

青藏高原生态修复格局空间优化

谢李园^{1,2}, 张 路², 万五星¹, 王效科²

(1. 河北师范大学生命科学学院, 石家庄 050024;
2. 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)

摘要:明确生态问题的空间特征及生态修复的空间格局,是提高生态服务的重要手段。尽管国内外对退化生态系统恢复重建已有诸多研究和探索,但是基于多个生态问题的协同治理格局尚不明确。因此,如何以多个生态问题的治理为主要目标,使用最小的面积获得最大的修复效果是急需解决的问题。通过收集数据模拟青藏高原水土流失、沙化、石漠化、森林和草地质量持续下降等生态问题,明确青藏高原主要生态问题空间特征,使用 Zonation 模型对各生态问题进行空间协同优化,识别青藏高原优先修复区。通过分析,青藏高原水土流失主要分布在青藏高原东南高山峡谷地区,沙化严重区域主要分布在南疆、西藏自治区的北部和西北部以及青海省西北部,石漠化以轻度石漠化为主,主要分布于青藏高原东部边缘地区、云南省西北与四川省西南交界的区域和西藏自治区与四川省交界区域。对比几种主要的修复目标发现,优先修复青藏高原30%的生态问题严重区域是比较适宜的选择。基于青藏高原主要生态问题空间协同优化结果与现有保护地和生态修复工程对比,划定阿里—藏北高原修复区、念青—唐古拉山修复区和三江并流修复区,在以上区域开展生态修复,修复4.81%的区域将会提升17.40%水源涵养服务、13.73%土壤保持服务和7.85%固碳服务。

关键词:生态问题;协同优化;生态修复;青藏高原

中图分类号: X171.4

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2022030016

Spatial optimization of ecological restoration patterns on the Qinghai-Tibet Plateau

XIE Liyuan^{1,2}, ZHANG Lu², WAN Wuxing¹, WANG Xiaoke²

(1. College of Life Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: Clarifying the spatial characteristics of ecological problems and the spatial pattern of ecological restoration is one of the important means to improve ecological services. At present, there have been many researches and explorations on the restoration and reconstruction of degraded ecosystems at home and abroad. However, the collaborative governance pattern based on multiple ecological problems is not clear. Therefore, how to take the governance of multiple ecological problems as the main goal and use the minimum area to obtain the maximum restoration effect is an urgent problem to be solved. By collecting data to simulate the ecological problems on the Qinghai-Tibet Plateau, such as soil erosion, desertification, rocky desertification, forest quality and grassland quality, the spatial characteristics of the main ecological problems on the Qinghai-Tibet Plateau are clarified, and the Zonation model is used to accomplish the spatial collaborative optimization for each ecological problem, thus identifying the priority restoration areas on the Qinghai-Tibet Plateau. Through the analysis, the Qinghai-Tibet Plateau soil erosion is mainly distributed in the southeast of the Qinghai-Tibet Plateau alpine valley, and desertification serious areas are mainly distributed in southern of Xinjiang, north and northwest of Tibet autonomous region, and northwest of Qinghai. The light rocky desertification is the main characteristic, mainly distributed in the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau area, northwest of Yunnan and Sichuan southwest border areas, border areas between Sichuan and Tibet. Comparing several main scenarios, it is found that it is a more appropriate choice to give priority to repairing 30% of the areas with serious ecological problems on the Qinghai-Tibet Plateau. Based on the results of spatial collaborative optimization of major ecological issues on the Qinghai-Tibet Plateau and the existing conservation areas, the restoration areas of the Ngari-Northern Tibet Plateau, Qomolangma, Nyenqantanggula and the Parallel flow of the Three Rivers are designated. The restoration is completed in the 4.81% areas mentioned above, thus resulting in the improvement of water

收稿日期: 2022-03-04

录用日期: 2022-05-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42171285);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0308);中国科学院先导专项(XDA20020402)

作者简介: 谢李园(1996-),女,硕士。研究方向:生态保护修复空间优化研究。E-mail: xieliyuan1996@163.com

通信作者: 张 路(1984-),男,博士、副研究员。研究方向:生态保护修复空间优化研究。E-mail: luzhang@rcees.ac.cn

引用格式: 谢李园,张 路,万五星,等. 青藏高原生态修复格局空间优化[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 78-86.

conservation and soil conservation as well as carbon fixation with the improved rates of 17.40%, 13.73% and 7.85%, respectively.

Keywords: ecological problems; collaborative optimization; ecological restoration; the Qinghai-Tibetan Plateau

CLC number: X171.4

生态系统退化及其导致的土地退化使水源涵养、防风固沙、土壤保持、固碳和生物多样性保护等生态服务功能丧失, 严重威胁区域生态安全。特别是在生态脆弱区, 生态系统退化一旦发生, 由于水热条件的不足, 需要更长时间的自然恢复, 在退化严重的区域也需要更大的投入进行人工干预修复。为修复退化或受威胁生态系统, 全球开展了不同尺度的生态保护和修复工程。联合国宣布 2021 ~ 2030 年为“联合国生态系统恢复十年”, 波恩挑战和纽约森林宣言旨在到 2030 年恢复全球 3.5 亿 hm^2 的森林^[1]。我国也在过去 20 年间开展了三江源生态保护与修复工程、黄土高原流域植被恢复、三北防护林保护工程及退化林修复、京津风沙源治理、喀斯特石漠化以及湿地景观生态修复工程、青藏高原生态安全屏障保护与建设工程和高寒湿地生态系统修复工程等一系列生态修复工程^[2-10], 并已获得了极大的生态效益^[11]。但随着气候变化加剧、人类活动方式的转变, 对如何进一步提高生态工程的保护效益提出了新的需求。区域生态修复的主要方式是明确修复工程的空间布局, 再给予政策和资金支持, 因地制宜开展自然恢复或人工修复。因此, 明确主要生态问题的空间格局至关重要, 能够为有效实施生态修复提供空间范围, 支持后续的生态工程和生态管理。

划定生态修复的空间范围首先需要根据区域特点确定主要生态问题, 通过对生态问题空间强度的模拟识别重点修复区。在遥感手段快速发展的背景下, 已有大量研究进行了不同类型生态系统退化和土地退化的空间模拟研究, 有通过遥感光谱信息关系构建的沙漠化监测与信息定量提取^[12]、旱地生态系统退化过程动态监测等^[13] 遥感评估, 基于遥感数据构建的水土流失生态问题过程模型^[14], 也有遥感数据与统计数据相结合的多因素风险评估模型^[15]。这些研究都在单独类型生态问题的保护和修复规划中发挥了重要作用, 有效支撑了生态修复工程布局。而在某些区域, 虽然是独立的地理单元, 但是面积广, 气候地形多样, 生态问题空间异质性强, 构建生态修复的总体布局不仅需要对每一类

型生态问题进行模拟和分析, 也需要根据区域地形、气候特征划分不同生态修复区, 在各区内研究生态问题之间的关系, 提出重点问题, 为区域生态修复决策提供更明确的依据。

青藏高原地处我国西南部, 因水热条件的限制导致其生态系统比较脆弱, 根据自然地理条件差异, 生态问题空间差异显著。袁烽迪等^[16] 以生态评价理论研究为基础, 发现青藏高原生态环境脆弱性空间分布由东南部向西北部生态环境脆弱性逐渐变大; 夏龙等^[17] 发现青藏高原地表水热对草地植被退化具有显著影响。然而有些问题的发生机制近似, 空间上存在重叠, 如何使用最小面积获得最大化的生态修复效果是急需解决的问题。多目标优化方法主要用于生物多样性保护规划研究, 重点保护生物多样性优先区, 该方法为多个生态问题的空间协同优化提供借鉴。

本研究通过保护规划 Zonation 模型, 对青藏高原质量持续下降的森林和草地生态系统、土地沙化、石漠化和水土流失等生态问题进行修复格局空间优化, 评估每类生态问题空间特征, 根据不同区域的主要生态问题, 使用多目标空间优化方法识别青藏高原生态修复优先区域, 为青藏高原生态安全格局的构建提供依据。具体研究目标包括: 明确青藏高原各类生态问题分布及重点修复区格局; 提出不同生态问题治理的空间协同优化方案。

1 研究区概括与方法

1.1 研究区概括

青藏高原位于我国西南部。面积约 257 万 km^2 , 占我国陆地总面积的 26.8%^[18], 其中森林生态系统主要分布在青藏高原东南部, 占青藏高原总面积的 5.36%, 草地生态系统广泛分布于青藏高原, 占青藏高原总面积的 60.77%。青藏高原处于高海拔地区, 以高寒、干旱气候为主, 植物生长缓慢, 生态环境敏感脆弱。在全球气候变化和人类活动的综合影响下, 青藏高原土地退化、水土流失和石漠化等生态问题整体有所改善, 但是局部问题仍然严重^[19]。

1.2 数据来源

本研究搜集了大量的数据及相关文献资料,其中空间分布数据包括生态系统类型遥感、省级行政区划数据等数据,生态问题数据包括水土流失、沙化和石漠化等数据,生态系统特征数据包括植被覆盖度、叶面积指数等。具体数据及来源等信息,见表 1。

表 1 主要数据及来源
Table 1 Main data and sources

数据	分辨率/ m	数据来源
植被覆盖度	250	中国科学院遥感与数字地球研究所
生态系统类型 遥感数据	250	中国科学院遥感与数字地球研究所
叶面积指数	250	中国科学院资源环境科学数据中心
行政区划图	-	中国科学院资源环境科学数据中心
水土流失	250	中国科学院资源环境科学数据中心
沙化	250	中国科学院生态环境研究中心
石漠化	250	中国科学院资源环境科学数据中心
生物量	250	中国科学院遥感与数字地球研究所

1.3 生态问题模拟

青藏高原具有重要的生态功能,同时,生态问题也极为突出,从生态修复格局出发,选取青藏高原森林、草地生态系统的水土流失、沙化、石漠化和持续退化的生态系统等问题进行模拟,最后对各生态问题进行归一化处理。

1.3.1 水土流失模拟 本研究采用修正后的通用土壤流失方程(RUSLE)对青藏高原的水土流失状况进行定量评价,见式(1):

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (1)$$

式中: A 为每年平均土壤损失,即土壤侵蚀模数, $t/(hm^2 \cdot a)$; R 为降雨侵蚀力因子, $MJ \cdot mm/(hm^2 \cdot h \cdot a)$; K 为土壤可蚀性因子, $t \cdot hm^2 \cdot h/(hm^2 \cdot MJ \cdot mm)$; L 为坡长因子; S 为坡度因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。 L 、 S 、 C 和 P 因子均为无量纲。

1.3.2 土地沙化模拟 土地沙化使用植被状况—地表反射率—土壤湿度(NDVI-Albedo-Wet)三维数据空间沙化遥感监测模型,利用 Google Earth Engine 遥感大数据平台进行沙化信息提取。

1.3.3 石漠化模拟 石漠化被定义为一个土壤侵蚀、基岩裸露和土地生产力退化的过程。因此,植被指数被用来指示喀斯特地区植被和非植被的覆盖。此外,以往的研究也表明土壤水分和温度是影

响中国石漠化的 2 个重要因素。

1.4 生态系统退化模拟

叶面积指数 (leaf area index, LAI) 通常用于表征叶片的疏密程度和冠层结构,反映植被的结构参数,是衡量森林生态系统的重要指标^[20]。植被覆盖度是衡量草原生态脆弱性的一个重要指标,同时也是生态系统、水土流失和气候变化模型的重要参数^[21]。本研究使用二分像元法获取植被覆盖度数据,通过每个像元的时间序列值获得每个像元的斜率系数。用于计算斜率系数^[22],见式(2):

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^{i=n} i \times X_i - \sum_{i=1}^{i=n} i \times \sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n \sum_{i=1}^{i=n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{i=n} i \right)^2} \quad (2)$$

式中, Slope 为依赖变化中每个像元的变化趋势, X_i 为第 i 年的年度指标值, n 为研究期间的年范围。 Slope 值小于零时表示植被质量持续下降。本研究提取持续下降的森林质量和草地质量进行研究。

1.5 生态问题修复格局空间优化

Zonation 模型是 LEHTOMÄKI et al^[23] 和 MOILAN-EN^[24] 于 2005 年开发,是空间保护修复及优化的决策分析模型。其原理是基于修复目标的价值、连接需求和修复目标的空间特征,通过移除景观中最没有价值的栅格,同时让保护价值的边际损失达到最小化,最终可获得高连通性的景观格局分布,保留了修复目标的核心区域^[25-26]。模型目标函数,见式(3):

$$\delta_i = \max_j \frac{q_{ij} w_j}{c_i} \quad (3)$$

式中, w_j 为指标 j 的权重(或优先级), c_i 是将单元 i 添加到保留网络的成本。在运行分析时,程序遍历所有单元,并根据特征计算 δ_i 值,该特征在特定单元中具有剩余的最高加权分布比例(因此表示如果移除细胞将丢失的最高生物值)。 δ_i 值最低的单元将被移除。

1.6 修复目标设置

根据已有的生态修复工程发现,生态修复的面积和生态修复效果的关系并没有线性关系,即修复优先区面积的增长并不与修复成效的显著提高呈线性关系。因此,对修复目标设置一个量化的标准至关重要。基于 Zonation 生成的修复优先区,按照全球生态系统优先恢复目标^[1] 和爱知生物多样性

目标^[27]、基于岷山山系多物种保护规划目标^[28]、以生态服务的供需为基础制定的全球性修复目标^[29]和生态保护红线目标^[30]选择生态问题关键区域。即分别以优化结果重要性的 15%、30%、40% 和 45% 为修复目标,得到修复目标下的修复优先区。

2 结果与分析

2.1 青藏高原生态问题空间特征

青藏高原森林、草地生态系统分别选取生态质

量持续下降、石漠化、水土流失、沙化等生态问题进行模拟,结果见图 1、图 2,其中石漠化以轻度石漠化为主,主要分布于青藏高原东部边缘地区,云南省西北与四川省西南交界的区域,西藏自治区与四川省交界区域,水土流失较为严重的区域主要分布于青藏高原南部高山峡谷地区,沙化严重区域主要分布在南疆、西藏自治区的北部和西北部以及青海省西北部。

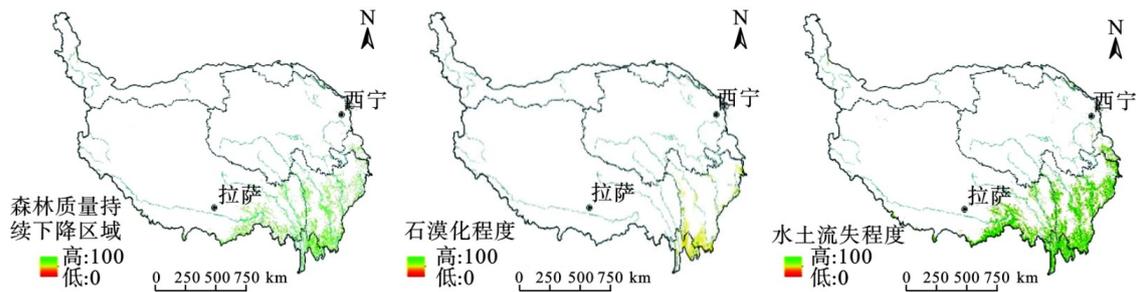


图 1 青藏高原森林生态系统生态问题空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of ecological problems in the Tibetan Plateau forest ecosystem

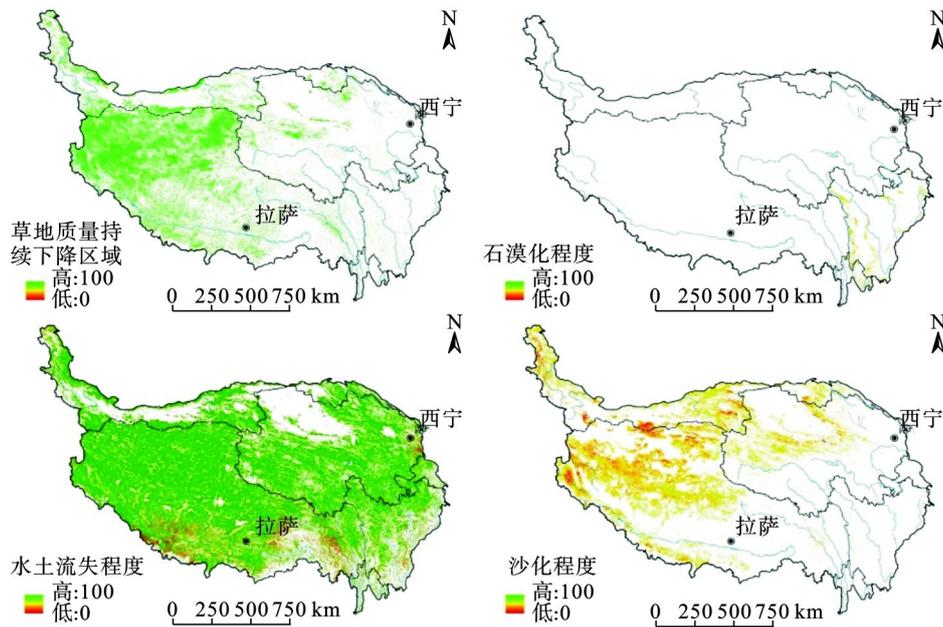


图 2 青藏高原草地生态系统生态问题空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecological problems in the grassland ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原森林生态系统石漠化面积 1.78 万 km², 森林质量持续下降面积 5.27 万 km², 水土流失面积 8.02 万 km²。草地生态系统的石漠化面积为 1.22 万 km², 水土流失面积约为 68.94 万 km², 沙化面积约 34.79 万 km², 生态质量面积为 35.27 万 km², 见表 2。

表 2 青藏高原生态系统生态问题面积

Table 2 Ecological problem area of Qinghai-Tibet Plateau ecosystem 10 000 km²

生态系统类型	生态系统面积	石漠化面积	水土流失面积	沙化面积	生态质量面积
森林	13.63	1.78	8.02	-	5.27
草地	154.46	1.22	68.94	34.79	35.27

2.2 青藏高原生态问题空间协同优化

青藏高原具有重要的生态功能,然而青藏高原生态问题局部退化严重,因此,根据不同区域的主要生态问题,使用多目标空间优化方法识别青藏高

原生态修复优先区域,完成青藏高原生态系统生态修复空间优化。结果显示,青藏高原森林生态系统修复优先区主要分布在三江并流区,草地生态系统修复优先区主要分布在阿里地区、那曲北部,见图 3。

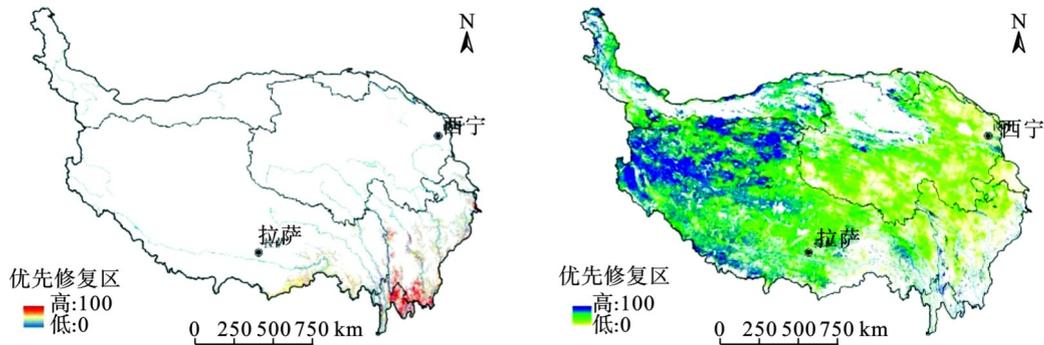


图 3 青藏高原森林、草地生态系统优先修复空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of forest and grassland ecosystems with priority restoration on the Qinghai-Tibet Plateau

通过比较青藏高原森林生态系统 4 种修复目标,当修复目标为 15% 时,石漠化问题修复 1.23 万 km²,水土流失问题修复 3.65 万 km²,森林质量持续下降区修复 1.86 万 km²。随着修复目标

的增加,在 30% 的修复目标时,石漠化修复面积达到 96.59%,在 45% 的优先修复目标时,水土流失和森林质量持续下降区修复面积达到 80% 以上,见表 3。

表 3 青藏高原森林生态系统优先修复结果

Table 3 Results of priority restoration of forest ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau

修复目标/%	石漠化修复面积/万km ²	比例/%	水土流失修复面积/万km ²	比例/%	森林质量修复面积/万km ²	比例/%
15	1.23	69.32	3.65	45.48	1.86	35.29
30	1.72	96.59	5.71	71.22	3.24	61.42
40	1.73	97.05	6.32	78.75	3.98	75.56
45	1.73	97.19	6.70	83.51	4.29	81.45

基于青藏高原森林生态系统各类生态问题协同优化结果,绘制优先修复累计曲线(图 4(a))。根据累计曲线,通过对比几种修复目标发现,在优先修复 30% 的生态问题严重区域时比较符合当前实际情况(图 4(b))。此时将会治理森林生态系统 96.59% 的石漠化问题、71.22% 的水土流失问题和 61.42% 的森林质量持续下降区域。

按照优先修复 30% 的结果对青藏高原森林生态系统进行生态修复,修复后的森林生态系统将会提升 29.77% 固碳服务、27.95% 水源涵养服务和 23.53% 土壤保持服务,见表 4。

通过比较青藏高原草地生态系统 4 种修复目标,当修复目标为 15% 时,石漠化问题修复 0.54 万 km²,水土流失修复 36.98 万 km²,草地质量持续下降修复 16.02 万 km²,土地沙化修复 17.12 万 km²。在修复目标为 30% 时,99% 的沙化问题得到治理,修复

目标为 40% 时,水土流失和草地质量持续下降区修复面积达到 80% 以上,沙化修复面积为 94.31%,见表 5。

基于青藏高原草地生态系统各类生态问题协同优化结果,绘制累计曲线,见图 5(a)。根据累计曲线,通过对比几种修复目标发现,在优先修复 30% 的草地生态系统生态问题严重区域时比较符合当前实际情况(图 5(b))。此时草地生态系统 99.00% 的石漠化问题、81.42% 的沙化问题、75.29% 的草地质量持续下降区和 70.26% 的水土流失将会得到治理。

按照优先修复 30% 的结果对青藏高原草地生态系统进行生态修复,修复后的草地生态系统将会提升 21.49% 土壤保持服务、20.60% 水源涵养服务和 11.51% 固碳服务,见表 6。

通过青藏高原主要生态问题空间协同优化结

果与现有保护地和生态修复工程对比及空缺识别并划定青藏高原优先修复区,发现青藏高原生态保

护和修复存在 3 处空缺,为阿里—藏北高原修复区、念青—唐古拉山修复区和三江并流修复区,见图 6。

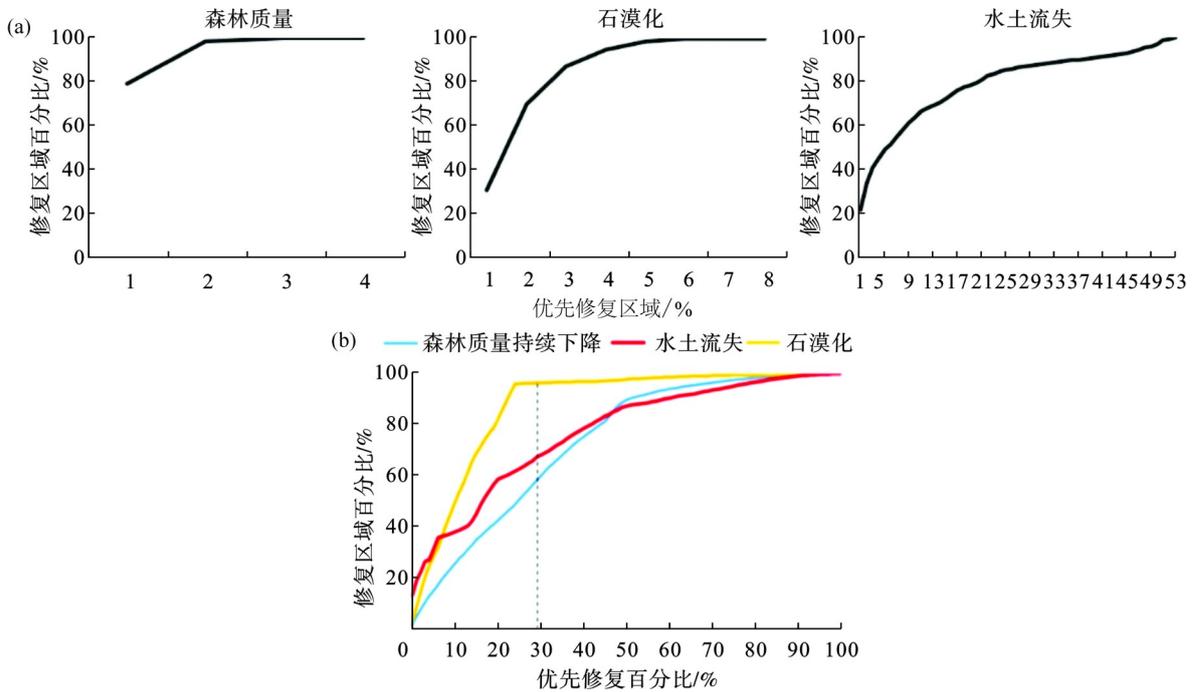


图 4 森林生态系统生态问题优化结果

Fig. 4 Optimization results of forest ecosystem ecological problems

表 4 青藏高原森林生态系统优先修复后将获得的生态系统服务

Table 4 Ecosystem services to be obtained after forest ecosystem restoration on the Qinghai-Tibet Plateau

修复目标/%	水源涵养/10 ⁸ m ³	比例/%	固碳/Tg	比例/%	土壤保持/亿t	比例/%
15	51.84	15.13	89.15	15.67	6.28	10.39
30	95.76	27.95	169.40	29.77	14.23	23.53
40	121.95	35.60	219.68	38.60	20.27	33.52
45	133.29	38.91	240.41	42.24	22.85	37.79

表 5 青藏高原草地生态系统优先修复结果

Table 5 Results of priority restoration of grassland ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau

修复目标/%	石漠化修复面积/万km ²	比例/%	水土流失修复面积/万km ²	比例/%	沙化修复面积/万km ²	比例/%	草地质量修复面积/万km ²	比例/%
15	0.54	44.08	36.98	53.64	17.12	49.65	16.02	45.43
30	1.21	99.00	48.44	70.26	28.10	81.47	26.55	75.29
40	1.21	99.20	55.65	80.72	32.53	94.31	30.13	85.43
45	1.21	99.44	60.47	87.72	34.40	99.75	31.56	89.49

划定的青藏高原优先修复区面积约 45.77 万 km², 其中现有自然保护区及修复工程面积为 33.41 万 km², 补充修复区域面积为 12.36 万 km²。按照结果对补充区域进行生态修复,修复 4.81% 的区域将会提升 17.40% 水源涵养服务、13.73% 土壤保持服务和 7.85% 固碳服务,见表 7。这一结果为区域生态修

复提供依据。

3 讨论

青藏高原开展了山水林田湖草生态保护修复工程试点,持续推进森林和草地保护恢复、水土流失和荒漠化土地治理、西藏生态安全屏障保护与建

设,以及三江源、横断山和祁连山等重点地区的生态保护与综合治理等工程建设,取得了显著的成果,有效促进了青藏高原生态系统质量和服务的稳步提升,维持了青藏高原生态安全屏障。由于青藏高原海拔高、气温低、降水少、生态系统结构简单

和抵抗能力弱等特点,青藏高原表现出较强的脆弱性和敏感性,其生态问题仍然严重。因此,明确主要生态问题的空间格局至关重要,能够为有效实施生态修复提供空间范围,支持后续的生态工程和生态管理。

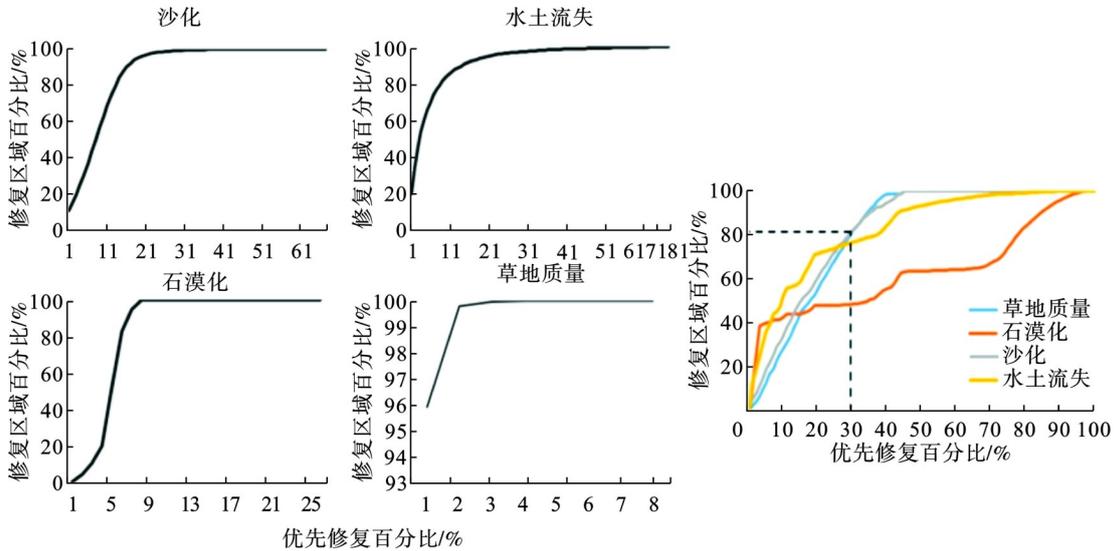


图 5 草地生态系统生态问题优化结果

Fig. 5 Optimization results of ecological problems in grassland ecosystem

表 6 青藏高原草地生态系统优先修复后将获得的生态系统服务

Table 6 Ecosystem services to be obtained after priority restoration of grassland ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau

修复目标/%	水源涵养/ 10 ⁸ m ³	比例/ %	固碳/ Tg	比例/ %	土壤保持/亿t	比例/ %
15	177.11	11.89	18.72	8.22	12.98	14.03
30	306.87	20.60	26.20	11.51	19.88	21.49
40	402.98	27.05	45.78	20.11	27.82	30.07
45	452.66	30.38	56.58	24.86	35.04	37.87

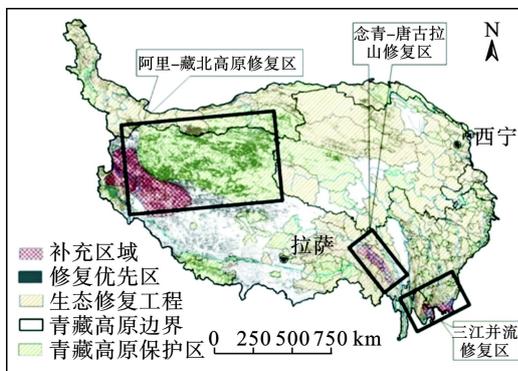


图 6 青藏高原优先修复区

Fig. 6 Priority restoration area of Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原已有很多研究在单独类型生态问题的保护和修复规划中发挥了重要作用,例如若尔盖

土地沙化的治理^[31]、新疆维吾尔自治区水土流失治理^[32]和贵州省石漠化治理^[33]等,有效支撑了生态修复工程布局。然而在某些区域,虽然是独立的地理单元,但是面积广,气候地形多样,生态问题空间异质性强,构建生态修复的总体布局不仅需要针对每一类型生态问题进行模拟和分析,也需要根据区域地形、气候特征划分不同生态修复区,根据各区内生态问题之间的关系,提出不同生态问题治理的空间协同优化方案。与单一目标或特定环境的生态修复不同,这些研究只针对某一种生态问题进行了治理,而本研究选取青藏高原水土流失、石漠化、土地沙化、生态质量持续下降区等生态问题进行协同优化,对青藏高原低差区域进行整体修复,这一结果为青藏高原地区生态修复提供借鉴。

表 7 青藏高原优先修复效果

Table 7 Effect of priority restoration on Qinghai-Tibet Plateau

补充修复区/万km ²	水源涵养/ 10 ⁸ m ³	比例/ %	固碳/ Tg	比例/ %	土壤保持/亿t	比例/ %
12.36	80.99	17.40	43.57	7.85	8.70	13.73

本研究基于空间协同优化与现有保护地及生态修复工程对比和空缺识别,发现有 3 处空缺,分别为阿里—藏北高原修复区、念青—唐古拉山修复

区和三江并流修复区,这一结果对生态工程建设和实施提供了明确的范围,为青藏高原生态安全格局构建提供更明确的依据。

4 结论

研究结合生态修复相关理论和实践研究成果,通过 Zonation 模型,对青藏高原森林和草地生态系统的生态质量持续下降、土地沙化、石漠化和水土流失等生态问题进行修复格局空间优化,评估每类生态问题空间特征,根据不同区域的主要生态问题,使用多目标空间协同优化方法识别青藏高原生态修复优先区域,为青藏高原构建生态安全格局提供依据。

(1)青藏高原水土流失发生面积较大,主要分布在青藏高原东南高山峡谷地区。土地沙化主要发生在草地生态系统中,面积约 34.79 万 km²,沙化强度空间分异特征显著,整体呈现“西北多东南少”趋势,严重区域主要分布在南疆、西藏自治区的北部和西北部以及青海省西北部(图 2(d))。石漠化以轻度石漠化为主,主要分布于青藏高原东部边缘地区,云南省西北与四川省西南交界的区域,西藏自治区与四川省交界区域,其中森林生态系统发生石漠化面积约 1.78 万 km²,草地生态系统发生石漠化约 1.22 万 km²,见表 2。森林质量持续下降区域主要分布在西藏自治区的中西部、林芝西南部、山南中部,四川凉山彝族自治州、阿坝藏族羌族自治州,甘肃省甘南藏族自治州和青海省海南藏族自治州,面积约 5.27 万 km²(图 1(a)),草地质量差的区域主要分布在西藏自治区的阿里、日喀则、山南中部,四川凉山彝族自治州、阿坝藏族羌族自治州,甘肃甘南藏族自治州,面积约 35.27 万 km²(图 2(a))。

(2)基于协同优化结果得到,青藏高原优先修复区位于三江并流区、阿里—藏北高原和珠穆朗玛峰附近(图 3)。通过对比 4 种修复目标发现,在优先修复森林和草地生态系统 30% 的生态问题严重区域时比较符合当前实际情况。此时修复后的森林生态系统分别提升了 27.95% 水源涵养服务、29.77% 固碳服务和 23.53% 土壤保持服务(表 4),草地生态系统能够分别提升 21.49% 土壤保持服务、20.60% 水源涵养服务和 11.51% 固碳服务(表 6)。若未来持续实施生态修复可以考虑 40% 或 45% 的修复目标。

(3)通过空间协同优化结果与现有保护地及生态修复工程对比和空缺识别并划定青藏高原优先修复区体系,发现青藏高原生态保护和修复主要存在 3 处空缺,分别为阿里—藏北高原修复区、念青—唐古拉山修复区和三江并流修复区。在这些区域开展生态修复,修复后的区域将会提升 17.40% 水源涵养服务、13.73% 土壤保持服务和 7.85% 固碳服务见表 7。

青藏高原要达到生态系统协同修复,需要优先修复 3 处空缺,分别为三江并流修复区、念青—唐古拉山修复区和阿里—藏北高原修复区,修复优先区面积为 12.36 万 km²,约占青藏高原总面积的 4.81%。优先修复 4.81% 的区域将会提升 17.40% 水源涵养服务、13.73% 土壤保持服务和 7.85% 固碳服务。

参考文献

- [1] STRASSBURG B B N, IRIBARREM A, BEYER H L, et al. Global priority areas for ecosystem restoration[J]. *Nature*, 2020, 586(7831): 724–729.
- [2] 程丽芬. “一带一路”发展战略下三北防护林工程建设策略研究——以山西省为例[J]. *林业经济*, 2017, 39(9): 53–56.
- [3] QIAO Y, JIANG Y, ZHANG C. Contribution of karst ecological restoration engineering to vegetation greening in southwest China during recent decade[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107081.
- [4] SUN J, YUAN X, LIU G, et al. Emergy and eco-exergy evaluation of wetland restoration based on the construction of a wetland landscape in the northwest Yunnan Plateau, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 252: 109499.
- [5] WANG X M, ZHANG C X, HASI E, et al. Has the Three Norths Forest Shelterbelt Program solved the desertification and dust storm problems in arid and semiarid China?[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 13–22.
- [6] LI Y R, ZHANG X C, CAO Z, et al. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China's Loess Plateau and strategy for more sustainable development[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756(10): 143676.
- [7] 张彪, 王爽, 李庆旭, 等. 基于防风固沙服务空间流动的区域关联度: 以京津风沙源治理工程区为例[J]. *资源科学*, 2020, 42(5): 969–979.
- [8] 史凯航. 辽宁三北防护林退化林分的现状、成因及修复措施[J]. *防护林科技*, 2015, 137(02): 50–51.
- [9] 赵志刚, 史小明. 青藏高原高寒湿地生态系统演变、修复与保护[J]. *科技导报*, 2020, 38(17): 33–41.
- [10] 黄麟, 曹巍, 徐新良, 等. 西藏生态安全屏障保护与建设工程的宏观生态效应[J]. *自然资源学报*, 2018, 33(3): 398–411.
- [11] LU F, HU H, SUN W, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001

- to 2010[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4039 - 4044.
- [12] 康文平, 刘树林. 沙漠化遥感监测与定量评价研究综述[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1222 - 1229.
- [13] 张平, 孙强强, 张亚萍, 等. 基于宽波段遥感光谱混合分解的干旱区土地退化监测评价理论和技术方法探讨[J]. *遥感技术与应用*, 2020, 35(2): 497 - 508.
- [14] 李青. 基于 GIS 和 USLE 模型的安庆市水土流失敏感性评价[J]. *水利科技与经济*, 2020, 26(11): 6 - 11.
- [15] 吴秦豫, 张绍良, 杨永均, 等. 基于恢复力的半干旱矿区生态系统退化风险空间评估[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1587 - 1598.
- [16] 袁烽迪, 张溪, 魏永强. 青藏高原生态屏障区生态环境脆弱性评价研究[J]. *地理空间信息*, 2018, 16(4): 67 - 69.
- [17] 夏龙, 宋小宁, 蔡硕豪, 等. 地表水热要素在青藏高原草地退化中的作用[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4618 - 4631.
- [18] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积[J]. *地理研究*, 2002(1): 1 - 8.
- [19] 王铁军, 赵礼剑, 张溪. 青藏高原生态屏障区生态环境综合评价方法探讨[J]. *测绘通报*, 2018, 498(9): 112 - 116.
- [20] CHEN J M, BLACK T A. Defining leaf area index for non - flat leaves[J]. *Plant, Cell and Environment*, 1992, 15(4): 421 - 429.
- [21] 贾坤, 姚云军, 魏香琴, 等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(7): 774 - 782.
- [22] CHAFIELD C. The analysis of time series: An introduction[J]. *Technometrics*, 2013, 33(1): 363 - 364.
- [23] LEHTOMÄKI J, MOILANEN A. Methods and workflow for spatial conservation prioritization using Zonation[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 47: 128 - 137.
- [24] MOILANEN A. Landscape Zonation, benefit functions and target-based planning: Unifying reserve selection strategies[J]. *Biological Conservation*, 2007, 134(4): 571 - 579.
- [25] 李丽鹤, 刘会玉, 林振山, 等. 基于 MAXENT 和 ZONATION 的加拿大一枝黄花入侵重点监控区确定[J]. *生态学报*, 2017, 37(9): 3124 - 3132.
- [26] 许小娟. 不同土地利用变化情景下互花米草分布格局及其入侵重点监控区规划[D]. 南京: 南京师范大学, 2016.
- [27] 生物多样性公约缔约方大会第十届会议. 2011—2020 年《生物多样性战略计划》[R]. 日本名古屋: 2010.
- [28] 肖静, 崔莉, 李俊清. 基于 ZONATION 的岷山山系多物种保护规划[J]. *生态学报*, 2016, 36(2): 420 - 429.
- [29] Arroyo Rodriguez V, FAHRIG L, TABARELLI M, et al. Designing optimal human-modified landscapes for forest biodiversity conservation[J]. *Ecology Letters*, 2020, 23(9): 1404 - 1420.
- [30] 饶胜, 张强, 牟雪洁. 划定生态红线 创新生态系统管理[J]. *环境经济*, 2012(6): 57 - 60.
- [31] 杨雨薇, 吴迪. 若尔盖县土地沙漠化研究进展[J]. *安徽农学通报*, 2019, 25(18): 98 - 101.
- [32] 赵欣. 新疆水土流失现状与综合治理展望[J]. *水利技术监督*, 2021(11): 59 - 62.
- [33] 杨世凡, 王朝军, 孙泉忠, 等. 贵州省石漠化综合治理成效及对策分析[J]. *中国水土保持*, 2021, 471(6): 8 - 11.

(上接第 71 页)

参考文献

- [1] 河南省人民政府. 河南省污染防治攻坚战三年行动计划(2018—2020 年)的通知[R]. 河南省人民政府公报, 2018(19): 4 - 29.
- [2] 焦丽鹏, 刘春腊, 徐美. 近 20 年来生态补偿绩效测评方法研究综述[J]. *生态科学*, 2020, 39(6): 213 - 223.
- [3] 汪惠青, 单钰理. 生态补偿在我国大气污染治理中的应用及启示[J]. *环境经济研究*, 2020, 5(2): 111 - 128.
- [4] Villarroya A, Persson J, Puig J. Ecological compensation: From general guidance and expertise to specific proposals for road developments[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2014, 45: 54 - 62.
- [5] Gilbert E. M. A Distributional Analysis of Green Tax Reforms[J]. *National Tax Journal*, 1999, 52(4): 655 - 681.
- [6] 袁伟彦, 周小柯. 生态补偿问题国外研究进展综述[J]. *中国人口·资源与环境*, 2014, 24(11): 76 - 82.
- [7] 魏巍贤, 王月红. 跨界大气污染治理体系和政策措施——欧洲经验及对中国的启示[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(9): 6 - 14.
- [8] 王前进, 王希群, 陆诗雷, 等. 生态补偿的政策学理论基础与中国的生态补偿政策[J]. *林业经济*, 2019, 41(9): 3 - 15.
- [9] FU Y Y, XIONG K N, ZHANG Z Z. Ecosystem services and ecological compensation of world heritage: A literature review[J]. *Journal for Nature Conservation*, 2021, 60: 125968.
- [10] 王思博, 李冬冬, 李婷伟. 新中国 70 年生态环境保护实践进展: 由污染治理向生态补偿的演变[J]. *当代经济管理*, 2021, 43(6): 36 - 42.
- [11] 任林静, 黎洁. 生态补偿政策的减贫路径研究综述[J]. *农业经济问题*, 2020(7): 94 - 107.
- [12] 王梓懿, 张京祥, 周子航, 等. 生态补偿的价值目标: 国际经验及对中国的启示[J]. *中国环境管理*, 2021, 13(2): 27 - 32.
- [13] 王前进, 王希群, 陆诗雷, 等. 生态补偿的经济学理论基础及中国的实践[J]. *林业经济*, 2019, 41(1): 3 - 23.
- [14] 聂鹏. 空气生态补偿的立法实践及路径推广——以山东省空气生态补偿机制为核心[C]// 生态文明法制建设——2014 年全国环境资源法学研讨会(年会)论文集(第二册). 中国环境资源法学研究会、中山大学: 中国法学会环境资源法学研究会, 2014: 183 - 188.
- [15] 湖北省人民政府办公厅. 湖北省环境空气质量生态补偿暂行办法的通知[R]. 湖北省人民政府公报, 2019(1): 12 - 14.
- [16] 尹珊珊, 贺结. 论我国大气污染生态补偿法律机制的完善[J]. *生态经济*, 2020, 36(5): 176 - 181.
- [17] 魏巍贤, 王月红. 京津冀大气污染治理生态补偿标准研究[J]. *财经研究*, 2019, 45(4): 96 - 110.
- [18] 陈楠, 陈立, 王莉莉, 等. 2015—2020 年湖北省 PM_{2.5} 和臭氧复合污染特征演变分析[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(3): 659 - 672.
- [19] 王明仕, 曹景丽, 桂晨露, 等. 基于主成分分析法对河南省大气主要污染物关系的研究[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2018, 50(2): 122 - 126.