

极酸化排土场不同坡位土壤酸化和养分的分异特征

张建锋^{1,2} 谢金亮¹ 何新春¹ 刘永兵³ 姜久宁¹ 陈宇菲⁴ 钟秀琴⁴

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083;
3. 中国地质科学院国家地质实验测试中心, 北京 100037; 4. 广东省大宝山矿业有限公司, 广东 韶关 512127)

[摘要] 为了解极酸化排土场不同坡位处土壤酸化变化与养分分布,以广东大宝山矿新山片区3个典型排土场为研究对象,分析了土壤层pH与净产酸量NAG的变化,以及不同坡位土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)、速效钾(AK)含量的分布差异,运用主成分分析和回归分析法综合评价了排土场的土壤肥力。结果表明:1)排土场坡脚0~100 cm土壤呈强酸性,pH值为1.96~3.76;0~20 cm土壤中度或高度产酸,产酸能力为坡中<坡顶<坡脚;2)不同坡位0~20 cm土层的SOM平均含量呈坡脚>坡中>坡顶的趋势,变化范围分别为0.24~2.32 g/kg、0.53~1.83 g/kg、1.28~1.55 g/kg;TN平均含量呈坡脚>坡顶>坡中的趋势,坡脚处较高,为0.25 g/kg;坡顶、坡中、坡脚的TP平均含量和TK平均含量均较高,分别为1.00 g/kg、1.02 g/kg、0.94 g/kg和44.74 g/kg、48.59 g/kg、47.81 g/kg;AN平均含量呈坡脚>坡顶>坡中的趋势,分别为54.37 mg/kg、34.53 mg/kg、26.60 mg/kg;坡顶、坡中、坡脚的AP和AK平均含量分别为3.52 mg/kg、2.52 mg/kg、2.15 mg/kg和36.67 mg/kg、36.67 mg/kg、38.33 mg/kg;3)不同坡位0~20 cm土层土壤肥力指数(SFI)为0.28~0.52,总体上呈坡脚>坡顶>坡中的趋势。

[关键词] 酸性废水; 极端酸化; 金属排土场; 坡面位置; 土壤剖面; 养分分布; 土壤肥力; 土壤修复

[中图分类号] X53 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2021)05-0035-10

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/lf.2021.05.009

Changes in Factors Influencing Soil Acidification and Nutrient along Different Slope Positions in Extremely Acidified Waste Dumps

ZHANG Jian-feng, XIE Jin-liang, HE Xin-chun, LIU Yong-bing, JIANG Jiu-ning,

CHEN Yu-fei, ZHONG Xiu-qin

Abstract: In order to understand the changes of soil acidification and nutrient distribution at different slope positions of extremely acidified waste dump, taking three typical waste dumps as the research object in Xinshan Area of Dabaoshan Mine in Guangdong Province, the changes of soil pH and net acid generation test, and the distribution differences of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), available nitrogen (AN), available phosphorus (AP) and availa-

[收稿日期] 2021-08-24

[基金项目] 国家重点研发计划项目:场地土壤污染成因与治理技术专项(2018YFC1801800);国家重点研发计划项目:典型酸性废石堆场及周边污染土壤的修复技术体系及示范(2019YFC1805005)

[作者简介] 张建锋(1986—),男,山西省吕梁人,工程师,博士,主要从事金属矿山生态修复研究和设计等工作。

[通讯作者] 何新春(1978—),男,教授级高级工程师,硕士,主要从事环境影响评价、土壤修复、绿色矿山建设等工作。

[引文格式] 张建锋,谢金亮,何新春,等.极酸化排土场不同坡位土壤酸化和养分的分异特征[J].有色冶金节能,2021,37(5):35-44.

ble potassium (AK) at different slope positions were analyzed. The results showed that: (1) The pH value range of 0 ~ 100 cm layer at the slope toe of the waste dump was 1.96 ~ 3.76, which meant the soil was strongly acidic. The acid production capacity of soil was medium or high in 0 ~ 20 cm layer, which had the trend of slope middle < slope top < slope toe; (2) The average content of SOM in 0 ~ 20 cm soil layer had the trend of slope toe > slope middle > slope top, and the variation ranges were 0.24 ~ 2.32 g/kg, 0.53 ~ 1.83 g/kg and 1.28 ~ 1.55 g/kg, respectively; the average content of TN had the trend of slope toe > slope top > slope middle, the higher slope toe was 0.25 g/kg; the average contents of TP and TK were high, which were 1.00 g/kg, 1.02 g/kg, 0.94 g/kg and 44.74 g/kg, 48.59 g/kg and 47.81 g/kg at the slope top, slope middle and slope toe, respectively; the average content of AN had the trend of slope toe > slope top > slope middle, which were 54.37 mg/kg, 34.53 mg/kg and 26.60 mg/kg, respectively; The average contents of AP and AK at the at the slope top, slope middle and slope toe were 3.52 mg/kg, 2.52 mg/kg and 2.15 mg/kg and 36.67 mg/kg, 36.67 mg/kg and 38.33 mg/kg, respectively; (3) The soil fertility index (*SFI*) in 0 ~ 20 cm soil layer along different slope positions was 0.28 ~ 0.52, which had the trend of slope toe > slope top > slope middle.

Key words: acid wastewater; extreme acidification; metal waste dump; slope location; soil profiles; nutrient distribution; soil fertility; soil remediation

0 前言

土壤退化已经成为限制金属矿区生态恢复的重要障碍因素之一,极端酸化和养分失衡则是土壤退化的重要表现之一^[1]。金属矿区排土场的大量黄铁矿(FeS_2)和其他硫化物矿物很容易产生富含重金属的酸性矿山废水,这些废水进入土壤会导致土壤逐渐酸化问题^[2]。由于矿区土壤环境特殊,植被生长的基质较少,同时由于酸化作用会抑制有机质分解和养分释放,土壤理化性质发生改变^[3]。不同坡面位置的养分运移是一个漫长行为,容易受土壤内部环境、降雨、地形自然因素及人类活动影响,具有时空变异性^[4-5]。

目前,金属矿山生态恢复是建设绿色矿山的重要内容,但针对酸化矿区排土场不同坡位的土壤酸化和养分分布变化的研究较少。本文选择广东大宝山矿新山片区的典型酸化排土场为研究区,分析了不同坡面位置的土壤酸化变化与养分分布特征,为我国南方金属矿山排土场开展原位土壤改良和植被恢复治理工程提供一定参考。

1 研究区概况

研究区位于广东韶关市曲江区沙溪镇大宝山矿新山片区($113^\circ 41' 53'' \sim 113^\circ 46' 40'' \text{E}$, $24^\circ 30' 01'' \sim 24^\circ 35' 26'' \text{N}$)。大宝山矿是广东省境内露天开采的大型多金属矿山,以铁、铜硫、铅锌等矿石为主。新

山片区地处岭南山地丘陵地貌,山体相对高差大,地形地貌复杂,排土场坡陡台高。当地气候是潮湿多雨的亚热带气候,自然季节为夏长,春、秋、冬短暂,多年平均气温为 $17.1 \sim 18.0^\circ \text{C}$,多年平均年降水量为 2083.5 mm。大宝山矿区土壤类型主要为红壤和山地黄壤,地带性植被类型为典型常绿阔叶林。由于长期遭受采矿破坏,植被毁坏殆尽,造成了比较严重的水土流失和生态环境问题。

2 研究方法

2.1 样地选取与样品采集

2020年5月6日,根据现场勘察实际情况,选择3个具有代表性、典型性的极酸化排土场,边坡编号依次为K1、K2和K3(图1)。

2.1.1 0~20 cm 表层土壤采样

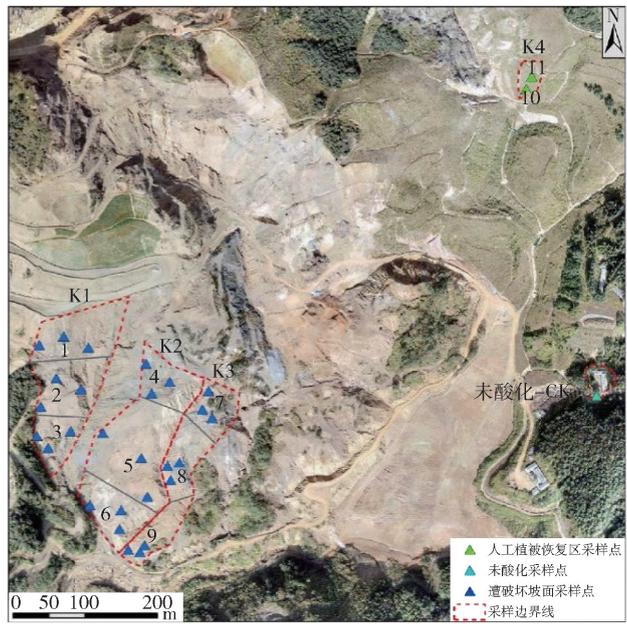
依据样品采集原则,采样点均匀分布在K1、K2、K3排土场中;同时考虑成本以及分析检测时效等因素,基本按对角线法,分别在K1、K2、K3排土场阳坡的坡顶、坡中和坡脚处采样,且每3个采样点的样品混合成1个混合样,每组混合土样尽量涵盖坡顶、坡中和坡脚区域。采集深度为0~20 cm,3个坡面共计27个采样点,采样点编号分别为K1-1-a、K1-1-b、K1-1-c; K1-2-a、K1-2-b、K1-2-c、…、K3-9-a、K3-9-b、K3-9-c,9个混合样品分别编号为K1-1、K1-2、…、K3-9。另外,设置了1个未酸化对照采样点CK,共计10个采样点(图1)。采样点基本情况见表1。



(a) 广东大宝山矿新山片区全景图——
K1、K2、K3所在位置



(b) 典型排土场K1坡面立体照片



(c) 采样点分布图

图1 样地全景图及采样点分布图

表1 新山片区典型排土场各样点基本情况

| 样点编号 | 经度 | 纬度 | 海拔高度/m | 坡向 | 坡度/(°) |
|-----------|---------------|--------------|--------|----|--------|
| 未酸化对照区 CK | 113°44'0.73" | 24°32'23.01" | 541 | E | 20 |
| K1-1-a | 113°43'34.63" | 24°32'26.14" | 544 | N | 35 |
| K1-1-b | 113°43'35.92" | 24°32'25.52" | 527 | NE | 30 |
| K1-1-c | 113°43'33.54" | 24°32'25.53" | 531 | NW | 27 |
| K1-2-a | 113°43'35.58" | 24°32'23.59" | 499 | NE | 40 |
| K1-2-b | 113°43'33.63" | 24°32'22.69" | 500 | W | 35 |
| K1-2-c | 113°43'34.37" | 24°32'24.05" | 515 | N | 45 |
| K1-3-a | 113°43'33.44" | 24°32'21.33" | 480 | SW | 30 |
| K1-3-b | 113°43'34.00" | 24°32'20.80" | 478 | S | 25 |
| K1-3-c | 113°43'35.09" | 24°32'21.62" | 485 | SE | 36 |
| K2-4-a | 113°43'38.72" | 24°32'24.91" | 528 | N | 25 |
| K2-4-b | 113°43'39.88" | 24°32'24.12" | 522 | NE | 35 |
| K2-4-c | 113°43'39.01" | 24°32'23.54" | 506 | SW | 30 |
| K2-5-a | 113°43'38.82" | 24°32'18.75" | 466 | S | 28 |
| K2-5-b | 113°43'38.51" | 24°32'20.54" | 479 | SE | 25 |
| K2-5-c | 113°43'36.58" | 24°32'21.70" | 487 | W | 30 |
| K2-6-a | 113°43'36.03" | 24°32'18.25" | 462 | W | 24 |
| K2-6-b | 113°43'37.55" | 24°32'18.07" | 451 | NE | 30 |
| K2-6-c | 113°43'37.48" | 24°32'17.20" | 451 | S | 27 |
| K3-7-a | 113°43'41.46" | 24°32'22.91" | 520 | SE | 42 |
| K3-7-b | 113°43'41.94" | 24°32'22.55" | 509 | NE | 36 |
| K3-7-c | 113°43'41.76" | 24°32'23.78" | 520 | N | 40 |
| K3-8-a | 113°43'39.79" | 24°32'20.22" | 476 | NW | 35 |
| K3-8-b | 113°43'39.94" | 24°32'19.58" | 483 | SW | 30 |
| K3-8-c | 113°43'40.36" | 24°32'20.40" | 483 | W | 45 |
| K3-9-a | 113°43'37.81" | 24°32'16.47" | 443 | SW | 27 |
| K3-9-b | 113°43'38.61" | 24°32'16.72" | 449 | SE | 30 |
| K3-9-c | 113°43'38.38" | 24°32'16.39" | 443 | S | 25 |
| K4-10 | 113°43'57.33" | 24°32'37.06" | 619 | NE | 15 |
| K4-11 | 113°43'57.59" | 24°32'37.65" | 631 | NE | 25 |

2.1.2 0~100 cm 土壤剖面分层采样

分别在排土场 K1、K2、K3 的坡脚,人工植被恢复区的坡中、坡脚,以及未酸化对照区 CK 共 6 个采样区,按 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm、50~100 cm 分层取样,土壤剖面分别编号为:K1-3-A1、K1-3-A2、…、K1-3-A6, K2-6-B1、K2-6-B2…K2-6-B6, K3-9-C1、K3-9-C2、…、K3-9-C6, K4-10-D1、K4-10-D2、…、K4-10-D6, K4-11-E1、K4-11-E2、…、K4-11-E6, 未酸化 CK1、…、未酸化 CK6, 共计 36 个样品(图 1)。

所有样品采集后装入洁净的自封袋中做好标记,每袋土样 1.5 kg, 运回实验室,经自然风干后,过 2 mm 筛后备用。

2.2 指标测定方法

为了解金属排土场土壤酸化情况,本研究选取土壤 pH、电导率 EC、净产酸量 NAG(Net Acid Generation Test)共 3 项指标;为研究不同坡面养分分布变化,选取了土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、速效氮(AN)、速效磷(AP)和速效钾(AK)含量共 7 项指标。

土壤 pH 值采用校正过的 pH 计测定土水质量比为 1:2.5 的悬液的 pH 值^[6];电导率 EC 采用 DDSJ-

308 电导率仪测定土水质量比为 1:5 的悬液的值^[7];土壤有机质含量采用重铬酸钾-硫酸氧化还原滴定法测定^[8];全氮含量采用凯式定氮仪测定,全钾含量采用火焰光度法测定,全磷含量采用硫酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定^[9];速效氮含量采用碱解扩散法测定,速效磷含量采用 Olsen 法测定,速效钾含量采用中性乙酸铵溶液浸提-火焰光度法测定^[10]。

净产酸量 NAG 的测定方法^[11]如下:2.5 g 土壤样品过 20 目筛网后,放入 500 mL 锥形瓶中,加入 250 mL 浓度为 15% 的 H₂O₂,静置过夜 24 h;采用电热板加热煮沸 1 h 至冒泡结束,以除去多余 H₂O₂;冷却至室温后测 pH 值,即为 NAG-pH。用 0.1 mol/L 的 NaOH 滴定反应溶液至 pH=7,利用式(1)计算 NAG 值(H₂SO₄, kg/t)。

$$NAG = (49VM) / W \quad (1)$$

V 为消耗的 NaOH 体积, mL; M 为 NaOH 浓度,取 0.1 mol/L; W 为样品质量,取 2.5。

2.3 数据分析方法

2.3.1 土壤养分分级标准

本研究区内不同坡面位置的土壤养分的判别标准参考表 2 的全国第二次土壤普查土壤养分分级标准^[12-13]。

表 2 土壤养分含量分级标准

| 等级 | 有机质/ g·kg ⁻¹ | 全氮/ g·kg ⁻¹ | 全磷/ g·kg ⁻¹ | 全钾/ g·kg ⁻¹ | 速效氮/ mg·kg ⁻¹ | 速效磷/ mg·kg ⁻¹ | 速效钾/ mg·kg ⁻¹ | 备注 |
|----|----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----|
| 1 | >40 | >2 | >1 | >25 | >150 | >40 | >200 | 很高 |
| 2 | 30~40 | 1.5~2 | 0.8~1 | 20~25 | 120~150 | 20.0~40.0 | 150~200 | 高 |
| 3 | 20~30 | 1~1.5 | 0.6~0.8 | 15~20 | 90~120 | 10.0~20.0 | 100~150 | 中上 |
| 4 | 10~20 | 0.75~1 | 0.4~0.6 | 10~15 | 60~90 | 5.0~10.0 | 50~100 | 中下 |
| 5 | 6~10 | 0.5~0.75 | 0.2~0.4 | 5~10 | 30~60 | 3.0~5.0 | 30~50 | 低 |
| 6 | <6 | <0.5 | <0.2 | <5 | <30 | <3.0 | <30 | 极低 |

2.3.2 土壤肥力评价

不同坡面土壤肥力评价采用土壤肥力指数法,步骤^[13]如下:

1) 评价指标确定。将土壤肥力指标进行主成分分析,选择每项主成分中贡献率较大的指标。若同一主成分有若干个贡献率较大指标,则需进行相关性分析。显著相关时,该评价指标选择为贡献率最大的指标,若不相关则都选。

2) 按照公式(2)对选取指标进行标准化处理。

$$Y = \frac{1}{1 + (x/x_0)^b} \quad (2)$$

式中, Y 为标准化后的指标值; x 为选取指标值; x_0 是

选取指标的平均值;主成分中 x 的系数为正时, b 为 -2.5,主成分中 x 的系数为负时, b 为 2.5。

3) 按照公式(3)计算土壤肥力指数 SFI 。

$$SFI = \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (3)$$

式中, SFI 表示土壤肥力指数; Y_i 是标准化后的指标值; W_i 为权重,文中可用方差贡献率作为权重。

2.3.3 养分指标分析

将不同坡面位置 0~20 cm 表层土壤的 SOM、TN、TP、TK、AN、AP 和 AK 等养分指标进行单因素方差分析,差异性检验采用最小显著性差异法 LSD ($P < 0.05$),并运用主成分分析法和回归分析法对

不同坡位的土壤肥力进行综合评价,采用 Excel2.0 软件进行数据录入,利用 SPSS20.0 软件进行统计分析。

3 结果与分析

3.1 不同坡面位置土壤酸化分布变化特征

3.1.1 土壤剖面各层 pH 值变化

排土场坡脚区土壤剖面各层样点 pH 值变化如图 2 所示。由图 2 可以看出,与未酸化对照区 CK 采样点相比,除 K3-9-C 采样点 20~30 cm 土壤层 pH 值为中性外,3 个排土场坡脚区域的土壤剖面各层 pH 值均处于 1.96~3.76。K1、K2、K3 坡脚的 0~100 cm 土壤层 pH 平均值分别为 2.31、3.16、3.65,说明研究区排土场矿土产酸明显,为强酸性区域。3 个排土场坡脚的强酸化土壤剖面的 pH 值没有表现出一定规律(pH 值随土壤深度增加而升高或降低)。此外,在人工植被恢复区,生态恢复后,坡中和坡脚 2 处土壤剖面的 pH 平均值分别为 5.02、6.96,明显高于未治理区 K1、K2、K3 排土场,但同时发现,采取人工生态恢复措施后,坡中部分位置的土壤仍有进一步酸化的倾向。

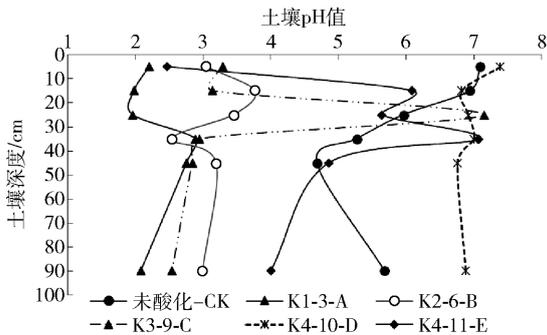


图 2 排土场坡脚区土壤剖面各层样点 pH 值变化

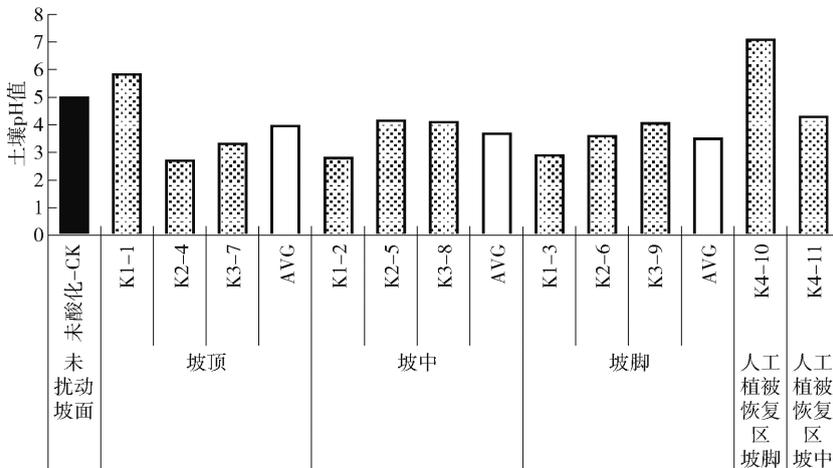


图 3 不同坡位处 0~20 cm 土壤 pH 值变化

3.1.2 土壤表层酸化分布特征

3.1.2.1 pH 值变化和电导率 EC 值变化

极端酸化是金属矿区原位土壤改良与植被恢复的关键制约因素之一^[14],因此,酸化排土场生态恢复工程中,0~20 cm 表层土壤改良受到较高重视^[15]。不同坡位的 0~20 cm 表层土壤 pH 值变化和电导率 EC 值变化分别如图 3、图 4 所示。

从图 3 可以看出,未治理区 3 个排土场坡顶、坡中、坡脚区域的 0~20 cm 表层土壤 pH 值总体上差异不明显,pH 平均值分别为 3.94、3.67、3.50。从图 4 可以看出,与坡中、坡脚位置相比,3 个排土场坡顶位置的 0~20 cm 表层土壤电导率 EC 明显较高,其平均值为 0.68 ms/cm。此外,未治理区 K1、K2、K3 排土场表层土壤电导率整体高于未酸化对照区 CK 和人工植被恢复区 K4-10、K4-11,说明酸化的过程促进了盐分的溶出,产生了严重的盐害。

3.1.2.2 净产酸量

净产酸量(NAG)在一定程度上可以代表酸化排土场土壤的实际产酸量^[16]。图 5 和图 6 为排土场不同坡面 0~20 cm 表层矿土的产酸能力。根据 NAG-pH 阈值划分^[17],K1、K2、K3 排土场坡面多数采样点 0~20 cm 层土壤的 NAG-pH 不高于 2.5,表明土壤中度或高度产酸。不同坡位土壤产酸能力排序为坡中 < 坡顶 < 坡脚,其土壤 NAG-pH 平均值分别为 2.79、2.64、2.38,其中坡脚表层土壤产酸最明显,其平均净产酸潜力为 12.25 kg/t(H_2SO_4)。

3.2 不同坡面土壤养分分布变化

酸化排土场不同坡位的 0~20 cm 土壤养分含量分布如图 7 所示。

由图 7 可知,不同坡位处 0~20 cm 土壤层 SOM

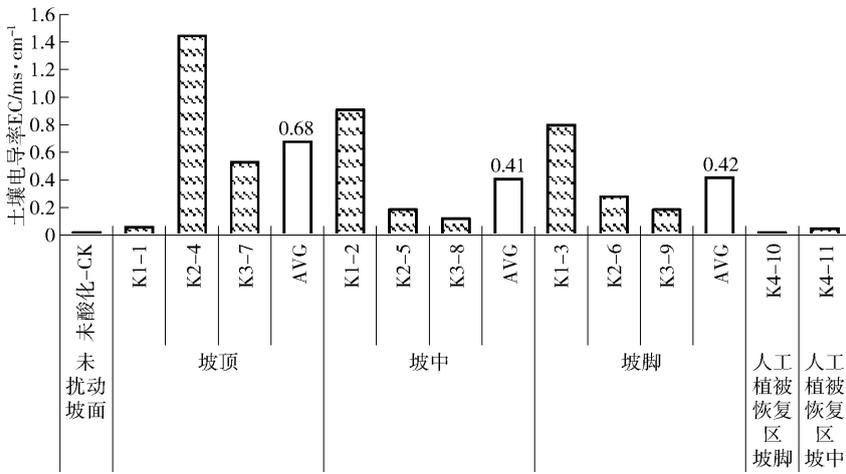


图4 不同坡位处0~20 cm土壤电导率EC值变化

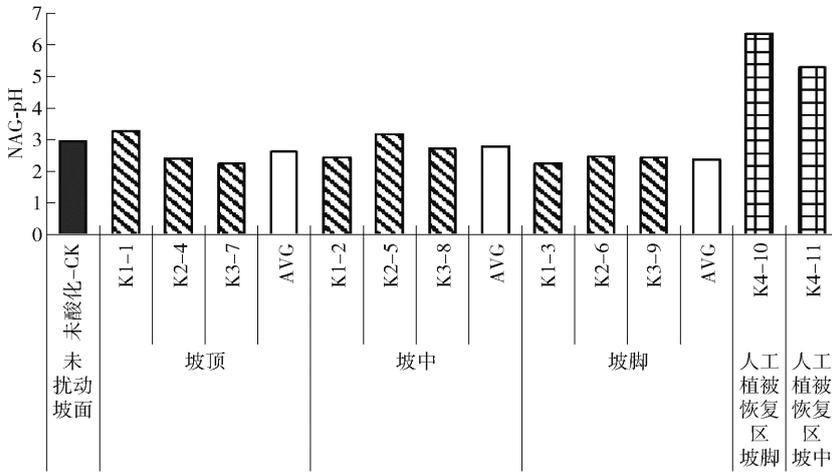


图5 不同坡位处0~20 cm土壤净产酸NAG-pH变化

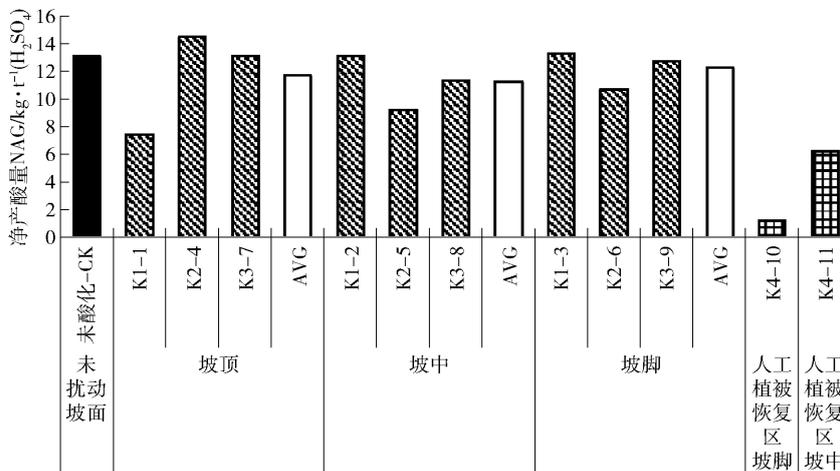


图6 不同坡位处0~20 cm土壤净产酸量NAG变化

含量总体趋势为坡脚>坡中>坡顶,平均含量分别是1.38 g/kg、1.24 g/kg、1.06 g/kg, SOM变化范围分别为0.24~2.32 g/kg、0.53~1.83 g/kg、1.28~1.55 g/kg。参考全国第二次土壤普查土壤养分分

级标准(表2),3个排土场的土壤养分分为6级极低水平,坡顶和坡中区域样点间的SOM含量差异显著。

从图7可知,3个排土场0~20 cm土层土壤

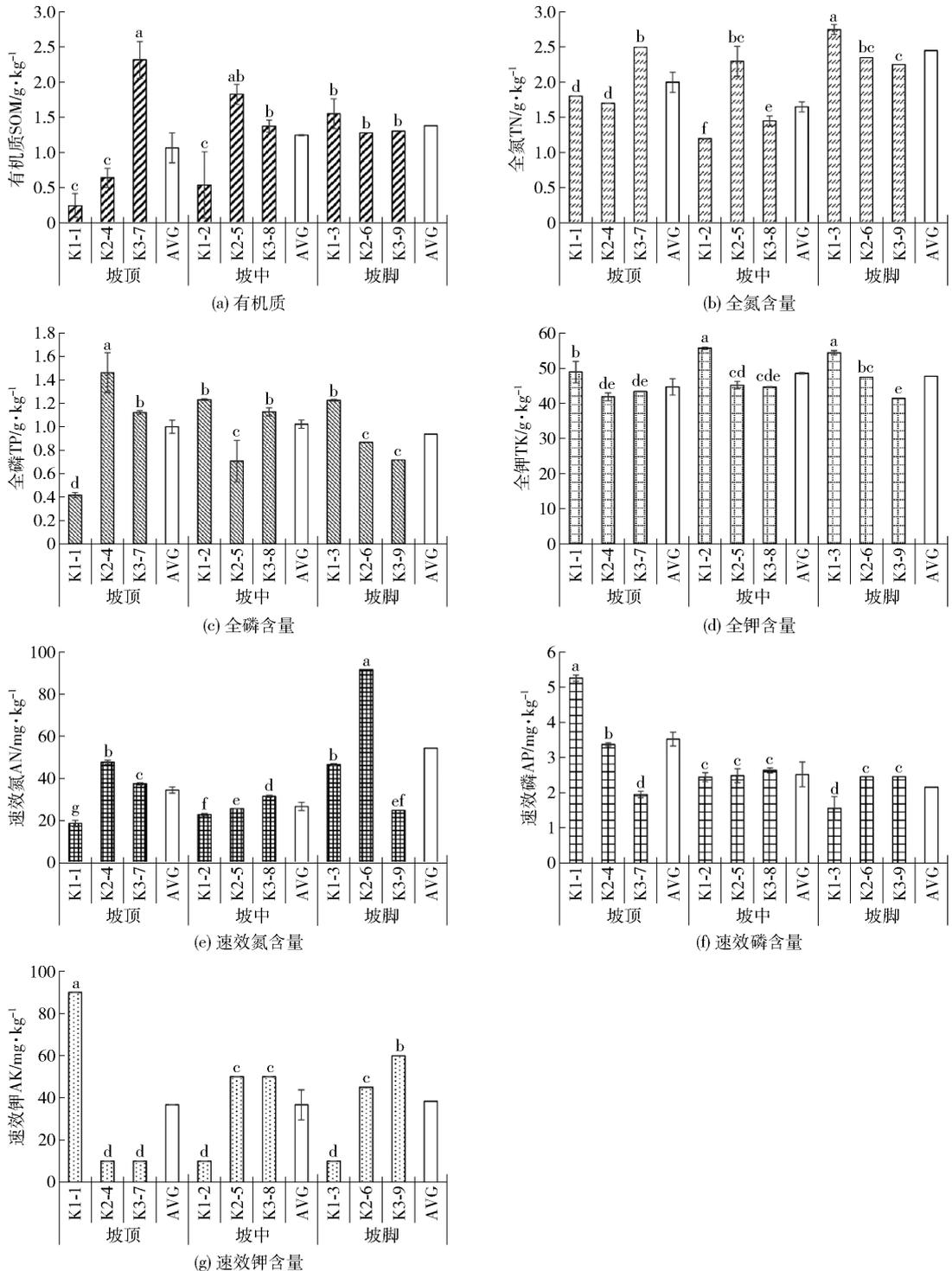


图7 酸化排土场不同坡位0~20 cm土壤养分含量分布

注: a, b, c, d 等字母表示不同坡位处0~20 cm土层样点间显著性水平 ($P < 0.05$)

TN、TP、TK 含量在不同坡位处的分布有一定差异。TN 平均含量总体趋势为坡脚 > 坡顶 > 坡中, 其中坡中处样点间的差异显著, 坡脚处土壤 TN 平均含量较高为 0.25 g/kg , 为 6 级极低水平; 坡顶、坡中、坡脚处土壤的 TP 平均含量较高, 分别为 1.00 g/kg 、

1.02 g/kg 、 0.94 g/kg , 属于 2 级以上高水平, 不同坡位总体差异不明显; 坡顶、坡中、坡脚处土壤的 TK 平均含量整体也较高, 分别为 44.74 g/kg 、 48.59 g/kg 、 47.81 g/kg , 属于 1 级很高水平, 其中坡脚处各样点间差异显著。

此外,从图 7 还可以看出,不同坡位 0 ~ 20 cm 土壤层的速效养分含量分布也有一定差异。其中 AN 平均含量总体趋势为坡脚 > 坡顶 > 坡中,坡顶、坡中、坡脚处 AN 平均含量分别为 34.53 mg/kg、26.60 mg/kg、54.37 mg/kg,属于 5 级以下低水平,样点间差异显著,变化范围为 18.55 ~ 91.70 mg/kg;坡顶、坡中、坡脚处 AP 平均含量分别为 3.52 mg/kg、2.52 mg/kg、2.15 mg/kg,属于 5 级以下低水平,坡顶处样点间的 AP 含量差异显著,坡中和坡脚变化不明显,AP 含量变化范围为 1.55 ~ 5.26 mg/kg;坡顶、坡中、坡脚处 AK 平均含量分别为 36.67 mg/kg、36.67 mg/kg、38.33 mg/kg,属于 5 级以下低水平,坡脚处样点间的 AK 含量差异显著($P < 0.05$),变化

范围为 10.00 ~ 90.00 mg/kg。

3.3 不同坡面位置土壤肥力特征及评价

运用主成分分析和回归分析法对排土场不同坡位处 0 ~ 20 cm 土层土壤肥力进行综合评价,结果见表 3、表 4 和表 5。根据累计方差百分比达到 80% 以上原则,选择第 1、2、3 主成分的土壤肥力指标,其累计方差贡献率为 83.42%。第 1 主成分中,土壤 pH、AP、AK 均有较高系数,且 pH 与 AP、AK 呈显著、极显著相关(表 3),因此土壤 pH 系数最大,可作为第 1 主成分评价指标。在第 2 主成分中,SOM 和 TN 有较大系数,SOM 与 TN 显著相关,且 TN 系数最大,故 TN 可作为第 2 主成分评价指标。第 3 主成分中只有 TK 系数较高,可作为其评价指标。

表 3 土壤肥力各项指标相关性矩阵

| 指标 | pH | SOM | TN | TP | TK | AN | AP | AK |
|-----|---------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|----|
| pH | 1 | | | | | | | |
| SOM | -0.23 | 1 | | | | | | |
| TN | -0.06 | 0.68* | 1 | | | | | |
| TP | -0.89** | 0.09 | -0.18 | 1 | | | | |
| TK | -0.18 | -0.30 | -0.12 | 0.11 | 1 | | | |
| AN | -0.35 | 0.17 | 0.37 | 0.23 | -0.02 | 1 | | |
| AP | 0.72* | -0.73* | -0.44 | -0.51 | -0.11 | -0.29 | 1 | |
| AK | 0.95** | -0.29 | -0.08 | -0.90** | -0.23 | -0.23 | 0.67* | 1 |

注: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, $N = 9$

表 4 解释的总方差

| 成分 | 初始特征值 | | | 提取平方和载入 | | |
|----|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 合计 | 方差百分比/% | 累积百分比/% | 合计 | 方差百分比/% | 累积百分比/% |
| 1 | 3.73 | 46.59 | 46.59 | 3.73 | 46.59 | 46.59 |
| 2 | 1.99 | 24.89 | 71.47 | 1.99 | 24.89 | 71.47 |
| 3 | 0.96 | 11.94 | 83.42 | 0.96 | 11.94 | 83.42 |
| 4 | 0.87 | 10.91 | 94.33 | | | |
| 5 | 0.28 | 3.46 | 97.79 | | | |
| 6 | 0.12 | 1.54 | 99.33 | | | |
| 7 | 0.05 | 0.65 | 99.98 | | | |
| 8 | 0.00 | 0.02 | 100.00 | | | |

利用公式(2)、(3)可计算得到不同坡位处 0 ~ 20 cm 土层的土壤肥力指数 SFI ,结果见表 6。从表 6 可以看出, SFI 变化范围为 0.28 ~ 0.52,总体上不同坡位处土壤肥力大小为:坡脚 > 坡顶 > 坡中。

根据表 1 和表 6 中不同坡位处海拔高度和土壤

肥力指数,进行回归分析,得到 0 ~ 20 cm 表层土壤肥力指数随海拔高度的变化趋势,结果如图 8 所示。从图 8 可以看出,极酸性金属排土场土壤肥力随平均海拔高度的降低呈增大趋势,决定系数 $R^2 = 0.034$ 。

表 5 土壤肥力指标主成分分析结果

| 指标 | 成分 | | |
|-----|---------|---------|---------|
| | 第 1 主成分 | 第 2 主成分 | 第 3 主成分 |
| pH | 0.94 | 0.29 | 0.05 |
| SOM | -0.53 | 0.75 | -0.20 |
| TN | -0.32 | 0.82 | 0.30 |
| TP | -0.81 | -0.47 | -0.22 |
| TK | -0.13 | -0.48 | 0.73 |
| AN | -0.43 | 0.24 | 0.48 |
| AP | 0.87 | -0.27 | -0.01 |
| AK | 0.92 | 0.30 | 0.08 |

表6 极酸化排土场不同坡位处0~20 cm土壤层土壤肥力指数(SFI)

| 坡面位置 | 样品编号 | 土壤 pH | | | | 全氮 TN | | | | 全钾 TK | | | | SFI |
|------|-------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|-------|------|------|------|------|
| | | x | Y | W | Y×W | x | Y | W | Y×W | x | Y | W | Y×W | |
| 坡顶 | K1-1 | 5.81 | 0.75 | 0.47 | 0.35 | 0.18 | 0.42 | 0.25 | 0.11 | 48.97 | 0.52 | 0.12 | 0.06 | 0.52 |
| | K2-4 | 2.70 | 0.31 | 0.47 | 0.15 | 0.17 | 0.39 | 0.25 | 0.10 | 41.92 | 0.43 | 0.12 | 0.05 | 0.29 |
| | K3-7 | 3.31 | 0.43 | 0.47 | 0.20 | 0.25 | 0.63 | 0.25 | 0.16 | 43.42 | 0.45 | 0.12 | 0.05 | 0.41 |
| | AVG | 3.94 | 0.50 | 0.47 | 0.23 | 0.20 | 0.48 | 0.25 | 0.12 | 44.77 | 0.47 | 0.12 | 0.06 | 0.41 |
| 坡中 | K1-2 | 2.78 | 0.33 | 0.47 | 0.15 | 0.12 | 0.21 | 0.25 | 0.05 | 55.78 | 0.60 | 0.12 | 0.07 | 0.28 |
| | K2-5 | 4.13 | 0.57 | 0.47 | 0.26 | 0.23 | 0.58 | 0.25 | 0.14 | 45.28 | 0.48 | 0.12 | 0.06 | 0.46 |
| | K3-8 | 4.10 | 0.56 | 0.47 | 0.26 | 0.15 | 0.30 | 0.25 | 0.07 | 44.71 | 0.47 | 0.12 | 0.06 | 0.39 |
| | AVG | 3.67 | 0.49 | 0.47 | 0.23 | 0.17 | 0.36 | 0.25 | 0.09 | 48.59 | 0.52 | 0.12 | 0.06 | 0.38 |
| 坡脚 | K1-3 | 2.88 | 0.35 | 0.47 | 0.16 | 0.28 | 0.68 | 0.25 | 0.17 | 54.49 | 0.59 | 0.12 | 0.07 | 0.40 |
| | K2-6 | 3.60 | 0.48 | 0.47 | 0.22 | 0.24 | 0.59 | 0.25 | 0.15 | 47.53 | 0.51 | 0.12 | 0.06 | 0.43 |
| | K3-9 | 4.04 | 0.55 | 0.47 | 0.26 | 0.23 | 0.56 | 0.25 | 0.14 | 41.42 | 0.42 | 0.12 | 0.05 | 0.45 |
| | AVG | 3.50 | 0.46 | 0.47 | 0.21 | 0.25 | 0.61 | 0.25 | 0.15 | 47.81 | 0.51 | 0.12 | 0.06 | 0.43 |
| 参数取值 | x_0 | 3.72 | | | | 0.20 | | | | 46.99 | | | | |
| | b | -2.50 | | | | -2.50 | | | | -2.50 | | | | |

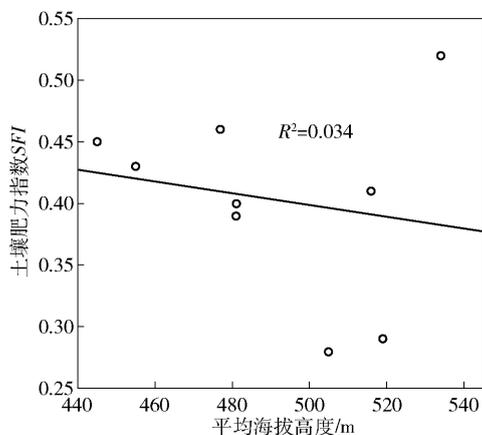


图8 不同坡位处0~20 cm土壤层土壤肥力指数随排土场平均海拔高度的变化

4 讨论

1) 本研究结果显示,未治理区3个排土场坡脚0~100 cm各土壤层的pH值均较小,土壤产酸明显,这是因为金属矿区排土场中的硫矿物(主要为黄铁矿 FeS_2)暴露于空气中,加上天然淋滤作用,与空气(主要是 O_2)和水蒸气充分接触,在铁离子和铁/硫氧化细菌的催化作用下会迅速发生氧化反应而产酸^[3]。有学者发现尾矿土壤表层作为强氧化层在氧化后产酸比较明显,pH值会随土壤剖面深度增加而增加^[15],但本研究结果中3个强酸化排土场土壤pH值没有随深度表现出一定规律,这可能是因为pH值受排土场堆积年限、堆积方式、矿石成分、雨水淋溶时间等多种因素影响。

2) 较低的土壤pH值易使可溶性盐含量增加,进而导致土壤电导率提高,造成土壤板结。本研究

结果显示,未治理区K1、K2、K3排土场整体表层土壤电导率EC高于未酸化对照组CK和人工植被恢复区,这也说明人工植被恢复后,酸化得到改善,植物对于促进土壤熟化和形成具有重要作用^[18]。本研究发现已酸化排土场坡脚位置土壤表层净产酸量NAG最明显,这可能是因为长期降雨量大,坡脚往往汇流汇集较多雨水。

3) 有机质具有疏松土壤结构、提高微生物活性、提高土壤保肥性和缓冲性等作用^[19]。本研究显示,酸化排土场0~20 cm表层土壤有机质含量和全氮含量均较低,这是因为95%以上的土壤氮素以有机态存在,土壤全氮量主要决定于有机质含量,土壤全氮含量与有机质含量间存在很好的线性正相关性^[20-21]。此外,本研究还显示矿区全磷含量和全钾含量较高,主要原因可能与排土场土壤成土母质富含钾和磷有关。

4) 本研究表明,矿区土壤速效养分含量均较低,且坡顶、坡中、坡脚不同坡位处各样点间的速效氮含量均存在显著差异。一方面,速效氮含量可能受坡面径流冲刷与雨水淋溶等因素影响;另一方面与缺乏土壤养分转化微生物有关。由于速效氮含量和全氮含量正相关,随有机质含量增加而增加^[21],因此可以通过提高土壤有机质含量来增强土壤全氮和速效氮的水平。土壤速效态养分以离子、分子状态存在于土壤溶液中,能够直接被作物吸收利用,而全量养分一般存在于土壤矿物质和有机质中,需要通过化学作用和微生物作用变为速效养分才能被植物吸收。本研究的速效磷和速效钾含量很低,可能是

因为土壤缺乏土壤氮转化、磷转化、钾转化的硝化细菌、磷细菌、钾细菌等相关益生微生物。

5 结论

1) 排土场坡脚区 0 ~ 100 cm 土壤层的 pH 值范围为 1.96 ~ 3.76, 产酸明显。坡顶、坡中、坡脚 0 ~ 20 cm 土壤 pH 值总体上差异不明显, 土壤 pH 均值分别为 3.94、3.67、3.50。0 ~ 20 cm 土层 NAG-pH ≤ 2.5, 表明土壤中度或高度产酸, 产酸能力大小为坡中 < 坡顶 < 坡脚。坡脚处产酸最明显, 净产酸潜力 NAG 平均为 12.25 kg/t(H₂SO₄)。

2) 不同坡位处 0 ~ 20 cm 土层有机质含量总体趋势为坡脚 > 坡中 > 坡顶, 变化范围分别为 0.24 ~ 2.32 g/kg、0.53 ~ 1.83 g/kg、1.28 ~ 1.55 g/kg, 为 6 级极低水平。

3) 0 ~ 20 cm 土层全氮平均含量总体趋势为坡脚 > 坡顶 > 坡中, 坡脚处较高, 为 0.25 g/kg, 属于 6 级极低水平; 未治理区排土场全磷平均含量和全钾平均含量均较高, 坡顶、坡中、坡脚处分别为 1.00 g/kg、1.02 g/kg、0.94 g/kg 和 44.74 g/kg、48.59 g/kg、47.81 g/kg, 分别为 2 级以上高水平 and 1 级很高水平。

4) 0 ~ 20 cm 土层速效氮平均含量总体呈坡脚 > 坡顶 > 坡中的趋势, 平均含量分别为 54.37 mg/kg、34.53 mg/kg、26.60 mg/kg, 为 5 级以下低水平, 不同坡位处速效氮含量差异显著。坡顶、坡中、坡脚 0 ~ 20 cm 土层的速效磷和速效钾平均含量分别为 3.52 mg/kg、2.52 mg/kg、2.15 mg/kg, 和 36.67 mg/kg、36.67 mg/kg、38.33 mg/kg, 均为 5 级以下低水平。

5) 不同坡位处 0 ~ 20 cm 土层土壤肥力指数 (SFI) 为 0.28 ~ 0.52, 总体上呈坡脚 > 坡顶 > 坡中的趋势。

[参考文献]

- [1] 孙敬国, 李先豪, 张鹏龙, 等. 酸化对植烟土壤影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(2): 20-22.
- [2] 陈波. 矿山排土场生态恢复实践——以德兴铜矿水龙山为例[J]. 江西建材, 2017(22): 278-279.
- [3] 杨胜香. 广东大宝山多金属矿排土场生态恢复[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [4] XU Qingxue, WANG Tianwei, ZHAO Xiali, et al. Effects of soil conservation on soil properties of citrus orchards in the Three-Gorges Area, China[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(1): 34-42.
- [5] ZHANG Nan, ZHANG Qun, LI Yueqiao, et al. Effect of Groundcovers on Reducing Soil Erosion and Non-Point Source Pollution in Citrus Orchards on Red Soil Under Frequent Heavy Rainfall[J]. Sustainability, 2020, 12(3): 1-16.
- [6] 熊管乐, 邵孝候, 张永涛, 等. 土壤调理剂用量对酸性土壤肥力影响的综合评价[J]. 广东农业科学, 2020, 47(1): 53-61.
- [7] 胡娟, 禹朴家, 周道玮. 松嫩平原沙丘-草甸复合生态系统土壤水分时空变化特征[J]. 土壤与作物, 2020, 9(3): 279-295.
- [8] 邹小阳, 周旺, 孙文俊, 等. 桂西北岩溶区土壤理化性质及相关性分析[J]. 东北农业科学, 2021, 46(3): 41-47, 129.
- [9] 刘麟, 于金田, 王晶, 等. 施肥对苜蓿地土壤理化性质及其生态化学计量学特征的影响[J]. 南方农业, 2021, 15(19): 1-6.
- [10] 赵昱, 喻武. 不同株龄紫穗槐对退化黑土土壤理化性质的影响[J]. 高原农业, 2021, 5(4): 353-360.
- [11] 张耀, 张永康, 刘岩, 等. 江西赣州矿山废石酸化潜力[J]. 现代矿业, 2019, 35(1): 119-122.
- [12] 刘军, 徐旻昱. 杭州市余杭区雷竹林土壤肥力评价及管理对策[J]. 浙江林业科技, 2016, 36(4): 59-63.
- [13] 任启文, 左万星, 尤海舟, 等. 冀北山地土壤养分和肥力对海拔梯度的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(3): 96-104.
- [14] 孟磊, 霍汉鑫, 李昊, 等. 土壤改良剂对废弃离子型稀土矿酸性砂化土壤改良效果研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2020, 72(6): 93-96.
- [15] 束文圣, 张志权, 蓝崇钰. 广东乐昌铅锌尾矿的酸化潜力[J]. 环境科学, 2001(3): 113-117.
- [16] 黄金文, 左丹丹, 岳梅. 庐江矾矿废石产酸潜力的评估[J]. 安庆师范大学学报(自然科学版), 2017, 23(3): 68-71.
- [17] 束文圣, 黄立南, 张志权, 等. 几种矿业废物的酸化潜力[J]. 中国环境科学, 1999, 19(5): 402-405.
- [18] Šourková M, Frouz J, Santruckova H, et al. Accumulation of carbon, nitrogen and phosphorus during soil formation on alder spoil heaps after brown-coal mining, near Sokolov (Czech Republic)[J]. Geoderma, 2005, 124(1-2): 203-214.
- [19] 李兵, 刘广明, 杨劲松, 等. 农艺措施对轻中度盐碱障碍农田土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(1): 190-194.
- [20] 荆奇, 戴廷波, 姜东, 等. 不同生态条件下不同基因型小麦干物质和氮素积累与分配特征[J]. 南京农业大学学报, 2004(1): 1-5.
- [21] 高丽丽. 西藏土壤有机质和氮磷钾状况及其影响因素分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004.