

第五届贵州省地质矿产发展战略研讨会 暨贵州省地质学会2007年学术年会 论文集



贵州省地质矿产勘查开发局
贵州省地质学会

主办单位:贵州省地质矿产勘查开发局

贵州省地质学会

协办单位:中国科学院地球化学研究所

贵州大学资源环境学院

贵州省煤田地质局

贵州省有色地质勘查局

编辑出版:贵州省地质矿产勘查开发局

贵州省地质学会

编辑委员会

主 编:王尚彦

副 主 编:刘家仁 王明章 陈履安 罗孝桓

编 委:陈革平 陈履安 陈文一 邓小万
梁福谅 刘家仁 刘卓璧 罗孝桓
王明章 王尚彦 周 琪

第五届贵州省地质矿产发展战略研讨会暨贵州省地质学会

2007 年学术年会论文集

贵州省地质矿产勘查开发局

贵州省地质学会

贵阳经纬印刷厂 印刷

编

黔新出[图书]2008 年一次性内资准字第 238 号

目 录

[基础地质]

中国亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应 朱立军,何守阳,李景阳(1)

[战略分析]

秘鲁安第斯铜矿资源特点及勘探开发商机
..... 罗孝桓(12)

贵州矿产资源节约与综合利用的前景分析
..... 陈履安,陈 林,姚志勇,等(19)

[贵金属矿产地质]

从黔东南金矿成矿模拟实验探讨该区金矿成矿前景
..... 吴学益,卢焕章,王中刚,等(25)

贵州西部铂钯异常特征及找矿前景分析
..... 马晓旻,程国繁,吕绍玉,等(32)

水银洞超大型金矿床含矿岩系稀土元素地球化学特征
..... 刘建中,夏 勇,张兴春,等(37)

贵州苗龙金矿深部找矿前景
..... 蒲德昌,马晓旻,詹永林(42)

黔东南小里地区新发现构造蚀变岩型金矿
..... 邓贵标,黄 勇,闵艳艳(46)

贵州省兴仁县滥木厂汞铊矿床中金矿体的发现及其地质特征 张金忠(50)

[有色金属矿产地质]

黔北铝土矿床特征浅析
..... 鲍 森,武国辉,杨瑞东,等(55)

贵州丹寨县黄泥塘铅锌找矿前景初探
..... 骆 军(62)

贵州省盘县乐民铜矿化区基本地质特征
..... 王汉毕(65)

贵州省台江县南翁丢地区铅锌矿地质特征及找矿

前景分析 刘学武,罗 强,周世瑜(68)

[煤矿煤层气地质]

贵州省煤层气勘探开发前景分析 ... 赵 霞(72)

贵州省煤层气资源的产业化开发 ... 任 平(80)

贵州保田青山区块煤储层特征及煤层气开发条件研究 黄 文,李 军,黄华州(85)

五轮山矿区煤层含气性特征及其地质控制初探
..... 熊孟辉,秦 勇(90)

贵州省纳雍县补作井田煤层气赋存特征与开发前景 王方发(97)

黔西矿区杨柳井田构造特征及对9[#]煤层的影响
..... 唐显贵(101)

织金牛场向斜 M16 煤层煤质特征研究
..... 李祥坤,全贵龙,高克敏,等(105)

兴仁县照子山煤矿地质特征及煤层稳定性探讨
..... 王 平,杨 林(111)

煤矿安全开采深度计算的探讨 周福明(114)

平坝县猫冲以碳酸盐岩为主的含煤地层特征
..... 杨桥方(116)

[旅游地质]

大有可为的新兴边缘学科——旅游地质学
..... 陈跃康(118)

贵州地质遗迹资源需求分析与管理建议
..... 武国辉,杨 涛(120)

贵州的三叠纪自然遗产与世界地质公园申报
..... 魏家庸(124)

贵州喀斯特石林发育演化特征
..... 李兴中,王立亭(129)

贵州温泉旅游 罗永明(137)

论地质遗迹在贵州旅游中的有效利用

..... 刘俊儒, 刘 婧(144)

贵州省桐梓县地层资源与旅游

..... 田维江, 陈小青(148)

[地质生态环境保护 水文地质 工程地质]

喀斯特石漠化类型划分及其生态治理模式初探

..... 苏维词(150)

浅析贵州喀斯特石漠化特征及防治

..... 余德志, 陈小青(154)

贵州地质资源环境——跨越式发展战略的基石

..... 陈兴龙(157)

贵州高氟地质背景与地氟病关系探讨

..... 刘应忠, 廖莉萍, 黄隆辉, 等(160)

凉都六盘水市重视地质灾害防治

..... 刘开谦(164)

贵州省岩溶山区煤矿环境影响防治

..... 陆彦吉(167)

贵州三叠系关岭组软弱夹层对滑坡形成的控制意义

..... 杨涛毅, 张驰宇(171)

大方电厂建筑场地基处理及地质灾害预防建议

..... 黄文平, 张 黔, 赵泽雪(173)

基于 MAPGIS 组件的地灾系统设计与开发

..... 杨 涛, 薛 云, 武国辉(177)

土钉支护在贵州红粘土基坑中的经验

..... 杨涛毅, 张驰宇(181)

浅谈软弱夹层的工程勘察及处理

..... 贺光祥(183)

浅谈岩溶地区地下水勘察综合物探的应用

..... 李勋祥(185)

影响激发极化法测量精度的因素及应对措施

..... 李勋祥(188)

贵州省织金县煤矿山地地质环境质量评价

..... 潘金权(190)

切实保护好岩溶地下水资源——刻不容缓

..... 杨 兵, 张忠敏(195)

[勘探工程及制图]

偏斜钻进技术在理化煤矿区的应用

..... 张忠俊, 张 明(197)

高聚物泥浆处理剂在纳雍法地矿区钻进施工中的应用

..... 胡宏彪, 姜兴祥, 李 勇(199)

露采石灰石矿山资源/储量估算方法

..... 黄道光(201)

JGS-1 智能工程测井系统(2.0)版本单独分离图件的方法

..... 高克敏, 李祥坤, 庄治贤(203)

[实验测试、3S 技术与资料管理]

ICP-AES 发射光谱法同时测定土壤和水系沉积物中的主、微量元素

..... 况云所, 陈 菊(205)

原子荧光光谱仪测定土壤样品中微量元素常见问题的解决办法

..... 陈 菊, 胡万明(210)

硫化钡的测定

..... 钟 蓓(212)

“3S”技术在喀斯特地区县级林地信息调查中的应用研究

..... 王天鸠, 安裕伦, 汤日红, 等(214)

论地质图书资料管理的优化与创新

..... 金华英(216)

[地学争鸣]

桐梓县茅石乡新桥浑水河的成因再探讨

..... 杨 旭, 何朝贵, 熊 敏(219)

贵州省清镇市鲤鱼塘地区铁质结核特征和宇宙来源的可能性

..... 何 兵(222)

[资源管理]

矿产资源执法监察与办理信访案件的技巧与艺术

..... 童学农(224)

[论文摘要]

贵州下寒武统牛蹄塘组的层序对比

..... 罗泰义, 周明忠, 杨 勇(230)

岩溶区不同土地利用条件下水质变化研究——以普定和茂兰为例

..... 曾 成, 叶文炳, 赵 敏, 等(223)

[基础地质]

中国亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用 及其环境效应*

朱立军^{1,2},何守阳^{3,4},李景阳¹

(1. 喀斯特环境与地质灾害防治(贵州大学)教育部重点实验室,贵阳 550003;

2. 贵州省地质矿产勘查开发局,贵州 贵阳 550004;

3. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学研究室,贵阳 550002;

4. 中国科学院研究生院;北京 100039)

[摘 要]通过对中国亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应的研究表明:亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用是溶蚀作用、交代作用和淀积作用同时存在,相互促进和共同作用的过程,具有多阶段、多途径和多方式的特点。随着碳酸盐岩风化成土作用的持续发展,交代成土作用逐渐成为主要的风化成土作用和矿物生成方式,贯穿于碳酸盐岩风化成土演化的全过程。风化成土作用的阶段性和风化剖面中新生矿物的分异演化使碳酸盐岩风化剖面具有明显的垂直分带结构和元素地球化学特征的递变规律。亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用地球化学过程可划分为脱钙镁富硅铝、富铁锰和脱硅富铝三个地球化学演化阶段,与上述演化阶段相对应,新生矿物演化序列表现为粘土矿物、氧化铁锰矿物和三水铝石阶段。碳酸盐岩风化成土作用产生的新生组分影响重金属元素化学形态,亚热带碳酸盐岩地区氟、砷等元素活化迁移和污染的重要机理受到氧化铁矿物表面的选择性吸附和解吸作用影响。即风化过程中新生矿物表面的选择性吸附和解吸作用控制着亚热带地区地表元素地球化学行为和环境质量特征。

[关键词]碳酸盐岩;风化成土作用;交代成土作用;环境效应;亚热带地区

1 引言

碳酸盐岩风化成土作用是亚热带碳酸盐岩地区最基本和最常见的地质地球化学作用,也是岩溶环境中岩—土—水—大气—生物相互作用的主要形式和元素表生地球化学循环的关键环节。制约着岩溶环境中岩—土—水—大气—生物系统的地球化学组成和物质、能量传输过程,记录着气候和环境变化的信息,与亚热带碳酸盐岩地区一系列资源与环境问题密切相关,如水土流失、石漠

化、土壤和水体污染、酸雨侵蚀、土壤退化等。全球碳酸盐岩出露面积约占陆地面积的12%,居住着约十亿人口。中国碳酸盐岩分布面积达344万km²,约占国土面积的三分之一,其中碳酸盐岩出露面积达90万km²以上,接近国土面积的十分之一。中国南方亚热带碳酸盐岩地区是全球连片分布、面积最大的碳酸盐岩分布区,地处东南亚碳酸盐岩分布区域中心地带,化学风化和成土作用强烈,形成了独特的岩溶地质地貌景观,广泛发育碳酸盐岩风化剖面,具有突出的地球化学敏感性和生态环境脆弱性特征,在全球亚热带岩溶地区具有代表性和典型特征。长期以来,受到世界各国

[作者简介]朱立军(1958—)男,贵州都匀人,博士,教授,贵州省地质矿产勘查开发局局长,喀斯特环境与地质灾害防治(贵州大学)教育部重点实验室主任,长期从事喀斯特环境地质地球化学研究。

[基金项目]国家重点基础研究发展计划(2006CB403200)、国家自然科学基金项目(49463011、49833002和49962002)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(1993年度、1995年度)、贵州省跨世纪科技人才工程项目(2000~2004)以及贵州省科学基金项目共同资助。

科学家们的关注,但值得注意的是,前人工作的重点主要集中在碳酸盐岩风化作用—岩溶作用及环境效应方面,而碳酸盐岩风化成土作用及环境效应研究就显得相当薄弱,这在很大程度上也制约了亚热带碳酸盐岩地区一系列资源与环境问题的深入研究。因此,在亚热带地区开展碳酸盐岩风化成土作用及其环境效应的系统研究,对解决亚热带碳酸盐岩地区一系列资源环境问题具有十分重要的科学意义和现实意义。

2 亚热带地区碳酸盐岩风化剖面地质地球化学特征

2.1 地质特征

研究区主要集中在北纬 $25^{\circ} \sim 29^{\circ}$, 东经 $105^{\circ} \sim 110^{\circ}$ 范围内的亚热带贵州岩溶地区。贵州是中国南方亚热带碳酸盐岩风化壳的主要分布区,具有典型的亚热带季风湿润气候和内陆高原岩溶山地自然环境。亚热带岩溶地区碳酸盐岩风化剖面发育类型齐全,特征明显。一般厚度 $8 \sim 10\text{m}$,最厚可达 $20 \sim 30$ 余 m 。横向上,其分布主要受岩溶地貌、水文及生态环境控制。在岩溶台地、缓丘和缓坡地带,风化壳剖面厚度较大,垂直分带完整;峰丛高地及陡坡地带,风化壳浅薄,剖面发育不完整。发育较完整的风化壳剖面一般都具有明显的垂直分带结构(表 1)。按风化强度,由上至下分为表土层,全风化层,半风化层和基岩(图 1)。

在风化壳结构和构造上,亚热带地区发育完整的碳酸盐岩风化壳具有如下的共同特征:①土体上部以红色粘土层为主,向下逐渐过渡到以黄色粘土层为主;②土和溶滤层交界面有一层杂色粘土层,具有晕圈及色带构造,这是岩土界面反应的“前峰面”,此层附近也常沉积有葡萄状、球状褐铁矿层;③在岩土界面上普遍有一层由白云岩砂或石灰岩风化成的溶滤层(表 2)。由上述特点可以看出,在由碳酸盐岩转变为粘土时,主要发育有三个界面,即基岩—溶滤层—粘土,在三个界面上进行着岩(土)—水—气界面反应。

2.2 地球化学特征

2.2.1 主量元素

亚热带地区碳酸盐岩风化剖面的主量元素地球化学特征总的演化趋势是一致的,随着母岩矿

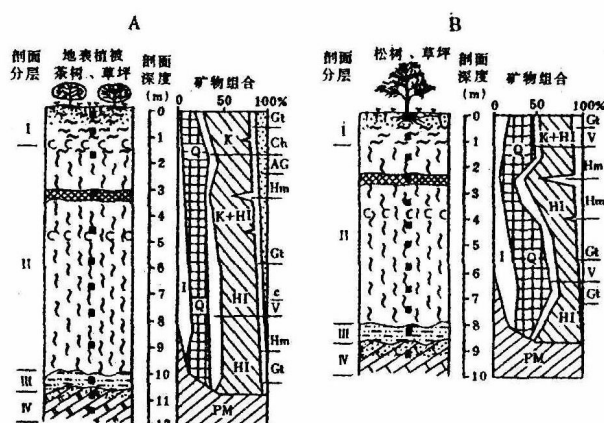


图 例

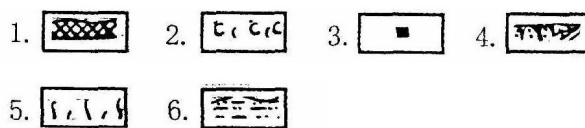


图 1 碳酸盐岩红色风化壳剖面特征

K—高岭石; HI—埃洛石; I—伊利石; Ch—绿泥石; V—蛭石; C/V—绿/蛭间层矿物; Hm—赤铁矿; Gt—针铁矿; AG—三水铝石; Q—石英; PM—原生矿物; 1—铁壳; 2—铁质结核; 3—采样位置; 4—表土层; 5—全风化层; 6—半风化层; A. 安顺白云岩红色风化壳剖面; B. 遵义石灰岩红色风化壳剖面

物在风化过程中的分解和转化,活动性主量元素(如 Ca 、 Mg 、 K 、 Na)随风化流体发生显著的迁移并带出风化壳,使风化壳中的活动性主量元素相对于母岩中逐渐减少,而相对迁移性弱或惰性主量元素(如 Si 、 Al 、 Fe 、 Mn)等则残留在风化壳中,相对于母岩富集(表 3)。

亚热带地区碳酸盐岩风化成土过程初期 SiO_2 的显著富集,沿剖面垂向上存在由富集到淋失的演化特征。碳酸盐风化成土作用包含着富硅和脱硅两个不同的地球化学过程,与花岗岩、玄武岩等岩石发育风化壳的风化成土作用一直处于脱硅过程不同。碳酸盐岩风化成土作用对 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的有明显的富集。在剖面上, Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量垂向上也都呈逐渐增加的变化趋势,但由于地球化学性质的差异,在风化成土过程中两者的分异也是很明显的。风化壳形成和演化过程中 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 具有不同的富集方式和演化途径,从而造成风化壳形成的阶段性特征和剖面地球化学分带性。

CaO 和 MgO 随着碳酸盐岩风化成土作用过程发生强烈淋溶,其淋失程度主要取决于风化成土作用强度和时间。因此,不同发育程度的红色

表 1 碳酸盐岩风化剖面垂直分带特征

风化剖面分层	风化成土强度与厚度/m	剖面特征	特征矿物组合	微结构特征	地球化学分带
表土层	很强 0.1-1	土壤层	高岭石-针铁矿-三水铝石	团粒结构、海绵状结构、渗流管构造	有机质及生物富集带
全风化层	强 1-5	红色铁铝质粘土层或铁壳	高岭石-针铁矿(赤铁矿)-三水铝石	凝胶结构、泥状结构、交代残余结构、假象交代结构、皮壳状构造、蜂窝状构造、肾状构造	富铝脱硅带
	强 0.5-0.3	黄色含褐铁矿粘土层或条带状铁质结核带	针铁矿(赤铁矿)-硬锰矿(软锰矿)	泥状结构、泥质条带结构、交代残余结构、假象交代结构、鲕状构造、蜂窝状构造	富铁、锰带
	中等 0.1-0.3	杂色粘土层或含粘土多孔溶滤层	埃洛石-石英-水铝英石	泥状结构、交代残余结构、假象交代结构、多孔状构造、交代残余层理构造	富硅铝脱钙镁带
碳酸盐岩	弱 0.1-1	裂隙或溶孔带	方解石-白云石	溶孔裂隙构造、原岩层理构造	物理崩解带

表 2 碳酸盐岩风化剖面结构和构造特征

深度(m)	白云岩风化剖面		石灰岩风化剖面	
	深度(m)		深度(m)	
0~0.5	暗棕色土壤层。	0~1.0	灰暗棕黄色土壤层。	
0.5~2.0	红棕色粘土,有时含黄色斑块。	1.0~4.5	棕黄色结构疏松粘土层,局部具由淡黄色纹组成的微层理。	
2.0~4.5	浅红棕色粘土层,近于水平分布砖红色铁质胶结的粘土条带及紫色铁质条带,局部为裂隙充填物。	4.5~6.5	姜黄色致密粘土,具条带状微层理构造,土体次生裂隙中,有黑色铁锰质薄膜充填物。	
4.5~6.2	黄色粘土,有时含红棕色小斑块,微裂隙极发育。	6.5~12.4	黄色粘土层,具碎屑及蠕虫状构造,土体中含较多的黑色铁锰质斑点、结核及夹层。	
6.2~6.3	具紫色、黑色网膜及黑白色微层及斑点的杂色粘土层,具色圈及晕圈构造,随基岩起伏。	12.4~12.6	杂色层纹状粘土层,层纹由紫色、暗棕色、约色灰及灰白色、褐黄色粘土薄层组成,随基岩岩面起伏,具色带及晕圈构造。	
6.3~6.5	多孔状白云岩砂溶滤层。此层厚度变化极大,最厚达1.0m以上。	12.6~12.7	灰白色溶滤层,由多孔状结构疏松的风化石灰岩构成。	
>6.5	白色厚层-巨厚层块状细晶白云岩。	>12.7	蓝灰色中厚层微晶白云质石灰岩,他形晶粒状,层理面发育且平整。	

表 3 碳酸盐岩风化剖面主量元素含量 (%)

风化剖面 类型	样品 (数量)	化学成分									
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
石灰岩风化剖面	表层土壤 (6)	$\frac{47.59}{43.58-51.29}$	$\frac{0.665}{0.57-0.73}$	$\frac{25.74}{24.77-27.15}$	$\frac{11.43}{10.7-12.02}$	$\frac{0.13}{0.08-0.52}$	$\frac{0.025}{0.02-0.03}$	$\frac{0.78}{0.7-0.8}$	$\frac{0.35}{0.2-0.4}$	$\frac{0.33}{0.21-0.47}$	$\frac{1.75}{1.66-1.82}$
	全风化层 (16)	$\frac{49.91}{23.04-64.63}$	$\frac{0.447}{0.23-0.67}$	$\frac{17.80}{9.3-26.48}$	$\frac{10.41}{6.22-48}$	$\frac{0.12}{0.07-0.26}$	$\frac{0.51}{0.02-6.5}$	$\frac{1.46}{0.7-4.6}$	$\frac{3.75}{0.1-19.4}$	$\frac{0.27}{0.17-0.63}$	$\frac{0.29}{1.62-5.2}$
	半风化层 (岩土过渡带) (4)	$\frac{16.07}{10.02-23.85}$	$\frac{0.38}{0.14-0.64}$	$\frac{5.62}{4.0-8.34}$	$\frac{2.04}{0.62-3.13}$	$\frac{0.34}{0.12-0.52}$	$\frac{0.05}{0.01-0.08}$	$\frac{1.4}{0.8-1.9}$	$\frac{42.3}{32.01-50.2}$	$\frac{0.15}{0.1-0.18}$	$\frac{2.36}{1.10-4.10}$
	石灰岩 (4)	$\frac{3.02}{2.62-3.43}$	$\frac{0.05}{0.02-0.08}$	$\frac{0.47}{0.40-}$	$\frac{0.36}{0.30-0.38}$	$\frac{0.06}{0.03-0.08}$	$\frac{0.006}{0.008-0.01}$	$\frac{0.7}{0.5-0.9}$	$\frac{55.6}{54.2-56.2}$	$\frac{0.16}{0.1-0.2}$	$\frac{0.34}{0.3-0.33}$
白云岩风化剖面	表层土壤 (8)	$\frac{44.34}{32.01-66.58}$	$\frac{0.79}{0.57-1.01}$	$\frac{26.82}{20.99-34.56}$	$\frac{9.59}{3.32-14.32}$	$\frac{0.42}{0.16-0.63}$	$\frac{0.134}{0.02-0.27}$	$\frac{1.02}{0.7-1.9}$	$\frac{0.81}{0.1-2.45}$	$\frac{0.38}{0.21-0.47}$	$\frac{1.2}{0.75-1.56}$
	全风化层 (25)	$\frac{46.28}{22.08-68.28}$	$\frac{0.87}{0.73-1.05}$	$\frac{28.86}{14.3-35.87}$	$\frac{10.64}{7-39}$	$\frac{0.4}{0.08-1.28}$	$\frac{0.19}{0.02-0.33}$	$\frac{1.196}{0.7-2.1}$	$\frac{0.43}{0.2-0.83}$	$\frac{0.49}{0.2-0.9}$	$\frac{2.14}{1.2-3.75}$
	半风化层 (岩土过渡带) (4)	$\frac{22.2}{20.16-24.18}$	$\frac{0.56}{0.52-0.6}$	$\frac{16.8}{16.3-16.9}$	$\frac{5.2}{4.82-5.4}$	$\frac{0.19}{0.18-0.2}$	$\frac{0.11}{0.08-0.14}$	$\frac{10.2}{9.1-10.92}$	$\frac{12.2}{9.1-14.4}$	$\frac{0.2}{0.08-0.22}$	$\frac{1.76}{1.7-1.8}$
	白云岩 (5)	$\frac{2.62}{2.19-3.66}$	$\frac{0.062}{0.04-0.11}$	$\frac{0.32}{0.13-0.4}$	$\frac{0.28}{0.13-0.4}$	$\frac{0.07}{0.06-0.08}$	$\frac{0.015}{0.007-0.02}$	$\frac{20.2}{18.2-22.2}$	$\frac{32.1}{29.6-33.9}$	$\frac{0.05}{0.08-0.1}$	$\frac{0.26}{0.18-0.3}$

风化壳剖面中 CaO 和 MgO 含量有较大变化。对于经历了较长时间风化和达到较高风化成土作用阶段的红色风化壳, CaO 和 MgO 几乎淋失殆尽, 对于一些尚处于风化成土初期或半风化层(岩土过渡带)的红色风化壳具有较高的 CaO 和 MgO 含量, 常可残留一些碳酸盐岩碎块及方解石、白云石等原生矿物。 K_2O 和 Na_2O 在风化壳中的含量较之碳酸盐岩有不同程度的富集。 K_2O 主要富集于风化壳剖面的中下部, 这主要与伊利石矿物的形成和产出部位有关。 Na_2O 在剖面中分布变化较大, 在风化程度较高的风化壳剖面中主要富集于剖面中下部, 而风化程度较低的风化壳剖面中相对富集于剖面上部, 且含量较之前者低, 与剖面中 Al_2O_3 的分布有一定的相似性。

2.2.2 微量元素

亚热带地区碳酸盐岩风化剖面中微量元素含量变化较大, 分异明显, 但各剖面微量元素地球化学特征具有一定的相似性。微量元素演化规律随风化成土阶段和发育程度沿剖面垂向上的变化趋势一致, 除 Sr 以外, 其它微量元素 Cu 、 Pb 、 Zn 、 Ni 、 Co 、 Cr 、 Rb 、 F 、 B 、 As 和 Cl 在风化成土过程中都有不同程度的富集, 平均含量均高于其克位克值和全球土壤均值(表4)。亚热带地区碳酸盐岩风化剖面微量元素分布特征主要与风化成土作用程度有关, 随着风化成土作用程度加深, 微量元素含量相对增大, 不同碳酸盐岩风化剖面中微量元素分布特征的差异表现不同风化成土作用程度产生的含量变化。

2.2.3 稀土元素

亚热带地区风化剖面母岩稀土元素含量很低, 稀土元素总量(ΣREE)均低于 100mg/kg , 与大陆碳酸盐岩中的稀土元素含量和总量分布特征一致(王中刚等, 1989)。风化剖面中稀土元素含量及总量具有相似分布特征, 稀土元素含量和总量相对于母岩碳酸盐岩都具有不同程度的富集, 在风化剖面中的分布具有明显的垂直分层现象。在风化剖面的底部半风化层(岩土过渡带)和中上部, 常存在 2~3 个明显的稀土元素总量富集带。底部半风化层(岩土过渡带)的稀土元素含量富集带集中在岩-土界面的粘土矿物带一侧, 而中部稀土元素含量富集带与全风化层氧化铁矿物结核带或铁壳的分布位置一致, 即风化剖面中稀土元素在岩土过渡带的粘土矿物一侧和全风化层铁质条带或铁壳部位最为富集。风化剖面剖面上

部, 特别是在表土层, 稀土元素总量有不同程度的降低。亚热带地区碳酸盐岩风化剖面具有共同的稀土元素分布模式特征, 都继承了母岩碳酸盐岩的稀土元素分布模式(图2, 图3)。

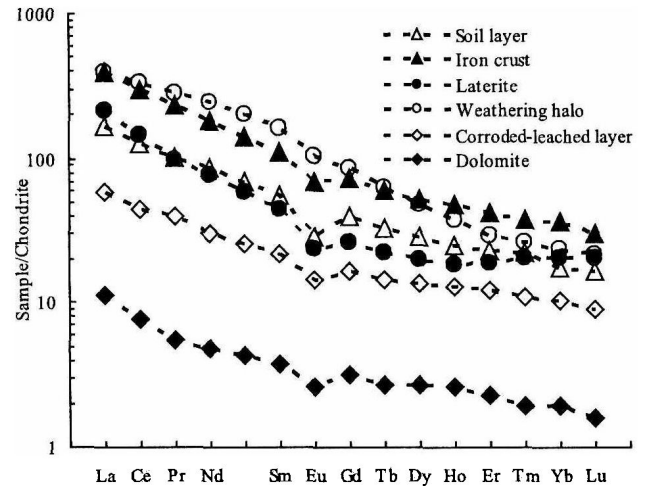


图2 白云岩风化剖面稀土元素
球粒陨石标准化分布图

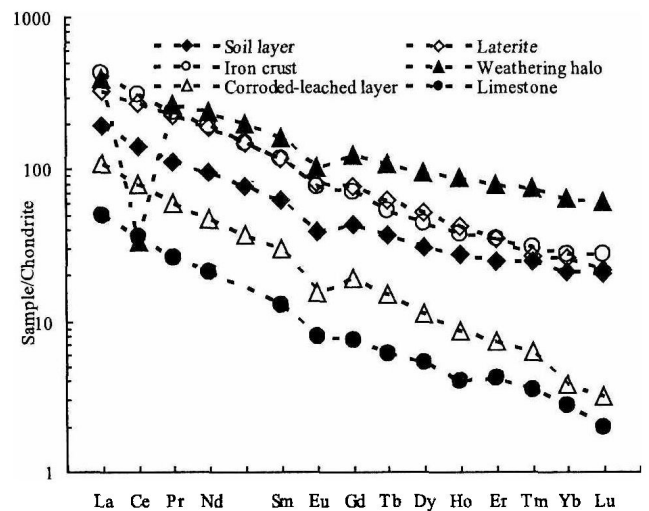


图3 石灰岩风化剖面稀土元素
球粒陨石标准化分布图

2.3 岩土界面特征

在亚热带碳酸盐岩地区不同母岩风化成土作用的演化趋势相一致, 风化剖面发育的过程在主要元素地球化学特征上是富铁铝化, 而在矿物组分上体现为粘土矿物、氧化铁矿物和三水铝石的富集。因此, 不同母岩风化成土作用的地球化学过程和风化剖面特征的差异主要表现在风化成土作用的初期阶段和风化剖面岩-土界面地球化学特征上。碳酸盐岩风化剖面岩-土界面主要元素

表 4 贵州碳酸盐岩风化剖面微量元素含量(10⁻⁶)

剖面类型	化学成分样品 (数量)	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Cr	Rb	Sr	F	B	As	Cl
石灰岩 风化剖面	表层土壤 (8)	$\frac{112.5}{89-136}$	$\frac{46.5}{36-57}$	$\frac{178.4}{260-335}$	$\frac{142.3}{135-149}$	$\frac{53.2}{51-54}$	$\frac{97.8}{91-100}$	$\frac{90.5}{82-100}$	$\frac{6.2}{0.2-11}$	$\frac{1160}{1150-1180}$	$\frac{79.2}{60-70}$	$\frac{7.26}{3.76-11.5}$	$\frac{193.4}{160-230}$
	红土 (18)	$\frac{82.4}{53-111}$	$\frac{65.1}{0.1-154}$	$\frac{223.7}{124-461}$	$\frac{108.1}{60-183}$	$\frac{37.9}{7-74}$	$\frac{67.5}{46-100}$	$\frac{99.1}{47-115}$	$\frac{18.2}{0.1-62}$	$\frac{1750}{1040-4600}$	$\frac{39.6}{3.5-7.5}$	$\frac{10.2}{4.28-21.1}$	$\frac{109.5}{59-193}$
	石灰岩 (4)	$\frac{36.5}{36-37}$	$\frac{37.2}{36-38}$	$\frac{24.5}{10-39}$	$\frac{61.2}{60-62}$	$\frac{16.3}{14-19}$	$\frac{13.2}{10-16}$	$\frac{14.2}{9-17}$	$\frac{312.5}{283-337}$	$\frac{380}{320-460}$	$\frac{5.3}{5-5.6}$	$\frac{0.92}{0.6-1.2}$	$\frac{234.4}{158-310}$
白云岩 风化剖面	表层土壤 (10)	$\frac{103.8}{48-207}$	$\frac{130}{50-153}$	$\frac{551.8}{192-1956}$	$\frac{104.6}{33-169}$	$\frac{48.8}{16.59}$	$\frac{119}{45-156}$	$\frac{91}{67-133}$	$\frac{5.2}{3-8}$	$\frac{1400}{1100-2300}$	$\frac{24.5}{23.4-29}$	$\frac{6.82}{5.5-8.3}$	$\frac{286}{30-570}$
	全风化层 (27)	$\frac{109.6}{37-196}$	$\frac{162.3}{0.01-753}$	$\frac{546.8}{131-2560}$	$\frac{135.8}{61-244}$	$\frac{50.1}{27-125}$	$\frac{84.9}{34-189}$	$\frac{134}{44-196}$	$\frac{8.1}{0.1-45}$	$\frac{2896}{100-5900}$	$\frac{54.3}{22-102.5}$	$\frac{11.75}{1.25-25}$	$\frac{83.8}{28-220}$
	白云岩 (5)	$\frac{33.4}{11-84}$	$\frac{228}{15-919}$	$\frac{680.4}{48-2903}$	$\frac{59.2}{33-84}$	$\frac{16.7}{12-26}$	$\frac{9.42}{0.1-28}$	$\frac{30.2}{5-108}$	$\frac{82.4}{6-283}$	$\frac{1306}{320-3600}$	$\frac{10.4}{5.5-14.5}$	$\frac{3.0}{0.6-5}$	$\frac{272.8}{158-325}$
克拉克值(泰勒 1964)		55	12.5	70	75	25	100	90	375	625	10	1.8	130
全球土壤元素平均值 (维诺格拉多夫 1954)		20	10	50	40	8	200	60	300	200	10	5	100

以突出的 Si、Al 富集和强烈的 Ca 亏损为特征。而 Mg 则显示缓慢变化的特征,与 Mg 在风化壳剖面中上部的分布特征有明显区别,部分风化壳剖

面在岩—土过渡带的上部还存在局部富集现象(表 5)。

表 5 碳酸盐岩风化剖面岩土过渡带化学成分变化概略表

化学成分	石灰岩风化壳剖面:母岩→杂色粘土层	白云岩风化壳剖面:母岩→杂色粘土层
SiO ₂		
Al ₂ O ₃	杂色粘土层 >> 溶滤层 > 母岩	杂色粘土层 >> 母岩 > 溶滤层
Fe ₂ O ₃		
TiO ₂		母岩 < 溶滤层 < 杂色粘土层
MnO		
K ₂ O	母岩 < 溶滤层 < 杂色粘土层	母岩 < 溶滤层 < 杂色粘土层
Na ₂ O		
FeO	溶滤层 > 杂色粘土层 > 母岩	母岩 < 溶滤层 < 杂色粘土层
P ₂ O ₅	母岩 < 溶滤层 < 杂色粘土层	
MgO	溶滤层 >> 母岩 > 杂色粘土层	
CaO	母岩 >> 溶滤层 >> 杂色粘土层	母岩 ≈ 溶滤层 >> 杂色粘土层

3 碳酸盐岩风化成土作用及机理

3.1 风化成土作用

碳酸盐岩风化成土作用是亚热带碳酸盐岩地区占主导作用的表生地质、地球化学作用,决定着由碳酸盐岩—土—水—大气—生物构成的岩溶环境系统中物质和能量的迁移和转化。碳酸盐岩风化成土作用包括岩溶环境中所有岩石和矿物的改

造、破坏过程。同时又是碳酸盐岩同岩溶水、大气及生物互相作用,进行物质交换,形成风化壳的过程。风化和成土是表生地质、地球化学作用的两个方面,是相互连接、互为助长和贯通的表生作用的不同发展阶段,风化作用是成土作用的前提和基础,成土作用是风化作用的延续和结果,成土作用也必然包含着风化作用。风化作用以岩石和矿物被破坏和分解、元素分离并在原地淋滤集中或短距离迁移集散为主,而成土作用则是元素集中聚合和新生矿物生成聚集的过程。

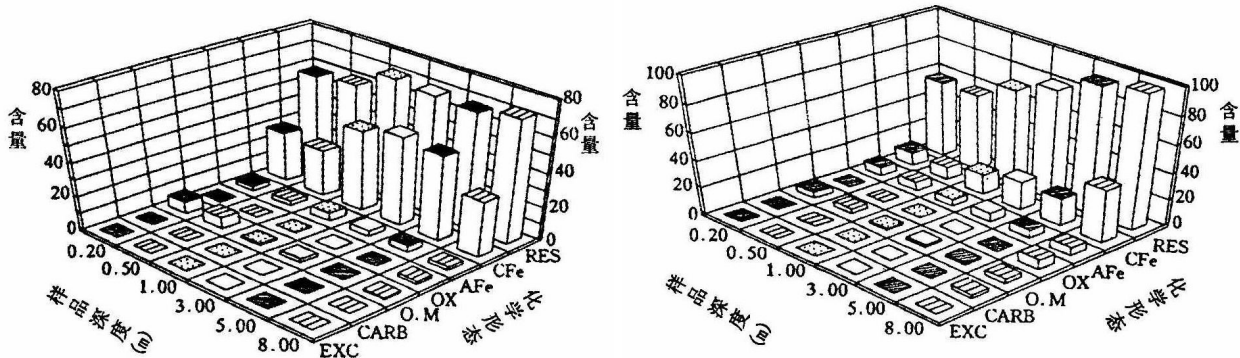


图 4 白云岩红色风化剖面中 Cr(a)、Cu(b) 的化学形态分布

3.1.1 风化溶蚀作用

溶作用是亚热带地区碳酸盐岩风化成土过程最关键性的第一步和先决条件。其化学机制实质上是 CO₂、水和岩石之间的化学反应过程(任美镒等,1983)。岩溶水是该过程中最活跃的地质营

力和最重要的物质载体,影响岩溶环境中固相(碳酸盐岩中矿物)、液相和气相侵蚀剂(氧、CO₂、有机酸等)的溶解,并将其带入碳酸盐岩风化带中,调节风化成土过程中物理化学环境(pH 值、Eh 值和岩溶水中化学组分的含量等)。

过去讨论较多的是岩溶水作为溶剂在碳酸盐岩风化(溶蚀)中的作用,比较强调可溶组分(Ca、Mg、K 等)的带出,而对岩溶水作为碳酸盐岩风化成土作用的物质传输载体涉及较少。实际上,岩溶水也是碳酸盐岩风化成土过程中最重要的物质带入载体。据统计,岩溶地下水中可溶性 SiO_2 含量可达 3 ~ 8mg/L,含 Fe、Al 等可溶性物质约 0.05 ~ 0.1mg/L。此外,植物、微生物都具有富集上述物质的作用,在我国岩溶地区的热带雨林的落叶、枯枝的数量可达 640 ~ 1540 斤/亩·年(任美镔等,1983)。这些凋落物中的成土元素均可直接溶入岩溶水中,参与岩溶水的循环交代。因为碳酸盐岩—水溶蚀反应速度较慢,岩溶水溶解更多的成土物质,这为缓慢交代成土提供了充裕的时间;溶蚀作用在溶滤层中形成很大的孔隙,也为进一步的交代作用和形成粘土矿物提供了充分有效的空间;碳酸盐岩矿物溶解析出的某些金属阳离子(如 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}),也为新生的粘土矿物(如绿泥石、蒙脱石、蛭石等)的形成提供了一定的物质成分来源。

3.1.2 交代成土作用

交代作用(metasomatism)一词最早是由德国矿物学家 K. 瑙曼—基尔克于 1877 年引入地质文献,指早期形成的矿物或岩石,在后期不同的物理化学溶液体系影响下,由于化学平衡条件的改变,使原来的矿物或岩石发生旧物质被新物质取代的作用。过去对交代作用的讨论主要见于热液矿床,特别是矽卡岩型矿床的研究中,著名的矿床学家 B. 林格伦和 Д. С. 柯尔任斯基等都曾对交代作用有过深入研究,提出了热液矿床交代作用成矿理论。对交代作用的概念,也有明确定义,其核心有二点,一是交代作用是按等体积定律进行的;二是老矿物的溶解和新矿物的沉淀几乎同时发生,被交代岩石常保持固体状态。因此,交代作用具有独特的结构构造特征。

在岩石风化成土作用研究中引入交代作用概念,还只有十余年时间,在讨论风化成土作用时,交代作用一词英文常用 replacement。汪寿松等(1983)根据海南岛玄武岩风化壳的矿物与微结构特征,曾引入假象交代作用研究海南岛玄武岩风化壳形成机理。近年来,在长石、云母等硅酸盐矿物及其岩石风化成土机理研究方面的突破性进展,也正是基于对风化壳中矿物与微结构特征的深入了解。目前,国内外学者在长石、云母和辉石

等硅酸盐矿物及其岩石风化成土作用研究中已普遍引入了交代作用概念。

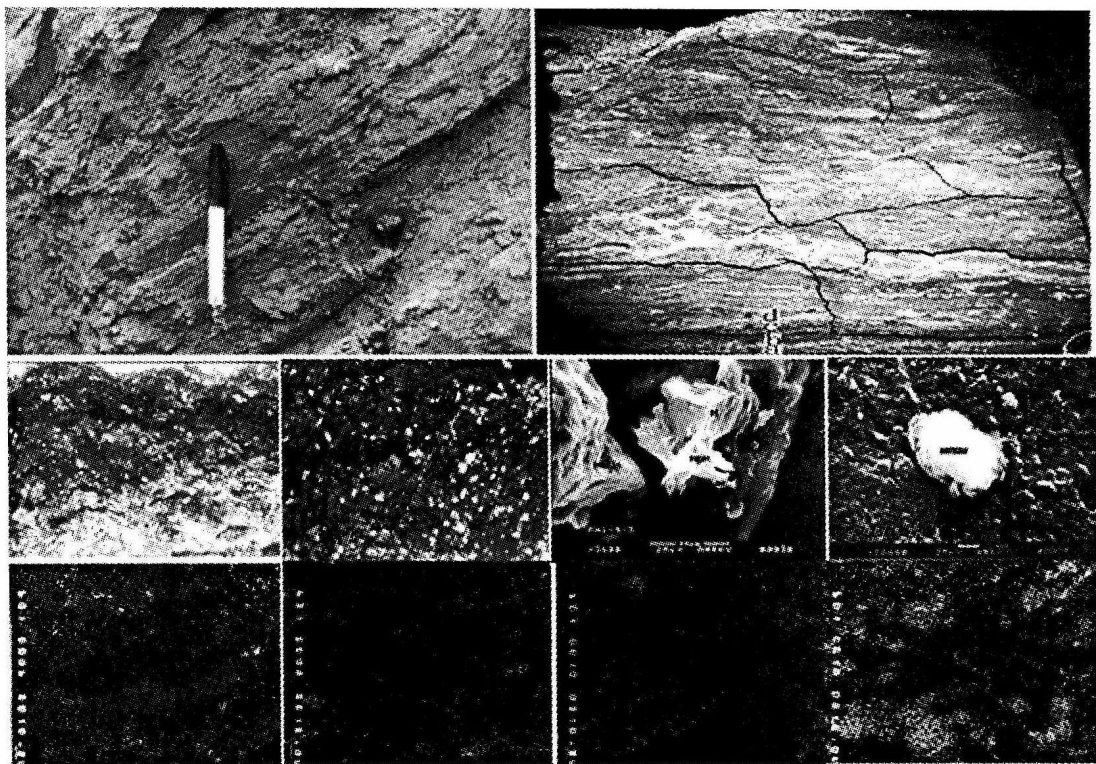
根据对亚热带地区不同发育程度典型碳酸盐岩风化剖面的野外观察和大量薄片显微观察,发现碳酸盐岩风化剖面中不仅存在岩溶环境常有的溶蚀—淀积作用形成的结构构造,而且普遍发育交代结构。在碳酸盐岩风化壳剖面的岩土过渡带(半风化层)可观察到大量交代成土作用发育的现象,岩土过渡带的土体仍保留了原岩的微构造[图版(1)、(2)],形成交代残余微层理构造,微观上表现为方解石和白云石被粘土矿物交代置换,形成假象交代结构[图版(5)、(6)],方解石(白云石)假象常由埃洛石、高岭石、伊利石等粘土矿物组成。在全风化层可观察到大量粘土矿物(高岭石、绿泥石)被氧化铁矿物(针铁矿、赤铁矿)交代置换,在结构上表现为原来由粘土矿物组成的白色与灰色相间的泥质条带结构转变为由氧化铁矿物(针铁矿、赤铁矿)构成的黄色与红色相间的泥质条带结构,进一步发展则形成全部由氧化铁矿物(针铁矿、赤铁矿)构成的黄色与红色相间的泥质条带结构[图版(3)],或黄色(针铁矿)、红色(赤铁矿)凝胶结构[图版(4)]。

在微环境 1cm 尺度范围可观察到岩土过渡带风化成土早期形成的粘土矿物(高岭石、埃洛石)被氧化铁矿物交代置换的矿物学特征,并记录下其转变的动态过程[图版(7~10)]。在矿物演化序列上,碳酸盐岩风化壳剖面由下至上常构成较完整的交代矿物演化序列;方解石、白云石—粘土矿物(埃洛石、高岭石、绿泥石)—氧化铁矿物(如针铁矿、赤铁矿)。

亚热带地区广泛发育的碳酸盐岩风化剖面处于开放的岩溶环境系统中,丰富的地下水、地表水及土中溶液和温暖潮湿的气候条件,使碳酸盐岩风化成土作用—溶蚀作用、交代作用和淀积作用十分活跃,为交代成土作用提供了良好条件。但在过去碳酸盐岩风化成土作用研究中比较强调可溶组分(钙、镁、钾等)的带出和难溶组分(铝、铁、锰等)的原地残积,往往忽视了地下水、地表水等风化流体在铝、铁、锰和硅等组分带入中的作用。尽管白云岩和石灰岩以及一系列过渡类型碳酸盐岩在成分、结构和微裂隙等方面存在差异,但交代成土作用发育却是碳酸盐岩类岩石风化成土作用的共同特征。交代成土作用是碳酸盐岩风化成土的重要主导作用,发育于碳酸盐岩风化壳形成和

演化的全过程,也是碳酸盐岩风化壳中矿物形成的基本方式之一。不同类型碳酸盐岩风化成土作用的差异主要表现在溶蚀-淀积作用发育的程度上。如在石灰岩风化成土的早期,就有溶蚀-淀积作用超过交代作用的现象,在石灰岩风化壳剖

面岩土界面附近,也可观察到较多的直接由溶蚀-淀积作用形成的矿物如埃洛石、水铝英石、结晶程度很低的凝胶状氧化铁矿物以及相应的微结构特征。



图板

3.1.3 淀积成土作用

淀积成土作用系指岩溶水(包括岩溶环境中地表水、地下水、土中水溶液)携带溶解物质在碳酸盐岩风化前锋溶滤层的空隙中(甚至可以是溶蚀洞穴等空间)生成新物质的作用,这是岩石风化成土过程中,易迁移的组分(如 K、Na、Ca、Mg 等)被带走、迁移,迁移能力弱的组分(如 Al、Si、Fe 等)沉淀聚积,形成风化壳的过程。淀积作用也包含部分残积作用,是风化壳形成的基本方式之一。

除了交代成土作用、淀积成土作用之外,还存在着残留和充填成土作用。残留成土作用是指母岩中所含石英、锐钛矿及粘土等不溶矿物经溶滤后而残留在原地;充填成土作用是岩溶地下水或其它风化流体,携带着一定量的悬移物质、填入到溶滤层及基岩的溶洞中沉积下来。随着碳酸盐岩风化成土作用的持续发展,交代成土作用逐渐成为主要的风化成土作用和矿物生成方式。因此,

交代成土作用是起主导作用的碳酸盐岩风化成土作用,贯穿于亚热带地区碳酸盐岩风化壳形成和演化的全过程。

3.2 风化成土机理

亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用具有多阶段、多途径和多方式的特点,是以化学风化和生物风化作用为主的表生地球化学过程,相应构成原岩矿物分解破坏和风化剖面中新生矿物的形成演化过程。据新生矿物的形成演化序列,碳酸盐岩风化成土过程分为粘土矿物阶段、氧化铁锰矿物阶段和三水铝石阶段。这也是碳酸盐岩风化成土过程中主量元素地球化学演化分异的结果,元素地球化学研究和风化剖面矿物分带组合特征揭示了亚热带地区碳酸盐岩风化成土地球化学过程可明显划分为脱钙镁富硅铝、富铁锰和脱硅富铝三个地球化学演化阶段,与上述矿物形成和演化阶段相对应,表现为粘土矿物、氧化铁锰矿物和三水

铝石等标志性矿物形成阶段和演化特征。碳酸盐岩风化成土作用是溶蚀、交代和淀积作用同时存在,相互促进和共同作用的过程,交代成土作用是碳酸盐岩风化成土的重要作用,也是碳酸盐岩风化剖面中矿物形成的基本方式和重要机理。

4 环境效应

4.1 重金属元素化学形态

亚热带碳酸盐岩风化剖面中重金属存在的化学形态包括交换态 (EXC)、碳酸盐结合态 (EXC)、无定形氧化锰结合态 (MnOX)、有机态 (O. M)、无定形氧化铁结合态 (AF_e)、晶质氧化铁结合态 (CF_e) 和残余态 (RES), Cu、Pb、Zn、Co、Cr、Mn 和 Fe 七种重金属元素主要存在于残余态 (RES)、晶质氧化铁结合态 (CF_e) 和无定形氧化铁结合态 (AF_e) (图 4) 中。风化成土作用形成的大量氧化铁矿物对重金属元素的富集和转化起着主导作用。随着风化成土作用的持续发展,特别是由于地表生物的参与,使风化壳表层的化学风化作用发展成为以生物风化作用—成壤作用为主的地球化学过程,并伴随大量有机质的产生,改变了风化剖面表层的物理化学微环境 (PH 值、有机质含量)。微环境有机质含量增加和 pH 值降低导致氧化铁矿物对重金属元素的吸附作用降低,而解吸作用增强,加之部分氧化铁矿物的溶解和转化,使部分呈晶质氧化铁结合态的重金属元素转变为有机态或交换态。总之,在亚热带地区碳酸盐岩风化成土过程中,风化成土作用形成的新生组分如氧化铁矿物和有机质影响重金属元素化学形态。

4.2 F、As、环境地球化学

氟主要富集于亚热带碳酸盐岩地区的土层和深层地下水中,而浅层地下水和地表水 (湖水) 普遍含氟较低。高氟地下水中氟含量在深度为百米处有一明显的异常分界线,埋藏深度在百米以内的地下水氟含量多在 0.5mg/l 以下,而赋存深度达到百米以上 (103 ~ 180m) 地下水中氟含量猛增至 1.5mg/l 以上 (曹卫锋, 1983)。风化剖面对氟的富集在很大程度上取决于其固相组分针铁矿对氟的吸附和解吸作用。砷在亚热带碳酸盐岩风化壳剖面中的分布不均匀,砷在垂直分布上并未表

现出随剖面深度增加而升高的趋势,砷的淋溶并不是影响砷垂直分布的主导因素,而成土母岩和剖面中矿物成分才是起决定作用的主导因素。风化剖面中矿物成分 (粘土矿物) 影响土样的吸附性能,尤以其中的针铁矿与无定形化合物吸附砷影响最大。

亚热带地区碳酸盐岩风化剖面中的矿物对氟、砷的选择性吸附和解析作用是二者在岩溶环境中迁移的主要机制之一,这两种作用受到碳酸盐岩风化成土作用影响和制约,如风化成土作用改变环境体系 pH 值和风化剖面中的矿物演化进而影响吸附和解析作用,其中 pH 值的变化是影响氟、砷迁移和转化的重要因素之一。一般来说,酸性环境 (pH = 4 ~ 7) 有利于氟、砷的被吸附。不同矿物成分对氟、砷的吸附能力是不相同的。亚热带碳酸盐岩风化剖面中氧化铁矿物表面对氟、砷等元素的选择性吸附和解吸作用是造成红色风化壳中氟、砷等元素活化迁移和污染的重要机理。

5 结论与展望

5.1 结论

1) 亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用是溶蚀作用、交代作用和淀积作用同时存在,相互促进和共同作用的过程,具有多阶段、多途径和多方式的特点。随着碳酸盐岩风化成土作用的持续发展,交代成土作用逐渐成为主要的风化成土作用和矿物生成方式。

2) 碳酸盐岩风化成土作用的阶段性和风化壳中新生矿物的分异演化使亚热带地区碳酸盐岩风化剖面具有明显的分带性特征。

3) 碳酸盐岩风化成土地球化学过程具有脱钙镁富硅铝、富铁锰和脱硅富铝三个地球化学演化阶段,与上述地球化学演化阶段相对应的矿物演化序列表现为粘土矿物阶段、氧化铁锰矿物阶段和三水铝石阶段。

4) 亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用产生的新生组分影响重金属元素化学形态。风化剖面中氟、砷等元素活化迁移和污染受到氧化铁矿物表面选择性吸附和解吸作用影响。风化成土作用形成新的矿物组分的选择性吸附和解吸作用,在很大程度上控制着亚热带地区地表元素地球化学行为和环境质量特征。

5.2 展望

亚热带地区碳酸盐岩风化成土作用及环境效应的研究,对解决该地区一系列资源环境问题具有十分重要的科学意义和现实意义,今后研究将主要集中在以下几个方面。

1) 碳酸盐岩风化成土作用机理。

碳酸盐岩风化成土作用内容广泛、形式复杂,是认识和解决岩溶地区一系列资源与环境问题的理论基础,今后将重点研究碳酸盐岩(或矿物)一土一水界面相互作用,成土速率及年代学研究等。

2) 碳酸盐岩风化成土地球化学过程。碳酸盐岩风化成土地球化学过程实质上是碳酸盐岩地区岩一土一水一大气一生物系统中元素地球化学循环过程和物质、能量传输过程,具有突出的地球化学敏感性特征。碳氮磷生源要素在碳酸盐岩一土一水一大气一生物系统及其界面间的生物地球化学过程已成为当前及今后一段时期该领域研究的热点和国际学科前沿课题。

3) 碳酸盐岩风化成土作用对碳循环的影响及其与全球变化的关系、碳酸盐岩风化剖面中环境信息的识别与提取。碳酸盐岩风化成土作用过程中碳的循环机制、运行规律及影响因素,对与碳酸盐岩风化成土作用有关的温室气体源汇的估算及对全球气候变化的影响。

4) 碳酸盐岩风化成土作用的资源效应。碳酸盐岩风化成土作用对亚热带岩溶环境中红土型金矿、铝土矿、风化型稀土矿床形成及部分稀有分散元素的富集成矿具有十分重要的意义,将成为矿床学家们在 21 世纪关注的一个重点领域。

5) 碳酸盐岩风化成土作用的环境效应。碳酸盐岩风化成土作用作为亚热带碳酸盐岩地区表生条件下元素地球化学循环重要组成部分,具有突出的生态环境脆弱性特征,环境效应十分明显,与许多环境问题直接相关,如水土流失、石漠化、土壤和水体污染、酸雨侵蚀、土壤退化等。今后将主要集中在碳酸盐岩风化成土作用对亚热带岩溶地区石漠化形成、演化的影响及有效防治措施研究、岩溶水环境质量变化原理及人为作用和风化成土作用的相对影响。

致谢:

本研究受到国家重点基础研究发展计划(2006CB403200)、国家自然科学基金项目(49463011、49833002 和 49962002)、环境地球化学国家重点实验室开放基金项目(1993 年度、1995 年度)、贵州省跨世纪科技人才工程项目(2000~2004)以及贵州省科学基金项目共同资助。陈筠、梁风、牟成刚、陈静、周训华等参加了部分野外和实验工作,王朝富、樊廷章、林进也等参加早期研究工作。作者在此一并表示衷心感谢。

[参考文献]

- [1] 任美镔,等. 1983. 岩溶学概论. 北京:商务印书馆.
- [2] 曹卫锋,白涛,1983. 贵阳地区地下水中高氟离子解释初步探讨. 贵州岩溶与地下水, (3):27~32.
- [3] 汪寿松,李康,韩秀伶,等. 海南岛红土风化壳的矿物成分及其形成机理[J]. 中国科学,1983,3:270~276.
- [4] 王中刚,于学元,赵振华,等. 1989. 稀土元素地球化学. 北京:科学出版社.
- [5] 李景阳,朱立军,2004. 论碳酸盐岩现代风化壳和古风化壳[J]. 中国岩溶,23(1):56~62.
- [6] 李景阳,朱立军,等,1998. 贵州碳酸盐岩风化壳稀土元素分布特征[J]. 中国岩溶, 17(1):15~24.
- [7] 李景阳,朱立军,等,2000. 碳酸盐岩风化壳界面土层的结构和矿物学特征[J]. 中国岩溶,19(4):301~307.
- [8] 朱立军,傅平秋,李景阳,1996. 贵州碳酸盐岩红土中的粘土矿物及其形成机理[J]. 矿物学报,16(3):290~297.
- [9] 朱立军,李景阳,2002. 碳酸盐岩风化成土的交代作用机理:矿物与微结构证据[J]. 贵州工业大学学报,31(2):44~47.
- [10] 朱立军,万国江,1995. 碳酸盐岩区域红色风化壳及其演化. 碳酸盐岩与环境(卷一),北京:地震出版社,41~57.
- [11] Zhu lijun, Lin jinye, 1996. The Geochemical Features and Evolution of Laterite in the Karst Areas of Guizhou Province, Chinese Journal of Geochemistry, 15(4):353~363.
- [12] Zhu lijun, Qi liang, 1997. Chemical forms of heavy metals in Carbonate Derived Laterite and ~ Enrichment of Its Iron Oxide Minerals. Chinese Journal of Geochemistry, 16(3):263~270.
- [13] Zhu lijun, Lin jiyang, 2002. Metasomic Mechanism of Weathering ~ Pedogenesis of Carbonate Rocks: I. Mineralogical and Micro ~ textural evidence. Chinese Journal of Geochemistry, 21(4):334~339.

[战略分析]

秘鲁安第斯铜矿资源特点及勘探开发商机

罗孝桓

(贵州省地质矿产勘查开发局, 贵州 贵阳 550004)

1 概述

新近的统计资料表明,美洲西海岸科迪勒拉(Cordillera)山系蕴藏有铜储量约 600Mt, 占世界总量 86%。南段安第斯为 442Mt, 约占整个科迪勒拉山系中铜储量的 73%。全球铜储量的 50% 以上是新生代第三纪产物, 并主要聚集在南美安第斯中南段的秘鲁和智利。其中智利的铜储量达 296Mt, 占世界总储量的近 42%。秘鲁的铜储量达到 100Mt, 占世界总储量近 15%。由于有得天独厚的资源条件, 南美仅智利和秘鲁的铜产量几乎占据了世界的半壁江山。2005 年, 世界铜产量 1497.2 万 t, 较上一年增长 6.59%。前 6 名铜生产大国分别为智利(以 537.9 万 t 的产量遥遥领先), 紧随其后的是美国(117.7 万 t)、印度尼西亚(102 万 t)、秘鲁(100.99 万 t)、澳大利亚(90.1 万 t)和中国(73.1 万 t)。

根据秘鲁目前铜矿山建设情况及矿业发展的国家规划, 2006 年秘鲁铜产量将会有较大增长。首先, 由 Phelps Dodge 公司经营的 Cerro Verde 矿山的铜产量将由 2004 年的 9.072 万 t 扩建到 20 万 t/y; 2007 年, Goldfield 公司年产 4 万 t 的 Cerro Corona 矿山亦将投产。因此到 2008 年, 秘鲁铜产量将达到 125 万 t, 超过印度尼西亚和美国排列第二位; 2009 年 ~ 2012 年, 秘鲁还有一批大型铜矿山如秘密第一大铜矿床 La Granja, 以及 Quellaveco、Michiquillay、Rio Blanco 等世界级铜矿床相继开发并投产, 新增产能将达到 100 万 t 以上, 因此, 乐观地预测, 到 2012 年, 秘鲁的铜产量将超过 200 万 t, 稳坐世界铜产能的第二把交椅。

2 主要矿床类型及典型斑岩矿床特征

2.1 重要铜矿床类型

秘鲁安第斯铜矿的成矿条件得天独厚, 矿床类型多样。目前已经公认的矿床类型主要有: a. 斑岩型(Porphyry Cu - Au、Cu - Mo)矿床, b. 矽卡岩型(Skarn Cu、Cu - Au)矿床, c. 火山岩块状硫化物型(VMS Cu - Pb - Zn)矿床, e. IOCG 型(Iron Oxide - Copper - Gold 即 Fe - Cu - Au)矿床。其中斑岩型和矽卡岩型铜 - 钼(铜 - 金)矿床尤为重要, 是秘鲁安第斯最重要矿床类型, 也是绝对优势的工业矿床类型。同时, 秘鲁铜矿床在安第斯构造 - 成矿带上虽然广泛分布, 但主要密集产出于三个铜矿化集中区(图 1)。最有意义的是, 斑岩矿床与矽卡岩矿床相互独立但在特殊的地质环境中又共存。总体而言, 秘鲁安第斯西带新生代火山岩分布区, 浅成侵入体的围岩主要为稍早或同期的中酸性火山岩, 所以孕育的是斑岩型铜(钼金)矿床; 而在安第斯东带浅层侵入体的围岩往往有中生代的灰岩、泥灰岩和硅泥质碎屑沉积岩, 这一情况在南秘鲁阿普里马克省、库斯科省、皮诺省一带尤为常见, 因此使这三省交界的 Andahuaylas - yauri 地区成为矽卡岩铜矿床最为集中的地区。从理论上说, 凡发现有矽卡岩铜矿化(床)的地区, 在其附近或深部都可能找到斑岩型矿化(床)。勘探实践已经无数次证明这样的叠复矿床是存在的。如在 Andahuaylas - yauri 地区

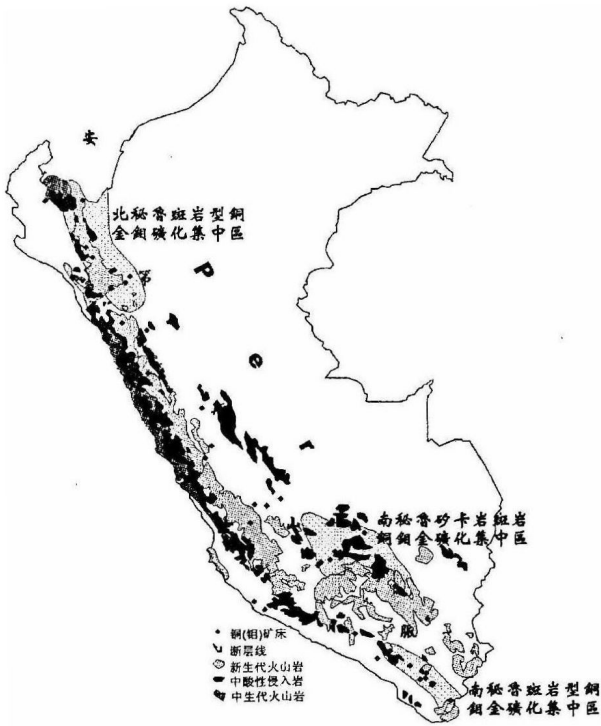


图1 秘鲁共和国地质矿产(铜钼)纲要图

南段,最先发现了 Tintaya 大型砂卡岩铜矿床,之后在其南侧找到了 Antapaccay 大型斑岩矿床;中北部安卡什省的 Antamina 铜-锌矿床,浅部为砂卡岩矿化,深部为斑岩矿化。这种叠复矿床在秘鲁安第斯特定的成矿区域相当普遍。

2.2 典型斑岩型铜矿床简介

因工作需要详细收集了北秘鲁 Michiquillay (米切克亚依)斑岩型铜钼矿床的资料,所以就以此为例介绍秘鲁安第斯斑岩铜矿床的基本地质特征。

2.2.1 成矿背景

米切克亚依 (Michiquillay) 斑岩铜矿床位于北秘鲁卡哈马卡矿业省 (Cajamarca Mining Province) 的南缘位置。北秘鲁卡哈马卡省,特别是其中的省会城市卡哈马卡市及周边是秘鲁乃至南美安第斯成矿带上金铜银钼矿成元素聚集程度最高的地区之一。在这一地区,受地壳深层次古构造控制的 Yanacocha - Chicama 高硫化低温热液型金-银-铜矿化带呈 NE - SW 走向,走向长 160km,宽约 70km。而受新生代安第斯构造-火山岩-浅层侵入岩带控制的斑岩型铜-钼(铜-

金)矿化带其走向则与安第斯构造带一致呈 NW 走向,长约 350km,NE 宽近 100km。这两个成矿带大致呈直角在卡哈马卡市区相交。米切克亚依即位于上述两个成矿带的十字交叉区域。

据不完全统计,在北秘鲁这两个重要成矿带不到 5 万 km² 的区域内,已探明储量:铜 3851 万 t,金 1830t,银 10885t,锌 600 万 t。当前,上述两个成矿带上铜金找矿勘探依然方兴未艾,铜金银等矿产资源/储量还将进一步增长。

2.2.2 区域地质简况(图 2)

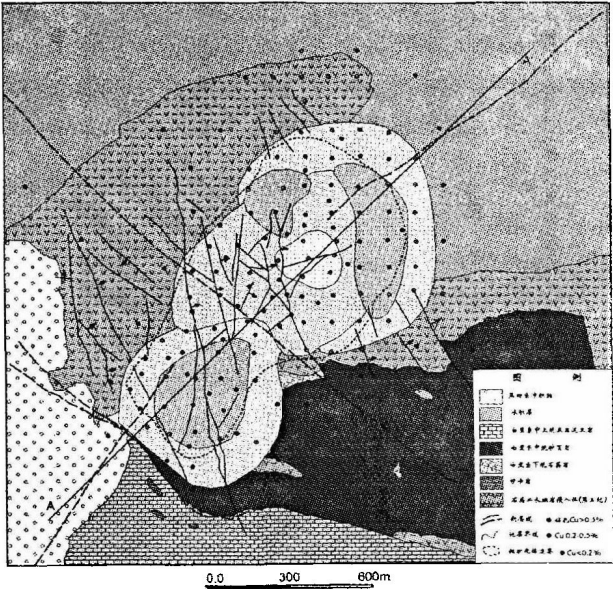


图2 北秘鲁米切克亚依 (Michiquillay) 斑岩型铜钼金矿床地质简图

米切克亚依区域出露最老的地层是下白垩统,由石英岩和石英砂岩组成。中上白垩统为从灰岩到泥灰岩夹页岩的连续沉积,总厚达 3400m。在区域构造位置上,米切克亚依铜矿床恰好处于安第斯中生代 NNW 向 NWW 构造的转折(拐点)上。受 NE 向挤压作用,区域地层总体走向 NWW 并形成背一向斜相间的褶皱构造系统。米切克亚依断层从背一向斜褶皱系统之间穿过。这是一条主要十分重要的控岩控矿断层,该断层 NW 走向长约 5000m。断层破碎带宽 20 ~ 100m。运动学的观察研究表明这条断层在成矿前和成矿期作逆冲运动,这种运动状态被认为与米切克亚依斑岩体的入侵(岩浆上涌推动)有着密切的关系(图 3)。除米切克亚依断层外,还有 NE 向和 NS 向断层。地质填图发现,在米切克亚依矿区发育有大量的破碎作用。通常情况下,细小裂隙强烈发育