

DOI: 10.11686/cyxb2024302

http://cyxb.magtech.com.cn

刘文谨, 蒋福祯, 祁凯斌, 等. 不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价. 草业学报, 2025, 34(5): 27—39.

LIU Wen-jin, JIANG Fu-zhen, QI Kai-bin, *et al.* Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(5): 27—39.

不同施肥量和播种量对高寒矿区植被恢复和土壤质量的影响及综合评价

刘文谨, 蒋福祯, 祁凯斌, 宋明丹, 李正鹏*

(青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 木里煤矿区地处高寒地带, 经多年开采后生态破坏严重, 土壤贫瘠, 导致生态恢复困难且恢复成本较高。因此, 筛选出一套高效率、低成本的生态恢复方案尤为重要。试验依托于青海省大面积的恢复方案设计不同施肥量和播种量组合的两因素三水平完全组合试验, 施肥量设3个水平, 分别为低施肥 F_1 (羊板粪 $165\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $7.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $75\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、中施肥 F_2 (羊板粪 $330\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、高施肥 F_3 (羊板粪 $495\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$); 播种量设3个水平, 分别为低播量 S_1 ($60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、中播量 S_2 ($120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、高播量 S_3 ($180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$), 共构建了9种恢复处理, 分别为低施肥低播量(F_1S_1)、低施肥中播量(F_1S_2)、低施肥高播量(F_1S_3)、中施肥低播量(F_2S_1)、中施肥中播量(F_2S_2)、中施肥高播量(F_2S_3)、高施肥低播量(F_3S_1)、高施肥中播量(F_3S_2)、高施肥高播量(F_3S_3)。本研究主要通过探究不同恢复处理下矿区植被生长状况及土壤质量变化, 结合灰色关联度分析和熵权TOPSIS方法, 对不同恢复方案的综合效果进行全面评价。结果显示, 施肥量与播种量的恢复处理显著促进了矿区的植被恢复($P<0.05$), 中高施肥处理下植被盖度超过70%, 植被密度达到 $8826\sim 10447\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$, 地上生物量显著增加至 $445.51\sim 559.47\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。不同恢复处理显著改善了土壤物理特性($P<0.05$), 中高施肥处理下土壤容重平均降至 $0.94\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 随施肥量的增加, 自然含水量显著增加, 在高施肥中播量(F_3S_2)和中施肥高播量(F_2S_3)处理达到39.31%和38.28%。高播量处理下, 土壤饱和持水量与毛管持水量显著提升($P<0.05$), 在高施肥高播量(F_3S_3)处理下最高分别为91.14%和81.39%。土壤养分特性方面, 中高施肥处理有机质平均增加26.23%, pH值平均降至7.5, 呈中性偏碱。且随着施肥量的增加氮、磷、钾等关键养分显著提升($P<0.05$)。选取测定的植物和土壤指标进行灰色关联度和熵权TOPSIS分析, 结果显示, 中施肥高播量(F_2S_3)的恢复方案在生态效益和经济效益上具有双重优势。综上所述, 本研究认为中施肥高播量(F_2S_3), 即采用羊板粪 $330\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 、有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、牧草专用肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 以及播种量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的恢复方案可作为青海省木里矿区生态恢复的优先参考方案。

关键词: 生态修复; 植被生长; 土壤养分特征; 熵权TOPSIS分析; 灰色关联度分析

Effects of different fertilization and sowing amounts on vegetation restoration and soil quality in alpine mining areas and comprehensive evaluation

LIU Wen-jin, JIANG Fu-zhen, QI Kai-bin, SONG Ming-dan, LI Zheng-peng*

Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: The Muli coal mining area is located in the hinterland of the Qilian Mountains on the Qinghai—Tibet Plateau. After years of mining activity, excessive open-pit mining activities have encroached on swampy wetlands

收稿日期: 2024-07-31; 改回日期: 2024-09-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201605)和青海省自然科学基金青年项目(2023-ZJ-987Q)资助。

作者简介: 刘文谨(1999—), 女, 青海西宁人, 在读硕士。E-mail: liuwenjin@nwafu.edu.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: lipengzheng131@163.com

and a large amount of waste residue from mining has been landfilled. Soil affected by mining activity is infertile, which leads to difficulties in environmental restoration and high restoration costs. Therefore, it is crucial to conduct experiments to identify an efficient and low-cost ecological restoration plan. The experiment conducted forms part of a large-scale restoration program in Qinghai Province and comprised two-factors (fertilization and seeding rates), and three-levels of each. Specifically, the fertilization rates were: low fertilization, F_1 (sheep manure $165 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ + organic fertilizer $7.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ + forage special fertilizer $75 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); medium fertilization, F_2 (sheep manure $330 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ + organic fertilizer $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ + forage special fertilizer $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); and high fertilization, F_3 (sheep manure $495 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ + organic fertilizer $22.5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ + forage special fertilizer $225 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). The three seeding rates were: low seeding rate, S_1 ($60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); medium seeding rate, S_2 ($120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$); and high seeding rate, S_3 ($180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$). A total of nine restoration treatments were formed from the combinations of the three levels of fertilization and seeding rate, namely: low fertilization and low seeding rate (F_1S_1), low fertilization and medium seeding rate (F_1S_2), low fertilization and high seeding rate (F_1S_3), medium fertilization and low seeding rate (F_2S_1), medium fertilization and medium seeding rate (F_2S_2), medium fertilization and high seeding rate (F_2S_3), high fertilization and low seeding rate (F_3S_1), high fertilization and medium seeding rate (F_3S_2), and high fertilization and high seeding rate (F_3S_3). This experiment design therefore comprehensively evaluated the overall effectiveness of different restoration programs by exploring vegetation growth and soil quality changes in mining areas under various restoration treatments. Data were analyzed using grey relational analysis and the entropy weight TOPSIS method. The study results indicate that applying fertilizer and adjusting seeding rates significantly enhances vegetation restoration in the mining area ($P < 0.05$). With medium and high fertilization treatments, vegetation cover exceeded 70%, vegetation density reached 8826–10447 plants $\cdot\text{m}^{-2}$, and aboveground biomass significantly increased to 445.51–559.47 g $\cdot\text{m}^{-2}$. Some restoration treatments also improved soil physical properties significantly ($P < 0.05$). With medium and high fertilization treatments, soil bulk density averaged 0.94 g $\cdot\text{cm}^{-3}$. Moreover, increased fertilizer application led to a significant increase in soil moisture content, which reached 39.31% and 38.28% under F_3S_2 and F_2S_3 , respectively. Soil saturated capacity and capillary water holding capacity also increased significantly ($P < 0.05$) under high seeding rate treatments, with the highest values of 91.14% and 81.39%, respectively, under the F_3S_3 treatment. In terms of soil nutrient characteristics, medium and high fertilization treatments increased organic matter by an average of 26.23%, and the pH value averaged 7.5, indicating a slightly alkaline soil. Additionally, essential nutrients such as nitrogen, phosphorus, and potassium increased significantly with increasing fertilization ($P < 0.05$). Through measured plant and soil indicators, grey relational analysis, and entropy weight TOPSIS analysis, it is evident that the restoration program with medium fertilization and high seeding rate (F_2S_3) offers dual advantages in both ecological and economic benefits. In conclusion, this study finds that $330 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ sheep manure, $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ organic fertilizer, $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ specialized forage fertilizer, and a seeding rate of $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ in the Muli mining area of Qinghai Province can be recommended as the optimal combination for ecological restoration.

Key words: ecological restoration; vegetation growth; soil nutrient characteristics; entropy weight TOPSIS analysis; grey relational degree analysis

青海木里矿区位于青藏高原祁连山腹地,不仅是青海省规模最大的焦煤储存区域,也是生态敏感区域。矿产开发主要集中在江仓、聚乎更、哆嗦贡玛和弧山等多个煤炭开采点^[1]。然而,过度的露天采矿活动侵占了沼泽湿地,导致水土流失、草地资源缩减^[2]。同时,采矿产生的大量废渣堆填,形成了结构疏松、养分稀缺的渣山,对周围生物栖息地造成了无法在短时间内自行恢复的损害^[3]。木里矿区地处高寒高原地带,气候严酷,冬季漫长严寒,夏季短暂低温,冻土层深厚,降水稀少,植物生长周期短且艰难。这种极端环境降低了植被再生的能力,使得生态恢复工作异常艰巨,不仅耗时长,而且经济成本高昂^[4]。因此,如何在这样的环境下制定出兼顾改善生态环境和

降低恢复成本的策略,成为当前急需解决的问题^[5]。

然而,木里矿区因其独特的地理位置,面临着运输客土成本高昂的难题。鉴于此,采用以肥代土的土壤修复策略进行土壤重构,并播种适宜的草种以实现快速植被建植,成为了一种切实可行的方案^[6]。有机肥的施用能够有效补充土壤中的营养元素和有机物质,进而显著提升土壤的持水保肥能力^[7]。同时,播种量的合理控制对于植物群落的健康生长具有至关重要的作用。这不仅能够确保植物以适宜的密度生长^[8],还能通过促进植物根系的发育,增加土壤孔隙度,提高土壤团聚体的稳定性,进而实现植被生长需求与资源利用效率之间的平衡^[9]。因此,有机肥的施加和播种量的确定变得尤为关键。

施肥量和播种量作为影响矿区生态恢复效果的两大关键因素,受到了广泛关注。杨鑫光等^[10]研究表明,相对于人工覆土,施肥在经济上具有更高的可行性。Li等^[11]也发现有机肥在土壤改良方面展现出一定的优越性。具体到实施层面,刘帅等^[12]研究显示,通过混合 $495 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的羊板粪与渣土形成的重构土,能够显著提升土壤养分含量,实现良好的“复绿”效果。播种量的重要性也不容忽视,这直接影响着植被的密度和覆盖度,进而决定整体的恢复效果。张玉芳等^[13]通过播种量与有机肥两因素试验研究,筛选出了最优的恢复方案,即有机肥 $20 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与播量 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的组合。刘万杰等^[14]则通过施肥量与播种方式的两因素试验发现羊板粪 $165 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 、商品有机肥 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 结合撒播的方式能实现最佳的恢复效果,但该措施的多年恢复效果仍需进一步深入研究。之后,王佟等^[15]推出了适用于现场大面积土壤重构的配比方案,即渣土+羊板粪 $450 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +商品有机肥 $22.5 \sim 30.0 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

目前,青海省大面积使用的生态恢复方案为李永红等^[16]于2021年提出的“七步法”种草技术,采用特定比例的羊板粪($495 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)、有机肥($11.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、牧草专用肥($225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和播种量($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),目前成效显著,但成本相对偏高。因此,在保证恢复效果的前提下,探讨通过减少施肥量和播种量以节约资源和降低成本的可行性,是需要进一步研究的关键课题。鉴于此,本研究在青海省大面积恢复方案的基础上,结合已有的文献设计了不同施肥量与播种量的两因素三水平完全组合随机区组试验。旨在通过评估不同恢复处理对植被生长状况和土壤质量改善效果的影响,筛选出在降低肥料和种子资源消耗的同时,能够维持生态恢复质量的优化方案,从而实现矿区恢复工作的效率性与经济性的平衡。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于青海省海北藏族自治州与海西蒙古族藏族自治州交界处的大通河上游木里煤田聚乎更矿区的原储煤场(东经 $99^{\circ}17'$, 北纬 $38^{\circ}16'$)。该区域平均海拔约 4100 m ,属于典型的高寒大陆性气候,低氧、气候寒冷,昼夜温差大。夏季的最高气温为 19.8°C ,而冬季的最低气温可降至 -34°C ,年均气温 -1.68°C 。年平均降水量为 516 mm ,平均蒸发量 1190 mm ,降水主要集中在5—9月,四季多风。植被类型分为高寒沼泽类和高寒草甸类,具有较明显的高寒地区形态特征,植被稀疏,群落结构简单^[17]。

1.2 试验设计

将青海省大面积恢复方案作为高施肥高播量处理,设计了播种量和施肥量的双因素试验,施肥量设置3个水平,分别为低施肥 F_1 (羊板粪 $165 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +有机肥 $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);中施肥 F_2 (羊板粪 $330 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +有机肥 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);高施肥 F_3 (羊板粪 $495 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ +有机肥 $22.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $225 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。播种量设置3个水平,分别为低播量 S_1 ($60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);中播量 S_2 ($120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);高播量 S_3 ($180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。完全组合后为9个处理(F_1S_1 、 F_1S_2 、 F_1S_3 、 F_2S_1 、 F_2S_2 、 F_2S_3 、 F_3S_1 、 F_3S_2 、 F_3S_3),每个处理重复4次,共36个小区,小区面积 $4 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ 。以裸露矿地(bare slag, BS)和天然草地(natural grassland, NG)作为对照。

草种选择青海草地早熟禾(*Poa pratensis*)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、星星草(*Puccinellia tenuiflora*)4种牧草,草种按照1:1:1:1的质量比例均匀混合播种。于2022年6月24日播种,播种前对煤渣山表层的矿渣进行机械破碎形成粒径 $<5 \text{ cm}$ 的砾石,之后压实和平整地面。依照试验设计,将不同用量的羊板粪、有机肥和牧草专用肥施入各小区,然后,将4种草种混匀后撒播于每个小区,旋耕耙磨镇压后,铺设无纺布。施用的羊板粪来源于周边区域,肥料购自青海一品畜产品加工有限责任公司(表1)。

表1 肥料的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of fertilizers

类型 Type	全氮 Total nitrogen (%)	全磷 Total phosphorus (%)	全钾 Total potassium (%)	有机质 Organic matter (%)	土壤酸碱度 Soil pH	含水率 Moisture content (%)
羊板粪 Sheep manure	1.168	0.738	1.396	41.43	7.86	35.08
商品有机肥 Commercial organic fertilizer	1.044	0.715	1.657	31.74	7.76	28.82

1.3 样品采集及测定方法

经过两年的恢复后,本研究于2023年8月进行了取样工作。在每个研究小区内,随机布设了4个1 m×1 m的样方,进行地上植被特征调查。其中,植被高度(vegetation height, VH)是在样地内随机选择若干植株,使用直尺从植株基部垂直量到植株的最高点,并逐一记录植株高度,通过计算所有测量高度的总和除以植株数量,得出样方内植被的平均高度。植被盖度(vegetation coverage, VC)采用细线将样方划分为100个大小相等的方格,根据植被在样方内的垂直投影,统计样方内植被占用的格子数,并除以总方格数(100)来计算植被盖度。植被密度(vegetation density, VD)的测定,则是在样方框内观察并记录所有植物个体的数量,将植物个体总数除以样方框面积(1 m²),得到样方内的植被密度。同时,采集了各样方中10 cm×10 cm×10 cm的草毡层样本,用以测定植物的地上生物量(above-ground biomass, AGB)、地下生物量(below-ground biomass, BGB)及根土体积比(root-to-soil volume ratio, RSR)^[18]。采用环刀法^[19]于植被调查样方中获取土壤样本,用于测定土壤物理特性,具体包括土壤容重(soil bulk density, SBD)、自然含水量(soil moisture content, SMC)、饱和持水量(soil saturated capacity, SSC)以及毛管持水量(capillary water holding capacity, CWC)。人工挖取表层(0~10 cm)的土壤,去除大石块和植物残根后用自封袋带回实验室,用于土壤化学性质测定。土壤化学性质测定方法参考鲍士旦^[20]的《土壤农化分析》,其中土壤全氮(total nitrogen, TN)含量采用半微量凯氏定氮法进行测定;土壤全磷(total phosphorus, TP)含量采用NaOH熔融法—钼锑抗比色法进行测定;土壤全钾(total potassium, TK)含量采用NaOH熔融法—火焰光度法进行测定;土壤速效氮(available nitrogen, AN)含量采用碱解扩散法进行测定;土壤速效磷(available phosphorus, AP)含量采用(碱性)碳酸氢钠浸提法—钼锑抗比色法进行测定;土壤速效钾(available potassium, AK)含量采用NH₄OAc浸提—火焰光度法进行测定;土壤有机质(soil organic matter, SOM)含量采用重铬酸钾—浓硫酸外加热法进行测定;阳离子交换量(cation exchange capacity, CEC)采用三氯化六氨合钴浸提—分光光度法进行测定;土壤酸碱度(pH)采用电位法—赛多利斯PB-10进行测定。

1.4 指标计算

1.4.1 灰色关联度分析 参考《灰色关联法在区域竞争力评价中的应用》^[21],将测定的19个植物和土壤指标作为一个灰色系统,选取天然草地的相关指标作为最优序列 X_0 ,并将各恢复处理的相关指标作为比较数列,判断关联程度;关联度越大,说明该恢复处理的综合恢复效果越好;反之,恢复越差。

将参评指标 X_i 进行归一化处理,并计算权重 w_i 。

$$w_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} / \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_i}{\mu_i}$$

式中: i 为评价对象; n 为样本数量; σ_i 和 μ_i 分别为 X_i 的均值和标准差。

利用灰色关联系数公式计算第 j 个评价对象 Y_j 与最优序列 X_0 的关联系数 ϵ_i 。

$$\epsilon_i(Y_j, X) = \frac{\min_i \min_j |Y_{ij} - X_i| + \rho \max_i \max_j |Y_{ij} - X_i|}{|Y_{ij} - X_i| + \rho \max_i \max_j |Y_{ij} - X_i|}$$

式中: $\min_i \min_j |Y_{ij} - X_i|$ 和 $\rho \max_i \max_j |Y_{ij} - X_i|$ 分别为两级极小差和两级极大差; $|Y_{ij} - X_i|$ 为评价对象与最优序列的绝对差; ρ 为分辨率(分辨系数),一般取0.5。

最后,进一步计算第 j 个评价对象 Y_j 与最优序列 X_0 的关联度 R 。

$$R(Y_j, X) = \sum_{i=1}^n w_i \times \epsilon_i(Y_j, X)$$

1.4.2 熵权-TOPSIS分析 将19个植物和土壤指标 X_{ij} 进行同趋势化处理 A_{ij} ,其中土壤容重、土壤酸碱度、恢复成本3个指标进行逆向化处理。使用熵权法^[22]计算权重值 W_j ,并将数据进行加权。之后,找出最优矩阵向量 A^+ 和最劣矩阵向量 A^- ,并分别计算各个评价对象与正、负理想解释的距离 D^+ 和 D^- 。最后,结合距离值计算得出评价对象与最优方案的接近程度 C 。

$$A_{ij} = X_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m X_{ij}^2}$$

$$D^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j \times (A_j^+ - A_{ij})^2}$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j \times (A_j^- - A_{ij})^2}$$

$$C = D^- / (D^+ + D^-)$$

式中: m 为评价指标; X_{ij} 为对应评价对象的评价指标; A_{ij} 为同趋势化处理的指标; W_j 为权重值; A_j^+ 为评价对象第 j 项指标的最大值; A_j^- 为评价对象第 j 项指标的最小值。

1.4.3 恢复成本计算公式 所有费用的具体定价均依据公司的实际报价标准,并通过以下公式进行计算得出:

$$\text{肥料费用 (元} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{施肥量 (t} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{肥料单价 (元} \cdot \text{t}^{-1})$$

$$\text{草种费用 (元} \cdot \text{kg}^{-1}) = \text{播种量 (kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \times \text{草种单价 (元} \cdot \text{kg}^{-1})$$

总肥料费用由羊板粪费用、有机肥费用以及牧草专用肥费用3部分组成;总草种费用则由冷地早熟禾、草地早熟禾、中华羊茅以及星星草4部分费用组成。

$$\text{人工机械费用} = \text{机械破碎} + \text{机械施肥} + \text{机械旋耕} + \text{机械播种} + \text{铺设无纺布费用}$$

式中:铺设无纺布费用进一步细分为无纺布材料成本及相应的人工铺设费用。

$$\text{恢复总费用} = \text{总肥料费用} + \text{总草种费用} + \text{人工机械费用}$$

1.5 数据处理

采用Excel 2016整理数据,使用SPSS 19.0对植被和土壤数据进行施肥量和播种量双因素方差分析,并应用Duncan法进行多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。使用SPSSAU进行灰色关联度分析和熵权TOPSIS分析,使用Origin 2021制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理植被恢复状况

植被恢复是评估矿区生态恢复进程的关键指标,能够直观反映生态系统的动态平衡^[23]。本研究发现,随着施肥量的增加,植被高度显著增长($P < 0.05$),中高施肥比低施肥分别提高了16.76%、25.50%;而播种量对植被高度的影响呈先增后减的趋势,中播量下植被高度最高,平均为28.23 cm(图1A)。随着施肥量和播种量的增加,植被盖度显著提高,中高施肥处理显著高于低水平处理,且中高处理间无显著差异(图1B)。植物密度和地上生物量随着施肥量的增加显著增加($P < 0.05$)。与低施肥相比,中施肥的植物密度平均提升了73%,达7234.22株 $\cdot \text{m}^{-2}$,地上生物量平均增加了72.83%,达445.51 g $\cdot \text{m}^{-2}$ 。同时中高施肥处理下,随着播种量的增加,植被密度和地上生物量也有显著提升(图1C,D)。

随施肥量的增加,植被地下生物量显著增加($P < 0.05$)。相较于低施肥处理,中施肥地下生物量增加94.68%,平均为644.24 g $\cdot \text{m}^{-2}$ 。高施肥增加了137.96%,平均为787.45 g $\cdot \text{m}^{-2}$ (图1E)。当施肥量一定时,高播量下地下生物量有显著提升,在 F_3S_3 处理下达到最高,为936.94 g $\cdot \text{m}^{-2}$ 。根土体积比与地下生物量呈相同的变化趋势,随着施肥量的增加根土体积比增加,在高播量处理下,根土体积比进一步提升(图1F)。然而,与天然草地相比,恢复处理后的植被地下生物量和根土体积比仍然存在较大差距。总体来说,适度增加施肥量和播种量对改善植被恢复效果具有显著作用,特别是高播种量与中高施肥结合的恢复处理。

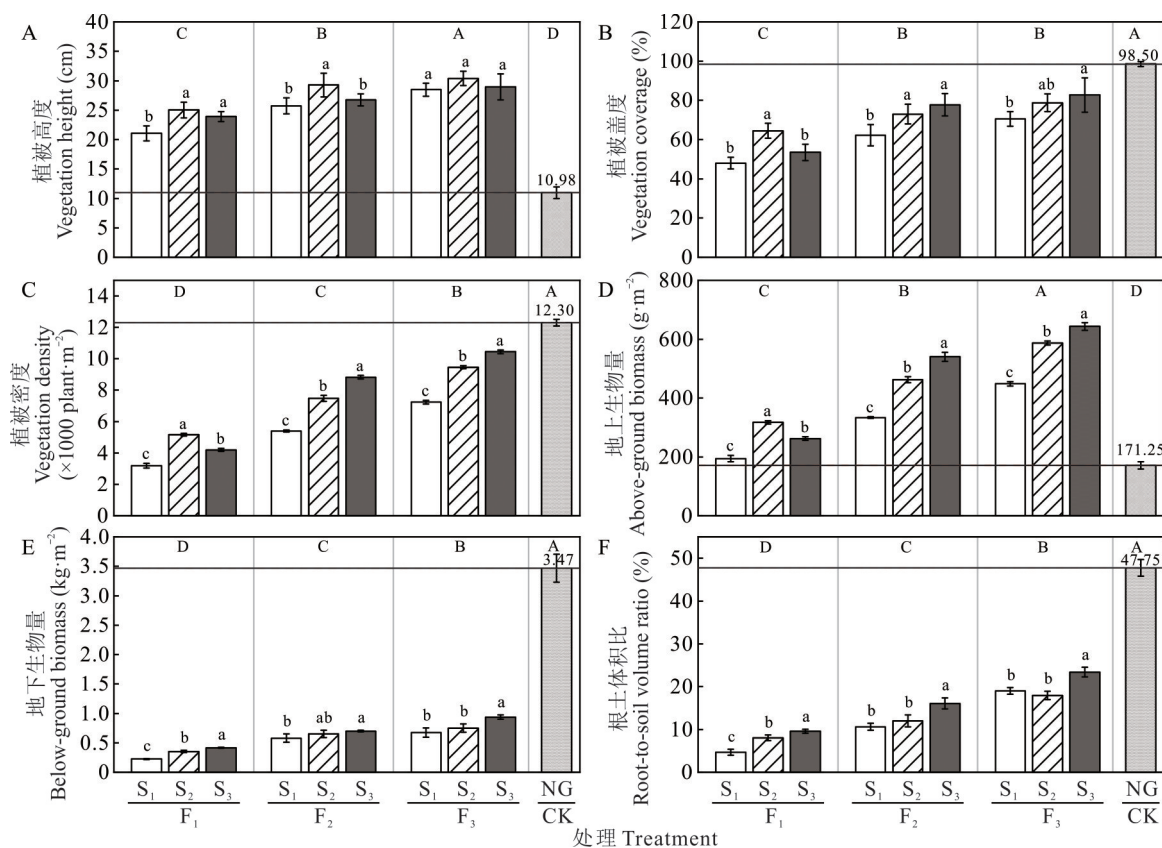


图1 不同处理下的植物生长状况

Fig. 1 Plant growth under different treatments

不同大写字母表示各指标在不同施肥量间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示各指标在同一施肥量下不同播种量间差异显著 ($P < 0.05$); 施肥量 (F_1, F_2, F_3)、播种量 (S_1, S_2, S_3)、天然草地 (NG)。实线为天然草地参考值。下同。Different uppercase letters indicated significant differences in each index under different fertilization amount ($P < 0.05$), and different lowercase letters indicated significant differences in each index under the same fertilization amount and different sowing amount ($P < 0.05$). Fertilization levels are denoted as F_1, F_2 , and F_3 , while seeding rates are denoted as S_1, S_2 , and S_3 . NG represents natural grassland. The solid line is the reference value of natural grassland. The same below.

2.2 不同处理土壤质量恢复状况

2.2.1 土壤水分状况

裸露矿地的土壤容重为 $1.83 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 进行恢复处理后, 结果显示土壤容重得到了有效的改善, 中高施肥下土壤容重平均降低了 48.63%, 接近天然草地 $0.76 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 水平 (图 2A)。土壤结构的改善在一定程度上影响了土壤水分状况的提升。随着施肥量的增加, 土壤自然含水量显著增加 ($P < 0.05$), 且中高施肥处理间无显著差异。当施肥量一定时, 相比于低播量, 中高播量下土壤自然含水量显著增加。尤其在 F_3S_2 和 F_2S_3 的处理组中表现较好, 分别为 39.31%、38.28% (图 2B)。土壤饱和持水量和毛管持水量的变化趋势显示一致性, 中高施肥相比于低施肥处理有明显的改善效果, 饱和持水量均在 35% 以上, 毛管持水量保持在 25% 以上。其中在高播量处理下, 土壤饱和持水量和毛管持水量进一步增强。在 F_3S_3 处理下达到最大, 即饱和持水量为 91.14%、毛管持水量为 81.39% (图 2C, D)。

2.2.2 土壤养分状况

土壤作为生态系统的重要组成部分, 其理化性质的改善对于生态恢复至关重要^[24]。研究结果显示, 不同施肥量与播种量组合对土壤理化性质有显著影响 ($P < 0.05$)。具体而言, 随着施肥量的增加, 土壤有机质含量显著增加, 在中施肥条件下, F_2S_2 处理有机质含量最高, 为 $330.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而在高施肥处理下, F_3S_3 处理的有机质含量进一步增加, 为 $366.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3A)。同样, 土壤阳离子交换量也随着施肥量的增加而增加, 当施肥量一定时, 中播量处理对阳离子交换量有显著的促进作用, 在 F_3S_2 处理下达到最大, 为 $126.89 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图 3B)。从土壤酸碱度来看, 裸露矿地的土壤呈偏碱性, pH 值平均为 8.60。采用不同恢复方案后, 土壤 pH 值逐渐降低至 7.5 左右, 呈中性偏碱状态。相比之下, 天然草地的 pH 值为 6.24, 呈弱酸偏中性 (图 3C)。

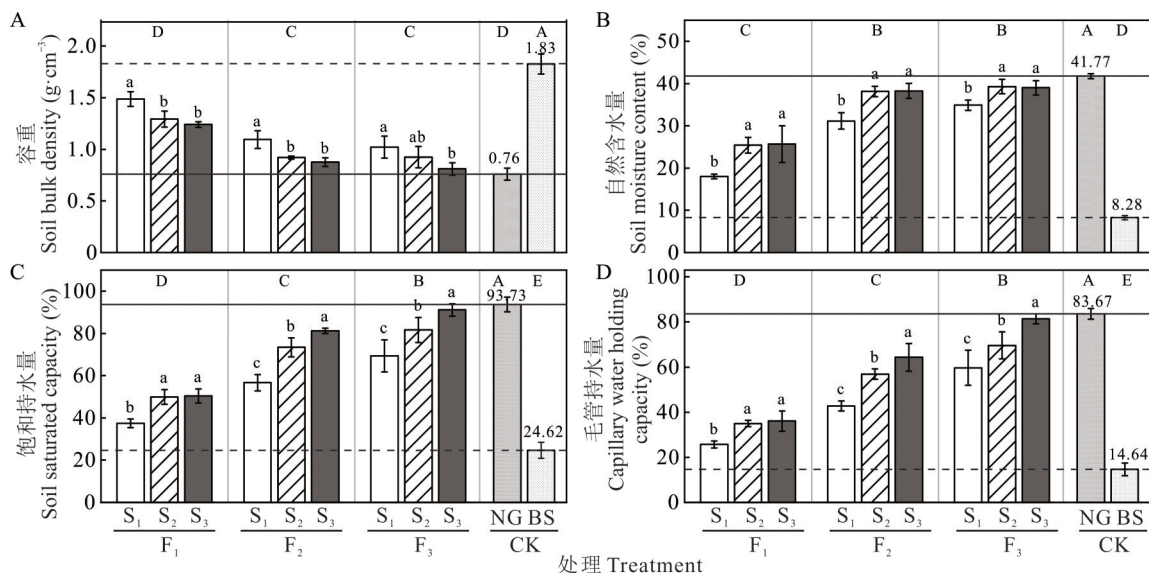


图 2 不同处理下的土壤水分状况

Fig. 2 Soil water status under different treatments

BS 表示裸露矿地; 虚线为裸露矿地的参考值。下同。BS represents bare slag. The dotted line is the reference value of the bare slag. The same below.

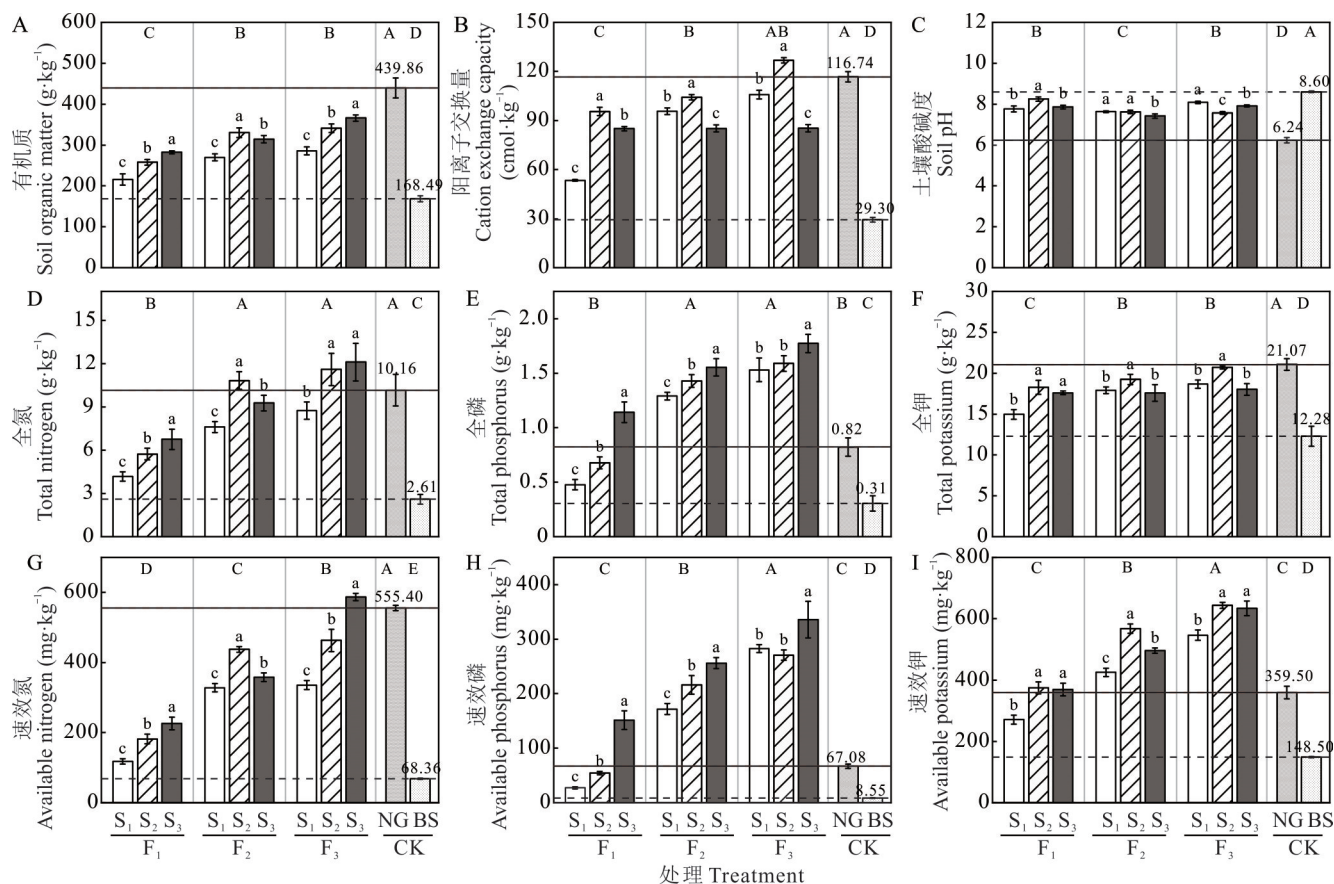


图 3 不同恢复处理下土壤化学性质变化情况

Fig. 3 Changes of soil chemical properties under different restoration treatments

与低施肥相比, 中高施肥显著提升土壤养分的含量。土壤全氮和速效氮呈相同的变化趋势, 在中施肥条件下, 中播量土壤氮含量显著增加, F₂S₂ 处理下土壤全氮为 10.83 g·kg⁻¹, 速效氮为 437.47 mg·kg⁻¹。而在高施肥条件下, 高播量对于土壤氮有显著的促进作用, F₃S₃ 处理下土壤全氮为 11.59 g·kg⁻¹, 速效氮为 586.78 mg·kg⁻¹ (图

3D,G)。此外,随着施肥量的增加,土壤全磷、速效磷也显著增加,相较于低施肥处理,中施肥处理全磷增加85.71%,速效磷增加176.40%;高施肥全磷增加111.69%,速效磷增加282.08%。当施肥量一定时,高播量对于土壤磷含量有显著的促进作用, F_3S_3 处理下全磷和速效磷含量最高,分别达到 $1.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $336.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3E,H)。土壤全钾和速效钾呈相同的变化趋势,随着施肥量的增加,土壤钾含量显著增加,在中播量处理下土壤全钾、速效钾含量进一步提升, F_3S_2 处理下土壤全钾和速效钾含量最高,分别为 $20.71\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $644.00\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图3F,I)。

2.3 不同处理的恢复效果评价

2.3.1 恢复成本计算 本研究中,矿区修复的肥料采用羊板粪、有机肥、专用肥进行配施,草种采用了草地早熟禾、冷地早熟禾、中华羊茅和星星草,播种方式采用撒播。由于矿区渣土条件较差,需要进行机械破碎和旋耕。根据恢复方案计算投入成本,其中肥料费:羊板粪 $220\text{ 元}\cdot\text{m}^{-3}$ 、有机肥 $1050\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 、专用肥 $2400\text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$ 。机械费:机械破碎 $6000\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、机械施肥 $1200\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、机械旋耕 $1275\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、机械播种 $1200\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。铺设无纺布:材料费 $3600\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、人工费 $5250\text{ 元}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。草种价钱:冷地早熟禾 $44\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、草地早熟禾 $55\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、中华羊茅 $22\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、星星草 $50\text{ 元}\cdot\text{kg}^{-1}$ (表2)。

表2 不同恢复方案总投入成本

Table 2 Total input cost of different restoration schemes (CNY·hm⁻²)

恢复处理 Recovery processing	羊板粪 Sheepboard manure	有机肥 organic fertilizer	牧草专用肥 Special forage fertilizer	草种 Grass seed	机械破碎 Mechanical disruption	机械施肥 Mechanized application	机械旋耕 Mechanical rotary tillage	机械播种 Mechanical seeding	铺设无纺布 Lay non-wo- ven fabric	总成本 Total cost
F_1S_1	36300	7875	180	2490	6000	1200	1275	1200	8850	65370
F_1S_2	36300	7875	180	4980	6000	1200	1275	1200	8850	67860
F_1S_3	36300	7875	180	7470	6000	1200	1275	1200	8850	70350
F_2S_1	72600	15750	360	2490	6000	1200	1275	1200	8850	109725
F_2S_2	72600	15750	360	4980	6000	1200	1275	1200	8850	112215
F_2S_3	72600	15750	360	7470	6000	1200	1275	1200	8850	114705
F_3S_1	108900	23625	540	2490	6000	1200	1275	1200	8850	154080
F_3S_2	108900	23625	540	4980	6000	1200	1275	1200	8850	156570
F_3S_3	108900	23625	540	7470	6000	1200	1275	1200	8850	159060

2.3.2 灰色关联-TOPSIS恢复效果评价 为系统地评估不同生态恢复策略对裸露矿地的修复效果,本研究选择了19项评价指标,包括植物特征(高度、盖度、密度、地上生物量、地下生物量、根土体积比),土壤水分(土壤容重、自然含水量、饱和持水量、毛管持水量),土壤养分(有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾、CEC、pH)。这些指标涵盖了植物生长的关键参数、土壤水分保持能力以及土壤养分含量等关键领域。

基于对这些指标的全面分析,把天然草地设定为理想恢复状态的参照序列,与9种不同的恢复方案进行比较和相关性评估^[25]。为了消除不同指标的量纲影响,所有数据均进行均值化处理,确保了评价结果

表3 关联度分析

Table 3 Correlation analysis

恢复方案 Recovery processing	关联度 Degree of association	排序结果 Sort results
F_3S_2	0.914	1
F_2S_3	0.912	2
F_3S_3	0.910	3
F_2S_2	0.907	4
F_3S_1	0.907	5
F_1S_2	0.904	6
F_2S_1	0.898	7
F_1S_1	0.893	8
F_1S_3	0.883	9

的一致性和公正性。之后,利用关联系数计算公式,得出各恢复方案相较于理想状态的关联系数,并进一步计算得出关联度,以量化每个方案的综合恢复效能。

结果表明(表 3),以天然草地为最优序列时,关联度较高的 3 个方案依次为 F_3S_2 、 F_2S_3 和 F_3S_3 。但是鉴于矿区生态恢复涉及的面积广阔,恢复成本因素不可忽视。为权衡经济效益,引入熵权 TOPSIS 方法对各方案进行加权,获得最终综合排名^[26]。

综合评价结果显示(表 4), F_2S_3 在恢复效能和经济效益上表现较为突出。不仅具备较优秀的恢复效果,同时还实现了成本的大幅节省,能够促进生态经济双重效益的提升。因此,推荐采用 F_2S_3 方案作为矿区生态修复的优先策略,从而实现生态恢复效果和经济成本的最佳平衡。

3 讨论

3.1 不同恢复处理下植被生长特征变化

植被群落特征是研究草地生态系统的基础^[27]。为了充分发挥草地的生态功能,深入了解其组成结构和功能至关重要^[28],本研究采用的 9 种恢复处理均对木里矿区的植被恢复产生了积极作用,但各处理的效果存在显著差异。

随着施肥量的增加,植被的高度、盖度、密度以及地上生物量均显著提升,这表明施肥为植物提供了必要养分,有效促进了植物的生长和生物量的积累^[29]。具体而言,中播量下植物更倾向于个体的生长,而高播量下个体生长高度较低,但植被群落整体更为茂盛,这与景美玲等^[30]的研究结果相一致。而鉴于矿区环境通常较为恶劣,草种的生存率和发芽率普遍偏低^[31],因此,通过增大播种量,可以有效增加植被的存活数量,进而提升植被的盖度、密度和地上生物量。较高的植被盖度和密度可以增加地表粗糙度、减缓水流、促进水分下渗,从而增强土壤的保水能力^[32]。地上生物量的增加也有助于提高生态系统的生物量储备,增强其稳定性和抗干扰能力,从而改善植物群落整体的生长状况^[33]。

根系作为吸收养分和水分的关键器官,其发育情况对植物生长至关重要^[34]。本研究结果显示随着施肥量和播种量的增加,地下生物量和根土体积比呈显著增加的趋势,这表明施肥量的增加使植物根系生长得到更好的营养支持,并且随着播种量的增加植物根系更好地扎根在土壤中,这有助于增强植物对养分和水分的吸收能力,为植被恢复创造有利条件^[35]。然而,与天然草地相比,恢复处理的植被仍存在一定差距。这可能与恢复植物种群结构、土壤条件及微生物群落的自然演替进程有关,需要更长时间的生态过程来达成^[36]。

3.2 不同恢复处理下土壤质量变化

在草地生态系统中,土壤水分与养分是关键限制因素,影响着草种的发芽及植物的生长发育。本研究发现随着施肥量的增加,土壤容重显著降低,并趋近于天然草地的水平,这与陈娟等^[37]的研究结果相一致,表明施肥和播种处理有效改善了矿区的土壤结构,进而对土壤的水分状况产生了积极影响^[38]。相较于低施肥处理,中高施肥条件下的土壤自然含水量、饱和持水量和毛管持水量均有所提高,且在高播量下,这种提升作用更为显著。这一变化与植被地上、地下生物量的显著增加密切相关,生物量的增加不仅增强了植被的水土保持功能^[39],还有效减少了土壤水分的蒸发,并且通过植物根系与土壤水分之间的动态调节机制,能够更好地维持土壤水分稳定^[40]。相比之下,中等播种量处理下土壤水分状况的改善并不明显,这可能与植被覆盖度不足和根系体系发展不充分有关。

在土壤理化性质方面,中高施肥处理显著增加了土壤有机质和土壤阳离子交换量,这表明有机肥和羊板粪的投入提供了额外的碳源,促进了土壤中微生物的活动和有机质的积累,而肥料中的阳离子(如钙、镁等)被土壤胶

表 4 熵权-TOPSIS 评价结果

Table 4 Entropy weight-TOPSIS evaluation results

恢复方案 Recovery processing	正理想解释距离 Positive ideal so- lution distance (D ⁺)	负理想解释距离 Negative ideal solution distance (D ⁻)	相对接近度 Relative proximity (C)	排序 结果 Sort results
F_2S_3	0.139	0.255	0.647	1
F_2S_2	0.150	0.228	0.604	2
F_1S_3	0.200	0.238	0.544	3
F_2S_1	0.177	0.195	0.524	4
F_3S_3	0.241	0.260	0.519	5
F_3S_2	0.231	0.228	0.497	6
F_1S_2	0.242	0.230	0.488	7
F_1S_1	0.260	0.240	0.480	8
F_3S_1	0.251	0.188	0.428	9

体吸附,从而增强了土壤的阳离子交换能力,这有利于维持土壤结构和提高土壤的养分保持能力^[41]。此外,不同恢复处理均对土壤酸碱度表现出显著的调节作用,使土壤pH值向更适宜植物生长的中性偏碱状态转变,有助于植物对养分的吸收。

此外,中高施肥显著提升了土壤养分的含量,包括全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷以及速效钾。这可能是由于肥料提供了大量的营养元素,同时促进了土壤中微生物的活动和有机质的分解,从而释放了更多的养分^[42]。在不同施肥条件下,中播量和高播量对土壤养分有进一步的促进作用。这说明较高的播种量有助于植被的生长和根系的扩展,进而提升了土壤养分的吸收和利用效率。

3.3 不同恢复处理的生态和经济效益综合评价

矿区的生态恢复一直是环境科学与工程领域的重要议题。目前已有多种恢复策略被提出并进行了试验验证,但如何系统评估这些策略的优劣,并选择最适合特定矿区的恢复方案,仍然是一个挑战。马立明等^[43]采用灰色关联度法构建了唐山露天煤矿集中区地质环境质量评价体系,揭示了各因素间的内在联系,并提供了标准化的权重指标,为矿区生态恢复的评价奠定了坚实基础。刘钊等^[44]则利用熵权TOPSIS技术,对陕北黄土高原神府矿区的不同区域土壤质量进行了全面评估,得出了开采区土壤质量亟待提升、治理区虽有所改善但仍需进一步努力的结论,为矿区的土壤恢复工作提供了重要参考。因此,本研究在矿区生态恢复方案的评估中进行了创新性的尝试,将灰色关联度分析与熵权TOPSIS方法相结合,以全面、系统地评价不同恢复策略的综合效果。这种综合评价方法不仅充分考虑了恢复方案的生态学效果,如植被恢复、土壤持水能力和土壤养分提升等方面,还兼顾了经济效益,为矿区的可持续恢复提供了更为科学的依据。特别是在资源有限、成本约束的情况下,单纯的生态学效果评估并不能完全指导实际的恢复工作。

本研究通过灰色关联度分析量化了各恢复方案与理想恢复状态(即天然草地)之间的关联程度。结果显示,高施肥中播量(F_3S_2)、中施肥高播量(F_2S_3)和高施肥高播量(F_3S_3)3个恢复处理在生态学指标上与天然草地的关联度较高,可能是由于这3个恢复处理均提供了充足的养分和较高的播种密度,为植被的生长创造了良好的条件,从而显著促进了植被的恢复、改善了土壤的水分状况,并提升了土壤的养分含量。较高的施肥量能够有效补充土壤中缺乏的营养元素和有机物质,提高土壤的持水保肥能力,为植被的生长奠定坚实的土壤基础。而适宜的播种量则确保了植物以合理的密度生长,既避免了因密度过大导致的竞争过度,也避免了因密度过小导致的植被覆盖不足。这两者的有机结合,使得这3个处理方案在生态学指标上表现出色。

然而,为了更全面地评估恢复方案的可行性,研究进一步引入了熵权TOPSIS方法,综合考虑了恢复效果和恢复成本两个方面的因素。熵权TOPSIS方法的评价结果显示,中施肥高播量(F_2S_3)处理在恢复效能和经济效益上达到了较好的平衡。这一方案不仅能够有效促进植被的恢复和土壤质量的改善,还能够在保证恢复效果的同时,显著降低恢复成本,提高恢复工作的经济可行性。相比之下,虽然高施肥中播量(F_3S_2)恢复处理在生态学指标上表现最优,但其成本可能过高,这在一定程度上限制了其未来大规模推广的可行性。毕竟,在实际的生态恢复工作中,除了考虑恢复效果外,还需要充分考虑经济成本。因此,本研究认为中施肥高播量(F_2S_3)处理能够更好地达到恢复效能和经济效益之间的平衡,更具有实际推广价值。

4 结论

本研究采用施肥量与播种量的双因素三水平完全组合试验,深入探究了不同恢复处理措施对高寒矿区植被恢复及土壤质量的影响。得出以下结论:

1)施肥和播种有效促进了矿区植被的生长,并改善了根系的发育。增大施肥量和播种量有效提升了矿区植被高度、盖度、密度、地上地下生物量及根土体积比。

2)中高施肥配合高播量能显著改善土壤物理化学性质,降低土壤容重,增加土壤自然含水量和持水能力,同时提高了土壤有机质和关键养分含量,改善了土壤酸碱度,为植物提供更好的生长环境,促进植物生长发育。

3)灰色关联分析发现高施肥中播量(F_3S_2 :羊板粪 $495\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $225\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +播种量 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和中施肥高播量(F_2S_3 :羊板粪 $330\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +播种量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)处理与天然草地生态学特征高度相关,恢复处理显著改善了植被生长和土壤质量

状况。

4)在综合考虑恢复效果与成本的基础上,熵权 TOPSIS 评价发现中施肥高播量(F_2S_3 :羊板粪 $330\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ +牧草专用肥 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ +播种量 $180\text{ kg}\cdot\text{hm}^2$)方案在恢复效能和经济效益上达到了较好的平衡,可作为一种有效的恢复方案推动矿区植被恢复、改善土壤质量、促进生态系统的恢复和稳定。

参考文献 References:

- [1] Li J, Sheng Y, Chen J, *et al.* Modeling the distribution of permafrost along a transportation corridor from Cetar to Muri in Qinghai province. *Progress in Geography*, 2010, 29(9): 1100—1106.
李静, 盛煜, 陈继, 等. 青海省柴达尔—木里地区道路沿线多年冻土分布模拟. *地理科学进展*, 2010, 29(9): 1100—1106.
- [2] Jin L Q, Li X L, Sun H F, *et al.* Effects of restoration years on vegetation and soil characteristics under different artificial measures in alpine mining areas, west China. *Sustainability*, 2022, 14(17): 10889.
- [3] Yang X G, Li X L, Jin L Q, *et al.* Changes in soil properties of coal mine spoils in an alpine coal mining area after short-term restoration. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(8): 30—38.
杨鑫光, 李希来, 金立群, 等. 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.
- [4] Wang Q W, Xing X F, Zou M J, *et al.* Application of ecological geological layer theory in coal seam protection and ecological restoration—An example of ecological management practice in plateau alpine mining areas. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 104—109.
王庆伟, 邢夏帆, 邹明俊, 等. 生态地质层理论在煤层保护和生态修复中的应用—以高原高寒矿区生态治理实践为例. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(4): 104—109.
- [5] Qin Y, Liu J S, Xie S X, *et al.* Reflections on cost control of ecological restoration in plateau and alpine coal mining areas. *China Plant Engineering*, 2023(18): 5—7.
覃韵, 刘金森, 谢色新, 等. 高原高寒煤矿区生态修复成本控制的思考. *中国设备工程*, 2023(18): 5—7.
- [6] Pang B L. Analysis on soil microbe, enzyme activity and its influencing factors under different vegetation type in coal waste pile. Taiyuan: Shanxi Normal University, 2018.
庞碧琳. 不同复垦植被类型煤矸山土壤微生物、酶活性及其影响因素. 太原: 山西师范大学, 2018.
- [7] Xi B, Zhai L M, Liu S, *et al.* Effects of combination of organic and inorganic fertilization on maize yield and soil nitrogen and phosphorus leaching. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 326—335.
习斌, 翟丽梅, 刘申, 等. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 326—335.
- [8] Yang X Y. Experimental study on soil fertility of green and fertilizer rape in Ningxia Yellow River Irrigation District. Yinchuan: Ningxia University, 2019.
杨旭燕. 宁夏引黄灌区绿肥油菜培肥土壤试验研究. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [9] Tang G, Hu L, Song X Y, *et al.* Response of plant roots in different diameter classes to changing precipitation in an alpine meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(15): 6250—6264.
唐国, 胡雷, 宋小艳, 等. 高寒草甸植物群落不同根序根系特征对降雨量变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(15): 6250—6264.
- [10] Yang X G, Li X L, Jin L Q, *et al.* Effectiveness of different artificial restoration measures for soil and vegetation recovery on coal mine tailings in an alpine area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(3): 1—11.
杨鑫光, 李希来, 金立群, 等. 不同人工恢复措施下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究. *草业学报*, 2019, 28(3): 1—11.
- [11] Li X Q, Li D Y, Lu Q J, *et al.* Effects of different organic fertilizers on sweet potato growth and rhizosphere soil properties in newly reclaimed land. *Agronomy*, 2022, 12(7): 1649.
- [12] Liu S, Xiong T, Sun H, *et al.* Study on plateau frigid zone Muri mining area ecological management soil reconfiguration effect. *Coal Geology of China*, 2021, 33(11): 77—80, 86.
刘帅, 熊涛, 孙浩, 等. 高原高寒木里矿区生态治理中土壤重构治理效果研究. *中国煤炭地质*, 2021, 33(11): 77—80, 86.
- [13] Zhang Y F, Xu Y X, Tang J W, *et al.* Effects of sowing, fertilization and non-woven covering on vegetation restoration and soil temperature and humidity in alpine coalmine area. *Qinghai Prataculture*, 2022, 31(2): 2—6.
张玉芳, 徐有学, 唐俊伟, 等. 播量和施肥及无纺布覆盖对高寒矿区植被恢复和土壤温湿度的影响. *青海草业*, 2022, 31(2): 2—6.
- [14] 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. *Grassland and Turf*, 2023, 43(2): 116–125.
- 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. *草原与草坪*, 2023, 43(2): 116–125.
- [15] Wang T, Cai X L, Li F, *et al.* Soil layer construction and composition changes in restoration of ecological and geological layer in alpine mining area on plateau. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2407–2419.
- 王佟, 蔡杏兰, 李飞, 等. 高原高寒矿区生态地质层修复中的土壤层构建与成分变化差异. *煤炭学报*, 2022, 47(6): 2407–2419.
- [16] Li Y H, Li X L, Tang J W, *et al.* 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.
- 李永红, 李希来, 唐俊伟, 等. 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.
- [17] Qiao Q L, Wu Y R, Li Q Y, *et al.* The effects of commercial organic fertilizer and semi decomposed sheep manure on artificial grassland and soil characteristics in alpine mining area. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(8): 2659–2669.
- 乔千洛, 武燕茹, 李钦瑶, 等. 商品有机肥和羊板粪对高寒矿区人工草地和土壤特性的影响. *草地学报*, 2024, 32(8): 2659–2669.
- [18] Zi H B, Ade L J, Ma L, *et al.* Change of ratio of root to soil and soil nutrient content at different grassland types in alpine meadow. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(12): 2916–2921.
- 字洪标, 阿的鲁骥, 马力, 等. 高寒草甸不同类型草地群落根土比、土壤养分变化. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 2916–2921.
- [19] Li J, Du Y G, Zhang F W, *et al.* Mattic epipedon impact on water conservation in alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(5): 836–841.
- 李婧, 杜岩功, 张法伟, 等. 草毡表层演化对高寒草甸水源涵养功能的影响. *草地学报*, 2012, 20(5): 836–841.
- [20] Bao S D. *Agrochemical analysis of soil*. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] Guo X Y. Application of grey relational analysis in regional competitiveness evaluation. *Statistics & Decision*, 2004(11): 55–56.
- 郭秀云. 灰色关联法在区域竞争力评价中的应用. *统计与决策*, 2004(11): 55–56.
- [22] Chen W, Xia J H. An optimal weights combination method considering both subjective and objective weight information. *Mathematics in Practice and Theory*, 2007, 37(1): 17–22.
- 陈伟, 夏建华. 综合主、客观权重信息的最优组合赋权方法. *数学的实践与认识*, 2007, 37(1): 17–22.
- [23] Zhang L, Lu Z H, Tang S Y, *et al.* Slope vegetation characteristics and community stability at different restoration years of open-pit coal mine waste dump. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(14): 5764–5774.
- 张琳, 陆兆华, 唐思易, 等. 露天煤矿排土场边坡植被组成特征及其群落稳定性评价. *生态学报*, 2021, 41(14): 5764–5774.
- [24] Li S W, Wang B, Liu J, *et al.* Analysis of community characteristics and stability during ecological restoration in mining area of alpine steppe. *Journal of Agricultural Science and Technology*. (2024-10-05) [2024-07-01]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0196>.
- 李诗文, 王博, 刘静, 等. 高寒草原矿区生态修复过程中植物多样性及群落稳定性分析. *中国农业科技导报*. (2024-10-05) [2024-07-01]. <https://doi.org/10.13304/j.nykjdb.2023.0196>.
- [25] Zhang W, Zhou Q P, Chen Y J, *et al.* Comparison of production performance and forage quality of ten introduced oat varieties in Hulunbuir, China. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(12): 129–142.
- 张伟, 周青平, 陈有军, 等. 呼伦贝尔地区10个引进燕麦品种生产性能及饲草品质比较. *草业学报*, 2021, 30(12): 129–142.
- [26] Ou K W, Nong Z M, Lu Y F, *et al.* Evaluation of sugarcane based on comprehensive characters using grey correlation degree and TOPSIS method. *Guangxi Sciences*, 2023, 30(4): 804–812.
- 欧克伟, 农泽梅, 卢业飞, 等. 基于灰色关联度及TOPSIS法的甘蔗综合性状评价. *广西科学*, 2023, 30(4): 804–812.
- [27] Han W Y, Chen L, Su X K, *et al.* Effects of soil physico-chemical properties on plant species diversity along an elevation gradient over alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 822268.
- [28] Chen H Y H, Biswas S R, Sobey T M, *et al.* Reclamation strategies for mined forest soils and overstorey drive understorey vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(2): 926–936.
- [29] Muhammad I, Yang L, Ahmad S, *et al.* Irrigation and nitrogen fertilization alter soil bacterial communities, soil enzyme activities, and nutrient availability in maize crop. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 833758.

- [30] Jing M L, Li J Y, Yang Z Z, *et al.* Response of seeding mode and sowing density to plant component characters in the early stage establishment of *Poa pratensis* L. 'Qinghai'. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1556–1563.
景美玲, 李积雅, 杨增增, 等. 播种方式和密度对青海草地早熟禾建植初期植株的影响. *草地学报*, 2023, 31(5): 1556–1563.
- [31] Wu Y W. Study on characteristics of soil seed bank and influence factors of germination in waste land of Xiangtan manganese mine. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2019.
吴耀文. 湘潭锰矿废弃地土壤种子库特征及萌发影响因素的研究. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [32] Li F M, Ren L H, Liu J K, *et al.* Analysis of soil erosion forms and nutrient status of tailings from Liaoning iron ore. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2017(5): 37–40.
李凤鸣, 任丽华, 柳金库, 等. 辽宁铁矿尾矿砂水土流失形式与养分状况分析. *水土保持应用技术*, 2017(5): 37–40.
- [33] Li W H, Gan Z Z B, Cao X J, *et al.* Effects of altitude on plant productivity and species diversity in alpine meadows of northern Tibet. *Acta Prataculturae Sinica*, 2017, 26(9): 200–207.
栗文瀚, 干珠扎布, 曹旭娟, 等. 海拔梯度对藏北高寒草地生产力和物种多样性的影响. *草业学报*, 2017, 26(9): 200–207.
- [34] Jung K H, Duan M, House J, *et al.* Textural interfaces affected the distribution of roots, water, and nutrients in some reconstructed forest soils in the Athabasca oil sands region. *Ecological Engineering*, 2014, 64: 240–249.
- [35] Liu F, Wang P P, Cao Y Y, *et al.* Root distribution characteristics of typical herbaceous plants and their effects on soil physicochemical properties on the Loess Plateau. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(10): 1–13.
刘芳, 王佩佩, 曹玉莹, 等. 黄土高原典型草本植物根系分布特征及其对土壤理化性质的影响研究. *草业学报*, 2024, 33(10): 1–13.
- [36] Nan W G, Jiao L, Wang H, *et al.* Ecological restoration effect of artificial grassland and turf transplantation in alpine mining area on plateau. *Pratacultural Science*, 2023, 40(12): 3018–3029.
南维鸽, 焦磊, 王浩, 等. 高寒矿区人工建植草地和自然草皮移植生态修复效应. *草业科学*, 2023, 40(12): 3018–3029.
- [37] Chen J, Guo N, Wang Y P, *et al.* The effect of organic fertilizer on the comprehensive fertility of newly reclaimed farmland soil and the annual yield of wheat and corn. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*. (2024-07-30)[2024-11-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1101.S.20240411.1507.002.html>.
陈娟, 郭宁, 王艳平, 等. 有机肥对复垦新增耕地土壤综合肥力及麦玉周年产量的影响. *华北农学报*. (2024-07-30)[2024-11-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1101.S.20240411.1507.002.html>.
- [38] Leatherdale J, Chanasyk D S, Quideau S. Soil water regimes of reclaimed upland slopes in the oil sands region of Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*, 2012, 92(1): 117–129.
- [39] Wu H Y, Du L T, Qiao C L, *et al.* Water consumption of ecosystem driven by evapotranspiration evolution in Ningxia oasis plain. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(3): 172–180, 189.
吴宏玥, 杜灵通, 乔成龙, 等. 基于蒸散演变驱动的宁夏绿洲平原生态系统耗水变化. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 172–180, 189.
- [40] Sun T J, Nie M H, Teng W J, *et al.* Effects of different grasses for ecological restoration on soil evapotranspiration. *Northern Horticulture*, 2024(3): 71–78.
孙铁军, 聂明鹤, 滕文军, 等. 不同生态修复草种对土壤水分蒸散的影响. *北方园艺*, 2024(3): 71–78.
- [41] Li J F, Qu M K, Huang B, *et al.* Spatially non-stationary relationships between cation exchange capacity and related control factors. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(3): 638–646.
李锦芬, 瞿明凯, 黄标, 等. 区域土壤CEC与相关控制因子的空间非平稳关系评估. *土壤学报*, 2017, 54(3): 638–646.
- [42] Ma Y F, Song Y T, Wu Y N, *et al.* Effects of fertilization and mowing for 5 years on soil microbial characteristics in Hulunbuir meadow steppe. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(9): 242–251.
马远飞, 宋彦涛, 乌云娜, 等. 施肥和刈割5年对呼伦贝尔草甸草原土壤微生物特征的影响. *草业学报*, 2024, 33(9): 242–251.
- [43] Ma L M, Hu L G, Yin H L. Construction of geological environment quality evaluation system Tangshan open-pit coal mine. *China Energy and Environmental Protection*, 2023, 45(4): 49–54.
马立明, 胡立国, 殷红亮. 唐山露天煤矿集中区地质环境质量评价体系构建. *能源与环保*, 2023, 45(4): 49–54.
- [44] Liu Z, Han L, Wang D Y, *et al.* Soil physicochemical properties and quality assessment in the coal mining area of Loess Plateau in Northern Shaanxi Province. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(5): 1555–1564.
刘钊, 韩磊, 王丹月, 等. 陕北黄土高原煤矿区土壤理化性质及质量评价. *煤炭学报*, 2021, 46(5): 1555–1564.