周彩云,张 嵚,赵小敏,等. 赣南某原地浸析稀土尾矿复垦前后土壤质量变化[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1): 89-95. ZHOU Cai-yun, ZHANG Qin, ZHAO Xiao-min, et al. Soil quality changes of rare earth tailings before and after reclamation in south Jiangxi Province, China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(1): 89-95.

赣南某原地浸析稀土尾矿复垦前后土壤质量变化

周彩云^{1,2},张 嵚^{1,2*},赵小敏^{1,2*},万广越²,程晓迪²,郭 熙²

(1.江西农业大学农学院/教育部作物生理生态与遗传育种重点实验室,南昌 330045;2.江西农业大学国土资源与环境学院/江西 省鄱阳湖流域农业资源与生态重点实验室,南昌 330045)

摘 要:为探究土地复垦对原地浸析稀土尾矿 0~20 cm 土层土壤质量的影响,以赣州市龙南县某原地浸析离子型稀土尾矿为研究 对象,从浸矿剂残留、土壤酸碱性、土壤养分和重金属污染等4个方面对比复垦前后土壤质量变化,探讨稀土尾矿土地复垦的效果 与潜在问题。结果表明:复垦后土壤的浸矿剂 NH:含量从 89.00 mg·kg⁻¹降低至 8.70 mg·kg⁻¹,土壤 pH 由 4.15 增加至 5.16,而土壤肥 力综合指数则由 0.44降低至 0.31。内梅罗综合指数评价结果显示,复垦前后土壤 5种非稀土重金属的污染水平均为清洁水平;而 地累积指数评价结果显示,复垦前后土壤稀土元素总量的污染水平分别为无污染-中度污染水平和无污染水平。研究表明,土地 复垦可显著改善该矿区土壤的浸矿剂残留、土壤酸化和重金属污染问题,但土壤肥力衰退问题没有明显改善。

关键词:复垦;离子型稀土;浸矿剂;酸化;重金属;土壤养分

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2019)01-0089-07 doi: 10.13254/j.jare.2018.0042

Soil quality changes of rare earth tailings before and after reclamation in south Jiangxi Province, China

ZHOU Cai-yun^{1,2}, ZHANG Qin^{1,2*}, ZHAO Xiao-min^{1,2*}, WAN Guang-yue², CHENG Xiao-di², GUO Xi²

(1.Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, Genetics and Breeding, Ministry of Education, College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Key Laboratory of Poyang Lake Basin Agricultural Resource and Ecology of Jiangxi Province, School of Land Resource and Environment, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: In order to study the effect of land reclamation on topsoil quality in in-situ leaching rare earth tailings, an in-situ leaching ionadsorption type rare earth tailings from Longnan County Ganzhou City was studied. The soil quality changes before and after reclamation were investigated through NH⁺ concentration, soil pH value, soil nutrient content and heavy metal content. The results showed that after reclamation the concentration of NH⁺ decreased from 89.00 mg·kg⁻¹ to 8.70 mg·kg⁻¹, and soil pH increased from 4.15 to 5.16. The comprehensive index of soil fertility decreased from 0.44 to 0.31. The Nemerow integrated pollution index of non-rare earth heavy metal indicated that the pollution level of tailing was clean before and after reclamation, but the geoaccumulation index of rare earth heavy metal showed that the pollution levels of tailing before and after reclamation were unpolluted to moderately polluted and unpolluted, respectively. Hence, land reclamation could significantly alleviate leaching agent residue, soil acidification and heavy metal pollution, but did not alleviate soil fertility degradation.

Keywords: reclamation; ion-adsorption type rare earth; leaching agent; acidification; heavy metal; soil nutrient

收稿日期:2018-06-26 录用日期:2018-07-26

作者简介:周彩云(1994—),女,江西南昌人,硕士研究生,主要从事土壤污染修复研究。E-mail:yun12321@foxmail.com

^{*}通信作者:张 嵚 E-mail:chincheung@live.com 赵小敏 E-mail:zhaoxm889@126.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0301601-01);赣鄱英才"555"领军人才项目(2012);江西省博士后科研项目(2015KY23);江西省教育 厅重点项目(GJJ170244);江西省研究生创新专项资金项目(YC2016-S181)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2017YFD0301601-01); "555" Talent Candidates of Jiangxi Province (2012); The Science Foundation for Post Doctorate Research of Jiangxi Province(2015KY23); The Key Research Foundation of Education Bureau of Jiangxi Province, China (GJJ170244); Graduate Student Innovation Special Fund of Jiangxi Province (YC2016-S181)

离子型稀土矿是在江西南部及临近省区发现的 独特的花岗岩风化壳离子吸附型稀土矿床,是世界中 重稀土的主要来源^[1]。我国离子型稀土资源占世界 同类资源的90%,其中江西的储量居全国第一且其 90%的储量分布在江西赣州^[2]。江西赣南地区于20 世纪80年代中末期开始大规模开采离子吸附型稀土 矿,是我国开采历史最长、开采规模最大和产量最多 的地区^[3-4]。离子型稀土矿山至今已开采40多年,经 历了池浸、堆浸和原地浸析3种采矿工艺的变迁^[5]。 原地浸析技术是将含有大量电解质离子的浸矿液通 过注液孔注入矿体,将矿物中稀土离子交换解析出 来,最后通过集液沟收集稀土母液导入母液处理车间 进行处理^[6]。相比池浸和堆浸工艺而言,原地浸析工 艺的资源利用率高且环境破坏较小,因此该工艺得到 广泛推广和应用^[7-8]。

由于离子型稀土矿中的稀土元素主要以离子相 存在19,故无法采用重选、磁选或浮选等一般的物理 选矿方法,只能采用电解质离子(Na⁺、NH[‡]、H⁺和 Mg²⁺) 交换化学选矿法[10-11]。这种特殊的开采工艺加上离 子型稀土矿区的不合理开采、乱采滥挖、回收工艺落 后及环境保护不及时等,使得赣南地区离子型稀土矿 区生态环境遭到严重破坏[6.12],以土壤酸化、浸矿剂残 留、土壤肥力退化及重金属污染为主要表现形式的土 壤退化问题尤为突出[13-14]。土地复垦是国家整治矿 山尾矿的重要措施,目前离子型稀土尾矿土地复垦主 要采用客土法来恢复地表土壤。尽管目前离子型稀 土矿山土地复垦项目已开展,但对于复垦前后矿山土 壤质量变化鲜见报道,而这对于明确矿山修复效果、 促进土地复垦技术发展具有重要作用。因此,本文以 赣州市龙南县某原地浸析稀土尾矿为研究对象,从土 壤质量的土壤酸碱性、浸矿剂残留、土壤养分和重金 属含量4个方面,比较复垦前后土壤质量变化,探讨 土地复垦改善矿区土壤退化的效果,并为离子型稀土 矿土地复垦技术进一步优化提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集

原地浸矿工艺开采过程对离子型稀土矿区地表 有较大扰动,开采后废弃稀土尾矿土壤受到严重破坏 且植被退化严重。研究矿区为赣州市龙南县某废弃 稀土原地浸析尾矿,该废弃尾矿选用NH4作为浸矿 剂,并于2012年12月采用梯田法复垦技术首先对矿 区土地地形地貌进行整理,客土覆盖30 cm,复垦植被 选取五节芒、芒草和高羊茅,复垦工程结束时间为 2013年9月。2014年12月14日矿区调查结果表明废 弃尾矿复垦区域表层有五节芒、芒草和高羊茅(图 1a),而未复垦区(即尾矿区)几乎无植被生长(图 1b)。复垦区由不同阶地组成,由山顶至山脚均匀间 隔选取6个阶地,并在每个阶地通过五点法采集一个 混合样品,共采集6个土壤样品代表复垦区土壤;尾 矿区分别在与复垦区采集样品几乎等高位置通过五 点法采集6个土样代表尾矿区土壤。与此同时在采 矿区周边未受人类活动干扰且植物覆盖区域山体不 同高度位置通过五点法采集5个土样代表对照土壤。 每个采样点均采集土壤(0~20 cm)组成混合样,采用 四分法取样品约1 kg并装袋密封,记录编号。



图 1 稀土原地浸析尾矿区与复垦区 Figure 1 The in-situ leaching rare earth tailings and reclamation area

1.2 土壤样品处理与分析

土壤样品风干后分别研磨过20目(0.9 mm)和 100目(0.149 mm)尼龙筛,并装袋待用。采用电位法 测定土壤 pH值(土:水=1:2.5);元素分析仪法测定土 壤有机质;碱解扩散法测定碱解氮;碳酸氢钠法测定 速效磷;乙酸铵提取法测定速效钾。土壤样品消解采 用四酸(HCl-HNO₃-HF-HClO₄)消煮法,准确称量 0.2~0.5g(精确至0.0001g)100目风干土样于50 mL 聚四氟乙烯消化管中,加超纯水润湿样品后加入5 mL HCl并于170℃消解土样,待消解液蒸发至约1~2 mL,取下稍微冷却后加入5 mL浓 HNO₃、3 mL HClO₄ 和2 mL HF,继续加热消煮至白烟冒尽且近干时取 下,冲洗消化管盖及内壁,加3 mL(1:1)HCl溶解残 渣,全量移至50 mL容量瓶中定容后滤膜过滤,存放 于4℃待测。5种非稀土重金属(Cr、Cu、Ni、Pb、Zn)均 采用电感耦合等离子光谱仪测定,16种稀土元素 (La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、 Lu、Sc、Y)均采用电感耦合等离子光谱-质谱联用仪 (ICP-MS)测定。

1.3 土壤评价方法

1.3.1 重轻稀土比[15]

根据稀土元素的化学性质、物理性质和地球化学 性质的相似性和差异性,以及矿物处理的需要,常分 为轻稀土组(LREEs,包括La、Ce、Pr、Nd、Sm和Eu)和 重稀土组(HREEs,包括Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、 Lu、Sc、Y),重轻稀土比计算公式为HREEs/LREEs= Σ ([Gd]-[Lu]+[Y])/ Σ ([La]-[Eu])。

1.3.2 土壤综合肥力评价法[16]

土壤综合肥力评价采用改进的内梅罗公式进行 计算,并对参评的土壤肥力评价因子进行标准化处 理,以消除各参评因子间的量纲差别。选取5个养分 评价因子(pH值、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾), 以第二次全国土壤普查标准为依据,土壤综合肥力按 下式计算:

$$P_{z} = \sqrt{\frac{P_{i\min}^{2} + P_{iave}^{2}}{2}} \times \frac{N-1}{N}$$

式中: P_x 为土壤综合肥力指数; P_{imn}^2 为土壤所有指标中 单项肥力指数最小值; P_{iave}^2 为土壤所有指标中单项 肥力指数平均值;N为参评的土壤肥力指标数。根 据 P_x 数值对土壤肥力等级进行分级^[17]: $P_x \leq 0.9$ 为差; $0.9 \leq P_x < 1.7$ 为一般; $P_x \geq 1.7$ 为肥沃。

1.3.3 内梅罗综合污染指数法[18]

内梅罗综合污染指数法是国内外广泛用于评价 土壤多种不同重金属元素污染水平的评价方法。其 计算公式为:

$$P_{\text{Nem}} = \sqrt{\frac{P_{\text{max}}^2 + P_{\text{ave}}^2}{2}}$$

式中:P_{Nem}为土壤重金属复合污染指数;P_{ave}为所有单项污染指数的平均值;P_{max}为最大单项污染指数。根据P_{Nem}值对非稀土重金属污染水平进行分级:P_{Nem} < 0.7为安全;0.7
<P_{Nem} <1 为警戒线;1<P_{Nem} <2 为轻度污染;2<P_{Nem} <3 为中度污染;P_{Nem}>3 为重污染。
1.3.4 地累积指数法^[17]

地累积指数法是一种广泛用于重金属污染评价 的方法,其计算公式为:

 $I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \cdot B_i)]$

式中:*I*geo为地积累指数;*C*_i为重金属元素*i*在沉积岩中的实测含量;*k*是各种岩石背景值差异的常数(通常为1.5);*B*_i为重金属元素*i*的地球化学背景值,本文采用江西省元素含量作为背景值^[19]。根据*I*geo值对稀土元素污染水平进行分级:*I*geo <0为无污染;0<*I*geo <1为无污染-中度污染;1<*I*geo <2为中度污染;2<*I*geo <3为中度污染;2<*I*geo <5为强污染;4<*I*geo <5为强污染。

1.4 数据分析

应用 Microsoft Excel 软件计算分析, Origin Pro 7.5 软件作图, SAS和 SPSS软件进行数据方差分析(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 浸矿剂NH 残留

稀土矿开采所用浸矿剂主要为铵盐,铵盐残留于 尾矿土壤会提高重金属活性,还会引起水体污染。不 同处理土壤NHt含量如图2所示。NHt含量平均值大 小依次为尾矿土壤(89.00 mg·kg⁻¹)>对照土壤(40.13 mg·kg⁻¹)>复垦土壤(8.70 mg·kg⁻¹)。尾矿土壤NH4⁺ 含量显著高于复垦土和对照土(P<0.05),而复垦土壤 和对照土壤之间无显著差异,这说明采矿结束后大量 浸矿剂残留于尾矿土壤,复垦后矿区土壤浸矿剂含量 显著降低。

2.2 土壤酸化

尾矿土的土壤酸化是离子型稀土尾矿常见的土 壤质量问题。不同处理土壤酸碱性如表1所示。结 果表明,土壤pH大小依次为复垦土壤>对照土壤>尾



Figure 2 Soil NH_4^+ content of different soils

矿土壤,并且三个处理间存在显著差异(P<0.05)。尾 矿土壤为极强酸性,这是由于稀土矿采用铵盐类酸性 物质浸矿提取稀土,随着开采时间增加土壤中铵盐类 物质浓度逐渐增加并最终导致土壤酸化。复垦后虽 为酸性,但土壤pH值显著高于尾矿土壤和对照土壤。 这说明复垦后矿区土壤酸化问题明显改善,并且其酸 性比对照土壤还要弱。

表1 不同处理土壤 pH 值

Table 1 Soil pH of different soils

尾矿土壤(n=6)	复垦土壤(n=6)	对照土壤(n=5)
Tailing soil	Reclamation soil	CK
4.15±0.12c	5.16±0.15a	4.77±0.08b

注:不同小写字母表示P<0.05水平上差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference at $P{<}$ 0.05 level. The same below.

2.3 土壤肥力退化

离子型稀土矿化学试剂开采必然会引起土壤养 分流失,稀土尾矿土壤养分总体匮乏。3种不同处理 土壤养分含量如表2所示。与尾矿土壤相比,复垦土 壤的碱解氮含量显著低于尾矿土壤(P<0.05),其他养 分指标无显著差异。这可能是由于浸矿剂NH4⁺作为 碱解氮残留于尾矿土壤使得尾矿土壤碱解氮含量较 高。复垦土壤的碱解氮和速效钾与对照土壤相比无 显著差异,但速效磷和有机质含量偏低,这说明复垦 后矿区土壤缺乏有效磷和有机质。

不同处理土壤的单项肥力指数和综合肥力指数 如表3所示。不同处理土壤的P₂值大小依次为对照 土壤>尾矿土壤>对照土壤,且所有土壤P₂值均小于 0.9,即所有土壤的综合肥力处于Ⅲ级(差)水平。复 垦土壤的P₂值小于尾矿土壤,说明复垦后土壤的综 合肥力比尾矿土壤还要差,这主要有两个方面的原 因:一方面,尾矿土壤中浸矿剂NH²残留使得碱解氮 含量较高,导致尾矿土壤的单项肥力指数P₄N比复垦 土壤高;另一方面,复垦土壤速效磷和速效钾含量较 低使得单项肥力指数P₄P和P₄K均低于尾矿土。此外, 复垦土壤的综合肥力指数小于对照土壤,这主要是由 于复垦土壤除 P_{pH}外其他单项肥力指数均小于对照土 壤。土壤综合肥力差意味着土壤肥力处于低水平状态,作物处于缺肥状态,个别指标严重缺乏。复垦土 壤单项肥力指数 P_{AP}、P_{AK}、P_{AN}和 P_{SOM}均最低,这说明复 垦土壤的速效磷、速效钾、碱解氮和有机质均非常缺 乏。以上结果表明复垦区土壤贫瘠,供给植物直接吸 收利用的养分含量整体偏低,不利于植物生长,这可 能严重影响土地复垦效果,基于此,建议土地复垦时 评价客土的土壤综合肥力水平,并对低肥力水平的客 土进行科学施肥以提高其肥力。

2.4 土壤重金属污染

稀土矿山的开采会破坏地表的形态,含有大量与 矿物伴生的重金属元素尤其是稀土元素势必发生迁 移转化,对周边水体和土壤环境造成无法估量的严重 影响。土壤重金属污染被认为是稀土矿区采矿的主 要环境问题,因此本文将土壤重金属污染分为非稀土 重金属污染和稀土元素污染两类。

2.4.1 非稀土重金属污染

矿区5种非稀土重金属含量如表4所示。复垦土 壤中Pb和Zn含量低于尾矿土壤和对照土壤,但其 Cr、Ni和Cu元素显著高于尾矿土壤和对照土壤(P< 0.05)。然而,不同处理土壤重金属含量与土壤环境 质量三级标准(GB 15618—1995)^[20]相比较,所有土壤 重金属含量均远低于土壤环境质量三级标准,这说明 单个重金属元素均不超标。内梅罗综合评价结果表 明不同类型土壤*P*_{Nem}相差不大且均远低于0.7,即重 金属污染等级均为清洁(安全)。

表3 不同处理土壤的肥力指数

Table 3 The fertility index of different soils

处理		综合肥力				
Treatment	$P_{ m pH}$	P_{AN}	$P_{\scriptscriptstyle \mathrm{AP}}$	$P_{\rm AK}$	P_{SOM}	指数Pz
尾矿土壤(n=6) Tailing soil	0.92	1.06	0.30	0.62	0.25	0.43
复垦土壤(n=6) Reclamation soil	1.66	0.23	0.13	0.46	0.17	0.34
对照土壤(n=5) CK	1.27	0.54	0.79	0.71	2.85	0.85

表2 不同处理土壤养分含	量
--------------	---

Table 2 So	oil nutrien	t contents o	t different	soils
------------	-------------	--------------	-------------	-------

处理	碱解氮(AN)	速效磷(AP)	速效钾(AK)	有机质(SOM)
Treatments	Available nitrogen/mg•kg ⁻¹	Available phosphorus/mg ${\boldsymbol \cdot} kg^{{\scriptscriptstyle -}1}$	Available potassium/mg $\boldsymbol{\cdot}kg^{1}$	Organic matter/g·kg ⁻¹
尾矿土壤Tailing soil(n=6)	63.67±18.95a	1.52±0.65ab	30.82±7.23a	$2.51\pm0.74\mathrm{b}$
复垦土壤 Reclamation soil(n=6)	13.55±3.24b	$0.66 \pm 0.20 \mathrm{b}$	23.20±6.59a	$1.65 \pm 0.56 \mathrm{b}$
对照土壤CK(n=5)	32.66±3.86ab	3.95±1.77a	35.51±8.94a	28.45±4.51a

2.4.2 稀土元素污染

不同处理土壤16种稀土元素含量和江西稀土元 素的背景值如表5所示。从重轻稀土比来看,对照土 和尾矿土的重轻稀土比分别为2.47和2.11,重稀土元 素富集明显,且重稀土元素Y占稀土总量分别为 37.60%和37.08%,说明该稀土矿是富钇型重稀土矿, 这与龙南县离子型稀土矿的特点一致^[21]。复垦土重 轻稀土比仅为0.36,表明该土壤稀土主要以轻稀土为 主。不同处理土壤稀土总量∑REEs的大小顺序为对 照土壤>尾矿土壤>复垦土壤,并且对照土壤显著高 于尾矿土壤和复垦土壤(P<0.05)。其稀土总量分别 是江西省背景值的5.40、2.43倍和1.41倍。对照土壤 和尾矿土壤中Y、Ce、Nd、Yb和Dy5种稀土元素含量 较高,其含量之和分别占稀土总量的73.88%和 75.05%;而复垦土壤中Ce、Nd、La、Sc和Pr5种稀土元 素含量较高,其总量占稀土总量的78.26%。 因稀土元素污染无相关国家环境质量标准,故采 用地累积指数(*I*geo)法评价稀土污染程度,结果如表6 所示。稀土总量的*I*geo表明,对照土壤、尾矿土壤和复 垦土壤的稀土污染水平分别处于中度污染水平、无污 染-中度污染水平和无污染水平。从单个元素来看, 配分最高的Y元素的*I*geo表明,对照土壤、尾矿土壤和 复垦土壤的稀土污染水平分别处于强污染水平、中度 污染-强污染水平和无污染水平。

3 讨论

大量的研究表明离子型稀土矿经开采后尾矿土 壤质量问题以土壤酸化、浸矿剂残留、土壤肥力退化 及重金属污染为主要表现形式^[21-25]。本研究矿区结 果表明开采后尾矿土壤质量问题主要为浸矿剂残留、 土壤酸化和土壤肥力退化。例如尾矿土壤的NH₄含 量为89.00 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值为4.15,而土壤综合肥

表4 矿区土壤的非稀土重金属含量

Table 4 Heavy metal contents of different soils in the mining area

处理Treatments	$Pb/mg \cdot kg^{-1}$	Cr/mg•kg ⁻¹	$Ni/mg \cdot kg^{-1}$	Cu/mg•kg ⁻¹	$Zn/mg \cdot kg^{-1}$	${P}_{ m Nem}$
尾矿土壤 Tailing soil(n=6)	70.38±16.80a	12.13±4.16b	$7.92 \pm 1.00 \mathrm{b}$	$5.96 \pm 0.89 \mathrm{b}$	$110.99{\pm}6.33\mathrm{b}$	0.12
复垦土壤 Reclamation soil(n=6)	$21.49{\pm}5.27\mathrm{b}$	67.84±5.89a	46.73±5.86a	49.25±5.48a	76.97±14.48c	0.11
对照土壤 CK(n=5)	78.32±12.53a	$16.95 \pm 2.55 \mathrm{b}$	$10.08 \pm 0.80 \mathrm{b}$	6.56±0.31b	144.49±7.52a	0.14
GB 15618—1995土壤环境质量三级标准	500	300	200	400	500	_
Environmental quality standards grade 🎹						

注:"一"表示没有相关数据。

Note:"-" indicate no relevant data.

表5 矿区土壤的稀土元素含量 $(mg \cdot kg^{-1})$

Table 5 The rare earth element contents of different soils in the mining area(mg·kg⁻¹)

								0 .	0 0		
处理Treatments	Y	Sc	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑HREEs
尾矿土壤(n=6) Tailing soil	220.27±63.65b	4.43±2.07b	29.51±7.44b	6.61±1.38b	42.18±11.11b	9.49±2.48b	32.70±8.40b	5.65±1.48b	44.21±11.7	70b 6.62±1.72b	401.68±106.49b
复垦土壤(n=6) Reclamation soil	16.28±5.83c	33.72±5.94a	13.44±1.03b	3.13±1.10b	10.31±1.17c	1.94±0.20c	5.74±0.65c	0.75±0.09c 4.64±		4c 0.91±0.09c	90.86±12.52c
対照土壤(n=5) CK	495.42±67.64a	3.88±0.59b	78.01±10.23a	16.88±2.00a	111.19±10.53a	23.89±1.93a	78.13±5.78a	13.20±0.90a	99.74±5.5	6a 14.51±0.80a	934.85±102.21a
背景值 ^[19] Background value ^[19]	34.20	10.31	6.01	0.90	6.27	1.22	3.90	0.49	3.40	0.51	67.21
处理Treatments	La	Ce	e	Pr	Nd	Sm Eu		ΣL	REEs	Σ HREEs/ Σ LREEs	ΣREEs
尾矿土壤(n=6) Tailing soil	20.76±4.53b	92.46±2	25.30b 9.00	6±12.39b	45.17±11.05b	22.49±5.27b	0.35±0.12	c 190.29	9±46.11b	2.11±0.75a	591.97±140.54b
复垦土壤(n=6) Reclamation soil	65.32±5.09a	82.91±	:6.08b 16.	80±1.28a	70.71±5.92ab	14.52±1.25b	3.19±0.37	a 253.46	6±13.71ab	0.36±0.04b	344.32±24.01b
对照土壤(n=5) CK	45.99±10.66a	174.25±	±31.72a 19.	00±3.80a	89.69±16.71a	48.40±7.81a	1.24±0.24	b 378.57	7±70.41a	2.47±0.41a	1 313.42± 169.90a
背景值 ^[19] Background value ^[19]	45.00	79.	90	10.34	33.30	6.64	1.02	176.20		0.38	243.41

农业资源与环境学报·第36卷·第1期

表6 不同处理土壤稀土元素的地累积指数(Igo)

Table 6	The	geoaccumula	ation in	$\operatorname{ndex}(I_{\operatorname{geo}})$	for	rare	earth	element	in	different	soil
---------	-----	-------------	----------	---	-----	------	-------	---------	----	-----------	------

					0				-										
处理Treatments	Y	Sc	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	∑HREEs	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	∑LREEs	$\sum \text{REEs}$
尾矿土壤(n=6) Tailing soil	2.10	-1.80	1.71	2.29	2.16	2.37	2.48	2.94	3.12	3.11	1.99	-1.70	-0.37	-0.78	-0.15	1.17	-2.14	-0.47	0.70
复垦土壤(n=6) Reclamation soil	-1.66	1.12	0.58	1.21	0.13	0.09	-0.03	0.03	-0.14	0.26	-0.15	-0.05	-0.53	0.11	0.50	0.54	1.06	-0.06	-0.08
对照土壤(n=5) CK	3.27	-2.00	3.11	3.64	3.56	3.71	3.74	4.17	4.29	4.25	3.21	-0.55	0.54	0.29	0.84	2.28	-0.30	0.52	1.85

力指数仅为0.43。重金属污染问题被认为是离子型稀土矿区的主要问题之一,但本研究矿区未发现严重的重金属污染问题。内梅罗综合指数和地累积指数评价结果表明尾矿土和对照土非稀土重金属污染水平均为清洁,而稀土元素总量水平分别为无污染-中度污染和中度污染,这说明稀土开采过程未引起重金属污染。尽管从稀土总量来看稀土元素的污染不严重,但是从单个稀土元素来看,配分最高的稀土元素Y的污染水平较高。目前大量的研究已明确稀土元素的生态毒性^[26],但土壤稀土元素含量与生态毒性之间的剂量关系尚不明确,因此高含量稀土元素的生态毒性应引起高度关注。

经复垦后,矿区土壤的浸矿剂残留和土壤酸化问 题得到明显改善。如复垦区土壤 pH 值升高至 5.16, 且土壤浸矿剂NH[‡]含量显著降低至8.70 mg·kg⁻¹。但 土地复垦没有改善尾矿土壤肥力缺乏问题,而且复垦 后土壤的综合肥力比未复垦前还要低。这主要与客 土土壤即复垦土壤的肥力贫瘠密切相关,而这一问题 很有可能是导致某些稀土矿区土地复垦效果不佳的 主要因素。此外,复垦土壤的非稀土重金属和稀土元 素污染水平分别为清洁和无污染水平,并且Y的污染 水平也为无污染,这意味着复垦后土壤重金属污染水 平更清洁。整体来看,本研究稀土尾矿不存在土壤重 金属污染问题,但需关注含量较高的稀土元素Y,土 地复垦可快速改善尾矿土壤酸化和浸矿剂残留问题, 而土壤肥力退化问题能否改善由客土土壤综合肥力 决定。基于以上结果,建议复垦前对客土土壤肥力进 行综合肥力评价,并通过配方施肥改善土壤肥力缺乏 问题。

4 结论

(1)采用客土法进行土地复垦后,矿区土壤浸矿 剂含量由89.00 mg·kg⁻¹减小至8.70 mg·kg⁻¹,土壤 pH 值由4.15升高至5.16,复垦可有效改善尾矿土浸矿剂 残留和土壤酸化问题。

(2)客土法未有效改善土壤肥力退化问题,这主要与客土土壤肥力贫瘠有关,建议今后进行土地复垦前评价客土土壤肥力状况并通过配方施肥调节土壤肥力。

(3)本研究矿区土壤重金属污染不严重,复垦后 矿区土壤更清洁。内梅罗综合指数和地累积指数评 价结果表明,尾矿土的非稀土重金属污染水平和稀土 元素污染水平分别为清洁和无污染-中度污染,复垦 后分别为清洁和无污染水平。值得注意的是稀土元 素Y的含量较高,其生态毒性风险值得关注。

参考文献:

- [1] Sanematsu K, Kon Y, Imai A, et al. Geochemical and mineralogical characteristics of ion-adsorption type REE mineralization in Phuket, Thailand[J]. *Mineralium Deposita*, 2013, 48(4):437-451.
- [2] 邹国良, 滕清安. 赣州稀土产业发展思路探析[J]. 稀土, 2012, 35 (5):94-98.

ZOU Guo-liang, TENG Qing-an. On the development of rare earth industry in Ganzhou[J]. *Chinese Rare Earths*, 2012, 35(5):94-98.

- [3] Ting M H, Seaman J. Rare earths: Future elements of conflict in Asia?[J]. Asian Studies Review, 2013, 37(2):234–252.
- [4] 杨芳英, 廖合群, 金姝兰. 赣南稀土矿产开采环境代价分析[J]. 价格 月刊, 2013, 433(6): 87-90.

YANG Fang-ying, LIAO He-qun, JIN Shu-lan. The environmental costs of the mining on rare earths in the south of Jiangxi Province[J]. *Prices Monthly*, 2013, 433(6):87–90.

[5] 刘 芳. 龙南离子型稀土矿生态环境及综合整治对策[J]. 金属矿山, 2013, 42(5):135-138.

LIU Fang. Eco-environment status and its comprehensive countermeasures of Longnan ionic rare-earth mine[J]. *Mental Mine*, 2013, 42(5): 135–138.

[6]周 丹,罗才贵,苏 佳,等.离子型稀土矿区土壤生态恢复[J].金属矿山,2014,460(10):103-109.

ZHOU Dan, LUO Cai-gui, SU Jia, et al. Soil ecological restoration in ionic rare earth mining area[J]. *Mental mine*, 2014, 460(10):103-109.

[7] 黄小卫,李红卫,王彩凤,等.我国稀土工业发展现状及进展[J].稀 有金属,2007,31(3):279-288.

HUANG Xiao-wei, LI Wei-hong, WANG Cai-feng, et al. Development

status and research progress in rare earth industry in China[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2007, 31(3):279–288.

[8] 艾光华,周 源,王 勇. 江西稀土资源的开发利用现状与产业发展对策[J]. 稀土, 2011, 32(5):97-101.

AI Guang-hua, ZHOU Yuan, WANG Yong. Development and utilization of rare earth resources in Jiangxi Province and its countermeasures [J]. *Chinese Rare Earths*, 2011, 32(5):97–101.

- [9] Hannigan R E, Sholkovitz E R. The development of middle rare earth element enrichments in freshwaters: Weathering of phosphate minerals. *Chemical Geology*, 2001, 175(3/4):495-508.
- [10] Chi R A, Tian J, Li Z J, et al. Existing state and partitioning of rare earth on weathered ores[J]. *Journal of Rare Earths*, 2005, 23(6):756– 759.
- [11] 田 君.风化壳淋积型稀土矿浸取动力学与传质研究[D].长沙: 中南大学, 2010:6-12.
 TIAN Jun. Kinetics and mass transfer in leaching rare earth from the

weathered crust elution-deposited rare earth ore[D]. Changsha: Central South University, 2010:6-12.

- [12] 邹国良, 吴一丁, 蔡嗣经. 离子型稀土矿浸取工艺对资源、环境的影响[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(2):100-106.
 ZOU Guo-liang, WU Yi-ding, CAI Si-jing. Impacts of ion-adsorption rare earth's leaching process on resources and environment[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(2):100-106.
- [13] Hao X, Wang D, Wang P, et al. Evaluation of water quality in surface water and shallow groundwater: A case study of a rare earth mining area in southern Jiangxi Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 188(1):1-11.
- [14] 高志强,周启星.稀土矿露天开采过程的污染及对资源和生态环境的影响[J].生态学杂志,2011,30(12):2915-2922.
 GAO Zhi-qiang, ZHOU Qi-xing. Contamination from rare earth ore strip mining and its impacts on resources and eco-environment[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(12):2915-2922.
- [15]金妹兰,黄益宗,胡 莹,等.江西典型稀土矿区土壤和农作物中稀土元素含量及其健康风险评价[J].环境科学学报,2014,34 (12):3084-3093.

JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong, HU Ying, et al. Rare earth elements content and health risk assessment of soil and crops in typical rare earth mine area in Jiangxi Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(12):3084–3093.

- [16] 孙 波, 张桃林, 赵其国. 我国东南丘陵山区土壤肥力的综合评价
 [J]. 土壤学报, 1995, 32(4):362-369.
 SUN Bo, ZHANG Tao-lin, ZHAO Qi-guo. Comprehensive evaluation of soil fertility in the hilly and mountainous region of southeastern China[J]. Acta Pedologica Sinica, 1995, 32(4):362-369.
- [17] 吴学丽,杨永亮,徐 清,等.沈阳地区河流灌渠沿岸农田土壤中
 重金属的污染现状评价[J].农业环境科学学报,2011,30(2):282-288.

WU Xue-li, YANG Yong-liang, XU Qing, et al. Evaluations of heavy metal pollution status in surface soils adjacent to the rivers and irriga-

tion channel in Shenyang, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(2):282-288.

- [18] 陈 涛,常庆瑞,刘 京,等.长期污灌农田土壤重金属污染及潜 在环境风险评价[J].农业环境科学学报,2012,31(11):2152-2159. CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(11):2152-2159.
- [19] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科 学出版社, 1990: 362-449.

China National Environmental Monitoring Centre. Background values of soil elements in China[M]. Beijing: Chinese Environmental Science Press, 1990:362-449.

[20] 国家环境保护局,国家技术监督局.土壤环境质量标准 GB 15618 -1995[S].北京:中国标准出版社,1995.

State Bureau of Environmental Protection, State Bureau of Technical Supervision. Environmental quality standard for soils GB 15618— 1995[S]. Beijing; China Standards Press, 1995.

- [21] 连 花,李利强,符 哲,等. 铵离子对 COD 测定的干扰及干扰的 消除方法[J]. 中国环境监测, 2016, 32(1):112-116.
 LIAN Hua, LI Li-qiang, FU Zhe, et al. The interference of ammonium ion on the determination result of COD and method to eliminate[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(1):112-116.
- [22] 罗才贵,罗仙平,周娜娜,等.南方废弃稀土矿区生态失衡状况及 其成因[J].中国矿业,2014,23(10):65-70.
 LUO Cai-gui, LUO Xian-ping, ZHOU Na-na, et al. Status and causes of ecological imbalance of abandoned rare-earth mine in south China[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(10):65-70.
- [23] 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[D]. 昆明:云南大学, 2012:51-54.
 WEN Xiao-jun. Study on characteristics of soil environment and geochemical behavior of rare earth metals in rare earth mining area of southern Jiangxi Province[D]. Kunming: Yunnan University, 2012: 51-54.
- [24] 张 艳. 废弃稀土矿区尾砂土壤改良及其植物修复试验研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2014:14-17.
 ZHANG Yan. An experimental research on improvement of abandoned rare earth mine tailings soil and phytoremadiation[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology, 2014:14-17.
- [25] 张臻悦,何正艳,徐志高,等.中国稀土矿稀土配分特征[J].稀土, 2016,37(1):121-127.

ZHANG Zheng-yue, HE Zheng-yan, XU Zhi-gao, et al. Rare earth partitioning characteristics of China rare earth ore[J]. *Chinese Rare Earths*, 2016, 37(1):121-127.

[26] 金姝兰, 黄益宗. 土壤中稀土元素的生态毒性研究进展[J]. 生态毒 理学报, 2014, 9(2):213-223.
JIN Shu-lan, HUANG Yi-zong. A review on ecological toxicity of rare earth elements in soil[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9(2): 213-223.