

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.01.005; CSTR:32311.14.rswc.2025.01.005.

李浩, 何静, 王理德, 等. 祁连山东段高寒草地修复过程中植被物种多样性及土壤理化性质[J]. 水土保持研究, 2025, 32(1): 110-120.

Li Hao, He Jing, Wang Lide, et al. Vegetation species diversity and soil physicochemical properties during restoration of alpine grassland in eastern Qilian Mountains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 110-120.

祁连山东段高寒草地修复过程中植被物种多样性及土壤理化性质

李浩¹, 何静¹, 王理德^{1,2,3,4}, 宋达成^{2,3}, 刘光武², 王梁浩然¹, 李诗涵¹

(1. 甘肃农业大学 林学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省治沙研究所, 兰州 730070;

3. 甘肃河西走廊森林生态系统国家定位观测研究站, 甘肃 武威 733000;

4. 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站, 甘肃 民勤 733300)

摘要: [目的] 探讨祁连山东段高寒草地修复过程中植被物种多样性与土壤理化性质特征, 为当地生态系统的修复和发展提供理论依据和科技支撑。 [方法] 采用时空替代法, 选取不同修复年限 (3 a, 6 a 和 11 a) 的人工沙棘林地及未修复的样地 (CK) 为研究对象, 通过植被调查和土壤采集, 分析了植被物种多样性及土壤理化性质, 且其随修复年限增加的变化规律。 [结果] (1) 随着修复年限的延长, 群落优势种由一年生草本植物逐渐演化成多年生草本和灌木植物, 植物个体数、物种数和 Margalef 丰富度指数呈现上升趋势。 (2) 随着修复年限的延长, 土壤含水量呈现“先上升—后下降—再上升”的趋势, 整体上表现为上升, 土壤容重呈现下降趋势; 土壤 pH、全氮、全磷、有机质呈现上升趋势; 随着土层加深, 土壤含水量在对照样地 CK 和样地 T₁ 呈现上升趋势, 在样地 T₂ 和 T₃ 呈现下降趋势, 土壤容重呈现先上升后下降的变化趋势, 土壤全氮、全磷、速效磷和有机质呈现下降趋势, 表聚现象明显。 (3) 植被个体数与土壤含水量、速效磷和有效钾呈现极显著正相关关系 ($p < 0.01$), 与容重呈现显著负相关关系 ($p < 0.05$); 物种数与 pH 值和全磷呈现极显著正相关关系, 与容重呈现极显著负相关关系 ($p < 0.01$); Shannon 多样性指数与含水量呈现极显著正相关关系 ($p < 0.01$); Pielou 均匀度指数与有效钾呈现极显著正相关关系, 与含水量呈现极显著负相关关系 ($p < 0.01$); Margalef 丰富度指数与全磷呈现显著正相关关系 ($p < 0.05$), 与土壤容重呈现极显著负相关关系 ($p < 0.01$)。 [结论] 修复年限对于植被物种多样性与土壤理化性质有着较大的影响, 植物群落逐渐变得单一且稳定, 土壤结构得到优化, 土壤养分含量不断升高, 一定程度上促进了高寒草地生态系统的恢复。

关键词: 高寒草地; 人工修复地; 不同修复年限; 物种多样性; 土壤理化性质

中图分类号: S714.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)01-0110-11

Vegetation species diversity and soil physicochemical properties during restoration of alpine grassland in eastern Qilian Mountains

Li Hao¹, He Jing¹, Wang Lide^{1,2,3,4}, Song Dacheng^{2,3},

Liu Guangwu², Wang Lianghaoran¹, Li Shihan¹

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Gansu Institute of Desertification Control, Lanzhou 730070, China; 3. Hexi Corridor Forest Ecosystem National Station, Wuwei, Gansu 733000, China; 4. Minqin Desert Grassland Ecosystem National Field Scientific Observation and Research Station, Minqin, Gansu 733300, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the vegetation species diversity and soil physicochemical properties during the restoration of alpine grassland in the eastern part of Qilian Mountains, and to provide

收稿日期: 2024-04-06

修回日期: 2024-05-04

资助项目: 国家自然科学基金“祁连山东段治理砾石重构土壤系统演变及其驱动机制”(42167069); 甘肃省重点人才项目“基于“两山”理念的祁连山及石羊河流域生态修复关键技术研究及团队建设”(GZTZ20240415); 草原生态修复治理科技支撑项目“祁连山东段北麓退化草地修复技术与示范”(GLCH20232550302)

第一作者: 李浩 (1999—), 男, 河南淇县人, 硕士研究生, 主要从事生物多样性及水土保持研究。E-mail: 2532581579@qq.com

通信作者: 王理德 (1969—), 男, 甘肃民勤人, 博士, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事生物多样性及水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: wldzy69@163.net

<http://stbcyj.paperonce.org>

theoretical basis and scientific support for the restoration and development of local ecosystem. [Methods] Using the time-space substitution method, artificial sea buckthorn woodland and unrepaired sample plots (CK) with different restoration years (3 a, 6 a and 11 a) were selected as the research objects. Through vegetation investigation and soil collection, the vegetation species diversity and soil physicochemical properties were analyzed, and the changes with the increase of restoration years were revealed. [Results] (1) With the extension of restoration years, the dominant species of the community gradually evolved from annual herbs to perennial herbs and shrubs, and the number of plant individuals, species and Margalef richness index showed an increasing trend. (2) With the extension of restoration years, soil water content showed a trend of 'increasing-decreasing-increasing', and the overall increase. Soil bulk density decreased, while soil pH, total nitrogen, total phosphorus and organic matter increased. With the deepening of soil layer, soil water content increased in CK and T_1 , and decreased in T_2 and T_3 . Soil bulk density increased first and then decreased. Soil total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and organic matter decreased, and surface accumulation was obvious. (3) Vegetation individual number was positively correlated with soil water content, available phosphorus and available potassium ($p < 0.01$), and negatively correlated with bulk density ($p < 0.05$). Species number was positively correlated with pH value and total phosphorus, and negatively correlated with bulk density ($p < 0.01$). There was a significant positive correlation between Shannon diversity index and water content ($p < 0.01$). Pielou evenness index was positively correlated with available potassium, and negatively correlated with water content ($p < 0.01$). There was a significant positive correlation between Margalef richness index and total phosphorus ($p < 0.05$), and a significant negative correlation between Margalef richness index and soil bulk density ($p < 0.01$). [Conclusion] It can be seen that the restoration years have a great impact on vegetation species diversity and soil physical and chemical properties. The plant community gradually becomes single and stable, the soil structure is optimized, and the soil nutrient content is continuously increased, which promotes the restoration of the alpine grassland ecosystem to a certain extent.

Keywords: alpine grassland; artificially restored ground; different repair years; species diversity; soil physical and chemical properties

祁连山地处青藏高原、蒙新高原和黄土高原交会地带,是西北地区重要的生态安全屏障和水源涵养地,属于典型高寒生态系统,自然环境非常脆弱,祁连山东段双龙沟地区是石羊河上游主要集水区,境内森林、草原广袤,矿产资源丰富^[1]。众所周知,大规模矿产开采常常导致土地挖损、塌陷和压占,引发植被退化甚至死亡等生态环境问题^[2],而双龙沟地区经历了 16 a 的挖煤和采金活动,使得生态环境遭到严重破坏,遗留了大面积裸露砂砾、坑穴和矸石山,极大影响了双龙沟生态系统的可持续发展和下游人民群众的用水安全^[3]。因此,如何科学治理和修复双龙沟废弃矿区,维持高寒草地植物群落结构稳定性及植物多样性问题尤为重要。

草地退化会导致草地生态系统结构与功能的逆向转变,并伴随着生产力损失、土壤酸化、生物多样性丧失甚至生态系统功能的改变,已成为制约草地生态环境改善的重要因素^[4]。植被恢复是生态修复的基础,目前植被恢复方式主要分为自然和人工 2 种,其中自

然植被恢复是指在干扰停止后依靠天然土壤种子库、原生植物自然更新对被破坏的植被重新建植,而人工植被修复是指在植被遭到破坏的区域,采取综合保护和抚育措施,为生态系统的循环创造良好的外部条件,加速植被恢复^[5]。由于双龙沟地区受到高海拔严酷气候条件影响,植被自然恢复和更新过程缓慢,因而实行人工植被修复措施已成为改善生态环境的重要途径^[6]。植被物种多样性是群落结构和功能复杂性的量度,研究物种多样性是群落生态学的重要研究课题,对于生态系统的可持续发展有着重要作用^[7]。周宸宇等^[8]对高寒草甸植被物种多样性的研究表明,植被物种多样性与生态系统多功能性存在正相关关系,在高寒草地进行植被人工修复对于改善植被群落和土壤结构具有积极意义。王祺等^[9]对甘南州沙化草地修复的研究表明,人工植被恢复群落较自然恢复群落生物多样性综合评价指数高,群落结构趋于复杂化,土壤养分含量升高。可见,植被物种多样性及土壤理化性质的研究对于退化草地修复具有深远意义。

目前对于双龙沟地区的研究主要涉及土壤酶活性特征、土壤重金属污染治理和微生物特征等,但涉及高寒草地植被修复过程中植被物种多样性与土壤理化性质的研究尚不多见。本文采用时空替代法,立足于祁连山双龙沟废弃矿区治理现状,以祁连山双龙沟不同修复年限的人工沙棘林地为研究对象,分析植被物种多样性和土壤理化性质的变化规律,并探讨相关性,揭示其变化规律和驱动机制,旨在为双龙沟高寒草地生态系统的修复和发展提供理论依据和科技支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省天祝藏族自治县哈溪镇双龙沟(37°22′24.6″N,102°25′24.8″E),属祁连山北坡冷龙岭,地势南高北低,海拔 2 400~4 800 m,平均坡为 25°~40°,年降水量 350~400 mm 以上,雨量主要集中在 8—9 月,占全年降水量的 76%,年均蒸发量 1 677 mm,年平均气温 3.3 ℃,无霜期 110 d,年平均日照时数 2 547 h,平均相对湿度 58%,当地曾经受到冰川(融水)及一系列复杂化学反应的影响,在双龙沟流域形成了典型的冰水堆积——阶地型砂金矿床,砂(岩)金、铜、铁、煤炭等矿产资源丰富,区内乔木以青海云杉(*Picea crassifolia*)为建群种,混交少量祁连

圆柏(*Sabina przewalskii*)、红桦(*Betula albo-sinensis*)和山杨(*Populus davidiana*)等,灌木以怀腺柳(*Salix cupularis*)和杜鹃(*Rhododendron simsii*)为主,人工林主要有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、金露梅(*Potentilla fruticosa*)和银露梅(*Potentilla glabra*),草本植物以垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、蕨麻(*Potentilla anserina*)和车前(*Plantago asiatica*)为主,土壤以亚高山草甸土为主,受高山地貌的影响,区域天然林景观格局垂直梯度较为明显,研究区石块多,土壤养分含量较低,土壤相对贫瘠^[10]。

1.2 样地布设与植被调查

走访调查当地牧民和查阅天祝县哈溪镇与祁连山国家自然公园哈溪保护站矿区治理相关资料,运用时空替代法,在集中连片的治理区域内,选择自然环境相似、微地形差异较小、植物生长均匀,治理年限分别为 3 a,6 a,11 a 和没有治理的废弃地作为对照样地(CK),2022 年 8 月 31 日—9 月 2 日进行野外调查,依据任继周野外调查的方法,在每个样地内设置 3 块 10 m×10 m 大样方,共 12 个大样方用于测定灌木植物种类、个体数、株高、冠幅、盖度和高度等指标,同时在每个大样方中心和四角分别设置 1 块 1 m×1 m 小样方,共 60 个小样方用于测定草本植物种类、物种数、高度和盖度等指标^[11](表 1)。

表 1 样地基本状况

Table 1 Basic status of sample plots

样地编号	海拔/m	纬度 N	经度 E	修复年限/a	群落优势种
CK	3110	37°22′14″	102°22′54″	0	砾地毛茛(<i>Ranunculus glareosus</i>)、臭蒿(<i>Artemisia hedinii</i>)、车前(<i>Plantago asiatica</i>)、沼生繁缕(<i>Stellaria palustris</i>)
T ₁	3050	37°22′16″	102°23′9″	3	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)、蕨麻(<i>Potentilla anserina</i>)、沙棘(<i>Hippophae rhamnoide</i>)
T ₂	3020	37°22′6″	102°23′45″	6	火绒草(<i>Leontopodium leontopodioides</i>)、草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i> L.)、沙棘(<i>Hippophae rhamnoide</i>)
T ₃	3000	37°22′19″	102°23′55″	11	垂穗披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)、金露梅(<i>Dasiphora fruticosa</i>)、沙棘(<i>Hippophae rhamnoide</i>)

1.3 土壤样品采集

野外植被调查的同时进行土壤的采集,研究区内共有 4 块样地,分别为 T₁,T₂,T₃ 和 CK,每块样地内布设了 3 个样方,每个样方对角外分别布设 2 个土壤样品采集点(避免破坏植物样方),各个采集点内以“5 点取样法”进行土壤剖面样品采集,使用环刀分别对(0—5 cm)、(20—25 cm)和(40—45 cm) 3 个深度的土壤取样,每层重复三次,共采集 216 次土壤样本,将同一样地、同一土层所采取的 6 个土样混合均匀后得到 36 个土壤样品,每个土壤样品重 1 kg 左右,装入无菌袋放于泡沫箱内带回实验室分析,用于测量土壤理化性质,所测指标土壤的取样深度和分层深度均保持一致。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 植被物种多样性测定 选用植物重要值、Margalef 丰富度指数、Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数、Shannon 多样性指数等对植被物种多样性进行测定,计算公式分别为^[12]:

重要值:IV=(相对高度+相对密度+相对盖度)/3×100%

Simpson 优势度指数 $C = \sum_{i=1}^S \frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)}$

Shannon 多样性指数 $H = -\sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$

Pielou 均匀度指数 $E = \frac{H}{\ln S}$

$$\text{Margalef 丰富度指数 } D_{\text{MG}} = \frac{S-1}{\ln N}$$

式中: P_i 是频度; N_i 是第 i 个类群的个体数; S 是类群数目; N 是所有类群的总个体数。

1.4.2 土壤理化性质测定 土壤含水量的测定方法^[13]:以重量百分数表示土壤含水量,用土壤中所含水分重量占烘干土重的百分数来表示,计算公式为土壤含水量(重量%)=(原土重-烘干土重)/烘干土重×100%=水重/烘干土重×100%。

土壤容重采用环刀法^[14]:将环刀托放在容积为 100 cm³ 的环刀上,将环刀刀刃口向下垂直压入土中,直至环刀筒中充满土样为止。

土壤有机质采用重铬酸钾—硫酸外加热法;全氮采用凯氏定氮法;全磷含量采用钼蓝比色法,UV2800 分光光度计(上海)测定;速效磷采用 NaHCO₃ 提取—钼锑抗比色法;有效钾采用四苯硼钠法;土壤 pH 值采用 pH 仪(PHS-3S)测定^[14]。

1.5 数据的处理

试验数据采用 Excel 2019 软件进行统计整理,用 SPSS 26.0 软件对土壤理化性质进行单因素方差分析(one-way ANOVA),以 LSD 法和 Duncan 法检验不同修复年限各指标的差异程度,并用 Pearson 相关性分析得到植物物种多样性与土壤理化性质的关系,最后采用 Origin 2021 制作本研究所需的相关图表。

2 结果与分析

2.1 不同修复年限人工沙棘林地植物物种重要值

由表 2 可知,在 11 a 的修复过程中,共出现 65 种

植物,其中,草本 57 种,灌木 7 种,缠绕草质藤本 1 种。在未修复的对照样地 CK,共出现 17 种植物,其中草本 15 种,灌木 2 种,臭蒿、砾地毛茛、沼生繁缕和车前 4 种草本植物重要值最大,分别为 14.763,13.372,11.912,9.778,一年生草本和多年生草本植物占据优势地位。

在样地 T₁,植物种类有所下降,共出现 15 种植物,其中草本植物 13 种,灌木植物 2 种,此时样地 CK 内的优势种臭蒿、砾地毛茛和沼生繁缕消失,车前重要值下降 72.54%,但蕨麻和猪毛蒿等植物大量出现补充。垂穗披碱草、蕨麻、沙棘和披碱草 4 种植物重要值最大,分别为 18.548,12.921,9.028,7.998,多年生草本植物占据优势地位。

在样地 T₂,植物种类大量增加,共出现 28 种植物,其中草本植物 22 种,增加了 8 种,草地早熟禾、蒲公英、星毛委陵菜、大籽蒿等草本植物大量出现,灌木植物 5 种,增加了 2 种,银露梅和金露梅出现,而藤本植物忍冬首次出现。黄白火绒草、银露梅、沙棘和草地早熟禾 4 种植物的重要值最大,分别为 16.296,10.501,10.303,9.361,多年生草本和灌木植物占据优势地位。

在样地 T₃,植物种类达到峰值,共出现 34 种植物,其中草本植物共 31 种,增加了 4 种,灌木植物 3 种,藤本植物消失,且除少数植物外,样地 CK 内植物全部退出。沙棘、黄白火绒草、金露梅和早熟禾 4 种植物的重要值最大,分别为 15.163,10.810,10.422,8.155,多年生草本和灌木植物占据优势地位。

表 2 人工沙棘林植物物种重要值变化

Table 2 Changes of important values of vegetation species in artificial sea-buckthorn forest

编号	物种	科	生活型	重要值			
				CK	T ₁	T ₂	T ₃
1	车前(<i>Plantago asiatica</i>)	车前科	草本	9.778	2.977	2.355	1.189
2	早熟禾(<i>Poa annua</i>)	禾本科	草本	2.267	6.612	2.066	8.155
3	垂穗披碱草(<i>Elymus nutans</i>)	禾本科	草本		18.548	1.212	6.789
4	风毛菊(<i>Saussurea japonica</i>)	菊科	草本	7.772	5.831		
5	天山千里光(<i>Senecio thianschanicus</i>)	菊科	草本	1.609	4.253	2.143	0.564
6	山卷耳(<i>Cerastium pusillum</i>)	石竹科	草本	7.036	4.433		
7	臭蒿(<i>Artemisia hedinii</i>)	菊科	草本	14.763			2.180
8	毛果荨麻(<i>Urtica triangularis</i>)	荨麻科	草本	4.763			
9	草地早熟禾(<i>Poa pratensis</i>)	禾本科	草本			9.361	
10	毛果蒙古葶苈(<i>Draba mongolica</i>)	十字花科	草本	4.771			
11	杂配轴藜(<i>Axyris hybrida</i>)	苋科	草本	2.226			
12	砾地毛茛(<i>Ranunculus glareosus</i>)	毛茛科	草本	13.372			
13	拉拉藤(<i>Galium spurium</i>)	茜草科	草本	2.303			2.466
14	沼生繁缕(<i>Stellaria palustris</i>)	石竹科	草本	11.912			3.132
15	藜(<i>Chenopodium album</i>)	苋科	草本	6.579			
16	丝毛飞廉(<i>Carduus crispus</i>)	菊科	草本	0.980			
17	阿拉善独行菜(<i>Lepidium alashanicum</i>)	十字花科	草本	0.975			

续表 1

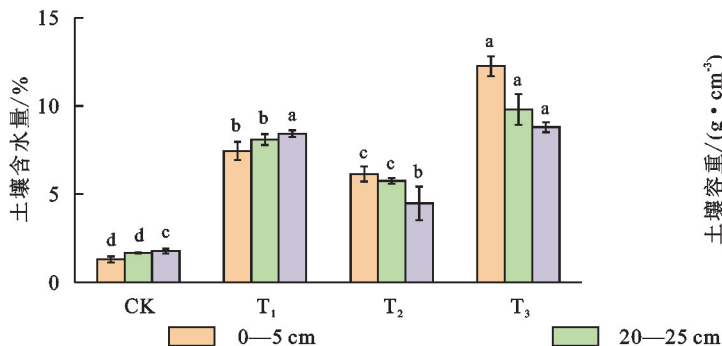
编号	物种	科	生活型	重要值			
				CK	T ₁	T ₂	T ₃
18	蕨麻(<i>Potentilla anserina</i>)	蔷薇科	草本		12.921	1.727	0.535
19	猪毛蒿(<i>Artemisia scoparia</i>)	菊科	草本		3.822		
20	密枝委陵菜(<i>Potentilla virgata</i>)	蔷薇科	草本			2.794	2.800
21	额河千里光(<i>acobaea argunensis</i>)	菊科	草本		4.127		
22	弯茎还阳参(<i>Crepis flexuosa</i>)	菊科	草本		5.144		
23	蒙古蒿(<i>Artemisia mongolica</i>)	菊科	草本		4.179		2.103
24	高原毛茛(<i>Ranunculus tanguticus</i>)	毛茛科	草本		6.732		1.880
25	披碱草(<i>Elymus dahuricus</i>)	禾本科	草本		7.998		4.242
26	蒲公英(<i>Taraxacum mongolicum</i>)	菊科	草本			1.214	1.728
27	星毛委陵菜(<i>Potentilla acaulis</i>)	蔷薇科	草本			2.311	
28	大籽蒿(<i>Artemisia sieversiana</i>)	菊科	草本			1.829	
29	葶苈(<i>Draba nemorosa</i>)	十字花科	草本			0.777	
30	篇蓄(<i>Polygonum aviculare</i>)	蓼科	草本			0.975	
31	薹草(<i>Carex giraldiana</i>)	莎草科	草本			3.599	
32	珠芽蓼(<i>Polygonum viviparum</i>)	蓼科	草本			3.311	
33	黄白火绒草(<i>Leontopodium ochroleucum</i>)	菊科	草本			16.296	10.810
34	葛缕子(<i>Carum carvi</i>)	伞形科	草本			3.699	
35	砾苔草 <i>Carex liparocarpos</i>)	莎草科	草本			5.036	
36	红颜草莓(<i>Fragaria ananassa</i>)	蔷薇科	草本			1.880	
37	赖草(<i>Leymus secalinus</i>)	禾本科	草本			2.309	
38	高山唐松草(<i>Thalictrum alpinum</i>)	毛茛科	草本			1.561	
39	柔毛蓼(<i>Koenigia pilosa</i>)	蓼科	草本			1.537	
40	早开堇菜(<i>Viola prionantha</i>)	堇菜科	草本			1.409	
41	紫背堇菜(<i>Viola violacea</i>)	堇菜科	草本				0.140
42	鼠掌老鹳草(<i>Geranium sibiricum</i>)	牻牛儿苗科	草本				1.409
43	中亚滨藜(<i>Atriplex centralasiatica</i>)	苋科	草本				0.933
44	密花香薷(<i>Elsholtzia densa</i>)	唇形科	草本				1.668
45	柳叶菜(<i>Epelobium hirsutum</i>)	柳叶菜科	草本				0.895
46	柳叶风毛菊(<i>Saussurea salicifolia</i>)	菊科	草本				2.865
47	马蔺(<i>Iris lactea</i>)	鸢尾科	草本				2.710
48	四数獐牙菜(<i>Swertia tetraptera</i>)	龙胆科	草本				0.563
49	二裂委陵菜(<i>Potentilla bifurca</i>)	蔷薇科	草本				1.357
50	肉果草(<i>Lancea Xizangica</i>)	通泉草科	草本				2.715
51	甘肃蒿(<i>Artemisia gansuensis</i>)	菊科	草本				0.568
52	小花草玉梅(<i>Anemone rivularis</i>)	通泉草科	草本				0.957
53	中华隐子草(<i>Cleistogenes chinensis</i>)	毛茛科	草本				1.176
54	狼毒(<i>Stellera chamaejasme</i>)	瑞香科	草本				1.003
55	多茎委陵菜(<i>Potentilla multicaulis</i>)	蔷薇科	草本				0.968
56	短花针茅(<i>Stipa breviflora</i>)	禾本科	草本				0.741
57	长茎飞蓬((<i>Erigeron elongatus</i>)	菊科	草本				0.237
58	悬钩子(<i>Rubus irritans</i>)	蔷薇科	灌木	6.102			
59	垂红忍冬(<i>Lonicera brownii</i>)	忍冬科	灌木	2.792			
60	肋果沙棘(小)(<i>Hippophae neurocarpa</i>)	胡颓子科	灌木			1.110	
61	银露梅(<i>Potentilla glabra</i>)	蔷薇科	灌木			10.501	5.745
62	金露梅(<i>Potentilla fruticosa</i>)	蔷薇科	灌木			5.849	10.422
63	沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)	胡颓子科	灌木		9.028	10.103	15.163
64	西北沼委陵菜(<i>Comarum salesovianum</i>)	蔷薇科	灌木		3.386	4.131	
65	忍冬(<i>Lonicera japonica</i>)	忍冬科	藤本			2.361	

2.2 不同修复年限人工沙棘林地植物物种多样性

由表 3 可知,植被个体数、物种数和 Margalef 丰富度指数随着修复年限延长呈现上升趋势,最大值均出现在样地 T_3 ,分别为 1 234,34,3.213;Simpson 优势度指数呈现先上升—后下降—再上升的变化趋势,整体呈现上升趋势,最大值(0.277)出现在样地 T_1 ;Shannon 多样性指数和 Pielou 均匀度指数呈现先下降—后上升—再下降的变化趋势,整体呈现下降趋势,Shannon 多样性指数最大值(3.286)出现在样地 T_2 ,Pielou 均匀度指数最大值(0.761)出现在样地 CK 内。

2.3 不同修复年限人工沙棘林地土壤物理性质变化

由图 1 可知,随修复年限延长,土壤含水量在 3 个土层(0—5 cm,20—25 cm 和 40—45 cm)均呈现先上升后下降再上升的变化趋势,最大值出现在样地 T_3 ,3



注:图内不同小写字母表示不同修复年限差异显著($p < 0.05$),下同。

图 1 不同修复年限人工沙棘林土壤物理性质

Fig. 1 Soil physical properties of artificial seabuckthorn forest with different restoration years

随修复年限延长,土壤容重在 3 个土层均呈现下降趋势,最大值出现在对照样地 CK,分别为 1.487,1.513,1.527 g/cm³,最小值出现在样地 T_3 ,分别为 1.133,1.387,1.333 g/cm³。在垂直方向上来看,随着土层加深,土壤容重在对照样地 CK 呈现上升趋势,最大值出现在深层土壤(40—45 cm),其余 3 个样地均呈现先上升后下降的变化趋势。

2.4 不同修复年限人工沙棘林地土壤化学性质变化

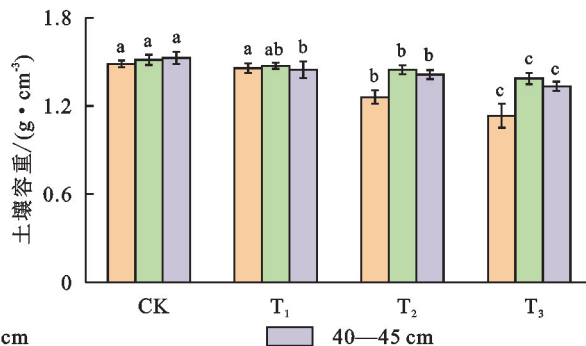
由图 2 可知,随着修复年限延长,土壤 pH 值在上中下 3 个土层(0—5 cm,20—25 cm 和 40—45 cm)呈现上升趋势,最大值均出现在样地 T_3 ,分别为 8.130,8.050,8.297;随修复年限延长,土壤全氮呈现上升趋势,最大值均出现在样地 T_3 ,分别为 0.100,0.057,0.040%,且 3 个土层的土壤全氮含量均小于对照样地(CK);土壤全磷在 0—5 cm 和 20—25 cm 土层间随着修复年限延长呈现上升趋势,最大值均出现在修样地 T_3 ,分别为 0.957,0.908 g/kg,土壤全磷在 40—45 cm 土层间随修复年限延长呈现先减小再增加的趋势,整体上升,最大值出现在样地 T_3 ,为 0.786 g/kg,此外 3 个土层的全磷含量在样地 T_3 时整体超越对

个土层含水量分别为 12.263%,9.798%,8.797%。在垂直方向上来看,随着土层加深,对照样地 CK 和样地 T_1 的土壤含水量呈现上升的趋势,最大值出现在深层土壤(40—45 cm);而样地 T_2 和 T_3 的土壤含水量呈现下降的趋势,最大值出现在表层土壤(0—20 cm)。

表 3 人工沙棘林地植物物种多样性变化

Table 3 Changes of plant species diversity in artificial sea-buckthorn woodland

样地编号	CK	T_1	T_2	T_3
个体数(N)	156	751	1231	1234
物种数(S)	17	15	28	34
Shannon 多样性指数(H)	3.111	2.400	3.286	3.011
Pielou 均匀度指数(E)	0.761	0.614	0.683	0.592
Simpson 优势度指数(C)	0.162	0.277	0.150	0.263
Margalef 丰富度指数(D)	2.196	1.465	2.630	3.213



照样地(CK);土壤速效磷在 0—5 cm 和 20—25 cm 的土层间呈现上升趋势,最大值出现在样地 T_3 ,分别为 0.274,0.111 mg/kg,土壤速效磷在 40—45 cm 的土层间呈现下降趋势,最小值为 0.084 mg/kg,3 个土层土壤速效磷均小于对照样地(CK);随着修复年限延长,土壤有机质在 3 个土层间呈现上升趋势,最大值均出现样地 T_3 ,分别为 2.117,1.484,1.395%;土壤有效钾在 0—5 cm 的土层间随着修复年限的延长呈现上升趋势,在 20—25 cm 和 40—45 cm 的土层间呈现下降趋势,变化规律不明显;在垂直方向上来看,随着土层不断加深土壤全氮、全磷、速效磷和有机质呈现下降的趋势,表聚现象明显;土壤有效钾在样地 T_1 随着土层加深呈现上升趋势,其余样地呈现下降趋势;土壤 pH 值随土层不断加深呈现先下降再上升的趋势,深层 pH 值 > 表层 pH 值 > 中层 pH 值。

2.5 植物物种多样性和土壤理化性质相关性

通过表 4 可知,植物个体数与土壤含水量、速效磷和有效钾呈现极显著正相关关系($p < 0.01$),与土壤容重呈现显著负相关关系($p < 0.05$);物种数与含水量、全氮等呈现正相关关系,但不显著($p > 0.05$),与 pH 值和全

磷极显著正相关($p < 0.01$),与容重极显著负相关($p < 0.01$);Shannon 多样性指数与 pH 值、全磷等呈现正相关关系,但不显著($p > 0.05$),与含水量极显著正相关($p < 0.01$)。Pielou 均匀度指数容重、全氮等呈现正相关关

系,但不显著($p > 0.05$),与有效钾极显著正相关($p < 0.01$),与含水量极显著负相关($p < 0.01$);Margalef 丰富度指数与全磷呈现显著正相关关系($p < 0.05$),与土壤容重呈现极显著负相关关系($p < 0.01$)。

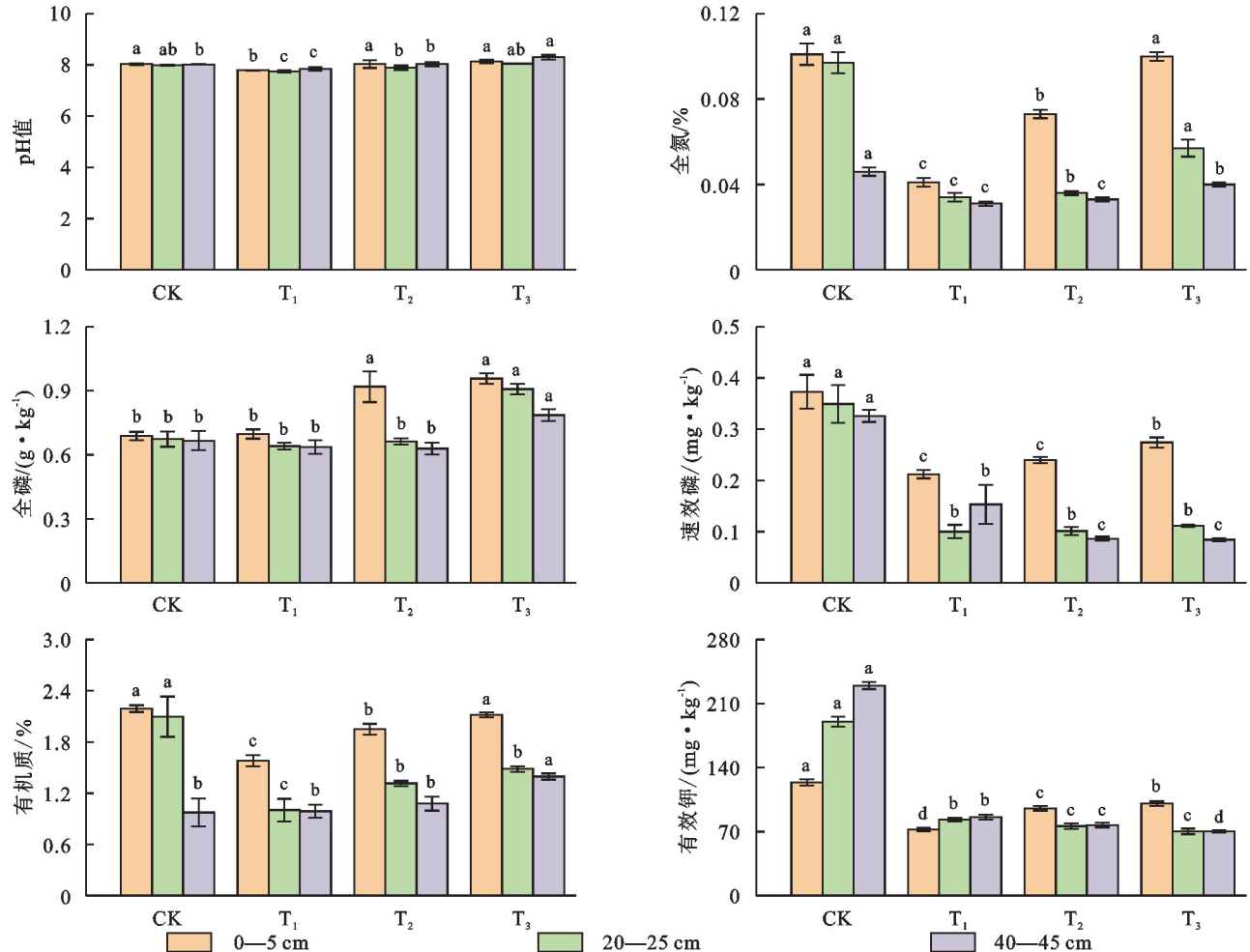


图 2 不同修复年限土壤化学性质变化

Fig. 2 Changes of soil chemical properties in different restoration years

表 4 植被物种多样性和土壤理化性质相关性分析

Table 4 Correlation analysis between vegetation species diversity and soil physicochemical properties

指标	含水量	容重	pH 值	全氮	全磷	速效磷	有机质	有效钾
个体数(N)	0.731 **	-0.699 *	0.251	-0.332	0.546	0.744 **	-0.190	0.782 **
物种数(S)	0.520	-0.740 **	0.714 **	0.074	0.710 **	-0.398	0.080	-0.417
Shannon 多样性指数	0.785 **	-0.211	0.519	0.340	0.227	0.191	0.185	0.256
Pielou 均匀度指数	-0.959 **	0.534	-0.002	0.361	-0.456	0.509	0.169	0.766 **
Simpson 优势度指数	-0.389	-0.234	-0.149	-0.231	0.246	-0.376	-0.077	-0.467
Margalef 丰富度指数	0.285	-0.702 **	0.478	0.282	0.667 *	-0.139	0.209	-0.139

注: * 在 0.05 水平上显著相关, ** 在 0.01 水平上极显著相关。

3 讨论

重要值可以显示群落中物种不同地位及作用,物种在群落中发挥作用的大小与重要值大小正相关,该指标值越大,物种地位越高,作用越大^[15]。研究表

明,在对照样地 CK 内群落优势种主要表现为一年生草本植物,到修复 3 a 时,植物数量有所下降,植物优势种转变为多年生草本植物,修复 6 a 时,大量新的植物开始出现,多年生草本植物与灌木成为群落优势种,修复 11 a 时,植物种类达到峰值。总体来说,随

修复年限的延长,双龙沟植物群落演替具有显著的递进性,大致经历了从一年生草本植物→一年生草本及多年生草本植物→多年生草本植物→多年生草本及灌木植物的演替过程,最终形成了一个稳定的灌木—草本复合体系,符合高海拔寒区植物区系的总体特征。这与吕广一等^[16]对于荒漠草原植物群落特征的研究结果相一致,这是因为植物在长期的自然选择下,会形成适应当地生态地理环境且具有特定结构的群落类型,适应能力和耐受性较高的物种将慢慢成为群落优势种。此外,草本植物车前、早熟禾和天山千里光等在4个样地内均有出现,这与耿冰瑾等^[17]对于露天矿区复垦地植被的研究结果相一致,这说明在人工沙棘林地植被演替过程中,具有一定的延续性,植被演替是一个缓慢的过程。

研究表明,在11a的修复过程中,植被个体数、物种数和Margalef丰富度指数随着修复年限延长呈现上升趋势。这与姜晓燕等^[18]对于对毛乌素沙漠不同修复年限植物多样性的研究结果相一致,这是因为随着修复年限延长,土壤肥力得到一定程度的补充,植被的生长资源相对丰富,草本和灌木植物的生长没有限制,植物种类和数量趋于丰富。Simpson优势度指数呈现先上升—后下降—再上升的变化趋势,整体随修复年限延长而上升。这与王理德等^[19]对于双龙沟矸石治理过程中物种多样性的研究结果相一致,这是因为植物群落在演替的过程中向着简单和稳定的方向而发展,随着植被的演替,群落优势种逐渐由一年生草本植物转变为多年生草本植物和灌木,群落优势种的地位越来越突出,植被物种的分布不均匀。Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数随修复年限延长整体下降,这是因为群落优势种沙棘生长旺盛,占用了更多的资源,抑制了部分植物的生长,部分植被没有足够的资源逐渐被淘汰。

研究表明,随修复年限延长,土壤含水量呈现“先上升—后下降—再上升”的变化趋势,土壤容重呈现不断下降趋势,这是因为随着植被的演替,耐盐碱的多年生草本植物和灌木成为群落优势种,植物对土壤的改造作用不断增强,土壤结构得到优化,在土壤容重降低的同时,土壤紧实度和透气性得到改善,土壤孔隙度增加,植物根系对水分的固持作用也不断增强,同时土壤表层的枯枝落叶层也减少了水分的散失,土壤保水性能不断增强^[20]。随土层的加深,土壤含水量在对照样地CK和样地T₁呈现上升趋势,在样地T₂和T₃呈现下降趋势。这是因为在修复的早

期,植物主要为一年生草本和多年生草本植物,根系较浅,主要吸收表层的土壤水分,而到了修复6a和11a,灌木植物大量出现,根系影响深,使得深层含水量低于表层含水量^[21]。随土层的加深,土壤容重在除对照样地CK外的3个样地呈现先上升后下降的趋势,这说明植物大量生长有效促进地下细根的周转,增强了植物根系对于土壤的改良作用,使得土壤有机质得到积累,在有机质的胶结作用下,细化颗粒物得到积累,土壤结构得到大的改善。

土壤化学性质是衡量土壤质量的重要参数,决定了植被分布格局,影响着植物生长发育状况,而土壤pH值是土壤酸性程度的量化表征,是土壤形成过程中多种因子综合作用的结果,直接影响植物生长与发育^[22]。研究表明,土壤pH值整体呈现弱碱性,保持在7.750~8.297,土壤pH值随着修复年限的延长呈现上升趋势,在不同土层间,土壤pH值随土层加深呈现“先下降再上升”的趋势,深层土壤>表层土壤>中层土壤。表层土壤pH值的变化趋势与李兴民等^[23]对于白龙江上游森林土壤养分的研究结果相一致,这是因为土壤中层盐碱物质随着水分聚集到土壤表层,水分蒸发致使土壤表层pH值升高。深层土壤pH值的变化与卞莹莹等^[24]对于荒漠草原区土壤理化性质的研究结果不同,这是因为样地气候类型和土壤类型不同所导致的,研究区所处的双龙沟降水量和空气湿度都高于宁夏荒漠草原,土壤表层和中层的盐碱经过雨水的淋洗向土壤深层不断渗漏,致使深层土壤pH值不断升高。

土壤全氮、全磷和有机质随着修复年限延长均呈现上升趋势,这是因为自然植被不断生长发育,植物种类和数量不断增加,大量落叶枯枝经过土壤微生物分解后进入土壤,有效补充了土壤养分^[25]。在不同土层间,土壤全氮、全磷、速效磷和有机质随土层加深呈现下降趋势,表聚现象十分明显。由于氮素主要来源于植被枯落物的归还与分解,植被凋落物及植物根系分解形成的有机物首先进入表层,同时植被的恢复也有助于土壤有机质的补充,但是腐殖化作用局限在表层,对下层土壤影响较小,因而全氮和有机质呈现下降趋势。土壤全磷和速效磷变化趋势与魏强等^[26]对兴隆山主要森林群落土壤理化性质的研究结果相一致,这是由于随着土层深度的增加,表层根系数量明显高于深层土壤,特别是植物毛细根,而枯死的毛细根是深层土壤磷素主要来源,因而土壤全磷和速效磷随土层加深不断降低。土壤速效磷在0—25cm和20—25cm

的土层随着修复年限延长呈现上升趋势,在 40—45 cm 的土层呈现下降趋势,这是因为植物生长消耗和环境变化等原因,导致 40—45 cm 的速效磷含量的逐年降低,由于土壤表层有着大量枯枝落叶物的堆积,经微生物分解后补充表层土壤磷元素,因而速效磷在 0—5 cm 和 20—25 cm 的土层呈现增加的趋势^[27]。

植被物种多样性和土壤理化性质存在不同程度的相关性,其中植被个体数与含水量、速效磷和有效钾呈现极显著负相关的关系($p < 0.01$),与土壤容重呈现显著负相关的关系($p < 0.05$)。这与丰菲等^[28]对于宁东矿区植物群落特征与土壤理化性质的研究结果相一致,这说明植被个体数的增加,需要消耗大量土壤水分、速效磷和有效钾,丰富的含水量、磷离子和钾离子对植物的生长有着重要作用,同时较大的土壤容重会抑制植物个体的生长,不利于植物个体数增加;植物物种数与 pH 值、全磷呈现极显著正相关的关系($p < 0.01$),这与胡广德^[29]对于人工林草地下草本植物多样性的研究结果相一致,这表明植物种类的增加和演替对土壤磷素的要求极高,土壤磷素是植物生长所必需的成分,丰富的土壤全磷能有效促进植被的恢复,而在植被恢复过程中土壤中的水分被大量消耗,同时植被凋落物和根系分泌物补充了土壤中的各种矿质元素,导致土壤 pH 值不断上升。植被均匀度指数与有效钾呈现极显著正相关的关系($p < 0.01$),与含水量呈现极显著负相关的关系($p < 0.01$)。这与胡亚伟等^[30]的研究结果相一致,这说明土壤有效钾有利于提高植被分布的均匀程度,但丰富的含水量,会加速优势种的生长发育,降低植被分布的均匀度;Margalef 丰富度指数与全磷呈现显著正相关的关系($p < 0.05$),与 pH 值呈现极显著正相关的关系($p < 0.01$),这说明土壤磷素对与植被丰富度的提升有着重要作用,而土壤 pH 值升高,不利于植被恢复。

4 结 论

随着双龙沟高寒草地修复年限的延长,群落优势种由一年生草本逐渐演化成多年生草本或者灌木植物,植被个体数、物种数和 Margalef 丰富度指数呈现上升的趋势。随着修复年限的延长,土壤含水量整体上升,容重持续下降,全氮、全磷等持续上升。可见,修复年限对植物物种多样性和土壤理化性质影响较大,随修复年限的延长,植物群落逐渐变得单一且稳定,土壤结构得到优化,土壤养分含量不断升高,自然环境趋于稳定,一定程度上促进了高寒草地生态系统的恢复。

参考文献 (References):

- [1] 罗维成,赵文智,刘继亮,等.祁连山自然保护区煤矿修复区地表节肢动物分布特征及其影响因素[J].中国沙漠,2022,42(6):165-175.
Luo W C, Zhao W Z, Liu J L, et al. Distribution pattern and influencing factors of ground arthropods in coalmines restoration area of Qilian Mountain Nature Reserve, China [J]. Journal of Desert Research, 2022,42(6):165-175.
- [2] 胡振琪,理源源,李根生,等.碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J].煤炭科学技术,2023,51(1):474-483.
Hu Z Q, Li Y Y, Li G S, et al. Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target [J]. Coal Science and Technology, 2023,51(1):474-483.
- [3] 吕海元.双龙沟废弃矿区植被恢复干扰因素调查分析[J].农业与技术,2015,35(6):7.
Lyu H Y. Investigation and analysis of disturbance factors of vegetation restoration in Shuanglonggou abandoned mining area [J]. Agriculture and Technology, 2015,35(6):7.
- [4] 徐剑波,陈进发,胡月明,等.青海省玛多县草地退化现状及动态变化研究[J].草业科学,2011,28(3):359-364.
Xu J B, Chen J F, Hu Y M, et al. Research on the status and the dynamic of grassland degradation in Maduo County, Qinghai Province [J]. Pratacultural Science, 2011,28(3):359-364.
- [5] 刘祥宏,尹勤瑞,辛建宝,等.生态植被自然修复及其人工促进技术研究进展与展望[J].生态环境学报,2022,31(7):1476-1488.
Liu X H, Yin Q R, Xin J B, et al. Technology research progress and prospects of natural vegetation restoration and its artificial promotion [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(7):1476-1488.
- [6] 宋达成,吴昊,王理德,等.双龙沟废弃矿区不同造林年限人工沙棘林土壤重金属分布特征及其对酶活性的影响[J].草业学报,2023,32(8):61-70.
Song D C, Wu H, Wang L D, et al. Distribution of heavy metals and their effects on enzymatic activity in soil of artificial *Hippophae rhamnoides* forests of different ages near abandoned mines in Shuanglonggou [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023,32(8):61-70.
- [7] Wu H, Carrillo J, Ding J Q. Species diversity and environmental determinants of aquatic and terrestrial communities invaded by *Alternanthera philoxeroides* [J]. Science of the Total Environment, 2017,581:666-675.
- [8] 周宸宇,杨晓渊,邵新庆,等.不同退化程度高寒草甸植物物种多样性与生态系统多功能性关系[J].草地学报,

- 2022,30(12):3410-3422.
- Zhou C Y, Yang X Y, Shao X Q, et al. Relationship between plant species diversity and ecosystem multifunctionality in alpine meadow with different degradation degrees[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022,30(12):3410-3422.
- [9] 王祺,唐进年,李银科,等.甘南州沙化草地流动沙丘治理与恢复关键技术:以黄河首曲为例[J].草业科学, 2020,37(9):1719-1728.
- Wang Q, Tang J N, Li Y K, et al. Key techniques for controlling mobile dunes and grassland restoration in a desertified grassland of Gannan: take the first bending of the Yellow River as an example[J]. Pratacultural Science, 2020,37(9):1719-1728.
- [10] 常丽,吴春荣,何芳兰,等.双龙沟废弃采金区人工栽植沙棘后植物群落组成和土壤性质的变化[J].中国农学通报,2019,35(19):83-90.
- Chang L, Wu C R, He F L, et al. Artificial planting of *Hippophae rhamnoides* in abandoned goldfield of Shuanglong gully: Effects on community composition and soil properties[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019,35(19):83-90.
- [11] 闫沛迎,屈建军,王理德,等.机械沙障固沙对生物土壤结皮形成发育的影响[J].干旱区研究,2023,40(12):1931-1937.
- Yan P Y, Qu J J, Wang L D, et al. Effect of sand barrier fixation on the formation and development of biological soil crust[J]. Arid Zone Research, 2023,40(12):1931-1937.
- [12] 李云琴,孟梦,胡光辉,等.林下种植模式对云南松人工林植物多样性的影响[J].西部林业科学,2023,52(6):39-46.
- Li Y Q, Meng M, Hu G H, et al. Effects of under-wood planting patterns on the diversity of vegetation species in *Pinus yunnanensis* plantation[J]. Journal of West China Forestry Science, 2023,52(6):39-46.
- [13] 何洪盛,田青,王理德,等.青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析[J].干旱区研究,2021,38(1):223-232.
- He H S, Tian Q, Wang L D, et al. Study on vegetation community characteristics and soil physical and chemical properties of abandoned land in Qingtu Lake[J]. Arid Zone Research, 2021,38(1):223-232.
- [14] 王理德,田青,郭春秀,等.不同退耕年限干旱绿洲植被群落及灰棕漠土特性变化[J].土壤学报,2021,58(6):1436-1447.
- Wang L D, Tian Q, Guo C X, et al. Variation of oasis vegetation communities and properties of grey brown desert soil relative to history of "grain for green" in arid regions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(6):1436-1447.
- [15] 刘万杰,蒋福祯,马利利,等.有机肥施用量和播种方式对高寒矿区植物群落生长和土壤养分的影响[J].草原与草坪,2023,43(2):116-125.
- Liu W J, Jiang F Z, Ma L L, et al. Effects of application amount of organic fertilizer and sowing methods on plant community growth and soil nutrients in alpine mining areas[J]. Grassland and Turf, 2023,43(2):116-125.
- [16] 吕广一,贺梦婷,李宏宇,等.荒漠草原植物群落特征及土壤碳氮含量对增温和增水的响应[J].中国草地学报,2024,46(3):60-69.
- Lyu G Y, He M T, Li H Y, et al. Responses of desert steppe plant community characteristics and soil carbon and nitrogen contents to warming and increased precipitation[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024,46(3):60-69.
- [17] 耿冰瑾,王舒菲,曹银贵,等.山西平朔露天矿区不同年限复垦地植被重建特征对比分析[J].生态学报,2022,42(8):3400-3419.
- Geng B J, Wang S F, Cao Y G, et al. Comparative analysis of vegetation reconstruction characteristics of different years in the reclaimed land of the Pingshuo opencast mining area, Shanxi Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022,42(8):3400-3419.
- [18] 姜晓燕,高圣杰,蒋燕,等.毛乌素沙地植被不同恢复阶段植物群落物种多样性、功能多样性和系统发育多样性[J].生物多样性,2022,30(5):18-28.
- Jiang X Y, Gao S J, Jiang Y, et al. Species diversity, functional diversity, and phylogenetic diversity in plant communities at different phases of vegetation restoration in the Mu Us sandy grassland[J]. Biodiversity Science, 2022,30(5):18-28.
- [19] 王理德,宋达成,李广宇,等.双龙沟矸石治理过程中植物群落演替及物种多样性研究[J].干旱区研究,2023,40(8):1294-1303.
- Wang L D, Song D C, Li G Y, et al. Syndynamic and diversity of species during gangue treatment in Shuanglong ditch[J]. Arid Zone Research, 2023,40(8):1294-1303.
- [20] 张玉芳,李希来,金立群,等.基于高寒矿区颗粒有机肥和羊板粪配施的无客土重构土壤理化性质分析[J].中国土壤与肥料,2023(7):129-137.
- Zhang Y F, Li X L, Jin L Q, et al. Analysis of soil physicochemical properties based on combined application of granular organic fertilizer and sheep board manure in alpine mining areas[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(7):129-137.
- [21] 张叶飞,李伞剑,王克勤,等.典型石漠化植被恢复区土壤理化特征及多指标聚类研究[J].水土保持学报,2023,37(2):287-293.

- Zhang Y F, Li S J, Wang K Q, et al. Physicochemical properties and multi-indicator clustering of soils in typical rocky desertification vegetation restoration area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2): 287-293.
- [22] 蒋嘉瑜,刘任涛,张安宁.干旱与半干旱荒漠草原区柠条灌丛土壤分形维数与理化性质对比分析[J].水土保持研究, 2021, 28(4): 54-61, 69.
- Jiang J Y, Liu R T, Zhang A N. Comparative analysis of soil fractal dimension and soil physical and chemical properties between *Caragana korshinskii* shrub plantations in arid and Semi-arid Desert steppe[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(4): 54-61, 69.
- [23] 李兴民,车克钧,杨永红,等.白龙江上游不同海拔森林土壤养分变化规律研究[J].甘肃农业大学学报, 2014, 49(6): 131-137.
- Li X M, Che K J, Yang Y H, et al. Variation pattern of soil nutrients in forests at different altitudes at upstream of Bailongjiang River[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2014, 49(6): 131-137.
- [24] 卞莹莹,张志敏,付镇,等.荒漠草原区不同植被恢复模式土壤微生物菌落分布特征及其与土壤理化性质的相关性[J].草地学报, 2021, 29(4): 655-663.
- Bian Y Y, Zhang Z M, Fu Z, et al. Distribution characteristics of soil microbial communities of different vegetation restoration models and their correlation with soil physical and chemical properties in desert steppe[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(4): 655-663.
- [25] Weber O B, Silva M C B, Silva C F, et al. Biological and chemical attributes of soils under forest species in Northeast Brazil[J]. Journal of Forestry Research, 2020, 31(5): 1959-1973.
- [26] 魏强,凌雷,王多锋,等.不同海拔甘肃兴隆山主要森林群落的土壤理化性质[J].西北林学院学报, 2019, 34(4): 26-35.
- Wei Q, Ling L, Wang D F, et al. Soil physicochemical properties of three main forest communities at different altitudes in Xinglong Mountain of Gansu Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 26-35.
- [27] Liu D, Huang Y M, An S S, et al. Soil physicochemical and microbial characteristics of contrasting land-use types along soil depth gradients[J]. Catena, 2018, 162: 345-353.
- [28] 丰菲,许丽,顾清敏,等.宁东矿区天然植物群落特征及其与土壤理化性质的关系[J].水土保持通报, 2021, 41(6): 48-56.
- Feng F, Xu L, Gu Q M, et al. Characteristics of natural plant community and its relationship with soil physicochemical properties in ningdong mining area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 48-56.
- [29] 胡广德.金塔沙地人工林林下草本植物多样性与土壤性质的关系[D].兰州:兰州大学, 2023.
- Hu G D. Understory Herb Diversity of Artificial Forest in Jinta Sandy Land Relationship with Soil Properties[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [30] 胡亚伟,施政乐,刘畅,等.晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响[J].生态学杂志, 2023, 42(9): 2072-2080.
- Hu Y W, Shi Z L, Liu C, et al. Effects of stand densities on understory vegetation diversity and soil physicochemical properties of *Robinia pseudoacacia* forest in loess region of western Shanxi Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(9): 2072-2080.

(上接第 109 页)

- [32] 伏耀龙,张兴昌,王金贵.岷江上游干旱河谷土壤粒径分布分形维数特征[J].农业工程学报, 2012, 28(5): 120-125.
- Fu Y L, Zhang X C, Wang J G. Fractal dimension of soil particle-size distribution characteristics in dry valley of upper Minjiang River[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 120-125.
- [33] 李红丽,万玲玲,董智,等.沙柳沙障对沙丘土壤颗粒粒径及分形维数的影响[J].土壤通报, 2012, 43(3): 540-545.
- Li H L, Wan L L, Dong Z, et al. Effects of sand barriers of *Salix psammophila* on soil particle size and fractal dimension[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 540-545.
- [34] 杜丹丹,高瑞忠,贾德彬.吉兰泰盐湖盆地土壤颗粒分形特征与空间变异分析[J].水土保持研究, 2023, 30(6): 93-101.
- Du D D, Gao R Z, Jia D B. Analysis of fractal characteristics and spatial variability of soil particles in the Jilantai salt lake basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 93-101.