

石质古建筑风化深度确定方法

刘成禹¹, 何满潮²

(1. 福州大学 环境与资源学院, 福建 福州 350108; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 在古建筑石构件不同深度岩样化学成分和矿物成分测试的基础上, 对根据不同深度岩样化学成分及矿物成分的变化来确定风化深度的方法进行了深入研究。结果表明: 由于岩石成岩之初其矿物成分和化学成分在不同部位存在差异, 风化后矿物成分和化学成分随深度的变化不具规律性, 提出根据化学风化指数沿深度的变化来确定石构件化学风化深度的方法。实践证明这一方法能较准确地获得石构件的化学风化深度。

关键词: 石质古建筑; 风化深度; 化学成分; 矿物成分; 化学风化指数

中图分类号: P642.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2008)01-0069-05

Method of Determining Weathering Depth of Rock Ancient Building

LIU Cheng-yu¹, HE Man-chao²

(1. School of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China;

2. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining, Beijing 100083, China)

Abstract Based on the mineral component and chemical composition test of rock examples from different depths in an ancient building, this paper studied the conventional method determining weathering depth according to the change of mineral component and chemical composition of rock examples in different depths. The result indicates that the change of mineral component and chemical composition of weathered rock with depth is ruleless because there is difference in the mineral component and chemical composition in different positions of this rock at the beginning of diagenesis. Thus, the conventional method determining weathering depth according to the relation of single mineral component or chemical composition with depth will become inapplicable. This paper presented a new method for determining weathering depth aiming at above condition, which determines weathering depth from the relation of chemical weathering indices with depth. Practice proves that this method presented can get accurate chemical weathering depth of ancient stone carving, grotto and rock component of building.

Key words: rocky ancient building; weathering depth; chemical composition; mineral component; chemical weathering indices

0 引言

风化深度是石雕、石窟及石质古建筑稳定性、耐久性评价和保护方案制定的重要依据之一。它不仅是判定哪一部分发生风化、材料性质发生变化的依据, 同时还是确定风化速度、判定风化程度和确定石雕石窟及石质古建筑加固方法与加固深度

的依据, 因此, 对其确定方法进行深入研究具有重要意义。

在风化深度确定方法方面, 石雕石窟及石质古建筑与地质体或传统地质工程相比有其特殊性。这主要是因为两者在工程尺度上有明显差异, 地质学传统意义上的风化带深度小则几十厘米, 大则数十米, 而石雕石窟及石质古建筑的风化深度大多几

收稿日期: 2007-08-28

基金项目: 福州大学科技发展基金项目(2006-XQ-11); 福州大学引进人才科研基金项目(824951)

作者简介: 刘成禹(1970-), 云南富源人, 讲师, 博士, 从事工程地质及岩土工程研究。E-mail: Liuchengyuphd@126.com

©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

厘米。因此用确定地质体风化深度的传统方法去研究石雕石窟及石质古建筑的风化深度是不适宜的^[1]。目前,确定石质古建筑风化深度的方法主要是基于风化前后,岩石的结构与强度及成分等会发生不同程度的变化,在此基础上,取不同深度岩样作物理、化学、矿物成分或表面强度等测试,以这些测试结果的单一指标或多个指标沿深度的变化趋势来确定岩石的风化深度^[2]。李宏松^[3]根据大足宝顶山摩崖造像岩石表面回弹值随深度的变化,确定石造像的风化深度;Shochi Hachinohe 等^[4]以岩石表面针刺硬度 (needle penetration hardness) 随深度的变化确定风化深度; Tamer Topal^[5]根据岩样化学成分随深度的变化确定风化深度; Takahiro Oyama 等^[6]在综合分析岩样中黄铁矿、Fe₂O₃、针刺强度、孔隙度、渗透系数等沿深度变化的基础上,确定岩石的风化深度。

由于风化岩样的物理力学指标(强度、孔隙率、渗透系数等)的测试结果受取样扰动影响较大,所以根据这些指标沿深度的变化来确定风化深度的准确性决定于取样的扰动程度。而风化岩样的矿物成分和化学成分不受取样扰动的影响,且具有测试方便、所需样品少、取样对研究对象损伤少等优点,所以根据它们随深度的变化来确定风化深度比较适宜于石雕石窟及石质古建筑。然而,同一岩石在成岩之初不同部位的矿物成分和化学成分存在差异,在其影响下,岩石风化后单一矿物成分或化学成分随深度的变化可能不具规律性,也无法根据它们的变化来确定风化深度。因此,笔者提出在不同深度岩样化学成分测试的基础上,根据化学风化指数沿深度的变化来确定风化深度的方法,通过对义乌宋代古月桥石质构件风化深度的确定,结果表明,这一方法能较准确地获得古建筑石质构件的风化深度。

1 研究对象概况

古月桥位于浙江省义乌市,建于宋嘉定六年(公元 1213 年),2001 年 6 月公布为国家重点文物保护单位。古月桥承载结构由 36 根长 2.8~4.0 m、宽 0.3 m、高 0.55 m 的纵肋条石和 4 根长 4.75 m、宽 0.58 m、高 0.30 m 的横锁石组成。现场勘察及分析发现,风化是引起石质构件损伤的重要原因。为制定该桥稳定性及加固对策的需要,对承载结构的风化深度进行研究。为此,在现场选取风化

代表性条石,并在不同深度取岩样做 X 射线衍射和化学分析,以确定其矿物成分和化学成分(表 1、2)。

表 1 不同深度处岩样的矿物成分

Tab. 1 Mineral Mass Percentage of Rock Specimens in Different Depths $w_B/\%$						
矿物成分	距表面深度/ cm					
	0~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0~9.0	9.0~12.0
石英	37.1	36.3	35.7	36.3	38.0	43.9
长石	33.6	37.8	33.1	24.6	27.4	39.6
方解石	0.7	2.4	0.0	1.7	0.0	0.8
黄铁矿	0.6	0.9	0.0	1.3	0.0	0.0
粘土	28.0	22.6	31.2	36.1	34.6	15.7

表 2 不同深度处岩样的化学成分

Tab. 2 Chemical Constituent Mass Percentage of Rock Specimens in Different Depths $w_B/\%$						
化学成分	距表面深度/ cm					
	0~1.5	1.5~3.0	3.0~5.0	5.0~7.0	7.0~9.0	9.0~12.0
SiO ₂	67.50	67.80	69.20	71.10	70.00	69.60
Al ₂ O ₃	13.10	12.10	12.50	12.70	12.10	12.50
Fe ₂ O ₃	1.40	1.33	1.64	2.14	1.17	1.01
MgO	0.54	0.60	0.48	0.46	0.47	0.50
CaO	1.95	1.53	1.33	1.34	1.83	1.35
Na ₂ O	2.54	2.71	2.59	3.29	3.08	2.99
K ₂ O	5.07	4.71	4.79	3.64	4.80	4.52
TiO ₂	0.30	0.31	0.29	0.27	0.25	0.25
H ₂ O ⁺	2.19	2.14	1.82	1.46	1.22	1.15

2 矿物成分及化学成分沿深度的变化

根据表 1、2 的测试结果,作出矿物成分及化学成分沿深度的变化曲线(图 1、2)。由图 1、2 可看出:岩样中主要矿物成分及化学成分并没有呈现沿深度变化的规律性。

钾、钠、钙、镁是岩石中较易迁移的元素^[7]。由于岩石的风化程度具由外向内逐渐减弱的特点,因此,如果岩石形成之初其矿物成分和化学成分在各部分是均匀的,岩石风化后,这些易迁移氧化元素物含量在风化层内应具由外向内逐渐变化的单调性。然而,图 2 中并未呈现出变化的单调性,其原因在于岩石在成岩之初各部分的矿物成分和化学成分就存在差异。

由于岩样中主要矿物成分及化学成分并未呈现出沿深度变化的规律性,所以,在这种情况下就不能直接根据单一矿物成分或化学成分沿深度的变化来确定风化深度。

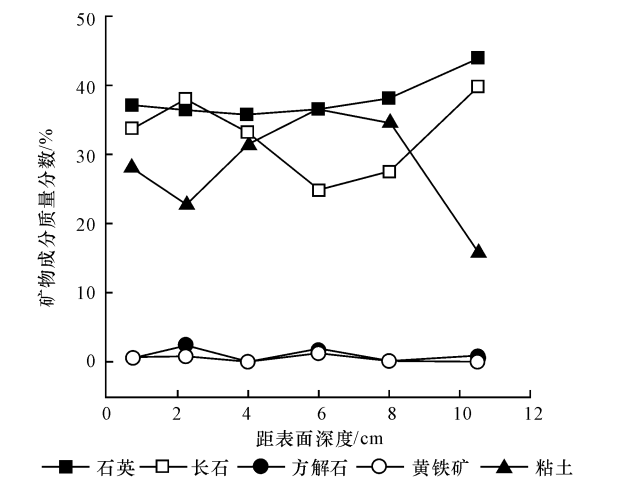
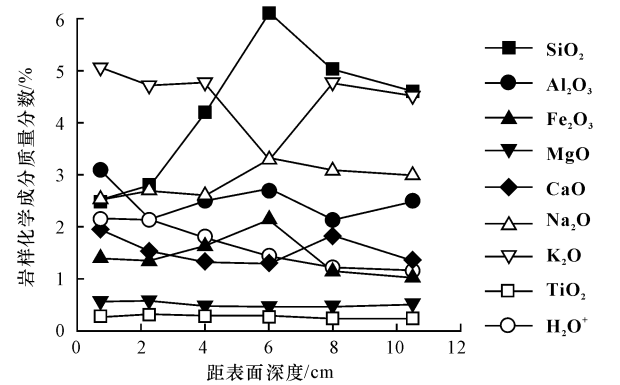


图 1 不同深度矿物成分
Fig. 1 Mineral Component Mass Percentage in Different Depths



SiO₂、Al₂O₃ 质量分数为表 2 中 SiO₂、Al₂O₃ 质量分数分别减去 65%和 12%
图 2 不同深度岩样化学成分
Fig. 2 Chemical Constituent Mass Percentage in Different Depths

3 根据化学风化指数确定风化深度

化学风化指数 (Chemical weathering index) 是根据岩石风化前后化学成分会发生变化提出的。20 世纪以来, 前人已提出 20 余种化学风化指数^[5, 8], 这些化学风化指数除 LOI 以质量分数比表示外, 其余均以摩尔分数比表示。以摩尔分数比表示的化学风化指数总体上分为两大类, 一类为已做归一化处理的, 即以未风化岩样为标准, 将风化样与之比较; 另一类为未作归一化处理的。表 3、4 根据文献^[5, 8] 整理出的归一化和未归一化化学风化指数。这些化学风化指数被广泛用于评价岩石风化物的风化强度^[9-19]

表 3 归一化的化学风化指数

Tab. 3 Normalized Chemical Weathering Indices		
序号	化学风化指数	计算公式
1	B	$B = I_{\text{weather}} / I_{\text{sound}} \quad I = x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
2	B'	$B' = I_{\text{weather}} / I_{\text{sound}} \quad I = x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
3	BT	$BT = [x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)]_{\text{weathered}} / \{ [x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)]_{\text{fresh}} + x(\text{CaO} / \text{MgO}) \}$ $WI = I_{\text{weather}} / I_{\text{fresh}}$
4	WI	$I = [x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} - \text{H}_2\text{O}^+) / x(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})]$
5	K	$K = I_{\text{weather}} / X_{\text{sound}} \quad I = x(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3)$ $X = x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
6	I _{mob}	$I_{\text{mob}} = (I_{\text{fresh}} - I_{\text{weather}}) / I_{\text{fresh}} \quad I = x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO})$

表 4 未归一化的化学风化指数

Tab. 4 Un-normalized Chemical Weathering Indices		
序号	化学风化指数	计算公式
1	CIW	$x(\text{Al}_2\text{O}_3) / x(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO}) \times 100$
2	CIA	$x(\text{Al}_2\text{O}_3) / x(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO}) \times 100$
3	CAN	$[x(\text{Al}_2\text{O}_3) / x(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$
4	SA	$x(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3)$
5	Kr	$x(\text{SiO}_2) / x(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
6	Ba	$x(\text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
7	Ba ₁	$x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
8	Ba ₂	$x(\text{MgO} + \text{CaO}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
9	Ba ₃	$x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{MgO}) / x(\text{Al}_2\text{O}_3)$
10	R	$x(\text{SiO}_2 / \text{Fe}_2\text{O}_3)$
11	WPI	$[x(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} - \text{H}_2\text{O}^+) \times 100] / x(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$
12	MWPI	$[x(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO}) \times 100] / x(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$
13	PI	$x(\text{SiO}_2) / x(\text{SiO}_2 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3) \times 100$
14	Si-Ti	$x(\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2) / x(\text{SiO}_2 / \text{TiO}_2) + x(\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3) + x(\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{TiO}_2)]$
15	LOI	w(H ₂ O ⁺) 的质量与样品总质量分数比
16	P	$[x(2\text{Na}_2\text{O}) / 0.35 + x(\text{MgO}) / 0.9 + x(2\text{K}_2\text{O}) / 0.25 + x(\text{CaO}) / 0.7] \times 100$

根据表 2 的结果, 计算出距条石表面不同深度的化学风化指数(表 5、6)。
根据表 5 的结果, 以已作归一化处理的化学风化指数为纵坐标, 以深度为横坐标, 作出其关系曲线, 如图 3。
由于表 6 的化学风化指数未作归一化处理, 所以先作归一化处理, 将距表面 9.0~12.0 cm 处的化学风化指数值设为数值 1, 以此为标准, 将其余深度

表 5 古月桥不同深度岩样归一化的化学风化指数

Tab. 5 Normalized Chemical Weathering Indices of Ancient Moon Bridge Rock Samples in Different Depths

距表面 深度/cm	化学风化指数					
	BT	B'	I _{mob}	B	WI	K
0.0~1.5	0.940	0.415	-0.127	1.164	122.20	11.245
1.5~3.0	0.870	0.611	0.000	1.000	100.02	10.467
3.0~5.0	0.816	0.561	0.046	0.939	42.45	11.751
5.0~7.0	0.838	0.274	-0.136	1.136	39.44	11.372
7.0~9.0	0.875	0.303	-0.181	1.220	25.86	11.310
9.0~12.0	0.818	0.220	-0.265	1.207	24.81	11.382

表 6 古月桥不同深度岩样未归一化的化学风化指数

Tab. 6 Un-normalized Chemical Weathering Indices of Ancient Moon Bridge Rock Samples in Different Depths

距表面 深度/cm	化学风化指数								
	WPI	MWPI	PI	R	P	CIW	CIA	CAN	
0.0~1.5	3.358	8.966	89.784	9.466	68.307	2.548	54.440	69.227	
1.5~3.0	2.748	8.196	90.039	9.835	72.661	2.225	50.654	64.779	
3.0~5.0	1.167	7.636	89.349	9.517	63.446	2.311	55.992	67.799	
5.0~7.0	1.084	9.082	89.423	9.411	69.363	2.238	51.269	65.16	
7.0~9.0	0.661	9.772	89.625	9.526	70.632	1.961	49.477	62.548	
9.0~12.0	0.572	10.191	88.867	8.760	73.034	2.042	49.749	62.889	

距表面 深度/cm	化学风化指数								
	LOI	Si-Ti	SA	Kr	Ba	Ba ₁	Ba ₂	Ba ₃	
0.0~1.5	2.19	0.884	9.466	9.002	0.836	9.0786	0.153	0.888	
1.5~3.0	2.14	0.887	9.835	9.264	0.974	2.0849	0.224	0.948	
3.0~5.0	1.82	0.883	9.517	8.594	0.786	0.0737	0.141	0.830	
5.0~7.0	1.46	0.880	9.411	8.685	0.950	5.0757	0.292	0.855	
7.0~9.0	1.22	0.879	9.526	8.902	1.021	2.0791	0.357	0.917	
9.0~12.0	1.15	0.875	8.76	8.201	1.010	1.0739	0.376	0.844	

处的化学风化指数数值除以距表面 9.0~12.0 cm 处的化学风化指数, 得到不同深度处的化学风化指数值, 作出它们的关系曲线(图 4)。

由图 3、4 可以看出, 在这些化学风化指数中, WPI、WI、LOI 呈现出明显的随深度变化的单调性。深度在 7~9 cm 以前, 这 3 个化学风化指数随深度增加而明显降低, 降低幅度由外向内逐渐趋于平缓, 这正是风化程度由外向内逐渐减弱的表现; 深度在 7~9 cm, WI、WPI、LOI 数值随深度的变化不再明显, 所以该条石的风化深度为 7~9 cm, 场穿透法 CT 测试所得到的 A、B 剖面纵波波速分布如图 5。

由图 5 可看出, 该条石侧面的风化深度为 8~

8.5 cm。现场穿透波 CT 测试结果得出的风化深度与用化学风化指数确定的风化深度基本一致, 说明根据化学风化指数沿深度变化来确定古建筑石构件的风化深度是可行的。

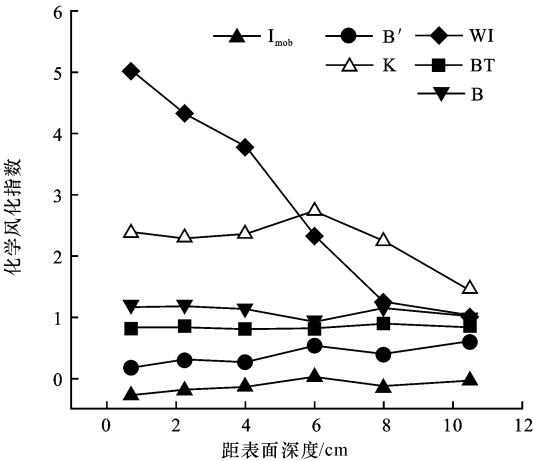


图 3 归一化的化学风化指数与深度关系

Fig. 3 Relation of Normalized Chemical Weathering Indices with Depths

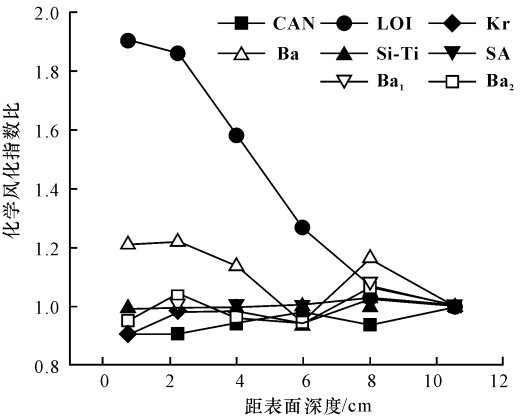
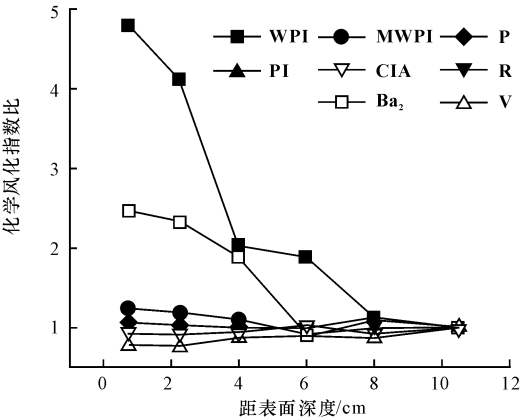


图 4 化学风化指数比与深度关系

Fig. 4 Relation of Chemical Weathering Indices Ratio with Depths

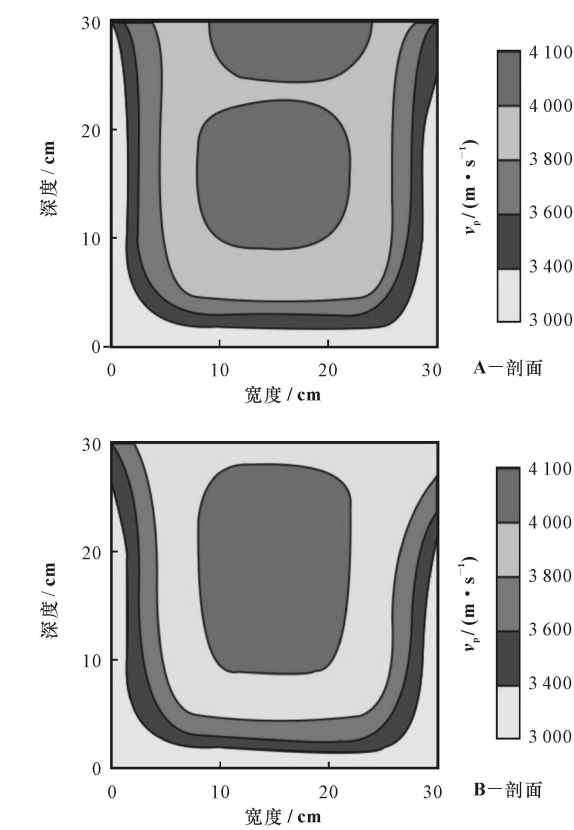


图 5 条石剖面纵波分布

Fig. 5 Distribution of Longitudinal Wave Speed in Cross Section of Block Stone

4 结语

由于岩石在成岩之初各部分的矿物成分和化学成分存在差异, 在其影响下, 岩石风化后矿物成分和化学成分随深度的变化可能不具规律性, 以往根据单一矿物成分或化学成分沿深度变化来确定风化深度的方法将不再适用。因此提出在不同深度岩样化学成分测试的基础上, 根据化学风化指数沿深度变化来确定风化深度的方法, 实践证明, 该法能较准确地获得石雕石窟及石质古建筑的风化深度。

化学风化指数是根据岩石风化前后化学成分会发生变化提出的。只有在风化后岩样化学成分发生改变的情况下, 化学风化指数才会变化, 所以, 用化学风化指数来确定风化深度的方法只适用于石雕石窟及石质古建筑的风化以化学风化为主的情况。

参考文献:

[1] 黄克忠, 解廷藩. 云岗石窟石雕的风化与保护: 文物保护与环境地质[M]. 北京: 地质出版社, 1992.

[2] Esaki T, Jiang K. Comprehensive Study of the Weathered Condition of Welded Tuff from A Historic Stone Bridge in Kagoshima, Japan[J]. Engineering Geology, 1999, 55: 121-130.

[3] 李宏松. 大足宝顶山摩崖造像岩体表层风化深度的研究[C] //王思敬. 第四届全国青年工程地质大会论文集. 北京: 地质出版社, 1997.

[4] Shoichi Hachinohe, Nobuaki Hiraki, Takasuke, et al. Rates of Weathering and Temporal Changes in Strength of Marine Terraces in Boso Peninsula, Japan[J]. Engineering Geology, 1999, 55: 29-43.

[5] Tamer Topal. Quantification of Weathering Depths in Slightly Weathered Tuffs [J]. Environmental Geology, 2002, 42: 632-641.

[6] Takahiro Oyama, Masahiro Chigira. Weathering Rate of Mudstone and Tuff on Old Unlined Tunnel Walls[J]. Engineering Geology, 1999, 55: 15-27.

[7] 王 磊, 李萼荣. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[8] Anand S, Gupta K, Seshangini Rao. Weathering Indices and Their Applicability for Crystalline Rocks[J]. Bull Eng Geol Env, 2001, 60: 201-221.

[9] 吴艳宏, 李世杰, 夏威夷. 可可西里苟仁 错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 64-68.

[10] 吴宏伟, 尚彦军, 曲永新, 等. 香港花岗岩风化分级化学指标体系与风化壳分带[J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 125-134.