

DOI: 10.20103/j.stxb.202310082156

申宇,程浩,刘国华,邓红兵,苏旭坤.基于生物多样性和生态系统服务的青藏高原保护优先区和保护空缺识别.生态学报, 2024, 44(11): 4507-4516.

Shen Y, Cheng H, Liu G H, Deng H B, Su X K. Conservation gaps and priorities on the Qinghai-Tibetan Plateau based on biodiversity and ecosystem services. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(11): 4507-4516.

基于生物多样性和生态系统服务的青藏高原保护优先区和保护空缺识别

申宇^{1,2}, 程浩^{1,2}, 刘国华^{1,2}, 邓红兵^{1,2}, 苏旭坤^{1,2,*}

1 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

2 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 101408

摘要: 协同生物多样性保护和生态系统服务功能维持对制定系统性保护规划具有重要意义。研究以青藏高原为研究区, 应用 Maxent 模型模拟了重点植物的空间分布, 结合世界保护联盟(IUCN)重点动物空间分布数据和生态系统服务空间分布, 利用 Zonation 模型依次识别了基于单一因素的保护优先区以及集成生物多样性和生态系统服务的保护优先区, 评估了青藏高原现有自然保护地对保护优先区、重要物种及生态系统服务的保护状况和保护空缺。结果表明: (1) 青藏高原保护优先区保护价值呈现由东南向西北递减趋势, 优先区主要分布在青藏高原东南缘喜马拉雅山地、雅鲁藏布江中游河谷及横断山区等区域, 生物多样性保护优先区和生态系统服务保护优先区分布略有差异, 存在 43.2% 的空间重叠; (2) 在重要物种保护上, 自然保护地对两栖动物的保护率最高, 平均保护了 38.2%, 哺乳动物次之(24%), 爬行动物的保护率较低, 仅为 10.2%。对生态系统服务功能覆盖率分别是 44.1% (防风固沙)、27.1% (水源涵养)、22.3% (土壤保持)、17.1% (碳固定) 和 16.6% (洪水调蓄); (3) 自然保护地对研究识别的保护优先区存在保护空缺, 仅覆盖了 26.8% 的集成保护优先区, I 级、II 级和 III 级优先区保护空缺面积占青藏高原面积的 7.2%、6.9% 和 7.7%。研究结果可为青藏高原以国家公园为主体的自然保护地体系优化提供科学依据与理论支撑。

关键词: 生物多样性保护; 生态系统服务; 青藏高原; 保护空缺; 保护优先区

Conservation gaps and priorities on the Qinghai-Tibetan Plateau based on biodiversity and ecosystem services

SHEN Yu^{1,2}, CHENG Hao^{1,2}, LIU Guohua^{1,2}, DENG Hongbing^{1,2}, SU Xukun^{1,2,*}

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

2 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China

Abstract: The intensification of human activities and climate change has posed unprecedented challenges to global biodiversity and ecosystems. The loss of biodiversity can impact the functionality and stability of ecosystems, leading to a decline in the supply of ecosystem services, threatening the health and sustainability of global ecosystems. Identifying priority areas, especially areas that are crucial for biodiversity and ecosystem services is an effective way to promote successful conservation strategies and can be applied to the systematic conservation planning. Therefore, the coordination of biodiversity conservation and ecosystem services in systematic conservation planning is of great importance. The Qinghai-Tibetan Plateau, which provides various ecosystem services, serves as an ecological security barrier not only for China but also for the entire Asia. It also stands as one of the most biologically diverse regions in the world. Using the QTP as a case,

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0402)

收稿日期: 2023-10-08; 网络出版日期: 2024-03-18

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

this study firstly employed the Maxent model to simulate the spatial distribution of key plant species. Additionally, utilizing these modeled distribution data of plants, spatial distribution data of key animals from the IUCN and ecosystem services, we identified the individual conservation priorities of biodiversity and ecosystem services and integrated priority conservation areas considering both biodiversity and ecosystem services using Zonation model. Furthermore, we assessed the protection status and gaps of the existing protected areas (PAs) on the QTP concerning key species, ecosystem services and priority areas. The results showed that: (1) Conservation priority areas on the QTP presented a decreasing trend in conservation value from southeast to northwest, primarily located in regions like the southeastern edge of the plateau, the Himalayan mountains, the middle reaches of the Yarlung Zangbo River, and the Hengduan Mountains. There were slight differences in the distribution of areas prioritized for biodiversity conservation and ecosystem services, resulting in a 43.2% spatial overlap; (2) PAs provided the highest protection rates for amphibians (average range coverage of 38.2%), followed by mammals (24%), and reptiles with the least coverage (10.2%). Ecosystem services coverage rates were as follows: sandstorm prevention (44.1%), water retention (27.1%), soil conservation (22.3%), carbon storage (17.1%), and flood regulation (16.6%). (3) PAs covered only 26.8% of the integrated priority conservation areas, with protection gaps in levels I, II, and III priority areas accounting for 7.2%, 6.9%, and 7.7% of the QTP's total area, respectively. This study can provide scientific basis and theoretical support for the optimization of protected area system with national parks as the main component on the QTP.

Key Words: biodiversity conservation; ecosystem services; the Qinghai-Tibetan Plateau; conservation gaps; conservation priority

人类活动和气候变化的加剧给全球生物多样性和生态系统带来了前所未有的挑战,而生物多样性的丧失则会影响生态系统的功能和稳定性,导致生态系统服务供给下降,威胁全球生态系统的健康和可持续性^[1-3]。建立自然保护区是保护生物多样性,维持生态系统服务的重要手段^[4]。目前,全球已建立了 295574 个自然保护区,保护地面积覆盖了 16% 的陆地和 8% 的海洋^[5],但仍有超过一半的受威胁物种没有得到有效的保护,生物多样性继续下降^[6-7]。2021 年,《生物多样性公约》缔约方大会第十五次会议(COP15)制定了新的全球生物多样性框架,强调到 2030 年至少 30% 的对生物多样性保护及生态系统功能和服务具有重要意义的区域得到有效保护和管理^[8]。随着全球可持续发展目标的提出和发展,自然保护区的保护目标也逐渐由保护物种栖息地和生态系统扩展到促进社区居民生计、提高人类福祉、缓解气候变化等多个方面^[4, 9]。因此,在有限的资金和管理条件下,保护地的建设应考虑生物多样性保护和生态系统服务等多种因素,以确保保护成效实现最大化^[1, 10]。

保护优先区识别为完善生态保护网络和保护地管理提供了新的思路。它能够综合考虑各种成本因素,利用与生态学相关的计算工具识别重要的生态区域,是系统保护规划的重要手段^[11-12]。传统研究主要将珍稀濒危物种以及其栖息地或者典型生态系统作为评估保护优先区的重要指标,从而识别优先区和保护空缺^[13-17],近年来,一些学者开始强调人类福祉的重要性,将生物多样性保护和生态系统服务相结合,划定生态保护优先区域,并和现有自然保护区相结合,评价保护成效^[1, 18-19]。在实际研究和应用中,保护优先区选择常因研究区域、尺度等产生差异,全球范围的研究由于精度限制往往无法满足特定区域需求^[20],仍然有必要针对重点区域开展更加深入的研究。

青藏高原被誉为“地球第三极”,是中国乃至亚洲重要的生态安全屏障^[21]。高原拥有独特的地理格局和多样的生态系统,提供水源涵养、土壤保持、防风固沙、碳固定等多种生态系统服务,同时也是生物多样性保护的重点地区之一^[21-23]。从 1963 年青藏高原建立第一个自然保护区白河自然保护区以来^[24],青藏自然保护区的类型、数量和面积都得到了迅速发展。近年来,国内外学者在青藏高原自然保护区对生态系统及物种保护、减少人类活动等方面开展了相关研究^[25-27]。在青藏高原生物多样性保护优先区的研究方面,叶锦等基于濒危植物识别了喜马拉雅东南部生物多样性保护优先区网络^[16],也有相关研究对青藏高原全域维管束植物、

药用植物和珍稀濒危哺乳动物的分布和保护进行了系统性的研究^[28-30]。在生态系统服务保护优先区识别方面, Li 等采用代表性-脆弱性框架识别评估了青藏高原生态系统服务的优先区^[31]。但大多数的研究集中在单一保护优先区或者热点区域的优先区识别, 综合生态系统服务和重要物种的保护优先区研究还较少, 且缺乏对整个青藏高原自然保护地对优先区的保护成效和空缺分析。为此, 本研究通过收集模拟青藏高原珍稀濒危及重点保护动植物空间分布, 结合水源涵养、土壤保持、防风固沙、碳固定、洪水调蓄五种生态系统服务, 利用 Zonation 模型识别青藏高原保护优先区, 并与高原已建自然保护地进行空间叠加分析, 旨在探究以下科学问题: (1) 青藏高原的集成生物多样性和生态系统服务的保护优先区空间分布和生态代表性如何? (2) 自然保护地对优先区保护现状如何, 存在哪些保护空缺? 本研究识别的生物多样性和生态系统服务保护优先区可以进一步明确青藏高原重要生态保护区域, 通过结合保护地开展保护空缺评估, 提出优化策略, 为青藏高原自然保护地体系优化和国家公园建设提供理论支撑和科学参考。

1 研究区概况

青藏高原 (26°00′12″—39°46′50″N, 73°18′52″—104°46′59″E) 总面积约 $2.56 \times 10^6 \text{ km}^2$, 范围涉及中国 6 个省(自治区), 面积占中国陆域积的 26.8%, 整个高原平均海拔超过 4000 m, 是世界上平均海拔最高的高原^[32-33] (图 1)。其独特的地理位置和气候条件孕育了复杂多样的生态系统和独特的生物多样性^[23]。青藏高原横跨了两个全球生物多样性热点区域, 即中国西南山区和喜马拉雅山区^[34], 拥有 14634 种维管植物和 1763 种脊椎动物, 且珍稀濒危物种数量众多, 是中国生态保护的重要区域^[23, 29]。截至目前, 中国政府已经在青藏高原建立了 407 处自然保护地, 171 处自然保护区, 总面积约为 $90.3 \times 10^4 \text{ km}^2$, 有效地保护了高原重脆弱的生态系统和重要物种^[23]。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究主要聚焦重要物种的生物多样性保护情况, 以《IUCN 红色名录》中的极危、濒危、易危和近危等级的物种以及《国家重点保护动物名录》(2021)、《国家重点保护野生植物名录》(2021) 中的国家一级以及国家二级保护物种作为青藏高原的重要物种。陆生脊椎动物的分布数据主要来自 IUCN^[35] 及 BirdLife International^[36] 数据。维管束植物地理分布点位数据来 GBIF (Global Biodiversity Information Facility) 数据库 (<http://www.gbif.org/>)、BIEN (Botanical Information and Ecology Network) (<https://bien.nceas.ucsb.edu>) 以及中国数字植物标本馆 (<https://www.cvh.ac.cn/>), 共包 4913 个含有经纬度分布信息的物种分布点数据, 而后经 Maxent 模型模拟每种维管束植物的空间分布。筛选后生物多样性数据共包含哺乳动物 70 种、鸟类 77 种、爬行动物 36 种、两栖动物 32 种、维管束植物 442 种共重要保护物种 657 种。生态系统服务主要包括 2015 年水源涵养、土壤保持、防风固沙、碳固定、洪水调蓄等五种生态系统服务, 数据来自第二次青藏高原综合科学考察研究任务三生态系统与生态安全。自然保护地数据来自国家林业与草原局。土地覆盖数据来源于武汉大学全国 30 m 土地覆盖数据集^[37], 用于后续划分不同生态系统, 识别不同生态系统的保护优先区占比。Maxent 模型所需的环境变量详细数据及分辨率见表 1。

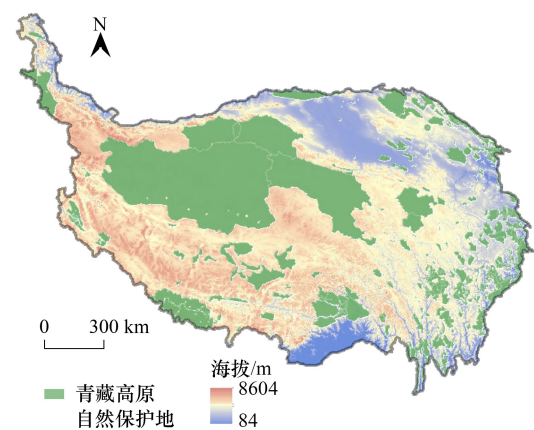


图 1 青藏高原海拔及自然保护地空间分布

Fig.1 The elevation and spatial distribution of protected areas on the Qinghai-Tibetan Plateau

表 1 环境变量主要数据来源
Table 1 Summary of environmental variables

数据名称 Data	类型/精度 Format/Resolution	时间范围 Time period	数据来源 Data source
气候因子 (Bio1—Bio19) Bioclimatic variables (Bio1—Bio19)	栅格/1 km	1970—2000 年	WorldClim 2.1
海拔 Elevation	栅格/1 km	—	WorldClim 2.1
坡度 (由海拔计算所得) Slope (Derived from elevation)	栅格/1 km	—	WorldClim 2.1
坡向 (由海拔计算所得) Aspect (Derived from elevation)	栅格/1 km	—	WorldClim 2.1
地表土壤水分 Surface soil moisture	栅格/1 km	2000—2020 年	国家青藏高原科学数据中心 ^[38]
土壤 pH 值 Soil PH	栅格/1 km	—	SoilGrid
土壤容重 Bulk density	栅格/1 km	—	SoilGrid
土壤黏土含量 Clay content	栅格/1 km	—	SoilGrid
土壤粉砂含量 Sand content	栅格/1 km	—	SoilGrid
土壤有机碳 Soil organic carbon	栅格/1 km	—	SoilGrid

2.2 研究方法

2.2.1 重要保护物种空间分布提取

陆生脊椎动物空间分布数据来自 IUCN 数据库,但为了更准确的反映物种的空间分布情况,我们参考 IUCN 提供的每个物种的栖息地偏好和海拔分布范围,只选取栖息地偏好的生态系统和海拔范围内的空间分布作为最终脊椎动物的分布范围,进一步剔除了不适宜生境^[39],同时将矢量空间分布数据转化成分辨率为 1 km 的栅格数据。由于缺乏植物空间分布数据,本研究采用近年来广泛应用于物种生境模拟研究的 Maxent 模型^[40],基于青藏高原 442 种维管植物的空间分布点位信息与环境变量间的函数关系,模拟青藏高原各重要维管植物的适宜生境。环境变量采用 Spearman 相关性分析来筛选环境因子,对相关性>0.7 的因子予以剔除,最终筛选出 13 个环境变量(bio3 等温性、bio4 温度季节性、bio8 最湿季均温、bio12 年降水量、bio14 最干月降水量、bio15 降水季节性、bio19 最冷季降水量、海拔、坡度、坡向、地表土壤水分、土壤黏土含量、土壤粉砂含量)用于生境模拟。使用交叉验证来评价每个物种的适宜生境模型,每个物种重复迭代 10 次,通过计算每个模型的 ROC(receiver operating characteristic) 曲线下的面积 AUC(area under the receiver operating characteristic curve)来评价模型的表现,AUC 值越高模拟效果越好,一般 $AUC \geq 0.7$ 即模型表现良好^[41]。为了进一步提取植物潜在空间分布,将“10 percentile 存在阈值”作为阈值,将 Maxent 模型模拟的每个物种植物适宜生境结果划定为二元分布图,来代表重点保护植物的空间分布区域^[15]。

2.2.2 Zonation 优先区识别

本研究采用 Zonation 5 v1.0^[42] 模型开展青藏高原保护优先区识别。Zonation 可以通过连通性和生物多样性等特征优先逐步移除最没有价值的栅格,识别对物种栖息地、生态系统等重要的区域或者景观,从而得到研究区的保护优先区,实现空间保护规划^[10–11]。模型采用核心区域分区(core area zonation, CAZ) 移除规则,通过收集每个维度分布的较高比例,最大化区域对不同保护类型(生物多样性和生态系统服务)的代表性^[1, 43]。本研究首先对单一生物多样性和生态系统服务为保护对象的保护优先区进行判识,包括陆生脊椎动物、维管束植物、生物多样性(考虑所有重要物种)及生态系统服务保护优先区。其次,研究集成青藏高原重要保护物种空间分布和生态系统服务判识基于两者的综合保护优先区。根据《2020 后全球生物多样性框架初稿》提出的到 2030 年应有效地保护 30% 的具有生态代表性的区域的目标^[8],将保护优先性最高的 30% 区域确定为青藏高原保护优先区,并进一步将保护优先区按照每 10% 划分为三级:Ⅰ级(保护优先值 ≥ 0.9)、Ⅱ级($0.8 \leq$ 保护优先值 < 0.9)、Ⅲ级($0.7 \leq$ 保护优先值 < 0.8)。

2.2.3 保护效率及保护空缺分析

本研究的保护效率和保护空缺分析主要集中在以下两方面。首先,本研究基于空间分析,将识别的不同类型的保护优先区与青藏高原已建自然保护地进行空间叠加,识别每种保护优先区被保护地覆盖的区域,进

行保护效率评估和保护空缺分析。同时,本研究针对前期筛选的重点保护物种和生态系统服务,结合动植物的空间分布范围和生态系统服务功能量进一步对保护地的保护效率进行了评估。

3 结果与分析

3.1 单一因素的保护优先区识别

分别计算模拟了陆生脊椎动物、维管束植物、生物多样性和生态系统服务的保护优先区。陆生脊椎动物的保护优先区主要分布在喜马拉雅山地东部、横断山区、岷山-邛崃山、西昆仑山地、三江源、祁连山脉等地区。维管束植物保护优先区分布较为集中,主要集中在青藏高原东南缘西藏南部、四川西部及云南省部分区域,喜马拉雅山脉、横断山区、岷山-邛崃山、雅鲁藏布江中游河谷等是珍惜濒危植物保护的热点区域。生物多样性保护优先区综合考虑了重点保护动植物的空间分布,优先区主要集中在雅鲁藏布江中游河谷、横断山区、怒江-澜沧江-长江“三江并流区”、柴达木盆地等区域,在祁连山、三江源、冈底斯山等地区也有零星分布。生态系统服务优先区空间分布较生物多样性更加均匀,主要是以藏东南地区和藏北高原等地为主(图2)。

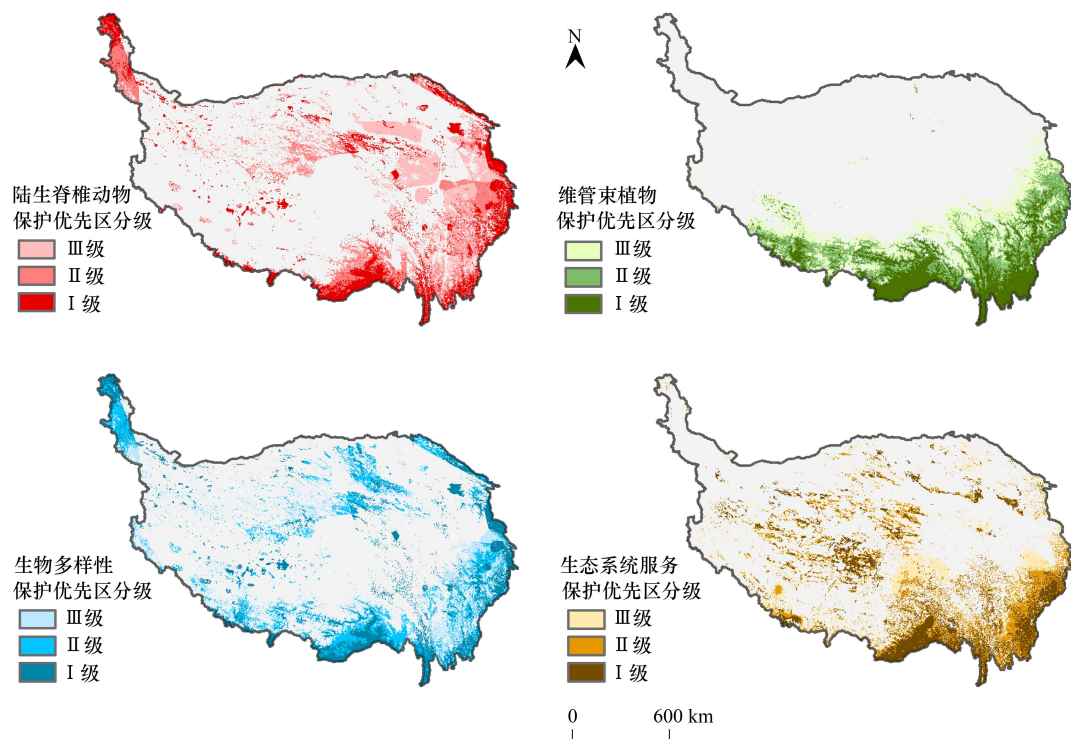


图2 单一类型青藏高原保护优先区

Fig.2 Conservation priorities based on single factors on the Qinghai-Tibetan Plateau

I级:保护优先值 ≥ 0.9 ; II级: $0.8 \leq$ 保护优先值 < 0.9 III级: $0.7 \leq$ 保护优先值 < 0.8

3.2 基于生物多样性保护和生态系统服务的优先区识别

整体来看,青藏高原综合生物多样性和生态系统服务后保护价值由东南向西北递减,综合两者的保护优先区主要集中在青藏高原东南部(图3)。其中I级优先区主要位于雅鲁藏布江中游河谷、横断山区中南段、高黎贡山、怒山、大雪山-沙鲁里山等区域(图3)。从优先区所在的从不同生态系统类型上看,草地生态系统占优先区比例最大,为49.3%,其次是森林生态系统(30.0%)和灌丛生态系统(8.85%)。值得关注的仅有17%的I级优先区为草地生态系统,森林生态系统是I级优先区的主要组成部分,面积超过60%。从空间上看,生物多样性保护优先区和生态系统服务优先区存在空间重叠,二者之间空间重叠比例为43.2%(图4)。

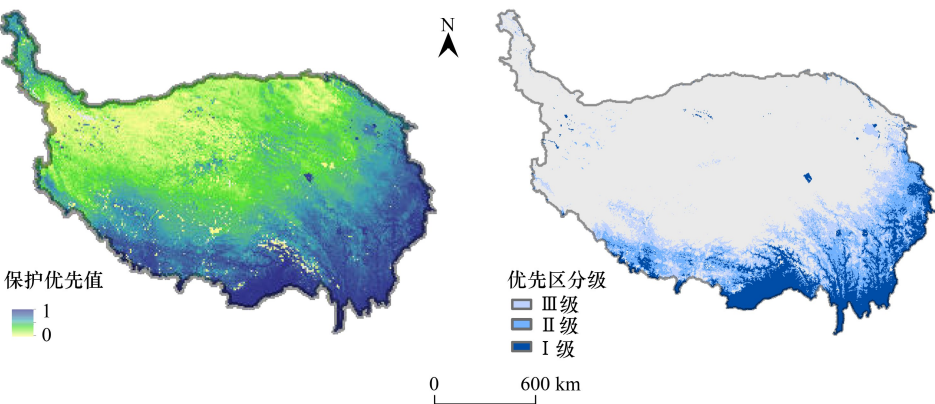


图 3 集成生物多样性保护和生态系统服务的青藏高原保护优先区

Fig.3 Conservation priorities based on both biodiversity conservation and ecosystem services on the Qinghai-Tibetan Plateau

3.3 保护效率及空缺分析

自然保护区对两栖动物的保护效果最好,平均保护了分布范围的 38.2%,其次是哺乳动物(24%)、维管束植物(22.0%)和鸟类(17.0%)。爬行动物的保护率较低,仅为 10.2%,存在较大的保护空缺。保护地对生态系统服务功能覆盖率分别是 27.1%(水源涵养)、22.3%(土壤保持)、44.1%(防风固沙)、17.1%(碳固定)和 16.6%(洪水调蓄)(表 2)。在对保护优先区的覆盖方面,自然保护区分别保护了 35.75%的动物保护优先区和 25.64%植物保护优先区,总体上对生物多样性保护优先区的覆盖率达到了 33.14%,基本和保护地面积占比持平(图 5)。在生态系统服务方面,自然保护区保护了 34.6%的生态系统服务保护优先区。集成生物多样性保护和生态系统服务发现,青藏高原自然保护区覆盖了 26.8%的集成保护优先区,仍有 73.2%的区域未被自然保护区覆盖, I 级、II 级和 III 级优先区保护空缺面积分别为达到了 186378、177640、199031 km²,占青藏高原面积 7.2%、6.9%和 7.7%(图 5)。

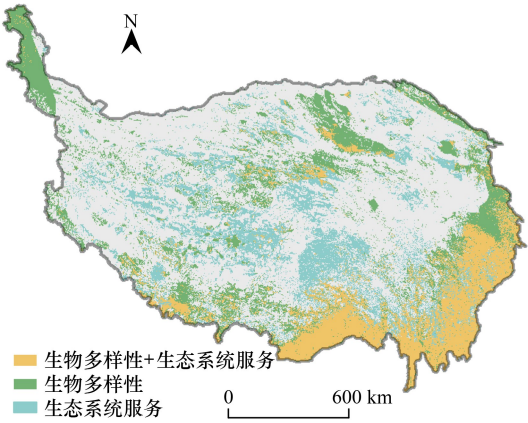


图 4 不同类型保护优先区空间重叠情况

Fig.4 Overlaps between different conservation priorities

表 2 自然保护区对重要物种及生态系统服务覆盖情况

Table 2 Coverage of important species and ecosystem services in protected areas

物种平均覆盖范围 Average range coverage of species/%					生态系统服务量 Ecosystem services coverage/%				
哺乳类 Mammals	鸟类 Birds	两栖 Amphibians	爬行 Reptiles	维管束植物 Plants	水源涵养 Water retention	土壤保持 Soil conservation	防风固沙 Sandstorm prevention	碳固定 Carbon storage	洪水调蓄 Flood regulation
24	17.0	38.2	10.2	22.0	27.1	22.3	41.1	17.1	16.6

4 讨论

4.1 Maxent 模型模拟植物空间分布

以往的研究由于青藏高原植物空间分布数据的缺乏往往基于县域尺度构建全域的植物或珍惜濒危物种空间分布^[44],但这种研究只能反映行政单元上植被的分布和保护情况,在实际保护规划中难以应用。本研究

基于植物空间分布点位数据,利用 Maxent 模型模拟了青藏高原 442 种重点保护植物的潜在空间分布。由于野外调查的限制,本研究无法针对每种植物进行分布数据的实际验证,但是在模拟过程,研究结合《中国植物志》《西藏植物志》《四川植物志》《云南植物志》《横断山区维管束植物》等对物种的分布所在地进行了验证,为模型输出数据的准确性提供了参考。在精度验证方面,本研究使用 AUC 来评价模型的表现。模型模拟结果表明,AUC ≥ 0.9 的维管植物有 311 种,占总物种数的 70.4%; $0.7 \leq \text{AUC} < 0.9$ 的维管植物有 111 种,AUC < 0.7 的维管植物有 20 种,总体模型精度较高。虽然部分维管束植物空间分布点位较少,但 Maxent 模型可以使用较少的物种分布记录进行潜在生境模拟,为保护优先区的识别提供了数据基础。

4.2 青藏高原保护优先区分布格局

识别保护优先区是系统保护规划中的重要环节,它可以合理配置有限的资源,优化保护地体系的布局^[45-46]。本研究识别的保护优先区主要分布在藏东南地区的横断山区和喜马拉雅山脉,与多数研究中青藏高原生物多样性和生态系统服务优先区结果较为一致^[30-31,47]。在生态系统服务功能维护方面,将本研究划定的生态系统服务保护优先区与我国重点生态功能区进行了比较,发现优先区与藏西北羌塘高原荒漠生态功能区、三江源草原草甸湿地生态功能区以及藏东南高原边缘森林生态功能区等都有较好的对应关系,但是在空间分布上更加聚焦。生态系统服务优先区、集成优先区与重点生态功能区三者的空间重叠面积达到青藏高原面积的 8.8% (图 6)。在生物多样性保护方面,本研究划定的生物多样性保护优先区与我国划定的 35 个生物多样性保护优先区也有一定的对应关系,研究识别的集成优先区与我国生物多样性保护优先区域空间重叠面积占青藏高原面积的 16.1% (图 6)。同时,进一步将本研究划定的保护优先区和全球生物多样性保护热点区^[34]及 IUCN 划定的植物多样性中心热点区^[48]进行比较发现,全球水平上划定的热点区域与本研究的保护优先区也有较好的对应关系,且相较于全球的热点区域划分,本研究结果更明确。本研究以珍惜濒危和重点保护动植物空间分布作为识别生物多样性保护优先区的重要依据,虽然不能涵盖所有的物种,但基于识别重要区域的原则,研究仍能够在一定程度上反映生物多样性保护的重要区域^[12]。值得关注的是遗传多样性、系统发育多样性等也是生物多样性的的重要组成部分^[40],未来可以同步纳入到优先区识别中,优化判别结果。

4.3 青藏高原自然保护地保护现状及格局优化

近年来,青藏高原自然保护地的面积和数量增长迅速,面积占比已经超过了青藏高原面积的 30%,是中国自然保护地覆盖比例最高的区域。现有自然保护地对于保护优先区的覆盖体现了自然保护地体系能够在保护生物多样性的同时,提供重要的生态系统服务。但保护空缺分析结果也表明,青藏高原现有自然保护地对本研究识别的保护优先区还存在保护空缺,仅有 26.8%的集成保护优先区在保护地范围内。尤其是 I 级保护优先区,例如喜马拉雅山脉、雅鲁藏布江中游河谷等区域存在大范围的保护空缺,空缺面积达到了 $1.86 \times 10^5 \text{ km}^2$,占到了整个青藏高原面积的 7.2%。这些区域应在后续保护地新建和区域生态保护规划中予以重视,建立相应的自然保护地,在维持生物多样性同时保证生态系统服务供给,例如规划建设雅鲁藏布江大峡谷国家公园、高黎贡山国家公园等。此外,青藏高原自然保护地分布呈现西北范围广、东南面积小的趋势,东南部的保护地虽然大多分布在保护优先区内但规模小且分散,建议整合优化现有保护地,同时开展保护地内外重点区域生态评估,加强保护地之间的连通性。而分布在高原西北部的羌塘国家级自然保护区、三江源国家公园

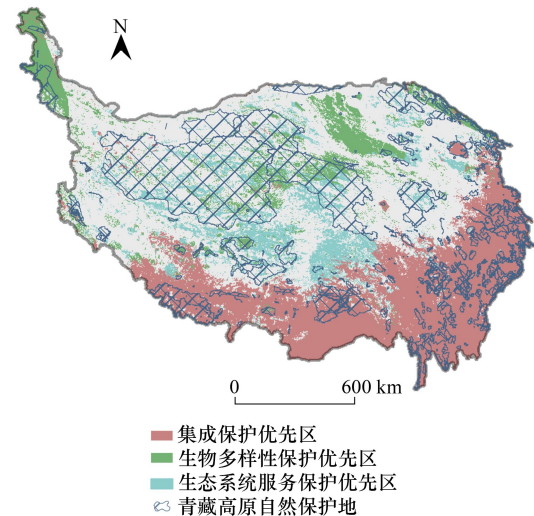


图 5 青藏高原自然保护地及不同类型保护优先区空间分布

Fig.5 The spatial distributions of protected areas and different types of conservation priorities on the Qinghai-Tibetan Plateau

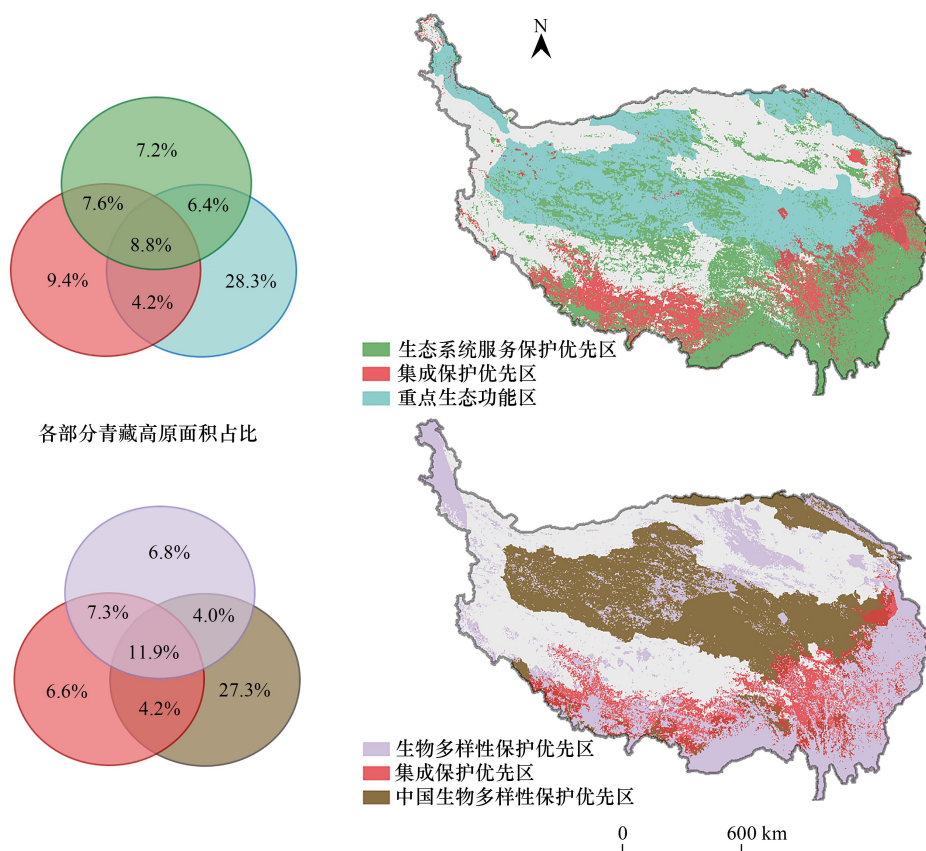


图6 全球及全国重要生态保护区域与优先区比较及占比

Fig.6 Comparison between global important conservation areas and conservation priorities on the Qinghai-Tibetan Plateau

等面积较大的自然保护地内几乎没有或者较少覆盖本研究识别的保护优先区,这可能是因为这些保护地的主要保护目标是藏羚羊(*Pantholops hodgsonii*)、藏野驴(*Equus kiang*)等有蹄类野生动物以及高寒草甸、高寒荒漠等生态系统。由于这些区域涉及物种较少且研究中并未将生态系统类型数据纳入模型模拟,因此 Zonation 识别的保护优先区没有在这些区域集中分布。另外,本研究在识别保护优先区时并未考虑气候变化和人类活动的影响,然而随着经济社会的发展和气候变化的加剧,青藏高原人类活动强度增加^[49],气候呈暖湿化趋势^[50-51],这些都有可能对重要物种栖息地、生态系统服务造成影响。在识别优先区时应考虑人类活动较明显区域以及气候变化敏感区,量化人类活动和气候变化的影响对保护优先区的评估具有重要研究意义。

5 结论

本研究以青藏高原为例,通过结合重要物种的空间分布和生态系统服务识别了基于生物多样性和生态系统服务的青藏高原保护优先区,并对现有保护地体系的保护成效和保护空缺进行了判别。结果表明:(1)青藏高原保护优先区分布格局整体集中在高原东南部,其优先区级别由东南向西北逐渐递减,森林生态系统是保护优先区中最重要的生态系统类型;(2)单一类型的保护优先区在高原东南部存在空间重叠,维管束植物优先区分布较为聚集,而脊椎动物和生态系统服务保护优先区除分布在横断山区和东喜马拉雅山区外还零星分布在昆仑山、可可西里、柴达木盆地、祁连山、藏北高原等地;(3)已建的自然保护地对保护优先区存在较大保护空缺,未来保护地体系优化应同时考虑生物多样性和生态系统服务等不同保护对象,着重关注保护优先区,特别是横断山区等保护空缺区域。

参考文献 (References):

- [1] O'Connor L M J, Pollock L J, Renaud J, Verhagen W, Verburg P H, Lavorel S, Maiorano L, Thuiller W. Balancing conservation priorities for nature and for people in Europe. *Science*, 2021, 372(6544): 856-860.
- [2] Cardinale B J, Duffy J E, Gonzalez A, Hooper D U, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace G M, Tilman D, Wardle D A, Kinzig A P, Daily G C, Loreau M, Grace J B, Larigauderie A, Srivastava D S, Naeem S. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*, 2012, 486: 59-67.
- [3] Hooper D U, Adair E C, Cardinale B J, Byrnes J E K, Hungate B A, Matulich K L, Gonzalez A, Duffy J E, Gamfeldt L, O'Connor M I. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change. *Nature*, 2012, 486: 105-108.
- [4] Watson J E M, Dudley N, Segan D B, Hockings M. The performance and potential of protected areas. *Nature*, 2014, 515: 67-73.
- [5] UNEP-WCMC. Protected areas map of the world. (2023-06) [2023.09.10]. www.protectedplanet.net.
- [6] Almond R, Grooten M, Juffe Bignoli D, et al. Living Planet Report 2022-Building a nature-positive society. World Wildlife Fund, 2022.
- [7] Geldmann J. Safeguarding biodiversity requires understanding how to manage protected areas cost effectively. *One Earth*, 2023, 6(2): 73-76.
- [8] Convention on Biological Diversity (CBD). Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework. (2022-12-19) [2023.09.10]. <https://www.cbd.int/doc/decisions/cop-15/cop-15-dec-04-en.pdf>.
- [9] 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.
- [10] Montesino Pouzols F, Toivonen T, Di Minin E, Kukkala A S, Kullberg P, Kuusterä J, Lehtomäki J, Tenkanen H, Verburg P H, Moilanen A. Global protected area expansion is compromised by projected land-use and parochialism. *Nature*, 2014, 516(7531): 383-386.
- [11] Lehtomäki J, Moilanen A. Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47: 128-137.
- [12] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. *Nature*, 2000, 405: 243-253.
- [13] Xu Y, Huang J H, Lu X H, Ding Y, Zang R G. Priorities and conservation gaps across three biodiversity dimensions of rare and endangered plant species in China. *Biological Conservation*, 2019, 229: 30-37.
- [14] Diao Y X, Wang J J, Yang F L, Wu W, Zhou J, Wu R D. Identifying optimized on-the-ground priority areas for species conservation in a global biodiversity hotspot. *Journal of Environmental Management*, 2021, 290: 112630.
- [15] Zhang M G, Zhou Z K, Chen W Y, Ferry Slik J W, Cannon C H, Raes N. Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. *Biological Conservation*, 2012, 153: 257-264.
- [16] 叶锦, 胡金明, 武瑞东, 王恒颖, 王军军, 周键, 王一婷, 杨飞龄. 喜马拉雅东南部生物多样性保护优先区域微优先区系统规划. *生态学杂志*, 2022, 41(9): 1862-1872.
- [17] 栾晓峰, 黄维妮, 王秀磊, 刘敏超, 刘世荣, 吴波, 李迪强. 基于系统保护规划方法东北生物多样性热点地区和保护空缺分析. *生态学报*, 2009, 29(1): 144-150.
- [18] Ramel C, Rey P L, Fernandes R, Vincent C, Cardoso A R, Broennimann O, Pellissier L, Pradervand J N, Ursenbacher S, Schmidt B R, Guisan A. Integrating ecosystem services within spatial biodiversity conservation prioritization in the Alps. *Ecosystem Services*, 2020, 45: 101186.
- [19] 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.
- [20] Srivathsa A, Vasudev D, Nair T, Chakrabarti S, Chanchani P, DeFries R, Deomurari A, Dutta S, Ghose D, Goswami V R, Nayak R, Neelakantan A, Thatte P, Vaidyanathan S, Verma M, Krishnaswamy J, Sankaran M, Ramakrishnan U. Prioritizing India's landscapes for biodiversity, ecosystem services and human well-being. *Nature Sustainability*, 2023, 6: 568-577.
- [21] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张镱锂. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. *地理学报*, 2012, 67(1): 3-12.
- [22] 郝嘉元, 智烈慧, 李晓文, 董世魁, 李巍. 青藏高原土地利用格局和生态系统服务的时空演变特征及关系. *应用生态学报*, 2023, 34(11): 3053-3063.
- [23] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 樊杰, 王小丹, 郑华, 赵文武, 吴飞. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策. *中国科学院院刊*, 2021, 36(11): 1298-1306.
- [24] 张镱锂, 吴雪, 祁威, 李士成, 摆万奇. 青藏高原自然保护区特征与保护成效简析. *资源科学*, 2015, 37(7): 1455-1464.
- [25] Shen Y, Liu G H, Zhou W, Liu Y Q, Cheng H, Su X K. Protected areas have remarkable spillover effects on forest conservation on the Qinghai-Tibet Plateau. *Diversity and Distributions*, 2022, 28(12): 2944-2955.
- [26] Hua T, Zhao W W, Cherubini F, Hu X P, Pereira P. Continuous growth of human footprint risks compromising the benefits of protected areas on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2022, 34: e02053.

- [27] 王秋生, 温璐, 苏旭坤. 气候变化背景下青藏高原藏羚羊生境时空格局演变. 生态学报, 2022, 42(22): 8985-8993.
- [28] 刘锋, 梁致远, 李杰, 杨飞龄, 邓涛, 孙航, 胡金明. 青藏高原陆生维管植物分布及其保护. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(8): 1133-1145.
- [29] 赵仁生, 许诗嘉, 宋鹏飞, 周翔, 张亚洲, 袁燕. 青藏高原药用植物分布格局及保护优先区. 生物多样性, 2022, 30(4): 68-77.
- [30] 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(3): 1-6.
- [31] Li S C, Zhang H, Zhou X W, Yu H B, Li W J. Enhancing protected areas for biodiversity and ecosystem services in the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecosystem Services*, 2020, 43: 101090.
- [32] Shen Y, Liu G H, Wan L F, Cheng H, Liu Y Q, Yang S S, Li B Y, Su X K. The role of protected areas in mitigating vegetation disturbances on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2023, 9: 0066.
- [33] 张德锂, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. 地理研究, 2002, 21(1): 1-8.
- [34] Myers N, Mittermeier R A, Mittermeier C G, da Fonseca G A B, Kent J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, 403: 853-858.
- [35] IUCN. The IUCN Red List of Threatened Species. Spatial Data Version 2022- 12. (2022- 12) [2023.09.10]. <https://www.iucnredlist.org/resources/spatial-data-download>
- [36] BirdLife International BirdLife International and Handbook of the Birds of the World. Bird species distribution maps of the world. (2022-01) [2023.09010]. <http://datazone.birdlife.org/species/requestdis>.
- [37] Yang J, Huang X. The 30m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8): 3907-3925.
- [38] 郑超磊, 贾立, 赵天杰. 全球 1 公里分辨率地表土壤水分数据集 (2000-2020). (2023-07-01) [2023.09.10]. 国家青藏高原科学数据中心. <https://doi.org/10.11888/RemoteSen.tpd.272760>. <https://cstr.cn/18406.11.RemoteSen.tpd.272760>.
- [39] Jung M, Arnell A, de Lamo X, García-Rangel S, Lewis M, Mark J, Merow C, Miles L, Ondo I, Pironon S, Ravilious C, Rivers M, Schepaschenko D, Tallwin O, van Soesbergen A, Govaerts R, Boyle B L, Enquist B J, Xiao F, Gallagher R, Maitner B, Shai M R, Mulligan M, Ofer G, Roll U, Hanson J O, Jetz W, Di Marco M, McGowan J, Rinnan D S, Sachs J D, Lesiv M, Adams V M, Andrew S C, Burger J R, Hannah L, Marquet P A, McCarthy J K, Morueta-Holme N, Newman E A, Park D S, Roehrdanz P R, Svenning J C, Violle C, Wieringa J J, Wynne G, Fritz S, Strassburg B B N, Obersteiner M, Kapos V, Burgess N, Schmidt-Traub G, Visconti P. Areas of global importance for conserving terrestrial biodiversity, carbon and water. *Nature Ecology & Evolution*, 2021, 5: 1499-1509.
- [40] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 2006, 190(3/4): 231-259.
- [41] Raes N, ter Steege H. A null-model for significance testing of presence-only species distribution models. *Ecography*, 2007, 30(5): 727-736.
- [42] Moilanen A, Lehtinen P, Kohonen I, Jalkanen J, Virtanen E A, Kujala H. Novel methods for spatial prioritization with applications in conservation, land use planning and ecological impact avoidance. *Methods in Ecology and Evolution*, 2022, 13(5): 1062-1072.
- [43] Brum F T, Graham C H, Costa G C, Hedges S B, Penone C, Radeloff V C, Rondinini C, Loyola R, Davidson A D. Global priority for conservation across multiple dimensions of mammalian diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(29): 7641-7646.
- [44] Yu H B, Miao S Y, Xie G W, Guo X Y, Chen Z, Favre A. Contrasting floristic diversity of the Hengduan Mountains, the Himalayas and the Qinghai-Tibet Plateau sensu stricto in China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2020, 8: 136.
- [45] Tang Z Y, Wang Z H, Zheng C Y, Fang J Y. Biodiversity in China's Mountains. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(7): 347-352.
- [46] 杨飞龄, 胡金明, 武瑞东. 基于 NPWP 的云南植物保护优先区分析. 地理学报, 2013, 68(11): 1538-1548.
- [47] Wang Y, Wang X F, Yin L C, Feng X M, Zhou C W, Han L, Lü Y. Determination of conservation priority areas in Qinghai Tibet Plateau based on ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, 2021, 124: 553-566.
- [48] Davis S D, Heywood V. Centres of plant diversity: a guide and strategy for their conservation, v. 2. Asia, Australasia and the Pacific. 1995,
- [49] Li S C, Zhang Y L, Wang Z F, Li L H. Mapping human influence intensity in the Tibetan Plateau for conservation of ecological service functions. *Ecosystem Services*, 2018, 30: 276-286.
- [50] Liu J H, Xin Z B, Huang Y Z, Yu J. Climate suitability assessment on the Qinghai-Tibet Plateau. *The Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151653.
- [51] Kuang X, Jiao J J. Review on climate change on the Tibetan Plateau during the last half century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(8): 3979-4007.