

峡东地区南华纪—寒武纪地层风化过程元素及 Sr-Nd 同位素演化特征及其地球化学意义

张永清^{1,2}, 凌文黎^{2,3}, 李方林³

1. 中国地质大学研究生院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 以峡东地区南华纪、震旦纪和寒武纪标准地层泥岩、冰碛泥岩、砂岩、灰岩和白云质灰岩及对应的风化土壤为研究对象, 分析了地层风化成土过程中不同元素的迁移行为, 根据剖面样品的 Sr-Nd 同位素组成变化, 探讨了其同位素体系的封闭性特征与应用意义。结果表明: (1) 不同岩性基岩在成土过程中的蚀变强度有明显的差异, 在相似地表条件下, 碳酸岩风化剖面的风化程度高于泥质岩和砂岩; (2) 通过对比稳定高场强 Ti 元素在基岩和风化剖面中的含量变化, 计算出土壤样品在风化过程中体积相对基岩发生的改变量, 进而计算出不同岩性基岩在风化过程中微量元素的绝对含量变化以探讨这些元素的活动规律。结果表明, 灰岩和白云质灰岩的风化剖面元素含量变化明显, 而在泥质岩风化过程中大多数元素保持了相对稳定, 说明沉积岩风化过程中元素的活动性特征明显地受到了原岩矿物组成的制约。风化过程中, 不同性质的元素的活动性差异明显, 其中亲硫元素(Cu、Zn、Pb、Mo)和大离子亲石元素(Rb、K、Sr、Ba)在不同岩性的风化剖面中均表现出明显的元素含量变化, 而高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)含量则相对稳定; (3) 泥质岩风化形成的土壤层 REE 含量变化较小, 而碳酸岩风化土壤层 REE 含量发生了明显下降, 且其风化形成的土壤表现出 LREE 和 HREE 相对于 MREE 的富集。无论是碳酸岩或泥质岩风化形成的土壤, 均出现了明显的 Eu 负异常和 Ce 的正异常, 但在其原岩中这些异常并不存在或不明显; (4) 基岩与土壤剖面间 Sr 同位素组成和 Rb/Sr 比值存在明显差异, Rb-Sr 同位素组成发生了明显的开放。所形成土壤层的 Sr 同位素组成受到 2 种因素的约束: 原岩性质和外来组成的 Sr 同位素比值。因此在总体上, 风化土壤的 Sr 同位素组成已不能代表基岩的 Sr 同位素组成; (5) 沉积岩风化过程中, 碳酸岩和泥质岩形成的风化土壤基本保持了原岩的 Sm-Nd 同位素组成特点, 由其组成所获得的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄等能反映其原岩信息, 而近源沉积形成的砂岩和含砾冰碛泥岩所形成的土壤, 其 Nd 同位素组成则存在不同程度的改变。

关键词: 南华系—寒武系; 沉积岩; 化学风化; 元素和 Sr-Nd 同位素; 迁移行为。

中图分类号: P591

文章编号: 1000-2383(2008)03-0301-12

收稿日期: 2007-10-13

Element and Sr-Nd Isotopic Mobility during Weathering Process of the Nanhuaian-Cambrian Sedimentary Strata in the Eastern Three Gorges and Its Geochemical Implication

ZHANG Yong-qing^{1,2}, LING Wen-li^{2,3}, LI Fang-lin³

1. Graduate School, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Element and Nd-Sr isotopic mobility during the weathering process of stratotypes for the Nanhuaian, Sinian and Cambrian sedimentary strata have been studied in eastern Three Gorges. Stratigraphic bedrocks of mudstone, glacial mudstone, sandstone, limestone and dolomitic limestone coupled with their correspondent soil layers by chemical weathering

基金项目: 国家自然科学基金委员会“创新研究群体科学基金”项目(No. 40521001); 国家精品课程资助项目(No. 17051018)。

作者简介: 张永清(1982-), 女, 硕士研究生, 地球化学专业。E-mail: zhangyq823@163.com。通讯作者: 凌文黎, E-mail: wlling@cug.edu.cn

were analyzed. It demonstrates that (1) the intensity of chemical weathering of bedrocks is dominated by their lithology; (2) Due to its stability, Ti is regarded as immobile during chemical weathering. Thus, the variations of Ti concentrations in soil samples relative to their bedrocks are used to correct volume changes of soil layers during the weathering and accordingly to recalculate relative contents of other elements in the layers. It shows that obviously content decreasing for most elements in soil layers relative to their bedrocks is found for limestone and dolomitic limestone profiles; in contrast, soil samples from the mudstone profiles exhibit a relative stability for most elements. It, thus, suggests that the elemental mobility during chemical weathering of sedimentary rocks is dominated by their rock-forming minerals. Meanwhile, different classical elements show distinct mobility during the chemical weathering. Contents of chalcophile (Cu, Zn, Pb and Mo) and LILE (Rb, K, Sr and Ba) elements varied obviously, whereas those of the HFSE element (Zr, Hf, Nb and Ta) kept relatively constant; (3) Relative to their bedrocks, the variation of REE content in soil layers by mudstone is indistinctively, whereas that in soil layers by carbonate rocks changed evidently characterized both by enrichment in LREE and HREE relative to MREE and negative Eu and positive Ce anomalies; (4) Both Sr isotopic composition and Rb/Sr ratio changed remarkably during the weathering process of both carbonatic and argillaceous rocks, indicating an opening of their Rb-Sr isotopic system. It shows that the variation in Sr isotopic compositions of the soil layers relative to their bedrocks is dominated both by the lithology of their parental rocks and the Sr isotopic composition input during weathering. Accordingly, the Sr isotopic compositions of the soil layers are not indicative of their bedrocks; (5) The Sm/Nd ratio and Nd isotopic compositions of the soil layers weathered from carbonate and mudstone rocks essentially inherited the characters of their bedrocks, and their depleted mantle model ages (t_{DM}) are indicative of their parental rocks. However, variable degree variations in Nd isotopic compositions are recognized for the soil samples weathered by sandstone and glacial mudstone.

Key words: Nanhuaian-Cambrian; sedimentary rock; chemical weathering; element and Sr-Nd isotope; mobility.

岩石风化是元素表生地球化学循环的重要环节,不仅影响了来源于固体岩石中的不同元素在地壳表层中的重新分配,且由于风化作用发生于与人类活动环境直接接触的地表,因此对人类的生存与生活有着重要的联系。长期以来,国内外学者对岩石风化成土过程中元素的变化规律(Ma and Liu, 1974; Nesbitt et al., 1980; 顾尚义等, 2003; 徐小磊等, 2005)、生物对风化进程的影响(Lucas et al., 1993; Oliva et al., 1999)、风化过程中的大气降水和气候因素(White and Blum, 1995; Anderson et al., 1997)等方面开展了研究,但相对于花岗岩和玄武岩等岩浆岩系,对于沉积岩风化过程中元素的地球化学行为研究显得相对较弱(Nesbitt, 1979; Middelburg et al., 1988; 黄成敏和龚子同, 2001; Ji et al., 2004)。

除少数隆升区外,扬子克拉通广泛发育了从震旦纪、古生代至中—新生代的巨厚沉积地层。因此,这些地层在地表的风化行为主导了扬子克拉通土壤层的元素地球化学特征。对扬子克拉通沉积地层开展表生条件下的元素和同位素地球化学研究,不仅在理论上可加强对不同性质基岩在化学风化作用过程中元素地球化学行为的认识,同时也将促进对与风化作用过程有关的扬子地区土壤、水系和沉积物性质的了解,进而为合理地利用和开发自然条件、保

护环境等关系人们生产和生活的重大问题提供决策的科学依据。

位于湖北省宜昌市的峡东地区是扬子克拉通震旦纪和古生代地层的标准剖面所在地。本文以峡东地区南华纪—寒武纪标准剖面为研究对象,对从基岩至不同风化程度的土壤剖面进行了系统的样品采集。通过对不同性质基岩及其土壤剖面样品进行主量—微量元素分析和配套的 Sr-Nd 同位素分析,讨论了沉积岩系风化作用过程中元素和同位素地球化学行为,并对其地球化学意义与应用进行了探讨。

1 区域地质概况与样品

研究区出露地层为南华纪莲沱组(Nh_1)、南沱组(Nh_2),震旦纪陡山沱组(Z_2d)、灯影组(Z_2dn)和寒武纪牛蹄塘组(E_1n)、石牌组(E_1sh)、天河板组(E_1t)、石龙洞组(E_1sl)、覃家庙组(E_2q)。

莲沱组底部为紫红色石英砾岩,不整合覆盖在黄陵岩基或崆岭群变质岩之上,下段下部以紫红色含砾粗中粒长石石英砂岩、长石石英中粒砂岩为主,上部为紫红—灰白色厚层状为主夹透镜状产出的中细粒长石岩屑砂岩夹粉砂质泥岩、透镜状泥岩,上段为灰白—紫红色中层状中粒长石岩屑砂岩、粉砂岩、

粉砂质泥岩及晶屑玻屑凝灰岩;南沱组为黄绿色含砾冰碛泥岩,中下部偶夹泥岩、泥质粉砂岩透镜体;陡山沱组分为4段,第四段为灰色粉晶云岩夹黑色页片状炭质泥岩,遍含透镜状燧石结核,第三段为含磷泥晶云岩夹黑色页岩,第二段为灰—深灰色泥质泥晶云岩、粉晶云岩夹页片状云质泥岩,第一段为含砾砂屑泥晶灰岩、泥粉晶灰岩夹页片状云质泥岩;灯影组下段为浅灰—灰白色薄层状纹石灰岩夹粉晶灰岩、泥晶灰岩及少量粉晶云岩,中段为深灰—灰黑色薄中层状粉晶云质灰岩、粉晶灰质云岩、粉晶云岩、泥晶灰岩等,上段为浅灰—灰白色厚层—块状亮晶砂屑云岩、粉晶云岩、含砂屑泥粉晶云岩;牛蹄塘组下段为黑色炭质泥岩、粉晶灰岩夹含磷层或磷质结核等,中段上部为灰—深灰色薄层状粉晶泥质灰岩夹薄层泥岩、粉砂质细晶灰岩,上段为灰—深灰色薄—中层状泥粉晶灰岩、含亮晶泥晶球粒灰岩等;石牌组下部为黄褐—紫红色泥质粉砂岩、细砂岩偶夹透镜状粉砂细晶灰岩,上部为黄绿色粉砂岩夹泥岩;天河板组为灰—深灰色薄层状含泥质条带泥粉晶灰岩、含泥质条带生物屑泥粉晶灰岩夹多层亮晶含砾砂屑灰岩;石龙洞组为灰色中厚层—块状粉—中晶云岩、粉晶砂屑云岩,顶部见亮晶鲕粒云岩;覃家庙组是研究区出露最年轻的地层,下段为浅灰—灰色薄—中层状泥质泥晶云岩夹页片状云质泥岩、粉砂屑泥粉晶云岩、叠层藻云岩,中下部夹亮晶鲕粒云质灰岩,上段为浅灰—灰白色薄—厚层状粉晶云岩夹叠层石泥晶云岩(湖北地质矿产局,1990;薛耀松等,2001;章森桂和严惠君,2005)。

样品采自位于峡东地区宜昌秭归县泗溪附近的南华纪、震旦纪和寒武纪标准剖面(图1),根据岩性,分别对南华纪砂岩和冰碛泥岩、震旦纪白云质灰岩和灰岩、寒武纪灰岩和泥岩及其风化土壤进行了样品采集。南华纪砂岩风化剖面采自莲沱组下段,基岩岩性为紫红色含砾中粒长石石英砂岩;冰碛泥岩风化剖面采自南沱组,地层岩性为黄绿色含砾冰碛泥岩;震旦纪白云质灰岩风化剖面取自灯影组下段,基岩岩性为浅灰白色薄层状白云质灰岩,灰岩风化剖面取自灯影组中段,基岩岩性为深灰色薄层状灰岩;寒武纪泥岩风化剖面取自牛蹄塘组下段,地层岩性为黑色炭质泥岩,灰岩风化剖面取自牛蹄塘组上段,地层岩性为深灰色薄层状灰岩。

在采集土壤样品时,按A、B层分别采集,当两者界限不清晰时,采集其混合层,当剖面发育C层

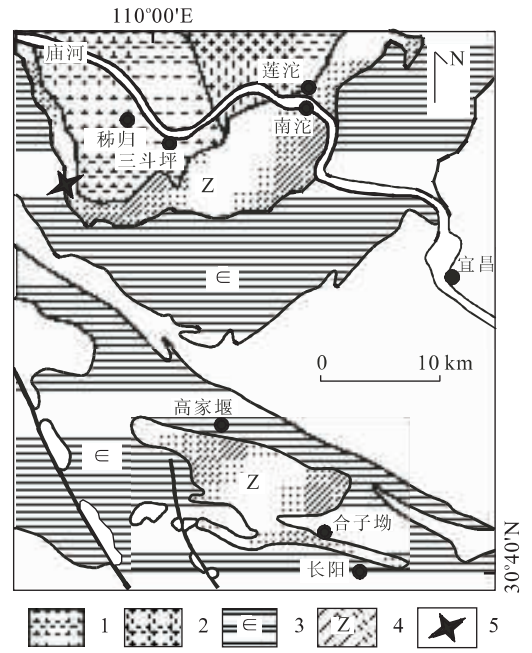


图1 峡东地区南华纪—寒武纪地层分布简图及采样位置 (据 Yin *et al.*, 2003 修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the eastern Three Gorges with sampling location

1. 英云闪长岩; 2. 花岗岩; 3. 寒武纪; 4. 南华和震旦纪; 5. 采样位置

土壤时,增采C层样品。A层土壤主要由砂组成,含少量粘土,粘性差、松散,采样位置在20~30 cm深度之间;B层土富含粘土,粘性强,采样位置为约50~70 cm深度;C层主要由原岩碎屑组成,岩石部分被分解,含粘土很少,采样位置随剖面不同而异。基岩样采自剖面下部的的新鲜原岩,当基岩出露条件较差时,则在邻近剖面位置附近采集同层同岩性基岩。

2 样品分析与结果

原始样品经风干后细碎过20目筛,再用玛瑙研钵磨至200目以下,供主量—微量元素和同位素分析测试。主量—微量元素和Sr、Nd同位素分析在中国地质大学“地质过程与矿产资源国家重点实验室”ICP-MS实验室和同位素实验室完成(表1)。

主量—微量元素样品用HNO₃+HF混合酸、在带金属外壳的耐高温高压特氟隆塑料溶样弹中溶解(190℃,48h),溶好样液蒸干后加入3 mL 30% HNO₃,在溶样弹中再次溶解(190℃,24h),以确保样品溶解彻底。溶解好的样液用2%的硝酸在聚乙烯塑料

表 1 峡东地区南华纪—寒武纪风化剖面主量—微量元素和 Sr-Nd 同位素组成

Table 1 Elements and Sr-Nd isotopic compositions of the Nanhuaian, Sinian and Cambrian weathering profiles from the eastern Three Gorges

剖面名称 样号 样品性质	灯影组灰岩剖面(1)			灯影组白云质灰岩剖面(2)			牛蹄塘组灰岩剖面(3)	
	1R 基岩	1A A层土	1B B层土	2R 基岩	2A A层土	2B B层土	3R 基岩	3AB AB层土
部分主量元素(%)								
Ti	0.04	0.53	0.52	0.02	0.35	0.37	0.03	0.44
Al	0.64	6.87	6.53	0.24	6.52	6.78	0.52	6.74
Fe	0.45	3.25	3.19	0.52	3.56	3.91	0.50	3.53
Mn	0.01	0.09	0.09	0.01	0.05	0.06	0.01	0.09
Mg	2.52	0.68	0.66	11.5	3.17	3.63	3.81	1.39
Ca	31.7	0.48	0.45	21.3	5.86	5.03	32.5	3.61
Na	0.14	0.68	0.65	0.04	0.33	0.29	0.05	0.53
K	0.25	1.89	1.91	0.05	2.13	2.40	0.25	1.43
P	0.02	0.07	0.06	0.02	0.11	0.10	0.02	0.06
微量元素($\mu\text{g/g}$)								
B	1.46	34.5	35.4	1.59	37.0	39.9	2.28	45.3
V	9.14	119	110	5.21	199	144	7.28	86.5
Cr	9.10	78.1	75.1	4.00	90.9	97.2	11.5	79.3
Co	1.84	14.9	13.9	1.06	13.0	15.4	1.58	13.0
Cu	2.57	26.2	23.9	4.31	40.7	42.7	2.38	17.8
Zn	2.92	80.5	77.5	14.2	112	123	3.12	51.3
Ga	1.75	15.2	14.5	0.86	16.2	17.0	1.37	16.7
Rb	9.80	105	101	1.34	104	111	9.14	86.9
Sr	649	70.4	67.1	152	123	83.2	610	89.0
Y	3.66	28.4	26.5	3.54	30.9	30.9	3.03	32.6
Zr	17.1	276	190	4.47	152	162	12.4	221
Nb	1.41	17.2	17.0	0.55	12.4	13.8	2.06	15.5
Mo	0.13	3.66	3.92	0.12	8.56	4.32	0.28	0.83
Cd	0.01	0.19	0.21	0.04	0.28	0.20	0.01	0.13
Sn	0.35	3.21	2.75	0.10	3.17	3.53	0.30	3.17
Cs	0.49	6.73	6.45	0.09	9.68	11.6	0.53	7.04
Ba	62.7	626	610	76.8	554	510	44.6	355
La	3.35	35.1	32.9	4.81	32.5	35.1	3.08	34.3
Ce	6.62	83.6	77.5	6.06	63.5	73.0	5.42	76.0
Pr	0.77	7.53	7.24	1.04	7.33	8.05	0.61	8.22
Nd	3.05	27.4	26.5	4.11	28.1	30.0	2.61	30.6
Sm	0.59	5.06	4.94	0.72	5.56	5.91	0.49	6.19
Eu	0.15	1.05	1.04	0.16	1.14	1.18	0.10	1.26
Gd	0.54	4.32	4.13	0.62	4.86	5.10	0.45	5.40
Tb	0.09	0.70	0.67	0.09	0.78	0.82	0.07	0.85
Dy	0.54	4.62	4.33	0.52	4.72	4.99	0.45	5.31
Ho	0.11	0.94	0.83	0.10	0.98	1.02	0.09	1.04
Er	0.31	2.75	2.51	0.23	2.89	2.89	0.25	2.95
Tm	0.04	0.41	0.38	0.03	0.41	0.43	0.04	0.46
Yb	0.29	2.85	2.58	0.20	2.61	2.86	0.22	3.04
Lu	0.05	0.44	0.39	0.03	0.41	0.42	0.03	0.45
Hf	0.47	7.35	5.28	0.12	3.99	4.28	0.35	5.70
Ta	0.12	1.09	1.14	0.05	0.85	0.96	0.10	1.07
Tl	0.05	0.92	0.89	0.01	1.25	1.33	0.04	0.63
Pb	3.09	23.4	21.7	2.82	30.6	32.7	6.08	32.0
Th	1.11	12.8	11.9	0.28	12.0	13.5	0.91	12.5
U	0.40	4.81	4.74	0.35	6.90	5.56	0.35	2.84

续表 1

剖面名称	灯影组灰岩剖面(1)			灯影组白云质灰岩剖面(2)			牛蹄塘组灰岩剖面(3)		
	1R	1A	1B	2R	2A	2B	3R	3AB	
样品性质	基岩	A层土	B层土	基岩	A层土	B层土	基岩	AB层土	
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.709 317	0.726 106	0.726 997	0.708 817	0.719 136	0.723 576	0.709 004	0.717 604	
$2\sigma_m(10^{-6})$	3	8	3	2	3	3	4	9	
Rb/Sr	0.02	1.49	1.51	0.01	0.84	1.34	0.01	0.96	
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.044	4.325	4.375	0.026	2.446	3.873	0.043	2.776	
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	0.708 925	0.687 240	0.687 680	0.708 588	0.697 154	0.688 774	0.708 668	0.696 114	
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.512 008	0.512 013	0.512 001	0.511 926	0.511 988	0.512 026	0.511 979	0.512 053	
$2\sigma_m(10^{-6})$	2	2	1	2	2	1	4	1	
Sm/Nd	0.19	0.18	0.19	0.18	0.20	0.20	0.19	0.20	
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.117 1	0.111 5	0.112 7	0.106 5	0.119 6	0.119 0	0.113 0	0.121 8	
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	0.511 525	0.511 553	0.511 536	0.511 486	0.511 494	0.511 534	0.511 577	0.511 620	
$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.80	1.69	1.73	1.74	1.88	1.80	1.77	1.81	
剖面名称	牛蹄塘组泥岩剖面(4)			南沱组冰碛泥岩剖面(5)			莲沱组砂岩剖面(6)		
样品性质	4R	4AB	5R	5A	5B	5C	6R	6A	6C
样品性质	基岩	AB层土	基岩	A层土	B层土	C层土	基岩	A层土	C层土
部分主量元素(%)									
Ti	0.42	0.36	0.36	0.43	0.47	0.48	0.10	0.49	0.58
Al	7.54	6.78	6.58	7.20	7.47	7.25	3.14	10.8	12.8
Fe	4.42	3.99	3.73	3.69	3.75	3.63	1.05	3.97	4.43
Mn	0.03	0.04	0.05	0.14	0.17	0.20	0.03	0.09	0.08
Mg	1.23	1.64	1.17	1.16	1.17	1.10	0.10	0.79	0.94
Ca	3.84	7.56	0.31	0.49	0.48	0.41	0.60	0.35	0.36
Na	0.65	0.25	0.31	0.92	1.03	1.03	1.35	1.72	1.46
K	2.74	2.26	3.06	2.86	2.79	2.74	1.58	4.28	5.47
P	0.07	0.08	0.05	0.09	0.08	0.07	0.01	0.04	0.03
微量元素($\mu\text{g}/\text{g}$)									
B	55.4	62.1	53.2	28.4	26.6	30.1	8.53	28.4	38.5
V	147	136	62.2	75.2	77.8	78.4	10.8	119	156
Cr	102	89.1	73.5	67.9	67.6	64.9	18.2	87.8	108
Co	16.7	16.1	6.40	16.1	16.7	17.8	2.40	18.5	21.6
Cu	49.4	42.3	5.12	41.0	29.4	38.0	5.95	17.1	16.3
Zn	132	86.8	49.5	94.1	83.7	86.7	21.0	159	193
Ga	20.0	17.7	16.6	17.7	18.1	18.6	5.27	30.2	38.4
Rb	146	125	100	98.5	102	105	47.9	147	177
Sr	481	510	28.4	65.6	70.2	69.8	85.7	99.9	97.9
Y	31.8	26.1	27.2	34.4	34.9	38.5	7.21	24.5	29.1
Zr	135	119	198	235	231	233	111	491	479
Nb	14.6	12.5	12.3	14.7	16.5	17.0	4.04	15.5	18.4
Mo	14.3	5.94	0.28	0.81	0.54	0.53	0.38	0.74	0.65
Cd	0.24	0.20	0.06	0.17	0.10	0.11	0.03	0.15	0.10
Sn	3.75	3.33	2.37	3.82	2.92	3.44	0.75	2.97	3.48
Cs	8.42	9.07	5.36	4.56	4.71	4.74	0.82	5.72	6.39
Ba	822	666	554	820	1 082	1 040	938	1 063	1 241
La	40.1	33.7	30.6	37.0	37.9	39.6	12.5	34.2	41.5
Ce	81.5	68.5	61.5	78.1	81.1	91.5	22.4	79.5	86.1
Pr	8.94	7.63	7.18	8.77	8.74	9.34	2.62	6.61	7.96
Nd	33.5	27.7	26.8	32.8	33.4	34.8	9.36	22.6	26.7
Sm	6.44	5.18	5.43	6.77	6.57	7.35	1.65	4.26	4.98
Eu	1.20	1.11	1.33	1.41	1.44	1.59	0.58	1.10	1.34
Gd	5.39	4.39	4.56	5.65	5.67	6.40	1.34	3.51	4.23
Tb	0.83	0.70	0.75	0.92	0.93	1.03	0.20	0.59	0.70
Dy	5.03	4.31	4.75	5.65	5.68	6.38	1.07	3.89	4.60
Ho	1.02	0.85	0.94	1.10	1.15	1.24	0.20	0.84	1.00

续表 1

剖面名称 样号 样品性质	牛蹄塘组泥岩剖面(4)			南沱组冰碛泥岩剖面(5)			莲沱组砂岩剖面(6)		
	4R 基岩	4AB AB层土	5R 基岩	5A A层土	5B B层土	5C C层土	6R 基岩	6A A层土	6C C层土
Er	2.83	2.40	2.69	3.33	3.40	3.64	0.61	2.64	3.11
Tm	0.41	0.37	0.42	0.50	0.49	0.53	0.10	0.41	0.50
Yb	2.69	2.36	2.74	3.23	3.35	3.55	0.67	2.88	3.42
Lu	0.41	0.36	0.42	0.49	0.49	0.53	0.10	0.47	0.53
Hf	3.64	3.24	5.15	6.01	6.02	5.95	2.77	11.9	11.8
Ta	1.03	0.90	0.81	0.96	1.07	1.11	0.25	0.92	1.10
Tl	1.95	1.72	0.34	0.48	0.48	0.47	0.28	0.83	0.99
Pb	16.5	17.9	3.02	25.7	19.0	20.2	9.22	27.4	26.3
Th	13.8	12.5	8.97	10.9	11.0	11.2	3.07	12.7	17.0
U	7.51	4.48	1.19	2.01	2.06	2.07	0.46	2.36	2.53
$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	0.714 602	0.713 058	0.723 759	0.734 529	0.736 540	0.737 568	0.739 043	0.739 300	0.744 513
$2\sigma_m(10^{-6})$	4	5	5	10	10	6	7	9	6
Rb/Sr	0.30	0.25	3.52	1.50	1.45	1.50	0.56	1.47	1.80
$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	0.879	0.710	10.201	4.359	4.206	4.365	1.620	4.258	5.240
$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	0.707 794	0.707 560	0.621 855	0.690 988	0.694 528	0.693 963	0.721 694	0.693 713	0.688 414
$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	0.511 915	0.511 916	0.512 276	0.512 072	0.512 088	0.512 119	0.511 407	0.511 623	0.511 554
$2\sigma_m(10^{-6})$	2	1	4	1	1	2	2	1	2
Sm/Nd	0.19	0.19	0.20	0.21	0.20	0.21	0.18	0.19	0.19
$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	0.116 3	0.103 0	0.122 6	0.124 6	0.118 9	0.127 5	0.106 7	0.113 9	0.112 7
$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	0.511 501	0.511 514	0.511 714	0.511 500	0.511 542	0.511 534	0.510 882	0.511 063	0.511 000
$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	1.93	1.86	1.46	1.84	1.70	1.82	2.47	2.32	2.40

注:(1)主量元素为 ICP-MS 分析结果;(2) $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 比值据样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 、 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值及 Rb、Sr 和 Sm、Nd 含量计算;(3) $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$ 和 $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$ 分别为样品的初始同位素比值,其计算公式为 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} \times (e^{(0.0000142t)} - 1)$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} \times (e^{(0.000054t)} - 1)$,南华纪莲沱组地层剖面 t 取值为 750 Ma,南沱组地层剖面 t 取值为 700 Ma,灯影组地层剖面 t 取值为 630 Ma,寒武纪牛蹄塘组地层剖面 t 取值为 543 Ma,年龄值的选取参考文献(薛耀松等,2001;章森桂和严惠君,2005);(4)亏损地幔现代值取 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.51315$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}=0.2137$; t_{DM} 的计算公式为 $152.9 \times \text{LN}(1 + (0.51315 - ^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}) / (0.2137 - ^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}))$ 。

瓶中定容至 100 g 左右,最后用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500a)进行元素含量测试(为避免 Nb, Ta 在稀硝酸介质中不稳定,所有 ICP-MS 测试均在定溶 12 h 内完成)。分析流程用国际标样 BCR-2、AGV-1 和 GSS-1 监测,元素含量相对误差优于 5%~10%。Sr、Nd 同位素样品同样采用 $\text{HNO}_3 + \text{HF}$ 混合酸和溶样弹溶解(190 °C, 48 h),溶好的样液用 AG50×8 阳离子交换树脂分离 Rb、Sr 和 REE,再用 Eichrom 公司生产的 LN 特效树脂分离和纯化 Nd。制备好的样品用热电离同位素质谱仪(TIMs, Triton TI)进行 Sr 和 Nd 同位素比值测量。仪器的准确度分别用标样 NBS987 和 La Jolla 国际标样进行监测。Sr 同位素质量分馏用 $^{88}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 8.375209$ 校正,国际标样 NBS987 和 NBS607 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 测量结果分别为 0.710300 ± 4 ($2\sigma_m$, 下同)和 1.198898 ± 4 ; Nd 同位素质量分馏用 $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.721900$ 校正,国际标样 La Jolla、BCR-2 的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 测试结果分别为 0.511837 ± 0.6 和 0.512619 ± 2 。样品的元素和 Sr-Nd 同位素组

成测量结果列于表 1。

3 风化过程元素含量变化的计算方法

基岩出露于地表发生化学风化作用的过程将伴随组成岩石的矿物发生不同程度的分解,导致部分矿物溶解进入地表水系、部分矿物蚀变形成与环境平衡的新矿物以及部分外来组成被吸附或进入新生矿物等,这些过程将引起风化后形成的新体系相对于原岩发生体积和质量的变化。因此,直接对比原岩与土壤样品间元素含量的变化并不能准确地反映风化过程中元素的地球化学行为,即基岩风化过程中各元素是否发生了净带出或净带入。部分元素(如多数高场强元素或 V 等元素)在风化过程中具相对的稳定性,即风化前后其绝对含量没有发生明显变化。因此,根据这些元素在风化前后体系中相对含量的变化,可计算出风化过程中体系发生的质量(或相对体积)的变化,以此为基础,计算出土壤样品中其他

元素相对于原岩质量(体积)的相对含量,通过对比元素的原岩含量和土壤相对含量之间的变化,分析其在化学风化过程中地球化学行为。

本文选择 Ti 为含量相对稳定的计算参考元素,因为在地质样品中, Ti 是含量最高的高场强元素,且大量的研究均表明 Ti 在风化蚀变过程中能保持相对稳定(Stiles *et al.*, 2003; 宋照亮等, 2004)(为确保稳定性元素选择的准确性,以同样被认为稳定元素的 Zr 作参照元素,标准化结果与 Ti 相近)。土壤样品元素含量的计算公式为:

$$\mu = [(C_j^O / C_j^A) \cdot (C_{Ref}^A / C_{Ref}^O) - 1] \times 100. \quad (1)$$

式(1)中 C_j^O 和 C_j^A 分别为元素 j 在基岩和风化土壤中的含量, C_{Ref}^O 和 C_{Ref}^A 分别为风化过程中相对稳定的参考元素,即 Ti 元素在基岩及其风化土壤中的含量。当 $\mu > 0$ 时,表示元素发生了富集作用,存在外来元素的净加入;当 $\mu < 0$ 时,表示元素从原系统中净迁出,即发生亏损作用;当 $\mu \approx 0$ 时,表示元素在风化作用过程中其净含量没有明显的改变。

4 风化剖面元素地球化学特征

4.1 微量元素

根据前述元素 Ti 含量标准化方法,计算了峡东南华纪—寒武纪地层风化剖面的微量元素相对含量的变化特征。计算结果表明,不同岩性基岩在风化过程中元素的活动性规律不同,其中灰岩和白云质灰岩的风化剖面元素含量变化明显,而泥岩和砂岩风化剖面的元素含量变化则相对较小。同时,在同一风化剖面内各土壤层之间,其微量元素含量变化具有

相似的变化趋势。

总体上,亲硫元素(Cu、Zn、Pb、Mo)和大离子亲石元素(Rb、K、Sr、Ba)在不同岩性的风化剖面中均表现出明显的元素含量变化,而高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)则含量相对稳定性。显然,亲硫元素的含量变化应与基岩化学风化过程中硫化物等矿物的氧化和次生富集有关,而大离子亲石元素的含量变化应主要由长石、云母(Rb、K、Ca)的粘土化和碳酸盐矿物的溶解所致。高场强元素的主要赋存矿物为锆石、榍石和金红石等副矿物,在地表风化条件较为稳定。值得指出的是,高场强元素 P 在泥质岩风化剖面中含量相对稳定,但灰岩风化剖面中表现出明显的活动性;而作为大离子亲石元素的 Ce 则在两个风化剖面中均表现出稳定性。以下以震旦纪灯影组灰岩剖面 and 南华纪南沱组冰碛泥岩剖面分别作为区域内碳酸岩和泥质岩典型剖面进行说明。

按元素相对含量变化由减少至增加的顺序,对微量元素进行“蛛网”图示(图 2)。由图 2a 可见,相对其原岩,土壤样品中大多数元素的含量发生了明显下降,其中 Sr 含量下降幅度最大,在 A 和 B 层土壤分别下降了 99% 和 97%,显示 Sr 在碳酸岩的风化过程中由于其主要寄主矿物碳酸盐的溶解而极易流失;元素 Eu、Pb、Y、K、Ho、Dy、Sm、Sn 与 Nd 等发生了中等程度的流失,其含量下降约为 40%,而元素 Yb、Pr、Ta、Cu、Ba、La、Rb 和 Th 含量变化稍小,其含量下降幅度约为 25%,这表明中—重稀土元素在水溶液中的溶解度随原子序数增加而下降,而溶解在水溶液(泥质成分长石类矿物风化)中的部分元素如 Pb、K、Ba 等部分地被新生粘土类矿物所

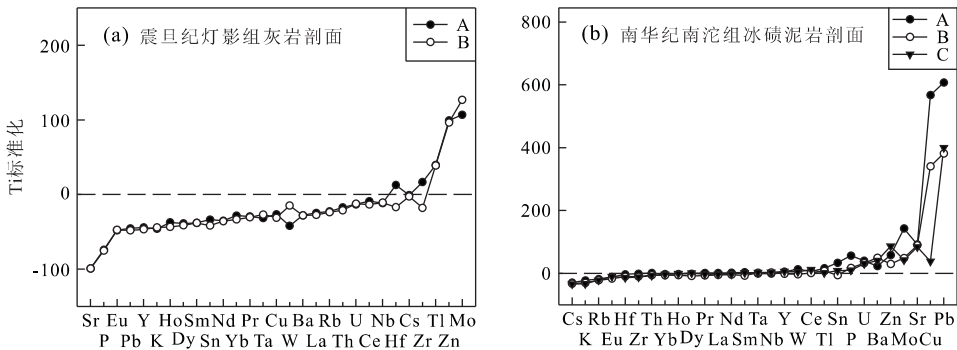


图 2 峡东地区南华纪—寒武纪地层风化剖面多元素的 Ti 含量标准化图

Fig. 2 Ti normalized multi-elemental diagrams of the weathering profiles of the Nanhuaian, Sinian and Cambrian strata from the eastern Three Gorges

A、B 和 C 分别为风化剖面的 A、B 和 C 层土壤

吸附.元素 Zn 和 Mo 具有相反的活动行为,其含量发生了明显的增高,其中 Zn 元素在 A 和 B 层土壤中含量分别增高了 99% 和 96%,Mo 元素则分别增高了 107% 和 121%.表明在碳酸岩的风化过程中,土壤层粘土类矿吸附了部分外来的元素 Zn 和 Mo.元素 U、Ce、Nb、Hf、Cs、Zr 在土壤层的含量变化不明显,表明这些元素在风化过程中相对稳定.

由图 2b 可见:(1)相对于碳酸岩剖面,大多数元素在泥质岩风化过程中保持了相对稳定;(2)按元素含量变化由减少至增加的序次,泥质岩风化剖面中元素的活性顺序与碳酸岩有明显不同,说明沉积岩风化过程中元素的活性特征明显地受到了原岩岩性,即岩石的矿物组成的制约.在泥质岩中,亲硫元素 Pb 和 Cu 发生了明显的富集,其中 Pb 元素在 A、B 和 C 层土壤中分别富集了 609%、424% 和 456%,Cu 分别富集 567%、341% 和 38%.元素 Sr 和 Mo 也发生了相对富集,在 A、B 和 C 层土壤中含量分别增高 92%、106%、105% 和 143%、62%、58%.发生少量富集的元素有 U、Ba 和 P,其富集程度约为 30%.这些元素的富集作用显然与新生粘土类矿物形成和粘土矿物的吸附作用有关.相反,大离子亲石元素 K、Cs 和 Rb 表现出含量下降的特征,其含量下降幅度约为 28%,应与长石的风化和碱金属在水溶液中的高溶解度有关.其他大多数元素(Eu、Hf、Zr、Th、Yb、Ho、Dy、Pr、Nd、Sm、Ta、Nb、Y、W、Ce、Tl、Sn)则表现为相对稳定,其含量变化不明显,其寄主矿物应主要为副矿物.

4.2 稀土元素

稀土元素(REE)地球化学性质相对稳定,在弱蚀变条件下基岩通常可保持其 REE 组成特征.但在

基岩风化形成土壤的过程中,相对于原岩,土壤的 REE 组成则发生了不同程度的变化.图 3a 为震旦纪灰岩和南华纪冰碛泥岩风化剖面土壤层 REE 含量(钛含量校正)相对于原岩的改变量,而图 3b 为其原岩相对球粒陨石的标准化图.由图 3 可观察到以下现象:(1)总体上泥质岩的土壤层 REE 含量变化较小,而碳酸岩风化土壤层发生了明显下降,表明碳酸盐矿物中的 REE 随着溶解作用而发生了大量流失,而寄居于泥质岩和碳酸岩泥质成分中的 REE 保持了相对稳定;(2)无论是碳酸岩或泥质岩风化形成的土壤,均出现了明显的 Eu 负异常和 Ce 的正异常,但在其原岩中这些异常并不存在或不明显;(3)由于泥质岩具有轻稀土元素(LREE)相对富集、中—重稀土元素(MREE-HREE)相对平坦的分配模式(图 3b),而泥质岩形成的土壤层相对平坦的 REE 分布形式表明,在风化过程中土壤层中 LREE 发生了相对于 HREE 的丢失;(4)碳酸岩原岩也表现为 LREE 富集、MREE 和 HREE 基本平坦的分布形式,但其风化形成的土壤却表现为 LREE 和 HREE 相对于 MREE 的相对富集.

稀土元素中,Ce 和 Eu 均为变价元素,因此高氧化状态的 Ce^{+4} 和还原状态下的 Eu^{2+} 可与其他呈 +3 价的 REE 之间发生存在形式和(或)活性特征上的差异.显然,土壤层中 Ce 的正异常可能与富含 Ce 元素的副矿物(如磷灰石)在风化过程中发生了相对富集作用或发生溶解时发生 Ce 的次生富集有关,而 Eu 的负异常则可能与与 Eu^{2+} 形成类质同象的高 Ca 矿物(如方解石、斜长石等)的分解有关(Nesbitt and Young, 1982),导致 Eu^{2+} 与 Ca 同时流失.除 Ce 的正异常外,碳酸岩风化土壤中 LREE

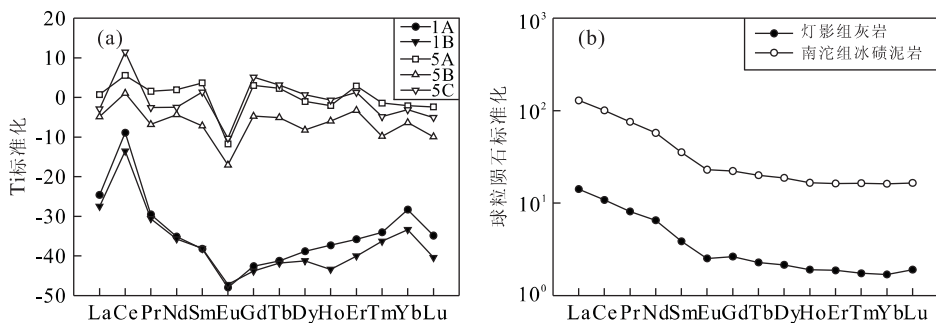


图 3 峡东地区风化剖面风化剖面稀土元素的 Ti 含量标准化图

Fig. 3 Ti normalized REE diagrams of the weathering profiles of the Nanhuaian, Sinian and Cambrian strata from the eastern Three Gorges

1A 和 1B 分别为灯影组灰岩风化剖面(1)A 和 B 层土壤;5A、5B 和 5C 分别为南沱组冰碛泥岩风化剖面(5)的 A、B 和 C 层土壤

富集应是继承了原岩组成的结果,而 HREE 的富集则可能存在两种原因,即 MREE 在碳酸岩风化过程中溶解性高于 LREE 和 HREE,或碳酸岩风化形成的土壤中相对富集了其所含泥质组成中的副矿物,如锆石和石榴石等。

5 风化剖面 Sr-Nd 同位素特征

5.1 Sr 同位素

元素 Rb 和 Sr 分属碱金属和碱土金属,在表生条件下具有较强的活动性,该特征在前面的讨论中已得到体现:无论碳酸岩或泥质岩,其形成的风化土壤中都出现了 Rb 和 Sr 含量的明显变化,其中泥质岩形成的土壤发生了 Sr 的富集和 Rb 的流失,而在碳酸岩形成的土壤 Sr 和 Rb 均发生了流失,但 Sr 流失的程度明显高于 Rb。由于基岩风化过程中发生了 Rb/Sr 比值的变化,因此有必要了解其 Rb-Sr 同位素体系在化学风化过程中的开放行为。

由图 4 可见,不同岩性的基岩形成的土壤,其 Rb-Sr 同位素开放行为存在明显的差异:

(1)碳酸岩风化形成的土壤中,其 Rb/Sr 比值和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 现在比值均明显增高,但其回算到基岩形成时的初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却显著地低于基岩的相应值(图 4a~4c)。碳酸岩风化剖面的元素蛛网图表明,其土壤层相对于基岩发生了 Rb 和 Sr 的流失,且 Sr 流失的程度高于 Rb。风化剖面的 Rb-Sr 同位

素体系特征表明,土壤层中不仅有 Sr 的流失,且存在外来高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的 Sr 加入,只是外来 Sr 的加入量小于基岩 Sr 的流失量,且土壤层 Sr 同位素比值主要反映了外来 Sr 的组成。由于 Rb 的流失量低于 Sr,因此高于基岩的 Rb/Sr 比值是导致计算获得的土壤中“初始” $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值过低的原因。

(2)南华纪冰碛泥岩形成的土壤层,其现在和初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均较基岩明显增高,但其 Rb/Sr 比值却显著降低(图 4e)。这一特征符合泥质岩风化形成的土壤层中发生了 Sr 的相对富集和 Rb 的流失的观察,而且外来 Sr 的同位素比值明显高于原基岩,显著地改变了土壤层的 Sr 同位素组成;寒武纪泥质岩剖面较为特殊,尽管与南华纪泥质岩剖面类似,其土壤层中 Rb/Sr 发生了下降,但其现在 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值不升反降,且其初始 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与基岩相似,表明其外来 Sr 的同位素比值低于原岩的相应值;

(3)南华纪砂岩风化剖面的 Rb-Sr 同位素体系特征总体上与碳酸岩剖面相似,只是土壤层中 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比基岩的增高幅度明显要小。

综上所述,沉积岩化学风化过程中,其 Rb-Sr 同位素组成发生了明显的开放,所形成的土壤层的 Sr 同位素组成受到两种因素的约束:原岩性质和外来组成的 Sr 同位素比值,因此在总体上风化土壤的 Sr 同位素组成已不能代表基岩的 Sr 同位素组成,计算所得到的“初始 Sr 同位素比值”已不具有封闭

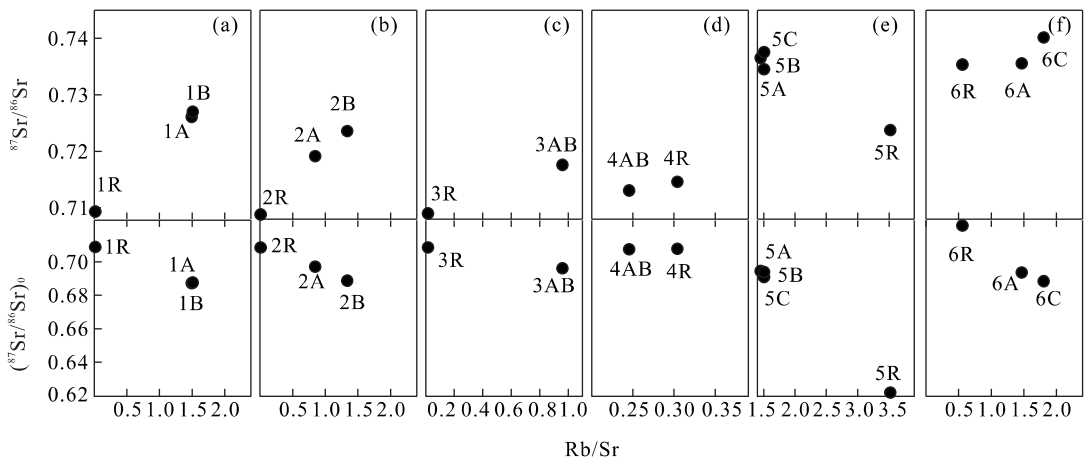


图 4 峡东地区南华纪—寒武纪地层风化剖面风化过程中 Sr 同位素特征图解

Fig. 4 Comparison plots of Sr isotopic ratio of the Nanhuaian, Sinian and the Cambrian strata weathering profiles from eastern Three Gorges

a. 灯影组灰岩风化剖面; b. 灯影组白云质灰岩风化剖面; c. 牛蹄塘组灰岩风化剖面; d. 牛蹄塘组泥岩风化剖面; e. 南沱组冰碛泥岩风化剖面; f. 莲沱组砂岩风化剖面; R 和 A、B、C 分别为风化剖面基岩和对应的 A、B、C 层土壤

体系的同位素意义。此外,尽管风化剖面的元素“蛛网图”可对其 Rb 和 Sr 含量的相对富集或贫化进行指示,但 Rb-Sr 同位素组成则可对体系同时存在外来 Sr 的加入和基岩 Sr 的流失导致的 Sr 同位素组成“净”改变量进行揭示,有助于对其化学风化的动力学行为进行了解。

5.2 Nd 同位素

如前所述,沉积岩发生化学风化的过程中可引起其所形成的土壤层中 REE 组成不同程度变化,因此有必要从 Sm-Nd 同位素体系的角度来观察风化过程导致的 Nd 同位素组成的变异。图 5 为各风化剖面基岩及其对应的土壤层 Sm/Nd 比值与其现今和初始(回算到基岩形成时代) $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值关系图,从中可观察到以下现象:

(1)除南华纪冰碛岩泥和砂岩外,其他沉积岩形成的风化土壤的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值与其基岩之间差异并不明显,但所有风化土壤的 Sm/Nd 比值相对于原岩均发生了较明显的变化,其中震旦纪灰岩和寒武纪泥岩的风化土壤 Sm/Nd 比值发生了下降(图 5a、5d),而震旦纪白云质灰岩和寒武纪灰岩风化土壤 Sm/Nd 比值升高(图 5b、5c);

(2)虽然上述剖面的土壤样品发生了 Sm/Nd 比值的变化,但其回算的“初始” $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值与其基岩之间十分相近,表明土壤层 REE 组成相对基岩的改变以 REE 不同程度的丢失为主,而非外来 REE 的加入,而土壤层与基岩相近的“初始”Nd 同位素比值还说明,这些岩性的沉积岩形成的风化土

壤,其 Sm-Nd 同位素组成特征基本能反映其基岩的性质,该认识可从风化剖面基岩与土壤层中具相近的 $\sim 1.8\text{ Ga}$ 的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄(表 1)得以佐证;

(3)南华纪冰碛泥岩形成风化土壤的现在和“初始” $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值均小于其基岩值,且土壤层中不同深度样品的 Sm/Nd 比值变化不规律,既有增高也有下降(图 5e)。导致风化剖面如此变化的原因可能与南沱组冰碛泥岩中含有不同比例的岩砾有关,即基岩或土壤样品的化学组成高度不均一。南华纪砂岩相对于其他基岩具有较低的现在和“初始” $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$,而其形成的风化土壤的 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值均明显增高(图 5f)。由于基岩发生化学风化的时间是近期,加上 Sm-Nd 同位素体系的衰变常数较小,因此,即使是风化过程中发生了 Sm/Nd 比值的变化,较短的衰变时间不足以导致其风化土壤中 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值与其基岩间的明显差异,故较合理的解释应是风化过程中有外来高同位素比值 Nd 的加入。

上述不同岩性风化剖面 Sm-Nd 同位素体系特征表明,沉积岩风化过程中,碳酸岩和泥质岩形成的风化土壤基本保持了原岩的 Sm-Nd 同位素组成特点,由其组成所获得的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄等能反映其原岩信息,而近源沉积形成的砂岩和含砾冰碛泥岩则出现较明显的同位素组成改变。

前人对于扬子克拉通东部和南部从元古宙至显生宙的泥质岩进行过较系统的 Nd 同位素示踪研

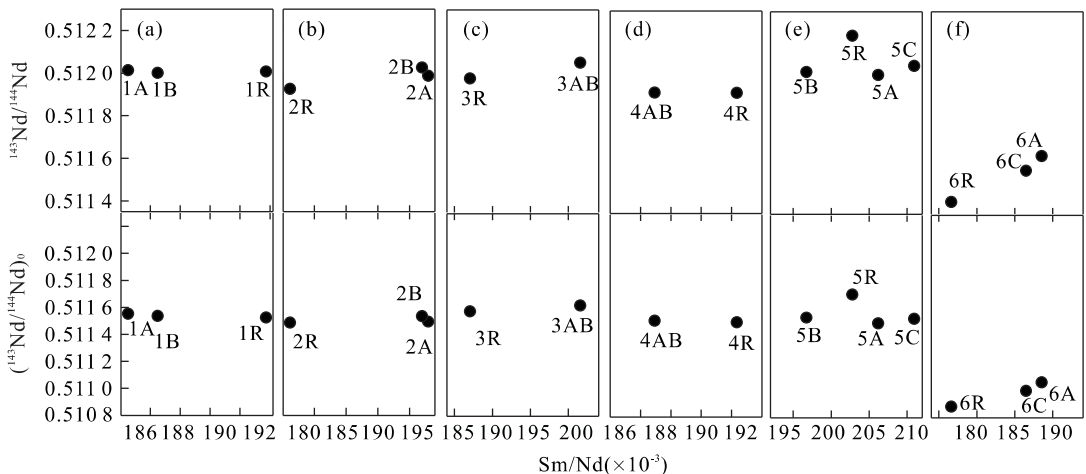


图 5 峡东地区南华纪—寒武纪地层风化剖面风化过程中 Nd 同位素特征图解

Fig. 5 Nd isotopic variation diagrams of the Nanhuaian, Sinian and Cambrian weathering profiles from the eastern Three Gorges R 和 A、B、C 分别为风化剖面的基岩和对应的 A、B、C 层土壤;a、b、c、d、e 和 f 表示意义同图 4

究,表明除部分新元古代地层因地幔物质的加入 Nd 模式年龄有所下降外,其他地层约为 1.8 Ga 的模式年龄值(DePaolo, 1988; 李曙光等, 1994; 李献华, 1996a, 1996b)。本次研究获得的结果表明,扬子克拉通核部南华纪和寒武纪泥质岩不仅具有相近的 Nd 模式年龄(表 1),且相似的模式年龄同样出现于震旦纪至寒武纪的碳酸岩中,显示出整个扬子克拉通较长时期相对稳定的沉积源区特征。值得指出的是,南华纪砂岩(莲沱组)的 Nd 同位素模式年龄(~2.4 Ga)明显老于其他沉积岩,表明其源区有所不同,应代表了莲沱组近源沉积的特征,而~2.4 Ga 的模式年龄可能代表了扬子克拉通核部前寒武纪基底岩系的平均年龄。

6 结论

(1)不同岩性基岩在成土过程中的蚀变强度有明显的差异,在相似地表条件下,碳酸岩风化剖面的风化程度高于泥质岩和砂岩的化学风化程度。

(2)微量元素的 Ti 元素标准化结果表明,不同岩性基岩在风化过程中元素的活动性规律不同,其中灰岩和白云质灰岩风化剖面元素含量变化明显,而泥岩和砂岩风化剖面的元素含量变化则相对较小,相对于碳酸岩剖面,大多数在泥质岩风化过程中保持了相对稳定,说明沉积岩风化过程中元素的活动性特征明显地受到了原岩岩性,即岩石的矿物组成的制约。总体特征表现为亲硫元素(Cu、Zn、Pb、Mo)和大离子亲石元素(Rb、K、Sr、Ba 等)在不同岩性的风化剖面中均表现出明显的元素含量变化,而高场强元素(Zr、Hf、Nb、Ta)则含量相对稳定。

(3)泥质岩的土壤层 REE 含量变化较小,而碳酸岩风化土壤层发生了明显下降,且其风化形成的土壤表现为 LREE 和 HREE 相对于 MREE 的富集。无论是碳酸岩或泥质岩风化形成的土壤,均出现了明显的 Eu 负异常和 Ce 的正异常,但在其原岩中这些异常并不存在或不明显。

(4)化学风化过程中,其 Rb-Sr 同位素组成发生了明显的开放,所形成的土壤层的 Sr 同位素组成受到两种因素的约束:原岩性质和外来组成的 Sr 同位素比值,因此在总体上,风化土壤的 Sr 同位素组成已不能代表基岩的 Sr 同位素组成。此外,尽管风化剖面的元素“蛛网图”可对其 Rb 和 Sr 含量的相对富集或贫化进行指示,但 Rb-Sr 同位素组成则可对

体系同时存在外来 Sr 的加入和基岩 Sr 的流失导致的 Sr 同位素组成“净”改变量进行揭示,有助于对其化学风化的动力学行为进行了解。

(5)除南华纪冰碛泥岩和砂岩外,其他沉积岩形成的风化土壤的¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值与其基岩之间差异并不明显,但所有风化土壤的 Sm/Nd 比值相对于原岩均发生了较明显的变化;虽然剖面的土壤样品发生了 Sm/Nd 比值的变化,但其回算的“初始”¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值与其基岩之间十分相近,表明沉积岩风化过程中,碳酸岩和泥质岩形成的风化土壤基本保持了原岩的 Sm-Nd 同位素组成特点,由其组成所获得的 Nd 同位素亏损地幔模式年龄等能反映其原岩信息,而近源沉积形成的砂岩和含砾冰碛泥岩,其风化土壤中的 Nd 同位素组成则存在不同程度的改变。

References

- Anderson, S. P., Drever, J. I., Humphrey, N. F., 1997. Chemical weathering in glacial environments. *Geology*, 25(5):399-402.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Hubei Province, 1990. Regional geology of Hubei Province. China University of Geosciences Press, Wuhan, 47-68 (in Chinese).
- DePaolo, D. J., 1988. Neodymium isotope geochemistry. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 76-80.
- Gu, S. Y., Wan, G. J., Miao, J. Q., 2003. Chemical weathering for dacite in Pingxiang, Guangxi. *Geochimica*, 32(4):328-334 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C. M., Gong, Z. T., 2001. Quantitative studies on development of tropical soils: A case study in northern Hainan Island. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(3):315-321 (in Chinese with English abstract).
- Ji, H. B., Wang, S. J., Ouyang, Z. Y., et al., 2004. Geochemistry of red residua underlying dolomites in karst terrains of Yunnan-Guizhou Plateau, II. The mobility of rare earth elements during weathering. *Chem. Geol.*, 203(1-2):29-50.
- Li, S. G., Liu, D. L., Chen, Y. Z., et al., 1994. Neodymium isotopic compositions of continental crust in the northern margin of Yangtze block and its tectonic implications. *Geochimica*, 23(Suppl.):10-17 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. H., 1996a. Sm-Nd isotopic systematics of Sibao Group

- form the southern margin of Yangtze block: Implications for the crustal evolution. *Scientia Geologica Sinica*, 31(3):218–228 (in Chinese).
- Li, X. H., 1996b. Nd isotopic evolution of sediments from the southern margin of the Yangtze block and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 12(3):359–369 (in Chinese with English abstract).
- Lucas, Y., Luizao, F. J., Chauvel, A., et al., 1993. The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. *Science*, 260:521–523.
- Ma, Y. J., Liu, C. Q., 1999. Trace element geochemistry during chemical weathering—As exemplified by the weathered crust of granite, Longnan, Jiangxi. *Chinese Science Bulletin*, 44(24):2260–2263.
- Middelburg, J. J., Van der Weijden, C. H., Woittiez, J. R. W., 1988. Chemical processes affecting the mobility of major, minor and trace elements during weathering of granitic rocks. *Chem. Geol.*, 68(3–4):253–273.
- Nesbitt, H. W., 1979. Mobility and fractionation of rare earth elements during weathering of a granodiorite. *Nature*, 279:206–210.
- Nesbitt, H. W., Markovics, G., Price, R. C., 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths continental weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 44(11):1659–1666.
- Nesbitt, H. W., Young, G. M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299:715–717.
- Oliva, P., Viers, J., Dupré, B., et al., 1999. The effect of organic matter on chemical weathering; Study of a small tropical watershed: Nsimi-Zoétélé site, Cameroon. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 63(23–24):4013–4035.
- Song, Z. L., Peng, B., Liu, C. Q., 2004. Discussion on element mobility and reference frame selection during black shale weathering; Example of profiles from Matian and Taohuajiang in Hunan Province. *Geological Science and Technology Information*, 23(3):25–29 (in Chinese with English abstract).
- Stiles, C. A., Mora, C. I., Driese, S. G., 2003. Pedogenic processes and domain boundaries in a Vertisol climosequence; Evidence from titanium and zirconium distribution and morphology. *Geoderma*, 116:279–299.
- White, A. F., Blum, A. E., 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59(9):1729–1747.
- Xu, X. L., Dai, S. Q., Liu, J. Y., et al., 2005. Movement of elements in a rock-soil system and the effects of a geological environment on agriculture in the Ningguo region, Anhui Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(2):168–176, 224 (in Chinese with English abstract).
- Xue, Y. S., Cao, R. J., Tang, T. F., et al., 2001. The Sinian stratigraphic sequence of the Yangtze region and correlation to the Late Precambrian strata of North China. *Journal of Stratigraphy*, 25(3):207–216, 234 (in Chinese with English abstract).
- Yin, C. Y., Gao, L. Z., Xing, Y. S., 2003. Silicified microfossils from the Early Cambrian Tianzhushan Member near Miaohe Village, Zigui, West Hubei, China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 42(1):76–88.
- Zhang, S. G., Yan, H. J., 2005. A brief introduction to international stratigraphic chart and Global Stratotype Section and Point. *Journal of Stratigraphy*, 29(2):188–204 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 湖北地质矿产局, 1990. 湖北省区域地质志. 武汉: 中国地质大学出版社, 47–68.
- 顾尚义, 万国江, 毛健全, 2003. 广西凭祥英安岩的化学风化作用研究. *地球化学*, 32(4):328–334.
- 黄成敏, 龚子同, 2001. 热带土壤发育过程的定量研究—以海南岛北部为例. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(3):315–321.
- 李曙光, 刘德良, 陈移之, 等, 1994. 扬子陆块北缘地壳的钕同位素组成及其构造意义. *地球化学*, 23(增刊):10–17.
- 李献华, 1996a. 扬子块体南缘四堡群 Sm-Nd 同位素体系及其地壳演化意义. *地质科学*, 31(3):218–228.
- 李献华, 1996b. 扬子南缘沉积岩的 Nd 同位素演化及其大地构造意义. *岩石学报*, 12(3):359–369.
- 宋照亮, 彭渤, 刘丛强, 2004. 黑色页岩风化过程中元素的活动性及参照系的选取初探——以湖南省麻田、桃花江剖面为例. *地质科技情报*, 23(3):25–29.
- 徐小磊, 戴圣潜, 刘家云, 等, 2005. 安徽宁国地区岩—土系统元素迁移及其农业地质环境效应. *地球科学——中国地质大学学报*, 30(2):168–176, 224.
- 薛耀松, 曹瑞骥, 唐天福, 等, 2001. 扬子区震旦纪地层序列和南、北方震旦系对比. *地层学杂志*, 25(3):207–216, 234.
- 章森桂, 严惠君, 2005. “国际地层表”与 GSSP. *地层学杂志*, 29(2):188–204.