



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果

田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 许素, 徐雁南, 李海东

引用本文:

田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 等. 内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 601–608.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0331>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁矿生态修复区生态系统服务价值增量评估

叶尔纳尔·胡马尔汗, 马伟波, 徐向华, 迪丽努尔·托列吾别克, 方颖, 李海东

农业资源与环境学报. 2020, 37(4): 594–600 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0197>

丹江口水源涵养区退耕还草土壤线虫群落变化特征

周广帆, 秦洁, 祁小旭, 王瑞琪, 赵建宁, 谭炳昌, 杨殿林

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 308–318 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0247>

两种不同生境对豚草入侵影响的实验研究

郭涛, 邝继云, 吕洁杰, 廖斌

农业资源与环境学报. 2015, 32(5): 511–516 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0086>

覆盖作物对茶园节肢动物群落多样性影响

王明亮, 刘惠芬, 王丽丽, 杨殿林, 汪洋, 修伟明, 李刚, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 326–331 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0490>

新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 杨磊, 徐晓龙, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 17–23 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 等. 内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(4): 601–608.
TIAN Jia-rong, MA Wei-bo, QI Xu-dong, et al. Effectiveness of vegetation recovery in an ecological restoration area around an iron tailings pond in Inner Mongolia[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(4): 601–608.



开放科学 OSID

内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果

田佳榕^{1,2}, 马伟波¹, 戚旭东³, 许素¹, 徐雁南², 李海东^{1*}

(1.生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 2.南京林业大学, 南方现代林业协同创新中心, 南京 210037; 3.江苏省地质矿产局第一地质大队, 南京 210041)

摘要:尾矿库生态修复可以在一定程度上阻隔库内污染物扩散, 适宜植物种选择不仅有利于确保坝体地质安全, 还是构建区域生态安全屏障的重要措施。本研究选取内蒙古某铁矿尾矿库的坝体边坡绿化、库外道路、人工湿地 3 个类型生态修复区, 运用植物群落生态学的调查方法, 分析与探讨了尾矿库外“边坡-道路-人工湿地”环境梯度下生态修复的适生植物种及物种多样性变化特征。结果表明:尾矿库生态修复区共发现植物 31 种, 隶属 13 科 30 属, 以菊科、豆科、禾本科和藜科为主, 占总数的 71.0%。边坡绿化区和库外道路区的草本优势种为狗尾草[*Setaria viridis* (L.) Beauv]、冰草[*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn]、猪毛菜(*Salsola collina* Pall)、黄芪[*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge], 共有灌木优势种为白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr); 人工湿地区的建群种为芦苇[*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud]。边坡绿化区物种多样性的 Shannon-wiener 指数(H' 值)和 Pielou 均匀度指数(J' 值)最高, 分别为 0.983 和 0.347, 人工湿地区的 H' 值和 J' 值最低, 分别为 0.049 和 0.030; 边坡-道路之间的相异性指数为 0.647, 道路-湿地之间的相异性指数为 0.818, 物种组成的替代速率前者大于后者。研究结果可以为相似类型的铁矿尾矿库生态修复的植物种选择和稳定群落构建提供参考。

关键词:矿山; 生态修复; 群落生态学; 环境梯度; 物种多样性

中图分类号: Q145

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)04-0601-08

doi: 10.13254/j.jare.2019.0331

Effectiveness of vegetation recovery in an ecological restoration area around an iron tailings pond in Inner Mongolia

TIAN Jia-rong^{1,2}, MA Wei-bo¹, QI Xu-dong³, XU Su¹, XU Yan-nan², LI Hai-dong^{1*}

(1. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 2. Centre of Co-Innovation for Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 3. The First Geological Brigade of Jiangsu Geology & Mineral Exploration Bureau, Nanjing 210041, China)

Abstract: To a certain extent, the ecological restoration of tailings ponds can prevent the seepage of pollution into reservoirs and is an important measure for constructing a regional ecological security barrier. Three types of ecological restoration areas, including a sloped green area, road area beside the reservoir, and artificial wet area, were selected for an iron tailings pond in Inner Mongolia. A vegetation community survey was conducted, and the suitable plant species and species diversity variation in the ecological restoration process under the environmental gradient of “slope-road-artificial wetland” outside the tailings pond were investigated and analyzed. The results showed that a total of 31 species of plants were found in the ecological restoration area of the tailings pond, which belonged to 13 families and 30 genera; Compositae, Leguminosae, Gramineae, and Chenopodiaceae accounted for 71.0% of the total. In the sloped green area and road area beside the reservoir, the dominant herbaceous species were *Setaria viridis* (L.) Beauv, *Agropyron cristatum* (L.) Gaertn, *Salsola collina* Pall, and

收稿日期: 2019-06-20 录用日期: 2019-10-21

作者简介: 田佳榕(1994—), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向为生态环境遥感。E-mail: tianjiarong.228@qq.com

*通信作者: 李海东 E-mail: lih2020@163.com

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务专项(GYZX190101)

Project supported: Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of China(GYZX190101)

Astragalus membranaceus (Fisch.) Bunge, and the dominant shrub species was *Nitraria tangutorum* Bobr. Meanwhile, *Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud was established as the group species in the artificial wet area. The Shannon-wiener index (H value) and Pielou index (J value) of species diversity were the highest in the sloped green area with values of 0.983 and 0.347, respectively, and the lowest in the artificial wetland area with values of 0.049 and 0.030, respectively. The anisotropy index between the slope and road was 0.647, and that between the road and wetland was 0.818; The rate of substitution of species of the former was larger than that of the latter. The results can provide a reference for the selection of plant species and the construction of stable communities for the ecological restoration of similar iron tailings ponds.

Keywords: mining area; ecological restoration; community ecology; environmental gradient; species diversity

尾矿库是堆存选矿废弃物的主要场所,不仅占用大量的土地资源^[1-2],而且形成长期大面积裸露的库面和边坡,是影响区域生态安全和人居环境健康的重要潜在风险源^[12-4]。近年来,尽管矿山环境治理和生态修复力度在不断加大,但是历史遗留的矿山环境问题仍然比较突出,大型尾矿库仍存在环境和生态安全问题^[5]。随着中央环境保护督察发现的一批矿山生态环境问题被曝光,加强尾矿库生态修复已经成为当前生态环境保护的紧迫问题^[6-9]。

适生植物种的筛选和稳定群落构建是尾矿库生态修复的重要内容。一些学者对矿区植被恢复的乔木与灌木^[10]、植物动态^[11]、生态演变^[12]等的研究结果表明,引种适宜的灌木和草本植物可快速复绿坝体坡面,可以有效地降低坡面的地表径流,防止水土流失造成的污染物迁移。稳定群落构建通常与生态系统的复杂性和稳定性相联系,反映群落种类组成、结构水平及功能特性^[13]。因此,构建稳定植物群落的物种多样性可以有效提升尾矿库生态修复成效^[14],对改善矿区生态环境质量具有重要作用^[15]。本文通过群落生态学调查,探讨了内蒙古某尾矿库南部的生态修复区适生植物种和物种多样性变化,以期对相似类型的铁矿尾矿库生态修复的植物种选择和稳定群落构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

内蒙古某铁矿尾矿库位于包头市哈德门和昆都仑河冲洪积扇前缘交汇处,黄河平原分布于尾矿库南500~1 000 m被夷平的二级阶地至黄河之间,地势北高南低,平均坡降约0.4%。库内堆存近1.8亿t细粉末状的尾矿,是中国最大的尾矿库之一。尾矿库是平地筑坝围成,东西宽约3.2 km,南北长约3.5 km,占地面积约12 km²。尾矿库处在温带草原和荒漠过渡地带,野生植物以菊科、禾本科、豆科和藜科为主,有少量灌木,周围亦有人工栽植的杨、榆、柳和沙枣

等^[16-17]。

尾矿库南部边坡在进行生态修复前,植被覆盖极少,其中多为柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙冬青[*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) Cheng f.]和花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch. et Mey.)等木本植物。在进行大规模的人工喷播绿化后,大量草本植被生长迅速,形成生态修复区。因此可将木本植物视为修复区的原生植被,而大部分草本植被视为人工恢复植被。尾矿库目前仍在服役期,库内暂不适宜进行植被恢复,需要闭库后才能进行生态修复。尾矿库南部边坡及毗邻的人工湿地工程是尾矿库环境治理的重要内容。人工湿地工程自2015年持续实施至2017年,尾矿库南部边坡植被恢复工程于2017年2月开始,持续至2018年8月。生态修复措施主要包括边坡喷播绿化7万m²、渗漏泵站的扩容改造、灌溉管网建设和坝体南侧湿地人工景观营造等。

1.2 研究方法

1.2.1 群落生态学调查

本研究采用以空间代替时间的方法,将“边坡-道路-湿地”环境梯度与尾矿库生态修复区的植被恢复过程(前期-中期-后期)联系起来。2018年8月,在尾矿库生态修复区按边坡绿化区、库外道路区和人工湿地3种类型,由西向东设置样线和样方^[18],样线长度为2 km,以300 m的距离等间隔布设6个样方,共18个样方。其中,人工湿地区S1~S6;库外道路区D1~D6;边坡绿化区B1~B6(图1)。样方大小为2 m×2 m。调查与记录的内容包括生境描述和植物种类、数量、密度、盖度等。

1.2.2 物种多样性计算

根据调查数据,计算各样方和不同生境的植物多样性指数^[19-20],包括物种丰富度 S 、 α 多样性和 β 多样性指数。 α 多样性指数计算公式如下:

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (i=1, 2, 3, \dots, S) \quad (1)$$

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (i=1, 2, 3, \dots, S) \quad (2)$$

$$J = H / \ln S \quad (3)$$

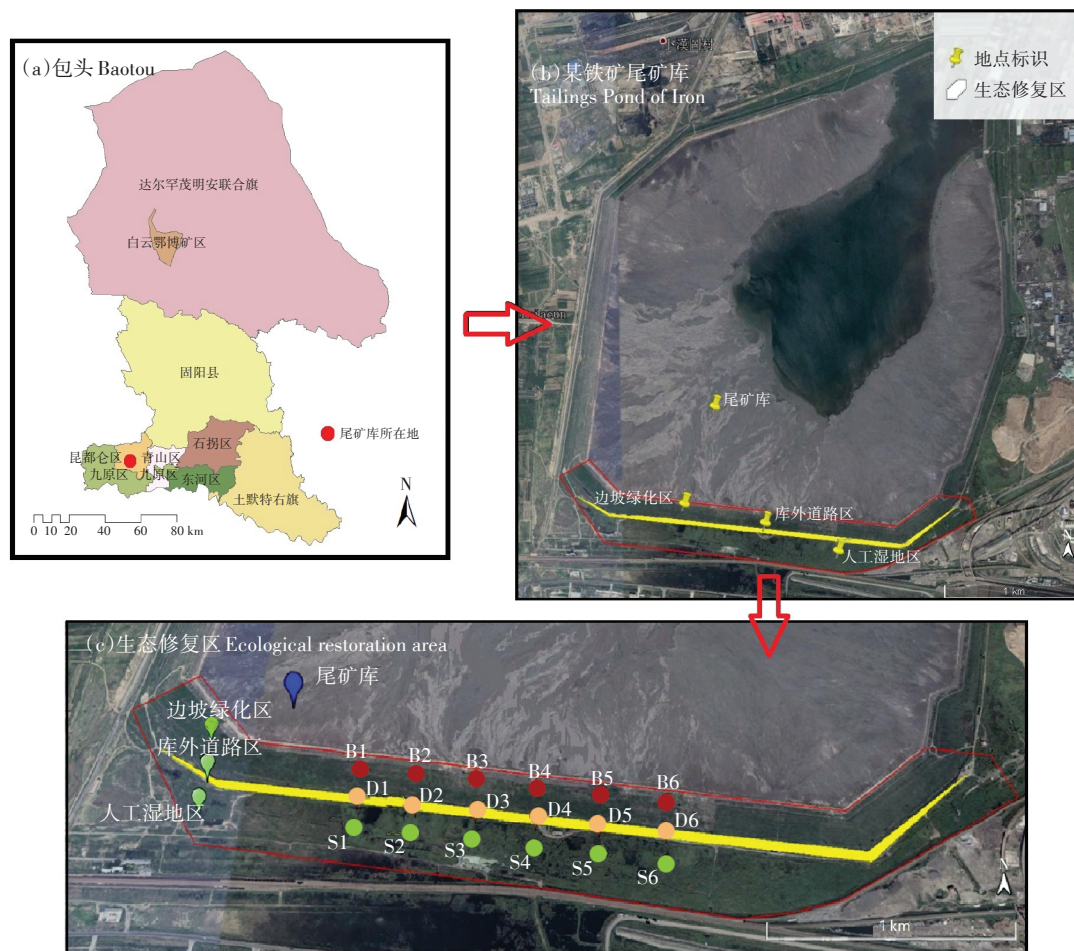


图1 生态修复区样点分布图

Figure 1 Distribution of sample sites for vegetation investigation ecological restoration area

式(1)~(3)中: H 为Shannon-wiener指数; S 为物种丰富度,即出现在样方内的物种数; D 为Simpson多样性指数; J 为Pielou均匀度指数; P_i 为物种 i 的个体数占群落中总个体数的比例。

β 多样性指数计算公式如下:

$$CD=1-[2c/(a+b)] \quad (4)$$

$$B=(a+b-2c)/2 \quad (5)$$

式(4)~(5)中: CD 为相异性指数; B 为Cody指数; a 和 b 分别为两群落的物种数; c 为两群落的共有物种数。

上述指数中Shannon-wiener指数和Simpson多样性指数均可衡量一个群落的物种多样性,其值越大,表示该群落中物种多样性越高^[20]。Pielou均匀度指数表示群落中不同物种分布的均匀程度,值越大,均匀程度越高。相异性指数反映群落间或者样方间物种组成的差异性,值越大,差异性越大。Cody指数则反映样方物种组成沿环境梯度的替代速率,值越大,替代速率越快。

1.2.3 统计分析

为分析坡度和土壤含水量对植被恢复的可能影响,将环境因子定性化参与计算,参照刘世梁等^[21]提出的经验方法对坡度进行赋值,上坡位、中坡位、下坡位依次赋值为0.4、1.0、0.8;对土壤含水量进行赋值,边坡绿化区、库外道路区、人工湿地区依次赋值为0.5、1.0、2.0,值越大,代表含水量越高。首先,对物种出现频数和多样性矩阵数据进行去趋势对应分析(De-trended correspondence analysis, DCA)分析,并进行蒙特卡洛检验(95%置信度)。其次,根据分析结果对物种和环境因子矩阵进行典范对应分析(Canonical correlation analyses, CCA),并将 α 多样性指数与环境因子矩阵进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

使用Microsoft Excel 2010对生态学群落调查的数据进行统计汇总,统计内容主要包括各植物种的生活型、科、属、数量比例和盖度比例。对各植物种和土壤含水量、坡度进行CCA分析,对18块样地的物种丰

富度、Shannon-wiener 指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数与环境因子进行 RDA 分析,CCA 和 RDA 作图均采用 CANOCO 5.0 软件(Biometris-Plant Research International, Wageningen, The Netherlands)制作。

2 结果与分析

2.1 不同生态修复区的适生植物种

由表 1 可知,尾矿库边坡绿化、库外道路和人工湿地 3 种类型的生态修复区内共有植物 31 种,隶属于 13 科 30 属。以菊科(19.4%)、豆科(19.4%)、禾本科(16.1%)和藜科(16.1%)为主。其中,草本群落物种较为丰富,数量上占 74.2%,且盖度较高,而木本植物(灌木)数量较少,只占 25.8%。除醉马草 [*Achnatherum inebrians* (Hance) Keng] 和 芨芨草 [*A. splendens* (Trin.) Nevski] 同属于 芨芨草属 (*Achnatheherum Beauv*),其余没有相同属的植物种。3 类修复区共有植物种为碱蓬 [*Suaeda glauca* (Bunge) Bunge], 边坡绿化区和库外道路区的共有种为狗尾草 (*Setaria viridis* (L.) Beauv)、冰草 [*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn]、猪毛菜 (*Salsola collina* Pall)、黄芪 [*Astragalus membranaceus* (Fisch.) Bunge] 和白刺 (*Nitraria tangutorum* Bo-br), 而库外道路区和人工湿地区的共有种为芦苇 [*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Ex Steud]。

边坡绿化区共含有 17 种植物,包括草本 12 种(多为多年生草本)、灌木 5 种。优势种为豆科的苜蓿 (*Medicago sativa* L.)、沙冬青、花棒和柠条锦鸡儿,禾本科的醉马草、狗尾草和芨芨草。芨芨草和苜蓿数量最多,达到总数的 22.15% 和 17.97%,盖度为 6.00% 和 12.50%,而数量只占 5.11% 的沙冬青的盖度最大,为 24.67%。数量占 0.07% 的大籽蒿 (*Artemisia sieversiana* Ehrhart ex Willd)、占 0.20% 的花棒和占 1.10% 的柠条锦鸡儿的盖度分别为 7.83%、5.83% 和 8.33%。由此看出,大多数灌木虽数量少,但植株高大,覆盖度高,是边坡绿化区不可缺少的优势种群。

库外道路区包含 17 种植物,其中草本植物 14 种、灌木 3 种。优势种为禾本科的芦苇和冰草,藜科的猪毛菜、碱蓬和盐爪爪 [*Kalidium foliatum* (Pall) Moq], 十字花科的播娘蒿 [*Descurainia sophia* (L.) Webb ex Prantl]。其中碱蓬的数量最多,为总数的 52.52%,其盖度最大,为 21.07%。此外数量只占 1.66% 的猪毛菜和 0.02% 的盐爪爪的盖度分别占 17.23% 和 6.07%。由此可见,库外道路区草本植物类型多,数量大,覆盖

范围广,灌木类植物较少,且不具备竞争力。

人工湿地区包含 5 种植物,均为草本植物,其中芦苇几乎覆盖全部样方,为该修复区的建群种,香蒲 (*Typha orientalis* Pres)、灯芯草 (*Juncus effusus* L.) 和圆穗苔草 (*Carex media* R.Br.) 在样方内少量分布,植被分布不均匀。

2.2 生态修复区物种多样性变化

由表 2 可见,“边坡-道路-湿地”梯度的 3 类生态修复区的植被盖度逐渐提高,由 83.83% 提高到 100%,各修复区的植物密度都很大,但物种丰富度 (S) 却在下降,由 17 种植物变为 5 种植物,相应的物种 α 多样性指数也不断减小。由表 2 可见,Shannon-wiener 指数 (H 值) 由 0.983 下降到 0.049, Simpson 多样性指数 (D 值) 由 0.873 下降到 0.035, Pielou 均匀度指数 (J 值) 也从 0.347 下降到 0.030。

生态修复区 β 多样性指数如图 2 所示,不同生态修复区之间差异性较大,其中边坡-道路的相异性指数 (CD 值) 为 0.647,道路-湿地的 CD 值为 0.818,这从两者之间的相同植物种数也能反映出来:前者相同植物种为 6 种,后者为 2 种。对于 Cody 指数,物种组成由边坡绿化区向库外道路区的替代速率较大,为 11,而道路-湿地间差异很大,所以其替代的速率相对较小,为 9。

2.3 环境因子变化对生态修复的影响

由图 3 可见,CCA 4 个轴的解釋量分别为 15.81%、10.67%、6.54%、14.10%,累计解释了物种与 2 种环境因子关系信息的 47.12%。其中 1 轴不与任何环境因子相关,2 轴与土壤含水量相关,4 轴与坡度相关,3 轴与两者均相关,坡度的相关性更大。按照 CCA 排序图,修复区的物种按照已知的影响因子可分为 3 个类群:其中香蒲、灯芯草、圆穗苔草和芦苇为第一类群,主要受土壤含水量的影响;第二类群植物种较多,有碱蓬、碱菀 (*Tripolium vulgare* Nees)、播娘蒿和枸杞 (*Lycium chinense* Miller) 等,主要受坡度影响;剩余其他植物属于第 3 类群,受环境因子的作用相对较小,属于尾矿库生态修复区适生植物的典型代表。

生态修复区共 18 块样地的物种丰富度、Shannon-wiener 指数、Simpson 多样性指数、Pielou 均匀度指数与环境因子的冗余 (RDA) 分析如图 4 所示。 α 多样性 RDA 第 1 轴的特征值为 0.761,第 2 轴特征值为 0.036,第 3 轴特征值为 0.004,仅第 1 轴对物种多样性变异的累计解释率就达 76.10%。Shannon-wiener 指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均与土壤含水量呈负相关。

表1 尾矿库不同类型生态修复区的适生植物种

Table 1 Suitable plant species in different ecological restoration areas of the tailings pond

生态修复区 Ecological restoration area	编号 No.	物种 Species	拉丁名 Latin name	生活型 Life form	科 Family	属 Genus	个体数比例 Individual ratio/ %	盖度比例 Coverage ratio/ %
边坡绿化区	1	秋英	<i>Cosmos bipinnata</i> Cav	多年生草本	菊科	秋英属	10.12	3.33
	2	苜蓿	<i>Medicago sativa</i> L.	多年生草本	豆科	苜蓿属	17.97	12.50
	3	醉马草	<i>Achnatherum inebrians</i> (Hance) Keng	多年生草本	禾本科	芨芨草属	7.61	8.67
	4	狗尾草	<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv	一年生草本	禾本科	狗尾草属	10.22	10.50
	5	迷迭香	<i>Rosmarinus officinalis</i> Linn	灌木	系唇形科	迷迭香属	3.64	1.67
	6	沙东青	<i>Ammopiptanthus mongolicus</i> (Maxim. ex Kom) Cheng f.	灌木	豆科	沙冬青属	5.11	24.67
	7	砂引草	<i>Tournefortia sibirica</i> L.	多年生草本	紫草科	紫丹属	4.44	6.17
	8	冰草	<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	多年生草本	禾本科	冰草属	8.92	1.67
	9	猪毛菜	<i>Salsola collina</i> Pall	一年生草本	藜科	猪毛草属	6.93	3.00
	10	大籽蒿	<i>Artemisia sieversiana</i> Ehrhart ex Willd	一、二年生草本	菊科	蒿属	0.07	7.83
	11	黄芪	<i>Astragalus membranaceus</i> (Fisch.) Bunge	多年生草本	蝶形花科	黄芪属	0.65	4.83
	12	芨芨草	<i>Achnatherum splendens</i> (Trin.) Nevski	多年生草本	禾本科	芨芨草属	22.15	6.00
	13	狗牙根	<i>Cynodon dactylon</i> (L.) Pers	多年生草本	禾本科	狗牙根属	0.26	3.33
	14	碱蓬	<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge	一年生草本	藜科	碱蓬属	0.08	0
	15	花棒	<i>Hedysarum scoparium</i> Fisch. et Mey	灌木	蝶形花科	岩黄芪属	0.20	5.83
	16	白刺	<i>Nitraria tangutorum</i> Bobr	灌木	蒺藜科	白刺属	0.53	1.00
	17	柠条锦鸡儿	<i>Caragana korshinskii</i> Kom	灌木	蝶形花科	锦鸡儿属	1.10	8.33
库外道路区	4	狗尾草	<i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv	一年生草本	禾本科	狗尾草属	1.06	0.95
	8	冰草	<i>Agropyron cristatum</i> (L.) Gaertn	多年生草本	禾本科	冰草属	6.43	7.07
	9	猪毛菜	<i>Salsola collina</i> Pall	一年生草本	藜科	猪毛草属	1.66	17.23
	11	黄芪	<i>Astragalus membranaceus</i> (Fisch.) Bunge	多年生草本	蝶形花科	黄芪属	0.55	5.90
	14	碱蓬	<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge	一年生草本	藜科	碱蓬属	52.52	21.07
	16	白刺	<i>Nitraria tangutorum</i> Bobr	灌木	蒺藜科	白刺属	0.02	1.23
	18	芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. Ex Steud	多年生草本	禾本科	芦苇属	13.78	19.06
	19	碱菀	<i>Tripolium vulgare</i> Nees	一年生草本	菊科	碱菀属	0.22	0.57
	20	蒺藜	<i>Tribulus terrester</i> L.	一年生草本	蒺藜科	蒺藜属	1.57	0.73
	21	乳苣	<i>Mulgedium tataricum</i> (Linn) DC.	多年生草本	菊科	乳苣属	1.64	2.57
	22	盐爪爪	<i>Kalidium foliatum</i> (Pall) Moq	灌木	藜科	盐爪爪属	0.02	6.07
	23	鹅绒藤	<i>Cynanchum chinense</i> R. Br	多年生草本	萝藦科	鹅绒藤属	0.07	0.57
	24	枸杞	<i>Lycium chinense</i> Miller	灌木	茄科	枸杞属	0.91	1.95
	25	播娘蒿	<i>Descurainia sophia</i> (L.) Webb. ex Prantl	一年生草本	十字花科	播娘蒿属	19.18	11.73
	26	紫菀	<i>Aster tataricus</i> L. f.	多年生草本	菊科	紫菀属	0.04	1.23
	27	灰绿藜	<i>Chenopodium glaucum</i> L.	一年生草本	藜科	藜属	0.16	0.17
	28	苍耳	<i>Xanthium sibiricum</i> Patrín ex Widder	一年生草本	菊科	苍耳属	0.16	1.90
人工湿地区	14	碱蓬	<i>Suaeda glauca</i> (Bunge) Bunge	一年生草本	藜科	碱蓬属	0.77	3.33
	18	芦苇	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. Steud	多年生草本	禾本科	芦苇属	98.21	96.00
	29	香蒲	<i>Typha orientalis</i> Pres	多年生草本	香蒲科	香蒲属	0.53	0.33
	30	灯芯草	<i>Juncus effusus</i> L.	一、多年生草本	灯芯草科	灯芯草属	0.38	0.17
	31	圆穗苔草	<i>Carex media</i> R.Br.	多年生草本	莎草科	薹草属	0.11	0.17

3 讨论

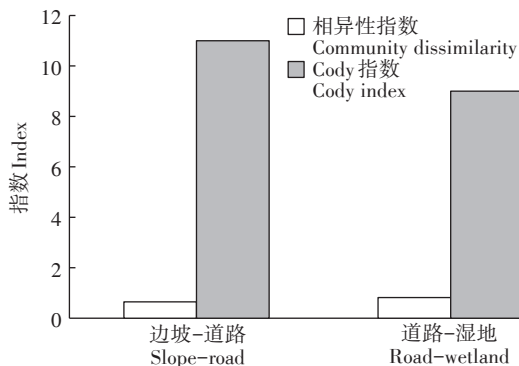
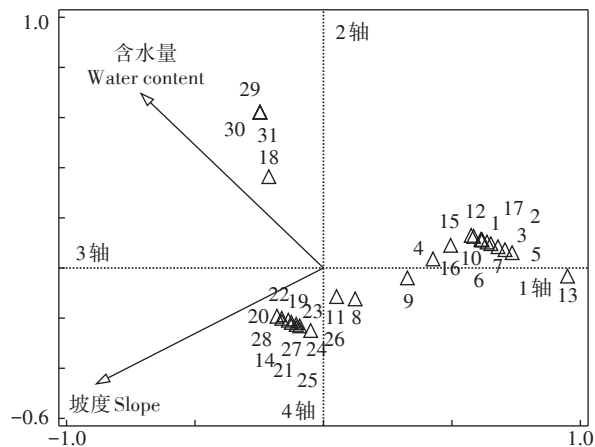
植被恢复是尾矿库生态修复的重要内容。相关

研究表明,植被恢复过程中灌木的生长发育对于土壤有机碳、全氮、全磷、有效氮和有效磷均有不同程度的富集作用,具有明显的“保种”作用和“肥岛”效

表2 尾矿库不同类型生态修复区的植被盖度及 α 多样性比较

Table 2 Comparison of vegetation coverage and plant diversity in different ecological restoration areas

生态修复区 Ecological restoration area	植被盖度 Vegetation coverage/%	物种丰富度 Species richness(<i>S</i>)	Shannon-wiener指数 Shannon-wiener index(<i>H</i>)	Simpson多样性指数 Simpson diversity index(<i>D</i>)	Pielou均匀度指数 Pielou evenness index(<i>J</i>)
边坡绿化区	83.83	17	0.983	0.873	0.347
库外道路区	88.33	17	0.639	0.663	0.225
人工湿地区	100.00	5	0.049	0.035	0.030

图2 各生态修复区的植物 β 多样性指数Figure 2 Plant β diversity index in ecological restoration areas

图中数字为物种编号。同表1

The numbers in the figure are the No. of species. Same as Table 1

图3 适生物种与环境因子CCA排序图

Figure 3 CCA sequence diagram of fitness species and environmental factors

应^[21-22]。本研究发现,离尾矿库越近的植物种适应生境胁迫的能力越强,边坡绿化区中的灌木种类主要有沙冬青、花棒和柠条锦鸡儿,这些灌木属于原生耐旱植被,对困难立地条件有着较强的适应能力,并对该生态修复区的草本植物恢复提供庇护;草本植物有苜蓿、狗尾草和芨芨草等,具有适应力强、种子容易传播的特点。库外道路区的土壤水分含量较高,适生植物

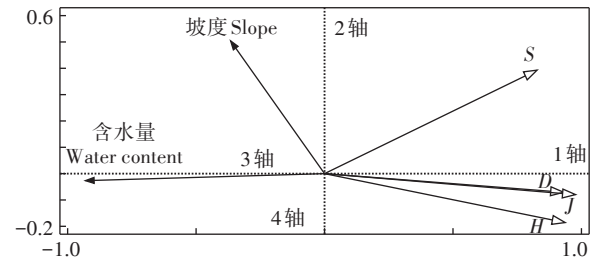


图4 生态修复区内物种多样性与环境因子RDA排序图

Figure 4 RDA sequence diagram of species diversity and environmental factors in the ecological restoration area

多为喜湿、耐涝类植物。人工湿地区内,适生植物均为水生类植被,如芦苇、碱蓬等。边坡绿化区、库外道路区分别有灌木5种和3种,人工湿地区无灌木,由此看出,灌木在尾矿库生态修复区的植被恢复中具有重要性,特别是在生态修复前期^[23-24]。

尾矿库生态修复植物种的选择,特别是边坡绿化区,首先考虑的是坝体地质安全,一定要做到因地制宜、适地适树,慎用高大和主根发达的乔木,避免因根系穿孔而造成尾矿库渗漏和安全问题;其次,困难立地条件下的土壤理化性质和生境胁迫、气候因素等都是植被恢复的潜在关键因素。RDA分析显示,尾矿库边坡绿化区因坝体渗漏受生境胁迫作用较明显,目前的植被恢复,避免采用高大乔木,减小影响坝体安全的潜在风险,从植物种类、优势种数量和植物多样性考虑选择最适宜物种,不仅可以提高景观功能,而且可以在一定程度上阻隔库内污染物扩散,构建区域生态安全屏障。本研究重点关注尾矿库生态修复区的适生植物种和多样性,未能研究揭示尾矿库植被恢复对关键污染物扩散的阻隔机制。有研究表明,尾矿库周围土壤的重金属含量高,营养元素缺乏,主要重金属元素的潜在生态风险指数由高至低为Pb>As>Cu>Zn>Cr,生境胁迫易造成土壤结构差而限制植被恢复的效果^[16-17]。建议下一步结合生态修复工程开展尾矿库植被恢复对关键污染物扩散的阻隔效应研究,提升尾矿库生态系统功能修复的成效。

4 结论

(1)内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区内共发现植物31种,隶属于13科30属,以菊科、豆科、禾本科和藜科为主,占总数的71.0%。占据主要优势的是草本植物,而木本植物数量虽少,但其盖度高,在矿区植被恢复前期具有十分重要的作用。

(2)不同类型生态修复区的优势种差异性大。边坡绿化区的优势种较多,草本植物为苜蓿、醉马草和狗尾草等,木本植物为沙冬青、花棒和柠条锦鸡儿。库外道路区优势种主要为草本植物(如芦苇、碱蓬和播娘蒿等),木本植物只有盐爪爪。芦苇为人工湿地区的建群种。

(3)边坡绿化区的植物多样性最高,人工湿地区的植物多样性最低。

(4)尾矿库生态修复首先要考虑坝体地质安全。在植物种选择和稳定群落构建上,尾矿库生态修复前期可在确保坝体地质安全的前提下,引种原生的木本植物,以沙冬青为主、花棒和柠条锦鸡儿为辅,改善土壤条件;随后引种草本植物,以苜蓿和狗尾草为主、醉马草和碱蓬为辅。播种方法上,可采用人工喷播和滴灌等方式提高尾矿库植被恢复效果。

参考文献:

- [1] 谢李娜,周建伟,徐文. 澳大利亚尾矿治理现状及先进技术综述[J]. 环境工程, 2015, 33(10):72-76.
XIE Li-na, ZHOU Jian-wei, XU Wen. Current situation and advanced technology of tailings management in Australia[J]. *Environmental Engineering*, 2015, 33(10):72-76.
- [2] 林晓燕,许闯,龚亚龙,等. 不同植物物种及其组合对铅锌尾矿库修复效果研究[J]. 环境工程, 2016, 34(S1):983-987, 949.
LIN Xiao-yan, XU Chuang, GONG Ya-long, et al. Repairing effect of different plant species and their combinations on lead-zinc tailings[J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(S1):983-987, 949.
- [3] 陈芳清,张丽萍,谢宗强. 三峡地区废弃地植被生态恢复与重建的生态学研究[J]. 长江流域资源与环境, 2004(3):286-291.
CHEN Fang-qing, ZHANG Li-ping, XIE Zong-qiang. Vegetation restoration of wasteland in Three Gorges area[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004(3):286-291.
- [4] 刘文清. 北京市矿山地质环境现状及发展趋势[J]. 城市地质, 2014, 9(1):4-8.
LIU Weng-qing. Development trend and present situation of mining geological environment in Beijing[J]. *Urban Geology*, 2014, 9(1):4-8.
- [5] 蒋美琛,田淑芳,詹骞. 北京周边重点矿山开采区的植被恢复状况评价[J]. 中国矿业, 2017, 26(6):88-94.
JIANG Mei-chen, TIAN Shu-fang, ZHAN Qian. Assessment of the

- vegetation restoration of the key mining areas around Beijing[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(6):88-94.
- [6] 环境保护部. 尾矿库环境风险评估技术导则(试行)[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2015.
Ministry of Environmental Protection. Technical guideline for environmental risk assessment of tailings pond(trial implementation) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2015.
- [7] 李海东,沈渭寿,贾明,等. 大型露天矿山生态破坏与环境污染损失的评估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6):112-118.
LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, JIA Ming, et al. Economic losses assessment for ecological destruction and environmental pollution in large-scale opencast mine[J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 2015, 39(6):112-118.
- [8] 李海东,沈渭寿,卞正富. 西部矿产资源开发的生态环境损害与监管[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(3):345-350.
LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, BIAN Zheng-fu. Damages to eco-environment caused by mineral resources exploitation in west China and supervisory countermeasures[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2016, 32(3):345-350.
- [9] 李海东,沈渭寿,司万童,等. 中国矿区土地退化因素调查:概念、类型与方法[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4):445-451.
LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, SI Wan-tong, et al. Investigation of driving factors of land degradation in mine areas in China: Concept, types and approaches[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2015, 31(4):445-451.
- [10] Zhao Z Q, Wang L H, Bai Z K, et al. Development of population structure and spatial distribution patterns of a restored forest during 17-year succession (1993—2010) in Pingshou opencast mine spoil, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187:431-443.
- [11] 任慧君,李素萃,刘永兵. 生态脆弱区露天煤矿生态修复效应研究[J]. 煤炭工程, 2016, 48(2):127-130.
REN Hui-jun, LI Su-cui, LIU Yong-bing. Ecological rehabilitation effects of open-pit coal mine in ecological fragile region[J]. *Coal Engineering*, 2016, 48(2):127-130.
- [12] 张笑然,白中科,曹银贵,等. 特大型露天煤矿区生态系统演变及其生态储存估算[J]. 生态学报, 2016, 36(16):5038-5048.
ZHANG Xiao-ran, BAI Zhong-ke, CAO Yin-gui, et al. Ecosystem evolution and ecological storage in outsize open-pit mining area[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16):5038-5048.
- [13] 李海东,高媛赞,燕守广. 生态保护红线区废弃矿山生态修复监管[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(8):673-677.
LI Hai-dong, GAO Yuan-yun, YAN Shou-guang, et al. Supervisory countermeasures of ecological restoration of abandoned mine areas in the ecological conservation redline area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2018, 34(8):673-677.
- [14] 王琼,辜再元,周连碧. 矿山废弃地人工植被恢复边坡质量综合评价研究[C]//2015年中国环境科学学会学术年会论文集. 北京:中国环境科学学会, 2015.
WANG Qiong, GU Zai-yuan, ZHOU Lian-bi. Study on comprehensive evaluation of slope quality of artificial vegetation restoration in

- abandoned mines[C]//Proceedings of the annual meeting of the Chinese Society for Environmental Sciences. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015.
- [15] 王 军, 李红涛, 郭义强, 等. 煤矿复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(2): 126-136.
WANG Jun, LI Hong-tao, GUO Yi-qiang, et al. Research progress and perspectives on biodiversity conservation and restoration of coal mine reclamation area[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(2): 126-136.
- [16] 王建宏. 包钢尾矿坝外源稀土积累区土壤微生物特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2011.
WANG Jian-hong. Study on characteristics of soil microbe in exogenous rare earths accumulation area of Baogang tailings dam[D]. Hohhot: Inner Mongolia Normal University, 2011.
- [17] 李艳君. 包钢尾矿坝重金属污染的研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2011.
LI Yan-jun. The study on heavy metal pollution of Baogang tailings dam[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2011.
- [18] 张洪达, 王保一, 刘 霞, 等. 奥维地图在区域水土流失监测野外调查工作中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 85-94.
ZHANG Hong-da, WANG Bao-yi, LIU Xia, et al. Application of Ovitamap in field survey of regional water and soil loss monitoring[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2018, 16(5): 85-94.
- [19] 马克平, 黄建辉. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究: II 丰富度、均匀度和物种多样性指数[J]. 生态学报, 1995, 18(3): 268-277.
MA Ke-ping, HUANG Jian-hui. Plant community diversity in Dongling Mountain, Beijing, China II. Species richness, evenness and species diversities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 18(3): 268-277.
- [20] 方精云, 沈泽昊, 唐志尧, 等. 中国山地植物物种多样性调查计划及若干技术规范[J]. 生物多样性, 2004, 12(1): 5-9.
FANG Jing-yun, SHEN Ze-hao, TANG Zhi-yao, et al. The protocol for the survey plan for plant species diversity of China's mountains[J]. *Chinese Biodiversity*, 2004, 12(1): 5-9.
- [21] 刘世梁, 马克明, 傅伯杰, 等. 北京东灵山地区地形土壤因子与植物群落关系研究[J]. 植物生态学报, 2003(4): 496-502.
LIU Shi-liang, MA Ke-ming, FU Bo-jie, et al. The relationship between landform, soil characteristics and plant community structure in the Dongling Mountain region, Beijing[J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003(4): 496-502.
- [22] Zhao H L, Zhou R L, Su Y Z, et al. Shrub facilitation of desert land restoration in the Horqin sand land of Inner Mongolia[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 31: 1-8.
- [23] 伊贤贵, 丁 晖, 王贤荣, 等. 基于固定样地的黄山不同海拔森林群落物种多样性分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2018, 42(1): 149-155.
YI Xian-gui, DING Hui, WANG Xian-rong, et al. Species diversity of forest communities at different altitudes based on fixed plot in Huangshan Mountains[J]. *Journal of Nanjing Forestry University(Natural Science Edition)*, 2018, 42(1): 149-155.
- [24] 刘尧尧, 辜 彬, 王 丽. 北川震后植被恢复工程植物群落物种多样性及优势种生态位[J]. 生态学报, 2019, 38(2): 309-320.
LIU Yao-yao, GU Bin, WANG Li. Species diversity of plant community and the niche of dominant species in Beichuan after earthquake engineering[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(2): 309-320.