

成土年龄对雷琼地区玄武岩母质土壤剖面中常量元素迁移的影响^①

张立娟^{1, 2}, 李德成^{1*}, 李徐生^{2*}, 韩志勇², 张甘霖¹

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 以雷琼地区不同发育时序的玄武岩母质土壤为研究对象, 研究了成土年龄对风化成壤作用的影响。结果表明, 成土年龄大的剖面中易溶元素的淋失率高, 体现了迁移累积效应; 而年轻的剖面中元素迁移率则随成土年龄的变化更加明显。故成土年龄对常量元素迁移率的影响具有一定的阶段性特征, 早期影响显著, 当风化成壤作用进行到一定程度后, 成土年龄的影响明显减弱。

关键词: 玄武岩母质土壤; 常量元素; 迁移率; 成土年龄

中图分类号: S151

岩石风化和成壤过程中的元素迁移和再分配能够反映土壤的发育程度和成土环境^[1-3]。元素在成壤过程中因地球化学性质的差异会出现相对富集或淋失, 因此常量元素的淋失或富集特征常作为土壤发育的指标^[4]。土壤的发育过程通常会受到母岩和成土母质、时间、地形、气候以及动植物和人类活动等因素的影响。黄成敏等^[4]对海南岛地区玄武岩上发育的土壤中常量元素的含量与组成特征进行了研究, 得出了强烈风化成壤作用下常量元素的含量特征; Ma 等^[5]对极端风化条件下海南岛北部玄武岩上发育的红土剖面中常量元素和微量元素的迁移和再分配进行了研究。前人对土壤中常量元素的迁移和变化特征的研究主要集中于气候(纬度)的影响方面^[6-8], 而对不同风化成壤年龄的土壤中常量元素的迁移率变化特征及其累积效应和过程缺乏深入研究。雷琼地区分布有不同喷发时代的玄武岩, 在湿热的气候条件下, 风化成壤作用强烈, 形成了除成土年龄外, 其他成土因素相同或相近的玄武岩母质土壤序列, 为研究成土年龄对土壤剖面中常量元素迁移的影响提供了良好的材料。

由于土壤中常量元素的迁移和再分配受母岩影响较大^[5,9,10], 因此, 本文同时采集了雷琼地区玄武岩母质土壤和玄武岩母岩样品, 计算了各剖面常量元素相对其母岩的迁移率。在此基础上, 分析了雷琼地区玄

武岩母质土壤在强烈风化成壤过程中常量元素的迁移过程。本研究可为深入研究强烈风化成壤作用下土壤的形成过程提供参考依据。

1 材料与方法

采样点位于雷州半岛南部和海南岛北部的玄武岩分布区。该区分布有不同喷发年龄的玄武岩^[11-12], 由于土壤年龄的直接测定仍存在许多问题^[13], 且鉴于理论上玄武岩喷出地表, 风化成壤作用就随之开始, 玄武岩喷发年龄可以近似代替该区土壤发育年龄。选择 6 个不同时期喷发的玄武岩上发育的红壤剖面(表 1), 玄武岩年龄测定均为 K-Ar 测年^[11-12], 具有一定的可比性。在野外根据土壤的主要形态特征将剖面分为 A、B、BC 3 个发生层次, 再在各发生层内分层采样, 共采集 53 个土壤样品, 同时分别采集 6 个剖面的玄武岩母岩样品, 共获得 59 个备测样品(表 1)。采样时, 尽量选择在地貌部位相似、没有明显侵蚀堆积的地点采样, 使得影响这些剖面的成土因素相同或相近, 从而形成一个成土年代由远及近的土壤剖面系列。

对所采土壤和玄武岩样品的常量元素含量, 采用偏硼酸锂熔融-等离子发射光谱仪(ICP-AES)法, 测试仪器为 IRIS advantage, 测试地点为中国科学院南京

①基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-409)和国家自然科学基金项目(40771091, 40625001)资助。

* 通讯作者(dcli@issas.as.cn; lixusheng@nju.edu.cn)

作者简介: 张立娟(1985—), 女, 山东肥城人, 硕士研究生, 研究方向为地表过程与环境演变。E-mail:zhanglijuan728@163.com

表 1 采样地点与玄武岩母质土壤剖面特征

Table 1 Location and characteristics of basalt-derived soil profiles

采样地点	剖面号	采样深度 (cm)	样品个数	成土年龄 (Ma)
海口市十字路镇美仪村	HN01	65	5	0.01 ^[11]
海口市东山镇创造村	HN02	95	5	0.59 ^[11]
海口市永发镇于吴村	HN03	165	8	1.33 ^[11]
徐闻县龙塘镇牛郎村	LZ03	315	14	1.79 ^[11]
徐闻县海安镇加洋村	LZ05	415	18	3.04 ^[12]
徐闻县海安镇迈龙村	LZ08	225	9	6.12 ^[12]

土壤研究所。另外测量了所有土壤样品的粒度, 使用 Mastersizer 2000G 型激光粒度仪, 在南京大学地表过程与环境演变实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 常量元素含量

表 2 为雷琼地区玄武岩母质土壤及其母岩中常量元素的含量, 可以发现 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 含量最高, 三者合计平均值为 818.5 g/kg。其中 SiO_2 含量最高, 平均为 348.6 g/kg, 但也明显低于上地壳平均值(UCC) 660 g/kg^[14]; Fe_2O_3 含量平均值为 202.5 g/kg, 高于上

陆壳平均值 50.0 g/kg^[14]; Al_2O_3 含量平均值为 268.4 g/kg, 也明显高于上陆壳平均值 152.0 g/kg^[14]; CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 含量很低, 除个别样品外均小于 10 g/kg; TiO_2 含量变化于 23.0 g/kg ~ 69.0 g/kg 之间, 亦明显高于上陆壳平均值 5 g/kg。对比各剖面土壤和母岩中常量元素含量变化, 可以看出, 各剖面常量元素含量变化特征相似, SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 K_2O 、 Na_2O 均较母岩含量减少产生淋失, 而 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 TiO_2 含量较母岩增加, 产生富集。说明雷琼地区不同成土年龄的玄武岩母质土壤均经历了强烈的风化淋溶过程和脱硅富铁铝作用。

表 2 雷琼地区玄武岩及其母质土壤中常量元素含量 (g/kg)

Table 2 Macro element contents in the basalts and basalt-derived soils in Leiqiong area

剖面代号	采样分层 (cm)	采样深度 (cm)	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	TiO_2
HN01	0 ~ 16	8	398.5	159.5	15.1	186.2	5.7	16.1	5.3	40.1
	16 ~ 40	28	414.5	172.0	6.2	209.4	5.4	12.5	3.5	44.8
	40 ~ 60	50	416.9	176.6	8.4	213.2	5.4	15.1	3.7	44.2
	60 ~	65	413.9	177.4	8.2	215.1	5.1	19.3	3.4	42.5
	母岩		521.9	178.3	82.3	108.6	8.8	56.2	22.0	16.5
HN02	0 ~ 18	9	379.9	214.8	3.6	209.3	2.3	4.2	1.2	69.0
	18 ~ 37	27	367.2	225.8	1.1	219.1	2.3	2.9	0.9	61.5
	37 ~ 90	63	336.7	248.4	2.2	236.0	1.6	2.5	0.8	47.2
	90 ~	95	333.7	244.2	4.7	234.1	1.4	6.7	0.9	48.2
	母岩		522.0	185.3	81.5	96.4	8.1	39.1	21.5	20.3
HN03	0 ~ 15	7	327.3	257.6	4.6	197.2	1.9	3.6	0.3	45.2
	15 ~ 40	27	328.5	274.9	4.7	202.0	2.2	2.8	0.8	44.3
	40 ~ 60	50	329.1	280.0	3.7	201.8	2.4	2.6	0.8	45.7
	60 ~ 90	75	327.3	278.9	0.5	208.3	2.2	2.6	0.4	47.8
	90 ~ 118	104	333.7	275.0	0.3	207.8	2.4	2.5	0.3	48.0
	118 ~ 160	139	328.7	266.8	0.1	221.6	1.9	2.3	0.2	44.5
	160 ~	165	375.5	238.0	4.5	208.4	1.9	14.0	2.6	36.4
母岩		529.6	171.0	78.2	101.0	13.1	60.6	23.0	18.2	
LZ03	0 ~ 3	2	350.2	273.4	5.1	192.6	0.9	5.9	1.3	23.0
	3 ~ 25	14	349.8	275.8	4.7	193.8	0.8	3.5	0.5	23.7
	25 ~ 50	37	330.7	269.5	4.4	206.0	1.1	2.1	0.4	26.4

续表 2

	50 ~ 60	55	331.0	272.5	2.8	204.8	1.1	2.0	0.3	26.9
	60 ~ 80	70	332.6	275.2	0.7	211.6	0.9	1.9	0.2	26.8
	80 ~ 110	95	332.5	272.8	0.9	212.0	1.1	2.3	0.3	27.8
	110 ~ 140	125	338.6	284.4	0.6	202.6	0.6	2.4	0.1	24.7
	140 ~ 170	155	341.3	287.4	0.9	197.6	0.7	2.5	0.3	24.1
	170 ~ 200	185	338.6	285.0	0.6	203.0	0.5	2.6	0.0	24.3
	200 ~ 220	210	335.6	285.5	0.8	205.3	0.6	2.7	0.5	25.4
	220 ~ 242	231	335.2	283.3	0.9	206.6	0.4	2.6	0.1	26.3
	242 ~ 270	256	334.0	281.7	0.8	209.7	0.4	2.9	0.5	26.7
	270 ~ 310	290	333.2	277.5	1.0	210.3	0.4	3.8	0.3	27.9
	母岩		531.5	180.1	80.0	96.7	7.3	59.2	21.1	12.5
LZ05	0 ~ 3	2	332.6	259.9	2.1	187.6	2.1	3.0	0.8	29.8
	3 ~ 18	10	334.2	269.8	1.2	192.6	1.7	2.5	0.6	30.3
	18 ~ 38	28	341.2	290.8	0.7	189.2	1.3	2.0	0.6	25.5
	38 ~ 70	54	345.4	293.6	0.6	188.3	1.3	1.8	0.8	24.2
	70 ~ 100	85	336.4	304.5	0.5	194.0	1.0	1.7	0.3	24.9
	100 ~ 120	110	331.9	294.9	1.0	200.8	1.0	1.7	0.3	26.9
	120 ~ 170	145	335.2	289.4	1.0	206.7	0.8	1.7	0.3	27.1
	170 ~ 190	180	337.7	286.6	1.2	206.1	0.8	1.8	0.5	26.4
	190 ~ 220	205	346.8	287.4	1.3	206.0	0.6	1.8	0.4	26.5
	220 ~ 250	235	344.8	281.9	1.5	212.4	0.5	1.7	0.4	26.4
	250 ~ 280	265	342.8	285.5	1.6	215.5	0.6	1.6	0.7	26.3
	280 ~ 300	290	344.9	285.3	1.5	216.7	0.5	1.6	0.5	26.7
	300 ~ 330	315	346.2	282.8	1.5	212.6	0.6	1.6	1.3	26.4
	330 ~ 360	345	351.5	283.0	1.7	201.7	0.6	1.8	0.6	26.4
	360 ~ 390	375	350.8	281.7	1.8	200.4	0.6	1.6	0.9	26.1
	390 ~ 410	400	351.2	288.6	1.5	192.5	0.4	1.5	0.5	27.3
	410 ~	415	342.9	275.9	1.6	219.2	0.2	1.6	0.6	28.7
	母岩		506.1	199.5	83.3	101.4	5.2	57.1	23.0	14.6
LZ08	0 ~ 20	10	366.3	275.5	3.0	181.8	1.2	3.1	0.7	31.9
	20 ~ 45	32	361.8	283.7	2.0	175.5	1.1	2.6	0.8	28.3
	45 ~ 80	63	361.0	286.7	3.5	176.2	1.1	2.5	0.8	27.2
	80 ~ 120	100	359.6	284.1	2.0	180.7	1.1	2.3	0.8	29.4
	120 ~ 150	135	351.2	289.1	1.4	184.2	0.6	1.9	0.4	25.9
	150 ~ 195	172	352.7	283.3	1.4	191.5	0.5	1.9	0.4	28.2
	195 ~ 220	207	356.3	285.2	3.9	188.3	0.6	2.0	0.6	29.3
	220 ~	225	356.4	280.8	1.7	187.5	0.6	2.0	0.4	29.8
	母岩		508.3	192.2	85.7	90.6	15.3	60.8	27.2	15.0

2.2 成土年龄对风化强度的影响

化学蚀变指数 (CIA)、硅铝率 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) 和硅铁铝率 ($\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$) 作为判断表生化学风化强度的地化指标被广泛应用。表 3 对这几个指标进行了计算。可以看出, 仅 HN01 剖面 CIA 指数平均值略低, 为 87.8, 其余剖面 CIA 指数已达到 97 以上, 且出现随成土年龄增大而增大的现象。一般地, CIA 值介于 50 ~ 65 之间, 反映寒冷干燥的气候条件下低等的化学风化程度; CIA

值介于 65 ~ 85 之间, 反映温暖、湿润条件下中等的化学风化程度; CIA 大于 85, 则反映炎热、潮湿气候条件下强烈的化学风化程度^[15]。从 CIA 值反映的情况看, 雷琼地区玄武岩母质土壤整体已达到强烈化学风化阶段。

一般认为, 随风化作用的进行, 脱硅富铁铝化程度增大, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 逐渐减小。图 1 为雷琼地区玄武岩母质土壤剖面中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$

随深度的变化曲线,可以看出,成土年龄较小的 HN01、HN02、HN03 三个剖面 (0.01 ~ 1.33 Ma), 随成土年龄增加, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 逐渐减小, 表明成土年龄小于约 1.33 Ma 时, 脱硅作用仍然显著; 而成土

年龄较大的 LZ03、LZ05、LZ08 三个剖面 (1.79 ~ 6.12 Ma), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 值与 HN03 剖面的相差不大, 表明成土年龄大于约 1.33 Ma 以后, 脱硅作用就不显著了。

表 3 雷琼地区玄武岩母质土壤剖面化学风化强度指标
Table 3 Indices of soil weathering in basalt-derived soils in Leiqiong area

剖面代号	采样分层	采样深度 (cm)	CIA	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$	剖面代号	采样分层	采样深度 (cm)	CIA	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$	
HN01	0 ~ 16	8	81.5	4.25	2.44	LZ05	0 ~ 3	2	98.0	2.18	1.49	
	16 ~ 40	28	91.0	4.10	2.31		3 ~ 18	10	98.8	2.11	1.45	
	40 ~ 60	50	89.2	4.01	2.27		18 ~ 38	28	99.2	1.99	1.41	
	60 ~	65	89.6	3.97	2.24		38 ~ 70	54	99.2	2.00	1.42	
	平均值		87.8	4.08	2.31		70 ~ 100	85	99.5	1.88	1.34	
HN02	0 ~ 18	9	96.2	3.01	1.85	100 ~ 120	110	99.2	1.91	1.33		
	18 ~ 37	27	98.5	2.76	1.71	120 ~ 170	145	99.2	1.97	1.35		
	37 ~ 90	63	97.9	2.30	1.43	170 ~ 190	180	99.0	2.00	1.37		
	90 ~	95	96.1	2.32	1.44	190 ~ 220	205	98.9	2.05	1.41		
	平均值		97.2	2.60	1.61	220 ~ 250	235	98.8	2.08	1.40		
HN03	0 ~ 15	7	96.7	2.16	1.45	250 ~ 280	265	98.6	2.04	1.38		
	15 ~ 40	27	96.6	2.03	1.38	280 ~ 300	290	98.7	2.06	1.38		
	40 ~ 60	50	97.2	2.00	1.37	300 ~ 330	315	98.3	2.08	1.41		
	60 ~ 90	75	99.4	2.00	1.35	330 ~ 360	345	98.6	2.11	1.45		
	90 ~ 118	104	99.6	2.06	1.39	360 ~ 390	375	98.4	2.12	1.46		
	118 ~ 160	139	99.9	2.09	1.37	390 ~ 410	400	98.8	2.07	1.45		
	160 ~	165	95.0	2.68	1.72	410 ~	415	98.6	2.11	1.40		
	平均值		97.8	2.15	1.43	平均值		98.8	2.04	1.41		
	LZ03	0 ~ 3	2	96.0	2.18	1.50	LZ08	0 ~ 20	10	97.6	2.26	1.59
		3 ~ 25	14	96.7	2.16	1.49		20 ~ 45	32	98.3	2.17	1.55
25 ~ 50		37	96.9	2.09	1.40	45 ~ 80		63	97.3	2.14	1.54	
50 ~ 60		55	98.0	2.07	1.40	80 ~ 120		100	98.3	2.15	1.53	
60 ~ 80		70	99.4	2.05	1.38	120 ~ 150		135	98.9	2.06	1.47	
80 ~ 110		95	99.2	2.07	1.39	150 ~ 195		172	98.9	2.12	1.48	
110 ~ 140		125	99.6	2.02	1.39	195 ~ 220		207	97.2	2.12	1.49	
140 ~ 170		155	99.3	2.02	1.40	220 ~		225	98.7	2.16	1.51	
170 ~ 200		185	99.6	2.02	1.39	平均值			98.2	2.15	1.52	
200 ~ 220		210	99.2	2.00	1.37							
220 ~ 242		231	99.4	2.01	1.37							
242 ~ 270		256	99.2	2.02	1.37							
270 ~ 310		290	99.2	2.04	1.38							
平均值			98.6	2.06	1.40							

从表生风化成土作用的过程来看, 愈近地表, 遭受的风化成土作用愈强, 理论上 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 值在剖面中的分布应呈从上部到下部逐渐增大的趋势。但此次研究的 6 个剖面均未按此规律变化。成土年龄相对较大的 HN03、LZ03、LZ05、LZ08 四个剖面的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 值随剖面深度变化不

大, 反映各层次脱硅富铁铝化程度较为相近, 各层脱硅作用均较为彻底; 成土年龄较小的 HN01、HN02 剖面的 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 值甚至出现上部大而下部小的异常现象。冯志刚等^[16]对中国南方红土风化壳的研究中也曾发现红土剖面上部常出现 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3$ 比值不降反升的现象, 并提出两种可能解释:

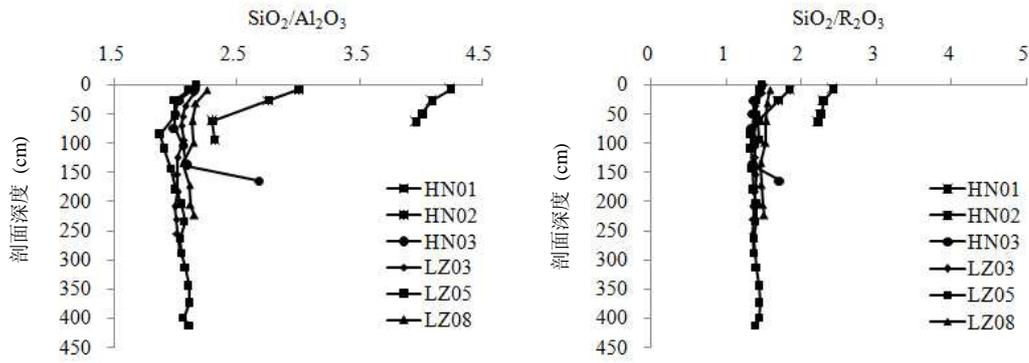


图 1 雷琼地区玄武岩母质土壤剖面中 SiO₂/Al₂O₃、SiO₂/R₂O₃ 值随深度变化曲线

Fig. 1 SiO₂/Al₂O₃ and SiO₂/R₂O₃ with depth in the basalt-derived soils in Leiqiong area

一是原生石英在表生作用下的相对残余富集；二是铁、铝氧化物及黏土矿物的机械淋洗作用。并认为在热带湿热条件下，红土中大量易风化矿物被分解、黏土化，以石英为主的抗风化矿物组成土壤的骨架，铁铝氧化物以及黏土矿物以雨水为载体沿土壤孔隙或裂隙下渗或被地表径流带走，从而造成 SiO₂ 富集，而铁、铝氧化物相对贫化。通过进一步研究认为第二种可能更好地解释了 SiO₂/Al₂O₃ 和 SiO₂/R₂O₃ 比值上升的现象。

研究中的土壤剖面是由玄武岩风化成土而形成的。一般玄武岩中原生石英含量较少，因此很难用原生石英在表生作用下的相对残余富集来解释 HN01、HN02 剖面的 SiO₂/Al₂O₃、SiO₂/R₂O₃ 值出现上部大而

下部小的异常现象。分析 HN01、HN02 剖面的粒度组成（图 2），结果表明由浅至深，HN01、HN02 剖面黏粒含量先增大后减小，黏粒含量的峰值出现在约 30 cm 的深度，粉砂含量则整体出现逐步增大的趋势。说明剖面上部（深度约 < 30 cm）粉砂含量较高，颗粒较粗，这可能是细颗粒被机械淋溶的结果，使得铁铝氧化物及黏土矿物向下迁移或淋失，导致 SiO₂ 的相对富集。可见，雷琼地区玄武岩母质土壤上部 SiO₂/Al₂O₃、SiO₂/R₂O₃ 异常增大的原因可能与冯志刚等^[16]讨论的相似。本区土壤剖面上部（深度约 < 30 cm）的 SiO₂/Al₂O₃ 和 SiO₂/R₂O₃ 普遍存在偏大的现象，而在成土年龄小的剖面上（约 < 0.59 Ma）尤为明显。

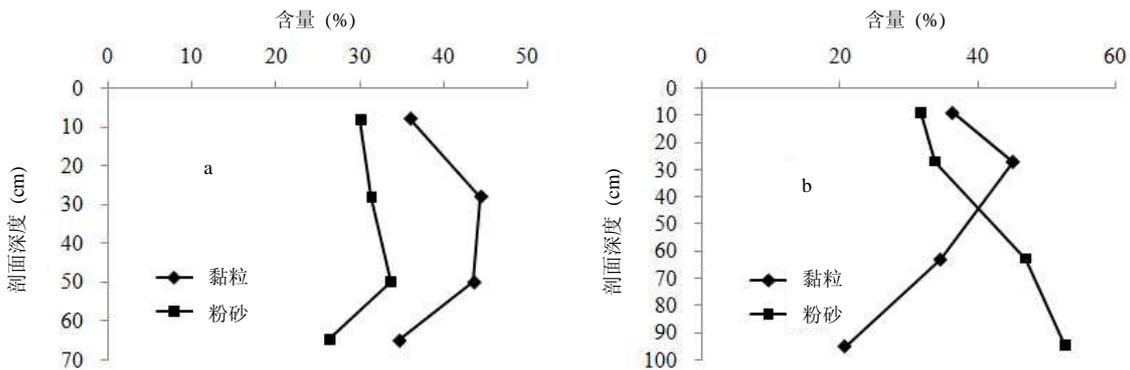


图 2 HN01、HN02 剖面黏粒、粉砂含量随深度变化曲线（a 为 HN01，b 为 HN02）

Fig. 2 Contents of clay and silt particles with depth in HN01 and HN02

2.3 成土年龄对常量元素迁移率的影响

风化成壤过程中，活动性强的元素遭淋失会导致稳定元素含量的相对增加，因此元素的绝对含量往往不能真实地反映风化成壤过程中元素的迁移或富集。为了消除这种影响，常选用一种稳定元素作为参比，

计算样品中常量元素的迁移率。一般认为风化成壤过程中较为稳定元素有 Ti^[17]、Al^[18]、Zr^[19]等。由于 Ti、Zr 为微量元素，含量少，取样过程会产生较大误差，因此本文以 Al 为稳定元素计算了常量元素的迁移率，计算公式如下^[20]：

$$\Delta X(\%) = [(X_s/I_s) / (X_r/I_r) - 1] \times 100\% \quad (1)$$

式中, X_s 、 X_r 分别为 X 元素在土壤和岩石中的含量; I_s 、 I_r 分别是稳定元素在土壤和母岩中的含量。 $\Delta X > 0$ 表示该元素在成土过程中发生富集, $\Delta X < 0$ 则为亏损或迁移。

2.3.1 成土年龄对常量元素迁移顺序的影响 图3显示了不同剖面常量元素的活动性与迁移顺序。根据迁移顺序的不同可以将6个剖面分成两种类型, 其中HN01、HN02、HN03三个剖面属于第一种类型, 成土年龄较小 (< 1.33 Ma), 这类剖面的

常量元素相对铝的迁移顺序相同(图3), 均为: $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2$; 而LZ03、LZ05、LZ08三个剖面属于第二种类型, 成土年龄较大 (> 1.33 Ma), 常量元素的迁移顺序则为 $\text{CaO} > \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O} > \text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{TiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3$ 。对比两种类型土壤剖面的常量元素活动性顺序可以看出, 易溶元素的迁移顺序相同, 而稳定元素 Fe_2O_3 、 TiO_2 的迁移顺序则出现变化。这个现象说明成土年龄仅对土壤剖面稳定元素的迁移顺序有影响。

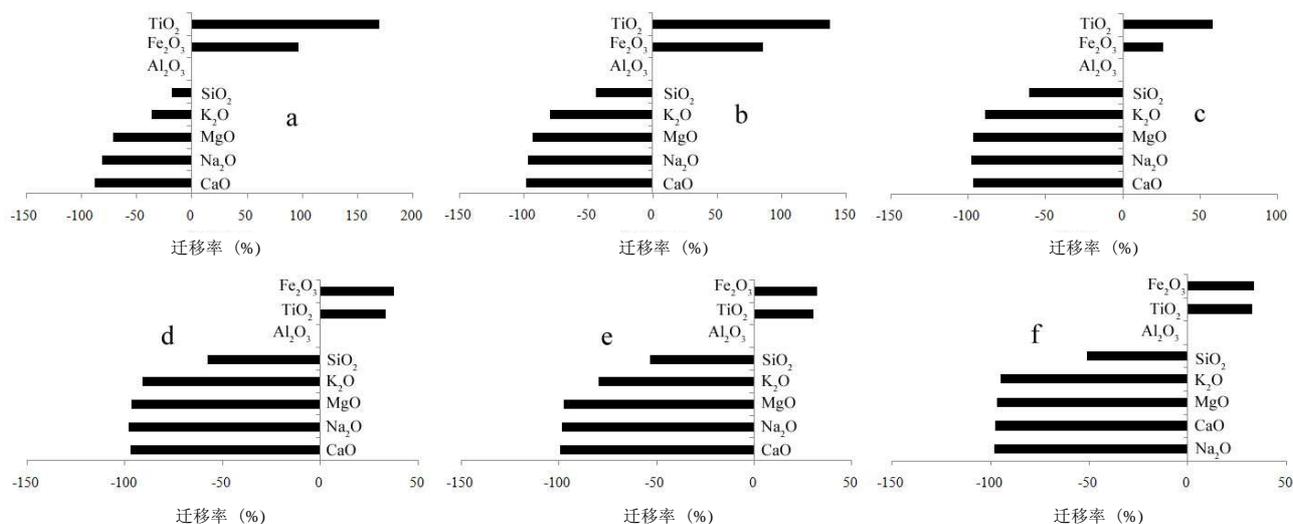


图3 雷琼地区玄武岩母质土壤剖面常量元素相对于铝元素的迁移率 (a为HN01, b为HN02, c为HN03, d为LZ03, e为LZ05, f为LZ08)

Fig. 3 Mobilization ratio of macro elements of basalt-derived soils based on element Al

2.3.2 易溶元素迁移率随成土年龄的变化过程 图4显示了常量元素迁移率随成土年龄的变化特征, 可以看出成土年龄大的土壤剖面易溶元素的迁移率要高于成土年龄小的剖面(图4a), 体现了迁移累积效应, 且年轻剖面迁移率随成土时间的变化幅度更大。这样也可以将研究剖面分为两种类型, 第一种类型的成土年龄 < 1.33 Ma, CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 迁移率均为负值, 产生淋失(图4a), 且随成土年龄的增加, CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 淋失率均逐渐增大, 尤其以成土年龄 < 0.59 Ma 的剖面更为明显, 反映盐基离子的大量淋失和强烈脱硅作用主要发生在成土作用开始至 1.33 Ma 之间, 表明在成土作用的早期 CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 、 SiO_2 迅速淋失, 成土年龄对易溶元素的淋失影响深重; 第二种类型的成土年龄 > 1.33 Ma, CaO 、 MgO 、 Na_2O 、 K_2O 淋失充分(图4a), 脱硅作用也已达较高水平, 随成土年龄继续增大, 各种

易溶元素的迁移率基本不变, 保持稳定, 说明在成土作用的后期, 成土年龄对易溶元素的淋失影响较小。

2.3.3 稳定元素迁移率随成土年龄的变化过程 图4b为稳定常量元素迁移率随成土年龄的变化, 可以看出, 在整个成土过程中, Fe_2O_3 、 TiO_2 的迁移率均为正值, 产生富集。成土年龄 < 1.33 Ma 的土壤剖面, Fe_2O_3 、 TiO_2 的富集程度随成土年龄的增加而降低, 说明在该区持续的强烈风化作用下, 相对稳定的元素 Fe_2O_3 、 TiO_2 在不断富集的基础上也可能产生了绝对淋失, 即在成土作用早期, 成土年龄对稳定元素的富集存在较大影响; 而在成土年龄 > 1.33 Ma 的土壤剖面中, Fe_2O_3 、 TiO_2 的富集率基本保持在 30% 左右, 说明随成土年龄的继续增加, Fe_2O_3 、 TiO_2 的迁移率基本不变, 即在成土作用后期, 成土作用对稳定元素富集程度的影响减小。

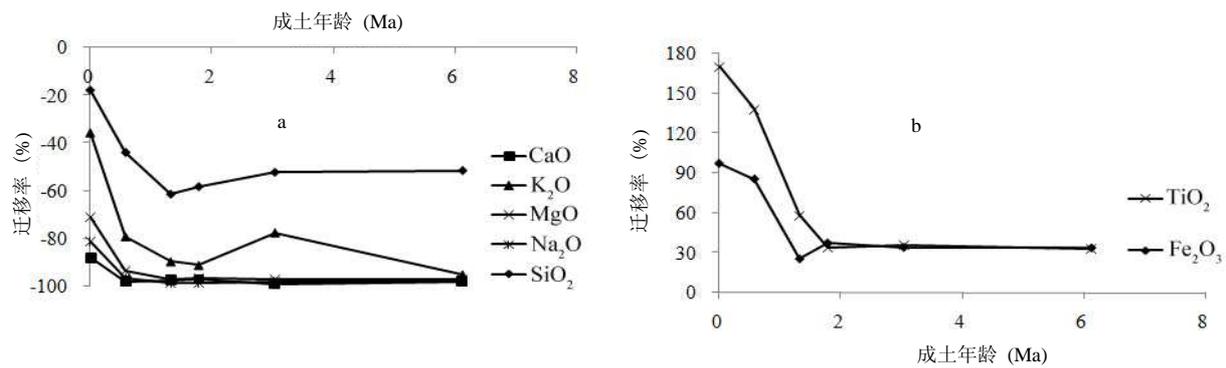


图 4 常量元素迁移率随成壤年龄的变化特征 (a 为易溶常量元素, b 为稳定常量元素)

Fig. 4 Mobilization of macro elements with soil ages

由此可以看出, 成土年龄对风化成壤作用产生了显著影响, 且对常量元素的迁移顺序、迁移率的影响表现出一定的阶段性特征, 在风化作用的早期影响较为显著, 当风化成壤作用进行到一定程度以后, 成土年龄的影响明显减弱。

3 结论

雷琼地区玄武岩母质土壤剖面均经历了强烈的风化成壤作用, 脱硅富铁铝化明显。成土年龄对土壤剖面中常量元素的迁移以及化学风化强度都有明显的影响。随成土年龄的增加, SiO₂/Al₂O₃、SiO₂/R₂O₃ 逐渐减小, 并且在剖面上随深度的变化也减小, 红土剖面上部常出现 SiO₂/Al₂O₃、SiO₂/R₂O₃ 比值不降反升的现象在成土年龄小的剖面中更加显著。

研究剖面可以分为两种类型, 第一种类型 (成土年龄 < 1.33 Ma), CaO、MgO、Na₂O、K₂O、SiO₂ 强烈而迅速淋失, 且淋失率随成土年龄的增加而明显增加, Fe₂O₃、TiO₂ 显著富集且富集率随成土年龄的增加而出现减小趋势, 反映随风化作用的加深, 稳定元素在相对富集的基础上亦可能存在一定程度的淋失; 第二种类型 (成土年龄 > 1.33 Ma), CaO、MgO、Na₂O、K₂O、SiO₂ 已遭充分淋失, 随成土年龄增加, 淋失率变化不大, Fe₂O₃、TiO₂ 富集率也趋于稳定。说明成土年龄对风化成壤作用的影响具有一定的阶段性特征, 早期影响显著, 当风化成壤作用进行到一定程度后, 成土年龄的影响明显减弱。

参考文献:

[1] Braun JJ, Pagel M, Herbillin A, Rosin C. Mobilization and redistribution of REEs and thorium in a syenitic lateritic profile: A mass balance study. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993,

57(18): 4 419-4 434

- [2] 朱丽东, 周尚哲, 李凤全, 叶玮, 崔嫻. 金衢盆地 TX 红土剖面元素迁移特征. *海洋地质与第四纪地质*, 2007, 27(1): 117-123
- [3] 张丽萍, 朱大奎, 杨达源. 长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征. *地理学报*, 2001, 56(5): 515-522
- [4] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生的化学特性研究. *热带地理*, 2001, 21(3): 207-212
- [5] Ma JL, Wei GJ, Xu YG, Wen GL, Sun WD. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(13): 3 223-3 237
- [6] 吴月照, 潘懋. 中国东部玄武岩地区母岩及土壤元素含量变化规律研究. *环境科学进展*, 1993, 1(5): 26-36
- [7] 赵其国, 王振权, 刘兆礼. 我国富铝化土壤发生特性的初步研究. *土壤学报*, 1983, 20(4): 333-348
- [8] 陈静生, 洪松, 邓宝山, 潘懋. 中国东部花岗岩、玄武岩及石灰岩上土壤微量元素含量的纬向分异. *土壤与环境*, 1999, 8(3): 161-167
- [9] Nesbitt HW, Markovics G. Weathering of granodioritic crust long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(8): 1 653-1 670
- [10] 徐瑞松, 徐金鸿, 苗莉, 朱照宇. 华南红土主元素表生地球化学特征. *地球化学*, 2006, 35(5): 547-552
- [11] 葛同明, 陈文寄, 徐行, 李大明, 樊利民, 李齐, 文思郁, 王昕. 雷琼地区第四纪地磁极性年表—火山岩钾-氩年龄及古地磁学证据. *地球物理学报*, 1989, 32(5): 550-558
- [12] 朱炳泉, 王慧芬. 雷琼地区 MORB-OIB 过渡型地幔源火山作用的 Nd-Sr-Pb 同位素证据. *地球化学*, 1989, (3): 193-201
- [13] Tsai H, Maejima Y, Hseu ZY. Meteoric ¹⁰Be dating of highly weathered soils from fluvial terraces in Taiwan. *Quaternary*

- International, 2008, 188: 185-196
- [14] Talor SR, McLennan SM. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. London: Blackwell, 1985: 276-277
- [15] 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同刚. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. *地学前缘*, 2003, 10(4): 539-544
- [16] 冯志刚, 王世杰, 孙承兴. 引起红土表层硅铝比值增大原因的可能性探讨. *地质地球化学*, 2002, 30(4): 7-14
- [17] Zhang GL, Pan JH, Huang CM, Gong ZT. Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 2007, 24(2): 261-269
- [18] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 陈英勇, 王永波, 杨达源. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征. *地理学报*, 2007, 62(11): 1 174-1 184
- [19] Langley-Turnbaugh SJ, Bockheim JG. Mass balance of soil evolution on late Quaternary marine terraces in coastal Oregon. *Geoderma*, 1998, 84(4): 265-288
- [20] 黄成敏, 龚子同. 海南岛北部玄武岩上土壤发生研究III.元素地球化学特征. *土壤学报*, 2002, 39(5): 643-652

Effects of Soil Age on Macro Element Mobilization of Basalt Derived Soils in Leizhou Area

ZHANG Li-juan^{1,2}, LI De-cheng¹, LI Xu-sheng², HAN Zhi-yong², ZHANG Gan-lin¹

(1 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences)*, Nanjing 210008, China;

2 *School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)*

Abstract: We studied the effect of soil age on the weathering and soil forming processes of the chronosequential soils derived from basalts in Leiqiong area. The result showed that easy dissolving elements mobilized faster in profiles formed earlier, reflecting mobilization accumulation; in profiles formed late, mobilization changed obviously with the increase of the soil age. The effect of soil age on the macro-element mobilization was significant at the earlier stage but then weakened significantly when pedogenesis to a certain degree.

Key words: Basalt-derived soil, Macro-element, Rate of mobilization, Soil age