

南方离子型稀土矿区芒萁的稀土提取能力

张巧玲^{1,2}, 陈志强^{1,2}, 林 强³, 陈志彪^{1,2}, 冯柳俊^{1,2}, 邱 洋^{1,2}, 徐 芮^{1,2}

(1. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007;

2. 福建师范大学 地理科学学院, 福建 福州 350007;

3. 福建省水土保持试验站, 福建 福州 350007)

摘 要:为探讨南方稀土矿区芒萁对土壤稀土元素的提取能力, 三洲桐坝(SZ, 5a 治理地)、下坑(XK, 8a 治理地)、牛屎塘(NS, 10a 治理地)、龙颈(LJ, 对照地)为实验样地, 研究芒萁的生长特征(株高、密度、生物量)、稀土元素富集能力及稀土元素提取能力。研究发现, 各样地间株高、密度、地上生物量和总生物量均显著差异($P < 0.05$), 而地下生物量则差异不显著。地上部分对稀土元素的积累量以 LJ 最高, 分别是 SZ、XK 及 NS 的 5.45、3.51、2.33 倍; 而地下部分积累量以 NS 最高, 分别是 SZ、XK 及 LJ 的 5.24、6.36、3.96 倍。芒萁地上部分轻稀土元素含量和稀土元素总量在各样地间差异显著($P < 0.05$), $LJ \approx NS > XK \approx SZ$, 且芒萁地上部分主要是累积轻稀土元素。通过芒萁净化矿区稀土元素, 通过计算分别需要 58 年、36 年、20 年芒萁提取, 才能将中度污染的 NS、轻度污染的 SZ、XK 的稀土矿区表层土壤(0~10 cm)中稀土元素含量降低到全国土壤稀土元素含量的平均水平($186.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

关键词:芒萁; 累积特征; 植物提取; 南方离子型稀土矿区

中图分类号: K903

文献标识码: A

文章编号: 1004-0277(2020)04-0073-09

稀土元素广泛应用在节能环保、航空航天、电子信息及新能源等方面, 素有“工业味精”之称^[1]。南方离子型稀土矿主要分布在我国湖南、江西、福建、广西和广东等省, 是我国特有的宝贵矿产资源。然而, 南方稀土矿区过高的稀土含量对矿区环境及人体身体健康构成了一定的危害, 长期食用稀土超标的水和食物, 可能导致人体血液病变或者慢性中毒^[2]。因此, 进行矿区修复, 降低矿区的稀土含量势在必行。

植物修复(Phytoremediation)作为矿区生态恢复的有效手段, 它主要是利用植物去除土壤中的污染物, 从而达到生态恢复的目的。其手段主要有: 植物固定(Phytostabilisation)、植物挥发(Phytovolatilization)、植物提取(Phytoextraction)、根际圈生物降解(Phytodegradation)和根际过滤(Phytoinfiltration)^[3]。植物提取一般通过耐逆性或超富集植物对已污染土壤中的重金属进行去除。超富集植物是指能超量累积一种或几种重金属元素的植物, 它

收稿日期: 2019-05-22

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01462)

作者简介: 张巧玲(1994-), 女, 湖北宜昌人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与环境修复研究, E-mail: zhangql17@163.com; 通讯作者:

陈志强, 教授, E-mail: soiltuqiang061@163.com

DOI: 10.16533/j.cnki.15-1099/TF.202004010

被 Baker 和 Brook^[4] 定义为:植物体内蓄积的某种重金属含量高于普通植物 100 倍以上且不影响其正常生长。

芒萁(*Dicranopreris dichotoma*) 作为南方离子型稀土矿区的典型草本植被,是矿区生态系统退化过程中最后退出而生态修复过程中最早侵入的草本,具有喜阳,耐贫瘠、耐旱,抗逆性强,适应性较广等特性^[5]。普通植物体内的稀土元素含量约为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与之相比,芒萁稀土含量可高达 $3358 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[6],是南方离子型稀土矿区典型的超富集植物。近年来,学者们对芒萁的生态群落特征^[7]、化感作用^[8]、稀土元素迁移特征^[9]、药用价值^[10]等进行研究。然而,目前将芒萁的生长特征、稀土含量特征及富集能力、生态修复作用结合共同探讨芒萁的植物提取能力的研究鲜见报道。

本文将超富集植物芒萁的生长特征与体内稀土元素的富集特征结合在一起,根据不同治理年限稀土矿区间芒萁的生长变化趋势,探究稀土矿区治理对芒萁生长的影响。同时,结合芒萁体内稀土元素的累积量,探讨芒萁提取稀土元素的能力,预估不同污染程度稀土矿区所需的植物提取时间,为南方离子型稀土矿区治理提供数据支撑。

1 研究区概况

研究区位于福建省长汀县河田镇内($116^{\circ}18' \sim 116^{\circ}31' \text{ E}$, $25^{\circ}33' \sim 25^{\circ}48' \text{ N}$),属于汀江上游的河谷盆地。该地区以低山、丘陵等地貌类型为主,平均海拔为 $300 \text{ m} \sim 500 \text{ m}$ 。土壤类型主要有红壤、黄壤、紫色土、水稻土、山地草甸土、石灰土、潮土等,以中粗粒花岗岩发育的红壤为主,面积占该地土壤总面积的 77.15%。气候类型为中亚热带季风气候,年均温度 $17.5^{\circ}\text{C} \sim 18.8^{\circ}\text{C}$,无霜期达 260 d;降水分布不均,3~6 月降水量占全年 60%,年降水量 $1700 \text{ mm} \sim 2000 \text{ mm}$ 。该研究区内的植被主要为亚热带常绿阔叶林、针阔混交林,该地区早期由于人为活动频繁,水土流失严重,现在的植被主要为马尾松(*Pinus massoniana*)、灌丛等^[11]。本研究所涉

及的实验样地包括 3 个不同治理年限的样地和 1 个矿区对照地,分别是:5a 治理地三洲桐坝(SZ),植被主要是宽叶雀稗(*Paspalum wetsfeteini*),少量的胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和枫香(*Liquidambar formosana*),植被覆盖度为 50%;8a 治理地下坑(XK),植被主要为宽叶雀稗和少量的胡枝子和枫香,植被覆盖度为 90%;10a 治理地牛屎塘(NS),植被主要有宽叶雀稗、胡枝子、枫香、木荷(*Schima superba*)和马尾松,植被覆盖度为 97%;矿区对照地龙颈(LJ)主要植被为马尾松、胡枝子、五节芒(*Miscanthus floridulus*)和芒萁等。以上 3 个不同治理年限的样地均采用乔灌草混交治理。

2 材料与方法

2.1 样品采集与实验方法

2.1.1 样品采集与测定

于 2015 年 7 月、10 月及 2016 年 1 月、4 月中旬分别对研究区土壤样品、芒萁样品进行采集。在样方内对芒萁株高、密度、生物量进行测量,用陶瓷刀采集土壤样品、芒萁样品,分别编号入袋,带回实验室待测。室内实验处理过程中,土壤样品直接编号摊开于牛皮纸上,自然风干,捡去石块、根系等杂物。芒萁样品上,用蒸馏水浸泡芒萁根系样品,待土块溶解后挑出细根,然后用蒸馏水冲洗芒萁地上部分植物样品后,分别编号装入牛皮纸信封中,放置于温度为 65°C 的烘箱中烘干至恒重,再对样品进行如下操作:(1)称重,计算芒萁地上、地下、总生物量;(2)研磨,将土壤样品、芒萁样品研磨后,过 100 目尼龙筛,编号装入自封袋待测。土壤样品采用 $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_3$ 法消解,植物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消解,消解完成后的液体于量杯中定容至 40 mL,最后经电感耦合等离子体质谱仪(Inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)上机测定。

2.1.2 芒萁刈割

选择地形较为平坦、芒萁覆盖度高的 NS,布设 3 个 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 的样方,于 2015 年冬季齐地剪取芒萁的地上部分,期间没有采取任何施肥措施,到 2016

年采用目估法估算其三个样方的芒萁覆盖度。

2.2 数据处理方法

本研究中的数据均采用 Excel 2016、Origin 9.0 等软件进行数据处理和制图。运用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(One-Way ANOVA)、及皮尔逊(Pearson)相关分析。并对其测定值做以下数据处理。

(1) ΣREE 、 ΣLREE 、 ΣHREE 、 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 分别代表稀土元素总量、轻稀土元素总量、重稀土元素总量和轻重稀土元素总量比例。 ΣREE 由 15 种稀土元素(La-Y)单个稀土元素含量相加而得; ΣLREE 和 ΣHREE 分别是 La-Eu 和 Gd-Y 单个稀土元素含量之和; $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 是 ΣLREE 与 ΣHREE 的比值,该比值大于 1 表明轻稀土元素相对富集,反之则重稀土元素相对富集。该比值在一定程度上说明了轻重稀土元素的含量及分布的分异程度。

(2) 芒萁各部位稀土元素的积累量计算公式^[12]如下:

$$T_i = \frac{(C_i \times W_i)}{1000}$$

(1)

式中: T_i 表示芒萁各部位稀土元素的积累量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$), C_i 表示对应各干重部位中的稀土元素含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), W_i 表示对应各部位的生物量干重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)。

(3) 稀土矿区芒萁提取稀土时间的估算。假设在一个 3 m×3 m 的样方内,根据芒萁稀土元素积累量、土壤稀土元素含量、土壤容重等估算稀土矿区表层土壤(0~10 cm)中芒萁提取稀土的时间。计算公式如下:

$$T = \frac{V \times \rho b \times (Cn - Bn) \div 1000}{S \times VC \times Ti}$$

(2)

式中: T 表示稀土矿区芒萁提取稀土的时间(年), V 表示样方体积(m^3), ρb 表示土壤容重($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), Cn 表示样地土壤稀土元素的平均含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), Bn 表示全国土壤元素背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), S 表示样方面积(m^2), VC 表示芒萁覆盖度(%), Ti 表示冬季芒萁地上部分稀土元素的积累量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。

3 结果分析

3.1 芒萁生长特征及动态

由表 1 可见,芒萁各样地间株高和密度均差异显著($P<0.05$)。株高上, $\text{SZ}<\text{NS} \approx \text{XK}<\text{LJ}$;密度上, $\text{SZ}>\text{NS}>\text{XK} \approx \text{LJ}$ 。

生物量上,各样地间生物量主要分配到地上部分,且地上部分生物量随总生物量增加而增加。各样地间,芒萁地上生物量差异显著, $\text{SZ}<\text{XK} \approx \text{NS}<\text{LJ}$ ($P<0.05$);地下生物量差异不显著。总生物量差异显著, $\text{SZ}<\text{XK}<\text{NS}<\text{LJ}$ ($P<0.05$)。

表 1 稀土矿区不同样地芒萁年均生长特征的比较

Table 1 Comparison of annual average growth characteristics of *dicranopteris dichotoma* in different sampling sites of rare earth mine area

Sampling sites	Height /cm	Density /(Plant/ m^2)	Aboveground biomass/(g/m^2)	Underground biomass/(g/m^2)	Total biomass /(g/m^2)
SZ	31.60±7.36D	1577.38±359.57A	521.86±39.52Ba	627.29±68.82Aa	1149.14±57.63C
XK	55.9±12.68B	963.10±387.73B	981.16±152.59Ba	695.00±86.33Aa	1676.16±170.23B
NS	48.63±11.50C	1357.14±468.01A	1079.59±96.75Ba	959.72±122.29Aa	2039.30±182.18B
LJ	77.97±16.35A	722.62±295.70B	2186.51±362.61Aa	762.86±100.45Ab	2949.37±449.42A

注:大写字母代表芒萁同一生长指标不同样地间显著性差异水平,小写字母表示同一样地不同生长指标间显著性差异水平, $P<0.05$ 。

芒萁各生长指标之间存在着不同程度的相关性。芒萁株高与密度之间极显著性负相关,与地上、总生物量之间极显著性正相关($P<0.01$)。芒萁地上生物量与地下、总生物量之间显著性相关,其

与总生物量之间相关性更高。芒萁地下生物量与总生物量之间也密切相关(表 2)。

表 2 稀土矿区芒萁生长特征指标间的相关性

Table 2 Correlation coefficients of <i>dicranopteris dichotoma</i> 's growth characteristic indexes in rare earth mine area					
Item	Height	Density	Aboveground biomass	Underground biomass	Total biomass
Height	1				
Density	-0.608 **	1			
Aboveground biomass	0.548 **	-0.271	1		
Underground biomass	0.069	0.255	0.364 *	1	
Total biomass	0.483 **	-0.148	0.956 **	0.620 **	1

** 代表在 $P<0.01$ (双侧)水平上显著相关,* 代表在 $P<0.05$ (双侧)水平上显著相关。

3.2 芒萁稀土元素含量分布及累积特征

各样地芒萁稀土元素总量范围为(1941.38±831.79) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ~(4162.82±1339.02) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (见表 3)。各样地地上部分轻稀土元素含量(ΣLREE)分别占稀土元素总量(ΣREE)的 88%(SZ)、82%(XK)、85%(NS)和 91%(LJ),轻重稀土元素比例($\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$)大于 1,呈现明显的轻稀土元素富集,重稀土元素贫乏现象。芒萁地上部分 ΣLREE 和 ΣREE 在各样地间差异显著($P<0.05$), $\text{LJ}\approx\text{NS}>\text{XK}\approx\text{SZ}$,而在各样地间的重稀土元

素含量(ΣHREE)差异不显著。

各样地芒萁地下部分 ΣLREE 占 ΣREE 的 62%(SZ)、45%(XK)、38%(NS)、71%(LJ)。芒萁地下部分 ΣLREE 和 ΣREE 均表现为 NS 显著高于 XK($P<0.05$),则 NS 的 ΣREE 显著高于其余 3 个样地($P<0.05$)。从芒萁体内稀土元素含量在地上、地下部分的分布来看,稀土矿区各样地芒萁地上部分的 ΣLREE 和 ΣREE 均大于地下部分($P<0.05$), ΣHREE 除了在 NS 为地下部分>地上部分外,在 SZ、XK、LJ 则无显著性差异($P<0.05$)。

表 3 稀土矿区芒萁不同部位稀土元素含量/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Rare earth elements' contents in different part of <i>dicranopteris dichotoma</i> in rare earth mine/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)					
Item		SZ	XK	NS	LJ
Aboveground	ΣLREE	1698.90±169.04	1346.10±359.59	1945.23±553.07	2430.51±276.15
	ΣHREE	223.73±35.33	305.10±60.65	339.94±92.77	222.75±28.40
	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	7.59	4.41	5.72	10.91
Underground	ΣLREE	351.60±85.57	177.02±82.74	720.91±139.13	435.28±111.66
	ΣHREE	213.21±42.20	215.57±148.20	1156.75 ±257.17	174.14±57.63
	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	1.65	0.82	0.62	2.50
	ΣREE	2487.45±503.74	1941.38±831.79	4162.82±1339.02	3262.68±822.62
	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$	4.69	2.93	1.78	7.22

从不同样地间芒萁的同一部位对稀土元素的积累量来看,芒萁地上部分对稀土元素的积累量随着治理年限的增加而增加(图 1,A 代表地上,U 代表地下)。

地上部分对稀土元素的积累量以 LJ 最高,分别是 SZ、XK 及 NS 的 5.45、3.51、2.33 倍;而地下部分积累量以 NS 最高,分别是 SZ、XK 及 LJ 的 5.24、6.36、3.96 倍。

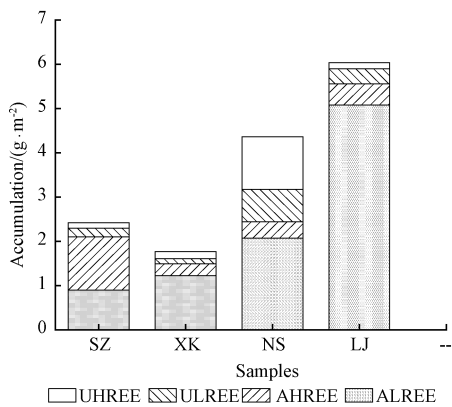


图 1 稀土矿区芒萁不同部位稀土元素积累量
Fig. 1 Rare earth elements' accumulation in different part of dicranopteris dichotoma in rare earth mine

3.3 稀土矿区芒萁植物提取能力

2016 年,在 NS 的 3 个 3 m×3 m 的样方内,芒萁覆盖度平均值为 65%。根据式 2 将 NS、SZ、XK 表层土壤(0~10 cm)中稀土元素含量降低到全国土壤稀土元素含量的平均水平 186. 76 mg · kg⁻¹,分别需要 58 年、36 年、20 年(表 4)。

表 4 稀土矿区芒萁的稀土元素提取时间

Table 4 Rare earth purification time of dicranopteris dichotoma in rare earth mining area

Item	NS	SZ	XK
Rare earth content of surface soil/g	801. 34	356. 06	310. 42
Aboveground accumulation of plant/(g · m ⁻²)	19. 66	8. 43	11. 93
Restoration time/a	58	36	20

4 讨论与分析

4.1 芒萁生长特征及其相关性

植物株高、密度作为植物最基本的形态特征,能够反映植物的生长环境、群落特征^[13]。本研究中芒萁株高与密度之间为负相关,复合植物的-3/2 自疏法则,即当植物生长密度较高时,植物体在竞争水热资源、养分等,植物会通过减少

密度的方式来适应生长环境以提高有限资源的利用率^[14]。这与张林海等^[13]、段晓男等^[15]研究结果一致。在稀土矿区各样地间,随着稀土矿区治理年限增加,芒萁株高呈显著上升趋势,但植株密度反而下降。

株高、密度、生物量作为植物生长特征指标,反映了植物的生长状况。稀土矿区随着治理年限的增加,芒萁株高、生物量逐渐增加。植物体在生长过程中,会受到环境因子(养分、水分、温度等)的影响,当其中部分因子制约植物生长发育时,植物会调整养分分配比例,从而促进植物能够正常生长,这可以看作是植物在生长过程中对环境适应的一种平衡^[16, 17]。当植物生长条件改善时,植物会减少对根系的养分供给,其余养分则供给植物地上部分以促进植物株高、密度等的生长,这与随着沙地环境条件的改善,狗尾草地上部分的生长发育状况逐渐转好趋势相一致^[18]。随着稀土矿区治理条件的改善,芒萁生长环境逐渐改善,芒萁株高、生物量逐渐增加。

生物量是指有机体物质在单位时间内积累的物质重量,是代表植物能量积累、结构功能的重要指标^[19]。它主要受植物环境条件、自身特性和遗传特性的影响^[20]。水热条件作为制约植物生物量的主要因子,温度能够影响植物的返青时间,降水量则影响植物的产量高低^[21]。根据芒萁的生长指标的相关性来看,芒萁的总生物量与株高、地上、地下生物量等密切相关,与芒萁密度不相关。稀土矿区芒萁的总生物量、地上生物量和株高均随着矿区治理年限的增加而增加,LJ 芒萁总生物量最高。各样地芒萁的地上生物量和地下生物量之间密切相关。上述结果说明在芒萁生长过程中各部位生物量分配具有协同性。植物在生长过程中,为了维持其正常生长,植物的各部位的大小与整个植株是相适应的,各部位所占的生物量也是一定的,如果比例失调,则会影响整株植物的生长^[22]。整体上,XK、NS 芒萁的长势随着治理年限的增加逐渐转好,株高、总生物量均有一定的增加。LJ 长势最佳,地上、总

生物量最大。然而,SZ 芒萁长势较差,植株矮小,盖度小,密度大,总生物量最小。

4.2 芒萁的稀土元素分布与累积特征

本研究中稀土矿区内芒萁地上部分稀土元素含量平均为 $2102.46\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,地下部分稀土元素含量平均为 $861.12\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见,芒萁吸收稀土元素能力强,这与学者研究结果一致^[4, 23]。普通植物各器官稀土元素的分布一般为根>茎>叶>花>果实>种子,而芒萁则为地上部分稀土元素含量大于地下部分。研究表明,当植物地上部分稀土元素含量高达 $1000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,或植物地上部分稀土元素的吸收系数大于 1 时,即为稀土元素超累积植物^[24],可见,芒萁符合超累积植物的特征。但芒萁各部位稀土元素的吸收、转移过程中依然会出现轻、重稀土元素分异现象,本研究中稀土矿区芒萁不同部位都出现轻稀土元素富集而重稀土元素贫乏的现象,这与张智勇等^[25]、魏正贵等^[26]的研究结果一致,这是由于土壤向植物根部转移的稀土元素离子会随着蒸腾水不断向上移动至植物地上部位,迁移过程中,稀土元素离子被木质部中的非扩散性阴离子吸附,同时,由于重稀土元素与生物体的结合作用强于轻稀土元素,从而导致地上部分轻重稀土元素明显分异的现象^[27]。

在不断变化的外界环境下,生物能够使其自身体内的 pH 值、养分状况、离子等处于相对稳定的状态,称为动态平衡^[28]。相对而言,芒萁地下部分对土壤轻、重稀土元素的累积量在样地间变化不一,这主要是由外界环境所致。本研究中,稀土矿区 LJ 土壤稀土元素含量较低,但芒萁地上部分稀土元素含量最高,而 NS 的土壤稀土元素含量最高,但芒萁地上部分稀土元素的含量并不是最高,这表明芒萁在吸收稀土元素时,会产生植物-壁垒作用,即当土壤稀土元素含量很高时,芒萁会对稀土元素选择性吸收或控制性吸收,这与王娟等^[29]研究一致,表明植物中存在着能调控体内元素浓度水平的生理垒或土壤-植物壁垒作用,使得体内稀土元素的富集保持在一定范围内。

4.3 芒萁地上部分对稀土元素的提取能力

植物提取作为目前植物修复中发展前景最广、研究最多的方式,是利用超富集或耐逆性植物提取已污染土壤中的一种或多种重金属,通过植物吸收-富集-运输-转移-贮存到植物的地上部分,后期采用刈割地上部分贮存的重金属从而达到净化土壤中的重金属污染物的目的^[3]。芒萁作为稀土元素超富集植物,是在稀土矿区进行植物修复的首选植物。但在实际情况中,因为不同地区土壤稀土元素含量、轻重稀土元素比例、芒萁稀土元素含量及生长环境的差异,通过芒萁提取矿区稀土元素的时间也会不一样。正如本研究中,芒萁地上部分以蓄积轻稀土元素为主,所以在重稀土元素广泛分布的矿区,芒萁的提取时间会比在轻稀土元素较为富集的地区长。

5 结论

1. 稀土矿区芒萁的生长特征。芒萁的株高、地上、总生物量均随着治理年限的增加而增加,但芒萁密度反而下降。

2. 稀土矿区芒萁的稀土元素累积特征。芒萁稀土元素含量主要为:地上部分>地下部分。芒萁地上部分累积土壤轻、重、总稀土元素能力较地下部分强,当土壤稀土含量很高时,植物地上部分会由于土壤-植物壁垒作用而对稀土元素产生选择吸收和控制性积累。

3. 芒萁作为稀土元素超富集植物,是稀土矿区进行植物提取的首选植物。根据估算,将 NS、SZ、XK 的稀土矿区表层土壤(0~10 cm)中稀土元素含量降低到全国土壤稀土元素含量的平均水平 $186.76\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别要经过 58 年、36 年和 20 年。

参考文献:

[1] 王颖. 包头稀土高新区稀土产业发展现状与环境保护对策研究[D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2012.
Wang Y. Study on Rare Earth Industry Development and Environmental Protection Countermeasures of Rare Earth

- Enterprises in Baotou National Rare Earth Hi-tech Zone [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2012.
- [2] Li X F, Chen Z Q, Chen Z B, Zhang Y H. A human health risk assessment of rare earth elements in soil and vegetables from a mining area in Fujian Province, South-east China [J]. Chemosphere, 2013, 93(6): 1240-1246.
- [3] 宋玉婷, 雷泞菲, 李淑丽. 植物修复重金属污染土地的研究进展 [J]. 国土资源科技管理, 2018, 35(5): 58-68.
- Song Y T, Lei N F, Li S L. Advances in phytoremediation of heavy-metal-contaminated land [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2018, 35(5): 58-68.
- [4] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, Jaffre T. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants [J]. Journal of Geochemical Exploration, 1977, 7(77): 49-57.
- [5] 吴征镒, 洪德元. 中国植物志 [M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- Wu Z Y, Hong D Y. Flora Reipublicae Popularis Sinicae [M]. Beijing: Science Press, 2010.
- [6] Sun J X, Zhao H H, Wang Y Q. Study on the contents of trace rare earth elements and their distribution in wheat and rice samples by RNAA [J]. Journal of Radioanalytical & Nuclear Chemistry, 1994, 179(2): 377-383.
- [7] 张明如, 何明, 温国胜, 张汝民, 张建国, 侯平. 芒萁种群特征及其对森林更新影响评述 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(4): 303-308.
- Zhang M R, He M, Wen G S, Zhang R M, Zhang J G, Hou P. The characteristics of *dicranopreris dichotoma* population and its effects on the forest regeneration [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2010, 31(4): 303-308.
- [8] 胡姐燕. 四种华南常见植物对薇甘菊和五爪金龙的化感作用研究 [D]. 广州: 华南农业大学, 2017.
- Hu N Y. The Study on Allelopathic ecological Control of Alien Plants Invading Common Plants in South China [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2017.
- [9] 潘宗涛, 陈志强, 陈志彪, 王敬哲, 邱洋, 徐芮. 南方离子吸附型稀土矿区表层土壤稀土有效性及芒萁稀土元素迁移、吸收特征 [J]. 稀土, 2019, 40(1): 1-13.
- Pan Z T, Chen Z Q, Chen Z B, Wang J Z, Qiu Y, Xu R. Bioavailability of rare earth elements in surface soil and migration, absorption characteristics of *dicranopreris dichotoma* in ionic type rare earth mining areas (Southern China) [J]. Chinese Rare Earths, 2019, 40(1): 1-13.
- [10] 陈少美, 宋飞飞, 陈艳玉. 不同采集时间芒萁各部位总黄酮含量的动态变化 [J]. 植物资源与环境学报, 2014, 23(4): 102-104.
- Chen S M, Song F F, Chen Y Y. Dynamic change of total flavonoids content in different parts of *dicranopreris pedata* at different collection times [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2014, 23(4): 102-104.
- [11] 朱鹤健. 长汀水土保持研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- Zhu H J. Soil and Water Conservation in Changting [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [12] 李小飞. 稀土采矿治理地土壤和植被中稀土元素含量及其健康风险评价——以福建长汀稀土采矿区为例 [D]. 福州: 福建师范大学, 2013.
- Li X F. Concentrations of Rare Earth Elements and Health Risk Assessment in Soil and Vegetation System——A Case Study of REEs Mining Area of Changting Country [D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2013.
- [13] 张林海, 曾从盛, 全川. 闽江河口湿地芦苇和互花米草生物量季节动态研究 [J]. 亚热带资源与环境学报, 2008, 3(2): 25-33.
- Zhang L H, Zeng C S, Tong C. Study on biomass dynamics of *phragmites australis* and *spartina alterniflora* in the wetlands of Minjiang river eatuary [J]. Journal of Subtropical Resource and Environment, 2008, 3(2): 25-33.
- [14] 孙儒泳. 基础生态学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- Sun R Y. Foundations in Ecology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.

- [15] 段晓男, 王效科, 欧阳志云, 苗鸿, 郭然. 乌梁素海野生芦苇群落生物量及影响因子分析 [J]. 植物生态学报, 2004, 28(2): 246-251.
- Duan X N, Wang X K, Ouyang Z Y, Miao H, Guo R. The biomass of *phragmites australis* and its influencing factors in Wuliangsu Hai [J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2004, 28(2): 246-251.
- [16] Bazzaz F A, Grace J. Plant resource allocation [J]. Ecology, 1998, 79(2): 746-747.
- [17] Poorter H, Niklas K J, Reich P B, Oleksyn J, Poot P, Mommer L. Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control [J]. New Phytologist, 2011, 193(1): 30-50.
- [18] 何玉惠, 赵哈林, 刘新平, 张铜会, 岳广阳. 不同类型沙地狗尾草的生长特征及生物量分配 [J]. 生态学杂志, 2008, 27(4): 504-508.
- He Y H, Zhao H L, Liu X P, Zhang T H, Yue G Y. Growth characteristics and biomass allocation of *setaria viridis* on different type of sandy [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(4): 504-508.
- [19] 郝婧, 张婕, 张沛沛, 郭东罡, 王丽媛, 上官铁梁, 黄汉富, 宋向阳. 煤矸石场植被自然恢复初期草本植物生物量研究 [J]. 草业学报, 2013, 22(4): 51-60.
- Hao J, Zhang J, Zhang P P, Guo D G, Wang L Y, Shangguan T L, Huang H F, Song X Y. A study on the biomass of herbs at the initial natural reclamation stage of plants in gangue fields [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(4): 51-60.
- [20] 李旭东, 张春平, 傅华. 黄土高原典型草原草地根冠比的季节动态及其影响因素 [J]. 草业学报, 2012, 21(4): 307-312.
- Li X D, Zhang C P, Fu H. Seasonal dynamics of root-shoot ratio and the effect of factors in grazed and ungrazed grasslands of the Loess Plateau [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2012, 21(4): 307-312.
- [21] 白永飞, 许志信. 羊草草原群落生物量季节动态研究 [J]. 中国草地学报, 1994, 16(3): 1-5.
- Bai Y F, Xu Z X. Study on seasonal fluctuations of biomass for *Lyemus chinesis* grassland [J]. Grassland of China, 1994, 16(3): 1-5.
- [22] Chapin F. The ecology and economics of storage in plants [J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1990, 21(1): 423-447.
- [23] 魏正贵, 尹明, 张巽, 洪法水, 李冰, 陶冶, 赵贵文, 汪振立, 谢先求. 稀土元素在赣南非稀土矿区和不同稀土矿区土壤-铁芒萁 (*Dicranopteris linearis*) 系统中的分布、累积和迁移 [J]. 生态学报, 2001, 21(6): 900-906.
- Wei Z G, Yin M, Zhang X, Hong F S, Li B, Tao Y, Zhao G W, Wang Z L, Xie X Q. Distribution, accumulation and transportation of rare earth elements in soil-*dicranopteris linearis* system at South Jiangxi [J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(6): 900-906.
- [24] Ozaki T, Enomoto S, Minai Y, Ambe S, Makide Y. A survey of trace elements in pteridophytes [J]. Biological Trace Element Research, 2000, 74(3): 259-273.
- [25] 张智勇, 王玉琦, 孙景信, 李福亮. 稀土超量积累植物铁芒萁中稀土元素的赋存状态 [J]. 稀土, 2000, 21(3): 42-45.
- Zhang Z Y, Wang Y Q, Sun J X, Li F L. Chemical species of rare earth elements in RE hyperaccumulator *dicranopteris dichotoma* [J]. Chinese Rare Earths, 2000, 21(3): 42-45.
- [26] 魏正贵. 土壤-植物体系中稀土元素分布及植物体内稀土结合生物大分子结构的研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2000.
- Wei Z G. Distribution of Rare Earth Elements in Soil-Plant System and Study on Rare Earth Binding Biomacromolecule Structure in Plants [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2000.
- [27] 金珠. 不同植物对镧 (La) 的积累特征及生理效应研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- Jin Z. Study on Accumulation Characteristics and Physiological Effects of Different Plants on La (La) [D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2014.
- [28] Harris G. Ecological stoichiometry: Biology of elements from molecules to the biosphere [J]. Journal of Plankton Research, 2003, 25(9): 1183-1183.
- [29] 王娟, 王正海, 耿欣, 何凤萍, 祖玉川, 王磊. 大宝

山多金属矿区土壤-植被稀土元素生物地球化学特征 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2014, 39 (6): 733-740.
Wang J, Wang Z H, Geng X, He F P, Zu Y C, Wang

L. REE biogeochemistry of soil-vegetation system in Dabaoshan polymetallic mine [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2014(6):733-740.

Rare Earth Element Extraction Ability of *Dicranopreris Dichotoma* in Ionic Type Rare Earth Mining Area, Southern China

ZHANG Qiao-ling^{1,2}, CHEN Zhi-qiang^{1,2}, LIN Qiang³, CHEN Zhi-biao^{1,2},
FENG Liu-jun^{1,2}, QIU Yang^{1,2}, XU Rui^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Subtropical Mountain Ecology (Ministry of Science and Technology and FuJian Province Funded), Fuzhou 350007, China;
- 2. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;
- 3. Fujian Soil and Water Conservation Test Station, Fuzhou 350007, China)

Abstract: In order to explore the rare earth element extraction ability of *dicranopreris dichotoma* in southern rare earth mining area to extract rare earth elements in the soil, this paper takes the southern ionic type rare earth mining area as experimental plots, including Sanzhoutongba (SZ, 5a governance land), Xiakeng (XK, 8a governance land), Niushitang (NS, 10a governance land). and Longjing (LJ, reference), to study the growth characteristics (plant height, density, biomass), rare earth element enrichment ability and rare earth element extraction ability. The study found that among those experimental plots, plant height, density, aboveground biomass and total biomass were significantly different ($P<0.05$), while underground biomass was not significantly different. The highest accumulation of rare earth elements in aboveground part is LJ, which is 5.45, 3.51 and 2.33 times of SZ, XK and NS respectively. The highest accumulation of underground part is NS, which is 5.24, 6.36 and 3.96 times of SZ, XK and LJ respectively. Σ LREE and Σ REE were significantly different in the aboveground part of *dicranopreris dichotoma* ($P<0.05$), $LJ \approx NS > XK \approx SZ$, and the aboveground part of *dicranopreris dichotoma* was mainly composed of LREE. In order to purify the rare earth elements in the mining area by *dicranopreris dichotoma*, it will take 58, 36 and 20-years to reduce the rare earth element content in the topsoil (0~10 cm) of NS, SZ, and XK, respectively, to the average level of soil rare earth elements in China ($186.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Key words: *dicranopreris dichotoma*; accumulation; phytoextraction; southern ionic rare earth mining area