

DOI:10.11686/cyxb2024455

http://cyxb.magtech.com.cn

李婷, 杨鑫光, 段成伟, 等. 不同施肥和混播条件下高寒受损煤矿区人工草地生态系统健康评价研究. 草业学报, 2025, 34(10): 16—29.

LI Ting, YANG Xin-guang, DUAN Cheng-wei, *et al.* An investigation into the health of synthetic grassland ecosystems in high-alpine regions under varied fertilization and mixed planting circumstances recovering from coal mining damage. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(10): 16—29.

不同施肥和混播条件下高寒受损煤矿区 人工草地生态系统健康评价研究

李婷¹, 杨鑫光^{2*}, 段成伟¹, 孙华方¹, 高涛², 陈同德², 杨凯², 杨千慧²

(1. 青海民族大学生态环境与资源学院, 青海省特色经济植物高值化利用重点实验室, 青海 西宁 810007; 2. 青海民族大学政治与公共管理学院, 青海省土地资源勘测与规划重点实验室, 青海 西宁 810007)

摘要:高寒受损煤矿区生态系统恢复是世界性难题之一,通过优选恢复措施开展推广应用,对于保障矿区生态系统稳定具有重要意义。本研究通过设置禾本科(同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、中华羊茅)、豆科(花苜蓿、黄花草木樨、紫花苜蓿)、禾本科+豆科3种播种方式,按照羊板粪和渣土不同比例设置重施肥(1:5)、中施肥(1:8)、轻施肥(1:11)、不施肥4种施肥水平(12种处理),同时选择草地生态系统健康评价模型OCVOR,定量判断不同恢复措施、不同恢复年限下的植被生长、土壤性质变化及生态系统健康状况。结果表明:随着恢复年限的增加,禾本科+豆科草地在重施肥和中施肥水平下(HBF₁、HBF₂)有利于植被盖度和地上生物量稳定;3种播种方式下土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾含量均表现为先上升、后下降趋势;恢复第3年,随着施肥量的增加,土壤有机碳和碱解氮含量逐步增加($P<0.05$),而速效磷和速效钾含量变化规律不明显。随着恢复年限的增加,禾本科草地在重施肥、中施肥、轻施肥下(HF₁、HF₂、HF₃),豆科草地在重施肥下(BF₁)OCVOR指数显著增加($P<0.05$),禾本科+豆科草地在重施肥、中施肥、轻施肥下(HBF₁、HBF₂、HBF₃)OCVOR指数极显著增加($P<0.01$);除BF₁外, HF₁、HF₂、HF₃、HBF₁、HBF₂、HBF₃处理下生态系统健康程度和恢复效果均表现为不健康、一般,与恢复1年相比,恢复3年后6种处理下的OCVOR指数分别增加了28.61%、33.03%、11.46%、38.96%、33.79%、9.83%,其中增幅最大的为HBF₁。综合来看,禾本科+豆科混播在重施肥处理下(HBF₁)更有利于木里矿区生态系统健康稳定。

关键词:高寒矿区;人工草地;生态系统;健康评价

An investigation into the health of synthetic grassland ecosystems in high-alpine regions under varied fertilization and mixed planting circumstances recovering from coal mining damage

LI Ting¹, YANG Xin-guang^{2*}, DUAN Cheng-wei¹, SUN Hua-fang¹, GAO Tao², CHEN Tong-de², YANG Kai², YANG Qian-hui²

1. Qinghai University for Nationalities, College of Ecology, Environment, and Resources, Qinghai Provincial Key Laboratory of High-Value Utilization of Characteristic Economic Plants, Xining 810007, China; 2. Qinghai University for Nationalities, College of Politics and Public Administration, Qinghai Key Laboratory of Land Resources Survey and Planning, Xining 810007, China

Abstract: The restoration of ecosystems in damaged alpine coal mining areas is a global problem. It is important to

收稿日期:2024-11-19;改回日期:2024-12-27

基金项目:青海省科技特派员专项(2025-NK-P02),青海省青海民族大学理工类科学研究项目(2024XJMD07)和全球大气本底与青藏高原大数据应用中心—青海省2024年创新平台建设专项项目(2024-SF-J10)资助。

作者简介:李婷(2000—),女,安徽安庆人,在读硕士。E-mail: lt2317617885@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yangxg618@163.com

ensure the stability of ecosystems in mining areas by optimizing restoration measures. In this study, three sowing methods were implemented, namely: i) revegetation by sowing four gramineous species (*Elymus breviaristatus*, *Poa crymophila*, *Poa pratensis*, *Festuca sinensis*; gramineous grasslands, designated H), ii) sowing three Fabaceae species (*Medicago ruthenica*, *Melilotus officinalis*, *Medicago sativa*; leguminous grassland, designated B), and iii) sowing four Poaceae and three Fabaceae species (gramineous and leguminous grasslands, designated HB). Additionally, utilizing different proportions of sheep manure and slag soil, four fertilization levels were implemented, namely (sheep manure : slag soil) heavy fertilization (1:5, F_1), medium fertilization (1:8, F_2), light fertilization (1:11, F_3), and no fertilization (F_4). Hence, 12 different restoration treatments were generated by factorial combination of these three sowing and four fertilizing methods. The variation in herbage growth and soil properties under the different restoration treatments was evaluated and compared over a number of years. The ecosystem health evaluation was quantitatively judged by using the grassland ecosystem health assessment model OCVOR. The results showed that vegetation cover and aboveground biomass were optimized by the mixed sowing of Poaceae and Fabaceae under the heavy and medium fertilization levels (HBF_1 , HBF_2) and increased with time from establishment. Levels of soil organic carbon, available nitrogen, available phosphorus, and available potassium were all substantially higher on the restoration plots after two years of restoration than after one year, but after three years had declined again to levels similar to those measured after one year. In the third year of restoration, the levels of soil organic carbon and available nitrogen were progressively increased ($P < 0.05$) with increased fertilization level, while the law of changes in available phosphorus and available potassium were not significant. The OCVOR index of gramineous grassland under the heavy, medium, and light fertilization (HF_1 , HF_2 , HF_3), and also of the leguminous grassland under the heavy fertilization (BF_1) increased significantly ($P < 0.05$) with the years of restoration. Additionally, the OCVOR index of gramineous and leguminous grassland increased significantly under the heavy, medium and light fertilization (HBF_1 , HBF_2 , HBF_3) ($P < 0.01$) over time. Except for the treatment BF_1 , the ecosystem health status and recovery under the treatments HF_1 , HF_2 , HF_3 , HBF_1 , HBF_2 and HBF_3 were determined to be unhealthy. Corresponding to these evaluation results, the OCVOR index under the same six treatments increased by 28.61%, 33.03%, 11.46%, 38.96%, 33.79% and 9.83%, respectively, after 3 years of restoration, compared to the first year of restoration. Moreover, the biggest increases were seen under the HBF_1 treatment. Overall, the treatment comprising mixed sowing of Poaceae and Fabaceae under the heavy fertilization level (HBF_1) was found to be most conducive to the health and stability of the ecosystem in the Muli mining area.

Key words: high cold mining areas; artificial grassland; ecosystem; health evaluation

煤炭开采业是国民经济支柱性产业之一,在创造巨大经济价值的同时,不合理的开采特别是露天开采活动会造成表层土壤丧失、植被破坏等一系列生态环境问题^[1-5],恢复土壤和植被成为恢复矿区生态环境的关键手段^[6]。木里煤矿区位于青藏高原祁连山南麓腹地,黄河重要支流大通河源头,生态安全战略地位突出^[7]。近年来,露天开采造成该地区生态环境破坏问题突出^[8-10]。对于木里矿区实施了大面积种草复绿恢复工程,特别是“木里矿区以及祁连山南麓青海片区生态环境综合整治三年行动计划”实施以来^[11],通过无客土渣土改良、羊板粪和有机肥耦合以肥代土、禾本科草种优选组合等生态恢复综合技术应用,生态环境状况得到较大改善^[12],但是不同的恢复措施下植被和土壤恢复效果差异较大^[13],并且恢复年限对于矿区人工群落土壤、植被的演替发展会产生巨大影响^[14-15],从不同恢复措施、不同恢复年限 2 个角度综合开展木里矿区生态系统健康评价和恢复效果研究意义重大。

草地生态系统健康评价方面,基于基况(condition, C)、活力(vigor, V)、组织力(organization, O)、恢复力(resilience, R)提出的 CVOR 综合指数得到了广泛的应用^[16-19],特别在天然草地生态系统健康评价方面,由于土

壤未遭受人为破坏,用土壤有机碳作为土壤基况开展综合评价^[20],一方面能够从土壤和植被两方面整体上反映草地生态系统健康状况^[7],另一方面土壤有机碳在自然条件下变化较小^[7,21],不会因其发生较大改变而影响生态系统健康评估结果。杨鑫光等^[7]在 VOR 和 CVOR 基础上,通过增加土壤氮磷钾速效养分含量因子优化基况形成 OCVOR 指数,在施用不同速效肥、不同覆土厚度措施下的人工草地生态系统健康评价中得到应用,评价结果符合实际。

有研究表明,退化草地恢复过程中相比施用速效肥,施用有机肥更有利于土壤肥力的长效保持^[22-24],同时在禾本科人工草地中,增加豆科牧草能够促进盖度、生物多样性的增加^[25-27]。当前,木里矿区大面积采取施用羊板粪+禾本科牧草混播恢复方式,对该措施下的植被恢复^[28]、植被群落特征^[29]、土壤理化性质^[29-30]、土壤微生物多样性^[30-31]等进行了研究,但是结合植被和土壤整体分析生态系统健康程度、不同恢复年限下的恢复效果方面未有报道,对于豆科牧草在木里高寒矿区生态恢复的贡献方面未有研究。基于此,本研究通过设置禾本科牧草、豆科牧草、禾本科+豆科牧草3种播种方式,重施肥、中施肥、轻施肥、不施肥4种施肥水平(12种处理),开展不同混播牧草、不同羊板粪施用比例双因素区组试验,利用草地生态系统健康评价模型 OCVOR,评价不同生态恢复组合方式的生态系统健康状况及恢复效果,同时评估随着恢复年限的增加人工草地生态系统健康变化状况,找出适宜的牧草混播+土壤改良技术进行示范推广,从而为木里受损煤矿区人工草地生态系统恢复提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

木里矿区位于青藏高原东北部,祁连山东中段大通河谷地的山地多年冻土分布区,区内由江仓、聚乎更、哆嗦贡玛和弧山等矿区组成,木里东西长50 km,南北宽8 km,总面积约400 km²,区域平均海拔4000 m,属于典型的高原大陆性气候,最低气温-34.8℃,最高气温19.8℃,年平均气温-5.3℃,≥0℃积温482.3℃,全年没有绝对无霜期^[30,32]。研究区位于江仓矿区(图1),东经99°27′-99°35′,北纬38°02′-38°03′,海拔高度在3850 m以上,土壤整体呈碱性,土壤类型以高寒草甸土、沼泽草甸土、高山草原土为主,原始群落组成主要为高寒草甸、高寒沼泽类植物,其中最常见的有耐寒多年生丛生禾草、根茎苔草等。经过多年恢复,江仓矿区人工草地植被主要为同德短芒披碱草(*Elymus breviaristatus*)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、青海草地早熟禾(*Poa pratensis*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)等禾本科植物,共伴生甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、细叶亚菊(*Ajania tenuifolia*)等植物。

1.2 试验地设计

2021年6月初,在江仓5号井南渣山山顶,选择平整地块1处作为试验地(东经99°28′,北纬38°02′),试验地长54.5 m,宽26.5 m,总面积1444.25 m²(图2),选择同德短芒披碱草、青海冷地早熟禾、青海草地早熟禾、中华羊茅4种禾本科植物,花苜蓿(*Medicago ruthenica*)、黄花草木樨(*Melilotus officinalis*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)3种豆科植物,共计7种植物作为供试植物。

试验地采用牧草混播+施肥双因素区组试验设计。3种牧草混播方式:1)4种禾本科牧草混播(H);2)3种豆科牧草混播(B);3)4种禾本科牧草+3种豆科牧草混播(HB),不同牧草混播比例相同,播量均为18 g·m⁻²。4种施肥梯度:1)羊板粪2.20 m³·hm⁻²+渣土11.14 m³·hm⁻²(F₁,羊板粪与渣土比例1:5,重施肥);2)羊板粪1.40 m³·hm⁻²+渣土11.14 m³·hm⁻²(F₂,羊板粪与渣土比例1:8,中施肥);3)羊板粪1.00 m³·hm⁻²+渣土11.14 m³·hm⁻²(F₃,羊板粪与渣土比例1:11,轻施肥);4)羊板粪0 m³·hm⁻²+渣土11.14 m³·hm⁻²(F₄,不施羊板粪,不施肥)。共计有HF₁、HF₂、HF₃、HF₄、BF₁、BF₂、BF₃、BF₄、HBF₁、HBF₂、HBF₃、HBF₄12种处理,每个处理6次重复,每个重复(每个样方)面积4 m×4 m,共计72个样方,样方之间用石块隔离。此外,在周边未采取任何人工恢复措施渣山随机选择6个1 m×1 m的样方,作为对照(CK);在试验地附近原始群落随机选择6个1 m×1 m的样方,作为原始群落对照组(undisturbed grassland, UG)。

小区试验设计严格按照预先设定的步骤开展,共计分为6步。1)试验地预处理(包括平整土地、捡走大石块

等);2)施用底肥(生物有机肥,有效活菌数 ≥ 2.0 亿 $\cdot g^{-1}$,有机质 $\geq 40.0\%$, $2.25\text{ kg}\cdot m^{-2}$);3)施用羊板粪;4)铺设渣土并耙平;5)按照设计处理撒播种子,同时施用牧草专用肥($N+P_2O_5+K_2O$ 质量分数 $\geq 35.0\%$, $0.022\text{ kg}\cdot m^{-2}$)并铺设无纺布;6)形成试验地。

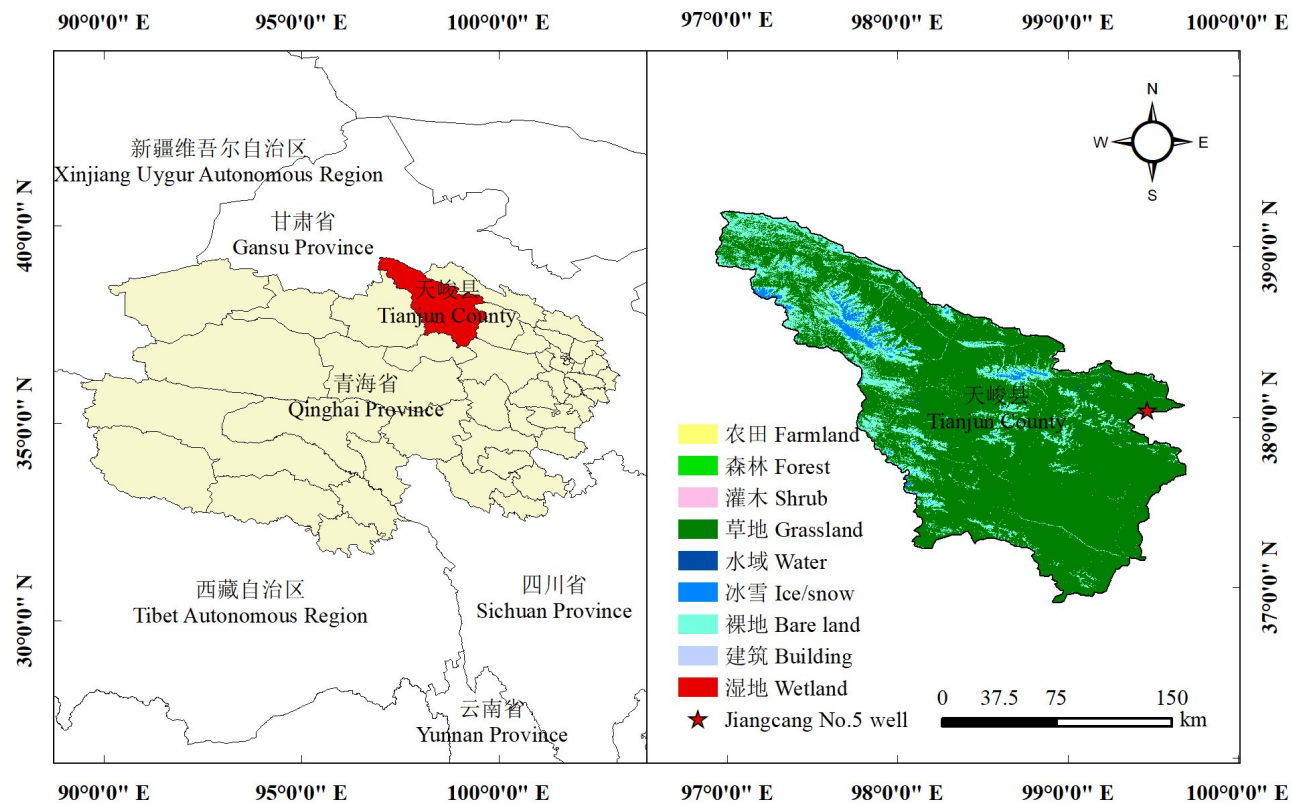


图 1 江仓 5 号井遥感地理位置

Fig. 1 Remote sensing geographic location of Jiangcang No. 5 well

基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2024)0650 号标准地图制作,底图边界无修改。Based on the standard map service website GS(2024)0650 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

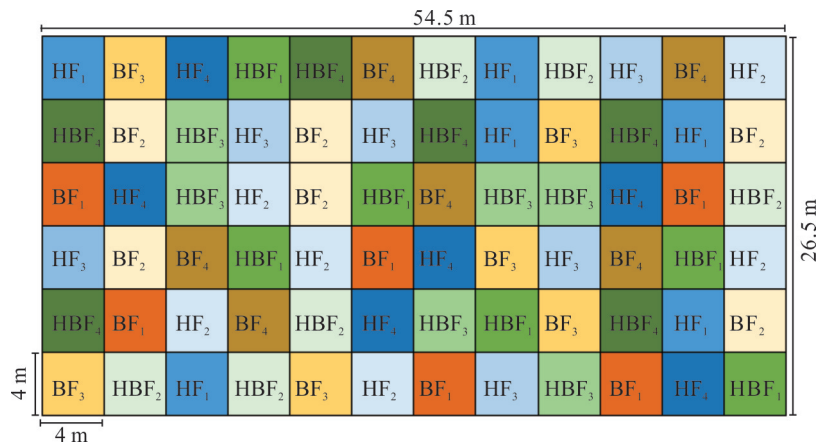


图 2 牧草混播+土壤改良的双因素随机试验小区设计

Fig. 2 Design of a two-factor randomized community experiment based on grass mixing and soil improvement

H 表示禾本科牧草, B 表示豆科牧草, HB 表示禾本科与豆科牧草的混合; F_1 为羊板粪与渣土比例 1:5, F_2 为羊板粪与渣土比例 1:8, F_3 为羊板粪与渣土比例 1:11, F_4 为不施用羊板粪。H represents gramineous grass, B represents leguminous grass, and HB represents the mixture of gramineous grass and leguminous grass. F_1 is 1:5 proportions of sheep manure and slag soil, F_2 is 1:8 proportions of sheep manure and slag soil, F_3 is 1:11 proportions of sheep manure and slag soil, F_4 is not applied sheep manure.

1.3 试验方法

2021年8月、2022年8月、2023年8月,利用1 m×1 m样方对试验地、渣山、原始群落所有设定样方连续3年开展植被生长状况调查,其中植被盖度(vegetation coverage, VC)用样方内垂直投影面积占样方面积的比值测定;地上生物量(above-ground biomass, AGB)用烘干法测定,具体操作步骤参考梁卫卫^[33]的《草地上生物量的简易估测方法研究》。在每个样方调查植被的同时,取0~10 cm的土壤样品混匀,剔除杂质后附上标签装入自封袋,带回实验室进行土壤养分测定,测定方法参考鲍士旦^[34]的《土壤农化分析》,其中土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量用重铬酸钾容量法测定;碱解氮(available nitrogen, AN)含量用碱解扩散法测定;速效磷(available phosphorus, AP)含量用0.5 mol·L⁻¹碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定;速效钾(available potassium, AK)含量用醋酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.4 评价方法

1.4.1 评价模型的建立 以活力、组织力、恢复力为基础的VOR指数在天然草地生态系统健康评价中得到了广泛应用^[35-36]; CVOR指数在VOR指数基础上增加了基况(土壤有机碳)评价指标,能够从土壤和植被两方面整体上反映草地生态系统健康状况^[37-39]。杨鑫光等^[7]在VOR和CVOR指数模型的基础上,充分考虑土壤速效氮、磷、钾在植物生长中发挥的重要作用,加之煤矸石山土壤有机碳含量过低等特点,将CVOR指数中的基况进行优化,增加了土壤速效养分含量因子,建立更加符合高寒矿区人工草地生态系统健康评价特点的OCVOR指数模型。本研究利用OCVOR指数模型,对不同处理、连续恢复3年的人工草地生态系统健康程度和恢复效果进行评价和对比分析。

OCVOR模型涉及指标为土壤有机碳、土壤碱解氮、土壤速效磷、土壤速效钾、地上部分生物量和植被盖度。
$$OCVOR = OC \times VOR = \{W_{SOC} \times (SOC_X / SOC_{UG}) + W_{NPK} \times [W_N \times (N_X / N_{UG}) + W_P \times (P_X / P_{UG}) + W_K \times (K_X / K_{UG})]\} \times (W_V \times V + W_O \times O + W_R \times R)$$
式中: W_{SOC} 、 W_{NPK} 分别为土壤有机碳和土壤速效氮磷钾的权重系数; W_N 、 W_P 、 W_K 分别为土壤碱解氮、速效磷、速效钾的权重系数; SOC_X 为评价对象X的土壤有机碳含量, SOC_{UG} 为参照; N_X 为评价对象X的土壤碱解氮含量, N_{UG} 为参照; P_X 为评价对象X的土壤速效磷含量, P_{UG} 为参照; K_X 为评价对象X的土壤速效钾含量, K_{UG} 为参照。V为活力评价指数, O为组织力评价指数, R为恢复力评价指数, W_V 、 W_O 、 W_R 为活力、组织力、恢复力评价指数的权重系数。

OCVOR∈[0,1]。OCVOR=1表明生态系统最健康,恢复效果最好; OCVOR=0表明生态系统最不健康,恢复效果为0。

1.4.2 生态系统健康等级划分 将人工草地生态系统健康等级及恢复效果划分为5个不同等级,详见表1。

1.5 数据处理

采用Excel 2016进行数据整理,运用SPSS 20.0和Origin 2024进行数据分析和图表绘制。采用双因素分析方法(two-factor analysis)检验各处理间的差异,采用LSD法(least-significant difference, LSD)进行多重比较。计算结果用平均值±标准差(mean±SD)表示。

2 结果与分析

2.1 不同恢复措施不同恢复年限下植被生长变化特征

从图3可以看出,恢复1、2和3年的人工草地中,12种处理下地上生物量和植被盖度均显著高于CK($P < 0.05$),恢复2年后植被盖度均显著低于UG($P < 0.05$)。

不同处理间相比较,恢复1和2年, HBF₃和HF₃处理地上生物量显著高于其他处理($P < 0.05$);恢复3年,除与HBF₁差异不显著外($P > 0.05$), HBF₂处理地上生物量显著高于其他处理($P < 0.05$)。与地上生物量类似,恢

表1 高寒矿区人工草地生态系统健康评价指数及等级

Table 1 Indexes and ranks of artificial grassland health evaluation in alpine mining areas

序号 Number	健康指数 Health index	健康等级 Health rank	恢复效果 Restoration effect
1	$0.80 \leq V \leq 1.00$	健康 Health	很好 Very good
2	$0.60 \leq V < 0.80$	亚健康 Sub-health	好 Good
3	$0.40 \leq V < 0.60$	不健康 Unhealthy	一般 General
4	$0.20 \leq V < 0.40$	警戒 Warning	差 Poor
5	$0.00 \leq V < 0.20$	崩溃 Collapse	很差 Very poor

注: V表示OCVOR指数模型计算结果值。

Note: V represents the calculated value of the OCVOR index model.

复 1、2 年, HBF₃ 和 HF₃ 处理植被盖度表现较好, 其次为 HBF₁、HF₁ 和 HF₂; 恢复 3 年, 除与 HBF₂ 差异不显著外 ($P>0.05$), HBF₁ 处理植被盖度显著高于其他处理 ($P<0.05$)。

与恢复 1 年相比, 恢复 3 年, 除原始群落和 HBF₁、HBF₂ 处理植被盖度和地上生物量表现稳定外 ($P>0.05$), 其他 11 种处理地上生物量和植被盖度均呈现显著下降趋势 ($P<0.05$)。随着恢复年限的增加, 禾本科+豆科混播牧草在重施肥和中施肥水平下 (HBF₁、HBF₂) 有利于植被盖度和地上生物量稳定。

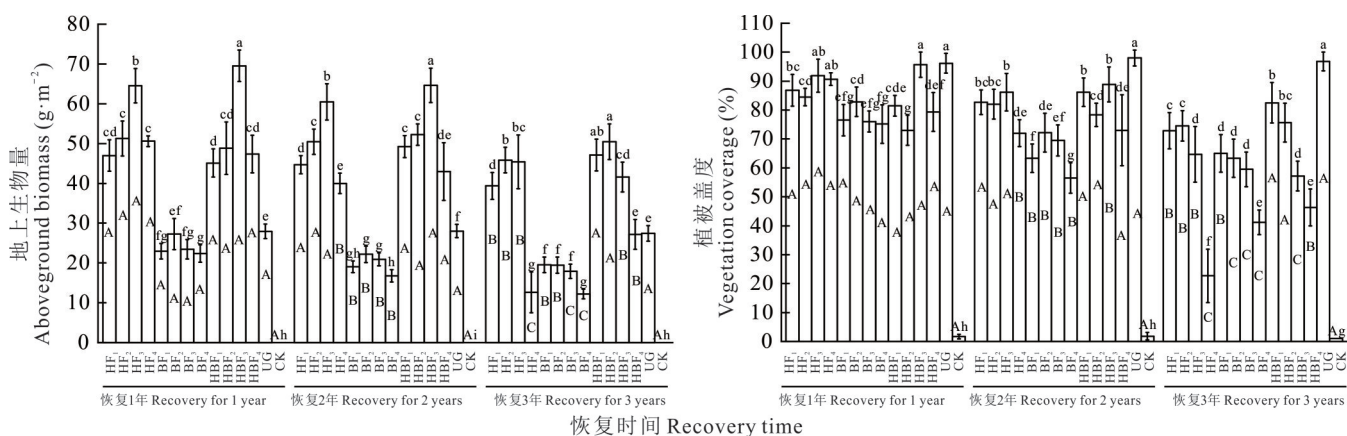


图 3 不同恢复年限不同恢复措施下的植被特征

Fig. 3 Vegetation characteristics under different restoration years and management practices

不同大写字母表示相同处理不同恢复年限之间差异性显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示相同恢复年限不同处理之间差异性显著 ($P<0.05$), 下同。The different uppercase letters represent the significant differences among different recovery years for the same treatment ($P<0.05$), the different lowercase letters represent the significant differences among different treatments within the same recovery year ($P<0.05$). The same below.

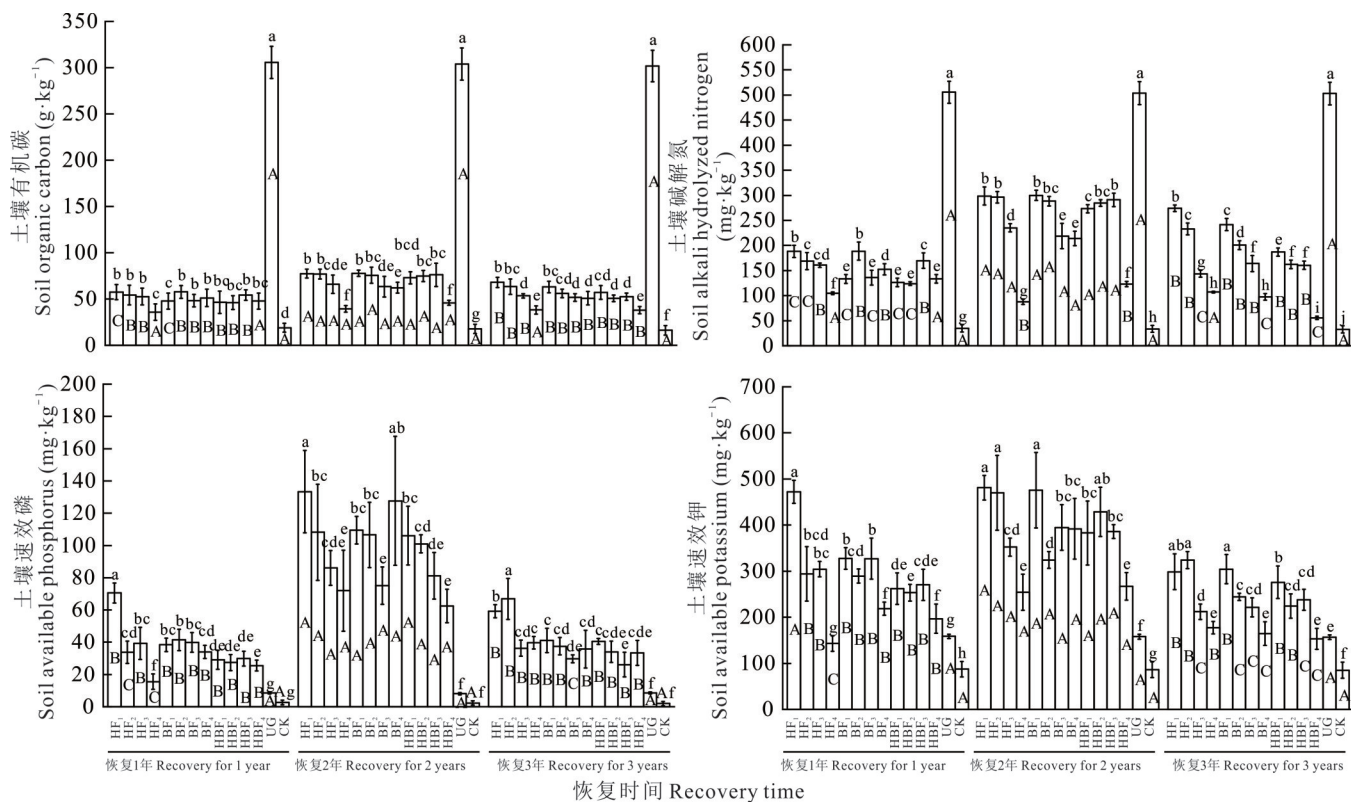


图 4 不同恢复年限不同恢复措施下的土壤性状特征

Fig. 4 Soil characteristics under different restoration years and measures

2.2 不同恢复措施不同恢复年限下土壤性状特征

从图4可以看出,恢复1、2和3年的人工草地中,12种处理下土壤有机碳、碱解氮、速效磷和速效钾含量均显著高于CK($P<0.05$);土壤有机碳和碱解氮含量均显著低于UG($P<0.05$),而土壤速效磷含量显著高于UG($P<0.05$)。恢复3年,除不施肥3种处理外,其他处理土壤速效钾含量显著高于UG($P<0.05$)。

不同处理间相比较,恢复1年,土壤有机碳含量规律不明显,恢复2和3年的人工草地中,HF₄、HBF₄处理土壤有机碳含量显著低于其他处理($P<0.05$);恢复1和2年,各处理间土壤碱解氮和速效钾含量规律不明显,恢复3年,不施肥会引起土壤碱解氮和速效钾含量显著下降($P<0.05$);与土壤碱解氮和速效钾类似,恢复1和2年,各处理间土壤速效磷含量规律不明显,恢复3年,HF₁、HF₂处理土壤速效磷含量显著高于其他处理($P<0.05$)。

随着恢复年限的增加,3种播种方式下土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾均表现为先上升、后下降趋势。与恢复1年相比,恢复3年,3种播种方式在较高施肥水平下(HF₁、HF₂、BF₁、HBF₁、HBF₂)有利于土壤有机碳、土壤碱解氮含量增加;土壤速效磷和速效钾含量变化规律性不明显。

2.3 不同恢复措施不同恢复年限下草地生态系统健康评价

由表2可以看出,恢复1、2、3年,12种处理OCVOR指数评价结果均表现为显著高于CK、显著低于UG($P<0.05$)。

恢复1年,12种处理下的OCVOR指数评价结果为0.31~0.42,其中HBF₃、HF₃和HF₂处理下OCVOR指数

表2 不同恢复年限不同恢复措施下的草地生态系统健康及恢复效果评价

处理 Treatment	恢复1年 Recovery for 1 year				恢复2年 Recovery for 2 years				恢复3年 Recovery for 3 years			
	OCVOR指数 OCVOR index	健康水平 Health level	恢复效果 Restoration effect	OCVOR指数 OCVOR index	健康水平 Health level	恢复效果 Restoration effect	OCVOR指数 OCVOR index	健康水平 Health level	恢复效果 Restoration effect	OCVOR指数 OCVOR index	健康水平 Health level	恢复效果 Restoration effect
HF ₁	0.39±0.07bcd	警戒 Warning	差 Poor	0.41±0.06bcd	不健康 Unhealthy	一般 General	0.50±0.08bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.50±0.08bc	不健康 Unhealthy	一般 General
HF ₂	0.40±0.02bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.40±0.06bcd	不健康 Unhealthy	一般 General	0.54±0.04b	不健康 Unhealthy	一般 General	0.54±0.04b	不健康 Unhealthy	一般 General
HF ₃	0.41±0.02bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.39±0.06bcd	警戒 Warning	差 Poor	0.46±0.04c	不健康 Unhealthy	一般 General	0.46±0.04c	不健康 Unhealthy	一般 General
HF ₄	0.35±0.03def	警戒 Warning	差 Poor	0.36±0.02de	警戒 Warning	差 Poor	0.27±0.04e	警戒 Warning	差 Poor	0.27±0.04e	警戒 Warning	差 Poor
BF ₁	0.34±0.02ef	警戒 Warning	差 Poor	0.31±0.07ef	警戒 Warning	差 Poor	0.39±0.09d	警戒 Warning	差 Poor	0.39±0.09d	警戒 Warning	差 Poor
BF ₂	0.39±0.04bcd	警戒 Warning	差 Poor	0.31±0.07ef	警戒 Warning	差 Poor	0.38±0.08d	警戒 Warning	差 Poor	0.38±0.08d	警戒 Warning	差 Poor
BF ₃	0.36±0.04def	警戒 Warning	差 Poor	0.30±0.06f	警戒 Warning	差 Poor	0.34±0.06d	警戒 Warning	差 Poor	0.34±0.06d	警戒 Warning	差 Poor
BF ₄	0.31±0.07f	警戒 Warning	差 Poor	0.26±0.04f	警戒 Warning	差 Poor	0.19±0.06f	崩溃 Collapse	很差 Very poor	0.19±0.06f	崩溃 Collapse	很差 Very poor
HBF ₁	0.37±0.03cde	警戒 Warning	差 Poor	0.43±0.02b	不健康 Unhealthy	一般 General	0.51±0.03bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.51±0.03bc	不健康 Unhealthy	一般 General
HBF ₂	0.36±0.04def	警戒 Warning	差 Poor	0.42±0.03bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.48±0.03bc	不健康 Unhealthy	一般 General	0.48±0.03bc	不健康 Unhealthy	一般 General
HBF ₃	0.42±0.02b	不健康 Unhealthy	一般 General	0.44±0.02b	不健康 Unhealthy	一般 General	0.46±0.02c	不健康 Unhealthy	一般 General	0.46±0.02c	不健康 Unhealthy	一般 General
HBF ₄	0.38±0.02bcde	警戒 Warning	差 Poor	0.37±0.02cd	警戒 Warning	差 Poor	0.36±0.02d	警戒 Warning	差 Poor	0.36±0.02d	警戒 Warning	差 Poor
UG	1.00±0.00a	健康 Health	很好 Very good	1.00±0.00a	健康 Health	很好 Very good	1.00±0.00a	健康 Health	很好 Very good	1.00±0.00a	健康 Health	很好 Very good
CK	0.00±0.00g	崩溃 Collapse	很差 Very poor	0.00±0.00g	崩溃 Collapse	很差 Very poor	0.00±0.00g	崩溃 Collapse	很差 Very poor	0.00±0.00g	崩溃 Collapse	很差 Very poor

小写字母表示相同恢复年限不同处理之间差异显著($P<0.05$)。OCVOR为草地生态系统健康评价模型,包含了优化基况、活力、组织力和恢复力指数。The lowercase letters represent the significant differences among different treatments within the same recovery year ($P<0.05$). OCVOR is a grassland ecosystem health assessment model, which includes the indices of the optimistic condition, vigor, organization, and resilience for the optimized base condition.

在 0.40 以上水平,生态系统表现为不健康,恢复效果一般;其余处理 OCVOR 指数为 0.31~0.39,生态系统表现为警戒,恢复效果差。

恢复 2 年,12 种处理下的 OCVOR 指数评价结果为 0.26~0.44,其中 HF₁、HF₂、HBF₁、HBF₂、HBF₃ 处理下 OCVOR 指数在 0.40 以上水平,生态系统表现为不健康,恢复效果一般;其余处理 OCVOR 指数为 0.26~0.39,生态系统均表现为警戒,恢复效果差。

恢复 3 年,12 种处理下的 OCVOR 指数评价结果为 0.19~0.54,其中 HF₁、HF₂、HF₃、HBF₁、HBF₂、HBF₃ 处理下 OCVOR 指数在 0.46 以上水平,生态系统表现为不健康,恢复效果一般;HF₄、BF₁、BF₂、BF₃、HBF₄ 处理下 OCVOR 指数为 0.27~0.39,生态系统均表现为警戒,恢复效果差;BF₄ 处理下 OCVOR 指数在 0.20 以下水平,生态系统表现为崩溃,恢复效果很差。

2.4 不同恢复措施下随着恢复年限的增加 OCVOR 指数变化特征

从图 5 可以看出,随着恢复年限的增加,12 种处理 OCVOR 指数变化趋势差异明显。与恢复 1 年相比,恢复 3 年, HF₁、HF₂、HF₃、BF₁、HBF₁、HBF₂、HBF₃ 处理下 OCVOR 指数分别增加了 28.61%、33.03%、11.46%、15.34%、38.96%、33.79%、9.83%,其中 HF₂、HBF₁、HBF₂ 呈极显著增加趋势 ($P < 0.01$),且 HBF₁ 处理下 OCVOR 指数上升幅度最大,其次为 HBF₂; HF₄、BF₄、HBF₄ 处理下 OCVOR 指数分别下降了 21.74%、41.44%、6.19%,其中 HF₄ 和 BF₄ 呈极显著下降趋势 ($P < 0.01$); BF₂、BF₃、HBF₄ 处理下 OCVOR 指数无显著性差异 ($P > 0.05$)。

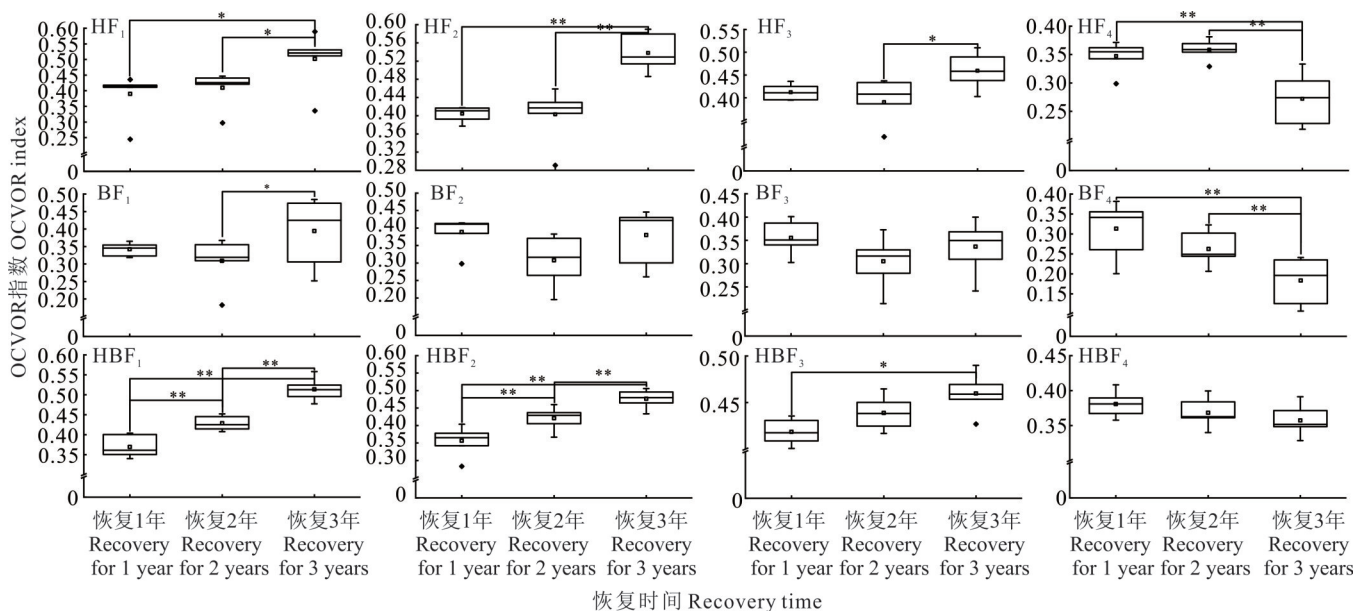


图5 不同恢复年限下的 OCVOR 指数变化特征

Fig. 5 Characteristics of OCVOR index changes under different recovery years

*表示在 0.05 水平上相关性显著。**表示在 0.01 水平上相关性显著。OCVOR: 草地健康评价模型。下同。* indicates that the correlation is significant at the 0.05 level. ** indicates that the correlation is significant at the 0.01 level. OCVOR: Grassland health evaluation model. The same below.

2.5 不同处理下植物生长、土壤性状指标和 OCVOR 指数之间的关系

从图 6 可以看出,除土壤有机碳与地上生物量之间相关性不显著 ($P > 0.05$),所有的植物生长指标(地上生物量、植被盖度)与土壤指标(土壤有机碳、碱解氮、速效磷、速效钾)之间呈显著性正相关 ($P < 0.05$);除土壤速效磷与 OCVOR 指数之间相关性不显著 ($P > 0.05$),所有的植物生长指标、土壤指标与 OCVOR 指数之间呈显著正相关 ($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 植物生长变化

许多研究表明,在矿山生态修复过程中,施用速效肥能有效增加人工草地植被盖度和生物量^[40],但是这种促进作用应将施肥量控制在一定范围之内,施用速效肥量过多会对植物造成伤害,反而不利于植物生长^[41-42];施用有机肥同样能够提高植被盖度和地上生物量^[31,43-44],特别是加入羊板粪能够有效改善高寒矿区植被的生长状况^[45],与施用商品有机肥相比,施用羊板粪更有利于植物生长^[31],但是随着恢复年限的增加,不同羊板粪施用量下高寒矿区植物生长变化规律尚不清楚。本研究在木里矿区通过设置不同羊板粪施用梯度、不同牧草组合方式对比试验,经过3年连续调查发现,恢复1和2年,轻施肥有利于禾本科和禾本科+豆科混播牧草地上生物量和

植被盖度的提高,主要原因可能是在种子萌发期和幼苗生长期适度施用牧草专用速效肥发挥了作用;恢复3年,速效肥的效果逐渐减少,羊板粪肥效逐步释放,加之豆科牧草的固氮作用促进了土壤中氮肥的增加^[27,46],同时,由于豆科和禾本科牧草具有不同的地上地下形态学特征,混播条件下能够充分利用光照、土壤水分、土壤养分资源,提高牧草生长效率^[25-27,47-49],因此重施肥和中施肥处理下禾本科+豆科混播牧草地上生物量和植被盖度显著高于其他处理,并且随着恢复年限的增加保持在较高生长水平,未发生明显退化现象。

3.2 土壤性状特征变化

关于木里矿区不同速效肥施用水平及不同恢复年限下的植被恢复效果研究发现,适度施肥有利于生态系统恢复,但随着恢复年限的增加草地生态系统有退化风险^[50-52];木里矿区施用不同比例有机肥(羊板粪)下的植被恢复和土壤质量的影响研究表明,中高施肥水平能够改善土壤理化性质,降低土壤容重,提高土壤养分含量^[28]。本研究表明,恢复1和2年后,各处理间土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量规律变化不明显,一方面,不同处理下施用底肥和牧草专用速效肥均在同一水平下,未造成土壤速效养分含量发生较大变化;另一方面,羊板粪为缓释肥,在高寒低温条件下分解速率较慢^[31,53],2年短期恢复不同处理间土壤速效养分水平未出现明显差异;与恢复1年相比,恢复3年后,重施肥水平下3种草地类型土壤碱解氮含量均显著增加,表明在重施肥水平下随着羊板粪肥效的释放促进了土壤碱解氮的积累,而土壤速效磷、速效钾由于在羊板粪中的磷和钾含量相对较低^[52],恢复3年后未有明显变化,土壤速效磷和速效钾含量变化需要长期观察。土壤有机碳是土壤肥力增加的一个重要判断依据^[51,54-59],土壤有机碳的积累为受损矿山植被恢复提供了基础保障。本研究结果与刘文谨等^[28]的结果类似,高施肥水平有利于土壤有机碳的积累,是矿山土地复垦进而促进植被恢复的有效方式。恢复3年后重施肥下土壤有机碳显著高于未施肥处理,主要由于羊板粪自身肥力水平差异所致,此外重施肥水平下更有利于植物生长和“枯落物”积累,从而增加了土壤有机碳含量^[51,59]。随着恢复年限的增加,土壤指标均呈先上升后下降趋势,恢复2年上升主要由于底肥和牧草专用肥肥效逐步释放,而恢复3年后下降可能因为夏季降水多、复垦土壤底部均为颗粒状煤矸石,其通透性强,雨水淋溶减少了土壤速效养分及有机碳的积累^[59-60]。

3.3 草地生态系统健康评价

对于同一草地生态系统,采用不同的健康评价模型其评价结果不同^[61-63]。本研究采用OCVOR模型开展草地生态系统健康评价,该模型能够较好地应用于矿山开采等遭受较大破坏草地的恢复重建生态系统^[7]。从各处理间比较来看,随着恢复年限的增加OCVOR模型评价结果由0.31~0.42逐步变化为0.19~0.54,各处理间健康水平差异分化扩大,表现为豆科牧草逐步退化,这与豆科牧草环境适应能力有关。根据现场观察,豆科牧草与

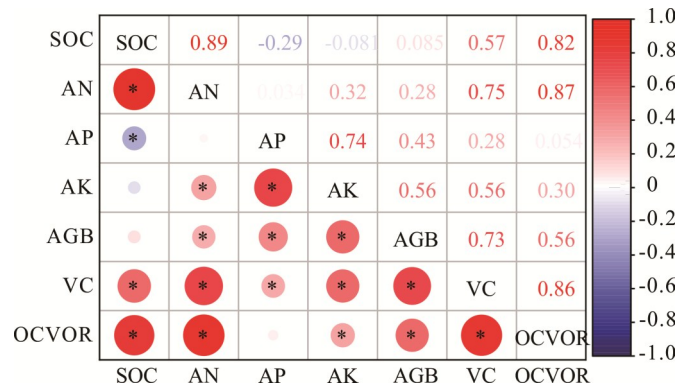


图6 植物生长、土壤指标和OCVOR指数相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of plant growth, soil indicators and OCVOR index

SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; AN: 土壤碱解氮 Soil available nitrogen; AP: 土壤速效磷 Soil available phosphorus; AK: 土壤速效钾 Soil available potassium; AGB: 地上生物量 Above-ground biomass; VC: 植被盖度 Vegetation coverage. *: $P \leq 0.05$.

禾本科牧草相比普遍矮小,木里地区夏季降水量大且集中,豆科牧草一定程度上存在淹浸现象,此外过高的土壤含水量下会使其根系活力降低,影响植株正常生长^[64-65]。而短芒披碱草、冷地早熟禾、草地早熟禾、中华羊茅植株较高,避免了淹浸现象发生,加之对高寒高海拔环境具有较强适应能力^[66-70],禾本科、禾本科+豆科牧草地与豆科牧草地相比表现出较高的生态系统健康程度。随着恢复时间的延长,禾本科和豆科+禾本科牧草在轻施肥以上水平 OCVOR 指数增加,特别是豆科+禾本科牧草在重施肥水平 OCVOR 指数增加趋势显著高于其他处理,可见单独种植豆科牧草不利于木里高寒矿区生态系统的恢复,而豆科和禾本科牧草混播能够形成良好的生态位互补效应^[71-72],从而增加了地上生物量、植被盖度和生物多样性^[25-27],促进草地群落功能提升和土壤理化性质的改善。不施肥会引起3类草地生态系统健康状况大幅下降,也验证了施用羊板粪对木里高寒矿区生态恢复的促进作用。下一步,在类似地区开展退化草地治理时,可以在禾本科草地中补播豆科牧草,通过进一步中试后加大示范推广力度,提升草地生态系统多样性、稳定性、持续性。

3.4 植物生长、土壤指标和 OCVOR 指数之间的相互作用

土壤是植物养分供给的基础,其中含有丰富的矿物质和有机质供植物吸收利用,促进植物生长,植物生长后通过生物量积累和腐化进行反馈,从而增加土壤养分含量^[45],植物和土壤能够相互作用、相互促进^[73-75]。本研究与以上结果类似,绝大多数植物生长指标与土壤指标之间呈显著性正相关,这种土壤-植物的相互促进关系对高寒受损煤矿区人工草地生态系统健康具有重要作用^[13]。由于恢复时间仅3年,草地植被枯落物在土壤中的积累不足,土壤有机碳与地上生物量之间相关性不显著。进一步研究发现,除土壤速效磷与 OCVOR 指数之间相关性不显著外,所有的植物生长指标和土壤指标与 OCVOR 指数存在显著性正相关关系,表现出在目前恢复阶段土壤中的速效磷含量已经满足植物生长的需要,未来在木里矿区补施肥料中可以暂时不再施用磷肥。

4 结论

在木里受损煤矿区草地生态系统恢复中,比较了12种不同的牧草混播+施用羊板粪比例恢复措施下植被生长、土壤性质变化及生态系统健康状况。恢复3年后,禾本科+豆科混播牧草在重施肥(羊板粪与渣土比例1:5)和中施肥(羊板粪与渣土比例1:8)水平下优于其他处理,有利于植被盖度和地上生物量稳定。3种播种方式在较高施肥水平下有利于土壤有机碳、土壤碱解氮含量增加,土壤速效磷和速效钾含量变化规律性不明显。禾本科+豆科混播牧草在重施肥水平下 OCVOR 指数增加幅度显著高于其他处理,有利于木里矿区生态系统恢复。综合来看,禾本科+豆科混播在重施肥处理下(HBF₁)更有利于木里矿区生态系统健康稳定。OCVOR 指数模型的应用拓展了草地生态系统健康评价的方法,在之后的研究中可以在类似地区进一步进行验证。

参考文献 References:

- [1] Yang X G, Li X L, Shi M M, *et al.* The effects of replaced topsoil of different depths on the vegetation and soil properties of reclaimed coal mine spoils in an alpine mining area. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, 2019, 65(3/4): 105.
- [2] Lin L, Wei S, Yan J Z, *et al.* Zoning of ecological restoration in the Qilian Mountain area, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(23): 12417.
- [3] Qian D W, Du Y G, Li Q, *et al.* Alpine grassland management based on ecosystem service relationships on the southern slopes of the Qilian Mountains, China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 288(2): 112447.
- [4] Li X Q, Li Q, Duan Y Z, *et al.* Soil fungal communities varied across aspects of restored grassland in former mining areas of the Qinghai-Tibet Plateau. *PLoS One*, 2024, 19(3): e0295019.
- [5] Yang X G, Li X L, Wang K Z, *et al.* Major paths of ecological restoration of coal mine spoils. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(19): 7740-7751.
杨鑫光, 李希来, 王克宙, 等. 煤矸石山生态恢复的主要路径. *生态学报*, 2022, 42(19): 7740-7751.
- [6] Huang L, Zhang P, Hu Y G, *et al.* Vegetation and soil restoration in refuse dumps from open pit coal mines. *Ecological Engineering*, 2016, 94(1): 638-646.
- [7] Yang X G, Li Z W, Wang K Z, *et al.* Evaluation of artificial restoration effect in alpine damaged coal mining area based on OCVOR optimization model. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(3): 38-46.

- 杨鑫光, 李志炜, 王克宙, 等. 基于OCVOR优化模型的高寒受损煤矿区人工恢复效果评价研究. 中国草地学报, 2024, 46(3): 38—46.
- [8] Hong F Z, He G J, Wang G Z, *et al.* Monitoring of land cover and vegetation changes in Juhugeng coal mining area based on multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 2023, 15(13): 34—39.
- [9] Xiao W, Gou J W, He T T, *et al.* Assessing the ecological impacts of opencast coal mining in Qinghai—Tibet Plateau—a case study in Muli coal field, China. *Ecological Indicators*, 2023, 153(1): 110454.
- [10] Jiang L, Cui T F, Liu H, *et al.* Remote sensing monitoring and analytical evaluation of grasslands in the Muli region of Qinghai, China from 2000 to 2021. *Land*, 2022, 11(10): 1733.
- [11] Li C C, Wang T, Zhao X, *et al.* Application research of slope monitoring and treatment technology in ecological restoration of open-pit coal mines in alpine mining areas. *China Mining Magazine*, 2024, 33(4): 122—131.
- 李聪聪, 王佟, 赵欣, 等. 边坡监测与治理技术在高寒矿区露天煤矿生态修复中的应用研究. 中国矿业, 2024, 33(4): 122—131.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Yuan Y, Zhao Z Q, Niu S Y, *et al.* Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: A case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China. *Catena*, 2018, 165(1): 72—79.
- [15] Yang X G. Study on vegetation recovery potential of coal mine spoils in an alpine coal mining area. Xining: Qinghai University, 2019.
- 杨鑫光. 高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究. 西宁: 青海大学, 2019.
- [16] Shan G L, Chen G, Liu Z L, *et al.* VOR and CVOR index for health evaluation of typical steppe in Inner Mongolia. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(3): 401—406.
- 单贵莲, 陈功, 刘钟龄, 等. 典型草原健康评价的VOR和CVOR指数. 草地学报, 2012, 20(3): 401—406.
- [17] Shi G F, Zhang J N, Yao L J, *et al.* Construction of grassland ecosystem health evaluation system in Inner Mongolia: Based on the formation, vegetation subtype and vegetation type. *Journal of Inner Mongolia University (Natural Science Edition)*, 2022, 53(1): 55—65.
- 史国锋, 张佳宁, 姚林杰, 等. 内蒙古草原生态系统健康评价体系构建—基于植被型、植被亚型、群系三个等级. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 55—65.
- [18] Lu J, Hu Y K, Yue P, *et al.* Assessment on the health of alpine steppe in Bayinbuluk based on CVOR index. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 862—869.
- 陆均, 胡玉昆, 岳平, 等. 基于CVOR指数的巴音布鲁克高寒草原健康评价. 干旱区研究, 2017, 34(4): 862—869.
- [19] Su Y. Grassland health assessment based on RBF neural network and CVOR comprehensive index. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2022.
- 苏玥. 基于RBF神经网络和CVOR综合指数的草地健康评价. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2022.
- [20] Pu J Y, Dong L H, Shi W L, *et al.* Soil quality assessment under different land uses in an alpine grassland. *Catena*, 2018, 171(1): 280—287.
- [21] Ma J J, Chen Y P, Mou X M, *et al.* Effects of plant diversity on soil organic carbon in alpine meadow in northeastern Qinghai—Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2025, 44(1): 56—66.
- 马骏杰, 陈银萍, 牟晓明, 等. 植物多样性对青藏高原东北部高寒草甸土壤有机碳的影响. 高原气象, 2025, 44(1): 56—66.
- [22] He F, Tong Z, Wang L, *et al.* Effect of fertilizer additions on plant communities and soil properties in a temperate grassland steppe. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2018, 27(4): 1533—1540.
- [23] Zhang H J, Zheng K F, Gu S S, *et al.* Grass-legume mixture with *Rhizobium* inoculation enhanced the restoration effects of organic fertilizer. *Microorganisms*, 2023, 11(5): 11—14.
- [24] Kou X X, Mou X M, Xu W B, *et al.* Yak and Tibetan sheep dung increase the proportional biomass of grasses and alleviate soil nitrogen limitation in degraded Tibetan alpine grassland. *Catena*, 2024, 240(1): 108007.

- [25] Lüscher A, Barkaoui K, Finn J A, *et al.* Using plant diversity to reduce vulnerability and increase drought resilience of permanent and sown productive grasslands. *Grass and Forage Science*, 2022, 77(4): 235–246.
- [26] Grange G, Finn J A, Brophy C. Plant diversity enhanced yield and mitigated drought impacts in intensively managed grassland communities. *Journal of Applied Ecology*, 2021, 58(1): 1864–1875.
- [27] Šidlauskaitė G, Kadžiulienė Ž. The effect of inorganic nitrogen fertilizers on the quality of forage composed of various species of legumes in the northern part of a temperate climate zone. *Plants*, 2023, 12(21): 3676.
- [28] Liu W J, Jiang F Z, Qi K B, *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.
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.
- [29] Liu Q Q, Lv L Y, He M H, *et al.* Screening of suitable mixed grass species and seeding rates of four native grass seeds in an alpine mining area. *Sustainability*, 2024, 16(21): 9587.
- [30] Hu S B, Li C H, Yu Z Y, *et al.* Effect of sheep plate manure and granular organic fertilizer on soil physicochemical properties and fungal community diversity in alpine mining areas. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2024(4): 9–14, 123.
胡生斌, 李长慧, 于中阳, 等. 羊板粪和颗粒有机肥配施对高寒矿区土壤理化性质及真菌群落多样性的影响. *青海农林科技*, 2024(4): 9–14, 123.
- [31] 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.
- [32] Tu D J, Qi P Y, Fang W, *et al.* Study on the soil physicochemical properties of Zhashan in the Muli mining area. *Qinghai Prataculture*, 2024, 33(3): 2–6, 22.
土旦加, 祁培勇, 方伟, 等. 木里矿区渣山土壤理化性质研究. *青海草业*, 2024, 33(3): 2–6, 22.
- [33] Liang W W. The study on simple estimation method of aboveground biomass of grassland. *Yangling: Northwest A&F University*, 2015.
梁卫卫. 草地地上生物量的简易估测方法研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- [34] 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.
- [35] Hu Y, Gou X, Tsunekawa A, *et al.* Assessment of the vegetation sensitivity index in alpine meadows with a high coverage and toxic weed invasion under grazing disturbance. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13(1): 1068941.
- [36] Li Y Y, Dong S K, Wen L, *et al.* Three-dimensional framework of vigor, organization, and resilience (VOR) for assessing rangeland health: A case study from the alpine meadow of the Qinghai–Tibetan plateau, China. *Ecohealth*, 2013, 10(4): 423–433.
- [37] Ma Y N, Wang S X, Zhang Q, *et al.* Aerial seeding promotes the restoration of ecosystem health in Mu Us sandy grasslands in China. *Agriculture*, 2022, 12(8): 1255.
- [38] Ren J Z, Nan Z B, Hao D Y. The three major interfaces within pratacultural system. *Acta Prataculturae Sinica*, 2000, 9(1): 1–8.
任继周, 南志标, 郝敦元. 草业系统中的界面论. *草业学报*, 2000, 9(1): 1–8.
- [39] Jiang J C, Sun B, Pan D R, *et al.* VOR index based health assessment of grassland ecosystem in Sunan county. *China Herbivore Science*, 2020, 40(4): 39–43.
姜佳昌, 孙斌, 潘冬荣, 等. 基于VOR指数的肃南县草地生态系统健康评价. *中国草食动物科学*, 2020, 40(4): 39–43.
- [40] Holmes P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: Effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition. *Restoration Ecology*, 2001, 9(1): 71–84.
- [41] Hou X Y, Liu S L, Zhao S, *et al.* Interaction mechanism between floristic quality and environmental factors during ecological restoration in a mine area based on structural equation modeling. *Ecological Engineering*, 2018, 124(1): 23–30.
- [42] 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.

- [43] Zhang Y F, Li X L, Gao Z X, *et al.* Effects of different fertilization treatments on artificial vegetation and soil microbial characteristics in Muli mining area of Qinghai Province. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2022, 31(6): 741—754.
张玉芳, 李希来, 高志香, 等. 不同施肥组合对木里矿区人工植被和土壤微生物特征的影响. *西北农业学报*, 2022, 31(6): 741—754.
- [44] Wang Y, Wang Z C, Kang Y K, *et al.* Assessing the win-win situation of forage production and soil organic carbon through a short-term active restoration strategy in alpine grasslands. *Frontiers in Plant Science*, 2024, 14(1): 1290808.
- [45] Wang T, Du B, Li C C, *et al.* Ecological environment rehabilitation management model and key technologies in plateau alpine coal mine. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 230—244.
王佟, 杜斌, 李聪聪, 等. 高原高寒煤矿区生态环境修复治理模式与关键技术. *煤炭学报*, 2021, 46(1): 230—244.
- [46] Pikula D, Rutkowska A. Effect of leguminous crop and fertilization on soil organic carbon in 30-years field experiment. *Plant, Soil and Environment*, 2014, 60(11): 507—511.
- [47] Du S S, Qi J, Li X, *et al.* Effect of alfalfa and *Elymus sibiricus* mixture on forage yield and soil nutrients. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(2): 74—82.
独双双, 祁娟, 李霞, 等. 苜蓿与老芒麦混播对牧草产量及土壤养分的影响. *中国草地学报*, 2024, 46(2): 74—82.
- [48] Zheng W, Ganar G L, Tang G R, *et al.* Effects of mixed species, mixed ratios of legume to grass on soil nutrients in surface soils of legume-grass mixture pasture. *Pratacultural Science*, 2015, 32(3): 329—339.
郑伟, 加娜尔古丽, 唐高溶, 等. 混播种类与混播比例对豆禾混播草地浅层土壤养分的影响. *草业科学*, 2015, 32(3): 329—339.
- [49] Hurisso T T, Norton J B, Norton U. Soil profile carbon and nitrogen in prairie, perennial grass-legume mixture and wheat-fallow production in the central High Plains, USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 181(1): 179—187.
- [50] Liu J T, Zhou L, Wang D N, *et al.* The effect of balanced N, P and K fertilization on fine root traits and soil properties in *Sapindus muk orossi*. *Forests*, 2024, 15(1): 94.
- [51] 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 Prataculturæ 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.
- [52] Zhao J, Zeng Z X, He X Y, *et al.* Effects of monoculture and mixed culture of grass and legume forage species on soil microbial community structure under different levels of nitrogen fertilization. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68(1): 61—68.
- [53] Qiao Q L, Yang W Q, Zhao S, *et al.* Effects of grass planting substrate on vegetation restoration in the Muli mining area. *Pratacultural Science*, 2022, 39(9): 1782—1792.
乔千洛, 杨文权, 赵帅, 等. 种草基质对木里矿区植被恢复效果的影响. *草业科学*, 2022, 39(9): 1782—1792.
- [54] Bo H J, Xu M G, Jin D S, *et al.* Responses of maize root morphology and soil available nutrient to fertilizer types in a coal mine reclamation area. *Canadian Journal of Soil Science*, 2022, 102(2): 419—431.
- [55] Li S, Wei W L, Liu S T. Long-term organic amendments combined with nitrogen fertilization regulates soil organic carbon sequestration in calcareous soil. *Agronomy*, 2023, 13(2): 291.
- [56] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304(1): 1623—1627.
- [57] Martín J A R, Álvaro-Fuentes J, Gabriel J L, *et al.* Soil organic carbon stock on the Majorca Island: Temporal change in agricultural soil over the last 10 years. *Catena*, 2019, 181(1): 104087.
- [58] Taktsang B, Weber J, Ernakulum E, *et al.* Assessment of soil health indicators for sustainable production of maize in smallholder farming systems in the highlands of Cameroon. *Geoderma*, 2016, 276(1): 64—73.
- [59] Zhang Y F. Effects of combined application of sheep manure and granular organic fertilizer on the physicochemical properties of reconstructed soil and arbuscular mycorrhizal fungi community structural in Muli mining area. Xining: Qinghai University, 2023.
张玉芳. 羊板粪和颗粒有机肥配施对木里矿区重构土壤理化性质和丛枝菌根真菌群落结构的影响. 西宁: 青海大学, 2023.
- [60] 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.
- [61] Du Z Y, Ji X B, Liu J L, *et al.* Ecological health assessment of Tibetan alpine grasslands in Gannan using remote sensed ecological indicators. *Geo-Spatial Information Science*, 2025, 28(1): 246—264.

- [62] Zou S B, Qian J K, Xu B R, *et al.* Spatiotemporal changes of ecosystem health and their driving mechanisms in alpine regions on the northeastern Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 2022, 143(1): 109396.
- [63] Ye X, Zhou H K, Zhao X Q, *et al.* Review on grassland ecosystem health. *Pratacultural Science*, 2011, 28(4): 549—560.
叶鑫, 周华坤, 赵新全, 等. 草地生态系统健康研究述评. *草业科学*, 2011, 28(4): 549—560.
- [64] Thompson T E, Fick G W. Growth response of alfalfa to duration of soil flooding and to temperature. *Agronomy Journal*, 1981, 73(2): 329—332.
- [65] Barta A L, Sulc R M. Interaction between waterlogging injury and irradiance level in alfalfa. *Crop Science*, 2002, 42(5): 1529—1534.
- [66] Meng X J, Zhao Q, Jin Y D, *et al.* Chilling-responsive mechanisms in halophyte *Puccinellia tenuiflora* seedlings revealed from proteomics analysis. *Journal of Proteomics*, 2016, 143(1): 365—381.
- [67] Yang X G, Li X L, Zhang J, *et al.* Physiological response of three cultivar grasses to natural cooling in alpine coal mine area. *Chinese Journal of Grassland*, 2019, 41(6): 72—79.
杨鑫光, 李希来, 张静, 等. 高寒煤矿区3种人工栽培种对自然降温的生理响应. *中国草地学报*, 2019, 41(6): 72—79.
- [68] Sun M D, Wang H Q. High quality forage of improved grassland in alpine region—*Poa crymophila* cv Qinghai. *Qinghai Prataculture*, 2017, 26(4): 6—9.
孙明德, 王海桥. 高寒地区改良草地的优良牧草—青海冷地早熟禾. *青海草业*, 2017, 26(4): 6—9.
- [69] Zhou W S, Wu N. Growth and potential reproduction of *Poa crymophila* in response to season precipitation shortage in the eastern Tibetan Plateau, China. *Journal of Sichuan University (Natural Science Edition)*, 2012, 49(3): 699—704.
周卫生, 吴宁. 中国青藏高原东部冷地早熟禾生长与潜在的繁殖对降水量缺乏的反应. *四川大学学报(自然科学版)*, 2012, 49(3): 699—704.
- [70] An J D. Research on the adaptability and high—yield cultivation technology of Qinghai Chinese fescue in alpine region. *Contemporary Animal Husbandry*, 2015, 30(17): 95—96.
安济东. 高寒地区青海中华羊茅适应性及高产栽培技术研究. *当代畜牧*, 2015, 30(17): 95—96.
- [71] Lai X J, Wang H Y, Yan J F, *et al.* Exploring the differences between sole silages of gramineous forages and mixed silages with forage legumes using 16S/ITS full-length sequencing. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14(1): 1120027.
- [72] Fujiwara R, Nashida H, Fukushima M, *et al.* Convolutional neural network models help effectively estimate legume coverage in grass-legume mixed swards. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12(1): 763479.
- [73] Krumins J A, Goodey N M, Gallagher F. Plant-soil interactions in metal contaminated soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 80(1): 224—231.
- [74] Wubs E R J, Van H T, Melchers P D, *et al.* Soil inoculation steers plant-soil feedback, suppressing ruderal plant species. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2019, 7(1): 451.
- [75] Ma H, Pineda A, Vander W, *et al.* Synergistic and antagonistic effects of mixing monospecific soils on plant-soil feedbacks. *Plant & Soil*, 2018, 42(1): 271—279.