

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2024.0545

赵立君, 田佳榕, 邵雅梅, 等. 高原内陆湖萎缩区盐碱地生态修复研究: 以内蒙古达里诺尔湖为例[J]. 生态与农村环境学报, 2025, 41 (6): 761-769.

ZHAO Li-jun, TIAN Jia-rong, SHAO Ya-mei, et al. Study on the Ecological Restoration of Saline-alkali Soils Lands in the Shrinkage Area of Plateau Inland Lakes: A Case Study of Dalinor Lake in Inner Mongolia[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2025, 41 (6): 761-769.

高原内陆湖萎缩区盐碱地生态修复研究: 以内蒙古达里诺尔湖为例

赵立君¹, 田佳榕², 邵雅梅¹, 姚国慧¹, 李海东^{1,3} (1. 生态环境部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042; 2. 南京警察学院, 江苏 南京 210042; 3. 南京林业大学林草学院水土保持学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 气候变化和人类活动易导致干旱区湖泊萎缩进而影响区域生态安全, 近年来湖泊萎缩区生态修复和生物多样性恢复受到高度关注。为探究气候变化背景下高原湖泊萎缩区生态修复的影响因素, 以内蒙古达里诺尔湖为例, 对湖泊萎缩区“近湖裸地—碱蓬修复区—湿地修复区”和浑善达克沙地修复样地的土壤 pH、养分和植被变化开展研究, 探讨“气候变化—湖泊萎缩—生态修复”的适应气候变化对策。结果表明: (1) 湖泊萎缩区样地土壤 pH 值与土壤肥力高于沙地修复样地, 随着与湖泊岸线距离的增加和海拔高度的增大, 部分土壤养分指标有所改善。与近湖裸地相比, 碱蓬修复区和湿地修复区全碳、全氮、全钾含量等显著增加。(2) 达里诺尔湖泊萎缩区植被恢复成效较好, 垂直于湖岸线方向上的“近湖裸地—碱蓬修复区—湿地修复区”植被盖度、植株数量逐步提高。(3) 干旱区湖泊萎缩后产生的土壤盐碱地为植物困难立地, 植被恢复指标与土壤全碳、全氮、有机质含量的相关性显著, 湖泊萎缩区盐碱地植被恢复应根据主要生态功能进行生态修复分区分类。研究结果对于加强干旱区湖泊萎缩后气候变化风险的适应性管理和生态功能修复具有参考价值。

关键词: 达里诺尔湖; 湖泊萎缩区; 盐碱地; 植被恢复; 生态修复

中图分类号: X22; X37 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2025)06-0761-09

Study on the Ecological Restoration of Saline-alkali Soils Lands in the Shrinkage Area of Plateau Inland Lakes: A Case Study of Dalinor Lake in Inner Mongolia. ZHAO Li-jun¹, TIAN Jia-rong², SHAO Ya-mei¹, YAO Guo-hui¹, LI Hai-dong^{1,3} (1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Nanjing Police University, Nanjing 210042, China; 3. College of Forestry and Grassland/ College of Soil and Water Conservation, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: Climate change and human activities tend to cause the shrinkage of lakes in arid areas, thus affecting regional ecological security. In recent years, biodiversity conservation and ecological restoration in lake shrinking areas have attracted significant attention. To explore the factors of ecological restoration in the shrinkage areas of plateau lakes under global climate change, a case study was carried out in Dalinor Lake in Inner Mongolia. Soil pH, nutrients, and revegetation effectiveness of different ecological restoration sites, including bare land near the lake, *Suaeda heteroptera* planted area, wetland restored area, and revegetated sandy land, were compared. The adaptation strategy of "climate change-lake shrinking-ecological restoration" was also discussed. The results show that: (1) soil pH values and fertility in the lake shrinking areas were higher than those in revegetated sandy lands. Some soil nutrient indicators improved with the increase in elevation and distance from the lake shoreline. Compared with bare land near the lake, the total carbon, total nitrogen, and total potassium contents in the *Suaeda heteroptera* planted area and wetland restored area increased significantly. (2) The revegetation effectiveness in the shrinking area of Dalinor Lake has achieved remarkable results, with a gradual increase in vegetation coverage and plant number along the direction of "bare land near the lake-*Suaeda heteroptera* plan-

收稿日期: 2024-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(41301611); “碳达峰碳中和”研究院项目(ZX2024SZY061)

① 通信作者 E-mail: lihd2020@163.com

ted area-wetland restored area" perpendicular to the shoreline of the lake. (3) The saline-alkaline soil produced after the shrinkage of lakes in arid regions is difficult for plants. Revegetation indicators were significantly correlated with soil total carbon (TC), total nitrogen (TN), and organic matter (SOC) contents. The revegetation countermeasures of saline-alkali lands in lake shrinking areas should be classified according to the main functions of ecological restoration zones. The research findings could provide references for strengthening the adaptive management of climate change risks and ecological function restoration for shrinking lakes in dry areas.

Key words: Dalinor Lake; lake shrinking area; saline-alkali lands; revegetation; ecological restoration

受全球变化影响,包括中国在内的世界上许多地区,正面临水资源短缺的风险^[1]。自20世纪70年代以来,气温升高和降水变化已经导致蒙古高原和青藏高原湖泊的剧烈变化^[2-3]。其中,青藏高原湖泊受冰川消融影响呈扩张趋势,淹没了牧场和农田,影响道路和基础设施的运行安全^[2]。蒙古高原面积大于1 km²的湖泊数量呈减少趋势(1987—2010年由785个锐减至577个),湖泊面积也呈现萎缩趋势。而在内蒙古,由于人类活动较剧烈,原因较为复杂,煤炭开采被认为是草原区湖泊减少的最重要因素,灌溉是农业区湖泊减少的主要因素^[3-4]。一般而言,内陆湖特别是面积较小的湖泊在气候变化和人类活动的影响下比外流湖更脆弱^[5],湖泊萎缩容易造成水生态失衡、土地盐渍化和生物多样性降低等一系列生态问题,在某些极端气候条件下可能面临完全消失的风险。

干旱区湖泊萎缩后产生的盐碱地是一种新的植被恢复困难立地,亟待实施生态修复和气候变化风险的适应性管理。研究表明,植被恢复作为提升湖泊萎缩区生态系统恢复力的关键措施,在维持生境、保持土壤和保护水质等方面发挥着重要作用^[5-7]。一方面,不同的植被恢复措施可影响湖泊周边的土壤有机碳库^[8-9]、理化性质^[10]、微生物群落组成^[11]和碳氮循环^[12]等;另一方面,土壤pH和养分含量变化又会对植被恢复过程产生正反馈^[13-15]。因此,植被恢复与土壤保持是互相促进的过程,对于维护湖泊生态功能稳定具有重要作用。相关研究表明,不同植被恢复模式能够改变土壤细菌和真菌群落的变化,进而极大地促进土壤养分转化过程^[16];也有研究指出,植被恢复可使土壤结皮及土壤表层微生物群落发生演替^[17-18],引起土壤微生物群落功能和理化性质发生转变^[19-20]。可以看出,现有研究^[5-7,13-15]多关注植被恢复本身,而忽略了湖泊萎缩与盐碱地形成之间的内在联系,以及它们与气候变化、土壤养分的相互作用^[21]。达里诺尔湖属于蒙古高原干旱区的封闭型湖泊,近年来,由于气候变化、植被蒸腾、牧民定居、牧场灌溉等原因,注入达里诺尔湖的水量明显减少,湖泊不断萎

缩,水质恶化,对当地牧民和渔民的生产和生活造成一定的不利影响^[4]。目前,关于达里诺尔湖流域生态退化的研究主要集中在通过多时相遥感技术探究影响湖面萎缩的主要因素^[22-24],以及研究草地退化、植被恢复等对内陆湖生态系统变化的影响^[25-26]。鲜有研究着眼于湖泊萎缩区的植被恢复对于土壤养分特征及粒度组成的影响,从土壤和植被相互作用的机理角度对达里诺尔湖生态退化问题进行探究。本研究基于2014、2016、2020和2024年对达里诺尔湖萎缩区的多次考察,通过实地调查、土壤采样等手段,分析气候变化影响下的生态修复限制因素,探讨“气候变化—湖泊萎缩—生态修复”的适应气候变化的对策,对湖泊萎缩区生态修复与生物多样性保护有着重要参考价值。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

达里诺尔湖(43°13′~43°23′ N, 116°29′~116°45′ E)位于内蒙古自治区赤峰市克什克腾旗,地处大兴安岭山地南端、内蒙古高原东部、浑善达克沙地3大地形的接合部,补给河道主要有贡格尔河、沙里河、亮子河和耗来河,达里诺尔湖南缘的浑善达克沙地地下水资源较为丰富。湖区生物多样性丰富,是珍稀候鸟的重要繁殖地和栖息地,同时也是中国北方重要的候鸟迁徙通道和重要的集散地之一。达里诺尔国家级自然保护区的主要保护对象包括珍稀鸟类及其赖以生存的湖泊、湿地、草原及林地等多样的生态系统。达里诺尔湖属于中温型大陆性气候区,年均气温约为4.9℃,年均降水量约为300 mm,日照时数长,蒸发旺盛。湖面海拔约为1 219 m,平均深度为7.5 m,最大水深为13 m。受气候变化的影响,过去几十年,达里诺尔湖萎缩趋势明显〔图1(a)~(b)],1960—2023年湖泊的东北、东和北部萎缩面积分别为13.57、13.29和5.31 km²,产生了大量盐渍化土地,亟待进行生态修复和综合治理。湖泊周围主要土壤类型有暗栗钙土、草甸土和沼泽土,以及盐化草甸土和草甸沼泽盐土等;常见植物有榆树(*Ulmus pumila*)、碱蓬(*Suaeda*

heteroptera)、小叶锦鸡儿 (*Caragana microphylla*)、香蒲 (*Typha orientalis*)、冰草 (*Agropyron cristatum*)、羊

草 (*Leymus chinensis*)、大针茅 (*Stipe grandis*) 和克氏针茅 (*Stipa krylovii*) 等。

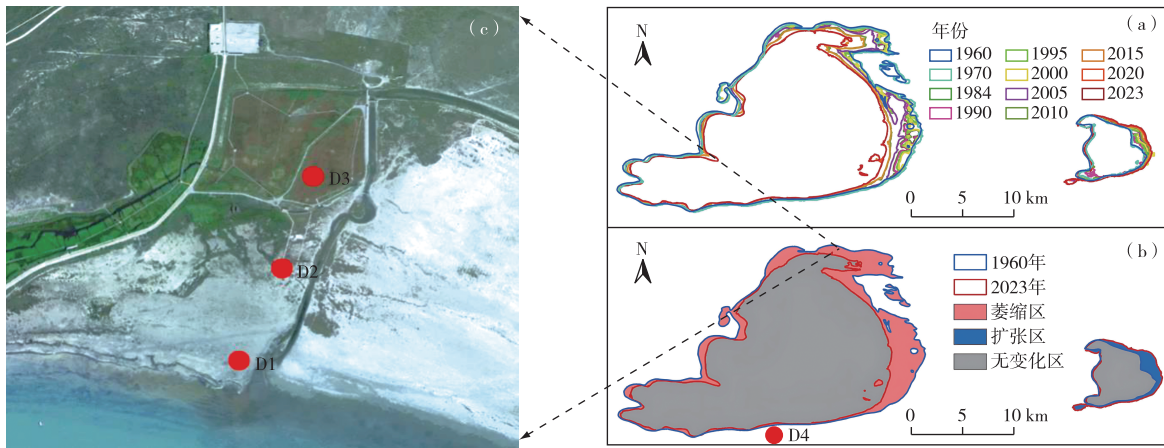


图 1 1960—2023 年达里诺尔湖岸线变化 [(a) 和 (b)] 和萎缩区的采样示意 [(b) 和 (c)]

Fig. 1 Changes in shoreline of Dalinor Lake during 1960–2023 [(a) , (b)] and distribution of sampling in lake shrinkage areas [(b) , (c)]

1.2 样地设置

2020 年 8 月 15 日至 16 日,在达里诺尔湖泊萎缩区和浑善达克沙地共设置 4 种类型 10 个样地

(表 1),其中,湖泊北岸萎缩区盐碱地设置 3 种类型生态修复样地[图 1(c)],即近湖裸地(D1)、碱蓬修复区(D2)和湿地修复区(D3)。

表 1 不同生态修复样地的基本情况

Table 1 Basic situations of different ecological restoration areas

样地	类型	优势种	坡度/(°)	坐标	海拔/m	简介	照片
D1-1	近湖裸地(D1)	无	0~1	116°39'48.69" E, 43°22'43.46" N	1 219	近 5 年内湖泊萎缩新增加的裸地,地势平坦,受湖水丰枯时的地下水影响大,土壤水分条件良好,以自然恢复为主,未采取人工修复措施	
D1-2		无	0~1	116°39'49.99" E, 43°22'43.58" N	1 219		
D1-3		无	0~1	116°39'52.13" E, 43°22'43.24" N	1 219		
D2-1	碱蓬修复区(D2)	碱蓬	0~1	116°39'48.63" E, 43°22'46.31" N	1 220	近 5~15 年的盐碱地,已实施植被恢复工程,主要为碱蓬,地势较平坦,受地下水影响较大,土壤水分季节变化较大,以人工修复为主,以自然演替为辅	
D2-2		碱蓬	1~2	116°39'51.48" E, 43°22'46.80" N	1 220		
D2-3		碱蓬	1~2	116°39'52.13" E, 43°22'43.24" N	1 220		
D3-1	湿地修复区(D3)	芦苇	0~1	116°39'51.86" E, 43°22'53.99" N	1 223	近 15~30 年的盐碱地,已进行湿地生态修复,主要有芦苇和香蒲等,地势较平坦,受人湖河流影响大,以人工修复为主,以自然演替为辅	
D3-2		芦苇	2	116°39'51.86" E, 43°22'53.99" N	1 223		
D3-3		芦苇	2	116°39'51.86" E, 43°22'53.99" N	1 223		
D4	沙地修复样地(D4)	大针茅	3~5	116°43'2.71" E, 43°13'20.26" N	1 237	属于浑善达克风沙土的灌草植被恢复区,主要为大针茅、克氏针茅、小叶锦鸡儿等,受地下水和人为活动的影响 ^[21] ,同时土壤水分季节变化大	

每种类型样地根据海拔高低、受地下水影响大小和植被状况等生境条件设置 3 个重复,样地原则上垂直于湖泊岸线方向。处于达里诺尔湖南岸的浑善达克沙地生态环境脆弱,更易受到气候变化的影响,同时兼顾生态修复样地类型,选择达里诺尔湖南侧的浑善达克沙地修复样地(D4)作为对照[图 1(b)],进行不同立地条件的生态修复对比研究。

1.3 土壤样品采集与测定

对 4 种类型 10 个样地均采用四分法采集表层土壤样品,同一个样地多点混合取样,深度为 0~20 cm,用自封袋储存后带回实验室,经自然风干、磨碎,过筛后备用。测定指标包括土壤 pH 值,有机质、全碳、全氮、全磷、有效磷、全钾和全硫含量,以

及粒度组成,检测方法参照国家行业标准和相关文献:(1)土壤 pH 值采用电位测定法(HJ 962—2018);(2)土壤有机质含量采用重铬酸钾稀释热法(NY/T 1121.6—2006),全碳含量采用浓硫酸-重铬酸钾氧化法(HJ 615—2011);(3)土壤全氮含量采用凯氏定氮法(HJ 717—2014);(4)土壤全磷含量采用碱熔-钼锑抗分光光度法(HJ 632—2011),有效磷含量采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗分光光度法(HJ 704—2014);(5)土壤全钾含量采用氢氟酸-高氯酸溶火焰光度法(GB 9836—88);(6)土壤全硫含量采用硫酸钡比浊法^[27]; (7)土壤粒度组成测定采用 Coulter LS230 激光粒度仪(体积分数)^[28]。土壤肥力等级划分见表 2。

表 2 全国第二次土壤普查土壤肥力状况分级标准

Table 2 General soil fertilization class ratings (from the Second National Soil Survey)

级别	w(有机质)/ (g·kg ⁻¹)	w(全氮)/ (g·kg ⁻¹)	w(全磷)/ (g·kg ⁻¹)	w(速效磷)/ (mg·kg ⁻¹)	w(全钾)/ (g·kg ⁻¹)
1	>40	>2.00	>1.0	>40	>25
2	>30~40	>1.50~2.00	>0.8~1.0	>20~40	>20~25
3	>20~30	>1.00~1.50	>0.6~0.8	>10~20	>15~20
4	>10~20	>0.75~1.00	>0.4~0.6	>5~10	>10~15
5	6~10	0.50~0.75	0.2~0.4	3~5	5~10
6	<6	<0.50	<0.2	<3	<5

来源于 1998 年全国第 2 次土壤普查;等级 1~6 分别表示土壤肥力很高、高、中上、中下、低和很低。

2 湖泊萎缩区生态修复成效及影响因素

2.1 盐碱地土壤粒度与 pH 值

达里诺尔湖泊萎缩区土壤粒度组成以砂粒含量为最大(89.44%~99.35%),粉粒含量(0.65%~10.56%)次之,黏粒含量为 0(图 2)。

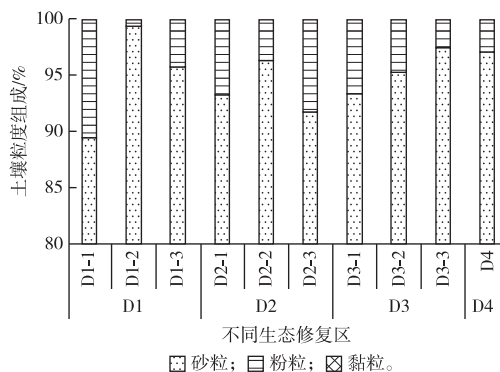


图 2 不同生态修复区土壤粒度组成
Fig. 2 Soil particle size composition in different ecological restoration areas

碱蓬修复区(D2)粉粒含量最高(平均值为 6.23%),近湖裸地(D1)和湿地修复区(D3)次之

(平均值分别为 5.15% 和 4.62%),沙地修复样地(D4)最低(2.9%)。砂粒含量表现为沙地修复样地(D4)>湿地修复区(D3)>近湖裸地(D1)>碱蓬修复区(D3),沙地修复样地砂粒含量最高(97.1%),碱蓬修复区(D2)最低(93.77%)。

湖泊萎缩区土壤 pH 值为 10.30~10.68(表 3),呈强碱性,为重度盐碱地,各类型样地土壤 pH 值由大到小表现为湿地修复区(D3)>碱蓬修复区(D2)>近湖裸地(D1),呈现距离湖泊岸线越远、随海拔增加而增大的趋势。湖泊萎缩区土壤 pH 值均大于浑善达克沙地修复样地(pH 值为 8.65,中度盐碱地)。

2.2 湖泊萎缩区土壤养分

由表 3 可知,土壤有机质含量为 4.01~7.54 g·kg⁻¹,表现为湿地修复区(D3)土壤有机质含量最高,土壤肥力低(等级为 5),远大于土壤肥力很低(等级为 6)的沙地修复样地(D4)、近湖裸地(D1)和碱蓬修复区(D2)。土壤全氮含量为 0.11~1.00 g·kg⁻¹,湿地修复区(D3)土壤全氮含量和肥力(等级为 4)高于其他类型样地(土壤全氮含量均小于 0.5 g·kg⁻¹,肥力等级为 6),表现为湿地修复区(D3)>碱蓬修复区(D2)>近湖裸地(D1)>沙地修复

样地(D4),不同生态修复区之间的变化与土壤 pH 值类似。土壤全磷含量为 $0.26 \sim 6.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中,碱蓬修复区(D2)土壤全磷含量最大,近湖裸地(D1)次之,土壤肥力均很高(等级为1);湿地修复区(D3)和沙地修复样地(D4)全磷含量较低,土壤肥力低(等级为5)。土壤全钾含量为 $24.40 \sim 28.44 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱蓬修复区(D2)最大,土壤肥力很高(等级为1),近湖裸地(D1)、湿地修复区(D3)和沙地修复样地(D4)差别小,土壤肥力高(等级为2)。土壤

全硫含量为 $0.34 \sim 0.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱蓬修复区(D2)最高,近湖裸地(D1)次之,沙地修复样地(D4)和湿地修复区(D3)较低,分别为 0.44 和 $0.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。总体而言,湖泊萎缩区样地土壤肥力高于沙地修复样地,随着与湖泊岸线距离的增加、海拔高度的增大,部分土壤养分指标有所改善。与近湖裸地相比,碱蓬修复区和湿地修复区全碳、全氮含量等显著增加。

表3 不同生态修复样地土壤 pH 值和土壤养分含量

Table 3 Soil pH values and nutrient contents of different ecological restoration areas

类型	pH 值	$w(\text{有机质})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全碳})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全氮})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全磷})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{有效磷})/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全钾})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$	$w(\text{全硫})/(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1})$
近湖裸地(D1)	10.30	4.23	11.13	0.17	2.22	6.84	24.40	0.68
碱蓬修复区(D2)	10.63	4.01	14.37	0.40	6.69	10.60	28.44	0.85
湿地修复区(D3)	10.68	7.54	19.43	1.00	0.30	6.96	24.43	0.34
沙地修复样地(D4)	8.65	4.96	11.50	0.11	0.26	6.43	24.53	0.44

2.3 不同样地生态修复成效

由表4可知,沙地修复样地(D4)植被盖度最高(达100%),其次是湿地修复区(D3)(82%~87%)和碱蓬修复区(D2)(22%~45%),近湖裸地(D1)最低($\leq 7\%$)。就盐碱地而言,植被盖度表现为由湖泊岸线向湿地修复区随海拔升高而增大,与土壤 pH 值随海拔的变化趋势基本一致(表3);植株数量和植株高度也呈现相似的情况,表现为湿地修复区(D3)>碱蓬修复区(D2)>近湖裸地(D1)。野外实地调查显示,D2-3样地处于碱蓬修复区(D2)与湿地修复区(D3)之间,开始出现芦苇,物种多样性增加。沙地修复样地(D4)与达里诺尔湖萎缩区接壤,同时属浑善达克沙地林草植被恢复工程实施区,植被覆盖度最高,土壤 pH 值最低(表3)。

表4 不同生态修复样地植被生长状况

Table 4 Status of revegetated plants in different ecological restoration areas

样地	类型	植被盖度/%	植株数量 ¹⁾	株高/m		
				最大值	最小值	平均值
近湖裸地(D1)	D1-1	3	1	0.19	0.19	0.19
	D1-2	5	2	0.18	0.14	0.16
	D1-3	7	4	0.27	0.12	0.21
碱蓬修复区(D2)	D2-1	22	12	0.36	0.13	0.27
	D2-2	39	21	0.33	0.19	0.26
	D2-3	45	26	0.42	0.18	0.31
湿地修复区(D3)	D3-1	84	45	0.78	0.23	0.56
	D3-2	82	51	1.03	0.51	0.73
	D3-3	87	42	0.88	0.46	0.66
沙地修复样地(D4)	D4	100	—	0.44	0.26	0.34

“—”表示无数据。1)样方内植物数量。

总体而言,达里诺尔湖泊萎缩区盐碱地植被盖度低于浑善达克沙地修复样地(D4),湿地修复区(D3)的植被恢复成效好于碱蓬修复区(D2)。

2.4 主要影响因素

达里诺尔湖泊萎缩区土壤 pH 值与全碳含量、全氮含量、有机质含量和粉粒含量均呈正相关,相关系数(r)介于 $0.26 \sim 0.47$ 之间;与砂粒含量、植被盖度呈负相关, r 均为 -0.26 (图3)。植被盖度与土壤有机质含量、全碳含量、全氮含量和砂粒含量均呈正相关, r 介于 $0.22 \sim 0.63$ 之间,土壤有机质和全碳含量对植被盖度的影响较大;植被盖度与土壤全硫含量、全磷含量、pH 值和粉粒含量呈负相关, r 介于 $-0.53 \sim -0.23$ 之间。植株平均高度与土壤全碳含量、全氮含量、有机质含量、pH 值和砂粒含量均呈正相关, r 介于 $0.11 \sim 0.89$ 之间,总体与植被盖度的主要影响因素相似。

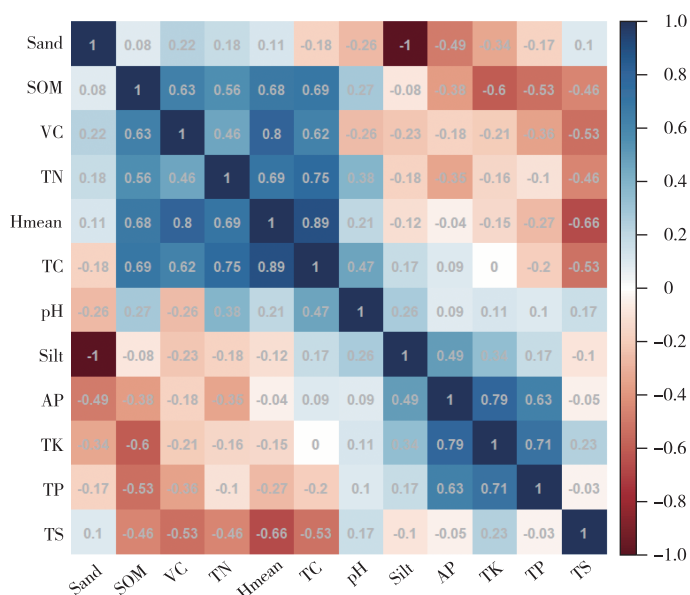
3 气候变化影响与生态修复管理

3.1 关于气候变化的风险与湖泊萎缩

IPCC 第5次评估报告(2015)表明,湖泊易受气候变化的直接影响,气温和降水变化可能导致湖泊水位、水质和整个湖泊生态系统发生变化。TAO 等^[3]研究指出,气候变化、煤炭开采和灌溉耗水是内蒙古湖泊锐减、部分地区土地荒漠化和沙化加剧的主要原因。就达里诺尔流域而言,气温升高和植被覆盖增加被认为在一定程度上造成湖泊萎缩,年降水量的减少与湖泊萎缩的趋势相一致^[4]。相关研究表明,达里诺尔湖地下径流量远大于地表径流

量^[29],陆面蒸散是衔接植被和地下水的过程,蒸散强度随植被盖度的增大而升高^[30-31]。2002年以来,我国启动实施了包括对现有植被的保护、封沙育林、飞播造林、人工造林、退耕还林、草地治理等生物措施和小流域综合治理相结合的京津风沙源治理工程,遥感监测表明,2002—2015年达里诺尔流域多年平均植被盖度(NDVI)远高于1976—2015年^[4],生态保护修复成效显著。植被稀疏的沙

地有利于地下水补给,而植被盖度较高的低洼地带因蒸散发强烈易于形成地下水的排泄区^[30]。可以看出,气候变化是造成达里诺尔湖萎缩的主要原因,浑善达克沙地植被盖度增加可能导致入湖水量减少,也是导致湖泊萎缩的原因之一。此外,人类活动,比如周边区域的矿产资源开发、牧场灌溉等不合理的水资源利用^[32],也对湖泊水位变化产生较大影响。



pH 为 pH 值, SOM 为土壤有机质, TC 为全碳, TN 为全氮, TP 为全磷, AP 为有效磷, TK 为全钾, TS 为全硫, Sand 为砂粒, Silt 为粉粒, VC 为植被盖度, Hmean 为植株平均高度。

图3 植被恢复成效与土壤 pH 值、养分含量及粒度组成的相关系数

Fig. 3 Correlation coefficients of revegetation effectiveness with soil pH value, nutrient content, and particle size composition

3.2 关于盐碱地生态修复与综合利用

湖泊萎缩区盐碱地是一种新的生态退化类型,具有土壤水分好等有利于植被恢复的条件,也具有强碱性、养分含量低等不利于植被生长的生境特点。冬春季节大面积裸地易受风力侵蚀而产生扬尘,影响区域大气环境质量,夏秋季节也会影响当地居民的农牧业生产和生物多样性保护,因此亟待加强立地条件差的盐碱地植被恢复。本研究表明,达里诺尔湖泊萎缩区土壤 pH 值为 10.30~10.68,为重度盐碱地,除土壤全磷和全钾含量外,土壤有机质、全碳、全氮含量等土壤肥力等级均很低,土壤粒度组成也以砂粒为主,生境胁迫条件下湖泊萎缩区林草植被的自然恢复难度大。碱蓬和芦苇分别作为碱蓬修复区(D2)和湿地修复区(D3)的先锋类植物,可促进土壤有机碳和氮的固存及物理稳定性^[28],并且碱蓬和芦苇作为建群种,提高了土壤养

分含量和肥力等级(表2)。值得注意的是,碱蓬修复区(D2)全硫含量较高,可能是导致植被种类单一的主要原因;湿地修复区(D3)植物丰富度较高,可能与较低的全硫含量以及丰富的有机质和全氮含量有关^[33-34]。分析植被恢复的影响因素发现,植被盖度和土壤有机质含量相关性最大($r=0.63$),可能是由于植被恢复增加了根系生物量和分泌物,从而间接提高土壤有机质含量^[31],这种情况在碱蓬修复区(D2)和湿地修复区(D3)表现较明显。达里诺尔湖泊萎缩区植被恢复也易受季节性水位的影响,这与张英蕾等^[35]研究指出的土壤水分和盐分是影响盐碱地碱蓬生长状态的关键因子结果相同。不同的是,滨海湿地碱蓬群落易受到其他物种挤压的影响^[36],内蒙古高原则主要受降水量少等影响^[4]。针对达里诺尔湖泊萎缩区生态功能修复,本研究根据海拔高低布设了近湖裸地(D1)、碱蓬修复区(D2)

和湿地修复区(D3)样地,盐碱地形成的年限和生态修复区的植被盖度、优势种群和植株数量均呈较为明显的梯度变化(表1),特别是4种生态修复区中的碱蓬修复区(D2)土壤粉粒含量最高,不仅说明植被的防风固沙作用良好,也表现为植被-土壤间的相互改善效果明显。从主导生态功能来看,位于自然保护地、生态保护红线和重要湿地等范围内的湖泊萎缩区的新增盐碱地,应实施植被恢复和生态功能提升工程。除植被恢复外,近年来,盐碱地的综合利用也受到广泛关注。孙盛楠等^[37]针对盐碱地综合利用效率低下的问题,提出了基于生态种养循环的高附加值改良和利用,从而实现以“双碳”为目标的滩涂盐碱地绿色开发、土-粮-草-畜生态种养循环模式在滩涂盐碱地的示范和推广等综合利用策略。《关于推动盐碱地综合利用的实施方案》(内党办发[2024]3号)也指出,“加强生态环境风险评估、加强林地草地湿地荒漠盐碱地治理、因地制宜利用盐碱地、支持盐碱地良种选育科技攻关”。因此,位于农牧区、沙漠边缘和滨海地区等的盐碱地,可根据区域功能定位,加强综合治理和生产利用,因地制宜地将其改造为耕地后备资源或进行林草生态修复。

3.3 关于适应气候变化的生态修复

国际上,基于自然的解决方案(nature-based solutions, NBS)自2002年首次被提出以来,近10年受到广泛讨论。NBS是一种通过有效干预生态系统、应对人类社会发展问题与挑战的自然资源管理观点,包括自然解决方案要有效地应对一个或多个社会挑战,自然解决方案的设计由尺度决定,自然解决方案为生物多样性和生态系统完整性带来净收益,自然解决方案在经济上和财政上是可行的,自然解决方案的基础是包容、透明和授权的管理流程,自然解决方案需要公平的权衡以实现其主要目标和可持续地提供多种效益,基于实证证据对自然解决方案进行适应性管理,提倡自然解决方案可作为主流方案以超越独立的、有时间限制的干预措施8项基本准则^[38]。其中,基于自然的气候变化解决方案和生态系统碳汇功能受到生态环境科技工作者的高度关注^[39-40]。盐碱地因其强碱性能以无机形式吸收大气中的CO₂,植被恢复后亦可通过光合作用固定CO₂,是陆地生态系统的重要碳库之一。

湖泊萎缩区裸露盐碱地具有巨大的固碳增汇潜力,但又是风力侵蚀的沙尘源地,亟待实施林草植被恢复工程。适应性管理是基于学习决策的一种资源管理框架,从试错的角度出发,管理者随气

候变化不断调整战略来适应管理需要,其被广泛应用于自然资源与生态系统管理等^[41]。因此,针对气候变化影响下的湖泊萎缩生态修复情况,一方面,要防治大面积裸地产生的大气扬尘、保护生物多样性、防止生境质量退化、保障当地居民生产生活环境健康,另一方面,也可通过吸收大气中的温室气体减缓气候变化。因此,基于适应性管理制定自然保护区生态保护修复专项规划,是达里诺尔湖泊萎缩区适应气候变化不利影响的“治标”和“治本”之策,主要任务包括湖泊萎缩生态风险调查与评估、生态修复分区分类、植被恢复和生态功能提升、自然保护区管理、气候变化风险防控、适应性管理对策等。针对达里诺尔湖泊萎缩区要因地制宜地采取基于自然的解决方案和人工修复措施,根据生态修复分区分类和生态系统演替理论,以成本-效益为导向,实施适应气候变化的生态修复工程,解决长期的生物多样性保护和短期的生态风险防控问题。

4 结论

本研究以内蒙古达里诺尔湖为例开展湖泊萎缩区“近湖裸地(D1)—碱蓬修复区(D2)—湿地修复区(D3)—沙地修复样地(D4)”土壤pH、养分和植被特征的对比研究,探讨了气候变化风险与湖泊萎缩、盐碱地植被恢复与综合利用、适应气候变化的生态修复等相关问题,并提出对策。

(1)湖泊萎缩区土壤pH值呈强碱性,为重度盐碱地,湖泊萎缩区样地土壤pH值高于沙地修复样地,呈现距离湖泊岸线越远、随海拔增加而增大的趋势。土壤粒度组成以砂粒为主,植被恢复指标与土壤全碳含量、全氮含量、有机质含量相关性显著。

(2)干旱区湖泊萎缩后产生的盐碱地是一种新的植被恢复困难立地,不同生态修复区土壤养分含量受植被恢复影响的差异较大,整体表现为湖泊萎缩区样地养分高于沙地修复样地,其中,碱蓬修复区(D2)全磷、全硫、全钾及有效磷含量最高,而湿地修复区(D3)有机质、全碳和全氮含量最高。达里诺尔湖泊萎缩区植被恢复成效较好,垂直于湖岸线方向上“近湖裸地(D1)—碱蓬修复区(D2)—湿地修复区(D3)”植被盖度、植株数量逐步提高。

(3)湖泊萎缩区盐碱地治理应根据主导生态功能进行生态修复分区分类。从主导生态功能来看,位于自然保护地、生态保护红线和重要湿地等范围内的湖泊萎缩区新增盐碱地,应实施植被恢复和生态功能提升工程。位于农牧区、沙漠边缘和滨海地

区等的盐碱地,可根据区域功能定位,加强综合治理和生产利用,将其因地制宜地改造为耕地后备资源或进行林草生态修复。

参考文献:

- [1] SPENCER T, ALTMAN P. Climate Change, Water, and Risk: Current Water Demands Are Not Sustainable[J]. Washington DC: Natural Resources Defense Council, 2010.
- [2] LI Y K, LIAO J J, GUO H D, *et al.* Patterns and Potential Drivers of Dramatic Changes in Tibetan Lakes, 1972–2010[J]. PLoS One, 2014, 9(11): e111890.
- [3] TAO S L, FANG J Y, ZHAO X, *et al.* Rapid Loss of Lakes on the Mongolian Plateau[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(7): 2281–2286.
- [4] LI H D, GAO Y Y, LI Y K, *et al.* Dynamic of Dalinor Lakes in the Inner Mongolian Plateau and Its Driving Factors during 1976–2015[J]. Water, 2017, 9(10): 749.
- [5] LAIRD K R, FRITZ S C, GRIMM E C, *et al.* Century Scale Paleoclimatic Reconstruction from Moon Lake, a Closed-basin Lake in the Northern Great Plains[J]. Limnology and Oceanography, 1996, 41(5): 890–902.
- [6] 孙龙, 卢涛, 孙涛, 等. 金沙江下游典型库区消落带植被恢复模式[J]. 生态学报, 2023, 43(2): 826–837. [SUN Long, LU Tao, SUN Tao, *et al.* Vegetation Restoration Pattern of Water-level-fluctuation Zone in Two Cascaded Reservoirs in the Lower Jinsha River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 826–837.]
- [7] 李海东, 林乃峰, 廖承锐, 等. 西藏山坡流动沙地物种多样性恢复及影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1762–1770. [LI Hai-dong, LIN Nai-feng, LIAO Cheng-rui, *et al.* Restoration of Plant Species Diversity on Valley Slope Sand Dunes and the Influencing Factors in Tibet, China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2017, 36(9): 1762–1770.]
- [8] HU P L, ZHANG W, CHEN H S, *et al.* Soil Carbon Accumulation with Increasing Temperature under both Managed and Natural Vegetation Restoration in Calcareous Soils[J]. Science of the Total Environment, 2021, 767: 145298.
- [9] HU P L, LIU S J, YE Y Y, *et al.* Effects of Environmental Factors on Soil Organic Carbon under Natural or Managed Vegetation Restoration[J]. Land Degradation & Development, 2018, 29(3): 387–397.
- [10] YAO S H, QIN J T, PENG X H, *et al.* The Effects of Vegetation on Restoration of Physical Stability of a Severely Degraded Soil in China[J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 723–734.
- [11] XIAO D, HE X Y, ZHANG W, *et al.* Microbiological Mechanism Underlying Vegetation Restoration across Climatic Gradients in a Karst Ecosystem[J]. Land Degradation & Development, 2022, 33(16): 3245–3259.
- [12] HU P L, ZHAO Y, XIAO D, *et al.* Dynamics of Soil Nitrogen Availability Following Vegetation Restoration along a Climatic Gradient of a Subtropical Karst Region in China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2021, 21(6): 2167–2178.
- [13] YE F, MA M H, WU S J, *et al.* Soil Properties and Distribution in the Riparian Zone: The Effects of Fluctuations in Water and Anthropogenic Disturbances[J]. European Journal of Soil Science, 2019, 70(3): 664–673.
- [14] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 4981–4992. [LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, ZOU Chang-xin, *et al.* Soil Nutrients Content and Grain Size Fraction of Aeolian Sandy Land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 4981–4992.]
- [15] LI H D, SHEN W S, ZOU C X, *et al.* Spatio-temporal Variability of Soil Moisture and Its Effect on Vegetation in a Desertified Aeolian Riparian Ecotone on the Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Hydrology, 2013, 479: 215–225.
- [16] YU J, LIU F, TRIPATHI B M, *et al.* Changes in the Composition of Soil Bacterial and Fungal Communities after Revegetation with Caragana Microphylla in a Desertified Semiarid Grassland[J]. Journal of Arid Environments, 2020, 182: 104262.
- [17] LIU L C, LIU Y B, HUI R, *et al.* Recovery of Microbial Community Structure of Biological Soil Crusts in Successional Stages of Shapotou Desert Revegetation, Northwest China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 107: 125–128.
- [18] 唐祯欣, 张伟, 吴汉卿, 等. 植被恢复对西南喀斯特地区土壤气候韧性的提升作用[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8430–8441. [TANG Yi-xin, ZHANG Wei, WU Han-qing, *et al.* Vegetation Restoration Enhances the Resilience of Soil Quality to Climate Change in the Southwest Karst Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8430–8441.]
- [19] HU Y G, ZHANG Z S, HUANG L, *et al.* Shifts in Soil Microbial Community Functional Gene Structure across a 61-year Desert Revegetation Chronosequence[J]. Geoderma, 2019, 347: 126–134.
- [20] 苟小林, 周青平, 涂卫国, 等. 高寒半湿润沙地植物与土壤微生物多样性对植被恢复的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(20): 8442–8453. [GOU Xiao-lin, ZHOU Qing-ping, TU Wei-guo, *et al.* The Responses of Biodiversity and Community Composition in Vegetation and Soil Microbes to Restoration in Alpine Cold and Sub-humid Desertified Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(20): 8442–8453.]
- [21] 赵乐凡, 杨振京, 马荣, 等. 内蒙古高原浑善达克沙地典型湖泊萎缩机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(5): 907–916. [ZHAO Le-fan, YANG Zhen-jing, MA Rong, *et al.* The Shrinking Mechanism of Typical Lakes in Hunshandake Sandy Land of Inner Mongolia Plateau[J]. South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(5): 907–916.]
- [22] 张郝哲, 田明中, 郭婧, 等. 基于RS和GIS的内蒙古达里诺尔湖1999–2010年动态监测[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(10): 41–46. [ZHANG Hao-zhe, TIAN Ming-zhong, GUO Jing, *et al.* The Dynamic Monitoring of Dalinor Lake in Inner Mongolia during 1999–2010 Based on RS and GIS[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(10): 41–46.]
- [23] 刘晶晶, 张生, 李文宝, 等. 近2400年以来达里诺尔湖区域环境演变及其气候响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1092–1101. [LIU Jing-jing, ZHANG Sheng, LI Wen-bao, *et al.* Environment E-

- volution and Its Response to Climate Change in the Dalai Nur Lake Area in the Last 2 400 Years[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(5): 1092-1101.]
- [24] 魏学. 近45 a 达里诺尔湖面积演变对气候的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2019, 33(2): 110-115. [WEI Xue. Response of Dali Lake Area to Climate Factors in the Past 45 Years[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(2): 110-115.]
- [25] 刘凯, 孙丽, 张志成, 等. 基于遥感信息的植被变化对岱海湖面积的影响[J]. *北方农业学报*, 2022, 50(5): 112-118. [LIU Kai, SUN Li, ZHANG Zhi-cheng, *et al.* Influence of Vegetation Change on the Area of Daihai Lake Based on Remote Sensing Information [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2022, 50(5): 112-118.]
- [26] 李芹, 王宇, 李笠, 等. 喀斯特高原湖泊流域基于自然解决的生态修复方案: 以云南九大高原湖泊为例[J]. *中国岩溶*, 2023, 42(3): 391-401. [LI Qin, WANG Yu, LI Li, *et al.* Ecological Restoration Scheme of Lake Basins on the Karst Plateau Based on Natural Solution: Take Nine Lakes on the Yunnan Plateau as Example [J]. *Carsologica Sinica*, 2023, 42(3): 391-401.]
- [27] 梁运献. 硫酸钡比浊法测定土壤全硫的改进[J]. *广西农业科学*, 2002, 33(4): 186-187. [LIANG Yun-xian. Improvement of the BaSO₄ Heterometric Method to Test for Total Sulphur in Soil [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2002, 33(4): 186-187.]
- [28] 程鹏, 高抒, 李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 449-455. [CHENG Peng, GAO Shu, LI Xu-sheng. Evaluation of a Wide Range Laser Particle Size Analyses and Comparison with Pipette and Sieving Methods [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 449-455.]
- [29] 邢莲莲. 达里诺尔野鸟[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 2014: 20-21.
- [30] 王旭升, 万力, 齐蕊, 等. 鄂尔多斯高原地下水与植被盖度的相互影响[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(5): 1013-1022. [WANG Xu-sheng, WAN Li, QI Rui, *et al.* Interactions between Groundwater and Vegetation Coverage in Erdos Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(5): 1013-1022.]
- [31] BALUGANI E, LUBCZYNSKI M W, REYES-ACOSTA L, *et al.* Groundwater and Unsaturated Zone Evaporation and Transpiration in a Semi-arid Open Woodland [J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 547: 54-66.
- [32] BAO Y H, ZHANG X L. The Study of Lakes Dynamic Change Based on RS and GIS: Take Dalinor Lake as an Example [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 10: 2376-2384.
- [33] 沈渭寿, 李海东, 林乃峰, 等. 雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果[J]. *生态学报*, 2012, 32(17): 5609-5618. [SHEN Wei-shou, LI Hai-dong, LIN Nai-feng, *et al.* Screening Trial for the Suitable Plant Species Growing on Sand Dunes in the Alpine Valley and Its Recovery Status in the Yarlung Zangbo River Basin of Tibet, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(17): 5609-5618.]
- [34] 江腊沙, 李海东, 沈渭寿, 等. 邓下小流域植物多样性与主要植被类型土壤养分效应[J]. *甘肃林业科技*, 2008, 33(3): 4-8. [JIANG La-sha, LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, *et al.* Plant Diversity and Effect of Main Vegetation Types on Soil Nutrients at Dengxia Catchment of Hilly Area in Southern Jiangsu Province [J]. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2008, 33(3): 4-8.]
- [35] 张英蕾, 吴炎慧, 刘红玉, 等. 基于土壤水分和盐分含量变化的滨海湿地盐地碱蓬生态退化诊断[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, 39(8): 1067-1076. [ZHANG Ying-lei, WU Yan-hui, LIU Hong-yu, *et al.* Study on Ecological Degradation Diagnosis of *Suaeda salsa* in Coastal Wetland Based on Changes of Soil Moisture and Salinity Content [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, 39(8): 1067-1076.]
- [36] 韩爽, 张华兵, 刘玉卿, 等. 盐城滨海湿地芦苇群落和互花米草群落对碱蓬群落挤压的时空变化特征[J]. *生态学报*, 2024, 44(22): 10309-10321. [HAN Shuang, ZHANG Hua-bing, LIU Yu-qing, *et al.* Temporal and Spatial Characteristics of Extrusion of *Phragmites australis* Community and *Spartina alterniflora* Community on *Suaeda salsa* Community in Yancheng Coastal Wetlands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(22): 10309-10321.]
- [37] 孙盛楠, 严学兵, 尹飞虎. 我国沿海滩涂盐碱地改良与综合利用现状与展望[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 1-13. [SUN Sheng-nan, YAN Xue-bing, YIN Fei-hu. Current Situation and Prospect of Improvement and Comprehensive Utilization for Saline-alkali Land of Coastal Tidal Flats in China [J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 1-13.]
- [38] IUCN. Global Standard for Nature-based Solutions [R]. Gland: IUCN, 2019.
- [39] 张小全, 谢茜, 曾楠. 基于自然的气候变化解决方案[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(3): 336-344. [ZHANG Xiao-quan, XIE Xi, ZENG Nan. Nature-based Solutions to Address Climate Change [J]. *Climate Change Research*, 2020, 16(3): 336-344.]
- [40] 于贵瑞, 朱剑兴, 徐丽, 等. 中国生态系统碳汇功能提升的技术途径: 基于自然解决方案[J]. *中国科学院院刊*, 2022, 37(4): 490-501. [YU Gui-rui, ZHU Jian-xing, XU Li, *et al.* Technological Approaches to Enhance Ecosystem Carbon Sink in China: Nature-based Solutions [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2022, 37(4): 490-501.]
- [41] 李海东. 脆弱区气候变化与生态保护修复成效评估研究[M]. 北京: 中国环境出版集团, 2019: 10-12.

作者简介: 赵立君(1992—), 男, 安徽铜陵人, 助理研究员, 硕士, 主要从事环境经济与生态保护修复研究。E-mail: swfu_zlj@126.com

(责任编辑: 李祥敏)