

# 峨眉山玄武岩岸坡深部差异风化岩体特征及成因

韩 刚, 赵其华, 彭社琴

(地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)/成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 西南地区某水电工程的峨眉山玄武岩, 其岩体风化具有特殊性, 存在岸坡内部(或深部)岩体风化局部加强的特殊现象(称为差异风化)。该差异风化岩体在表观特征、分布特征、化学特征及形成环境上具有与岸坡表部一般风化岩体不同的显著特征。以该处差异风化岩体发育分布规律为基础, 结合其化学特征、河谷演化过程及浅生改造理论分析其成因机制。研究表明: 差异风化不具随水平深度增大风化逐渐减弱特征, 分布受长大张性结构面控制, 表现为局部的裂隙式风化加剧, 张性结构面两侧 5~15 cm 范围内岩体红度增加; 差异风化岩体发生了化学风化, 但并未发生明显的脱硅富铝与盐类淋失迁移, 仅表现为二价铁减少、三价铁富集; 控制性结构面具浅生改造特征, 差异风化岩体赋存于浅生结构所形成的相对封闭空间; 浅生改造正是导致差异风化岩体形成的根本原因。

**关键词:** 峨眉山玄武岩; 差异风化; 化学特征; 浅生改造; 成因机制

中图分类号: P642.24

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)10-1547-07

**作者简介:** 韩 刚(1978-), 男, 吉林省吉林市人, 博士研究生, 主要从事岩石高边坡工程方面的研究工作。E-mail: gang\_han@126.com。

## Characteristics and formation mechanism of deep differential weathering rock mass in Emei Mountain basalt canyon slope

HAN Gang, ZHAO Qi-hua, PENG She-qin

(State Key Laboratory of GeoHazard Prevention and GeoEnvironment Protection(Chengdu University of Technology)/College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The Emei Mountain basalt of a hydropower project in the southwest of China is special in its weathering characteristics. There exists abnormal weathered belt inner rock mass (called differential weathering). Differential weathering is much different from normally weathering rock mass in its apparent, distribution, chemical characteristics and environment involved. The distribution characteristics of differential weathering rock mass are analyzed. And the formation mechanism is studied by analyzing chemical characteristics, valley evolution and near surface action theory. The main conclusions are drawn that the differential weathering does not weaken with the increase of the horizontal depth. The distribution is controlled by long tension fracture, and highly weathered near fracture. It is much redder within 5~15 cm of the tension fracture. Chemical weathering occurs in differential weathered rock including decrease of  $Fe^{2+}$  and increase of  $Fe^{3+}$ . But there is no obvious decrease of Na, K, Ca, Mg, Al and Si. The controlling discontinuity appears near surface action characteristics, and differential weathering rock mass is formed by near surface action.

**Key words:** Emei Mountain basalt; differential weathering; chemical characteristic; near surface action; formation mechanism

## 0 引 言

岩体风化一直是岩土、地质科技工作者所热衷研究的科学问题, 其所关心的主要是由风化作用所导致的岩土材料工程性质的劣化<sup>[1]</sup>。以往研究多关注于有关风化带划分量化指标以及风化岩体可利用性方面, 近年来, 随着岩土工程化学<sup>[2]</sup>这一交叉学科的发展, 使借助于分析岩石中化学元素的迁移来研究处于地表或埋深较浅的岩体风化成为可能, 并相应地根据多种

化学风化指标与微观结构特征<sup>[3-7]</sup>反映岩体风化剧烈程度。

随着我国西南水电蓬勃发展, 建设过程中随着勘探工作不断深入, 在已超出地表风化波及范围、岸坡

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(40772177); 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB013501); 长江学者和创新团队发展计划项目(IRT0812)

收稿日期: 2010-08-17

深部揭露有一种局部发育的风化加剧现象, 由于其与周边新鲜岩体形成鲜明对比, 可称之为差异风化, 与处于地表风化岩体不同, 此类现象较为特殊且并非大规模出现, 以往研究多限于对其进行风化带定名<sup>[8]</sup>与分布规律的分析<sup>[9]</sup>, 有关成因机制的深入研究则较少。为揭露此特殊工程地质现象本质, 本文以白鹤滩水电站坝址区差异风化岩体为实例, 在总结其发育分布规律基础上, 结合化学分析与河谷演化过程, 借助于浅生改造理论, 力求初步分析差异风化岩体特征与成因机制, 所研究成果对进一步深入研究差异风化岩体具有一定借鉴意义。

1 地质环境概况

白鹤滩水电站坝址区位于云南省巧家县以北约 45 km 处金沙江呈近 SN 向河段上, 金沙江由 S 向 N 流过坝址区, 岸坡高陡, 河谷深切, 参照坝址区地形地貌与对比区域资料, 可将坝址区河谷发育阶段大致划分为宽谷期与峡谷期, 其中宽谷期对应于高级剥蚀面与低级剥蚀面之间, 峡谷期则对应于Ⅳ~Ⅰ级阶地形成(表 1), 在经历共 4 次快速下切后, 坝址区已经形成目前河谷地貌, 其形成地质年代大致对应于 Q<sub>2</sub> 晚期~Q<sub>3</sub> 早期。

表 1 河谷演化阶段

Table 1 Evolution stages of valley			
标志地貌	河拔/海拔/m	地质年代/ka	演化期次
高级剥蚀面	1020/1600	Q <sub>1</sub> /1500	第一次下切
低级剥蚀面	600/1180	Q <sub>1</sub> /700	
Ⅳ级阶地	250/830	Q <sub>2</sub> /180	
Ⅲ级阶地	140/720	Q <sub>2</sub> /150	第二次下切
Ⅱ级阶地	80/660	Q <sub>3</sub> /40	
Ⅰ级阶地	20/600	Q <sub>4</sub> /11	第四次下切

表 2 差异风化岩体分布

Table 2 Distribution of differential weathering rock mass					
高程/m	洞深/m	岩性	层位	地下水	工程地质特征简述
1001	120~147	角砾熔岩	P <sub>2</sub> β <sub>8</sub>	潮湿	角砾熔岩表面可见团块状土黄色锈染
883	107~130	隐晶玄武岩	P <sub>2</sub> β <sub>3</sub>	滴水	位于缓倾角错动带上盘, 沿结构面两侧 5~15 cm 范围岩体呈红褐色
807	100~104	斜斑玄武岩	P <sub>2</sub> β <sub>3</sub>	潮湿~渗水	位于缓倾角错动带上盘, 岩体沿隐微裂隙周边呈现红褐色
805	188~192	柱状节理	P <sub>2</sub> β <sub>3</sub>	潮湿~渗水	位于缓倾角错动带上盘, 沿柱状节理面风化加强, 呈现黄褐色
800	120~160	柱状节理	P <sub>2</sub> β <sub>4</sub>	潮湿~滴水	位于缓倾角错动带上盘, 沿柱状节理面风化加强, 呈现黄褐色
744	66~100	角砾熔岩	P <sub>2</sub> β <sub>5</sub>	潮湿	位于缓倾角错动带下盘, 沿裂隙及错动带可见团块状锈染
738*	110~197	柱状节理	P <sub>2</sub> β <sub>5</sub>	潮湿	受多条缓倾角错动带控制, 上盘岩体裂隙面可见红褐色锈染
670	84~138	隐晶玄武岩	P <sub>2</sub> β <sub>3</sub>	潮湿~渗水	位于缓倾角错动带上盘, 岩体沿隐微裂隙周边呈现红褐色
625	112~148	柱状节理	P <sub>2</sub> β <sub>4</sub>	潮湿	缓倾角错动带上、下盘 5~10 cm 范围内风化加强, 呈红褐色
620	78~82	柱状节理	P <sub>2</sub> β <sub>4</sub>	潮湿	位于缓倾角错动带上盘, 沿柱状节理面风化加强, 呈现黄褐色
611	45~100	隐晶玄武岩	P <sub>2</sub> β <sub>3</sub>	潮湿	位于缓倾角错动带上盘, 岩体沿隐微裂隙周边呈现红褐色

坝址区主要出露三叠系上统飞仙关组砂泥岩 (T<sub>1</sub>f<sub>1</sub>) 与二叠系峨眉山组玄武岩 (P<sub>2</sub>β), 根据喷溢间断与爆发次数, 可将玄武岩划分为 11 个岩流层, 每岩流层自下向上包含斜斑玄武岩、隐晶(微晶)玄武岩、杏仁玄武岩、角砾熔岩及凝灰岩, 其中(微晶)玄武岩根据柱状节理发育程度又可划分出柱状节理玄武岩。岩流层产状 N20°~60°E, SE∠15°~20°, 除凝灰岩性软外, 其余均属坚硬岩, 强度较高。

受燕山期与喜山期两期多次潜在走滑型应力场作用, 坝址区除形成走向 N40°~60°W 与 N30°~50°E 陡倾平面“X”型节理系外, 还形成数量较多、较为长大的缓倾角错动带, 其产状与岩流层近于平行, 各岩流层均有分布, 且以 P<sub>2</sub>β<sub>3</sub> 层内最为发育。

2 差异风化岩体发育分布特征

坝址区范围内共揭露有 11 处差异风化现象, 将其汇总于表 2 进行分析, 并总结坝址区差异风化岩体发育分布具有如下特征:

(1) 多位于距岸坡 100~150 m 之间, 此深度远大于坝址区卸荷带底界(卸荷带底界一般约 70 m 左右), 差异风化岩体与地表风化岩体间发育有一段新鲜完整岩体。

(2) 分布高程具有随机性, 但若以岸坡高程区间进行区分, 则其多位于下(1/3~1/2)坡高范围间(坝址区岸坡坡顶高程约 1000 m, 谷底高程约 580 m)。

(3) 对岩性具有依赖性, 隐晶(包含柱状节理)玄武岩内最为发育, 这可能与隐晶玄武岩, 特别是柱状节理玄武岩内隐微裂隙较为发育有关。

(4) 多与规模较大、延伸性较好缓倾角错动带伴生, 并受其控制, 在错动带两侧 5~15 cm 范围内呈裂

注：\*代表取样进行地球化学分析。



图 1 差异风化岩体特征

Fig. 1 Characteristics of differential weathering rock mass

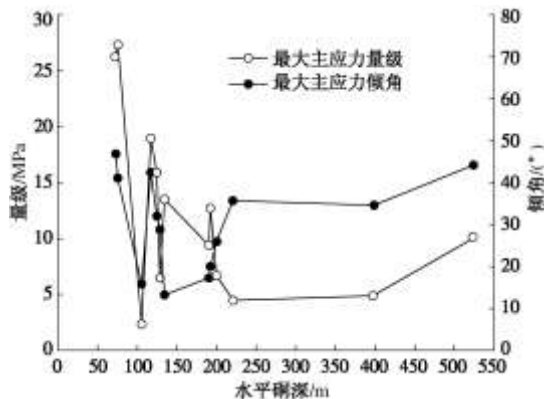


图 2 最大主应力随水平硐深变化曲线图

Fig. 2 Relationship between maximum principal stress and horizontal adit depth

隙式风化加剧，呈现鲜艳的红褐色与土黄色（图 1），超出此范围岩体则转变为新鲜。

（5）出现差异风化岩体区域，岩体多呈镶嵌结构，较为破碎，裂隙多呈微张状态，但并未充填，地下水并不十分发育，仅表现出潮湿—渗滴水状态。

（6）据地应力实测资料，发育差异风化岩体硐段，主应力量级与倾角则呈剧烈波动特征（图 2），主应力局部最高可达约 28 MPa，倾角约 70°，与斜坡坡面近于平行，最低仅约 5 MPa，倾角约 15°，近于水平，应力量级与倾角均表现强烈离散性，表明该区域处于斜坡应力场向构造应力场转化过渡地带，应力环境属构造应力场与斜坡应力场共同作用下的复合应力场。

上述特征表明：坝址区差异风化岩体的分布规律、表观特征与地表风化岩体存在明显差异。差异风化岩体主要分布于岸坡下（1/3~1/2）坡高附近、硐深 100~150 m 左右；受规模较大缓倾角错动带控制，多沿错动带两侧 5~15 cm 范围内具裂隙式风化加强特征，宏观表象即为岩体红度增加；受岩性控制，集中发育于隐晶（含柱状节理）玄武岩内；发育差异风化硐段地下水并不十分发育，仅表现为渗水—滴水状态；所赋

存应力环境属构造应力场与斜坡应力场共同作用下的复合应力场。

### 3 差异风化岩体化学特征

岩体的化学风化包括有溶解作用、水化作用、水解作用、酸化作用及氧化作用<sup>[1]</sup>，并可采用多种化学风化指标<sup>[3-7, 10]</sup>表征岩体风化剧烈程度，本文采用文<sup>[4]</sup>所应用的 11 种风化系数，各系数如下所示：

硅铁系数- $K_1=SiO_2/Fe_2O_3$ ，硅铝系数- $K_2=SiO_2/Al_2O_3$ ，离铁系数- $K_3=Al_2O_3/Fe_2O_3$ ，硅铁铝系数- $K_4=SiO_2/(Fe_2O_3+Al_2O_3)$ ，碱土金属淋溶系数- $K_5=(CaO+MgO)/Al_2O_3$ ，碱金属淋溶系数- $K_6=(K_2O+Na_2O)/Al_2O_3$ ，盐基总量淋溶系数- $K_7=(K_2O+Na_2O+CaO+MgO)/Al_2O_3$ ， $K_8=CaO/MgO$ ， $K_9=K_2O/Na_2O$ ， $K_{10}=FeO/Fe_2O_3$ ，岩石化学新鲜度- $K_{11}=(R_2O+RO)/R_2O_3$ 。

试验样品采集于 PD344 平硐（表 2）内 114, 126, 136, 150, 188 m 硐壁，样品中既包含青灰色新鲜岩样(Co)（图 1），也包含红褐色差异风化岩样(Cr)，分别对样品进行编号进行化学分析，主量元素化学分析结果见表 3，风化系数见表 4，分析中 Co-Cr( $\Delta R$ )表示新鲜岩样与差异风化岩样某种元素差值。

#### 3.1 主量元素化学分析特征

主量元素分析表明，差异风化岩体具有如下化学特征：

（1）样品的  $SiO_2$  含量在 45.50%~48.53% 之间，表明坝址区玄武岩属基性岩范畴，同一样品中 Co-Cr( $\Delta SiO_2$ )<1.00%， $SiO_2$  含量基本恒定。

（2）样品的  $MgO$  含量在 4.96%~6.19% 之间， $CaO$  含量在 8.12%~8.83% 之间， $Na_2O$  含量在 1.83%~2.18% 之间， $Al_2O_3$  含量在 12.93%~13.74% 之间， $K_2O$  含量在 1.24%~1.51% 之间，总体上，虽不同样品中上述元素含量存在差异，但同一样品中 Co-Cr( $\Delta R$ )<1.00%，含量基本恒定。

（3）样品  $\Sigma Fe$  含量在 13.20%~14.14% 之间，除 4 号样品 Co-Cr( $\Delta \Sigma Fe$ )=1.70% 外，其余同一样品中 Co-Cr( $\Delta \Sigma Fe$ )<1.00%，总体上， $\Sigma Fe$  含量保持稳定。

（4）同一样品中由新鲜岩石过渡到风化岩石，表现出  $Fe^{2+}$  含量减小， $Fe^{3+}$  含量增加，二价铁减少量与三价铁增加量基本一致。

#### 3.2 风化系数特征

（1）各风化系数具有如下关系

$Co(K_1)>Cr(K_1)$ ； $Co(K_2)\approx Cr(K_2)$ ； $Co(K_3)>Cr(K_3)$ ； $Co(K_4)>Cr(K_4)$ ； $Co(K_5)\approx Cr(K_5)$ ； $Co(K_6)\approx Cr(K_6)$ ； $Co(K_7)$

$\approx \text{Cr}(\text{K}_7)$ ;  $\text{Co}(\text{K}_8) \approx \text{Cr}(\text{K}_8)$ ;  $\text{Co}(\text{K}_9) \approx \text{Cr}(\text{K}_9)$ ;  $\text{Co}(\text{K}_{10}) >$

表 3 差异风化岩体主量元素化学分析结果

Table 3 Chemical analysis results of main elements in differential weathering rock mass														%
样品编号	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ΣFe	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
PD344-1-Co	45.50	0.01	6.19	8.44	0.20	1.83	1.42	4.20	13.74	9.59	4.34	13.93	0.49	4.28
PD344-1-Cr	46.50	0.01	5.79	8.75	0.20	1.90	1.24	4.11	13.53	6.25	7.57	13.82	0.47	3.83
Co-Cr(Δ R)	-1.00	0.00	0.40	-0.31	0.00	-0.07	0.18	0.09	0.21	3.34	-3.23	0.11	0.02	0.45
PD344-2-Co	48.26	0.01	5.43	8.50	0.23	2.14	1.34	4.12	13.56	8.63	4.74	13.37	0.47	2.95
PD344-2-Cr	48.06	0.01	4.96	8.61	0.23	2.04	1.38	4.09	13.33	7.01	6.46	13.47	0.48	3.24
Co-Cr(Δ R)	0.20	0.00	0.47	-0.11	0.00	0.10	-0.04	0.03	0.23	1.62	-1.72	-0.10	-0.01	-0.29
PD344-3-Co	48.53	0.01	5.30	8.49	0.19	2.07	1.60	4.11	13.29	8.09	5.11	13.20	0.47	2.86
PD344-3-Cr	47.81	0.01	5.47	8.41	0.20	2.08	1.54	4.09	13.34	6.43	7.22	13.65	0.47	3.08
Co-Cr(Δ R)	0.72	0.00	-0.17	0.08	-0.01	-0.01	0.06	0.02	-0.05	1.66	-2.11	-0.45	0.00	-0.22
PD344-4-Co	47.70	0.01	5.17	8.16	0.48	1.97	1.39	3.73	12.77	7.86	7.21	15.07	0.51	3.37
PD344-4-Cr	48.10	0.01	5.38	8.44	0.22	2.18	1.51	4.14	13.44	5.67	7.70	13.37	0.47	3.09
Co-Cr(Δ R)	-0.40	0.00	-0.21	-0.28	0.26	-0.21	-0.12	-0.41	-0.67	2.19	-0.49	1.70	0.04	0.28
PD344-5-Co	48.35	0.02	5.03	8.83	0.28	2.08	1.34	4.03	13.12	8.31	4.89	13.20	0.48	3.25
PD344-5-Cr	47.39	0.03	5.40	8.12	0.23	2.15	1.40	4.02	12.93	6.15	7.99	14.14	0.46	3.93
Co-Cr(Δ R)	0.96	-0.01	-0.37	0.71	0.05	-0.07	-0.06	0.01	0.19	2.16	-3.10	-0.94	0.02	-0.68

表 4 岩体风化系数

Table 4 Weathering coefficients of rock mass											
样品编号	风化系数										
	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	K <sub>7</sub>	K <sub>8</sub>	K <sub>9</sub>	K <sub>10</sub>	K <sub>11</sub>
PD344-1-Co	10.48	3.31	3.17	2.52	1.06	0.24	1.30	1.36	0.78	2.21	1.52
PD344-1-Cr	6.14	3.44	1.79	2.20	1.07	0.23	1.31	1.51	0.65	0.83	1.13
PD344-2-Co	10.18	3.56	2.86	2.64	1.03	0.26	1.28	1.57	0.63	1.82	1.42
PD344-2-Cr	7.44	3.61	2.06	2.43	1.02	0.26	1.27	1.74	0.68	1.09	1.21
PD344-3-Co	9.50	3.65	2.60	2.64	1.04	0.28	1.31	1.60	0.77	1.58	1.39
PD344-3-Cr	6.62	3.58	1.85	2.33	1.04	0.27	1.31	1.54	0.74	0.89	1.16
PD344-4-Co	6.62	3.74	1.77	2.39	1.04	0.26	1.31	1.58	0.71	1.09	1.23
PD344-4-Cr	6.25	3.58	1.75	2.28	1.03	0.27	1.30	1.57	0.69	0.74	1.10
PD344-5-Co	9.89	3.69	2.68	2.68	1.06	0.26	1.32	1.76	0.64	1.70	1.42
PD344-5-Cr	5.93	3.67	1.62	2.27	1.05	0.27	1.32	1.50	0.65	0.77	1.11

Cr(K<sub>10</sub>)。

(2) 硅铝系数维持不变, 硅铁系数、离铁系数及硅铁铝系数均较新鲜岩体低, 表明差异风化岩体并未发生明显的脱硅富铝作用, 而主要表现为铁的富集;

(3) 碱土金属淋溶系数、碱金属淋溶系数及盐基总量淋溶系数基本维持恒定, 表明差异风化岩体并未发生明显的盐类淋失;

(4) K<sub>8</sub>、K<sub>9</sub> 基本恒定, 也表明 Na、K、Ca、Mg 元素并未发生明显的淋失迁移, 而 Co(K<sub>10</sub>)>Cr(K<sub>10</sub>), 反映差异风化岩体确实发生过氧化作用, 表现出二价铁的减少, 三价铁的富集, 其宏观表现为岩体的红度增加, 即为平硐内可见的红褐色风化岩体 (图 1);

(5) Co(K<sub>11</sub>)>Cr(K<sub>11</sub>), 表明差异风化岩体风化程度较新鲜岩体剧烈。

前人研究成果表明<sup>[3-4, 11-14]</sup>, 处于地表或近地表风化岩体中化学元素迁移一般具有 Na、K、Ca、Mg 淋失导致含量减少, Al、Fe 沉积富集以及脱硅富铝等特征, 而差异风化岩体并不具有上述特征, 但却表现出明显的氧化反应特征, 即二价铁减少与三价铁增加, 而化学新鲜度指标则又反映在风化程度上, 差异风化岩体确实较新鲜岩体剧烈。

## 4 控制性错动带浅生改造特征

浅生改造<sup>[15]</sup>系指在地貌晚近期的改造和演化过程中,地壳浅表圈层中因区域性卸荷引起岩(土)体应力场的变化和应变能的释放而形成的变形破裂过程,其所形成的结构体系即为浅生结构,往往具有继承性与新生性。文献[16]对本区玄武岩浅表生改造特征进行详细总结归纳。据现场勘探揭露,坝区控制差异风化岩体分布的缓倾角错动带也具明显浅生改造特征:

(1)缓倾角错动带具有离面回弹特征,表现出错动带上盘一定范围内岩体呈现整体板裂化(图3),这与宽谷期经历的大规模垂向剥蚀有关。



图3 板裂化破裂

Fig. 3 Plate cracking fracture

(2)缓倾角错动带具有差异回弹特征,表现出错动带上盘岩体出现间隔式陡倾角张裂缝,且错动带内部可见多期顺倾向方向擦痕,擦痕方向指向河谷临空面方向,这与峡谷期大规模侧向卸荷有关。

(3)上述破裂体系是岸坡岩体在浅生改造过程中形成的浅生结构,其所处应力环境属构造应力场与斜坡应力场共同作用下的复合应力场,而并非重力场,形成的驱动力是伴随应力场变化过程中应变能的释放,一旦应变能释放完毕,浅生改造作用随即终止,因此,其所形成的空间也相对封闭。现场勘察揭露张性破裂面内未见地表充填物也进一步证实其贯通性较差,并未与外界连通。

## 5 差异风化岩体形成机制

坝址区差异风化的表观特征为沿错动带周边15~30 cm 范围内岩体红度增加,表现为一种裂隙式的风化加剧,结合其发育分布规律、化学特征以及河谷演化过程,可概括差异风化岩体形成过程如下:

(1)坝址区河谷形成过程中经历的大规模垂向剥蚀及侧向卸荷作用,导致岩体内地应力场发生改变,并伴随应变能的强烈释放,从而使延伸性较好的错动带发生离面回弹与差异回弹,为外营力(主要表现为地

下水)作用提供通道。

(2)应变能释放伴随地应力场调整完毕而终止,因此,浅生改造作用具有一定局限性与区域性,其所形成的张性破裂体系也非贯通性结构,与外界并不连通,从而导致岩体处于一种相对封闭的地质环境,岩体风化表观特征与剧烈程度与处于地表岩体存在差异。

(3)张性破裂面为赋存于玄武岩体内裂隙水提供流通空间,但由于坝址区地下水为偏碱性,PH 值7.5~9.3,总碱度72.6~166.3 mg/L,加之所处环境相对封闭,地下水并不能有效使岩石中碱离子淋滤、迁移,从而导致岩石中Na、K、Ca、Mg、Al、SiO<sub>2</sub>等元素含量基本维持恒定。

(4)游离于裂隙水中的氧可使二价铁发生氧化反应转变为三价铁,从而使岩体表现出红度增加,但由于三价铁更为稳定,不易风化,且易与H<sub>2</sub>O、挥发质形成胶体或残余层,从而阻止水溶液进一步与二价铁发生氧化反应,导致差异风化岩体仅限于张性破裂面两侧5~15 cm 范围内可见,超出此范围岩体则表现为新鲜未风化状态。

差异风化岩体正是在上述作用下最终形成,其形成的环境与处于地表的风化岩体存在差异,由此导致其并不具备地表风化岩体所表现出的化学元素迁移特征,主要表现在盐类淋失与脱硅富铝现象并不显著,但二价铁氧化形成三价铁却反映出差异风化岩体在化学风化程度上较新鲜岩体剧烈,这与文献[6, 17]所采用风化指数(WI)判定白鹤滩水电站玄武岩岩体化学风化不明显的结论有所区别,因此,单一采用风化指数(WI)来判别岩体是否发生明显的化学风化则有待商榷。

## 6 结 论

本文在总结其发育分布规律基础上,结合化学分析与河谷演化过程,借助于浅生改造理论探讨差异风化岩体特征与形成机制,主要结论如下:

(1)差异风化岩体分布受限于延伸性较好、规模较大错动带控制,且具有局部性,仅在错动带两侧5~15 cm 范围内局部可见裂隙式风化加剧现象。

(2)差异风化岩体与地表风化岩体表观特征存在区别,仅表现为红度增加,其实质为三价铁的富集,为二价铁氧化所形成。

(3)差异风化岩体不具地表风化岩体所具有的脱硅富铝及盐类淋溶迁移规律,这可能与差异风化岩体形成于相对封闭的空间,不利于化学元素的迁移有关,

但其风化程度又较新鲜岩体剧烈。

(4)浅生结构构成差异风化岩体所赋存的地质环境,浅生改造是形成差异风化岩体的根本原因。

以上基本认识仅是探索性的,对其他类似现象尚有待于深入研究。

**致谢:**感谢昆明理工大学徐则民教授在岩石化学分析方面给予的帮助。

#### 参考文献:

- [1] 沈珠江. 抗风化设计-未来岩土工程设计的一个重要内容[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(6): 866 - 869. (SHEN Zhu-jiang. Weathering resistant design-An important aspect of future development of geotechnical engineering design[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(6): 866 - 869. (in Chinese))
- [2] 熊厚金, 张良辉, 邹小平, 等. 岩土工程化学导论[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(4): 403 - 407. (XIONG Hou-jing, ZHANG Liang-hui, ZOU Xiao-ping, et al. An introduction to the geotechnical chemistry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(4): 403 - 407. (in Chinese))
- [3] 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比-以香港九龙地区为例[J]. 地质科学, 2001, **36**(3): 279 - 294. (SHANG Yan-jun, WU Hong-wei, QU Yong-xin. Comparison of chemical indices and micro-properties of weathering degrees of granitic rocks-a case study from Kowloon, Hong Kong[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, **36**(3): 279 - 294. (in Chinese))
- [4] 张丽萍. 三峡坝区花岗岩风化分带的化学风化特征指标研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2003, **30**(4): 471 - 476. (ZHANG Li-ping. Study on characteristic value of chemical weathering in weathering granite regolith different vertical division zone in the Three Gorge Dam Region of Yangtze River[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2003, **30**(4): 471 - 476. (in Chinese))
- [5] 李日运, 吴林峰. 岩石风化程度特征指标的分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(22): 3830 - 3833. (LI Ri-yun, WU Lin-feng. Research on characteristic indexes of weathering intensity of rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(22): 3830 - 3833. (in Chinese))
- [6] 魏云杰, 许模, 陶连金, 等. 峨眉山玄武岩岩体风化分带量化研究[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, **23**(3): 32 - 36. (WEI Yun-jie, XU Mo, TAO Lian-jin, et al. Quantitative study on the zoning of weathering degree of Emei Mountain basalts[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2008, **23**(3): 32 - 36. (in Chinese))
- [7] 苏永华, 封立志, 李志勇, 等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(4): 679 - 686. (SU Yong-hua, FENG Li-zhi, LI Zhi-yong, et al. Quantification of elements for geological strength index in Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(4): 679 - 686. (in Chinese))
- [8] 中华人民共和国建设部. GB—50287—2006 水力发电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB—50287—2006 Code for hydropower engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [9] 白乐, 彭社琴, 赵其华. 西南某水电站坝区岩体深部差异风化成因及分布规律分析[J]. 长江科学院院报, 2010, **27**(2): 46 - 49. (BAI Le, PENG She-qin, ZHAO Qi-hua. Cause of deep rock mass difference weathering formation and distribution law analysis in dam site area of some hydraulic power station in Southwest China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, **27**(2): 46 - 49. (in Chinese))
- [10] 刘本立. 地球化学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1994. (LIU Ben-li. Geochemical basis[M]. Beijing: Peking University Press, 1994. (in Chinese))
- [11] 张仲英, 刘瑞华. 海南岛第四系火山岩的分期[J]. 地质科学, 1989(1): 67 - 76. (ZHANG Zhong-ying, LIU Rui-hua. The stage-division of quaternary volcanic rocks in Hainan Island[J]. Scientia Geologica Sinica, 1989(1): 67 - 76. (in Chinese))
- [12] 冯锦江, 胡碧茹. 琼北第四纪玄武岩化学风化速率的初步研究[J]. 地质科学, 1992(增刊): 295 - 301. (FENG Jin-jiang, HU Bi-ru. A Preliminary study of rates of chemical weathering of quaternary basalts in Hainan Island[J]. Scientia Geologica Sinica, 1992(S): 295 - 301. (in Chinese))
- [13] 程绍平, 杨桂枝, 冯锦江. 华北北部玄武岩风化晕厚度测年的尝试[J]. 地理学报, 1991, **46**(2): 242 - 251. (CHENG Shao-ping, YANG Gui-zhi, FENG Jin-jiang. Attempts of weathering-rind thickness daings in the basalt area, Northern

- North China[J]. Acta Geographica Sinica, 1991, 46(2): 242 - 251. (in Chinese))
- [14] 李秉生, 赵琨明. 昆明西山地区玄武岩风化壳工程地质性质初步探讨[J]. 西南交通大学学报, 1985, 4: 35 - 44. (LI Bing-sheng, ZHAO Li-ming. Preliminary research of the engineering geological property of weathering shell of basalt in Xi-shan, Kunming[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1985, 4: 35 - 44. (in Chinese))
- [15] 王兰生. 地壳浅表圈层与人类工程[M]. 北京: 地质出版社, 2004. (WANG Lan-sheng. Epigenetic sphere of earth crust and human being project[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [16] 沈军辉, 王兰生, 李天斌, 等. 川西南玄武岩的岩体结构特征[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(6): 680 - 686. (SHEN Jun-hui, WANG Lan-sheng, LI Tian-bin, et al. Rock mass structural features of basalt in Southwest Sichuan[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002, 29(6): 680 - 686. (in Chinese))
- [17] 魏云杰, 许 模, 陶连金, 等. 某水电站坝区峨眉山玄武岩岩体风化特征[J]. 北京工业大学学报, 2009, 35(1): 53 - 57. (WEI Yun-jie, XU Mo, TAO Lian-jin, et al. Weathering characteristics of E'mei Mountain basalts in a certain hydropower project, Southwester area[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2009, 35(1): 53 - 57. (in Chinese))

### 欢迎订阅《勘察科学技术》

《勘察科学技术》是由中勘冶金勘察设计研究院有限责任公司(原冶金勘察研究总院)主办的学术—技术类双月刊, 是中国科技论文统计源期刊, 中国地质文摘引用期刊, 中国学术期刊(光盘版)、中国期刊网万方数据科技期刊群全文收录期刊, 多次被评为河北省优秀期刊。

《勘察科学技术》主要介绍岩土工程设计与施工、工程地质、环境地质、水文地质及地下水资源评价、工程测量及地理信息系统、工程物探、岩土测试、工程检测及地下管网探测等专业的科研成果、生产经验、工程实录以及新理论、新技术、新方法。

《勘察科学技术》内容丰富, 理论结合实际, 适于从事岩

土工程及勘察的广大科研、设计、施工、监理、教学的专业技术人员及高等院校学生阅读、收藏。

《勘察科学技术》国内外公开发行, 双月刊, 大 16 开本, 双月 20 日出版。每期定价 10.0 元, 全年 60 元。邮发代号 18-153。全国各地邮局均可订阅, 也可随时汇款到本编辑部订阅。

本刊兼营广告, 价格适中, 印制精良, 注重实效。

欢迎广大读者投稿、订阅和广告惠顾。

地址: 河北省保定市东风中路 1285 号《勘察科学技术》编辑部; 邮编: 071069; Tel: 0312-3020887, 3094054; Fax: 0312-3034561; E-mail: kckxjs@126.com, kckxjs@163.com。

(《勘察科学技术》编辑部 供稿)