

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2020.04.025

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. 土壤, 2020, 52(4): 831–839.

## 高寒矿区排土场不同坡向植被和土壤特征研究<sup>①</sup>

金立群<sup>1,2</sup>, 李希来<sup>1,4\*</sup>, 孙华方<sup>1</sup>, 张 静<sup>1,4</sup>, 周 伟<sup>3</sup>

(1 青海大学农牧学院, 西宁 810016; 2 青海湟源县草原站, 西宁 812100; 3 中国地质大学土地科学技术学院, 北京 100083; 4 青海-广东自然资源监测与评价联合实验室, 西宁 810016)

**摘 要:** 针对高寒矿区排土场人工植被恢复问题, 选取青海江仓矿区南北 2 个排土场的 4 个坡面(南坡、北坡、东南坡与东坡)为研究对象, 进行了不同坡向立地条件下植被与土壤的调查分析。结果显示: 除幼苗高度外, 不同坡向植被高度、盖度、地上生物量、生殖枝数量具有显著差异( $P<0.05$ ), 东南坡与南坡(阳坡)长势较好。土壤全氮、有效磷含量及 pH 在不同坡向差异不显著( $P>0.05$ ), 土壤全磷、碱解氮、速效钾、有机质、含水量在不同坡向具有显著差异( $P<0.05$ )。北坡土壤有机质含量比其他 3 个坡面平均高出 127.95 g/kg( $P<0.05$ ), 土壤含水量在北坡与东坡(阴坡)显著高于南坡与东南坡( $P<0.05$ )。土壤细菌与放线菌数量在东南坡显著高于其他 3 个坡面( $P<0.05$ )。利用随机森林方法得出, 土壤细菌数量、含水量、碱解氮含量、全磷含量、有机质含量及植被高度是影响露天煤矿排土场不同坡向立地条件下植被与土壤特性的主要因子。因此, 为减小矿区排土场复绿过程中坡向不同带来的影响, 在人工建植初期应加大东坡与北坡(阴坡)的种子播量, 适时追施氮肥, 并选择加厚无纺布( $>50\text{ g/m}^2$ )覆盖。

**关键词:** 江仓矿区; 人工建植; 坡向; 植被特征; 土壤理化性质

**中图分类号:** S154.4; S812.6; S812.2 **文献标志码:** A

## Characteristics of Vegetations and Soils Under Different Aspects of Slag Mountain in Alpine Mining Area

JIN Liqun<sup>1,2</sup>, LI Xilai<sup>1,4\*</sup>, SUN Huafang<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1,4</sup>, ZHOU Wei<sup>3</sup>

(1 College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China; 2 Qinghai Huangyuan County Grassland Station, Xining 812100, China; 3 College of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4 Qinghai-Guangdong Joint Laboratory of Natural Resources Monitoring and Evaluation, Qinghai University, Xining 810016, China)

**Abstract:** Aiming at artificially restoring vegetation in an alpine mine-dump area in Qinghai, four aspects (southeast, south, north and east) at two dumps in the Jiangcang mining area, Qinghai, were selected as the study plots, and their characteristics of artificial vegetations and soils were investigated and analyzed. The results showed that at different aspects, there were significant differences ( $P<0.05$ ) in vegetation height, coverage, aboveground biomass, and the number of reproductive branches except seedling height. Vegetation on the southeast and south aspects (sunny aspect) grew better than on other aspects. There was no significant difference in soil total N, available P contents and pH among the different aspects. Soil total P and available N, available K, organic matter and moisture showed significant differences ( $P<0.05$ ) among different aspects. Organic matter content on the north aspect was 127.95 g/kg higher than other three aspects ( $P<0.05$ ), soil moistures on the north and east aspects were significantly higher than on the south and southeast ones ( $P<0.05$ ). The populations of soil bacteria and actinomycetes were significantly higher on the southeast aspect than on the other aspects ( $P<0.05$ ). Results of Random Forest analysis revealed that soil bacteria, water content, available N, total P, height of vegetation and soil organic matter content were the main influencing factors of the characteristics of vegetation and soil in the open-cast coal mine drainage field. Therefore, in order to reduce the impacts of different aspects in the re-greening process of the mine drainage area, the quantity of seeds sowed on east and north

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金项目(41977415, 41867073)、高等学校学科创新引智计划项目(D18013)和教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT\_17R62)资助。

\* 通讯作者(xilai-li@163.com)

作者简介: 金立群(1993—), 女, 青海西宁人, 博士研究生, 主要从事高寒草甸生态学和高原生态修复研究。E-mail: 961172566@qq.com

aspects (shady aspect) should be increased at the initial stage of artificial planting, nitrogen fertilizer should be applied in time, and thick non-woven fabric ( $>50 \text{ g/m}^2$ ) should be used to cover the field to boost seed germination rate.

**Key words:** Jiangcang mining area in Qinghai; Artificial vegetation and planting; Aspect; Vegetation characteristics; Physicochemical properties of soil

煤炭是支撑社会经济发展的主要能源之一<sup>[1]</sup>,但露天煤矿的开采造成了以水土资源为核心的生态环境破坏,使整个矿区生态系统极端恶化,且难以恢复<sup>[2-3]</sup>。相关研究表明,目前全球因采矿而破坏的土地约为 670 万  $\text{hm}^2$ ,中国约有 140~200 万  $\text{hm}^2$ ,并以每年 4 万  $\text{hm}^2$  的速度递增且复垦率仅 13.3%,与国外发达国家 75% 的复垦率差距较大<sup>[4]</sup>。开采前未对草地、农田的表层土进行剥离、存储,加大了复垦难度。国内外矿区复垦主要集中在低海拔平原、盆地及黄土高原地区<sup>[5]</sup>,对青藏高原矿区的研究较少,特别是人工植被恢复。

木里煤田位于高海拔、气候寒冷、生态条件恶劣的青海省海北州,2003 年开始进行开矿生产原煤,且产量逐年递增。采煤占据了大量的天然湿地面积,尤其开采过程中形成了大量的地下冻土、岩土、岩石与煤矸石机械堆积的排土场山<sup>[6]</sup>,其无序堆放不仅破坏和占用大量湿地资源,而且其结构松散,地层层序紊乱,土量稀少,无保水保肥能力,严重缺乏植物生长所需要的营养物质,植物很难定居生长<sup>[7-8]</sup>。因此,在青藏高原进行矿区生态重建对恢复受损的土壤和植被具有重大意义,通过人工植被建植,能够有效提高草地生态系统的功能<sup>[9]</sup>。

排土场修复是通过再造土壤形成良好的土壤结构和层次,提供植物生长必备的土壤生境,而植被恢复能够改善露天煤矿区排土场表层基质结构和肥力,是排土场土壤形成的必要条件<sup>[10]</sup>,也是露天煤矿区排土场土壤重构的重要内容,不仅起着构建矿区排土场初始植被的作用,还能从而促进整个生态系统结构和功能的恢复<sup>[11]</sup>。露天煤矿排土场人工建植的植被与土壤环境相互依存又相互制约<sup>[12]</sup>,因此,研究人工建植植被特征和土壤理化特征对于煤矿区植被恢复具有重要的意义。有关研究表明,在煤矸石山人工建植植被可提高其表层有机质含量和  $\text{pH}$ <sup>[13]</sup>,可明显改善排土场基质的土壤容重、土壤持水量及孔隙度等物理性质<sup>[14]</sup>。王洪丹等<sup>[15]</sup>发现坡向与土壤有机质和有效磷之间具有线性相关性;邱莉萍等<sup>[16]</sup>分析得出草地土壤养分在不同坡向的变异性较大;Pan 等<sup>[17]</sup>研究表明由于不同坡向水热条件的差异,植被生长状况有明显差异;陈正兴等<sup>[18]</sup>通过

研究不同坡向的草地植物群落,揭示了植被物种组成和多样性特征在不同坡向条件下差异显著。本文以青藏高原青海省木里煤田江仓矿区排土场为研究对象,在不覆盖客土的条件下人工建植植被,并且不同坡向条件下植被建植方法一致,研究在高海拔寒冷地区煤矿排土场不同坡面是否对植被生长与土壤基质造成差异,为高寒煤矿区排土场植被恢复与重建提供科学的参考价值。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

研究地点位于青海省海北州木里煤田东部的江仓矿区,大通河上游南侧(图 1),距省会西宁市约 450 km。木里煤田是青海省唯一的焦煤资源整装勘查区域,也是该省最大的煤矿。其地理坐标为  $99^{\circ}27' \sim 99^{\circ}35' \text{ E}$ ,  $38^{\circ}02' \sim 38^{\circ}03' \text{ N}$ ,海拔 3 800~4 200 m,年平均气温  $-2.8^{\circ}\text{C}$ ,气候严寒。矿区东西长 25 km,南北宽 2.5 km,面积 55  $\text{km}^2$ 。研究区为圣雄矿业在 2010 年采煤区,矿坑深度 100~200 m,两座排土场占地面积约 104.33 万  $\text{hm}^2$ ,由开采时产生的煤矸石及渣土机械堆积而成。南部排土场占地面积 73.10  $\text{hm}^2$ ,最大堆高 60 m(地表标高 3 865 m,排土场顶部标高 3 925 m),北部排土场占地面积 31.23  $\text{hm}^2$ ,最大堆高 50 m(地表标高 3 890 m,排土场顶部标高 3 940 m)。排土场基部多年冻土夏季容易融化产生滑坡、塌方等,形成地质灾害。研究区排土场稳定处理措施包括削坡卸载,使坡度小于  $25^{\circ}$ ,沿排土场底部边缘砌筑围堰,以增加坡面和坡体的稳定性,恢复排土场地下冻土。为减少排土场植被恢复的成本,人工植被建植时不覆盖客土,充分利用矿坑堆积的数十米多年永久性冻土作为排土场植被恢复的表层土壤。试区种植的草种主要是垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、冷地早熟禾(*Poa crymophila*)和星星草(*Puccinellia tenuiflora*),分别于 2015 年 5 月下旬将相同播种量、播种比例(2:1:1)的草种混合撒播于样地,播种量为 300  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,并施颗粒有机肥 60  $\text{kg}/\text{hm}^2$ 、复合化肥 195  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,播种施肥后覆盖 20  $\text{g}/\text{m}^2$  的无纺布。

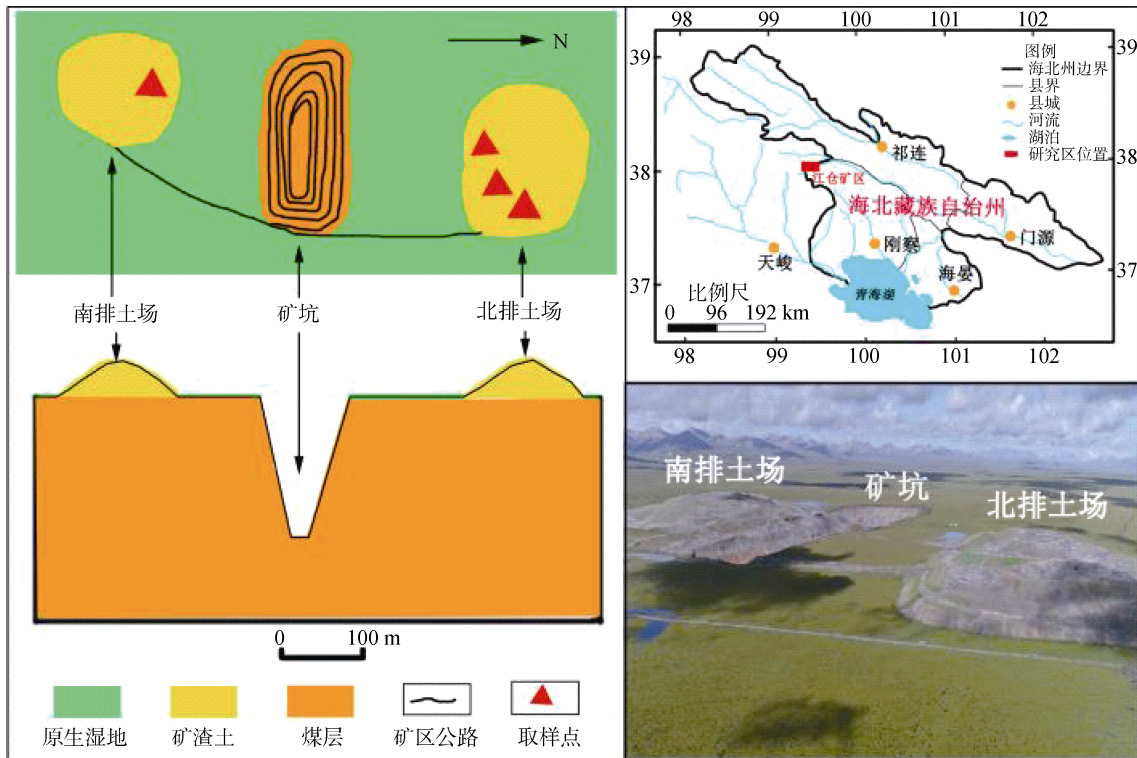


图 1 试验区地理位置

Fig. 1 Geographical position of study area

## 1.2 试验设计

试验地选择为 2015 年种植的排土场山南坡、北坡、东南坡与东坡，种植方法一致。2017 年 8 月分别以样线法随机选择 12 个  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的样方，测定植被盖度(人为估测)、高度(钢卷尺测定)、地上生物量、生殖枝数量、幼苗数量等，并把采集的样品用信封袋带回室内，烘干称其干重。采样过程中，用 GPS 记录经纬度、海拔，罗盘仪测定坡度、坡向，三参速测仪(HW-WET-3)测定排土场基质的水分与盐分。样方内除去地面植被和地表覆盖物，对表层(0 ~ 10 cm)土壤进行取样，去除大石块和植物残根后用自封袋带回室内；另用消过毒的无菌铲在每个样方取表层样 20 g 装入无菌袋，在低温下运回实验室，放入  $4^{\circ}\text{C}$  冰箱冷藏待用，且取样过程、运输环节尽可能保持无菌。

## 1.3 样品分析测定

土壤全氮采用半微量凯氏定氮法测定；全磷采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法测定；全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定；碱解氮采用碱解扩散法测定；有效磷采用  $0.5\text{ mol/L}$  碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定；速效钾采用醋酸铵浸提-火焰光度法测定；土壤 pH 采用电极法(水土质量比 2.5 : 1)测定；土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定<sup>[19]</sup>。土壤样品委托

青海省农林科学院分析测试中心测定。土壤微生物数量采用混合平板计数法测定：细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基，真菌采用虎红培养基，放线菌采用高氏 1 号培养基<sup>[20]</sup>。

## 1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2007 进行数据整理，运用 SPSS 19.0 进行描述性统计分析、单因素方差分析及显著性检验，显著水平设定为  $\alpha=0.05$ 。其次，基于 R 语言软件的随机森林算法进行影响因子重要性分析。随机森林算法是由 Leo Breiman 提出的一种新型高效的组合分类法，通过自助法(Bootstrap)对样本数据进行抽样，由随机向量(X, Y)构建组合模型。鉴于随机森林模型可处理大量数据，易于建立又易于解释，可用来评估本文中变量的重要性，提高效率<sup>[21]</sup>。

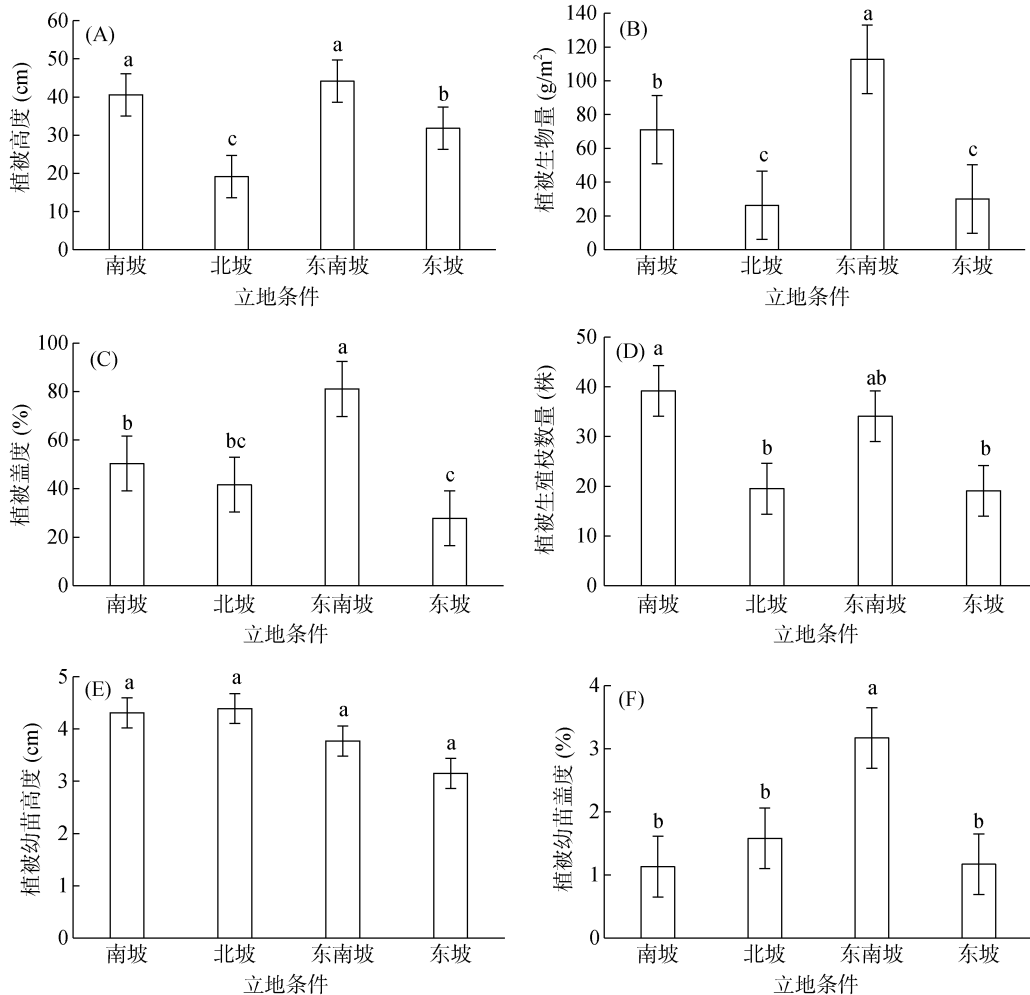
## 2 结果与分析

### 2.1 不同坡向立地条件植被特征

由图 2A 可以看出，种植在排土场南坡与东南坡的植被高度显著高于东坡与北坡的植被( $P<0.05$ )，而东坡的植被显著高于北坡( $P<0.05$ )。由图 2B 可以看出，植被生物量在东南坡为  $115\text{ g/m}^2$ ，显著高于其他 3 个坡向( $P<0.05$ )，南坡生物量显著高于北坡与东坡( $P<0.05$ )，北坡与东坡差异不显著( $P>0.05$ )。由图 2C

可以看出,东南坡的植被盖度显著高于南坡、北坡与东坡( $P<0.05$ ),南坡植被盖度显著高于东坡( $P<0.05$ ),北坡与南坡、东坡差异不显著( $P>0.05$ )。由图 2D 中可以看出,南坡植被生殖枝数量显著高于北坡与东坡( $P<0.05$ ),东坡与其他 3 个坡向差异不显著( $P>0.05$ ),北坡与东坡差异不显著( $P>0.05$ )。由图 2E 可以看出,

植被幼苗高度在 4 个坡上差异不显著( $P>0.05$ )。由图 2F 可以看出,东南坡的幼苗盖度显著高于其他 3 个坡向( $P<0.05$ ),其余 3 个坡向之间差异不显著( $P>0.05$ )。由以上分析可知,不同的坡向种植对地上植被特征有一定的影响,东南坡与南坡相较于北坡与东坡,地上植被质量明显较好。



(图中不同小写字母表示不同立地条件下差异在  $P<0.05$  水平显著)

图 2 不同坡向立地条件下植被特征变化

Fig. 2 Vegetation characteristics under different aspects

## 2.2 不同坡向立地条件表层土壤理化性质

从表 1 可以看出,排土场山南坡表层土壤全氮含量高于其他 3 个坡面,但是差异不显著( $P>0.05$ )。全磷含量在南坡最高,显著高于北坡与东坡( $P<0.05$ ),与东南坡差异不显著( $P>0.05$ )。全钾含量在东坡最高,显著高于南坡与北坡( $P<0.05$ ),与东南坡差异不显著( $P>0.05$ )。南坡与北坡全氮含量差异也不显著( $P>0.05$ )。土壤碱解氮含量南坡为 85.58 mg/kg,比北坡、东南坡、东坡分别高 53.58、43.33、54.33 mg/kg,差异显著( $P<0.05$ )。有效磷含量在 4 个坡面差异不显

著( $P>0.05$ )。速效钾含量在东南坡含量最高,显著高于南坡与北坡( $P<0.05$ ),与东坡差异不显著( $P>0.05$ )。有机质含量在北坡高达 163.52 g/kg  $\pm$  56.98 g/kg,显著高于其他 3 个坡面( $P<0.05$ )。土壤 pH 在 4 个坡面无显著变化( $P>0.05$ ),均偏碱性。土壤体积含水量在北坡与东坡含量较高,平均比南坡与东南坡高 66%,差异显著( $P<0.05$ )。由以上分析可以看出,不同坡向立地条件对露天煤矿区排土场表层土壤理化性质有一定的影响,全磷、全钾、碱解氮、速效钾、有机质与含水量等具有明显差异。

表 1 不同坡向条件下表层土壤理化性质  
Table 1 Soil physiochemical properties under different aspects

坡向	全氮 (g/kg)	全磷 (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , g/kg)	全钾 (K <sub>2</sub> O, g/kg)	碱解氮 (mg/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	有机质 (g/kg)	pH	体积含水量 (%)
南坡	1.55 ± 1.35 a	1.41 ± 0.22 a	22.3 ± 1.98 b	85.58 ± 61.03 a	5.24 ± 8.47 a	70.25 ± 12.77 b	33.35 ± 30.30 c	8.26 ± 0.28 a	13.68 ± 4.72 b
北坡	1.09 ± 0.21 a	1.13 ± 0.26 b	20.81 ± 1.14 b	32.0 ± 6.06 b	2.18 ± 0.45 a	62.00 ± 12.00 b	163.52 ± 56.98 a	8.47 ± 0.09 a	23.7 ± 4.15 a
东南坡	0.78 ± 0.10 a	1.23 ± 0.28 a	23.94 ± 1.60 ab	42.25 ± 3.40 ab	8.83 ± 3.72 a	96.25 ± 13.67 a	34.55 ± 6.54 c	8.29 ± 0.29 a	16.18 ± 2.24 b
东坡	0.75 ± 0.05 a	1.02 ± 0.04 b	24.67 ± 2.28 a	31.25 ± 9.36 b	1.68 ± 0.63 a	84.25 ± 13.30 a	38.81 ± 5.27 c	8.37 ± 0.22 a	25.7 ± 1.89 a

注: 表中数据为平均值±标准误, 同列数据后小写字母不同表示不同坡向间差异达  $P < 0.05$  显著水平; 下同。

### 2.3 不同坡向立地条件表层土壤微生物数量

从表 2 中可以看出, 细菌数量在东南坡最高, 显著高于其他 3 个坡面 ( $P < 0.05$ ), 北坡与东坡显著高于南坡 ( $P < 0.05$ ), 南坡细菌数量最少, 仅为  $(0.12 \pm 0.10) \times 10^2$  cfu/g。放线菌数量在不同坡向条件下无显著差异 ( $P > 0.05$ )。真菌数量在东南坡数量为  $(3.14 \pm 1.99) \times 10^6$  cfu/g, 显著高于其他 3 个坡向 ( $P < 0.05$ )。

表 2 不同坡向条件下表层土壤微生物数量  
Table 2 Soil microbial populations under different aspects

不同坡向	细菌 ( $\times 10^2$ cfu/g)	放线菌 ( $\times 10^3$ cfu/g)	真菌 ( $\times 10^6$ cfu/g)
南坡	0.12 ± 0.10 bc	6.53 ± 10.47 a	1.27 ± 1.06 b
北坡	0.88 ± 0.78 b	3.87 ± 3.40 a	1.19 ± 1.28 b
东南坡	4.04 ± 2.12 a	4.02 ± 4.46 a	3.14 ± 1.99 a
东坡	1.64 ± 1.41 b	2.64 ± 7.74 a	0.57 ± 0.27 b

### 2.4 矿区排土场表层土壤的主要影响因素

图 3 为随机森林方法对不同坡向表层土壤理化性质以及植被恢复特征的 22 个建模因子的重要性分析。重要性指标为平均准确率降低度与基于平均基尼指数递减度, 两个指标数值增大, 则代表对应的影响因素越重要。从图 3 中可以看出, 土壤细菌数量、含水量、碱解氮、全磷、植被高度与土壤有机质含量是影响排土场不同坡向立地条件下植被与土壤特性的主要因子, 通过随机森林法计算平均准确率降低度, 土壤细菌数量的影响力为 16.35, 土壤含水量为 12.01, 土壤碱解氮为 11.21, 全磷为 10.25, 植被高度为 9.39, 土壤有机质为 8.60, 依次降低。为了更好地分析各因子对不同坡向立地条件下植被与土壤特性的影响规律, 本文对 6 个重要因子绘制了作用曲线 (图 4)。图 4 中横坐标对应因子取值, 纵坐标对应该因子对排土场植被与土壤特性影响的贡献概率值, 即纵坐标值越大, 该因子对排土场不同坡向立地条件的的影响越大。细菌数量的重要性排序最高, 从图 4 中可以看出, 随着细菌数量的增大, 对不同坡向排土场特

性影响增大。土壤含水量是维持土壤循环系统不可缺少的物质, 从图 4 中可以看出, 随着土壤含水量的升高, 对不同坡向排土场表层土壤的影响逐渐增大, 当含水量为 25.4% 时, 有略微下降。氮是植物需要量较大的营养元素, 从图 4 中可以看出, 碱解氮含量为 49 mg/kg 时, 对不同坡向排土场特征的影响最大, 之后随着碱解氮含量的增大影响力逐渐下降并趋于稳定。从图 4 曲线中可以看出, 全磷含量大于 1.6 g/kg 时, 对 4 个坡向的植被与土壤特性影响最大。植被高度是对排土场表层基质养分的响应, 从图 4 中可以看出, 随着植被高度的增高, 对不同坡向立地条件的的影响显著上升, 当植被高度上升至 34 cm 时, 影响最大, 随后随着植被高度增高, 影响力缓慢下降并趋于稳定。而土壤有机质为 47 g/kg 时对不同坡向排土场特性影响最大, 之后影响力下降。

## 3 讨论

### 3.1 不同坡向立地条件对排土场植被特征变化的影响

坡向作为一个最重要的地形因子, 不同坡向因光照、水分、温度、土壤等差异, 使植被特征不同。南坡受较多太阳辐射影响, 具有较高的温度, 北坡则温度较低且湿度大。同时, 土壤是植物生长的物质基础, 植物的生长发育和分布与不同坡面的土壤特征存在着重要关系<sup>[22]</sup>。植被生长与生存环境之间是一种相互协同进化和适应的关系, 植物在不同坡向立地条件下长势不同, 也会因生境的不同而出现一些可塑性反应<sup>[23]</sup>。从本文研究结果可以看出, 植被高度在南坡和东南坡高于东坡和北坡, 北坡植被高度最低, 这说明植被高度与日照时数关系密切, 日照时数会影响热量与水分的平衡<sup>[24]</sup>, 从而影响植被的生长高度。植被盖度与产量按东南坡、南坡、东坡、北坡的顺序下降, 南坡与东南坡相比较低, 这可能是由于南坡温度更高, 光照更强, 蒸散作用大, 土壤中水分可利用性

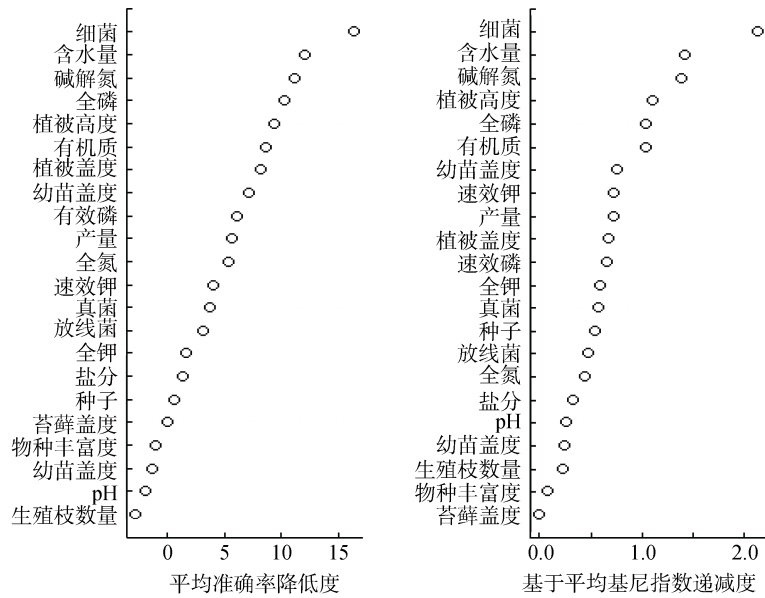


图 3 不同坡面变量的重要性排序

Fig. 3 Importance rank of variables under different aspects

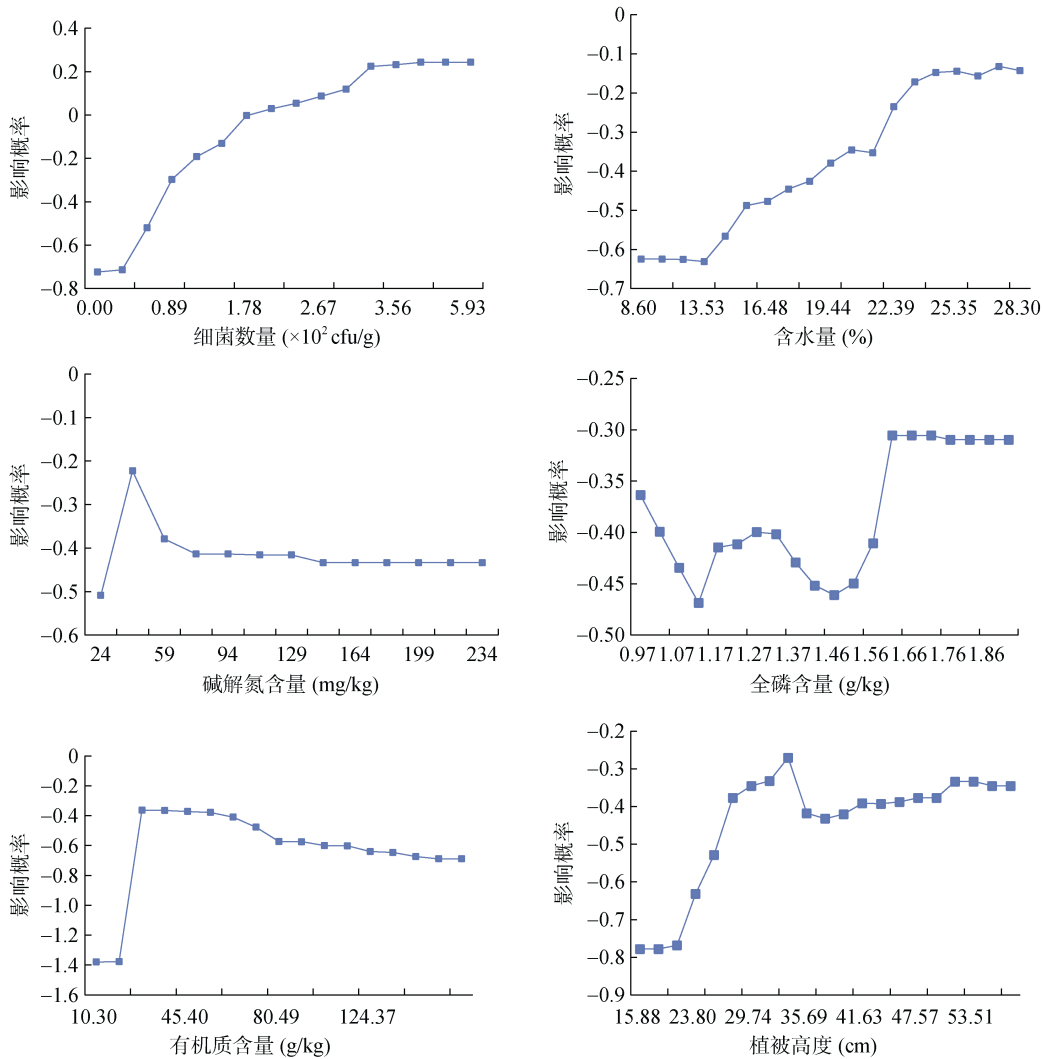


图 4 基于随机森林方法的主要生态因子对不同坡面表层基质的影响

Fig. 4 Effects of main ecological factors on topsoil substrate under different aspects based on random forest method



低,使植被盖度与产量低于东南坡。正是由于以上原因,使得北坡与东坡的植被生长状况稍差。植被生殖枝数量在南坡和东南坡高于其他2个坡,这是因为坡向的不同造成了植被生长期的差异,温度缩短了北坡与东坡的生长周期,减缓了生殖枝的发育。幼苗的出现,证明在排土场山植被恢复中,有成熟种子脱落并发芽,说明植被恢复呈稳定演替方向发展。一般情况下幼苗时期是对环境最敏感的时期,坡向的差异使种子发芽率与幼苗成活率表现出明显的差异,所以幼苗盖度在不同坡向有显著差异。鉴于不同坡向对排土场人工植被建植有一定的影响,在今后露天煤矿区排土场植被恢复初期应增加东坡与北坡(阴坡)的播种量以及恢复过程中及时补播和追施氮肥,减小不同坡向对植被生长造成的差异。

### 3.2 不同坡向立地条件对排土场土壤特征变化的影响

土壤养分状况在土壤质量维持和改善中具有重要作用,也是植被恢复生态环境效应的重要体现<sup>[16]</sup>。在同一区域成土条件一致的情况下,土壤养分会因为坡向不同存在差异<sup>[18,25]</sup>。在不同坡向立地条件下,排土场表层土壤全量氮、钾含量与速效氮、磷含量均在东南坡与南坡最高,而其有机质含量显著低于北坡与东坡,这是因为在植被生长过程中需要吸收大量的速效氮、磷、钾,而植物生长所需的养分是由土壤中有机质转化而来,南坡与东南坡的植物由于地形原因,生长速率快,促进了土壤中物质循环,加快了土壤中物质的输入和输出速率。同时,南坡与东南坡的植被盖度高,提高了土壤氮、磷、钾的利用率<sup>[26]</sup>。而北坡与东坡土壤含水量高,土壤空隙由水分充塞,通气受阻使有机质矿化率低,有利于有机质的积累<sup>[27]</sup>。排土场坡面的不同立地条件对土壤pH的影响略微,这是由于在植被恢复3a的时间下,植物根系与凋落物并不多,与有机质结合分解、转化的过程中,产生有机酸含量少,不足以降低矿区排土场表层土壤pH<sup>[10,28]</sup>。坡向通过调节太阳辐射状况来影响水分的平衡,在排土场南坡与东南坡光照强,蒸散作用大,表层基质含水量低<sup>[24]</sup>。因此,在今后高寒矿区恢复中,排土场东坡与北坡(阴坡)播种时应覆盖至少为50 g/m<sup>2</sup>的加厚无纺布,保温效果更好,有利于种子发芽及出苗生长。

### 3.3 不同坡向立地条件对排土场土壤微生物数量的影响

土壤微生物是土壤生态系统的重要组成部分,主要参与土壤养分与物质的循环代谢过程,与土壤健康

状况密切相关<sup>[29]</sup>。煤矿区排土场的特殊结构和地形特点使表层基质肥力差,而地形会通过光照分布影响土壤水热条件<sup>[30]</sup>。不同坡向由于其水热条件的差异,影响土壤中微生物的数量,土壤温度与水分对微生物代谢活动有很大影响<sup>[31-32]</sup>。在本文中,细菌与真菌在东南坡的数量最多,而南坡含量仅有 $0.12 \times 10^2$  cfu/g,这是因为东南坡的光照、水分及植被生长状况均良好,光照强度使土壤干湿交替与昼夜温差不大,并且植被的旺盛使枯枝落叶增多,增加腐殖质,影响着土壤养分的保持与土壤结构的形成<sup>[33]</sup>,相对于其他3个坡面,有利于细菌代谢生长。不同坡面对土壤放线菌的影响不大,这可能是因为排土场恢复初期,选择人工建植的植物种只有3种,并且排土场恢复时间较短,每个坡面的植物种类基本无差异,植物产生的枯枝落叶基本相同,使土壤放线菌数量无差异<sup>[34]</sup>。

### 3.4 矿区排土场不同坡向表层土壤特征的主要影响因素

露天煤矿区排土场土壤与植被的交互影响作用复杂,因为在现阶段处于植被恢复初期,土壤各因子不稳定,植被的生长也处于适应阶段<sup>[35]</sup>。随机森林法得出结果表明,细菌、含水量、碱解氮、全磷、植被高度与有机质是影响排土场表层土壤特征的主要影响因素。细菌是土壤微生物中重要的组成部分,含氮量高,含碳量低,可促进土壤养分的形成与分解<sup>[36]</sup>,不同坡向植被恢复后土壤细菌的环境影响因子主要为含水量、有机质及全磷含量<sup>[37]</sup>,这说明土壤微生物在植被恢复过程中起着重要的作用。土壤含水量对植被的生长与土壤养分循环及土壤微生物的活动均有不可或缺的作用,在不同坡面立地条件下,由于不同的光照强度与时间导致了土壤含水量的差异。土壤中氮素是植物生长发育所需的大量元素,是调节生态系统生产力、结构与功能的重要元素,在氮循环中至关重要,而氮含量的高低与植被特征密切相关<sup>[38]</sup>,故而在不同坡向条件下有一定差异。不同坡向含水量的差异影响了植被可吸收的无机磷含量,排土场较低的含磷量限制了植被的生长。土壤中有机质的含量影响着土壤的肥力,进而影响了土壤质量与结构功能<sup>[39]</sup>,排土场北坡表层土壤含水量高,温度低,有利于有机质的积累与保存。通过分析排土场不同坡向表层土壤的主要影响因素,建议在排土场恢复中及时补充氮肥以利于加速植被恢复进程。

## 4 结论

1) 在青海江仓矿区排土场进行不覆盖客土利用

多年冻土植被恢复中,不同坡向立地条件下,南坡与东南坡(阳坡)的植被高度、盖度、生物量、生殖枝数量等特征均显著高于北坡与东坡(阴坡)。说明坡向不同显著影响植被的生长,因此在高寒矿区植被恢复过程中增加阴坡(东坡与北坡)坡面的播种量并及时追施速效肥料有利于植被的快速恢复。

2) 在排土场不同坡向立地条件下,表层土壤的全磷、全钾、速效氮磷钾、有机质及含水量具有明显差异,因此,在排土场恢复初期应增加阴坡(北坡与东坡)种植时所用无纺布厚度,减小坡向不同对植被生长带来的影响。

3) 坡向的不同对排土场表层微生物数量有一定影响,东南坡(阳坡)的土壤细菌和真菌数量显著高于其他 3 个坡面。

4) 在高寒矿区排土场植被恢复过程中,排土场表层细菌数量、含水量、碱解氮、全磷与植被高度是影响植被生长的主要影响因子。因此,及时补充氮肥有利于加速矿区排土场植被恢复进程。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Xia H P, Cai X A. Ecological restoration technologies for mined lands: A review[J]. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao, 2002, 13(11): 1471-1477.
- [3] Carrick P J, Kruger R. Restoring degraded landscapes in lowland Namaqualand: Lessons from the mining experience and from regional ecological dynamics[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 70(4): 767-781.
- [4] 胡晓萧,李小英.矿山废弃地生态修复中土壤基质改良技术研究综述[J].现代农业科技,2018(1):184-186,190.
- [5] Gao S H, He R X, Jin H J, et al. Thermal recovery process of a backfilled open-pit in permafrost area at the Gulian strip coal mine in Northeast China[J]. Journal of Mountain Science, 2017, 14(11): 2212-2229.
- [6] Cao W, Sheng Y, Wu J C, et al. Simulation analysis of the impact of excavation backfill on permafrost recovery in an opencast coal-mining pit[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(9): 1-10.
- [7] 王尚义,石瑛,牛俊杰,等.煤矸石山不同植被恢复模式对土壤养分的影响——以山西省河东矿区1号煤矸石山为例[J].地理学报,2013,68(3):372-379.
- [8] 黄元仿,张世文,张立平,等.露天煤矿土地复垦生物多样性保护与恢复研究进展[J].农业机械学报,2015,46(8):72-82.
- [9] Ahirwal J, Maiti S K, Singh A K. Ecological restoration of coal mine - degraded lands in dry tropical climate: what has been done and what needs to be done?[J]. Environmental Quality Management, 2016, 26(1): 25-36.
- [10] 张兆彤,王金满,张佳瑞.矿区复垦土壤与植被交互影响的研究进展[J].土壤,2018,50(2):239-247.
- [11] Chu Z X, Wang S C, Wang X M. Distribution pattern and limiting factors of vegetation in coal waste pile of Xinzhuanzi coal mine in Huainan[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 2012, 18(4): 413-417.
- [12] 谷裕,王金满,王洪丹,等.黄土区露天煤矿排土场植被恢复的水肥响应[J].生态学杂志,2016,35(12):3233-3241.
- [13] 刘军,张武文,蓝登明,等.不同植被恢复模式对煤矸石堆土壤理化性质的影响——以大杨树煤矿区为例[J].林业科技,2016,41(1):56-59.
- [14] 王丽艳,韩有志,张成梁,等.不同植被恢复模式下煤矸石山复垦土壤性质及煤矸石风化物的变化特征[J].生态学报,2011,31(21):6429-6441.
- [15] 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.
- [16] 邱莉萍,张兴昌,程积民.云雾山不同坡向草地土壤养分的坡面分布特征[J].水土保持通报,2010,30(3):6-9.
- [17] Pan J, Bai Z K, Cao Y G, et al. Influence of soil physical properties and vegetation coverage at different slope aspects in a reclaimed dump[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(30): 23953-23965.
- [18] 陈正兴,高德新,张伟,等.黄土丘陵沟壑区不同坡向撂荒草地植物群落种群空间格局[J].应用生态学报,2018,29(6):1846-1856.
- [19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.
- [20] 许光辉,郑洪元.土壤微生物分析方法手册[M].北京:农业出版社,1986.
- [21] 赖自力,向杰,陈建平,等.基于随机森林模型的云南元阳梯田地形因子分析[J].地质学刊,2016,40(3):518-525.
- [22] 徐长林.坡向对青藏高原东北缘高寒草甸植被构成和养分特征的影响[J].草业学报,2016,25(4):26-35.
- [23] 侯兆疆,赵成章,李钰,等.不同坡向高寒退化草地狼毒株高和枝条数的权衡关系[J].植物生态学报,2014,38(3):281-288.
- [24] 郭滨德,张远东,王晓春.川西高原不同坡向云、冷杉树轮对快速升温的响应差异[J].应用生态学报,2016,27(2):354-364.
- [25] 邓欧平,周稀,黄萍萍,等.川中紫色丘区土壤养分空间分异与地形因子相关性研究[J].资源科学,2013,35(12):2434-2443.
- [26] 路晓,王金满,李博,等.矿山土壤特性及其分类研究进展[J].土壤,2017,49(4):670-678.
- [27] 王长庭,龙瑞军,王启基,等.高寒草甸不同海拔梯度土壤有机质氮磷的分布和生产力变化及其与环境因子的关系[J].草业学报,2005,14(4):15-20.



- [28] 韦莉莉, 卢昌熠, 丁晶, 等. 丛枝菌根真菌参与下植物-土壤系统的养分交流及调控[J]. 生态学报, 2016, 36(14): 4233-4243.
- [29] 杨宁, 杨满元, 雷玉兰, 等. 紫色土丘陵坡地土壤微生物群落季节变化[J]. 生态环境学报, 2015, 24(1): 34-40.
- [30] 赵彤, 蒋跃利, 闫浩, 等. 黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(8): 3223-3230.
- [31] Li Y, Sun Q Y, Zhan J, et al. Soil-covered strategy for ecological restoration alters the bacterial community structure and predictive energy metabolic functions in mine tailings profiles[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(6): 2549-2561.
- [32] 纳小凡, 郑国琦, 彭励, 等. 不同种植年限宁夏枸杞根际微生物多样性变化[J]. 土壤学报, 2016, 53(1): 241-252.
- [33] 吴云当, 李芳柏, 刘同旭. 土壤微生物-腐殖质-矿物间的胞外电子传递机制研究进展[J]. 土壤学报, 2016, 53(2): 277-291.
- [34] Lorangermerciris G, Barthes L, Gastine A, et al. Rapid effects of plant species diversity and identity on soil microbial communities in experimental grassland ecosystems[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(8): 2336-2343.
- [35] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 223-232.
- [36] 杨菁, 周国英, 田媛媛, 等. 降香黄檀不同混交林土壤细菌多样性差异分析[J]. 生态学报, 2015, 35(24): 8117-8127.
- [37] 陈熙, 刘以珍, 李金前, 等. 稀土尾矿土壤细菌群落结构对植被修复的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 3943-3950.
- [38] 李丹, 康萨如拉, 赵梦颖, 等. 内蒙古羊草草原不同退化阶段土壤养分与植物功能性状的关系[J]. 植物生态学报, 2016, 40(10): 991-1002.
- [39] 何贵永, 孙浩智, 史小明, 等. 青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应[J]. 草业学报, 2015, 24(4): 12-20.