

宝顶石刻区 污染地下水对造像岩体的破坏作用*

张赞勋 汪东云 付林森 姚金石

谢本立

(重庆建筑工程学院 重庆 630045)

(四川省大足县博物馆 四川大足 632360)

提 要 污染地下水渗入大佛湾摩岩造像群,在石刻表面积聚可溶盐,加剧了石刻的侵蚀破坏,其中尤以泥质细粒长石砂岩风化剥落最为严重。研究渗水病害对石刻保护有重要意义。

关键词 污染 渗水病害 盐蚀作用 矿物组对比

1 石刻区环境地质

宝顶石刻区位于大足县城东北 15km 的大佛湾。自南宋淳佑年(公元 1252 年)^[1]凿成至今,已历经 800 年。

该石刻区地处川东红层丘陵区,四周台坪残丘,中至浅切沟谷发育。大佛湾走向 NE80°,沟长 340m,沟宽 90m,环沟悬崖陡壁。区内出露地层除少量第四系崩、坡、残积物沿沟分布外,其余均为侏罗系上统蓬莱镇组(J_{3p})紫红色砂岩与泥质粉砂岩互层,倾角 1°—4°。摩岩造像群刻凿于大佛湾内第二层巨厚层状紫灰—灰白色细粒钙泥质长石砂岩陡壁上,砂岩总厚约 19m 左右。该砂岩体完整性较好,下部大型斜层理发育,夹 30cm 厚的紫色泥砾岩透镜体,中部和上部各有 60cm 厚的灰绿色条纹状细粒绿泥石长石砂岩,成为软弱带,凡此部位的造像大多风化破坏严重。

石刻区褶皱舒缓,岩层近于水平,NE25°—50°和 NW315°—340°两组近垂直的构造节理遍布全区。裂隙密度为 0.1 条/m,延伸长度 2.5—6.0m,发育深度 0.3—2.0m,张开度 0.3—25cm。层面裂隙和卸荷裂隙也较发育。

大佛湾沟底海拔为 475—485m,切割深度达 20—30m。在源头处形成约 10m 落差的跌水陡坎,坎下巨厚层长石砂岩中顺层刻凿释迦牟尼涅槃像(即卧佛),窟长 32m,窟高 7m,进深 4m。坎上为宝顶小型盆地,有一常年蓄水的圣迹池,水面面积约 1 000m²,为地表水之泄水区,汇水面积近 0.8km²。

区内砂岩属非均质弱富水含水岩体,地下水类型为风化裂隙水及构造裂隙水,水量不大且极不均一。各类裂隙中,构造裂隙起控水作用。

大足县境气候潮湿,雨量充沛,多年平均降雨量为 984.3mm,酸雨率达 85.7%。降水入渗是地下水主要补给来源。地下水径流途径短,向大佛湾内排泄,在沟壁适宜部位呈间歇泉出露(图1,2),卧佛脚及牧牛图等处泉水终年不断。冬春季节的相对湿度偏高,月均

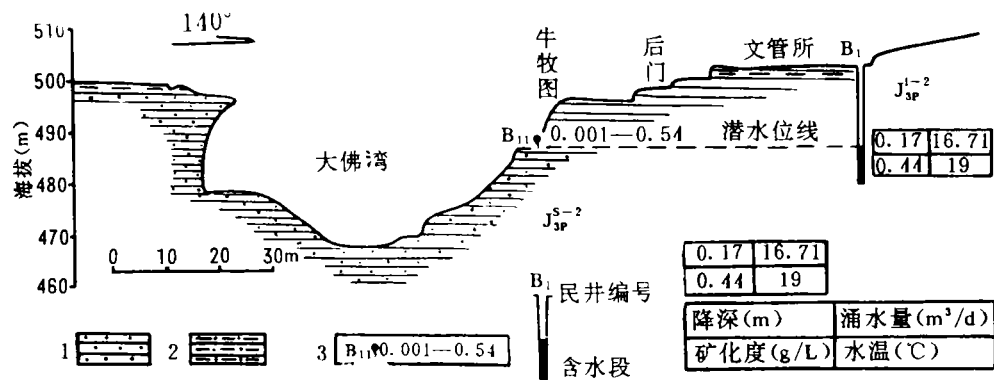
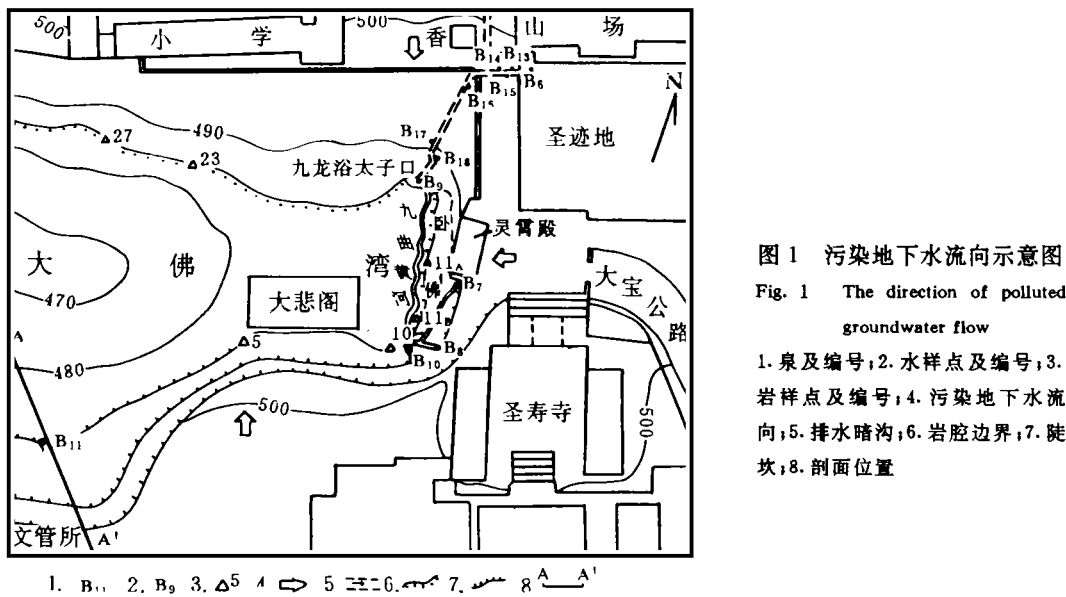
*《大足石刻艺术保护》系国家自然科学基金、建设部共同资助项目。本文是阶段研究成果之一。

潘别桐等。四川省大足县宝顶石刻区渗水病害及防治对策研究。1991。

蔡素德等。大足石刻造像风化侵蚀原因分析及防护对策初探。1992。

本文改回日期:1993-12-25。

86.4%，最高日均值达 98.0%。



2 石刻区地下水化学特征及污染源分区

2.1 地下水水化学特征及污染程度

本区地下水化学分析资料表明,主要水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,次为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{Cl-Ca}$ 型水,矿化度为 384.7—766.0mg/L,其他成分列于表 1. 本文仅按氯离子含量将区内地下水污染程度相对划分成以下四级^[2]:

未污染, Cl^- 含量小于 20mg/L; 轻污染, Cl^- 含量 20—55mg/L; 中污染, Cl^- 含量 55—80mg/L; 重污染, Cl^- 含量大于 80mg/L. 污染地下水流向如图 1 所示.

2.2 污染源分区

表 1 石刻区地下水化学成分(mg/L)

Table 1 Chemical composition(mg/L) of ground water in stone carving area

成分	地 点 及 编 号									
	文管所井 B ₁ ¹⁾	圣寿寺井 B ₂ ²⁾	牧牛图泉 B ₁₁	卧佛脚泉 B ₁₀	圣迹池水 B ₈	卧佛顶沟 B ₇	暗沟南侧 B ₁₅	九龙浴太子口 B ₉	暗沟北侧 B ₁₃	暗沟北侧 B ₁₄
K ⁺	5.10	5.28	4.88	13.20	8.00	8.19		20.00		
Na ⁺	13.20	23.10	28.70	37.00	35.70	41.34		62.00		
Ca ²⁺	71.14	122.91	29.04	124.49	54.93	118.20		97.21		
Mg ²⁺	5.99	17.50	8.87	22.76	4.43			4.91		
NH ₄ ⁺	0.20	<0.04	0.12	<0.04	0.32			32.00		
Fe ²⁺	<0.08							0.16		
Fe ³⁺	<0.08							<0.08		
HCO ₃ ⁻	202.59	380.15	274.59	378.32	153.77	306.37		398.46		
SO ₄ ²⁻	48.32	72.48	34.77	76.70	19.88	64.60		23.20		
Cl ⁻	12.83	35.66	36.23	49.35	67.60	68.50	73.73	88.45	277.16	307.33
NO ₃ ⁻	5.00	6.00	6.00	28.00	1.60			3.00		
游离 CO ₂	18.06	27.10	4.96	15.80	9.94			42.00		
侵蚀 CO ₂	14.90	—	—	—	—			17.74		
可溶 SiO ₂	20.00	19.20	18.20	19.20	10.00			20.00		
耗氧量	4.86	1.80	4.34	1.49	9.56			43.20		
矿化度	384.70	682.50	474.90	749.10	356.30			766.00		
pH	7.18	7.14	8.02	7.58	7.38	7.70	7.70	7.06	7.80	7.70
分级	未污染	轻污染			中污染			重污染		

1)B₁井位于 B₁₁泉东南约 70 m 处(图 1 外);2)B₂井位于 B₁₀泉东南约 95 m 处(图 1 外)。

2.2.1 北片区 大佛湾北部宝顶小学与香山场一带,以圣迹池北沿及排水暗沟与东片区分界(见图 1)。地下水属中等污染至重污染水,如排水暗沟 B₁₃水点的水源来自北部,氯离子含量达 307.33mg/L,含 NH₄ 为 32.00mg/L。九龙浴太子口 B₉ 水点的水源亦主要来自北片区,也有部分东片区水源混杂,富侵蚀性 CO₂,耗氧量亦较多(见表 1)。区内中部黄桷坡分水岭东西走向,其南面斜坡上除宝顶小学外,尚有民居约 40 户,餐馆及饮食摊点 9 家。旺季时节游客与商旅云集,日均人流量 1 500 人。该区每日排放的污浊生活污水约 50—100t,经暗沟和地表排入圣迹池及大佛湾,途中透过杂填土层渗向卧佛及毗庐洞一带,在石刻表面积聚了以石膏和石盐为主的可溶盐(表 2)。本区渗水在渗透过程中和在立壁渗出时主要对卧佛的危害极为严重。

2.2.2 东片区 圣迹池与大宝公路一带,以圣寺北围墙至 B₁₀一线为南界,地下水多属中等污染水。此片区公路沿线堆放燃煤及灰碴,兼有人畜粪便散布。地表漫流淋洗形成的污水,以及沿途 10 余家餐馆旅业和杂货摊档排放的废水,均顺坡汇入低洼的圣迹池内,再沿拦水坝裂隙及凌霄殿下的排水明沟渗入卧佛,形成具有细菌参与的富钠风化产物,如芒硝、泡碱和石盐等,是导致卧佛表面形成污渍及生长“脓疮”的主要原因之一。

2.2.3 南片区 包括文管所与圣寿寺,地下水多属轻污染水。污染源为所内四时浇灌花木的肥水,以及寺庙僧众排放的生活污水,含氯离子 36.23mg/L,如牧牛图泉。此污水常透过松散土层经岩体裂隙渗入入天毕会图至园觉洞一带,在石刻表面形成石膏,并有较

多的芒硝、石盐和方解石(见表 2)。

表 2 风化产物水提取液中可溶盐含量(重量%)

Table 2 The content of dissoluble salts in extracted liquid from weathering products

名 称	化 学 式	北片区	东片区		南片区	平 均
		宝顶 27 龛	宝顶 11 窟 A	宝顶 11 窟 B	宝顶 10 龛	
石 膏	CaSO ₄ · 2H ₂ O	84.19	73.85	30.32	80.21	67.14
芒 硝	Na ₂ SO ₃ · 10H ₂ O	微	10.31	51.00	5.25	16.64
泻利盐	MgSO ₄ · 7H ₂ O	—	3.66	—	0.48	1.04
钙芒硝	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	微	0.75	2.73	1.09	1.14
软钾镁矾	K ₂ Mg(SO ₄) ₂ · 6H ₂ O	—	微	4.71	0.47	1.30
钾铁矾	KFe(SO ₄) ₂	—	0.53	微	—	0.13
方解石	CaCO ₃	3.72	0.71	1.02	5.43	2.73
白云石	CaMg(CO ₃) ₂	2.14	0.14	0.66	2.38	1.33
泡 碱	Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O	—	5.70	1.54	—	1.81
水 碱	Na ₂ CO ₃ · H ₂ O	微	微	微	—	微
石 盐	NaCl	4.11	3.54	7.36	3.69	4.68
钾 盐	KCl	0.59	—	—	—	0.14
硝 石	NaNO ₃	3.15	0.58	1.06	0.90	1.42
钾硝石	KNO ₃	2.11	—	—	微	0.52

3 污染地下水与风化产物的渍盐组合

3.1 岩体化学成分变化规律

3.1.1 龛窟外围的天然边坡 此边坡位于佛缘桥以外的西端,远离污染源,岩体化学成分无明显变化,从 120cm 深处所采新鲜岩样的化学全分析结果(表 3)与常见砂岩对比,两者相近,说明污染地下水尚未对该边坡产生影响。其裸露部位常受酸雨直接淋洗,表面不能积成可溶盐,但活泼元素极易淋失。在 20mm 范围的浅表层内,Ca 的淋失率达 87%,方解石近于绝迹;Na 的淋失率为 14%,酸性斜长石类钠质铝硅酸盐表现高岭石化。从岩体内随水迁出的低价铁在表面氧化成高价铁,富集于浅表层,其残积率达 223%。结果该处原为灰白色的长石砂岩锈染成为褐色的铁质长石砂岩(见表 3)。

表 3 长石砂岩化学分析结果(重量%)

Table 3 Chemical analysed result of arkose

名 称	取样地点	取样深度 (cm)	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	备 注
灰白色长石砂岩	外 围 边 坡	120.0	70.01	2.56	10.79	0.50	0.05	4.26	1.79	1.96	2.23	0.16	新鲜岩石
褐色铁质砂岩	外 围 边 坡	2.0	70.59	5.72	11.80	0.60	0.08	0.55	1.93	1.97	1.91	0.24	风化岩石
灰绿色长石砂岩	宝顶 11 窟 C	0.5	64.73	3.99	9.47	0.50	0.08	8.60	0.50	1.46	3.25	0.20	风化物为主
灰白色长石砂岩	宝 顶 23 龛	0.2	65.54	2.64	10.39	0.50	0.05	5.70	2.27	1.70	2.03	0.17	
灰绿色长石砂岩	宝 顶 5 龛	1.0	57.66	3.78	13.55	0.60	0.06	5.26	3.10	2.59	1.60	0.15	

3.1.2 龛窟本部 多有雨蓬遮盖,可免遭酸雨的腐蚀淋洗。据典型龛窟风化产物的化学分析资料,该处石刻表面普遍积存多种可溶盐,特殊部位的风化产物富 Ca 和 Na。

3.1.3 影响岩体化学成分变化的主要外因 据上述化学分析资料及野外观察综合分析认为,岩体成分发生明显变化主要在浅表层。地下水,特别是污染地下水渗透的影响,

是改变岩体该部位化学成分的主要因素,酸雨淋洗和酸雾的腐蚀也有重要影响。

古来之石刻造像多依山就势雕凿于露天,长年累月经受日晒雨淋,使其造像浅表层 20mm 范围内的 K, Na, Ca, Mg 等元素大量淋失。加盖雨蓬是为了防止直接日晒,阻隔酸雨淋洗,但其客观作用可能适得其反,实际上刚好为盐类在石刻表面的积聚提供了庇护的有利条件,从而导致日益严重的盐蚀作用。宝顶某些露天的石刻,以及外围天然边坡上,其风化产物中可溶盐极少,几乎没有发生粉状剥落。而现在业已遮盖的许多石刻上,可溶盐含量相对较多,且表面岩石已显得异常酥脆,这可能已经是多年渍盐的结果。表面涂层可以在一段时期内阻隔酸性雨雾及湿度对石刻表面直接产生作用,防止表面渍盐,而且还可渗入内部,胶结砂粒固着疏松层,但它肯定无法阻隔气温变化对涂层下那些早已存在的盐类发生结晶转化而出现盐胀破坏。此外,涂层之下有可能形成封闭式渍盐,它意味着潜伏的隐患,若干年后,漫不经心地观看石刻外貌,似乎都依然完好无损,实际上恐怕已是金玉其外而败絮其内了。可见,地下水的渗透作用始终影响着岩体表层风化产物的形成。

3.2 污染地下水与风化产物的盐类组合比

镜下鉴定发现,佛湾不同地段的风化产物中,渍盐矿物组合比存在较大差异,说明可溶盐的形成受地下水化学成分的影响。虽然同样以硫酸盐为主,但盐种相对比例仍有明显差别。轻污染地下水的矿化度相对较低,微含有机质,受此渗透影响的岩体表面渍盐具有正常矿物组合比,与未污染地下水渗透地段的渍盐矿物组合比相近,石膏占绝对优势,含少量石盐和方解石,如宝顶 27 龕(见表 2)。重污染地下水中,富含 K^+ , Na^+ , NH_4^+ 及 NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- 等成分,且有相当数量的游离 CO_2 、有机物质和细菌,受其渗透作用的影响,石刻表面渍盐矿物组合比异常,甚致以芒硝为主,石膏有时降至次要地位,同时还有泡碱和石盐,表现出富钠的特点,如宝顶 11 窟 B(见表 2)。显然是受餐馆等污水影响之故。因此当风化产物中有多量芒硝与泡碱共生时,此种组合比可作为地下水已严重污染的标志之一。

4 可溶盐对造像岩体的破坏作用

4.1 可溶盐的盐蚀作用

石刻的风化破坏是由表及里缓慢深入的渐进过程,破坏的根本原因在于石刻岩体浅表层内所积聚的可溶盐在受到环境的气温和湿度影响时,因吸水或失水而发生结晶转化,所产生的膨胀压力破坏了砂粒间胶结,使该部位岩石变得疏松脆弱而逐渐分崩离析。本文将这种因可溶盐吸水结晶膨胀导致岩石表面风化破坏的作用称为盐蚀作用或盐胀作用。其破坏的速度和程度则与所含盐种及数量有关。石膏、芒硝和泡碱是区内常见的具有强烈盐胀效应的盐种。当浅表层内局部含盐量达 5% 时,发生盐蚀破坏的效果就相当明显。

可溶盐结晶膨胀的本质是盐类晶胞参数改变时所发生的一种物理-化学作用,它对石刻造成盐胀破坏的功能主要受其自身物质成分的制约,同时也受环境湿度和气温的影响。

4.2 石膏和芒硝的盐胀效应

4.2.1 石膏 在石刻表面的渍盐中,石膏几乎总是数量最多的盐胀矿物,其相对量多

在80%以上. 研究认为^[3],石膏与硬石膏之间,在常温条件下也可以相互转化. 微米粒级的转化历时约5—6h. 计算表明,常温常压条件下,硬石膏吸水转化结晶成石膏时,体积增大31%,同时产生0.15MPa的膨胀力.

4.2.2 芒硝 芒硝的含量多在10%以下,当受到严重污染地下水渗透作用影响时,有些地段(如宝顶11窟B)生成的芒硝可超过50%(见表2). 无水芒硝与芒硝在17.9℃时即可相互转化^[4],且其转化速度更快,盐胀效应也更强烈. 当无水芒硝吸水转化结晶成芒硝时,可增大体积1.04倍,产生0.44MPa的膨胀力.

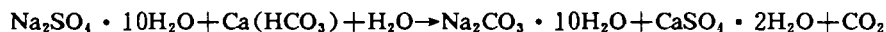
石膏与芒硝合计共占渍盐相对总量90%,加上其他盐种,硫酸盐在盐蚀破坏作用中占有举足轻重的地位. 常见石刻表面的风化剥落即主要由此造成.

4.3 泡碱

4.3.1 泡碱的形成作用 泡碱是一种极易潮解的含水钠质碳酸盐,常与芒硝、石盐和石膏等密切共生,在-2—32℃的温度范围内均可以多种方式形成. 本区泡碱仅见于东片区卧佛及其毗连地带,其形成作用显然与污染地下水入渗有密切关系.

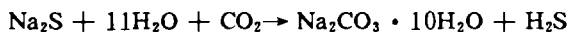
按范特荷夫的 $\text{Na}^+, \text{K}^+ // \text{SO}_4^{2-}, \text{CO}_3^{2-}, \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 五元体系20℃准稳定相图^[4]解,体系中将最先直接析出泡碱. 据此,当本区重污染地下水浓缩过饱和时即可生成泡碱,这是常见的但不是唯一的形成方式. 当有多量芒硝形成后,可以通过下述三种途径形成泡碱.

渗水带入的可溶性碳酸钙与已晶出的芒硝作用形成泡碱,过程如下:



卧佛头部及胸腹部所长的“脓疮”内有泡碱与芒硝、石膏及方解石共生,说明前述的泡碱形成方式确属客观存在. 该“脓疮”呈半球状,附于裂隙交叉的渗水处长出,底径4—5mm. 每在旅游旺季长势较盛,当年可增径6—7mm. 表面覆盖苔藓,形似绿色绒球. 此钙华堆积经镜下观察,见由方解石与白云石交生联接成网状格架(照片1)¹⁾,网眼中充填细砂、芒硝、石膏、泡碱和石盐(照片2),苔藓根须缠绕其中(照片3). 结构疏松,十分脆弱,周围常有污斑向下垂延成参差幕帘状(照片4).

污水中繁衍的细菌分解芒硝是形成泡碱的另一种方式,即有如下二步过程:



前述卧佛腹部所长污斑就是污水中的有机物质经细菌分解后渗流至岩体表面干渍所成,散发着 H_2S 霉变气味.

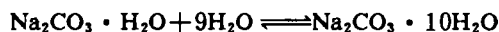
佛湾地区具备前述三种形成泡碱的环境条件,其中东片区卧佛一带尤为适宜.

芒硝碱($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{Na}_2\text{SO}_4$)自身分解是形成泡碱的第四种方式. 芒硝碱是在快速蒸发条件下形成的一种混晶,对湿度相当敏感,极易受潮分解. 就宝顶地区而言,恐怕不一定具备生成芒硝碱的干燥条件.

4.3.2 泡碱的盐胀作用 泡碱极不稳定,稍微受热即发生结晶转化. 当空气相对湿度大于90%、或石刻表面风化产物粒间存在毛管水时,泡碱溶于自身结晶水中,使砂粒失去

1) 本文照片见刊末图版 I.

盐晶胶结。升温与干燥常使泡碱脱水变成水碱。通常,随着气候的季节性更替,甚至是昼夜温差的变换,都可促使水碱与泡碱之间发生频繁的结晶转化。此过程可表示如下:



水碱吸水结晶成泡碱时,体积增大 2.59 倍,可产生 5.4atm 的膨胀力,超过石膏或芒硝的膨胀力值。据 W·V·恩格尔哈特援引莫顿生(Mortensen)的资料,此种变化的结果甚至可产生 300.0atm 的膨胀力^[5]。

多种盐胀效应迭加,长时间周期性的胀缩作用,最终将使石刻表面砂粒逐渐松动脱离,在重力或风力作用下不断坠落。电子显微镜能谱分析表明,砂粒外部包果物主要是钾铁矾(照片 5)、绿泥石和伊利石等,它们使砂粒之间只能具有微弱的静电引力。条纹状绿泥石质长石细砂岩构成的佛手正在日渐变瘦,五指残缺,在很大程度上是因污染地下水渗入后,于石刻表面形成了多量石膏、芒硝和泡碱等盐胀矿物所产生的盐蚀作用而破坏的。

参 考 文 献

- [1] 刘长久,胡文和,李永超等. 一大足石刻内容总录. 成都:四川省社会科学院出版社,1985. 183.
- [2] 汪东云,张赞勋,付林森等. 宝顶山石窟卧佛渗水病害形成原因分析. 水文地质工程地,1992,(3),25—28.
- [3] 张赞勋,汪东云,付林森等. 北山石窟岩体风化产物的形成及其破坏作用. 重庆建筑工程学院学报,1993,(3),67—75.
- [4] 何法明,刘世昌,白崇庆等. 盐类矿物鉴定工作方法手册. 北京:化学工业出版社,1985. 136.
- [5] 恩格尔哈特 W V. 王东坡,何起样,汪碧华译. 沉积物和沉积岩的成因. 北京:地质出版社,1977. 12.

EROSION OF POLLUTED GROUND WATER TO STATUE ROCKMASS IN BAODING STONE CARVING AREA, DAZU COUNTY,SICHUAN PROVINCE

Zhang Zanxun Wang Dongyun Fu Linsen Yao Jinshi
(Chongqing Institute of Architecture and Engineering Chongqing 630045)
Xie BenLi
(Museum of Dazu County Dazu,Sichuan 632360)

Abstract

All the statues in rock cave are located at Dafowan of Dazu County,Sichuan Province,in China. Seeping through the polluted ground water,dissoluble salts are accumulated on the surface of the caved stone so that the erosion and destruction are strongly aggravated. Particularly,it is very serious that some locations of clay fine arkose are weathered and peeled. It will be of important significance to study on the disease of seeping water in order to protect the grotto.

Key words pollution, disease of seeping water,salt crystalline erosion,mineral composite ratio