

DOI: 10.20103/j.stxb.202302220310

李怡啸, 欧小杨, 李昊冉, 程哲, 李晓溪, 郑曦. 基于全域连通性识别气候变化风险下的生物多样性保护优先区——以京津冀为例. 生态学报, 2024, 44(3): 1152-1163.

Li Y X, Ou X Y, Li H R, Cheng Z, Li X X, Zheng X. Identifying biodiversity priority conservation areas under climate change risks based on omnidirectional connectivity in Beijing-Tianjin-Hebei region. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(3): 1152-1163.

基于全域连通性识别气候变化风险下的生物多样性保护优先区

——以京津冀为例

李怡啸, 欧小杨, 李昊冉, 程 哲, 李晓溪, 郑 曦 *

北京林业大学园林学院, 北京 100083

摘要: 在保护优先区规划中, 有必要考虑气候变化的潜在风险并关注物种在气候驱动下的扩散格局。基于未来生物气候数据、地形多样性数据以及土地利用数据, 应用 Omniscape 算法, 对 21 世纪中叶 (2040—2061 年) 气候变化情景下京津冀地区陆生哺乳动物的扩散进行全域连通性建模并与当前情景对比分析, 识别出生物多样性保护优先区。结果表明: 区域尺度下, 气候变化风险使得高连通性的区域逐渐从平原向山区转移, 分布趋于集中; 斑块尺度下, 林缘连通性较高, 而位于林地或草地边缘的耕地连通性低。在此基础上, 共识别生物多样性保护优先区共 51786 km², 其中涵养区 (占 56.4%) 在当前和未来的连通状况均较为良好; 优化区 (占 38.4%) 应提升生境质量以满足未来连通性的更高需求; 而修复区 (占 5.22%) 面临的气候变化风险较高, 亟需进行生态修复以免在未来出现连通性夹点。本研究通过评估京津冀地区两种情景下的全域连通格局, 为生物多样性保护的气候适应性规划提供了科学依据。

关键词: 保护优先区; 生物多样性; 气候变化; 连通性; 京津冀地区

Identifying biodiversity priority conservation areas under climate change risks based on omnidirectional connectivity in Beijing-Tianjin-Hebei region

LI Yixiao, OU Xiaoyang, LI Haoran, CHENG Zhe, LI Xiaoxi, ZHENG Xi *

School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: In the context of planning priority conservation areas, it is essential to consider the potential risks posed by climate change in order to pay close attention to the dispersal patterns of species under the influence of climate-driven conditions. This research concerns by focusing on the Beijing-Tianjin-Hebei region, a critical area for terrestrial mammals and biodiversity conservation. Employing the innovative Omniscape algorithm, which utilizes future bioclimatic data, topographic diversity data, and land use data, the study models landscape-level connectivity for terrestrial mammals during the mid-century period (2040—2061) under four kinds of climate change scenarios. This approach provides vital insights into how species distributions and connectivity patterns might evolve in response to changing climates. At the regional scale, one of the key findings is the gradual shift of high connectivity areas from plains to mountains due to climate change risks. This shift indicates a need for targeted conservation efforts in these emerging connectivity hotspots. The distribution of these areas is also expected to become more concentrated, emphasizing the importance of focusing conservation resources effectively. At the patch scale, the study uncovers significant differences in landscape connectivity. Forest edges show high

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFD11004021)

收稿日期: 2023-02-22; 采用日期: 2023-12-10

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

connectivity, serving as vital corridors for species movement. Conversely, the connectivity of agricultural lands, particularly those adjacent to forests or grasslands, is notably lower. This disparity highlights the need for careful land-use management around critical habitats to maintain ecological corridors. A total of 51786 km² of priority conservation areas are identified, categorized into protection, optimization, and restoration zones. The protection zone (56.4%) exhibits good connectivity currently and is expected to continue to do so in the future, indicating the effectiveness of existing conservation measures. The optimization zone (38.4%) requires habitat quality improvements to meet future connectivity demands, pointing to the necessity for proactive measures to enhance habitat resilience. The restoration zone (5.22%) faces high climate change risks, necessitating urgent ecological restoration to prevent future connectivity pinch points. Such points could severely impede species movement and survival, underscoring the importance of timely intervention in these areas. By evaluating omnidirectional connectivity under two scenarios in the Beijing-Tianjin-Hebei region, this study provides a scientific basis for climate-adaptive planning in biodiversity conservation. It offers a framework for understanding potential shifts in ecological networks due to climate change and highlights the need for dynamic conservation strategies. These insights are crucial for informing policy decisions and guiding conservation efforts, ensuring the long-term preservation of biodiversity in this significant region.

Key Words: priority conservation areas; biodiversity; climate change; connectivity; Beijing-Tianjin-Hebei region

在全球栖息地丧失的背景下^[1-2],保护优先区(Priority Conservation Areas, PCA)是保持生物多样性的关键战略^[3],可以有效保持区域物种丰富度。然而,未来气候变化作为潜在风险之一,给保护优先区的有效性带来了威胁。这是由于尽管存在小范围的“避难所”或耐受气候变化的物种^[4],许多种群仍需通过迁徙来追踪与先前气候相似的栖息地^[5]。当物种为了适应气候变化而迁出自然保护区时,现有的保护体系可能会失效^[6],且随着未来气候变化加剧,这种影响也会随之放大^[7]。因此,在保护优先区规划中,有必要考虑气候变化的潜在风险并关注物种在气候驱动下的扩散格局。

现有诸多研究基于不同方法进行特定风险下的优先区识别,其中人类活动干扰和气候变化是最为常见的两种潜在风险。对于前者而言,多数研究利用指标体系、生态模型或生态制图来识别保护优先区。如宋成文等基于植被生态系统和人类干扰强度因子提出了横断山区的保护优先区^[8];Vu 等基于压力-状态-响应环境模型和层次分析法确定了越南地区的保护优先区^[9];Pérez-García 等通过风险预测模型和物种敏感性识别了和基础设施相关的动物保护区^[10];还有研究基于 GIS 的决策支持系统和线性模型绘制火灾生态脆弱性图,从而对现有保护区进行优化^[11]。近年来,气候变化风险逐渐引起人们的关注。与此相关的保护优先区识别中,连通性(Connectivity)建模是应用最广的评估方法^[12]。现有诸多途径对气候变化下景观的连通性进行评价^[13-16],其中全域 Circuitscape 算法(The Omnidirectional Circuitscape algorithm, Omniscape)因其能够计算研究区内任意两点之间的连通性^[17],已被广泛应用于在气候变化背景下识别生物多样性保护优先区^[18]的研究。如 Drasher 等对福蒙特州交通结构影响下的气候连通性评估^[19],Gray 等在气候变化风险下评估地形多样景观的连通性^[20]。

京津冀地区作为我国经济最具活力的地区之一,也面临着生态环境压力增大的问题^[21]。预估到本世纪中叶的年平均气温将相较于当前升高 1.60—1.75℃,在西北山区部分地方升温幅度超过 2℃^[22]。目前,已有研究基于科学考察报告对京津冀地区的当前生物多样性保护优先区进行识别^[23],但考虑气候变化对保护优先区分布影响的研究仍鲜见报道。因此,本研究采用 Omniscape 算法分别基于当前情景和气候变化风险情景进行全域连通性建模,并通过对比分析识别生物多样性保护优先区,以期气候适应性规划提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀地区包括北京市、天津市以及河北省(北纬 36°03′—42°40′,东经 113°27′—119°50′),总面积约

217200 km²。东部和南部属华北平原,北部和西北部地势较高,大部分地区为暖温带大陆性季风气候区,土地利用类型以耕地、林地、草地和建设用地为主。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据及预处理

本研究所使用的遥感数据有 300 m 分辨率 2017 年人类对土地改造程度估计数据(范围为 0—1)^[24]、270 m 分辨率全球 SRTM 地形多样性数据^[25];所使用的 30 m 分辨率 2020 年中国土地利用遥感监测数据、高程数据(DEM)和归一化植被指数(NDVI)来自中国科学院地理科学与资源研究所([https://www.resdc.cn/doi/doi.aspx? DOIid=54](https://www.resdc.cn/doi/doi.aspx?DOIid=54));夜间灯光数据(NPP-VIIRS)来自美国国家海洋与大气管理局(<https://ncc.nesdis.noaa.gov/VIIRS/>)。此外,坡度数据为高程数据在 ArcGIS 中的 3D Analyst 工具箱处理获得,植被覆盖度(FVC)是由 NDVI 进行计算后获得。

1.2.2 生物气候数据

本研究所用的 1970—2000 年生物气候因子数据(2020 年 1 月发布的版本)和 2040—2061 年生物气候因子预测插值均来自 WorldClim 数据库(<https://www.worldclim.org/>)。该数据集是基于 CMIP6 项目的降尺度预测数据,提供了四个共享社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)对应的排放情景:分别是 SSP126(低排放)、SSP245(中等排放)、SSP370(高排放)和 SSP585(极高排放)^[26]。本研究以 19 个生物气候变量来表征气候变化^[27],包括年度趋势、季节性指标和极端环境指标(表 1)。

表 1 生物气候变量代码、单位和来源^[28]

Table 1 Bioclimatic variable codes, units and sources

代码 Code	名称 Name	单位 Unit	来源 Derived from	代码 Code	名称 Name	单位 Unit	来源 Derived from
Bio1	年平均气温	℃	Tg	Bio11	最冷季平均气温	℃	Tg
Bio2	平均昼夜变化	℃	Tx, Tn	Bio12	年降水量	mm	P
Bio3	等温性	%	Tx, Tn	Bio13	最湿月降水量	mm	P
Bio4	温度季节性	℃	Tg	Bio14	最干月降水量	mm	P
Bio5	最暖月最高气温	℃	Tx	Bio15	降水季节性	%	P
Bio6	最冷月最低气温	℃	Tn	Bio16	最湿季降水	mm	P
Bio7	温度年差	℃	Tx, Tn	Bio17	最干季降水量	mm	P
Bio8	最湿季平均气温	℃	Tg, P	Bio18	最暖季降水量	mm	Tg, P
Bio9	最干季平均气温	℃	Tg, P	Bio19	最冷季降水量	mm	Tg, P
Bio10	最暖季平均气温	℃	Tg				

Tg:每日平均温度 Daily mean temperature;Tx:每日最高温度 Daily maximum temperature;Tn:每日最低温度 Daily minimum temperature;P:每日降水量 Daily precipitation amount

2 研究方法

2.1 全域连通性

本研究采用的全域连通性识别借助 Omniscape.jl 实现,它是基于 Julia 语言开发的程序包^[17]。该方法能够以像素为单位对连通性进行“无核心”建模^[29],即无需输入特定的栖息地斑块,这样既保留了景观的破碎性特征,又避免了结果对人为指定的斑块的敏感性^[11]。其运行原理为:输入源地和阻力栅格,通过移动窗口进行迭代计算^[30](图 1)。然后叠加每个窗口产生的电流,输出累积电流、流动电位(整个景观的阻力设置为 1 时的累积电流)和归一化电流(累积电流除以电势)。其中归一化电流可以表征局部连通性,以识别夹点和廊道^[31]。

窗口半径的选择与物种扩散能力有关,本文参考相关研究选取 40 km 作为窗口半径,该半径可以满足大多数陆生哺乳动物在长时间内扩散运动的距离^[32—33]。为避免边缘效应产生的伪影,所有输入数据的范围都

被缓冲至京津冀边界以外的 50 km 处。

2.2 当前时期全域连通性评估

2.2.1 当前时期的源地评估

以自然度(N)来衡量生态源地的强度(式1)。以人类改造程度的估计值(H)来衡量人类影响强度,该值的范围在 0 到 1 之间。

$$N = 1 - H \tag{1}$$

2.2.2 当前时期的阻力面构建

研究表明,土地利用、地形、植被和人类影响是决定物种在景观中扩散阻力的关键因子^[33—36]。因此,本文选取以上指标构建了基本阻力面(表2)。

为了进一步提高阻力面的精确度和可信度,采用 VIIRS-NPP 夜间灯光数据对阻力值进行修正,计算方法如式 2。

$$R_i = \frac{NL_i}{NL_a} \times R \tag{2}$$

式中, R_i 为修正后的基本阻力值, NL_m 为栅格 i 的夜间灯光指数, NL_a 为栅格 i 对应的用地类型 a 的平均夜间灯光指数, R 为基于土地利用类型赋值的基本阻力面。

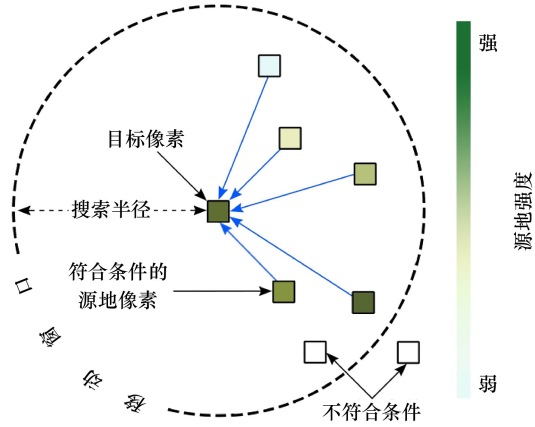


图1 Omniscience 算法运行原理,修改自文献^[17]
Fig.1 Omniscience algorithm mechanism

表2 基本阻力面各因子及权重
Table 2 The factors and weights of the basic resistance surface

阻力因子 Resistance factor	类别 Category	阻力值 Resistance value	权重 Weight	阻力因子 Resistance factor	类别 Category	阻力值 Resistance value	权重 Weight
土地利用 Land use map	林地	1	0.26	植被覆盖度 FVC	0—0.2	50	0.25
	草地	5		Fraction vegetation coverage	0.2—0.4	30	
	耕地	30			0.4—0.6	20	
	水域	100			0.6—0.8	5	
	建设用地	100			0.8—1	1	
	未利用地	60		坡度	0—3	5	0.16
数字高程模型 DEM Digital elevation model/m	<300	5	0.17	Slope/(°)	3—8	10	
	300—750	10			8—15	20	
	750—1000	20			15—25	30	
	1000—1500	30		距主要道路的距离	<50	100	0.16
	>1500	40		Distance to main road/m	50—200	60	
					200—500	40	
					500—1000	20	
					>1000	1	

2.3 气候变化风险下的全域连通性评估

2.3.1 气候变化风险下的源地评估

研究表明,可以通过气候类似地(即未来与当今气候条件相似的区域)来评估生态源地强度^[37]。具体而言,以气候相似度作为未来生态源地强度的评估标准(式3)。某地气候相似度就越大,气候变化速度越小,越有可能在未来保留更多物种资源^[33]。

$A = 1 - V \tag{3}$ 式中, A 为气候相似度, V 为归一化的气候变化速度。

气候变化速度基于 R 语言计算^[38]。由于 19 个生物气候变量之间存在较大的相关性,先使用 raster 包对其降维,再用 VoCC 包中的 ClimPCA 函数进行主成分分析。

由表 3 可见,对于四种 SSP 情景而言,前两个主成分(PC1 和 PC2)均能够解释 85% 以上的总方差量(表 3),故用其来代表不同时期的生物气候特征。

表 3 主成分分析结果(前 4 个主成分)

Table 3 Principal component analysis results D(the first 4 principal components)

主成分 Principal component	SSP126		SSP245		SSP370		SSP585	
	标准差	累计方差 贡献率	标准差	累计方差 贡献率	标准差	累计方差 贡献率	标准差	累计方差 贡献率
PC1	3.2673	0.5619	3.291	0.57	3.2853	0.5681	3.3326	0.5846
PC2	2.4412	0.8755	2.4209	0.8785	2.4465	0.8831	2.3998	0.8877
PC3	1.2132	0.953	1.159	0.9492	1.104	0.995	1.0889	0.95
PC4	0.90349	0.9832	0.80349	0.98316	0.828	0.9833	0.8037	0.984

在此选择使气候变化速度不为空值的最小阈值:对 PC1 取 5.0,对 PC2 取 10.0。计算全局气候变化速度时,将原始数据缓冲至边界以外 700 km 以避免边缘效应。结果显示,平原和滨海地区气候变化迅速;除 SSP585 外,西北部山地和高原的未来气候较为稳定(图 2)。

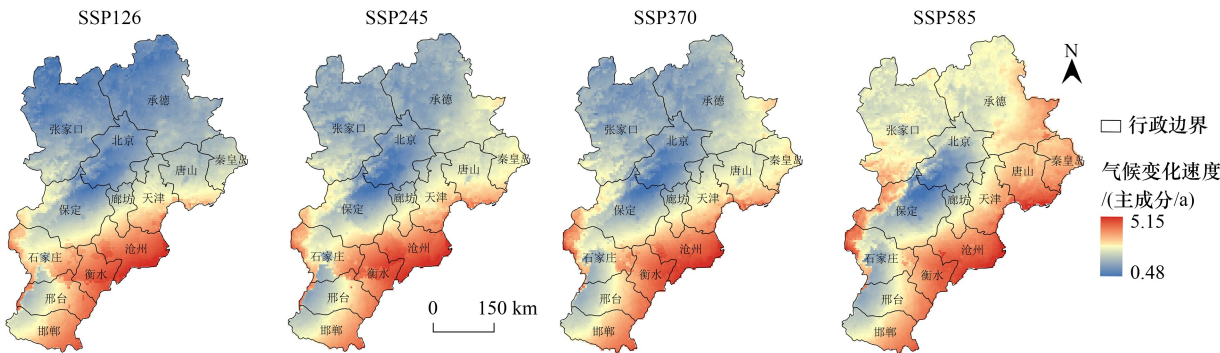


图 2 不同 SSP 情景下的气候变化速度

Fig.2 Velocity of climate change of different SSP scenarios

SSP126,共享社会经济路径 1—2.6 Shared socioeconomic pathway 1—2.6;SSP245,共享社会经济路径 2—4.5 Shared socioeconomic pathway 2—4.5;SSP370,共享社会经济路径 3—7.0 Shared socioeconomic pathway 3—7.0;SSP585,共享社会经济路径 5—8.5 Shared socioeconomic pathway 5—8.5

VoCC 包有气候梯度的速度(gVoCC)和基于距离的速度(dVoCC)两种算法^[39—40],本研究选取后者,通过在搜索半径内识别各目标单元与焦点单元气候类似性,然后根据二者的距离和时间跨度计算气候变化速度(式 4)。如果在所选时间跨度内某个目标单元的气候变化量(式 5)小于阈值,那么该目标单元就是焦点单元的气候类似单元(式 6)。

$$dVoCC = \frac{d}{(t' - t)} \tag{4}$$

$$\Delta C_{k,i,j}^{t,t'} = |C_{k,j}^{t'} - C_{k,j}^t| \tag{5}$$

$$\Delta C_{k,i,j}^{t,t'} \leq C_{k,th} \text{ for all } k \tag{6}$$

式中,dVoCC 为气候变化速度,d 为从每个焦点单元到搜索半径范围内未来气候类似单元的距离,t 为当前时期的时间,t'为所选未来时期的时间,i 为每个焦点单元,j 为每个目标单元,k 为每个气候变量,ΔC_{k,i,j}^{t,t'} 为该时间跨度内该目标单元的气候变化量,C_{k,th} 为对每个气候变量所选取的阈值。

2.3.2 气候变化风险下的阻力面构建

对于气候变化情景,既要考虑土地利用基本阻力,又要考虑地形引起的局部气候变化。地形位置指数(TPI)可用于表示地形多样性。多样的地形意味着更多的微型气候避难所^[41],相对地,地形单一度能反映地形带来的阻力强度(式7)。运用 ArcGIS 中的 Spatial Analyst 工具箱,将地形单一度 R_d 与归一化的修正后基本阻力值 R_i 进行模糊叠加(求和)运算,再结果缩放至最大值为 250,得出基于未来气候变化的阻力面。

$$R_d = 1 - D$$

(7)

式中, R_d 为地形单一度, D 为归一化的地形位置指数。

2.4 气候廊道与生物多样性保护优先区识别

气候廊道(Climatic corridor)是在气候变化风险下确定保护优先区的关键因子^[42]。它不仅是连接当前和未来气候类型之间的最佳路径^[43],也是支持气候驱动扩散的重要区域^[33,44]。

为了将原始的连通性结果用于保护区的识别,对于当前土地利用的归一化电流,依据分位值将其分为四个连通等级(表4)。类似地,由于四种 SSP 情景的归一化电流结果相似,取其平均值并分级(表4)。由于面积较小的生态孤岛功能性较弱^[45],将归一化电流密度高($q>1.06$)且空间形态较为完整的区域识别为气候廊道。

表 4 归一化电流分类
Table 4 Normalized current classification

连通性分类 Connectivity classification	基于当前土地利用 Based on current land use	基于未来气候变化 Based on future climate change	生态学意义 Ecological meaning
高连通性 High connectivity	$q>1.13$	$q>1.04$	非常适宜物种移动的区域
中连通性 Medium connectivity	$1.13\geq q>1.03$	$1.04\geq q>1.01$	比较适宜物种移动的区域
低连通性 Low connectivity	$1.03\geq q>0.82$	$1.01\geq q>0.93$	物种移动受限的区域
受阻区域 Blocked	$q\leq 0.82$	$q\leq 0.93$	物种移动非常有限的区域

q :归一化电流密度 Normalized current

将基于当前土地利用的归一化电流分类结果与气候廊道进行叠加,进行生物多样性保护优先区分类。廊道内高连通性区域识别为涵养区,中连通性区域识别为优化区,低连通性区域识别为修复区。最后,将保护优先区红线根据现状用地进行调整,使其尽可能在少地与耕地重叠。

3 结果与分析

3.1 全域连通性评估结果

3.1.1 当前时期的全域连通性

就累积电流而言,当前时期区域尺度下连通格局差异明显,连通性总体呈西北山地较高,东部平原及城镇较低的趋势,极高值主要位于张家口和承德的交界地带以及张家口南部;斑块尺度下,草地、耕地的背景上的指状林地斑块或者大型林地斑块的边缘地带往往连通性极高(>170),而大面积林地斑块内部的连通性与前者相比略低;连通性极低(<20)的斑块往往与建设用地重合(图3),说明人类活动对景观连通性的影响很大。

就归一化电流而言,高连通性区域主要分布于承德大部分地区以及北京、张家口和保定的交界处,用地性质多为林地;中连通性区域成片分布于华北平原内的耕地,零散分布于张家口和承德地区的草地以及北京西山、军都山片区的林地;低连通性区域主要分布于东部滨海耕地和太行山脉东侧草地;连通受阻区集中分布于各市中心城区和东部沿海地区,以及沿主要道路分布(图4)。

3.1.2 气候变化风险下的全域连通性

就累积电流而言,气候变化风险下本世纪中叶四种 SSP 情景的连通格局差异明显,大体呈现西北高、东南低的趋势,其中以北京浅山区连通性为最高;斑块尺度下,华北平原上大片集中耕地的连通性与气候变化速

度呈负相关,其它规律与不考虑气候变化的情况大致相同(图 5)。

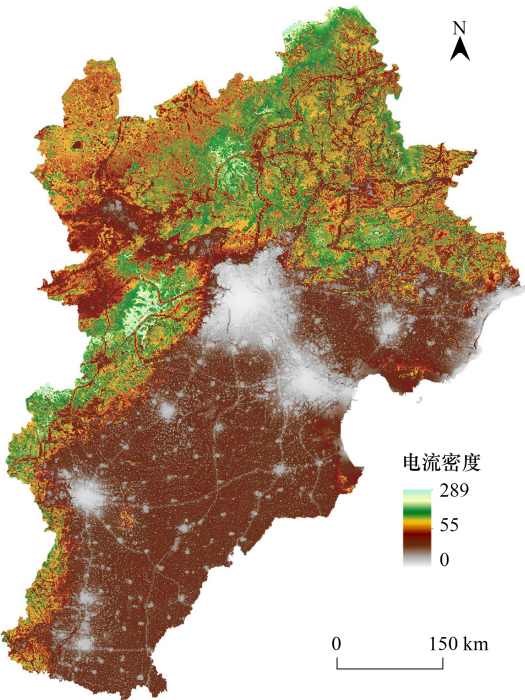


图 3 当前时期的累积电流

Fig.3 Cumulative current based on current land use

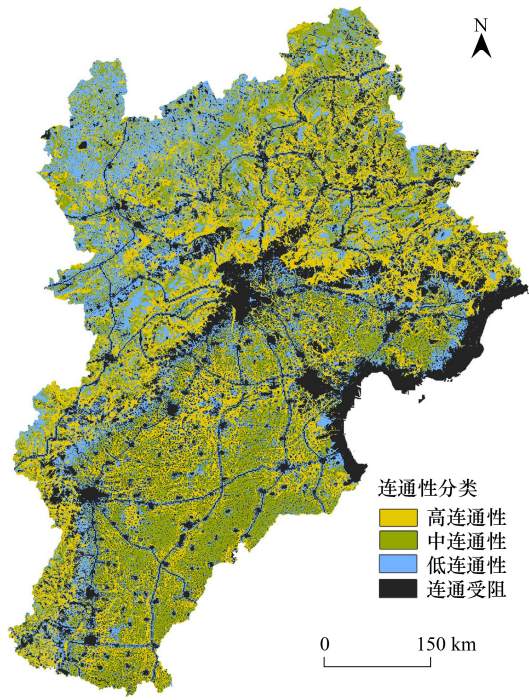


图 4 当前时期的归一化电流分类

Fig.4 Normalized current classification based on current land use

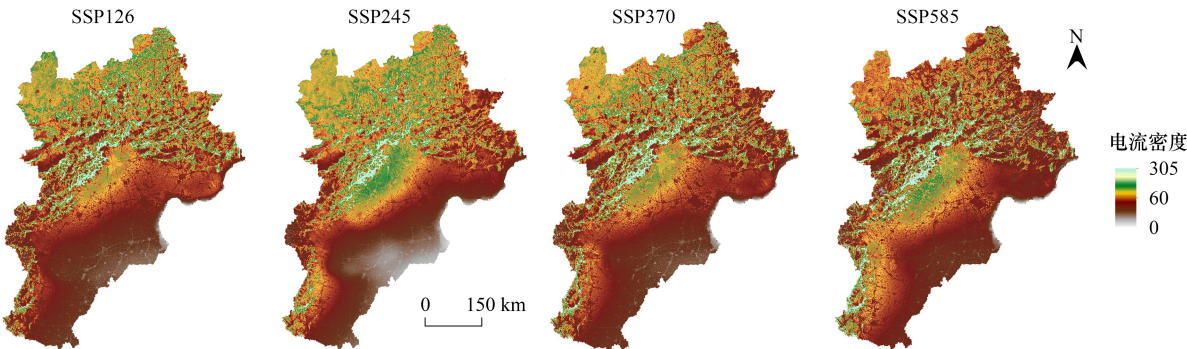


图 5 不同 SSP 情景下的累积电流

Fig.5 Cumulative currents of different SSP scenarios

SSP126,共享社会经济路径 1—2.6 Shared socioeconomic pathway 1—2.6;SSP245,共享社会经济路径 2—4.5 Shared socioeconomic pathway 2—4.5;SSP370,共享社会经济路径 3—7.0 Shared socioeconomic pathway 3—7.0;SSP585,共享社会经济路径 5—8.5 Shared socioeconomic pathway 5—8.5

不同 SSP 情景之间,平均电流密度没有显著差异($P=0.757>0.05$)。但在 SSP245 情景下电流密度空间分布最不平衡,呈现北京周边远高于沧州及衡水的特点。随着排放量的增加,电流密度的最高值逐渐减小(图 6)。

高连通性区域主要位于燕山与太行山山脉的林地,多呈东北—西南方向带状分布,少量沿滨海地区分布;中连通性区域主要位于华北平原大面积耕地内;低连通区分布于内蒙古高原耕地、太行山东麓草地以及北京中心城区;连通受阻区于山地交错分布,在平原地区分布于城镇建设用地(图 7)。

3.2 气候廊道与生物多样性保护优先区

气候廊道主要分布于山区到平原的过渡地带,总面积约 52231 km²,分布密度大致遵循海拔梯度,平原区最少,山地及高原最多,可见物种在未来气候变化压力下的扩散路径多分布于海拔较高、地形复杂的地区。其中丘陵及山地高原地区的气候廊道呈现沿山脊走向的趋势;而平原地区的气候廊道倾向于沿主要河流分布(图 8)。气候廊道内部,交错镶嵌分布特点明显,尤其在张家口和承德境内。气候廊道范围内,当前高连通区主要分布于太行山脉和燕山山脉的丘陵地带,表明该区域在当前和未来都具有促进物种扩散的良好潜力;而位于张家口、承德等冀北山区的气候廊道与当前中、低连通区重叠度较高,表明当前的连通性格局不能很好地满足未来物种的扩散需求(图 8)。

共识别 51786 km² 的生物多样性保护优先区,占京津冀总面积约 23.8%(图 9)。其中,涵养区 34 个,占保护区总面积 56.4%,在当前和未来都具有较高的保护价值;优化区 32 个,占保护区总面积 38.4%,多集中于京津冀西北部,应进行生境质量提升;修复区 11 个,占保护区总面积 5.22%,多位于城郊,处于自然保护区和生态保护红线之外的空缺地带,未来可尝试以自然保护区的形式纳入保护体系^[46]。

保护优先区占市域面积的比例最大的 4 个城市分别为北京市(37.9%)、承德市(33.1%)、和秦皇岛市(28.7%)、张家口市(24.7%),以上地区在气候变化适应性规划与生物多样性保护中占据重要地位(图 10)。其中承德市的优化区和修复区面积占比最大(19.6%),表明当前连通性与气候变化情景下的未来需求存在较大落差,需要进一步提升;而秦皇岛市的涵养区占比最大(26.6%),表明当前的连通性格局能较好地适应物种未来的扩散需求,对涉及到的重点区域限制开发并加强保护。

4 讨论

本研究提出的保护优先区识别方法对气候适应性规划具有重要意义:首先,当前情景和气候风险情景下的连通性对比分析有利于制定稳健的规划分区^[33];其次,所识别出的气候廊道有助于在区域生物多样性保护规划中提高资金的利用效率^[44]。

在方法层面,本文使用的 Omniscape 与常见方法相比具有一定优势。与最小累积阻力模型相比,本方法基于的电荷随机游走的特性更加真实地模拟了景观中的物种移动模式。与 Circuitscape 4.0 通常采用的成对模式相比^[47-49],本研究采用的方法避免了源地斑块选取的数量限制以及结果对所选斑块的敏感性,从而能够

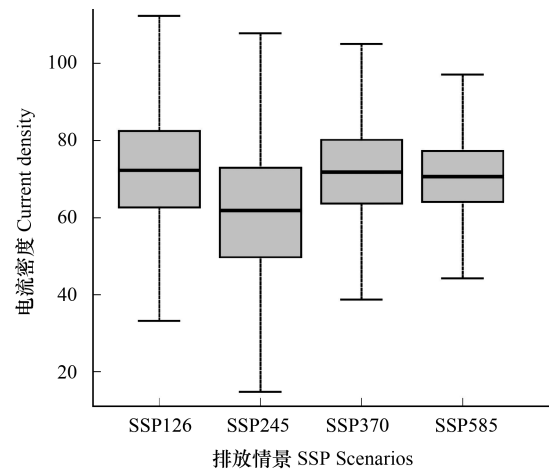


图 6 不同 SSP 情景的累积电流密度统计

Fig.6 Cumulative current density statistics for different SSP scenarios

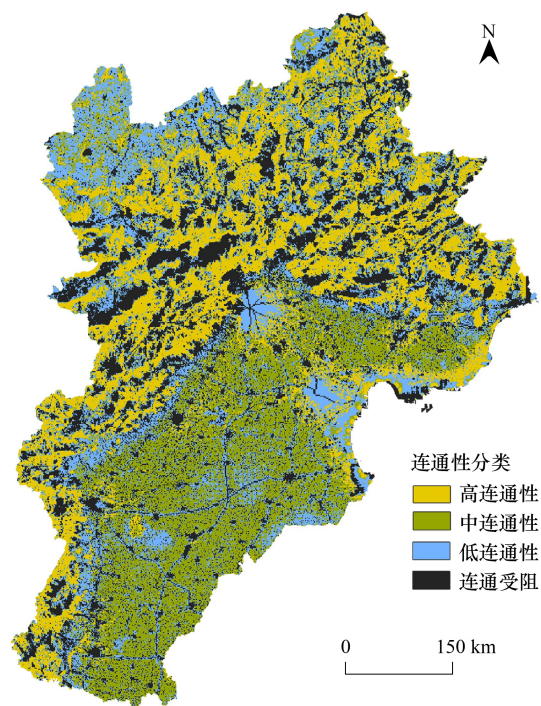


图 7 气候变化风险下的平均归一化电流分类

Fig.7 Classification of mean normalized currents under the risk of climate change

在更精细的像素尺度下评估连通性^[50],更好地体现了景观的镶嵌异质性^[51]。

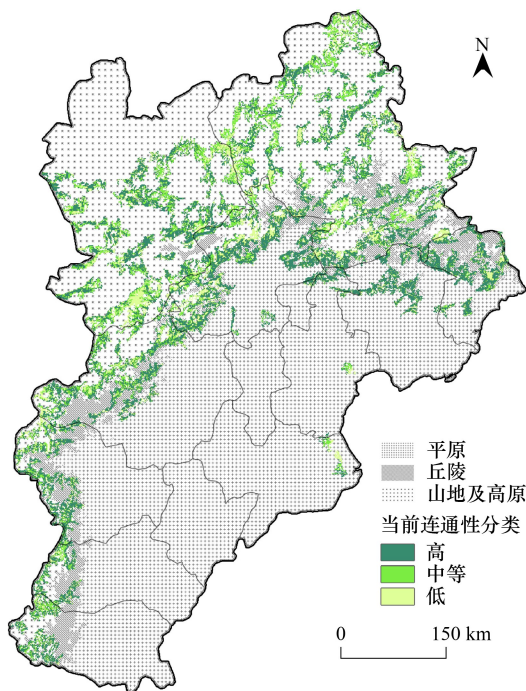


图8 气候廊道与当前连通性叠加结果
Fig.8 Overlay of climate corridors and current connectivity

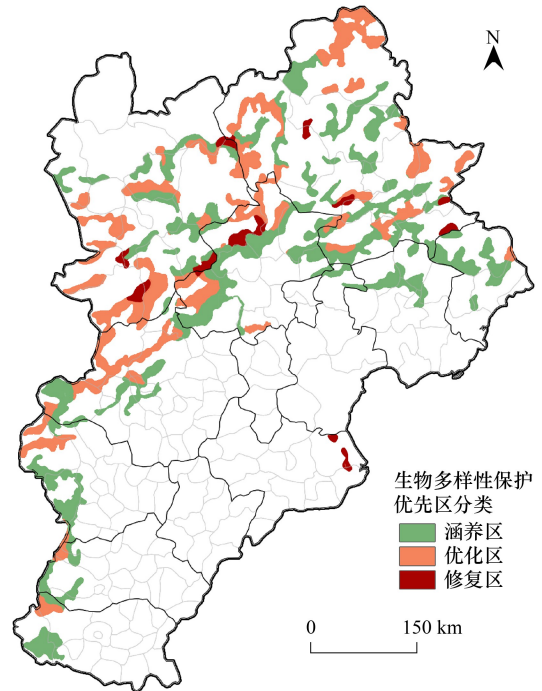


图9 生物多样性保护优先区
Fig.9 Priority conservation areas for biodiversity

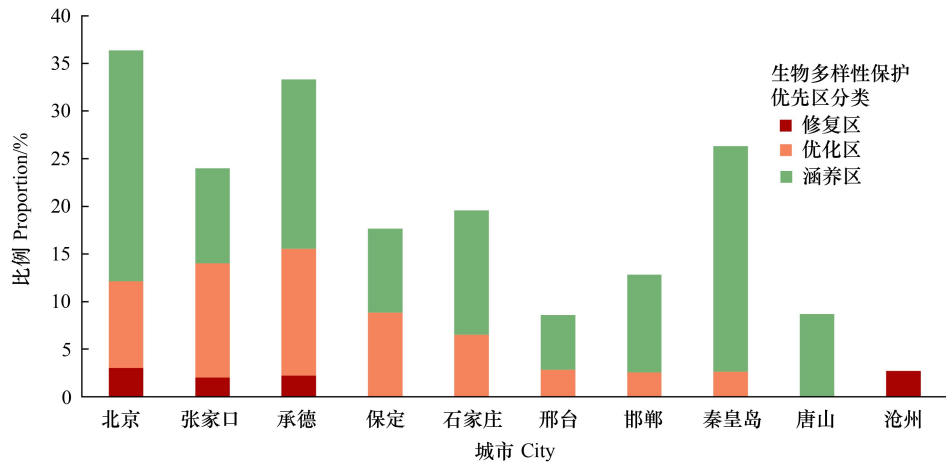


图10 生物多样性保护优先区面积占各市面积比例
Fig.10 Proportion of priority conservation areas for biodiversity to the area of each city

本研究所发现的规律与现有研究大致符合,但也存在一些差异。本研究所识别的气候廊道主要分布于山地,这与 Schloss 等人的研究结果相吻合^[33]。保护优先区中的部分修复区已被其他研究证实存在较高气候风险^[52],如北京市门头沟区、房山区正向更脆弱的趋势演变。此外,优先区识别结果主要与邢韶华等^[23]的研究相比,在地形复杂区域分布更加零散,可能由于较高的地形多样性较易维持小气候^[41]。

为保证连通性的效益,保护优先区应尽可能在规划初期被纳入实施策略^[53]。所识别的保护优先区中的部分区域通常已经受到现有政策的保护^[54],尤其是华北平原内沿主要河流分布的气候廊道(如北京永定河绿廊),着重保护这些区域有利于达成生物多样性和降低洪泛风险的双重目标。

此外,在数据精度和计算力的限制下,本研究也存在一定不确定性。第一,采用的气候数据为降尺度数

据,即使通过使用较高分辨率的地形位置指数数据对精度进行了一定程度上的弥补^[55]。第二,由于涉及到的焦点物种数量繁多,Omniscape 搜索半径根据物种移动距离的平均值设置,这在一定程度上会弱化边缘物种的种群动态。

5 结论

本研究分别评估了京津冀地区当前时期与气候变化风险下的全域连通性格局,通过对比分析,得到如下结论:

(1)两种情景下区域尺度的连通性存在较大差异,而斑块尺度下的规律相似。区域层面,气候变化风险使得高连通性的区域从平原地区逐渐向山区转移,分布趋于集中;斑块层面,以林地斑块边缘的连通性高,耕地斑块与林地或草地接壤处连通性低,即林缘地带的生物多样性更有可能在气候变化下维持原先水平。

(2)对于三类生物多样性保护优先区应采取对应的保护策略。涵养区应限制开发,以保护重要种质资源为导向;优化区应保护和恢复生境多样性并减少人类活动对生态系统的影响;修复区应加强环境监测和管理,通过生态修复提升生境的稳定性和质量。

参考文献 (References):

- [1] Newbold T, Hudson L N, Hill S L L, Contu S, Lysenko I, Senior R A, Börger L, Bennett D J, Choimes A, Collen B, Day J, De Palma A, Díaz S, Echeverria-Londoño S, Edgar M J, Feldman A, Garon M, Harrison M L K, Alhusseini T, Ingram D J, Itescu Y, Kattge J, Kemp V, Kirkpatrick L, Kleyer M, Correia D L P, Martin C D, Shai M R, Novosolov M, Yuan P, Phillips H R P, Purves D W, Robinson A, Simpson J, Tuck S L, Weiher E, White H J, Ewers R M, Mace G M, Scharlemann J P W, Purvis A. Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 2015, 520(7545): 45-50.
- [2] Gattuso J, Hoegh-Guldberg O, Pörtner H. Climate change 2014 impacts, adaptation, and vulnerability: cross-chapter boxes. IPCC, 2014.
- [3] Roberts C M, O'Leary B C, McCauley D J, Cury P M, Duarte C M, Lubchenco J, Pauly D, Sáenz-Arroyo A, Sumaila U R, Wilson R W, Worm B, Castilla J C. Marine reserves can mitigate and promote adaptation to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(24): 6167-6175.
- [4] Keppel G, Wardell-Johnson G W. Refugia: keys to climate change management. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2389-2391.
- [5] McGuire J L, Lawler J J, McRae B H, Nuñez T A, Theobald D M. Achieving climate connectivity in a fragmented landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113(26): 7195-7200.
- [6] D'Aloia C C, Naujokaitis-Lewis I, Blackford C, Chu C, Curtis J M R, Darling E, Guichard F, Leroux S J, Martensen A C, Rayfield B, Sunday J M, Xuereb A, Fortin M J. Coupled networks of permanent protected areas and dynamic conservation areas for biodiversity conservation under climate change. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7: 27.
- [7] Newman T P. Tracking the release of IPCC AR5 on Twitter: users, comments, and sources following the release of the Working Group I Summary for Policymakers. *Public Understanding of Science*, 2017, 26(7): 815-825.
- [8] 宋成文, 王文礼, 刘冬梅, 代光辉, 刘维鸿, 李泞吕, 朱颖, 张志明. 不同人类干扰背景下横断山南段保护优先区规划研究. *生态学报*, 2021, 41(24): 9655-9668.
- [9] Vu X D, Csaplovics E, Marrs C, Nguyen T T. Criteria and indicators to define priority areas for biodiversity conservation in Vietnam. *Forests*, 2022, 13(9): 1341.
- [10] Pérez-García J M, DeVault T L, Botella F, Sánchez-Zapata J A. Using risk prediction models and species sensitivity maps for large-scale identification of infrastructure-related wildlife protection areas: the case of bird electrocution. *Biological Conservation*, 2017, 210: 334-342.
- [11] Aretano R, Semeraro T, Petrosillo I, De Marco A, Pasimeni M R, Zurlini G. Mapping ecological vulnerability to fire for effective conservation management of natural protected areas. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 163-175.
- [12] Heller N E, Zavaleta E S. Biodiversity management in the face of climate change: a review of 22 years of recommendations. *Biological Conservation*, 2009, 142(1): 14-32.
- [13] Vos C, Berry P, Opdam P, Baveco H, Nijhof B, O'Hanley J, Bell C, Kuipers H. Adapting landscapes to climate change: examples of climate-proof ecosystem networks and priority adaptation zones. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45: 1722-1731.
- [14] Burrows M T, Schoeman D S, Richardson A J, Molinos J G, Hoffmann A, Buckley L B, Moore P J, Brown C J, Bruno J F, Duarte C M, Halpern B S, Hoegh-Guldberg O, Kappel C V, Kiessling W, O'Connor M I, Pandolfi J M, Parmesan C, Sydeman W J, Ferrier S, Williams K J,

- Poloczanska E S. Geographical limits to species-range shifts are suggested by climate velocity. *Nature*, 2014, 507(7493): 492-495.
- [15] Townsend P A, Masters K L. Lattice-work corridors for climate change: a conceptual framework for biodiversity conservation and social-ecological resilience in a tropical elevational gradient. *Ecology and Society*, 2015, 20(2): art1.
- [16] Anderson M G, Clark M, Sheldon A O. Estimating climate resilience for conservation across geophysical settings. *Conservation Biology: the Journal of the Society for Conservation Biology*, 2014, 28(4): 959-970.
- [17] Landau V A, Shah V B, Anantharaman R, Hall K. Omniscape.jl: software to compute omnidirectional landscape connectivity. *Journal of Open Source Software*, 2021, 6(57): 2829.
- [18] Carroll C, Parks S A, Dobrowski S Z, Roberts D R. Climatic, topographic, and anthropogenic factors determine connectivity between current and future climate analogs in North America. *Global Change Biology*, 2018, 24(11): 5318-5331.
- [19] Marangelo P. Improving roadway conservation investments in Vermont: Developing a prioritization screening framework for reducing road wildlife mortality and improving wildlife movement through bridges and culverts. Montpelier: Transportation Research Center Research Reports, 2019.
- [20] Morgan G, Elisabeth M, Tosha C, Adina M. Quantifying climate-wise connectivity across a topographically diverse landscape. *Land*, 2020, 9(10): 355.
- [21] 中共中央国务院印发《国家新型城镇化规划(2014-2020年)》_2014年第9号国务院公报_中国政府网. [2023-02-14]. http://www.gov.cn/gongbao/content/2014/content_2644805.htm.
- [22] 吴婕, 高学杰, 徐影. RegCM4 模式对雄安及周边区域气候变化的集合预估. *大气科学*, 2018, 42(3): 696-705.
- [23] 邢韶华, 周鑫, 刘云强, 袁秀. 京津冀地区物种多样性保护优先区识别研究. *生态学报*, 2021, 41(8): 3144-3152.
- [24] Theobald D, Kennedy C, Chen B, Oakleaf J, Baruch-Mordo S, Kiesecker J. Earth transformed: detailed mapping of global human modification from 1990 to 2017. *Earth System Science Data*, 2020, 12(3): 1953-1972.
- [25] Theobald D M, Harrison-Atlas D, Monahan W B, Albano C M. Ecologically-relevant maps of landforms and physiographic diversity for climate adaptation planning. *PLoS One*, 2015, 10(12): e0143619.
- [26] Riahi K, van Vuuren D P, Kriegler E, Edmonds J, O'Neill B C, Fujimori S, Bauer N, Calvin K, Dellink R, Fricko O, Lutz W, Popp A, Cuaresma J C, Ke S, Leimbach M, Jiang L W, Kram T, Rao S, Emmerling J, Ebi K, Hasegawa T, Havlik P, Humpenöder F, Da Silva L A, Smith S, Stehfest E, Bosetti V, Eom J, Gernaat D, Masui T, Rogelj J, Streffer J, Drouet L, Krey V, Luderer G, Harmsen M, Takahashi K, Baumstark L, Doelman J C, Kainuma M, Klimont Z, Marangoni G, Lotze-Campen H, Obersteiner M, Tabeau A, Tavoni M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 153-168.
- [27] Petrie R, Denvil S, Ames S, Levvasseur G, Fiore S, Allen C, Antonio F, Berger K, Bretonnière P A, Cinquini L, Dart E, Dwarakanath P, Druken K, Evans B, Franchistéguy L, Gardoll S, Gerbier E, Greenslade M, Hassell D, Iwi A, Juckes M, Kindermann S, Lacinski L, Mirto M, Ben Nasser A, Nassisi P, Nienhouse E, Nikonov S, Nuzzo A, Richards C, Ridzwan S, Rixen M, Serradell K, Snow K, Stephens A, Stockhause M, Vahlenkamp H, Wagner R. Coordinating an operational data distribution network for CMIP6 data. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(1): 629-644.
- [28] Noce S, Caporaso L, Santini M. A new global dataset of bioclimatic indicators. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 398.
- [29] 赵智聪, 王沛. 中国自然保护区连通性的重要意义与关键议题. *风景园林*, 2022, 29(7): 12-17.
- [30] McRae B H, Dickson B G, Keitt T H, Shah V B. Using circuit theory to model connectivity in ecology, evolution, and conservation. *Ecology*, 2008, 89(10): 2712-2724.
- [31] Mcrae B, Popper K, Jones A, Schindel M, Buttrick S, Hall K, Unnasch R, Platt J. Conserving Nature's Stage: Mapping Omnidirectional Connectivity for Resilient Terrestrial Landscapes in the Pacific Northwest. Portland: The Nature Conservancy, 2016.
- [32] Whitmee S, Orme C D L. Predicting dispersal distance in mammals: a trait-based approach. *The Journal of Animal Ecology*, 2013, 82(1): 211-221.
- [33] Schloss C A, Cameron D R, McRae B H, Theobald D M, Jones A. "No-regrets" pathways for navigating climate change: planning for connectivity with land use, topography, and climate. *Ecological Applications*, 2022, 32(1): e02468.
- [34] 刘俊男, 龙雨丹, 陈扬帆, 高凯. 基于生境网络构建的昆明呈贡新区生物多样性保护. *中国城市林业*, 2022, 20(4): 15-21.
- [35] 阳文锐, 李婧, 闻丞, 黄越, 顾懿芸, 朱洁, 唐燕. 基于物种分布的北京平原生态网络构建. *生态学报*, 2022, 42(20): 8213-8222.
- [36] Wade A, McKelvey K, Schwartz M. Resistance-surface-based wildlife conservation connectivity modeling: summary of efforts in the United States and guide for practitioners. RMRS-GTR-333. Ft. Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2015: RMRS-GTR-333.
- [37] Littlefield C E, Krosby M, Michalak J L, Lawler J J. Connectivity for species on the move: supporting climate-driven range shifts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2019, 17(5): 270-278.

- [38] Molinos J G, Schoeman D, Brown C, Burrows M. VoCC: an r package for calculating the velocity of climate change and related climatic metrics. *Methods in Ecology and Evolution*, 2019, 10: 2195-2202.
- [39] Burrows M, Schoeman D, Buckley L B, Moore P, Poloczanska E, Brander K, Brown C G, Bruno J, Duarte C M, Halpern B, Holding J, Kappel C V, Kiessling W, O'Connor M, Pandolfi J, Parmesan C, Schwing F, Sydeman W, Richardson A. The pace of shifting climate in marine and terrestrial ecosystems. *Science*, 2011, 334: 652-655.
- [40] Hamann A, Roberts D R, Barber Q E, Carroll C, Nielsen S E. Velocity of climate change algorithms for guiding conservation and management. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 997-1004.
- [41] Dobrowski S Z. A climatic basis for microrefugia: the influence of terrain on climate. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1022-1035.
- [42] Williams P, Hannah L, Andelman S, Midgley G, Araújo M, Hughes G, Manne L, Martinez-Meyer E, Pearson R. Planning for climate change: identifying minimum-dispersal corridors for the cape Proteaceae. *Conservation Biology*, 2005, 19(4): 1063-1074.
- [43] The University of Montana. Mapping climate corridors. (2018-07-11) [2023-04-05]. <https://www.sciencedaily.com/releases/2018/07/180711182728.htm>.
- [44] Alagador D, Cerdeira J O, Araújo M B. Climate change, species range shifts and dispersal corridors: an evaluation of spatial conservation models. *Methods in Ecology and Evolution*, 2016, 7(7): 853-866.
- [45] Mallarach J M, Marull J. Impact assessment of ecological connectivity at the regional level: recent developments in the Barcelona Metropolitan Area. *Impact Assessment and Project Appraisal*, 2006, 24(2): 127-137.
- [46] 袁秀, 刘义, 章伶俐, 李景文, 李俊清. 北京市自然保护区建设方案与管理模式探讨. *北京林业大学学报: 社会科学版*, 2010, 9(1): 59-64.
- [47] 沈钦炜, 林美玲, 莫惠萍, 黄宇斌, 胡欣雨, 魏凌伟, 郑郁善, 陆东芳. 佛山市生态网络构建及优化. *应用生态学报*, 2021, 32(9): 3288-3298.
- [48] 乔治, 陈嘉悦, 王楠, 卢应爽, 贺瞳, 孙宗耀, 徐新良, 杨浩, 李莹, 王方. 基于 MSPA 和电路理论的京津冀城市群热环境空间网络. *环境科学*, 2023, 44(6): 3034-3042.
- [49] 刘婷, 欧阳帅, 勾蒙蒙, 项文化, 雷丕锋, 李艳兵. 基于 MSPA 模型的新型城市热景观连通性分析. *生态学报*, 2023, 43(2): 615-624.
- [50] Keeley A, Ackerly D, Cameron D, Heller N, Huber P, Schloss C A, Thorne J, Merenlender A. New concepts, models, and assessments of climate-wise connectivity. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(7): 073002.
- [51] 王红梅, 王仲良, 王堃, 陈欢, 刘安乐. 华北农牧交错带农田-草地景观镶嵌体土壤水分空间异质性. *生态学报*, 2013, 33(19): 6287-6294.
- [52] 施瑶, 李嘉艺, 高娜, 郑曦. 气候变化背景下北京浅山区社会——生态系统脆弱性评估. *北京林业大学学报*, 2020, 42(4): 132-141.
- [53] Costanza J K, Terando A J. Landscape connectivity planning for adaptation to future climate and land-use change. *Current Landscape Ecology Reports*, 2019, 4(1): 1-13.
- [54] Fremier A K, Kiparsky M, Gmur S, Aycrigg J, Craig R K, Svancara L K, Goble D D, Cosens B, Davis F W, Scott J M. A riparian conservation network for ecological resilience. *Biological Conservation*, 2015, 191: 29-37.
- [55] Hannah L, Flint L, Syphard A D, Moritz M A, Buckley L B, McCullough I M. Fine-grain modeling of species' response to climate change: holdouts, stepping-stones, and microrefugia. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(7): 390-397.