



地理学报 2001年第56卷第5期

长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征

作者: 张丽萍 朱大奎

在长江三峡坝区河谷不同地貌部位系统采样的基础上, 通过X射线荧光光谱的化学全量分析及各元素迁移率特征值和强度值的详细计算, 揭示出不同地貌部位各化学元素的迁移规律: ①长期淹没于水下的河床风化壳, 易溶的CaO、MgO发生相对富集的现象, Al₂O₃ 却呈减少的趋势; Fe₂O₃ 的富集率最大; ②季节性被水浸没的河漫滩风化壳, 还出现了K₂O、MgO含量相对富集的现象; ③谷坡风化壳是典型的北亚热带地带性风化壳, 处于化学风化早期到中期的过渡阶段。④在各种地貌的风化壳中6.5深度是一个特殊的层位, K₂O、Na₂O对抗现象最为明显, 即Na₂O相对富集, K₂O相对减少。

长江三峡坝区花岗岩风化壳化学元素迁移特征 张丽萍¹, 朱大奎², 杨达源² (1. 浙江大学土水资源与环境研究所, 杭州 310029; 2. 南京大学大地海洋系, 南京 210093)

摘要: 在长江三峡坝区河谷不同地貌部位系统采样的基础上, 通过X射线荧光光谱的化学全量分析及各元素迁移率特征值和强度值的详细计算, 揭示出不同地貌部位各化学元素的迁移规律: ①长期淹没于水下的河床风化壳, 易溶的CaO、MgO发生相对富集的现象, Al₂O₃ 却呈减少的趋势; Fe₂O₃ 的富集率最大; ②季节性被水浸没的河漫滩风化壳, 还出现了K₂O、MgO含量相对富集的现象; ③谷坡风化壳是典型的北亚热带地带性风化壳, 处于化学风化早期到中期的过渡阶段。④在各种地貌的风化壳中6.5深度是一个特殊的层位, K₂O、Na₂O对抗现象最为明显, 即Na₂O相对富集, K₂O相对减少。关键词: 三峡坝区; 花岗岩; 风化壳; 化学元素; 迁移

中图分类号: P512.1 文献标识码: A 花岗岩风化壳的分带特性、分布规律、地貌过程及成因研究历史悠久 [1-2]。但是关于大江大河的河谷横断面 (尤其是包括河床在内的) 不同地貌部位花岗岩风化壳化学元素迁移对比研究为数很少。长江三峡大坝截流、坝基清理, 为河谷地貌的系统研究提供了机会。坝区基岩为前震旦纪闪云斜长花岗岩 [13], 坝区2侧谷坡为厚度不等的花岗岩风化壳。本研究揭示出同一气候条件下, 不同地貌部位化学元素迁移的差异和成因, 并反映不同地貌部位的物质迁移强度。1 样品采集 在长江三峡坝区主坝轴南侧100m处, 做一NE42° 走向的河谷横切剖面, 沿剖面线分4个高程、6个典型柱状断面, 从顶面垂直向下等高差采样, 每样的高差间隔为1.5m, 共采样50个。靠近河床深槽两侧的2个样柱顶面高程为38m, 样柱高度为10m, 2个样柱共采集14个样品; 河床两侧河漫滩53m高程处取2个样柱, 样柱高度为8.5m, 2个样柱共采集12个样品; 中堡岛左侧72m处选1样柱, 样柱高17.5m, 共采集12个样品 (图1); 第6个样柱是在三峡坝区永久船闸左侧山地, 从纸湾到雷劈台的100~200m高程范围内, 由于垂直剖面层次发育的限制, 采取相同风化层的水平移动, 共采集12个样品。因第6样柱距坝址较远, 所以不在图1范围内。图1 长江三峡坝基下游100m处河谷横切面柱状采样分布图 Fig.1 The distribution chart of sampling vertically cross river valley in lower100m of the Three Gorges Dam of Yangtze River

2 研究方法 2.1 不同地貌部位花岗岩风化壳化学成份及元素迁移率 采用X射线荧光光谱仪进行化学全量分析, 并在此基础上, 计算了各元素在剖面中的迁移速率m: 即各层某一化学元素含量 (%) 与新鲜基岩同一元素含量 (%) 之比 (表1)。表中数字为同一地貌部位同一层次同一元素2柱样之平均值。因长江三峡坝区不同的钻孔岩芯样, 其新鲜基岩的主要化学元素含量不尽相同, 所以, 本文计算时采用的是长江三峡勘测研究院 [13]、中国地质大学 [14]和河海大学 ① 3单位之平均值。选表中数字变化奇特的元素绘成图2。 2.2 不同地貌部位花岗岩风化壳化学元素迁移特征值及强度的计算 在化学全量及迁移率分析的基础上, 详细计算了不同地貌部位各风化层的化学元素迁移特征值和强度。在计算迁移特征值时主要选取的风化系数有: ①硅铝系数 (SiO₂ / Al₂O₃), ②铝铁系数 (Al₂O₃ / Fe₂O₃), ③碱金属淋溶系数 ((K₂O + Na₂O) / Al₂O₃), ④碱土金属淋溶系数 ((CaO + MgO) / Al₂O₃), ⑤盐基总量淋溶系数 ((K₂O + Na₂O + CaO + MgO) / Al₂O₃), ⑥残积系数 ((R₂O₃ / (R₀ + R₂O)), ⑦铝铁硅系数 (R₂O₃ / SiO₂) 等7个系数。表1 长江三峡坝区河谷花岗岩风化壳化学成份及元素迁移率 Tab.1 Chemical content and transferring rate in the Three Gorges Dam region of Yangtze River

风化系数是反映风化壳本身元素的迁移和累积及绝对的风化程度, 只适用于同一风化壳剖面各层单一元素的对比分析; 在综合评价不同风化壳剖面中化学元素变化特征时就难以进行比较, 有时还会发生误导或顾此失彼, 由此需引进一种计算风化强度较好的综合性指标——风化强度I [15] $I = [1 - (Er \times C + Em \ 2)] \times 100$ (2-1) 式中 I 为新鲜基岩体的均衡度, 包括氧化物元素迁移率的均衡度和风化率的均衡度, 将风化壳各层的均衡度与其对比。母岩经过风化后, 其均衡度一定小于I, 取%为其值; Er为风化率均衡度; Em为元素迁移率均衡度, 求取方式相同。 $Er = E \ H(s) \ N$ (2-2) 式中 H(S) 为信息熵函数 [16] $H(s) = - \sum_{i=1}^N P_i \ln P_i$ (2-3) N为数值的个数, P_i 为概率, 即每个风化率值占总数值的; C 为平均淋溶系数。 $C = Y \ 0 - (Y \ i \times \text{新鲜基岩的Al}_2\text{O}_3 \ \text{含量各层的Al}_2\text{O}_3 \ \text{含量} \ Y \ 0) \times 100$ (2-4) 式中 淋溶系数C为氧化物在风化过程中从母岩中迁移的重

量%。Y₀ 为新鲜基岩该氧化物的重量，Y_i 为各层该氧化物的重量，当所计算的C值≤0时，则忽略不参加计算。这一指标能综合反映不同层次在垂直剖面上的风化程度，便于不同地貌风化壳之间的对比，能体现出风化壳发育过程中元素的迁移和累积特性（表2）。图2 长江三峡坝区不同地貌部位花岗岩风化壳各层特殊化学成份变化趋势 Fig.2 The changing trend of special chemical composition in different granite weathering layer depths in the Three Gorges Dam region of Yangtze River

3 结果分析

3.1 化学成份含量和元素迁移特征分析

该区风化壳的化学组分主要是Si、Al的氧化物，占到了总量的80%（表1、图2）。然而，由于所处的地貌位置不同，化学元素的迁移各有差异。

（1）SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 脱硅过程微弱，以河漫滩风化壳最快，河床风化壳次之，谷坡的脱硅率最小，几乎不变。Al₂O₃ 的富集程度较弱，在谷坡风化壳的上层，含量有所增加，但在中、下层，含量却围绕15%上下波动，变幅微弱；在河漫滩风化壳中，富集率明显；相反，在河床风化壳中下层，Al₂O₃ 含量变化较小，在上层还有减少趋势。无论在什么地貌部位的风化壳中，Fe₂O₃ 均呈富集状态，而且变化规律明显，其中以河床风化壳富集最快。

表2 长江三峡坝区花岗岩风化壳各风化层化学元素迁移特征值及强度 Tab.2 The characteristics value of chemical element transferring and intensity in different granite weathering layer depth in the Three Gorges Dam region of Yangtze River

（2）碱土金属CaO、MgO在谷坡和河漫滩风化壳剖面中，CaO含量总的变化趋势是处于淋溶状态，而在河床风化壳中，CaO的含量却呈现出增加的趋势，但最大值在表层以下一定位置。无论在何种地貌部位，风化壳表层往下3~5m处均出现高低不同的CaO高含量层（淀积现象）。MgO在坡风化壳剖面中，总的趋势是处于淋失状态，但最小值并非在上层，而是在剖面中部；在河床及河漫滩风化壳中，MgO含量几乎呈直线上升，只是河漫滩风化壳剖面最下层和河床风化壳剖面的3.5m处各出现了一个畸点。

（3）碱金属K₂O、Na₂O在各种地貌部位的风化壳中，Na₂O总的趋势处于淋失状态，最小值位于最上层。但在表层往下6.5m处有一个明显的富集层，由富集层向两端递减。K₂O的含量变化复杂，在河床及谷坡风化壳剖面中，从下向上呈现出淋失的趋势；而在河漫滩风化壳剖面中却趋于增加、规律明显。但在每个剖面中6.5m深度处均出现最低值层位。

3.2 不同地貌部位风化壳不同层次的化学元素迁移强度分析

上述各风化系数、风化率、风化强度特征值表明了不同地貌部位风化壳发育的差异性。

（1）硅铝系数（SiO₂ / Al₂O₃）在各地貌部位风化壳中，从下往上均呈逐渐减少的趋势，减少幅度以河漫滩最大，规律明显；但在谷坡与河床风化壳剖面中，波动性大、递减幅度小。

（2）铝铁系数（Al₂O₃ / Fe₂O₃）无论在何种地貌部位的风化壳中，从下向上均系递减规律。递减强度河床最大，河漫滩次之，谷坡最慢，并比SiO₂ / Al₂O₃ 更能反映从下到上的变化规律。

（3）残积系数（R₂O₃ / (R₀+R₂O)）在河漫滩和谷坡的风化壳剖面中处于增加状态，但在河床风化壳剖面的下部出现了一个0.79的畸点。

（4）盐基总量的淋溶系数（(R₀+R₂O) / Al₂O₃）在谷坡、河漫滩风化壳中，从下向上呈逐渐减少之趋势，盐基淋失量变化率大；在河床风化壳剖面中，反而出现增加的现象。

（5）风化强度I在河漫滩、河床风化壳剖面中，除去最下层2个畸点，风化强度从底部向上基本上呈增加趋势，但波动性较大。在谷山坡风化壳剖面中，变化不明显，围绕44%上下波动，但波动幅度较小。由此可见，绝对风化强度和相对风化强度均以河床风化壳剖面为最大，其次是河漫滩，谷坡最小。

4 结论及讨论

（1）河床风化壳长期淹没于快速流动的河水，水的溶解、水解、水化和氧化作用强于谷坡、河漫滩，故易溶矿物的迁移速率很大。然而，由于水的冲刷作用，松散物质被冲走，失去了进一步溶解的机会，只停留在化学风化的早期阶段，K⁺、Na⁺ 碱金属离子被水中的H⁺ 离子置换，呈游离状态随水流失，碱土金属CaO、MgO相对富集，因此，河床风化壳基本上没有全、强风化带，弱风化带厚约4~5m [13]；从另一方面来讲，河水中的CO₂ 的含量远远小于地表风化土层和岩石裂隙水中的CO₂ 含量，碳酸化作用很弱，也是CaO相对富的原因之一。

（2）河漫滩地貌部位，一些随水流带来的易溶性物质暂时停留，因而一些易溶盐类基数很大，还出现了表面暂时富集的畸象。在水浸季节里，其水解作用和水化、氧化作用强于谷坡。虽然，在淹水季节被水浸没，但水深度不大，流速缓慢，冲刷作用弱于河床，被风化的岩体可以停留一段时间，有进一步风化的机会，故风化率大于谷坡。

（3）在风化壳剖面中，淋溶元素相对富集和富集元素相对淋失层位的形成，说明了在同一气候条件下，化学元素的迁移并非按照淋溶元素依次递减、富集元素逐渐增加的理论模式去演化，而是随着地貌和风化壳中水分循环条件而变化。元素在风化壳的上层以垂直运动为主，迁移到一定深度，由于水循环减慢，上层元素逐渐累积。

（4）风化强度的大小是由Em、C、Er3个变量来决定，由表2可知：Em、Er的变化规律较明显，无特殊的畸点存在，C值波动很大，可推得风化强度上下波动的原因在于值的稳定性。淋溶系数的变化由SiO₂、K⁺、Na⁺、Ca²⁺、Mg²⁺ 5个元素的极值和权重来反映。

致谢：X射线荧光光谱分析是由南京大学环科中心完成，采样过程中承蒙长江水利委员会三峡勘测研究院全体工作人员的大力协助，在此深表谢意。

参考文献 (References)：

[1] Guangzheng Xiong, Min Feng. The characteristics of weathering granite regolith [J]. Quaternaria Sinica, 1965, 4 (2) : 55-67. (In Chinese) [熊广政, 冯敏, 花岗岩红色风化壳的特征 [J], 中国第四纪研究, 1965, 4 (2) : 55-67.]

[2] Xianjue Wang, Lipu Shen, Yunhua Song. Experiment and study on weathering granite rare-earth regolith southern China [A]. Aca-demic Thesis Volume (2) of International Geology Exchange Meeting [C]. Beijing: Geology Press. 1980, 139-145. (In Chinese) [王贤觉, 沈丽璞, 宋云华. 华南花岗岩稀土风化壳的实验研究 [A]. 国际交流地质学论文集 (2) [C]. 北京: 地质出版社. 1980, 139-145.]

[3] Zhiwei Bao. Study on geochemistry rare-earth element of weathering granite regolith southern China [J]. Journal of Geochemistry, 1992, (2) : 166-174. (In Chinese) [包志伟. 华南花岗岩风化壳稀土元素地球化学研究 [J]. 地球化学, 1992, (2) : 166-174.]

[4] Jiongxin Xu. Chemical denudational processes in different natural zones of the maonsoon-influenced eastern China [J]. Scientia Geo-graphica Sinica, 1994, 14 (4) : 306-313. (In Chinese) [许炯心. 我国不同自然带的化学剥蚀过程 [J]. 地理科学, 1994, 14 (4) : 306-313.]

[5] Zitong Gong. Bio-geochemistry of red weathering regolith [A]. Chinese Red Soil [M]. Beijing: Science Press, 1983. 24-39. (In Chinese) [龚子同. 红色风化壳的生物地球化学 [A]. 中国红壤 [M]. 北京: 科学出版社, 1983. 24-39.]

[6] Zelin Su. The relationship between weathering and granite seacoast landforms in Hong Kong [J]. Tropical Geomorphology, 1988, 9 (1) : 1-13. (In Chinese) [苏泽霖. 香港花岗岩海岸地貌与风化的关系. 热带地貌. 1988, 9 (1) 1-13.]

[7] Guoqi Lu. Stud

y on red weathering regolith in Hainan Island [J]. Tropical Geography, 1982, (1):51-58. (In Chinese In Chinese)
[陆国琦.海南岛红色风化壳的研究 [J].热带地理, 1982, (1):51-58.] [8] Yunhua Song, Lipu Shen, Xianjue Wang. Preliminary study on rare-earth element in weathering regolith of certain rock [J]. Chinese Science Bulletin, 1987, (9):695-698. (In Chinese) [宋云华, 沈丽璞, 王贤觉. 某些岩石风化壳中稀土元素的初步探讨 [J]. 科学通报, 1987, (9):695-698.] [9] Cliff Ollier. Geomorphology Texts-Weathering [M]. New York, 1984. 203-212, 224-250. [10] Smith B J. Weathering of superficial limestone debris in a hot desert environment [J]. Geomorphology, 1988, (1):355-367. [11] Denys Brunsden. Weathering [A]. Geomorphology Process [M]. London:1979. 73-129. [12] Milan Pavich. Appalachian piedmont morphogenesis: weathering, erosion, and cenozoic uplift [A]. Tectonic Geomorphology [M], 1984. 299-320. [13] Hydraulic committee of Changjiang. Research on hydropower project geology of the Three Gorges Dam of Yangtze River [M]. Wuhan: Science and Technology Press of Hubei, 1997. 40-120. (In Chinese) [长江水利委员会编, 三峡工程地质研究 [M], 武汉:湖北科学技术出版社, 1997. 40-120.] [14] Ziming Ren, Daixin Ma, Tai Shen et al. Study on rock engineering of the Three Gorges dam foundation [M]. Wuhan: Chinese Geology University Press, 1998. 23-75 (In Chinese) [任自民, 马代馨, 沈泰等. 三峡工程坝基岩体工程研究 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1998. 23-75.] [15] Zhenguo Huang, Weigang Zhang, Junhong Chen et al. The red residuum in southern part of China [M]. Beijing: Ocean Press, 1996. 38-64 (In Chinese) [黄镇国, 张伟强, 陈俊鸿等著. 中国南方红色风化壳 [M], 北京:海洋出版社, 1996. 38-64.] [16] Chuixiang Yi. Nonlinear Science and Its Application in Geoscience [M]. Beijing: Meteorological Press, 1995. 53-59. (In Chinese) [仪垂祥. 非线性科学及其在地学中的应用 [M]. 北京:科学出版社, 1995. 53-59] Chemical Element Transferring Features of Weathering Granite Regolith in Three Gorges Dam Region ZHANG Li-ping¹, ZHU Da-kui², YANG Da-yuan² (1. Institute of Soil and Water Resources and Environment, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China; 2. Department of Geo and Ocean Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China) Abstract: Key words:

关键词: 三峡坝区; 花岗岩; 风化壳; 化学元素; 迁移