

ISSN 0564-3929

# Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会  
科学出版社

主办  
出版

2015

第 52 卷 第 4 期

Vol.52 No.4



# 土壤学报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

## 目 次

### 综述与评论

亚硝酸盐型甲烷厌氧氧化微生物生态学研究进展····· 沈李东 (713)

### 土壤科学与现代农业

近30年江西省耕地土壤全氮含量时空变化特征····· 赵小敏 邵 华 石庆华等 (723)

北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究····· 蒋红群 王彬武 刘晓娜等 (731)

秸秆深还对土壤团聚体中胡敏酸结构特征的影响····· 朱 姝 窦 森 陈丽珍 (747)

生物炭添加对酸化土壤中小白菜氮素利用的影响····· 俞映惊 薛利红 杨林章等 (759)

水肥对高产无性系油茶果实产量的影响····· 张文元 郭晓敏 涂淑萍等 (768)

### 研究论文

基于VRML的土壤电导率三维空间变异性虚拟现实建模研究····· 李洪义 顾呈剑 但承龙等 (776)

不同样点数量对土壤有机质空间变异表达的影响····· 海 南 赵永存 田 康等 (783)

基于稳定同位素的土壤水分运动特征····· 靳宇蓉 鲁克新 李 鹏等 (792)

中国玉米区域氮磷钾肥推荐用量及肥料配方研究····· 吴良泉 武 良 崔振岭等 (802)

不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布····· 候晓静 杨劲松 王相平等 (818)

长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响····· 毛霞丽 陆扣萍 何丽芝等 (828)

不同时期施用生物炭对稻田N<sub>2</sub>O和CH<sub>4</sub>排放的影响····· 李 露 周自强 潘晓健等 (839)

秸秆生物炭对潮土作物产量和土壤性状的影响····· 刘 园 M. Jamal Khan 靳海洋等 (849)

单一电解质体系下恒电荷土壤胶体扩散双电层中滑动层厚度的计算····· 丁武泉 朱启红 王 磊等 (859)

化工厂遗留地铬污染土壤化学淋洗修复研究····· 李世业 成杰民 (869)

离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究····· 刘文深 刘 畅 王志威等 (879)

辽东与山东半岛土壤中有机氯农药残留特征研究····· 朱英月 刘全永 李 贺等 (888)

长期冬种绿肥改变红壤稻田土壤微生物生物量特性····· 高嵩涓 曹卫东 白金顺等 (902)

豆科间作对番茄产量、土壤养分及酶活性的影响····· 代会会 胡雪峰 曹明阳等 (911)

### 研究简报

蚕豆根系分泌物中氨基酸含量与枯萎病的关系····· 董 艳 董 坤 汤 利等 (919)

小麦与蚕豆间作对根际真菌代谢功能多样性的影响····· 胡国彬 董 坤 董 艳等 (926)

不同年限毛竹林土壤固氮菌群落结构和丰度的演变····· 何冬华 沈秋兰 徐秋芳等 (934)

长期不同施肥模式下砂姜黑土的固碳效应分析····· 李 玮 孔令聪 张存岭等 (943)

果园生草对<sup>15</sup>N利用及土壤累积的影响····· 彭 玲 文 昭 安 欣等 (950)

封面图片: 离子型稀土矿废弃地全景 (由汤叶涛、刘文深提供)

DOI: 10.11766/trxb201407310385

# 离子型稀土矿尾砂地植被恢复障碍因子研究

刘文深<sup>1</sup> 刘 畅<sup>1</sup> 王志威<sup>1</sup> 滕文凯<sup>1</sup> 汤叶涛<sup>1, 2†</sup> 仇荣亮<sup>1, 2</sup>

(1 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275)

(2 广东省环境污染控制与修复技术重点实验室(中山大学), 广州 510275)

**摘 要** 以江西省赣州市定南县不同废弃时间的离子型稀土矿尾砂地为研究对象, 通过植被调查、土壤理化性质、微生物和酶活性分析, 探讨稀土矿尾砂地植被恢复的障碍因子。结果表明, 尾砂地植被覆盖度随着废弃时间增加而增加, 在废弃 10 年后植被覆盖度达到 72%, 但其群落组成仍相对简单(仅 3 种); 尾砂地土壤黏粒含量(6.00%~9.66%)和土壤有机质含量(0.5~1.5 g kg<sup>-1</sup>)均远低于周边正常植被区, 而尾砂地土壤容重(1.26~1.43 g cm<sup>-3</sup>)则明显高于周边正常植被区。废弃 1 年的尾砂地土壤电导值显著高于废弃 3~10 年的尾砂地土壤和对照区土壤, 土壤铵态氮和碱解氮含量则高达 400 mg kg<sup>-1</sup>和 500 mg kg<sup>-1</sup>, 但废弃 3~10 年后碱解氮和铵态氮含量已趋于痕量, 且在所调查的废弃 3 年和 6 年的尾砂地 0~100 cm 剖面内土壤铵态氮含量也极低, 表明尾砂地土壤铵态氮在废弃 3 年内已流失殆尽, 严重的水土流失及其导致的土壤氮素等营养匮乏也是尾砂地植被恢复的主要障碍之一; 尾砂地土壤微生物生物量碳(<26.7 mg kg<sup>-1</sup>)、土壤脲酶活性(<29.9 NH<sub>3</sub>-N mg kg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>)、土壤酸性磷酸酶活性(<7.10 phenol mg kg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>)均显著低于周边正常植被区土壤, 表明尾砂地土壤氮、磷循环受到抑制。本研究表明, 废弃 3~10 年内离子型稀土矿尾砂地的土壤理化生性质并未得到明显改善, 尾砂地土壤面临土壤重建的问题, 需要引入合适的人工干预如土壤改良才能加快尾砂地植被恢复。

**关键词** 离子型稀土矿尾砂地; 植被恢复障碍因子; 土壤物理结构; 土壤铵态氮; 土壤酶活性

**中图分类号** X53 **文献标识码** A

离子型稀土矿是我国重要的战略资源, 主要分布在南方的江西、广东、福建、湖南和广西, 其中以江西省赣州市开采时间最早、开采量最多<sup>[1]</sup>, 也为当地经济发展做出了巨大贡献。但长期以来, 离子型稀土矿开采尤其是早期多采用堆浸工艺: 即富含稀土的矿砂从位于表土下层的风化层和半风化层搬运至堆浸场, 用硫酸铵反复浸取, 得到稀土母液的同时, 遗留了大面积的尾砂地。据江西省赣州市统计, 截止 2011 年, 赣州全市稀土尾砂累计积存量  $1.9 \times 10^9$  t, 毁坏面积累计 116 km<sup>2</sup>, 尚未治理的矿区面积 101 km<sup>2</sup>。这些尾砂不仅占用大量土地资源, 还破坏矿区及其周边正常植被, 产生严重的水土流失, 导致当地河流堵塞、农田被淹、水库淤积<sup>[2-3]</sup>; 尾砂地残留的硫酸铵易随水土流失进入当

地水体, 造成水体氮素和硫酸根污染<sup>[4]</sup>; 此外, 稀土矿区土壤环境中稀土元素含量均较高<sup>[5]</sup>, 矿区周边水体中稀土含量高于一般淡水的百倍<sup>[6]</sup>。稀土尾砂地给当地的生态环境以及当地居民的身心健康带来严重威胁。

离子型稀土矿开采带来的环境问题受到越来越多的关注, 但目前为止, 离子型稀土矿尾砂地的相关研究仍然很少, 仅有的一些调查尚不够全面, 得到的结果也迥异。比如在土壤氮素含量方面, 许炼烽等<sup>[7]</sup>认为, 尾砂地土壤碱解氮含量高于周边正常植被, 而涂翠琴<sup>[8]</sup>和温小军<sup>[5]</sup>等则认为尾砂地土壤碱解氮含量为痕量。此外, 到目前为止对影响尾砂地立地条件的土壤微生物、植被现状等生物因子也缺乏调查。

† 通讯作者: 汤叶涛(1974—), 男, 副教授, 主要从事水土修复研究。E-mail: eestyt@mail.sysu.edu.cn

作者简介: 刘文深(1989—), 男, 江西赣州人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤修复。Tel: 18933937862, E-mail: 453161904@qq.com

收稿日期: 2014-07-31; 收到修改稿日期: 2014-10-14

本文以江西省赣州市定南县不同废弃时间的离子型稀土矿尾砂地为研究对象,通过植被调查、土壤理化性质分析、以及土壤微生物和土壤酶活性分析,并与周边未开采的正常植被区对比,探讨尾砂地植被恢复的障碍因子,为离子型稀土矿尾砂地的植被复垦提供支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于江西省赣州市最南端的定南县,毗邻广东省河源市,辖区内植被保持优良,森林覆盖率达78.1%。定南县属中亚热带季风湿润气候区,年均气温为18.8℃,年均降雨量1 609 mm。但降雨季节分布不均衡,3—6月雨量多,形成明显的雨季,10—12月降雨量最少,形成旱季。定南县稀土矿藏品种全、品位高,开采时间比较早,是赣州离

子型稀土矿采矿主要地区之一。由于早期开采工艺多为堆浸工艺,离子型稀土矿开采在定南县留下了大面积的尾砂地,据赣州市统计,截止2011年,定南全县尾砂地面积达10 km<sup>2</sup>。

研究调查的尾砂地分布在三个矿区(图1):定南县南丰村长坑尾矿区(24°57', 115°05')和竹山背矿区(24°57', 115°06'),以及定南县郊区工业园矿区(24°36', 115°04')。其中长坑尾矿区面积达1.9 km<sup>2</sup>,海拔为500~550 m,矿区分布着十来个不同废弃时间的尾砂地;竹山背矿区面积为0.067 km<sup>2</sup>,海拔为506 m,面积较小;工业园矿区位于定南县城郊区,海拔为266~322 m,由于该地要建立工业区,在整地搬山过程中采用堆浸工艺提取山体中的稀土。研究选择的尾砂地均由堆浸工艺产生,且受人为干扰少,在自然条件下演替,通常这类尾砂废弃地呈现方格状,地表平整。

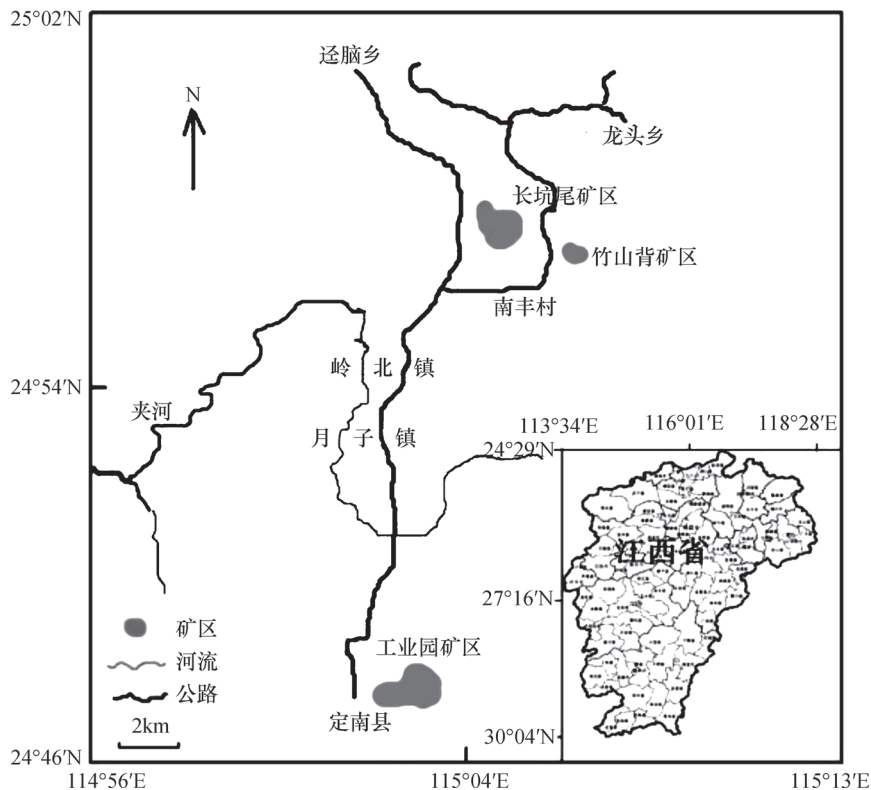


图1 采样区域示意图

Fig. 1 Sketch map of the sampling region

### 1.2 样品采集

野外调查时间为2013年6月。调查时记录每个尾砂地植物种类、优势种,并估测尾砂地植被覆盖度。土壤采集方法为:将尾砂地划分为3个样方,

每个样方用对角线法采集3个土样并混合成1个混合样,每个尾砂地共3个混合样;对照区则选择在长坑尾矿区旁边的正常植被区(C1、C2)和竹山背矿区旁的正常植被区(C3),每个对照区随机采

集3个土样。采样深度均为0~30 cm。剖面土样采集为：选取废弃3年和6年的尾砂地分别于0~5、5~20、25~50、50~75、75~100 cm 5层采集土样；对照土壤剖面则选取长坑尾矿区旁的正常植被区（C1），其土样按照土壤自然分层结构从下往上采集，其中对照C1-1为O层：0~5 cm；A1层：5~10 cm；A2层：10~20 cm；AB层：20~50 cm；B1层：50~70 cm；B2层：70~100 cm；对照C1-2为A1层：0~5 cm；A2层：5~40 cm；B层：40~70 cm；BC层：70~120 cm。测土壤容重采用环刀采集土样，每个样方采集1个土样，每个尾砂地和对照区分别采集3个环刀土样。

土壤样品带回实验室后，拣去大块石粒、根系等，及时测定土壤微生物生物量碳和酶活性指标。其余土壤放于阴凉处风干，并根据相关实验要求分别处理。

### 1.3 分析方法

土壤黏粒含量采用简易比重计法测定，大于5 mm石粒含量采用称重法测定<sup>[9]</sup>。土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸提取法：土样经氯仿熏蒸和未熏蒸两种不同处理后，分别用K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液浸提，提取液中有有机碳采用总有机碳自动分析仪（Shimadzu TOC-500，日本）测定，转换系数0.45。土壤脲酶活性采用苯酚钠一次氯酸钠比色法测定，土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定，过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定<sup>[10]</sup>。土壤全磷和全钾采用HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消解，Optima 5300DV型ICP-OES（Perkin Elmer，USA）测定<sup>[11]</sup>。土壤铵态氮采用2 mol L<sup>-1</sup>KCl溶液提取—靛蓝比色法测定<sup>[12]</sup>。土壤其他理化性质方法如下<sup>[9]</sup>：土壤pH采用水土比为2.5：1提取，pH计测定；土壤有机质采用油浴—重铬酸钾容量法；土壤碱解氮采用碱解扩散法；土壤电导率采用水土比5：1提取，电导率仪（DDS-307A，上海雷磁）测定；土壤有效磷采用1 mol L<sup>-1</sup>碳酸氢钠提取（pH=7，水土比1：10），ICP-OES测定；土壤速效钾采用1 mol L<sup>-1</sup>醋酸铵浸取（pH=7，水土比1：10），ICP-OES测定。

### 1.4 数据处理

数据处理采用Origin 8.0和SPSS 16.0软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 尾砂地群落植被特征

从表1可以看出，废弃1年的尾砂地还没有植物定居，废弃3年的尾砂地开始有芒草定居；废弃6年的尾砂地植被覆盖度达15%~25%，出现先锋物种芒草、芒萁和马尾松；废弃10年后尾砂地植被覆盖度已达65%~80%，但是没有出现新的物种。可见，离子型稀土矿尾砂地植被覆盖度尽管在废弃10年后达到较高的植被覆盖度，但是尾砂地群落物种数却维持在1~3之间，明显少于对照的物种数6~17种，群落组成简单。此外，马尾松、芒草和芒萁均是尾砂地先锋物种，且马尾松和芒草为优势种，说明它们对离子型稀土矿尾砂地土壤有较强的适应能力，可考虑作为离子型稀土矿尾砂地复垦的优选植物。

### 2.2 尾砂地土壤理化性质

离子型稀土矿尾砂地土壤主要理化性质见图2。从图2A~图2C可以看出，在废弃10年内，尾砂地土壤黏粒含量（6.00%~9.66%）远低于周边正常植被区土壤黏粒含量（24.10%~50.48%）；尾砂地土壤容重（1.25~1.43 g cm<sup>-3</sup>）则显著高于周边正常植被区（0.9~1.16 g cm<sup>-3</sup>），且废弃6年的尾砂地其土壤容重最大；尾砂地土壤有机质含量（0.5~1.5 g kg<sup>-1</sup>）也远低于周边正常植被区（7.4~16.8 g kg<sup>-1</sup>）。

土壤物理结构的好坏对土壤质量起着关键作用<sup>[13]</sup>，而土壤机械组成和土壤有机质则是土壤物理结构的主要影响因子<sup>[14-15]</sup>。尾砂土源于表土下风化层和半风化层富含稀土的矿砂浸取之后的废弃土，含有大量未风化的石粒，废弃1~10年的尾砂地土壤大于5 mm石粒含量高达21.1%~40.0%（数据未列出），加上尾砂地土壤黏粒含量和有机质含量极低，使得这类土壤难以形成大（>0.25 mm）而稳定的团聚体<sup>[16]</sup>，再经过风吹雨淋和干旱等自然过程，其土壤板结加剧<sup>[17]</sup>，导致尾砂地恶劣的土壤物理结构。

物理结构差的土壤往往导致植物难以定居，根系难以生长及获取营养<sup>[15]</sup>，对废弃10年尾砂地的调查也发现，芒草和芒萁的根系主要分布在尾砂地

表1 尾砂地植被状况

Table 1 Vegetation at the ionic rare earth mine tailings dumping sites

废弃时间 Abandoned time (a)	采样地点 Sampling site	编号 Code	覆盖度 Coverage (%)	群落 Community	物种组成 Species composition	物种数 Species number	优势种 Dominant species
1	工业园矿区	Y1-1	0	—	—	0	—
		Y1-2	0	—	—	0	—
3	长坑尾矿区	Y3-1	<1	—	芒草	1	—
		Y3-2	<1	—	芒草, 偶见山鸡椒	2	—
6	长坑尾矿区	Y6-1	15	马尾松-芒草	马尾松、芒草, 偶见芒萁	3	马尾松、芒草
		Y6-2	20	马尾松-芒草	马尾松、芒草、芒萁	3	马尾松、芒草
		Y6-3	25	马尾松	马尾松、芒草、偶见芒萁	3	马尾松
10	竹背山矿区	Y6-4	15	芒草	芒草, 偶见马尾松和芒萁	3	芒草
		Y10-1	65	马尾松-芒草	马尾松、芒草、芒萁	3	马尾松、芒草
		Y10-2	80	马尾松-芒草	马尾松、芒草、芒萁	3	马尾松、芒草
对照	长坑尾	C1	100	马尾松-芒萁	马尾松、芒萁、油茶等	6	马尾松
		C2	100	杉木-赤楠	杉木、赤楠、芒萁等	14	杉木、赤楠
		C3	100	杉木	杉木、菝葜、芒草、枫香等	17	杉木

注: 马尾松: *Pinus massoniana*; 芒草: *Miscanthus sinensis*; 芒萁: *Dicranopteris dichotoma*; 杉木: *Cunninghamia lanceolata*; 山鸡椒: *Litsea cubeba*; 赤楠: *Syzygium buxifolium*; 菝葜: *Smilacis chinae rhizoma*; 枫香: *Liquidambar formosana*; 油茶: *Camelli aoleiferaabel*

土壤表层0~5cm处。因为土壤有机质不仅可改善土壤物理性状, 也是土壤肥力的重要指标<sup>[18]</sup>, 而且, 土壤有机质还与土壤微生物及土壤酶活性密切相关<sup>[19]</sup>。因而推测土壤物理结构和土壤有机质含量远差(低)于周边正常植被区是尾砂地植被恢复的最主要障碍因子之一。

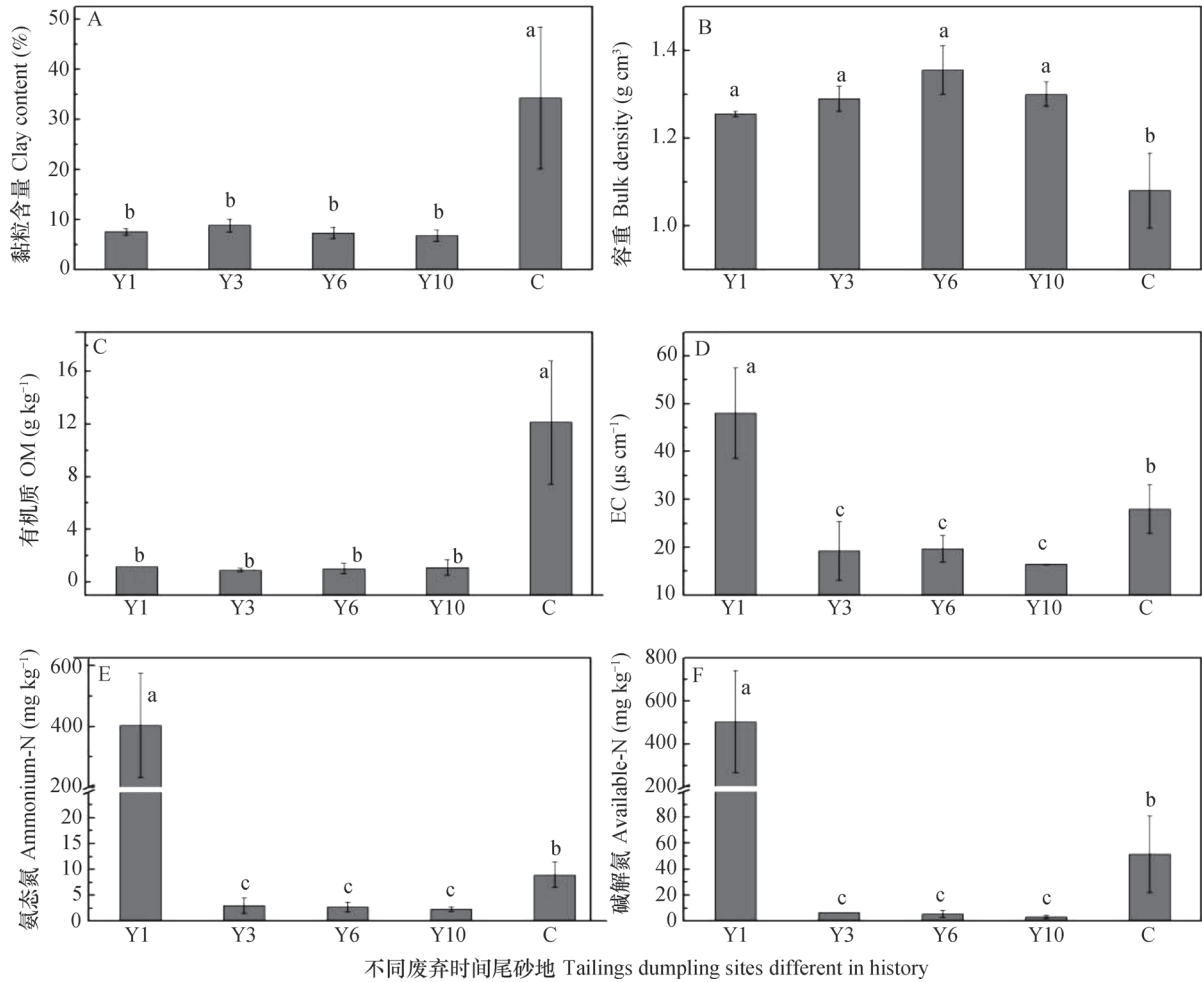
从图2D可以看出, 废弃3~10年的尾砂地土壤电导值低于 $20\mu\text{S cm}^{-1}$ , 明显低于废弃1年的尾砂地土壤电导值, 也低于对照区土壤; 从图2E和图2F可知, 废弃1年的尾砂地土壤铵态氮和碱解氮含量高达 $400\text{ mg kg}^{-1}$ 和 $500\text{ mg kg}^{-1}$ , 远高于对照区土壤, 而废弃3~10年的尾砂地土壤含量则为痕量。

尾砂地土壤是含稀土矿砂经过硫酸铵长时间浸取后的废弃物, 稀土元素被交换出来后, 还有大量的铵根离子残留在土壤中。许炼烽等<sup>[7]</sup>也认为, 尾砂地土壤碱解氮不是离子型稀土矿尾砂地植被复垦的障碍因子。但是, 调查发现废弃3年之后的尾砂地, 其土壤铵态氮含量已经降到极低, 从图3也可以看出, 废弃3年和6年的尾砂地, 在100cm深度内, 其铵态氮含量均低于 $6\text{ mg kg}^{-1}$ 。虽然在尾砂地恶劣的物理结构和极低的有机质含量条件下, 土

壤铵态氮较难通过硝化作用转化为易流失的硝态氮<sup>[18]</sup>, 但同时在这种条件下, 土壤保水保肥能力弱, 铵根离子也易流失<sup>[21-23]</sup>。此外, 定南地区降雨量大且集中, 尾砂地水土流失严重, 尾砂移动性强<sup>[23]</sup>, 不仅导致土壤的一些可溶性营养物质不断流失, 土壤吸附能力较强的铵根离子也流失殆尽。因而, 尾砂地废弃3年后, 严重的水土流失导致的尾砂地氮素及营养元素流失, 以及水土流失导致的植物难以定居也是植被恢复的主要障碍因子之一。

### 2.3 离子型稀土矿尾砂地土壤微生物及土壤酶活性状况

图4是尾砂地土壤微生物生物量碳和土壤酶活性情况。从图4A可以看出, 在3~10年内, 尾砂地土壤微生物量碳远低于正常植被区土壤, 且在废弃3~10年内并未随着废弃时间的增加而得到较明显的改善。从图4B可以看出, 尾砂地土壤脲酶活性和土壤酸性磷酸酶活性也显著低于正常植被区土壤, 且废弃3~10年间差别不明显。土壤酶活性结果与土壤有机质和碱解氮含量, 以及土壤微生物量碳结果类似。虽然废弃3~10年尾砂地



注：Y1、Y3、Y6和Y10分别表示废弃时间为1、3、6、10年的尾砂地，C表示尾砂地周边正常植被区。不同小写字母表示不同废弃时间尾砂地间的差异显著， $p < 0.05$  Note: Y1, Y3, Y6 and Y10 stands for sites, 1, 3, 6 and 10 years old respectively, and C for the control sites (surrounding areas). The different lowercase letters show significant differences among different tailings,  $p < 0.05$

图2 不同废弃时间尾砂地土壤理化性质

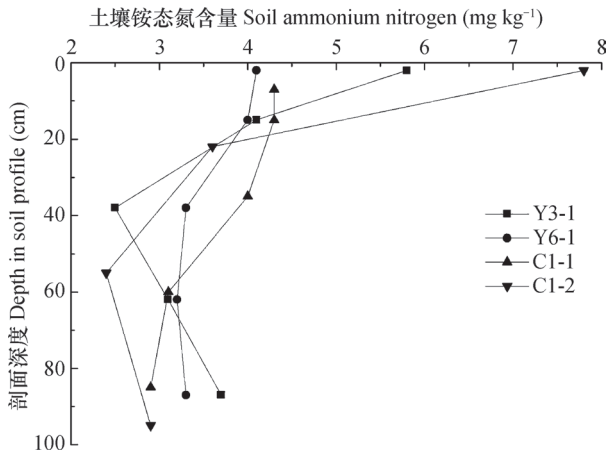
Fig. 2 Physical and chemical properties of the soils at the tailings dumping sites different in history

土壤与对照土壤在有效磷含量上差别不明显（废弃1、3、6、10年尾砂地和对照区土壤有效磷含量分别为 $0.43 \pm 0.07$ 、 $0.68 \pm 0.14$ 、 $0.44 \pm 0.12$ 、 $0.24 \pm 0.12$ 、 $0.46 \pm 0.24 \text{ mg kg}^{-1}$ ），废弃1年的尾砂地土壤全磷甚至明显高于对照区土壤（废弃1、3、6、10年尾砂地和对照区土壤全磷含量分别为 $0.28 \pm 0.06$ 、 $0.22 \pm 0.03$ 、 $0.13 \pm 0.02$ 、 $0.19 \pm 0.01$ 、 $0.13 \pm 0.04 \text{ g kg}^{-1}$ ），但尾砂地土壤酸性磷酸酶活性远低于正常植被区土壤。可能是对照区土壤有机质含量相对较高，且红壤地区养分循环速度极快，在有机质分解过程中，有机磷能不断释放出有效态磷供植物使用<sup>[24]</sup>。由于土壤微生物通过相互竞争、协调、驱动养分循环等作用影响着植物多样性和生态系统的生产力，其中土壤脲酶活性

则与土壤氮循环密切相关，土壤磷酸酶活性与土壤磷循环密切相关<sup>[25]</sup>。因而，土壤微生物生物量碳和土壤酶活性情况表明尾砂地土壤氮、磷等养分循环受到抑制，土壤脲酶和酸性磷酸酶活性可作为尾砂地土壤质量评价的酶活性指标。

#### 2.4 尾砂地土壤理化性质主成分分析

为综合判定不同废弃时间尾砂地土壤理化性质，选取尾砂地土壤黏粒含量（ $X_1$ ）、> 5mm石粒含量（ $X_2$ ）、容重（ $X_3$ ）、pH（ $X_4$ ）、EC（ $X_5$ ）、有机质（ $X_6$ ）、碱解氮（ $X_7$ ）和铵态氮（ $X_8$ ）为评定指标作主成分分析，从中提取了两个主成分（累积贡献率大于90%）。其中主成分1（PC1）可表示为： $PC1 = -0.942X_1 + 0.822X_2 + 0.942X_3 + 0.627X_4 - 0.298X_5 - 0.918X_6 + 0.077X_7$



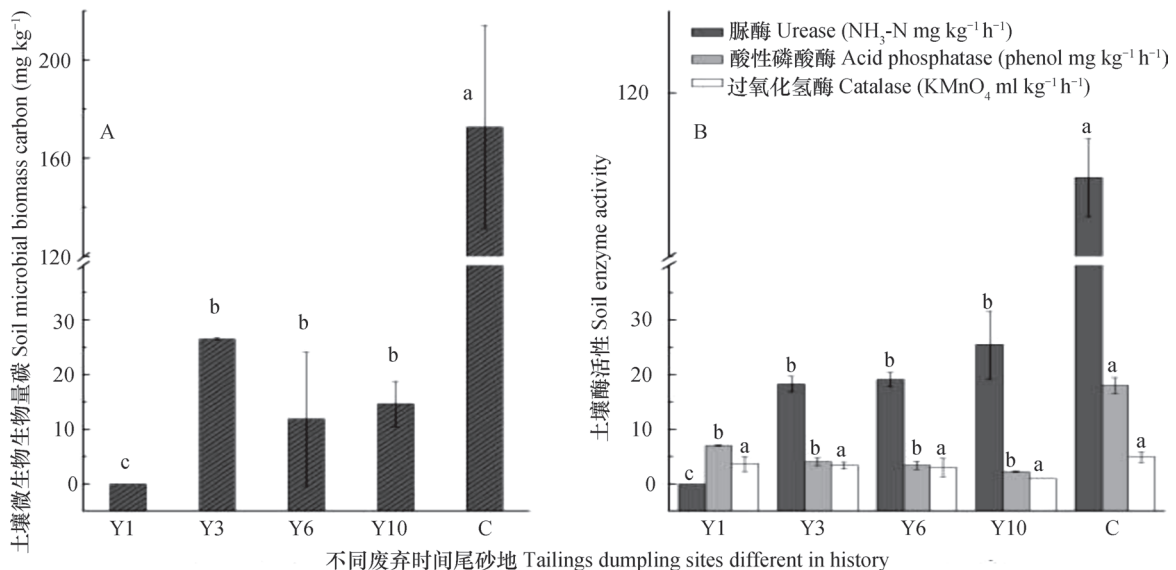
注：Y3-1和Y6-1分别表示废弃时间为3和6年的尾砂地，C1-1和C1-2表示尾砂地周边正常植被区  
Note: Y3-1 and Y6-1 stands for sites, 3 and 6 years old respectively, and C1-1 and C1-2 for the surrounding areas

图3 尾砂地土壤剖面土铵态氮含量

Fig. 3 Distribution of ammonium nitrogen content in soil profiles

+0.166X<sub>8</sub>, 代表土壤物理结构和有机质, PC1越大, 物理结构越差, 有机质越低; 主成分2可表示为: PC2=-0.023X<sub>1</sub> -0.215X<sub>2</sub> -0.177X<sub>3</sub> +0.464X<sub>4</sub> +0.823X<sub>5</sub> -0.039X<sub>6</sub> +0.992X<sub>7</sub> +0.985X<sub>8</sub>, 代表土壤碱解氮和电导值, PC2越大, 土壤碱解氮、电导值越高。以主成分1为横轴, 主成分2为纵轴, 得散点聚类图(图5)。

从图5可以看出, 废弃1年的尾砂地土壤、废弃3~10年的尾砂地土壤和对照土壤分属3种不同类型的土壤。对照C1、C2和C3的PC1得分最低, 表示其物理结构最好, 而PC2得分较高, 表示其土壤碱解氮含量较高; 废弃1年的尾砂地PC1、PC2得分最高, 表示其物理结构差, 土壤碱解氮含量过高; 而废弃3~10年的尾砂地, 其PC1得分较高, 而PC2得分均最低, 表明废弃3~10年的尾砂地物理结构差、EC值和氮含量低。且其得分差别不大, 说明



不同废弃时间尾砂地 Tailings dumping sites different in history

注：不同小写字母表示不同废弃时间尾砂地间的差异显著,  $p < 0.05$   
Note: The different lowercase letters show significant differences between sites different in age,  $p < 0.05$

图4 离子型稀土矿尾砂地土壤微生物及土壤酶活性状况

Fig. 4 Soil microbial biomass carbon content and soil enzyme activity in soils at the tailings dumping sites

尾砂地在废弃3~10年内其理化性质未得到明显改善。

尾砂地土壤理化性质主成分分析表明, 离子型稀土矿尾砂地在废弃10年后植被覆盖度达到较高水平, 但其土壤理化性质并未在废弃3~10年内得到明显的改善, 植被对土壤理化性质的改良作用没有明显体现出来。一方面由于尾砂来自表土下层的风

化层和半风化层土壤, 其沙砾含量高, 导致保水保肥能力弱, 植物根系也难以往下生长; 另一方面尾砂经过浸洗后, 营养和部分黏粒流失, 以致土壤环境更为恶劣。Bradshaw<sup>[26]</sup>也认为在足够长的时间内, 废弃地能够在自然演替条件下恢复, 但是当废弃地土壤理化性质比较极端时, 这个时间要更长。对于物理结构差、有机质含量低的离子型稀土尾



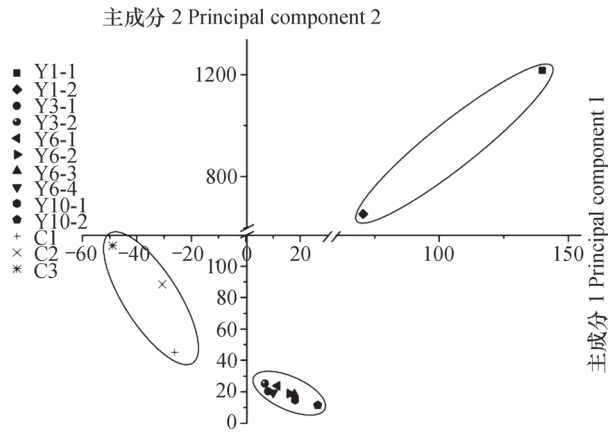


图5 不同废弃时间尾砂地土壤理化性质得分分布

Fig. 5 Score distribution of the sites different in age in physical and chemical properties

砂地，设法增加其土壤有机质含量是尾砂地土壤基质改良的首要任务<sup>[27]</sup>。有效态营养元素较高的牲畜粪便、城市污泥等有机废弃物，搭配营养含量较低、吸附能力较强的锯末、生物炭等<sup>[26, 29]</sup>可以考虑作为尾砂地土壤改良剂，加快尾砂地土壤重建及植被恢复，并提高尾砂地土壤保水保肥能力。

### 3 结论

离子型稀土矿尾砂地土壤植被覆盖度随着废弃时间增加而增加，并在废弃10年后达到较高的覆盖度，但是其群落组成仍相对简单。与周边未被破坏植被区对比，尾砂地土壤黏粒含量低、容重大、有机质含量极低，且废弃3~10年内并未明显改善。土壤物理结构和土壤有机质含量远差（低）于周边正常植被区是尾砂地植被恢复的最主要障碍因子之一；尾砂地在废弃3年后，其0~100cm剖面内铵态氮流失殆尽，土壤电导值也降至较周边正常植被区低。严重的水土流失及其导致的土壤氮素等营养匮乏也是尾砂地植被恢复的主要障碍之一；此外，尾砂地土壤微生物生物量碳及土壤酶活性显著低于周边正常植被区，尾砂地土壤氮、磷循环受到抑制。总之，尾砂地土壤物理结构极差、土壤养分贫乏、生物多样性少，这些均构成了矿区土地修复与生态恢复中的物理性、化学性和生物性的限制因素。要加快尾砂地植被恢复，必须引入人工干预进行土壤改良，促进尾砂地土壤重建。

致谢 感谢广州威典公司郭铁成先生对本研究野外调查工作所提供的帮助。

### 参考文献

- [1] 池汝安, 田君. 风化壳淋积型稀土矿评述. 中国稀土学报, 2007, 25 (6): 641—650. Chi R A, Tian J. Review of weathered crust rare earth ore (In Chinese). Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2007, 25 (6): 641—650
- [2] 李永绣, 张玲, 周新木. 南方离子型稀土的资源 and 环境保护性开采模式. 稀土, 2010, 31 (2): 80—85. Li Y X, Zhang L, Zhou X M. Current mining situation and potential development of rare earth in China (In Chinese). Chinese Rare Earths, 2010, 31 (2): 80—85
- [3] 王平, 刘少峰. 岭南稀土矿区土壤侵蚀状况分析. 中国水土保持, 2008 (1): 44—46, 56. Wang P, Liu S F. Status of soil erosion of south China rare-earth mining area (In Chinese). Soil and Water Conservation in China, 2008 (1): 44—46, 56
- [4] 高志强, 周启新. 稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响. 生态学杂志, 2011, 30 (12): 2915—2922. Gao Z Q, Zhou Q X. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment (In Chinese). Chinese Journal of Ecology, 2011, 30 (12): 2915—2922
- [5] 温小军. 赣南稀土矿区土壤环境特征及稀土金属地球化学行为研究. 昆明: 云南大学, 2012: 19—50. Wen X J. Study on characteristics of soil environment and geochemical behavior of rare earth metals in rare earth mining area of southern Jiangxi Province (In Chinese). Kunming: Yunnan University, 2012: 19—50
- [6] Li X F, Chen Z B, Chen Z Q, et al. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, Southeast China. Chemosphere, 2013, 93: 1240—1246
- [7] 许炼烽, 刘明义. 稀土矿开采对土地资源的影响及植被恢复. 农村生态环境, 1999, 15 (1): 14—17. Xu L F, Liu M Y. Impact of rare-earth exploitation on land resources and its ecological recovery (In Chinese). Rural Eco-Environment, 1999, 15 (1): 14—17
- [8] 涂翠琴, 张宝山. 寻乌县稀土尾沙堆场地复垦试验. 冶金矿山设计与建设, 1995 (2): 55—59. Tu C Q, Zhang B S. On land reclamation of rare earth tailings dam in Xunwu (In Chinese). Metal Mine Design and Construction, 1995 (2): 55—59
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版

- 社, 2002. Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis (In Chinese). 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2002
- [ 10 ] 闫晗, 葛蕊, 潘胜凯, 等. 恢复措施对排土场土壤酶活性和微生物量的影响. 环境化学, 2014, 33 ( 2 ): 327—333. Yan H, Ge R, Pan S K, et al. Effects of restoration measures on soil enzyme activities and microbial biomass in the coalmine dump (In Chinese). Environmental Chemistry, 2014, 33 ( 2 ): 327—333
- [ 11 ] 吴玉萍, 李应金, 赵立红, 等. 连续流动分析法测定土壤中全磷、全钾的含量. 西南农业学报, 2013, 26 ( 5 ): 1941—1945. Wu Y P, Li Y J, Zhao L H, et al. Determination of total phosphorus content and total potassium content in soil with continuous flow analytical method (In Chinese). Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2013, 26 ( 5 ): 1941—1945
- [ 12 ] 谢志鹏, 徐志南, 郑建明, 等. 靛酚蓝反应测定发酵液中的氨态氮. 浙江大学学报: 工学版, 2005, 39 ( 3 ): 437—439, 444. Xie Z P, Xu Z N, Zheng J M, et al. Determination of ammonium nitrogen in fermentation broth through indophenol blue reaction (In Chinese). Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2005, 39 ( 3 ): 437—439, 444
- [ 13 ] Schlüter S, Weller U, Vogel H J. Soil-structure development including seasonal dynamics in a long-term fertilization experiment. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2011, 174 ( 3 ): 395—403
- [ 14 ] Annabi M, Le B Y, Le V P M, et al. Improvement of soil aggregate stability by repeated applications of organic amendments to a cultivated silty loam soil. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2011, 144 ( 1 ): 382—389
- [ 15 ] Bandyopadhyay P K, Saha S, Mani P K, et al. Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system. Geoderma, 2010, 154 ( 3/4 ): 379—386
- [ 16 ] Dexter A R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma, 2004, 120 ( 3/4 ): 201—214
- [ 17 ] Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research, 2005, 82 ( 2 ): 121—145
- [ 18 ] Elfstrand S, Båth B, Mårtensson A. Influence of various forms of green manure amendment on soil microbial community composition, enzyme activity and nutrient levels in leek. Applied Soil Ecology, 2007, 36 ( 1 ): 70—82
- [ 19 ] Gabor R S, Eilers K, McKnight D M, et al. From the litter layer to the saprolite: Chemical changes in water-soluble soil organic matter and their correlation to microbial community composition. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 68: 166—176
- [ 20 ] Guo J H, Peng Y Z, Wang S Y. Effective and robust partial nitrification to nitrite by real-time aeration duration control in an SBR treating domestic wastewater. Process Biochemistry, 2009, 44 ( 9 ): 979—985
- [ 21 ] 曾曙才, 吴启堂. 华南赤红壤无机复合肥氮磷淋失特征. 应用生态学报, 2007, 18 ( 5 ): 1015—1020. Zeng S C, Wu Q T. Leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in inorganic compound fertilizer from latosolic red soil in South China (In Chinese). Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18 ( 5 ): 1015—1020
- [ 22 ] Nguyen T T, Marschner P. Addition of a fine-textured soil to compost to reduce nutrient leaching in a sandy soil. Soil Research, 2013, 51 ( 3 ): 232—239
- [ 23 ] 李德荣, 董闻达, 廖汉民, 等. 治理稀土尾砂中百喜草的生长和促苗措施的研究. 江西农业大学学报, 2001, 23 ( 1 ): 93—95. Li D R, Dong W D, Liao H M, et al. A study on the growth and seedling improvement of bahiagrass in the tail mineral slag of rare earth (In Chinese). Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2001, 23 ( 1 ): 93—95
- [ 24 ] Guppy C N, Menzies N W, Moody P W, et al. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: A review. Soil Research, 2005, 43 ( 2 ): 189—202
- [ 25 ] 刘善江, 夏雪, 陈桂梅, 等. 土壤酶的研究进展. 中国农学通报, 2011, 27 ( 21 ): 1—7. Liu S J, Xia X, Chen G M, et al. Study progress on functions and affecting factors of soil enzymes (In Chinese). Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 ( 21 ): 1—7
- [ 26 ] Bradshaw A. The use of natural processes in reclamation-advantage and difficulties. Landscape and Urban Planning, 2000, 51 ( 2/4 ): 89—100
- [ 27 ] Tordo G M, Baker A J M, Willis A J. Current approaches to the revegetation and reclamation of metalliferous mine wastes. Chemosphere, 2000, 41: 219—228
- [ 28 ] Asai H, Samson B K, Stephan H M, et al. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos I: Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. Field Crops Research, 2009, 111: 81—84

- [ 29 ] 姜灿烂, 何园球, 刘晓利, 等. 长期施用有机肥对旱地红壤团聚体结构与稳定性的影响. 土壤学报, 2010, 47 ( 4 ) : 715—722. Jiang C L, He Y Q, Liu X L, et al. Effect of long-term application of organic manure on structure and stability of aggregate in upland red soil ( In Chinese ) . Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 ( 4 ) : 715—722

## LIMITING FACTORS FOR RESTORATION OF DUMPING SITES OF IONIC RARE EARTH MINE TAILINGS

Liu Wenshen<sup>1</sup> Liu Chang<sup>1</sup> Wang Zhiwei<sup>1</sup> Teng Wenkai<sup>1</sup> Tang Yetao<sup>1, 2†</sup> Qiu Rongliang<sup>1, 2</sup>

( 1 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China )

( 2 Guangdong Provincial Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Remediation Technology ( Sun Yat-sen University ) , Guangzhou 510275, China )

**Abstract** A field survey was performed of some deserted ionic rare earth mine tailing dumping sites different in age in the Dingnan County, Ganzhou, Jiangxi, to investigate vegetation composition, soil physico-chemical properties, soil microbial and enzyme activities, in an attempt to explore factors limiting restoration of the dumping sites. Results show that vegetation coverage of the dumping sites increased with the age, reaching 72% at the sites 10 years after the desertion, but plant composition of the vegetation at the sites remained still quite simple ( only three species recorded ) . In comparison with the surrounding areas with normal vegetation, the sites were much lower in soil organic matter content ( 0.5 ~ 1.5 g kg<sup>-1</sup> ) , and clay content ( 6.00% ~ 9.66% ) , but significantly higher in bulk density ( 1.26 ~ 1.43 g cm<sup>-3</sup> ) . The one-year old deserted dumping sites were much higher in soil electrical conductivity ( EC ) than those 3 ~ 10 years old and the surrounding areas, and moreover, reached as high as 400 mg kg<sup>-1</sup> and 500 mg kg<sup>-1</sup> in ammonium nitrogen and available nitrogen, while those 3 ~ 10 years old tended to be as low as trace, and the sites, 3 and 6 years old, were also extremely low in ammonium nitrogen in the 0 ~ 100 cm soil layer, indicating that soil ammonium nitrogen in the sites were almost depleted completely to below 10 mg kg<sup>-1</sup> within three years. So severe soil erosion and the resultant soil N deficiency are among the main factors limiting restoration of vegetation at the sites. Besides, the soils at the sites were significantly lower than the surrounding areas in soil microbial carbon content ( < 26.7 mg kg<sup>-1</sup> ) , soil urease activity ( < 29.9 NH<sub>3</sub>-N mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ) and soil acid phosphatase activity ( < 7.10 phenol mg kg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> ) , indicating that soil nitrogen and phosphorus recycling in the soils of the sites was inhibited. The findings of the present study suggest that the soils at the sites did not have much improvement in the years from the 3<sup>rd</sup> to the 10<sup>th</sup> physical, chemical and microbial properties. So vegetation restoration at the sites is facing an issue of reconstructing, their soils, which requires some appropriate artificial interventions, like soil amelioration, before vegetation can be restored.

**Key words** Ionic rare earth mine tailings; Limiting factors for vegetation restoration; Soil physical structure; Soil ammonium nitrogen; Soil enzyme activity

( 责任编辑: 卢 萍 )

CONTENTS

**Reviews and Comments**

A review of study on microbial ecology of nitrite-dependent anaerobic methane oxidation ..... Shen Lidong ( 721 )

**Soil Science and Modern Agriculture**

- Spatio-temporal variation of total N content in farmland soil of Jiangxi Province in the past 30 years ..... Zhao Xiaomin, Shao Hua, Shi Qinghua, et al. ( 730 )
- Early warning of heavy metals potential risk governance in Beijing ..... Jiang Hongqun, Wang Binwu, Liu Xiaona, et al. ( 745 )
- Effect of deep application of straw on composition of humic acid in soil aggregates ..... Zhu Shu, Dou Sen, Chen Lizhen ( 758 )
- Effect of biochar application on pakchoi (*Brassica chinensis* L.) utilizing nitrogen in acid soil ..... Yu Yingliang, Xue Lihong, Yang Linzhang, et al. ( 766 )
- Effects of water and fertilizer on fruit yield of high-yielding clonal *Camellia oleifera* Abel ..... Zhang Wenyuan, Guo Xiaomin, Tu Shuping, et al. ( 774 )

**Research Articles**

- VRML-based virtual reality modeling of three dimensional variation of soil electrical conductivity ..... Li Hongyi, Gu Chengjian, Dan Chenglong, et al. ( 781 )
- Effect of number of sampling sites on characterization of spatial variability of soil organic matter ..... Hai Nan, Zhao Yongcun, Tian Kang, et al. ( 790 )
- Research on soil water movement based on stable isotopes ..... Jin Yurong, Lu Kexin, Li Peng, et al. ( 800 )
- Basic NPK fertilizer recommendation and fertilizer formula for maize production regions in China ..... Wu Liangquan, Wu Liang, Cui Zhenling, et al. ( 816 )
- Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of SOC in aggregates in tidal flat polders ..... Hou Xiaojing, Yang Jingsong, Wang Xiangping, et al. ( 827 )
- Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil ..... Mao Xiali, Lu Kouping, He Lizhi, et al. ( 837 )
- Effects of biochar on N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> emissions from paddy field under rice-wheat rotation during rice and wheat growing seasons relative to timing of amendment ..... Li Lu, Zhou Ziqiang, Pan Xiaojian, et al. ( 847 )
- Effects of successive application of crop-straw biochar on crop yield and soil properties in cambosols ..... Liu Yuan, M. Jamal Khan, Jin Haiyang, et al. ( 857 )
- Calculation of thickness of shear plane in diffuse double layer of constant charge soil colloid in single electrolyte system ..... Ding Wuqun, Zhu Qihong, Wang Lei, et al. ( 867 )
- Effect of chemical leaching remedying chromium contaminated soil in deserted chemical plant site ..... Li Shiye, Cheng Jiemin ( 877 )
- Limiting factors for restoration of dumping sites of ionic rare earth mine tailings ..... Liu Wenshen, Liu Chang, Wang Zhiwei, et al. ( 887 )
- Residues of organochlorine pesticides in soils of Liaodong and Shandong Peninsulas ..... Zhu Yingyue, Liu Quanyong, Li He, et al. ( 900 )
- Long-term application of winter green manures changed the soil microbial biomass properties in red paddy soil ..... Gao Songjuan, Cao Weidong, Bai Jinshun, et al. ( 909 )
- Effects of intercropping with leguminous crops on tomato yield, soil nutrients and enzyme activity ..... Dai Huihui, Hu Xuefeng, Cao Mingyang, et al. ( 917 )

**Research Notes**

- Relationship of free amino acids in root exudates with wilt disease (*Fusarium oxysporum*) of faba bean ..... Dong yan, Dong Kun, Tang Li, et al. ( 924 )
- Effects of intercropping of wheat and faba bean on diversity of metabolic function of rhizosphere fungal community ..... Hu Guobin, Dong Kun, Dong Yan, et al. ( 933 )
- Evolvement of structure and abundance of soil nitrogen-fixing bacterial community in *Phyllostachys edulis* plantations with age of time ..... He Donghua, Shen Qiulan, Xu Qiufang, et al. ( 941 )
- Effect of long-term fertilization on carbon sequestration in lime concretion black soil relative to fertilization pattern ..... Li Wei, Kong Lingcong, Zhang Cunling, et al. ( 949 )
- Effects of interplanting grass on utilization, loss and accumulation of <sup>15</sup>N in apple orchard ..... Peng Ling, Wen Zhao, An Xin, et al. ( 955 )

**Cover Picture:** Full view of ionic rare earth mine desert (by Tang Yetao, Liu Wenshen)

# 《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

## 土 壤 学 报

### Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 4 期 2015 年 7 月

## ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 4 July, 2015

编 辑 《土壤学报》编辑委员会  
地址：南京市北京东路 71 号 邮政编码：210008  
电话：025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica  
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China  
Tel: 025 - 86881237  
E-mail: actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正  
主 管 中 国 科 学 院  
主 办 中 国 土 壤 学 会  
承 办 中国科学院南京土壤研究所

Editor-in-Chief Shi Xuezheng  
Superintended by Chinese Academy of Sciences  
Sponsored by Soil Science Society of China  
Undertaken by Institute of Soil Science,  
Chinese Academy of Sciences

出 版 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717

Published by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China

印刷装订 北京中科印刷有限公司  
总发行 科 学 出 版 社  
地址：北京东黄城根北街 16 号 邮政编码：100717  
电话：010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company  
Distributed by Science Press  
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,  
Beijing 100717, China  
Tel: 010 - 64017032  
E-mail: journal@mail.sciencep.com

国外发行 中国国际图书贸易总公司  
地址：北京 399 信箱 邮政编码：100044

Foreign China International Book Trading Corporation  
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号：CN 32-1119/P

国内邮发代号：2-560

国外发行代号：BM45

定价：60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929

