

# 南京梁代石刻微侵蚀的研究

张 捷 李升峰

(南京大学大地海洋系, 南京 210008)

陈舒泛

(南京教育学院生物系, 南京 210013)

杨天麒

(南京市文物管理委员会, 南京 210008)

**提 要** 从地貌学角度较系统地分析了梁代石灰岩石刻表面自然毁损的微侵蚀机制, 本文指出, 雨水沿缝合线渗流, 经多种地衣及兰藻、绿藻等生物作用而大大加强了溶蚀作用, 导致石刻的崩解, 并讨论此种特殊微侵蚀形态的形成机制在地貌学理论研究中的意义。

**关键词** 石灰岩石刻溶蚀 微侵蚀特征 生物侵蚀 梁代

古代石刻文物, 历经风雨沧桑, 均会受到自然及人为的毁损作用, 造成不可弥补的损失。石刻文物表面的微生物或低等植物对石刻的侵蚀作用, 近来已引起地貌学家及文物保护专家的重视<sup>[1-4]</sup>。位于南京市东部栖霞区的南朝梁代石刻群, 与陈代石刻等一起统称为六朝刻石, 是全国重点文物保护单位。包括萧恢、萧愔、萧景及萧秀等墓的石刻, 分别建于梁代普通年间, 距今已有 1 400 多年, 是南京作为六朝古都的标志和实物见证。梁代石刻建成后露天存放, 历经自然风化作用, 且由于年久无人管理, 至新中国成立前, 有的已陷埋于稻田, 仅露出上半部, 有的则已失踪。50 年代起政府逐渐作了妥善处理, 修建基础平台并对已毁损严重的石刻作了初步加固。迄今为止, 虽然有关六朝刻石表面的地衣侵蚀现象曾被注意过<sup>[5-6]</sup>, 但对六朝刻石自然毁损尚无专门研究。本文通过野外现场观察及室内光学显微镜、扫描电子显微镜对其表面脱落碎片的微观分析, 对梁代石刻自然风化毁损过程中的微侵蚀作用, 尤其是生物微侵蚀作用作初步探讨。

## 1 石刻自然毁损的微地貌形态观察

梁代石刻有辟邪(一种神兽)、望柱、石碑及龟趺。其表面的自然毁损实际上也是一地貌过程, 其微形态可反映这种过程的性质。

### 1.1 现场观察

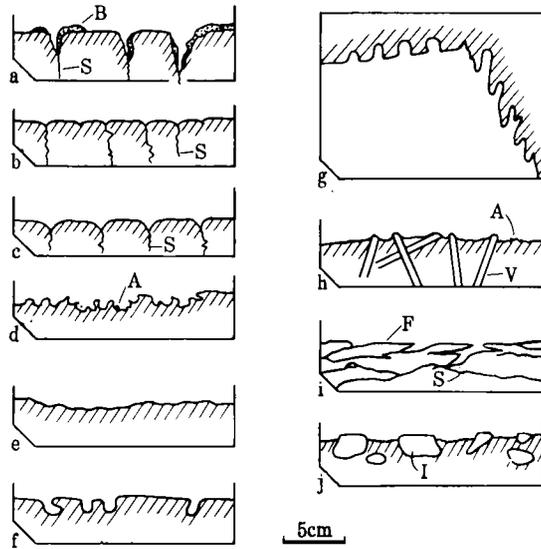
梁代石刻均由石灰岩雕刻而成, 故其表面溶蚀作用的痕迹十分明显。根据毁损的剖面形态特征, 现场可将其初步划分为几种类型: 1) 溶隙和溶纹(图 1a-c, i), 主要沿缝合线

• 国家自然科学基金及南京大学现代分析中心基金资助项目。  
来稿日期: 1993 年 6 月。

表 1 梁代石刻表面自然毁损现象的现场观察

Tab1. Main Characters of the natural Damage to Liang stone Sculpture's surface Observed *In situ*

名称及年代(公元)	地点	石刻名称	缝合线	溶蚀裂隙特征(宽、深;cm)	溶蚀特征	土下溶蚀现象	表面着生生物及相关溶蚀形态	备注
萧叔墓(526)	甘家巷田	东侧辟邪	直立较密	沿缝合线发育 宽:最大 11.0, 最小 0.2, 平均 1.2 深:最深 3.5, 平均 2.4	占整个表面 约 5-10% 直径:3.0-10mm 深:1.5-2.0mm	50-70cm 以下范围, 深蚀似较弱, 仅有刀砍状溶蚀发育	表面可有地衣及藻类分布,溶 隙、溶窝内藻类、地衣聚集,表面 可见溶针孔	有一大型溶隙沿石 胸至后背发育,使石 刻呈崩解趋势,1992 年填补
				沿缝合线发育,较东侧弱; 宽:最大 2.0, 最小 0.6, 平均 1.1 深:最深 3.0, 平均 2.4	约占表面 10%	120-150cm 以下范围, 形成溶纹,沿缝合线或 节理发育,宽约 2mm, 深约 2mm	地衣较少,后背北侧有藻类分布	
萧海墓(522)	回	辟邪 (东侧)	直立	沿缝合线发育 宽:最大 8.0, 一般 0.5-1.5 深:1.0-1.5	不明显	120cm 以下范围,仅有 溶纹,另有小辟邪胸部 有回曲状溶沟	距基面 1.2~1.6m 处曾有大量 地衣覆盖并形成相应的地衣溶 针孔、微溶纹等	
				沿缝合线发育,较弱; 宽:最大 2.0, 一般 0.5 深:约 1.5	不明显	约 1.6m 以下范围,底 腹部有较密集回曲状溶 沟,宽:0.5-1.5cm, 深 为 0.5-4cm	背部基础有大量藻类、地衣生 长,表面可见藻类等形成的斑状 溶痕	腰部曾沿节理发生 断裂
萧景墓(523)	十月村	望柱	直立	沿缝合线发育,较弱; 宽:一般 < 0.5 深:浅	不明显	柱身下部有水蚀凹痕	柱基有地衣、藻类生长	
				沿缝合线发育,有沿溶隙发生表面 脱落现象	不明显	无明显下埋痕迹	表面有生物覆盖	西侧有铁箍加固,免 其崩解
萧秀墓(523)	甘家巷小学内	辟邪 (东、西各一)	不明显	沿节理溶蚀形成溶隙,不规则, 宽:2.0-3.0	不明显	无明显下埋痕迹	表面有多种地衣及藻类覆盖,生 物差异溶蚀可形成约 2mm 的残 留微台阶,也可成溶窝	
				较浅细,沿缝合线发育, 宽:1.2-1.5, 最深:0.9	不明显	无明显下埋痕迹	部分有地衣或藻类覆盖	



a-c: 缝合线处不同类型之溶隙 d: 蜂窝状溶痕

e: 表面漫漶状溶蚀 f: 萧愔墓小辟邪表面溶沟

g: 萧景墓辟邪腹部的微溶沟 h: 方解石或白云质石脉的凸起

i: 萧秀碑沿缝合线发生剥落 j: 灰岩中内碎屑及基质的生物差异侵蚀过程

B—生物体 S—缝合线 A—藻类 V—方解石脉 F—碑面(阴、阳) I—内碎屑

图1 梁代灰岩石刻表面现场观察所见常规尺度的自然风化毁损的剖面类型示意图

Fig. 1 Profile sketch of the types of various weathered reliefs in normal scale on Liang Sculptures

发育; 2) 溶窝(图1-d); 3) 回曲状溶沟(图1-f-g), 系土下溶蚀所成, 在萧景墓辟邪的腿根部密集发育并形成小型石芽(图1-g); 4) 差异溶蚀现象(图1-h, j)。此外, 一些表面可形成不规则漫漶状侵蚀表面(图1-e)。各墓石刻的基本特征归纳如表1。

为了进一步了解溶蚀裂隙向石刻内部延伸的性质, 测量萧愔墓辟邪现存尚未填补的溶隙, 采用0.5mm及0.1mm的塞尺测量该相应宽度裂隙的内延深度, 并据裂隙口的宽度, 计算得出裂隙内隙夹角和裂隙口夹角(表2)。其中裂隙内隙夹角是裂隙内部宽度从0.5mm到0.1mm的夹角。结果表明裂隙愈宽, 则其深度愈深。裂隙的内夹角一般较小, 与裂隙口宽无明显关系, 而裂隙口夹角则较大, 且与口宽似有一定的正相关关系(图2)。

表2 萧愔墓石刻表面溶蚀裂隙的特征

Tab. 2 Morphologic data on the solutional fissures on the sculptures of Xiao Hui's Tomb

	裂隙口宽 cm			深度 cm			裂隙口夹角°			裂隙内隙夹角°		
	Max	Min	$\bar{X}$	Max	Min	$\bar{X}$	Max	Min	$\theta$	Max	Min	$\theta$
东辟邪	2.0	0.2	1.2	3.5	0.5	2.4	50	20	34	22	1.8	10.6
西辟邪	1.7	0.6	1.1	3.0	1.8	2.4	42	20	29	11.4	4.6	5.2

注: 深度以0.1mm塞尺测量值计。

现场观察结果可归纳为以下几点: ①石刻表面毁损以溶蚀作用为主, 类型较多, 具多种平面和剖面形态(图1); ②沿缝合线形成的溶隙是一种潜在威胁(图1), 其深度、外夹角与口宽有一定的相关性; ③石刻曾下埋的部分与上部出露部分的侵蚀状况有较大的差

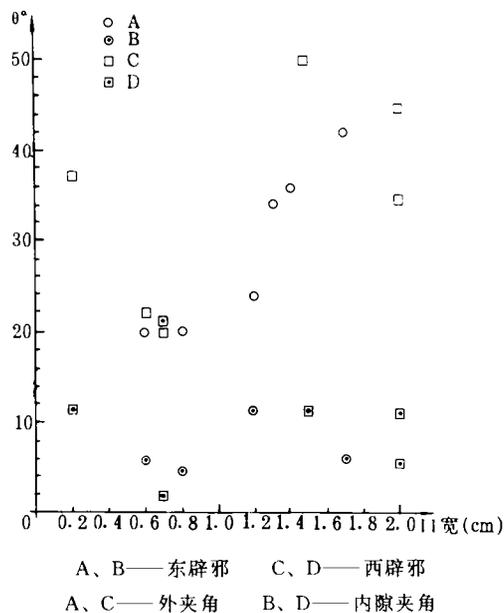


图 2 萧恢墓辟邪 (公元 526) 溶蚀裂隙夹角  $\theta$  与裂隙宽度的关系

Fig. 2 Relationship between inner and outer fissure angles and width of fissure on sculptures of Xiao Hui's Tomb (526 AD)

异；①石刻表面着生生物类型有多种地衣及藻类和苔藓，其中地衣、藻类均有明显的溶蚀作用。

## 1.2 室内观察

### 1.2.1 石刻表面着生的低等植物鉴定

据对石刻表面刮取收集的生物进行镜下鉴定，其主要类型为几种地衣及气生蓝藻和绿藻。初步鉴定结果见表 3。

表 3 梁代石刻表面着生的地衣及藻类

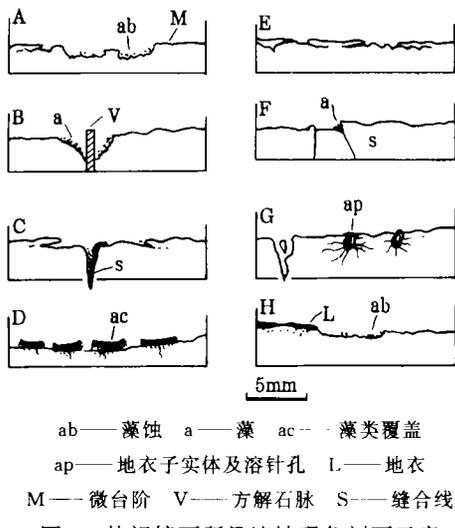
Tab. 3 Lichens and algae on the surface of Liang Sculptures

石刻墓主	地 衣	藻 类
萧 景	橙衣 <i>Caloploca</i> sp. 胶衣 <i>Collama</i> sp. 裂朵双缘衣 <i>Diploschistes actinostomus</i> 墙茶渍 <i>Lecanora muralis</i>	色球藻 <i>Chroococales</i>
萧 愨	瓶口衣 <i>Verrucaria</i> sp. 橙衣 <i>Caloploca</i> sp. 墙茶渍 <i>Lecanora muralis</i>	粘球藻 <i>Gloeocapsa</i> sp.
萧 恢	东侧有瓶口衣残迹，西辟邪基本无地衣	粘球藻 <i>Gloeocapsa</i> sp.
萧 秀	瓶口衣 <i>Verrucaria</i> sp. 胶衣 <i>Collama</i> sp. 裂朵双缘衣 <i>Diploschistes actinostomus</i>	管孢藻目 <i>Chamaesiphomales</i>

### 1.2.2 体视镜观察

经对所收集样品表面微观侵蚀形态的观察，可将其划分为如下几种类型 (图 3)：

1) 沿缝合线发育的微溶隙 (照片 3, 图 3-C), 可见嵌生型藻类等生物着生。



ab——藻蚀 a——藻 ac——藻类覆盖  
ap——地衣子实体及溶针孔 L——地衣  
M——微台阶 V——方解石脉 S——缝合线

图3 体视镜下所见溶蚀现象剖面示意  
Fig. 3 Profile sketch of solutional feature under stereomicroscope

2) 斑状溶痕及残留微台阶(图3-A, 照片4), 系斑状着生的嵌生型藻类群落覆盖并侵蚀形成亚超微蜂窝状溶痕区, 未受生物侵蚀区则残留高约0.1—0.3mm的微台阶。

3) 残留方解石脉及相邻微溶沟(图3-B, 照片3), 方解石脉在溶蚀后呈脊状凸出, 两侧则沿石脉与基质的接触面形成微溶沟, 沟槽中生物侵蚀作用明显。

4) 生物溶蚀现象: 包括龟裂状生物覆盖(图3-D, 照片2)、地衣溶针孔(图3-G)及其它生物覆盖溶蚀现象(图3-H、A、C)。

5) 其它类型的溶蚀裂隙: 或沿表面节理溶蚀(图3-F), 或者沿其它成因的风化裂隙溶蚀(图3-E)。

### 1.2.3 扫描电镜观察

在微台阶下的斑状溶痕表面, 电镜下可见明显的啮蚀现象(照片5), 可形成宽约1.5—3.0 $\mu\text{m}$ 的网格状交错超微溶沟, 并可见生物体。

亚超微裂隙内的生物作用可直接形成钻孔, 即生物钻孔现象(照片6), 钻孔壁可见明显的溶蚀现象, 并有次一级的裂隙, 钻孔孔径约10 $\mu\text{m}$ 。

石刻表面的一些无明显生物覆盖处, 现场观察为雨水溶蚀作用区, 但在扫描电镜下可见其基本特征为: ①其超微溶蚀沿方解石的双晶纹、解理纹或晶间裂隙发育; ②超微特征往往仍显示出生物作用的参与, 可见到一些钻孔现象及生物残体; ③方解石在受外营力作用时可沿解理面或晶间面发生松动(照片7), 这在水流作用下可发生脱落, 现场用手指研按表面常可见粉末, 主要就是这类风化物。

## 2 讨论

石刻文物表面的自然风化作用尤其是生物作用近来尤为国外学者所关注<sup>[1-4]</sup>, 国内虽然已有文献提及石刻表面的地衣侵蚀作用<sup>[5]</sup>, 但尚无专门研究。事实上, 如果要真正做到有的放矢地保护石刻, 就必须进行其毁损机制的研究。

### 2.1 石刻自然毁损的微地貌机制分析

#### 2.1.1 自然毁损过程中的地貌外营力分析

石灰岩石刻最基本的侵蚀过程是溶蚀过程。对梁代石刻而言, 这种溶蚀作用的外营力包括: ①大气降水(雨、雪)及凝结水(霜、露)均溶解有大气中的 $\text{CO}_2$ , 故具有溶蚀力, 大气污染导致的酸雨, 则更有利于溶蚀作用的进行。②土壤水: 曾下埋于土中的石刻部分, 其溶蚀现象与地表状况明显不同。这是因为土下溶蚀的营力是土壤水, 由于土壤水动力条件的不同, 土壤溶蚀现象间也有较大的差异。③表面着生生物: 石灰岩表面的低等植物可

对石灰岩直接产生侵蚀作用，这是近年生物喀斯特研究发展所得出的新结论<sup>[7-9]</sup>①。地衣的侵蚀机制包括化学的、物理的和生物的三种机制类型<sup>[10]</sup>。梁代石刻表面地衣作用也形成了溶针孔及超微钻孔。藻类对石灰岩同样也有多种侵蚀机制<sup>[11-12]</sup>，对梁代石刻而言，藻类不仅有钻孔作用、酸化作用及持水等作用，而且还有一种剥离作用。其发育过程是由于藻类等生物着生覆盖石面后对下伏基质进行长期的风化侵蚀作用并形成下伏风化层（常呈粉末状），在干燥时藻体可收缩干裂，并形成表面脱落层（照片 2），这样便可将下伏风化层剥离基质，在其表面残留一些溶蚀斑块（图 4），这一过程反映了生物侵蚀作用的多样性和综合性。

### 2.1.2 影响毁损过程的岩石性质

石刻组成物质的性质是影响其自然毁损过程的内部因素。同一外营力在不同性质的基质上往往有不同的作用产物。岩性因素影响毁损过程反映在几个方面：①由于岩性的不同可产生差异溶蚀现象，如萧秀墓辟邪表面的生物差异侵蚀，其原因之一即是岩性成分例如泥晶灰岩与方解石脉之间的差异。②节理及缝合线是侵蚀营力容易沿之作用的部位，同时由于这些部位水份条件较好，故有大量生物着生，因此溶蚀均沿大型裂隙发育并扩大，如萧恢、萧愴墓辟邪，但缝合线的产状又可影响到侵蚀作用的强弱，缝合线直立则有利于降水沿之流动渗透并溶蚀形成较大溶隙，而缝合线呈水平状则不利于雨水的流动渗入，故只形成浅细溶纹，如萧秀墓龟趺。③方解石脉的存在也可导致表面形成差异溶蚀。

### 2.1.3 自然毁损的微形态类型及机制

综合分析石刻基质性质及外营力，可将其表面自然毁损类型划分为：①构造型溶痕，有几种类型，如沿缝合线、节理溶蚀发育的溶隙，以及沿岩石原生构造发育的溶痕，如萧恢墓东辟邪北侧沿扰动构造溶蚀形成的薄层状裂隙。②降水型溶蚀作用，由于降水在石面流动可由重力定向，或可影响溶痕的形态。③浸湿型溶痕，系埋于土中为土壤裂隙水作用形成的溶痕，有两种类型，一种为由裂隙水作用形成的回曲状溶沟，一种为由渗透水作用形成的表面较均匀的侵蚀现象。④岩控型溶痕，指由于岩性成分差异所决定的溶痕，如萧秀墓辟邪表面的溶蚀残留微台阶。⑤生物型溶痕，由藻类、地衣等形成的特殊侵蚀形态，如地衣溶针孔及超微钻孔，藻类参与形成的溶窝及表面超微蜂窝状溶痕。⑥表面脱落现象，系表面沿溶蚀裂隙、风化裂隙或节理发生脱落的现象。

石灰岩石刻毁损的基本机制是溶蚀作用。梁代石刻的主要侵蚀现象集中于沿缝合线发育。首先是缝合线本身具微裂隙，有利于水流渗透流动，同时缝合线的存在扩大了岩石与水流的接触面。其次，缝合线处可保持一定的裂隙水或毛细水，在后期溶隙形成后这里也更比其它部位利于水、汽的保存，较湿润，有利于生物的生长，而缝合线处灰岩所含较多杂质在溶解后无疑又可成为生物生长的无机养分。生物的聚集生长，增加了溶蚀作用的形式和强度，有的生物可直接形成溶蚀侵蚀形态，如超微钻孔、地衣溶针孔及生物的剥离作用，或者通过对降水的酸化作用（分泌生物酸及夜间呼出  $\text{CO}_2$ ）可增强降水的溶蚀力，持水作用可延长溶蚀反应的时间。因此在缝合线处溶蚀作用大为加强而形成较大溶隙，由于石刻雕制时将缝合线（面）直立，故沿之形成的大型裂隙（溶隙）可导致石刻的崩解如萧恢墓、萧愴墓辟邪，这是梁代石刻的破坏性毁损类型。同时沿缝合线溶蚀风化而导致碑面的脱

① 张捷，包浩生．生物喀斯特及其微形态研究．未刊稿，1993．

落作用也使其文史、艺术价值大为降低,如萧秀碑。

## 2.2 石刻毁损的微地貌研究及其理论意义

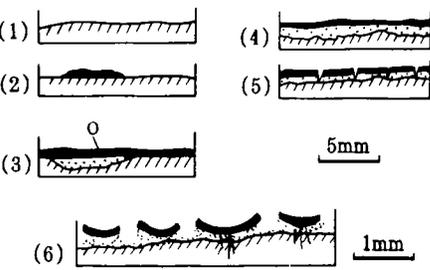
石刻表面自然毁损的微地貌机制实际上是喀斯特侵蚀理论的一个部分,因为灰岩石刻表面的自然毁损机制和过程就是一种喀斯特侵蚀机制和过程,其形成的毁损形态也就是一种现代喀斯特侵蚀微地貌形态。通过上述研究,对喀斯特侵蚀作用有以下新的认识。

### 2.2.1 生物喀斯特侵蚀作用的形式

地衣、藻类对于灰岩基质均具有物理、化学等多种侵蚀机制<sup>[8-11]</sup>。梁代石刻表面的许多微观及超微生物溶蚀形态无疑是一个良好的例证,同时前文(2.1.1)中所提到的藻类等生物的剥离作用则又是一种新的生物侵蚀作用的综合机制类型。此外,灰岩基质的某些性质,可明显地影响生物侵蚀作用的分布。

### 2.2.2 石灰岩表面侵蚀过程中物质运输方式

对梁代石刻的扫描电镜观察表明,在灰岩表面溶蚀过程中可导致表面方解石颗粒的松动(照片7),文献报道曾在模拟溶蚀试验中观察到同类现象<sup>[13]</sup>。野外



- (1) 新鲜面 (2) 藻类  
(3) 藻类覆盖并影响基质风化  
(4) 藻类及基质间形成风化层  
(5) 干燥时藻类发生收缩干裂  
(6) 干燥时产生剥离作用

图4 藻类覆盖的侵蚀剥离过程示意

Fig. 4 Peeling-off effect of algal coating on limestone sculpture substrate

现场观察发现这种颗粒可以为小雨所产生的表面漫流所携带运移。因此石灰岩表面的喀斯特侵蚀作用还应包括这种机械的输运方式。

### 2.2.3 有关差异溶蚀的讨论及意义

差异溶蚀的产生,既可能是因为外营力作用的不同,也可由内部物质成分差异所致。由于生物的局部覆盖及相应增加的溶蚀作用,一般即可产生差异溶蚀,如萧秀墓东辟邪。这种溶蚀现象可以反映生物侵蚀与常规侵蚀强度的反差,从而可间接反映生物侵蚀营力的强度。有关纯净方解石与泥晶灰岩两者溶蚀强度的大小关系,学术界颇多争论,且有多种结论<sup>[14-15]</sup>。但这些研究大多只是从溶解度的角度来讨论和分析,而未综合考虑外营力。在镜下对六朝石刻剥落碎片的观察表明,有方解石脉的地方往往形成明显的差异溶蚀现象,使方解石脉凸起,两侧则可形成溶槽(图3,照片3中V)。这是由于基质成分及结构不同导致了生物覆盖着生的状况不同,从而产生差异生物侵蚀作用。在这里,主要侵蚀营力来自于生物,而方解石与泥晶的溶解度的差异对侵蚀作用的影响处于从属地位。这种现象表明仅从可溶岩的溶解度来分析喀斯特侵蚀强度是不完全的。

### 2.2.4 地表与土下溶蚀作用强度比较

萧景、萧恢及萧愔墓辟邪的下部都曾经陷埋于土下,经历了长期的土下溶蚀作用。由于石刻的原始表面是一个较圆浑平整的表面,因此这相当于一个可供比较溶蚀强度的参照基准面。从石刻表面微地貌特征分析,地表与土下溶蚀强度是有所变化的,而非单一的大小关系。地下溶蚀强度与地表相比,有时较小,有时则较大。据溶蚀形态分析,这种关系取决于土壤水动力条件。土壤裂隙水条件好,溶蚀作用就强,故沿土壤裂隙形成回曲状溶沟,如萧景墓辟邪腹部;反之,土壤透水性较差或较干燥,则只能形成浸湿型弱溶蚀现象,仅形成浅细的溶纹。

本文对石灰岩石刻表面微侵蚀及其形成机制的一些分析,也是对喀斯特侵蚀理论的补充。针对本文揭示的毁损机制,对石刻的保护应加强表面尤其是顶背部缝合线的防水措施和防止表面生物生长,详细的方法措施将在另文讨论。

### 参 考 文 献

- 1 Danin A. Weathering of Limestone in Jerusalem by Cyanobacteria. *Z. Geomorph. N. F.*, 1983, **27** (4): 413-421.
- 2 Jones D, Wilson MJ. Chemical Activity of Lichens on Mineral Surfaces A Review. *International Biodeterioration*, 1985, **21** (2): 99-104.
- 3 Ciochon R, James J. The battle of Angkor Wat. *New Scientist*, 1989, **133** (1687): 52-57.
- 4 Seaward MRD. Lichen Damage to Ancient Monuments: A case study. *Lichenologist*, 1988, **20** (3): 291-295.
- 5 张捷, 李升峰, 陈舒泛. 石灰岩表面溶针孔的初步研究. *中国岩溶*, 1991, **10** (2): 151-160.
- 6 Chen Shufan, Zhang Jie. (陈舒泛, 张捷), Biodeterioration of Chinese Monuments. *International Lichenological Newsletter* (Official Publication of the International Association for Lichenology). 1993, **26** (1): 10-12.
- 7 Viles HA. Biodarst; review and prospect. *Progress in Physical Geography*. 1984, **8** (4): 523-542
- 8 Viles HA. Organisms and Karst Geomorphology. In: Viles HA. *Biogeomorphology*. Oxford: Basil Blackwell, 1988, 319-350.
- 9 Schneider Z. Carbonate construction and decomposition by epilithic and endolithic micro-organisms in salt and freshwater. In: Flugel E. *fossil Algae*. Berlin & New York: Springer-Verlag. 1977, 248-260.
- 10 张捷. 地衣喀斯特侵蚀作用的初步研究. *地理学报* 1993, **48** (5): 437-446.
- 11 张捷. 喀斯特侵蚀过程中藻类作用的微形态研究. *地理学报*, 1993, **48** (3): 235-243.
- 12 Viles HA. Blue-green Algae and Terrestrial Limestone Weathering on Aldabra Atoll: A SEM and Light Microscope Study. *Earth Surface Processes and Landforms*. 1987, **12** (3): 319-330.
- 13 翁金桃. 桂林岩溶与碳酸盐. 重庆: 重庆出版社. 1987. 129-133
- 14 Sweeting MM. *Karst Landforms*. London: Macmillan, 1977, 38-40.
- 15 Trudgill S. *Limestone Geomorphology*. London: Longman, 1985, 20-25.

# A STUDY ON MICRO-EROSION OF THE STONE SCULPTURES OF THE LIANG DYNASTY (522-526AD) IN NANJING

Zhang Jie Li Shengfeng

(Department of Geo & Ocean Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008)

Chen Shufan

(Nanjing Institute of Education, Nanjing 210013)

Yang Tianqi

(Nanjing Administrative Commission for Cultural Relics, Nanjing 210008)

**Key Words:** corrosion of limestone sculptures, micro-erosion features, biological erosion, Liang Dynasty

## Abstract

Natural damage to ancient stone sculptures or cultural relicts, especial the biodeterioration, has become a new research topic. The Liang stone sculptures during the Liang Dynasty in the suburb of Nanjing, which are a group of limestone sculptures and inscribed tablets of the Liang tombs, built in the period of 522-526 AD, have been enrolled in the list of National Cultural Heritages of China. The Liang stone Sculptures have been situated in the open air for more than 1400 years since they were built. The damages to them belong to a kind of karst geomorphological phenomena. This paper presents a micro-morphological approach to the study on weathering of the stone sculptures.

I. Observation on micro morphology of produced by natural damage.

A. Observation in situ

Liang stone sculptures include stone sculptures of the mausoleums of Xiao Dan, Xiao Hui, Xiao Jing and Xiao Xiu. The main types of sculptures are Bixie (a symbolic divine beast as evil-spirits exorciser), ornamental columns and inscribed tablets.

The main types of the damage phenomenon can be classified in accordance to section morphology into: a) Solutional fissures and furrows, mainly along the suture line; b) Solutional pits, c) Meandering furrows, distributed on sculpture below the buried surface, d) Selective corrosional features.

In order to understand the penetrating character of the fissures, we measured the weathering (solution) fissure along suture line on Xiao Hui's Sculpture. The parameters measured included: a) Width of fissure mouth, b) The depth of the fissure with plug gauge of 0.5mm and 0.1mm. The measured data show a trend that the wider the fissure mouth, the deeper the total fissure. We also calculated the outer angle and the inner angle between the corroded fissures on rock walls, where the inner angle refers to the angle between rock walls of the fissure from 0.5mm to 0.1mm wide and the outer angle from mouth to 0.1mm wide. The data indicate that: a) Inner angles are smaller than outer angle generally, b) There is a trend that the larger the total depth of the fissure, the larger the outer angle will be.

The main results of the observation in situ are summed up as follows: a) The damage to sculp-

ture surface is mainly due to the solution with several section types. b) The solution fissure formed along suture line is an initial fatal damage, which may cause the disintegration of the whole sculpture. c) There is a difference between the surface damage on the burried line and that below the line. d) There are lichen and algal covered surfaces with obvious biodeterioration.

#### B. Lab Observation

We identified the epi- and endolithic lichen and algae collected from the sculpture surface. The lichens identified are: *Caloploca* sp., *Collama* sp., *Diploschistes actinostomus*, *Lecanora muralis*, and *Verrucarina* sp.. The algae include *Gloeocapsa* sp. and the species from the order of *Chamaesiphonales* and *Chroococales*.

With optical stereo microscope observation, the micro solutional fissures with chasmolithic algae along suture line can be observed. The chasmolithic algae may form the patched solutional pits and the related relict micro steps with a height of about 0.1~0.3mm. Calcite vein often forms a ridge with micro corrosion furrow on both sides. Algal coating may become full of crack with the tension of mucus while in dry season.

With observation on certain minor solutional features under Scanning Electronic Microscope (SEM), the related ultral corrosional features were identified as follows: a) Bore-hole with diameter around 10 $\mu$ m formed by fungi filament of lichen. b) Ultral etched pits on minor patched erosional pits, composed of networks of ultral furrows which 1.5~3 $\mu$ m wide. Under SEM, we observed the ultral features of the normal solution surface. The main characters are that: a) Ultral solutional pits are basically along the cleavage plane of calcite or fissure among calcite grains. b) There are still organisms and a few bioerosional features. c) Calcite grain or micrite may loosen or even come off during the weathering (solution) processes.

## II. Discussion

### A. Micro-morphologic mechanism of natural damage

The basic damage process is solution. The exogenic factor affecting the solution are as follows: a) Atmospheric precipitation and condensed water. b) Ground water in soils. c) Organisms distributed on the sculpture with various types of bioerosional mechanisms. As to bioerosion process, algal may also cause the peeling-off effect. In the process, the algal coating causes the weathering of the top substrate and forms a powder-like layer beneath the algal covering at first. During the dry period, the organic coating may be cracked by the tension of mucus and organic body. And then the weathering layer will be peeled off.

Some rock properties may also affect on the damage process, resulting in the selective corrosion feature. Such factors included chemical property, the suture line in moist environment, and the existence of calcite vein and joint.

The genetic types of karren or erosion feature on the sculptures are structural karren, free karren, subsoil karren, biodeteriorated karren and petro-affected karren as well as peeling-off phenomena.

As a result of observation, the main damage processes are the concentrated and strengthened corrosion along suture line. The micro-fissure and the better moistened environment along suture line causes the strengthened corrosion with several bioerosional effects (e.g. biopeeling-off effects, bio-

acidification of the rain water and the water holding effects). Such strengthened solution forms large fissure and then may cause the disintegration of the whole sculpture along the suture lines.

#### B. Theoretical significance of the research

Through the observation and analysis, some new ideas about karst erosion process were recognised, obtained.

1) The mechanism of bio-karst erosion may be a complex process with many agents, while rock property may largely affect on the distribution of the process.

2) As to transportation of karst erosion, there may also be the micro machanical ones beside chemical process.

3) the solubility or chemical property of karst rock is not the only factor affecting on the solution process on limestone surface. In some cases, bio-effect may be the dominant agent influencing the solution process in stead of rock chemical property.

4) The comparable relationship between subaerial karst erosion intensity on limestone surface and subsoil ones is variable. It depends largely on the hydrau-dynamical condition of soil water (ground water) .

### 作者简介

张捷, 男, 1960年生, 1990年毕业于南京大学大地海洋系并获博士学位, 现留系任教并兼职于南京大学东方艺术研究中心。主要从事喀斯特地貌学研究, 发表有“石灰岩表面溶针孔的初步研究”等论文。

#### 图版说明

照片 1 萧恢墓东辟邪全貌。可见右前胸沿缝合线发育的溶隙(已填补)及加固铁箍。(摄于 1990 年)。

照片 2 萧恢墓辟邪表面藻类等生物覆盖及其对下伏基质的剥离作用。体视镜。

照片 3 萧恢墓辟邪表面溶蚀现象: (1) 缝合线及沿之发育的微溶隙(箭头所指); (2) 蚀余凸起的方解石脉(V)及两侧藻蚀区。体视镜。

照片 4 萧景墓辟邪剥落碎片所示裂隙内侧由嵌生型藻类形成的斑状溶痕(a)及相邻残留微台阶(M)。体视镜。

照片 5 萧景墓斑状溶痕表面的超微溶蚀形态, 可见溶蚀作用形成的超微溶沟。扫描电镜。

照片 6 梁代石刻表层内部生物钻孔现象的断面观。扫描电镜。注意管壁明显的溶蚀形态。

照片 7 石刻表面常现溶蚀部位, 超微尺度上可见方解石晶粒松动即将脱落, 并可见球形单细胞植物体。扫描电镜。

#### Captions of the Plates

Plate 1 A full view of the eastern Bixie (a divine beast) of the Xiaohui Tomb. Note fissures (filled) along suture lines and the banding hoop iron (photo in 1990)

Plate 2 Algal coating and the peeling-off effect on substrate.

Plate 3 Micro corrosional feature on limestone sculpture surface of the Xiaodan Tomb. Note the micro fissures along the suture line (shown by arrow) and relict ridge of calcite vein (V) and neighbouring algal erosional furrows.

Plate 4 Patched pits (a) eroded by chasmolithic algae and the related relict micro step (M) on the inner side of peeled block from Xiaojing Sculpture.

Plate 5 Ultral corrosional feature of patched pits on the Xiao jing Sculpture. Note the ultral 'karren' of corrosional furrow. SEM

Plate 6 Section view of biogenetic borehole on peeled block form the liang Sculpture. Note the solutional pits on the wall of holes and the filament of organism. SEM

Plate 7 Ultral feature of 'normal' corrosional surface (without organic cover observed with naked eyes). Note the loosen calcite grain and the spherical organic body, SEM

# 冲积河流的汇合与分流<sup>\*</sup>

高 进

(湘潭矿业学院资源勘察与市政工程系, 湘潭 411201)

**提 要** 冲积河流具有一定的自动调整作用。遵循最小阻力原理, 河道的汇合分流也应属于冲积河流的自动调整作用之列, 事实上, 在河道的汇合与分流处, 支流与主流夹角形成及其宽度比(或断面积比)的建立都不是随机的, 它必须保证来自支流与主流的水和泥沙能在此通畅排泄。本文证明了水流在通过河道的汇合与分流处时所形成的夹角及其宽度比, 对应于水头损失的最小值。河口段垂直于或趋向垂直于海岸线的特性, 也是水流不断调整到最小阻力状态的结果。

**关键词:** 冲积河流, 汇合, 分流, 河口, 最小阻力原理

## 1 概述

冲积河流具有一定的自动调整作用, 能使来自上游的水和泥沙通过河段下泄, 以保持相对的平衡并形成不同的河型。一个值得注意的问题是河道的汇合与分流也应属于冲积河流的自动调整作用之列。冲积河流的自动调整作用不仅是通过河床比降、宽度、水深、床沙、河型等不同要素的调整来适应流域来水来沙条件, 而且也包括对河道汇合与分流夹角及该处河宽比(或断面积比)的调整来适应来水来沙的变化。河流入海可以看作是一种特殊形式的汇合。各种不同形态河口所具有的一个共同特征是河口段走向垂直于或趋向垂直于海岸线。这是在许多因素作用下河口段不断调整到最小阻力状态的结果。

为了简化, 本文研究只限于均匀流、均匀冲积物边界和接近清水河流的理想情况。在这种假定条件下所得出的结论虽然是近似的, 但却是明确的。

河渠均匀流沿程水头损失  $h_f$  可用 Darcy-Weisbach 公式<sup>[1]</sup>表示:

$$h_f = \lambda \frac{L}{4R} \frac{v^2}{2g} \quad (1-1)$$

式中,  $\lambda$ ——沿程水头损失系数;  $R$ ——水力半径;  $v$ ——平均流速;  $g$ ——重力加速度。

上式适合于不同流态, 只需改变  $\lambda$  值即可。为便于计算, 河道过水断面我们不取矩形而设为弓形, 这时水力半径  $R$  可表为:

$$\begin{aligned} R &= \frac{w}{x} = \frac{\frac{1}{2}r^2(\varphi - \sin\varphi)}{\varphi r} \\ &= \frac{r(\varphi - \sin\varphi)}{2\varphi} \end{aligned} \quad (1-2)$$

\* 收稿时期: 1993 年 2 月; 收到修改稿日期: 1993 年 7 月。

