

# 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下 土壤养分效应研究\*

王丽丽<sup>1,2</sup> 甄庆<sup>1,2</sup> 王颖<sup>1,3</sup> 孙层层<sup>1,3</sup> 严翔<sup>1,3</sup>

郑纪勇<sup>1,2,3†</sup>

(1 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要** 探究晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应及差异。在内蒙古准格尔旗永利煤矿排土场, 选取砒砂岩沙黄土混掺(FS)、风化煤沙黄土混掺(WC)、沙黄土(SL)三种人工熟化的新构土体, 与周边以长芒草为主的原地貌土壤(OL)以及新建排土场(CK)作对比, 分析3种改良模式下0~20 cm表层土壤中有机碳、全氮、硝态氮、铵态氮、有效磷的含量变化及改良效果差异, 并采用加权综合法对几种土壤类型的养分质量进行综合评价。结果表明: 1) 不同改良模式排土场相比新建排土场, 土壤各养分含量均有显著提高, 原地貌土壤在0~10 cm和10~20 cm两个土层中, 有效磷含量较对照分别降低了0.36 mg kg<sup>-1</sup>和0.9 mg kg<sup>-1</sup>。2) 重构小区中不同改良模式下土壤有机碳、有效磷、硝态氮均已超过原地貌土壤养分含量, 土壤铵态氮基本达到原地貌水平, 土壤全氮尚未恢复至原地貌水平。3) 由5种土壤养分指标计算出的土壤质量指数在0~10 cm土层中的变化范围是0.16~0.79, 在10~20 cm土层中的变化范围是0.16~0.55, 几种土壤类型的土壤质量指数排序为WC>FS>SL>OL>CK。总体而言, 不同改良模式土壤养分质量以风化煤掺混土体最高, 其次是砒砂岩掺混土体, 沙黄土高于原地貌土壤, 对照质量最差。

**关键词** 排土场; 砒砂岩; 风化煤; 土壤养分; 改良效果; 土壤质量指数

**中图分类号** S158.2 **文献标识码** A

晋陕蒙地区是我国特大型能源基地, 蕴含丰富的煤炭资源, 该区大规模地露天开采, 在带动经济发展的同时, 造成了地表破坏、植被受损等环境污染和生态问题, 严重限制了该区的可持续发展。排土场是在露天煤矿开采过程中形成的巨型特殊地貌, 由大量剥离物人工堆垫形成<sup>[1]</sup>。矿区扰动地表生态系统重建和新建排土场新构土体的复垦成为当前矿区生态环境建设中最为紧迫的任务<sup>[2]</sup>。现阶段矿区排土场主要存在土层薄(≤50 cm, 农用地标准)、质地粗(0.02~2 mm砂砾≥70%)、质量差(有效养分含量较低)、漏水漏肥严重等问题。

晋陕蒙矿区土壤类型以沙黄土和砒砂岩为主, 沙黄土结构疏松, 质地粗, 保水保肥能力差; 砒砂岩结构性差, 无水时坚硬如石, 遇水则松软如泥, 极易发生水土流失<sup>[3]</sup>, 但由于岩中矿物含量高, 砒砂岩含有高达30%的蒙脱石<sup>[4]</sup>矿物, 具有很强的吸附能力和离子交换能力, 保水保肥能力较好。当地还大量存在一种煤层的风化物——风化煤, 其腐殖酸含量丰富, 含

\*国家重点研发计划项目(2017YFC0504504-2)和中国科学院科技服务网络计划项目(KFJ-STS-ZDTP-012)资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2017YFC0504504-2), and the Science and Technology Service Network Program of the Chinese Academy of Sciences (No. KFJ-STS-ZDTP-012)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

作者简介: 王丽丽(1992—), 女, 山东枣庄人, 硕士研究生, 主要从事土壤微生物研究。E-mail: 793572398@qq.com

收稿日期: 2018-02-22; 收到修改稿日期: 2018-05-06; 优先数字出版日期(www.cnki.net):

有多种活性基团,具有吸附、络合和交换等性能,是一种良好的天然吸附剂<sup>[5]</sup>。土壤养分是评估土壤质量的重要指标,已有众多学者将砒砂岩用于改良沙黄土、与沙复配,或将风化煤作为改良剂施于土壤中:如摄晓燕等<sup>[6-7]</sup>研究砒砂岩改良风沙土对氮、磷的吸附效果,结果显示,添加砒砂岩可减少土壤对磷的吸附量,增加土壤对铵态氮的吸附。有研究<sup>[8-12]</sup>将砒砂岩与沙复配,并种植玉米、小麦、马铃薯等,研究复配土的理化特性及对土壤肥力的影响。有研究<sup>[5]</sup>显示风化煤的使用对黄土区的煤矿土地复垦有明显作用,风化煤中含有较多腐殖酸,施入土壤后,减少了水、肥的流失,使土壤有机碳含量升高,土壤得到改良<sup>[13]</sup>。武瑞平等<sup>[14]</sup>以风化煤为修复介质,认为合理施用风化煤对露天煤矿复垦土壤理化性质有明显的改良效果,土壤养分随风化煤施用量的增加而显著增加。李华等<sup>[5]</sup>通过野外分区试验,研究刺槐种植后露天煤矿区复垦土壤理化性质的变化,结果表明,不同量风化煤施用后,0~20 cm 土层土壤有机质、腐殖质含量显著提高,且风化煤施加量为 27 t hm<sup>-2</sup>时改良效果最佳。但将风化煤、砒砂岩分别与沙黄土掺混,比较不同新构土体改良土壤养分效果的研究却鲜见报道。本研究利用砒砂岩沙黄土掺混土体、风化煤沙黄土掺混土体、沙黄土这三种结构与养分性能各异的土壤类型,对永利煤矿排土场进行土体重构,辅以施肥加速熟化和种植植物的措施,对矿区土壤进行改良,分析比较了3年后改良土壤与原地貌及新建排土场土壤中养分差异,旨在探究矿区排土场不同改良模式的土壤养分效应,为矿区排土场土地复垦与生态恢复的理论和措施积累认识和经验。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区准格尔旗永利煤矿排土场(39°69'N, 110°27'E),地处鄂尔多斯市中东部,为黄土高原向鄂尔多斯高原过渡的交错地带,海拔 1 409.9 m,属典型砒砂岩、沙黄土分布区,年平均气温 6.2~8.7°C,年均降水量 400 mm,年潜在蒸发约 2 200~3 000 mm,降水年际、季节分配不均,主要集中于7—9月。常年多风沙天气,平均风速 3.4 m s<sup>-1</sup>,为大陆性干旱半干旱气候,植被均以抗旱、抗贫瘠、生长缓慢、种类单纯为特点。

### 1.2 试验设计

在永利煤矿排土场修筑新构土体小区,小区中采取工程措施与植物措施相结合的复垦方式:第一种处理是将沙黄土与砒砂岩按7:3比例混掺(沙黄土:砒砂岩, w/w,该处理简称为FS),第二种处理是将风化煤与沙黄土混掺,风化煤添加量为27 t hm<sup>-2</sup>(简称为WC);第三种处理是排土场施加当地的沙黄土,不混掺其他类型的土体(简称为SL),每个小区的沙黄土施加量为13 t,铺设厚度为50 cm,每个处理重复三次。修筑砒砂岩与沙黄土混掺的新构土体小区时,将供试的砒砂岩和沙黄土用搅拌机搅拌均匀,人工铺设成深度为50 cm的土层;修筑风化煤与沙黄土混掺的新构土体小区时,将供试的风化煤和沙黄土用搅拌机搅拌均匀,人工铺设在0~20 cm的土层,其底部为沙黄土。重构小区于2013年修建,小区规格为5 m×4 m,深50 cm。修建时对所有重构土体表层一次性施加农家肥(羊粪, 25 t hm<sup>-2</sup>)、菌肥(金宝贝微生物菌肥, 60 kg hm<sup>-2</sup>)和化肥(磷酸二铵, 600 kg hm<sup>-2</sup>),表施后翻耕。在重构小区中,于2013年种植小白菜、2014年种植黄豆、2015年和2016年种植荞麦,以加速熟化。

排土场周边为植被类型以长茅草为主的黄土丘陵沟壑地貌。本试验设计中将原地貌土壤(简称为OL)以及新建排土场的土壤(简称为CK)作为对照,通过测定表层0~20 cm土壤养分含量,研究不同改良模式下土壤养分的差异。

试验所用沙黄土、风化煤均采自当地,砒砂岩采自鄂尔多斯暖水镇砒砂岩示范区。风化煤pH为6.02,有机质含量58.5%,腐殖酸4.617 g kg<sup>-1</sup>,全氮2.98 g kg<sup>-1</sup>。沙黄土和砒砂岩的基

本性质如表1所示。

表 1 供试土壤的基本理化性质  
Table 1 Physical and chemical properties of tested soil

| 土壤类型<br>Soil type | 土壤质地<br>Soil texture         | 砂粒<br>(0.02~2 mm)<br>Sand (%) | 粉粒<br>(0.002~0.02 mm)<br>Silt (%) | 黏粒<br>(<0.002 mm)<br>Clay (%)                             | pH  | 阳离子交换量<br>Cation exchange<br>capacity (cmol kg <sup>-1</sup> ) |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|---|--|
| 砒砂岩 <sup>①</sup>  | 粉砂质壤土 <sup>③</sup>           | 34.55                         | 59.08                             | 6.37  | 9.2   | 54.8   |
| 沙黄土 <sup>②</sup>  | 砂质壤土 <sup>④</sup>            | 70.14                         | 16.41                             | 13.45   | 8.60  | 4.63   |
| 土壤类型<br>Soil type | SOC<br>(g kg <sup>-1</sup> ) | TN<br>(g kg <sup>-1</sup> )   | AP<br>(mg kg <sup>-1</sup> )      | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N<br>(mg kg <sup>-1</sup> ) |  |
| 砒砂岩 <sup>①</sup>  | 1.58                         | 0.03                          | 2.75                              | 0.85  | 5.45  |  |
| 沙黄土 <sup>②</sup>  | 1.73                         | 0.08                          | 2.44                              | 3.53  | 7.48  |  |

注: SOC、TN、AP、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 分别表示土壤有机质、全氮、有效磷、硝态氮、铵态氮 Note: SOC, TN, AP, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N represents soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen. ①Feldspathic Sandstone, ②Sandy loess soil, ③Silty loam soil, ④Sandy loam soil

### 1.3 样品采集与分析

土样采集时间为 2016 年 10 月底, 采样方法为多点混合取样, 在每个重构土体小区随机选取 3 个重复, 用土钻法分别取 0~10 cm 和 10~20 cm 深度的新鲜土样。新鲜土样采回后, 去除鲜土中的植物根系和石块, 过 2 mm 筛, 分成两份, 一份于 4℃ 保存, 一份风干备用。用烘箱法测定过筛鲜土的含水量; 用鲜土测土壤中硝态氮、铵态氮含量; 将风干土过 0.15 mm 筛用于测定土壤有机碳; 风干土过 0.25 mm 筛用于测定土壤全氮、有效磷的含量。土壤有机碳用重铬酸钾容量法—外加热法测定, 土壤全氮用半微量凯氏定氮 (2300, FOSS 公司, 瑞典) 法测定, 土壤硝态氮、铵态氮用 1 mol L<sup>-1</sup> 氯化钾溶液浸提—流动分析仪 (AutAnalyel, AAA 公司, 美国) 法测定, 土壤有效磷用 NaHCO<sub>3</sub> 浸提—钼锑抗比色 (UV2300, 上海天美科技公司) 法测定。

### 1.4 数据处理

采用加权综合法<sup>[15]</sup>建立土壤质量综合评价模型:

$$SQI = \prod_{i=1}^n (K_i)^{C_i}$$

式中, SQI 为土壤质量指数 (Soil quality index); C<sub>i</sub> 为各个评价指标的隶属度值; K<sub>i</sub> 为第 i 个评价指标的权重; Π 是连乘符号, n 是评价指标的个数。

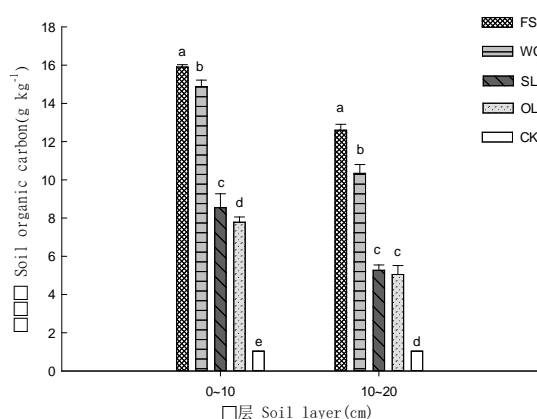
利用 Microsoft Excel 2013、SPSS 18.0 和 Origin8.0 软件对数据进行统计处理和绘图。采用 SPSS 软件单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和邓肯 (Duncan) 新复极差法进行多重比较, 以检验差异是否显著。

## 2 结果

## 2.1 不同改良模式下土壤有机碳含量变化

永利煤矿排土场不同改良模式下, 0~20 cm 表层土壤中不同土体类型有机碳含量变化如图 1 所示。从图中可以看出, 不同土体中有机碳含量在两个土层中呈现一致的变化趋势, 均表现为 FS>WC>SL>OL>CK。

在 0~10 cm 土层中, 5 种不同土体类型间的有机碳含量具有显著性差异 ( $p<0.05$ )。FS、WC、SL、OL 四种土体类型相对于新建排土场 (对照土壤), 土壤有机碳分别为其 15.4 倍、14.4 倍、8.3 倍、7.5 倍。在 10~20 cm 土壤中, 沙黄土与原地貌间无显著性差异, 其余土体类型间有机碳含量有显著性差异 ( $p<0.05$ )。FS、WC、SL、OL 这四种土体类型相对于新建排土场, 土壤有机碳分别为其的 12.2 倍、10.0 倍、5.1 倍、4.9 倍。因此, 掺混砒砂岩和风化煤对于提高土壤有机碳有显著效果; 沙黄土和原地貌土壤中有有机碳含量无显著差异, 改良后的土壤以及原地貌土壤相比新建排土场的土壤, 均有显著提高。



注:FS、WC、SL、OL、CK 分别表示砒砂岩沙黄土混掺土体、风化煤沙黄土混掺土体、沙黄土、原地貌土体、对照土体 (新建排土场); 不同小写字母者表示同一土层不同处理间差异显著 ( $p<0.05$ )。下同  
Note: FS, WC, SL, OL, and CK stands for feldspathic sandstone mixing with sandy loess soil, weathered coal mixing with sandy loess soil, sandy loess soil, soil under original landform and soil as control respectively, and different lower-case letters indicate significant difference ( $p<0.05$ ) between treatments in the same soil layer. The same below

图 1 不同改良模式下的土壤有机碳  
Fig.1 Soil organic carbon in the soil relative to soil amelioration mode

## 2.2 不同改良模式下土壤全氮含量变化

不同改良模式下表层 0~20 cm 土壤全氮变化如图 2 所示。全氮在土壤中分布具有表层聚集现象, 但 0~10 cm 土层与 10~20 cm 土层差异不显著。在 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层中, 不同处理的土壤全氮变化一致, 均表现为 OL>FS>SL>WC>CK。在 0~10 cm 的土层中, FS、WC、SL、OL 这四种土体类型的土壤全氮含量分别为新建排土场的 5.2 倍、4.9 倍、5 倍、8.6 倍; 在 10~20 cm 的土层中, FS、WC、SL、OL 这四种土体类型土壤全氮分别为对照土壤的 3.4 倍、3.2 倍、3.3 倍和 7.5 倍。原地貌土壤中全氮含量显著高于其他土体类型 ( $p<0.05$ ), 重构小区中的三组土体全氮含量相近, 新建排土场土壤中全氮含量显著低于其他土体类型 ( $p<0.05$ )。

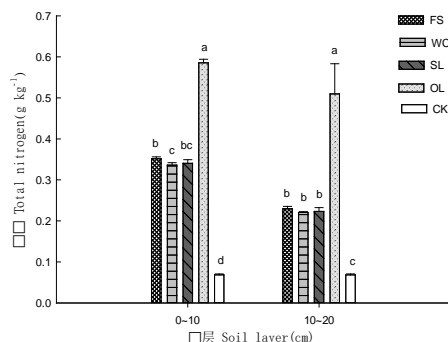


图2 不同改良模式下的土壤全氮

Fig.2 Soil total nitrogen in the soil relative to soil amelioration mode

### 2.3 不同改良模式下土壤硝态氮和铵态氮含量变化

不同改良模式下土壤硝态氮和铵态氮的含量变化如图3所示,由图3A可以看出,在0~10 cm 土层中,沙黄土土壤中的硝态氮含量显著高于其他四种土体类型 ( $p<0.05$ ); 而在10~20 cm 土层中,沙黄土硝态氮含量居中,土壤硝态氮含量从高至低依次为 WC>FS>SL>OL>CK。混掺砒砂岩和混掺风化煤的两种新构土体类型对于改良土壤中硝态氮含量的效果相近,两个土层中原地貌土壤硝态氮含量均显著低于人工熟化的三种土体类型 ( $p<0.05$ ), 且不同熟化方式对于矿区排土场的土壤硝态氮均有明显的改善,具体表现为: 在0~10 cm 土层中, FS、WC、SL、OL 四种处理的土壤硝态氮分别为 CK 的 6 倍、7 倍、11.4 倍和 3.6 倍; 在10~20 cm 土层中, FS、WC、SL、OL 四种处理的土壤硝态氮分别为 CK 的 3.6 倍、4.2 倍、2.8 倍和 1.6 倍。

不同改良模式下土壤铵态氮的含量变化如图 3B 所示, 在 0~10 cm 和 10~20 cm 两个土层中, 不同处理间铵态氮含量变化无统一规律, 且无表聚现象。在 0~10 cm 土层中, 掺混风化煤的新构土体和沙黄土中土壤铵态氮含量显著高于其他土体类型 ( $p<0.05$ ), 不同处理下土壤铵态氮含量从高至低依次为 WC>SL>FS>OL>CK; 相对于新建排土场, 其他四种土体类型分别提高了 1.29 mg kg<sup>-1</sup>、2.0 mg kg<sup>-1</sup>、1.98 mg kg<sup>-1</sup>、0.66 mg kg<sup>-1</sup>。在 10~20 cm 土层中, 土壤铵态氮含量排序为 OL>FS>WC>SL>CK, 原地貌土壤铵态氮含量为 5.32 mg kg<sup>-1</sup>, 显著高于其他四种土体类型 ( $p<0.05$ ), 沙黄土中铵态氮含量较低 (3.43 mg kg<sup>-1</sup>)。试验结果可以看出, 3 种改良模式对土壤铵态氮均有不同程度的改善作用。

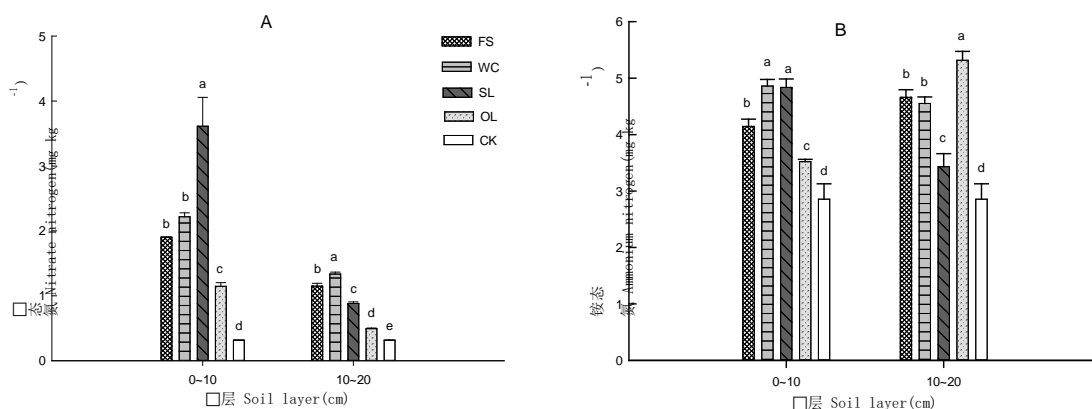


图3 不同改良模式下的土壤硝态氮 (A) 和铵态氮 (B)

Fig.3 Soil nitrate nitrogen (A) and ammonium nitrogen (B) in the soil relative to soil amelioration mode

## 2.4 不同改良模式下土壤有效磷含量变化

如图 4 所示, 矿区排土场土壤有效磷的分布均有表层聚集现象。在 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤中, 不同处理下的有效磷含量表现一致, 按照从高至低的排序为 WC>FS>SL>CK>OL。从这 5 种土体类型表层土壤有效磷含量变化可以看出, 掺混风化煤的新构土体类型显著高于其他土体 ( $p<0.05$ ), 其次为掺混砒砂岩的人工熟化的新构土体, 沙黄土中有效磷含量居中。与其他处理土壤养分不同的是, 原地貌土壤中有有效磷含量在 0~20 cm 表层土壤中显著低于新建排土场对照 ( $p<0.05$ )。

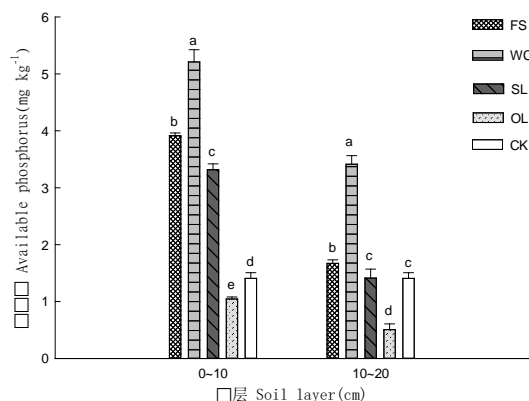


图 4 不同改良模式下的土壤有效磷

Fig.4 Soil available phosphorus in the soil relative to soil amelioration mode

## 2.5 不同改良模式土壤养分质量综合评价

土壤质量是土壤各个属性综合作用的结果。分别计算 0~10 cm 和 10~20 cm 土层中不同处理的土壤质量指数, 结果如表 2 所示。可以看出不同处理的土壤通过加权综合法, 由 5 个土壤养分指标计算出的土壤质量指数在 0~10 cm 土层中的变化范围是 0.16~0.79, 在 10~20 cm 土层中的变化范围是 0.16~0.55, 几种土壤类型中土壤质量指数排序为 WC>FS>SL>OL>CK。

表 2 0~20 cm 土层中土壤质量指数

| 土层 Soil layer | FS   | WC   | SL   | OL   | CK   |
|---------------|------|------|------|------|------|
| 0~10 cm       | 0.71 | 0.79 | 0.70 | 0.46 | 0.16 |
| 10~20 cm      | 0.48 | 0.55 | 0.35 | 0.32 | 0.16 |

## 3 讨论

本研究结果可以看出, 除铵态氮外, 改良后的土体中养分分布表现出明显的表层聚集现象。土壤有机碳含量 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层 (图 1), 因为土壤中植被根系以及植被的枯枝落叶更多集中在 0~10 cm 土层, 导致植物积累的土壤有机碳更多集中在表层 0~10 cm 土壤中。不同改良模式的土壤相比新建排土场的土壤, 有机碳含量均有不同程度的提高, 因为新建的排土场, 土壤质地疏松, 土壤养分易流失, 开采煤矿时, 土壤在剥离、堆砌等过程中受到侵蚀, 同时雨水冲刷及内蒙地区的风蚀均能导致有机碳的大量损失<sup>[16]</sup>。掺混砒砂岩的新构土体有机碳含量最高是因为砒砂岩有很强的吸附能力和离子交换能力, 保水保肥能力较好。掺混风化煤的新构土体有机碳含量高是因为风化煤中含有丰富的腐殖酸, 施入土壤

后, 土壤微生物活性增强, 调节土壤的孔隙度, 减少水、肥流失, 使土壤有机碳含量升高, 土壤得到改良<sup>[13]</sup>。

全氮含量是衡量土壤氮素水平的基础肥力指标。有研究表明, 植被恢复可增加排土场表层土壤有机质和全氮含量, 且恢复年限越长, 含量增加越显著<sup>[17-19]</sup>。原地貌的长芒草由于复垦年限长, 覆盖度高于人工熟化的重构小区, 根系数量多且多为须根, 在微生物的作用下产生大量分泌物, 提高土壤氮素含量。掺混砒砂岩的新构土体由于砒砂岩具有保肥作用, 土壤母质也具有一定的养分, 外加人工培肥, 因此, 土壤中全氮含量较高(图2)。硝态氮和铵态氮属于速效氮, 硝态氮是最易被旱作作物吸收利用的氮素形态, 也是氮素流动、损失和被利用的中心环节; 铵态氮由硝化作用转化为硝态氮, 土壤中铵态氮含量就会迅速下降<sup>[20]</sup>。风化煤的铵态氮含量高, 因为风化煤具有有机质和腐殖质含量高、吸附能力强等优良的理化和生物学特性<sup>[21]</sup>, 其氮含量也有一定的来源, 土壤养分含量有所提高<sup>[22]</sup>, 且其吸附作用可吸收一定量的铵态氮。经过硝化作用, 可以产生大量的硝态氮, 因此, 掺混风化煤的新构土体中铵态氮含量也很高(图3); 且风化煤中含有多种活性基团, 增强了土壤中氮的自然循环还原能力, 腐殖酸含碳、氮等多种元素, 在分解过程中便释放出来供给作物吸收利用, 增加土壤的速效养分<sup>[23]</sup>。砒砂岩中铵态氮含量也较高(图3), 因此, 掺混砒砂岩的新构土体可在短时间内增加改良土壤对铵态氮的吸附量, 一定程度上减少了铵态氮的挥发损失<sup>[6]</sup>。

掺混风化煤的新构土体中有效磷含量最高, 是因为风化煤中含有多种活性基团, 能大大减少磷的固定损失<sup>[22]</sup>。风化煤中的含碳化合物基本上可转化为腐殖酸类物质<sup>[21]</sup>, 大大增加土壤有效养分。本研究中掺混砒砂岩的新构土体有效磷含量高于沙黄土(图4), 可能是由于砒砂岩具有较强的保水保肥能力, 大大降低了有效磷在土壤的流动性和被淋溶的程度<sup>[24]</sup>。原地貌土壤中有效磷含量最低, 显著低于新建排土场, 因为磷在土壤熟化过程迁移能力最小, 原地貌年限较新建排土场和重构小区年代更久远, 土壤中有效磷逐渐形成溶解度低的磷酸钙盐。此外, 新建排土场以及重构小区的土体是在矿区开采和复垦后上下层混合后的土体, 表层土壤中有效磷被植被大量利用, 深层土壤中含量较高, 因而, 原地貌 0~20 cm 土壤中有效磷含量显著低于其他几种处理(图4)。

通过加权综合法利用这 5 个土壤养分指标计算不同处理的土壤质量指数, 研究发现不同改良模式下土壤养分质量风化煤掺混土体最高, 其次是砒砂岩掺混土体, 沙黄土高于原地貌土壤, 对照质量最差。风化煤中由于含有较多的腐殖质及活性基团, 使土壤中养分含量有所提高, 促进养分发生氧化还原作用及减少固定损失, 故土壤质量最高。砒砂岩由于具有较强的吸附能力与离子交换能力, 保水保肥能力较高, 所以土壤质量也较高。沙黄土前期经过人工熟化, 土壤养分状况有显著改善效果, 原地貌由于草本植物生长年限较长, 土壤养分消耗量较大且存在固定损失, 因此沙黄土养分质量较原地貌土壤和对照更高。

## 4 结论

经过 3 年的人工熟化, 不同改良模式下土壤有机碳、硝态氮、有效磷均已超过原地貌土壤养分含量, 土壤铵态氮基本达到原地貌水平, 土壤全氮尚未恢复到原地貌水平, 且所测养分均显著高于新建排土场。不同改良模式下掺混砒砂岩的新构土体对土壤有机碳提升效果最好; 掺混风化煤的新构土体对有效磷的提升效果最好。相对于当地典型土壤类型沙黄土, 两种新构土体对其他养分改良效果也较好, 通过加权综合法计算 5 种处理的土壤质量指数, 结果表明土壤养分质量以风化煤掺混土体最高, 其次是砒砂岩掺混土体, 沙黄土高于原地貌土壤, 对照质量最差。因此, 可以充分发挥当地的资源优势、变废为宝, 将风化煤广泛用于排土场土壤的质地改良, 即改善了生态环境又能实现一定的经济效益。

参考文献

- [1] 王晓琳, 王丽梅, 张晓媛, 等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分16a恢复程度的影响. 农业工程学报, 2016, 32(9): 198-203  
Wang X L, Wang L M, Zhang X Y, et al. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16 a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(9): 198-203
- [2] 任志胜, 齐瑞鹏, 王彤彤, 等. 风化煤对晋陕蒙矿区排土场新构土体土壤呼吸的影响. 农业工程学报, 2015, 31(23): 230-237  
Ren Z S, Qi R P, Wang T T, et al. Effect of weathered coal on soil respiration of reconstructed soils on mining area's earth disposal sites in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent area (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 230-237
- [3] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94  
Han J C, Liu Y S, Luo L T. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region (In Chinese). China Land Sciences, 2012, 26(8): 87-94
- [4] 叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析. 地球学报, 2006, 27(2): 145-150  
Ye H, Shi J S, Li X Q, et al. The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility (In Chinese). Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(2): 145-150
- [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. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752-1756  
Li H, Li Y Q, Shen C B, et al. Physicochemical properties of reclaimed soil with weathered coal in open cast mining areas of Loess Plateau (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(5): 1752-1756
- [6] 摄晓燕, 魏孝荣, 魏艳春, 等. 砒砂岩改良风沙土对铵态氮吸附特性影响研究. 农业机械学报, 2015, 46(11): 165-173  
She X Y, Wei X R, Wei Y C, et al. Effects of soft rock modified sandy soil on  $\text{NH}_4^+$ -N adsorption characteristics (In Chinese). Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(11): 165-173
- [7] 摄晓燕, 魏孝荣, 马天娥, 等. 砒砂岩改良风沙土对磷的吸附特性影响研究. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1373-1380  
She X Y, Wei X R, Ma T E, et al. Phosphorus adsorption characteristics of soft rock modified sandy soil (In Chinese). Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1373-1380
- [8] 韩霁昌, 李娟, 李晓明. 砒砂岩与沙复配成土的物理性状及其对冬小麦产量的影响. 西北农业学报, 2013, 22(11): 15-19  
Han J C, Li J, Li X M. Effects of remixed soil with soft rock and sand on physical characters and winter wheat yield (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2013, 22 (11): 15-19
- [9] 李娟, 韩霁昌, 成生权, 等. 砒砂岩与沙复配土对土壤团聚体和有机碳质量分数的影响. 西北农业学报, 2015, 24(11): 140-148  
Li J, Han J C, Cheng S Q, et al. Effects of composite soil with feldspathic sandstone and sand on soil aggregates and organic carbon mass fraction (In Chinese). Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 24(11): 140-148
- [10] 李娟, 韩霁昌, 张卫华, 等. 砒砂岩与沙复配土壤的物理性状和相关光谱特性. 麦类作物学报, 2015, 35(3): 394-401  
Li J, Han J C, Zhang W H, et al. Research on physical properties and related spectral characteristics of



- composited soil with feldspathic sandstone and sand (In Chinese). Journal of Triticeae Crops, 2015, 35(3): 394-401
- [11] 赵宣, 韩霁昌, 王欢元. 砒砂岩与沙复配土生地·熟地中土壤有机碳及水稳定性团聚体含量的变化特征. 安徽农业科学, 2015, 43(11): 75-77  
Zhao X, Han J C, Wang H Y. Variation characteristics of organic carbon and water stable aggregate of feldspathic sandstone and sand compound soil between raw land and cultivated land (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(11): 75-77
- [12] 柴苗苗, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 179-184  
Chai M M, Han J C, Luo L T, et al. Effects of soft rock and sand mixing ratios and crop planting frequency on soil and crop yield (In Chinese). Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2013, 41(10): 179-184
- [13] 曾宪成. 腐植酸与食品源头安全. 中国农资, 2006(1): 51-53  
Zeng X C. Humic acid and safety of food source (In Chinese). China Agri-Production News, 2006(1): 51-53
- [14] 武瑞平, 李华, 曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1855-1861  
Wu R P, Li H, Cao P. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(9): 1855-1861
- [15] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区侵蚀土壤质量评价. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(3): 285-293.  
Xu M X, Liu G B, Zhao Y G. Quality assessment of erosion soil on hilly Loess Plateau (In Chinese). Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(3): 285-293
- [16] Anderson J D, Ingram L J, Stahl P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming. Applied Soil Ecology, 2008, 40(2): 387-397
- [17] Shrestha R K, Lal R. Changes in physical and chemical properties of soil after surface mining and reclamation. Geoderma, 2011, 161(3): 168-176
- [18] Sever H, Makineci E. Soil organic carbon and nitrogen accumulation on coal mine spoils reclaimed with maritime pine (*Pinus pinaster* Aiton) in Agacli-Istanbul. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 155(1/4): 273-280
- [19] Zhao Z Q, Shahrour I, Bai Z K, et al. Soils development in opencast coal mine spoils reclaimed for 1-13 years in the West-Northern Loess Plateau of China. European Journal of Soil Biology, 2013, 55: 40-46
- [20] 罗林涛, 程杰, 王欢元, 等. 玉米种植模式下砒砂岩与沙复配土氮素淋失特征. 水土保持学报, 2013, 27(4): 58-61  
Luo L T, Cheng J, Wang H Y, et al. Nitrogen leaching characteristics in the compound soil of feldspathic sandstone and sand under corn conditions (In Chinese). Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(4): 58-61
- [21] 曹鹏. 冻融交替及水分对风化煤改良露天煤矿复垦土壤及植被恢复的影响研究. 太原: 山西大学, 2008  
Cao P. Amelioration of weathered coal on soil and vegetation restoration in open-cast mine area with different freezing-thawing process and water content (In Chinese). Taiyuan: Shanxi University, 2008
- [22] 王晓玲. 不同施肥措施对复垦土壤肥力及玉米生长的影响. 太原: 山西农业大学, 2014  
Wang X L. Effects of different fertilization on fertility of reclaimed soil and corn growth (In Chinese). Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2014
- [23] 赫婧, 颜丽, 杨凯. 不同来源腐殖酸的组成和性质的研究. 土壤通报, 2003, 34(4): 343-345

- Hao J, Yan L, Yang K. Study on the composition and properties of humic acid of different sources (In Chinese). Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(4): 343-345
- [24] 任志胜. 晋陕蒙矿区排土场土体新构模式及土壤生态效应. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2016
- Ren Z S. The models of soil reconstruction and its ecological effects in mining area's earth disposal sites in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent area (In Chinese). Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2016

## Effect of Soil Amelioration on Soil Nutrients at Mining Dumps in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Region

WANG Lili<sup>1,2</sup> ZHEN Qing<sup>1,2</sup> WANG Ying<sup>1,3</sup> SUN Cengceng<sup>1,3</sup> YAN Xiang<sup>1,3</sup>  
ZHENG Jiyong<sup>1,2,3†</sup>

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 China University Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract** 【Objective】 The Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia region is an energy base in China, massive opencast mining activities in the region bring about a series of environmental and ecological problems. In this case, reconstruction of disturbed surface ecosystems and reclamation of dumps have become the utmost urgent tasks in eco-environment rehabilitation of the region. The soil in the region is dominated with sandy loess soil, and some feldspathic sandstone and weathered coal. Studies have shown that feldspathic sandstone can be used to improve soil properties of sandy loess, and weathered coal, too, as soil amendment. However, effects of using feldspathic sandstone and weathered coal as soil amendment to improve soil properties and fertility of reconstructed soil are rarely reported. To reconstruct the soil of the dump of the Yongli Coal Mine, this study was oriented to explore effects of different soil amelioration modes on soil nutrients in the soil of the dump so as to accumulate certain theoretical and practical experience in reclaiming deserted dumps and restoration of the ecosystems therein 【Method】 In this study, three types of reconstructed and artificially aged soils, different in structure and nutrient state, i.e. FS (Feldspathic sandstone mixed with sandy loess soil), WC (Weathered coal mixed with sandy loess soil), and SL (Sandy loess soil), were selected for comparison with the soil under original landform grown mainly with *Stipa bungeana* (OL, Original landform soil) and a new dump (CK, Blank control). So there were 5 treatments and 3 replicates for each treatment. After three years of artificially aging through fertilization and plant cultivation, soil samples were collected from the five treatments for analysis of soil organic carbon, total nitrogen, nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and available phosphorus in the 0~20 cm surface soil. Comparison was made for differences in nutrient status and the weighted synthesis method was used to evaluate the nutrient quality of several soil types. 【Result】 Results show that: 1) SOC in the reconstructed soils (FS, WC and SL) and the original landform soil (OL) was 12.2, 10.0, 5.1 and 4.9 times respectively as high as that in the new dump in the 10~20 cm layer soil. Soil total nitrogen in OL was the highest among the five treatments. TN in the 0~10 cm layer in the three reconstructed soils was about 5 times as high as that in the new dump, while TN in the 10~20 cm soil layer, about 3 times as high. Nitrate nitrogen in

the 0~10 cm soil layer soil was the highest in SL, reaching up to 3.61 mg kg<sup>-1</sup>. Ammonium nitrogen in the 0~20 cm soil layer varied randomly, showing no consistent tendency among the treatments. Available phosphorus in the 0~10 cm and 10~20 cm soil layers was 0.36 mg kg<sup>-1</sup> and 0.9 mg kg<sup>-1</sup>, respectively, lower in OL than in CK. 2) Soils under three different amelioration modes were obviously higher than OL in content of soil organic carbon, available phosphorus and nitrate nitrogen, and almost as high as OL in content of soil ammonium nitrogen, but still lower than OL in content of soil total nitrogen. 3) The soil quality index in 0~10 cm soil layer was 0.16~0.79 while range from 0.16 to 0.55 in 10~20 cm soil layer, and the soil quality index among five soil types shows WC>FS>SL>OL>CK.

**【Conclusion】** All the findings in the experiment demonstrate that the soil amelioration mode of mixing weathered coal has the highest soil nutrient quality, followed by the mode of mixing fieldspathic sandstone, and the soil nutrient quality of sandy loess soil is higher than the original landform soil, while the quality of the blank control is the worst, showing three amelioration modes all have some positive effects on soil nutrients. The findings may serve as indices for evaluating soil fertility and as theoretical basis for constructing high-efficient artificial soils, and also provide reasonable suggestions for land reclamation and ecological restoration in mine dumps.

**Key words** Mine dump; Fieldspathic sandstone; Weathered coal; Soil nutrient; Ameliorating effect; Soil quality index

(责任编辑: 陈荣府)