

# 平朔矿区露天煤矿排土场复垦类型及 微地形对土壤养分的影响

刘孝阳<sup>1</sup>, 周伟<sup>1,2</sup>, 白中科<sup>1,2</sup>, 杨柯<sup>1,3,4</sup>

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 国土资源部土地整治重点实验室,  
北京 100035; 3. 中国地质科学院 地球表层碳—汞地球化学循环重点实验室,  
河北 廊坊 065000; 4. 中国地质科学院 地球物理地球化学勘查研究所, 河北 廊坊 065000)

**摘要:**研究土地复垦类型及微地形对土壤养分的影响对于指导土地复垦实践,控制复垦土地水土流失等具有重要的理论意义和实际应用价值。以平朔露天煤矿排土场为例,借助数理统计方法分析评价复垦类型与微地形因子(高程、坡度、坡向)对土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷及速效钾含量的影响。结果表明:(1) 复垦类型对各项土壤养分含量影响较为显著,不同的复垦类型中,各项土壤养分含量排序均为耕地>林地>草地;其中,土壤有机碳、全氮、全磷及速效钾含量,耕地分别为草地的2.15~2.68倍,林地的1.48~1.78倍,对于土壤有效磷,耕地中的含量为71.24 mg/kg,为草地的11倍,林地的4倍;(2) 坡度与土壤养分含量之间存在显著的相关性( $p<0.05$ ),而高程、坡向与土壤养分含量的相关性较弱,表明排土场复垦区土壤养分受坡度影响较大,而受高程与坡向的影响较小;(3) 复垦类型与坡度的交互作用对土壤养分含量产生一定的影响:同一复垦类型的不同坡度的土地养分含量存在差异,耕地的土壤养分含量随着坡度的增大在降低;同一坡度,不同的复垦类型条件下,土壤养分差异显著,总体趋势为耕地>林地>草地。

**关键词:**露天煤矿; 排土场; 复垦; 土壤养分; 复垦类型; 微地形

中图分类号:S158.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0006-07

## Influences of Reclamation Types and Microtopography on Soil Nutrient in Opencast Coal Mine Dump of Pingshuo Mining Area

LIU Xiaoyang<sup>1</sup>, ZHOU Wei<sup>1,2</sup>, BAI Zhongke<sup>1,2</sup>, YANG Ke<sup>1,3,4</sup>

(1. China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China; 4. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang, Hebei 065000, China)

**Abstract:** Study of the impacts of reclamation type and microtopography on soil nutrient is helpful to guide the executive of land reclamation, and it also has great significance with respect to both theory and execution for controlling soil erosion of reclaimed land. Selecting the reclaimed land in Pingshuo opencast coal mine dump as the study area, we estimate the effects of reclamation types and the microtopographic factors (elevation, slope, aspect) on soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, available phosphorus and available potassium using mathematical statistics method. The results show that: (1) reclamation types have the significant effect on the soil nutrient contents in different reclamation types, the contents of soil nutrients decrease in the order: farmland> woodland> grassland, the contents of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus and available potassium in farmland are 2.15~2.68 times of the grassland, are 1.48~1.78 times as much as woodland. Content of available phosphorus in farmland is 71.24 mg/kg, being 11 times of grassland, 4 times of woodland; (2) there is a significant correlation between slope steepness and soil nutrient content at 0.05 level, while elevation and aspect have weaker correlation with soil nutrients, suggesting that soil nutrients are greatly influenced by slope, but the influence of elevation and slope direction is small; (3) the interaction between reclamation types and slope has effect on soil nutrient to certain extent, with the same reclamation

type, soil nutrient content differs in different slopes, the farmland slope's increase leads to the decrease of soil nutrient content; with the same slope, different reclamation types have significant differences in soil nutrient contents, the general trend of soil nutrient content follows the order: farmland>woodland>grassland.

**Keywords:** opencast coal mine; mine dump; land reclamation; soil nutrient; reclamation type; microtopography

全世界三分之二的矿产原料采用露天开采<sup>[1]</sup>,然而,露天开采为经济社会的发展提供大量物质基础的同时,采矿过程需剥离煤层上方的全部表土和岩层,不仅在采矿场损毁大量的土地,产生的排弃物也会占用大量的土地,致使区域环境生态失衡和土地资源损失<sup>[2]</sup>。加上我国露天煤矿多处于干旱、半干旱的生态脆弱区<sup>[3]</sup>,这进一步加大了矿区土地的破坏程度与生态恢复治理难度。排土场作为煤矿露天开采的主要损毁类型之一,复垦过程也对土壤产生扰动<sup>[4]</sup>。其中,复垦过程由于发生土壤重构,土壤原有理化性质发生了根本的变化<sup>[5]</sup>。复垦后的土壤条件直接关系到复垦的成败和效益的高低,重构一个较高土壤生产力的土地一直是土地复垦技术革新的动力和方向<sup>[6]</sup>。

土壤肥力是决定土地生产力的基本条件<sup>[7]</sup>,而土壤养分是土壤肥力的重要标志<sup>[8]</sup>。复垦农用地土壤养分在很大程度上决定了复垦植被的生存、生长,决定复垦土地的生产力水平,成为复垦农用地质量评价的重要指标。关于对土壤养分影响因素的分析研究已有较多,有地形因子对土壤养分影响的研究<sup>[9-10]</sup>,也有土地利用对土壤养分影响的研究<sup>[11-14]</sup>。然而,相关研究中较多地关注了土地利用或者地形等单因素对土壤养分的影响,较少考虑二者的交互作用,研究对象也大都集中在自然土壤,针对发生土壤重构的排土场复垦土地土壤养分的研究较为少见。本文以平朔露天煤矿排土场复垦土地为对象,分析评价土地复垦类型与微地形(高程、坡度、坡向)单因素及二者交互作用对复垦土地土壤有机碳、全氮、全磷、有效磷及速效钾含量的影响,以期为指导土地复垦实践及控制复垦土地水土流失提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

平朔矿区地处黄土高原晋、陕、蒙接壤的黑三角地带,山西省北部的朔州市平鲁区境内,地理坐标为东经 $112^{\circ}45'58''$ — $110^{\circ}53'00''$ ,北纬 $39^{\circ}3'45''$ — $39^{\circ}58'29''$ 。矿区包括三个大型露天矿以及三个井工矿,总面积近 $160\text{ km}^2$ 。矿区原地貌类型为黄土低山丘陵,典型的半干旱气候,地带性植被属于干草原类型,地带性土壤为栗钙土和黄绵土<sup>[15]</sup>。矿山服务年限长达上百年,开采时间从1986年开始,复垦工作也在随后的

1994年逐渐开展起来。

研究区位于平朔矿区内西南部,南北长约 $6.8\text{ km}$ ,东西长约 $7\text{ km}$ ,总面积约为 $18.96\text{ km}^2$ ,所涉范围包括安太堡内排、西排、西排扩大区,安家岭东排及西排,主要复垦类型包括耕地、草地及林地。研究区位置及土壤样点分布如图1所示。

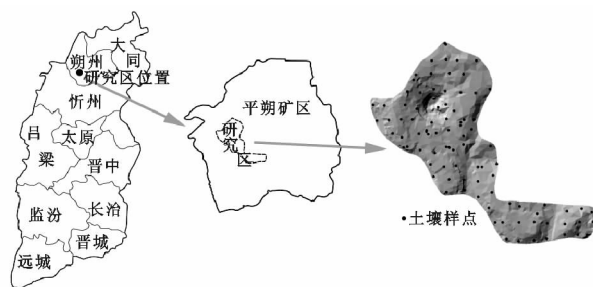


图1 研究区位置及土壤样点分布

### 1.2 数据来源

(1) 样品采集及处理。以该区域地形图及土地利用现状图为依据进行室内布点,并将坐标输入GPS,2013年8月进行野外土壤样点的采集,每个样地取0—30 cm深度的表层土壤,同时记录采样时间、海拔高度、土地复垦类型、植被覆盖类型及样点位置描述,最终在研究区范围内共采集土壤样点93个,其中耕地土壤样点16个,草地土壤样点49个,林地土壤样点28个,样点基本呈均匀分布,两点间距离约为500 m。样点处的土地复垦时间从1995到2012年不等,其中复垦5 a内的样点个数为42个,复垦5~10 a的样点个数为12个,复垦10~15 a的样点个数为18个,复垦15~20 a的样点个数为21个。土壤样品风干、研磨、过筛后进行分析,有机碳采用重铬酸钾氧化—分光光度法;全氮采用半微量凯氏定氮法;全磷采用NaOH熔融—钼锑抗比色法;有效磷采用Olsen法;速效钾采用 $1.0\text{ mol/L NH}_4\text{OAc}$ 浸提—火焰光度法。

(2) 地形因子提取。根据1:10 000地形图生成10 m分辨率的DEM,基于DEM运用数字地形分析技术提取所需一阶地形因子,包括高程、坡度及坡向。

### 1.3 研究方法

(1) 为全面了解研究区土壤养分含量的基本统计学特征,对土壤养分含量的最值、平均值、中位数及标准差等指标进行统计,并对土壤养分的空间变异程度进行分析,所用指标为变异系数( $C_V$ )。

(2) 为了解研究区土壤养分空间异质程度及其

原因,运用地统计学方法分析不同土壤养分的块金值( $C_0$ )、偏基台值( $C$ ),并以块金比 $[C_0/(C_0+C)]$ 作为衡量空间自相关性的指标。

(3) 为探讨土地复垦类型及地形因子单因素及交互作用对土壤养分含量的影响,采用单因素方差分析判断影响的显著性,利用 Pearson 相关系数分析变量间的相关程度。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤养分含量描述性统计分析

对研究区的 93 个土壤样本进行描述性统计分析,分析结果如表 1 所示。对照表 1 中土壤养分的均值含量,依据《全国第二次土壤普查分类标准》,将各土壤养分含量进行等级划分,等级排序依次为速效钾>全磷

≈有效磷>有机碳>全氮。其中速效钾处于第二等级,全磷和有效磷处于第三等级,均为中上等水平;全氮含量处于第六等级,按照土壤有机碳与有机质 1.724 的 Van Bemmelen 因数进行转换,土壤有机碳处于第五等级,二者均处于中下等水平。5 种土壤养分含量的空间变异程度都很高,其中土壤有效磷的变异系数高达 244.17%,变异程度最低为土壤速效钾,其变异系数达到 69.70%。根据变异系数等级划分<sup>[16]</sup>,土壤有机碳、有效磷为强变异性,土壤全氮、全磷及速效钾为中等变异。根据以往的研究表明,由于采矿方法、复垦技术、表土厚度、表土来源以及矿工技能等因素的不同,采矿后复垦土壤特性空间变异性往往发生巨大变化<sup>[17]</sup>,土壤属性的空间变异性变得较为强烈。根据 K-S 正态性检验可知,五种土壤养分均不符合正态分布。

表 1 土壤养分含量描述性统计

指标	样本数	最小值	最大值	平均值	标准差	方差	变异系数/%	$P_{K-S}$
有机碳	93	0.60	26.24	4.58	4.68	21.90	102.18	1.91 E-4
全氮	93	0.17	2.27	0.45	0.35	0.12	77.78	2.94 E-4
全磷	93	0.46	3.77	0.73	0.51	0.26	69.86	0
有效磷	93	0.25	259.48	17.25	42.12	1774.27	244.17	7.51 E-6
速效钾	93	59.09	738.74	158.71	110.62	12236.07	69.70	0

注:有机碳含、全磷、全氮的单位是 g/kg,有效磷、速效钾的单位是 mg/kg。

2.2 土壤养分含量地统计学分析

区域化变量同时具有结构性和随机性的特点,仅用经典的统计方法进行研究是不够的<sup>[18]</sup>,目前利用地统计学方法来研究土壤特性的空间变异已成为土壤科学研究的热点之一。对研究区土壤养分进行地统计学分析,分析结果见表 2。

表 2 土壤养分含量地统计学分析

指标	数据变换	模型	块金值	偏基台值	块金比/%
有机碳	对数变换	球面模型	0.10	0.50	16.11
全氮	对数变换	指数模型	0.03	0.24	10.38
全磷	对数变换	指数模型	0.05	0.10	34.14
有效磷	对数变换	指数模型	1.03	2.03	33.77
速效钾	对数变换	球面模型	0.18	0.05	79.60

从表 2 中可以看出,速效钾的块金比最大,表明土壤速效钾的空间自相关性很弱;其次是全磷和有效磷的块金比,分别为 34.14%和 33.77%,空间自相关性为中等;有机碳和全氮的块金比最低,分别为 16.11%和 10.38%,均小于 25%,表现出的空间自相关性强烈。通过对比表 1 和表 2 可以看出,变异系数与块金比并不能一一对应,土壤速效钾属中等变异性,但块金比最大,这表明人为的随机干扰对变异性的贡献较大;对于土壤全磷和有效磷,空间变异性分别为中等变异和强变异性,但块金比分别为 34.14%和 33.77%,处于中等自相关水平,这说明空间变异性是由人为因素和结构性因素共同

导致;而对于土壤有机碳与全氮,块金比均小于 25%,空间自相关性较为强烈,这表明空间变异性主要来自结构性因素,人为扰动因素的作用很小。

2.3 土地复垦类型对研究区土壤养分含量的影响

土地复垦类型属于土地利用的具体体现,土地利用作为人类利用土地各种活动的综合反映,与土壤养分有着密切的联系<sup>[19]</sup>。土地利用方式可以影响植被凋落物和残余量<sup>[20]</sup>,影响土壤微生物的活动<sup>[21]</sup>,因而引起土壤养分的变化。

研究区土地复垦类型主要为耕地、草地及林地。耕地包括旱地和水浇地,旱地以种植玉米、土豆、荞麦等农作物为主,水浇地主要为蔬菜大棚;草地种植有苜蓿,林地种植有沙棘、油松、杨树等。在复垦工作以前,剥离的表土首先会播撒苜蓿等草本的植物种子以用来保持土壤养分,复垦完成后,复垦为林、草地的基本不会进行施肥,复垦为旱地的主要进行机械化耕作,肥料施用较少,而复垦为水浇地的管理措施较多,有机肥料施用较多。93 个土壤样点中,耕地土壤样点 16 个,草地土壤样点 49 个,林地土壤样点 28 个。分类对样点的土壤养分含量进行均值及变异系数统计,统计结果见表 3。

从表 3 中可以看出,在不同的土地复垦类型条件下,5 种土壤营养成分表现出了显著的差异性。就土壤养分均值含量来看,耕地>林地>草地,这与陈春

瑜等的土地利用对滇池流域土壤养分时空分布影响的研究结果较为一致<sup>[22]</sup>。土壤养分含量的变异系数差异较大,除了林地土壤有机碳大于耕地外,其他土壤养分平均含量中耕地的变异系数都大于其他地类。其中,草地和林地的全磷含量变异系数最低,分别为

8.49%和 9.88%,属弱变异性;耕地有效磷平均含量数据表现出较大的“跳跃性”,变异系数最大,达到了 117.81%,属强变异性;剩余地类的土壤养分含量变异性均较大,变异系数介于 25.08%~89.78%,均属于中等变异性。

表 3 不同土地复垦类型下土壤养分含量的分布

土地复垦类型	样本数	有机碳 <sup>*</sup>		全氮 <sup>*</sup>		全磷 <sup>*</sup>		有效磷 <sup>*</sup>		速效钾 <sup>*</sup>	
		含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%	含量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	变异 系数/%
耕地	16	7.67±1.72b	89.78	0.86±0.16b	72.68	1.29±0.27b	83.47	71.24±20.98b	117.81	284.57±55.15b	77.51
林地	28	5.18±0.98ab	99.78	0.45±0.03a	39.81	0.73±0.01a	9.88	17.70±0.65a	65.18	159.70±6.73a	25.08
草地	49	3.22±0.37a	81.18	0.32±0.02a	37.69	0.60±0.01a	8.49	6.47±0.62a	66.59	127.17±4.68a	25.78

注: \* 表示指标达到 F 检验要求,  $p<0.05$ 。a,b 表示二者差异显著的状态,ab 表示差异不显著状态。

耕地土壤养分含量表现出的这种特征主要与耕地土壤样点中包含蔬菜大棚的地类有关。由于蔬菜生长的需要,大棚土壤施用氮磷钾等肥料,导致土壤养分含量均值升高,也使耕地的空间变异性有很大的增强。

2.4 微地形对复垦土壤养分含量的影响

地形与土壤中水分的运输及物质的运移有着紧密的联系<sup>[23]</sup>,因而会对土壤养分的分布状况产生影响。露天矿排土场地形复杂多变,复垦土壤重构后排土场地形因子与土壤养分的关系也变得较为特殊。为了探讨研究区微地形与土壤养分二者的关系,首先将其进行相关性分析,分析结果见表 4。

表 4 土壤养分含量与微地形因子的相关系数

项目	有机碳	全氮	全磷	有效磷	速效钾
高程	-0.05	0.08	0.10	0.08	0.06
坡度	-0.20	-0.27*	-0.26*	-0.32*	-0.27*
坡向	0.00	-0.03	-0.06	-0.08	-0.08

注: \* 表示在 0.05 水平上显著性相关。

从表 4 中可以看出,除有机碳外,坡度与土壤全氮、全磷、有效磷、速效钾之间均存在显著负相关性,这与杨建虎等对黄土高原小流域地形与土壤养分关系的研究结果较为一致<sup>[24]</sup>。复垦排土场的土壤养分受坡度影响较大,并随着坡度的加大,土壤养分流失加剧,含量逐渐降低。土壤养分与高程、坡向的相关性较弱,Pearson 相关系数均在 0.1 水平以下,这表明研究区内土壤养分受高程与坡向的影响较小。

为了进一步探讨坡度对土壤养分含量的影响,本研究将坡度进行重分类,重分类以水土保持工作中普遍采用的临界坡度分级标准<sup>[25]</sup>作为基本依据,同时结合研究区的实际情况来进行分类,共分为 6 级,分级结果见表 5 所示。

由于研究区 35°以上坡度所占比例少且零星分布,所采土壤样点没有涉及到第 6 坡度等级,故以下分析中不涉及第 6 坡度等级。对不同坡度等级的土

壤养分含量进行统计,统计结果见图 2。

表 5 排土场边坡坡度分级

坡度等级	坡度特征	坡度/(°)
1	微坡(平台)	<5
2	轻微破	5~8
3	缓坡	8~15
4	较陡坡	15~25
5	陡坡	25~35
6	急陡坡	>35

从图 2 中可以看出,坡度等级对各土壤养分含量的影响较为显著,平均含量随着坡度等级的增加总体上呈下降的趋势。对于土壤有机碳含量,第 1 等级均值含量最高,第 5 坡度等级的均值含量最低,为第 1 坡度等级的三分之一左右;第 1,3 坡度等级的有机碳含量极差较大,而第 2,4,5 等级的分布则相对集中。第 1 坡度等级的土壤全氮含量最高,达到 0.7 g/kg 左右,其次是第 3 坡度等级,第 2,4,5 等级的均值含量较为接近,含量较低仅为第 1 等级的一半左右,但其含量极差较小,分布较为集中。土壤全磷和有效磷的分布趋势较为一致,第 1 坡度等级的含量最高,但同时又是极差最大的一个等级,第 2~5 坡度等级含量较为接近,且极差较小,相对第 1 坡度等级来说,土壤全磷和有效磷的含量高度集中,表明在这几个坡度等级中,全磷与有效磷含量较为稳定,空间变异程度低。对于速效钾,同样是第 1 坡度等级的均值含量最高,接近 200 mg/kg 左右,第 2~5 坡度等级速效钾含量较为接近,极差较小,分布较为稳定。

2.5 土地复垦类型及坡度的交互作用对复垦土壤养分含量的影响

为了研究土地复垦类型与微地形因子的交互作用,将每个坡度等级的地类细分为耕地、草地及林地进行分析,分类结果见图 3。

从图 3 中可以看出,耕地主要集中在第 1 坡度等级上,第 2,3 坡度等级耕地零星分布,第 4,5 等级不存在耕

地。草地在五个坡度等级中均有分布,其中第 3 坡度等级分布最多,是第 5 坡度等级中仅存的一种地类;除了第 5 坡度等级,林地和其他各个坡度等级中均有分布。

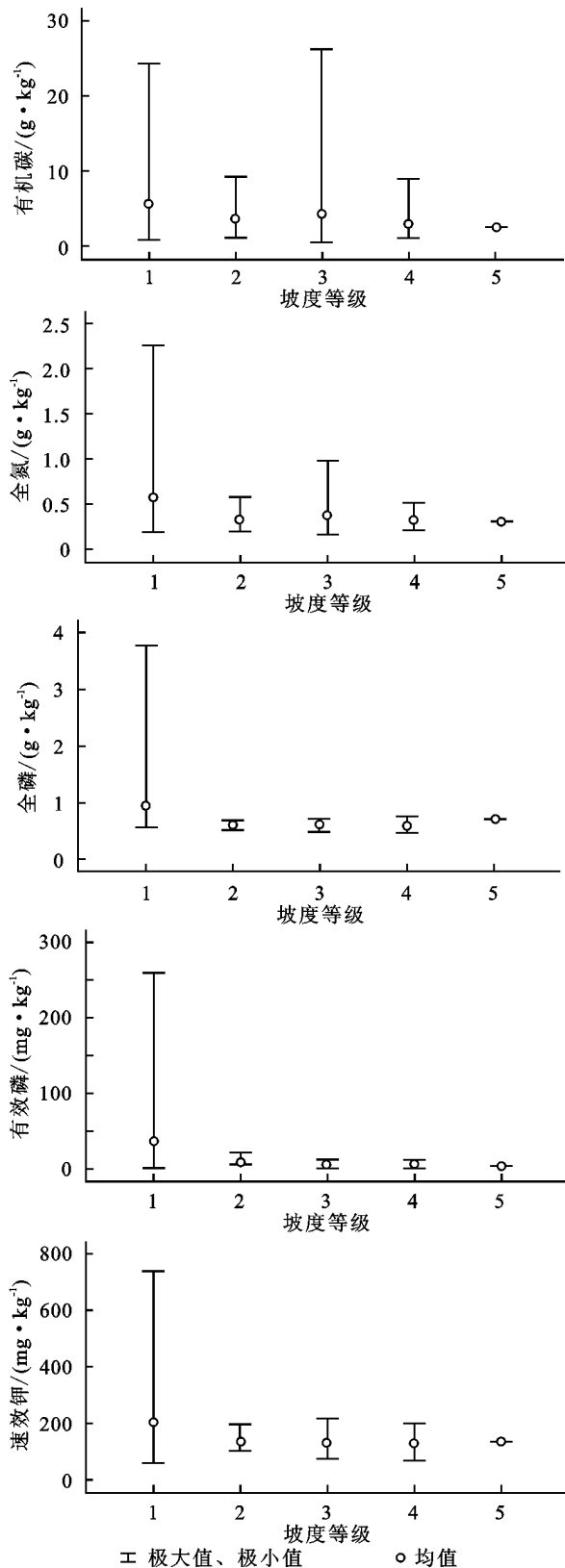


图 2 不同坡度等级土壤养分含量分布

这种分布格局主要是由于坡度对土地复垦类型的限制造成的,农用地由于耕作等条件的限制,对坡

度有较高的要求,根据《土地复垦质量控制标准》(TD/T1036—2013)黄土高原区的控制标准,复垦为旱地的地面坡度要求在  $25^\circ$  以内,在坡度较缓的适宜区内往往优先复垦为农用地,因而耕地在研究区范围内的分布主要表现为集中于微坡(平台)及缓坡区域;而林地和草地对坡度的适应性较强,可以适应坡度较陡的区域,《土地复垦质量控制标准》中并未对复垦林地和草地进行坡度的限制,在研究区不同坡度等级中均有林地或草地的出现。

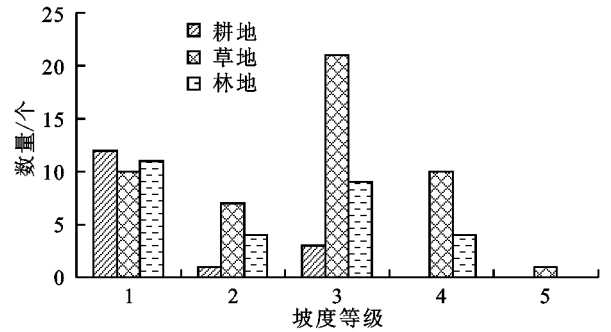


图 3 不同坡度等级中的土地复垦类型分布

在分析土地复垦类型与坡度对各土壤养分的交互作用前,首先要对交互作用的存在性进行检验。利用 SPSS 19.0,通过交互检验得到结果如表 6 所示。

从表 6 中可以看出,除土壤有机碳以外,其他各项土壤养分均受土地复垦类型与坡度等级的交互影响,在 5% 或 10% 水平上表现出较为明显的显著性。由于交互因子对土壤有机碳的交互作用不显著,因此只需对其他几种土壤养分做分析,土地复垦类型与坡度双因子交互作用对土壤养分的影响见表 7。

从表 7 中可以看出,同一土地复垦类型下,不同坡度等级的土壤养分含量差异显著。耕地的各项土壤养分均随着坡度等级的增加呈下降趋势,从第 1 坡度等级到第 2 坡度等级,耕地的各项土壤养分含量急剧降低,而从第 2 坡度等级到第 3 坡度等级,营养含量下降则相对缓慢。对于土壤全氮、全磷及速效钾含量,第 1 坡度等级均为第 2,3 坡度等级的 2~3 倍,但对于耕地的有效磷含量,第 1 坡度等级远远大于 2,3 等级,相差近 18 倍之多。对于草地,全氮含量受坡度等级影响较小,维持在  $0.30 \sim 0.33 \text{ g/kg}$  以内变化。草地土壤全磷含量在第 2—4 坡度等级上先是减少,然后在第 5 坡度等级上增加至最高值  $0.71 \text{ g/kg}$ ,总体变化趋势较小,近乎呈 U 形,土壤有效磷从第 1 坡度等级变为第 2 坡度等级时含量达到最高值  $11.05 \text{ mg/kg}$ ,而后呈波浪状上下浮动变化,在第 5 坡度等级处达到最低值  $3.03 \text{ mg/kg}$ 。土壤速效钾在前 3 个坡度等级含量呈倒 V 字形变化,而后在第 4,5 坡度等级持续增加,在第 5 等级处达到最高值  $134.08 \text{ mg/kg}$ 。

表 6 土地复垦类型与坡度交互作用的检验

项目	交互类型	平方和	均方	F 值	Sig.	显著性
有机碳	复垦类型×坡度等级	124.627	24.925	1.247	0.295	不显著
全氮	复垦类型×坡度等级	0.978	0.196	2.507	0.036	5%水平上显著
全磷	复垦类型×坡度等级	1.943	0.389	2.075	0.077	10%水平上显著
有效磷	复垦类型×坡度等级	$1.986 \times 10^{-8}$	$3.972 \times 10^{-9}$	3.865	0.003	5%水平上显著
速效钾	复垦类型×坡度等级	$1.310 \times 10^{-7}$	$2.621 \times 10^{-8}$	3.187	0.011	5%水平上显著

表 7 土地复垦类型与坡度双因子交互作用下土壤养分的分布

项目	坡度等级	坡度范围	耕地	草地	林地
全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	1	0°~5°	1.01	0.30	0.42
	2	5°~8°	0.48	0.33	0.33
	3	8°~15°	0.43	0.33	0.51
	4	15°~25°	—	0.32	0.37
	5	25°~35°	—	0.31	—
全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )	1	0°~5°	1.52	0.62	0.62
	2	5°~8°	0.65	0.62	0.60
	3	8°~15°	0.61	0.60	0.62
	4	15°~25°	—	0.58	0.64
	5	25°~35°	—	0.71	—
有效磷/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	1	0°~5°	93.33	4.98	4.75
	2	5°~8°	5.38	11.05	6.66
	3	8°~15°	4.85	6.00	5.13
	4	15°~25°	—	6.11	5.47
	5	25°~35°	—	3.03	—
速效钾/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	1	0°~5°	339.19	130.49	129.40
	2	5°~8°	150.89	132.46	142.90
	3	8°~15°	110.65	123.57	159.17
	4	15°~25°	—	127.02	137.06
	5	25°~35°	—	134.08	—

同一坡度等级上,不同的土地复垦类型对土壤养分含量影响显著。耕地各项土壤养分含量在第 1 坡度等级上显著高于林地和草地的含量,其中耕地有效磷为林、草地的 18 倍左右。第 2 坡度等级上,耕地除了有效磷含量低于林地、草地外,其他土壤养分均较林地、草地含量高。第 3 坡度等级上,耕地除全磷含量与林地、草地较为接近外,其他土壤养分含量较林地、草地低。在第 1—4 坡度等级上,除第 2 等级上全氮含量相等外,林地全氮含量均大于草地含量,而全磷含量较为接近;对于土壤有效磷含量,第 1—4 坡度等级上草地均大于林地,而速效钾含量较为接近。

2.6 其他影响土壤养分含量的因素

除了坡度和土地复垦类型以外,引起复垦区土壤养分变化的因素还有很多,其中较为重要的主要还有复垦时间和管理措施。

研究区内土壤样点的复垦年限从 3~20 a 不等,将土壤样点按 5 a 一个阶段进行,共划分为 0~5 a,5~10 a,10~15 a,15~20 a 四个阶段,进行单方差分析,得到表 8 检验结果。

表 8 复垦时间对土壤养分影响的单方差检验

项目	有机碳	全氮	全磷	有效磷	速效钾
F 值	0.77	1.93	2.95	4.51	4.24
显著性	0.55	0.11	0.02*	0.002**	0.003**

注: \* 表示在 0.05 水平上显著性相关, \*\* 表示在 0.01 水平上显著性相关。

从表 8 中可以看出,复垦时间对土壤养分含量有重要的影响,其中土壤有效磷和速效钾含量与复垦时间在 0.01 置信度水平上存在显著相关性,土壤全磷含量与复垦时间在 0.05 置信度水平上存在显著相关性,土壤有机碳、全氮与复垦时间存在一定的相关性,但显著性水平稍低。根据樊文华等<sup>[26]</sup>关于平朔安太堡露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤养分变化的研究表明,复垦年限对土壤养分含量影响较为显著,随着复垦年限的增加,沙棘林、乔木林的土壤有机质、氮、磷、钾含量均不断上升。

另外,管理措施也是影响土壤养分含量变化的重要因素。研究区内的复垦类型主要分为耕地、林地和草地,其中草地和林地很少进行施肥等管护,管理措施对于草地及林地土壤养分含量的影响较小;耕地中旱地进行农作物的种植,主要进行机械化耕作,肥料施用较少,而耕地中的水浇地主要为蔬菜大棚,管理措施较多,肥料施用量大,对于土壤养分产生较大影响,导致耕地土壤养分含量的极差和变异程度均较高。

3 结论

(1) 依据全国第二次土壤普查分类标准,除土壤有机碳及全氮含量等级较低外,其他土壤养分含量均处于中上等水平,等级排序依次为速效钾>全磷≈有效磷>有机碳>全氮;土壤养分的空间变异程度很高,变异系数均达到中强度水平,其中有效磷的变异系数高达 244.17%,即使是变异程度最低的速效钾,其变异系数也达到了 69.70%。

(2) 不同土壤养分的空间自相关性差异较大。其中有机碳和全氮的块金比最低,均小于 25%,空间自相关性较强,空间变异主要来自结构性因素。全磷和速效钾含量的块金值,介于 25%~75%,空间自相关性为中等,速效钾的块金比最大,其值达到 79.60%,表明受人为扰动较大。

(3) 土地复垦类型对各项土壤养分影响均较显

著,均为显著性相关。各项土壤养分含量排序均为耕地>林地>草地,其中,土壤有效磷、全氮、全磷及速效钾含量,耕地分别为草地的2.15~2.68倍,林地的1.48~1.78倍,对于土壤有效磷,耕地中的含量为71.24 mg/kg,为草地的11倍,林地的4倍。

(4) 微地形因子影响土壤养分含量。通过 Pearson 相关性分析可知,土壤养分含量与坡度之间存在较强的相关性,除土壤有机碳以外,其他各养分含量与坡度在 0.05 水平上均呈现为显著相关性;土壤养分含量与高程、坡向的相关性较弱, Pearson 相关系数均在 0.1 水平以下,未达到 0.05 水平上的显著性相关水平,这表明土壤养分受高程与坡向的影响较小,在微地形因子中坡度占主导地位。

(5) 土地复垦类型与坡度的交互作用对土壤养分产生一定的影响。同一土地复垦类型下,不同坡度的土壤养分含量存在差异,耕地的土壤养分随着坡度的加大含量在降低。同一坡度条件下,不同的土地复垦类型土壤养分差异显著,总体趋势为耕地>林地>草地。这种二者的交互作用在控制复垦土地水土流失中值得重视。

#### 参考文献:

- [1] 白中科,赵景达,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.
- [2] 蔡利平,李钢,史文中.增地节地型露天矿排土场优化设计[J].煤炭学报,2013,38(12):2208-2214.
- [3] 张立平,张世文,叶回春,等.露天煤矿区土地损毁与复垦景观指数分析[J].资源科学,2014,36(1):55-64.
- [4] Liu Zigang, Ma Xuehui. Effect of Reclamation on Soil Environment in Sanjiang Plain[J]. Pedosphere, 1997, 7(1):73-78.
- [5] 李华,李永青,沈成斌,等.风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J].农业环境科学学报,2008,27(5):1752-1756.
- [6] 胡振琪,魏忠义,秦萍.矿山复垦土壤重构的概念与方法[J].土壤,2005,37(1):8-12.
- [7] 古巧珍,杨学云,孙本华,等.长期定位施肥对土娄土耕层土壤养分和土地生产力的影响[J].西北农业学报,2004,13(3):121-125.
- [8] 信忠保,余新晓,张满良,等.黄土高原丘陵沟壑区不同土地利用的土壤养分特征[J].干旱区研究,2012,29(3):379-384.
- [9] Sigua G C, Coleman S W. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation: Effects of slope aspect and slope position[J]. Journal of Soils and Sediments, 2010, 10(2):240-247.
- [10] 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.
- [11] Wiatrak P, Liu K. Soil Nutrient Distribution Affected by Nitrogen Fertilization under Conventional Tillage System[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(6):819-828.
- [12] Alem S, Pavlis J. Conversion of grazing land into *Grevillea robusta* plantation and enclosure: Impacts on soil nutrients and soil organic carbon[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, 186(7):4331-4341.
- [13] 傅伯杰,郭旭东,陈利顶,等.土地利用变化与土壤养分的变化:以河北省遵化县为例[J].生态学报,2001,21(6):926-931.
- [14] 孔祥斌,张凤荣,齐伟,等.集约化农区土地利用变化对土壤养分的影响:以河北省曲周县为例[J].地理学报,2003,58(3):333-342.
- [15] 周伟,白中科,袁春,等.东露天煤矿区采矿对土地利用和土壤侵蚀的影响预测[J].农业工程学报,2007,23(3):55-60.
- [16] Nielsen D R, Bouma J. Soil spatial variability[C]// Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA, Las Vegas(USA), 30 Nov-1 Dec. 1984, Pudoc, 1985.
- [17] Omodt H W, Schroer F W, Patterson D D. The Properties of Important Agricultural Soils as a Criteria for Mined Land Reclamation[M]. North Dakota Agricultural Experiment Station Bulletin, 1975:492.
- [18] 杨志斌,杨忠芳,冯海艳,等.沈阳市新城子区土壤重金属元素的空间变异性[J].地质通报,2007,26(11):1480-1485.
- [19] 马云,何丙辉,陈晓燕,等.不同土地利用方式下坡面土壤养分分布特征[J].水土保持学报,2009,23(6):118-122.
- [20] 张萍,郭辉军,刀志灵,等.高黎贡山土壤微生物生化活性的初步研究[J].土壤学报,2000,37(2):275-279.
- [21] 史衍玺,唐克丽.人为加速侵蚀下土壤质量的生物学特性变化[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(1):29-34.
- [22] 陈春瑜,和树庄,胡斌,等.土地利用方式对滇池流域土壤养分时空分布的影响[J].应用生态学报,2012,23(10):2677-2684.
- [23] Florinsky I V, McMahon S, Burton D L. Topographic control of soil microbial activity: A case study of denitrifiers[J]. Geoderma, 2004, 119(1):33-53.
- [24] 杨建虎,常鸿莉,魏琪.黄土高原小流域土壤养分空间特征及其与地形因子的相关性[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(12):85-90.
- [25] 汤国安,宋佳.基于 DEM 坡度制图图中坡度分级方法的比较研究[J].水土保持学报,2006,20(2):157-160.
- [26] 樊文华,李慧峰,白中科,等.黄土区大型露天煤矿不同复垦模式和年限下土壤肥力的变化:以平朔安太堡露天煤矿为例[J].山西农业大学学报:自然科学版,2006,26(4):313-316.