

赣南某未开发离子型稀土矿区土壤环境质量评价

姚玉玲, 代力, 舒荣波, 徐明

(中国地质科学院矿产综合利用研究所, 四川省稀土技术创新中心, 中国地质调查局稀土资源应用技术创新中心, 四川 成都 610041)

摘要: 为摸清未开发离子型稀土矿区土壤环境质量, 使后续开采过程中的监测更有目的性, 以赣南某矿区为研究区域, 采用改进内梅罗土壤肥力综合法评价了研究区域土壤肥力, 采用单因子指数法和内梅罗污染指数法评价了其重金属污染状况。结果显示: 研究区域各单项土壤肥力水平依次为全磷<全氮<有机质<速效磷<碱解氮<速效钾<全钾, 整体处于低水平、贫瘠状态, 优于赣南某采矿废弃区; 各项重金属污染水平依次为 $As < Ni < Cr < Cu < Zn < Cd < Pb$, 均处于安全区范围内, 与江西省土壤背景值具有可比性, 优于赣南某采矿废弃区。研究揭示该地区土壤肥力低下, 不存在重金属污染, 在后期开发利用中, 应注意对土壤中碱解氮、全钾、速效钾、Pb、Cd 和 As 的监测。

关键词: 未开发离子型稀土矿; 土壤肥力评价; 重金属污染评价; 环境监测

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.026

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 04-0152-05

稀土素有“工业维生素”之称, 并被世界各国当做发展高科技和国防尖端技术不可或缺的战略资源^[1-2], 其开采利用一直受到极度重视。但以前粗放的开采方式引发了较严重的环境问题^[3-4]。离子型稀土矿作为赣南典型的稀土类型^[5], 其开采中的环境问题一直为社会各界关注。苏文湫^[6]、张培^[7]等采用单因子、综合因子、内梅罗指数、潜在生态危害指数等方法对离子型稀土矿区的土壤进行了重金属生态风险评价, 郭钟群等^[8]在环境风险评估的基础上, 提出了解决其开采中引发环境问题的思路。但以前对稀土矿区土壤质量的研究主要集中在开采后已经产生破坏或者污染的土壤, 而较少研究未开发的离子型稀土矿区土壤环境质量。

本研究为摸清未开发离子型稀土矿区土壤质量, 以在后续开采过程中, 监测更有目的性, 防污减污更有针对性, 以赣州某矿区为研究对象, 评价了土壤肥力和重金属污染状况, 较全面地摸清了未开采稀土矿区的土壤质量状况, 提出在后

续稀土开采中需重点监测的元素。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于赣州市, 土壤类型为红壤, 区域内主要为变质岩型离子型稀土, 目前处于未开发状态。所在区域海拔 485 m, 日照充足, 雨量充沛, 冬无严寒, 无霜期长, 冷暖变化显著, 属于中亚热带季风湿润气候。

1.2 样品采集与测定

将采样中心点四个垂直轴向 5 m 范围内 4 个样品与中心点位样品混合为一个土壤样品, 样品采集时尽量避开明显点状污染区, 保证样品的典型性和代表性。用塑料铲子采集约 1 kg 表层土壤, 剔除石块、植物根系等杂物, 自然风干, 研磨过筛后装入样品袋保存备用。采集的土壤样品测试指标为有机质、有效磷、速效钾、碱解氮、全磷、全钾、全氮、Cu、Ni、Cd、Cr、Pb、Zn、As, 均采用国家标准方法测定, 测试过程中按规

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20221697); 四川省科技计划 (重点研发) 项目 (2022YFN0025)

作者简介: 姚玉玲 (1984-), 女, 工程师, 主要从事矿山生态修复工作。

范加 10% 空白样与平行样进行质量控制。

2 土壤质量评价方法

2.1 改进内梅罗土壤肥力综合评价法

采用改进的内梅罗公式进行土壤肥力综合评价，式中用单项肥力最小值取代最大值，突出了参评因子中最差因子对土壤质量的影响，增加修正项提高了评价结果的可信度。对参评的土壤肥力评价因子进行标准化处理，具体处理方法见表1。土壤指标分级标准以第二次全国土壤普查标准为依据，见表2。土壤综合肥力按下式计算。

$$P_z = \sqrt{\frac{(P_i)_{\min}^2 + (P_i)_{\text{ave}}^2}{2}} * \frac{N-1}{N}$$

上式中， $(P_i)_{\min}$ 为土壤所有指标中单项肥力指数最小值， $(P_i)_{\text{ave}}$ 为各单项肥力指数平均值， N 为参评指标数， P_z 为土壤肥力综合指数。

2.2 单因子指数法和内梅罗污染指数法

采用单因子污染指数法和内梅罗污染指数法进行土壤重金属污染评价。

单因子污染指数法，计算公式如下：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i}$$

上式中， P_i 为各重金属的单项污染指数；

表3 不同重金属的农用地土壤污染风险筛选值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Screening values of soil pollution risk in agricultural land for different heavy metals

pH值	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As
≤ 5.5	50	80	200	150	60	0.3	40

内梅罗污染指数法计算公式如下：

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\max}^2 + (C_i/S_i)_{\text{ave}}^2}{2}}$$

上式中， $(C_i/S_i)_{\max}$ 为土壤污染物中污染指数最大值， $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为污染指数平均值， $P_{\text{综}}$ 为土壤污染综合指数，其分级标准为： $P_{\text{综}} \leq 1$ ，未污染； $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ ，轻度污染； $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ ，中度污染； $P_{\text{综}} > 3$ ，重度污染。

3 结果及讨论

3.1 土壤肥力评价结果及讨论

对测试数据进行综合分析，并对照全国第二次土壤普查养分分级标准（表4），得出研究区域

表1 土壤肥力参评因子标准化处理方法

Table 1 Standardized treatment methods of soil fertility participating factors

分级标准	标准化处理方法
IV(差)	$c_i \leq x_a, p_i = c_i/x_a, p_i \leq 1$
III(中等)	$x_a \leq c_i \leq x_c, p_i = 1 + (c_i - x_a)/(x_c - x_a), 1 \leq p_i \leq 2$
II(较好)	$x_c \leq c_i \leq x_p, p_i = 2 + (c_i - x_a)/(x_c - x_a), 2 \leq p_i \leq 3$
I(好)	$c_i > x_p, p_i = 3$

注： c_i 为土壤中某项指标的实测数据。

表2 土壤肥力参评指标分级标准值

Table 2 Grading standard values of soil fertility participating factors

参评指标	x_a	x_c	x_p
AN/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	60	120	180
AP/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	5	10	20
AK/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	50	100	200
TN/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.75	1.50	2.00
TP/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.75	1.50	2.00
TK/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10	20	30
SOM/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	10	20	30

C_i 为各重金属的实测值； S_i 为各重金属的评价标准，具体由国家《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的 $\text{pH} \leq 5.5$ 时的污染风险筛选值（表3）确定。

各养分含量和分布见表5。依据土壤肥力参评因子标准化处理方法和修正后的内梅罗公式计算得到土壤单项肥力指数。

由表5可知，研究区域土壤综合肥力处于低水平、贫瘠状态，植物缺肥，其中以有机质和速效磷最为缺乏，有机质含量范围为 $0.87 \sim 28.7 \text{ g/kg}$ ，在六级区域分布最多，为44%，其后依次为四级、五级、三级（26%、18%、12%），含量平均值为 9.46 g/kg ，处于五级标准区域，低于江西省土壤背景值（ 20 g/kg ），为缺乏有机质类土壤。研究区域土壤中全P和速效P的单项肥力指数都处于较低水平，其分布区域主要在四级、五级和六级，为促进研究区域植被良好生长，可适当施加磷肥。

表 4 全国第二次土壤普查养分分级标准
Table 4 The nutrient classification standard of the second national soil census

	一级（极高）	二级（较高）	三级（中等）	四级（较缺乏）	五级（缺乏）	六级（极缺乏）
AN/(mg·kg ⁻¹)	>150	150~120	120~90	90~60	60~30	<30
AP/(mg·kg ⁻¹)	>40	40~20	20~10	10~5	5~3	<3
AK/(mg·kg ⁻¹)	>200	200~150	150~100	100~50	50~30	<30
TN/(g·kg ⁻¹)	>2	2~1.5	1.5~1	1~0.75	0.75~0.5	<0.5
TP/(g·kg ⁻¹)	>1	1~0.8	0.8~0.6	0.6~0.4	0.4~0.2	<0.2
TK/(g·kg ⁻¹)	>25	25~20	20~15	15~10	10~5	<5
SOM/(g·kg ⁻¹)	>40	40~30	30~20	20~10	10~6	<6

表 5 研究区域土壤中养分含量分析
Table 5 Analysis of nutrient content in soil in the survey area

	AN/(mg·kg ⁻¹)	AP/(mg·kg ⁻¹)	AK/(mg·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)	TP/(g·kg ⁻¹)	TK/(g·kg ⁻¹)	SOM/(g·kg ⁻¹)
平均值	140.00	4.71	150.00	0.63	0.23	26.67	9.46
最大值	310.00	7.59	300.00	1.80	0.76	37.1	28.70
最小值	42.50	2.99	80.40	0.10	0.091	14.5	0.87
背景值	132.03	4.41	0.014	0.063	0.22	25.53	10.68
一级（%）	32	0	12	0	0	72	0
二级（%）	22	0	30	2	0	26	0
三级（%）	32	0	50	10	4	2	12
四级（%）	12	26	8	18	4	0	26
五级（%）	2	72	0	20	36	0	18
六级（%）	0	2	0	50	56	0	44

将研究区域各单项及综合土壤肥力指数与对照区、赣南某采矿区^[9]对比，得到研究区域土壤肥力状况见图 1，并参照土壤综合肥力等级划分（表 6），评价研究区域土壤肥力情况。

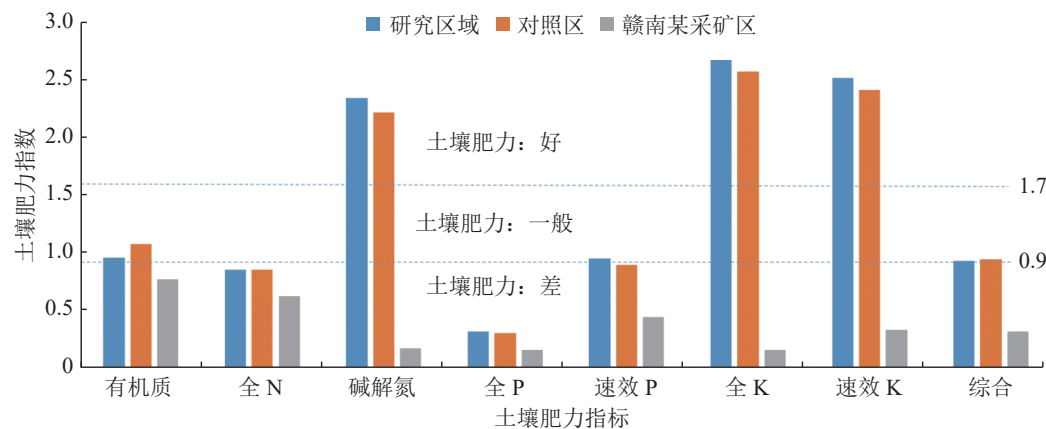


图 1 研究区域土壤肥力指数对比
Fig.1 Comparison of soil fertility indices in the study area

表 6 土壤综合肥力等级划分（NY/T 1749-2009）
Table 6 Classification of soil comprehensive fertility grades (NY/T 1749-2009)

等级划分	土壤肥力指数	评价描述
I (好)	$p_z \geq 1.7$	土壤肥力处于高水平、肥沃或很肥沃，不缺肥，作物产量较高，施肥增产的边际效应降低。
II (一般)	$0.9 \leq p_z \leq 1.7$	土壤肥力处于一般水平、尚可，个别指标可能显示缺乏，作物产量随施肥量提高较明显。
III (差)	$p_z < 0.9$	土壤肥力处于低水平、贫瘠，作物处于缺肥状态，个别指标严重缺乏或不宜，施肥增产显著。

由图1可知,研究区域处于一般水平的单项土壤肥力指数有:有机质、碱解氮、全K、速效K,处于差一级的单项土壤肥力指数有:全N、全P。综合土壤肥力指数为0.92,处于差与一般的临界位置,可见研究区域的土壤肥力处于较缺肥状态,这也是区域内植被长势较差的主要原因。

研究区域各项肥力指标均与远离矿区的对照区有可比性,说明研究区域采矿活动较少,人为干扰程度较低。研究区域各单项肥力指标与综合肥力指标都优于赣南某稀土矿采矿废弃区,其中差距最为悬殊的土壤肥力因子依次为:碱解氮、全钾、速效钾等,采矿废弃区土壤中氮、钾元素的含量减少可能与长期稀土资源开发造成严重水土流失、浸提剂的使用破坏土壤中的营养元素有关,在后期研究区域离子型稀土矿开采活动中应注意对土壤中碱解氮、全钾、速效钾等肥力指标的监测和评估。

3.2 土壤重金属污染评价

对调查数据进行分析,采用单因子污染评价法,考查每个重金属的最小值、最大值、平均值等,结果见表7。由表7可知,研究区域只有个别点位的Pb与Cr超过《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)中的 $pH \leq 5.5$ 时的污染风险筛选值(超标率小于2%),整体土壤环境质量良好,与江西省土壤背景值有可比性。

表7 研究区域土壤中重金属含量统计

Table 7 Statistical table of heavy metal content in soil in the study area

元素	平均值/ ($g \cdot t^{-1}$)	最大值/ ($g \cdot t^{-1}$)	最小值/ ($g \cdot t^{-1}$)	江西省土壤背景 值/ ($g \cdot t^{-1}$)
Cu	10.66	35.3	2.45	17.7
Pb	37.61	164	8.21	28.5
Zn	65.71	123	29.9	63.7
Cr	22.02	73.2	8.3	39.4
Ni	8.88	29.6	2.72	15.8
Cd	0.13	1.4	0.041	0.0696
As	3.59	30	0.26	11.3

注:出自《中国土壤元素背景值》

计算研究区域各重金属指标的单项污染因子和内梅罗污染指数,参照土壤重金属污染评价分级标准(表8)评价其污染程度,将研究区域的重金属污染与赣南某稀土采矿区^[10]进行对比,得到研究区域土壤中重金属污染指数对比见图2。

表8 土壤重金属污染评价分级标准

Table 8 Classification criteria for soil heavy metal pollution evaluation

等级划分	综合污染指数	污染等级
1	$P_{综} \leq 0.7$	安全
2	$0.7 < P_{综} \leq 1$	警戒线
3	$1 < P_{综} \leq 2$	轻度污染
4	$2 < P_{综} \leq 3$	中度污染
5	$P_{综} > 3$	重度污染

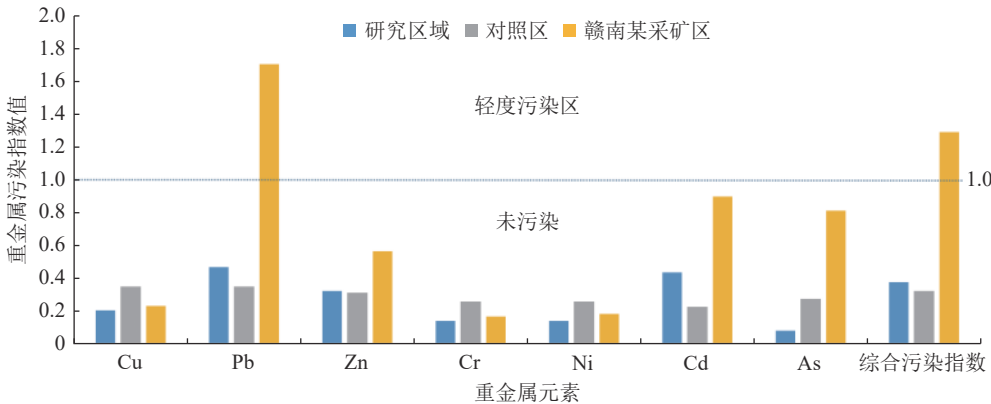


图2 研究区域土壤中重金属污染指数

Fig.2 Heavy metal pollution indices in soil in the study area

结果表明:研究区域的各重金属单项污染指数均小于1,其污染程度均处于安全区范围内,依次为 $As < Ni < Cr < Cu < Zn < Cd < Pb$,综合污染指数为0.38,远小于1,说明研究区域内无重金属污染

情况。

将研究区域与赣南某开采后的稀土矿区相比,综合污染指数差距较大,说明离子型稀土矿原有开采模式会造成土壤污染,其中以Pb、Cd

和 As 变化最为明显, 因此, 在后期离子型稀土矿开采过程中, 应加大对 Pb、Cd 和 As 的监测。

4 结 论

(1) 研究区域土壤综合肥力处于低水平、贫瘠状态, 植物缺肥。各单项土壤肥力指数水平依次为全钾>速效钾>碱解氮>速效磷>有机质>全氮>全磷, 处于差一级的单项土壤肥力指数有: 全氮、全磷, 可考虑在研究区域施加氮肥和钾肥, 为植物生长创造有利条件。

(2) 研究区域为未开采稀土矿山, 其各项肥力指标均与远离矿区的对照区有可比性, 而优于赣南某稀土矿采矿废弃区, 其中差距最为悬殊的土壤肥力因子依次为: 碱解氮、全钾、速效钾等, 在后期研究区域离子型稀土矿开采活动中应注意对土壤中碱解氮、全钾、速效钾等肥力指标的监测和评估。

(3) 研究区域的各重金属单项污染指数均小于 1, 其污染程度均处于安全区范围内, 依次为 As<Ni<Cr<Cu<Zn<Cd<Pb, 综合污染指数为 0.38, 远小于 1, 研究区域内无重金属污染情况。

(4) 研究区域为未开采稀土矿山, 其各项重金属污染指数与江西地区土壤背景值具有可比性, 而优于赣南某稀土采矿区, 其中, 综合污染指数差距较大, 说明离子型稀土矿原有开采模式会造成土壤污染, 而单项重金属污染指数以 Pb、Cd 和 As 变化最为明显, 因此, 在后期离子型稀土矿开采过程控制中, 应加大对 Pb、Cd 和 As 的监测。

参考文献:

- [1] 周贺鹏, 胡洁. 离子型稀土矿化学溶浸影响因素及其调控[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):146-151.
- ZHOU H P, HU J. Influencing factors and control of chemical leaching of ion-type rare earth ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):146-151.
- [2] 张博, 宁阳昆, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):7-12.
- ZHANG B, NING Y K, CAO F, et al. Current situation of worldwide rare earth resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):7-12.
- [3] 魏娟萍, 王海宁, 晏江波. 南方离子型稀土矿开采的环境损伤及防治[J]. *有色金属科学与工程*, 2016, 7(1):125-132.
- WEI J P, WANG H N, YAN J B. Environmental damages and control measures in exploiting ion-absorbed rare earth of South China[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2016, 7(1):125-132.
- [4] 何淼, 周进生. 稀土综合利用新途径探究—华沙大学锡矿尾沙试验的启示[J]. *矿产综合利用*, 2017(5):105-110.
- HE M, ZHOU J S. New approach to the comprehensive utilization of rare earth—the revelation of the Tin mine tailings test at the university of Warsaw[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2017(5):105-110.
- [5] 詹光, 黄草明, 朱景和, 等. 南方离子型稀土冶炼废水治理现状与展望[J]. *矿产综合利用*, 2018(3):18-25.
- ZHAN G, HUANG C M, ZHU J H, et al. Development status and prospect of hydrometallurgy wastewater treatment technology in south rare earth[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(3):18-25.
- [6] 苏文湫, 祝怡斌. 赣州稀土矿山废弃地土壤重金属污染现状评价[J]. *有色金属 (矿山部分)*, 2016, 68(4):81-85.
- SU W Q, ZHU Y B. Evaluation of the soil heavy metal pollution in Ganzhou rare earth mine wasteland[J]. *Nonferrous Metals(Mining Section)*, 2016, 68(4):81-85.
- [7] 张培, 谢海云, 曹广祝, 等. 硫酸铵浸出离子型稀土矿对土壤和地下水污染的研究现状[J]. *矿冶*, 2021, 30(4):95-101.
- ZHANG P, XIE H Y, CAO G Z, et al. Current status of research on soil and groundwater contamination by ammonium sulfate leaching of ionic rare earth ores[J]. *Mining and Metallurgy*, 2021, 30(4):95-101.
- [8] 郭钟群, 赵奎, 金解放, 等. 离子型稀土矿环境风险评估及污染治理研究进展[J]. *稀土*, 2019, 403:115-126.
- GUO Z Q, ZHAO K, JIN J F, et al. Reviews on environmental assessment and pollution prevention of ion adsorption type rare earth ores[J]. *Chinese Rare Earths*, 2019, 403:115-126.
- [9] 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.
- 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[D]. Kunming: Yunnan University, 2012.
- [10] 张军. 离子型稀土矿区重金属污染调查及 Pb 形态转化过程研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2019.
- ZHANG J. Investigation of heavy metal pollution and form transformation of lead in ion-type rare earth mining area[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019.

(下转第 161 页)