



种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响

乔千洛 杨文权 赵帅 傅文慧 柴港宁 鱼杨华 简宝 李希来 寇建村

Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area

QIAO Qianluo, YANG Wenquan, ZHAO Shuai, FU Wenhui, CHAI Gangning, YU Yanghua, LIN Baojun, LI Xilai, KOU Jiancun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

甘南高寒草甸采矿活动及植被恢复方式对土壤有机质和酶活性的影响

Effects of mining activities and vegetation restoration methods on soil organic matter content and enzyme activities in the alpine meadows of Gannan

草业科学. 2020, 37(2): 266 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0202>

化肥减量配施有机肥对青贮玉米产量、营养价值及土壤微生物活性的影响

Effects of chemical fertilizer reduction and application of organic manure on the yield and nutritive value of *Zea mays* and soil microbial activity

草业科学. 2020, 37(2): 348 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0301>

荒漠植物专用有机肥在梭梭大田育苗中的应用效果

Effects of a desert plant-specific organic fertilizer on *Haloxylon ammodendron* seedlings

草业科学. 2017, 11(2): 339 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2016-0085>

干旱矿区不同干扰强度下土壤种子库特征

Characteristics of the soil seed bank under different disturbance intensities in an arid mining area

草业科学. 2021, 38(3): 443 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2020-0400>

林草恢复对热水河小流域侵蚀区土壤团聚体稳定性与有机碳氮特征的影响

Effects of forest and grass restoration on soil aggregate stability, and organic carbon and nitrogen characteristics in an eroded area of the Reshui River

草业科学. 2021, 38(6): 1012 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2021-0062>

黑河中游湿地不同植物群落土壤有机碳分布及影响因素

Soil organic carbon and its influencing factors on the different plant communities in the middle reaches of the Heihe River wetland

草业科学. 2020, 37(5): 833 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2019-0557>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0008

乔千洛, 杨文权, 赵帅, 傅文慧, 柴港宁, 鱼杨华, 蔺宝珺, 李希来, 寇建村. 种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响. 草业科学, 2022, 39(9): 1782-1792.

QIAO Q L, YANG W Q, ZHAO S, FU W H, CHAI G N, YU Y H, LIN B J, LI X L, KOU J C. Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area. Pratacultural Science, 2022, 39(9): 1782-1792.

种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响

乔千洛¹, 杨文权², 赵 帅¹, 傅文慧¹, 柴港宁¹,
鱼杨华¹, 蔺宝珺¹, 李希来³, 寇建村¹

(1. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学生命科学学院,
陕西 杨凌 712100; 3. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 渣土改良是矿区植被恢复的主要方法之一, 为掌握不同的渣土改良方法对高寒矿区植被恢复的影响, 探究适宜高寒矿区植被恢复的基质。选用羊板粪、颗粒有机肥对木里矿区渣土进行改良, 构建不同种草基质, 定量分析植物群落和土壤肥力变化特征。结果表明: 渣土+颗粒有机肥/羊板粪, 可提高种草第1年矿区土壤有机质、全效和速效养分含量, 增加植物群落高度、盖度、密度、生物量, 颗粒有机肥与羊板粪同施植物群落特征和土壤肥力效果均优于单施; 渣土直接种草第6年, 矿区植物群落盖度、产量、生物量、密度降低, 但植物物种数增加, 植株较高, 生物结皮明显, 土壤有机质、全氮含量增加; 追施氮肥可明显改善矿区植物群落结构; 缓坡地和平地的植被和土壤恢复效果较陡坡地明显。综上, 渣土/渣山塑形(较小坡度)+颗粒有机肥+羊板粪, 是研究区适宜的植被恢复基质构建方法。

关键词: 高寒矿区; 羊板粪; 颗粒有机肥; 渣土; 土壤肥力; 植物群落; 生物结皮

文献标志码: A 文章编号: 1001-0629(2022)09-1782-11

Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area

QIAO Qianluo¹, YANG Wenquan², ZHAO Shuai¹, FU Wenhui¹, CHAI Gangning¹,
YU Yanghua¹, LIN Baojun¹, LI Xilai³, KOU Jiancun¹

(1. College of Grassland Agriculture, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

2. College of Life Sciences, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China;

3. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: The improvement of coal mine dumps is one of the main methods of vegetation restoration in mining areas. This study was conducted to investigate the effects of such improvement methods on vegetation restoration and to explore the theory of ecological sustainable restoration in alpine mining areas. The characteristics of the vegetation community and soil fertility were studied in dumps treated with mixed granular organic fertilizer and sheep manure as grass substrates. The results showed that adding granular organic fertilizer or sheep manure to dumps increased the content of organic matter, total and available nutrients, plant height, coverage, density, and biomass during the first year. The effect of both applications was better than that of a single application on plant communities and soil fertility. In the sixth year of direct grass planting in dumps, the plant coverage, yield, biomass, and density decreased, but the species and heights of plants, soil organic matter

收稿日期: 2022-01-06 接受日期: 2022-03-17

基金项目: 中央财政林草科技推广示范项目(青[2021]TG01号); 青海省财政林业改革发展资金新技术推广项目([2021]001号)

第一作者: 乔千洛(1999-), 男, 新疆乌鲁木齐人, 在读硕士生, 研究方向为草地生态。E-mail: 429256401@qq.com

通信作者: 寇建村(1976-), 女, 青海湟中人, 副教授, 博士, 研究方向为草地生态。E-mail: jiancun02@163.com

content, and total nitrogen increased with the obvious biological crust. Topdressing with nitrogen fertilizers significantly improved the characteristics of the plant community. Compared to gentle-slope land and flat land, the soil fertility of steep-slope land was better for the restoration of the plant community and soil fertility. Overall, for vegetation restoration and maintenance of the stability of plant communities in alpine mining areas, improving the fertility of dumps with organic fertilizer, sheep manure, and reshaped dumps ($< 30^\circ$ slope) is of great significance. Dumps/dumps reshaping (slope $< 30^\circ$) + granular organic fertilizer + sheep manure is the most suitable combination for the vegetation restoration matrix in the study area.

Keywords: alpine mining area; sheep manure; granular organic fertilizer; dump; soil fertility; plant community; biological crust

Corresponding author: KOU Jiancun E-mail: jiancun02@163.com

青海省木里煤田地处海拔较高、生态条件恶劣的高寒草甸区, 采煤的矿坑、堆积的矿渣和煤场等使矿区草场成为一种极端裸地, 严重威胁当地生态环境安全^[1]。由于自然条件恶劣、气候寒冷、微生物活动微弱, 土壤形成和植被生长均存在很大困难, 致使高寒矿区生态系统不可能短期恢复或很难恢复到原有的自然状态^[2-3]。而建植人工植被可通过加速矿区土壤熟化过程, 增加土壤有机质和营养物质含量, 改良土壤结构, 提高保水、固土、保肥能力等, 进而加快矿区生态环境修复^[4-5]。因此, 通过人工种草重建矿山废弃地植物群落, 是矿区植被的有效措施之一^[6]。

目前, 国内外对矿区渣山植被恢复重建的研究多集中在低海拔地区, 主要采用客土改良土壤作为种草基质^[7], 而对高寒矿区植被恢复的研究很少^[1-3]。一般高寒矿区地处偏远、土源缺乏, 从外地运土成本较大, 因而渣土经简单改良后直接种草是最方便实用的矿区植被恢复方法^[2, 8]。虽然矿渣中有机碳含量较高, 但由于其难转化成植物可利用养分, 造成植物很难从矿渣中获得满足其稳定生长的养分, 渣土直接种植植物生长受限^[1, 9]。因此, 探究适宜种草基质, 对高寒矿区植被可持续恢复具有重要意义。

渣土添加有机肥作为种草基质是高寒矿区经济实用的方法。研究表明, 有机肥不仅能为微生物提供足够底物, 加速土壤有机碳矿化及有机物料腐解, 改善土壤理化状况及生物特性; 还可增强土壤的保肥、供肥和缓冲能力, 为植物提供长效肥力^[10]。因此, 在矿区种草时, 施用有机肥是改善渣土养分供应和土壤质量的重要途径, 也可起到改善土壤物理性质, 促进矿区真正土壤基质的形成。在木里矿

区周边, 羊板粪作为重要有机肥源, 资源丰富、价格便宜, 用来改良渣土经济实惠^[8]; 同时, 商品有机肥经充分熟化, 养分更全面, 在改善渣土结构和肥力方面也具有重要作用。但关于渣土种草、渣土+羊板粪/颗粒有机肥、渣土+羊板粪+颗粒有机肥作为种草基质的比较研究尚无报道。本研究以木里矿区草地为对象, 通过定量分析渣土基质种植不同年限及渣土中添加羊板粪、颗粒有机肥的植被和土壤恢复效果, 探究适宜高寒矿区植被恢复的种草基质, 为高寒矿区的植被恢复提供实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青藏高原东北端的祁连山中段南部地区的青海木里江仓矿区, $99^\circ 27' \sim 99^\circ 35' \text{ E}$, $38^\circ 02' \sim 38^\circ 03' \text{ N}$ 。该地区年最高气温为 19.8°C , 最低气温可达 -36°C , 年平均气温 $-5.1 \sim -4.2^\circ \text{C}$ 。年平均降水量约 500 mm , 蒸发量 $1\,418 \text{ mm}$, 降水主要集中在 7 月—9 月, 降雪集中在 1 月—5 月。矿区四季多风, 夏季盛行东南风, 冬季盛行西北风, 年平均大风日数 30 d 。海拔 $3\,800 \sim 4\,000 \text{ m}$, 周边主要草地类型为高寒沼泽湿地和高寒草甸, 属于多年冻土区, 优势种为藏嵩草 (*Koeleria tibetica*)、青藏薹草 (*Carex moorcroftii*) 等。由于长时间、大规模的煤矿开采, 高寒草甸和湿地遭到严重破坏, 造成生态系统失衡、地下水污染等环境问题, 也对当地牧民的生产生活造成了严重影响。

1.2 试验处理

试验地包括 5 个种草 1 年的试验处理 (ZC11-平

地渣土、ZC12-平地羊板粪、ZC13-有机肥、ZC14-坡地羊板粪+有机肥、ZC15-平地羊板粪+有机肥)及4个渣土直接种草后第6年的试验处理(BP61-路边陡坡地、BP62-路边缓坡地、ZC61-平地、ZC62-平地追氮肥)(表1)和两个天然草地(TR1高寒草甸、TR2高寒湿地,均为平地)。草种均为同德短芒披碱草(*Elymus breviaristatus* ‘Tongde’)、同德小花碱茅(*Puccinellia tenuiflora* ‘Tongde’)、青海中华羊茅(*Festuca sinensis* ‘Qinghai’)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* ‘Qinghai’)、青海草地早熟禾(*P. pratensis* ‘Qinghai’),播种量混合比例(重量比)为1:1:1:1:1,坡地草种播种量240 kg·hm⁻²,平地草种播种量202.5 kg·hm⁻²。各试验地播种方法如表1所列。另外,ZC62在2019年至2021年的每年7月施尿素一次,用量22.4 g·hm⁻²。ZC11、ZC12、ZC13和ZC62小区面积4 m×5 m,3次重复;其余处理均在矿区大面

积恢复区(恢复区采用的种草技术和方法由高原生态修复创新团队提供)取样。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 植物样品

在2021年8月中旬,测定植物群落相关指标,高度为草层高度,重复20次;每小区用样方法(1 m×1 m)测定植物盖度、密度、生物量,3次重复;大面积恢复区处理样方重复6次取样;将样方内的植物齐地面刈割,带回实验室,65℃烘干,测地上生物量。

1.3.2 土壤样品

2021年8月中旬,用土钻采集样方内0—15 cm的土壤样本,每个测定植物群落的样方周围,根据植物生长均匀度情况,随机取9~12钻混为一个土样,阴干,用于测定相关指标。对应植物群落调查,

表 1 试验设计
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	建植时间 The year of planting	种床组成 Seed bed composition	坡度 Slope	播种方法 Sowing method
ZC11	2021	渣土 Dump	平地 Flat land	①→④→⑤
ZC12	2021	渣土:羊板粪=5:1 Dump: sheep manure = 5:1	平地 Flat land	①→②→④→⑤
ZC13	2021	渣土,施有机肥 Dump, application of organic fertilizer (12 000 kg·hm ⁻²)	平地 Flat land	①→③→⑤
ZC14	2021	渣土:羊板粪=5:1,施有机肥 Dump: sheep manure = 5:1, application of organic fertilizer (15 000 kg·hm ⁻²)	30°坡地 30° Slope land	①→②→③→⑤
ZC15	2021	渣土:羊板粪=5:1,施有机肥 Dump: sheep manure = 5:1, application of organic fertilizer (11 250 kg·hm ⁻²)	平地 Flat land	①→②→③→⑤
BP61	2016	渣土 Dump	路边45°坡地 Roadside 45° slope	①→④→⑤
BP62	2016	渣土 Dump	路边30°坡地 Roadside 30° slope	①→④→⑤
ZC61	2016	渣土 Dump	平地 Flat land	①→④→⑤
ZC62	2016	渣土,追肥 Dump, topdressing	平地 Flat land	①→④→⑤

① 挑选出矿土中大于5 cm的石粒(至少30 cm深);② 如施羊板粪,先在上述矿土表层铺设羊板粪5 cm,用旋耕机旋深30 cm,将渣土和羊板粪混匀;③ 如施颗粒有机肥,先将有机肥总用量的60%撒在筛选过的表层,用旋耕机旋深5 cm混匀,剩余40%的有机肥与牧草专用肥和种子一起撒播;④ 将255 kg·hm⁻²牧草专用肥(NPK复合肥)和种子一起播种;⑤ 轻耙耨平,使种子埋入表层土壤中,铺设无纺布,边缘用石头覆压。

① The stone grains larger than 5 cm (to less than 30 cm deep) in the ore soil were selected; ② If sheep board manure is applied, first lay sheep board manure 5 cm on the surface of the mineral soil, use the rotary tiller to spin 30 cm deep, mix the muck and sheep board manure; ③ If the grain fertilizer is applied, 60% of the total use of fertilizer is scattered on the surface of the selected surface, and the rotary cultivator is used to mix the manure with a depth of 5 cm, and the remaining 40% of organic fertilizer is sown with the special forage fertilizer and seeds; ④ 255 kg·hm⁻² pasture fertilizer (NPK compound fertilizer) was sown with the seeds; ⑤ The utility model uses a light rake for burying the seeds in the surface soil, laying a non-woven cloth and covering the edge with a stone.

每小区 3 个混合土样, 其余大面积恢复区处理, 6 个混合土样。有机质采用重铬酸钾-硫酸氧化法; 全氮采用浓硫酸消煮-蒸馏法测定; NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 浸提, 连续流动注射分析仪测定; 全磷采用 $\text{HClO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ 消煮后, 分光光度法测定; 全钾采用 HF-HClO_4 消煮后, 火焰光度法测定; 速效磷采用 NaHCO_3 浸提后, 分光光度法测定; 速效钾采用 NH_4OAc 浸提后, 火焰光度法测定; 用酸度计测定 pH^[11]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 处理数据, SPSS 22.0 进行 one-way ANOVA 方差分析、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同种草基质的植物群落结构特征

种草第 1 年各处理优势草种均为当年播种的草种 (表 2), 施用羊板粪的处理中偶有灰绿藜 (*Chenopodium glaucum*) 出现; 种草第 6 年样地除了优势植物短芒披碱草、草地早熟禾外, 还出现了甘肃马先蒿 (*Pedicularis kansuensis*), 但植物种类远低于高寒草甸的, 高寒湿地植物种类主要为青藏薹草 (*Carex moorcroftii*) 和双柱头薹草 (*Scirpus distigmaticus*)。

种草第 1 年各样地均未出现生物结皮; 种草第 6 年除了路边陡坡地外, 均有结皮生物发育, 尤其是

表 2 不同种草处理的植物种类和生物结皮盖度
Table 2 Plant species, soil biological crust species, and coverage of grass-planting treatments

处理 Treatment	植物种类 Plant species	生物结皮种类 Soil biological crust species	生物结皮盖度 Soil biological crust coverage/%
ZC11	短芒披碱草、小花碱茅、中华羊茅、冷地早熟禾、草地早熟禾 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Puccinellia tenuiflora</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Poa crymophila</i> , <i>Poa pratensis</i>		
ZC12	短芒披碱草、小花碱茅、中华羊茅、冷地早熟禾、草地早熟禾、灰绿藜 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Puccinellia tenuiflora</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Poa crymophila</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Chenopodium glaucum</i>		
ZC13	短芒披碱草、小花碱茅、中华羊茅、冷地早熟禾、草地早熟禾 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Puccinellia tenuiflora</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Poa crymophila</i> , <i>Poa pratensis</i>		
ZC14	短芒披碱草、小花碱茅、中华羊茅、冷地早熟禾、草地早熟禾 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Puccinellia tenuiflora</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Poa crymophila</i> , <i>Poa pratensis</i>		
ZC15	短芒披碱草、小花碱茅、中华羊茅、冷地早熟禾、草地早熟禾 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Puccinellia tenuiflora</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Poa crymophila</i> , <i>Poa pratensis</i>		
BP61	短芒披碱草、甘肃马先蒿 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Pedicularis kansuensis</i>		
BP62	短芒披碱草、草地早熟禾、甘肃马苋蒿 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Pedicularis kansuensis</i>	苔藓、地衣 Moss and lichen	25
ZC61	短芒披碱草、草地早熟禾、甘肃马苋蒿 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Pedicularis kansuensis</i>	苔藓 Moss	3
ZC62	短芒披碱草、草地早熟禾、甘肃马苋蒿 <i>Elymus breviaristatus</i> , <i>Poa pratensis</i> , <i>Pedicularis kansuensis</i>	苔藓 Moss	3
TR1	草地早熟禾、甘肃马苋蒿、中华羊茅、青藏龙胆、火绒草、青藏薹草、垂穗披碱草、藏嵩草 <i>Poa pratensis</i> , <i>Pedicularis kansuensis</i> , <i>Festuca sinensis</i> , <i>Gentiana futtereri</i> , <i>Leontopodium leontopodioides</i> , <i>Carex moorcroftii</i> , <i>Elymus nutans</i> , <i>Koeleria tibetica</i>	苔藓、地衣 Moss and lichen	20
TR2	青藏薹草、双柱头薹草 <i>Carex moorcroftii</i> , <i>Scirpus distigmaticus</i>		

处理编号参见表1; 下同。
The treatment codes are given in Table 1; this is applicable to the following tables and figures as well.

路边缓坡地生物结皮盖度高达 25% (表 2)。

种草第 1 年处理除渣土直接种草处理外, 其余处理草的盖度均在 80% 以上; 种草第 6 年处理中, 追肥处理盖度最高达 88%, 其余处理低于 20%, 且 BP61 显著低于 ZC61、BP62 ($P < 0.05$)。高寒草甸盖度为 70%, 高寒湿地盖度为 90% (表 3)。

种草第 1 年处理草层高度均低于种草第 6 年。种草第 1 年处理中, 渣土直接种草的处理植物草层高度最小, 显著低于 ($P < 0.05$) 除 ZC14 外添加羊板粪和有机肥的各处理, 同时, 羊板粪加有机肥处理中平地植物又高于坡地, 施用有机肥处理低于羊板粪处理; 种草第 6 年处理中, 追肥处理植物高度最高, 为 53.8 cm, 显著高于 ($P < 0.05$) 其余处理; 高寒草甸和高寒湿地草层高度分别为 20.3、30.2 cm (表 3)。

种草第 1 年处理和高寒湿地植株密度均较高。种草第 1 年, 渣土直接种草的处理密度为 0.655 万株·m⁻², 羊板粪、有机肥施用的处理植株密度均在 1 万株·m⁻² 以上; 种草第 6 年处理植株密度大幅降低, 但追肥后植物密度提高, 为 0.132 万株·m⁻², 路边陡边坡处理密度约 0.003 万株·m⁻², 其余两个处理在 0.02 万株·m⁻² 左右 (表 3)。

种草第 1 年处理中, 添加有机肥、羊板粪的植物生物量均较高, 渣土直接种草处理生物量显著低

于 ($P < 0.05$) 各处理; 种草第 6 年处理中, 追肥处理生物量最高, 为 395.1 g·m⁻², ZC61、BP62 约 120 g·m⁻², 显著高于 BP61 ($P < 0.05$); 高寒草甸和高寒湿地植物生物量分别为 257.0、189.9 g·m⁻² (表 3)。

2.2 不同种草基质土壤 pH 及养分含量

所有处理中, 除了路边缓坡地外, 土壤 pH 均偏碱性。高寒草甸 pH 为 8.76, 高寒湿地为 7.60。种草第 1 年各处理中, ZC11 土壤 pH 最低, 显著低于其余处理 ($P < 0.05$); BP62 最低, 和所有处理差异显著。换言之, 种草第 1 年, 无论单施还是同时施用羊板粪和颗粒有机肥均使土壤 pH 显著升高; 渣土种草第 6 年处理中, 除缓坡地种草处理外, 其余各处理 pH 均升高 (图 1A)。

煤矿区土壤有机质含量普遍较高, 除 BP61 外, 各处理均大于 80 g·kg⁻¹。TR1、TR2、BP62 土壤有机质含量很高 ($> 149 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著高于除 ZC15 外的所有处理; 种草第 1 年各处理中土壤有机质含量 ZC15、ZC14、ZC12、ZC13 显著高于 ZC11 ($P < 0.05$)。说明种草第 1 年在渣土中添加颗粒有机肥、羊板粪, 可以使土壤有机质显著增加; 除了路边陡坡地外, 渣土随种草年限的增加, 土壤有机质含量增加 (图 1B)。

ZC14、ZC15 处理土壤全氮含量显著高于其他

表 3 植物群落特征
Table 3 Vegetation characteristics of individual plots

处理 Treatment	盖度 Coverage/%	草层高度 Grass height/cm	密度 Density/($\times 10^4 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$)	地上生物量 Aboveground biomass/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)
ZC11	50.00 ± 5.40d	13.10 ± 1.60g	0.655 ± 0.012e	96.60 ± 20.60f
ZC12	93.00 ± 6.10a	27.20 ± 3.30d	1.022 ± 0.032c	338.40 ± 24.70c
ZC13	85.00 ± 3.20b	16.50 ± 1.60f	1.101 ± 0.041c	386.10 ± 20.20b
ZC14	82.00 ± 4.60b	15.80 ± 2.10gf	1.153 ± 0.121b	409.40 ± 16.40b
ZC15	90.00 ± 4.80a	17.50 ± 2.20f	1.431 ± 0.210a	470.20 ± 15.10a
BP61	8.00 ± 1.30e	49.60 ± 3.60b	0.003 ± 0.001h	33.40 ± 2.50g
BP62	15.00 ± 4.20d	44.20 ± 3.70c	0.018 ± 0.002g	123.90 ± 16.40f
ZC61	20.00 ± 5.30d	48.00 ± 2.10b	0.021 ± 0.003g	121.60 ± 19.80f
ZC62	88.00 ± 6.30ab	53.80 ± 3.50a	0.132 ± 0.031f	395.10 ± 13.60b
TR1	70.00 ± 5.80c	20.30 ± 3.10e	0.108 ± 0.012f	257.00 ± 12.80d
TR2	90.00 ± 4.10a	30.20 ± 3.50d	0.840 ± 0.052d	189.90 ± 13.90e

同列数不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。
Different lowercase letters within the same column indicate significant difference between treatments at the 0.05 level.

处理, ZC11 全氮含量最低, 且和其他各处理差异显著; 种草第 6 年各处理中, 全氮含量 BP62 显著高于各处理 ($P < 0.05$), ZC61 显著高于 BP61 ($P < 0.05$), 除 BP62 外, 各处理均显著低于 ($P < 0.05$) 高寒草甸、高寒湿地全氮含量 (图 1C)。说明种草第 1 年在渣土中添加有机肥、羊板粪, 可以提高土壤全氮含量; 渣土随种草年限的增加, 土壤全氮含量增加, 而陡坡地增加幅度较小。

TR1、ZC61 全磷含量最低, 约 $0.20\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远低于其余处理; 种草第 1 年各处理中, ZC11 全磷含量最低, 与各处理差异显著; ZC12、ZC13、ZC14、TR2 全磷含量居中, 相互间差异不显著 ($P > 0.05$); ZC15、BP61、BP62、ZC62 全磷含量显著高于其余处理 (图 1D)。说明渣土中添加羊板粪、颗粒有机肥可使土壤全磷含量显著升高, 两者同时施用效果更明显; 种草第 6 年各处理边坡地和平地追肥处理, 土壤全磷含量

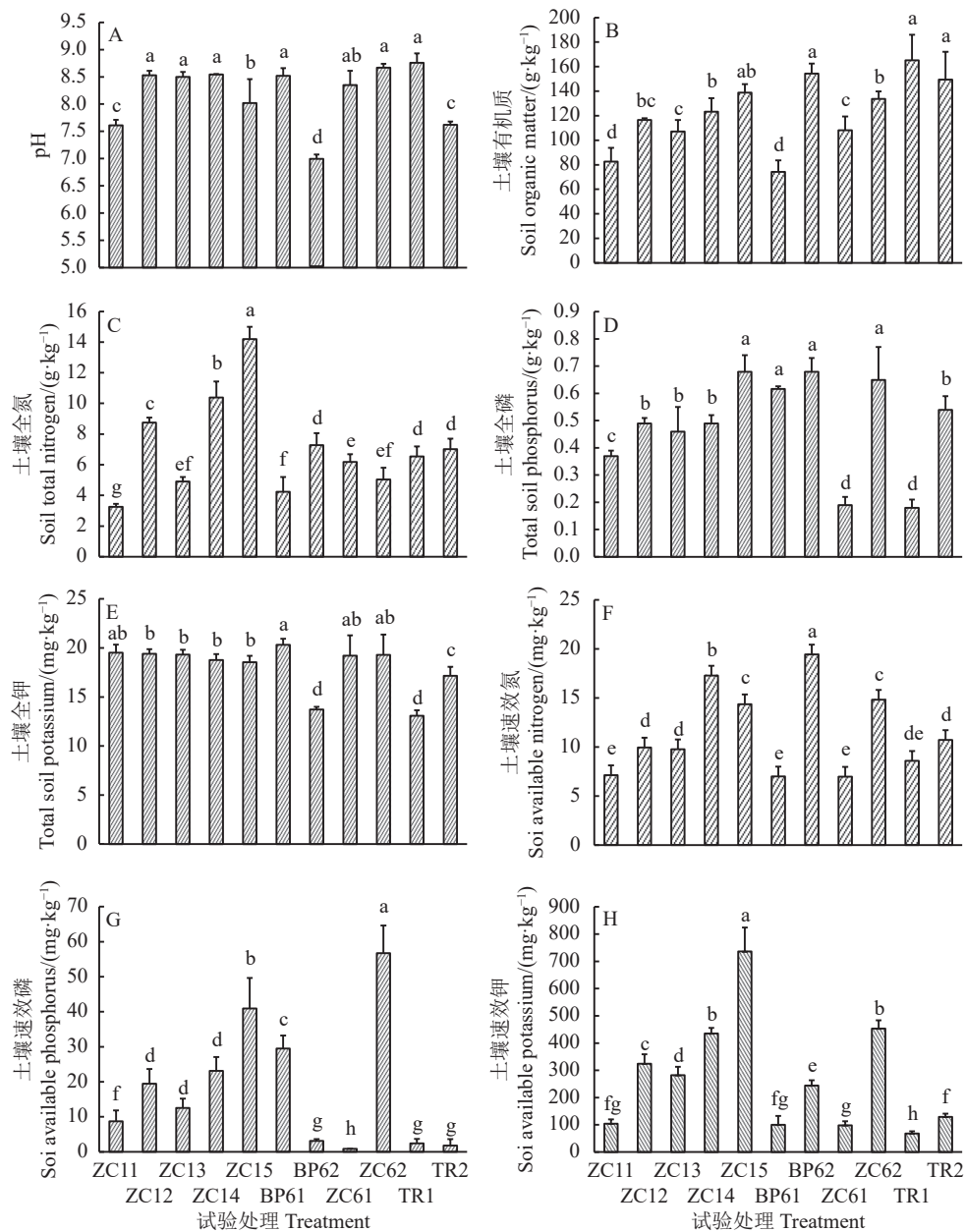


图 1 不同处理土壤 pH、有机质、全量和速效养分含量

Figure 1 Soil pH, organic matter, total and available nutrients of the treatments

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the 0.05 level.

高; 平地渣土种草第 6 年全磷含量较低, 接近天然高寒草甸全磷含量。

TR1、BP62 土壤全钾含量最低, 两处理无显著差异 ($P > 0.05$), 但均显著低于其余各处理 ($P < 0.05$); TR2 全钾含量居中, 和多数处理差异显著; 种草处理中, BP62 全钾含量最低, 显著低于其余各处理, 其余处理全钾含量无显著差异。说明除了缓坡地种草第 6 年处理外, 其余各处理全钾含量均显著高于天然高寒草甸和高寒湿地; 在种草第 1 年各处理中, 渣土中添加有机肥、羊板粪对土壤中全钾含量无影响; 缓坡地种草后第 6 年, 与周围高寒草甸土壤全钾含量无显著差异 (图 1E)。

所有处理中, BP62 速效氮含量最高 ($19.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 远高于其余各处理。在种草第 1 年各处理中, 速效氮含量 $\text{ZC14} > \text{ZC15} > \text{ZC12}$ 、 $\text{ZC13} > \text{ZC11}$, 差异显著 ($P < 0.05$); 种草第 6 年各处理间速效氮含量 $\text{BP62} > \text{ZC62} > \text{BP61}$ 、 ZC61 , 差异显著 ($P < 0.05$); 天然草地 TR1 和 TR2 速效氮含量较低, 与种草第 1 年的 ZC12 、 ZC13 间无显著差异 (图 1F)。说明在种草第 1 年, 渣土中添加有机肥、羊板粪可显著提高土壤中速效氮含量, 同时施用效果更好; 陡坡地和平地种草后第 6 年, 与周围高寒草甸土壤速效氮含量无显著差异; 平地种草后追施氮肥使土壤速效氮含量增加。

ZC62 速效磷含量最高 ($56.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 远高于其余处理。在种草第 1 年各处理速效磷含量 ZC15 最高, 显著高于其余处理 ($P < 0.05$), ZC12 、 ZC13 和

ZC14 之间差异不显著 ($P > 0.05$), 但显著高于 ZC11 ($P < 0.05$); 种草第 6 年各处理间速效磷含量差异达显著水平 ($P < 0.05$), 呈 $\text{ZC62} > \text{BP61} > \text{BP62} > \text{ZC61}$; 天然草地 TR1 和 TR2 速效磷含量较低, 分别为 2.4 和 $1.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1G)。说明在种草第 1 年, 渣土添加有机肥、羊板粪种草较渣土直接种草处理速效磷含量高; 种草第 6 年, 陡坡地土壤速效磷含量高, 缓坡地和平地速效磷含量低, 而平地种草后追施氮肥会使土壤速效磷含量大幅增加。

速效钾含量以 ZC15 最高 ($736.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 显著高于其余各处理 ($P < 0.05$)。在种草第 1 年处理中, 速效钾含量 $\text{ZC15} > \text{ZC14} > \text{ZC12} > \text{ZC13} > \text{ZC11}$, 各处理间差异显著 ($P < 0.05$); 种草第 6 年各处理间速效钾含量差异显著 ($P < 0.05$), 呈 $\text{ZC62} > \text{BP62} > \text{BP61} > \text{ZC61}$; 天然草地 TR1 和 TR2 速效钾含量分别为 68.2 和 $129.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 1H)。说明在种草第 1 年, 渣土添加颗粒有机肥、羊板粪较渣土直接种草处理速效钾含量大幅提高, 两者同时施用效果更好; 种草第 6 年, 陡坡地较缓坡地土壤速效钾含量低, 平地种草追施氮肥使土壤速效钾含量大幅增加。

2.3 植物群落特征和土壤肥力指标的相关性

植物群落特征和土壤肥力指标的相关性分析 (表 4) 表明, 土壤全氮、速效钾含量分别与植物密度、地上生物量显著正相关 ($P < 0.05$), 而其他指标之间无显著相关性 ($P > 0.05$)。

表 4 植物群落特征和土壤肥力指标的相关性
Table 4 Correlation between plant community characteristics and soil fertility index

指标 Parameter	pH	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	速效氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available nitrogen
盖度 Coverage	0.321	0.362	0.417	0.101	0.102	0.179	0.332	0.535
密度 Density	0.032	0.003	0.615*	0.219	0.322	0.175	0.171	0.614*
高度 Grass height	-0.005	-0.047	-0.329	0.242	0.051	0.051	0.222	-0.192
生物量 Aboveground biomass	0.410	0.362	0.626*	0.230	0.110	0.443	0.538	0.822**

*、**分别表示显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$)相关性。
* and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

3 讨论

3.1 渣土种草对矿区植被恢复的影响

本研究表明, 渣土直接种草第 1 年植物盖度为

50%, 而在渣土直接种草第 6 年, 植物盖度下降至 20% 以下, 植物密度和生物量也都大幅下降。这是因为高寒矿区渣土可供植物生长的养分缺乏, 土壤中虽然有机物质含量较高^[12], 但是由于气温

低、微生物活动弱,有机物质矿化速度慢,速效养分含量低^[3,13],随着种草年限的增加,人工建植的植物群落,由于养分不足,退化严重^[14]。但值得注意的是植株高度增加,究其原因,第1年草的生长时间较短(7月初发芽,8月中旬测量时只生长了1个半月),植株低矮,没有形成生殖枝,而在种草多年后,植物形成较多的生殖枝,这也是虽然植物群落盖度急剧下降,但生物量下降幅度相对较慢的重要原因。在平地渣土上直接种草第1年和第6年相比,随着种草年限的增加,土壤有机质、全氮含量增加,这可能是由于渣土种草后,植物根系分泌物、枯落物输入土壤,增加了有机质和全氮含量^[15],但速效养分并没有得到改善,导致了植物群落严重退化。

本研究表明,高寒矿区种草后,土壤全氮、速效钾含量分别与植物密度、地上生物量显著正相关,而其他指标间均无显著差异。而金立群等^[9]研究表明,速效氮与植物生物量、高度、盖度,土壤有机质含量与生物量均显著正相关。这可能和本研究中大部分试验处理为种草第1年,种草基质中添加了较多的有机质(如颗粒有机肥、羊板粪),以及播种时种肥(牧草专用肥)的加入,影响了土壤指标与指标植被之间的真实相关性。

随着种草时间的推移,人工种植的植物群落发生退化,甘肃马先蒿、生物结皮出现。甘肃马先蒿是玄参科一年或二年生草本植物,具有强大的种子繁殖能力和集群分布形式,是高寒地区栽培草地退化出现的先锋植物^[16]。生物结皮由土壤中的真菌、细菌、藻类和苔藓等将土壤颗粒与细丝或根状结构缠绕在一起,与多糖渗出物粘合,形成固结的表面结皮,可稳定土壤免受侵蚀^[17]。生物结皮后可改善土壤条件,影响土壤水文、生物化学(碳和氮固定)、养分循环、理化性质、维管植物的萌发和生长过程,有利于生态系统的发育和养分循环,可为植物的恢复和存活提供良好条件^[18]。本研究中,缓坡地种草第6年的样地中生物结皮盖度高达25%,可能也是该样地中土壤有机质、全氮、全磷、速效氮、速效钾含量显著($P < 0.05$)高于平地种草第6年样地的重要原因;另外,种草6年平地样地中也有生物结皮明显发育,也说明生物结皮是高寒矿区生态修复的重要过程,应重视其在土壤修复和生态系统恢复中

发挥的重要作用^[19]。

3.2 坡度对矿区植被恢复的影响

陡坡地种草植物群落退化严重,土壤肥力低,没有生物结皮出现,植物生长的表层基质稳定性很差;而缓坡地则相反,随着种草年限增加,土壤肥力增加,甚至高于平地,地衣、苔藓等盖度达25%,加上其他植物15%的盖度,植物群落整体盖度高达40%,植物生长环境表层稳定性大大提高。因为矿区种草植物群落的稳定性与种草的地势密切相关,坡度太大,种床稳定性差,加上矿区风大、降水量较集中,土壤侵蚀严重^[12],土壤肥力有限,植物群落快速退化^[19]。本研究中为了减少坡面侵蚀对植物群落的影响,在建植栽培草地群落时,坡面上每隔一定距离设排水沟;同时,加大颗粒有机肥和种子的用量,即较平地多施用了颗粒有机肥 $3\,750\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,多播种子 $37.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。即使这样,坡地的植物生长情况、土壤肥力仍和平地持平或较差。

值得注意的是,本研究中缓坡地处理植物群落和土壤肥力优势明显,甚至优于平地种草处理。究其原因,第一,可能是在废弃渣土塑形,准备种草的过程中,形成的此缓坡养分条件较好;第二,此路边坡的上方是大面积被平整后种草的区域,在江仓经常下雨造成水土流失^[1],此坡地形刚好是平地地表水流过的地方,因此,在降雨过程中,从平地雨水冲刷带来的土质较细渣土、速效养分等在此缓坡滞留;第三,盖度高达25%的生物结皮在土壤养分供应和保持方面起到了重要作用。

3.3 肥料类型对矿区植被恢复的影响

种草第1年渣土添加颗粒有机肥和羊板粪,各处理pH升高。这是因为有机肥添加可显著提高氮的利用率,从而降低土壤 NO_3^- 含量,增加土壤pH。有机碳也是调控土壤pH的关键因子,添加有机肥后有机碳的有效性增加,刺激了还原性硝酸盐的反硝化过程及有机质中高碱度灰分的中和作用,这均使土壤pH增加^[20]。

施用颗粒有机肥、羊板粪均使基质中有机质、全氮、全磷、速效氮磷钾含量提高,植物高度、密度、生物量、盖度均大幅度提高。因为有机肥添加可增加土壤微生物的可利用碳源,促进它们的新陈代谢和繁殖,从而促进土壤酶活性的增加,可显著

提高土壤 β -1,4-葡萄糖苷酶、乙酰氨基葡萄糖苷酶和 L-亮氨酸氨基转移酶等碳氮转移酶活性,从而提高土壤碳、氮养分利用率,促进植物生长^[10];施用有机肥有助于改善土壤结构,提高土壤的保水、保肥能力,改善土壤的理化性质,为土壤微生物和动物群体的生长提供了更好的环境,进而加速了它们对有机物的分解^[21],而有机肥中的有机物矿化过程缓慢,损失小,容易在土壤中存留,从而提高土壤有机质和养分含量^[10]。

有机肥的施用量和效果与施用方式密切相关。通常单独施用与本研究相同量的羊板粪或颗粒有机肥即可取得很好的效果^[10],两种有机肥同时施用会导致严重烧苗(前期青海大学试验地预试验结果表明)。但是在本研究所在的江仓矿区,无论是单独施用,还是和颗粒有机肥一起配施,都促进了植物的生长,尤其是羊板粪和颗粒有机肥一起施用对促进植物生长和改善土壤肥力方面优势明显。这可能与矿渣不是真正意义上的土壤,微生物数量有限^[22],加上气候寒冷、微生物活动微弱、养分释放缓慢有关^[13],具体原因还需进一步研究。这也说明为了延缓人工建植植物群落的退化,尽快促进真正土壤的发育和形成,施用双有机肥是构建高寒矿区种草基质行之有效的方法,可为植物群落提供相对稳定的养分,2021 年使用该方法也成功修复了近 3 万 hm^2 木里矿区。

此外,本研究中,施用尿素提高土壤氮素养分含量,促进植物生长。这是因为:第一,尿素能在水中解离出正负离子的盐,如碳酸氢铵、碳酸铵、铵态氮、硝态氮等,可提供植物吸收的速效氮养分,促进

植物细胞的分裂和生长,加快植物生长发育,也在一定程度上促进根系代谢,增加根系分泌物,促使微生物繁殖^[23];第二,土壤微生物活动需要一定的碳氮比^[13],矿区渣土直接种草其基质中有机碳含量较高^[12],而氮素的加入改善了植物生长环境中的碳氮比,更有利于微生物的活动,加快土壤有机物质的矿化,改善土壤养分供应^[24];第三,施氮增加了地上植物生物量,使土壤有机碳的输入量增加,可补偿由施氮引起的地下碳矿化引起的土壤有机质减少,最终表现为使土壤有机质增加^[25]。在本研究中,平地渣土直接种草,每年追施一次尿素处理土壤有机质、速效氮磷钾含量均高于不追肥样地,可为植物提供更多速效养分,从而增加了植物群落盖度、高度、密度和生物量,而渣土直接种草植物群落退化严重。因此,在木里矿区渣土含有一定的有机碳而矿化速度慢的情况下,适当添加氮肥可能会促进有机物质矿化,有利于人工建植植被的稳定和土壤肥力的提高。

4 结论

渣土 + 颗粒有机肥/羊板粪种草,可提高矿区土壤养分含量,促进矿区植物群落生长;颗粒有机肥和羊板粪同施效果优于单施;虽然种草可改善渣土性质,但随种草年限增加,渣土直接种草群落逐渐退化;追肥、羊板粪和颗粒有机肥,可改善种草基质肥力状况,提高植被恢复效果;种草前将渣山改造成较低坡地,可明显提高矿区植被恢复效果。渣土/渣山塑形(坡度 $< 30^\circ$) + 有机肥/羊板粪,是研究区较适宜的植被恢复基质。

参考文献 References:

- [1] 周林虎, 杨幼清, 胡夏嵩, 李希来, 王涛, 刘昌义. 高寒矿区排土场边坡土体抗剪强度特征. 煤田地质与勘探, 2019, 45(6): 105-113.
ZHOU L H, YANG Y Q, HU X S, LI X L, WANG T, LIU C Y. Shear strength characteristics of slope soil in dumping site in high-cold mining area. Coal Geology & Exploration, 2019, 45(6): 105-113.
- [2] 王锐, 李希来, 张静, 周华坤, 胡夏嵩. 不同覆土处理对青海木里煤田排土场渣山表层土壤基质特征的影响. 草地学报, 2019, 27(5): 1266-1276.
WANG R, LI X L, ZHANG J, ZHOU H K, HU X S. Effects of different soil-covering thicknesses on the characteristics of coalmine spoils in the Mulicoalfield of Qinghai Province. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(5): 1266-1276.
- [3] 杨鑫光, 李希来, 金立群, 孙华方. 短期恢复下高寒矿区煤矸石山土壤变化特征研究. 草业学报, 2018, 27(8): 30-38.
YANG X G, LI X L, JIN L Q, SUN H F. Changes in soli properties of coal mine in an alpine mining area after short-term restoration. Acta Prataculture Sinica, 2018, 27(8): 30-38.

- [4] 王丽艳, 韩有志, 张成梁, 裴宗阳. 不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征. *生态学报*, 2011, 31(21): 6429-6439.
WANG L Y, HAN Y Z, ZHANG C L, PEI Z Y. Reclaimed soil properties and weathered gangue change characteristics under various vegetation types on gangue pile. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(21): 6429-6439.
- [5] FERNÁNDEZ-CALIANI J C, GIRÁLDEZ M I, WAKEN W H, RÍO D Z M, CÓRDOBA F. Soil quality changes in an *Iberian pyrite* mine site 15 years after land reclamation. *Catena*, 2021, 206: 105538.
- [6] VENSON G R, MARENZI R C, ALMEIDA T C, DESCHAMPS-SCHMIDT A, TESTOLIN R C, ROERIG L R, RADETSKI C M. Restoration of areas degraded by alluvial sand mining: Use of soil microbiological activity and plant biomass growth to assess evolution of restored riparian vegetation. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2017, 189: 120.
- [7] KUMAR V, CHANDRA A, USMANI Z. Impact of coal mining on soil properties and their efficient eco-restoration. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 2017, 13(1/2): 158-165.
- [8] 李永红, 李希来, 唐俊伟, 贾顺斌, 张强骅, 王明宏, 李潇, 杨启鹏, 王佟. 青海木里高寒矿区生态修复“七步法”种草技术研究. *中国煤炭地质*, 2021, 33(7): 57-60.
LI Y H, LI X L, TANG J W, JIA S B, ZHANG Q H, WANG M H, LI X, YANG Q P, WANG T. Study on “seven-step” grass planting technology for ecological rehabilitation of frigid zone Muri mining area in Qinghai. *Coal Geology of China*, 2021, 33(7): 57-60.
- [9] 金立群, 李希来, 孙华方, 杨鑫光, 张静. 不同恢复年限对高寒露天煤矿区渣山植被和土壤特性的影响. *生态学杂志*, 2019, 38(1): 121-128.
JIN L Q, LI X L, SUN H F, YANG X G, ZHANG J. Effects of different years of recovery on vegetation and soil characteristics of open-pit coal mine dumps in alpine region. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, 38(1): 121-128.
- [10] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 迟凤琴, 张一雯, 宿庆瑞, 石艳香. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响. *麦类作物学报*, 2021, 41(12): 1-7.
ZHANG J M, KUANG E J, LIU Y D, CHI F Q, ZHANG Y W, SU Q R, SHI Y X. Effect of different proportions of labile organic fertilizer substituted by nitrogen fertilizer on components of soil organic carbon. *Journal of Triticeae Crops*, 2021, 41(12): 1-7.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 30-108.
BAO S D. Soil Agro-chemical Analysis (Third Edition). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 30-108.
- [12] 王锐, 李希来, 张静. 四种覆土处理对高寒煤矿区排土场渣山植被恢复的影响. *草业学报*, 2020, 29(7): 40-51.
WANG R, LI X L, ZHANG J. Effects of four different soil-covering measures on vegetation restoration of coal mine spoils in an alpine area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2020, 29(7): 40-51.
- [13] 薛凯, 张彪, 周姝彤, 冉沁蔚, 唐立, 车荣晓, 庞哲, 王芳, 王頔, 张静, 姜丽丽, 胡容海, 崔骁勇, 郝彦宾, 王艳芬. 青藏高原高寒草地土壤微生物群落及影响因子. *科学通报*, 2019, 64(27): 2915-2927.
XUE K, ZHANG B, ZHOU S T, RAN Q W, TANG L, CHE R X, PANG Z, WANG F, WANG D, ZHANG J, JIANG L L, HU R H, CUI X Y, HAO Y B, WANG Y F. Soil microbial communities in alpine grasslands on the Tibetan Plateau and their influencing factors. *Chinese Science Bulletin*, 2019, 64(27): 2915-2927.
- [14] 吴建国, 韩梅, 裴伟, 艾丽, 常学向. 祁连山中部高寒草甸土壤氮矿化及其影响因素研究. *草业学报*, 2007, 16(6): 39-46.
WU J G, HAN M, CHANG W, AI L, CHANG X X. The mineralization of soil nitrogen and its influenced factors under alpine meadows in Qilian mountains. *Acta Prataculturae Sinica*, 2007, 16(6): 39-46.
- [15] 谭学进, 穆兴民, 高鹏, 孙文义, 赵广举, 顾朝军. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响. *中国环境科学*, 2019, 39(2): 713-722.
TAN X J, MU X M, GAO P, SUN W Y, ZHAO G J, GU C J. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the loess plateau. *China Environmental Science*, 2019, 39(2): 713-722.
- [16] 赵燕, 杜文华. 青藏高原东缘垂穗披碱草草地群落组成及生产力. *草业科学*, 2018, 35(12): 2978-2987.
ZHAO Y, DU W H. Study on the composition and productivity of the eastern Qinghai-Tibetan *Elymus nutans* grassland community. *Pratacultural Science*, 2018, 35(12): 2978-2987.
- [17] WARREN S D, ROSENTERETER R, PIETRASIAK N. Biological soil crusts of the great plains: A review. *Rangeland Ecology & Management*, 2021, 78: 213-219.
- [18] KIDRON G J, XIAO B, BENENSON I. Data variability or paradigm shift? Slow versus fast recovery of biological soil crusts-a review. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137683.
- [19] 顾云兵, 全文选, 李朝婵, 唐凤华, 黄先飞. 贵州西部废弃煤矿地先锋树种物种组成及多样性研究. *西南林业大学学报*, 2020,

- 40(1): 52-61.
- GU Y B, QUAN W X, LI C C, TANG F H, HUANG X F. Species composition and diversity of pioneer tree of abandoned coal mines in western Guizhou. *Journal of Southwest Forestry University*, 2020, 40(1): 52-61.
- [20] 李佳乐, 梁泳怡, 刘文杰, 杨秋, 徐文娟, 汤水荣, 王晶晶. 有机肥替代化学氮肥对橡胶幼苗生长和土壤环境的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(2): 431-438.
- LI J L, LIANG Y Y, LIU W J, YANG Q, XU W X, TANG S R, WANG J J. Effects of manure substituting chemical nitrogen fertilizer on rubber seedling growth and soil environment. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(2): 431-438.
- [21] 孔晓君, 尚晓阳, 李玉胜, 刘泉汝, 滕怀泽, 郑海涛. 有机肥与控释复合肥配施对茶叶产量、品质和土壤化学性质的影响. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1377-1383.
- KONG X J, SHANG X Y, LI Y S, LIU Q R, TENG H Z, ZHENG H T. Effects of combined application of organic fertilizer and controlled-release compound fertilizer on yield and quality of tea, and soil chemistry properties. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1377-1383.
- [22] 杨清夏, 龙光强, 吴开贤, 何澍然, 李扬, 赵平. 控释尿素一次性施用的玉米减氮增效研究. *西北农业学报*, 2022, 31(1): 34-43.
- YANG Q X, LONG G Q, WU K X, HE S R, LI Y, ZHAO P. Study on reducing N fertilizer and increasing nutrient use efficiency of maize with one-time application of controlled-release urea. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2022, 31(1): 34-43.
- [23] 段文学, 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 张立明. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(11): 1971-1980.
- DUAN W X, ZHANG H Y, XIE B T, WANG B Q, ZHANG L M. Effects of chemical and bio-organic fertilizers on tuber yield, quality, and soil fertility of edible sweet potato. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(11): 1971-1980.
- [24] 李欢, 赵平, 陈林康, 李连华, 向蕊, 龙光强. 添加不同类型秸秆对土壤 CO₂ 排放和化学性质的影响. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4): 909-918.
- LI H, ZHAO P, CHEN L K, LI L H, XIANG R, LONG G Q. Effects of addition of different types of straw on soil CO₂ emission and soil chemical properties. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 909-918.
- [25] 赵轻舟, 王艳芬, 崔晓勇, 郝彦宾, 余志晟. 草地土壤微生物多样性影响因素研究进展. *生态科学*, 2018, 37(3): 204-212.
- ZHAO Q Z, WANG Y F, CUI X Y, HAO Y B, YU Z C. Research progress of the influence factors of soil microbial diversity in grassland. *Ecological Science*, 2018, 37(3): 204-212.

(责任编辑 苟燕妮)

2022 年第 9 期《草业科学》审稿专家

安 渊 白小明 鲍根生 曹文侠 曾 兵 常生华 陈 功 陈连民
程汉亭 范树高 付和平 付娟娟 干友民 郭同军 郭彦军 韩云华
何 峰 侯扶江 花立民 姜怀志 焦 婷 金 樑 李东坡 李 飞
李胜利 李文静 李 悦 刘华梁 刘兴元 龙 健 姜燕宏 马红彬
马绍楠 聂 刚 蒲小鹏 齐智利 钱珊珠 孙 建 谭 波 王文明
王向涛 徐 彬 许岳飞 鄢 燕 杨振安 于应文 鱼小军 张 程
张宏磊 张建全 张万军 张兴旭 张振华 赵成章 赵 祺

承蒙以上专家对《草业科学》期刊稿件的审阅, 特此表示衷心的感谢!