



基于高寒矿区颗粒有机肥和羊板粪配施的 无客土重构土壤理化性质分析

张玉芳¹, 李希来^{1*}, 金立群¹, 高志香¹, 马小雯¹, 张钰珑¹, 马瑞明¹, 寇建村²

(1. 青海大学农牧学院, 青海 西宁 810016; 2. 西北农林科技大学草业与草原学院, 陕西 咸阳 712100)

摘要:为解决高寒矿区恢复植被退化和土壤肥力下降等问题, 选用颗粒有机肥与牧区羊圈羊板粪作为试验材料, 对青海木里矿区不同坡度改良土进行双因素随机区组控制试验, 以期为高寒矿区生态恢复提供理论依据。羊板粪与矿山渣土配比设置 4 个水平, 分别为 0:10 ($0\text{ m}^3/\text{m}^2$, S_0)、1.5:10 ($0.03\text{ m}^3/\text{m}^2$, S_1)、3:10 ($0.06\text{ m}^3/\text{m}^2$, S_2)、4.5:10 ($0.09\text{ m}^3/\text{m}^2$, S_3), 颗粒有机肥施用量设 4 个水平, 分别为 $0\text{ kg}/\text{m}^2$ (M_0)、 $1.2\text{ kg}/\text{m}^2$ (M_1)、 $2.4\text{ kg}/\text{m}^2$ (M_2)、 $3.6\text{ kg}/\text{m}^2$ (M_3), 羊板粪与颗粒有机肥两两组合共 16 个处理。分析不同配施处理下试验小区土壤理化性质和土壤酶活性, 研究结果表明: (1) M_3S_2 处理下平地土壤最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度分别是 M_0S_0 处理 (对照) 的 3.9、4.1 和 1.8 倍, 土壤容重相比 M_0S_0 处理降低 42.8%; M_3S_2 处理下坡地土壤最大持水量、毛管孔隙度分别比 M_0S_0 处理高 70.6% 和 75.0%, 毛管持水量是 M_0S_0 处理的 2.2 倍。(2) 单施羊板粪及其与颗粒有机肥的配施处理, 能提高平地土壤养分含量及土壤 pH, M_1S_3 处理下平地土壤全氮、全磷、有机质含量分别是 M_0S_0 处理的 2.0、1.9 和 1.9 倍, M_3S_2 处理下铵态氮含量是 M_0S_0 处理的 3.1 倍。 M_1S_2 处理下坡地土壤全氮含量比 M_0S_0 处理显著提高 64.3%。(3) 平地与坡地土壤脲酶活性分别在 M_1S_3 、 M_3S_3 处理下显著提高。(4) 土壤全氮、毛管孔隙度、铵态氮是影响土壤酶活性的驱动因子。总体来看, 矿区平地无客土重构土壤以颗粒有机肥与羊板粪配施 M_1S_3 处理效果最佳, 矿区坡地无客土重构土壤采用 M_3S_2 处理效果最好。

关键词: 木里矿区; 颗粒有机肥; 羊板粪; 土壤理化性质; 酶活性

煤炭资源在我国的能源结构中占据重要位置^[1]。木里矿区煤炭资源储量 33 亿 t, 煤质优良, 地处青藏高原多年冻土区, 环境条件恶劣, 煤炭开采造成原有高寒沼泽湿地面积减少, 矿区水源涵养、土壤保持、生物多样性保护功能下降等问题^[2], 因此, 开展木里矿区生态恢复意义重大。关于木里矿区植被恢复技术的研究目前已有一些报道^[3-7]。高寒矿区人工植被建植初期, 大播量、高施肥及覆盖无纺布, 可保证植被迅速生长, 但恢复 3 ~ 5 年后改良土养分下降, 植被生长稀疏, 矿区生态恢复速

度缓慢。前人研究发现, 覆土处理对高寒矿区植被恢复的效果较好^[8], 但成本高, 客土来源困难, 不建议采用^[8]。施肥是改良土壤营养物质的重要措施, 在矿区生态恢复中应用较多。有机肥中含有大量的有机物质^[9], 对改善土壤物理性质和提高土壤养分含量有重要作用, 可作为高寒矿区改良土的首选材料。目前, 矿区常用有机肥主要有秸秆还田^[10-12]、家畜粪便^[13-16]、污泥^[17-18]、商品有机肥^[19-20]等, 由于成本原因, 本研究采用当地牧区羊圈羊板粪和颗粒有机肥进行矿区渣土改良试验。

高寒矿区周边牧户养殖羊群数量较多, 羊粪经羊群践踏与细土混合形成的羊板粪, 可作为高寒矿区改良土的首选材料。羊板粪未经腐熟, 前期释放养分少, 木里矿区年平均气温低于 -4.2°C , 而羊板粪快速腐熟温度要达到 50°C , 这使得羊板粪腐熟过程减缓, 从常规的施肥 1 ~ 3 年有效^[21], 可实现施肥 1 ~ 6 年有效, 羊板粪腐熟后释放养分, 可满足后期人工植被生长需求。另外, 羊板粪本身可作为结构

收稿日期: 2022-05-30; 录用日期: 2022-07-31

基金项目: 中央财政林草科技推广示范项目 (青 [2021]TG01 号); 青海省财政林业改革发展资金新技术推广项目 (2021001); 高等学校学科创新引智计划 (D18013); 青海省科技创新创业团队 “三江源生态演变与管理创新团队”。

作者简介: 张玉芳 (1998-), 硕士研究生, 主要从事矿区生态修复技术研究。E-mail: 1249212374@qq.com。

通讯作者: 李希来, E-mail: xilai-li@163.com。

物质与矿山渣土混合,形成有利于植被生长的改良土层。商品颗粒有机肥已经过腐熟处理,并在制作过程中加入了菌剂,不仅能满足前期植被生长的营养需求,还能为羊板粪的腐熟提供有益微生物。用渣土+羊板粪+颗粒有机肥拌合完成土壤重构,成为本次矿区生态恢复的主要措施。因此,本研究通过比较颗粒有机肥与羊板粪不同梯度配施下改良土理化性质及酶活性的差异,找出最佳配施颗粒有机肥与羊板粪用量,为高寒矿区植被恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

木里矿区地处祁连山南麓腹地,是我国西部重要的安全生态屏障,矿区向北与祁连山国家公园相衔接,又是黄河上游重要水源涵养地。矿区地处高海拔高寒地带,气候寒冷,昼夜温差变化大,四季不分明,10月至翌年4月为冰冻期,属于典型的高原大陆性气候。区内年平均日照时数2164.9 h,年平均气温为-4.2℃,最低气温为-35.6℃,最高气温为19.8℃。全年大风天气接近100 d,平均风速2.9 m/s。年平均降水量为477.1 mm,降水多集中在6—9月,降雪多集中在1—5月,年平均蒸发量为1049.9 mm。本次试验所选坡地样地位于99°7′45.94″E,38°6′52.16″N,海拔4061 m,坡度为28°。平地样地位于99°7′3″E,38°7′32″N,海拔3991 m。

1.2 试验设计与样地布置

羊板粪(N 2.1%, P₂O₅ 0.4%, 有机质 15.8%)与渣土配比设置4个水平,分别为0:10(0 m³/m², S₀)、1.5:10(0.03 m³/m², S₁)、3:10(0.06 m³/m², S₂)、4.5:10(0.09 m³/m², S₃),用等体积羊板粪替代等体积渣土。颗粒有机肥(有机质≥45%, N+P₂O₅+K₂O ≥5%)施用量设置4个水平,分别为0(M₀)、1.2(M₁)、2.4(M₂)、3.6 kg/m²(M₃),颗粒有机肥与羊板粪两两组合共16个处理(M₀S₀、M₀S₁、M₀S₂、M₀S₃、M₁S₀、M₁S₁、M₁S₂、M₁S₃、M₂S₀、M₂S₁、M₂S₂、M₂S₃、M₃S₀、M₃S₁、M₃S₂、M₃S₃),每个处理重复3次,小区面积为20 m²(长5 m,宽4 m)。

平地样地土壤全氮2.24 g/kg、全磷0.51 g/kg、有机质62.5 g/kg、pH 7.32,坡地样地土壤全氮2.04 g/kg、全磷0.60 g/kg、有机质80.70 g/kg、pH 8.06。

2021年6月5日,分别在平地与坡地试验地,

利用挖机将大于5 cm的石块检出,形成厚度为25 cm的土壤层,并间隔30 m左右修建排水沟构建排水系统。羊板粪施入之前将等体积的渣土取出,后将等体积的羊板粪和50%的设计用量颗粒有机肥施入,用挖土机、圆盘耙及人工方法将羊板粪和颗粒有机肥与渣土混匀,随后将剩下的50%颗粒有机肥施入改良土基质中。最后将225 kg/hm²同比例播量的垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* cv. Qinghai)、同德小花碱茅(*Puccinellia tenuiflora* cv. Qinghai)、青海中华羊茅(*Festuca sinensis* cv. Qinghai)、青海草地早熟禾(*Poa Pratensis* cv. Qinghai)和225 kg/hm²牧草专用肥(总养分≥35%, N 18%, P₂O₅ 12%, K₂O 5%)混匀,通过人工撒播方式撒播于地面。采用机械及人工方式对样地进行耙耱镇压,铺设无纺布(20 g/m²)。

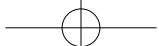
表1 不同处理施肥情况

处理	颗粒有机肥 (kg/m ²)	羊板粪		
		与渣土配比	体积 (m ³ /m ²)	施用量 (kg/m ²)
M ₀ S ₀	0	0:10	0	0
M ₀ S ₁	0	1.5:10	0.03	15
M ₀ S ₂	0	3:10	0.06	30
M ₀ S ₃	0	4.5:10	0.09	45
M ₁ S ₀	1.2	0:10	0	0
M ₁ S ₁	1.2	1.5:10	0.03	15
M ₁ S ₂	1.2	3:10	0.06	30
M ₁ S ₃	1.2	4.5:10	0.09	45
M ₂ S ₀	2.4	0:10	0	0
M ₂ S ₁	2.4	1.5:10	0.03	15
M ₂ S ₂	2.4	3:10	0.06	30
M ₂ S ₃	2.4	4.5:10	0.09	45
M ₃ S ₀	3.6	0:10	0	0
M ₃ S ₁	3.6	1.5:10	0.03	15
M ₃ S ₂	3.6	3:10	0.06	30
M ₃ S ₃	3.6	4.5:10	0.09	45

1.3 测定指标及方法

1.3.1 采样方法与时间

2021年8月15日,利用五点取样法,采集各小区0~20 cm土壤样品,风干研磨后过筛,测定土壤化学性质及酶活性指标。利用环刀在各小区取



样,测定土壤物理性质。

1.3.2 测定指标

土壤 pH 用 PHS-25 酸度计测定,土水比为 1:2.5,土壤有机质含量采用重铬酸钾氧化法测定^[22]。土壤铵态氮、硝态氮、有效磷、全氮及全磷含量用德国 SEAL 型 AA3 连续流动分析仪测定。土壤容重、最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度用环刀法测定^[23]。土壤酶活性测定参照关松荫^[24]的方法,土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法测定,其中,蔗糖酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的毫克数表示,脲酶活性以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的毫克数表示。

1.4 数据统计与分析方法

应用 Excel 2010 进行数据整理、Origin 2021 完成作图、SPSS 26.0 完成统计分析、Canoco 5.0 进行冗余分析。采用 Three-way ANOVA 检验颗粒有机肥、羊板粪及坡度对矿区改良土壤理化性质和酶活性的影响,并用 One-way ANOVA 进行方差分析,运用 LSD 检验方法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 颗粒有机肥与羊板粪配施对木里矿区无客土重构土壤物理性质的影响

表 2 结果显示,添加羊板粪对土壤容重、最

大持水量、毛管持水量和毛管孔隙度影响极显著 ($P<0.01$);坡度与羊板粪的交互作用和颗粒有机肥与羊板粪的交互作用对土壤容重、最大持水量影响显著 ($P<0.05$),说明单施羊板粪及其与颗粒有机肥的配施是改善渣土物理性质的关键措施。表 3 结果显示,平地与坡地土壤物理性质对不同施肥处理响应不同,平地土壤最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度显著高于坡地 ($P<0.05$),土壤容重显著低于坡地 ($P<0.05$)。在平地, M₃S₂ 处理下土壤容重最小,相比 M₀S₀ 处理,显著降低 42.8% ($P<0.05$); M₃S₂ 处理下土壤最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度均最大,分别是 M₀S₀ 处理的 3.9、4.1 和 1.8 倍。在不同肥料配施处理下,坡地样地土壤容重变化范围为 1.2 ~ 1.6 g/cm³, M₃S₂ 处理下最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度最大,分别比 M₀S₀ 处理高出 70.6%、124.1% 和 75.0%,但差异不显著 ($P>0.05$)。整体来看,矿区平地土壤物理性质明显好于坡地,颗粒有机肥与羊板粪配施对改善矿区平地土壤物理性质影响显著,其中以 M₃S₂ 处理效果最佳,坡地土壤物理性质虽然在各处理下未发生显著变化,但基本在 M₃S₂ 处理下改善最好。与未干扰高寒草甸土壤容重^[25]与最大持水量^[26]相比, M₃S₂ 处理下平地土壤容重、平地和坡地最大持水量恢复效果比较好,坡地土壤容重仍存在差异。

表 2 不同因子及其交互作用对土壤理化性质及酶活性的影响

指标	S	G	M	S × G	S × M	G × M	S × G × M
容重	**	NS	**	NS	*	*	NS
最大持水量	**	NS	**	NS	*	*	NS
毛管持水量	**	NS	**	NS	NS	*	NS
毛管孔隙度	**	NS	**	NS	NS	NS	NS
全氮	NS	NS	**	NS	*	NS	NS
全磷	NS	*	**	NS	**	NS	*
有机质	**	NS	**	NS	NS	NS	NS
硝态氮	NS	**	**	NS	NS	NS	**
铵态氮	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS
有效磷	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
pH	**	NS	**	NS	**	NS	NS
脲酶	**	*	**	NS	**	**	NS
蔗糖酶	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS

注: S 代表坡度, G 代表颗粒有机肥, M 代表羊板粪, ** 表示差异极显著 ($P<0.01$), * 表示差异显著 ($P<0.05$), NS 表示无显著差异 ($P>0.05$)。

表 3 不同颗粒有机肥与羊板粪组合下木里矿区无客土重构土壤物理性质

处理	容重 (g/cm^3)		最大持水量 (g/kg)		毛管孔隙度 (%)		毛管持水量 (g/kg)	
	平地	坡地	平地	坡地	平地	坡地	平地	坡地
M_0S_0	$1.4 \pm 0.1\text{abc}$	$1.4 \pm 0.1\text{a}$	$278.6 \pm 70.4\text{c}$	$232.4 \pm 15.1\text{a}$	$34.4 \pm 4.3\text{ef}$	$22.0 \pm 2.8\text{a}$	$247.9 \pm 58.2\text{bc}$	$146.6 \pm 10.5\text{a}$
M_0S_1	$1.2 \pm 0.1\text{bcde}$	$1.4 \pm 0.2\text{a}$	$420.8 \pm 89.2\text{bc}$	$233.0 \pm 71.2\text{a}$	$47.5 \pm 6.3\text{bcde}$	$21.7 \pm 1.3\text{a}$	$394.3 \pm 87.0\text{bc}$	$148.6 \pm 30.4\text{a}$
M_0S_2	$1.0 \pm 0.1\text{ef}$	$1.2 \pm 0.1\text{a}$	$549.7 \pm 159.9\text{bc}$	$364.3 \pm 93.7\text{a}$	$52.0 \pm 6.0\text{ab}$	$35.9 \pm 10.8\text{a}$	$512.7 \pm 145.0\text{bc}$	$305.8 \pm 122.2\text{a}$
M_0S_3	$1.1 \pm 0.0\text{cdef}$	$1.4 \pm 0.2\text{a}$	$453.7 \pm 21.8\text{bc}$	$279.2 \pm 83.7\text{a}$	$45.7 \pm 6.0\text{bcdef}$	$33.6 \pm 8.4\text{a}$	$413.0 \pm 68.6\text{bc}$	$245.2 \pm 92.3\text{a}$
M_1S_0	$1.3 \pm 0.2\text{abcd}$	$1.6 \pm 0.1\text{a}$	$311.5 \pm 85.6\text{bc}$	$226.1 \pm 1.2\text{a}$	$36.9 \pm 9.5\text{def}$	$27.9 \pm 6.0\text{a}$	$274.3 \pm 83.4\text{bc}$	$171.4 \pm 45.5\text{a}$
M_1S_1	$1.1 \pm 0.1\text{cdef}$	$1.3 \pm 0.0\text{a}$	$479.4 \pm 139.5\text{bc}$	$284.3 \pm 7.7\text{a}$	$48.7 \pm 6.6\text{bcd}$	$33.6 \pm 4.6\text{a}$	$455.9 \pm 149.8\text{bc}$	$239.0 \pm 30.4\text{a}$
M_1S_2	$1.0 \pm 0.1\text{ef}$	$1.6 \pm 0.2\text{a}$	$510.3 \pm 145.5\text{bc}$	$202.7 \pm 97.4\text{a}$	$45.6 \pm 9.9\text{bcdef}$	$26.2 \pm 7.7\text{a}$	$453.2 \pm 174.1\text{bc}$	$167.2 \pm 80.7\text{a}$
M_1S_3	$1.0 \pm 0.1\text{def}$	$1.4 \pm 0.0\text{a}$	$524.4 \pm 161.9\text{bc}$	$301.4 \pm 28.1\text{a}$	$49.8 \pm 8.5\text{abcd}$	$33.4 \pm 5.1\text{a}$	$484.8 \pm 152.9\text{bc}$	$233.5 \pm 30.4\text{a}$
M_2S_0	$1.6 \pm 0.1\text{a}$	$1.5 \pm 0.0\text{a}$	$218.0 \pm 18.5\text{c}$	$228.7 \pm 41.8\text{a}$	$33.5 \pm 1.0\text{f}$	$23.5 \pm 1.2\text{a}$	$205.2 \pm 15.4\text{c}$	$151.3 \pm 14.3\text{a}$
M_2S_1	$1.0 \pm 0.1\text{ef}$	$1.3 \pm 0.4\text{a}$	$504.4 \pm 105.4\text{bc}$	$370.8 \pm 298.0\text{a}$	$45.0 \pm 7.4\text{bcdef}$	$34.4 \pm 17.9\text{a}$	$450.7 \pm 119.6\text{bc}$	$325.0 \pm 296.1\text{a}$
M_2S_2	$1.0 \pm 0.0\text{def}$	$1.2 \pm 0.1\text{a}$	$468.6 \pm 86.3\text{bc}$	$346.6 \pm 70.0\text{a}$	$45.2 \pm 6.6\text{bcdef}$	$38.2 \pm 7.0\text{a}$	$426.4 \pm 92.0\text{bc}$	$297.7 \pm 72.7\text{a}$
M_2S_3	$0.9 \pm 0.1\text{ef}$	$1.4 \pm 0.1\text{a}$	$649.5 \pm 153.3\text{b}$	$251.6 \pm 64.7\text{a}$	$50.8 \pm 4.8\text{abc}$	$30.8 \pm 2.6\text{a}$	$572.8 \pm 129.9\text{bc}$	$212.1 \pm 36.6\text{a}$
M_3S_0	$1.4 \pm 0.1\text{abc}$	$1.5 \pm 0.0\text{a}$	$292.6 \pm 50.6\text{c}$	$220.2 \pm 12.0\text{a}$	$38.7 \pm 3.6\text{bcdef}$	$27.7 \pm 6.5\text{a}$	$276.7 \pm 51.4\text{bc}$	$180.0 \pm 40.7\text{a}$
M_3S_1	$1.5 \pm 0.0\text{ab}$	$1.5 \pm 0.1\text{a}$	$266.9 \pm 25.9\text{c}$	$255.9 \pm 55.9\text{a}$	$37.4 \pm 4.6\text{cdef}$	$32.7 \pm 8.1\text{a}$	$245.3 \pm 35.0\text{bc}$	$219.6 \pm 71.6\text{a}$
M_3S_2	$0.8 \pm 0.5\text{f}$	$1.2 \pm 0.1\text{a}$	$1086.7 \pm 717.3\text{a}$	$396.6 \pm 108.2\text{a}$	$62.6 \pm 20.8\text{a}$	$38.5 \pm 11.0\text{a}$	$1023.0 \pm 699.8\text{a}$	$328.5 \pm 141.5\text{a}$
M_3S_3	$1.0 \pm 0.0\text{ef}$	$1.3 \pm 0.2\text{a}$	$527.0 \pm 14.6\text{bc}$	$295.3 \pm 120.9\text{a}$	$52.0 \pm 1.3\text{ab}$	$35.1 \pm 10.7\text{a}$	$506.1 \pm 15.1\text{bc}$	$270.4 \pm 135.1\text{a}$
平均值	$1.1 \pm 0.2\text{B}$	$1.4 \pm 0.2\text{A}$	$471.4 \pm 262.2\text{A}$	$280.6 \pm 101.7\text{B}$	$45.4 \pm 10.0\text{A}$	$30.9 \pm 8.6\text{B}$	$433.9 \pm 251.6\text{A}$	$227.6 \pm 106.3\text{B}$

注：不同小写字母表示同一坡度不同处理间差异显著 ($P<0.05$)，不同大写字母表示平地与坡地差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 颗粒有机肥与羊板粪配施对木里矿区无客土重构土壤化学性质的影响

表2结果显示，添加羊板粪对土壤全氮、全磷、有机质、硝态氮含量及pH影响极显著 ($P<0.01$)；添加颗粒有机肥对土壤全磷含量影响显著 ($P<0.05$)，对硝态氮含量影响极显著 ($P<0.01$)；不同坡度下土壤有机质含量及pH差异极显著 ($P<0.01$)，坡地土壤有机质含量及pH显著高于平地；羊板粪与坡度的交互作用对土壤全氮和铵态氮含量影响显著 ($P<0.05$)，对土壤全磷含量及pH影响极显著 ($P<0.01$)；不同坡度下，同时添加颗粒有机肥和羊板粪对土壤硝态氮含量影响极显著 ($P<0.01$)，对土壤全磷含量影响显著 ($P<0.05$)，说明添加羊板粪是提高渣土养分含量的关键措施。图1和图2结果显示，在平地区，颗粒有机肥施用量一定时，随羊板粪施用量增加，土壤全氮、全磷、有机质含量及pH总体呈增加趋势。 M_1S_3 处理下土壤全氮和全磷含量最大，分别是 M_0S_0 处理的2.1和1.8倍； M_0S_3 处理下土壤有机

质含量是 M_0S_0 处理的2.1倍； M_3S_2 处理下土壤铵态氮和硝态氮含量最大，分别是 M_0S_0 处理的3.1和17.4倍； M_1S_3 处理下土壤pH达到最大值，比 M_0S_0 处理高10.8%；不同施肥处理下土壤有效磷含量基本处于14.5 ~ 28.7 mg/kg，但各处理间差异不显著 ($P>0.05$)。在坡地区， M_1S_2 处理下土壤全氮含量最高，是 M_0S_0 处理的1.6倍； M_3S_3 处理下硝态氮含量最大，是 M_0S_0 处理的26倍； M_3S_1 处理下土壤pH显著下降3.9% ($P<0.05$)。不同施肥处理下土壤全磷含量为0.5 ~ 1.0 g/kg、有机质含量为159.6 ~ 249.7 g/kg、铵态氮含量为0.4 ~ 3.0 mg/kg、有效磷含量为14.2 ~ 30.6 mg/kg，4种养分分别在 M_1S_2 、 M_1S_2 、 M_0S_3 和 M_2S_0 处理下最大，但是在各处理间差异不显著 ($P>0.05$)。总体来看，矿区平地区域土壤养分含量在 M_1S_3 处理下相对较高，坡地区土壤养分在 M_3S_2 处理下含量较高，且 M_1S_3 和 M_3S_2 处理土壤全氮、全磷和有机质含量与周边自然高寒草甸相比^[4]，土壤全磷含量仍存在差异。

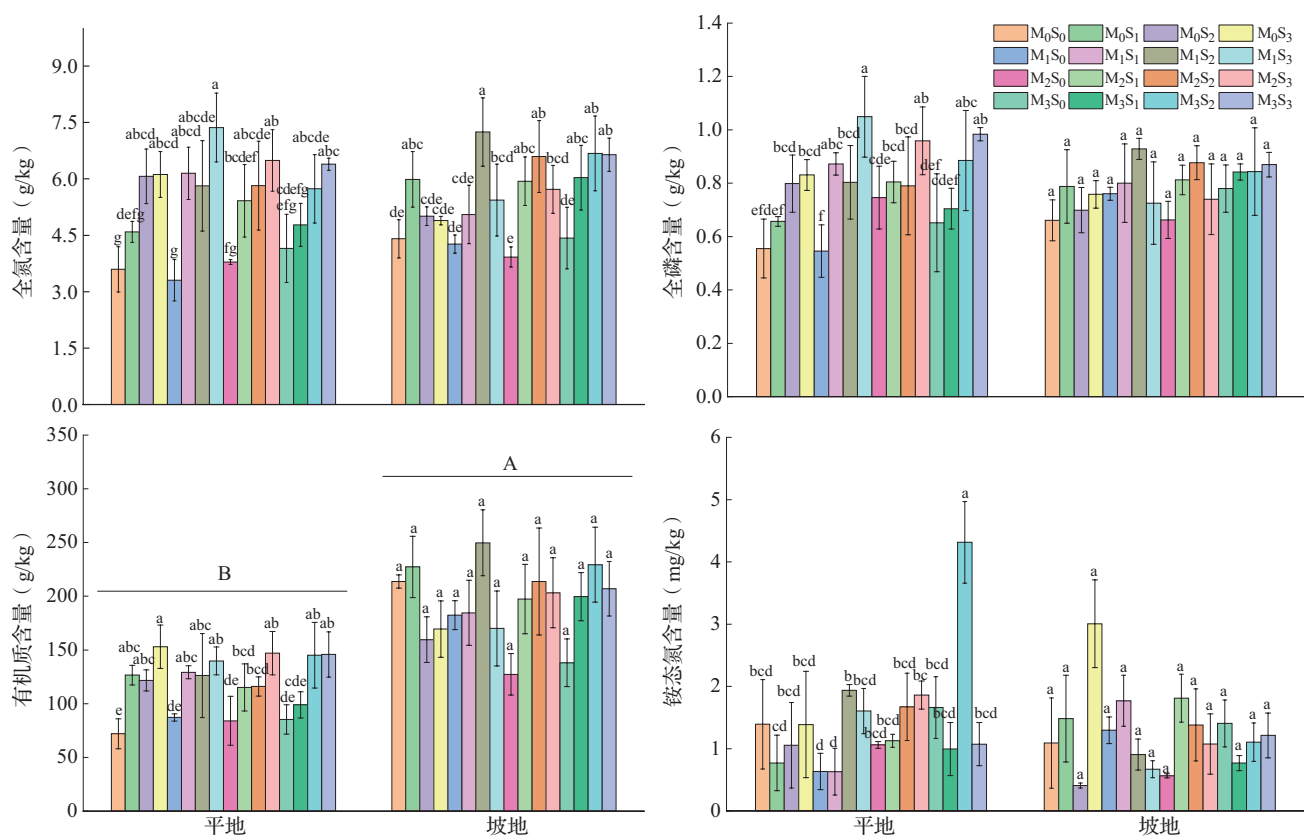


图1 不同颗粒有机肥与羊板粪组合下木里矿区无客土重构土壤全氮、全磷、有机质和铵态氮含量

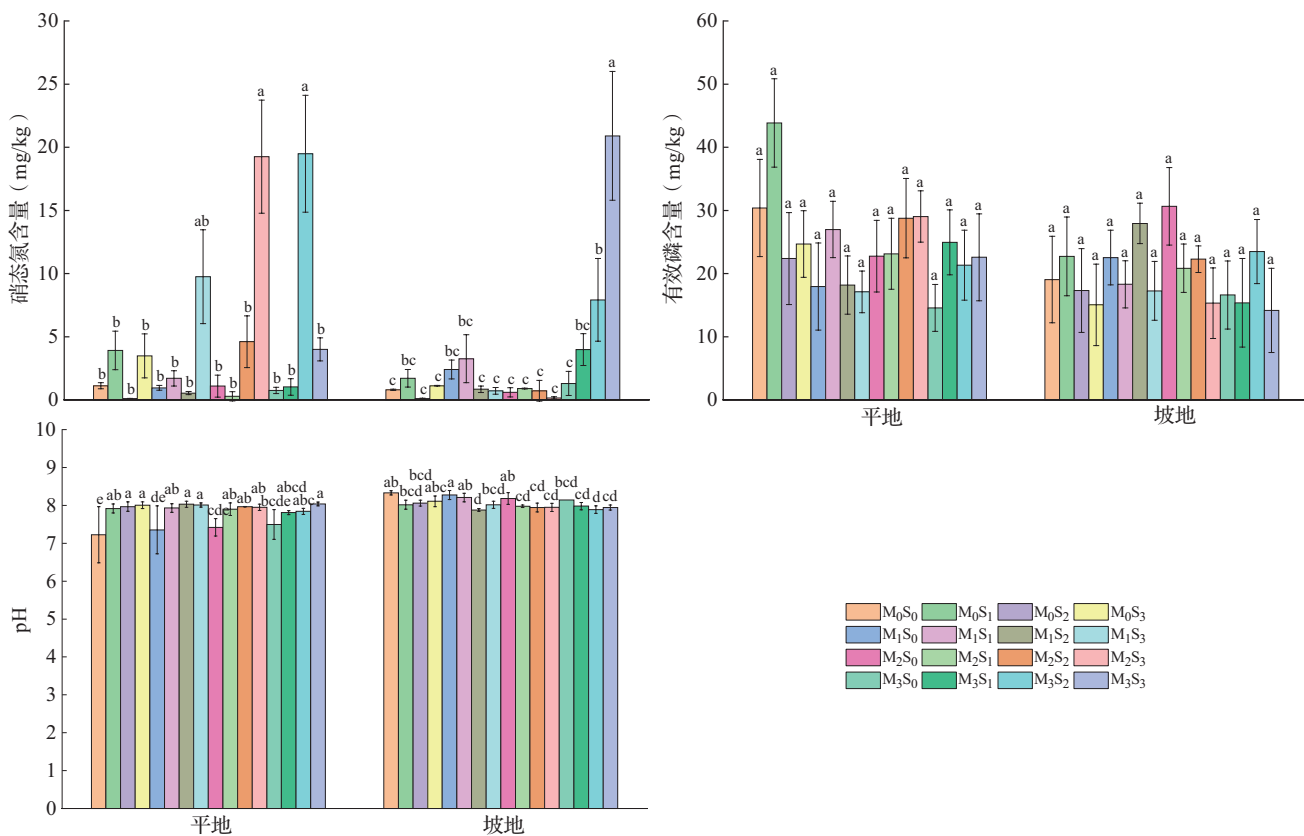
注: 不同小写字母表示同一坡度不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示平地与坡地差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图2 不同颗粒有机肥与羊板粪组合下木里矿区无客土重构土壤硝态氮、有效磷含量和 pH

2.3 颗粒有机肥与羊板粪配施对木里矿区无客土重构土壤酶活性的影响

表 2 结果显示, 添加颗粒有机肥对土壤脲酶活性影响显著 ($P<0.05$), 添加羊板粪对土壤蔗糖酶活性影响显著 ($P<0.05$), 坡度与羊板粪的交互作用和颗粒有机肥与羊板粪的交互作用对土壤脲酶活性影响极显著 ($P<0.01$)。图 3 结果显示, 不同施肥处理下平地土壤脲酶活性为 $0.5 \sim 3.1 \text{ mg/(g} \cdot \text{d)}$, 蔗糖酶活性为 $15.3 \sim 30.0 \text{ mg/(g} \cdot \text{d)}$, 同时坡地土壤脲酶活性为 $0.4 \sim 3.4 \text{ mg/(g} \cdot \text{d)}$, 蔗糖酶活性为 $11.9 \sim 45.3 \text{ mg/(g} \cdot \text{d)}$, 平地土壤脲酶活性高于坡地 ($P<0.05$)。在平地区, M_1S_3 处理下土壤脲酶活性达到最大, 是 M_0S_0 处理的 7.4 倍, 同时 M_3S_2 处理下蔗糖酶活性达到最大, 是 M_0S_0 处理的 2.8 倍, 但蔗糖酶活性在各

处理间差异不显著 ($P>0.05$)。在坡地区, M_3S_3 处理下土壤脲酶活性达到最大, 是 M_0S_0 处理的 5.9 倍, M_1S_3 处理下蔗糖酶活性达到最大, 是 M_0S_0 处理的 5.6 倍。表 2 结果表明, 添加羊板粪相比添加颗粒有机肥对矿区土壤理化性质及酶活性大部分指标的影响达到了极显著的水平, 说明添加羊板粪相比颗粒有机肥更有利于无客土土壤重构。总体来看, M_1S_2 处理对提高平地土壤酶活性效果最好, M_3S_3 处理对提高坡地土壤酶活性效果最好, 且 M_1S_2 和 M_3S_3 处理下土壤脲酶和蔗糖酶活性与周边自然高寒草甸土壤酶活性接近^[27]。在高寒矿区渣土改良过程中, 添加羊板粪相比颗粒有机肥更具有改良效果。

2.4 土壤理化性质与酶活性之间的关系

图 4 结果显示, 第一序轴与第二序轴贡献率分

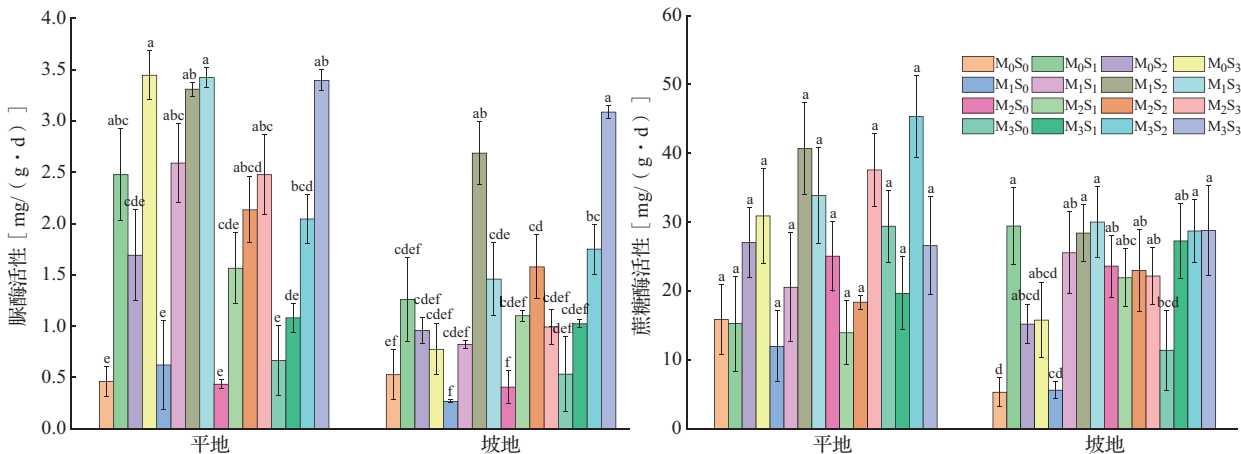


图 3 不同颗粒有机肥与羊板粪组合下木里矿区无客土重构土壤脲酶和蔗糖酶活性

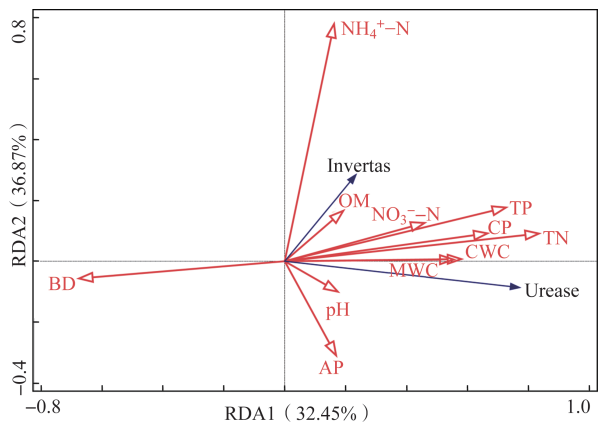
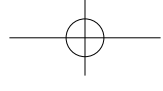


图 4 不同施肥处理下土壤理化性质与酶活性的 RDA 冗余分析
注: 箭头长度和角度余弦反映了酶和土壤理化性质之间的关系。带有实箭头的蓝色线表示酶活性指标, 带有空箭头的红色线表示土壤理化性质指标。Urease 代表脲酶、Invertase 代表蔗糖酶、MWC 代表最大持水量、CWC 代表毛管持水量、CP 代表毛管孔隙度、BD 代表容重、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 代表硝态氮、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 代表铵态氮、TN 代表全氮、TP 代表全磷、AP 代表有效磷、OM 代表有机质。

别为 32.45% 和 36.87%, 土壤全氮、毛管孔隙度、铵态氮与土壤酶活性密切相关, 三者的贡献率分别达到 22.6%、7.0% 和 2.9% (表 4), 说明氮素供应和透气性是影响土壤酶活性的关键因子, 土壤容重、毛管持水量、最大持水量、有效磷、有机质、全磷、硝态氮及 pH 对土壤酶活性无显著影响 ($P>0.05$)。

表 4 土壤理化性质对酶活性的解释率

指标	贡献率 (%)	F	P
全氮	22.6	27.5	0.002
毛管孔隙度	7.0	9.3	0.002
铵态氮	2.9	4.0	0.026
毛管持水量	0.8	1.1	0.292
有效磷	0.6	0.9	0.412
土壤容重	0.5	0.6	0.502
最大持水量	1.2	1.6	0.238
硝态氮	0.6	0.9	0.444
有机质	0.2	0.3	0.73
pH	0.1	0.2	0.83
全磷	0.3	0.3	0.69



3 讨论

3.1 施颗粒有机肥和羊板粪对木里矿区无客土重构土壤物理性质的影响

本研究发现,在矿山平地样地区,单施羊板粪或羊板粪与颗粒有机肥配施处理下土壤毛管孔隙度、最大持水量、毛管持水量增加明显,容重逐渐降低,而单施颗粒有机肥对土壤物理性质影响不显著,这表明添加羊板粪相比颗粒有机肥对矿区土壤物理性质的改善更为明显,原因可能是表面积较大的颗粒有机肥在提高土壤保水性能和透气性等方面效果不如羊板粪明显^[28]。添加羊板粪相比颗粒有机肥能促进土壤微团聚体的形成,从而使土壤容重下降。土壤容重降低的同时,土壤紧实度和透气性得到改善,土壤孔隙度增加,土壤保水性能增强^[29]。在坡地样地区,不同配施处理下土壤毛管持水量、最大持水量、毛管孔隙度及容重均未发生显著变化,这可能是坡地试验区土壤的水土流失较严重造成的^[30]。因此,在渣山坡面土壤改良过程中,应加大羊板粪的添加,为矿山渣土土壤改良提供良好的基础。

3.2 施颗粒有机肥和羊板粪对木里矿区无客土重构土壤化学性质的影响

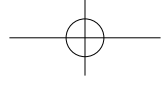
有机物料施入渣土土壤后,在土壤微生物和植物根系分泌物的共同作用下,所含有的氮、磷、钾等元素一部分由有机态转化为无机态释放到土壤中,一部分则转化为腐殖质^[31],因此,添加有机物料后土壤中的有机质及其它养分含量会提高。马坤等^[32]研究发现,使用颗粒有机肥可以增加土壤全氮和有机质含量,对铵态氮和硝态氮含量无显著影响。本研究发现,颗粒有机肥对土壤养分无显著影响,这可能是矿区土壤贫瘠,加上施肥期限短,养分释放缓慢的原因。吴红等^[33]研究发现,在高砂土中施入羊板粪可显著提高全氮、有效磷含量,李艳春等^[34]研究发现,施用羊板粪后土壤全氮、全磷、有效磷含量与常规施用化肥无显著差异。闵星星等^[35]研究发现,适量腐熟羊粪可提高土壤全氮、有机质、速效氮、全磷、有效磷等含量,生羊粪可提高土壤有机质、全氮、有效氮含量,对全磷和有效磷含量无显著影响。本研究结果显示,在平地样地区,适量羊板粪处理下土壤全氮、全磷、有机质、铵态氮、硝态氮含量显著提高,这种施肥引起的土壤肥力差异与羊板粪的腐熟

程度、土壤类型及气候资源环境有关。有机肥中的有机质与微生物对土壤磷的转换比较迟钝^[36],所以有效磷在各处理下增幅不明显。土壤 pH 在各施肥处理下有增加趋势,这可能是因为羊粪本身是弱碱性肥料,短期内有机质矿化作用有限,导致随羊板粪施用量增加土壤 pH 呈上升趋势。在坡地样地区,各处理下仅全氮、硝态氮含量变化显著,其他养分无显著变化。一方面,因为坡地属于迎风坡,土壤温度低,降低了有机质矿化速率;另一方面,由于地势原因,机械对羊板粪与渣土混合不均匀,全磷、铵态氮、有效磷等养分含量在各处理间差异小。土壤温度和湿度对养分矿化和释放有很大影响^[37],平地试验地点位于矿坑底部,南北两面由渣山包围,西面是坡度将近 30° 的坡面,独特的位置使其形成相对密闭的环境,土壤温度较高,加之土壤保水保肥力好,土壤微生物活性强,有利于羊板粪和颗粒有机肥料中养分的矿化与释放^[38],而坡地属于迎风坡,土壤温度较低,有机质矿化速率低。

本试验处理只有两个月,后期植被凋落物归还及根系分泌物,可进一步增加土壤有机质含量,随着土壤有机质的积累,微生物结构和多样性逐步得到改善,矿区渣土将会逐渐具备土壤特征,渣土的改良效果会更好。

3.3 施颗粒有机肥和羊板粪对木里矿区无客土重构土壤酶活性的影响

施肥后土壤酶活性增加是因为羊板粪和有机肥一方面可作为“加酶”肥料,另一方面可通过促进植物与微生物生长分泌酶^[39]。研究证明,土壤水分、空气及热量状态对土壤酶活性影响显著,不同水热及空气组成状态下土壤酶活性存在明显差异^[40],适当的土壤湿度可提高土壤酶活性,较大土壤湿度可降低土壤酶活性^[41]。这与本次平地试验区土壤脲酶活性高于坡地试验区的的结果一致。土壤养分的存在形式和含量与土壤酶活性密切相关,土壤碳、氮和磷是微生物碳和氮的主要来源,土壤养分通过影响微生物的数量和类型来影响酶的活性^[42-43]。本研究发现,土壤全氮和铵态氮是影响土壤酶活性的主要驱动因子,这与莫雪等^[44]的研究结果一致。低浓度可利用性氮可促进微生物分泌胞外酶,而酶活性的提高可以分解有机质释放更多无机氮^[45],这可能是铵态氮与酶活性呈正相关关系的原因,同时土壤全氮可以促进植物根际微生物生长,



增强土壤微生物对酶的合成^[46]。

4 结论

颗粒有机肥与羊板粪配施进行高寒矿区无客土重构土壤,显著提高了高寒矿区平地样地渣土养分含量,降低了渣土容重,提高了渣土最大持水量、毛管持水量和毛管孔隙度,激发了土壤脲酶活性。同时,颗粒有机肥与羊板粪配施显著提高了坡地样地渣土全氮含量、硝态氮含量、脲酶活性和蔗糖酶活性,但对坡地渣土物理性质的影响不显著。坡地处理的渣土最大持水量、毛管持水量、毛管孔隙度、容重、脲酶活性显著低于平地样地,但渣土pH和有机质含量显著高于平地样地。综合来看,添加羊板粪相比颗粒有机肥对矿区渣土改良效果更好。高寒矿区无客土重构土壤在平地样地区以 M_1S_3 处理效果最佳,在坡地样地区以 M_3S_2 处理效果最佳。

参考文献:

- [1] 杨建平. 煤炭在我国能源安全战略中的作用[J]. 煤炭经济研究, 2002, 3(12): 24-26.
- [2] 王锐, 李希来, 马钰, 等. 青海圣雄煤矿煤矸石堆积对周边高寒湿地植被和土壤的影响[J]. 土壤, 2020, 52(2): 386-393.
- [3] 杨鑫光. 高寒矿区煤矸石山植被恢复潜力研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [4] 金立群. 多年冻土矿区渣山人工植被对微生物群落恢复的影响研究[D]. 西宁: 青海大学, 2019.
- [5] 金立群, 李希来, 孙华方, 等. 高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究[J]. 土壤, 2020, 52(4): 831-839.
- [6] 李宏林, 梁德飞, 马丽, 等. 不同恢复措施和生境对高寒矿区渣山植被恢复的影响[J]. 青海科技, 2021, 28(5): 34-41.
- [7] 高志香, 李希来, 张静, 等. 不同施肥处理对高寒矿区渣山改良土壤酶活性和理化性质的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1748-1756.
- [8] 王锐, 李希来, 张静. 四种覆土处理对高寒煤矿区排土场渣山植被恢复的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(7): 40-51.
- [9] 李三省. 有机肥腐熟窍门[J]. 农家科技, 2016(11): 13.
- [10] 黄界颖. 秸秆还田对铜陵矿区土壤Cd形态及生物有效性的影响机理[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [11] 朱慧可. 水稻有机质输入对矿区稻田土壤汞形态及暴露风险影响研究[D]. 南京: 南京大学, 2015.
- [12] 沈秋华, 樊娜娜, 刘丹丹, 等. 稀土矿区秸秆还田的经济与环境效应[J]. 经济研究导刊, 2019(8): 63-64.
- [13] 冯鹏艳, 梁利宝, 许剑敏. 不同施肥处理对采煤塌陷区复垦土壤理化性质和油菜产量的影响[J]. 山西农业科学, 2019, 47(8): 1375-1379, 1415.

- [14] 薛玉晨. 不同有机肥对矿区复垦土壤氮素矿化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 1-12.
- [15] 吕鉴于, 高文俊, 郝鲜俊, 等. 不同有机肥对矿区复垦土壤磷素矿化特征研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 59-67.
- [16] 张若扬, 郝鲜俊, 韩阳, 等. 不同有机肥对采煤塌陷区土壤氮素矿化动态特征研究[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 7.
- [17] 孙永明, 郭衡焕, 孙辉明, 等. 城市污泥在矿区废弃地复垦中应用的可行性研究[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(6): 22-25.
- [18] 何士龙, 钱奎梅, 王丽萍, 等. 污泥在矿区废弃地复垦中的应用实验[J]. 环境科技, 2009, 22(4): 15-17.
- [19] 邢虹娟. 山西省清城煤矿矿区土地破坏分析与复垦措施[D]. 晋中: 山西农业大学, 2013.
- [20] 牛旭. 生物有机肥对矿区复垦土壤微生物多样性及小麦生长的影响[D]. 太原: 山西大学, 2014.
- [21] 陈伯华, 王会金. 羊粪的开发与利用[J]. 山西农业, 2001, 3(7): 21-22.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [23] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [24] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [25] 贺慧丹, 李红琴, 祝景彬, 等. 黄河源高寒草甸封育条件下的土壤持水能力[J]. 中国草地学报, 2017, 39(5): 62-67.
- [26] 郑元铭, 全小龙, 乔有明, 等. 高寒露天煤矿剥离物理特性及其植物生长适宜性分析[J]. 青海大学学报, 2019, 37(2): 22-27, 35.
- [27] 谭巧义. 三江源地区高寒草地土壤氨氧化细菌和亚硝酸盐氧化细菌的分子生态学研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [28] 刘光荣, 冯兆滨, 刘秀梅, 等. 不同有机肥源对红壤旱地耕层土壤性质的影响[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(5): 927-932, 938.
- [29] 于菲, 赵硕, 赵影, 等. 长期施用有机肥对松嫩平原西部盐碱土肥力和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(2): 172-180.
- [30] 王恒松, 熊康宁, 张芳美. 地形因子对喀斯特坡面水土流失影响的机理研究[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 7.
- [31] 李军营, 邓小鹏, 杨坤, 等. 施用有机肥对植烟土壤理化性质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(3): 12-16, 34.
- [32] 马坤, 芦光新, 邓晔, 等. 有机肥对垂穗披碱草根际微生物及土壤理化性质的影响[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 594-602.
- [33] 吴红, 刘海霞, 周明夏, 等. 羊粪还田对巨峰葡萄园土壤理化性质的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(12): 32-37.
- [34] 李艳春, 李兆伟, 林伟伟, 等. 施用生物质炭和羊粪对宿根连作茶园根际土壤微生物的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(4): 1273-1282.
- [35] 闵星星, 马玉寿, 李世雄, 等. 羊粪对青海草地早熟禾草地



- 生产力和土壤养分的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(6): 1039-1044.
- [36] 张敏, 孙宝利, 宋阿琳, 等. 微生物多样性对土壤氮磷钾转化、酶活性及油菜生长的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5856-5864.
- [37] Schmidt I K, Jonasson S, Michelsen A. Mineralization and microbial immobilization of N and P in arctic soils in relation to season, temperature and nutrient amendment[J]. Applied Soil Ecology, 1999, 11(2): 147-160.
- [38] 陶玥玥, 王海候, 施林林, 等. 水生植物堆肥在太湖稻麦体系的适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 712-719.
- [39] 杨林, 刘慧龙, 张钦, 等. 不同有机肥对茶园主要土壤酶活性的影响[J]. 贵州科学, 2015, 33(5): 36-39.
- [40] 杨红梅, 陆梅, 杨桂英. 高低产脂思茅松林土壤理化性质及其与酶活性关系[J]. 亚热带水土保持, 2011, 23(1): 6-9, 54.
- [41] 张传更, 高阳, 张立明, 等. 水分管理措施对施用有机肥麦田土壤酶活性和微生物群落结构的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 38-44.
- [42] Kandeler E, Luxhoi J, Tschierko D, et al. Xylanase, invertase and protease at the soil-litter interface of a loamy sand[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, 31(8): 1171-1179.
- [43] Burke D J, Weintraub M N, Hewins C R, et al. Relationship between soil enzyme activities, nutrient cycling and soil fungal communities in a northern hardwood forest[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(4): 795-803.
- [44] 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 等. 黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 895-904.
- [45] 孙悦, 徐兴良, Kuzyakov Y. 根际激发效应的发生机制及其生态重要性[J]. 植物生态学报, 2014, 38(1): 62-75.
- [46] Lucas R W, Casper B B, Jackson J K, et al. Soil microbial communities and extracellular enzyme activity in the New Jersey Pinelands[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2007, 39(10): 2508-2519.

Analysis of soil physicochemical properties based on combined application of granular organic fertilizer and sheep board manure in alpine mining areas

ZHANG Yu-fang¹, LI Xi-lai^{1*}, JIN Li-qun¹, GAO Zhi-xiang¹, MA Xiao-wen¹, ZHANG Yu-long¹, MA Rui-ming¹, KOU Jian-cun² (1. College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining Qinghai 810016; 2. College of Grassland Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Xianyang Shaanxi 712100)

Abstract: In order to solve the problems of revegetation degradation and soil fertility decline, granular organic fertilizer and sheep board manure in pastoral areas were selected as experimental materials for improving soil in Muli mining area of Qinghai, and a two-factor random block control experiment was conducted at slope and flat plots to provide theoretical basis for ecological recovery in alpine mining area. A total of sixteen treatments combined with sheep board manure and granular organic fertilizer were set up, including four levels of the ratio of sheep board manure and mine muck, which were 0 : 10 (0 m³/m², S₀), 1.5 : 10 (0.03 m³/m², S₁), 3 : 10 (0.06 m³/m², S₂), 4.5 : 10 (0.09 m³/m², S₃), and four levels of granular organic fertilizer application, which were 0 kg/m² (M₀), 1.2 kg/m² (M₁), 2.4 kg/m² (M₂), 3.6 kg/m² (M₃). The results showed that: (1) The maximum soil water holding capacity, capillary water holding capacity and capillary porosity of the flat plot under M₃S₂ treatment were 3.9, 4.1 and 1.8 times higher than those under M₀S₀ treatment, and the soil bulk density reduced by 42.8% compared with that of M₀S₀ treatment. The maximum soil water holding capacity and capillary porosity of the slope plot under M₃S₂ were 70.6% and 75.0% higher than those of M₀S₀ treatment, and the capillary water holding capacity was 2.2 times higher than that of M₀S₀ treatment. (2) The single application of sheep board manure and its combined application with granular organic fertilizer increased the soil nutrient content and soil pH in the flat plot. The contents of total nitrogen, total phosphorus and organic matter in flat plot under M₁S₃ treatment were 2.0, 1.9 and 1.9 times that of M₀S₀ treatment, respectively. The content of ammonium nitrogen under M₃S₂ treatment was 3.1 times that of M₀S₀ treatment. Soil total nitrogen in the slope plot significantly increased by 64.3% under M₁S₂ compared with M₀S₀ treatment. (3) Soil urease activity in the flat and plot land significantly increased under M₁S₃ and M₃S₃ treatments. (4) Soil total nitrogen, capillary porosity and ammonium nitrogen were the driving factors affecting soil enzyme activities. On the whole, the treatment effect of granular organic fertilizer combined with sheep board manure M₁S₃ is the best for the reconstructed soil without guest soil in the flat plot of mining area, and M₃S₂ is the best for the reconstructed soil without guest soil in the slope plot of mining area.

Key words: Muli mining area; granular organic fertilizer; sheep board manure; soil physical and chemical properties; enzyme activity