

福建山地赤红壤和红壤稀土容量与强度及其影响因素

唐南奇

(福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘 要: 福建具有丰富的山地赤红壤和红壤资源, 且在我国亚热带山地土壤中具有代表性。本研究根据对不同母质发育的赤红壤和红壤典型剖面样本的稀土容量和强度及相关影响因素的测定和分析, 从 5 个方面阐明了这两类土壤稀土的剖面变异、母质差别及土壤环境因素的影响规律, 为山地赤红壤和红壤开发中稀土的应用提供依据。

关键词: 赤红壤; 红壤; 稀土容量; 稀土强度

中图分类号: S153.2

文献标识码: A

自二十世纪 70 年代起, 我国开展了稀土农用研究。实践证明, 稀土在粮食、油料、水果、花卉和林木上应用具有投资少、见效快、增加产量、改善品质的特点和良好的经济效益。福建省位于我国东南部, 背山面海, 跨中、亚热带, 具有优越的水、热、气候条件, 境内丘陵山地面积占土地总面积的 87.5%, 是发展特色农业的资源所在。其中分布于海拔 700 m 以下的赤红壤和红壤总面积达 827.5 万 hm^2 , 占土地总面积的 68.5%^[1], 是山地开发利用的主要土壤类型。稀土土壤学是稀土农用的基础, 然而, 对赤红壤和红壤的稀土容量和强度分布、变异特性及影响因素的分析和调控的研究尚不多见。本文就此进行探讨, 旨在为山地赤红壤和红壤开发中稀土的应用提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

采集福建省亚热带丘陵山地具有代表性的黑云母花岗岩、英安质凝灰岩、玄武岩、辉绿岩和第四纪沉积物等发育的赤红壤剖面 10 个, 土样 30 个; 中亚热带丘陵山地具有代表性的黑云母花岗岩、凝灰岩、玄武岩、石英闪长岩、片麻岩、千枚岩和第四纪沉积物等发育的红壤剖面 11 个, 土样 33 个。土壤发生层符号 A 为有机质层, B 为淀积层, C 为母质层。

1.2 试验方法

1.2.1 总稀土元素丰度($\sum REE$)的测定

采用对马尿酸偶氮氯膦(CPA-PHA)分光光度法^[2]。土样过 18 号筛, 用氢氧化钠和过氧化钠高温熔融, 三乙醇胺浸提分离干扰物, 沉淀用盐酸溶解后用氨水沉淀稀土, 在 0.20 mol/l ~ 0.24 mol/l 盐酸介质中, 用对马尿酸偶氮氯膦显色, 用 752-C 型数显分光光度计于波长 675 nm 处测定吸光度, 计算丰度。

1.2.2 轻稀土元素丰度($\sum LREE$)的测定

采用乙酰基偶氮膦分光光度法^[3]。试样熔融和共存干扰去除与 $\sum REE$ 处理相同, 用乙酰基偶氮膦显色, 在 670 nm 处测定吸光度, 计算其丰度。重稀土元素丰度 $\sum HREE = \sum REE - \sum LREE$, 由计算得出。

1.2.3 土壤可溶态稀土丰度(REE_s)的测定

采用偶氮氯膦 III-溴化十六烷基三甲铵三元络合体系三波长分光光度法^[3]。称取通过 20 号筛风干土样 10g, 用 HAC-NaAC (pH4.8) 提取液浸提, 加入 0.05% 偶氮氯膦 III 溶液显色, 用 752-C 型数显分光光度计于波长 703、723、743 (nm) 处测定吸光度, 计算丰度。

1.2.4 土壤主要组分含量和特性的测定^[4]

1. 土壤有机质含量的测定: 采用重铬酸钾法—硫酸消化;
2. 土壤颗粒组成的测定: 采用吸管法;
3. 土壤全铁(Fe_t)测定: 采用碳酸钠碱熔法处理样品, 原子吸收光谱法测定; 土壤活性铁(Fe_o)测定:

收稿日期: 2002-03-18.

作者简介: 唐南奇(1955-), 男(汉族), 福州人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 土地资源持续利用。Tel: 0591-3793455

采用酸性草酸铵缓冲液浸提样品,原子吸收光谱法测定;土壤游离铁(Fe_d)测定:采用柠檬酸钠—连二亚硫酸钠—重碳酸钠浸提样品,原子吸收光谱法测定;土壤晶质铁 $\text{Fe}_\text{c}=\text{Fe}_\text{d}-\text{Fe}_\text{o}$; 非游离铁 $\text{Fe}_\text{u}=\text{Fe}_\text{c}-\text{Fe}_\text{d}$ 由计算得出。

4. 土壤 pH 值的测定:采用水浸提电位法。

1.2.5 供试土样 pH 值调节

称取通过 20 号筛风干土样 20 g, 加入 0.2 mol/l 的 CaCl_2 40 ml, 摇匀后放置过夜, 用 0.1mol/l 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液滴定不同的 pH 值, 绘制滴定曲线。取每种供试土样 8 份各 20 g, 按照滴定曲线, 加入一定量的 0.1mol/l $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液, 使调节后的土样 pH 值分别为 5.0、5.5、6.0、6.5、7.0、7.5、8.0、8.5, 静置 24h 后测定其 pH 值, 并调节至设定值, 保持该值后加水至田间持水量, 培养 1 个月, 风干后测定 REE_s 。

2 结果与分析

2.1 供试土壤 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 、 $\sum \text{HREE}$ 和 REE_s 统计特征参数分析

土壤稀土元素指在土壤中 $\text{La} \rightarrow \text{Lu}$ 的镧系元素及元素钇 (y)。由于“镧系收缩”的结果使其原子半径、离子半径非常接近, 具有物理化学和晶体化学性质的相似性。在土壤中以 $\sum \text{REE}$ 表示总稀土丰度, 由于 Gd 之后原子外层电子自旋方向的不同可再分为轻稀土组分 ($\sum \text{LREE}$) 和重稀土组分 ($\sum \text{HREE}$)^[5]。农业中使用的外源稀土主要成分为轻稀

土。表 1 表明: 1. 赤红壤和红壤的 $\sum \text{REE}$ 平均值分别达 273.28 mg/kg 和 286.6 mg/kg, 均高于我国其他土类的平均水平^[6]。但 s 和 $C.V$ 均较大, 表明这两类土壤的 $\sum \text{REE}$ 的数值离散性较大。2. 供试土壤 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 和 $\sum \text{HREE}$ 的 $C_s > 0$, 表明这三种稀土组分均呈正偏态分布。且 $\sum \text{REE}$ 、 $\sum \text{LREE}$ 的 $C_e > 0$, 表明二者分布的波峰较陡。但这两类土壤 $\sum \text{HREE}$ 的 $C_e < 0$, 表明 $\sum \text{HREE}$ 的分布处于较平缓的低峰态。3. 赤红壤和红壤的 REE_s 平均值分别为 6.75mg/kg 和 4.95 mg/kg, 但 $D.V$ 分别为 15.0 mg/kg 和 16.01 mg/kg, s 分别为 4.8 mg/kg 和 4.63 mg/kg, $C.V$ 分别为 0.71 和 0.94。表明这两类土壤的虽然稀土容量处于较高水平, 但稀土强度水平较低, 且变幅较大。

2.2 不同母质发育的供试土壤 $\sum \text{REE}$ 的比较和剖面分布特征

图 1 表明, 不同母质发育的赤红壤剖面 $\sum \text{REE}$ 均呈现自上而下递增的趋势, 其中以凝灰岩母质发育者增幅最大。在 A 层 $\sum \text{REE}$ 依大小排序为: 玄武岩母质发育者、凝灰岩母质发育者、花岗岩母质发育者、辉绿岩母质发育者。而在 C 层 $\sum \text{REE}$ 则以凝灰岩母质发育者最大, 玄武岩母质发育者其次, 其他母质发育者排序与 A 层相同。图 2 表明, 第四纪沉积物发育的赤红壤 $\sum \text{REE}$ 剖面亦均呈现自上而下递增的趋势, 但 Q4 母质发育者 $\sum \text{REE}$ 剖面变幅较小, 而 Q3 母质发育者 $\sum \text{REE}$ 剖面变异较大。图 3 表

表 1 供试土壤稀土主要组分统计特征参数

Table 1 The statistic characteristic parameters of main REE components in tested soils

参数值	$\sum \text{REE}$	$\sum \text{LREE}$	$\sum \text{HREE}$	REE_s
(1) 赤红壤系列:				
样本数 n	30	30	30	30
平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	273.28	182.82	91.23	6.75
全距 $D.V(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	588.10	558.86	163.62	15.00
标准差 $s(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	131.19	126.99	40.47	4.80
变异系数 $C.V$	0.48	0.70	0.45	0.71
偏度 C_s	1.40	1.26	0.24	-0.22
峰度 C_e	1.74	1.48	-0.55	-1.47
(2) 红壤系列:				
样本数 n	33	33	33	33
平均值 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	286.68	182.55	105.03	4.95
全距 $D.V(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	732.71	747.68	143.47	16.01
标准差 $s(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	178.09	173.33	38.52	4.63
变异系数 $C.V$	0.63	0.96	0.37	0.94
偏度 C_s	2.05	2.41	0.00	0.55
峰度 C_e	3.50	5.11	-0.82	-0.88

明,不同母质发育的红壤剖面 $\sum REE$ 亦均呈现自上而下递增的趋势,其中石英闪长岩母质发育者剖面变异最大。玄武岩母质发育者 $\sum REE$ 最大,处于700 mg/kg~850 mg/kg,其他几种母质发育者则相对集中在100 mg/kg~400 mg/kg数量级。图4表明,部分第四纪沉积物发育的红壤剖面 $\sum REE$ 在B层减少,但总的趋势仍然是向下相对富集。

2.3 供试土壤的剖面 $\sum LREE$ 与 $\sum HREE$ 的“分馏作用”特征

$\sum LREE/\sum HREE$ 是表征 $\sum LREE$ 和 $\sum HREE$ 地球化学“分馏作用”的特征参数^[7]。图5表明,在不同母质发育的赤红壤剖面中,A、C层的 $\sum LREE/\sum$

$HREE$ 相对较小,且相对一致,但在B层均明显增大,其中以第四纪沉积物母质发育者、凝灰岩母质发育者和玄武岩母质发育者最突出。反映了在赤红壤成土过程中 $\sum LREE$ 和 $\sum HREE$ 在B层发生了显著的“分馏作用”,其结果是在该层 $\sum LREE$ 相对富集, $\sum HREE$ 相对向下淋溶。然而,图6所表明的不同母质发育的红壤剖面 $\sum LREE/\sum HREE$ 分布与赤红壤的特征不一致,除了第四纪沉积物发育者 $\sum LREE/\sum HREE$ 向下明显递增外,其余母质发育者均呈现相对平稳。

2.4 供试土壤的REEs与剖面分布特征
土壤中的可溶态稀土含量REEs代表供给植物

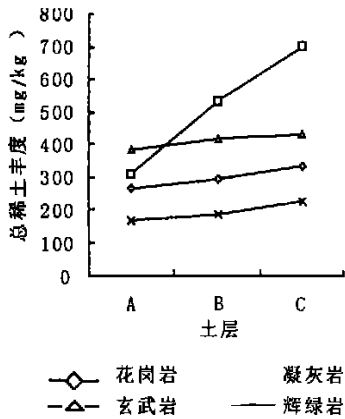


图1 赤红壤总稀土丰度剖面分布
Fig. 1 REE profile distribution in lateritic red earthes

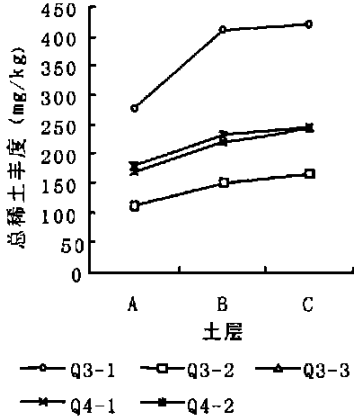


图2 第四纪沉积物发育赤红壤总稀土丰度剖面分布
Fig. 2 REE profile distribution in lateritic red earthes derived from the Quaternary precipitates

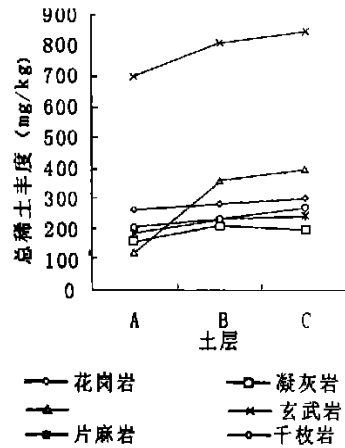


图3 红壤总稀土丰度剖面分布
Fig. 3 REE profile distribution in red enathes

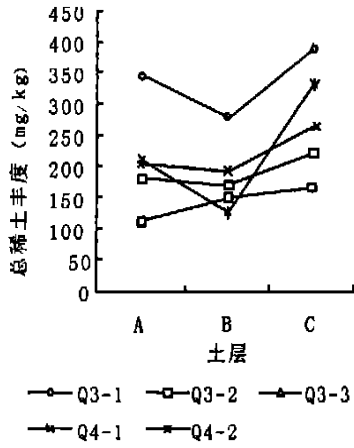


图4 第四纪沉积物发育红壤总稀土丰度剖面分布
Fig. 4 REE profile distribution in red earthes derived from the Quaternary precipitates

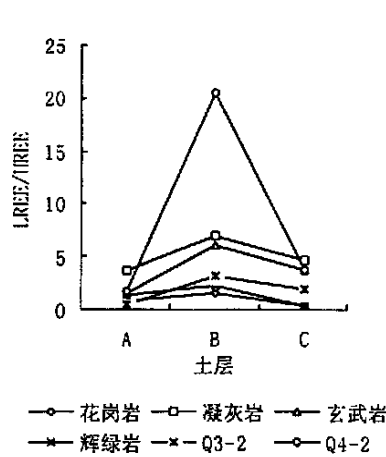


图 5 赤红壤 LREE/ HREE 剖面分布

Fig. 5 LREE/ HREE profile distribution in lateritic red earth

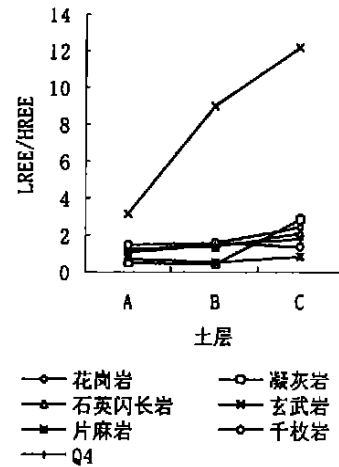


图 6 红壤 LREE/ HREE 剖面分布

Fig. 6 LREE/ HREE profile distribution in red earth

有效态稀土的强度。表 2 表明, 赤红壤和红壤的 REEs 在 A 层均较低, 反映了表土层土壤稀土供给强度较小, 但所有供试土壤的 REEs 在 B 层和 C 层均持续递增。不同母质发育的赤红壤 REEs 平均值依大至小排序为: 凝灰岩母质发育者、玄武岩母质发育者、花岗岩母质发育者、第四纪沉积物母质发育者、辉绿岩母质发育。不同母质发育的红壤 REEs 平均值依大至小排序为: 石英闪长岩母质发育者、花岗岩母质发育者、片麻岩母质发育者、第四纪沉积物母质发育者、玄武岩母质发育者、凝灰岩母质发育者、千枚岩母质发育者。

2.5 供试土壤稀土容量与强度及其影响因素分析

根据供试土壤的 $\sum REE (y_1)$ 、 $\sum LREE (y_2)$ 、 $\sum HREE (y_3)$ 、 $REEs (y_4)$ 对土壤 pH 值 (x_1)、有机质含量 (x_2)、砂粒含量 (x_3)、粉砂粒含量 (x_4)、粘粒含量 (x_5)、活性铁含量 (x_6)、晶质铁含量 (x_7)、非游离铁含量 (x_8) (表 3) 的双重筛选逐步回归分析, 在临界值 $F_x = 1.63$, $F_y = 2.03$ 的条件下, 可建立如下回归方程

$$\begin{aligned} y_1 &= -32.46x_2 + 2.70x_4 - 40.58x_6 + 44.08x_8 + 167.97 \quad (R=0.8827, p=0, s=100.52) \\ y_2 &= -35.93x_2 + 2.81x_4 - 41.57x_6 + 44.90x_8 + 63.29 \quad (R=0.8969, p=0, s=94.25) \\ y_3 &= 0.17x_6 + 103.28 \quad (R=0.1031, p=0.5877, s=37.95) \\ y_4 &= -3.48x_2 - 0.19x_4 + 0.14x_5 + 14.15 \quad (R=0.7699, p=0, s=3.38) \end{aligned}$$

表 4 与上述结果表明: 1. 与 $\sum REE$ 、 $\sum LREE$ 相关的土壤影响因素主要是土壤有机质含量、粉砂粒含量、活性铁含量和非游离铁含量。偏相关系数 r 和直接通径系数 P 分析表明 (表 4), $\sum REE$ 、 $\sum LREE$ 与土壤非游离铁含量的正相关最显著, 其次是粉砂粒含量, 而与土壤活性铁含量负相关最显著, 其次是有机质含量。2. $\sum HREE$ 与土壤影响因素的相关不显著。3. 与 $REEs$ 相关的土壤影响因素主要是土壤有机质含量、粉砂粒含量和粘粒含量。偏相关系数 r 和直接通径系数 P 分析表明, $REEs$ 与土壤粘粒含

表 2 不同母质发育供试土壤 REEs 剖面分布
Table 2 REEs distribution in tested soil profiles derived from diffrence parent materials

母质类型	A 层	B 层	C 层
赤红壤 REEs (mg/ kg):			
花岗岩母质	4. 85	10. 35	11. 75
凝灰岩母质	11. 20	12. 20	12. 60
玄武岩母质	10. 23	11. 65	12. 00
辉绿岩母质	0. 07	2. 40	3. 60
Q3 母质	0. 04	6. 58	7. 95
Q4 母质	0. 02	3. 20	5. 75
红壤 REEs (mg/ kg):			
花岗岩母质	5. 64	7. 75	13. 60
凝灰岩母质	0. 11	1. 65	8. 00
石英闪长岩母质	0. 07	12. 23	16. 00
玄武岩母质	0. 20	3. 90	5. 80
片麻岩母质	5. 00	8. 40	10. 42
千枚岩母质	0. 10	0. 40	0. 60
Q4 母质	0. 02	5. 75	9. 31

量呈正相关,与土壤有机质含量、粉砂粒含量呈负相关。由于供试土壤的 pH 值变异幅度较小,故 REE_s 与土壤 pH 值的关系未能在此反映。

2.6 土壤酸度调控对 REE_s 的影响

图 7 表明,以黑云母花岗岩、石英闪长岩、玄武岩、凝灰岩和第四纪沉积物母质发育的红壤 C 层土壤为代表性试样,在调节土壤酸碱度的条件下,土壤 REE_s 和 pH 值均表现出显著的幂函数、一次及二次线性函数相关。二者依序为

$REE_{s_1}=1491.8pH_1^{-4.1906}, (R_1^2=0.9391)$

$REE_{s_2}=4778.4pH_2^{-3.488}, (R_2^2=0.9902)$

$REE_{s_3}=-1.364pH_3^{+12.146}, (R_2^2=0.9743)$

$REE_{s_4}=0.131pH_4^2-3.575pH_4^{+22.55},$
 $(R_2^2=0.9889)$

$REE_s=1273.4H_5^{-2.9829}, (R_1^2=0.9821)$

以上结果均表明随着土壤 pH 值的升高, REE_s 趋于降低,故在实际应用中,随着石灰施用量的增加,土壤中有有效态稀土供给强度将趋于减少。

3 结论

试验结果和分析表明:

- 1. 赤红壤和红壤的 $\sum REE$ 、 $\sum IREE$ 和 $\sum HREE$ 均较大,其剖面分布具有自上而下递增的趋势;
- 2. 赤红壤和红壤的 REE_s 在 A 层含量较低,其剖面分布亦具有自上而下递增的趋势;
- 3. 赤红壤剖面的 B 层 $\sum IREE$ 与 $\sum HREE$ 具有明显的“分馏作用”, $\sum IREE$ 的相对富集,但红壤剖面的不具这一特征;

表 3 供试土壤主要理化特性
Table 3 The chief physical and chemical characteristics in tested soils

参数值	pH	有机质	砂粒	粉砂粒	粘粒	全铁	游离铁	活性铁	晶质铁	非游离铁
样本数 n	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
平均值(%)	5.0	1.09	34.89	35.99	29.57	31.94	24.73	4.67	5.285	7.00
全距 $D.V(\%)$	3.0	3.91	67.12	61.85	67.81	700.00	579.91	124.66	16.559	124.14
标准差 $s(\%)$	1.0	1.02	16.98	12.15	15.24	126.83	104.36	22.69	5.025	22.46
变异系数 $C.V$	0	0.96	0.49	0.33	0.52	4.02	4.24	4.85	0.960	3.24

表 4 供试土壤稀土容量与强度及其影响因素的逐步回归分析特征参数
Table 4 The characteristics parameters of the stepwise regression analysis on
REE capacity, REE intensity and influential factors in the tested soils

偏相关系数 r	t 检验值	显著水平 p	直接途径系数 P
$r(y_1, 2)=-0.3538$	1.8817	0.0735	$P_{2 \rightarrow y_1}=-0.1803$
$r(y_1, 4)=0.2452$	1.2794	0.2204	$P_{4 \rightarrow y_1}=0.1292$
$r(y_1, 6)=-0.8051$	6.736	0	$P_{6 \rightarrow y_1}=-4.5941$
$r(y_1, 8)=0.8364$	7.3001	0	$P_{8 \rightarrow y_1}=4.9737$
$r(y_2, 2)=-0.4090$	2.2156	0.0372	$P_{2 \rightarrow y_2}=0.1993$
$r(y_2, 4)=0.2719$	1.4285	0.1711	$P_{4 \rightarrow y_2}=0.1357$
$r(y_2, 6)=-0.8365$	7.3803	0	$P_{6 \rightarrow y_2}=-4.7326$
$r(y_2, 8)=0.8512$	7.9515	0	$P_{8 \rightarrow y_2}=5.0928$
$r(y_4, 2)=-0.7378$	5.4495	0	$P_{2 \rightarrow y_4}=-0.7645$
$r(y_4, 4)=-0.5007$	2.9495	0.0067	$P_{4 \rightarrow y_4}=-0.3683$
$r(y_4, 5)=0.5453$	3.2991	0.0028	$P_{5 \rightarrow y_4}=0.4626$

4. 赤红壤和红壤的 $\sum REE$ 、 $\sum LREE$ 均与土壤非游离铁含量、粉砂粒含量呈显著正相关, 与土壤活性铁含量、有机质含量呈负相关; $REEs$ 与土壤粘粒含量呈正相关, 与土壤有机质含量、粉砂粒含量呈负相关;

5. 经酸碱调节后的供试土壤的 $REEs$ 随着土壤 pH 值的提高而递减, 呈显著的幂函数、一次和二次线性函数关系。

参考文献:

[1] 福建省土壤普查办公室. 福建土壤 [M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1991. 69 ~ 115.

- [2] 中华人民共和国国家标准局. 土壤中氧化稀土总量的测定—对马尿酸偶氮氯膦分光光度法[S]. 北京: 标准出版社, 1986. 1 ~ 3.
- [3] 贾文竹, 邱贵田. 稀土与农业[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998. 213 ~ 214.
- [4] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978. 142 ~ 285.
- [5] 王云, 魏复盛. 土壤环境元素化学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995. 327 ~ 328.
- [6] 朱其清. 我国土壤中的稀土元素[A]. 见: 国家计委稀土办公室. 稀土碳铵复混肥文集[C]. 北京:《中国稀土学报》编辑部, 1996. 112 ~ 117.
- [7] 陈德潜, 陈刚. 实用稀土元素地球化学[M]. 北京: 农业科技出版社, 1990. 19 ~ 22.

Study on the *REE* Capacity, Intensity and the Influence Factors of Lateritic Red Earth and Red Earth in Fujian Mountains

TANG Nan-qi

(College of the Resource and Environment Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002)

Abstract: The lateritic red earth and red earth are abundant in Fujian mountains that represent the characteristics of the subtropics mountain soils in China. With analysis of *REE* capacity, *REE* intensity and related influential factors of the profile samples in different parent soils, the profile variability, the difference of parent materials and the influences of environmental factors were studied in five aspects, which thereby provide the basis for using *REE* in lateritic red earth and red earth. The results are as follows: 1. $\sum REE$, $\sum LREE$ and $\sum HREE$ of lateritic red earth and red earth are all larger than other soil types in China, the distribution in profile represents a increasing tendency from top to bottom horizon in the tested soils. 2. $REEs$ in A horizon of lateritic red earth and red earth are lower than other soil types, and the distributions are like (1). 3. There are remarkable 'fractional distillation' between $\sum LREE$ and $\sum HREE$ in B horizon of lateritic red earth profiles, but not in the red earth. 4. The relation between $\sum REE$, $\sum LREE$ and soil non-free iron oxides, silt particles are obviously positive, however, that between $\sum REE$, $\sum LREE$ and soil active iron oxides, soil organic matter are negative. Moreover, the relation between $REEs$ and soil clay particles are positive, and that between $REEs$ and soil organic matter, soil silt particles are negative. 5. $REEs$ decline as the rising of pH value in the tested soils after regulation, representing remarkable correlation of power function and linear function between $REEs$ and pH values.

Key words: lateritic red earth; red earth; *REE* capacity; *REE* intensity