

有机肥施用量和播种方式对高寒矿区植物群落生长和土壤养分的影响

刘万杰, 蒋福祯, 马利利, 李正鹏*

(青海大学农林科学院, 青海 西宁 810016)

摘要:【目的】探究适宜的高寒矿区生态恢复措施。【方法】通过有机肥改良土壤的方法在青海木里矿区设置双因素完全随机区组试验,探究不同有机肥施用量(低、中、高)和3种播种方式(条播、穴播、撒播)对高寒矿区植物群落的生长特征和土壤养分的影响,并对其投入和产出进行综合评价。【结果】1)低有机肥施用量与撒播相结合(Y1F3)的方式,其植物群落高度、盖度和地上生物量均最优;2)高有机肥施用量与撒播相结合(Y3F3)的方式,其土壤营养成分整体较佳;3)基于主成分分析,高有机肥施用量(羊板粪 $33\text{ m}^3/667\text{ m}^2$ +商品有机肥 $1.5\text{ t}/667\text{ m}^2$)+撒播处理的土壤养分和植物生长综合效果最好,但成本高;4)基于熵权TOPSIS法得出低有机肥施用量(羊板粪 $11\text{ m}^3/667\text{ m}^2$ +商品有机肥 $0.5\text{ t}/667\text{ m}^2$)+撒播处理最接近最优方案,指标相对接近度为0.704,其投入产出效率最高。【结论】从投入和产出的综合角度看,低有机肥施用量+撒播的经济效益最好,同时对植物群落生长、土壤改良效果较好。

关键词:高寒矿区;有机肥施用量;播种方式;主成分分析;熵权TOPSIS法

中图分类号:S158.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2023)02-0116-10

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2023.02.014



青藏高原是中国最大的高原,也是世界海拔最高的高原,有“世界屋脊”和“第三极”之称^[1],约占全球土壤碳库的2.5%,在全球碳循环中起着重要的作用^[2-4],是我国乃至亚洲重要的生态安全屏障。青藏高原草原占我国草原面积的44%^[5-6],木里矿区位于青藏高原祁连山南麓腹地,持续多年的煤炭开采形成了11个巨大的矿坑、19个由煤矸石堆积成的渣山,对高寒草地造成了毁灭性的破坏^[7-9]。煤渣山是露天开采中形成的结构松散、土壤粒径分布不均(其中岩石占比较大)、孔隙度较大的堆集体^[10],木里矿区由于多年采伐,煤渣山原有的植物群落已经消失殆尽,可用土壤深埋于煤渣山底部,煤渣山表层可利用土壤比例

较少,且由于海拔高,气候条件恶劣,植物生长季不足3个月,没有绝对无霜期,且年降水量较少,平均温度极低,自然生态恢复极其缓慢。

煤渣山生态修复的主要过程是平整地面、土体再造、土壤培肥、先锋植物种植^[11]等,表层土壤重构、植被恢复是煤渣山快速生态修复的关键环节^[12-14]。经过地貌重塑的煤渣山表层养分含量极低,不利于植物生长。培肥土壤是土壤重构的关键环节,一般采用种植绿肥作物后翻压、施用有机肥和化肥、使用土壤改良剂等方法增加土壤可用养分^[15]。羊板粪作为天然的有机肥料,能够增加土壤中的蛋白酶、脱氢酶、脲酶和纤维素酶活性,提高有机质含量和速效养分含量,改善微生物群落结构,对于生态恢复起着重要的作用^[16-17]。植被恢复是植物与环境相互影响、相互作用的过程,针对高寒矿区的植被恢复,大多选用抗寒、抗旱、耐贫瘠的草种,如青海草地早熟禾(*Poa pratensis*)、青海冷地早熟禾(*Poa crymophila*)、同德小花碱茅(*Puccinellia tenuiflora*)、中华羊茅(*Festuca sinensis*)、

收稿日期:2022-01-17;修回日期:2022-05-04

基金项目:青海省重点研究与转化计划(2021-SF-170)

作者简介:刘万杰(1993-),男,河南安阳人,硕士研究生。

E-mail:502154910@qq.com

*通信作者。E-mail: lipengzheng131@163.com

垂穗披碱草(*Elymus nutans*)等^[18]。播种方式有条播、穴播、撒播^[19],不同播种方式各有特点。条播一般采用机械播种,集开沟、播种、覆土、镇压于一体,省时省力,且播种均匀,行间距可控,但无株距;穴播具有播种均匀,通风透光性好,能充分利用土壤中的养分和水分^[20];撒播具有省时省力的特点,但种子在土壤表面,易遭到雨水冲刷和风力的影响,导致出苗不均匀。目前,牧草的播种方式主要以撒播为主,补播时通常采用穴播的方式,条播主要应用在粮食作物,不同的播种方式对粮食作物的株高、产量均有影响^[9]。本研究将不同的播种方式应用于矿区生态恢复中,探究其对植物生长的影响^[21-23]。

青海海西地区羊板粪含量巨大,大量的羊板粪被丢弃在围栏中^[24],因此本试验因地制宜,采用以羊板粪和商品有机肥改良煤渣山表土。在林草局提供的方案的基础上,进一步设置了不同播种方式和有机肥梯度,并且添加速效和缓效化肥的方法,重新构建植物群落、土壤,探究第一年矿区植物群落的生长特征、土壤的养分变化,以及经济效益,从而筛选出经济、适合的高寒矿区生态恢复措施。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

木里煤矿江仓矿区地处青藏高原东北端的祁连山中段南部地区。平均海拔4 100 m,高寒大陆性气候,只有冷暖季,最高气温为19.8℃,最低气温可达-34℃,年均气温-1.68℃,年降水量426~860 mm,主要集中在5-9月,该阶段降水量占全年降水量的

80%左右。土壤类型主要以高山灌丛草甸土和高山草甸土为主。高寒灌丛以金露梅(*Potentilla fruticosa*)为主。高寒草甸优势种群主要有矮生蒿草(*Kobresia humilis*)、线叶蒿草(*K. Capillifolia*)、高山蒿草(*K. pygmaea*)等,伴生种类主要有羊茅(*Festuca ovina*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、高原毛茛(*Ranunculus tanguticus*)等^[25]。

1.2 试验设计

试验于2021年6-9月进行。采用双因素(有机肥施用量×播种方式)随机区组设计。有机肥施用量设置3个水平,分别为低有机肥施用量(Y1):羊板粪11 m³/667 m²+商品有机肥0.5 t/667 m²;中有机肥施用量(Y2):羊板粪22 m³/667 m²+商品有机肥1.0 t/667 m²;高有机肥施用量(Y3):羊板粪33 m³/667 m²+商品有机肥1.5 t/667 m²。播种方式设置3个水平:分别为条播(F1,播种深度2 cm),穴播(F2,播种深度2 cm),撒播(F3)。两因素完全组合共9个处理,重复4次,共36个小区,小区面积20 m×2.5 m,以CK(不施肥,撒播)为对照。

播种前将煤渣山表层矿渣经过机械破碎后形成粒径<5 cm的砾石,然后压实,平整地面。2021年6月播种,供试5种牧草均来自青海牧科院,分别为青海冷地早熟禾(*Poa crymophila* cv. Qinghai)、青海草地早熟禾(*Poa pratensis* cv. Qinghai)、同德小花碱茅(*Puccinellia tenuiflora* cv. Tongde)、中华羊茅、垂穗披碱草,按草籽重量1:1:1:1:1混播,播种量180 kg/hm²,统一施入树脂包衣尿素136 kg/hm²、磷酸二胺83 kg/hm²。

表1 矿区裸地基本化学性质

Table 1 Basic chemical properties of bare land in mining area

类型	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH值
渣土	1.52	0.73	27.37	12.4	7.84	189.2	127.84	7.94

1.3 测定指标及方法

1.3.1 植物群落生长指标的测定 地上生物量:2021年9月7日进行采样,每小区随机选0.5 m×0.5 m的样方,齐地面刈割,将地上部分装入纸袋,105℃下杀青30 min,75℃下烘至恒重;

盖度:采用方格法:将10 cm×8 cm的方格架置于

植物上方,每个方格内植物群落面积超过50%记为1,统计其占总方格的比例;

植物群落高度:采用直尺测量地面到植物顶部的自然高度;

密度:将0.2 m×0.2 m样方内的植株带土挖出,数出全部株数,计算密度。

表2 有机肥的初始化学性质和含水率

Table 2 Initial chemical properties and moisture content of organic fertilizer

类型	全氮/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	有机质/(g·kg ⁻¹)	pH值	含水率/%
商品有机肥	1.11	0.374	1.3	40.08	7.93	16.53
羊板粪	2.31	1.234	1.673	35.47	6.07	37.19

1.3.2 土壤指标的测定 2021年9月7日,采用对角线五点取样法,将每个小区的土样去除石块、根系采回,测定土壤养分含量、有机质含量pH值。土壤养分测定参照鲍士旦^[26]的方法测定。pH值采用酸度计(雷磁PHS-2F)测定。

1.4 数据分析

通过Excel 2010进行数据整理,SPSS 23.0进行多因素方差分析、主成分分析、LSD进行多重比较,使用SPSSAU分析软件进行指标的权重分析,对各个指标进行归一化处理,同时采用TOPSIS方法综合评分(对指标的数据进行归一化处理,可以降低不同指标单位不一造成的影响,然后根据实际情况对不同指标做正向化处理和逆向化处理,同时计算各个指标的权重,将处理后的数据与指标权重相乘,得到新的数据后利用TOPSIS法进行排序),对投入和产出进行综合评价,用Origin 2018作图。

2 结果与分析

2.1 有机肥施用量和播种方式对矿区植物群落生长的影响

有机肥施用量对植物群落高度、盖度、地上生物

量均有极显著影响,对密度没有显著影响(表3)。随着有机肥施用量的增加,植物群落高度、盖度、生物量呈现增加的趋势,与中等有机肥施用量相比,继续增加有机肥,植物群落高度、盖度、地上生物量没有显著增加。中、高有机肥施用量的植物群落高度(20.66 cm、21.02 cm)显著高于低有机肥施用量17.38 cm($P < 0.05$);不同有机肥施用量的盖度范围为95.07%~99.37%,中、高有机肥施用量的盖度显著高于低有机肥施用量($P < 0.05$);中、高有机肥施用量的地上生物量(395.40 g/m²、398.69 g/m²)显著高于低有机肥施用量292.17 g/m²($P < 0.05$)。

不同播种方式对植物群落高度、密度、盖度、地上生物量均有显著影响(表3)。播种撒播的植物群落高度23.01 cm显著高于条播的18.65 cm和穴播的17.41 cm($P < 0.05$);穴播的密度1960株/m²显著低于条播的8460株/m²和撒播的8780株/m²($P < 0.05$);撒播的盖度最大,为99.24%,显著高于条播的97.22%和穴播的96.72%($P < 0.05$);撒播的地上生物量最大为440.71 g/m²,显著高于条播的336.75 g/m²和穴播的308.81 g/m²($P < 0.05$)。

有机肥施用量和播种方式交互作用的CK(不施

表3 有机肥施用量和播种方式对矿区草地植物群落生长特征的影响

Table 3 Effects of application amount of organic fertilizer and sowing method on the growth characteristics of grassland plant community in mining area

因素	水平	植物群落高度/cm	密度/(株·m ⁻²)	盖度/%	地上生物量/(g·m ⁻²)
有机肥施用量	低	17.38 ^b	6668 ^a	95.07 ^b	292.17 ^b
	中	20.66 ^a	7271 ^a	98.74 ^a	395.40 ^a
	高	21.02 ^a	5264 ^a	99.37 ^a	398.69 ^a
播种方式	条播	18.65 ^b	8464 ^a	97.22 ^b	336.75 ^b
	穴播	17.41 ^b	1960 ^b	96.72 ^b	308.81 ^b
	撒播	23.01 ^a	8780 ^a	99.24 ^a	440.71 ^a
方差分析	有机肥施用量	**	NS	**	**
	播种方式	**	**	*	**
	有机肥施用量×播种方式	**	NS	**	**

注:*和**分别表示不同水平在0.05和0.01水平上差异显著。下表同

肥,撒播)出苗后不久即停止生长死亡,说明原始土壤的营养不能满足植物生长的需要。交互作用显著影响植物群落高度、盖度、地上生物量,而对植株的密度无显著影响(表3)。由图1可知,Y1F3的植物群落高度最高,除了Y2F3、Y3F1和Y3F3外,显著高于其他处理($P<0.05$);Y1F2的盖度最低,为92.42%,其次为Y1F1,显著低于其他处理($P<0.05$)。但中有机肥施用量的3个处理、高有机肥施用量的3个处理和Y1F3之间的盖度差异均不显著;不同施肥量的撒播

地上生物量之间无显著差异,Y1F3、Y2F3、Y3F1和Y3F3的地上生物量在所有处理中是较高的,但是他们之间差异不明显,其中Y1F3地上生物量较Y1F1、Y1F2平均增加了118.73%、85.08%。综上所述,处理Y1F3的植物群落高度、盖度和地上生物量均最优,均显著高于Y1F1、Y1F2($P<0.05$),与Y3F3无显著差异,说明低有机肥施用量和撒播的方式可以满足第一年植物生长的需要。

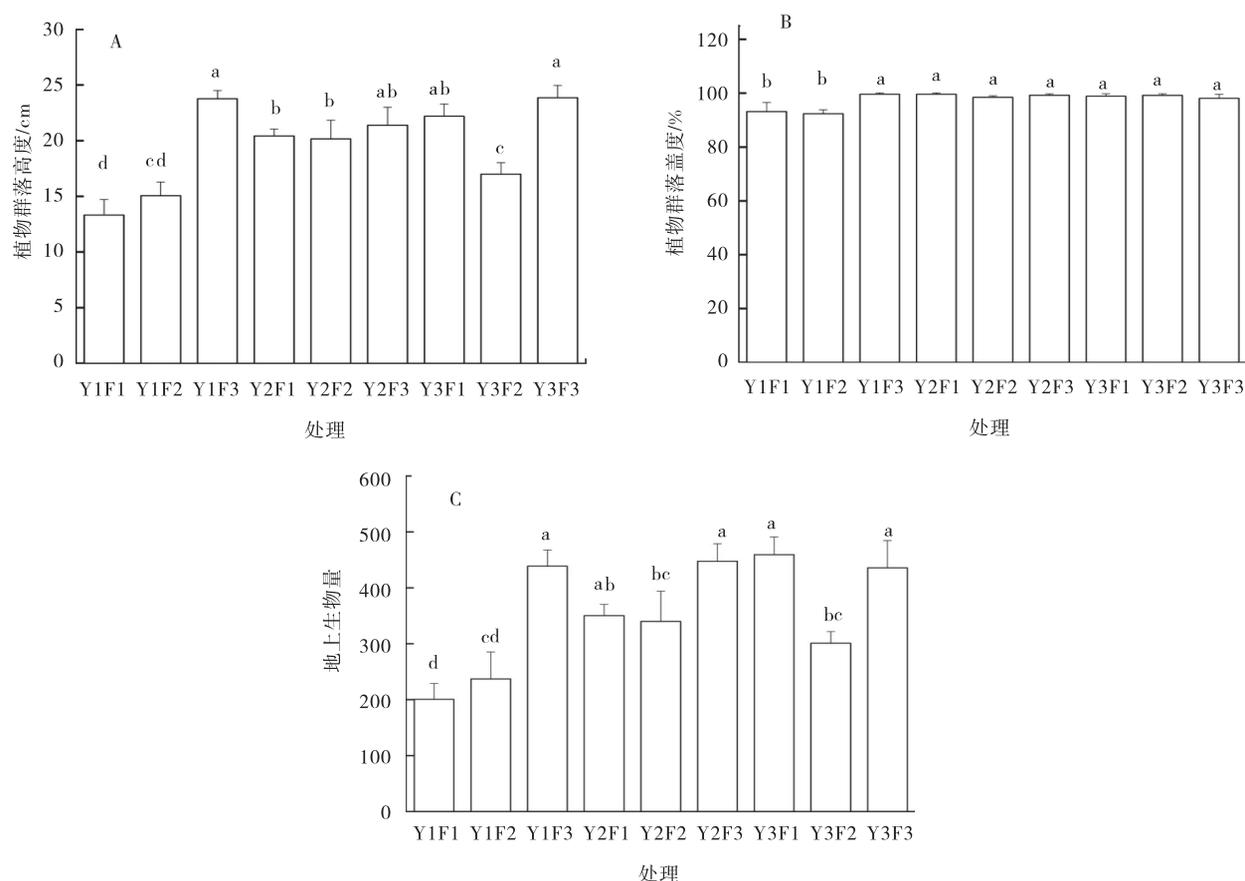


图1 有机肥施用量和播种方式对植物群落高度、盖度、地上生物量的影响

Fig. 1 The influence of application amount of organic fertilizer and sowing method on vegetation height, coverage and aboveground biomass

注:不同小写字母表示不同处理差异显著($P<0.05$),下同

2.2 有机肥施用量和播种方式对矿区土壤养分的影响

随着有机肥施用量的增加,土壤的全氮、全磷、碱解氮、速效磷、速效钾含量呈现逐渐增加的趋势(表4);有机肥施用量对pH值没有显著影响,对其他指标均有显著影响($P<0.05$);低、中、高有机肥施用量的土壤全氮含量分别为5.11、7.48、9.26 g/kg,较初始含量(1.52 g/kg)分别增加了236.18%、392.11%、509.21%。随着有机肥施用量的增加,碱解氮含量呈

现增加的趋势,中、高有机肥施用量比低有机肥施用量分别增加了43.06%、54.41%,但中、高有机肥施用量之间无显著差异;低、中有机肥施用量的全钾、有机质含量之间无显著差异。

播种方式对碱解氮含量无显著影响,对其他指标均有显著影响;条播、穴播、撒播的全氮含量之间均有显著差异($P<0.05$),条播的全氮含量最低,为6.23 g/kg,穴播和撒播相比于条播的全氮含量分别增加了17.01%、33.70%。

表 4 有机肥施用量和播种方式对土壤养分含量的影响

Table 3 The effect of application amount of organic fertilizer and sowing method on soil nutrients

因素	水平	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	全钾/ (g·kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	有机质/ (g·kg ⁻¹)	pH值
有机肥施用量	低	5.11 ^c	1.69 ^c	19.41 ^a	233.00 ^b	47.55 ^c	298.33 ^c	216.30 ^b	7.68 ^a
	中	7.48 ^b	2.50 ^b	18.97 ^a	333.33 ^a	72.14 ^b	493.78 ^b	220.84 ^b	7.68 ^a
	高	9.26 ^a	3.29 ^a	17.47 ^b	359.78 ^a	97.33 ^a	690.33 ^a	260.61 ^a	7.74 ^a
播种方式	条播	6.23 ^c	2.07 ^b	18.87 ^a	284.89 ^a	60.06 ^b	437.11 ^b	227.91 ^{ab}	7.78 ^a
	穴播	7.29 ^b	2.47 ^b	19.19 ^a	319.11 ^a	69.70 ^b	515.00 ^a	220.86 ^b	7.68 ^{ab}
	撒播	8.33 ^a	2.96 ^a	17.80 ^b	322.11 ^a	87.28 ^a	530.33 ^a	248.98 ^a	7.64 ^b
方差分析	有机肥施用量	**	**	**	*	**	**	**	NS
	播种方式	**	**	*	NS	**	*	NS	*
	有机肥施用量×播种方式	NS	NS	**	NS	*	NS	**	NS

有机肥施用量和播种方式的交互作用对全钾、速效磷、有机质含量均有显著影响,对其他营养成分含量的影响差异不显著,但整体上的趋势是高有机肥施用量和撒播(Y3F3)的处理方式下各营养成分含量较高(表4)。Y1F2处理的全钾含量最高,为21.87 g/kg,与Y2F1差异不显著外,均显著高于其他处理($P < 0.05$);Y3F3处理的全钾含量最低,为17.02 g/kg,但与Y1F1和Y3F2处理差异不显著(图2-A)。Y3F3

处理的速效磷含量最高,为90.66 mg/kg,除了与Y3F1和Y3F2处理差异不显著外,显著高于其他处理($P < 0.05$);Y1F2处理的速效磷含量最低,为34.83 mg/kg,但与Y1F1和Y2F1处理差异不显著(图2-B)。Y3F3处理的有机质含量显著高于其他处理,为256.93 g/kg;Y1F2处理的有机质含量最低,为190.08 g/kg,与Y1F1、Y3F2和Y3F3处理差异显著外,与其他处理差异均不显著(图2-C)。

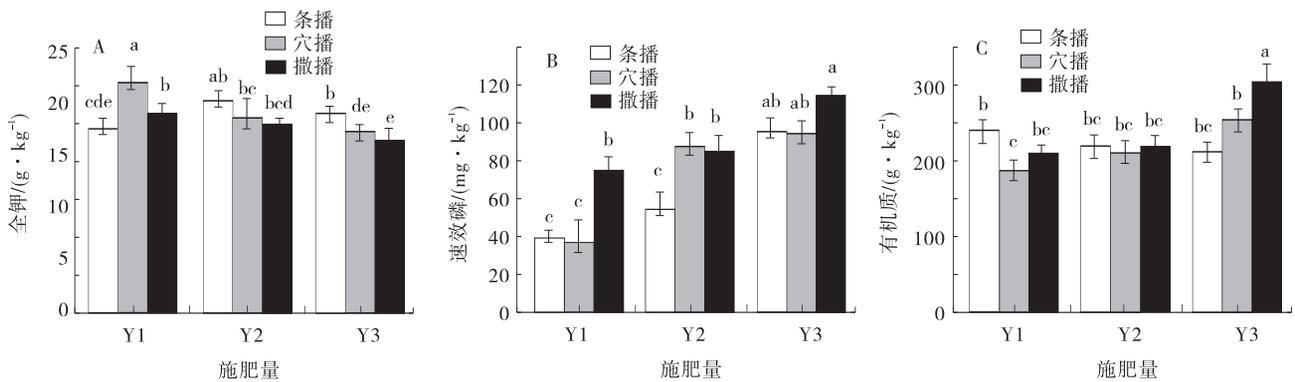


图 2 有机肥施用量和播种方式对全钾、速效磷、有机质含量的影响

Fig. 2 Effects of application amount of organic fertilizer and sowing method on total potassium, available phosphorus and organic matter

2.3 不同处理下土壤养分和植物群落生长指标的主成分分析

对9个处理的土壤养分含量和植物群落高度、盖度、地上生物量进行主成分分析(表5),标准化处理后计算,筛选出3个主成分,特征值分别为6.09、1.95、1.03;方差贡献率分别为55.37%、17.70%、9.38%;累积方差贡献率达到82.45%,超过80%,说明这3个主成分涵盖了土壤养分和植物生长特征指标的绝大部分信息。

对不同处理的土壤养分和植物群落生长指标进

表 5 土壤养分指标和植株生长指标的3个主成分的特征值及方差贡献率

Table 5 Eigenvalues and variance contribution rate of three principal components of soil nutrient index and plant growth index

主成分	特征值	方差贡献率%	累积方差贡献率%
1	6.09	55.37	55.37
2	1.95	17.70	73.07
3	1.03	9.38	82.45

行主成分分析(表 6),根据每个主成分的方差贡献率计算综合评价得分,综合得分处理大小排序 Y3F3>Y3F1>Y2F3>Y3F2>Y2F2>Y1F3>Y2F1>Y1F1>Y1F2,其中分数最高的是 Y3F3,为 1.70,说明其土壤养分含量和植物生长状况综合效果最好,最低的是 Y1F2,说明其土壤养分和植物生长状况在所有处理中的综合效果较差。

表 6 不同处理的土壤养分和植物群落生长指标综合评价得分

Table 6 Comprehensive evaluation scores of soil nutrient and plant community growth indicators under different treatments

处理	主成分 1 得分	主成分 2 得分	主成分 3 得分	综合得分
Y1F1	-3.33	-1.57	-1.22	-2.24
Y1F2	-4.18	-0.07	0.13	-2.31
Y1F3	0.03	1.83	-0.24	0.32
Y2F1	-0.92	0.99	0.26	-0.31
Y2F2	0.75	0.29	0.29	0.49
Y2F3	1.08	0.54	0.52	0.74
Y3F1	1.31	0.82	0.60	0.93
Y3F2	1.79	-2.33	1.14	0.69
Y3F3	3.48	-0.51	-1.49	1.70

2.4 对土壤养分、植物生长指标和投入的综合评价

撒播、条播皆为机械播种,机械播种费用包括机械旋耕 1 200 元/hm²、机械播种的费用 1 200 元/hm²;穴播为人工播种,播种费用为 2 400 元/hm²;无纺布包舍材料费 3 600 元/hm²和人工铺设成本 5 250 元/hm²。

从表 7 可以看出,低有机肥施用量条播、撒播的总成本为 65 880 元/hm²,中有机肥施用量的为 110 430

元/hm²,高肥量的为 154 980 元/hm²;穴播的低、中、高有机肥施用量总费用为 67 080、111 630、156 180 元/hm²。

对地上生物量、盖度、全氮、全磷、全钾、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾含量用熵权法计算权重,对数据进行标准化处理,采用 Z-score 归一化进行数据处理。含有的信息越多,说明离散程度越大,权重越大。权重大小为成本投入>全氮>全钾>全磷>速效钾>有机质>碱解氮>速效磷>地上生物量>植物群落高度>盖度。其中成本投入所占权重最大,为 13.22%,其次为全氮所占权重 11.26%(表 8)。

对各项投入产出进行标准化处理,其中土壤养分和植物生长特征指标作为产出进行正向化处理,有机肥施用量作为投入负向化处理,再对所有的投入产出进行归一化处理,利用熵权 Topsis 计算出排名。每个处理接近最优方案的程度,接近最优方案程度越大,排名越高。

从表 9 可以看出,Y1F3 的相对接近度最大,说明该方案的投入和产出效率最大,是目前所有处理中,投入和产出比例最适宜的,其次是处理 Y2F3 和 Y2F2;在同样的投入情况下,撒播的产出大于穴播和条播。

3 讨论

3.1 有机肥施用量和播种方式对高寒矿区植物群落生长的影响

木里矿区的生长环境主要是高海拔、全年平均温

表 7 不同处理的总投入成本

Table 7 Total input cost of different treatments

处理	机械破碎/ (元·hm ⁻²)	播种/ (元·hm ⁻²)	草种/ (元·hm ⁻²)	羊板粪/ (元·hm ⁻²)	商品有机肥/ (元·hm ⁻²)	化肥/ (元·hm ⁻²)	无纺布/ (元·hm ⁻²)	总成本/ (元·hm ⁻²)
Y1F1	6 000	2 400	3 285	36 300	8 250	795	8 850	65 880
Y1F2	6 000	3 600	3 285	36 300	8 250	795	8 850	67 080
Y1F3	6 000	2 400	3 285	36 300	8 250	795	8 850	65 880
Y2F1	6 000	2 400	3 285	72 600	16 500	795	8 850	110 430
Y2F2	6 000	3 600	3 285	72 600	16 500	795	8 850	111 630
Y2F3	6 000	2 400	3 285	72 600	16 500	795	8 850	110 430
Y3F1	6 000	2 400	3 285	108 900	24 750	795	8 850	154 980
Y3F2	6 000	3 600	3 285	108 900	24 750	795	8 850	156 180
Y3F3	6 000	2 400	3 285	108 900	24 750	795	8 850	154 980

表8 评价指标权重
Table 8 Evaluation index weight

指标类型	指标名称	指标权重
植物生长	地上生物量	6.59%
	盖度	4.54%
	植物群落高度	6.30%
土壤养分	全氮含量	11.26%
	全磷含量	8.76%
	全钾含量	8.89%
	碱解氮含量	8.39%
	速效磷含量	6.65%
	速效钾含量	8.59%
	有机质含量	8.45%
经济	成本投入	13.22%

表9 不同处理的投入、产出综合排名分析表

Table 9 Comprehensive ranking analysis of input and output of different treatments

处理	正理想解距离	负理想解距离	相对接近度	排序
Y1F1	0.73	0.588	0.446	8
Y1F2	0.854	0.575	0.402	9
Y1F3	0.328	0.779	0.704	1
Y2F1	0.535	0.495	0.48	7
Y2F2	0.399	0.645	0.618	3
Y2F3	0.365	0.692	0.655	2
Y3F1	0.607	0.657	0.52	5
Y3F2	0.608	0.655	0.519	6
Y3F3	0.575	0.854	0.598	4

注:正理想解距离表示评价指标的最大值,负理想解距离表示评价指标的最小值,相对接近度表示评价对象与最优方案的接近程度,该值越大说明越接近最优方案

度-1.68℃、植被脆弱、属于盐碱地,另外矿区植物种子的收集和整理困难,在已有的高寒矿区的种属中筛选出应人工繁种的多年生矮草品种:青海草地早熟禾、青海草地早熟禾、同德小花碱茅、中华羊茅、垂穗披碱草,通过一个生长季的生长,植物群落高度、盖度、地上生物量范围分别为13.33~23.87、92.42~99.62%、50.15~114.82 g/m²。江仓矿区附近的天然草地高度、盖度、地上生物量分别是19 cm、94.25%、25 g/m²[15],从植物的生长情况相比,低、中、高有机肥施用量的盖度均已达到天然草地的盖度,且地上生物

量均高于天然草地。主要原因可能是原始矿渣中缺乏植物生长所需的养分,增加有机肥施用量可以增加牧草的产量、盖度、株高^[27-29]。但有机肥施用量并不是越多越好,在增加到一定程度以后,继续增加有机肥量并不会促进植物的生长,这与贾倩民^[30]和李成泉^[31]的研究结果一致。本研究发现限制植物生长的主要因素是土壤养分含量,在中有机肥施用量时,土壤养分已经能够满足植物生长,限制植物生长的主要因素已经变成温度、光照、空间等因素^[32]。穴播的植物群落高度、盖度、生物量均显著小于撒播,这与梁翠丽的研究^[23]不一致,可能是因为穴播的每穴中的种子量大,植物群落竞争激烈,苗期影响植物生长的因素为空间,最终影响了牧草的产量^[33-34]。通过有机肥替代土壤,有机肥和无机肥相结合的方法,中有机肥施用量和高有机肥施用量的植物群落生长无显著差异,但不同有机肥和播种方式是否影响第二年植物群落的返青状况有待验证。

3.2 有机肥施用量和播种方式对高寒矿区土壤养分的影响

高寒矿区煤渣山的土壤中严重缺少植物生长所需的养分,本研究表明CK(不施肥+撒播),仅播种种子,养分只能满足植物发芽需要,后期植物全部死亡。添加有机肥可以快速增加土壤中有机质、速效氮、速效磷、速效钾的含量^[35-38],;低、中、高有机肥施用量经过一个生长季后的土壤全氮含量分别为5.11、7.48、9.26 g/kg,较初始含量(1.52 g/kg)分别增加了236.18%、392.11%、509.21%,但是中有机肥施用量继续增加有机肥用量,土壤中的全氮、全磷含量不会显著增加^[39],这可能是因为有机肥存在报酬递减规律(当施肥量超过一定范围时,产量增加速率减慢,直至停止甚至产量开始下降)。有机肥除了含有多种养分,还有大量的有机质和微量元素,这些物质能够改善微生物的生长环境,提高土壤肥力、有机质含量,对土壤微生物的浓度、种类起着重要作用^[40-41]。而且有机肥并非越多越好,肥料利用率和养分平衡都应考虑,养分平衡对于指导高寒矿区有机肥施用量有着重要意义。播种方式对土壤养分的影响研究较少,本文中条播的全氮含量最低,为6.23 g/kg,穴播和撒播相比于条播的全氮含量分别增加了17.01%、33.70%,这可能是因为高寒矿区雨季,条播的行距之间形成

了小范围的径流,造成部分养分流失。

3.3 有机肥施用量和播种方式对土壤养分、植物群落生长、投入的综合评价

植物的生长需要适宜的养分浓度^[42],矿区的生态修复同样需要合适的有机肥用量,同样也要考虑植物生长、土壤养分和经济效益之间的平衡。针对北方农牧交错带沙化土地植被恢复进程缓慢和沙尘源植被恢复潜力评价困难的问题,陈英义等^[43]对地形、气候、土壤、植物群落和人为活动5个方面的12个指标开展了植物恢复潜力的评估,为确定沙尘源植被恢复的优先顺序提供决策依据。本研究通过熵权TOPSIS综合评价法对土壤养分8项指标、植物生长3个指标、经济投入1个指标进行了综合评价,每个处理接近最优方案程度越大,排名越高,结果表明:处理Y1F3(低有机肥施用量,羊板粪11 m³/亩+商品有机肥0.5 t/667 m²+撒播)的投入产出效率最高,指标接近程度为0.704,投入成本65 880元/hm²,是所有处理中最低的,说明在当前所有的处理中,处理Y1F3的植物生长、土壤养分和成本投入的综合效益最高。

4 结论

通过有机肥改良土壤的方法在青海木里矿区设置双因素完全随机区组试验,探究不同有机肥施用量和播种方式对高寒矿区植物群落的生长特征和土壤养分的影响,并对其投入和产出进行综合评价。结果表明:低有机肥施用量与撒播相结合(Y1F3),其植物群落高度、盖度和地上生物量均最优;高有机肥施用量与撒播相结合(Y3F3),其土壤营养成分较佳;不同处理下土壤养分和植物群落生长指标的主成分分析显示高有机肥施用量及撒播的方式(Y3F3)对土壤养分和植物生长综合效果最好,但是投入成本高;利用熵权法对不同处理的投入和产出(土壤养分、植物群落生长指标)进行综合评价,结果显示低有机肥施用量和撒播的组合(Y1F3)在所有处理的投入产出中综合效益最高。该试验结果可为高寒矿区生态恢复提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] Qiu J. The third pole [J]. *Nature*, 2008, 454 (7203): 393-396.
- [2] Piao S L, Tan K, Nan H J, *et al.* Impacts of climate and

CO₂ changes on the vegetation growth and carbon balance of Qinghai - Tibetan grasslands over the past five decades [J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 98-99: 73-80.

- [3] Zhao L, Li Y, Xu S, *et al.* Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai - Tibetan plateau [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 1940 - 1953.
- [4] Genxu W, Ju Q, Guodong C, *et al.* Soil organic carbon pool of grassland soils on the Qinghai - Tibetan Plateau and its global implication [J]. *Science of the total environment*, 2002, 291(1-3): 207 - 217.
- [5] Scurlock J M O, Hall D O. The global carbon sink: a grassland perspective [J]. *Global Change Biology*, 1998, 4: 229 - 233.
- [6] Tan K, Cia S P, Piao S L, *et al.* Application of the ORCHIDEE global vegetation model to evaluate biomass and soil carbon stocks of Qinghai - Tibetan grasslands [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24: GB1013.
- [7] 白中科,赵景逵,李晋川,等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例 [J]. *生态学报*, 1999, 19(6): 870-875.
- [8] 白中科,郭青霞,王改玲,等. 矿区土地复垦与生态重建效益演变与配置研究 [J]. *自然资源学报*, 2001(6): 525-530.
- [9] 杨勤学,赵冰清,郭东罡. 中国北方露天煤矿区植物群落恢复研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2015, 34(4): 1152-1157.
- [10] 刘福明,才庆祥,周伟,等. 露天矿排土场边坡降水入渗规律试验研究 [J]. *煤炭学报*, 2015, 40(7): 1534-1540.
- [11] 吴维,汪溪远,师庆三,等. 不同生态修复措施基于DEA模型的综合效率评价——以新疆准东矿区为例 [J]. *矿业研究与开发*, 2020, 40(10): 141-148.
- [12] 王洪丹,王金满,曹银贵,等. 黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响 [J]. *生态学报*, 2016, 36(16): 5098-5108.
- [13] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, *et al.* Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review [J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 191: 12-25.
- [14] 项元和,于晓杰,魏勇明. 露天矿排土场生态修复与植被重建技术 [J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(S1): 48-54.
- [15] 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物群落和土壤恢复效果研究 [J]. *草业学报*,

- 2021,30(8):98-108.
- [16] 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酶活性和理化性质的影响[J].草地学报,2021,29(8):1748-1756.
- [17] 金立群,李希来,宋梓涵,等.高寒矿区植物群落恢复对渣山表层基质的响应[J].草业科学,2018,35(12):2784-2793.
- [18] 景美玲,马玉寿,李世雄,等.大通河上游16种多年生禾草引种试验研究[J].草业学报,2017,26(6):76-88.
- [19] 胡月.地下滴灌条件下覆膜、穴播对苜蓿种子产量的影响[D].呼和浩特:新疆农业大学,2017.
- [20] 刘苏伟.流体穴播自动排种装置设计及试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [21] 陈留根,刘红江,沈明星,等.不同播种方式对小麦产量形成的影响[J].江苏农业科学,2015,31(4):786-791.
- [22] 刘强,比拉力·艾力,王冀川,等.不同播种方式与密度对滴灌冬小麦干物质积累及光合特性的影响[J].塔里木大学学报,2021,33(1):66-76.
- [23] 梁翠丽,田向东,海江波,等.播种密度与播种方式对小麦不同穗位结实特性及产量的影响[J].西北农业学报,2021,30(6):796-806.
- [24] 安国荣,张明,周冰,等.ICP-MS检测青海省海西州地区羊板粪中的重金属元素含量[J].光谱实验室,2012,29(3):1912-1914.
- [25] 肖莲桂,石明章.1961—2015年天峻地区极端降水变化趋势[J].青海农林科技,2016(4):52-55.
- [26] 鲍士旦.土壤农化分析(第三版)[M].北京:中国农业出版社,2005.
- [27] Holmes P M. Shrubland restoration following woody alien invasion and mining: Effects of topsoil depth, seed source, and fertilizer addition [J]. Restoration Ecology, 2001,9(1):71-84.
- [28] 葛庆征,魏斌,张灵菲,等.草地恢复措施对高寒草甸植物群落的影响.草业科学,2012,29(10):1517-1520.
- [29] Borges B M M N, Bordonal R D, Silveira M L, *et al.* Short-term impacts of high levels of nitrogen fertilization on soil carbon dynamics in a tropical pasture [J]. Catena, 2019,174:413-416.
- [30] 贾倩民.农牧交错区弃耕地施肥对牧草生长及生态特征的影响[D].银川:宁夏大学,2014.
- [31] 李成泉.高寒地区追施有机肥对栽培牧草产量的影响[J].青海农林科技,2012(3):15-17+73.
- [32] 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 [J]. Ecological Engineering, 2018, 124:23-30.
- [33] 周强,李生荣,陶军,等.杂交小麦品种绵杂麦168稀植高效栽培技术初探[J].中国农学通报,2009,25(21):166-169.
- [34] 柴芳梅,高甜甜,柴守玺,等.种植密度对甘肃不同生态区小麦产量形成的影响[J].作物杂志,2020(3):154-160.
- [35] 王丽红,庄长楠,孙兴智,等.生物有机肥对牧草生长及其产量影响研究[J].中国农机化学报,2015,36(4):242-244.
- [36] 明广增,徐建国,刘向国.有机肥施用量对‘映霜红’桃果品质及土壤养分的影响[J].北方果树,2021(5):9-12.
- [37] 朱志炎,梁雪雁,林凤玲,等.有机肥对香蕉枯萎病及土壤主要理化性质和微生物群落的影响[J].福建农业学报,2021,36(7):806-816.
- [38] 冯鹏艳,梁利宝.施肥对采煤塌陷区复垦土壤理化性质和磷分级的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):229-233.
- [39] 王琦,全占军,韩煜,等.风沙区采煤塌陷不同恢复年限土壤理化性质变化[J].水土保持学报,2014,28(2):118-122+126.
- [40] 张密密,陈诚,刘广明,等.适宜肥料与改良剂改善盐碱土壤理化特性并提高作物产量[J].农业工程学报,2014,30(10):91-98.
- [41] Romantschuk M, Sarand I, Petanen T, *et al.* Means to improve the effect of insitu bioremediation of contaminated soil: an overview of novel approaches [J]. Environ Pollut, 2000,107: 179-185.
- [42] 宋双双,孙保平,张建锋,等.保水剂与微生物菌剂对土壤水分、养分的影响[J].干旱区研究,2018,35(4):761-769.
- [43] 陈英义,李道亮.北方农牧交错带沙尘源植物群落恢复潜力评价模型研究[J].农业工程学报,2008(3):130-134.

Effects of application amount of organic fertilizer and sowing methods on plant community growth and soil nutrients in alpine mining areas

LIU Wan-jie, JIANG Fu-zhen, MA Li-li, LI Zheng-peng*

(Academy of agricultural and Forestry Sciences, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: 【Objective】 The aim of the study is to explore suitable ecological restoration measures in alpine mining areas. 【Method】 Through the method of replacing soil with sheep board manure and improving soil with organic fertilizer, a two factor complete randomized block experiment was set up in Muli mining area, Qinghai Province, to explore the effects of different organic fertilizer application rates (low, medium and high) and three sowing methods (sowing in line, hole sowing and sow broadcast) on the growth characteristics of plant communities and soil nutrients in alpine mining areas, and to comprehensively evaluate their input and output. 【Result】 1) The height, coverage and aboveground biomass of plant community were the best in the way of combining low organic fertilizer amount with broadcast sowing (Y1F3). 2) Under the combination of high organic fertilizer and broadcast sowing (Y3F3), the overall soil nutrient composition was good. 3) Based on principal component analysis, high organic fertilizer and broadcast sowing Y3F3 (sheep board dungis $33 \text{ m}^3/667 \text{ m}^2$ + commercial organic fertilizer $1.5 \text{ t}/667 \text{ m}^2$) had the best comprehensive effect on soil nutrients and plant growth, but the cost was high. 4) Based on the entropy weight TOPSIS method, it was concluded that the low organic fertilizer application amount (sheep manure $11 \text{ m}^3/667 \text{ m}^2$ + commercial organic fertilizer $0.5 \text{ t}/667 \text{ m}^2$) with broadcast treatment was the closest to the optimal scheme, and the relative proximity of the index was 0.704. Its input-output efficiency was the highest. 【Conclusion】 Therefore, from the comprehensive perspective of input and output, low application amount of organic fertilizer with broadcast sowing had the best economic benefit, and had a good effect on plant community growth and soil improvement. The results of this study could provide a reference basis for soil improvement and vegetation restoration in Alpine mining areas.

Key words: alpine mining area; application amount of organic fertilizer; sowing methods; principal component analysis; entropy weight TOPSIS method