

DOI: 10.20103/j.stxb.202405131075

黄萍, 臧振华, 徐卫华. 气候稳定性在西藏自然保护区规划中的应用. 生态学报, 2025, 45(22): - .

Huang P, Zang Z H, Xu W H. Application of climate stability in Xizang protected area planning. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(22): - .

气候稳定性在西藏自然保护区规划中的应用

黄萍^{1,2}, 臧振华¹, 徐卫华^{1,*}

1 中国科学院生态环境研究中心区域与城市生态安全全国重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 在全球气候变化背景下, 将气候稳定性作为关键因子纳入保护规划, 对于实现生物多样性保护目标具有重要意义。本文以西藏为研究区域, 探讨将气候稳定性纳入保护规划的路径, 识别西藏当前和未来保护优先区和保护空缺, 并提出自然保护区空间布局的建议。结果表明: (1) 在保护规划中, 将气候稳定性设为保护目标时, 高稳定气候区保护最优且人类足迹指数较低; 将其作为成本时, 物种覆盖率最高但人类足迹指数最高; 作为边界长度时, 人类足迹指数最低但气候稳定性保护最弱。综合而言, 将气候稳定性设为保护目标是综合最优的整合方案; (2) 保护优先区的面积约为 28.4 万 km², 可有效覆盖当前和未来的生物多样性保护需求。然而, 该区域目前仅有 54.3% 的面积受到自然保护区的覆盖, 保护空缺主要分布在喜马拉雅东部、昌都地区北部以及班公错等区域。因此, 建议未来优先在这些空缺区域扩建或新建自然保护区。本研究为将气候因素纳入自然保护区规划提供了一种可操作性较强的方法, 有助于提升自然保护区体系的长期保护效能。

关键词: 气候稳定性; 生物多样性; 保护规划; 保护优先区; 西藏

Application of climate stability in Xizang protected area planning

HUANG Ping^{1,2}, ZANG Zhenhua¹, XU Weihua^{1,*}

1 State Key Laboratory of Regional and Urban Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Under the background of increasingly intensified global climate change, incorporating climate change as a key factor into the conservation planning of protected areas is crucial for achieving long-term and effective biodiversity conservation. Xizang as a region highly sensitive and vulnerable to climate change, faces severe challenges in preserving its biodiversity. Taking Xizang as a case study, selecting 432 endangered species as conservation targets and using the human footprint index as planning cost. Using the MARXAN, a systematic conservation planning software, four planning scenarios were developed. Scenario 1 does not account for climate stability and sets species conservation as conservation target, using the human footprint index as cost. Scenarios 2 to 4 build upon Scenario 1 by incorporating climate stability respectively as a conservation target, a cost factor, and a boundary length. For each scenario, the top 30% of areas with the highest irreplaceability values were identified as conservation priority areas. The study then evaluated the performance of each scenario in terms of selecting climatically stable areas, minimizing conservation cost, and maximizing the average proportion of species habitat coverage, aiming to achieve conservation goals under climate change with minimal cost. Results show that: (1) in conservation planning, Scenario 2 resulted in optimal protection of highly stable climatic areas with a low human footprint index; Scenario 3 resulted in the highest species cover but the highest human footprint index; and Scenario 4 resulted in the lowest human footprint index but the weakest protection of climate stability. Taken together, setting climate

基金项目: 西藏自治区重点研发计划(XZ202401ZY0110)资助, 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)资助

收稿日期: 2024-05-13; 网络出版日期: 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuweihua@rcees.ac.cn

stability as a conservation target is the best option, which represents the optimal climate-adaptive planning strategy by balancing biodiversity conservation with minimal human disturbance. While the priority areas identified in Scenario 1 are critical for conserving current biodiversity, those from Scenario 2 are more suitable for meeting future conservation needs under climate change. The overlapping areas between these two scenarios offer both high current biodiversity value and strong future climate adaptation potential, and should thus be prioritized as long-term conservation areas. These areas cover approximately 284,000 km², accounting for 23.6% of Xizang's total area. However, 45.7% of these areas are still not covered by existing protected areas, with significant conservation gaps primarily located in the eastern Himalayas, northern Qamdo City, and Pangong Tso. Therefore, it is recommended that future conservation efforts focus on expanding or establishing protected areas in these underrepresented regions to improve the effectiveness and climate resilience of the protected area network. This study provides a simple and practical technical approach for integrating climate considerations into protected area planning, offering valuable insights for enhancing the long-term effectiveness of conservation systems under climate change.

Key Words: climate stability; biodiversity; conservation planning; conservation priority areas; Xizang

气候变化和生物多样性丧失是两大紧密联系的全球性危机^[1]。物种在空间上的重新分布是对气候变化最根本的响应,历史气候变化已导致陆地物种向更高海拔和更高纬度迁移^[2],海洋物种则向更深、更冷的水域迁移^[3]。未来,气候变化预计将成为生物多样性丧失的主要驱动因素^[5]。即便将全球变暖控制在 1.5—2℃ 之内,预计仍有 6%—18% 的昆虫、8%—16% 的植物及 4%—8% 的脊椎动物将失去其超过一半的受气候条件制约的栖息地^[5],同时将有 3%—18% 的物种面临极高的灭绝风险^[7]。更为严峻的是,生物多样性的下降会进一步加剧气候变化,形成恶性循环。这种加剧效应主要通过改变碳、氮和水循环等关键生态过程实现^[6],其后果可能是不可逆转的。

随着对气候变化与生物多样性相互关系的深入理解,将气候因素纳入保护规划逐渐成为研究热点^[7]。目前,这种方法主要通过整合气候变化数据和物种分布模型(如 Maxent),预测物种未来的潜在分布,并结合系统保护规划软件(如 MARXAN、Zonation、C-Plan)识别空间保护优先区,划定气候避难所,以期有效保护未来的物种栖息地^[8-11]。然而,物种分布模型通常需要详尽的物种特定信息才能获得可靠的预测结果。对于绝大多数物种而言,往往缺乏对气候变化的敏感性、响应环境变化的扩散能力、适应潜力以及种间相互作用等关键参数与数据^[12-13]。这些数据的缺失严重制约了物种分布模型对大多数物种未来空间分布的预测能力,进而导致最终的保护规划结果存在较高的不确定性。

为解决上述问题,通常将气候变化指标纳入保护规划,以间接反映物种对气候变化的响应^[14],这一策略已在多项研究中得到应用。例如,尚柯等人将气候变化因素纳入保护成本,以此探讨未来鲨鱼保护优先区^[15];Doxa 等人则将直接气候变化设定为保护目标,识别了欧洲的气候避难所,但未纳入生物多样性目标^[16]。相较之下,Brito-Morales 等人的研究更为综合,不仅将气候变化作为保护目标,还考量了 12932 种海洋动物的保护需求,却未涉及保护成本^[17]。这些研究共同表明,将气候变化纳入系统保护规划(如作为保护目标或成本),对于识别气候避难所至关重要。

然而,不同规划方法之间缺乏系统比较,难以确定何种方法在协同生物多样性保护、气候变化缓解与成本效益方面更具优势。Arafah-Dalmau 等人尝试弥补这一研究空白,通过对比将气候速度分别作为保护目标、成本要素和边界长度约束的三种方法,并考量了保护成本^[18]。但该研究缺乏具体的生物多样性目标,难以评估规划方案对生物多样性保护需求的满足程度。此外,保护策略仅聚焦于气候因素而忽视生物多样性的具体需求,可能导致关键物种栖息地覆盖不足,从而削弱保护成效。因此,在保护规划中如何协同整合气候变化因素、生物多样性目标与保护成本,是实现生物多样性长期有效保护的关键所在。

在未来气候变化背景下,具有长期气候稳定性的区域常被视为“气候避难所”,对维持生物多样性具有关

键作用^[19-23]。气候稳定性是制约物种分布和多样性的关键因素^[24-27],既能促进物种聚集,又能降低灭绝风险^[28],这也使得物种热点地区常与气候稳定区高度重合^[29-31]。《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》也明确要求,“到 2030 年,将至少 20% 的陆地区域指定为气候稳定区”^[33]。由此可见,面对未来气候变化,长期气候稳定的区域应成为自然保护地建设的优先选址区域。因此,本研究选取对气候变化敏感的西藏作为案例区,在统筹兼顾生物多样性目标与保护成本的前提下,探讨将气候变化因素纳入自然保护地规划的可行路径,以期实现生物多样性保护成效最大化。该研究不仅积极响应了国际公约制定的生物多样性保护目标^[32-33],也能为未来保护策略的制定提供科学依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

西藏位于我国西南部,地理坐标介于北纬 26°50′—36°53′、东经 78°25′—99°06′之间,平均海拔超过 4000m,总面积约 120 万 km²,被誉为“世界屋脊”。作为全球山地物种的重要起源和分化中心之一^[34],西藏拥有丰富的植物和动物资源:已记录的维管束植物达 6530 种,其中包含 2700 种中国特有种及 348 种珍稀濒危植物;同时栖息着约 900 种野生脊椎动物,超过三分之一被列为国家重点保护物种^[36],代表性物种包括藏羚 (*Pantholops hodgsonii*)、野牦牛 (*Bos mutus*)、藏野驴 (*Equus kiang*) 和雪豹 (*Panthera uncia*) 等^[35]。羌塘和喜马拉雅地区是中国的生物多样性保护优先区^[36],其中喜马拉雅东部更是全球生物多样性热点地区之一^[37]。尤为重要的是,西藏不仅是全球气候变化的敏感区,也是生态脆弱区,其生物多样性保护正面临气候变化带来的严峻挑战^[38]。综上所述,西藏独特的地理区位、丰富的生物多样性及其对气候变化的高度敏感性,使其成为气候变化因素纳入自然保护地规划的理想研究区域。

1.2 保护优先区识别

采用 Marxan 软件进行不可替代性分析,以识别西藏的保护优先区。该方法基于设定物种保护目标、气候稳定性指数以及规划单元的保护成本,通过模拟退火算法进行优化计算,旨在以最小成本实现设定的保护目标^[39-40]。

1.2.1 物种筛选及栖息地评价

首先,确定珍稀濒危物种名录。本研究筛选的物种包括:列入 2022 年《国际自然保护联盟濒危物种红色名录》(IUCN Red List of Threatened Species)或 2021 年《中国生物多样性红色名录》的极度濒危(CR)、濒危(EN)和易危(VU)等级的物种^[41-43];列入《国家重点保护野生动物名录》和《国家重点保护野生植物名录》中的国家一级和国家二级重点保护物种^[44-45]。最终共筛选出 432 种物种,包括 239 种植物、57 种哺乳动物、68 种鸟类、18 种两栖动物、12 种爬行动物和 38 种水生动物。

其次,对物种栖息地进行适宜性评价。由于直接获取的物种空间分布范围图可能包含非适宜生境,本研究基于各物种的已知空间分布范围、偏好栖息地类型及海拔区间,对其空间分布进行了精细化处理^[46]。主要包括以下数据:植物空间分布数据主要来源于中国植物物种科学数据^[47],哺乳动物、爬行动物、两栖动物和水生动物分布图主要来自 IUCN^[41],其中部分两栖动物分布数据参考了《中国两栖动物及其分布彩色地图集》^[48],鸟类分布数据来源于国际鸟盟(BirdLife International)^[49]。土地覆盖数据来自青藏高原生态系统数据集成平台,分辨率为 30m^[49],分为森林、灌丛、草地、农田、湿地、沙漠和其他^[50]。高程数据来自资源环境科学与数据中心,分辨率为 250m。

1.2.2 气候稳定性评价

本研究基于 Herrando-Moraira 等人提出的气候稳定性计算的框架(Climatic Stability Index, CSI)^[20],结合从 WorldClim v2.1 中获取的气候数据,绘制了西藏地区的气候稳定性分布图。该方法通过计算不同时间段气候变量的标准差,并对一组不相关变量的标准差值进行求和与归一化处理,最终生成气候稳定性指数图(公式 1—4)。标准差反映了气候变量随时间变化或离散程度,揭示了在所研究的时间周期内,气候条件相对稳

定或易变的区域^[27]。

数据获取与预处理:从 WorldClim v2.1 中获得了当前期(1970—2000 年)和未来四个时期(2020—2040、2040—2060、2060—2080、2080—2100)的 19 个生物气候变量(表 1),空间分辨率为 30 弧秒^[51—52]。未来气候数据基于耦合模式比对项目第六阶段(CMIP6)的共享社会经济路径(SSP),选用高强迫情景 SSP5-8.5(其辐射强迫水平约为 8.5 W/m²),以探讨最剧烈气候变化情景下的气候稳定性。为降低不确定性,未来数据采用在西藏地区模拟降水和温度表现较好的四个全球气候模式(GCMs)的集合平均值,包括 EC-Earth3-Veg、MIROC6、MPI-ESM1-2-HR 和 MRI-ESM2-0^[53—54]。

标准差计算与初步归一化:分别计算五个时间段内各生物气候变量的标准差(公式 4),并采用最大-最小归一化方法将其标准化至 0-1 范围(公式 3)。

变量筛选与加和:利用 R 4.3.2 软件,基于 Pearson 相关系数评估不同生物气候变量间的相关性。若变量间相关系数 $|r| < 0.8$,则认为二者不相关;若 $|r| \geq 0.8$,则仅保留其中一个变量。经筛选,最终保留 14 个互不相关的生物气候变量(bio1、bio2、bio3、bio4、bio5、bio7、bio8、bio9、bio10、bio11、bio12、bio15、bio17、bio19),并将它们的标准化标准差值求和(公式 2)。

最终归一化与成图:使用最大-最小归一化方法,将步骤 3 得到的加和值标准化至 0—1 范围(公式 1),生成气候稳定性分布图。图中,值 0 表示在五个时间段内标准差最小,即气候最稳定;值 1 表示在五个时间段内标准差最大,即气候最不稳定。

$$CSI = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \quad (1)$$

$$Y = \text{SUM}(X_{SD_{bio_j}}) \quad (2)$$

$$X_{SD_{bio_j}} = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (3)$$

$$SD_{bio_j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}{n}} \quad (4)$$

式中,CSI:气候稳定性指数,范围为 0—1,数值越大表示气候变化越不稳定;Y:不相关气候变量标准差的和; $X_{SD_{bio_j}}$:第 j 个气候变量在五个时间段标准差的归一化值; SD_{bio_j} :第 j 个气候变量的标准差; T_i :第 i 个时间段(1970—2000、2020—2040、2040—2060、2060—2080、2080—2100)。

1.2.3 保护规划成本

本研究采用 Venter 等人开发的人类足迹指数作为保护规划成本^[55]。该指数衡量人类对整个陆地表面的影响,代表了人类生态足迹的总体情况,既能反映区域间社会经济成本差异,又能以最小人为干扰保护最大范围的生物多样性^[56]。

1.2.4 保护规划情景

本研究构建了四种规划情景,旨在以最小成本实现生物多样性保护目标。四种情景在物种保护目标和人类足迹指数设置上完全一致,但在气候稳定性的应用方式上存在差异。具体设置如下:

(1) 物种保护目标设置

基于物种分布范围大小,对分布面积最小的 1/3 物种设定 70% 的保护目标,对分布面积最大的 1/3 物种设定 30% 的保护目标,对中等分布范围的物种则设定 50% 的保护目标^[57]。

(2) 规划情景设置

1) 基准情景(情景 1):仅考虑物种保护目标和人类足迹指数(作为规划成本),未纳入气候稳定性因素。该情景用于识别当前生物多样性保护的关键区域。

2) 气候适应性情景(情景 2-4):在基准情景基础上引入气候稳定性因素,旨在识别气候变化背景下能够

长期维持生物多样性的重要区域。其中,情景 2 将气候稳定性作为保护目标,实现兼顾物种和气候稳定性两个保护目标;情景 3 将气候稳定性与人类足迹指数共同作为成本因子,优先选择气候稳定性高且保护成本低的规划单元;情景 4 将气候稳定性作为边界长度调节因子,促进形成由高气候稳定性区域组成的紧凑保护网络。

(3) Marxan 模型运行

首先,将西藏划分为 5km×5km 的网格单元,作为空间规划的基本单位。其次,针对每种规划情景,进行边界长度修正值(BLM)的敏感性分析。设置 BLM 梯度(10^{-7} , 10^{-6} , ..., 10^4),固定其他参数,每种情景运行 1000 次,迭代 100 万次,以确定最优 BLM 值,确保规划结果的稳健性。再者,基于最优参数组合,对每种情景进行 1000 次 Marxan 运算,计算各规划单元的不可替代性值(Irreplaceability)。该值反映规划单元对实现保护目标的重要性,数值越高(0-1),其保护优先级越高^[55]。最后,提取各情景中不可替代性值最高的前 30% 区域,作为西藏生物多样性保护优先区。

表 1 生物气候变量
Table 1 Bioclimatic variables

生物气候变量 Bioclimatic	描述 Description	单位 Unit
Bio1	年平均温度 Annual Mean Temperature	℃
Bio2	平均气温日较差 Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp-min temp))	℃
Bio 3	等温性 Isothermality (Bio2/Bio7)×100	
Bio 4	气温季节性 Temperature Seasonality (standard deviation×100)	℃
Bio 5	最热月份的最高温度 Max Temperature of Warmest Month	℃
Bio 6	最冷月份的最低温度 Min Temperature of Coldest Month	℃
Bio 7	气温年较差 Temperature Annual Range (Bio5-Bio6)	℃
Bio 8	最潮湿季度的平均温度 Mean Temperature of Wettest Quarter	℃
Bio 9	最干旱季度的平均温度 Mean Temperature of Driest Quarter	℃
Bio10	最热季度的平均温度 Mean Temperature of Warmest Quarter	℃
Bio11	最冷季度的平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter	℃
Bio 12	年降水量 Annual Precipitation	mm
Bio 13	最湿月份降水量 Precipitation of Wettest Month	mm
Bio 14	最干月份降水量 Precipitation of Driest Month	mm
Bio 15	降水季节性(变异系数) Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)	
Bio 16	最湿季度降水量 Precipitation of Wettest Quarter	mm
Bio 17	最干季度降水量 Precipitation of Driest Quarter	mm
Bio 18	最热季度降水量 Precipitation of Warmest Quarter	mm
Bio 19	最冷季度降水量 Precipitation of Coldest Quarter	mm

1.3 情景比较

为确保不同规划情景间的可比性,本研究统一选取各情景中不可替代性(Irreplaceability)最高的前 30% 区域作为保护优先区,以符合《昆明-蒙特利尔全球生物多样性框架》(Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework)提出的“到 2030 年保护至少 30% 的陆地和海洋面积”的目标^[33]。

为比较不同情景的保护效果,本研究从以下三个维度进行定量评估:(1)气候稳定性:计算优先区的平均气候稳定性指数,评估其对气候变化适应能力的贡献;(2)保护成本:基于优先区的平均人类足迹指数(Human Footprint Index, HFI),衡量保护措施的经济和社会成本;(3)物种栖息地覆盖:统计优先区覆盖物种栖息地的平均比例,反映生物多样性保护的有效性。此外,使用了非参数 Kruskal-Wallis(K-W)检验(独立样本)分析不同规划情景在最小化保护成本和选择稳定气候区域是否存在显著差异。

1.4 保护优先区

自然保护区规划需兼顾生物多样性的当前保护需求与未来气候适应能力。在全球气候变化背景下,仅依

赖当前生物多样性格局制定的保护策略难以实现对物种的长期有效保护。研究表明,气候稳定性较高的区域更可能成为未来的“气候避难所”,为物种提供持续的生存环境。因此,本研究综合考虑不包含气候变化因素的基础情景与考虑气候稳定的最优保护规划情景,将两种情景所确定的保护优先区的重叠区域确定为最终的保护优先区,确保这些区域既能满足当前生物多样性保护需求,又能在气候变化背景下长期发挥“气候避难所”功能。

1.5 保护优先区的保护状况评价

基于来自国家林业和草原局的自然保护地数据,本研究评估了西藏自治区自然保护地对保护优先区的覆盖状况。自然保护地总面积(扣除重叠面积)为 40.9 万 km^2 ,约占西藏总面积的 34.0%,包括 47 个自然保护区、22 个湿地公园,9 个森林公园和 3 个地质公园。

2 研究结果

2.1 不同情景保护优先级比较

不同保护规划情景的空间优先级既呈现共性特征又存在显著差异。在物种保护目标和人类足迹指数设定一致的前提下,喜马拉雅东部因其突出的物种丰富度在所有情景中均被识别为高优先级区域。然而,气候稳定性的不同处理方式导致各情景的保护优先格局产生明显分异:当气候稳定性被直接设为保护目标(情景 2)时,羌塘地区的保护优先级显著提升,而喜马拉雅东部的优先级则相对降低,这表明该策略更倾向于选择气候缓冲能力强的区域;相比之下,将气候稳定性作为成本因子(情景 2)或边界长度参数(情景 3)的情景,则更突出物种热点区域的保护价值(图 1)。这种差异反映了不同保护策略在气候变化适应性管理中的实际应用,强调了在制定保护规划时考虑气候稳定性的重要性。

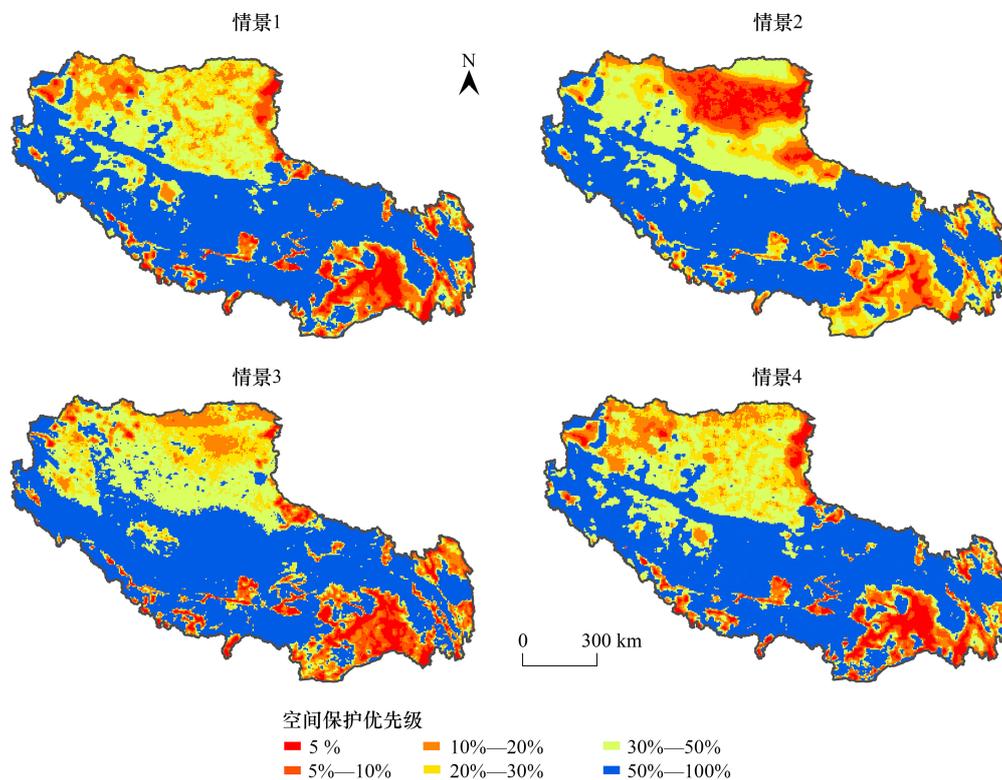


图 1 不同情景的空间保护优先级

Fig.1 Spatial priorities for different scenarios

情景 1 为基础情景,只考虑物种和人类足迹指数;情景 2—4:在情景 1 的基础上考虑气候稳定性。其中,情景 2 将气候稳定性为保护目标,情景 3 将气候稳定性作为成本,情景 4 将气候稳定性作为边界长度。图中不同颜色表示空间保护优先级,图例中各优先级的数字表示该区域在整个研究区中所占的面积比例。

K-W 检验结果表明,四种规划情景在气候稳定性区域选择上存在显著差异($P < 0.05$)。其中,情景 2(气候稳定性设为保护目标)表现最优,能有效识别并优先保护气候稳定性较高的区域,情景 3(气候稳定性作为成本因素)和情景 1(基础情景)次之,而情景 4(气候稳定性作为边界条件)表现最不理想(图 2)。在保护成本控制方面,情景 1 和情景 2 无显著差异($P = 0.386$),但与情景 3 和情景 4 相比,差异显著($P < 0.05$),但均显著优于情景 3 和情景 4($P < 0.05$)。具体而言,情景 4 在最小化人类足迹方面表现最佳,情景 2 和情景 1 次之,情景 3 表现最差。就物种栖息地保护效果而言,所有情景均展现出较高的保护覆盖率,情景 3 以 83.4% 的覆盖率位居首位,情景 2(78.6%)和情景 1(77.5%)次之,情景 4(72.3%)相对较低(图 2)。

综合分析表明,情景 2 在气候适应性、保护成本控制和物种保护三者间实现了最佳平衡,不仅优先保护了气候稳定区域,同时在物种栖息地保护和人类足迹最小化方面也表现良好。这一结果为气候变化背景下制定兼具时效性和可持续性的生物多样性保护策略提供了重要参考,有助于提升保护规划的长期有效性。

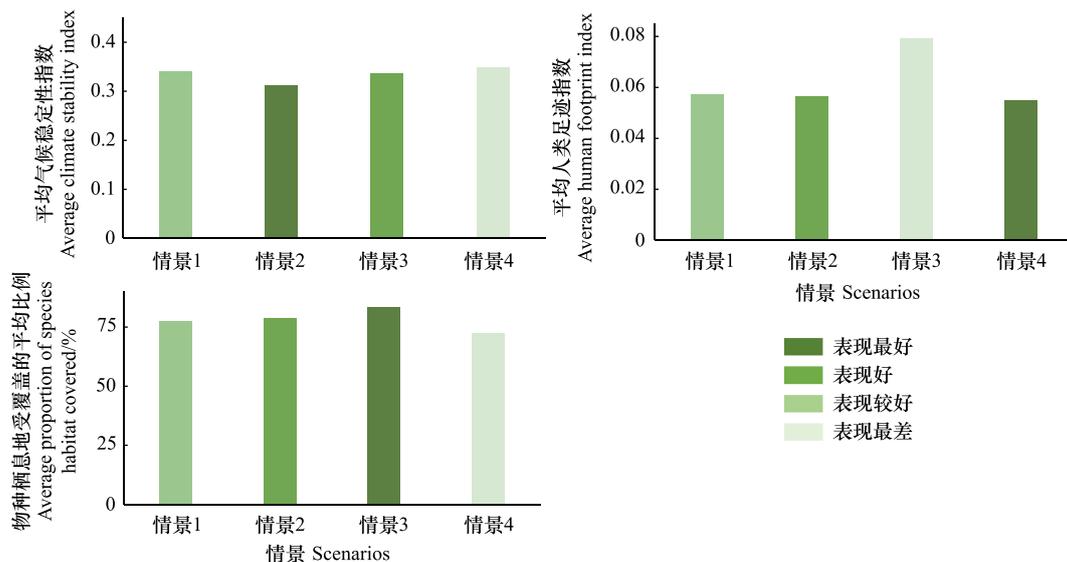


图 2 不同情景在选择气候稳定区域、最小化保护成本和最大程度覆盖物种的表现

Fig.2 Performance of different scenarios in selecting climate-stable areas, minimizing conservation costs, and maximizing species coverage

2.2 保护优先区

本研究通过整合当前与未来保护需求,确定了西藏生物多样性的保护优先区域。情景 1(当前保护优先区)和情景 2(气候适应优先区)的重叠区域面积达 28.4 万 km^2 (占西藏总面积 23.6%),主要分布于喜马拉雅东部和羌塘高原(图 3)。这些区域兼具当前生物多样性价值与未来气候适应潜力,应被视为生物多样性保护的重要区域,优先纳入自然保护区体系的规划与实施中。

2.3 保护优先区的受保护情况

研究结果显示,西藏现有自然保护区对保护优先区的覆盖程度存在明显不足。具体而言,当前自然保护区体系对情景 1(不考虑气候稳定性)优先区的覆盖率为 57.0%,对情景 2(气候适应优先区)的覆盖率为 58.8%,而对两者重叠的关键区域(兼具当前和未来保护价值)的覆盖率仅为 54.3%(图 3 和图 4)。这一数据表明,近一半具有最高保护价值的区域尚未纳入保护范围,保护空缺问题十分突出。特别是那些同时具备当前生物多样性价值和未来气候适应潜力的关键区域,其保护缺口比例高达 45.7%,这一现象在喜马拉雅东部和羌塘高原等保护优先区尤为明显。为此建议,未来保护地网络扩展应重点填补这些关键区域的保护空缺,以

实现兼顾当前保护需求和长期气候适应能力的综合保护目标。

3 讨论

将气候变化纳入保护规划是制定未来保护策略的有效途径。以往研究通常将气候变化设定为保护目标^[15-16]或保护成本^[17],为气候因子融入自然保护地规划提供了重要指导。然而,这些研究往往缺乏对不同规划方法的系统比较,可能导致规划结果并非最优选择。因此,在不同区域的保护地规划实践中,有必要对比将气候变化纳入规划的不同方法,并统筹考虑生物多样性目标与保护成本,以确定最优保护策略。

本研究系统比较了三种将气候稳定性纳入保护规划的方法,旨在探讨气候变化背景下实现生物多样性长期有效保护的途径。分析显示,将气候稳定性设定为保护目标(情景2)在筛选气候稳定区域、最小化保护成本以及保护物种栖息地方面表现更优,是制定保护策略的较优选择。然而,Arafteh-Dalmau 等人的研究指出,将气候变化作为边界条件处理,可在选择气候变化缓慢区域和最小化保护成本方面取得更综合的效益^[18]。这种差异可能源于研究区域特性、所采用的气候变化数据、成本计算方法以及具体保护目标设定的不同^[19-20]。因此,在实际保护规划中,适宜的保护策略应通过比较不同规划方法来确定。

本研究识别出的西藏保护优先区主要分布于喜马拉雅山东部、珠穆朗玛峰区域以及羌塘高原。通过与我国划定的 35 个生物多样性保护优先区进行对比,发现喜马拉雅山东部及珠穆朗玛峰区域与本研究的识别结果高度一致,但羌塘高原未被纳入国家优先区范围^[36]。羌塘高原作为西藏的关键气候稳定区域(图 2),不仅是青藏高原特有物种的重要栖息地^[59-60],还对未来防风固沙生态系统服务具有关键作用^[53]。这表明羌塘高原的保护价值在现有保护策略中可能被低估。因此,建议在未来的保护规划中优先考虑将羌塘高原纳入自然保护地体系。

保护策略的制定应优先关注那些对维持现有生物多样性和增强未来气候变化适应能力均具有关键作用的区域。在西藏,约 28.4 万 km² 的区域被识别为兼具当前生物多样性价值和未来气候适应潜力的保护优先区。然而,约一半区域尚未被现有自然保护地覆盖。因此,建议以本研究识别的保护优先区为基础,在喜马拉雅山东部、昌都地区北部以及班公错等关键区域,通过新建或扩建自然保护地来优化现有自然保护地网络,从而提升保护成效。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Sections. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, 2023.
- [2] Chen I C, Hill J K, Ohlemüller R, Roy D B, Thomas C D. Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. *Science*, 2011, 333(6045): 1024-1026.

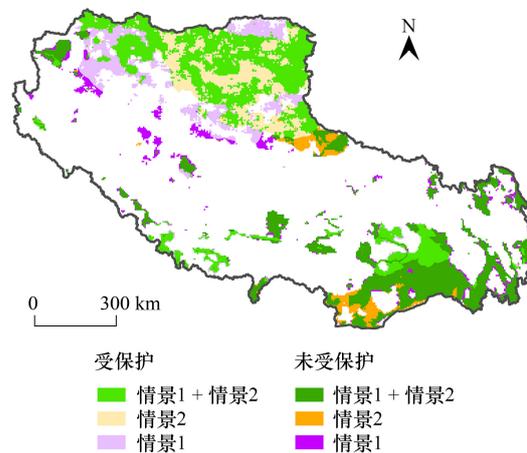


图 3 保护优先区空间格局

Fig.3 Spatial pattern of conservation priority areas

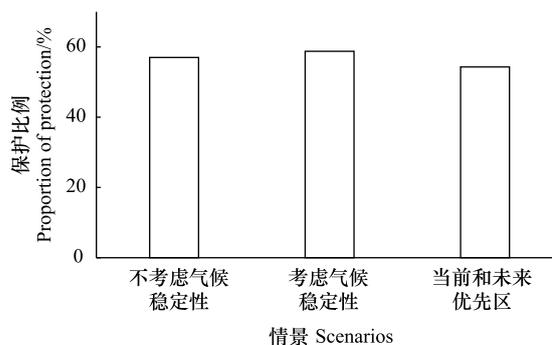


图 4 自然保护地对保护优先区的覆盖比例

Fig.4 Coverage percentage of protected areas to conservation priority areas

- [3] Poloczanska E S, Brown C J, Sydeman W J, Kiessling W, Schoeman D S, Moore P J, Brander K, Bruno J F, Buckley L B, Burrows M T, Duarte C M, Halpern B S, Holding J, Kappel C V, O'connor M I, Pandolfi J M, Parmesan C, Schwing F, Thompson S A, Richardson A J. Global imprint of climate change on marine life . *Nature Climate Change*, 2013, 3(10) : 919-925.
- [4] Elsen P R, Saxon E C, Simmons B A, Ward M, Williams B A, Grantham H S, Kark S, Levin N, Perez-Hammerle K V, Reside A E, Watson J E M. Accelerated shifts in terrestrial life zones under rapid climate change. *Global Change Biology*, 2022, 28(3) : 918-935.
- [5] Warren R, Price J, Graham E, Forstenhaeusler N, VanDerWal J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5°C rather than 2°C. *Science*, 2018, 360(6390) : 791-795.
- [6] IPCC. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp 3-33, doi:10.1017/9781009325844001, 2022.
- [7] Pörtner H O, Scholes R J, Agard J, Archer E, Arneth A, Bai X, Barnes D, Burrows M, Chan L, Cheung W L, Diamond S, Donatti C, Duarte C, Eisenhauer N, Foden W, Gasalla M A, Handa C, Hickler T, Hoegh-Guldberg O, Ichii K, Jacob U, Inzarov G, Kiessling W, Leadley P, Leemans R, Levin L, Lim M, Maharaj S, Managi S, Marquet P A, McElwee P, Midgley G, Oberdorff T, Obura D, Osman E, Pandit R, Pascual U, Pires A P F, Popp A, ReyesGarcía V. Scientific outcome of the IPBES-IPCC co-sponsored workshop on biodiversity and climate change; IPBES secretariat, Bonn, Germany. 2021.
- [8] Jones K R, Watson J E M, Possingham H P, Klein C J. Incorporating climate change into spatial conservation prioritisation: a review. *Biological Conservation*, 2016, 194: 121-130.
- [9] Brambilla M, Rubolini D, Appukuttan O, Calvi G, Karger D N, Kmecl P, Mihelić T, Sattler T, Seaman B, Teufelbauer N, Wahl J, Celada C. Identifying climate refugia for high-elevation Alpine birds under current climate warming predictions. *Global Change Biology*, 2022, 28(14) : 4276-4291.
- [10] Beaumont L J, Esperón-Rodríguez M, Nipperess D A, Wauchope-Drumm M, Baumgartner J B. Incorporating future climate uncertainty into the identification of climate change refugia for threatened species. *Biological Conservation*, 2019, 237: 230-237.
- [11] Condro A A, Prasetyo L B, Rushayati S B, Santikayasa I P, Iskandar E. Measuring metrics of climate change and its implication on the endangered mammal conservation in the leuser ecosystem. *Frontiers in Environmental Science*, 2021, 9: 713837.
- [12] Hanson J O, Marques A, Veríssimo A, Camacho-Sanchez M, Velo-Antón G, Martínez-Solano Í, Carvalho S B. Conservation planning for adaptive and neutral evolutionary processes. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(11) : 2159-2169.
- [13] Reside A E, Butt N, Adams V M. Adapting systematic conservation planning for climate change. *Biodiversity and Conservation*, 2018, 27(1) : 1-29.
- [14] Brito-Morales I, Schoeman D S, Everett J D, Klein C J, Dunn D C, García Molinos J, Burrows M T, Buenafe K C V, Dominguez R M, Possingham H P, Richardson A J. Towards climate-smart, three-dimensional protected areas for biodiversity conservation in the high seas. *Nature Climate Change*, 2022, 12(4) : 402-407.
- [15] 苏尚柯, 杜建国, 丁丽可, 谭红建, 陈彬, 胡文佳. 气候速度影响下中国周边海域鲨鱼保护优先区识别. *生态学报*, 2023, 43(22) : 9218-9231.
- [16] Doxa A, Kamarianakis Y, Mazaris A D. Spatial heterogeneity and temporal stability characterize future climatic refugia in Mediterranean Europe . *Global Change Biology*, 2022, 28(7) : 2413-2424.
- [17] Brito-Morales I, Schoeman D S, Everett J D, Klein C J, Dunn D C, Molinos J G, Burrows M T, Buenafe K C V, Dominguez R M, Possingham H P, Richardson A J. Towards climate-smart, three-dimensional protected areas for Biodiversity conservation in the high seas . *Nature Climate Change*, 2022, 12(4) : 402-407.
- [18] Arafeh-Dalmau N, Brito-Morales I, Schoeman D S, Possingham H P, Klein C J, Richardson A J. Incorporating climate velocity into the design of climate-smart networks of marine protected areas . *Methods in Ecology and Evolution*, 2021, 12(10) : 1969-1983.
- [19] de Souza Lima-Ribeiro M, Felizola Diniz-Filho J A, Barberi M. Climate stability and the current patterns of terrestrial vertebrate species richness on the Brazilian Cerrado. *Quaternary International*, 2010, 222(1/2) : 230-236.
- [20] Herrando-Moraira S, Nualart N, Galbany-Casals M, Garcia-Jacas N, Ohashi H, Matsui T, Susanna A, Tang C Q, López-Pujol J. Climate Stability Index maps, a global high resolution cartography of climate stability from Pliocene to 2100 . *Scientific Data*, 2022, 9: 48
- [21] Du Z B, Li L Q, Zhang J Y, Shi Z L, Chen X Q, Kang B Y, Meng W Q, Li H Y. Another essential dimension of priorities: spatial heterogeneity and temporal stability of climate refugia. *Global Ecology and Conservation*, 2024, 49: e02771.
- [22] Terribile L C, Lima-Ribeiro M S, Araujo M B, Biazio N, Collevatti R G, Dobrovolski R, Franco A A, Guilhaumon F, Lima J d S, Murakami D M, Nabout J C, de Oliveira G, de Oliveira L K, Rabelo S G, Rangel T F, Simon L M, Soares T N, de Campos Telles M P, Felizola Diniz-Filho J A. Areas of Climate Stability of Species Ranges in the Brazilian Cerrado; Disentangling Uncertainties Through Time. *Natureza & Conservacao*,

- 2012, 10(2): 152-159.
- [23] Tang C Q, Matsui T, Ohashi H, Dong Y F, Momohara A, Herrando-Moraira S, Qian S H, Yang Y C, Ohsawa M, Luu H T, Grote P J, Krestov P V, LePage B, Werger M, Robertson K, Hobohm C, Wang C Y, Peng M C, Chen X, Wang H C, Su W H, Zhou R, Li S F, He L Y, Yan K, Zhu M Y, Hu J, Yang R H, Li W J, Tomita M, Wu Z L, Yan H Z, Zhang G F, He H, Yi S R, Gong H D, Song K, Song D, Li X S, Zhang Z Y, Han P B, Shen L Q, Huang D S, Luo K, López-Pujol J. Identifying long-term stable refugia for relict plant species in East Asia. *Nature Communications*, 2018, 9: 4488.
- [24] Brown S C, Wigley T M L, Otto-Bliesner B L, Fordham D A. StableClim, continuous projections of climate stability from 21000 BP to 2100CE at multiple spatial scales. *Scientific Data*, 2020, 7: 335.
- [25] Abellón P, Svenning J C. Refugia within refugia-patterns in endemism and genetic divergence are linked to Late Quaternary climate stability in the Iberian Peninsula. *Biological Journal of the Linnean Society*, 2014, 113(1): 13-28.
- [26] Sandel B, Monnet A C, Govaerts R, Vorontsova M. Late Quaternary climate stability and the origins and future of global grass endemism. *Annals of Botany*, 2017, 119(2): 279-288.
- [27] Fordham D A, Brown S C, Wigley T M L, Rahbek C. Cradles of diversity are unlikely relics of regional climate stability. *Current Biology*, 2019, 29(10): R356-R357.
- [28] Fine P V A. Ecological and Evolutionary Drivers of Geographic Variation in Species Diversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, Vol 46. 2015: 369-392.
- [29] Fjeldsa J, Lovett J C. Geographical patterns of old and young species in African forest Biota: The significance of specific montane areas as evolutionary centres. *Biodivers Conserv*, 1997, 6(3): 325-346.
- [30] Cowling R M, Potts A J, Bradshaw P L, Colville J, Arianoutsou M, Ferrier S, Forest F, Fyllas N M, Hopper S D, Ojeda F, Proches S, Smith R J, Rundel P W, Vassilakis E, Zutta B R. Variation in plant diversity in mediterranean-climate ecosystems: the role of climatic and topographical stability. *Journal of Biogeography*, 2015, 42(3): 552-564.
- [31] Sundaram M, Donoghue M J, Farjon A, Filer D, Mathews S, Jetz W, Leslie A B. Accumulation over evolutionary time as a major cause of Biodiversity hotspots in conifers. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2019, 286(1912):
- [32] Dinerstein E, Vynne C, Sala E, Joshi A R, Fernando S, Lovejoy T E, Mayorga J, Olson D, Asner G P, Baillie J M, Burgess N D, Burkart K, Noss R F, Zhang Y P, Baccini A, Birch T, Hahn N, Joppa L N, Wikramanayake E. A global deal for nature: guiding principles, milestones, and targets. *Science Advances*, 2019, 5(4): eaaw2869.
- [33] CBD. Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (CBD/COP/DEC/15/4). 2022.
- [34] 邓涛, 吴飞翔, 苏涛, 周浙昆. 青藏高原——现代生物多样性形成的演化枢纽. *中国科学: 地球科学*, 2020, 50(2): 177-193.
- [35] 钟祥浩, 刘淑珍, 王小丹, 朱万泽, 李祥妹, 杨俐. 西藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *山地学报*, 2006, 24(2): 129-136.
- [36] 中华人民共和国生态环境部. 关于发布《中国生物多样性保护优先区域范围》的公告. 北京: 中华人民共和国生态环境部. 2015.
- [37] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403(6772): 853-858.
- [38] 杜军, 黄志诚, 次旺顿珠, 德庆卓嘎, 周刊社. 气候变化背景下青藏高原地区界限温度时空变化特征. *中国农业气象*, 2024, 45(02): 111-123.
- [39] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405(6783): 243-253.
- [40] Ardron J A, Possingham, H P, and Klein, C J. *Marxan Good Practices Handbook, Version 2*. Pacific Marine Analysis and Research Association Victoria, BC, Canada, 2010, 165 pages. www.pacmara.org.
- [41] IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2021-3. 2021. Available at <https://www.iucnredlist.org>.
- [42] 生态环境部, 中国科学院. 中国生物多样性红色名录—脊椎动物卷(2020). 北京: 生态环境部办公厅. 2023.
- [43] 生态环境部, 中国科学院. 中国生物多样性红色名录—高等植物卷(2020). 北京: 生态环境部办公厅. 2023.
- [44] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生动物名录. 北京: 国家林业和草原局. 2021.
- [45] 国家林业和草原局, 农业农村部. 国家重点保护野生植物名录. 北京: 国家林业和草原局. 2021.
- [46] Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J G, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Lu F, Wang X K, Daily G C, Ouyang Z Y. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(7): 1601-1606.
- [47] 中国科学院昆明植物研究所. 中国植物物种科学数据库. db.kib.ac.cn/eflora/Default.aspx. 2017.
- [48] 费梁, 叶昌媛, 江建平. 中国两栖动物及其分布彩色图鉴. 四川科学技术出版社. 2012.
- [49] BirdLife International and NatureServe. Bird Species Distribution Maps of the World. Available at <http://datazone.birdlife.org>. Accessed January 15, 2017.

- [50] Earth Big Data and Decision Support Systems. Available at: <https://portal.casearth.cn/>. 2023.
- [51] Fick S.E, Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37 (12): 4302-4315.
- [52] Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, Taylor K E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [53] Meng N, Yang Y-Z, Zheng H, Li R-N. Climate change indirectly enhances sandstorm prevention services by altering ecosystem patterns on the Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(7): 1711-1724.
- [54] Zhu Y Y, Yang S N. Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 2020, 11(3): 239-251.
- [55] Venter O, Sanderson E W, Magrath A, Allan J R, Beher J, Jones K R, Possingham H P, Laurance W F, Wood P, Fekete B M, Levy M A, Watson J E M. Global terrestrial human footprint maps for 1993 and 2009. *Scientific Data*, 2016, 3: 160067.
- [56] Sanderson E W, Jaiteh M, Levy M A, Redford K H, Wannebo A V, Woolmer G. The human footprint and the last of the wild. *BioScience*, 2002, 52(10): 891.
- [57] 黄萍, 徐卫华, 范馨悦, 韩梅. 青藏高原珍稀濒危哺乳动物保护优先区评价与空缺分析. *环境保护科学*, 2022, 48(03): 1-6.
- [58] 张路, 欧阳志云, 肖焱, 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.
- [59] 胡一鸣, 李玮琪, 蒋志刚, 刘务林, 梁健超, 林宜舟, 黄志文, 覃海华, 金崑, 胡慧建. 羌塘、可可西里无人区野牦牛种群数量和分布现状. *生物多样性*, 2018, 26(02): 185-190.
- [60] 蒋志刚, 李立立, 胡一鸣, 胡慧建, 李春旺, 平晓鸽, 罗振华. 青藏高原有蹄类动物多样性和特有性: 演化与保护. *生物多样性*, 2018, 26(02): 158-170.