

DOI: 10.11686/cyxb2024195

http://cyxb.magtech.com.cn

马利利, 蒋福祯, 马玉寿, 等. 粒径配比、施肥量以及播量耦合对矿区煤矸石基质的改良效果. 草业学报, 2025, 34(3): 71-84.

MA Li-li, JIANG Fu-zhen, MA Yu-shou, *et al.* Effect of particle size ratio, fertilizer application amount, and seeding rate combinations coal gangue matrix properties in restoration of a mining area. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(3): 71-84.

粒径配比、施肥量以及播量耦合对矿区煤矸石基质的改良效果

马利利¹, 蒋福祯², 马玉寿¹, 祁凯斌², 贾顺斌³, 李正鹏^{2*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016; 3. 青海省草原总站, 青海 西宁 810016)

摘要:煤矸石作为采矿活动产生的固体废弃物, 物理结构差, 所含养分不能被植物直接有效利用。因此, 煤矸石的基质改良是矿区生态恢复过程中的首要任务。本试验采用 $L_9(3^4)$ 正交设计, 研究煤矸石 <7 mm粒径占比(A)、有机肥施用量(B)、缓释尿素施用量(C)和播量(D)4个因素组合对植被生长和土壤养分的影响, 并通过TOPSIS综合分析优选出最佳改良模式。结果表明: 不同处理的地上生物量和土壤养分随着试验年限的增加而减少, 尤其是土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷以及速效钾含量极显著减少, 而全钾含量则显著增加。极差分析结果显示, 缓释尿素施用量和播量是影响地上生物量的关键因素, 而 <7 mm粒径占比和有机肥施用量是影响土壤养分含量的关键因素。结合地上生物量和土壤肥力指标进行TOPSIS综合分析得出, $T_2(A_1B_2C_2D_2)$ 处理(<7 mm粒径占比为0, 有机肥施用量为羊板粪 $30\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +商品有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$, 缓释尿素施用量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 播量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)时综合效果最好。该研究结果可为木里矿区生态修复提供参考依据。

关键词:煤矸石; 基质改良; 地上生物量; 土壤养分; 综合评价

Effect of particle size ratio, fertilizer application amount, and seeding rate combinations coal gangue matrix properties in restoration of a mining area

MA Li-li¹, JIANG Fu-zhen², MA Yu-shou¹, QI Kai-bin², JIA Shun-bin³, LI Zheng-peng^{2*}

1. Academy of Animal and Veterinary Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China; 3. Qinghai Province Grassland Station, Xining 810016, China

Abstract: Coal gangue, a solid waste produced from mining activities, has a poor physical structure, making the nutrients it contains inaccessible to plants. Therefore, improving the matrix properties of coal gangue is crucial in the ecological restoration of mining areas. This study utilized an $L_9(3^4)$ orthogonal design to investigate the combined effects of: (A) coal gangue particle size ratio <7 mm (0%, 25% or 50%), (B) organic fertilizer application amount ($15+7.5$, $30+15$ or $45\text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}+22.5\text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ sheep manure+commercial organic fertilizer), (C) slow-release urea application amount (30, 60 or $90\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), and (D) seeding rate (60, 120, or $180\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), on above-ground vegetation and soil nutrients. The optimal improvement model was selected using TOPSIS multivariate analysis. The findings revealed that over time, the above-ground biomass and soil nutrient levels decreased across different treatments. Specifically, soil organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium decreased significantly, while total potassium showed a notable increase.

收稿日期: 2024-05-22; 改回日期: 2024-07-15

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: 马利利(1994—), 女, 甘肃天水人, 在读博士。E-mail: 18997076162@163.com

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

Range analysis indicated that the application rate of slow-release urea and seeding rate were critical for above-ground biomass, whereas the particle size ratio < 7 mm and organic fertilizer amount were key factors for soil nutrient content. A comprehensive TOPSIS analysis based on above-ground biomass and soil fertility indicators identified the T_2 ($A_1B_2C_2D_2$) treatment as the most effective, comprising 0% of coal gangue with a particle size ratio < 7 mm, $30 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ of sheep manure + $15 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ of commercial organic fertilizer, $60 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ of sustained-release urea, and a seeding rate of $120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. The results of this study offer valuable insights for ecological restoration in the Muli mining area.

Key words: coal gangue; substrate improvement; above-ground biomass; soil nutrients; comprehensive evaluation

煤矸石是采矿所产生的固体废弃物,其结构性和通透性差,保水、保肥能力差,缺乏植被生长所需的营养物质^[1]。由于常年的采矿活动,使得煤矸石逐渐成为我国排放及积存量最大的固体废弃物。煤矸石的大量积累,经过长期风化和雨水淋溶作用^[2],会影响矿区的环境质量,包括地表与浅层地下水污染^[3],重金属污染^[4],煤矸石自燃^[5],有毒污染物释放等^[6-7]。因此,综合治理煤矸石山已成为解决矿区生态环境的突出问题。

土壤重构以及植被重建是促进煤矸石山向土壤化演化、消除污染、提高土壤质量以及快速恢复生态的有效措施^[8-10],土壤重构可在短时间内恢复和提高土壤肥力条件,是矿区生态系统恢复过程中的核心。土壤养分是评估土壤质量的重要指标,其含量大小可以直观地反映出土壤肥力的状况。煤矸石粒径可以影响土壤团聚体结构稳定性,改变煤矸石的粒径会显著影响土壤养分含量,尤其是有机碳和有效磷含量^[11]。施肥是最快且有效改善煤矸石山土壤理化性质的方式,对煤矸石进行施肥可以增加营养元素供给,能够保证植物正常生长以及群落的建立和发展^[9,12]。罗珂^[13]研究表明,在煤矸石种植区施肥,可以明显提高土壤养分含量,尤其是有机质、全氮、硝态氮、速效磷以及速效钾的含量。杨鑫光等^[14]研究也发现在煤矸石中进行适量施肥,能够显著提高土壤养分含量,有利于煤矸石山植被生长和土壤性质的改善。此外,植被重建是在土壤重构的基础上重建植物群落的稳定性,是矿区生态系统恢复过程中的保障^[15],也在煤矸石的治理中起着重要的作用,在改良煤矸石基质的基础上进行植被重建,可以有效控制煤矸石产生的污染^[16],并促进土壤养分的有效性^[17]。

虽然前人在煤矸石方面进行了相关研究,但针对粒径占比、肥料用量和播量耦合的研究较少。因此,本研究以青海省木里江仓矿区的煤矸石基质为对象,在青海大学农林科学院试验园区内开展了预试验,结合 < 7 mm 粒径不同占比,混合添加有机肥和缓释尿素,并设置不同播量,分析了2021和2023年植被生长状况和土壤的养分变化情况。并通过TOPSIS综合评价分析,确定不同粒径、有机肥施用量、缓释尿素施用量、播量的合理配比。本研究结果可为矿区后续生态恢复提供一定的理论参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

本研究使用的煤矸石基质取自青海省海北州刚察县木里煤田江仓矿区($99^{\circ}35' \text{ E}$, $38^{\circ}02' \text{ N}$,图1),该区属于高原大陆性气候,海拔3800~4000 m,年平均气温 $-5.0 \sim -4.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温可达 $-35 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温可达 $19.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量500 mm以上,5-9月占全年降水量的80%左右,年潜在蒸发量1500 mm左右。由于江仓矿区气候条件较为严峻,生长季较短,主要集中在6-9月。本研究于2021年4月在青海省西宁市城北区青海大学农林科学院试验园区内($101^{\circ}40' \text{ E}$, $36^{\circ}40' \text{ N}$,图1)利用取自江仓矿区的煤矸石基质开展了预试验。该区属于典型的高原大陆性气候,海拔为2200~2280 m,年平均温度 $5.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最低气温可达 $-18.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温可达 $34 \text{ }^{\circ}\text{C}$,年平均降水量350 mm,年潜在蒸发量1300 mm左右,年平均相对湿度56%,无霜期150 d。

1.2 试验设计与试验材料

该试验于2021年4月-2023年9月在西宁市开展,采取 $L_9(3^4)$ 正交试验设计(表1),共设置 < 7 mm粒径占比(A)、有机肥施用量(B)、缓释尿素施用量(C)和播量(D)4个因素,每个因素设置3个水平,共9个处理,每个处理重复3次,共27个微区。在试验地中挖取 $1.00 \text{ m} \times 1.00 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ 的坑,铺入0.075 mm的尼龙网隔离周围土

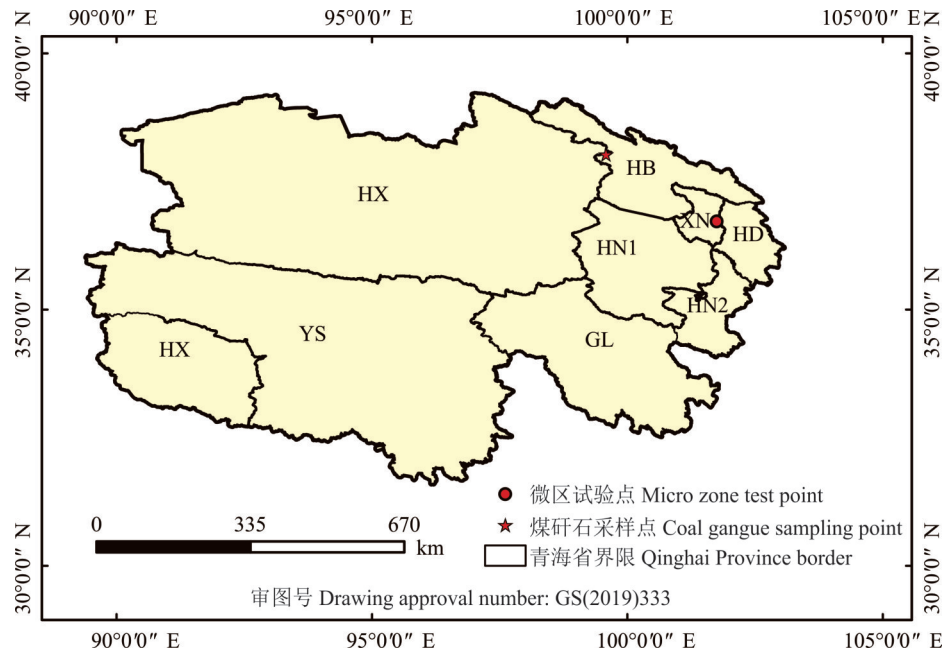


图 1 采样点及试验样地位置

Fig. 1 Location map of sampling points and test plots

XN、HD、HN1、HX、HB、HN2、GL、YS 分别代表西宁市、海东市、海南藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州、海北藏族自治州、海南藏族自治州、果洛藏族自治州、玉树藏族自治州。基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)333 号标准地图制作,底图边界无修改。The map depicts Xining City (XN), Haidong City (HD), Hainan Tibetan Autonomous Prefecture (HN1), Haixi Mongolian Tibetan Autonomous Prefecture (HX), Haibei Tibetan Autonomous Prefecture (HB), Huangnan Tibetan Autonomous Prefecture (HN2), Goluo Tibetan Autonomous Prefecture (GL), and Yushu Tibetan Autonomous Prefecture (YS). Based on the standard map service GS(2019)333 website of the Ministry of Natural Resources Standard Map Service, with no modifications to the base map boundary.

壤,然后将不同比例粒径的煤矸石基质填入微区,各微区间隔 0.5 m。2021 年 4 月 15 日按照试验设计对各小区进行处理后播种,草种主要有草地早熟禾(*Poa pratensis*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)和星星草(*Puccinellia tenuiflora*) (草种由青海大学畜牧兽医科学院提供),按草籽重量 1:1:1:1 混合后播种,播种后覆盖无纺布,待全部出苗后揭下。2022 和 2023 年试验期间不再对微区进行任何施肥。试验中的羊板粪(粉末状,处于半腐熟状态)由青海开泰农牧开发有限公司提供;有机肥由青海三夫农牧科技有限公司提供;缓释尿素由山东茂施生态肥料有限公司提供,含氮量为 44%~45%。煤矸石、羊板粪和有机肥的化学性质详见表 2。

1.3 样品采集、测定与指标计算

1.3.1 样品采集与测定 分别于 2021 年 9 月 16 日和 2023 年 9 月 16 日对地上生物量和土壤样品进行采集。地上植株采集:2021 年 9 月 16 日在微区内随机选 0.5 m×0.5 m 的样方,2023 年 9 月 16 日将微区内所有样方齐地面刈割,后将割取的地上部分装入纸袋,105 °C 杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重后称重计算地上生物量。土壤样品采集:分别于 2021 年 9 月 16 日和 2023 年 9 月 16 日在微区内采集煤矸石基质样品,去除石块、根系,带回实验室风干后备用。

地上生物量(above-ground biomass, AGB)采用烘干法测定、土壤全氮(total nitrogen, TN)采用凯氏定氮法测定、土壤全磷(total phosphorus, TP)采用碱熔法测定、土壤全钾(total potassium, TK)采用火焰光度计法测定、土壤碱解氮(available nitrogen, AN)采用碱解扩散法测定、土壤速效磷(available phosphorus, AP)采用比色法测定、土壤速效钾(available potassium, AK)采用火焰光度计法测定、土壤有机质(soil organic matter, SOM)采用重铬酸钾外加热法测定,以上均参照鲍士旦^[18]的方法。

1.3.2 土壤肥力综合指数(integrated fertility index, IFI) 根据模糊数学加乘法原则,计算综合土壤肥力指数(IFI),公式如下^[19]:

表1 正交试验

Table 1 The orthogonal tests

处理 Treatment	<7 mm 粒径占比 Proportion of particle size less than 7 mm (A, %)	有机肥施用量(羊板粪+商品有机肥) Amount of organic fertilizer applied (sheep manure+ commercial organic fertilizer) (B, m ³ ·hm ⁻² +t·hm ⁻²)	缓释尿素施用量 Amount of slow-release urea applied (C, kg·hm ⁻²)	播量 Seeding rate (D, kg·hm ⁻²)
T ₁ (A ₁ B ₁ C ₁ D ₁)	0(A ₁)	15+7.5(B ₁)	30(C ₁)	60(D ₁)
T ₂ (A ₁ B ₂ C ₂ D ₂)	0(A ₁)	30+15(B ₂)	60(C ₂)	120(D ₂)
T ₃ (A ₁ B ₃ C ₃ D ₃)	0(A ₁)	45+22.5(B ₃)	90(C ₃)	180(D ₃)
T ₄ (A ₂ B ₁ C ₂ D ₃)	25(A ₂)	15+7.5(B ₁)	60(C ₂)	180(D ₃)
T ₅ (A ₂ B ₂ C ₃ D ₁)	25(A ₂)	30+15(B ₂)	90(C ₃)	60(D ₁)
T ₆ (A ₂ B ₃ C ₁ D ₂)	25(A ₂)	45+22.5(B ₃)	30(C ₁)	120(D ₂)
T ₇ (A ₃ B ₁ C ₃ D ₂)	50(A ₃)	15+7.5(B ₁)	90(C ₃)	120(D ₂)
T ₈ (A ₃ B ₂ C ₁ D ₃)	50(A ₃)	30+15(B ₂)	30(C ₁)	180(D ₃)
T ₉ (A ₃ B ₃ C ₂ D ₁)	50(A ₃)	45+22.5(B ₃)	60(C ₂)	60(D ₁)

注: 在<7 mm 粒径占比因素下, A₁水平下煤矸石基质均大于7 mm(煤矸石基质粒径增大); A₂水平下煤矸石基质25%小于7 mm, 其余75%大于7 mm(煤矸石基质初始状态); A₃水平下煤矸石基质50%小于7 mm, 其余50%大于7 mm(煤矸石基质粒径减小)。

Note: Under the factor of <7 mm particle size, all the gangue matrix at A₁ level is larger than 7 mm (particle size of the gangue matrix increases); 25% of the gangue matrix at A₂ level is smaller than 7 mm, and the remaining 75% is larger than 7 mm (initial state of the gangue matrix); 50% of the gangue matrix at A₃ level is smaller than 7 mm, and the remaining 50% is larger than 7 mm (particle size of the gangue matrix decreases).

表2 煤矸石、羊板粪和有机肥的基本化学性质

Table 2 Basic chemical property of coal gangue, sheep manure and organic fertilizer

项目 Items	全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	全钾 Total potassium (g·kg ⁻¹)	碱解氮 Avail- able nitrogen (mg·kg ⁻¹)	速效磷 Avail- able phospho- rus (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	有机质 Soil organic mat- ter (g·kg ⁻¹)
煤矸石 Coal gangue	1.5	0.7	27.3	12.4	7.8	189.2	127.8
羊板粪 Sheep manure	11.1	3.7	13.0	—	—	—	400.8
商品有机肥 Commercial organic fertilizer	23.1	12.3	16.7	—	—	—	354.7

$$IFI = \sum_{i=1}^n f_i w_i$$

式中: n 为肥力指标数量, f_i 为第 i 项指标的隶属值, w_i 为第 i 项指标的权重值。其中, 隶属值计算公式如下:

$$f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq x_2 \\ 0.1 + 0.9(x - x_1)/(x_2 - x_1) & x_1 < x < x_2 \\ 0.1 & x \leq x_1 \end{cases}$$

式中: x_2 为某一指标最大值, x_1 为某一指标最小值, x 为指标测定值。本研究中, 7项土壤养分指标含量在一定范围内越高, 越有利于地上植被的生长, 超出该范围则影响较小, 因此采用戒上型隶属度函数^[19-21]。

权重值采用主成分分析, 对各评价指标进行降维, 计算各指标的公因子方差占公因子方差总和的百分数, 赋以各指标0~1.0之间的权重数值^[22-24]。

1.3.3 TOPSIS 综合评价指标计算 TOPSIS 综合评价法是在归一化后的原始矩阵中找出最优方案和最劣方案(分别用最优向量和最劣向量表示), 然后分别计算出评价对象与最优方案和最劣方案间的距离, 获得该评价对象与最优方案的相对接近程度, 以此作为评价优劣的依据。相对接近度越高时, 评价方案越接近于最优方案^[25-26]。其相对接近度计算公式如下:

$$C_i = D_i^- / (D_i^+ + D_i^-)$$

式中: C_i 为样本点到最优样本点的相对接近度, D_i^+ 为评价方案到最优方案间的距离, D_i^- 为评价方案到最劣方案间的距离。其中, D_i^+ 和 D_i^- 的计算公式如下:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2}$$

式中: m 为评价指标个数(如果 m 个指标中有逆向指标, 则需将其正向化), Z_{ij} 为标准化加权决策矩阵, 表示第 i 个处理第 j 个指标的标准化加权结果。 Z_j^+ 和 Z_j^- 分别代表第 j 项指标的正理想解和负理想解。

1.4 数据分析

使用 Excel 2021 对数据进行整理和基本统计, 使用 SPSS 27.0 进行多因素方差分析、多重比较以及显著性检验(Duncan, $P < 0.05$ 时显著, $P < 0.01$ 时极显著), 使用 SPSSAU 进行 TOPSIS 法分析, 使用 Origin 2021 作图。

2 结果与分析

2.1 粒径配比、施肥量以及播种量耦合对地上生物量的影响

2021 和 2023 年间的地上生物量变化无显著差异($P > 0.05$), 其中, 随着试验年限的增加, T_1 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_7 、 T_8 和 T_9 处理均呈下降的趋势, 而 T_2 和 T_6 处理呈上升趋势。不同处理地上生物量在 2021 年差异不显著, 在 T_3 处理下最高, 为 $700.19 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 在 T_6 处理下最低, 为 $478.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$; 2023 年 T_2 处理地上生物量显著大于 T_5 处理, 为 $639.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, 相比于 T_5 处理增加了 46.35%, 其他处理组间的地上生物量无显著性差异(图 2a)。极差分析发现(表 3), 在 2021 年 4 个因素对地上生物量影响程度为 $C > D > B > A$, 在 2023 年 4 个因素对地上生物量影响程度为 $D > C > A > B$ 。总体来看, 影响地上生物量最关键的因素是缓释尿素施用量和播量, 但地上生物量受各因素的影响不显著($P > 0.05$)。分析不同因素水平下地上生物量变化的正交效应曲线发现(图 2b), 相较于因素 A 和因素 B, 因素 C 和因素 D 的效应曲线变化幅度较大。2021 年地上生物量随因素 C 的增加而增加, 在 C_3 水平下达到最大, 在因素 D 下 D_3 水平下达到最大。2023 年地上生物量随因素 C 和因素 D 的增加而先增加后降低, 在 C_2 和 D_2 水平下达到最大。

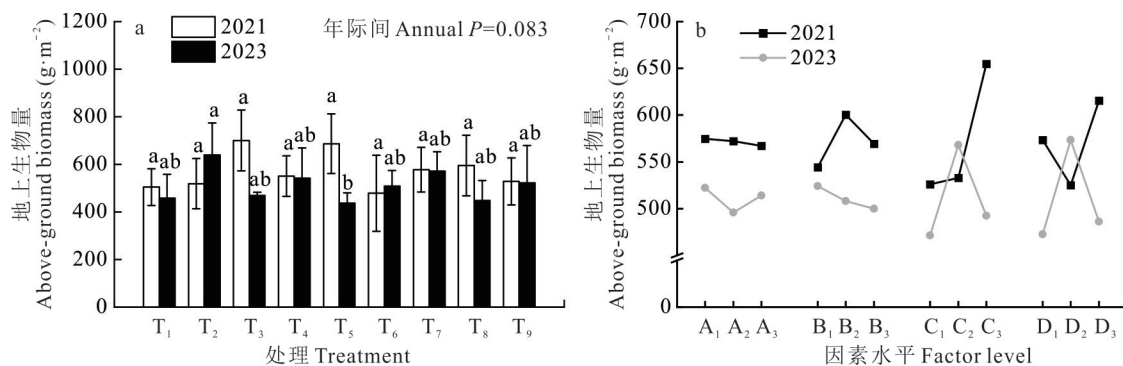


图 2 不同处理和不同因素水平对地上生物量的影响

Fig. 2 The effects of different treatments and factor level on above-ground biomass

a 为不同处理下地上生物量变化, b 为正交效应曲线。A 代表 $< 7 \text{ mm}$ 粒径占比, B 代表有机肥施用量, C 代表缓释尿素施用量, D 代表播量, A_1 、 A_2 和 A_3 代表 $< 7 \text{ mm}$ 粒径占比因素下不同水平; B_1 、 B_2 和 B_3 代表有机肥施用量因素下的不同水平; C_1 、 C_2 和 C_3 代表缓释尿素施用量因素下的不同水平; D_1 、 D_2 和 D_3 代表播量因素下的不同水平。不同小写字母代表同一年份不同处理间在 0.05 水平下差异显著, 下同。a is the change of aboveground biomass under different treatments, b is the orthogonal effect curve. A represents the proportion of $< 7 \text{ mm}$ particle size, B represents the amount of organic fertilizer applied, C represents the amount of slow-release urea applied, and D represents the seeding rate. Different levels of the factor of $< 7 \text{ mm}$ particle size are denoted as A_1 , A_2 , and A_3 , while different levels of organic fertilizer applied are denoted as B_1 , B_2 , and B_3 , and different levels of slow-release urea applied are denoted as C_1 , C_2 , and C_3 . Similarly, different levels of sowing amount are denoted as D_1 , D_2 , and D_3 . Lowercase letters are used to indicate significant differences among treatments in the same year at the 0.05 level, the same below.

表3 地上生物量的极差分析

Table 3 Range analysis of above-ground biomass

参数 Parameter	2021				2023			
	A	B	C	D	A	B	C	D
K_1	574.56	544.35	526.10	573.41	522.16	524.08	471.47	472.62
K_2	572.17	600.27	532.90	525.10	495.88	508.05	568.09	573.27
K_3	567.15	569.25	654.89	615.37	513.98	499.89	492.46	486.13
R	7.41	55.92	128.79	90.27	26.28	24.18	96.63	100.65
P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

注: K_1 表示该因素下水平1的平均值, K_2 表示该因素下水平2的平均值, K_3 表示该因素下水平3的平均值, R表示该因素各水平之间极大值与极小值之差, NS表示该因素影响不显著, 下同。

Note: K_1 represents the average value of level 1 under this factor, K_2 represents the average value of level 2 under this factor, K_3 represents the average value of level 3 under the factor. R represents the difference between the maximum value and the minimum value among each level of the factor. NS represents that the influence of the factor is not significant, the same below.

2.2 粒径配比、施肥量以及播种量耦合对土壤养分的影响

随着试验年限的增加,不同处理2023年有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷和速效钾含量均极显著低于2021年($P<0.001$),而全钾含量显著高于2021年($P<0.05$)。2021年,不同处理下土壤养分含量无显著性差异(除速效磷),但与初始值相比,均明显提高了土壤养分含量(除全钾外)。2023年,不同处理有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷以及速效钾含量均存在显著差异($P<0.05$)。其中, T_6 处理组有机质和全氮含量显著高于 T_1, T_2, T_3 和 T_6 处理组的全磷含量显著高于 T_1, T_9 处理组的碱解氮和速效磷含量分别显著高于 T_1 和 T_7 , 而 T_3, T_5, T_8 和 T_9 处理组的速效钾含量显著高于 T_1, T_4 和 T_7 处理组(图3)。此外,2023年有机质和全钾含量均明显低于初始值。

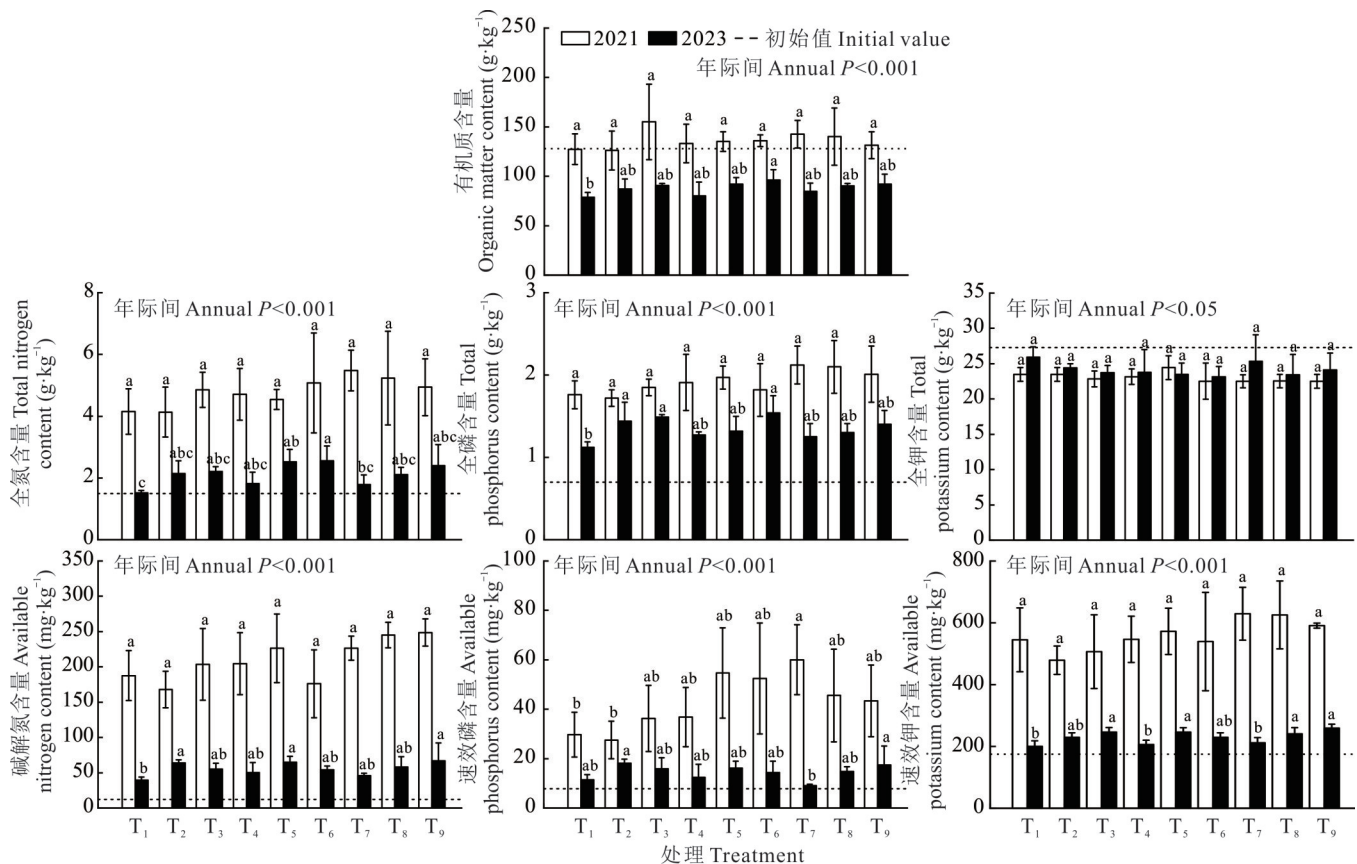


图3 不同处理对土壤养分含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on soil nutrient content

极差分析发现(表 4),在 2021 年,4 种因素对有机质含量的影响大小表现为 C>D>B>A,对全氮含量的影响大小表现为 A>D>C>B,对全磷含量的影响大小表现为 A>C>D>B,对全钾含量的影响大小表现为 B>A>D>C,对碱解氮含量的影响大小表现为 A>D>C>B,对速效磷含量的影响大小表现为 A>C>D>B,对速效钾含量的影响大小表现为 A>C>B>D。这说明在播种当年有机质含量主要受缓释尿素施用量的影响,而全氮、全磷、碱解氮、速效磷以及速效钾含量主要受<7 mm 粒径占比的影响。2023 年对有机质含量的影响大小表现为 B>A>C>D,对全氮含量的影响大小表现为 B>A>D>C,对全磷含量的影响大小表现为 B>D>A>C,对全钾含量的影响大小与 2021 年保持一致,也表现为 B>A>D>C,对碱解氮含量的影响大小表现为 B>C>A>D,对速效磷含量的影响大小表现为 B>C>A>D,对速效钾含量的影响大小表现为 B>A>D>C。这说明试验第 3 年土壤养分含量主要受有机肥施用量的影响(表 4)。

表 4 土壤有机质和速效养分的极差分析

Table 4 Range analysis of soil organic matter and available nutrients

指标 Index	参数 Parameter	2021				2023			
		A	B	C	D	A	B	C	D
有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	K ₁	136.18	134.40	134.50	131.36	85.48	81.19	88.49	87.64
	K ₂	134.74	133.79	130.24	134.89	89.46	89.90	86.50	89.47
	K ₃	138.12	140.85	144.29	142.79	89.15	93.00	89.11	86.99
	R	3.38	7.05	14.06	11.43	3.97	11.81	2.61	2.48
全氮 Total nitrogen (g·kg ⁻¹)	K ₁	4.38	4.78	4.82	4.54	1.95	1.71	2.06	2.14
	K ₂	4.78	4.63	4.59	4.90	2.30	2.25	2.12	2.16
	K ₃	5.22	4.96	4.96	4.93	2.10	2.39	2.17	2.05
	R	0.84	0.33	0.37	0.38	0.35	0.68	0.11	0.12
全磷 Total phosphorus (g·kg ⁻¹)	K ₁	1.78	1.93	1.89	1.91	1.35	1.22	1.32	1.28
	K ₂	1.90	1.93	1.88	1.89	1.38	1.35	1.37	1.41
	K ₃	2.08	1.89	1.98	1.95	1.32	1.48	1.35	1.36
	R	0.30	0.04	0.10	0.06	0.06	0.26	0.05	0.13
全钾 Total potassium (g·kg ⁻¹)	K ₁	23.27	23.05	22.84	23.48	24.69	25.01	24.17	24.50
	K ₂	23.37	23.48	23.05	22.84	23.47	23.77	24.09	24.29
	K ₃	22.52	22.62	23.27	22.84	24.28	23.66	24.18	23.65
	R	0.85	0.86	0.43	0.64	1.22	1.34	0.10	0.85
碱解氮 Available nitrogen (mg·kg ⁻¹)	K ₁	186.44	206.33	202.89	220.89	52.89	45.22	50.67	57.22
	K ₂	202.33	213.11	207.11	190.22	56.44	62.44	60.44	54.56
	K ₃	240.11	209.44	218.89	217.78	57.00	58.67	55.22	54.56
	R	53.67	6.78	16.00	30.67	4.11	17.22	9.78	2.67
速效磷 Available phosphorus (mg·kg ⁻¹)	K ₁	31.14	42.18	42.56	42.57	15.13	10.96	13.51	15.00
	K ₂	47.98	42.58	35.90	46.66	14.31	16.39	15.96	13.82
	K ₃	49.66	44.02	50.32	39.56	13.76	15.86	13.73	14.38
	R	18.51	1.84	14.42	7.10	1.38	5.43	2.44	1.18
速效钾 Available potassium (mg·kg ⁻¹)	K ₁	510.22	573.67	570.00	569.44	225.44	206.00	223.56	235.33
	K ₂	552.78	559.00	538.89	549.22	227.33	238.89	231.67	223.67
	K ₃	615.33	545.67	569.44	559.67	237.22	245.11	234.78	231.00
	R	105.11	28.00	31.11	20.22	11.78	39.11	11.22	11.67

分析不同因素水平下土壤养分含量变化的正交效应曲线发现(图4),相较于2021年,各因素下2023年土壤养分的效应曲线较为平稳。2021年有机质含量在C因素下变化幅度最大,在C₃水平下有机质含量最高;而土壤全氮、全磷、碱解氮、速效磷以及速效钾的效应曲线随A因素增加而增加,均在A₃水平下为最高。2023年土壤养分含量的效应曲线均在B因素下变化幅度最大。其中,有机质、全氮、全磷以及速效钾均在B₃水平下最高,碱解氮和速效磷在B₂水平下最高,而全钾则在B₁水平下最高。根据方差分析结果(表5),因素A显著影响2021年的速效磷含量,因素B显著影响2023年土壤养分含量($P < 0.05$)(除全钾外),而因素C和因素D对土壤养分的影响不显著。

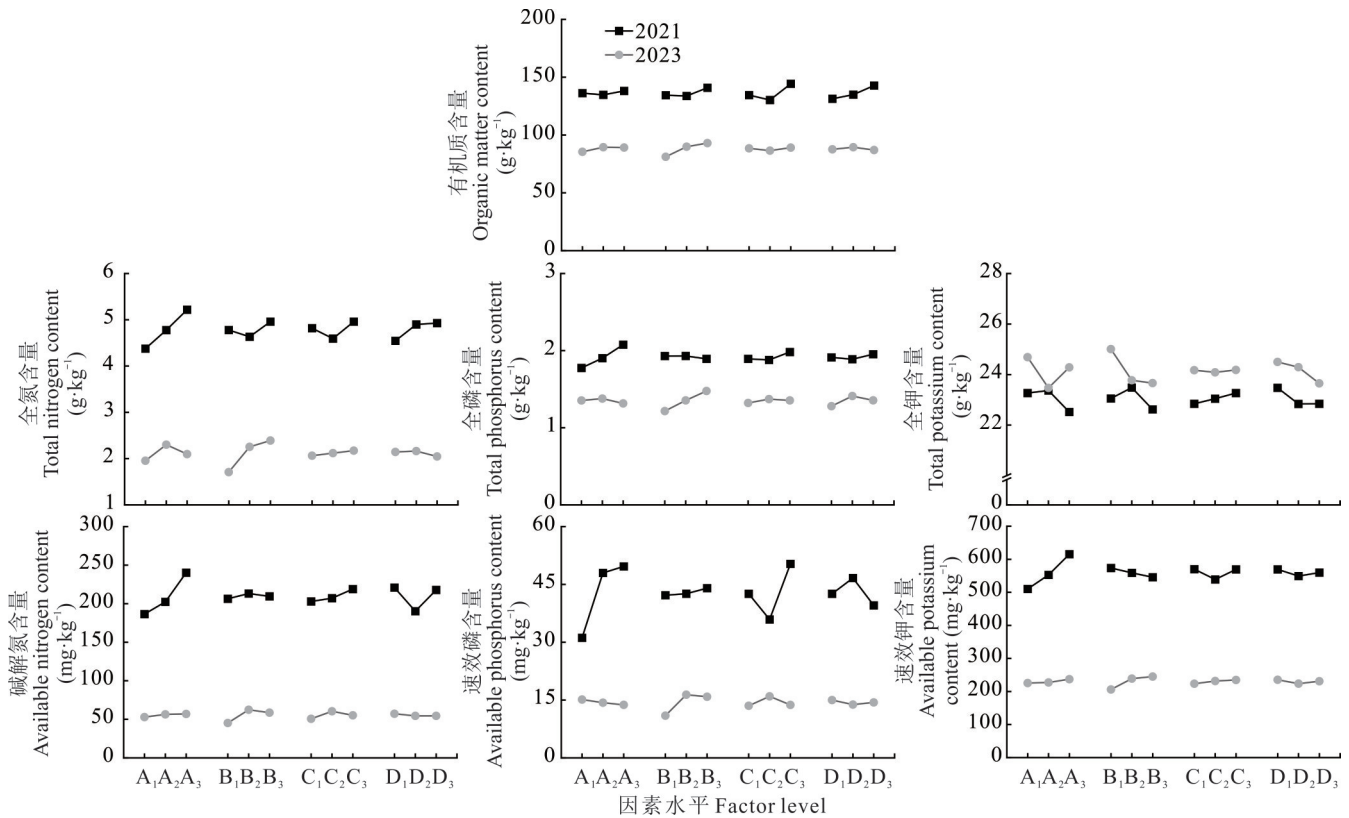


图4 不同因素下土壤养分含量的效应曲线

Fig. 4 Effect curve of soil nutrient content under different factors

表5 不同因素下土壤养分指标的方差分析

Table 5 Variance analysis of different factors on soil nutrient indicators

年份 Year	因素 Factor	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium
2021	<7 mm 粒径占比 Proportion of particle size less than 7 mm (A)	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS
	有机肥施用量 Amount of organic fertilizer applied (B)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	缓释尿素施用量 Amount of slow-release urea applied (C)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	播量 Seeding rate (D)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
2023	<7 mm 粒径占比 Proportion of particle size less than 7 mm (A)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	有机肥施用量 Amount of organic fertilizer applied (B)	*	**	**	NS	*	*	**
	缓释尿素施用量 Amount of slow-release urea applied (C)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
	播量 Seeding rate (D)	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

*: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$.

2.3 煤矸石基质改良模式优选

本研究以试验第3年土壤养分测定结果作为土壤养分综合评价的参评数据,选取土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾7个指标作为土壤养分综合评价的参评因子,采用戒上型隶属度函数计算隶属度值,用主成分分析法计算各指标权重值(表6)后得出土壤肥力质量综合指数(IFI)。结果发现,在T₉处理下IFI最高,为0.8215,其次为T₅处理,而在T₁处理下IFI最低,为0.2411(表7)。这表明经T₉和T₅处理改良后的煤矸石基质肥力状况较优。

表6 土壤养分指标权重值

Table 6 The weight value of soil nutrient index

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	有机质 Organic matter
权重 Weight	0.1798	0.1263	0.1227	0.1458	0.1317	0.1510	0.1527

表7 不同处理组土壤养分综合评价

Table 7 Comprehensive evaluation of soil nutrients in different treatment groups

处理 Treatment	全氮 Total nitrogen	全磷 Total phosphorus	全钾 Total potassium	碱解氮 Available nitrogen	速效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	有机质 Organic matter	土壤肥力综合指数 Integrated fertility index (IFI)
T ₁	1.52	1.12	25.93	39.67	11.40	200.33	78.71	0.2411
T ₂	2.14	1.44	24.40	64.00	18.10	229.67	87.26	0.6989
T ₃	2.21	1.49	23.74	55.00	15.90	246.33	90.48	0.6856
T ₄	1.82	1.27	23.77	50.33	12.40	206.00	80.04	0.3295
T ₅	2.52	1.32	23.48	65.00	16.23	246.33	92.01	0.7388
T ₆	2.56	1.54	23.16	54.00	14.30	229.67	96.32	0.7091
T ₇	1.79	1.25	25.32	45.67	9.07	211.67	84.83	0.3632
T ₈	2.11	1.30	23.44	58.33	14.83	240.67	90.44	0.5953
T ₉	2.40	1.40	24.09	67.00	17.37	259.33	92.20	0.8215

进一步以2023年地上生物量和土壤肥力指数作为TOPSIS综合分析的评价指标分析发现(表8),T₂处理相对接近度最高,为0.8765,其次为T₉处理组,相对接近度为0.6176。这表明在综合考虑土壤肥力状况以及地上植被生长状况时,认为T₂(A₁B₂C₂D₂)处理即<7 mm粒径占比为0,有机肥施用量为羊板粪30 m³·hm⁻²+商品有机肥15 t·hm⁻²,缓释尿素施用量为60 kg·hm⁻²,播量为120 kg·hm⁻²时综合效果最好,该组合在拥有较高土壤肥力的前提下,可以维持植被良好的生长,有利于地上生物量的积累。

3 讨论

煤矸石作为采矿活动产生的固体废弃物,机械组成不良,颗粒级配较差,速效养分元素含量较少,所含养分不能被植物直接有效利用^[27-28]。因此,为了让煤矸石形成满足植物所能生长的立地条件,需进行煤矸石的基质改良工作。通过煤矸石改良措施可提升其中的肥力水平,促进地上植物的生长发育,最终实现生态恢复的目的。已有研究表明在煤矸石基质改良过程中,改变煤矸石粒径、有机肥、化肥用量以及播量均会显著影响矿区复垦中地上植被的生长,尤其是生物量、株高和叶面积等指标^[29-31]。本研究探讨了煤矸石粒径配比、有机肥施用量、缓释尿素施用量以及结合播量对形成的煤矸石基质肥力和地上植被生长的影响,经过3年的微区试验发现,在试验第一年(2021年)各处理地上生物量差异不显著,但随着试验年限的增加,T₂与T₅处理地上生物量在2023年差异显著

($P < 0.05$),且相比于2021年,2023年的地上生物量有所降低。这可能是由于随着试验年限的增加,土壤中的养分含量下降,植被在养分含量有限的情况下,会优先满足地下部分的生长,将更多的物质能量分配给根系,这就导致分配给地上部分的生物量降低^[32-33]。极差分析表明,在2021年4个因素对地上生物量影响由大到小表现为C(缓释尿素施用量) $>$ D(播量) $>$ B(有机肥施用量) $>$ A($<$ 7 mm 粒径占比),在2023年4个因素对地上生物量影响由大到小表现为D(播量) $>$ C(缓释尿素施用量) $>$ A($<$ 7 mm 粒径占比) $>$ B(有机肥施用量),这表明缓释尿素施用量和播量是影响植被生物量的关键因素,正交效应曲线也得出,相对于因素A($<$ 7 mm 粒径占比)和因素B(有机肥施用量),因素C(缓释尿素施用量)和因素D(播量)的效应曲线变化幅度较大,这可能是由于缓释尿素释放养分缓慢,肥效持续时间长,释放养分基本与植物吸收养分同步进行。此外,缓释尿素施入土壤后,可以减少一些生物、化学和物理作用对养分的固定,从而提高肥料利用率,促进地上部分生长^[34-36],而播量是提高种群密度最重要的因素之一,播量的大小直接影响着地上生物量的累积^[37-39]。矿区重构土壤中,煤矸石粒径大小是影响植被生长的重要因素,已有研究表明煤矸石粒径在0~8 mm 范围内越大,地上植被生长就越好^[40],本研究也发现随着小于7 mm 煤矸石粒径占比的增加地上生物量有所下降,2021和2023年地上生物量均在A₁(粒径 $<$ 7 mm 占比0%)水平下最高。

煤矸石改良的最终目的是提高肥力水平,以供植物生长所需。土壤养分可直观体现土壤肥力水平^[41],因此本研究分析了煤矸石改良过程中土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷以及速效钾含量的变化情况,结果表明,在试验第1年(2021年)各处理除速效磷外的土壤养分含量之间并无显著性差异,但与初始值相比,除全钾含量外均有明显提升。随着试验年限的增加,各处理间除全钾含量外的土壤养分在2023年均出现显著性差异($P < 0.05$),这种现象可能是由于2021年试验在基质混匀过程产生的随机误差所导致的。2023年的全氮、全磷、有机质、碱解氮、速效磷以及速效钾含量均极显著低于2021年($P < 0.01$),而全钾含量却显著高于2021年($P < 0.05$),这与张亚鸽^[42]的研究结果一致。引起这种变化的主要原因可能是仅在试验第1年进行施肥,后续不再追施任何肥料,而种植的植被为多年生植物,其后续返青和生长过程中均需要消耗土壤中的养分,因此在本试验中土壤养分总体呈现下降的趋势。进一步对土壤养分进行极差分析发现,在试验第1年(2021年),影响有机质含量最关键的因子是缓释尿素施用量,其中的原因可能是缓释尿素施用后,土壤中微生物数量增加,活性增强,进而通过影响有机质的分解而影响有机质含量^[43]。对碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷含量影响最关键的因子均是 $<$ 7 mm 粒径占比,且土壤碱解氮、速效磷、速效钾、全氮、全磷含量随着 $<$ 7 mm 粒径占比的增加呈现上升的趋势,这与前人研究结果相一致^[44],这主要是因为煤矸石粒径的大小影响着土壤养分的交换和迁移,煤矸石的粒径越小,比表面积越大,从煤矸石中释放进入到土壤中的养分含量也越多^[45]。在试验第3年(2023年),显著影响土壤养分含量的关键因子是有机肥施用量,这可能是由于有机肥在施入土壤后,需要经过微生物分解和转化,完成矿质化过程,才能被植物直接吸收利用。而这个过程可能需要一定时间,如果土壤中的微生物数量不足或活性较低时,分解速度也会变慢。因此,有机肥在施入土壤后可能需要一段较长的时间来完成这一过程。此外,即使施入土壤中的有机肥已分解,但因其肥效发挥作用的时间可能与作物的生长周期不匹配,也会影响有机肥的发挥^[46]。对比不同因素水平下土壤养分含量变化的正交效应曲线发现(图4),相较于2021年,各因素下2023年土壤养分的效应曲线较为平稳。原因在于随着试验年限的增加,植物对土壤养分的需求也逐渐趋于稳定,当土壤养分达到一个相对稳

表8 不同处理TOPSIS综合评价结果

Table 8 Comprehensive evaluation results of TOPSIS for different treatments

处理 Treat- ment	正理想解距离 Distance of posi- tive ideal solution (D_i^+)	负理想解距离 Distance of nega- tive ideal solution (D_i^-)	相对接近度 Relative proximity (C_i)	排序 Rank
T ₁	0.9333	0.0866	0.0849	9
T ₂	0.1303	0.9252	0.8765	1
T ₃	0.6831	0.4873	0.4163	5
T ₄	0.6404	0.4277	0.4004	7
T ₅	0.7918	0.5290	0.4005	6
T ₆	0.5219	0.5702	0.5221	3
T ₇	0.5460	0.5556	0.5044	4
T ₈	0.7799	0.3791	0.3271	8
T ₉	0.4386	0.7084	0.6176	2

定的水平时,其变化幅度也会减小^[47]。

土壤肥力质量综合指数(IFI)可客观表征土壤肥力质量,因此,研究中常用土壤综合肥力指数评价法来量化土壤肥力,该方法可将土壤肥力量化为0~1之间的具体数值,数值越接近于1,表明土壤肥力水平越高,反之肥力水平越低^[48-49]。本研究将不同试验处理的土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量通过土壤综合肥力指数评价法量化后发现, $T_9(A_3B_3C_2D_1)$ 处理的IFI最高,为0.8215,而 T_1 处理IFI最低,为0.2411。这表明经 T_9 处理即<7 mm粒径占比为50%,有机肥施用量为羊板粪 $45\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +商品有机肥 $22.5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,缓释尿素施用量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 改良后的煤矸石基质肥力状况较优。进一步综合地上生物量和土壤肥力质量综合指数,经TOPSIS分析后,推荐最佳组合为 $T_2(A_1B_2C_2D_2)$ 处理,即<7 mm粒径占比为0,有机肥施用量为羊板粪 $30\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +商品有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,缓释尿素施用量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。该处理能够同时兼顾植被生长和土壤肥力维持。

4 结论

本研究探讨了不同粒径配比、有机肥施用量、缓释尿素施用量以及播种量耦合处理下煤矸石基质地上生物量和土壤养分含量变化状况,并通过TOPSIS综合评价分析筛选出最佳配比。得出以下结论:

不同处理的地上生物量和土壤养分随着试验年限的增加而减少,尤其是土壤有机质、全氮、全磷、碱解氮、速效磷以及速效钾含量极显著减少,而全钾含量则显著增加。极差分析结果显示缓释尿素施用量和播量是影响地上生物量的关键因素,<7 mm粒径占比和缓释尿素施用量是影响2021年土壤养分含量的关键因素,而有机肥施用量是影响2023年土壤养分含量的关键因素。土壤综合肥力指数(IFI)得出, $T_9(A_3B_3C_2D_1)$ 处理的IFI最高,为0.8215。结合地上生物量和土壤肥力指标进行TOPSIS综合分析得出 $T_2(A_1B_2C_2D_2)$ 处理即<7 mm粒径占比为0,有机肥施用量为羊板粪 $30\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ +商品有机肥 $15\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,缓释尿素施用量为 $60\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,播量为 $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时综合效果最好。该组合在拥有较高土壤肥力的前提下,可以维持植被良好的生长。

参考文献 References:

- [1] Fan L Y. Effect and assessment of vegetation restoration on soil quality in abandoned wasteland. *Shanxi Forestry Science and Technology*, 2014, 43(1): 25-27, 30.
樊兰英. 煤矿废弃地植被恢复对土壤质量的影响及评价. *山西林业科技*, 2014, 43(1): 25-27, 30.
- [2] Yan S. Study on the artificial re-vegetation techniques in coal gangue. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2015.
闫帅. 煤矸石山人工植被恢复技术研究. 北京: 中国林业科学研究院, 2015.
- [3] Gu D M. Research of coal gangue storage impact on surface and shallow groundwater environment—A case of Panji mining area in Huainan. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2015.
谷得明. 煤矸石堆存对地表与浅层地下水环境的影响研究——以淮南潘集矿区为例. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- [4] Wang T, Zhang M, Xu H, *et al.* Soil fertility and heavy metal risk assessment in Jvhugeng mining area, Muli Coalfield, Qinghai Province. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(4): 113-120.
王佟, 章梅, 徐辉, 等. 青海木里煤田聚乎更矿区土壤肥力及重金属风险评价. *煤田地质与勘探*, 2022, 50(4): 113-120.
- [5] Zhao Y C, Zhang J Y, Chou C L, *et al.* Trace element emissions from spontaneous combustion of gob piles in coal mines, Shanxi, China. *International Journal of Coal Geology*, 2008, 73(1): 52-62.
- [6] Wang S B, Luo K, Wang X, *et al.* Estimate of sulfur, arsenic, mercury, fluorine emissions due to spontaneous combustion of coal gangue: An important part of Chinese emission inventories. *Environmental Pollution*, 2016, 209(2): 107-113.
- [7] Li S Q, Liber K. Influence of different re-vegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1314-1323.
- [8] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, *et al.* Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area. *Catena*, 2015, 128: 44-53.
- [9] Sheoran V, Sheoran A S, Poonia P. Soil reclamation of abandoned mine land by revegetation: A review. *International Journal of Soil, Sediment and Water*, 2010, 3(2): 1-20.

- [10] Ni H B, Zhang L P, Wu X Y, *et al.* A research progress on soil reconstruction and property restoration in mine regions. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(2): 399–403.
倪含斌, 张丽萍, 吴希媛, 等. 矿区废弃地土壤重构与性能恢复研究进展. *土壤通报*, 2007, 38(2): 399–403.
- [11] Han X N, Dong Y, Geng Y Q, *et al.* Influence of coal gangue mulching on chemical characteristics of soil in the mining area. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2251–2256.
韩秀娜, 董颖, 耿玉清, 等. 覆盖煤矸石对矿区土壤养分及盐分特征的影响. *生态环境学报*, 2021, 30(11): 2251–2256.
- [12] Niu Y F, Zhou Z C. Progress in the study of site conditions and reclamation technologies of coal gangue dump. *Environmental Protection Science*, 2015, 41(5): 147–152.
牛钰枫, 周正朝. 煤矸石山立地条件及复垦技术研究进展. *环境保护科学*, 2015, 41(5): 147–152.
- [13] Luo K. Study on the soil fertility improvement of mining wasteland by plants under different fertilizations. Yangling: Northwest A & F University, 2016.
罗珂. 不同施肥条件下植物对矿山废弃地土壤肥力改良的研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [14] Yang X G, Li X L, Ma P P, *et al.* Effects of fertilizer application rate on vegetation and soil restoration of coal mine spoils in an alpine mining area. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(8): 98–108.
杨鑫光, 李希来, 马盼盼, 等. 不同施肥水平下高寒矿区煤矸石山植被和土壤恢复效果研究. *草业学报*, 2021, 30(8): 98–108.
- [15] Bai Z K, Zhou W, Wang J M, *et al.* Rethink on ecosystem restoration and rehabilitation of mining areas. *China Land Science*, 2018, 32(11): 1–9.
白中科, 周伟, 王金满, 等. 再论矿区生态系统恢复重建. *中国土地科学*, 2018, 32(11): 1–9.
- [16] Feng G B, Ruan M Y, Li H B, *et al.* Analysis on ecological reconstruction technology and benefit of vegetation in gangue dump of Changcun Coal Mine. *China Coal*, 2021, 47(2): 76–82.
冯国宝, 阮梦颖, 李海波, 等. 浅析常村煤矿矸石山植被生态重建技术及效益. *中国煤炭*, 2021, 47(2): 76–82.
- [17] 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.
- [18] Bao S D. Soil agro-chemical analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [19] Jiang B, Wang S T, Sun Z B, *et al.* Evaluation of cultivated land soil fertility based on membership function and principal component analysis. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2023, 39(2): 22–27.
姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 基于隶属度函数和主成分分析的耕地土壤肥力评价. *中国农学通报*, 2023, 39(2): 22–27.
- [20] Xu Y Z, Hou Y M, Yuan H, *et al.* Soil fertility evaluation of Chinese fir planted forest based on Nemerow method and membership function in Hubei. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021, 41(5): 1–11, 28.
许业洲, 侯义梅, 袁慧, 等. 基于Nemerow法和隶属度函数的湖北杉木人工林土壤肥力评价. *中南林业科技大学学报*, 2021, 41(5): 1–11, 28.
- [21] Luo B S, Zhong J H, Chen J J. Integrated digitization evaluation on soil fertility. *Soils*, 2004, 36(1): 104–106.
骆伯胜, 钟继洪, 陈俊坚. 土壤肥力数值化综合评价研究. *土壤*, 2004, 36(1): 104–106.
- [22] Yang X C, Ye H C, Li D M, *et al.* Assessment of red soil upland fertility in long-term fertilization based on fuzzy mathematics and principal component analysis. *Soils and Fertilizer Sciences in China*, 2018(3): 79–84.
杨旭初, 叶会财, 李大明, 等. 基于模糊数学和主成分分析的长期施肥红壤旱地土壤肥力评价. *中国土壤与肥料*, 2018(3): 79–84.
- [23] Wu Y H, Tian X H, Tong Y A, *et al.* Assessment of integrated soil fertility index based on principal components analysis. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 173–180.
吴玉红, 田霄鸿, 同延安, 等. 基于主成分分析的土壤肥力综合指数评价. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 173–180.
- [24] Wen Y C, Li Y Q, Yuan L, *et al.* Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91–99.
温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91–99.
- [25] Wang H, Chen L, Chen K, *et al.* Multi index comprehensive evaluation method and selection of weight coefficient. *Journal of Guangdong Pharmaceutical University*, 2007, 23(5): 583–589.

- 王晖, 陈丽, 陈昱, 等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择. 广东药学院学报, 2007, 23(5): 583—589.
- [26] Yu X F, Fu D. Review of multi index comprehensive evaluation methods. Statistics and Decision, 2004(11): 119—121.
虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述. 统计与决策, 2004(11): 119—121.
- [27] Zhang R C, Wang D M, Zhang Y, *et al.* Effects of green substrates composed of coal gangue on the growth of *Trifolium repens* L. and its resistance to heavy metal pollution. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2018, 24(4): 908—914.
张汝翀, 王冬梅, 张英, 等. 煤矸石绿化基质对白三叶草生长及其抵御重金属污染的影响. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 908—914.
- [28] Xu L, Zhou X C, Wang D M. Progress on the reclamation of gangue waste area. Science of Soil and Water Conservation, 2005, 3(3): 117—122.
许丽, 周心澄, 王冬梅. 煤矸石废弃地复垦研究进展. 中国水土保持科学, 2005, 3(3): 117—122.
- [29] Xie J Y, Zhang H F, Luo Y Q, *et al.* Driving factors of improving fertility and maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024, 40(1): 150—160.
谢钧宇, 张慧芳, 罗云琪, 等. 连续7年施有机肥和化肥提高复垦土壤上玉米产量的驱动因子. 农业工程学报, 2024, 40(1): 150—160.
- [30] Nan Y C, Yang Y G, Wang Z Q, *et al.* Effects of coal gangue on soil property and plant growth in mining area. Chinese Journal of Applied Ecology, 2023, 34(5): 1253—1262.
南益聪, 杨永刚, 王泽青, 等. 煤矸石对矿区土壤特性与植物生长的影响. 应用生态学报, 2023, 34(5): 1253—1262.
- [31] 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.
- [32] Jiang S X, Zhao P. Morphological structure and biomass allocation of *Agriophyllum squarrosum* in different habitats of east section of Hexi Corridor. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(3): 248—256.
姜生秀, 赵鹏. 河西走廊东段不同生境对沙米形态结构及生物量分配的影响. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 248—256.
- [33] Ma J L, Hao J T, Zhang Y Q, *et al.* Response of *Macleaya cordata* biomass and its distribution characteristics to nitrogen in reclamation area of coal mine. Pratacultural Science, 2024, 41(5): 1039—1047.
马嘉丽, 郝嘉浩, 张永清, 等. 煤矿复垦区博落回生物量及其分配特征对氮的响应. 草业科学, 2024, 41(5): 1039—1047.
- [34] Shaviv A, Mikkelsen R L. Controlled-release fertilizers to increase efficiency of nutrient use and minimize environmental degradation—A review. Fertilizer Research, 1993, 35(1/2): 1—12.
- [35] Wang Y L, Li C H, Wang J, *et al.* Application and prospect of slow/controlled release fertilizers in maize production. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 254—257.
王宜伦, 李潮海, 王瑾, 等. 缓/控释肥在玉米生产中的应用与展望. 中国农学通报, 2009, 25(24): 254—257.
- [36] Zhou L P, Yang L P, Bai Y L, *et al.* Comparison of several slow-released nitrogen fertilizers in ammonia volatilization and nitrogen utilization in summer maize field. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1449—1457.
周丽平, 杨俐苹, 自由路, 等. 不同氮肥缓释化处理对夏玉米田间氨挥发和氮素利用的影响. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1449—1457.
- [37] Liu Z H, Zhang X, Xia Q, *et al.* Effects of phosphate fertilizer application and sowing rate on the dry matter content of multiple-cropping forage rape after wheat and soil fertility. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(10): 1446—1454.
刘振华, 张霞, 夏清, 等. 磷肥与播量对麦后复种饲料油菜干物质质量及土壤肥力的影响. 山西农业科学, 2022, 50(10): 1446—1454.
- [38] Fang X M, Li Y S, Nie J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer and planting density on the leaf photosynthetic characteristics, agronomic traits and grain yield in common buckwheat (*Fagopyrum esculentum* M.). Field Crops Research, 2018, 219: 160—168.
- [39] Yang W Y, Li T F, Dong B, *et al.* Effects of seeding rate on rapeseed biological yield and soil nutrient in wheat stubble multiple cropping rape. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2017, 26(4): 583—587.
杨文元, 李腾飞, 董博, 等. 播量对麦后复种油菜生物产量及耕层土壤养分的影响. 西北农业学报, 2017, 26(4): 583—587.
- [40] Bai D S. Ecological reconstruction model and driving factors of soil hydrological properties optimization in gangue accumulation

- area. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2022.
- 白东升. 煤矸石堆积区生态重构模式与土壤水文性质优化的驱动要素. 绵阳: 西南科技大学, 2022.
- [41] Zhang R C. Effects of the improvement measures of coal gangue matrix on plant growth and heavy metal enrichment. Beijing: Beijing Forestry University, 2018.
- 张汝翀. 煤矸石基质改良措施对植物生长及重金属富集影响研究. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [42] Zhang Y G. Study on fertilization effect of mature *Ziziphus jujuba* 'Junzao' in Aksu. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015.
- 张亚鸽. 阿克苏成龄骏枣施肥效应研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015.
- [43] Ding J N, Li D P, Wu Z J, *et al.* Responses of soil physicochemical properties and biological activity to continuous application of slow/controlled releasing urea. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(7): 1769–1778.
- 丁济娜, 李东坡, 武志杰, 等. 土壤理化性质与生物活性对持续施用缓/控释尿素肥料的响应. *生态学杂志*, 2014, 33(7): 1769–1778.
- [44] Zhang Y H, Song Z L, Kong T, *et al.* Amelioration effect of coal gangue on physical and chemical properties of saline-alkaline soil. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(1): 195–204.
- 张宇航, 宋子岭, 孔涛, 等. 煤矸石对盐碱土壤理化性质的改良效果. *生态环境学报*, 2021, 30(1): 195–204.
- [45] Ke K E, Dong X Y, Zhou J X, *et al.* Evaluation of the formula for coal gangue ecological substrate and its fertility indexes. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2021(4): 308–317.
- 柯凯恩, 董晓芸, 周金星, 等. 煤矸石生态基质的制备配方及其肥力特征研究. *中国土壤与肥料*, 2021(4): 308–317.
- [46] Kong T, Ma Y, Liu M, *et al.* Effect of applying biological organic fertilizer on soil nutrients and soil microbes. *Arid Zone Research*, 2016, 33(4): 884–891.
- 孔涛, 马瑜, 刘民, 等. 生物有机肥对土壤养分和土壤微生物的影响. *干旱区研究*, 2016, 33(4): 884–891.
- [47] Zhang J Z, Wang Q C, Bian M W, *et al.* Effects of different planting years on soil nutrient evolution and variation characteristics of greenhouse vegetables. *Agricultural Engineering Technology*, 2022, 42(1): 77–82.
- 张敬智, 王青川, 边明文, 等. 不同种植年限对设施蔬菜土壤养分演变规律及其变异特征的影响. *农业工程技术*, 2022, 42(1): 77–82.
- [48] Wander M M, Bollero G A. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(4): 961–971.
- [49] Zhang W X, Wang S X, Liu Z B, *et al.* Evaluating soil fertility improvement effects of chemical fertilizer combined with organic fertilizers in a red paddy soil using the soil fertility index. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(5): 777–790.
- 张文学, 王少先, 刘增兵, 等. 基于土壤肥力质量综合指数评价化肥与有机肥配施对红壤稻田肥力的提升作用. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(5): 777–790.