

# 基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价(II): 玄武岩斜坡地下水及浸泡液水文地球化学

徐则民<sup>1,2</sup> 黄润秋<sup>2</sup>

(1.昆明理工大学土木系,云南 昆明 650224; 2.地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

**摘要:**岩石风化过程中的元素活性评价除应考虑该元素在风化产物中残留与淋失状况及在淋滤液(地下水及室内浸泡液等)中的浓度外,还应考虑其在母岩中的相对含量。峨眉山玄武岩斜坡地下水及室内浸泡液中各元素原子个数比值与母岩中对应比值之间均存在显著差异,其造岩矿物的非全等溶解特征显著。综合考虑风化过程中的岩石成分变化,斜坡地下水及室内浸泡液化学成分确定的峨眉山玄武岩风化过程中的元素活性顺序为  $Ca > Na > Mg \geq Si > K > Fe$ 。活性强或惰性程度高、对风化程度变化响应敏感应成为岩石风化程度指示性元素的选择标准,Ca 和 Fe 应成为峨眉山玄武岩风化程度评价的首选元素。

**关键词:**玄武岩;峨眉山玄武岩;风化;元素活性;地下水;浸泡液;水文地球化学

**中图分类号:**P624.24      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2013)04-1298-09

岩石化学风化在很大程度上可以理解为岩石与水(包括水汽)的作用过程。在此过程中,溶出组分进入地下水并最终排出地表进入河流或海洋;难溶,即惰性组分在风化产物中沉淀或被吸附,因此,地下水地球化学研究是了解岩石风化过程中元素地球化学行为的重要途径。文[1]根据风化结构体的地球化学特征推断,峨眉山玄武岩风化过程的中后期,活性组分 Si、Ca、Mg、Na、K 明显淋失,惰性组分 Al、Ti、 $\Sigma Fe$  相对富集,二价铁氧化引起的  $FeO$ 、 $Fe_2O_3$  相对含量的此消彼长贯穿整个风化过程。为进一步了解风化过程中的活性组分析出的状况及 Fe 的活性,本文研究了峨眉山玄武岩斜坡地下水及新鲜玄武岩浸泡液的水文地球化学特征。

## 1 玄武岩斜坡地下水的水文地球化学

头寨滑坡发生于长轴长约 18 km 的北东  $30^\circ$  方向展布的盘河向斜北西翼,北西翼主体峨眉山玄武

岩构成北东向展布的线状山脊<sup>[2,3]</sup>。在滑坡左侧坡脚处存在一常年性地下水露头,其补给范围内全部为峨眉山玄武岩(图 1)。根据滑坡左侧翼次断壁及滑床判断,地下水补给区内从地表向下 1 m 左右为玄武岩风化形成的残坡积层,中部为厚 5~10 m 的裂隙发育的强风化-中风化层,底部为新鲜玄武岩(图 1)。为研究玄武岩风化机理,从 2006 年 5 月开始至 2007 年 6 月,对该处地下水进行了为时 14 个月的水量和水化学成分动态监测。降水(降雨和降雪融水)是该处地下水的唯一补给来源,就地补给、就地排泄,动态变化剧烈,14 个月监测期内测得的最大、最小和平均流量分别为 14.23 l/s、0.01 l/s 和 3.04 l/s(图 1~2)。为提高样品分析的准确度,每次采集两个水化学样进行平行测试,取其平均值作为当月的水化学成分,表 1 给出了地下水化学成分监测的详细结果,图 3 为主要组分的浓度变化过程。

从表 1 及图 3 可以看出,玄武岩斜坡地下水的

收稿日期:2012-07-04;改回日期:2012-09-15

基金项目:国家自然科学基金-云南联合基金重点项目(U1033601)、国家自然科学基金面上项目(40572159, 40772189)、教育部高等学校博士点基金项目(20060674009)及地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室开放基金项目(GZ2007-1, GZ2009-10)资助成果。

作者简介:徐则民,男,1963 年生,博士,教授,博士生导师,水文地质工程地质专业,目前主要从事滑坡灾害孕育过程研究;

E-mail:abc5100@188.com。



图 1 头寨滑坡地下水出露环境及宏观特征

Fig.1 The outcrop setting of the spring in Touzhai landslide

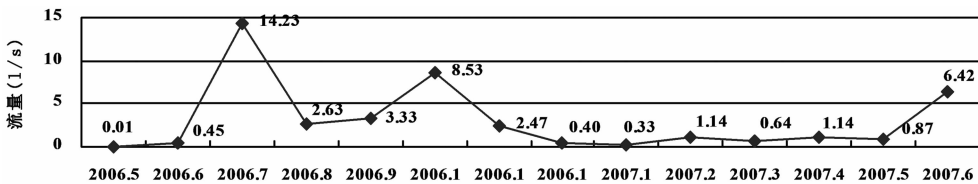


图 2 头寨滑坡地下水流量动态

Fig.2 Monthly changes of the spring discharge in Touzhai landslide

各组分浓度及总矿化度(总溶解固体-TDS)都处于较低水平,而且动态比较稳定,说明玄武岩化学组分的淋出及玄武岩的风化过程还是比较缓慢的。所有溶出组分中, $\text{SiO}_2$  的浓度最高,平均值为  $11.42 \text{ mg/l}$  ( $0.1901 \text{ mmol/l}$ )。Ca 在地下水中的浓度仅次于 Si, 平均  $4.03 \text{ mg/l}$  ( $0.101 \text{ mmol/l}$ ), 远高于 Mg 的  $0.94 \text{ mg/l}$  ( $0.040 \text{ mmol/l}$ )。Na 的平均浓度为  $1.25 \text{ mg/l}$  ( $0.054 \text{ mmol/l}$ ), 远高于 K 的  $0.25 \text{ mg/l}$  ( $0.006 \text{ mmol/l}$ )。除 2006 年 5 月测到  $0.04 \text{ mg/l}$  的  $\text{Fe}^{3+}$  外, 其他月份的  $\text{Fe}^{3+}$  及所有月份的  $\text{Fe}^{2+}$  浓度均为  $0.00 \text{ mg/l}$ , 说明玄武岩风化过程中 Fe 元素基本都是残留

原地的。

上述数据可以说明, 玄武岩风化过程中析出量最大的是 Si, 其次是 Ca, 然后是 Na 和 Mg, K 析出量很小, 而 Fe 基本上没有析出, 但还不能说明这些组分活动性的相对强弱, 因为地下水中的组分浓度除与该组分的活动性有关外, 还与其在岩石中的相对含量有关, 仅根据风化产物或地下水中某一元素的含量或浓度(文献[1]表 2、表 1、图 3)推断其活动性是不够的。

为进一步探讨玄武岩不同组分在风化过程中的活动性, 表 2 给出了从头寨滑坡、白鹤滩电站、烂泥

表 1 头寨滑坡地下水化学成分(mg/l)

Table 1 Chemical composition of the groundwater in Touzhai landslide

时间	pH	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	TDS
06/5/3	7.69	12.87	5.22	1.36	1.89	0.25	0	0.04	1.2	0	0	22.94	1.83	46.97
06/6/13	7.18	10.53	3.73	0.45	1.15	0.37	0	0	4.6	0	0	19.66	2.74	41.83
06/7/13	7.74	11.84	3.01	0.78	0.99	0.31	0	0	2.9	0	0	14.75	2.29	35.38
06/8/13	7.84	11.81	3.44	1.04	1.28	0.19	0	0	0.9	0	0	21.3	2.74	46.65
06/9/13	7.29	11.41	3.44	0.78	1.14	0.15	0	0	3	0	0	16.38	1.83	37.69
06/10/13	8.05	11.35	3.1	1.04	0.76	0.17	0	0	3.2	0	0	15.92	1.83	39.96
06/11/13	7.65	11.55	4.27	0.43	1.34	0.40	0	0	1.6	0	0	18.58	2.74	43.29
06/12/13	8.22	11.50	4.27	0.86	1.13	0.21	0	0	2.7	0	0	21.23	2.74	43.12
07/01/13	7.75	12.07	4.27	0.86	1.34	0.21	0	0	2	0	0	23.89	2.76	46.44
07/02/13	7.73	11.11	4.27	1.3	1.15	0.27	0	0	3.95	0	0	21.23	2.76	44.12
07/03/13	7.97	11.26	3.87	1.41	1.3	0.21	0	0	2.6	0	0	23.89	2.76	45.44
07/04/13	7.74	10.56	5.04	0.94	1.45	0.13	0	0	7.6	0	0	21.23	1.84	54.12
07/05/10	7.60	11.53	4.65	1.41	1.36	0.31	0	0	2.1	0	0	23.89	2.76	46.44
07/06/14	7.90	10.47	3.87	0.47	1.26	0.40	0	0	4.9	0	0	15.93	1.84	39.47
总平均值	7.75	11.42	4.03	0.94	1.25	0.25	0	0	3.1	0	0	20.06	2.36	43.64

注:由云南省地质矿产勘察开发局中心实验室分析。

沟滑坡、小龙街、柯度街、阿子营和松茂(文献[1]图1)采集的29个新鲜玄武岩样品的化学成分,岩性包括致密玄武岩、杏仁状玄武岩、斜斑玄武岩和柱状节理玄武岩。从峨眉山玄武岩核心区7个地区采集的玄武岩样品的平均化学成分与文献[4]根据204样品、文[5]根据668个样品各自获得的峨眉山玄武岩的平均化学成分接近,因而具有较好的代表性。

根据表2中29个样品确定的研究区新鲜玄武岩(FR—fresh rock)中主要元素的原子个数比为FR Ca/Mg=1.1、FR Na/K=2.6、FR Ca/Na=1.6、FR Mg/Na=1.4、FR Si/Ca=5.8、FR Si/Mg=6.3、FR Si/Na=9.0、FR Si/K=23.6。

根据表1中地下水的化学成分,图4给出了地下水中主要离子摩尔数比值的月度变化情况及新鲜玄武岩中对应离子个数的比值。从图4可以得出以下几点结论:

(1)地下水各元素原子个数比值与玄武岩对应比值之间均存在显著差异,玄武岩造岩矿物的非全等溶解(incongruent dissolution)特征显著。

(2)图4-a表明,玄武岩中Ca和Mg的原子个数总体接近,而地下水中Ca/Mg的最小值为1.6、最大值达5.9,14个月平均值为3.0,说明玄武岩及其风化产物(残坡积物、风化及新鲜玄武岩)中的Ca活性明显高于Mg,即Ca>Mg。

(3)玄武岩的Na、K比值为2.6,而地下水Na/K的最小值为5.4,平均值高达9.7(图4-b),Na进入

地下水而淋失的倾向性要明显高于K,即Na>K。

(4)14个月中,尽管地下水的Ca/Na在1.5和2.4之间波动,但只有一个月小于玄武岩的Ca/Na(1.6)(图4-c),平均值1.9,表明Ca的活动性要高于Na,即Ca>Na。

(5)地下水的Mg/Na介于0.3和1.3之间,平均值只有0.7,小于玄武岩的Mg/Na(1.4)(图4-d),Mg的活动性远低于Na,即Na>Mg。

(6)地下水的Si/Ca波动于1.4和2.6之间,平均值只有1.9,远小于玄武岩的5.8(图4-e),说明玄武岩中Si的活动性远低于Ca,即Ca>Si。

(7)尽管地下水的Si/Mg有两个月上升到玄武岩的Si/Mg(6.3)以上,但大部分月份的Si/Mg都在6.3以下(图4-f),平均值只有5.6,表明Si的活动性仍略低于Mg,即Mg≥Si。

(8)地下水的Si/Na介于2.6和5.7之间,平均值为3.6,波动幅度不大,明显低于玄武岩的Si/Na(9.0)(图4-g),玄武岩中的Si活性低于Na,即Na>Si是明显的。

(9)图4-h表明,地下水Si/K从7.0到58.7,波动幅度较大,但只有两个月低于玄武岩的Si/K(23.6),而且平均值高达34.0,Si活性高于K,即Si>K是明显的。

(10)玄武岩中Fe<sup>2+</sup>/K和Fe<sup>3+</sup>/K的比值分别为4.23和1.77,而地下水中Fe<sup>2+</sup>和Fe<sup>3+</sup>的浓度均(接近)为零,因此,Fe应该是玄武岩中活性最差的元素之一。



表 2 新鲜玄武岩的全岩化学成分(%)  
Table 2 Whole-rock major element composition of the fresh basalt

采样地点	顺序号	样品编号	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	LOI	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	岩性(岩体尺度)	
头寨滑坡	1	BC5	48.39	13.38	9.99	4.08	9.42	4.01	2.16	1.20	2.77	---	---	---	---	致密玄武岩	
	2	BC6	47.62	12.45	10.32	4.88	9.41	4.47	2.10	1.10	3.24	---	---	0.16	0.16	致密玄武岩	
	3	C2-C3-2	48.95	13.6	8.49	4.98	7.88	4.48	2.53	1.91	2.41	2.41	0.21	4.11	0.43	0.01	致密玄武岩
	4	C2-C3-3	48.81	13.18	7.85	5.14	7.22	4.7	3.23	2.62	2.68	2.68	0.16	4.1	0.45	0.00	杏仁状玄武岩
	5	C2-C3-4	46.81	14.15	7.53	5.87	6.13	4.8	4.58	1.01	3.83	3.83	0.2	4.6	0.53	0.01	斜斑玄武岩
	6	C2-C3-6	48.29	13.30	8.71	4.78	8.20	4.29	2.37	1.89	3.33	3.33	0.17	4.2	0.45	0.06	斜斑玄武岩
白鹤滩电站	7	C2-C3-7	48.87	13.28	7.46	4.68	7.46	4.1	3.22	2.64	3.07	3.07	0.17	4.1	0.45	0.06	杏仁状玄武岩
	8	C2-C3-8	47.93	13.29	8.30	4.96	6.97	4.94	3.62	2.04	3.21	3.21	0.21	4.15	0.48	0.02	杏仁状玄武岩
	9	C2-C3-9	47.61	13.64	8.25	5.18	6.97	4.75	3.19	1.91	3.51	3.51	0.19	4.07	0.43	0.02	致密玄武岩
	10	C2-C3-11	49.34	13.51	8.41	5.13	7.98	4.58	2.54	1.58	2.08	2.08	0.18	4.19	0.47	0.01	致密玄武岩
	11	C2-C3-12	49.01	13.46	7.78	5.70	8.80	4.62	2.16	1.29	2.52	2.52	0.19	4.07	0.48	0.08	柱状节理玄武岩
	12	C2-C3-14	46.02	13.33	8.31	5.45	8.42	5.41	2.28	2.10	3.91	3.91	0.19	4.11	0.45	0.06	杏仁状玄武岩
	13	C3-C4-1	51.39	12.80	8.43	4.57	8.11	4.16	2.20	1.91	2.25	2.25	0.18	3.66	0.4	0.04	柱状节理玄武岩
	14	C3-C4-2	45.17	15.22	8.59	4.44	5.25	5.9	3.61	1.50	5.21	5.21	0.22	4.4	0.51	0.11	杏仁状玄武岩
	15	C3-C4-3	46.38	13.73	8.49	5.77	6.51	5.22	3.00	2.31	3.92	3.92	0.2	3.95	0.43	0.05	致密玄武岩
	16	C3-C4-5	47.95	13.27	7.81	5.32	6.87	5.25	3.02	1.67	4.15	4.15	0.2	3.79	0.36	0.08	致密玄武岩
	17	C3-C4-6	51.41	12.13	7.86	4.92	6.51	4.45	2.85	1.63	4.44	4.44	0.14	3.31	0.32	0.03	杏仁状玄武岩
	18	C3-C4-7	55.23	10.74	7.23	5.70	4.43	4.99	2.16	1.43	4.36	4.36	0.13	3.1	0.35	0.07	杏仁状玄武岩
	19	C3-C4-8	45.31	13.65	8.40	5.37	7.72	6.27	3.16	1.17	4.48	4.48	0.17	3.9	0.38	0.00	致密玄武岩
烂泥沟滑坡	20	L2	44.86	16.02	8.57	4.94	5.45	5.46	3.35	1.71	5.06	5.06	0.18	4.02	0.54	0.35	斜斑玄武岩
	21	L3	48.58	13.50	7.59	5.23	6.87	4.35	3.88	1.15	4.79	4.79	0.23	3.52	0.53	0.50	斜斑玄武岩
	22	L4	46.03	11.43	7.48	4.66	9.59	12.25	1.70	0.31	4.05	4.05	0.23	2.03	0.25	0.17	致密玄武岩
	23	T3	49.10	13.51	8.31	4.18	8.83	4.01	2.11	1.59	3.93	3.93	0.17	3.63	0.43	0.02	致密玄武岩
小龙街	24	T4	46.52	13.15	8.03	4.41	8.17	6.97	2.69	1.55	4.32	4.32	0.18	3.56	0.42	0.03	柱状节理玄武岩
	25	K9	49.66	14.21	8.89	4.01	9.32	5.25	2.01	0.78	1.46	1.46	0.19	2.95	0.35	0.04	致密玄武岩
阿子营	26	A1	45.33	12.62	8.09	4.77	8.28	5.14	2.81	2.86	5.67	5.67	0.29	3.94	0.45	0.06	柱状节理玄武岩
	27	A2	46.11	12.95	8.75	5.62	9.47	5.05	2.59	1.55	3.01	3.01	0.16	4.22	0.49	0.07	致密玄武岩
松茂	28	C1	49.06	13.37	7.13	6.12	8.57	4.09	2.61	1.25	2.57	2.57	0.18	4.18	0.49	0.07	杏仁状玄武岩
	29	C2	48.72	12.36	9.16	4.49	9.31	4.64	2.15	0.62	3.75	3.75	0.16	3.87	0.48	0.06	杏仁状玄武岩
29 个峨眉山玄武岩样品平均值																	
204 个峨眉山玄武岩样品平均值																	
668 个峨眉山玄武岩样品平均值																	
901(29+204+668)个峨眉山玄武岩样品平均值																	
注:1~29 号样由云南省地质矿产勘查开发局中心实验室分析;“---”表示该项目未分析。																	
本文																	
引自文献[4]																	
引自文献[5]																	

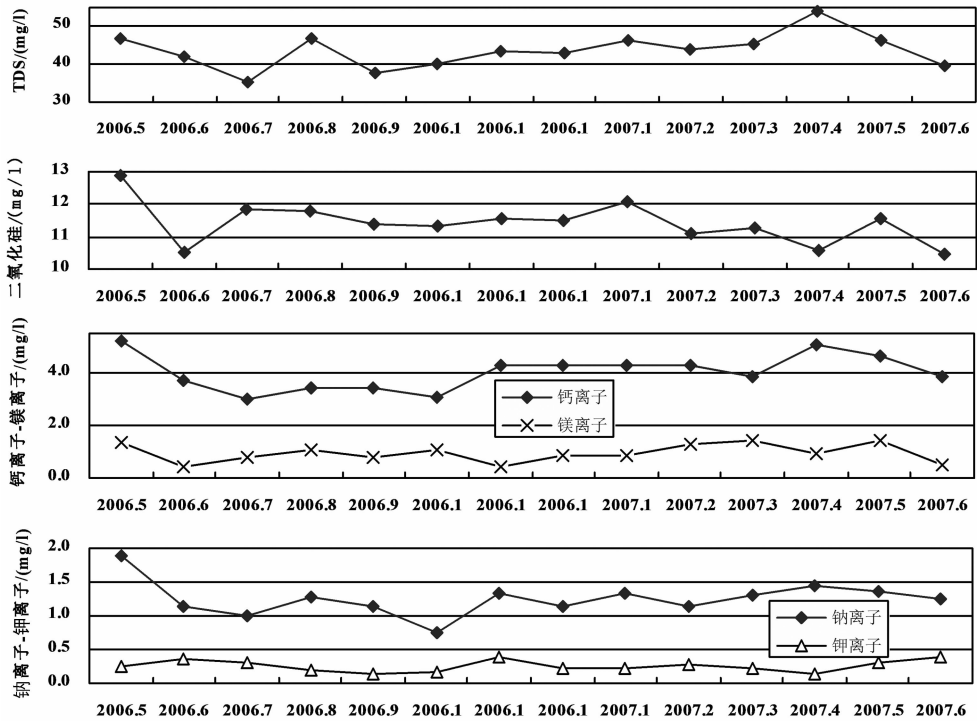


图3 头寨滑坡地下水 TDS 及主要离子浓度的月度变化

Fig.3 Monthly changes of TDS and ion concentrations in the spring in Touzhai landslide

综上所述，根据地下水组分浓度推断的玄武岩风化过程的元素活动性顺序为：Ca>Na>Mg≥Si>K>Fe。

### 2 玄武岩浸泡液的地球化学

前文根据玄武岩斜坡地下水的化学成分特征对玄武岩风化过程中的元素活动性进行了探讨，其结果所反映的是风化玄武岩残坡积物、风化玄武岩及新鲜玄武岩构成的组合的组分淋出状况。为更为明晰地了解玄武岩风化过程中的元素地球化学行为，对采自头寨滑坡的新鲜无斑玄武岩进行了室内浸泡试验。

浸泡试验采用的初始溶液分别为当地降水（第一组）和市售蒸馏水（第二组），前者模拟降水对玄武岩的淋溶作用，后者模拟非饱和带水气凝结水对玄武岩的溶解，即文献[1]图2中充气壳状结构层内的水岩作用，两种初始溶液的化学成分见表3。

第一组试验共有JP1~JP4 4个样品，JP1为一长约10 cm、等效直径4 cm的碎块；JP2~JP3由等效直径分别为4~2 cm、2~1.3 cm和1.3~0.5 cm的碎块集合体构成。第二组试验共有JP6~JP10 5个样品，JP6

为一长约10 cm、等效直径4 cm的碎块；JP7由等效直径2~4 cm的4个碎块组成；JP8~JP10由等效直径分别为2~1.3 cm、1.0~0.5 cm和0.5~0.3 cm的碎块集合体构成。

浸泡试验中的玄武岩样品重量、浸泡液加入量和浸泡时间分别为478 g、600 ml和24 h。浸泡开始前，分别用雨水和蒸馏水反复冲洗两组样品，以消除破碎过程可能产生的亚微米离子（submicron-sized grains）的影响。浸泡液化学分析结果见表3，从该表可以得出以下几点结论：

(1)与初始溶液相比，浸泡液中的SiO<sub>2</sub>、Ca<sup>2+</sup>和Na<sup>+</sup>浓度均有较为明显的提升，说明玄武岩在两种浸泡液中都发生了溶解。

(2)SiO<sub>2</sub>、Ca<sup>2+</sup>和Na<sup>+</sup>浓度变化表明，雨水对玄武岩的溶解程度要高于蒸馏水，这主要与前者的pH较低、玄武岩造岩矿物的溶解过程主要为有H<sup>+</sup>参与的水解反应<sup>⑥</sup>有关，浸泡液的pH总体上高于雨水和蒸馏水可以进一步证实这一推论。

(3)pH及SiO<sub>2</sub>、Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>的浓度变化表明，玄武岩碎块的粒度越小，雨水和蒸馏水对其溶解程度越高，说明水岩反应正相关于水岩作用面积。这一结论

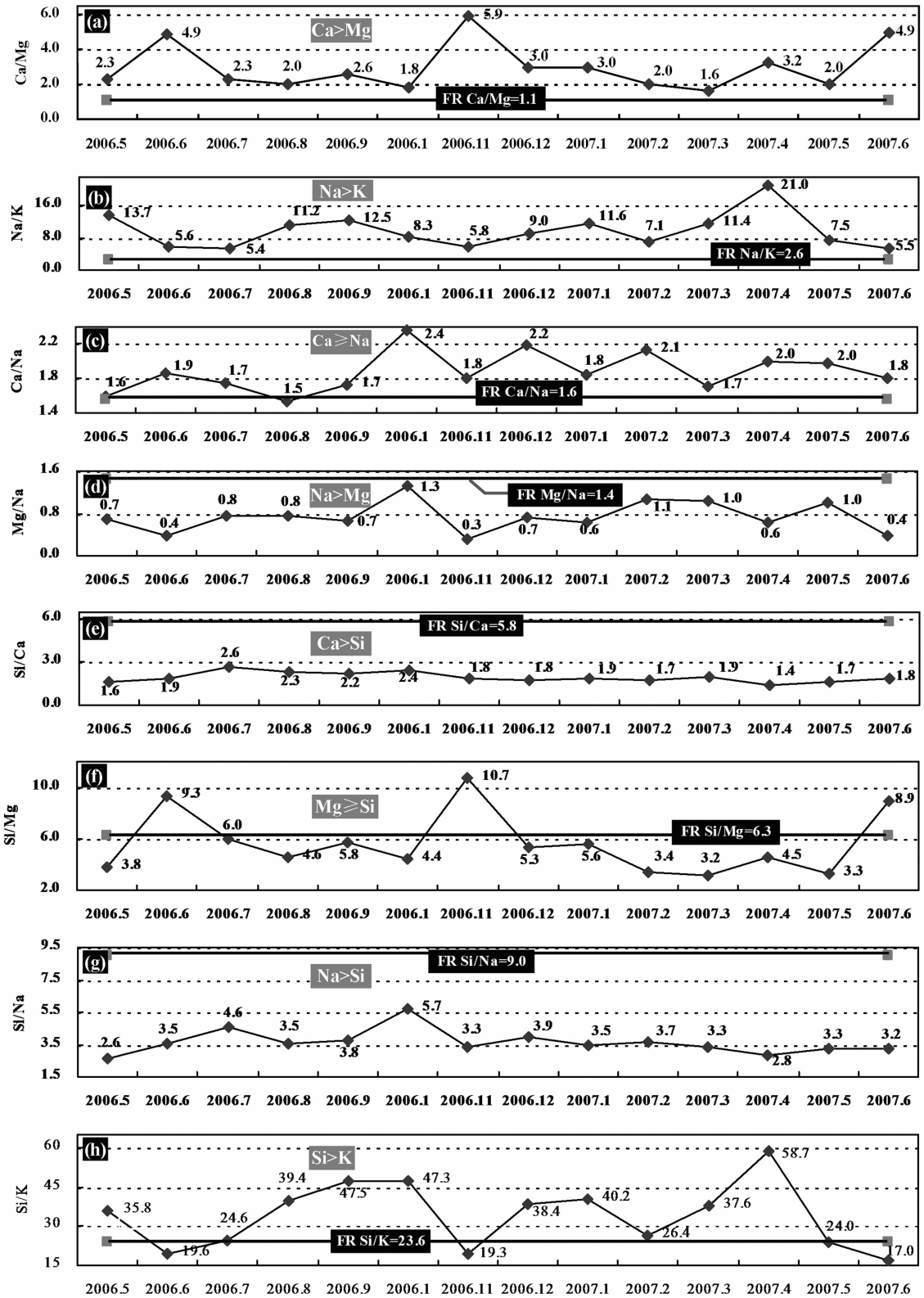


图 4 头寨滑坡地下水离子摩尔数比值的月度变化

Fig.4 Monthly changes of the ratios between different ion concentrations in the spring in Touzhai landslide

表 3 玄武岩浸泡液化学成分 (mg/l)  
Table 3 Chemical composition of the basalt soak solution (mg/l)

样品	pH	SiO <sub>2</sub>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>3+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>2</sub>	TDS	
雨水	6.95	0.53	2.98	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	7.60	0.00	0.00	6.55	2.74	18.28	
	6.96	0.40	2.98	0.00	0.26	0.16	0.00	0.00	7.20	0.00	0.00	6.55	2.74	18.28	
蒸馏水	7.70	0.00	1.72	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.00	9.83	1.83	11.92	
总平均值	7.20	0.31	2.56	0.00	0.09	0.07	0.00	0.00	5.00	0.00	0.00	7.64	2.44	16.16	
雨水	JP1	7.55	0.53	2.98	0.45	0.96	0.12	0.00	0.00	7.80	0.00	0.00	6.55	2.74	20.28
	JP2	7.28	0.53	3.73	0.00	0.63	0.16	0.00	0.00	7.20	0.00	0.00	13.11	1.83	25.56
	JP3	7.36	1.18	6.72	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	7.60	0.00	0.00	16.38	2.74	33.19
	JP4	7.59	2.89	8.21	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	7.80	0.00	0.00	26.21	1.83	49.10
	平均值	7.45	1.28	5.41	0.11	1.21	0.07	0.00	0.00	7.60	0.00	0.00	15.56	2.29	32.03
蒸馏水	JP6	7.40	0.66	1.72	0.00	0.44	0.08	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	9.83	1.83	13.92
	JP7	7.25	0.39	1.72	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.80	0.00	0.00	6.55	1.83	10.28
	JP8	7.27	1.05	2.58	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	16.38	1.83	21.19
	JP9	7.72	2.37	5.16	0.00	1.48	0.04	0.00	0.00	0.40	0.00	0.00	31.46	1.83	41.73
	JP10	8.17	2.24	5.16	0.00	1.71	0.12	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	26.21	1.83	37.10
平均值	7.56	1.34	3.27	0.00	0.86	0.05	0.00	0.00	0.64	0.00	0.00	18.09	1.83	24.84	
总平均值	7.51	1.32	4.22	0.05	1.02	0.06	0.00	0.00	3.73	0.00	0.00	16.96	2.03	28.04	

注:由云南省地质矿产勘察开发局中心实验室分析。

暗示,浅表生环境下的水岩相互作用主要发生于非饱和带而不是饱和带,由于新鲜岩石的低渗透特性(文献[1]表 1),饱和带地下水无法进入结构体内部,水岩反应只能发生于较大尺度结构体的表面,因而其规模有限;与此相反,非饱和带地下水能够以水汽的方式进入结构体表面以内一定深度的粒间孔隙中(文献[1]图 3),水岩反应界面和规模都将大幅度提升。

(4)9 个浸泡液样品中,分别只有 1 个和 5 个检出了 Mg<sup>2+</sup>和 K<sup>+</sup>,这可能与浸泡时间较短有关;Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>的浓度分析结果表明,岩石中没有 Fe 进入溶液。从初始溶液和浸泡液的化学成分差异可以看出,玄武岩中活动性较高的组分包括 Si、Ca 和 Na,Mg、K 的活动性较差,而 Fe 基本可以确定是惰性的。

根据表 3,图 5 给出了 9 个浸泡液样品中 Ca<sup>2+</sup>、Na<sup>+</sup>、Si(SiO<sub>2</sub>)的摩尔数比值及玄武岩中对应的原子数比值。

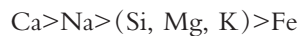
图 5-a 表明,9 个浸泡液的 Ca/Na 在 1.7 和 6.6 之间波动,平均值 2.9,明显高于玄武岩的 Ca/Na (1.6),与图 4-c 一样,同样表明 Ca 的活动性要高于 Na,即 Ca>Na。

与头寨滑坡地下水类似,浸泡液样品的 Si/Ca 也小于玄武岩的 Si/Ca,只是两者的差异更加显著(图 5-b、图 4-e),玄武岩中 Si 活动性低于 Ca,即 Ca>Si 的趋势更加明显。

浸泡液的 Si/Na 介于 0.2 和 1.0 之间,平均值为 0.5,波动幅度不大,明显低于玄武岩的 Si/Na(9.0),

玄武岩中的 Si 活动性低于 Na,即 Na>Si 的趋势同样也是很明显的。

由于无法准确判定 Si、Mg、K 的活动顺序,根据浸泡试验结果(表 3,图 5)可以得出的元素活动性顺序为



综合考虑文献[1]中风化过程中的岩石化学成分变化、斜坡地下水及浸泡液化学成分,峨眉山玄武岩风化过程中的元素活动性顺序可以表示为:Ca>Na>Mg≥Si>K>Fe。

### 3 结 论

(1)作为岩石风化程度研究基础的元素活动性评价除应考虑该元素在风化产物中残留(淋失)状况及在淋滤液(地下水及室内浸泡液等)中的浓度外,还应考虑其在母岩中的相对含量。

(2)斜坡地下水及室内浸泡液中各元素原子个数比值与母岩中对应比值之间均存在显著差异,峨眉山玄武岩造岩矿物的非全等溶解(incongruent dissolution)特征显著。

(3)岩石风化过程实质上是其与水的作用过程。综合考虑风化过程中的岩石成分变化、斜坡地下水及室内浸泡液的化学成分确定的峨眉山玄武岩风化过程中的元素活动性顺序为:Ca>Na>Mg≥Si>K>Fe。

(4)活动性强或惰性程度高、对风化程度变化响应敏感应成为岩石风化程度指示性元素的选择标准,

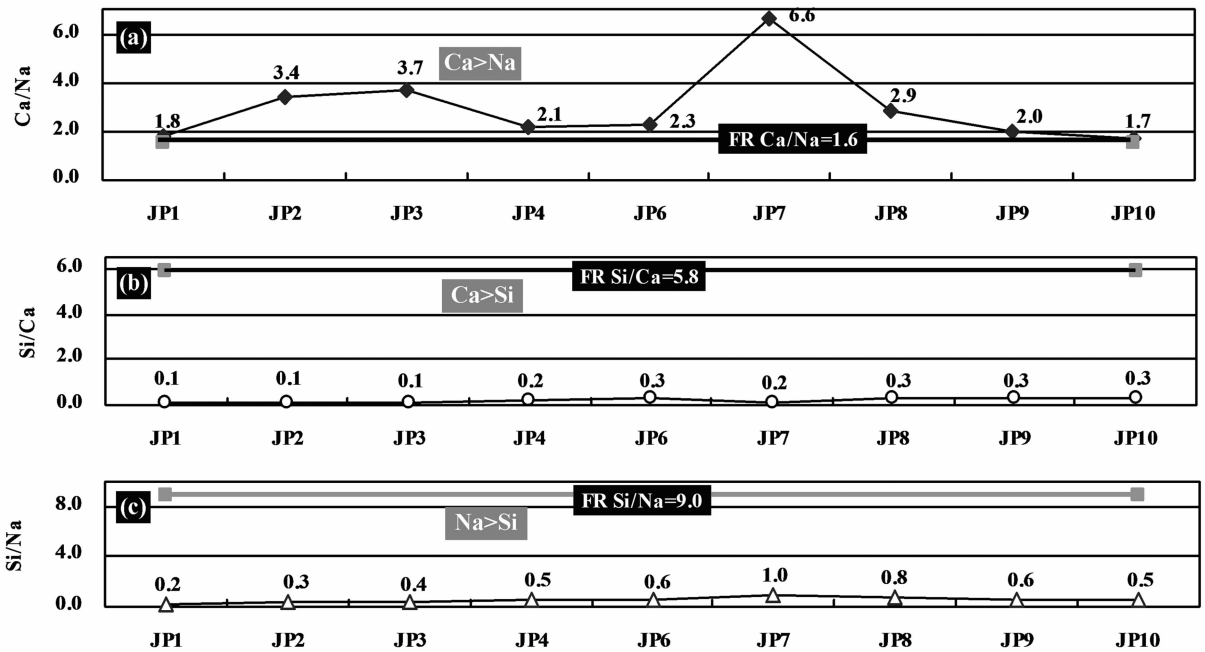


图 5 玄武岩浸泡液离子的摩尔数比值  
Fig.5 The ratios between different ion concentrations in the basalt soak solution

对于峨眉山玄武岩, Ca 和 Fe 应该是优先考虑元素。

**致谢:** 本项工作涉及范围广、研究周期长、研究区工作条件复杂, 2003—2008 级五届博士和硕士研究生唐正光、张家明、陈积普、王志兵、申林方、王朝阳、刘泉、王志强、王红晓及魏力等参加了现场调查、监测及室内试验和资料整理工作。感谢油气藏地质及开发工程国家重点实验室和云南地质矿产开发局中心实验室在样品分析测试中所给予的帮助。

**参考文献(References):**

[1] 徐则民, 黄润秋. 基于结构体的峨眉山玄武岩风化程度评价 ( I ): 风化结构体地球化学 [J]. 中国地质, 2013, 40(3):895-908.  
Xu Zemin, Huang Runqiu. Assessment of the intensity of Emeishan basalt weathering based on rock blocks ( I ): geochemistry of weathered basalt blocks [J]. Geology in China, 2013, 40 (3):895-908(in Chinese with English abstract).  
[2] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 头寨滑坡的工程地质特征及其发生机制 [J]. 地质论评, 2007, 53(5):691-698.  
Xu Zemin, Huang Runqiu, Tang Zhengguang. Engineering

geological characteristics of the Touzhai landslide and its occurrence mechanisms [J]. Geological Review, 2007, 53 (5):691-698 (in Chinese with English abstract).  
[3] 徐则民, 黄润秋. 峨眉山玄武岩大规模灾难性崩滑事件的地质构造约束 [J]. 地质论评, 2010, 56(2):224-236.  
Xu Zemin, Huang Runqiu. The geological structure constraint for massive and catastrophic landslides in Permian Emeishan basalt [J]. Geological Review, 2010, 56(2):224-236 (in Chinese with English abstract).  
[4] 邱家骧. 岩浆岩岩石学 [M]. 北京:地质出版社, 2001:110.  
Qiu Jiaxiang. Magmatic Petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2001:110(in Chinese).  
[5] 张云湘, 骆耀南, 杨崇喜. 攀西裂谷 [M]. 北京:地质出版社, 1988:163.  
Zhang Yunxiang, Luo Yaonan, Yang Chongxi. Panxi Rift [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988:163(in Chinese).  
[6] 徐则民, 黄润秋, 唐正光. 硅酸盐矿物溶解动力学及其对滑坡研究的意义 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9):1479-1491.  
Xu Zemin, Huang Runqiu, Fan Zhuguo et al. Kinetics of silicate mineral dissolution and implications for landslide studies [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (9):1479-1491(in Chinese with English abstract).



## The assessment of the intensity of Emeishan basalt weathering based on rock blocks( II ):hydrogeochemistry of the groundwater in the basalt slope and basalt soaking solution

XU Ze-min<sup>1,2</sup>, HUANG Run-qiu<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650224, Yunnan, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu 610059, Sichuan, China)

**Abstract:** The evaluation of the element mobility in the process of rock weathering should consider not only elements fixation and leaching status and their concentrations in the leachate (groundwater and laboratory soaking solutions, etc.), but also their relative content in the parent rocks. The ratios of atomic numbers of different elements in the groundwater in Emeishan basalt slope and laboratory soak solution are different from those in basalt parent rocks. The rock-forming mineral dissolution of Emeishan basalt is incongruent. According to the basalt composition change in the course of weathering and the chemical compositions of the groundwater in the basalt slope and the laboratory basalt soaking solutions, the element mobility sequence in Emeishan basalt weathering process of  $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} \geq \text{Si} > \text{K} > \text{Fe}$  was determined. Mobile elements sensitive to the degree of weathering or immobile elements should be selected as indicative elements of the rock weathering degree, and Ca, Fe should be the preferred elements to evaluate the weathering intensity of the Emeishan basalt.

**Key words:** basalt; Emeishan basalt; weathering; element mobility; groundwater; soaking solution; hydrogeochemistry

---

**About the first author:** XU Ze-min, male, born in 1963, professor, supervisor of doctor candidates, mainly engages in the study of predispose process of landslide hazards; E-mail: abc5100@188.com.