

植被毯覆盖对高寒矿区煤矸石基质热性质的影响

李川, 贺康宁, 马小东, 邹星晨, 王作泉

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 评估高寒地区不同植被毯(普通防冲毯、秸秆植被毯、椰丝植被毯及秸秆椰丝混合毯)对煤矸石基质热特性的影响, 重构矿区冻土隔热保护系统, 为高寒矿区生态修复提供科学依据。[方法] 以天然泥炭层和未覆盖煤矸石为对照, 选取 4 种常见植被毯覆盖于煤矸石基质上方, 通过热特性试验测定不同覆盖材料的热导率、热容及热扩散率, 并结合熵权 TOPSIS 法综合评价其隔热性能。[结果] ① 在含水率 0.1~0.3 范围内, 泥炭层与煤矸石基质的热参数随含水率的增加变化过程不同, 其中热容对水分变化最敏感, 热导率次之, 热扩散率受二者影响波动较大。② 室内土柱试验表明, 泥炭层热导率[0.61 W/(m·K)]、热容[1.60×10^6 J/(m³·K)]、热扩散率(3.90×10^{-7} m²/s)相关热参数均为最优值。相较于未覆盖煤矸石, 植被毯可显著改善热特性, 其中秸秆植被毯表现最佳, 使热导率降至 0.65 W/(m·K), 热容升至 1.16×10^6 J/(m³·K), 热扩散率降至 5.50×10^{-7} m²/s。③ 熵权 TOPSIS 分析显示, 秸秆植被毯相对接近度最高(0.603), 是高寒矿区最优覆盖方案。[结论] 秸秆植被毯能有效模拟泥炭层隔热功能, 显著降低煤矸石基质热导率并提升热容, 可作为高寒矿区重构冻土隔热层最佳材料。

关键词: 煤矸石; 植被毯; 热性质; 土柱试验; 熵权 TOPSIS 法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0076-10

中图分类号: S157

文献参数: 李川, 贺康宁, 马小东, 等. 植被毯覆盖对高寒矿区煤矸石基质热性质的影响[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 76-85. Li Chuan, He Kangning, Ma Xiaodong, et al. Influence of vegetation blanket coverage on thermal properties of coal gangue substrate in alpine mining areas [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 76-85.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.024

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.024

Influence of vegetation blanket coverage on thermal properties of coal gangue substrate in alpine mining areas

Li Chuan, He Kangning, Ma Xiaodong, Zou Xingchen, Wang Zuoxiao

(School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The influence of different vegetation blankets (common anti-erosion blanket, straw vegetation blanket, coconut fiber vegetation blanket, and straw-coconut fiber mixed blanket) on the thermal characteristics of coal gangue substrate in alpine mining areas was evaluated, and the insulation protection system of frozen soil in mining areas was reconstructed, in order to provide a scientific basis for ecological restoration in alpine mining areas. [Methods] Using the natural peat layer and uncovered coal gangue as controls, four common vegetation blankets covering the coal gangue substrate were selected. The thermal conductivity, thermal capacity, and thermal diffusivity of different covering materials were measured through thermal property experiments, and their insulation performance was then comprehensively evaluated by combining the entropy weight TOPSIS method. [Results] ① Within the water content range of 0.1 to 0.3, the thermal parameters of the peat layer and coal gangue matrix exhibited different variations as the water content increased. Among them, thermal capacity was the most sensitive to changes in water content, followed by thermal conductivity, while thermal diffusivity fluctuated greatly under the influence of both factors. ② The laboratory soil column experiment showed that the

收稿日期: 2025-08-05

修回日期: 2025-11-19

采用日期: 2025-11-26

资助项目: “十四五”国家重点研发项目“高寒矿区水源涵养功能恢复新型材料和冻土剖面近自然重构技术研发与试验示范”(2022YFF1302604)

第一作者: 李川(2000—), 男(汉族), 甘肃省酒泉市人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持。Email: Lichuan2025@bjfu.edu.cn。

通信作者: 贺康宁(1962—), 男(汉族), 陕西省蓝田县, 博士, 教授, 主要从事水土保持及林业生态工程等方面的研究。Email: hkn@bjfu.edu.cn。

thermal conductivity [$0.61 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$], thermal capacity [$1.60 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$], and thermal diffusivity ($3.90 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$) of the peat layer were all at their optimal values. Compared with uncovered coal gangue, vegetation blankets significantly improved the thermal properties, among which the straw vegetation blanket performed the best, reducing the thermal conductivity to $0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, increasing the thermal capacity to $1.16 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, and reducing the thermal diffusivity to $5.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. ③ The entropy weight TOPSIS analysis showed that the straw vegetation blanket had the highest relative proximity (0.603) and was the optimal coverage solution for alpine mining areas. [Conclusion] The straw vegetation blanket can effectively simulate the heat insulation function of the peat layer, significantly reduces the thermal conductivity of the coal gangue substrate, and increases its thermal capacity. It can be used as the best material for reconstructing the insulation layer of frozen soil in alpine mining areas.

Keywords: coal gangue; vegetation blanket; thermal properties; soil column experiment; entropy weight TOPSIS method

青藏高原是世界上平均海拔最高的高原,平均海拔高度大于4 000 m,有地球的“第三极”之称^[1]。在该地区,多年冻土面积约占陆地面积的一半以上^[2],冻土作为浅层地下水含隔水层的实质载体和支撑地表植被、湿地等生态环境的基础,同时兼具多重生态地质功能作用^[3-5],对高寒地区生态系统的稳定起着重要作用。冬季,土壤中的水分冻结储存在土壤孔隙中,当春季气温回升时,冻土开始融化,储存的水分缓慢释放出来,为植物生长提供持续稳定的供水,且冻土融化后的土壤具有较好的保水性能,能够减少水分的蒸发损失,使得土壤能够长时间保持一定的湿度,满足植物生长对水分的需求,尤其在干旱的高寒地区,这部分水分对植物种子的萌发和早期生长至关重要。在冻土层上方的泥炭层为水热综合作用下形成的松软的有机质堆积物,具有良好的隔热能力^[6]。夏季,泥炭层能够阻挡热量向地下传递,减少热量进入冻土,防止冻土过快地融化,维持冻土的稳定性,是冻土良好的隔热层。

位于青藏高原的木里矿区是青海省最大的煤炭矿区,其煤矿生产过程中产生的工业废渣煤矸石约占原煤产量的15%~20%^[7],煤矸石的堆放不仅占用大量土地,对泥炭层进行了破坏与掩埋,且煤矸石中含有的硫化铁经氧化后产生大量热量,当热量积累至残煤的燃点时便会发生自燃现象并产生有害气体,对水体、土壤和大气造成严重污染^[8]。此外,煤矸石呈黑灰色,其表面反照率低于天然地表,增加了对太阳辐射的吸收,导致地表温度升高,加速下层冻土的热量输入,导致冻土层逐渐融化,在降水稀少季节不能给植物生长提供足够的水分,使得植被难以存活^[9-11]。因此,如何减少煤矸石对冻土层的扰动是高寒矿区生态修复的重要任务。

在实际治理中,煤矸石堆形成后其下方与冻土层的接触界面已经固定,如果直接在煤矸石与冻土

层之间开挖隔离增加隔热措施,其操作难度较大,成本较高,不符合实际情况,因此减少其表层的热量向深层传导是高寒矿区现有条件下操作性较高,成本较低的一种方法。用植被毯进行植被恢复时,其上方存在由椰糠、蛭石、珍珠岩、砂子组成的生长基质,因此使用植被毯对煤矸石基质表层进行覆盖,能够改善其隔热性能,具有保蓄水分、降低土壤温度变幅的效果^[12]。植被毯是以秸秆、椰壳、黄麻等天然材料和聚丙烯等废弃物生产加工而成的生态护坡材料^[13],具有很强的抗拉、抗剪性能,目前已广泛应用于公路、水库、河道岸坡及矿山等边坡绿化恢复工程中^[14-16],并显示出良好的治理效果。在北京市平原废弃砂石坑地类造林中应用植被毯和保水剂,田间持水量和涵养水源量显著提高^[17]。潞安集团王庄煤矿采用铺设生态植被毯的方法恢复边坡植被,选择适宜树种进行合理配置,使矸石山边坡的治理初见成效^[18]。目前研究主要集中在植被毯对土壤温湿度、土壤养分、抑制杂草、生态恢复等方面,但将植被毯作为高寒矿区隔热材料的研究少有报道。

本研究以青海省海西州天峻县木里煤矿煤矸石为对象,在煤矸石基质上层铺设4种常见的无种子植被毯,进行隔热层重构,并以泥炭层、无覆盖煤矸石作为对照。通过对泥炭层及不同植被毯覆盖下的煤矸石基质隔热性能进行比较,并使用熵权TOPSIS法筛选隔热效果最接近泥炭层的重构隔热层类型,为高寒矿区生态修复提供理论依据和技术支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

木里矿区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,地处青藏高原北部的祁连山区,东西方向约3.6 km,南北方向约1.3 km,其含煤面积4.08 km²^[19]。该区年降水量477.1 mm,年蒸发

量 1 049.9 mm, 年均气温 $-4.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年极端最低气温 $-35.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 极端最高气温 $19.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 属典型高原大陆性气候。矿区植物主要为禾本科 (Poaceae)、莎草科 (Cyperaceae) 和菊科 (Compositae) 植物等。土壤为高寒草原土壤, 砂砾质和砂壤质为土壤主要质地, 表层为碎石, 草皮层很薄或不存在, 根系繁多, 腐殖质层厚度 $5\sim 10\text{ cm}$ ^[20]。矿区由于露天开采时间过长, 存在水土流失、冻土损毁、植被破坏等生态环境问题。

1.2 试验材料

试验于 2025 年 6—9 月在北京林业大学水土保持学院实验室进行。试验所用泥炭土 (主要由高山草甸土构成) 和煤矸石均取自木里煤矿, 其中泥炭土为天然形成。泥炭土以偏壤为主, 风化煤矸石的粒径分布以中等颗粒 ($2\sim 10\text{ mm}$) 为主 (表 1)。风化煤矸石的物理性质见表 2, 其饱和含水量较高, 容重适中, 毛管孔隙占比较大。

表 1 研究区泥炭土物理性质

Table 1 Physical properties of peat at study area

项目	粒级分布/%						饱和含水量/%	田间持水量/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙/%
	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.1~0.25 mm	<0.25 mm					
数值	12.39±2.13	26.72±3.38	34.37±5.15	18.56±3.26	5.75±1.23	2.21±0.96	35.26±3.13	17.23±2.34	0.83±0.05	39.34±3.26	29.19±3.15

表 2 研究区风化煤矸石物理性质

Table 2 Physical properties of weathered coal gangue at study area

项目	粒级分布/%						饱和含水量/%	田间持水量/%	容重/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/%	毛管孔隙/%
	>10 mm	2~10 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.1~0.5 mm	<0.1 mm					
数值	30.59±3.15	40.58±6.27	4.29±1.32	9.13±2.65	10.26±2.41	5.15±0.87	23.45±2.35	12.04±1.64	1.58±0.04	31.48±2.6	22.38±2.64

试验所用植被毯有 4 种类型 (表 3), 包括普通防冲毯 (FC)、秸秆植被毯 (JG)、椰丝植被毯 (YS) 和秸秆椰丝混合毯 (HH)。

4 种植物毯的规格和抗拉强度一致, 均为 $200\pm$

$50\text{ g}/\text{m}^2$, 横向抗拉强度为 1.5, 纵向抗拉强度为 2。主要区别在于材质构成, 其中普通防冲毯采用土工织物, 其他 3 种植物毯分别由秸秆、椰丝或两者混合制成。

表 3 研究区植被毯指标

Table 3 Vegetation blanket indicators at study area

植被毯种类	材质	规格/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	抗拉强度
普通防冲毯 (FC)	土工织物	200 ± 50	横向 1.5, 纵向 2
秸秆植被毯 (JG)	100% 秸秆	200 ± 50	横向 1.5, 纵向 2
椰丝植被毯 (YS)	100% 椰丝	200 ± 50	横向 1.5, 纵向 2
秸秆椰丝混合毯 (HH)	50% 秸秆, 50% 椰丝	200 ± 50	横向 1.5, 纵向 2

1.3 仪器

采用室内土柱试验测定土壤热参数 (图 1)。试验所用仪器主要为高 30 cm、内径 20 cm 的有机玻璃柱, 275 W 辐射光源; 煤矸石温度测量采用美国 Cambell 公司生产的 SoilVUE10 土壤参数传感器、CR300 数据采集器测定; 热通量测量使用 Hukseflux 公司生产的土壤热通量板。通过测定不同土层的温度、含水量、热通量的数据, 运用差分方程求出热导率、热容和热扩散率。

1.4 方法

1.4.1 测定方法

根据查阅的待测土体所在地的气象资料, 确定

辐射光源的功率为 275 W, 光源距离土柱容器顶端 50 cm, 模拟木里矿区日最大辐射量。称取适量风干煤矸石, 每 2 cm 分层装填, 在每一层填充完成后, 用细毛刷在其表面进行轻微的松动, 以增加土壤颗粒的粗糙度和接触面积, 直至填充至 14 cm, 之后覆盖 2 cm 厚由椰糠、蛭石、珍珠岩、砂子均匀组成的生长基质层; 泥炭层装填方法与此相同, 厚度与煤矸石基质一致。随后裁剪相对应面积的 4 种不同植被毯 (FC, JG, YS, HH) 覆盖固定于煤矸石基质之上, 以泥炭 (CK₁) 以及无覆盖煤矸石 (CK₂) 作为对照, 通过土壤参数传感器孔和热通量传感器孔将对应的土壤参数传感器和热通量板分别布设在土柱容器上方

(高度分别为4, 9, 14 cm), 土壤参数传感器和热通量板的导线分别通过土壤参数传感器孔、热通量传感器孔穿出, 与土柱容器外侧的CR300数据采集器相连接, 每分钟测定1次相关数据。本研究采用的热数据为4~14 cm的平均值。试验设计0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30共5个体积含水率梯度, 各处理测定时间为30 min。

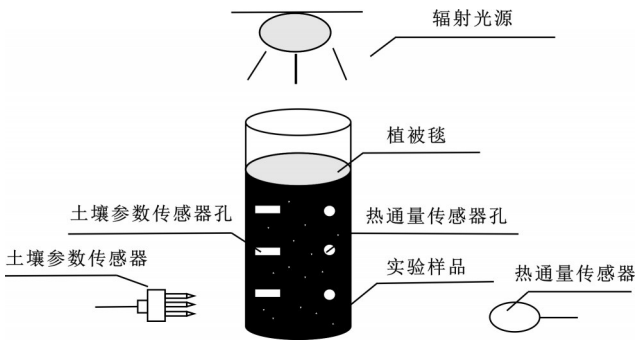


图1 室内土柱试验装置

Fig.1 Laboratory experimental setup of soil column

选择热导率、热容和热扩散率表征材料的热特性, 反应其温度的变化速度、保持和传输热量的能力^[21]。热导率 $[\lambda, \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ 、热容 $[C_s, \text{J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})]$ 以及热扩散率 $[K_s, \text{m}^2/\text{s}]$ 计算公式如下^[22-23]:

$$\lambda_s = -\frac{G_1 + G_2}{\Delta T_s / \Delta Z} \quad (1)$$

$$C_s = \frac{G_1 - G_2}{\Delta Z} \Big/ \frac{\Delta T_s}{\Delta t} \quad (2)$$

$$K_s = \lambda_s / C_s \quad (3)$$

式中: G_1 和 G_2 分别为4 cm和9 cm处煤矸石热通量 (W/m^2) ; Δz 为两层探头之间的煤矸石厚度 (cm) ; $\Delta T_s / \Delta t$ 为6.5 cm处煤矸石温度随时间的变化率 (C/t) ; $\Delta T_s / \Delta Z$ 为4 cm和9 cm之间的煤矸石温度梯度 (C/cm) 。

1.4.2 隔热效果评价

熵权法是利用原始数据的隐含信息, 客观地检验指标的离散程度, 以确定各个指标权重的一种赋权方式。TOPSIS法又称理想解法, 它根据有限个评价对象与理想化目标的接近程度进行排序, 是一种逼近理想解的排序法, 适用于对样本进行相对优劣的评价^[24]。

而熵权TOPSIS法是根据数据的离散程度, 运用熵权法确认每个指标的权重, 然后将权重值融入TOPSIS的分析模型中, 最终通过对最优解和最劣解的计算, 算出正理想解的距离和负理想解的距离, 得到贴近值, 通过对贴近值的比较, 评价研究对象的优

劣。此方法是解决实际工程当中有限方案多目标决策较为有效的方法之一, 具体参考李泽东等^[25]的计算方法。

为消除所选指标量纲不同的影响, 需要对各评价指标进行标准化处理。本研究采用极值法对原始数据进行标准化处理, 正相关和负相关指标的标准化公式如下:

$$S_1 = \frac{(S - S_{\min})}{(S_{\max} - S_{\min})} \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{(S_{\max} - S)}{(S_{\max} - S_{\min})} \quad (5)$$

式中: S_1 为正相关指标标准化值; S_2 为负相关指标标准化值; S 为指标原始数值; S_{\max} 为该指标在所有处理中的最大值; S_{\min} 为该指标在所有处理中的最小值。

本研究选取热导率、热容以及热扩散率3个指标进行隔热效果综合评价。其中, 热导率、热扩散率越大, 隔热性能越差, 热容越大其保持热量的能力越强, 隔热性能越好。因此热导率、热扩散率2个指标为负相关指标, 热容为正相关指标。

1.5 数据处理

使用 Excel 2019 进行数据整理与分析; 运用 Origin 2024 进行绘图; 使用 SPSS 27.0 对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 采用 LSD 法通过多重比较($p < 0.05$)进行差异显著性检验; 利用熵权 Topsis 法对隔热效果进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 热特性变化对含水率的响应

2.1.1 热导率对水分变化的响应

土壤中水热传输通常是同时进行的。由图2可知, 热导率随含水率增加呈幂函数增大趋势。在体积含水率0.1~0.3范围内, 泥炭层热导率变化范围为0.32~0.84 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 无覆盖煤矸石热导率变化范围较大, 为0.42~1.82 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 植被毯覆盖的煤矸石基质热导率变化相对较小, 普通防冲毯热导率变化范围为0.39~1.29 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 秸秆植被毯、椰丝植被毯以及秸秆椰丝混合毯覆盖热导率变化范围分别为0.32~1.00, 0.36~1.28, 0.32~1.19 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

2.1.2 热容对水分变化的响应

图3表明, 热容与含水率呈线性增加关系, 泥炭层热容变化范围较大, 为 $9.40 \times 10^5 \sim 2.30 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$, 无覆盖煤矸石热容变化范围较小, 为 $3.10 \times 10^5 \sim 9.00 \times 10^5 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。在植被毯覆盖的处理中,

秸秆植被毯覆盖热容变化较明显,为 $7.10 \times 10^5 \sim 1.70 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,普通防冲毯覆盖煤矸石基质热容变化范围为 $3.80 \times 10^5 \sim 9.80 \times 10^5 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,椰丝

植被毯以及秸秆椰丝混合毯覆盖热容变化范围分别为 $4.10 \times 10^5 \sim 1.31 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 和 $4.80 \times 10^5 \sim 1.68 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

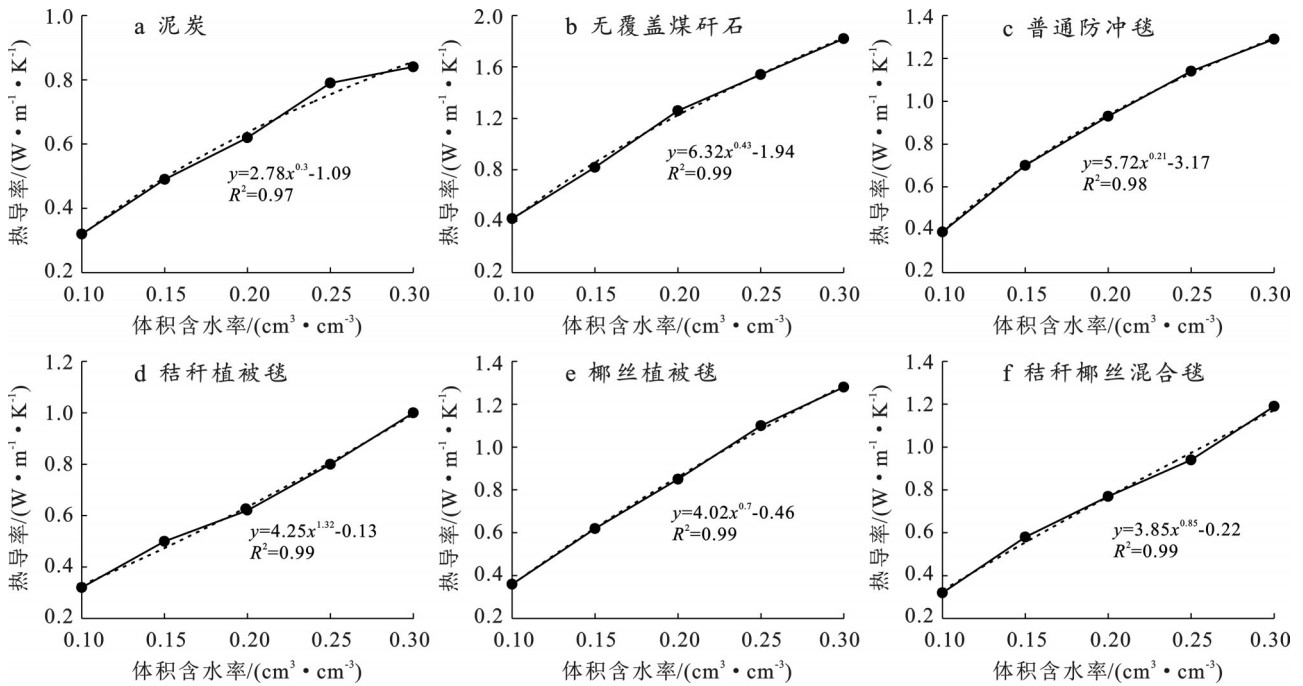


图 2 土壤热导率与水分变化的关系

Fig.2 Relationship between soil thermal conductivity and water content

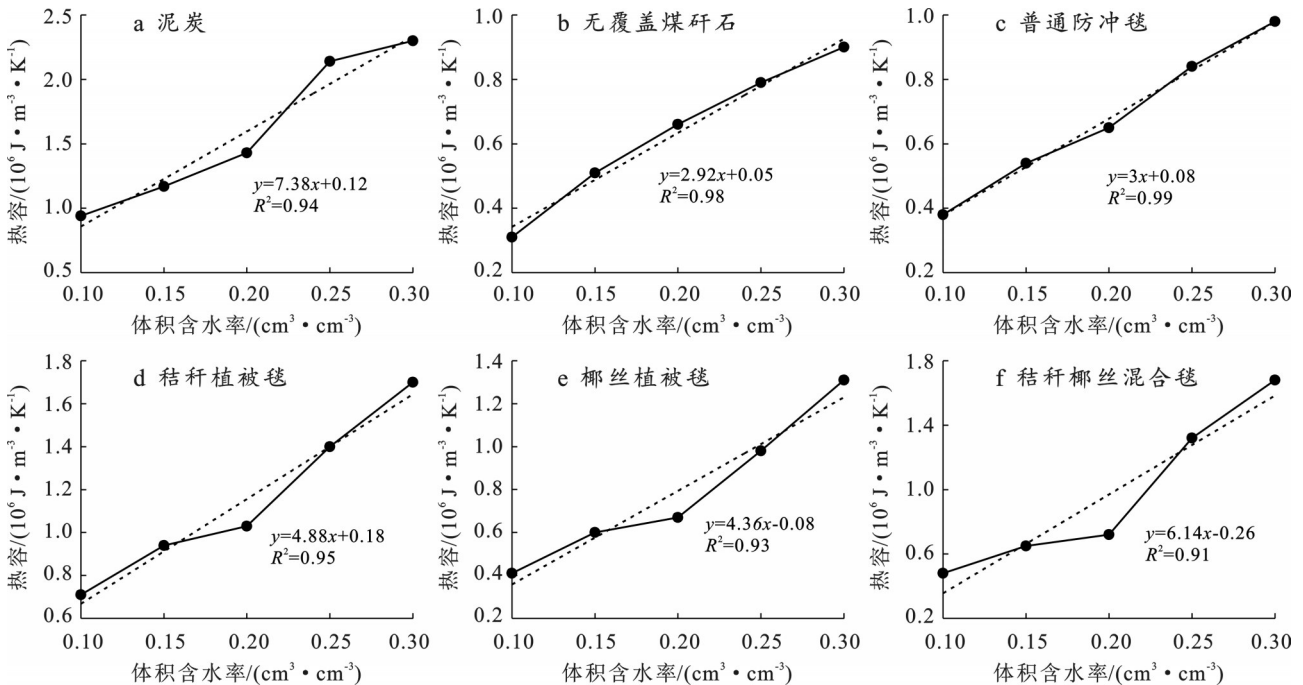


图 3 土壤热容与水分变化的关系

Fig.3 Relationship between soil thermal capacity and water content

2.1.3 隔热层热扩散率对水分变化的响应

由于热导率以及热容的增加幅度不同,热扩散

率与含水率呈二次函数波动关系(图 4)。在体积含水率 $0.10 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 范围内,热导率以及热容随

着含水率的增加变化的幅度不同,所以其热扩散率呈先增加后下降的趋势,且各处理热扩散率在含水率 $0.25\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 左右时开始下降。泥炭层热扩散率变化范围较小,为 $3.40\times 10^{-7}\sim 4.40\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$,无覆盖煤矸石其热扩散率波动范围较大,为 $1.35\times 10^{-6}\sim 2.00\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。在植被毯覆盖处理中,秸秆

植被毯覆盖下热扩散率波动范围较小,为 $4.50\times 10^{-7}\sim 6.00\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$,其次为秸秆椰丝混合毯,热扩散率波动范围为 $6.70\times 10^{-7}\sim 1.07\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。普通防冲毯覆盖下煤矸石基质热扩散率变化范围为 $1.03\times 10^{-6}\sim 1.43\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$,椰丝植被毯覆盖热扩散率变化范围为 $8.80\times 10^{-7}\sim 1.27\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 。

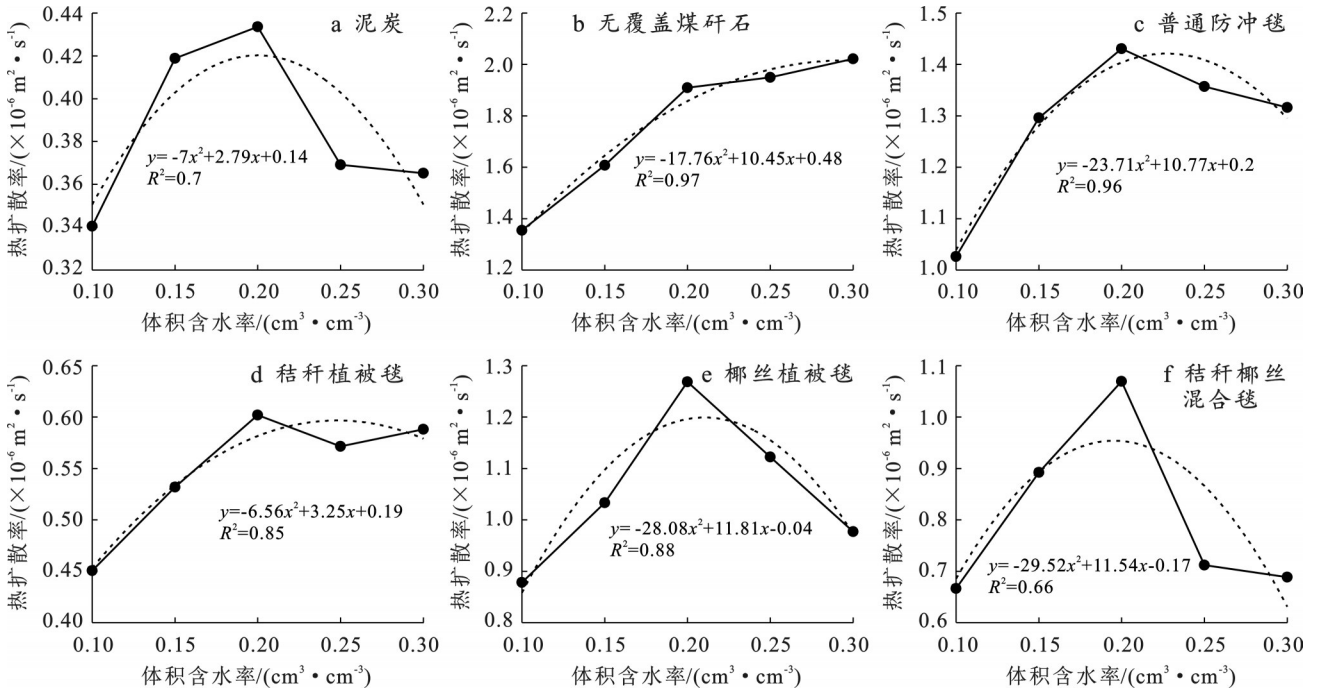


图4 泥炭层热扩散率与水分变化关系

Fig.4 Relationship between thermal diffusivity and water content of peat layer

2.2 植被毯覆盖后煤矸石基质热特征

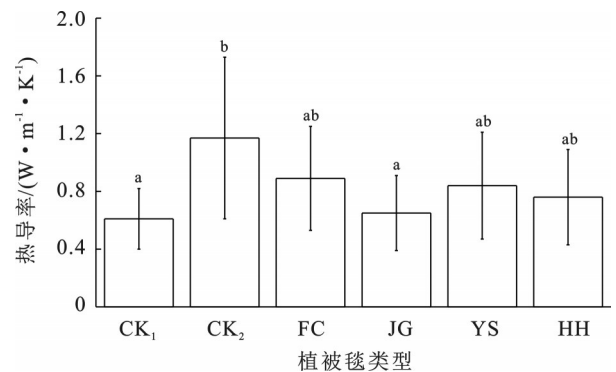
2.2.1 热导率特征

由图5可知,泥炭层以及秸秆植被毯覆盖的煤矸石基质热导率与无覆盖煤矸石差异显著($p < 0.05$)。泥炭层热导率最低,为 $0.61\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,无覆盖煤矸石热导率最高,为 $1.17\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,最大值是最小值的1.92倍。在植被毯覆盖处理中,秸秆植被毯 [$0.65\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 优于秸秆椰丝混合毯 [$0.76\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]、椰丝植被毯 [$0.84\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] 以及普通防冲毯 [$0.89\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$] ,秸秆植被毯覆盖下煤矸石热导率较无覆盖煤矸石降低了44%。

2.2.2 热容特征

研究结果表明,秸秆植被毯覆盖可有效提高基质的热容(图6),除秸秆植被毯以外,泥炭层与各处理间的煤矸石热容差异显著($p < 0.05$)。无覆盖煤矸石热容最小,泥炭层热容最大,最大值是最小值的2.54倍。在植被毯覆盖处理中,秸秆植被毯 [$1.16\times 10^6\text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$] 优于秸秆椰丝混合毯 [$9.70\times$

$10^5\text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]、椰丝植被毯 [$8.00\times 10^5\text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]、普通防冲毯 [$1.29\times 10^6\text{ J}/(\text{m}^3\cdot\text{K})$]。秸秆植被毯覆盖下煤矸石热容较无覆盖煤矸石提高了84%。



注:不同小写字母代表处理间显著差异($p < 0.05$)。各符号所代表的植被毯类型见表3。下同。

图5 不同类型隔热层热导率

Fig.5 Thermal conductivity of different types of insulation layers

2.2.3 不同类型隔热层热扩散率特征

采用植被毯覆盖可有效降低煤矸石基质热扩散

率(图7),且植被毯覆盖与未覆盖煤矸石基质热扩散率差异显著($p < 0.05$)。泥炭层热扩散率最小,为 $3.90 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,无覆盖煤矸石最大,为 $1.77 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$,最大值是最小值的 4.54 倍。在植被毯覆盖处理中,秸秆植被毯($5.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)优于秸秆椰丝混合毯($8.10 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$)、椰丝植被毯($1.06 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)、普通防冲毯($1.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)。秸秆植被毯覆盖下煤矸石热扩散率较无覆盖煤矸石降低了 69%。

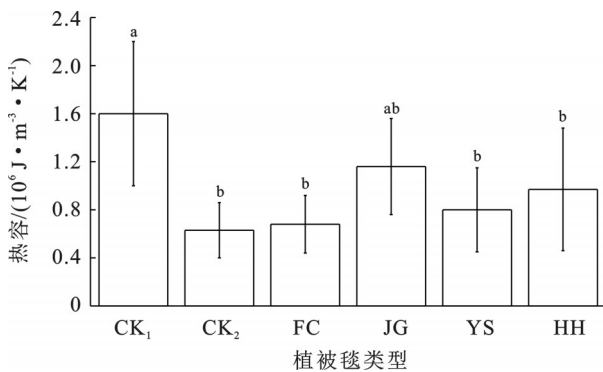


图 6 不同类型隔热层热容

Fig.6 Thermal capacity of different types of insulation layers

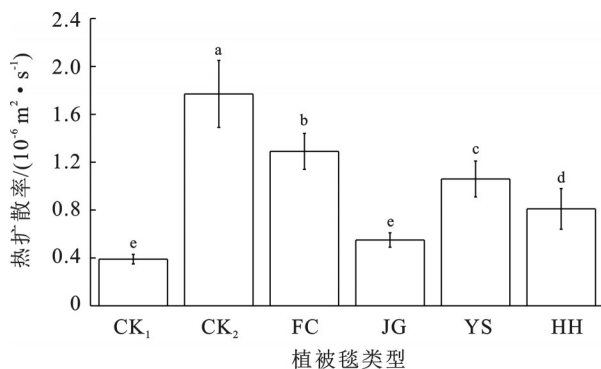


图 7 不同类型隔热层热扩散率

Fig.7 Thermal diffusivity of different types of insulation layers

2.3 不同类型隔热层隔热性能综合评价

通过熵权 TOPSIS 法对不同类型隔热层的热导率、热容、热扩散率进行综合评价,从而选出隔热性能最接近于泥炭层的隔热层类型。由表 4 可知,热容所占权重最大,为 0.496,其次是热导率,为 0.261,热扩散率所占权重最小,为 0.243。不同隔热层下的综合分析及排序结果(表 5)表明,泥炭层隔热效果最好,植被毯覆盖处理的相对接近度在 0.155~0.603 之间,其中,秸秆植被毯效果较好,相对接近度为 0.603,其次为秸秆椰丝混合毯(0.428)、椰丝植被毯(0.263)、普通防冲毯(0.155)。

表 4 各评价指标熵值及熵权

Table 4 Entropy value and entropy weight of each evaluation indicator

项目	热导率	热容	热扩散率
熵值	0.868 4	0.749 9	0.877 5
熵权	0.261 0	0.496 0	0.243 0

表 5 不同类型隔热层隔热效果排序结果

Table 5 Ranking results of thermal insulation performance of different types of insulation layers

类型	正理想解距离	负理想解距离	相对接近度	排序结果
CK ₁	0.000	0.471	1.000	1
CK ₂	0.471	0	0	6
FC	0.420	0.077	0.155	5
JG	0.192	0.292	0.603	2
YS	0.361	0.129	0.263	4
HH	0.279	0.209	0.428	3

3 讨论

3.1 水分对隔热层热参数的影响

本研究通过分析泥炭含水率与其热参数之间的关系,发现随着水分的增加,其热导率增加趋势较为明显,这与 Wang Kaicun 等^[22]的研究结果一致。土壤水分含量对土壤的热传递方式有显著影响,热导率随土壤水分的变化有 3 个阶段^[26],第一阶段土壤含水量高,土壤水分在物理上具有连续性,热传递主要路径为固/液、固/固接触传递,一般热导率大小为:固态 > 液态 > 气态,所以土壤热导率较大。热导率变化很小表明在此含水量范围内,土壤接近饱和。第二阶段随土壤含水量下降,空气逐渐进入土壤中,导致土壤水分不连续,热量传递路径从固/液向气/液/固或者气/固转变,热导率减小。第三阶段土壤含水量小于剩余含水量,热导率随含水量下降急剧减小,热量传递的途径只有气/液/固、气/固和固/固,土壤颗粒间热传导路径减少,土壤热导率减小^[12],对于本试验中泥炭层来说,其饱和含水量为 35%,在试验含水率 0.1~0.3 的范围内,尚未饱和,随着含水量的增加,其在土壤中传导主要通过固/液、固/固途径,所以热导率不断增加,当达到饱和状态时,其热导率应该在出现峰值后保持稳定。裸地煤矸石以及植被毯覆盖处理的煤矸石其热导率随含水量的变化过程与其类似,煤矸石中常含有蒙脱石、高岭土等黏土矿物,这些矿物吸水后膨胀,进一步压缩了孔隙空间,增强了颗粒间的接触面积,减少了空气含量,所以其热导率随

含水量的增加而增大。

在本研究中,基质固相组成和容重不变的情况下,含水率是影响其热容的主要因素,与热导率的变化情况类似,随着含水率增加热容增大,这与 Guan Xiaodan 等^[27]的研究结果一致。这可能是因为水的容积热容是空气的 3 000 多倍^[28],其变化呈线性关系,所以热容对水分的响应最为敏感。

热扩散率随含水率的变化与热容和热导率随含水率增加的幅度有关,热容随着含水率的增加而稳定增大,热导率的变化则呈现阶段性,随着含水率的增加,热导率变化不大,所以其热扩散率随着含水率的增加出现峰值后开始下降。

3.2 不同类型隔热层对煤矸石热特性的影响

本研究中,泥炭层具有良好的隔热效果,这可能是因为高寒地区的泥炭层主要是由植物残体在积水、缺氧的环境下经过长时间的堆积和不完全分解形成,其主要成分包括纤维素、半纤维素、木质素以及腐殖质等有机物质,这些有机物质的分子结构复杂,分子链之间相互交织形成相对疏松的网状结构使得泥炭层内部存在大量的微小孔隙,形成了一个微小的隔热单元。

通过在煤矸石基质表层覆盖不同类型植被毯,探究不同类型植被毯对煤矸石热特性的影响。研究表明,对煤矸石进行覆盖后,其温度、热通量等热参数变幅明显降低,这与崔向新等^[29]的研究结果一致。与裸地煤矸石相比,进行植被毯覆盖后煤矸石热导率减小($p < 0.05$),这可能是因为植被毯在煤矸石表面形成了一层物理屏障,减少了辐射对煤矸石的直接照射,有助于降低煤矸石表面的温度,进而减少其向周围环境释放热量的能力^[30]。普通防冲毯由土工织物构成,主要用于防止水土流失和坡面冲刷。其材料成分侧重于抗冲刷能力,缺乏有效的隔热层阻断热量的传递,导致其热导率较高。随着热量快速地在材料内部扩散,其热扩散率也较大。椰丝植被毯由椰丝纤维编织而成,主要成分是纤维素、半纤维素和木质素等。椰丝纤维之间存在许多微小的空气间隙,当热量在椰丝植被毯中传递时必须绕过这些空隙或者通过纤维本身来传导。由于椰丝纤维本身的导热性较差,椰丝植被毯的热导率较小,导致其热扩散率较小。秸秆植被毯内部结构较椰丝疏松,内部含有较多的空气,空气是热的不良导体,当热量通过秸秆植被毯时,热量在空气间隙中传导会受到很大的阻碍,热传导路径变得曲折复杂,所以其热导率以及热扩散率也较低。热容是一个相对

稳定的物理量,反映了物质储存热量的能力,本研究中,在煤矸石表面铺设植被毯后,由于其没有发生明显的物质变化,所以煤矸石的热容变化不显著($p > 0.05$)。

相较于换土、铺设保温板等传统修复技术,植被毯覆盖措施不仅有利于植物生长,且成本较低,每 m^2 1.5元左右,应用效率较高,适合在高寒矿区大规模应用,满足其生态修复的需求。此外,在实际应用中,若煤矸石堆积较厚也可在其表层覆盖薄泥炭碎屑进一步提升隔热效果,灵活度较高。综上所述,本研究筛选出在煤矸石基质上方铺设秸秆植被毯的方案,通过对表层热量阻隔的机制,实现接近于天然泥炭层的隔热效果,既可以解决煤矸石堆积造成的冻土融化问题,又能为植被生长提供一个稳定的环境。该成果可直接应用于高寒矿区的生态修复工程,也为同类地区的冻土保护与植被重建提供参考。

4 结论

(1) 水分条件显著影响煤矸石的热特性。水分对煤矸石热容的影响最为明显,二者呈线性关系;煤矸石热导率随体积含水率的增加呈幂函数关系增加;热扩散率与含水率呈二次函数关系。

(2) 在体积含水率 0.1~0.3 范围内,泥炭层由于热容较高且热导率及热扩散率较低,具有良好的隔热能力。不同类型植被毯覆盖后,可以有效降低煤矸石热导率及热扩散率,其中,秸秆植被毯效果较好,煤矸石热导率降至 $0.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,较未覆盖煤矸石降低 44%;热扩散率降至 $5.50 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$,较未覆盖煤矸石降低 69%;热容提高至 $1.16 \times 10^6 \text{ J}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$,较未覆盖煤矸石提高 84%。煤矸石上覆盖植被毯在一定程度上可以改善其热特性。

(3) 使用秸秆植被毯相对接近度最高,达到 0.603,可作为高寒矿区重构冻土隔热层最佳材料。

参考文献(References)

- [1] 马耀明,胡泽勇,田立德,等.青藏高原气候系统变化及其对东亚区域的影响与机制研究进展[J].地球科学进展,2014,29(2):207-215.
Ma Yaoming, Hu Zeyong, Tian Lide, et al. Study progresses of the Tibet Plateau climate system change and mechanism of its impact on east Asia [J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(2): 207-215.
- [2] 吴青柏,牛富俊.青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J].科学通报,2013,58(2):115-130.
Wu Qingbai, Niu Fujun. Changes of permafrost in Qinghai-Tibet Plateau and engineering stability [J].

- Chinese Science Bulletin, 2013, 58(2):115-130.
- [3] 王欠鑫,曹巍,黄麟. 青藏高原生态系统功能稳定性演化特征及分区[J]. 地理学报, 2023, 78(5):1104-1118.
Wang Qianxin, Cao Wei, Huang Lin. Evolutionary characteristics and zoning of ecosystem functional stability on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2023, 78(5):1104-1118.
- [4] 孙鸿烈,郑度,姚檀栋,等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1):3-12.
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and construction of the national ecological security shelter zone on Tibetan Plateau [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1):3-12.
- [5] 韩道瑞,曹广民,郭小伟,等. 青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力[J]. 生态学报, 2011, 31(24):7408-7417.
Han Daorui, Cao Guangmin, Guo Xiaowei, et al. The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24):7408-7417.
- [6] 孙广友. 试论沼泽与冻土的共生机理:以中国大小兴安岭地区为例[J]. 冰川冻土, 2000, 22(4):309-316.
Sun Guangyou. Discussion on the symbiotic mechanisms of swamp with permafrost: Taking Da-Xiao Hinggan Mountains as examples [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2000, 22(4):309-316.
- [7] Liu Haibin, Liu Zhenling. Recycling utilization patterns of coal mining waste in China [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12):1331-1340.
- [8] 陈敏. 煤矸石充填重构土壤水气热耦合运移试验研究[D]. 安徽淮南:安徽理工大学, 2018.
Chen Min. Coupled water, air and heat transport in reconstruction soil filled with coal gangue [D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [9] 吴钢,魏东,周政达,等. 我国大型煤炭基地建设的生态恢复技术研究综述[J]. 生态学报, 2014, 34(11):2812-2820.
Wu Gang, Wei Dong, Zhou Zhengda, et al. A summary of study on ecological restoration technology of large coal bases construction in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11):2812-2820.
- [10] Bradshaw A. Restoration of mined lands: Using natural processes [J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [11] Kumar V, Chandra A, Usmani Z. Impact of coal mining on soil properties and their efficient eco-restoration [J]. International Journal of Energy Technology and Policy, 2017, 13(1/2):158.
- [12] 米美霞,樊军,邵明安,等. 地表覆盖对土壤热参数变化的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(1):58-66.
Mi Meixia, Fan Jun, Shao Ming'an, et al. Study of effects of the surface mulch on soil thermal properties using heat pulse technology [J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(1):58-66.
- [13] 王子寅,唐万鹏,刘秉儒,等. 植被毯覆盖对旱区露天煤矿土壤生态化学计量及酶活性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15):124-132.
Wang Ziyin, Tang Wanpeng, Liu Bingru, et al. Effects of vegetation blanket cover on the ecological stoichiometry and enzymatic activity of opencast coal mine soils in arid areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15):124-132.
- [14] Liu Hongyuan, Liu Liang, Zhang Keli, et al. Effect of combining biogeotextile and vegetation cover on the protection of steep slope of highway in northern China: A runoff plot experiment [J]. International Journal of Sediment Research, 2023, 38(3):387-395.
- [15] 陈雅雯,蒋小雨,邵钱宇,等. 植物纤维材料在河道护坡工程中应用研究综述[J]. 水利与建筑工程学报, 2023, 21(2):27-35.
Chen Yawen, Jiang Xiaoyu, Shao Qianyu, et al. Review on the application of plant fiber materials in river slope protection engineering [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2023, 21(2): 27-35.
- [16] Nsiah P K, Schaaf W. The potentials of biological geotextiles in erosion and sediment control during gold mine reclamation in Ghana [J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(4):1995-2006.
- [17] 于丹丹,贾黎明,贾忠奎,等. 生态垫及保水剂对废弃砂石坑立地造林的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2015, 39(6):99-104.
Yu Dandan, Jia Liming, Jia Zhongkui, et al. Effects of eco-mat and super absorbent polymers on forest in waste sand and gravel pit sites [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(6):99-104.
- [18] 于桂芬,杨亚平,崔焱森. 潞安集团煤矸石山边坡生态治理工程技术:以王庄煤矿为例[J]. 中国水土保持, 2010(10):66-68.
Yu Guifen, Yang Yaping, Cui Yansen. Ecological control engineering technology of coal gangue hill slope in Lu'an Group: Taking Wangzhuang coal mine as an example [J]. Soil and Water Conservation in China, 2010(10):66-68.
- [19] 曹伟,盛煜,陈继. 青海木里煤田冻土环境评价研究[J]. 冰川冻土, 2008, 30(1):157-164.
Cao Wei, Sheng Yu, Chen Ji. Study of the permafrost

- environmental assessment in Muli coalfield, Qinghai Province [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008,30(1):157-164.
- [20] 段新伟,左伟芹,杨韶昆,等.高寒缺氧矿区草原生态恢复探究:以青海省木里煤田为例[J].*矿业研究与开发*, 2020,40(2):156-160.
- Duan Xinwei, Zuo Weiqin, Yang Shaokun, et al. Study on ecological restoration of grassland in alpine and anoxic mining areas: Taking the Muli Coalfield in Qinghai Province as an example [J]. *Mining Research and Development*, 2020,40(2):156-160.
- [21] 付永威,卢奕丽,任图生.探针有限特性对热脉冲技术测定土壤热特性的影响[J].*农业工程学报*, 2014, 30(19):71-77.
- Fu Yongwei, Lu Yili, Ren Tusheng. Influences of finite probe property on soil thermal property estimated by heat pulse technique [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(19): 71-77.
- [22] Wang Kaicun, Wang Pucui, Liu Jingmiao, et al. Variation of surface albedo and soil thermal parameters with soil moisture content at a semi-desert site on the western Tibetan Plateau [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005,116(1):117-129.
- [23] Li Ren, Zhao Lin, Wu Tonghua, et al. Investigating soil thermodynamic parameters of the active layer on the northern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71(2):709-722.
- [24] 刘爽.基于熵权TOPSIS法的K公司服务质量优化研究[D].北京:中国政法大学,2022:15.
- Liu Shuang. Research on service quality optimization of K company based on entropy weight method and TOPSIS evaluation model [D]. Beijing: China University of Political Science and Law, 2022:15.
- [25] 李泽东,曹振,张如明,等.熵权-TOPSIS法在华北石质山区常用造林树种抗旱性评价中的应用[J].*山东大学学报(理学版)*,2020,55(1):117-126.
- Li Zedong, Cao Zhen, Zhang Ruming, et al. Application of entropy weight-TOPSIS method to drought resistance evaluation of common afforestation tree species in the lithoid hilly area of north China [J]. *Journal of Shandong University (Natural Science)*, 2020, 55(1):117-126.
- [26] Smits K M, Sakaki T, Limsuwat A, et al. Thermal conductivity of sands under varying moisture and porosity in drainage-wetting cycles [J]. *Vadose Zone Journal*, 2010,9(1):172-180.
- [27] Guan Xiaodan, Huang Jianping, Guo Ni, et al. Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2009, 26(4):692-700.
- [28] 王明峰,陈志文,蒋恩臣,等.桉树热解产物热物性参数演变特性研究[J].*农业机械学报*, 2018, 49(3): 317-321.
- Wang Mingfeng, Chen Zhiwen, Jiang Enchen, et al. Thermal parameters properties evolution of eucalyptus pyrolysis bio-char [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018,49(3):317-321.
- [29] 崔向新,蒙仲举,高永,等.不同粒径砾石覆盖对土壤水分蒸发的影响[J].*中国农村水利水电*,2009(3):21-23.
- Cui Xiangxin, Meng Zhongju, Gao Yong, et al. Effect of different grain size gravel covered on soil evaporation [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(3): 21-23.
- [30] 方文松,朱自玺,刘荣花,等.秸秆覆盖农田的小气候特征和增产机理研究[J].*干旱地区农业研究*,2009,27(6):123-128.
- Fang Wensong, Zhu Zixi, Liu Ronghua, et al. Study on microclimate characters and yield-increasing mechanism in straw mulching field [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009,27(6):123-128.