

DOI: 10.20103/j.stxb.202304150770

陈红, 欧小杨, 吕英烁, 李晓溪, 郑曦. 时空变化视角下北京市湿地优先保护格局. 生态学报, 2024, 44(12): 5128-5139.

Chen H, Ou X Y, Lü Y S, Li X X, Zheng X. Priority conservation pattern of wetlands in Beijing from the perspective of time and space. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5128-5139.

时空变化视角下北京市湿地优先保护格局

陈 红, 欧小杨, 吕英烁, 李晓溪, 郑 曦*

北京林业大学, 北京 100083

摘要: 气候变化通过改变湿地水文过程等影响湿地的空间分布, 城市化进程加剧了湿地破碎化程度并导致湿地生境退化, 构建连续的湿地生态保护网络体系有利于应对气候变化和城市发展带来的负面影响、提高生物多样性保护水平。北京市现有湿地空间分布呈现斑块面积小、破碎化程度高等特点, 为优化湿地保护区格局并应对气候变化和城市发展对北京市湿地生物多样性的影响, 基于系统保护规划方法, 以 Marxan 作为空间优化模型, 结合 PLUS 模型和 MaxEnt 模型, 模拟预测北京市湿地优先保护格局、识别湿地保护空缺并构建湿地分级保护区格局。研究表明: 2020 年北京市湿地存在 80.15 km² 的保护空缺, 2035 年和 2050 年优化后湿地保护区占比分别为 87.54% 和 85.95%, 在满足本研究预设的生物多样性保护目标的前提下符合北京市湿地保护规划对湿地保护率的要求。为最优化资源分配, 综合时空变化对湿地保护区空间分布的影响, 构建了湿地分级保护区格局, 将湿地保护区分为湿地永久保护区、湿地一级临时保护区和湿地二级临时保护区三个等级, 以期为北京市分期建设湿地保护区、优化湿地生态保护网络体系和保护湿地生物多样性提供依据。

关键词: 湿地; 优先保护格局; 系统保护规划; Marxan; MaxEnt

Priority conservation pattern of wetlands in Beijing from the perspective of time and space

CHEN Hong, OU Xiaoyang, LÜ Yingshuo, LI Xiaoxi, ZHENG Xi*

Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Climate change affects the spatial distribution and ecological functions of wetlands by altering the hydrological processes, soil temperature, biogeochemical cycles, and vegetation conditions. The continuous high temperature and drought, as well as other extreme weather conditions, have led to the degradation of habitats of some urban wetlands, posing a serious threat to the safety of urban biodiversity. The increasingly rapid urbanization is exacerbating wetland fragmentation and reducing the hydrological connectivity of wetlands, and thereby increasing the fragility of wetland ecosystems and leading to the degradation of wetland habitats. Establishing a continuous wetland ecological protection network system is beneficial for mitigating the negative impacts of climate change and urban development and improving biodiversity conservation. The current spatial distribution of wetlands in Beijing is characterized by small patch size and high fragmentation. Despite facing numerous challenges such as water scarcity and fragile water environment, Beijing aims to increase the area of wetlands and promote efforts related to wetland protection and restoration. To optimize the priority conservation pattern of wetlands and address the impacts of climate change and urban development on wetland biodiversity in Beijing, this study adopts the approach of Systematic Conservation Planning which can resolve the conflict between biodiversity conservation and urban resource utilization based on the simulated annealing algorithm. In order to provide more

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFF1304602)

收稿日期: 2023-04-15; 网络出版日期: 2024-04-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengxi@bjfu.edu.cn

scientific evidence and suggestions for the protection of biodiversity in Beijing, the Marxan spatial optimization model is used in combination with the PLUS and MaxEnt models to simulate and predict the priority areas for wetland protection in Beijing, identify protection gaps, and establish a classification system for wetland protected areas. The result showed that there was a protection gap of 80.15 km² of Beijing's wetlands in 2020. After optimization, the proportion of protected wetland areas will be 87.54% in 2035 and 85.95% in 2050. Under the premise of satisfying the predetermined biodiversity conservation objectives, the result complies with the wetland conservation rate requirements outlined in the wetland conservation planning of Beijing. To optimize resource allocation, the study considers the impact of temporal and spatial changes on the spatial distribution of wetland protected areas and proposes a classification system comprising permanent wetland protected areas, the first-level temporary protected areas, and the second-level temporary protected areas. And the result showed that by 2050, their areas would reach to 488.61 km², 13.02 km² and 28.95 km² respectively. This provides a basis for the phased construction of wetland protected areas, optimization of the wetland ecological protection network system, and conservation of wetland biodiversity in Beijing.

Key Words: wetland; priority conservation pattern; systematic conservation planning; Marxan; MaxEnt

湿地为众多野生生物提供了生长栖息环境,良好的湿地生态系统对于生物多样性的维持具有重要意义^[1-2]。气候变化通过改变湿地水文过程、土壤温度、生物地球化学循环、植被状况等影响湿地的空间分布及其生态功能^[3-4],高温、降水格局改变、极端天气等导致全球内陆湿地面积不断缩小^[5-6],部分城市湿地生境退化,生物多样性受到威胁。城市发展导致湿地水文联系减弱、破碎化程度加深、生态环境脆弱性增加和生物多样性降低^[7-9]。建立湿地保护区是对湿地进行保护的最为普遍和最有效的方法之一^[10-11],为应对气候变化和城市发展对城市湿地生物多样性的负面影响,建立科学合理的湿地生态保护网络体系刻不容缓。

系统保护规划(Systematic Conservation Planning, SCP)^[12]是当前生物多样性保护领域的主流方法之一^[13],被广泛应用于全国^[14]、区域^[15]、省域^[16]和县域^[17]等多个尺度的保护区规划实践中。该方法引用选址优化算法,从保护成本和保护目标两方面出发,在解决生物多样性保护与资源利用冲突的前提下构建生态保护网络体系,优化生态保护格局并最大化实现生物多样性保护目标^[18-19]。目前已有学者基于该方法构建海河流域^[20]、松花江流域^[21]和黄河流域^[22]等区域的湿地生态保护网络体系,但相关研究多从当前时空出发,未能预测未来湿地保护区格局变化,并不能为湿地生态保护网络体系提供与时俱进的规划依据。

北京市湿地为市域范围内 50%的植物和 76%的野生动物提供了生存环境^[23],但《北京市湿地保护发展规划(2021—2035 年)》^[24]指出水资源短缺、水环境脆弱是北京市必须长期面对的基本水情和市情,并在此背景下提出多措并举增加湿地面积、加大推进北京湿地保护修复工作。因此本文以北京市湿地为研究对象,运用系统保护规划的方法,结合土地利用模拟模型和物种分布模型,模拟预测城市化和气候变化背景下北京市湿地优先保护格局与保护空缺,并构建湿地分级保护区格局,以期为北京市湿地保护区的选址规划、湿地生态保护网络体系的构建、湿地生物多样性保护以及湿地保护资源配置提供科学依据和改进建议。

1 研究地区概况

北京市(39°26'N—41°04'N, 115°25'E—117°30'E)地处华北平原西北隅,地势西北高东南低,占地面积 16410.54km²,属暖温带半湿润大陆性季风气候,降水量时空分布不均。截至 2020 年,北京市湿地总面积约 586.85km²,占全市总面积的 3.6%^[24],包括河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地 4 个类别,总体上存在人均面积小、斑块面积小、破碎化程度高等问题。2020 年北京市现有市级湿地保护区 47 个,包括野鸭湖湿地公园、密云水库、拒马河市级水生野生动物自然保护区等,总面积约 422.43km²,布局较为分散。

2 研究方法

基于系统保护规划原理,耦合土地利用模拟模型和物种分布模型,模拟并预测与当前发展最为接近的

SSP245 中等发展情景下^[25]北京市 2020 年、2035 年和 2050 年湿地优先保护区、识别湿地保护空缺并构建湿地分级保护区格局,具体分为以下几步:(1)确定以北京市为研究区的规划范围;(2)使用 PLUS 模型模拟预测湿地保护政策和气候变化背景下北京市未来湿地分布格局;(3)收集区域内生物多样性数据和环境变量数据,使用 MaxEnt 模型预测物种空间分布格局;(4)确定规划单元、构建物种分布数据集和保护成本数据集,使用 Marxan 模型预测湿地优先保护区并识别湿地保护空缺;(5)将现存湿地保护区与模拟得到的湿地优先保护区进行叠加分析,构建湿地分级保护区格局,并提出湿地生态保护网络体系优化建议。

2.1 数据来源

本研究所用数据来源如下:30m 空间分辨率 DEM 数据来自地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>), 30m 空间分辨率 Landsat 5 TM 地表反射率数据集(LANDSAT/LT05/C01/T1_SR)和 Landsat 8 OLI 地表反射率数据集(LANDSAT/LC08/C01/T1_SR)来自谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE),全国湿地空间分布数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),鸟类分布数据来自中国观鸟记录中心(<http://www.birdreport.cn/>),土壤类型、自然保护区、GDP 和人口空间分布数据来自中国科学院地理科学与资源研究所数据中心(<https://www.resdc.cn/>),大坝数据来自 China-LDRL 数据集^[26],公路、铁路、城镇和农村居民点等社会经济数据来自 OpenStreetMap(<https://www.openstreetmap.org/>),历史 30s 生物气候变量数据和未来不同时间段 30s BCC-CSM2-MR SSP245 生物气候变量数据来自 WorldClim(<https://worldclim.org/>),坡度和坡向数据根据 DEM 数据提取而得,北京市湿地保护区空间分布数据参照北京市园林绿化局官网湿地名录绘制而成。

2.2 未来土地利用预测

湿地格局变化影响湿地物种的空间分布,因此首先基于 Landsat 数据使用 ENVI 软件解译出北京市 2010 年、2015 年和 2020 年土地利用数据,参照《湿地公约》的湿地分类标准和相关文件^[24],解译出九种土地利用类型,包括河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地、人工湿地、建设用地、林地、草地、耕地、未利用地,并对解译结果进行精度检验,总精度为 0.7930±0.0199。

然后使用 PLUS v1.3.5 模型模拟预测北京市 2035 年和 2050 年土地利用,PLUS 模型是一种面向栅格数据的土地利用变化模拟模型,它耦合了多目标优化算法,集成了 LEAS 模块和 CARS 模块,能根据具体的开发和约束情景模拟未来土地利用^[27-29]。利用 PLUS 模型模拟未来土地利用所需驱动因素包括自然驱动因素(坡度、高程、平均降水、至河流水系距离、坡向、土壤类型、温度)和社会驱动因素(GDP、人口密度、至高速公路距离、至铁路距离),并主要分为以下四步:(1)使用马尔科夫模型预测 2035 年和 2050 年土地类型斑块大小;(2)使用 LEAS 模块进行土地扩张分析;(3)以 2010 年和 2015 年土地利用数据为基础,使用 CARS 模块预测 2020 年土地利用数据,并对模拟结果进行精度检验;(4)依据北京市湿地保护规划政策^[20]并结合相关研究^[30-32],限制现有湿地向其他土地类型转化,使用 CARS 模块模拟湿地生态保护情景下北京市 2035 年和 2050 年土地利用,设置转移矩阵并根据用地类型扩张面积占比确定领域权重(表 1)。

表 1 转移矩阵和领域权重

Table 1 Transition matrix and neighborhood weights

土地利用类型 Land use type	河流湿地	湖泊湿地	沼泽湿地	人工湿地	建设用地	林地	草地	耕地	未利用地
河流湿地 Riverine wetland	1	1	1	1	0	0	0	0	0
湖泊湿地 Lake wetland	1	1	1	1	0	0	0	0	0
沼泽湿地 Marsh wetland	1	1	1	1	0	0	0	0	0
人工湿地 Constructed wetland	1	1	1	1	0	0	0	0	0
建设用地 Construction land	0	0	0	0	1	0	0	0	0
林地 Forest land	0	0	0	0	0	1	0	0	0
草地 Grassland	1	1	1	1	0	1	1	0	0
耕地 Cultivated land	0	0	0	0	0	0	0	1	0
未利用地 Bare land	1	1	1	1	1	1	1	1	1
领域权重 Neighborhood weights	0.0078	0.0183	0.0005	0.0107	0.5122	0.2692	0.0241	0.1570	0.0002

2.3 物种分布预测

水鸟是湿地生态系统的重要指示物种,其种群动态和分布数量易于观测和统计^[33],同时由于缺乏其他湿地物种分布数据,本研究从中国鸟类观测中心筛选 2015 年 01 月 01 日到 2020 年 12 月 31 日北京市湿地水鸟分布记录,并选定 21 种国家级保护水鸟作为保护对象(表 2),使用 MaxEnt 模型对北京市 2020 年、2035 年和 2050 年水鸟空间分布进行建模。观测到的水鸟主要分布于潮河、白河、奶水河、怀九河、怀沙河、温榆河、永定河和大石河等流域,这些流域附近分布着密云水库、野鸭湖湿地公园、怀沙怀九河市级水生野生动物自然保护区、永定河滞洪水库和大宁水库等湿地保护区。MaxEnt 模型可基于现有物种分布数据和不同时空环境变量参数构建模型,模拟物种过去、当前和将来潜在分布范围^[34—36]。为避免环境变量间相关性对模拟结果的干扰,首先使用 ENMtools 对所有环境变量进行相关性分析,当系数大于 0.9 时,利用 MaxEnt 软件中的刀切法剔除其中贡献率较小者^[37—39],最终筛选出土地利用(LULC)、坡度、坡向、年均温度(Annual Mean Temperature, Bio1)、昼夜温差月均值(Mean Diurnal Range, Bio2)、等温性(Isothermality, Bio3)、温度季节变化标准差(Temperature Seasonality, Bio4)、年均温度变化范围(Temperature Annual Range, Bio7)、最暖季度平均温度(Mean Temperature of Warmest Quarter, Bio10)、最湿月份降水量(Precipitation of Wettest Month, Bio13)、最干月份降水量(Precipitation of Driest Month, Bio14)、降水量季节变异系数(Precipitation Seasonality, Bio15)、最湿季度降水量(Precipitation of Wettest Quarter, Bio16)、最干季度降水量(Precipitation of Driest Quarter, Bio17)等 14 个环境变量。构建模型前基于 R 语言对 MaxEnt 参数进行优化^[40—42],经参数优化调整,确定特征组合(Feature combination, FC)为阈值函数(Threshold Feature)、RM(Regularization Multiplier)为 1.1 时满足最优参数选择标准。

表 2 湿地生物保护对象

Table 2 Wetland biological protection objects

序号 Serial number	物种 SpeciesChinese name	国家保护级别 Conservation status in China	IUCN 级别* IUCN status
1	青头潜鸭 <i>Aythya baeri</i>	I 级	CR
2	东方白鹳 <i>Ciconia boyciana</i>	I 级	EN
3	黑鹳 <i>Ciconia nigra</i>	I 级	LC
4	白枕鹤 <i>Grus vipio</i>	I 级	VU
5	遗鸥 <i>Ichthyophaga relictus</i>	I 级	VU
6	卷羽鹈鹕 <i>Pelecanus crispus</i>	I 级	NT
7	鸳鸯 <i>Aix galericulata</i>	II 级	LC
8	花脸鸭 <i>Sibirionetta formosa</i>	II 级	LC
9	白额雁 <i>Anser albifrons</i>	II 级	LC
10	鸿雁 <i>Anser cygnoides</i>	II 级	VU
11	小天鹅 <i>Cygnus columbianus</i>	II 级	LC
12	大天鹅 <i>Cygnus cygnus</i>	II 级	LC
13	疣鼻天鹅 <i>Cygnus olor</i>	II 级	LC
14	灰鹤 <i>Grus grus</i>	II 级	LC
15	鸕嘴鹬 <i>Ibidorhyncha struthersii</i>	II 级	LC
16	阔嘴鹬 <i>Calidris falcinellus</i>	II 级	LC
17	半蹼鹬 <i>Limnodromus semipalmatus</i>	II 级	NT
18	斑头秋沙鸭 <i>Mergellus albellus</i>	II 级	LC
19	白琵鹭 <i>Platalea leucorodia</i>	II 级	LC
20	角鸬鹚 <i>Podiceps auritus</i>	II 级	VU
21	黑颈鸬鹚 <i>Podiceps nigricollis</i>	II 级	LC

IUCN: 世界自然保护联盟 International Union for Conservation of Nature; CR: 极危 Critically Endangered; EN: 濒危 Endangered; VU: 易危 Vulnerable; NT: 近危 Near Threatened; LC: 无危 Least Concern

使用 MaxEnt 建模,对每个物种做 10 次自举法检验 (Bootstrap) 并取平均值。利用受试者工作特征曲线 (Receiver Operating Characteristic, ROC) 中的 AUC 值评估模型预测的准确性;0.5—0.6 为预测不合格,0.50—0.70 为预测结果较差,0.70—0.90 为预测结果较好,0.90—1.00 为预测结果非常好^[43]。然后取 10 次最大训练敏感性加特异性阈值 (Maximum training sensitivity plus specificity) 的平均值,将物种分布预测结果转化为 0 (物种不存在) 或 1 (物种存在) 的二值分布^[44—46]。

2.4 优化湿地生态保护网络体系

2.4.1 确定规划单元

本研究考虑湿地生态系统的连接性,以集水区作为保护规划单元。依据北京市 DEM 数据及基本水系空间分布数据,使用 ArcHydro 工具提取 1487 个集水区作为规划单元^[47—48],规划单元平均面积为 10.82km²。

2.4.2 构建物种分布数据集

基于 MaxEnt 模型对北京市 2020 年、2035 年、2050 年水鸟空间分布的预测结果,使用 ArcGIS 10.6 的 Zonal Statistics as Table 工具统计每个规划单元中每个目标物种栖息地的分布面积^[49]。参照 CBD (Convention on Biological Diversity) 对国际生物多样性保护目标设置的 20% 基准线,并根据鸟类濒危程度、分布范围和所需生境大小确定物种保护目标^[15,20,50];国家 I 级保护水鸟保护目标为 50%,国家 II 级保护水鸟保护目标为 30%。并基于以上数据构建物种分布数据集。

2.4.3 构建保护成本数据集

以北京市公路、铁路、城镇、农村居民点、水坝和保护区作为集水区保护成本的间接因子,并将各因子进行 0—1 标准化处理,然后乘以权重系数 (表 3),构建每个集水区的保护成本数据集^[22,33,51],其计算公式为:

$$C = \sum_{j=1}^n \left(\frac{V_i - V_{i\min}}{V_{i\max} - V_{i\min}} W_i \right) \tag{1}$$

$$C' = C(1 - 0.5R) \tag{2}$$

式中, V_i 、 $V_{i\min}$ 和 $V_{i\max}$ 分别为每个集水区内因子 i 的度量值、最小值和最大值, W_i 为因子 i 的权重, j 为每个集水区内因子的个数, C 为集水区调整前的保护代价值, C' 为集水区调整后的保护代价值; R 为集水区内保护区面积占集水区总面积的比例。

表 3 各影响因子的度量和权重

Table 3 The measurement and weights of the impact factors

因子 Factors	度量 (每个集水区) Measurement (Each watershed)	权重系数 Weight coefficient
公路 Road	公路长度/河流长度	1
铁路 Rail	铁路长度/河流长度	1
城镇 Town	城镇面积/集水区面积	5
农村居民点 Rural	农村居民点个数/集水区面积	5
大坝 Dam	大坝个数/集水区面积	20

2.4.4 模拟预测湿地优先保护区

基于以上规划单元、物种分布、物种保护目标和保护成本等数据,使用 Marxan 4.0.6 软件模拟北京市湿地优化保护区,Marxan 模型基于互补性原则和模拟退火算法的原理通过迭代运算筛选出最优的规划单元,以满足保护目标^[52]。一般认为连接度高、聚集度高的保护区格局更利于维持生物多样性和开展湿地保护工作,但过于集中的保护区会增加土地资源利用成本^[20],为了平衡保护代价和保护区聚集度,基于 Marxan 边缘长度调节模块 (Boundary Length Modifier, BLM),采用敏感性分析得到合理的 BLM 值,模拟北京市 2020 年、2035 年、2050 年湿地优先保护区。将模拟结果与现有湿地保护区进行对比分析,识别湿地保护空缺,并将现存湿地保护区与模拟的湿地优先保护区进行叠加分析,构建湿地分级保护区格局。

3 结果与分析

3.1 土地利用模拟结果

对模型进行精度检验, kappa 系数为 0.8941, 总精度为 0.9319, 预测精度较高。对预测结果进行数据统计(表 4)和图示化显示(图 1), 2020 年、2035 年和 2050 年湿地总面积分别为 586.85km²、586.90km²、586.90km², 表明在湿地生态保护情景下, 北京市湿地总面积基本保持不变, 只在类型之间有转换, 其中河流湿地和人工湿地面积均呈现缓慢增长趋势, 湖泊湿地面积持续小幅度减少, 而沼泽湿地面积保持不变。

表 4 2020 年、2035 年、2050 年北京市湿地面积

Table 4 Area of Beijing's wetlands in 2020, 2035 and 2050

年份 Year	湿地总面积/km ² Total wetland area	河流湿地/km ² Riverine wetlands	湖泊湿地/km ² Lake wetlands	沼泽湿地/km ² Marsh wetlands	人工湿地/km ² Constructed wetlands
2020	586.85	50.19	107.74	1.81	427.12
2035	586.90	50.21	106.05	1.81	428.83
2050	586.90	50.25	105.77	1.81	429.06

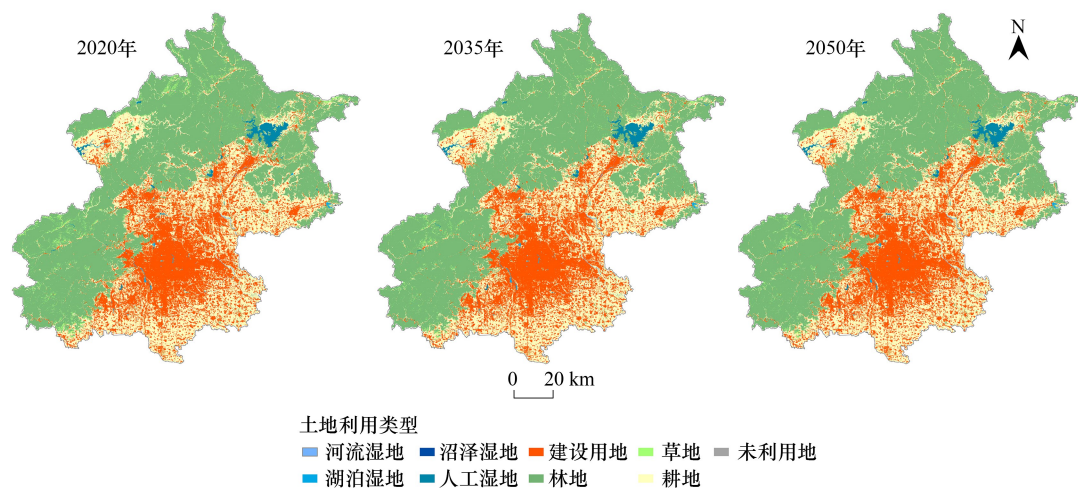


图 1 2020 年、2035 年、2050 年北京市土地利用

Fig.1 LULC of Beijing in 2020, 2035 and 2050

3.2 物种分布预测结果

本研究共预测了 21 种水鸟在规划范围内的空间分布, 2020 年、2035 年和 2050 年鸟类空间分布 AUC 值分别为 0.8645 ± 0.0815 、 0.8575 ± 0.0945 、 0.8395 ± 0.0875 , 预测结果较好, 均纳入系统保护规划。依据模拟结果, 统计环境变量置换重要性 (Permutation importance) 并进行归一化处理。置换重要性通过计算去除一个环境变量使模型准确性降低的程度, 来衡量该变量在模拟过程中的重要性^[53-54]。在 63 次模拟中, 土地利用 (LULC)、最暖季度平均温度 (Bio10)、降水量季节变异系数 (Bio15)、坡度、坡向等环境变量的贡献率排名前五, 归一化处理后其值分别是 1、0.237、0.141、0.136、0.115, 表明以上环境变量对湿地鸟类空间分布影响较大。

3.3 湿地优先保护区模拟结果

使用 Marxan 模型对北京市 2020 年、2035 年和 2050 年湿地优先保护区格局进行模拟, BLM 值分别为 0.00000691628180、0.00000660015124、0.00000839524016 时达到保护格局聚集度和保护代价的平衡。模拟结果显示(表 5 和图 2): 2020 年模型最优解选择了 516 个规划单元作为湿地保护区的选址范围, 占规划单元总数的 34.7%, 主要位于北京市东北部白河、潮河、清水河、错河和沟河一带, 西北部妫水河和红土河一带, 中

部白羊城沟、京密引水渠、温榆河和坝河一带,南部北拒马河、挟括河和永定河一带。现存湿地保护区面积约 422.43km²(占湿地总面积的 71.98%),存在 80.15km²的保护空缺,其中河流湿地、湖泊湿地和人工湿地分别存在 6.84km²、18.19km²和 55.12km²的保护空缺。优化后湿地保护区总面积约 502.58km²,湿地保护率提升至 85.64%。

表 5 北京市现有湿地保护区、湿地保护区空缺和优先后湿地保护区面积

Table 5 Area of Beijing's existing protected wetlands, vacant protected wetlands and priority protected wetlands

年份 Year	湿地类型 Type of wetland	现存湿地 保护区面积 Area of existing protected wetlands/km ²	现存湿地 保护区占比 Proportion of exiting protected wetlands/%	湿地保护区 空缺面积 Area of vacant protected wetlands/km ²	优化后湿地 保护区面积 Area of priority protected wetlands/km ²	优化后湿地 保护区占比 Proportion of priority protected wetlands/%
2020	河流湿地	9.64	19.20	6.84	16.48	32.84
	湖泊湿地	54.01	50.13	18.19	72.20	67.02
	沼泽湿地	1.77	98.27	0	1.77	98.27
	人工湿地	357.00	83.58	55.12	412.12	96.49
	小计	422.43	71.98	80.15	502.58	85.64
2035	河流湿地	9.64	19.19	10.34	19.98	39.79
	湖泊湿地	52.49	49.49	23.57	76.06	71.72
	沼泽湿地	1.77	98.27	0.03	1.80	99.87
	人工湿地	358.57	83.62	57.36	415.93	96.99
	小计	422.47	71.98	91.30	513.77	87.54
2050	河流湿地	9.64	19.18	8.32	17.95	35.72
	湖泊湿地	52.32	49.46	15.19	67.51	63.83
	沼泽湿地	1.77	98.27	0	1.77	98.27
	人工湿地	358.74	83.61	58.45	417.19	97.23
	小计	422.47	71.98	81.96	504.43	85.95

2035 年模型最优解选择了 512 个规划单元作为湿地保护区的选址范围,占规划单元总数的 34.4%,主要分布于北京市中部和北部奶水河、白羊城沟、京密引水渠、潮白河、错河和沟河一带。现存湿地保护区面积约 422.47km²(占湿地总面积的 71.98%),存在 91.30km²的保护空缺,其中河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地分别存在 10.34km²、23.57km²、0.03km²和 57.36km²的保护空缺。优化后湿地保护区总面积约 513.77km²,湿地保护率提升至 87.54%,满足北京市湿地保护规划 2035 年湿地保护率 80%的要求。

2050 年模型最优解选择了 379 个规划单元作为湿地保护区的选址范围,占规划单元总数的 25.5%,主要分布于北京市东北部白河、潮河,红门川河和清水河一带,西北部奶水河、白河北干渠和红土河一带,中部白羊城沟、温榆河和坝河一带,南部北拒马河、挟括河、大石河和永定河一带。现存湿地保护区面积约 422.47km²(占湿地总面积的 71.98%),存在 81.96km²的保护空缺,其中河流湿地、湖泊湿地、和人工湿地分别存在 8.32km²、15.19km²和 58.45km²的保护空缺。优化后湿地保护区总面积约 504.43km²,湿地保护率提升至 85.95%。

2020 年、2035 年和 2050 年优化后湿地保护区面积呈现先增后减趋势,整体增加 1.85km²。河流湿地、湖泊湿地和沼泽湿地优化后保护区面积呈现先增后减趋势,其中河流湿地保护区整体增加 1.47km²、湖泊湿地保护区减少 4.69km²、沼泽湿地保护区面积保持不变。人工湿地优化后保护区面积总体呈现缓慢增长趋势,至 2050 年面积达 417.19km²。

综合考虑湿地保护区的时空变化,将现存湿地保护区、2020 年、2035 年和 2050 年湿地优先保护区模拟结果进行叠加分析,构建湿地分级保护区格局(图 3)并对湿地保护区面积进行统计(表 6):湿地永久保护区(现有湿地保护区和三次模拟中均被选中的规划单元)、湿地一级临时保护区(三次模拟中被选中两次的规划单

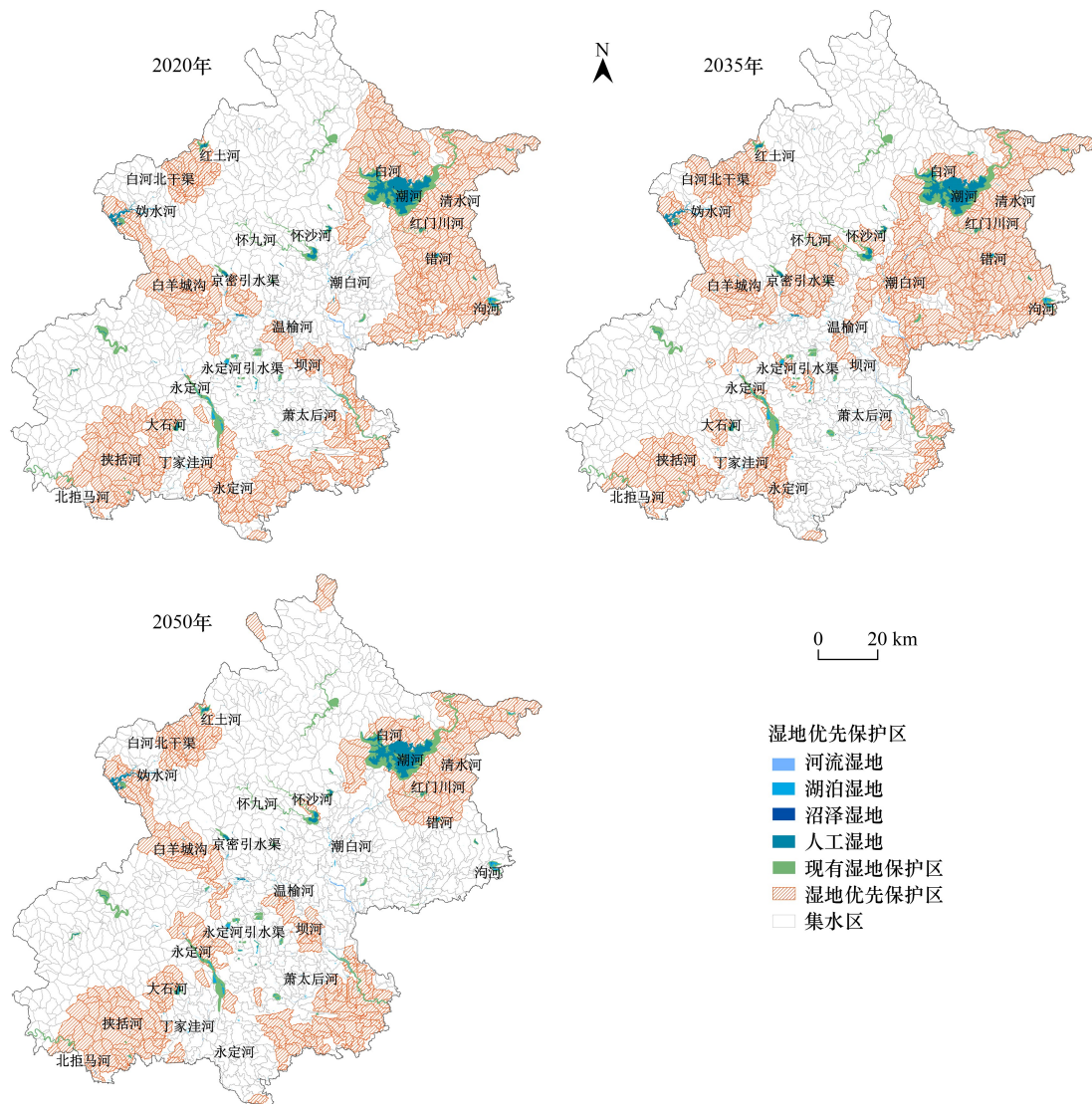


图 2 2020 年、2035 年、2050 年湿地优先保护区

Fig.2 The priority protected wetlands in 2020, 2035 and 2050

元)、湿地二级临时保护区(三次模拟中被选中一次的规划单元)。截至 2050 年,湿地永久保护区面积 488.61km²,占湿地总面积的 83.25%,河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地永久保护区面积分别为 11.73km²、61.91km²、1.77km²和 413.20km²,主要分布于白河、潮河、怀沙河、永定河、清水河、红门川河、红土河、妫水河、白羊城沟、温榆河、挟括河和大石河一带;湿地临时保护区占湿地总面积的 7.15%,湿地一级临时保护区面积 13.02km²,河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地一级临时保护区面积分别为 4.51km²、7.58km²、0km²和 0.94km²,主要分布于沟河、京密引水渠和永定河一带;湿地二级临时保护区面积 28.95km²,河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿地和人工湿地二级临时保护区面积分别为 10.20km²、12.77km²、0.03km²和 5.95km²,主要分布于怀九河、潮白河和永定河引水渠一带。

4 讨论

4.1 湿地优先保护格局研究

近几十年来,系统保护规划方法被广泛应用于湿地优先保护格局的构建^[20-22],但因缺乏物种空间分布等

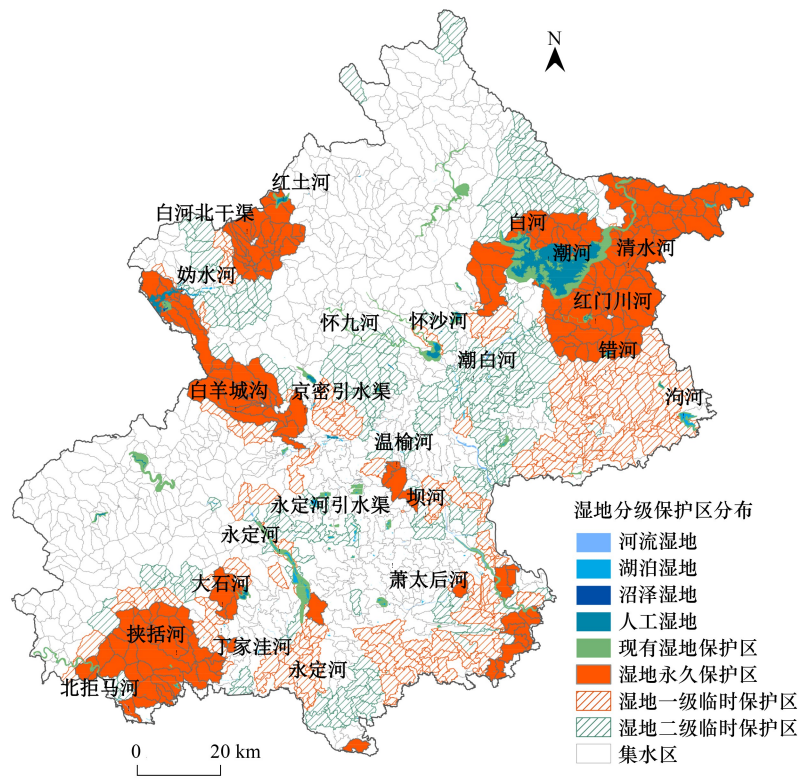


图 3 湿地分级保护区格局图

Fig.3 The pattern map of graded protected wetlands

相关数据,现有研究多聚焦于当前时空生态保护网络体系的构建,并未充分发挥系统保护规划为决策者提供规划指引的最大优势。同时气候变化和城市发展均会影响湿地的空间分布和生态功能,基于当前环境背景构建的湿地生态保护网络体系,未必能在未来满足湿地生物多样性保护的需求,不加区分地对规划保护区进行投资也会导致资源的浪费。

表 6 湿地分级保护区面积

Table 6 Area of graded protected wetlands

湿地类型 Wetland type	湿地永久 保护区面积 Area of permanent protected wetlands/ km ²	湿地永久 保护区占比 Proportion of permanent protected wetlands/%	湿地一级临时 保护区面积 Area of first-level temporary protected wetlands/km ²	湿地二级临时 保护区面积 Area of second-level temporary protected wetlands/km ²	湿地临时 保护区占比 Proportion of temporary protected wetlands/%
河流湿地 Riverine wetland	11.73	23.35	4.51	10.20	29.29
湖泊湿地 Lake wetland	61.91	58.53	7.58	12.77	19.24
沼泽湿地 Marsh wetland	1.77	98.27	0	0.03	1.60
人工湿地 Constructed wetland	413.20	96.30	0.94	5.95	1.60
总计 Total	488.61	83.25	13.02	28.95	7.15

模拟优先保护区并构建生态网络保护体系是系统保护规划的关键环节^[10],量化物种空间分布、计算保护规划成本、设置保护目标和评估规划结果可靠性是该环节的重要步骤^[19]。为增强湿地生物多样性保护时效性和湿地优先保护格局构建的实用性,本研究基于系统保护规划方法,耦合 PLUS、MaxEnt 和 Marxan 模型,从

时空变化角度对北京市湿地优先保护区进行模拟预测,为北京市构建科学合理的湿地生态保护网络体系提供方法指引,以应对气候变化和城市发展对北京市湿地生物多样性的影响。

为解决因缺乏物种空间分布而无法模拟未来湿地优先保护格局的问题,本研究引入 MaxEnt 模型模拟预测当前和未来物种空间分布并构建系统保护规划所需的物种分布数据集,同时为提高预测结果的准确性,对模型参数进行优化并基于相关性分析筛选环境变量。为提高 Marxan 软件预测模拟保护区结果的合理性,本研究根据鸟类濒危程度设定不同的保护目标以满足不同鸟类对栖息地大小的需求,并采用敏感性分析设置合理的 BLM 值以达到保护区聚集度和保护代价的平衡。最后基于现有湿地保护区和模拟规划结果划分湿地保护等级并构建湿地分级保护区格局,为湿地保护区资源合理分配提供依据。

4.2 北京市湿地生态保护网络体系优化建议

Marxan 可以根据研究者设定的条件选出多个保护区规划的最优解,为决策者提供灵活的规划方案^[53],因此要根据具体的规划目标设定相应的规划情景。本研究以湿地水鸟保护为主要规划目标并根据北京市湿地保护规划政策,模拟预测生态保护情景下湿地优先保护区格局,现基于模拟预测结果对北京市湿地生态保护网络体系的优化提出以下几点建议:

(1) 推动湿地恢复,增加湿地资源总量。

北京市存在湿地资源总量不足的问题,根据 PLUS 模型模拟预测的结果,在现有湿地保护政策下,截至 2050 年湿地总量仅增加 0.05km²,因此应调整现有湿地保护政策,加快小微湿地恢复,增加湿地资源总量。

(2) 以湿地生物多样性保护为目标,不盲目追求湿地保护区面积的扩大。

湿地在调节区域水资源平衡、调节气候环境、提供食物药物资源、提供生物栖息地等方面具有重要的价值和作用^[55],但一味地追求湿地保护区面积的扩大,势必会破坏城市发展和生物多样性保护的平衡,引入系统保护规划可以有效解决这一矛盾。北京市 2020 年现存湿地保护区占比 71.98%,现有湿地保护规划提出到 2035 年实现 80%的湿地保护目标,但其仅从湿地保护率提升的角度对湿地总体布局进行规划,并未落位具体的湿地保护区。本研究以湿地水鸟作为生物多样性保护的目标,模拟预测湿地保护区空间分布,优化后 2020 年、2035 年和 2050 年湿地保护区占比分别为 85.64%、87.54%和 85.95%,均能实现政府现有规划文件中湿地总体保护率的目标,并填补了湿地保护区空间落位这一空白。现有规划文件并未对湿地生物多样性提出具体的保护目标,仅仅强调湿地保护区面积的增加,未来在进行湿地保护规划时,决策者可根据具体的生物多样性保护目标模拟预测湿地保护区格局,制定更实用的湿地保护政策。

(3) 建立湿地保护区分级体系,合理分配资源。

气候变化和城市发展等因素改变湿地保护区的空间分布,现有湿地保护区在未来保护优先性可能会升高或降低,本研究考虑时空变化因素,将湿地保护区划分为湿地永久保护区、湿地一级临时保护区和湿地二级临时保护区三个等级,建议在建立保护区时,根据保护区优先等级进行不同程度的资源配置以实现资源的最优化配比,如加大永久湿地保护区的投资力度,提升保护区的保护管理水平。

(4) 根据流域水文特色和保护区优先性采取差异性保护措施。

不同流域水文特色存在差异,建议在规划方案实施前,对保护区进行调研并据此提出切实可行的保护措施:北京市东北部潮河、白河和清水河一带湿地分布较为集中、湿地斑块面积较大,现存密云水库、怀柔琉璃庙湿地公园、密云穆家峪红门川湿地公园等湿地保护区,可依托现有湿地保护区,以密云水库及周边湿地为中心,调整湿地保护区边界,适当扩大部分湿地保护区面积,建立保护等级最高的湿地永久保护区,提升湿地保护管理水平。北京市西北部以山地环境为主,现存白河堡水库和野鸭湖湿地公园等湿地保护区,可在关键河段如奶水河、白河北干渠和白羊城沟建立湿地永久保护区,填补该流域的湿地保护空缺。北京市西南部现存拒马河市级水生野生动物自然保护区、房山长沟泉水国家湿地公园和崇青水库等湿地保护区,可在挟括河、北拒马河关键河段依托现有绿地空间建立新的湿地永久保护区,提高湿地生物多样性保护水平。北京市中部和东南部现有湿地保护区分布较为分散,湿地斑块面积较小,此处多为湿地临时保护区,可在京密引水渠、温榆

河和坝河附近增建临时湿地保护区,并沿流域建立湿地廊道,串连现有湿地斑块,提高湿地保护区连接性,同时可结合湿地自然教育和湿地休闲体验服务,赋予湿地临时保护区多样的活动主题,在提高湿地生物多样性保护的同时,充分发挥湿地生态系统服务价值。

4.3 研究不足和展望

本研究在使用 PLUS 模型进行土地利用模拟时,仅从自然环境和社会经济学角度选择了驱动因素,在未来研究中可以从多模型耦合和量化宏观政策入手^[56],提升模型精度并增强模拟结果的适用性。

由于数据不足,本研究在使用 Marxan 模型进行湿地优先保护区模拟时,只将湿地鸟类作为生物多样性保护的对象,在之后的研究中可以增加两栖类、鱼类、植被等湿地物种数据以提高模拟精度,也可引入调节服务、文化服务和供给服务等生态系统服务作为保护对象^[15],系统模拟湿地优先保护格局。同时本研究以城市公路等作为保护代价的间接因子,但这些因子在未来的模拟中很难量化,因此在后续研究中可以使用环境干扰指数代表保护代价^[57-58]。另外,流域生态系统是一个整体,在未来的研究中,可将湿地保护区上下游之间、河道之间和地表水与地下水之间考虑到系统保护规划中来,构建纵向-横向-垂向的 3D 连接性湿地优先网络体系^[59],从而提高湿地间的连接性并增强跨流域湿地生态系统维持区域生物多样性的能力。

参考文献 (References):

- [1] 李永涛,杜振宇,王霞,杨庆山,陈占强,孙燕燕,刘德玺. 黄河三角洲自然保护区湿地生态服务功能价值评估. 海洋环境科学, 2019, 38(5): 761-768.
- [2] 肖涛,石强胜,闻熠,宋胜帮,王志强,曾明. 湿地生态系统服务研究进展. 生态学杂志, 2022, 41(6): 1205-1212.
- [3] Mitsch W J, Bernal B, Nahlik A M, Mander Ü, Zhang L, Anderson C J, Jørgensen S E, Brix H. Wetlands, carbon, and climate change. Landscape Ecology, 2013, 28(4): 583-597.
- [4] 孟焕,王琳,张仲胜,薛振山,吕宪国,邹元春. 气候变化对中国内陆湿地空间分布和主要生态功能的影响研究. 湿地科学, 2016, 14(5): 710-716.
- [5] Creed I F, Lane C R, Serran J N, Alexander L C, Basu N B, Calhoun A J K, Christensen J R, Cohen M J, Craft C, D'Amico E, DeKeyser E, Fowler L, Golden H E, Jawitz J W, Kalla P, Kirkman L K, Lang M, Leibowitz S G, Lewis D B, Marton J, McLaughlin D L, Raanan-Kiperwas H, Rains M C, Rains K C, Smith L Enhancing protection for vulnerable waters. Nature Geoscience, 2017, 10(11): 809-815.
- [6] 彭书时,席毅. 湿地面积时空变化特征及其生态效应. 中国科学基金, 2022, 36(3): 383-390.
- [7] 赵雪,黄庆旭,何春阳. 城市扩展过程对湿地影响的情景模拟研究——以河北怀来为例. 自然资源学报, 2017, 32(9): 1469-1481.
- [8] 汪婷,周立志. 合肥市小微湿地鸟类多样性的时空格局及其影响因素. 生物多样性, 2022, 30(7): 146-158.
- [9] 张倚浩,阎建忠,程先. 气候变化与人类活动对青藏高原湿地的影响研究进展. 生态学报, 2023, 43(6): 2180-2193.
- [10] Groves C R, Jensen D B, Valutis L L, Redford K H, Shaffer M L, Scott J M, Baumgartner J V, Higgins J V, Beck M W, Anderson M G. Planning for biodiversity conservation: putting conservation science into practice. BioScience, 2002, 52(6): 499.
- [11] McCune J L, Van Natto A, MacDougall A S. The efficacy of protected areas and private land for plant conservation in a fragmented landscape. Landscape Ecology, 2017, 32(4): 871-882.
- [12] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. Nature, 2000, 405: 243-253.
- [13] 张晓琳,金晓斌,吴心怡,梁鑫源,韩博,孙瑞,周寅康. 基于系统保护理念的弹性生态保护空间划定——以广东省茂名市为例. 生态学报, 2021, 41(18): 7393-7405.
- [14] 梁晨. 中国湿地保护的有效性评估及系统保护规划研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2012.
- [15] 封志雪,周键,杨飞龄,武瑞东. 集成生态系统服务与生物多样性的系统保护规划. 生态学报, 2023, 43(2): 522-533.
- [16] 张路,欧阳志云,肖懿,徐卫华,郑华,江波. 海南岛生物多样性保护优先区评价与系统保护规划. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2105-2112.
- [17] 牟雪洁,饶胜,张箫,王夏晖,朱振肖. 县域生物多样性保护优先格局评价及保护体系优化:以武夷山市为例. 生态与农村环境学报, 2021, 37(6): 769-777.
- [18] 李晓文,吕江涛,智烈慧,梁芳源,裴元生,李迎霞,孟耀斌,廖丹琦,穆泳林. 基于“目标-成本-效益”协同优化的山水林田湖草沙一体化生态保护与修复格局. 生态学报, 2023, 43(9): 3625-3635.
- [19] 张路,欧阳志云,徐卫华. 系统保护规划的理论、方法及关键问题. 生态学报, 2015, 35(4): 1284-1295.
- [20] 穆泳林,梁晨,李晓文,白军红,崔保山,智烈慧,梁芳源,李鹏,程维金,肖之炎. 基于系统保护规划的海河流域湿地保护优先格局与保护空缺识别. 生态学报, 2021, 41(10): 3836-3845.
- [21] 梁芳源,梁晨,李晓文,白军红,穆泳林,谢旭. 基于系统保护规划的松花江流域湿地优先保护格局模拟研究. 湿地科学, 2022, 20(1): 56-64.
- [22] 郭云,梁晨,李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局. 应用生态学报, 2018, 29(9): 3024-3032.
- [23] 北京市园林绿化局. 北京 湿地生物多样性丰富之都. 森林与人类, 2022(S1): 52-55.
- [24] 北京市园林绿化局. 关于印发《北京市湿地保护发展规划(2021-2035 年)》的通知. (2021-08-03) [2023-09-09]. http://yllhj.beijing.gov.cn/zwgk/gsgg/202108/t20210827_2478896.shtml.

- [25] Yang X L, Zhou B T, Xu Y, Han Z Y. CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(5): 817-830.
- [26] Wang X, Xiao X, Qin Y, Dong J, Wu J, Li B. China-LDRL: China's surface water bodies, Large Dams, Reservoirs, and Lakes dataset [Internet]. figshare; 2021 [2023-09-09]. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.16964656.v3>.
- [27] 张鹏, 李良涛, 苏玉姣, 王清涛, 韩红英, 韩宏伟, 李晓婧. 基于 PLUS 和 InVEST 模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 338-348.
- [28] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于 PLUS 模型和 InVEST 模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(1): 41-51.
- [29] 袁贞贞, 王秋红, 王勇, 李维杰, 高洁, 程先, 朱大运. 多情景模拟下重庆市土地利用变化对生态系统健康的影响. *生态学报*, 2023, 43(20): 8279-8291.
- [30] 张考, 黄春华, 王志远, 伍瑾意, 曾志强, 穆佳佳, 杨文搢. 基于 DTTD-MCR-PLUS 模型的三生空间格局优化——以长沙市为例. *生态学报*, 2022, 42(24): 9957-9970.
- [31] 雒舒琪, 胡晓萌, 孙媛, 闫彩, 张鑫. 耦合 PLUS-InVEST 模型的多情景土地利用变化及其对碳储量影响. *中国生态农业学报: 中英文*, 2023, 31(2): 300-314.
- [32] 赵霖雨, 崔柳, 王佳, 陈思. 基于土地利用模拟预测模型分析的城市绿色空间发展多情景模拟及建设时序研究——以湛江市中心城区为例. *生态学报*, 2023, 43(15): 6307-6320.
- [33] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于水鸟保护的长江流域湿地优先保护格局模拟. *生态学报*, 2018, 38(6): 1984-1993.
- [34] 李芮芝, 胡希军, 韦宝婧, 陈存友, 金晓玲. 气候变化下中国八种梧桐属树种潜在适生区模拟. *生态学报*, 2023, 43(14): 5937-5955.
- [35] 赵增辉, 余水生, 龚笑飞, 陈智强, 王远飞, 赵家乐, 韦力, 樊晓丽, 林植华. 气候变化对黄腹角雉潜在栖息地的影响. *生态学报*, 2023, 43(8): 3157-3167.
- [36] 徐文力, 李庆康, 杨潇, 王景升. 气候变化情景下西藏入侵植物印加孔雀草的潜在分布预测. *生态学报*, 2022, 42(17): 7266-7277.
- [37] 周玉婷, 葛雪贞, 邹娅, 郭思维, 王涛, 陶静, 宗世祥. 基于 Maxent 模型的长林小蠹的全球及中国适生区预测. *北京林业大学学报*, 2022, 44(11): 90-99.
- [38] 杜倩, 魏晨辉, 梁陈涛, 于景华, 王慧梅, 王文杰. 中国东北地区 12 个建群树种对气候变化响应的 MaxEnt 模型分析. *生态学报*, 2022, 42(23): 9712-9725.
- [39] 陈思如, 张任翔, 张学治, 赵文慧, 戎郁萍, 邓波, 王莉, 刘起棠, 刘雷震. 基于 MaxEnt 优化模型的罗布麻类植物潜在分布研究. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2023, 59(3): 377-387.
- [40] 郭云霞, 王亚锋, 付志玺, 马蓓. 基于优化 MaxEnt 模型的疣果匙荠在中国的适生区预测与分析. *植物保护*, 2022, 48(2): 40-47.
- [41] 孔维尧, 李欣海, 邹红菲. 最大熵模型在物种分布预测中的优化. *应用生态学报*, 2019, 30(6): 2116-2128.
- [42] Cobos M E, Peterson A T, Barve N, Osorio-Olvera L. Kuenm: an R package for detailed development of ecological niche models using Maxent. *PeerJ*, 2019, 7: e6281.
- [43] Swets J A. Measuring the accuracy of diagnostic systems. *Science*, 1988, 240(4857): 1285-1293.
- [44] Liu C R, White M, Newell G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data. *Journal of Biogeography*, 2013, 40(4): 778-789.
- [45] Yesson C, Bedford F, Rogers A D, Taylor M L. The global distribution of deep-water Antipatharia habitat. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2017, 145: 79-86.
- [46] Perzanowski K, Bleyhl B, Olech W, Kuemmerle T. Connectivity or isolation? Identifying reintroduction sites for multiple conservation objectives for wisents in Poland. *Animal Conservation*, 2019, 23: 212-21.
- [47] 谢旭, 梁晨, 李晓文, 白军红, 穆泳林, 梁芳源. 辽河流域湿地优先保护格局构建与保护空缺识别. *湿地科学*, 2021, 19(4): 451-457.
- [48] 梁晨, 穆泳林, 智烈慧, 梁芳源, 李晓文, 白军红, 李鹏. 珠江流域湿地保护优先格局构建与保护空缺识别. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 57(1): 142-150.
- [49] 谢文冬, 贾嘉, 卜长利, 马黎明, 郭建刚, 宋凯, 李欣海, 孙悦华, 方昀. 燕山地区国家重点保护鸟类生境评估与国家级自然保护区保护空缺分析. *动物学杂志*, 2022, 57(2): 170-184.
- [50] 李潇, 刘昭阳, 王晓莉, 吴玥, 左国成, 陶以军. 基于系统保护规划理论的广西海域优先保护格局分析. *海洋通报*, 2021, 40(2): 189-197.
- [51] 梁晨, 李晓文, 崔保山, 马田田. 中国滨海湿地优先保护格局构建. *湿地科学*, 2015, 13(6): 660-666.
- [52] Watts M E, Ball I R, Stewart R S, Klein C J, Wilson K, Steinback C, Lourival R, Kircher L, Possingham H P. Marxan with Zones: software for optimal conservation based land- and sea-use zoning. *Environmental Modelling & Software*, 2009, 24(12): 1513-1521.
- [53] 孙赫英, 隋晓云, 何德奎, 李雪晴, 陈毅峰. 金沙江流域鱼类的系统保护规划研究. *水生生物学报*, 2019, 43(S1): 110-118.
- [54] 秦淑洁, 钱天陆, 吴朝宁, 李云昊, 王结臣. 基于地理探测器和最大熵模型的人类出行活动强度空间格局模拟: 以云南省域为例. *地理科学*, 2023, 43(8): 1360-1370.
- [55] 刘惠良, 刘红峰. 洞庭湖湿地生物多样性保护的价值评估. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(10): 140-147.
- [56] 吕晶, 金日, 王镜植, 张鹏, 朱卫红. 基于 PLUS 的耕地驱动因素分析与未来预测——以图们江流域为例. *水土保持通报*, 2023, 43(3): 203-212, 224.
- [57] 黄心一, 李帆, 陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划. *中国科学: 生命科学*, 2015, 45(12): 1244-1257.
- [58] 智烈慧, 周方文, 李晓文, 马田田, 邵冬冬, 白军红, 崔保山, 郭卫华. 基于生态系统服务优化的滨海湿地一体化保护——修复格局构建. *自然资源学报*, 2023, 38(12): 3150-3165.
- [59] 曲艺, 李佳珊, 王继丰, 崔福星, 孙工棋, 梁晓峰, 倪红伟. 基于系统保护规划的三江平原湿地保护网络体系优化. *生态学报*, 2015, 35(19): 6394-6404.