

粤西地区土壤-植物系统中稀土元素地球化学特征*

苗 莉^{1,2} 徐瑞松¹ 徐金鸿^{1,2}

(1 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要 在广东省西部不同地区采取土壤、植物样品, 并对其中的稀土元素含量采用 ICP-MS 法测定, 研究了稀土元素在土壤、植物叶中的地球化学特征。结果表明: 土壤-植物系统的各环节间稀土元素的含量模式基本相似。不同母岩发育的土壤稀土分布有较大的差异, 其中以花岗岩发育的土壤稀土含量最高。在土壤的各个剖面层中, 心土层和底土层稀土含量高于表土层, 轻重稀土发生分异, 均有不同程度的 Eu 亏损, Ce 表现为土壤各层位中的正异常。同一采样点的不同种属植物具有相似的稀土分配模式, 在不同母岩发育土壤上生存的同一种属植物稀土分配模式不同, 其稀土分布均受其所生存土壤的影响和制约, 同时具有自身的生物地球化学特性。生物吸收系数表明植物对稀土元素的吸收能力的差异, 稀土元素在由土壤向植物体运输迁移中发生了明显的分馏作用, 重稀土相对贫乏。

关键词 土壤; 植物; 稀土元素; 地球化学特征; 生物吸收系数

中图分类号 P595

文献标识码 A

稀土元素具有独特的地球化学学习性, 作为一种地球化学指示剂在地质领域许多方面得到广泛重视和应用^[1, 2]。20 世纪 70 年代以来, 随着稀土微肥的提出, 稀土大规模应用于农业生产^[3]。在我国, 稀土是重要战略资源之一, 已探明储量达 4 300 万吨, 占全球的 41.4%, 储量、产量、用量、以及出口量均列世界第一^[4], 尤其是华南地区红土风化壳稀土元素含量较高, 开发前景广阔。随着稀土资源的广泛的开发和应用, 稀土元素大量进入环境, 稀土元素的生物和环境效应成为重要的研究课题^[5-10]。本文主要研究稀土元素在华南地区土壤-植物系统中的地球化学特征, 探讨稀土元素在该系统中的关联性、迁移和分异现象。

1 样品采集与测试

1.1 研究区自然概况

采样点位于华南地区广东省西部, 由北到南依次为肇庆市七星岩(QXY), 茂名市水东(SHD), 廉江市遂溪西(SXX), 湛江市湖光岩(HGY), 雷州市北海(BH), 雷州市英利(YL), 徐闻海安(HAN)。自然概

况见表 1。

1.2 样品采集

土壤的采集按照土壤自然发生层位分类, 将完整的土壤剖面由上到下分为表土层(A)、心土层(B)、底土层(C)。所有土样按照土壤微量元素的处理方法, 将土样自然风干, 去除杂质, 研磨, 过 200 目筛, 混合均匀, 供分析测试用。

研究区现有常见植被主要有桉树(*Eucalyptus globulus Labill*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、桃金娘(*Phodomyrtus tomentosa*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。在每株植物的上、中、下、东、西、南、北方采取其叶, 并依次以自来水、蒸馏水、去离子水各冲洗 3 次, 在 60~70 °C 下烘干, 磨细, 混合均匀, 过 100 目筛, 备用。

1.3 分析方法

准确称取土样, 用 HNO₃ 和 HF 溶解超声波振荡后置电热板蒸干, 再次加入 HF 和 HNO₃ 密封加热 7~10 d, 溶液蒸干后加入稀硝酸, 恒温 24 h, 再次蒸干赶尽多余的酸, 再以稀硝酸溶解、定容, 加内标。植物定量称取 500 °C 灰化至白色或灰白色, 灰份用混酸消解。所有样品稀土元素含量用 ICP-MS(ELAN 6000) 在中国

* 中国科学院创新项目(KZCX3-SW-152)、国家重大基础研究前期研究专项(2003CCA00100)、国家自然科学基金重点项目(40331009、4007257)和中国科学院广州地球化学研究所创新项目(GIGCX-03-05、GIGCX-04-01)资助

作者简介: 苗 莉(1980~), 女, 硕士研究生, 环境科学专业。E-mail: mli@gig.ac.cn

收稿日期: 2005-11-29; 收到修改稿日期: 2006-05-11

科学院广州地球化学研究所广州质谱中心测定。其实 验参数见文献[11], 相对标准偏差(RSD)小于 5%。

表 1 研究区自然概况

Table 1 Natural conditions of the sampling sites

采样点 Sampling sites	北纬 Latitude, N	东经 Longitude, E	海拔 Altitude (m)	成土岩性 Lithology	土壤类型 Soil type	发生层位深度 Depth of layer (m)		
						A	B	C
QXY	23° 05' 22"	112° 28' 36"	88	石灰岩 Limestone	红壤 Red soil	0~ 20	50~ 70	160~ 180
SXX	21° 34' 45"	109° 59' 26"	235	花岗岩 Granite	红壤 Red soil	0~ 20	40~ 60	210~ 231
SHD	21° 28' 43"	110° 05' 51"	30	风成红砂土 Eolian red sand	红壤 Red soil	0~ 20	30~ 50	580~ 600
HGY	21° 08' 26"	110° 16' 47"	91	玄武岩 Basalt	砖红壤 Latosol	0~ 20	60~ 80	120~ 140
BH	20° 54'	110° 03' 34"	12.3	红色粉砂岩 Red siltstone	红壤 Red soil	0~ 20		
YL	20° 34' 28"	110° 06' 03"	133	玄武岩 Basalt	砖红壤 Latosol	0~ 20		290~ 305
HAN	20° 16' 27"	110° 15' 34"	14.7	玄武岩 Basalt	砖红壤 Latosol	0~ 30	120~ 140	140~ 160

2 结果与讨论

2.1 岩石、土壤中稀土元素的分布特征

2.1.1 稀土元素的平均含量 各采样点虽然成土母岩有别, 总体上具有稀土元素含量共同的特征, 表现为原子序数为偶数的含量大于原子序数为奇数的稀土元素含量, 即遵循 Odd+Harkins 规则。轻稀土元素(LREE)含量显著大于重稀土(HREE)含量, La、Ce、Nd 的含量占主导地位。

在不同的岩性母质发育的红壤中稀土总量有一定的差异。由表 2 可见, 以花岗岩发育的红壤中稀土含量最高, 其次是玄武岩和石灰岩发育的砖红壤和红壤, 较低的是风成红砂土和红色粉砂岩上发育的风化剖面。然而, 研究区稀土元素含量相对低的石灰岩却发育稀土元素含量相对较高的土壤, 主要是由于在成土过程中碱金属和碱土金属大量淋溶, 稀土元素发生

了一定程度的浓缩^[12]。风成红砂土和红色粉砂岩发育的红土, 二者稀土含量较低, 可能受二者中高的石英含量对土壤中稀土元素起到稀释作用的影响^[13]。研究区位于亚热带海洋季风区, 母岩生物和化学风化作用强烈, 在成土过程中化学元素发生了明显的淋溶作用, 对于稀土元素主要以可溶性的阳离子形式迁移, 轻稀土的水解能力比重稀土强, 二者比较而言, 重稀土的迁移能力较强易被淋湿而轻稀土则易被积淀, 导致轻稀土和重稀土发生分异。研究区花岗岩发育的土壤和风成红砂土中的 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的比值均较大, 其次为玄武岩发育的红土、石灰岩发育的红土, 这一现象更多地显示了土壤中稀土元素对成土母岩的继承性, 并反映与成土母质有关的地球化学性质^[14], 而淋溶作用、化学风化作用和生物作用使稀土元素进一步产生分异。如花岗岩在表生风化作用中遭受风化作用较强, HREE 淋失较多, LREE 相对富集, 造成其发育红土中 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的值较高。

表 2 研究区土壤稀土元素平均含量

Table 2 Mean concentrations of rare earth elements (REEs) in soils

采样点 Sampling sites	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣLREE	ΣHREE	ΣREE	$\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$
	(mg kg ⁻¹)																	
QXY	27.95	82.60	6.47	25.08	5.04	1.00	4.65	0.76	4.42	0.94	2.75	0.41	2.66	0.42	148.1	17.01	165.1	8.71
SXX	56.94	121.9	12.24	40.58	7.03	0.44	4.41	0.63	2.52	0.34	0.81	0.09	0.56	0.08	239.2	9.45	248.6	25.32
SHD	21.18	53.38	5.07	19.00	3.44	0.28	2.61	0.39	2.01	0.37	1.05	0.15	0.98	0.16	102.3	7.71	110.1	13.27
HGY	28.95	85.50	7.06	27.37	5.72	1.62	5.31	0.82	4.46	0.81	2.13	0.30	1.86	0.28	156.2	15.98	172.2	9.78
BH	7.98	18.27	1.72	6.16	1.21	0.19	1.32	0.28	2.05	0.45	1.40	0.21	1.46	0.22	35.5	7.40	42.94	4.80
YL	26.96	97.26	7.81	33.34	7.76	2.36	6.79	0.99	5.21	0.90	2.45	0.34	2.19	0.33	175.5	19.20	194.7	9.14
HAN	26.30	81.58	6.77	28.77	6.75	2.28	7.14	1.15	6.29	1.16	3.11	0.42	2.55	0.38	152.4	22.19	174.6	6.87

2.1.2 红土剖面中稀土元素的含量特征 各采样点红土不同剖面层位中的稀土元素含量分布见表3。由表3可见,各剖面层位中,所有稀土元素的分布均遵从 Oddo Harkins 规则。在各采样点上,稀土元素在各剖面层位中高度富集,总体具有向上迁移的趋势,而表土层 A 的稀土含量稍低于 B、C 层,主要是表土层经历了一定强度的淋溶作用的结果。研究区温暖潮湿的亚热带气候条件更有利于表土层的淋滤作用,在土壤发育过程中 REE(OH)²⁺ 离子解吸附,在表层以下逐渐富集,体现在采样点 QXY、SXX、SHD、HAN 的心土层 B 层 ΣREE 最大,在 SXX、SHD、YL、HAN 位于土壤表土层 A 层的稀土元素含量较底土层 C 层低。个别采样点表土层稀土含量略高,可能与 A 层的有机质和腐殖质及其生物作用有关^[15]。

各层稀土元素含量进行球粒陨石标准化^[16],则可反映各稀土元素在成土过程中的分异情况,采样

点稀土元素分配曲线见图1。各采样点各层位稀土元素分配曲线走势相似,各稀土元素在同一母质来源的土壤各层地球化学分布具有一致性。各层土壤均表现出轻稀土元素分配曲线向右倾斜,重稀土元素分配曲线保持相对平稳,即 LREE 相对富集, LREE 与 HREE 发生分异。在石灰岩发育的 QXY、花岗岩发育的 SXX、风成红砂土 SHD 和红色粉砂岩发育的 BH 点上各层的曲线基本平行分布且各层稀土元素含量有一定的差异,稀土元素迁移现象明显,而由玄武岩发育的点 HGY、YL、HAN 上的砖红壤稀土在各层间的迁移并不显著。各采样点各剖面层位 Ce 出现正异常, Ce 异常变化规律基本与 ΣREE 变化规律相反,在表土层和底土层较高,心土层较低。在 QXY、SXX、SHD、BH 的分配曲线上, Eu 出现强烈亏损,而由玄武岩发育的点 HGY、YL、HAN 上的红土各层稀土的分配曲线较平滑, Eu 无较大程度的亏损。Ce、Eu 异常的主要原因是氧化还原条件, Ce 有三价

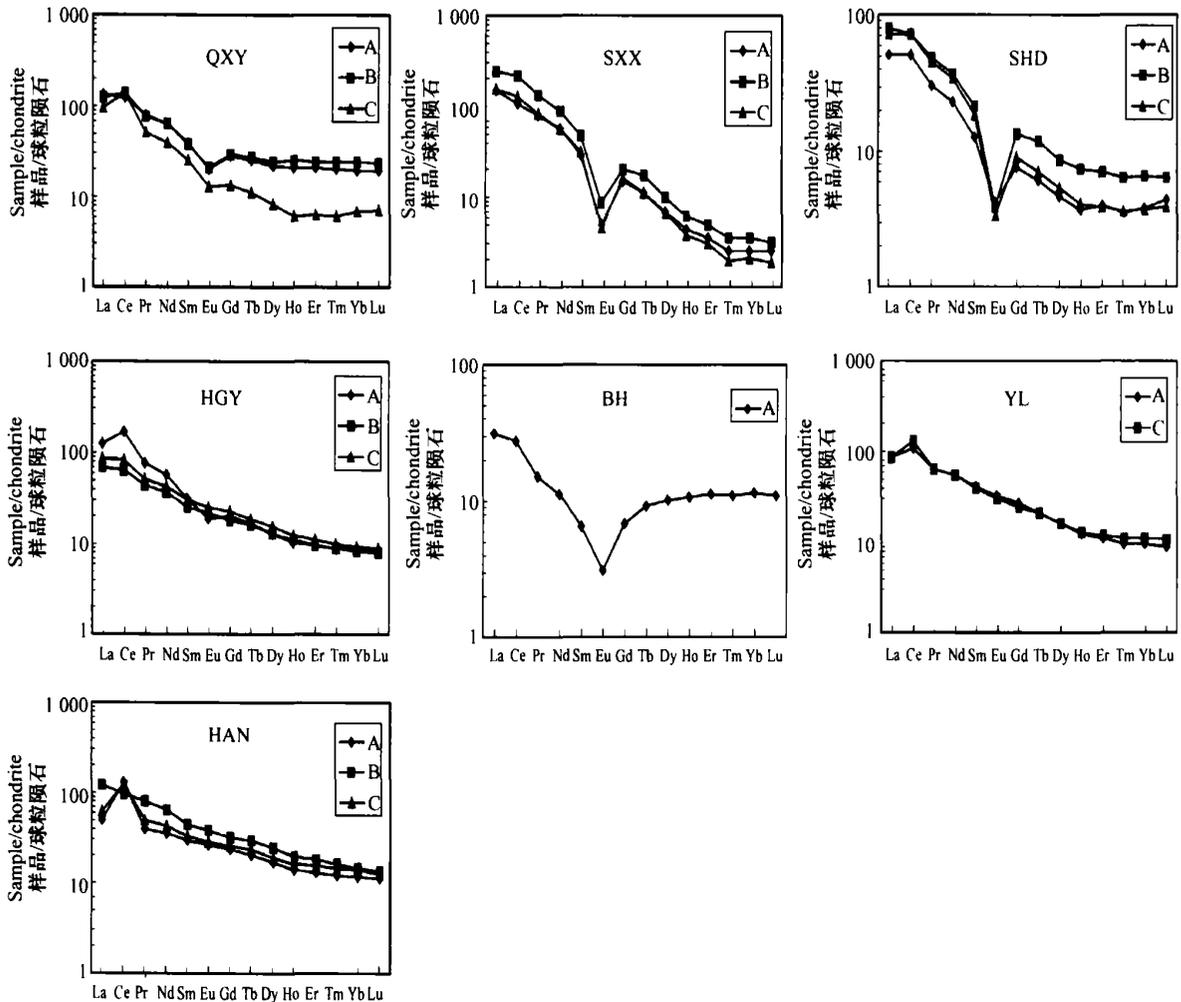


图1 各剖面层稀土元素分配曲线

Fig. 1 Chondrite normalized REE distribution patterns in soil profiles

表 3 各剖面层的稀土元素含量
Table 3 Concentrations of REEs in soil profiles

采样点 Sampling sites	层位 Layer	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ LaREE	Σ PrREE	Σ REE	Σ LaREE / Σ REE	δ Ce	δ Eu
QXY	A	42.26	102.0	9.84	37.82	7.70	1.48	7.31	1.18	7.05	1.49	4.47	0.66	4.12	0.66	201.1	26.95	228.1	7.46	1.14	0.60
	B	39.14	112.8	9.53	38.48	7.43	1.56	7.70	1.30	7.82	1.81	5.14	0.78	5.02	0.79	208.9	30.35	239.3	6.89	1.33	0.63
	C	29.34	114.6	6.35	23.54	4.91	0.94	3.47	0.53	2.71	0.45	1.32	0.20	1.42	0.24	179.7	10.34	190.0	17.39	1.89	0.67
SXX	A	46.64	87.06	9.87	33.81	5.73	0.36	3.86	0.54	2.24	0.31	0.75	0.08	0.52	0.08	183.5	8.39	191.9	21.88	0.91	0.22
	B	75.23	175.1	16.60	53.04	9.14	0.63	5.18	0.82	3.21	0.44	1.02	0.12	0.73	0.11	329.7	11.62	341.3	28.36	1.12	0.26
	C	48.95	103.7	10.25	34.90	6.22	0.34	4.19	0.53	2.11	0.28	0.65	0.06	0.44	0.06	204.4	8.32	212.7	24.55	1.04	0.20
SHD	A	15.82	41.90	3.68	14.10	2.48	0.31	1.96	0.29	1.51	0.27	0.84	0.12	0.79	0.15	78.28	5.92	84.20	13.22	1.25	0.42
	B	25.02	59.22	5.96	22.45	4.19	0.29	3.52	0.56	2.80	0.53	1.48	0.21	1.37	0.21	117.1	10.68	127.8	10.97	1.10	0.23
	C	22.70	59.02	5.58	20.46	3.65	0.24	2.35	0.33	1.73	0.30	0.81	0.12	0.77	0.13	111.6	6.54	118.2	17.06	1.20	0.24
HGY	A	38.59	137.1	9.50	33.83	6.24	1.38	5.29	0.81	4.18	0.74	2.03	0.29	1.88	0.28	226.6	15.50	242.1	14.62	1.63	0.72
	B	21.43	51.39	5.36	22.33	4.98	1.63	4.69	0.78	4.22	0.80	2.04	0.29	1.76	0.27	107.1	14.86	122.0	7.21	1.10	1.03
	C	26.83	68.00	6.31	25.94	5.95	1.84	5.94	0.88	4.97	0.89	2.34	0.33	1.93	0.30	134.9	17.57	152.4	7.67	1.19	0.94
BH	A	9.61	22.24	1.85	6.75	1.29	0.23	1.78	0.44	3.31	0.78	2.38	0.36	2.44	0.37	41.97	11.85	53.82	3.54	1.17	0.47
	A	27.19	87.93	7.90	33.70	7.96	2.45	7.19	1.00	5.22	0.88	2.34	0.31	2.03	0.30	167.1	19.26	186.4	8.68	1.39	0.98
	C	26.74	106.6	7.71	32.99	7.57	2.27	6.40	0.99	5.21	0.93	2.56	0.36	2.34	0.36	183.9	19.15	203.0	9.60	1.71	0.98
HAN	A	15.58	105.8	4.91	21.55	5.73	1.92	6.16	0.97	5.47	1.00	2.70	0.39	2.44	0.37	155.5	19.49	175.0	7.98	2.80	0.99
	B	37.17	78.18	9.71	38.99	8.71	2.79	8.19	1.42	7.74	1.41	3.75	0.52	3.00	0.45	175.5	26.48	202.0	6.63	0.94	1.00
	C	19.26	102.5	6.00	25.37	6.29	2.08	6.63	1.12	6.14	1.17	3.33	0.47	2.88	0.41	161.5	22.14	183.7	7.30	2.21	0.99

离子和四价离子两种,在氧化条件下,易被氧化成稳定的四价离子,易在黏土表面被强烈吸附,在原地保存下来而与其他稀土元素发生分异。在湿热条件下即还原环境中, Eu 的三价阳离子被还原为活性较强的二价阳离子,在强热的淋溶条件下被淋洗从而与其他稀土元素的三价阳离子分异,造成 Eu 亏损。稀土元素在各层位中发生分异,剖面自上而下进行的酸性淋滤作用和黏土吸附反应的耦合是导致稀土分异的主要因素,具体的分异程度受母岩的矿物组合、相对丰度及风化壳发育程度的影响^[17,18]。

2.2 植物叶体中稀土元素的含量特征

2.2.1 植物叶体中稀土元素地球化学特征

植物叶中所有稀土的分布均遵循 Oddo-Harkins 规则,土壤和植物中的稀土元素含量虽然有一定的差异,但是两系统的增减趋势相同,均随着原子序数的增大而递减(见表4)。研究区植物叶体中的稀土较土壤中的稀土含量要低的多,芒萁除外。生长在相同母岩发育土壤上的不同植物稀土元素含量不同,其中以蕨类植物芒萁稀土含量最高,较其他植物稀土含量高100~200倍,表现出极强的积累稀土能力,为研究稀土元素对植物的生理作用以及环境效应提供了一种理想材料。同一属种植物在不同母岩发育的土壤上稀土含量也不同,表现在玄武岩发育的砖红壤即点 HGY、YL、HAN 上和风成红砂土 SHD 点的桉树稀土总

量相对较高,分别为 2.36、8.89、10.78、2.38 mg kg^{-1} ,其次是红色粉砂岩和花岗岩发育的砖壤上的桉树稀土含量为 2.06、1.34 mg kg^{-1} ,石灰岩土壤上生长的桉树稀土含量最低,为 0.92 mg kg^{-1} 。

各植物稀土分配曲线见图2,生长在同一土壤上的各种植物稀土含量尽管差别大,分配曲线却呈现相同的变化趋势,基本与其所在的土壤稀土分配曲线模式一致,但要比土壤曲线陡一些,植物 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 较所在土壤的要大,表明植物更富集轻稀土,重稀土相对贫乏,轻、重稀土元素在土壤-植物系统中的迁移过程中发生了明显的分馏作用。稀土元素在经过各系统的迁移和积聚到达植物体内的长期过程中,又有新的变化: Ce 在采样点 QXY、SXX、SHD、BH 上的植物体中出现轻微的正异常,而在玄武岩发育的 HGY、YL、HAN 上生长的植物出现显著的 Ce 负异常; Eu 的亏损程度有所变化。在同一属种植物的稀土分配曲线随着生长土壤的母岩类型不同而呈现变化,以红色粉砂岩发育的土壤上生长的桉树 $\Sigma\text{LREE}/\Sigma\text{HREE}$ 的值最高,较低的为玄武岩发育的土壤上生存的桉树。在玄武岩发育的土壤上生长的桉树 Ce 出现明显的负异常,而在其他母岩发育的土壤上生存的桉树 Ce 出现正异常。控制植物中稀土元素分布的因素有土壤中副矿物地球化学特性、植物的生理化学特性及其生存土壤的物理化学特性。

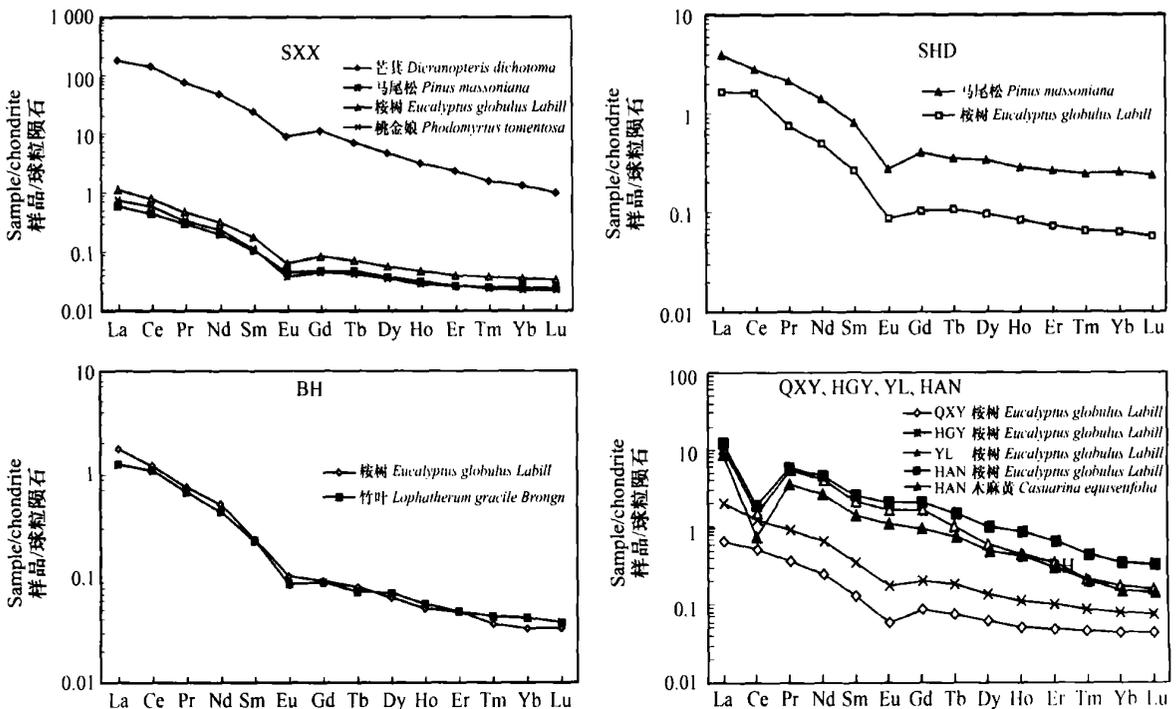


图2 植物稀土分配曲线

Fig 2 Chondrite normalized REE distribution patterns in plants

2.2.2 稀土元素的生物迁移能力 植被通过根系从所生存环境吸收稀土元素,并在植物体中运输迁移。生物吸收系数 BAC 是表示生物选择吸收元素能力的常用指标,常用来表征元素在生物中的迁移能力,可用下式计算^[19]:

$$BAC = L_x / N_x \quad (1)$$

式中, L_x 表示稀土元素 x 在植物灰份中的含量 (mg kg^{-1}), N_x 为该元素在生长该植物的根系土壤中的含量 (mg kg^{-1})。表 5 中显示芒萁的各稀土元素的生物吸收系数在 $10n$ 数量级中 (n 为自然数且 < 10), 而其他植物的在 $n \sim 0. n \sim 0.0n$ 中变化, 表明不同种属的植物对稀土的选择吸收和富集分异能力有一定的差别, 其中以芒萁对稀土元素的吸收要高于其他植

物。土壤 Eu 亏损最大且 L/H 系数最高的 SXX 点上生长的植物吸收 Eu 和重稀土元素强烈, 在其他各采样点相对于其他元素而言, La、Pr、Nd、Sm 的生物吸收系数较高, 属强度吸收元素, Ce 为弱度吸收元素。轻稀土元素除 Ce 外生物吸收系数基本上大于重稀土的生物吸收系数, 但在遂溪西 SXX 采样点上各植物出现相反的变化特点。图 3(a) 是由花岗岩发育的 SXX 土壤上植物稀土元素生物吸收系数变化趋势图, 图 3(b) 为玄武岩发育的海安 HAN 点土壤上生存植物的稀土元素生物吸收系数变化趋势图, 除 SXX 点外, 其他各点各植物的稀土元素生物吸收系数变化曲线图均与图 3(b) 相似。从中看出同一采样点不同属种植物的生物吸收系数不同, 但呈现相同的变化趋势, 即在相同母岩发育的土壤上植物选择吸收

表 5 植物稀土元素生物吸收系数

Table 5 REE biological absorption coefficients of plants

采样点 Sampling sites	植物 Plants	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
QXY	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	0.18	0.13	0.17	0.15	0.12	0.10	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09
SXX	芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	50.45	49.05	38.25	35.69	34.11	75.13	32.78	26.48	31.11	33.33	32.05	29.78	25.28	20.44
	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	0.35	0.32	0.32	0.31	0.32	0.77	0.29	0.38	0.50	0.69	0.76	0.99	1.01	0.99
	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	0.24	0.20	0.19	0.18	0.19	0.41	0.19	0.21	0.29	0.39	0.41	0.54	0.50	0.52
	桃金娘 <i>Phodomyrtus tomentosa</i>	0.29	0.29	0.25	0.25	0.23	0.47	0.19	0.23	0.34	0.43	0.50	0.63	0.62	0.66
	SHD	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	3.66	2.64	3.36	2.97	3.11	4.54	2.87	3.25	4.08	4.56	4.33	4.21	4.29
HGY	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	1.53	1.49	1.19	1.04	1.02	1.43	0.73	0.98	1.16	1.30	1.16	1.13	1.04	0.87
	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	0.58	0.32	0.43	0.39	0.31	0.21	0.26	0.28	0.26	0.26	0.27	0.25	0.25	0.24
BH	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	1.68	1.19	1.40	1.39	1.19	1.35	0.89	0.79	0.68	0.58	0.46	0.34	0.27	0.25
	竹子 <i>Lophatherum gracile Brong</i>	0.40	0.36	0.42	0.39	0.38	0.39	0.30	0.24	0.25	0.21	0.16	0.13	0.11	0.10
YL	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	2.88	0.30	2.04	1.76	1.30	1.38	1.51	1.23	0.96	0.93	0.78	0.56	0.46	0.44
HAN	木麻黄 <i>Casuarina equisetifolia</i>	2.87	0.17	1.64	1.44	1.05	0.92	0.94	0.81	0.64	0.65	0.51	0.36	0.30	0.30
	桉树 <i>Eucalyptus globulus Labill</i>	5.17	0.53	3.47	3.16	2.36	2.28	2.52	2.03	1.71	1.69	1.40	1.05	0.86	0.86

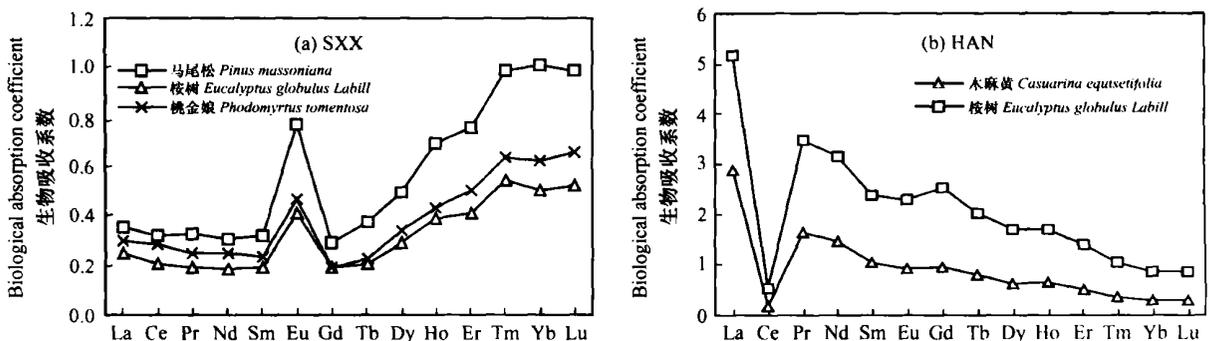


图 3 植物稀土生物吸收系数变化趋势图

Fig 3 Variation of REE biological absorption coefficients of plant

稀土元素的趋势相近,但吸收富集能力不同。同一属种植物在不同的生长环境对稀土的吸收能力亦不同,桉树在稀土元素含量高的SXX和QXY点各元素的生物吸收系数均小于其他各采样点的生物吸收系数,但在稀土含量低的SHD、BH采样点上生长的桉树的稀土元素生物吸收系数较高。这表明植物在稀土元素含量低的生长环境里,可以较强烈地吸收富集稀土元素,但在生长环境稀土含量较高时对高浓度元素的吸收起着明显的抑制和阻碍作用,也就是植物中存在能控制调节体内元素浓度水平的生理垒^[20]或土壤-植物壁垒^[21]使体内稀土元素的富集保持在一定的范围内。

3 结 论

1) 不同母岩发育的土壤以及所生存的植物中的稀土元素含量和分布具有相似之处,又有自己的独特一面。各系统的稀土元素的分布不仅与气候环境,成土过程以及其他的化学因素有关,还与成土母岩有重要关系,成土母岩决定土壤和植物中的化学元素的最初含量,并制约着稀土元素在土壤和植物中的富集、迁移等地球化学行为。

2) 土壤-植物系统各环节间的稀土元素含量差异较大但模式基本相似,稀土总量在土壤各层中发生分异,在心土层和底土层含量较高,表土层含量较低。各层位轻稀土相对富集,重稀土相对贫乏,在植物叶中表现出更强的轻重稀土的分馏作用。Ce和Eu在岩石-土壤-植物系统产生分异现象:Ce由成土母岩的负异常到土壤和部分植物的正异常,在由玄武岩发育的土壤上生长的植物又出现负异常。Eu在各系统中均出现不同程度的亏损。

3) 植物中稀土元素地球化学分配特征是土壤中的稀土元素在环境中迁移、富集和分异的结果。各植物体中稀土元素的含量不同,除继承了稀土元素的地球化学特征之外,还具有自身的生物地球化学作用特征,其稀土分布特征不仅与植物本身的生理特性有关,还与其所在的地质环境背景以及各个稀土元素的化学特性有关。

4) 不同属种的植物对稀土元素具有不同的选择吸收和富集分异作用的能力,生物吸收系数可以作为植物的生物地球化学分类的指标参数之一。

参 考 文 献

[1] 刘英俊,曹励明,李兆麟,等. 元素地球化学. 北京: 科学出

版社, 1984. 194~ 215. Liu Y J, Cao L M, Li Z L, *et al.* Element Geochemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1984. 194~ 215

- [2] 黄成敏, 龚子同. 土壤发育过程中稀土元素的地球化学指示意义. 中国稀土学报, 2000, 18(2): 150~ 156. Huang C M, Gong Z T. Geochemical implication of rare earth elements in process of soil development (In Chinese). Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2000, 18(2): 150~ 156
- [3] 郭伯生, 竺伟民, 雄炳昆, 等. 农业中的稀土. 北京: 中国农业科技出版社, 1985. 13~ 27. Guo B S, Zhu W M, Xiong B K, *et al.* Rare Earth Elements in Agriculture (In Chinese). Beijing: Chinese Agriculture Science and Technology Publishing House, 1985. 13~ 27
- [4] 香山科学会议主编. 香山科学会议十年历程. 北京: 中国环境科学出版社, 2003. 410. Xiang Shan Science Meeting, ed. The Ten Years Journey of Xiang Shan Science Meeting (In Chinese). Beijing: Chinese Environmental Science Press, 2003. 410
- [5] 丁友超, 刘国庆, 王晓蓉. 稀土元素在土壤中的环境化学行为及其生物效应. 农业环境保护, 2002, 1(6): 567~ 569, 576. Ding Y C, Liu G Q, Wang X R. Environmental chemical behaviors of rare earth elements in soil and their biological effects (In Chinese). Agr environment Science, 2002, 1(6): 567~ 569, 576
- [6] 季宏兵, 王立军, 董云社, 等. 稀土元素的环境生物地球化学循环研究现状. 地理科学进展, 2004, 23(1): 51~ 61. Ji H B, Wang L J, Dong Y S, *et al.* An overview on the study of biogeochemical cycle for rare earth elements (In Chinese). Progress in Geography, 2004, 23(1): 51~ 61
- [7] 李徐生, 韩志勇, 杨达源, 等. 镇江下蜀的黄土稀土元素地球化学特征研究. 土壤学报, 2006, 43(1): 1~ 7. Li X S, Han Z Y, Yang D Y, *et al.* REE geochemistry of Xiashu Loess in Zhenjiang Jiangsu Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2006, 43(1): 1~ 7
- [8] 丁士明, 梁涛, 张自立, 等. 稀土对土壤的生态效应研究进展. 土壤, 2004, 36(2): 157~ 163. Ding S M, Liang T, Zhang Z L, *et al.* Advances of ecological effect of rare earths on soil (In Chinese). Soils, 2004, 36(2): 157~ 163
- [9] Ding S M, Liang T, Zhang C S, *et al.* Accumulation and fractionation of rare earth elements in a soil-wheat system. Pedosphere, 2006, 16(1): 82~ 90
- [10] 刘定芳, 王子健. 稀土元素在土壤-玉米体系吸收的剂量效应关系研究. 土壤学报, 2000, 37(3): 364~ 371. Liu D F, Wang Z J. Dose effect relationship for uptake of rare earth elements in corn after application as REE fertilizer (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(3): 364~ 371
- [11] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素. 地球化学, 1996, 25(6): 552~ 558. Liu Y, Liu H C, Li X H. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP-MS (In Chinese). Geochimica, 1996, 25(6): 552~ 558
- [12] 刘铮. 中国土壤微量元素. 南京: 江苏科学技术出版社, 1996. 295. Liu Z. Microelements in Soil of China (In Chinese). Nanjing: Jiangsu Science and Technology Publishing House, 1996.

295

- [13] 王中刚, 于学元, 赵振华. 稀土元素地球化学. 北京: 科学出版社, 1989. 330. Wang Z G, Yu X Y, Zhao Z H. Rare Earth Element Geochemistry (In Chinese). Beijing: Science Press, 1989. 330
- [14] 邢光熹, 朱建国. 土壤微量元素和稀土元素化学. 北京: 科学出版社, 2003. 85. Xing G X, Zhu J G. Microelements and Rare Earth Elements Chemistry in Soil (In Chinese). Beijing: Science Press, 2003. 85
- [15] 付舜珍, 严重玲, 吴善绮, 等. 贵州省典型土壤中稀土元素含量及分布特性. 土壤学报, 2000, 37(1): 109~114. Fu S Z, Yan Z L, Wu S Q, *et al.* Content and distribution characteristics of rare earth elements in typical soils of Guizhou Province (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 109~114
- [16] Boyton W V. Cosmochemistry of the rare earth elements: Meteorite studies. In: Herrdenson P. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 1984. 63~114
- [17] 陈炳辉, 俞受. 华南风化壳中稀土元素的分异作用及其影响因素. 中山大学学报(自然科学版), 1998, 37(2): 92~96.
- Chen B H, Yu S Y. Fractionation of rare earth elements and its effecting factors in weathering crusts in south China (In Chinese). Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 1998, 37(2): 92~96
- [18] 马英军, 霍润科, 徐志方, 等. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 2004, 19(1): 87~94. Ma Y J, Huo R K, Xu Z F, *et al.* REE behavior and influence factors during chemical weathering (In Chinese). Advance in Earth Sciences, 2004, 19(1): 87~94
- [19] Fortescue A C. Environmental Geochemistry. New York: Springer Verlag, 1980. 79~172
- [20] 王将克, 常弘, 廖金凤, 等. 生物地球化学. 广州: 广东科技出版社, 1999. 225. Wang J K, Chang H, Liao J F, *et al.* Biogeochemistry (In Chinese). Guangzhou: Guangdong Science and Technology Publishing House, 1999. 225
- [21] 王宏康. 土壤中金属污染的进展. 环境化学, 1991, 10(5): 35~42. Wang H K. Advances of metal pollution study in soils (In Chinese). Environmental Chemistry, 1991, 10(5): 35~42

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF RARE EARTH ELEMENTS (REEs) IN THE SOIL- PLANT SYSTEM IN WEST GUANGDONG PROVINCE

Miao Li^{1, 2} Xu Ruisong¹ Xu Jinhong^{1, 2}

(1 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Concentrations of rare earth elements (REEs) in soil and plant samples collected from different areas, West Guangdong were determined with the ICP-MS method to study geochemical characteristics of these elements. Results show that no big difference was found within a soil-plant system in REEs distribution pattern, but they were detected between soils derived from different parent materials, with the soils derived from granite being the highest in REE concentration. Within a soil profile, REE concentrations were higher in B and C horizons than in A horizon. Differentiation between light REEs and heavy REEs occurred displaying some extent of negative Eu anomaly changes, while Ce showed positive anomaly in all soil layers. Plants different in genera growing in the same sampling site were quite similar in REE distribution pattern, but plant of the same genera growing in soils derived from different parent materials differed in REE distribution pattern. Obviously, REE distribution in plants are influenced by the soils they grow in and also displays their individual biogeochemical characteristics. Biological absorption coefficients indicate that plants vary sharply in REE absorption capacity. REEs are obviously fractionated when they are transported and migrated from soils to plants, revealing that heavy REEs are relatively sparse.

Key words Soil; Plant; Rare earth element; Geochemical characteristic; Biological absorption coefficient