

涠洲岛和斜阳岛红色风化壳粘土矿物和化学特征及成土环境研究

葛 坦^{1,2} 韩江伟^{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 100049)

摘要:选择涠洲岛和斜阳岛的两个玄武岩风化壳和一个凝灰岩风化壳,用 X 射线粉晶衍射法(XRD)和 X 射线荧光光谱法(XRF)分别测定了风化剖面各层粘土矿物和主量元素。结果表明:各风化剖面粘土矿物以 7×10^{-10} m 埃洛石为主,且普遍含有针铁矿和赤铁矿,表明风化程度较高。风化剖面表层化学特征指标出现异常变化,其中一个剖面表层含有次生方解石支持了存在海岛复盐基作用对风化壳的影响。风化剖面底层的化学特征指标和粘土矿物亦表明地下水对风化壳的发育有着重要影响。热带季风气候仍然是控制该地区风化壳发育的主要因素,但海岛环境特有的复盐基作用和地下水也对风化壳的发育产生了一定影响。

关 键 词:粘土矿物;化学特征;成土环境;涠洲岛和斜阳岛

中图分类号:P619.23+1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2009)01-0203-11

涠洲岛和斜阳岛是南海北缘北部湾海域内的一对姊妹火山岛,涠洲岛位于广西北海市正南 36 海里处,面积 26.74 km²,斜阳岛在涠洲岛东南 9 海里处,面积 1.89 km²。两岛地表分布着大面积第四纪火山岩,在热带海洋性季风气候条件下已形成红色风化壳。涠洲岛和斜阳岛火山岩是雷琼第四纪火山岩的重要组成部分,雷琼第四纪火山岩红色风化壳蕴含丰富的环境变化信息,前人已对陆域环境下的雷琼第四纪火山岩风化壳做过一些研究^[1-3],但海岛环境下火山岩风化壳的地球化学特征及演化规律尚属研究空白。本研究以涠洲岛和斜阳岛的 3 个红色风化壳剖面为例,试通过对剖面粘土矿物特征和元素地球化学特征的研究,探讨涠洲岛和斜阳岛红色风化壳的气候-环境意义及海岛风化壳与陆域风化壳成土环境属性的差异。

1 涠洲岛和斜阳岛的地质及地理概况

涠洲岛和斜阳岛的大地构造分区属南海盆地北缘的北部湾拗陷区^[4],同时又处于中国东南大陆的

大陆边缘^[5,6]。涠洲岛北面是已成为大陆的钦州古洋盆,南面和东面为隔海的雷琼第四纪裂谷玄武岩所环绕。涠洲岛地区受太平洋板块、印度板块和欧亚板块的共同作用,新华夏构造域和喜山构造域在此重叠和复合^[6-8]。此外,这里已被确认是南海地幔热柱活动的范围^[9],右旋走滑的红河深断裂东南端穿过该区域进入南海盆地北缘^[10],地幔热柱和红河断裂的共同作用是涠洲岛和斜阳岛深源玄武质岩浆形成和喷出的主要原因。

涠洲岛和斜阳岛的火山活动分为 3 个喷发旋回:早—中更新世溢流式岩浆喷发、晚更新世射气岩浆喷发及全新世溢流相玄武质熔岩和碎屑流喷发,各旋回火山喷发形成的火山岩地层相应为中更新统石垌岭组(Q_{3s})、上更新统湖光岩组(Q_{3h})和全新统鳄鱼山组(Q_{4e})。早—中更新世溢流玄武岩是涠洲岛的造岛基岩,岛内横路山锅盖岭为早—中更新世盾形火山锥,其溢出的熔岩向四周漫溢,形成中心高,四周低的盾形地形。斜阳岛古火山口外侧分布着中更新世球状风化玄武岩,是中更新世斜阳岛的造岛基

收稿日期:2008-06-15;改回日期:2008-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40676070;40672121)资助。

作者简介:葛 坦,男,1984 年生,硕士生,研究方向为环境地球化学;E-mail:getan516@163.com。

岩,而斜阳村火山及涠洲岛南湾火山则产生于晚更新世射气岩浆喷发,间有岩浆喷发,火山碎屑岩和基浪堆积物覆盖了两座火山岛,在新构造运动和风化作用下,形成了两岛现代地貌景观。全新世火山活动作用范围小,仅见于涠洲岛鳄鱼山南端和斜阳岛南部的婆湾^[11, 12]。于涠洲岛横路山锅盖岭和斜阳岛古火山口采集 2 件新鲜玄武岩样品,样品的 $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/(\text{SiO}_2 - 39)$ 均大于 0.37,属碱性玄武岩类^[13]。

涠洲岛和斜阳岛位于热带季风气候区,年均气温 22.6℃,年均降水量 1 380.2 mm,与同纬度的内陆相比,降雨量偏少,干燥度较高,但光照强,热量足,全年 $>10^\circ\text{C}$ 积温可达 8 305℃,为广西积温最高的地方,有利于原生矿物发生强烈风化,适合红色风化壳发育^[14]。

2 样品采集与分析

2.1 样品采集

经野外踏勘,选择 3 处中更新世红色风化壳剖面作为研究对象(图 1)。在涠洲岛横路山锅盖岭的简易公路边,发现一处较新鲜的玄武岩风化壳剖面,海拔高度 27.5 m,地理位置 $21^\circ02'28''\text{N}$, $109^\circ05'40''\text{E}$,剖面出露约 2 m,底部出露新鲜玄武岩,采集样品 16 件,剖面上部红土每 5cm 采集一个样品,下部风化玄武岩每 30 cm 采集一个样品;在斜阳岛古火山口的一处玄武岩风化壳剖面采集 10 件样品,采样密度为每 10 cm 一个,该剖面海拔高度为 84.7m,地理位置 $20^\circ54'32''\text{N}$, $109^\circ12'25''\text{E}$,剖面出露约 1 m,此处采样点未发现新鲜玄武岩,在附近海拔约 83.5 m 处采集一件新鲜玄武岩样品;另于涠洲岛北港一处凝灰岩风化壳剖面采集 11 件样品,采样密度为每 10 cm 一个,该采样点海拔高度为 18.9 m,地理位置 $21^\circ04'06''\text{N}$, $109^\circ07'22''\text{E}$,剖面出露约 1.1 m,底部出露风化凝灰岩。样品采样深度及形态描述见表 1。

2.2 样品制备及分析

风化壳样品经缩分、烘干、剔除植物根系后分成两份。一份选各剖面若干代表样,用常规方法将样品在去离子水中分散,经自然沉降法分离出粘粒($<2\ \mu\text{m}$),制备定向薄片(自然风干),用 X 射线粉晶衍射分析法(仪器型号:Rigaku D/max-1200 型 X 射线衍射仪;测试条件:管压 40 kV,管流 30 mA, Cu 靶,扫描范围 $3\sim70^\circ$,扫描速度 $5^\circ/\text{min}$)测定粘土的矿物成分。另一份用玛瑙研钵磨至 200 目以下, X 射线荧光

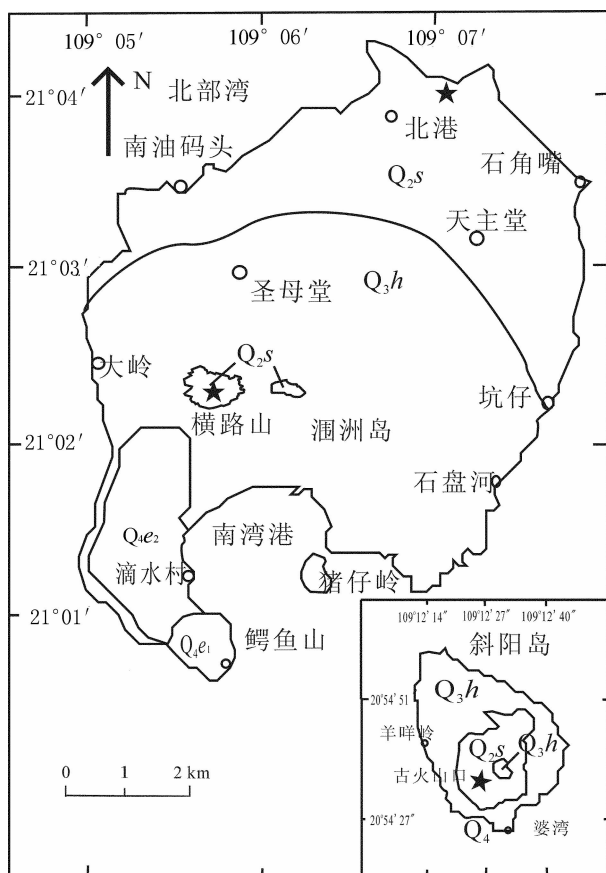


图 1 采样剖面的地理位置(据李昌年等^[9]修改)

Q_{2s}—中更新统石埭岭组; Q_{3h}—上更新统湖光岩组;
Q_{4e1}—全新统鳄鱼山组下段; Q_{4e2}—全新统鳄鱼山组上段;
★—采样点

Fig. 1 Location of the sampling section
(modified from Li Changnian et al^[9])

Q_{2s}—Middle Pleistocene Shimaoling Formation; Q_{3h}—Upper Pleistocene Huguangyan Formation; Q_{4e1}—Lower Member of Holocene E'yushan Formation; Q_{4e2}—Upper Member of Holocene E'yushan Formation; ★—Sampling point

光谱法(仪器型号:Rigaku ZSX100e 型 X 射线荧光光谱仪)分析主量元素,包括 SiO_2 、 Al_2O_3 、 TFe_2O_3 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、 TiO_2 、 MnO 和 P_2O_5 ,分析方法精度小于 3%。测试工作在中国科学院广州地球化学研究所完成。

3 结果与讨论

3.1 粘土矿物特征

如图 2 所示,各风化剖面粘土矿物的衍射峰多呈宽阔而弥散状,矿物结晶度较差,表明经受了强烈的风化淋溶作用^[15]。按照任磊夫等^[16]提出的划分高

表 1 涠洲岛和斜阳岛红色风化壳剖面岩石采样深度及化学特征指标值
Table 1 Sampling depth, sample description and chemical
characteristic indices of the weathering profiles in the Weizhou Island
and the Xieyang Island

剖面	样号	深度/cm	岩性	CIA	ba值	SiO ₂ /Al ₂ O ₃
涠 洲 岛 横 路 山 锅 盖 岭 玄 武 岩 风 化 壳	HLS-1	5	褐红色土	63.26	1.16	3.70
	HLS-2	10	褐红色土	61.95	1.23	3.72
	HLS-3	15	褐红色土	65.32	1.06	3.72
	HLS-4	20	褐红色土	68.74	0.92	3.68
	HLS-5	25	浅红褐色土	70.36	0.85	3.65
	HLS-6	30	浅红褐色土	67.52	1.00	3.73
	HLS-7	35	褐色土	67.25	0.98	3.73
	HLS-8	40	褐色土	74.07	0.74	3.66
	HLS-9	45	褐色土	72.43	0.79	3.81
	HLS-10	50	褐色含砾土	53.14	1.78	4.19
	HLS-11	80	灰色土	40.98	2.82	4.82
	HLS-12	110	灰色土	54.21	1.78	4.06
	HLS-13	140	球状风化玄武岩	42.26	2.65	4.95
	HLS-14	170	球状风化玄武岩	32.90	3.82	5.97
	HLS-15	200	球状风化玄武岩	31.67	3.94	6.19
	HLS-16	230	玄武岩基岩	31.55	4.11	6.27
斜 阳 岛 古 火 山 口 玄 武 岩 风 化 壳	XY-1	10	砖红色土	91.85	0.46	3.88
	XY-2	20	砖红色土	92.15	0.44	3.78
	XY-3	30	砖红色土	91.76	0.46	3.74
	XY-4	40	砖红色土	92.15	0.38	3.59
	XY-5	50	砖红色土	91.79	0.44	3.81
	XY-6	60	砖红色土	90.98	0.46	3.74
	XY-7	70	砖红色含砾土	91.70	0.39	3.67
	XY-8	80	砖红色含砾土	85.88	0.55	3.62
	XY-9	90	黄色风化玄武岩	31.66	4.68	6.09
	XY-10	100	半风化玄武岩	37.22	4.69	6.72
	XY-11	110	玄武岩基岩	34.92	3.76	6.54
涠 洲 岛 北 港 凝 灰 岩 风 化 壳	BG-1	10	赤红色细粒砂质土	49.97	1.09	17.92
	BG-2	20	赤红色细粒砂质土	55.94	0.85	16.69
	BG-3	30	赤红色细粒砂质土	87.00	0.21	8.20
	BG-4	40	赤红色细粒砂质土	91.02	0.15	7.41
	BG-5	50	赤红色细粒砂质土	91.01	0.15	7.60
	BG-6	60	红色细粒砂质土	90.74	0.16	7.10
	BG-7	70	红色细粒砂质土	90.33	0.16	6.51
	BG-8	80	浅红黄色土	91.26	0.15	6.57
	BG-9	90	浅红黄色土	89.90	0.17	6.74
	BG-10	100	杂色含砾土	77.93	0.57	8.52
	BG-11	110	风化凝灰岩	68.71	1.07	10.22

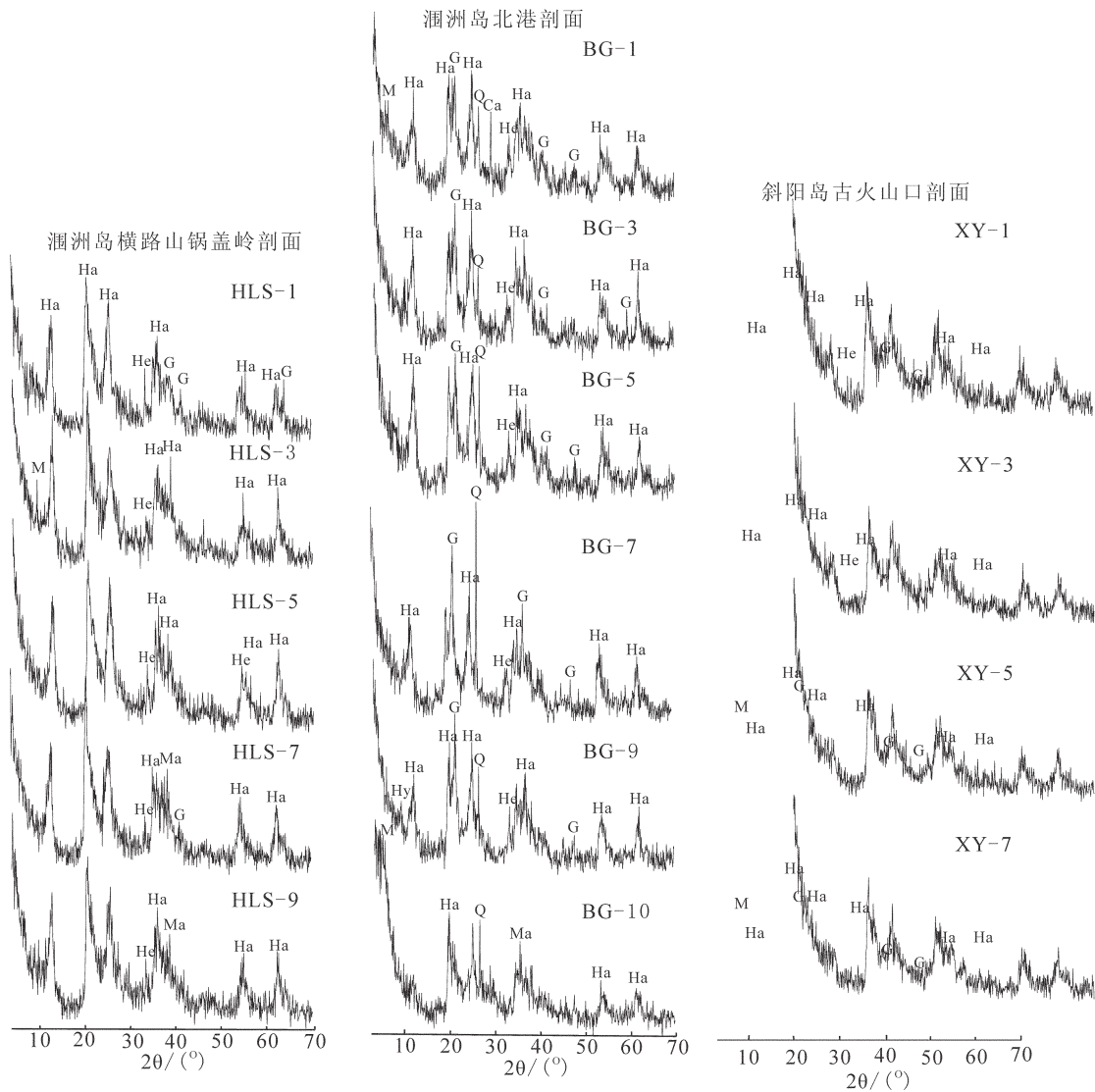


图 2 涠洲岛和斜阳岛各风化剖面代表样品粘土矿物 X 射线粉晶衍射图谱

Ha— 7×10^{-10} 埃洛石;G—针铁矿;He—赤铁矿;Ma—磁铁矿;M—蒙脱石;Q—石英;Ca—方解石;Hy— 10×10^{-10} m 埃洛石

Fig.2 X-ray diffraction patterns of the typical clay fraction extracted from each weathering profile in the Weizhou Island and the Xieyang Island

Ha— 7×10^{-10} halloysites; G—Goethite; He—Hematite; Ma—Magnetite; M—Montmorillonite; Q—Quartz; Ca—Calcite;Hy— 10×10^{-10} halloysites

岭石和 7×10^{-10} m 埃洛石的原则,可判定各剖面粘土矿物均以 7×10^{-10} m 埃洛石为主。涠洲岛横路山锅盖岭剖面样品的粘土矿物中 7×10^{-10} m 埃洛石含量为 80%~85%,斜阳岛古火山口剖面中 7×10^{-10} m 埃洛石含量为 65%~70%,涠洲岛北港剖面多数样品 7×10^{-10} m 埃洛石含量为 69%~90%,但该风化壳下部层位样品 (BG-10) 7×10^{-10} m 埃洛石含量只有 28%,而蒙脱石含量可达 54%。埃洛石是风化程度极高的矿物,主要存在于湿热的热带和亚热带地区土壤中,在地形坡度

较大,母岩构造破碎严重且降雨充足的地区,风化壳内部水溶液渗透速率大,流动性好,长石的风化产物主要是埃洛石^[17]。在中国南方部分风化残积型高岭土矿床的构造裂隙处,已形成的高岭石甚至可以转化成埃洛石^[18]。徐义芳等^[19]研究了雷南碱性玄武岩风化型红土,发现碱性玄武岩在水化作用较高和氧化作用较低的环境下发生淋溶作用,所形成的红土中埃洛石和绿泥石含量丰富。研究区各剖面地势起伏较大(周围均有低山),风化壳内部构造裂隙发育,

水溶液流动性较好,其物理、化学条件有利于埃洛石的形成。除 $7\times 10^{-10}\text{m}$ 埃洛石外,在斜阳岛古火山口剖面下部还存在蒙脱石、涠洲岛北港剖面下部还存在 $10\times 10^{-10}\text{m}$ 埃洛石等风化程度较低的粘土矿物,这符合一般原位风化残积风化壳的演化特征。涠洲岛北港剖面下部层位粘土中蒙脱石含量超过 50%则与地下水作用密切相关,构造裂隙发育为地下水运移提供通道,凝灰岩在水流作用下发生了蒙脱石化作用,因而产生了含量较高的蒙脱石矿物。各剖面均未见三水铝石,尽管斜阳岛古火山口风化红土具有砖红壤的特征(晒干后不可逆地变成坚硬如砖的棕红色粘土),却也未见砖红壤的特征矿物三水铝石^[20]。三水铝石是土壤发生强烈富铝化作用的产物,一般出现在红色风化壳上部脱硅富铝化作用强烈的层位,本研究区虽然处于热带季风气候条件之下,具备土壤发生强烈富铝化作用所需的气候条件,但海岛土壤承受的复盐基作用又减缓了富铝化作用,从而破坏了三水铝石形成的环境,而靠近海岸,受复盐基作用影响较大的涠洲岛北港剖面表层样品(BG-1)的粘土矿物中甚至出现了含量为 7% 的细粒方解石,此外,该层粘土矿物样品中亦含有 3% 的蒙脱石,显然是复盐基作用造成表层土壤局部偏碱性,使得蒙脱石没有完全风化。各剖面粘粒部分均同时含有赤铁矿和针铁矿,这通常是热带亚热带土壤在成土过程中的次生矿物,值得注意的是,涠洲岛横路山锅盖岭和北港剖面下部层位出现磁铁矿,土壤中的磁铁矿多为母质成分残遗^[21],而两剖面的成土母岩碱性玄武岩及凝灰岩均不含磁铁矿,故此磁铁矿是在地下水作用形成的低 Eh 环境下,赤铁矿发生还原反

应而形成。

涠洲岛和斜阳岛 3 个剖面粘土矿物组成符合铁铝型残积风化壳的一般特征,但也体现出了海岛环境独特的复盐基作用和地下水作用对风化剖面的改造。

3.2 地球化学特征

岩石不同阶段的风化程度通常用化学蚀变指数(CIA)来描述,该值是风化壳全岩各类矿物和胶结物总的化学元素迁移与富集的比例,代表了风化壳化学风化自然作用的总体特征。CIA 的定义如下^[22]:

$$\text{CIA}=[\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{CaO}^*+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]\times 100$$

式中各氧化物均为其摩尔数,CaO*为与硅酸盐结合的 CaO,按 McLennan^[23]推荐的方法计算。CIA 值越大,表明风化作用越强。而风化壳成土过程中,土壤盐基淋溶强度则用土壤风化淋溶系数(ba 值)来表征,ba 值是土壤中盐基与 Al_2O_3 的摩尔比率。常以 $(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO}+\text{MgO})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 表示。在表生环境下,Al 是稳定性元素,因而不易被淋溶,而 Na、K、Ca、Mg 等盐基易受淋洗,ba 值小,表明脱盐基多,淋溶作用强。 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (摩尔比)多用于表征成土作用程度^[24, 25],其比值越小,表明成土程度越高。笔者采用 CIA、ba 值和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 三类指标来描述风化特征(表 1,图 3)。

由图 3 可以看到,各剖面 CIA 值总体上是从剖面下部至上部增大的,而 ba 值和 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 从剖面下部至上部减小,并与 CIA 值呈反相位变化。表明涠洲岛和斜阳岛红色风化壳大致呈正常风化趋势,从 CIA 与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 相关关系(图 4)亦可判定各风化剖面是正常发育的,其 CIA 与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 呈正相

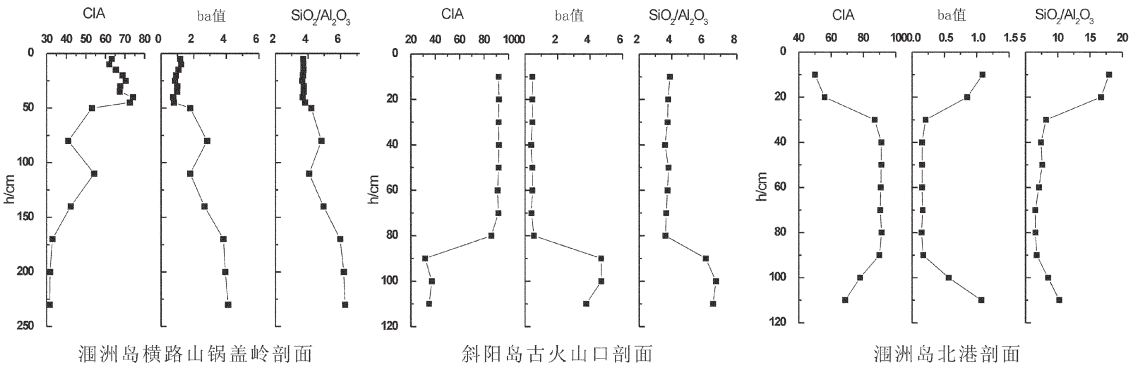


图 3 涠洲岛和斜阳岛各风化剖面 CIA、ba 值及 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化曲线

Fig.3 Variation of CIA, ba value and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratio of each weathering crust profile in the Weizhou Island and the Xieyang Island

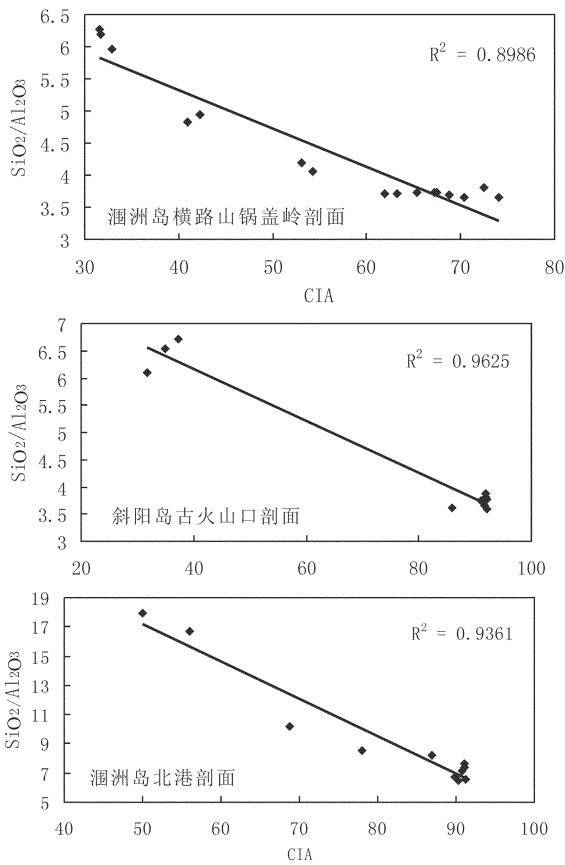


图4 涠洲岛和斜阳岛各风化剖面 CIA 与 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 相关关系图

Fig.4 Correlation between CIA and $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ of each weathering profile in the Weizhou Island and the Xieyang Island

关系^[26]。然而,各剖面的化学特征指标都有不同程度的波动,斜阳岛古火山口剖面和涠洲岛北港剖面的化学特征指标在岩-土界面附近呈现出突变的现象,这意味着在岩-土界面附近,除了地表岩石在温度变化、大气降水、生物等因素作用下发生的化学风化以外,还存在其他自然因素的作用,联系矿物学的证据,推测该现象可能由地下水作用引起。而涠洲岛横路山锅盖岭剖面风化红土部分 CIA 值从下部到上部逐渐减小,北港剖面表层土壤的 CIA 值较剖面下部突然减小,甚至低于剖面底部的风化母岩,则支持了海岛复盐基作用对风化剖面表层土壤的影响。朱照宇等^[26]对粤西雷州半岛 4 个喜山期后期玄武岩风化壳的化学特征指标进行了统计,结果表明,CIA 值为 82.91~97.92, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值为 1.73~5.29。涠洲岛横路山锅盖岭剖面的 CIA 最大值为 74.07,远

低于雷州半岛第四纪玄武岩风化壳的风化程度,斜阳岛古火山口剖面的红土部分 CIA 值为 85.88~92.15, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值在 3.59~3.88,则表明该风化壳风化程度及成土作用程度均较高。

CIA 值为 50~65,反映低等的化学风化程度,为 65~85 之间,反映温暖、湿润条件下中等的化学风化程度,为 85~100,反映炎热、潮湿的热带亚热带条件下强烈的化学风化程度^[27]。风化作用的地球化学过程在很大程度上受长石蚀变作用的控制,Na/K 比(摩尔比)是衡量样品中斜长石风化程度的指标,由于斜长石的风化速率远大于钾长石,因此,风化剖面的 Na/K 与其风化程度成反比^[28]。将各剖面样品的 CIA 值和 Na/K 投点到坐标系中(图 5),涠洲岛横路山锅盖岭剖面及斜阳岛古火山口剖面样品的 Na/K 与 CIA 值基本呈负相关关系。Na/K 揭示的剖面风化程度与 CIA 值揭示的状况基本一致,横路山锅盖岭剖面的样品大部分处于中等及初等风化阶段,而斜阳岛古火山口剖面的样品处于强烈风化阶段,但该剖面底部风化玄武岩的风化程度很低,且不具有过渡层。而涠洲岛北港剖面的成土母质 Na 含量较低,因而样品的 Na/K 较低且差异不显著,不能很好地反映化学风化的程度,但 CIA 值却很好地表明该风化壳存在一个渐变的化学风化过程。

Nesbitt 等^[29]根据质量平衡原理,长石淋溶实验和矿物稳定性的热力学计算提出了用于化学风化趋势预测的 A-CN-K (即 $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}$)三

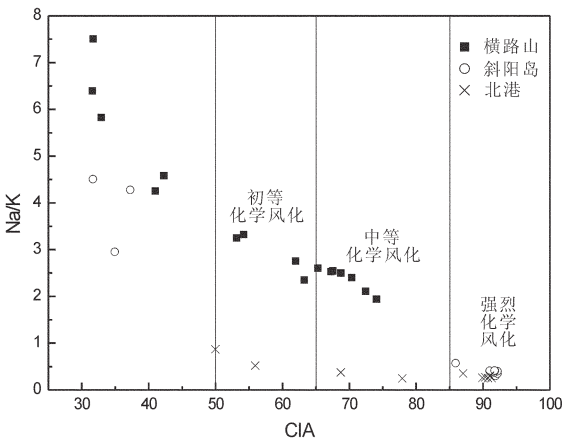


图5 涠洲岛和斜阳岛风化剖面 CIA 与 Na/K 关系散点图

Fig.5 Scattering diagram of CIA versus Na/K of weathering profiles in the Weizhou Island and the Xieyang Island

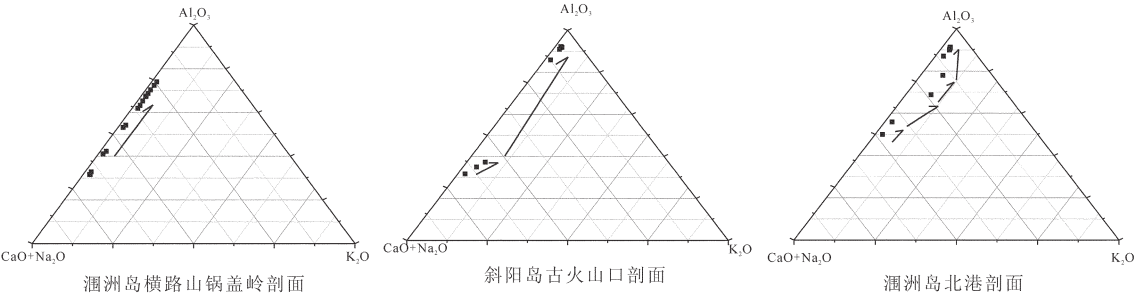


图 6 涠洲岛和斜阳岛各风化剖面化学成分 A-CN-K 三角图

Fig.6 Ternary diagram of molecular proportions A-CN-K of each weathering profile in the Weizhou Island and the Xieyang Island

角模型图(图 6),此模型可以反映化学风化趋势及化学风化过程中主成分和矿物的变化。涠洲岛横路山锅盖岭和斜阳岛古火山口剖面的风化趋势总体上从偏 CN-A 轴开始,向 A 端元趋近,符合一般基性岩的化学风化规律,斜阳岛古火山口剖面的富铝化作用比涠洲岛横路山锅盖岭剖面更强。酸性火山岩的风化趋势一般先趋向 K-A 轴,然后向 A 端元趋近,体现明显的脱钾过程,而基性岩钾长石含量低,风化趋势因而没有明显的脱钾过程,涠洲岛北港凝灰岩为英安质成分,其风化趋势符合酸性火山岩的一般趋势,且富铝化作用较强。

元素的绝对含量变化往往不能真实地反映风化成壤过程中元素的地球化学行为。因为在化学风化过程中,活动性元素的淋失或剖面体积的缩小会直接造成样品中稳定性元素浓度的增加,从而掩盖这一过程中元素迁移或富集的真实情况。因此,一般选择某一稳定性元素(如 Ti、Al 和 Zr 等)作为参照,计算样品中其他元素的变化率来获知元素迁移或富集的程度:

$$\Delta X(\%) = [(X_s/I_s)/(X_p/I_p) - 1] \times 100$$

式中 X_s 、 I_s 分别代表样品中元素 X 和稳定性元素 I 的含量, X_p 、 I_p 分别表示上述元素在原始母质中的含量。若 $\Delta X > 0$, 则说明元素 X 相对 I 富集, $\Delta X < 0$ 反映元素 X 相对 I 亏损^[30]。涠洲岛北港剖面底部凝灰岩风化最弱,故以此层近似代表该剖面的风化母岩。笔者选择 Al 作为风化过程中的稳定性元素,将其他元素与母岩中的相比较来衡量风化过程中各元素的活动性。各元素相对于 Al_2O_3 的变化率随 CIA 的变化趋势见图 7。随着风化作用的进行,各剖面的元素除 MnO 外,均显示出逐渐亏损的趋势,反映了硅酸

盐矿物的风化,活动性元素从剖面中淋失的现象,而 Mn 在矿物最初的风化阶段以还原态释放,往剖面上层随氧逸度的升高,其含量有所上升^[31]。多数样品的 SiO_2 、 CaO 、 Na_2O 、 K_2O 、 MgO 、 P_2O_5 的 $\Delta X < 0$, 且 $|\Delta X| > 10$, 说明这些元素发生了明显的迁移,具有活动性元素的特征。值得注意的是,斜阳岛古火山口剖面下部岩-土界面处半风化岩石的碱金属及碱土元素 $\Delta X > 0$, 这也是地下水与剖面相互作用的重要表现,地下水将风化剖面上部淋溶下来的活动性元素滞留在岩-土界面处,造成界面处活动性元素出现富集现象。而涠洲岛北港剖面表层样品的 Na_2O 、 K_2O 和 MgO 虽然相对 Al_2O_3 亏损,但 CaO 却相对富集,这与许多海岛红壤、赤红壤表土的盐基组成中, Ca 含量较高相一致^[32, 33]。各剖面 TiO_2 的 $|\Delta X|$ 大多小于 10, 相对 Al_2O_3 表现出轻微亏损或富集,是剖面中典型的稳定性元素。玄武岩风化剖面的 TFe_2O_3 相对 Al_2O_3 的迁移率较小,属稳定性元素,但凝灰岩风化剖面的 TFe_2O_3 却有较高的富集,在风化程度较高的层位尤为显著,表明随风化程度增加,富铁化作用明显。

3.3 成土过程及环境意义

热带亚热带炎热而干、湿交替的气候条件有利于岩石发生强烈的化学风化,化学风化过程也是涠洲岛和斜阳岛 3 个红色风化壳经历的最显著的成土过程,这个过程包括原生矿物的风化,碱金属和碱土金属淋溶及脱硅富铁铝化 3 个阶段。3 个风化壳粘土矿物中针铁矿、赤铁矿、 7×10^{-10} m 埃洛石等稳定性矿物丰富,且矿物组合简单,指示了成土母质化学风化程度较深^[34]。土壤富铁化作用强烈,以斜阳岛古火山口剖面尤为显著,其样品风干后的硬化现象,源

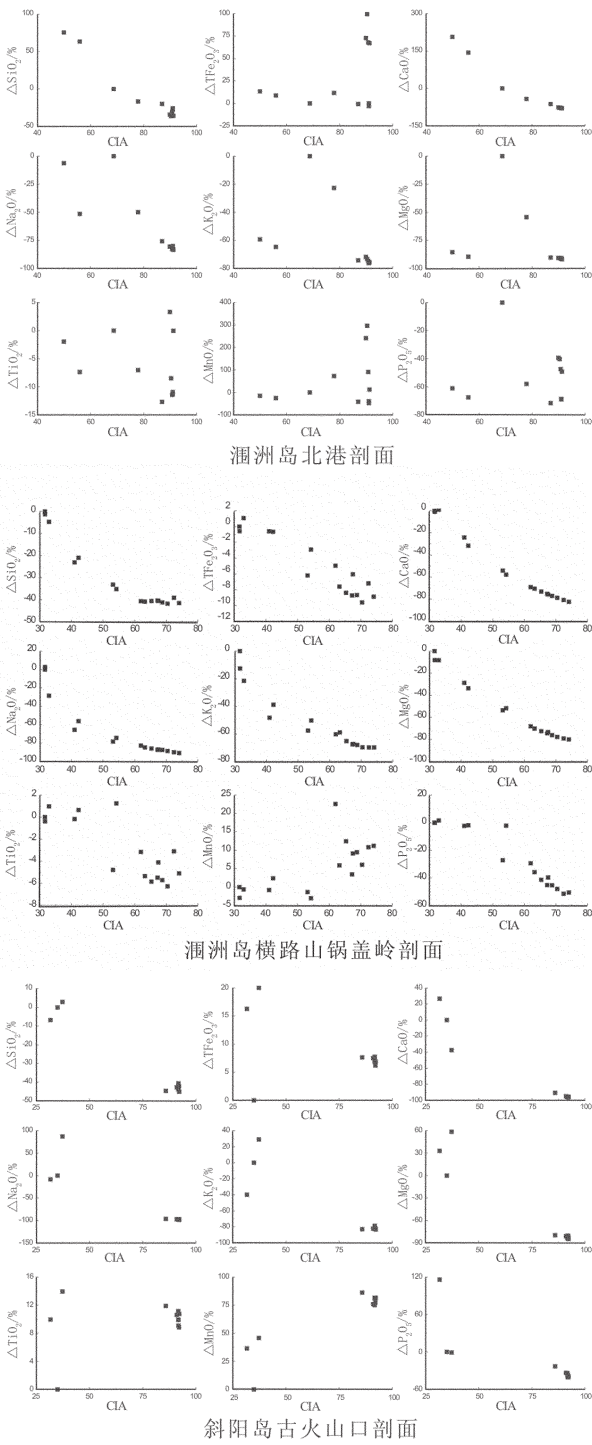


图 7 涠洲岛和斜阳岛各风化剖面主要元素相对 Al 的变化率随 CIA 的变化趋势图

Fig.7 Variation trends of major elements relative to Al with the variation of CIA in each weathering profile of the Weizhou Island and the Xieyang Island

于砖红物质中无定形 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 在干湿变异中结晶,成为相互连接的针铁矿系统。与其他热带地区的第四纪红土相比^[35],涠洲岛北港和斜阳岛古火山口剖面多数样品的化学特征指标亦指示风化程度较高,表明气候条件仍是控制该地区红土发育的主要因素。涠洲岛横路山锅盖岭剖面的各项化学特征指标指示该剖面仅处于中等风化程度,富铝化程度较低,而该剖面基底玄武岩的 K-Ar 法年龄 (0.79~0.60 Ma) 却比高度风化的斜阳岛古火山口剖面基底玄武岩的 K-Ar 法年龄 (0.57 Ma) 更大^[1],推测涠洲岛横路山锅盖岭剖面可能受到后期的剥蚀,风化程度较高的层位因构造抬升引起剥蚀速度加快而没有遗留下来。

另一方面,海岛土壤特有的复盐基作用也很明显地体现在这 3 个风化壳的矿物组成及化学特征上。海岛土壤长期受含盐基微粒的雨雾影响,雨雾中的盐分来自海洋,雨雾沉降后,将盐分带至土壤表层;此外,海岛风速大,经常有富含盐分的浪花飞溅至土壤表层。这在离海岸近的涠洲岛北港剖面尤为显著,表层土的粘粒矿物中出现方解石, CIA 值在表层土中突然降低等都是复盐基作用的表现,即使是离海岸较远的涠洲岛横路山锅盖岭剖面,其红土部分的 CIA 值亦因复盐基作用而出现与正常风化趋势相反的变化特征。可见,复盐基作用对海岛环境下风化壳的发育具有普遍的影响。通常,复盐基作用随海拔高度的增加而减小,斜阳岛由于海拔比涠洲岛高,受复盐基作用较涠洲岛小,但其表层未出现三水铝石,与其“砖红化”的特征明显不符,表明即便是较小的复盐基作用,也能阻碍土壤的富铝化作用,使强烈风化最后阶段的产物三水铝石不能形成。

黄镇国等^[39]研究发现,雷琼玄武岩风化壳的完整剖面包括:母岩、半风化裂隙层、球状风化层、红土层及表土层。但涠洲岛和斜阳岛的 3 个剖面显然缺失其中的若干层次,特别是斜阳岛古火山口剖面,岩-土界面清晰,化学特征指标在岩-土界面处发生明显突变,涠洲岛北港剖面也有类似现象。顾尚义等^[36]对广西凭祥英安岩风化剖面的研究发现,在风化剖面形成过程中由于地下水作用的叠加,使得碱金属元素相对 Al 的变化率及 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 偏离了正常的演化趋势。在充沛的水热条件下,理想的风化壳剖面发育在排水良好、构造缓慢上升的地段,富含 CO_2 的大气降水作为风化流体和介质从地表向风化剖面深处

垂向渗滤,岩-土界面(即风化前锋)作为临时隔水层,渗流水在此汇聚并充分发生水-岩反应,可溶组分逐渐随水排出剖面,风化前锋不断向下拓展,风化壳剖面逐渐增厚。而如果地下水进入风化壳体,岩-土界面即成为地下水的下垫面,地下水的溶蚀作用只发生在潜水面附近的流动带,岩-土界面的滞水缺乏化学动能,不能继续对母岩进行改造,使得风化壳发育向下停滞。斜阳岛古火山口剖面和涠洲岛北港剖面下部岩-土界面即受到地下水的作用。斜阳岛古火山口剖面位于火山口内,火山喷发时,在重力和风力分选下,大颗粒火山碎屑落在火山口周围,颗粒小的飘落在离火山口较远的地方,火山口中心岩石孔隙发育,大面积洼地有利于汇聚地下水,富水性较火山口周围地区好^[37],其构造特征就决定了地下水对风化壳的影响不可忽略。在碱性、偏碱性的介质条件下,凝灰物质极易蚀变为蒙脱石矿物^[38],涠洲岛北港剖面下部层位出现的蒙脱石,即是水质偏碱性的涠洲岛地下水与剖面相互作用的产物。

4 结 论

涠洲岛和斜阳岛 3 个红色风化壳的矿物学和化学特征表明,热带季风气候炎热多雨、干湿交替的特征决定了风化壳处于高度风化的阶段,是控制风化壳发育的主要因素,但海岛环境特有的复盐基作用、风化壳内部构造裂隙发育致使水溶液流动性好、构造抬升引起的剥蚀加快以及地下水与风化剖面的相互作用等因素也对两岛红色风化壳产生了显著的影响。风化壳的特征及演化趋势是多种因素共同作用的结果,反映了风化壳发育过程的复杂性。下一步的研究将尝试测定红色风化壳的形成年龄,复盐基作用对风化剖面活动性元素含量变化的影响及地下水对岩-土界面元素的滞留效应,以期对各种影响因素给予定量的评价。

致谢:感谢中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室孙亚莉研究员和边缘海地质重点实验室朱照宇研究员在撰写论文过程中提供的帮助;同时也感谢同位素年代学和地球化学重点实验室刘颖高级工程师和极端环境地质地球化学实验室王辅亚研究员在样品测试工作中给予的帮助。

参考文献(References):

[1] 徐义芳, 朱照宇, 文启忠, 等. 英峰岭剖面红土的粘土矿物和化学

特征与成土环境关系[J]. 地球化学, 1999, 28(3):281-288.

Xu Yifang, Zhu Zhaoyu, Wen Qizhong, et al. Clay mineral, chemical characteristics and environmental record of the multi-stage laterite at Yingfengling section, Leizhou Peninsula [J]. Geochimica, 1999, 28(3):281-288 (in Chinese with English abstract).

[2] 文国高, 文启忠, 朱照宇, 等. 雷州半岛英峰岭剖面多期红土矿物学特征初步研究 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 1997, 16 (3):145-149.

Wen Guogao, Wen Qizhong, Zhu Zhaoyu, et al. A preliminary study of mineral characteristics of multicyclic red soils in Yingfengling section in Leizhou Peninsula [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 1997, 16(3):145-149 (in Chinese with English abstract).

[3] Ma Jinlong, Wei Gangjian, Xu Yigang, et al. Mobilization and re-distribution of major and trace elements during extreme weathering of basalt in Hainan Island, South China [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2007, 71(13):3223-3237.

[4] 元发庆, 黎广钊, 孙永福, 等. 北部湾涠洲岛地貌的基本特征[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1):41.

Qi Faqing, Li Guangzhao, Sun Yongfu, et al. Basic geomorphologic features of the Weizhou Island of the Beibu Bay [J]. Advances in Marine Science, 2003, 21(1):41(in Chinese with English abstract).

[5] 杨森楠. 中、新生代太平洋陆缘带的构造格局和构造转换[J]. 地学前缘, 1997, 4(3/4):247-255.

Yang Sennan. Tectonic framework and tectonic transformation of the Pacific continental margin belts in the Mesozoic and Cenozoic [J]. Earth Science Frontiers, 1997, 4(3/4):247-255(in Chinese with English abstract).

[6] 王鸿桢, 杨森楠, 李思田. 中国东部及邻区中、新生代盆地发育及大陆边缘区的构造发展[J]. 地质学报, 1983, 57(3):213-223.

Wang Hongzhen, Yang Sennan, Li Sitian. Mesozoic and Cenozoic basin formation in east China and adjacent regions and development of the continental margin[J]. Acta Geologica Sinica, 57(3):213-223 (in Chinese with English abstract).

[7] Chung Sunlin, Cheng Hai, Jahn Borming, et al. Major and trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of paleogene volcanism in the South China prior to the South China Sea opening[J]. Lithos, 1997, 40:203-220.

[8] 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J].地球化学, 2002, 31(3):213-221.

Zhu Bingquan, Wang Huifen, Chen Yuwei, et al. Geochronological and geochemical constraint of the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia[J]. Geochimica, 2002, 31(3):213-221(in Chinese with English abstract).

[9] 李昌年, 王方正, 钟称生. 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)第四纪玄武质火山岩的地球化学性质及其源区特征 [J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(1):9.

Li Changnian, Wang Fangzheng, Zhong Chengsheng. Geochemistry

- of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou Island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2005, 24 (1):9 (in Chinese with English abstract).
- [10] 郝芳, 李思田, 龚再升, 等. 莺歌海盆地底辟发育机理与流体幕式充注[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(6):471-476.
- Hao Fang, Li Sitian, Gong Zaisheng, et al. Development mechanism of diapirism and fluid-screen charging in Yingge Sea basin [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 31 (6):471-476 (in Chinese with English abstract).
- [11] 樊祺诚, 孙谦, 龙安明, 等. 北部湾涠洲岛及斜阳岛火山地质与喷发历史研究[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6):1529-1537.
- Fan Qicheng, Sun Qian, Long Anming, et al. Geology and eruption history of volcanoes in Weizhou Island and Xieyang Island, North Bay [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (6):1529-1537(in Chinese with English abstract).
- [12] 李昌年, 王方正. 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)全新世火山喷发及其地质意义[J]. *矿物岩石*, 2004, 24(4):28.
- Li Changnian, Wang Fangzheng. Holocene volcanic effusion in Weizhou Island and its geological significance [J]. *J Mineral Petrol*, 2004, 24(4):28(in Chinese with English abstract).
- [13] Middlemost E A K. *Magma and Magmatic Rocks: An Introduction to Igneous Petrology* [M]. London: Longman, 1985; 1-266.
- [14] 马毅杰, 罗家贤, 蒋梅茵, 等. 我国南方铁铝土矿物组成及其风化和演变[J]. *沉积学报* 1999, 17(增刊):686.
- Ma Yijie, Luo Jiaxian, Jiang Meiyin, et al. The weathering and evolution of soil ferrallite minerals in the South China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1999, 17 (supp.):686 (in Chinese with English abstract).
- [15] 朱诚. 华东山地第四纪沉积环境研究[M]. 南京: 南京大学出版社, 2000:78-85.
- Zhu Cheng. *Quaternary Sedimentary Environments in the East China Mountains* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2000; 78-85(in Chinese with English abstract).
- [16] 任磊夫, 于众. 高岭石的微观结构分析, 兼述无序高岭石与 7Å 埃洛石的划分界线[C]//地质研究论文集(北京大学). 北京: 北京大学出版社, 1982:86-91.
- Ren Leifu, Yu Zhong. The analysis of the micro-structure of Kaolinite and the discussion of the boundary demarcation between Kaolinite and 7Å halloysites [C]//*Geological Research Papers (Peking University)* Beijing: Peking University Press, 1982:86-91 (in Chinese with English abstract).
- [17] Jeong G Y, Kim S J. Boxwork fabric of halloysite-rich kaolin formed by weathering of anorthosite in the Sancheong area, Korea [J]. *Clays and Clay Minerals*, 1993, 41(1):56-65.
- [18] 任磊夫. 粘土矿物与粘土岩[M]. 北京:地质出版社, 1992:37-40.
- Ren Leifu. *Clay Minerals and Argillaceous Rocks* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1992:37-40 (in Chinese).
- [19] 徐义芳, 朱照宇, 文高国, 等. 雷州半岛南部若干红土剖面的地球化学与成土环境研究[J]. *地球化学*, 2000, 29(4):402-409.
- Xu Yifang, Zhu Zhaoyu, Wen Gaoguo, et al. Geochemistry and soil-forming environment of the red soil section in the southern Leizhou Peninsula, Guangdong Province [J]. *Geochimica*, 2000, 29 (4):402-409 (in Chinese with English abstract).
- [20] 袁宝印, 夏正楷, 李保生, 等. 中国南方红土年代地层学与地层划分问题[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(1):1-12.
- Yuan Baoyin, Xia Zhengkai, Li Baosheng, et al. Chronostratigraphy and stratigraphic division of red soil in southern China[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(1):1-12(in Chinese with English abstract).
- [21] 陆景冈. *土壤地质学*[M]. 北京:地质出版社, 1997:21.
- Lu Jinggang. *Geopedology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997:21(in Chinese).
- [22] Nesbitt H W, Young G M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1984, 48(7): 1523-1534.
- [23] McLennan S M. Weathering and global denudation [J]. *Journal of Geology*, 1993, 101(2):295-303.
- [24] 黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿, 等. 中国南方红色风化壳[M]. 北京:海洋出版社, 1996:144.
- Huang Zhenguo, Zhang Weiqiang, Chen Junhong, et al. *Red Weathering Crust in Southern China* [M]. Beijing: China Ocean Press, 1996:144 (in Chinese).
- [25] 杨元根, 刘从强, 袁可能, 等. 南方红土形成过程及其稀土元素地球化学[J]. *第四纪研究*, 2000, 20(5):469-480.
- Yang Yuangen, Liu Congqiang, Yuan Keneng, et al. Laterite formation process in southern China and its Rare Earth Element (REE) geochemistry[J]. *Quaternary Sciences*, 2000, 20(5):469-480 (in Chinese with English abstract).
- [26] 朱照宇, 谢久兵, 王彦华, 等. 华南沿海地表红土地球化学特性变异的自然因素与人类活动干预[J]. *第四纪研究*, 2004, 24(4):404.
- Zhu Zhaoyu, Xie Jiubing, Wang Yanhua, et al. The natural factors and artificial disturbance of variation in geochemistry characteristics of red soil on land surface along the coast of South China [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(4):404 (in Chinese with English abstract).
- [27] Nesbitt H W, Young G M. Early Paleozoic climates and plate motions inferred from major elements chemistry of lutites [J]. *Nature*, 1982, 299:715-717.
- [28] Nesbitt H W, Markovics G. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44:1659-1666.
- [29] 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征[J]. *地理学报*, 2007, 62(11):1178-1179.
- Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, et al. Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11):1178-1179(in Chinese with English abstract).
- [30] Nesbitt H W, Markovics G. Weathering of granodioritic crust,

- long-term storage of elements in weathering profiles, and petrogenesis of siliciclastic sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61:1653–1670.
- [31] 马英军, 刘丛强. 化学风化作用中的微量元素地球化学——以江西龙南黑云母花岗岩风化壳为例[J]. *科学通报*, 1999, 44(22): 2434–2435.
- Ma Yingjun, Liu Congqiang. Geochemical characteristics of trace elements during chemical weathering—an example from biotite granite weathering crust in Longnan, Jiangxi [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44 (22):2434–2435 (in Chinese with English abstract).
- [32] 罗薇. 珠江口海区海岛赤红壤交换性盐基含量的研究[J]. *热带亚热带土壤科学*, 1997, 6(4):296–298.
- Luo Wei. Study on the content of soil exchangeable base of island latosolic red soil in Pearl River estuary[J]. *Tropical and Subtropical Soil Science*, 1997, 6 (4):296–298 (in Chinese with English abstract).
- [33] 张雪林. 浙江省海岛土壤发生特征及其分类 [J]. *浙江师大学报* (自然科学版), 2001, 24(4):385–388.
- Zhang Xuelin. The genetic properties and classification of soil in islets of Zhejiang Province [J]. *Journal of Zhejiang Normal University* (Nat. Sci.), 2001, 24 (4):385–388 (in Chinese with English abstract).
- [34] 冯金良, 崔之久. 拱王山风化壳的发育特征及其环境和构造意义[J]. *地理学与国土研究*, 2002, 18(2):58.
- Feng Jinliang, Cui Zhijiu. Weathering profiles and its environmental and tectonic significance in Gongwangshan mountain, Yunnan Province [J]. *Geography and Territorial Research*, 2002, 18(2):58 (in Chinese with English abstract).
- [35] 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 等. 雷琼第四纪火山[M]. 北京: 科学出版社, 1993:65.
- Huang Zhenguo, Cai Fuxiang, Han Zhongyuan, et al. *Quaternary Volcanoes in Leizhou Peninsula and Hainan Island* [M]. Beijing: Science Press, 1993:65 (in Chinese).
- [36] 顾尚义, 万国江, 毛健全. 广西凭祥英安岩的化学风化作用研究 [J]. *地球化学*, 2003, 32(4):328–334.
- Gu Shangyi, Wan Guojiang, Mao Jianquan. Chemical weathering for dacite in Pingxiang, Guangxi [J]. *Geochimica*, 2003, 32(4): 328–334 (in Chinese with English abstract).
- [37] 孔中恒. 雷州半岛火山岩的水文地质特征与富水规律[J]. *热带地理*, 2004, 24(2):138.
- Kong Zhongheng. Hydrogeological property and laws of water abundance of the volcanic rocks in Leizhou Peninsula [J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(2):138 (in Chinese with English abstract).
- [38] 刘钦甫, 付正, 侯丽华, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷兴安岭群储层粘土矿物组成及成因研究[J]. *矿物学报*, 2008, 28(1):45.
- Liu Qinfu, Fu Zheng, Hou Lihua, et al. Clay complexes and geneses of the Xing'anling Group in the Beier depression of the Hailar basin [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2008, 28 (1):45 (in Chinese with English abstract).

Characteristics of clay minerals and geochemistry and soil-forming environment of the red weathering crusts in Weizhou Island and Xieyang Island, Guangxi

GE Tan^{1,2}, HAN Jiang-wei^{1,2}

(1. *Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China;*

2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The clay minerals and major elements of two basaltic weathering crusts and a tuffaceous crust in the Weizhou Island and the Xieyang Island were identified and measured by means of X-ray diffraction and X-ray fluorescence analysis. The results show that 7×10^{-10} m halloysite is the main constituent in the clay minerals of every weathering profile, and goethite and hematite are also extensively existent. This suggests that these weathering crusts are in a fairly high degree of weathering. The abnormal variations of chemical indicators in surface weathering profiles and the existence of secondary calcite in one of the profiles imply the effect of compound alkalization on the weathering crust. Underground water has also made these profiles considerably different from the normally-developed weathering crust. Tropical monsoon climate has remarkably controlled the development of weathering crusts, but the specific compound alkalization of the island and the underground water have also exerted their influence on the development of the weathering crusts.

Key words: clay minerals; chemical characteristics; soil-forming environment; Weizhou Island and Xieyang Island

About the first author: GE Tan, male, born in 1984, master candidate, mainly engages in environmental geochemical research; E-mail: getan516@163.com.