corresponding author: quyforest@vnuf2.edu.vn*

https://doi.org/10.55250/jo.vnuf.15.1.2026.051-061

Thông tin chung:
Ngày nhận bài: 25/07/2025
Ngày phản biện: 06/09/2025
Ngày quyết định đăng: 13/10/2025

Từ khóa:
Biến đổi khí hậu, dịch chuyển vùng phân bố, dự báo tổng hợp, khả năng di cư, kịch bản phát thải, mô hình phân bố loài.

TÓM TẮT

Biến đổi khí hậu đang đe dọa nghiêm trọng đa dạng sinh học toàn cầu, làm thay đổi phân bố loài và suy giảm chức năng hệ sinh thái. Bài báo tổng quan này tập trung vào các nghiên cứu về mô hình phân bố loài (SDMs) – công cụ quan trọng để dự báo vùng phân bố thích hợp của loài dưới tác động của biến đổi khí hậu. Sự phát triển trong nghiên cứu về SDMs trên các nhóm sinh vật đã được đánh giá một cách hệ thống. Kết quả cho thấy nhiều loài có xu hướng di chuyển về phía vĩ độ cao và độ cao lớn hơn, kèm theo thu hẹp 15-82% diện tích sinh cảnh tùy theo kịch bản khí hậu. Việc áp dụng phương pháp đa mô hình và kịch bản khí hậu cập nhật đã nâng cao độ chính xác dự báo 25-35% so với phương pháp truyền thống. Tuy nhiên, các hạn chế như thiên lệch dữ liệu xuất hiện của loài, bỏ qua yếu tố phát tán và tác động gián tiếp thông qua thay đổi thảm thực vật vẫn tồn tại. Bài báo đề xuất ba hướng ưu tiên: (1) phát triển SDMs thế hệ mới tích hợp ngưỡng sinh lý, tương tác loài và kết nối cảnh quan; (2) ứng dụng công nghệ viễn thám độ phân giải cao và phân tích dữ liệu lớn; (3) thiết lập khuôn khổ liên ngành cho bảo tồn thích ứng. Những kết quả này nhấn mạnh nhu cầu cấp thiết về cách tiếp cận đa quy mô trong quản lý đa dạng sinh học, đồng thời gợi ý chiến lược bảo tồn linh hoạt bao gồm thiết lập hành lang di cư và quản lý chủ động các hệ sinh thái.

ABSTRACT

Climate change severely threatens global biodiversity, driving species redistribution and ecosystem functional decline. This review synthesizes research on Species Distribution Models (SDMs) – critical tools for predicting climate change impacts on species' suitable habitats. We systematically evaluate advancements in SDM applications across taxonomic groups. Our

Keywords:
Climate change, dispersal capacity, ensemble forecasting, emission scenarios, range shifts, species distribution modeling.

analysis reveals a predominant trend of species shifting toward higher latitudes and elevations, accompanied by 15-82% habitat range contractions depending on climate scenarios. Implementing ensemble modeling approaches and updated climate projections has enhanced prediction accuracy by 25-35% compared to conventional methods. However, persistent limitations include occurrence data biases, overlooked dispersal constraints, and indirect climate effects mediated by vegetation changes. We propose three research priorities: (1) developing next-generation SDMs incorporating physiological thresholds, species interactions, and landscape connectivity; (2) leveraging high-resolution remote sensing and big data analytics; (3) establishing interdisciplinary frameworks for adaptive conservation. These findings underscore the urgent need for multi-scale approaches in biodiversity management and suggest flexible conservation strategies incorporating migratory corridors and proactive ecosystem governance.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Biến đổi khí hậu đã trở thành một trong những thách thức lớn nhất của thế kỷ 21, đe dọa nghiêm trọng đến sự phát triển bền vững của nhân loại [1]. Các bằng chứng khoa học cho thấy, kể từ những năm 1970, Trái Đất đã trải qua giai đoạn ấm lên nhanh chưa từng có trong ít nhất 2.000 năm qua, với nhiệt độ mỗi thập kỷ sau đều cao hơn thập kỷ trước đó [2]. Đặc biệt, trong giai đoạn 2011-2020, nhiệt độ trung bình toàn cầu đã tăng 1,1°C so với thời kỳ tiền công nghiệp (1850-1900), vượt quá mức nhiệt độ cao nhất từng được ghi nhận trong Kỷ Băng hà cuối cùng (Last glacial maximum) cách đây khoảng 125.000 năm [3]. Theo dự báo của Ủy ban Liên chính phủ về Biến đổi Khí hậu (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC), trong các kịch bản phát thải khác nhau, nhiệt độ toàn cầu có thể tăng thêm từ 0,3-4,8°C vào cuối thế kỷ 21 (2081-2100) so với giai đoạn 1986-2005, tùy thuộc vào hiệu quả của các chính sách giảm phát thải khí nhà kính [4]. Những con số này cho thấy mức độ nghiêm trọng của biến đổi khí hậu và sự cấp thiết phải có những hành động quyết liệt để giảm thiểu tác động của nó.

Sự gia tăng nhiệt độ toàn cầu đã và đang gây ra những thay đổi sâu sắc trong các hệ sinh thái tự nhiên. Nhiều loài sinh vật buộc phải thay đổi phạm vi phân bố địa lý, biến đổi đặc điểm hình thái và điều chỉnh thời gian của các sự kiện sinh học theo mùa như ra hoa, di cư để thích nghi với điều kiện mới [5]. Những thay đổi này làm gia tăng đáng kể nguy cơ tuyệt chủng của nhiều loài, đặc biệt là những loài có khả năng thích nghi hạn chế. Một nghiên cứu quy mô lớn của Parmesan và Yohe [6] trên 1.700 loài sinh vật, bao gồm thực vật núi cao, chim và côn trùng, đã phát hiện rằng trung bình các loài đã dịch chuyển về phía cực với tốc độ 6,1 km mỗi thập kỷ, trong đó 84% số loài được nghiên cứu có xu hướng mở rộng phân bố về phía cực - một hiện tượng phù hợp với xu hướng biến đổi khí hậu. Đáng báo động hơn, Thomas và cộng sự [7] dự đoán rằng khoảng 15-37% các loài trên toàn cầu có thể đối mặt với nguy cơ tuyệt chủng vào năm 2050 trong kịch bản biến đổi khí hậu trung bình. Trước những bằng chứng này, Công ước Đa dạng Sinh học (Convention on Biological Diversity - CBD) đã xác định biến đổi khí hậu là một trong những mối đe dọa lớn nhất đối với đa dạng sinh học toàn cầu, cùng với các yếu tố khác như mất môi trường sống, ô nhiễm và khai thác quá mức [8]. Điều đáng lo ngại là các biện pháp bảo tồn truyền thống, chẳng hạn như thiết lập các khu bảo tồn dựa trên phân bố hiện tại của loài, đang trở nên kém hiệu quả hơn trước tốc độ biến đổi khí hậu nhanh chóng hiện nay [9].

Trong bối cảnh đó, các mô hình phân bố loài (Species Distribution Models - SDMs) đã nổi lên như một công cụ quan trọng trong nghiên cứu và dự báo tác động của biến đổi khí hậu lên đa dạng sinh học [10]. Ban đầu được phát triển để nghiên cứu mối quan hệ giữa sự phân bố của các loài và các yếu tố môi trường, SDMs hiện đại được chia thành hai nhóm chính: mô hình cơ chế (dựa trên các đặc điểm sinh lý của loài)

và mô hình thống kê (sử dụng dữ liệu hiện diện kết hợp với các biến môi trường). Trong số các mô hình thống kê, MaxEnt, Biomod và Random forest đã được ứng dụng rộng rãi nhờ khả năng xử lý hiệu quả các bộ dữ liệu không hoàn chỉnh và cho kết quả có độ tin cậy cao [11]. Hiệu quả của các mô hình này đã được chứng minh trong nhiều nghiên cứu, chẳng hạn như công trình của Pearson và cộng sự [12] về dự báo phân bố các loài lưỡng cư ở Nam Mỹ, hay nghiên cứu của Robinson và cộng sự [13] về xu hướng di cư của các loài chim ở Bắc Mỹ. SDMs đã chứng tỏ giá trị đặc biệt trong việc dự báo xu hướng di cư của các loài nguy cấp cũng như sự mở rộng phạm vi của các loài xâm lấn dưới tác động của các kịch bản khí hậu khác nhau. Tuy nhiên, các mô hình này vẫn tồn tại những hạn chế đáng kể, bao gồm sự thiếu hụt dữ liệu sinh thái ở quy mô khu vực, độ không chắc chắn trong các mô hình khí hậu toàn cầu và khó khăn trong việc tích hợp các tương tác phức tạp giữa các loài trong hệ sinh thái.

Bài báo tổng quan này tập trung vào năm mục tiêu nghiên cứu chính. Thứ nhất, nhóm tác giả hệ thống hóa các phương pháp SDM hiện đại, bao gồm kỹ thuật thu thập dữ liệu hiện diện loài với các giải pháp giảm thiểu thiên lệch không gian, quy trình tích hợp dữ liệu môi trường kết hợp xử lý đa cộng tuyến bằng phân tích tương quan Pearson và PCA, đánh giá các thuật toán từ MaxEnt đến phương pháp tổng hợp đa mô hình sử dụng nền tảng Biomod2. Thứ hai, nghiên cứu phân tích các thành tựu nổi bật thông qua các trường hợp điển hình. Thứ ba, nhóm tác giả đánh giá những tiến bộ phương pháp luận, bao gồm sự phát triển từ mô hình đơn lẻ sang hệ thống tổng hợp đa mô hình, cải thiện độ phân giải không gian, hoàn thiện phương pháp đánh giá hiệu suất thông qua ma trận nhầm lẫn và các chỉ số AUC, TSS, Kappa. Thứ tư, bài báo thảo luận các hạn chế chính, gồm thiên lệch dữ liệu quan trắc do tập trung ở khu vực dễ tiếp cận, bỏ qua khả năng di cư và phát tán của loài, chưa xem xét đầy đủ tương tác sinh thái và các yếu tố gián tiếp như biến động thảm thực vật. Cuối cùng, nhóm tác giả đề xuất các hướng phát triển tiềm năng nhằm nâng cao hiệu quả ứng dụng SDM. Những đóng góp của nghiên cứu này cung cấp cơ sở khoa học để xây dựng chiến lược bảo tồn linh hoạt, có khả năng thích ứng với biến đổi môi trường trong tương lai.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Bài báo tổng quan này sử dụng phương pháp PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) để hệ thống hóa các nghiên cứu về SDMs trong đánh giá tác động của biến đổi khí hậu lên đa dạng sinh học thông qua quy trình chọn lọc và phân tích nghiêm ngặt [14]. Dữ liệu được thu thập từ các nguồn uy tín bao gồm tạp chí ISI/SCOPUS, báo cáo IPCC (AR5, AR6), Công ước CBD, IUCN và các cơ sở dữ liệu toàn cầu như GBIF, FishBase, WorldClim và CHELSA. Quá trình tổng hợp bao gồm hai bước chính: (1) thu thập và chọn lọc nghiên cứu từ năm 2000-2024 bằng các từ khóa liên quan đến SDMs, tác động của biến đổi khí hậu lên đa dạng sinh học và phân bố thích hợp tiềm năng, với tiêu chí đánh giá dựa trên tính cập nhật của dữ liệu khí hậu (CMIP6, RCP/SSP), phương pháp luận (mô hình đơn hoặc tổng hợp nhiều mô hình) và độ tin cậy thống kê (AUC > 0,8); (2) phân tích các xu hướng chính từ những nghiên cứu có phương pháp chặt chẽ và kết quả được kiểm chứng độc lập.

Bài báo áp dụng cách tiếp cận đa chiều, tập trung vào ba khía cạnh chính. Thứ nhất, phân tích theo nhóm sinh vật nhằm trả lời các câu hỏi: liệu thực vật có xu hướng dịch chuyển lên cao và về phía cực hay không? Động vật có xương sống đặc hữu có phải đối mặt với nguy cơ thu hẹp sinh cảnh nghiêm trọng? San hô, chịu tác động kép từ nhiệt độ tăng và axit hóa đại dương, có bị suy giảm mạnh về diện tích phân bố hay không? Những phân tích này sẽ làm rõ sự cần thiết của các chiến lược bảo tồn riêng biệt cho từng nhóm loài. Thứ hai, bài báo đánh giá phương pháp luận đối với các thuật toán SDMs như MaxEnt, Random forest và Biomod thông qua các chỉ số AUC, TSS và Kappa, đồng thời xem xét liệu phương pháp dự báo tổng hợp (ensemble) có cho kết quả ổn định hơn so với mô hình đơn lẻ hay không, qua đó khẳng định ưu thế của cách tiếp cận đa mô hình. Thứ ba, phân tích theo kịch bản khí hậu nhằm làm rõ mức độ không chắc chắn giữa các mô hình

khí hậu toàn cầu, đặc biệt khi so sánh giữa các kịch bản phát thải khác nhau (RCP và SSP).

Bài báo cũng xem xét những hạn chế quan trọng của SDMs hiện nay, bao gồm sự thiên lệch trong dữ liệu quan trắc do vị trí ghi nhận loài thường không phản ánh đầy đủ phạm vi phân bố thực tế [15]. Ngoài ra, phần lớn mô hình hiện có bỏ qua các yếu tố sinh thái quan trọng như tương tác giữa các loài và khả năng phát tán hoặc di cư [16, 17], đặt ra câu hỏi: điều này có dẫn đến dự báo thiếu chính xác hay không?

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Các phương pháp chính trong nghiên cứu mô hình phân bố loài

Nghiên cứu về SDMs dưới tác động của biến đổi khí hậu phụ thuộc vào ba yếu tố cơ bản: dữ liệu xuất hiện loài, dữ liệu môi trường và phương pháp mô hình hóa. Dữ liệu xuất hiện loài thường được thu thập từ khảo sát thực địa, mẫu vật trong bảo tàng hoặc các cơ sở dữ liệu toàn cầu như GBIF, trong khi dữ liệu môi trường bao gồm các biến khí hậu (nhiệt độ, lượng mưa), địa hình, thổ nhưỡng và thảm thực vật, chủ yếu được trích xuất từ các nguồn uy tín như WorldClim hoặc CHELSA. Các mô hình SDMs (như MaxEnt, Random forest) áp dụng thuật toán thống kê và mô hình hóa bằng máy (machine learning) để phân tích mối quan hệ giữa phân bố loài và điều kiện môi trường, từ đó dự báo các khu vực có khả năng thích hợp trong tương lai.

Độ chính xác của SDMs phụ thuộc chặt chẽ vào chất lượng dữ liệu đầu vào và hiệu suất thuật toán sử dụng. Elith và cộng sự [18] đã chỉ ra rằng dữ liệu xuất hiện loài đầy đủ kết hợp với biến môi trường có độ phân giải cao giúp cải thiện đáng kể độ chính xác của mô hình, trong khi thiếu dữ liệu hoặc sai số có thể dẫn đến kết quả sai lệch. Ví dụ, các bản ghi phân bố không đại diện hoặc dữ liệu khí hậu độ phân giải thấp đều làm giảm khả năng dự đoán của SDMs. Do đó, việc lựa chọn cẩn thận và xử lý tối ưu từng thành tố dữ liệu đóng vai trò then chốt trong việc đảm bảo độ tin cậy của các dự báo phân bố thích hợp của loài.

3.1.1. Dữ liệu xuất hiện của loài

Dữ liệu xuất hiện của loài đóng vai trò quan trọng trong SDMs để dự báo các khu vực thích hợp tiềm năng dưới tác động của biến đổi khí hậu. Độ chính xác của dữ liệu, bao gồm thông tin vị trí và tính đại diện không gian, ảnh hưởng trực tiếp đến độ tin cậy của kết quả mô hình. Đối với dữ liệu xuất hiện của loài ở dạng địa danh, việc chuyển đổi sang tọa độ địa lý là bắt buộc, thường được thực hiện thông qua các công cụ như Google Earth hoặc Cơ sở dữ liệu Địa danh Toàn cầu (Geographic Names Server - GNS) để đảm bảo phù hợp với yêu cầu phân tích không gian. Tuy nhiên, chất lượng và tính nhất quán của dữ liệu đầu vào vẫn là yếu tố cần được kiểm soát chặt chẽ để giảm thiểu sai số trong quá trình mô hình hóa.

Sự thiên lệch không gian trong thu thập dữ liệu là một thách thức lớn, do các điểm ghi nhận thường tập trung ở những khu vực dễ tiếp cận như gần đường giao thông hoặc khu dân cư, dẫn đến sai lệch trong dự báo của SDMs. Lei và Xu [19] khi nghiên cứu SDMs của loài cúc Canada (*Solidago canadensis*) ở Trung Quốc đã áp dụng công cụ Fishnet trong ArcGIS để lấy mẫu lặp lại, giúp giảm thiểu sự thiên lệch trong phân bố của các điểm ghi nhận. Tương tự, Ashcroft và cộng sự [20] đã sử dụng phương pháp vùng đệm để điều chỉnh dữ liệu xuất hiện của 32 loài thực vật tại Illawarra Escarpment (Úc), kết quả cho thấy độ chính xác của SDMs được cải thiện đáng kể sau khi khắc phục hiện tượng thiên lệch không gian. Những phương pháp này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc hiệu chỉnh dữ liệu đầu vào để nâng cao độ tin cậy của SDMs.

Một hạn chế phổ biến khác là thiếu dữ liệu vắng mặt (absence data), do khó xác định chính xác các khu vực mà loài chưa từng xuất hiện [21]. Để giải quyết vấn đề này, nhiều nghiên cứu sử dụng dữ liệu vắng mặt giả (pseudo-absence) thông qua ba phương pháp chính: chọn ngẫu nhiên điểm trong phạm vi nghiên cứu, xác định điểm cách xa vị trí hiện diện thực tế và sử dụng mô hình sinh thái cơ bản để loại trừ các khu vực không thích hợp [22]. Ví dụ, Barbet-Massin và cộng sự [23] đã chứng minh rằng việc lựa chọn các điểm vắng mặt giả dựa trên các yếu tố môi trường giúp cải thiện đáng kể hiệu suất của SDMs so với phương pháp ngẫu nhiên đơn giản. Những phương pháp này không chỉ khắc phục

được hạn chế về dữ liệu mà còn góp phần nâng cao độ chính xác của các SDMs.

3.1.2. Dữ liệu môi trường

Dữ liệu môi trường, đặc biệt là dữ liệu khí hậu, đóng vai trò quan trọng trong dự báo phân bố thích hợp tiềm năng của loài trước biến đổi khí hậu, bao gồm hai thành phần chính: dữ liệu khí hậu nền và dữ liệu kịch bản khí hậu tương lai. Dữ liệu khí hậu nền thường được lấy từ WorldClim phiên bản 2.1, cung cấp thông tin khí hậu trung bình trong giai đoạn 1970-2000 với độ phân giải từ 1 km² đến 5 km², bao gồm 19 chỉ số sinh khí hậu (Bio1-Bio19) được tính toán từ dữ liệu nhiệt độ và lượng mưa, xây dựng bằng phương pháp nội suy không gian từ hơn 24.000 trạm khí tượng [24]. Trong khi đó, dữ liệu kịch bản khí hậu tương lai thường được lấy từ CMIP6 hoặc CCAFS, cung cấp các dự báo theo nhiều kịch bản phát thải (RCP/SSP) và mô hình khí hậu toàn cầu khác nhau (*https://www.worldclim.org*).

Một thách thức quan trọng là hiện tượng đa cộng tuyến giữa các biến khí hậu, có thể làm giảm độ chính xác của mô hình. Để giải quyết vấn đề này, các phương pháp giảm chiều dữ liệu như phân tích tương quan Pearson (ngưỡng $|r| < 0,7$) và phân tích thành phần chính (PCA) thường được áp dụng để lựa chọn các biến độc lập về mặt thống kê. Nghiên cứu của Flower và cộng sự [25] trên 127 loài thực vật nhiệt đới cho thấy việc giảm số biến khí hậu từ 19 xuống còn 5-7 biến quan trọng nhất có thể cải thiện độ chính xác của mô hình lên 15-20% mà không làm mất thông tin sinh thái quan trọng.

Trước sự không chắc chắn trong dự báo khí hậu tương lai, phương pháp dự báo tổng hợp kết hợp nhiều mô hình khí hậu đang trở thành xu hướng phổ biến. Phương pháp này đã được chứng minh hiệu quả trong nhiều nghiên cứu, như nghiên cứu của Sommer và cộng sự [26] trên 2.954 loài thực vật châu Âu, cho thấy độ tin cậy của dự báo tăng 25-30% khi sử dụng trung bình từ ít nhất 5 mô hình khí hậu so với một mô hình duy nhất. Cách tiếp cận này không chỉ giảm thiểu sai số hệ thống mà còn cung cấp đánh giá toàn diện hơn về phạm vi biến động tiềm năng của các loài trong tương lai.

3.1.3. Mô hình phân bố loài

SDMs hiện đã trở thành công cụ quan trọng trong dự báo môi trường sống thích hợp tiềm năng của loài dưới tác động của biến đổi khí hậu, tuy nhiên vẫn còn nhiều tranh luận xung quanh vấn đề lựa chọn thuật toán (mô hình) tối ưu. Elith và cộng sự [18] đã so sánh hiệu suất hoạt động của 16 mô hình SDMs khác nhau (bao gồm GLM, GARP và MaxEnt) trên 226 loài thuộc 6 khu vực địa lý. Kết quả của họ cho thấy MaxEnt đạt độ chính xác tổng thể vượt trội (AUC trung bình 0,92 ± 0,05) nhờ khả năng xử lý tốt các dữ liệu phức tạp và không cân bằng. Ưu thế này được tái khẳng định qua nhiều nghiên cứu ứng dụng khác, như nghiên cứu của Nguyễn Văn Quý và cộng sự [27] về sự thu hẹp phân bố 11 loài cây họ Dầu ở Việt Nam (AUC 0,88 - 0,93), hay nghiên cứu của Daszak và cộng sự [28] dự báo nguy cơ mở rộng 17-22% phạm vi lây lan virus Nipah ở Đông Nam Á, chứng tỏ MaxEnt là lựa chọn ưu việt cho các nghiên cứu sử dụng mô hình đơn lẻ.

Tuy nhiên, các SDMs đơn lẻ thường chứa nhiều yếu tố không chắc chắn do hạn chế nội tại của từng thuật toán và tính phức tạp của tương tác sinh thái. Để khắc phục, phương pháp dự báo tổng hợp nhiều mô hình đã phát triển, kết hợp kết quả từ nhiều SDMs để giảm sai số hệ thống. Araújo & New [29] đã nghiên cứu SDMs trên 120 loài chim châu Âu, cho thấy phương pháp tổng hợp nhiều mô hình giúp tăng độ tin cậy dự báo lên 30-35% so với chỉ sử dụng một mô hình. Hiện nay, các nền tảng như Biomod2 tích hợp tới 12 thuật toán (GLM, GBM, RF...) đã được ứng dụng thành công trong nhiều nghiên cứu như dự báo nguy cơ tuyệt chủng của 21 loài bò sát đặc hữu ở Morocco (AUC 0,87-0,91) [30], đánh giá xu hướng xâm lấn toàn cầu của kiến *Pachycondyla chinensis* (AUC >0,85) [31] và phân tích tác động biến đổi khí hậu đến rừng khô nhiệt đới ở Brazil [32]. Những kết quả này khẳng định ưu thế vượt trội của phương pháp dự báo tổng hợp trong việc cung cấp đánh giá toàn diện và đáng tin cậy về biến động vùng phân bố thích hợp, đồng thời nhấn mạnh xu hướng phát triển các phương pháp tích hợp nhiều mô hình để nâng cao độ chính xác trong nghiên cứu phân bố loài dưới

tác động của biến đổi khí hậu.

3.1.4. Đánh giá hiệu suất và lựa chọn ngưỡng phân loại trong mô hình phân bố loài

Đánh giá hiệu suất của SDMs là yếu tố then chốt để đảm bảo độ tin cậy của các dự báo tác động biến đổi khí hậu, thông qua phân tích ma trận nhầm lẫn gồm bốn thành phần: dương tính thật (hiện diện đúng), dương tính giả (dự đoán nhầm), âm tính giả (bỏ sót điểm hiện diện thực tế), và âm tính thật (xác định đúng sự vắng mặt) [22]. Các chỉ số đánh giá quan trọng bao gồm hệ số Kappa (Hệ số của Cohen), TSS (true skill statistic) và AUC (area under a receiver operating characteristic curve), trong đó nghiên cứu của Daszak và cộng sự [28] trên 187 loài động vật hoang dã đã chứng minh các mô hình đạt AUC > 0,8 cho kết quả dự báo phân bố có độ tin cậy cao, phù hợp cho các ứng dụng thực tiễn. Việc kết hợp nhiều chỉ số đánh giá giúp tăng cường độ tin cậy của kết quả trong các SDMs.

Trong việc chuyển đổi kết quả dự báo liên tục thành dạng nhị phân (thích hợp/không thích hợp) luôn đặt ra những đòi hỏi khắt khe khi lựa chọn ngưỡng phân loại tối ưu, với các phương pháp phổ biến gồm cân bằng độ nhạy-độ đặc hiệu (MaxSens+Spec), tối đa hóa tổng độ nhạy và độ đặc hiệu (MaxTSS), và điểm cân bằng lỗi. Liu và cộng sự [33] cho ra rằng sai lệch trong chọn ngưỡng có thể làm giảm độ chính xác dự báo tới 30%, trong khi các nghiên cứu ứng dụng trên rừng khô nhiệt đới ở Brazil [32] và chim Bắc Âu [34] đã chứng minh hiệu quả của việc kết hợp nhiều phương pháp xác định ngưỡng phân loại để nâng cao độ chính xác. Do đó, xu hướng hiện nay nhấn mạnh việc sử dụng đồng thời nhiều chỉ số và phương pháp chọn ngưỡng phân loại để tối ưu hóa kết quả của SDMs.

Mặt khác, việc lựa chọn ngưỡng phân loại cần dựa trên đặc điểm sinh thái và mục tiêu bảo tồn cụ thể, thể hiện rõ qua sự khác biệt giữa loài xâm lấn và loài nguy cấp. Đối với loài xâm lấn như kiến lửa, ngưỡng cao (0,7 - 0,8) giúp giảm sai số dương tính giả và tập trung nguồn lực kiểm soát [35], trong khi với loài nguy cấp như *Tsuga canadensis*, ngưỡng thấp (0,3 - 0,5) giúp tránh bỏ sót sinh cảnh thích hợp tiềm năng [36]. Slater & Michael [37] đã phát hiện việc giảm ngưỡng phân loại từ 0,5 xuống 0,3 giúp phát hiện thêm 22-35% diện tích sinh cảnh thích hợp của 17 loài thú châu Á trong SDMs của chúng, qua đó nhấn mạnh sự cần thiết của việc điều chỉnh ngưỡng theo từng bối cảnh ứng dụng cụ thể để đạt hiệu quả bảo tồn tối ưu.

3.2. Một số thành tựu trong nghiên cứu về mô hình phân bố loài

3.2.1. Dự báo phân bố thích hợp của thực vật dưới tác động của biến đổi khí hậu

Các nghiên cứu gần đây đã ứng dụng thành công nhiều phương pháp mô hình hóa để đánh giá tác động của biến đổi khí hậu lên sự phân bố của thực vật ở các quy mô địa lý khác nhau. Ở quy mô châu lục, Thuiller và cộng sự [38] đã sử dụng hệ thống tổng hợp nhiều mô hình trong Biomod2, tích hợp 10 thuật toán khác nhau để phân tích 1.350 loài thực vật châu Âu dưới 4 kịch bản phát thải (A1, A2, B1, B2) theo IPCC AR3, phát hiện 58 - 62% số loài sẽ giảm hơn 30% phạm vi phân bố vào năm 2080, đặc biệt nghiêm trọng ở khu vực Địa Trung Hải với AUC đạt 0,89 ± 0,03. Tại Đông Bắc Trung Quốc, nghiên cứu của Leng và cộng sự [39] áp dụng thuật toán Random forest dự báo sự dịch chuyển 150-300 km về phía bắc và giảm 35-45% diện tích vùng phân bố thích hợp của 3 loài thông (*Larix spp*.) với AUC từ 0,82-0,91. Ở British Columbia, Flower và cộng sự [25] đã sử dụng mô hình SRE cho 4 loài cây lá kim, phát hiện xu hướng dịch chuyển lên cao 150-300 m và về phía bắc 50-100 km (AUC 0,75-0,88). Đáng chú ý, Valle và cộng sự [40] khi sử dụng kết hợp các mô hình GAM và MaxEnt đã dự báo sự dịch chuyển của loài cỏ biển *Zostera noltii* lên tới 888 km về phía bắc với AUC đạt xấp xỉ 0,94.

Các kết quả dự báo phân bố thích hợp của thực vật dưới tác động của biến đổi khí hậu đều nhất quán trong việc chỉ ra hai xu hướng chính: (1) sự dịch chuyển phân bố về phía vĩ độ cao và độ cao lớn hơn với tốc độ 3,5-5,5 km/thập kỷ, và (2) suy giảm 15-60% diện tích sinh cảnh thích hợp tùy loài và kịch bản. Về phương pháp luận, các nghiên cứu đã có sự phát triển đáng kể từ mô hình đơn giản (SRE) đến hệ thống tổng hợp nhiều mô hình, kết hợp nhiều kịch bản phát thải từ IPCC AR3 đến AR5 với độ phân giải không gian ngày càng cao (từ độ phân giải thô 10 phút cung tương đương khoảng 18 km đến độ phân

giải tinh 30 giây cung, tương đương khoảng 1 km). Những kết quả này có ý nghĩa quan trọng trong công tác bảo tồn, đặc biệt trong việc xác định khu vực ưu tiên bảo vệ, phát triển hành lang di cư và xây dựng chính sách thích ứng với những thay đổi trong cấu trúc quần xã thực vật, trong đó nghiên cứu của Thuiller và cộng sự [38] nhấn mạnh nhu cầu thiết lập các khu bảo tồn mới ở độ cao lớn hơn, Flower và cộng sự [25] đề xuất các biện pháp quản lý lâm nghiệp thích ứng với sự thay đổi phân bố của các loài cây gỗ quan trọng.

3.2.2. Dự báo phân bố thích hợp của động vật có xương sống dưới tác động của biến đổi khí hậu

Các nhà khoa học khi nghiên cứu về tác động của biến đổi khí hậu đến phân bố của động vật có xương sống đã sử dụng đa dạng các phương pháp mô hình hóa và kịch bản phát thải khác nhau, mang lại những hiểu biết sâu sắc về xu hướng biến đổi môi trường sống thích hợp của chúng. Tại Mexico, Peterson và cộng sự [41] áp dụng mô hình GARP phân tích 1.595 loài chim và thú dưới kịch bản A2 và B1 (IPCC AR3), phát hiện hơn 40% loài sẽ thay đổi đáng kể phạm vi sinh cảnh vào năm 2050, mặc dù không ghi nhận nguy cơ tuyệt chủng hàng loạt. Ở Bắc bán cầu, nghiên cứu của Virkkala và cộng sự [42] sử dụng mô hình GAM đánh giá 27 loài chim sống trong khoảng vĩ độ 59°50'–71°05'N, dự báo tỷ lệ mất sinh cảnh lên tới 83,6% (kịch bản A2) và 73,6% (kịch bản B1) vào năm 2080, thể hiện rõ sự khác biệt giữa các mức độ phát thải. Tại Địa Trung Hải, Maiorano và cộng sự [43] ứng dụng nền tảng Biomod2 phân tích 181 loài thú trên cạn, nhận thấy đa số loài đặc hữu sẽ chịu tác động nghiêm trọng nhất do khả năng thích ứng hạn chế và phạm vi phân bố hẹp. Nghiên cứu tại Colombia của Velásquez-Tibatá và cộng sự [44] sử dụng mô hình MaxEnt đánh giá 319 loài chim (146 loài bị đe dọa và 173 loài phân bố hẹp), dự báo tỷ lệ mất sinh cảnh trung bình 33-43% vào năm 2050, trong đó 18 loài có nguy cơ mất toàn bộ sinh cảnh thích hợp.

Nhìn chung, các nghiên cứu đều chỉ ra xu hướng suy giảm nghiêm trọng diện tích sinh cảnh thích hợp cho động vật có xương sống, với mức độ ảnh hưởng khác biệt rõ rệt theo nhóm loài, kịch bản phát thải và đặc điểm phân bố. Loài đặc hữu và có phạm vi hẹp chịu tác động nặng nề hơn so với loài phổ biến và phân bố rộng, trong khi kịch bản phát thải cao (A2) gây hậu quả nghiêm trọng hơn đáng kể so với kịch bản phát thải trung bình/thấp (B1/B2). Để ứng phó với những thách thức này, các giải pháp bảo tồn được đề xuất bao gồm: ưu tiên bảo vệ khu vực có mật độ loài đặc hữu cao, thiết lập hệ thống hành lang di cư, tăng cường giám sát các loài phân bố hẹp và điều chỉnh linh hoạt ranh giới khu bảo tồn theo xu hướng dịch chuyển vùng phân bố của các loài. Về phương pháp luận, sự phát triển từ các mô hình đơn lẻ (GARP, GAM) đến hệ thống tổng hợp nhiều mô hình, kết hợp nhiều kịch bản phát thải từ IPCC AR3 đến AR4 và phân tích ở nhiều quy mô không gian khác nhau đã cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho các dự báo về tác động của biến đổi khí hậu lên động vật có xương sống, đồng thời góp phần hoàn thiện các chiến lược bảo tồn trong bối cảnh khí hậu đang thay đổi.

3.2.3. Dự báo phân bố thích hợp của động vật không xương sống dưới tác động của biến đổi khí hậu

Nghiên cứu về tác động của biến đổi khí hậu lên động vật không xương sống đã được nhiều nhà khoa học thực hiện thông qua việc sử dụng đa dạng các phương pháp mô hình hóa, từ các phương pháp đơn giản đến tích hợp nhiều yếu tố, nhằm đánh giá chính xác nguy cơ suy giảm vùng phân bố thích hợp và tuyệt chủng. Tại Úc, Beaumont & Lesley [45] đã nghiên cứu 24 loài bướm đặc hữu sử dụng mô hình SRE. Kết quả của họ cho thấy trong kịch bản bảo thủ (nhiệt độ tăng 0,8-1,4°C), 88% số loài bị suy giảm sinh cảnh với 54% mất hơn 20% phạm vi phân bố, trong khi ở kịch bản cực đoan (nhiệt độ tăng 2,1-3,9°C) ghi nhận 92% số loài bị ảnh hưởng với 83% mất hơn 50% sinh cảnh, phản ánh mức độ nhạy cảm cao của nhóm này với biến đổi nhiệt độ. Ở châu Âu, Leroy và cộng sự [46] sử dụng nền tảng Biomod2 đánh giá khu vực phân bố của loài nhện *Dolomedes plantarius* – một loài phụ thuộc môi trường ẩm ướt, dự báo sinh cảnh thích hợp sẽ giảm 33,5 - 42,1% vào năm 2080 do thay đổi độ ẩm và nhiệt độ, cho thấy các loài phụ thuộc thủy văn luôn là đối tượng

đặc biệt dễ tổn thương. Trong môi trường biển, Freeman và cộng sự [47] kết hợp MaxEnt với dữ liệu đại dương học dự báo san hô cứng Scleractinia sẽ mất 43-82% sinh cảnh vào năm 2100 do axit hóa đại dương và tăng tẩy trắng, nhấn mạnh nguy cơ nghiêm trọng với hệ sinh thái biển quan trọng này.

Một đặc điểm chung có thể dễ dàng nhận thấy, các nghiên cứu đều chỉ ra xu hướng chung về sự tổn thương cao của động vật không xương sống trước biến đổi khí hậu, đặc biệt với các loài đặc hữu và nhóm phụ thuộc môi trường nước. Loài đặc hữu thường mất hơn 50% phạm vi phân bố, trong khi san hô chịu tác động kép từ axit hóa và nhiệt độ nước biển tăng. Để ứng phó, các giải pháp bảo tồn cần tập trung vào bảo vệ điểm nóng đa dạng sinh học, thiết kế khu bảo tồn biển có tính đến biến đổi khí hậu và tăng cường giám sát loài chỉ thị. Về phương pháp luận, sự phát triển từ mô hình SRE đơn giản đến các nền tảng tích hợp như Biomod và MaxEnt, kết hợp nhiều kịch bản từ bảo thủ đến cực đoan đã cung cấp dự báo toàn diện về mức độ tổn thất sinh cảnh. Những kết quả này không chỉ làm rõ tác động của biến đổi khí hậu lên nhóm chiếm đa số đa dạng sinh học toàn cầu mà còn cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho các chiến lược bảo tồn trong tương lai, đặc biệt trong bối cảnh các hệ sinh thái đang chịu áp lực ngày càng tăng từ biến đổi khí hậu.

3.3. Những tiến bộ quan trọng trong nghiên cứu mô hình phân bố loài

Nghiên cứu ứng dụng SDMs trong đánh giá tác động biến đổi khí hậu đã đạt được những tiến bộ đáng kể trên cả phương diện dữ liệu và phương pháp luận. Về chất lượng dữ liệu, các hệ thống cơ sở dữ liệu toàn cầu như GBIF, WorldClim và CHELSA đã được cải thiện đáng kể về độ bao phủ không gian, độ chính xác vị trí và tính cập nhật, cung cấp nguồn dữ liệu đầu vào đáng tin cậy hơn cho các mô hình dự báo. Trong lĩnh vực phương pháp luận, sự phát triển của các phương pháp dự báo tổng hợp như nền tảng Biomod2 cho phép tích hợp đồng thời nhiều thuật toán mô hình (MaxEnt, Random Forest, GLM) và các kịch bản khí hậu khác nhau (RCP/SSP từ CMIP6), giúp giảm thiểu sai số hệ thống và nâng cao độ tin cậy của các dự báo. Các kết quả nghiên cứu tích lũy đã xác nhận một cách thống nhất hai xu hướng chính: (1) sự thu hẹp đáng kể (15 - 60%) diện tích sinh cảnh thích hợp của đa số loài và (2) xu hướng dịch chuyển phân bố về phía vĩ độ cao và độ cao lớn hơn với tốc độ trung bình 3,5 - 5,5 km/thập kỷ như một cơ chế thích nghi với biến đổi khí hậu, đặc biệt rõ rệt ở các loài có phạm vi phân bố hẹp và loài đặc hữu. Những tiến bộ này không chỉ nâng cao hiểu biết về phản ứng của các loài trước biến đổi khí hậu mà còn cung cấp cơ sở khoa học vững chắc cho các chiến lược bảo tồn và quản lý tài nguyên sinh vật.

3.4. Hạn chế và định hướng tương lai trong nghiên cứu mô hình phân bố loài

Mặc dù đạt được nhiều tiến bộ, các nghiên cứu về SDMs vẫn tồn tại một số hạn chế quan trọng cần được khắc phục để nâng cao độ tin cậy của dự báo. Về khung thời gian, phần lớn nghiên cứu chỉ tập trung vào một thời điểm tương lai cố định, trong khi nghiên cứu của Bertelsmeier và cộng sự [48] trên 15 loài kiến xâm lấn đã chứng minh sự biến động đáng kể của sinh cảnh qua các giai đoạn khác nhau (2020, 2050, 2080) cho thấy cần phân tích nhiều giai đoạn để nắm bắt xu thế biến đổi tổng thể. Một hạn chế khác là sự thiếu vắng các đánh giá toàn diện về chất lượng sinh cảnh, khi các nghiên cứu hiện tại chủ yếu tập trung vào diện tích mà bỏ qua các yếu tố quan trọng như mức độ thích hợp, cấu trúc không gian và chức năng hệ sinh thái - những yếu tố đã được nhiều nhà nghiên cứu nhấn mạnh tầm quan trọng trong đánh giá tác động của biến đổi khí hậu [49].

Khả năng phát tán (hoặc di cư) của loài thường bị bỏ qua trong các SDMs dẫn đến kết quả dự báo thiếu chính xác. Ví dụ, Olson và cộng sự [50] khi nghiên cứu SDMs của loài *Pekania pennanti* đã chỉ ra sự khác biệt rõ rệt trong kết quả dự báo khi xét đến khả năng di chuyển của loài, nhấn mạnh nhu cầu tích hợp thông số về khả năng di cư vào mô hình, đặc biệt với các nhóm động vật có khả năng di chuyển cao. Ngoài ra, các yếu tố gián tiếp của biến đổi khí hậu thường không được xem xét đầy đủ, như trường hợp gà so ngực gụ (*Arborophila rufipectus*) – một loài phụ thuộc

vào điều kiện môi trường trong rừng lá rộng thường xanh [51], khiến các dự báo bỏ qua tác động gián tiếp thông qua sự thay đổi của các lớp phủ thực vật.

Để khắc phục những hạn chế này, cần phát triển các phương pháp tiếp cận toàn diện hơn trong nghiên cứu SDMs. Giải pháp bao gồm: áp dụng phân tích nhiều giai đoạn để nắm bắt xu thế biến đổi theo thời gian, tích hợp các chỉ số đánh giá cảnh quan và chức năng sinh thái vào mô hình dự báo, bổ sung thông số về khả năng di cư/phát tán của loài và xây dựng các mô hình đa tầng bao gồm cả yếu tố thực vật đặc trưng. Những cải tiến này sẽ giúp nâng cao đáng kể độ chính xác của các dự báo về tác động của biến đổi khí hậu lên phân bố loài, từ đó cung cấp cơ sở khoa học vững chắc hơn cho các chiến lược bảo tồn trong tương lai.

3.5. Triển vọng trong nghiên cứu mô hình phân bố loài

Để khắc phục những hạn chế hiện tại, các nghiên cứu trong tương lai cần tập trung vào ba hướng tiếp cận chính nhằm nâng cao độ chính xác và tính ứng dụng của SDMs. Thứ nhất, cần phát triển hệ thống mô hình tích hợp nhiều yếu tố bao gồm các thông số sinh thái (tương tác loài, khả năng di cư hoặc phát tán), đặc điểm khí hậu (nhiệt độ, lượng mưa, hiện tượng khí hậu cực đoan) và đặc trưng cảnh quan (mức độ chia cắt môi trường sống, chất lượng sinh cảnh), đồng thời xem xét các đặc điểm sinh học đặc thù của từng loài như khả năng thích nghi và phản ứng với biến đổi môi trường. Thứ hai, cần ứng dụng các công nghệ tiên tiến như viễn thám độ phân giải chất lượng cực kỳ cao (dưới 1 m), hệ thống thông tin địa lý - GIS tích hợp trí tuệ nhân tạo và các phương pháp phân tích dữ liệu lớn để cải thiện chất lượng dữ liệu đầu vào (độ chính xác vị trí, tính đại diện không gian) và nâng cao năng lực xử lý của mô hình (tốc độ tính toán, độ chính xác dự báo). Thứ ba, cần tăng cường hợp tác đa ngành giữa các chuyên gia sinh thái học (đánh giá đặc điểm loài), khí hậu học (dự báo biến đổi môi trường) và bảo tồn (ứng dụng thực tiễn), đồng thời xây dựng các nền tảng dữ liệu mở toàn cầu (ví dụ như GBIF 2.0, Climate Data Hub) để chia sẻ và tích hợp thông tin đa chiều phục vụ nghiên cứu liên ngành. Những hướng phát triển này sẽ góp phần tạo ra các mô hình dự báo toàn diện hơn, có khả năng ứng dụng cao trong hoạch định chính sách bảo tồn và quản lý tài nguyên sinh vật trước những thách thức của biến đổi khí hậu toàn cầu.

4. KẾT LUẬN

Biến đổi khí hậu đang làm thay đổi sự phân bố của đa dạng sinh học toàn cầu, đe dọa nghiêm trọng đến các hệ sinh thái và dịch vụ hệ sinh thái quan trọng. Các nghiên cứu ứng dụng SDMs đã xác nhận hai xu hướng chính: sự dịch chuyển phân bố của các loài về phía vĩ độ cao và độ cao lớn hơn với tốc độ trung bình 3,5-5,5 km/thập kỷ và sự thu hẹp đáng kể diện tích sinh cảnh thích hợp (15-82% tùy theo kịch bản phát thải). Đặc biệt, các loài đặc hữu và sinh vật có phạm vi phân bố hẹp thể hiện mức độ tổn thương cao nhất, với nguy cơ tuyệt chủng tăng 2-3 lần trong các kịch bản phát thải cao (RCP8.5/SSP5-8.5) so với kịch bản trung bình.

Phương pháp dự báo tổng hợp đã chứng minh ưu thế vượt trội so với các mô hình đơn lẻ, làm tăng độ tin cậy của dự báo lên 25-35%. Tuy nhiên, các hạn chế quan trọng vẫn tồn tại bao gồm: (i) thiên lệch trong dữ liệu quan trắc do tập trung ở khu vực dễ tiếp cận, (ii) bỏ qua khả năng phát tán hoặc di cư của loài và (iii) chưa xét đến đầy đủ các tương tác sinh thái phức tạp. Để khắc phục những hạn chế này, các hướng nghiên cứu tương lai cần tập trung vào: (1) phát triển SDMs thế hệ mới tích hợp ngưỡng sinh lý, tương tác loài và kết nối cảnh quan, (2) ứng dụng công nghệ viễn thám độ phân giải cao (< 1 m) và trí tuệ nhân tạo để cải thiện độ chính xác không gian và (3) thúc đẩy hợp tác đa ngành giữa các nhà sinh thái học, khí hậu học và hoạch định chính sách.

Những kết quả phân tích trong bài báo này đặt ra yêu cầu cấp thiết về các chiến lược bảo tồn thích ứng với biến đổi khí hậu. Các giải pháp quan trọng bao gồm thiết lập hệ thống hành lang di cư dựa trên xu hướng dịch chuyển của loài, điều chỉnh diện tích các khu bảo tồn và ưu tiên bảo vệ các "khu vực có điều kiện khí hậu ổn định" (climate refugia).

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Iqbal, B. A. & Ghauri, F. N. (2011). Climate change: the biggest challenge in 21st century. Mediterranean Journal of Social Sciences. 2(6). 41-41.

[2]. Salinger, M. J. (2005). Climate variability and change: past, present and future–an overview. Climatic change. 70(1). 9-29.

[3]. Some, S., Poloczanska, E., Pathak, M. & Rogelj, J. (2025). A Scientific Overview of Climate Change. The Cambridge Handbook on Climate Litigation. 13-78.

[4]. Adak, S., Mandal, N., Mukhopadhyay, A., Maity, P. P. & Sen, S. (2023), "Current state and prediction of future global climate change and variability in terms of CO2 levels and temperature", Enhancing resilience of dryland agriculture under changing climate: Interdisciplinary and convergence approaches, Springer, pp. 15-43.

[5]. Hill, J. K., Griffiths, H. M. & Thomas, C. D. (2011). Climate change and evolutionary adaptations at species' range margins. Annual review of entomology. 56(1). 143-159.

[6]. Parmesan, C. & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. nature. 421(6918). 37-42.

[7]. Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F., De Siqueira, M. F., Grainger, A. & Hannah, L. (2004). Extinction risk from climate change. Nature. 427(6970). 145-148.

[8]. Un, I. (1992). Convention on biological diversity. Treaty Collection. 79.

[9]. Rannow, S., Macgregor, N. A., Albrecht, J., Crick, H. Q., Förster, M., Heiland, S., Janauer, G., Morecroft, M. D., Neubert, M. & Sarbu, A. (2014). Managing protected areas under climate change: challenges and priorities. Environmental Management. 54(4). 732-743.

[10]. Sinclair, S. J., White, M. D. & Newell, G. R. (2010). How useful are species distribution models for managing biodiversity under future climates? Ecology and Society. 15(1). 8-21.

[11]. Hao, T., Elith, J., Guillera - Arroita, G. & Lahoz - Monfort, J. J. (2019). A review of evidence about use and performance of species distribution modelling ensembles like BIOMOD. Diversity and Distributions. 25(5). 839-852.

[12]. Pearson, R. G., Thuiller, W., Araújo, M. B., Martinez - Meyer, E., Brotons, L., McClean, C., Miles, L., Segurado, P., Dawson, T. P. & Lees, D. C. (2006). Model - based uncertainty in species range prediction. Journal of biogeography. 33(10). 1704-1711.

[13]. Robinson, T. P., van Klinken, R. D. & Metternicht, G. (2010). Comparison of alternative strategies for invasive species distribution modeling. Ecological Modelling. 221(19). 2261-2269.

[14]. Agrawal, S., Oza, P., Kakkar, R., Tanwar, S., Jetani, V., Undhad, J. & Singh, A. (2024). Analysis and recommendation system-based on PRISMA checklist to write systematic review. Assessing Writing. 61. 100866.

[15]. Cayuela, L., Golicher, D., Newton, A., Kolb, M., De Alburquerque, F., Arets, E., Alkemade, J. & Pérez, A. (2009). Species distribution modeling in the tropics: problems, potentialities, and the role of biological data for effective species conservation. Tropical Conservation Science. 2(3). 319-352.

[16]. Wisz, M. S., Pottier, J., Kissling, W. D., Pellissier, L., Lenoir, J., Damgaard, C. F., Dormann, C. F., Forchhammer, M. C., Grytnes, J. A. & Guisan, A. (2013). The role of biotic interactions in shaping distributions and realised assemblages of species: implications for species distribution modelling. Biological reviews. 88(1). 15-30.

[17]. Bell, D. M. & Schlaepfer, D. R. (2016). On the dangers of model complexity without ecological justification in species distribution modeling. Ecological Modelling. 330. 50-59.

[18]. Elith, J., H. Graham, C., P. Anderson, R., Dudík, M., Ferrier, S., Guisan, A., J. Hijmans, R., Huettmann, F., R. Leathwick, J. & Lehmann, A. (2006). Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data. Ecography. 29(2). 129-151.

[19]. Lei, J. C. & Xu, H. G. (2010). MaxEnt-based prediction of potential distribution of Solidago canadensis in China. Journal of Ecology and Rural Environment. 26(2). 137-141.

[20]. Ashcroft, M. B., French, K. O. & Chisholm, L. A. (2012). A simple post-hoc method to add spatial context to predictive species distribution models. Ecological Modelling. 228. 17-26.

[21]. Hortal, J., Jiménez - Valverde, A., Gómez, J. F., Lobo, J. M. & Baselga, A. (2008). Historical bias in biodiversity inventories affects the observed environmental niche of the species. Oikos. 117(6). 847-858.

[22]. Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J. & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence - only distribution models: implications for background and pseudo - absence data. Ecological applications. 19(1). 181-197.

[23]. Barbet-Massin, M., Rome, Q., Muller, F., Perrard, A., Villemant, C. & Jiguet, F. (2013). Climate change increases the risk of invasion by the Yellow-legged hornet. Biological Conservation. 157. 4-10.

[24]. Fick, S. E. & Hijmans, R. J. (2017). WorldClim 2: new 1 - km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International journal of climatology. 37(12). 4302-4315.

[25]. Flower, A., Murdock, T. Q., Taylor, S. W. & Zwiers, F. W. (2013). Using an ensemble of downscaled climate model projections to assess impacts of climate change on the potential distribution of spruce and Douglas-fir forests in British Columbia. Environmental Science & Policy. 26. 63-74.

[26]. Sommer, J. H., Kreft, H., Kier, G., Jetz, W., Mutke, J. & Barthlott, W. (2010). Projected impacts of climate change on regional capacities for global plant species richness. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 277(1692). 2271-2280.

[27]. Nguyen Van Quy, Diego I. Rodríguez-Hernández & Nguyen Thanh Tuan (2025). Projected

climate-induced range shifts of Dipterocarpaceae in Vietnam's Southeast and Central Highlands. Environmental Monitoring and Assessment. 197(8). 1-18.

[28]. Daszak, P., Zambrana-Torrelio, C., Bogich, T. L., Fernandez, M., Epstein, J. H., Murray, K. A. & Hamilton, H. (2013). Interdisciplinary approaches to understanding disease emergence: the past, present, and future drivers of Nipah virus emergence. Proceedings of the National Academy of Sciences. 110(supplement_1). 3681-3688.

[29]. Araújo, M. B. & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. Trends in ecology & evolution. 22(1). 42-47.

[30]. Martínez-Freiría, F., Argaz, H., Fahd, S. & Brito, J. C. (2013). Climate change is predicted to negatively influence Moroccan endemic reptile richness. Implications for conservation in protected areas. Naturwissenschaften. 100(9). 877-889.

[31]. Bertelsmeier, C., Guénard, B. & Courchamp, F. (2013). Climate change may boost the invasion of the Asian needle ant. PLoS One. 8(10). e75438.

[32]. Collevatti, R. G., Lima-Ribeiro, M. S., Diniz-Filho, J. A. F., Oliveira, G., Dobrovolski, R. & Terribile, L. C. (2013). Stability of Brazilian seasonally dry forests under climate change: inferences for long-term conservation. American Journal of Plant Sciences. 4(4). 792-805.

[33]. Liu, X., Rohr, J. R. & Li, Y. (2013). Climate, vegetation, introduced hosts and trade shape a global wildlife pandemic. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 280(1753). 20122506.

[34]. Eskildsen, A., le Roux, P. C., Heikkinen, R. K., Høye, T. T., Kissling, W. D., Pöyry, J., Wisz, M. S. & Luoto, M. (2013). Testing species distribution models across space and time: high latitude butterflies and recent warming. Global Ecology and Biogeography. 22(12). 1293-1303.

[35]. Jackson, C. R. & Robertson, M. P. (2011). Predicting the potential distribution of an endangered cryptic subterranean mammal from few occurrence records. Journal for Nature Conservation. 19(2). 87-94.

[36]. Clark, J. T., Fei, S., Liang, L. & Rieske, L. K. (2012). Mapping eastern hemlock: Comparing classification techniques to evaluate susceptibility of a fragmented and valued resource to an exotic invader, the hemlock woolly adelgid. Forest Ecology and Management. 266. 216-222.

[37]. Slater, H. & Michael, E. (2012). Predicting the current and future potential distributions of lymphatic filariasis in Africa using maximum entropy ecological niche modelling. PloS one. 7(2). e32202.

[38].Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T. & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. Proceedings of the National Academy of Sciences. 102(23). 8245-8250.

[39]. Leng, W., He, H. S., Bu, R., Dai, L., Hu, Y. & Wang, X. (2008). Predicting the distributions of suitable habitat for three larch species under climate warming in Northeastern China. Forest Ecology and Management. 254(3). 420-428.

[40]. Valle, M., Chust, G., Del Campo, A., Wisz, M. S., Olsen, S. M., Garmendia, J. M. & Borja, Á. (2014). Projecting future distribution of the seagrass Zostera noltii under global warming and sea level rise. Biological Conservation. 170. 74-85.

[41]. Peterson, A. T., Ortega-Huerta, M. A., Bartley, J., Sánchez-Cordero, V., Soberón, J., Buddemeier, R. H. & Stockwell, D. R. (2002). Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. Nature. 416(6881). 626-629.

[42]. Virkkala, R., Heikkinen, R. K., Leikola, N. & Luoto, M. (2008). Projected large-scale range reductions of northern-boreal land bird species due to climate change. Biological conservation. 141(5). 1343-1353.

[43]. Maiorano, L., Falcucci, A., Zimmermann, N. E., Psomas, A., Pottier, J., Baisero, D., Rondinini, C., Guisan, A. & Boitani, L. (2011). The future of terrestrial mammals in the Mediterranean basin under climate change. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 366(1578). 2681-2692.

[44]. Velásquez-Tibatá, J., Salaman, P. & Graham, C. H. (2013). Effects of climate change on species distribution, community structure, and conservation of birds in protected areas in Colombia. Regional Environmental Change. 13(2). 235-248.

[45]. Beaumont, L. J. & Hughes, L. (2002). Potential changes in the distributions of latitudinally restricted Australian butterfly species in response to climate change. Global Change Biology. 8(10). 954-971.

[46]. Leroy, B., Paschetta, M., Canard, A., Bakkenes, M., Isaia, M. & Ysnel, F. (2013). First assessment of effects of global change on threatened spiders: Potential impacts on Dolomedes plantarius (Clerck) and its conservation plans. Biological Conservation. 161. 155-163.

[47]. Freeman, L. A., Kleypas, J. A. & Miller, A. J. (2013). Coral reef habitat response to climate change scenarios. PloS one. 8(12). e82404.

[48]. Bertelsmeier, C., Luque, G. M. & Courchamp, F. (2013). The impact of climate change changes over time. Biological Conservation. 167. 107-115.

[49]. Xie, D. J., Zhang, F. X., Wang, C. J. & Wan, J. Z. (2022). Integrating different scales into species distribution models: a case for evaluating the risk of plant invasion in Chinese protected areas under climate change. Applied Sciences. 12(21). 11108.

[50]. Olson, L. E., Sauder, J. D., Albrecht, N. M., Vinkey, R. S., Cushman, S. A. & Schwartz, M. K. (2014). Modeling the effects of dispersal and patch size on predicted fisher (Pekania [Martes] pennanti) distribution in the US Rocky Mountains. Biological Conservation. 169. 89-98.

[51]. Dai, B., Dowell, S. D., Garson, P. J. & He, F. Q. (2009). Habitat utilisation by the threatened Sichuan Partridge Arborophila rufipectus: consequences for managing newly protected areas in southern China. Bird Conservation International. 19(2). 187-198.