

# 福建永安石林地貌 的现代生物喀斯特侵蚀营力\*

张捷 包浩生 李春华

(南京大学大地海洋科学系 南京 210008)

**提 要** 本文以永安石林为例,阐述分析了石林地貌的现代生物喀斯特侵蚀现象的类型及形态特征。结果表明,地表及地下的生物喀斯特侵蚀营力是石林现代侵蚀过程的主要因素,石林表面的大部分均有微生物覆盖并起侵蚀作用,形成明显的微观及超微溶蚀形态,石林表面的溶蚀作用性质不同于传统认识。对石林地貌发育提出了新的思考。

**关键词** 石林 生物喀斯特 现代侵蚀营力

石林(Stone Forest, Rock Forest 或 Pinnacle karst)是一种特殊的喀斯特地貌,有关其侵蚀营力的研究一直为喀斯特研究者所关注<sup>[1-3]</sup>,国外学者也然<sup>[4-5]</sup>。同时,石林地貌也是一种景观奇特的旅游资源,著名的路南石林早已闻名中外并成为旅游热点;福建的永安石林自1985年以来逐渐开发后,目前已成为福建省十大名胜之一和国家级风景区,因此对石林的研究具有现实意义。另一方面,尽管近年来生物喀斯特研究的兴起为喀斯特研究提供了新的方法和视野<sup>[6-8]</sup>,但有关石林的现代生物侵蚀营力尚无专门研究。本文即拟以永安石林为例来作一探讨。

## 1 生物喀斯特侵蚀现象的观察

永安石林位于福建省永安市西北13km处大湖乡丘陵山地,由石炭系黄龙组(C<sub>2</sub>h)、船山组(C<sub>3</sub>c)和二叠系栖霞组(P<sub>2</sub>q)灰岩组成。该地区气候温暖湿润,1月平均气温为7—13℃,7月均温为28—30℃,降水丰沛,年均降水量在1400mm以上。适宜的自然环境促使生物的生命活动异常繁茂。其中对石林发育有影响的生物主要有岩表着生的石生植物及土壤微生物。

### 1.1 藻 类

石生藻类是岩表着生生物中覆盖率最大的一种。据初步观察,永安石林岩表的石生藻类有螺旋藻 *Spirulina*、伪枝藻 *Scytonemata*、念珠藻 *Nostoc* 等属和色球藻科 *Chroococcaceae* 的藻类。一般石生藻类可分为三种类型:表生型(*Epilithic*)、嵌生型(*Chasmolithic*)和内生型(*Endolithic*)<sup>[9]</sup>。根据扫描电镜观察,石林表面的嵌生型和内生型藻类主要是球状藻细胞(照片1,2)<sup>1)</sup>,集中分布于岩表层150μm以内(表1)。据镜下观察及统计估算结果分析,永安石林岩表藻类(包括近表层的石生内生藻类)在岩石表层的着生和分布及其作

\* 国家自然科学基金及南京大学现代分析中心分析基金资助项目。

1) 本文照片见刊末图版 I。

本文改回日期: 1994-03-15。

用性质,在剖面上可分为三层:(1)表层藻被层,为表面 0—20 $\mu\text{m}$ ,由藻类聚集体与松散基质(侵蚀风化后岩石结构已改变)及杂质(有机质、外来物质及蚀余残质)组成,其中球形藻类嵌生岩表所占体积大於 50%,甚至可超过 75%,整体结构较松散,可呈粉末状;丝状藻类则可表现为表生或嵌生(照片 3)。(2)密集钻孔层,分布於 10—150 $\mu\text{m}$  范围内,由球形藻细胞钻孔形成了蜂窝状钻孔层(照片 1),钻孔密度(体积比)为 14—15%,由外层向基质内部逐渐变少,体视镜下呈灰白色晕带(基岩本色为肉红色),其方解石则基本保持原来的晶粒结构形态;(3)基质层,一般在距表面 60—150 $\mu\text{m}$  以内的岩石基质内部,藻类钻孔已十分稀疏( $<2\%$ ),岩石矿物的原始结构保存完好,体视镜下呈岩石的本色肉红色。

表 1 永安石林表面嵌生及内生藻类分布密度(藻类钻孔所占体积百分比)估算

Table 1 An estimation for the distributed density of chasmolithic and Endolithic Algae on the surface of Yongan Stone Forest (volume percentage of Algae)

样 号 \ 深 度	0—20 $\mu\text{m}$	20—60 $\mu\text{m}$	60—100 $\mu\text{m}$	100—150 $\mu\text{m}$	>150 $\mu\text{m}$
S <sub>1</sub>	>50%	33%	12%		<2%
S <sub>2</sub>	>75%	50%	40%	14%	<2%

藻类在永安石林区几乎覆盖了所有灰岩的裸头表面,使得石林多呈墨绿色。在潮湿部位更为明显,岩表藻类呈藻被层,起持水作用,这在溶槽(rundkarren)底部、石林侧壁基部均可见到这种现象。由於藻类的广泛分布,使得侵蚀作用的分布也很普遍。据电子探针分析,钻孔藻类藻体本身也可含有较多的钙,这一现象是否说明了侵蚀过程中藻类具有某种生理机制,还是仅仅由於后期一定程度上藻体的钙化,这将有待於今后深入研究。

1.2 地 衣

永安石林灰岩表面的地衣生长型有壳状和鳞片状。壳状地衣分布于裸岩较干燥部位(石芽上部通风处),鳞片状地衣则分布于石林较潮湿且有藻被层的部位。对灰岩直接起侵蚀作用的地衣类型是壳状地衣,它们可在灰岩表面形成溶针孔<sup>[10]</sup>。永安石林表面,壳状地衣所形成的溶针孔个体深约 0.20mm,直径约 0.15mm,呈微观壶穴状形态,内部为地衣子实体所占据。壳状内生地衣由岩表及近表层石内聚集的藻孔层(距表面约 0.05—0.10mm 处)和地衣真菌丝及其钻孔组成,地衣菌丝钻孔比藻类钻孔要细,约 3 $\mu\text{m}$  粗,一般为 1—3 $\mu\text{m}$ (直径)(照片 4)。钻孔密度可达  $4.7\times10^5$  个/ $\text{mm}^2$ 。在子实体底部,其外壁系由真菌丝组成(照片 5 中 b),菌丝同时向其外围灰岩基质中伸展钻孔。

1.3 岩表着生的其它植物类型

除了地衣、藻类外,石林岩表尚有多种植物分布,主要有苔藓类、蔓生藤本植物及灌草丛。苔藓类在灰岩表面同样可起侵蚀作用,但它对环境条件的要求较高,故分布于潮湿的部位。灌丛及藤本植物可着生于基岩裂隙之中(照片 6),其根系分泌的酸类无疑可促进岩表的溶蚀过程。此外,永安石林岩表还可见由於植物根系的沥水作用在其下部形成的波浪状溶痕。以往国外对同类形态的研究结果表明,其形态特征的形成与水流的重力、表面张力及岩表的摩擦力相关<sup>[11]</sup>。

#### 1.4 土下生物溶蚀营力

土下喀斯特侵蚀的主要营力是土壤空气中的  $\text{CO}_2$ 。一般认为,土壤  $\text{CO}_2$  主要是微生物的产物,而且这种生物成因的  $\text{CO}_2$  具有十分强烈的喀斯特侵蚀作用<sup>[4,12]</sup>。据野外实地测定,永安石林地区的土壤空气  $\text{CO}_2$  含量,即使在冬季(生物的生命活动相对较弱)也远大于开放大气中的  $\text{CO}_2$  的含量(表 2)。这种现象反映了土壤现代生物喀斯特侵蚀营力的潜力。在永安石林区尚能观察到被掩埋在土下的石林形态(照片 7)。对其表面方解石的扫描电镜微观观察表明,土下岩体表面确实存在着强烈的溶蚀作用,方解石表面形成了微观锥状晶丛,其间或有镂空状溶蚀穴(照片 8),这种表面的锥状晶丛是与人们以酒石酸对灰岩进行模拟溶蚀试验所得到的微形态<sup>[13]</sup>相一致。除此以外,土下强烈溶蚀作用所形成的微形态还可以是以残余(蚀余)方解石残片所组成的格栅状形态。

表 2 永安石林地区土壤空气  $\text{CO}_2$  含量(1985 年 1 月)

Table 2  $\text{CO}_2$  content of soil atmosphere in Yongan Stone Forest Area (on January, 1985)

项 目 \ 地 点	麒麟石林中部			洪云石林槽谷			十八洞后探槽		
土壤层次(cm)	表层 20	50	100	表层 20	50	100	20	50	100
土 温( $^{\circ}\text{C}$ )	9.5	10.5	11.0	9.5	10.7	12.8	9.5	10.5	11.5
$\text{CO}_2$ 含量(%)	0.141	0.097	0.216	0.314	0.108	0.782	0.0651	0.127	0.108

## 2 现代生物喀斯特侵蚀营力与石林地貌发育的有关问题讨论

一些学者认为,石林的形成主要是由土壤水对灰岩的溶蚀作用而成<sup>[1,5]</sup>,从而许多研究者认为现代石林侵蚀营力仅限于其顶部表面有限的改造作用,而对石林表面的微形态及现代侵蚀营力都不甚重视。确实,永安石林地区土壤溶蚀营力强度较大,尤其是与大气  $\text{CO}_2$  含量(0.02—0.03%)所具的侵蚀潜力(以降水为介质)相比。同时,石林顶部也确实存在着一系列受雨水重力作用控制其定向性质的微小型(Minor)溶痕,如梳状溶痕(Rillenkarren)等,而一般认为这些类型的形态是由降水溶蚀而成<sup>[14]</sup>。这种推论也许是将降水中所溶解的大气  $\text{CO}_2$  当作岩表侵蚀的主要营力,而这种营力确要远小于土壤水,如永安石林区土壤空气  $\text{CO}_2$  含量是大气  $\text{CO}_2$  含量的 20—30 倍之多(冬季)。然而事实并非完全如此。如果石林表面是纯裸露的,那么这种推论也许是可行的,但是,仅以永安而言,我们发现石林表面的大部分,甚至包括一些典型的“降水型”溶痕(如梳状溶痕)表面,均有藻类、地衣等植物覆盖并具钻孔或其它侵蚀作用。据研究,藻类对灰岩的侵蚀机制可分为化学的和机械的两类,其钻孔作用主要是化学过程<sup>[15]</sup>。永安石林岩表的石生藻类及地衣对灰岩的侵蚀作用,除了钻孔作用外,可导致表面方解石晶屑的脱落,同时还起着对降水等的持水作用(延长水对灰岩表面的接触及相应的反应时间)和酸化作用(包括生物分泌的各种有机酸及夜间呼吸所释放的  $\text{CO}_2$ )。石林表面藻类等的覆盖,同样也改变了仅由雨水在光滑裸露的灰岩表面上溶蚀强度的分布格局(即上部强,向下逐渐减弱),而使石林的下部(基部侧面等)由于生物作用的参与仍可达到较强的侵蚀强度,这无疑是石林发育成形的一种有益作用。石内球形藻类所形成的钻孔,从形态上分析应是藻类个体发育的副产品,藻类个体发育的速度直接影响着这种形态的形成速率。据研究,单细胞藻类生长一般可

分为延缓期、指数生长期、相对生长下降期、静止期和死亡期<sup>[16]</sup>。在指数生长期,藻体数  $N$  随时间呈指数增长:

$$N_t = N_0 e^{kt} \quad (1)$$

式中  $N_t$  为  $t$  时刻的藻类个体数;  $N_0$  为初始时藻体数;  $t$  为时间;  $k$  为系数。

藻类生长速率在一定条件下是很可观的。如 Gummert(1953)报道了在夏季适宜光照下培养小球藻,每天光照 10.0h,每毫升个体数  $8 \times 10^6$  及  $64 \times 10^6$  的含藻水体在 24.0h 内藻类个体数可增加若干倍;Fogg(1965)则通过实验及总结他人成果,发现蓝绿藻的一些种属在 25℃ 下经 10.6h 可增殖 1 倍,而小球藻在不同的温度条件下,其增殖一倍时间在 2.6—19.6h 不等(转引自[16])。藻类个体数目的增殖速率,一般也可认为是单细胞个体发育生长期中体积增长的平均状况。因此我们可以推断,在暖湿气候条件下,藻类钻孔发育的速率也相当可观。因此石林地区地表现代侵蚀营力绝非仅仅来源于大气  $\text{CO}_2$  和降水,而应该包括其表面多种石生植物、微生物的浸蚀作用,这种生物作用参与后的岩表侵蚀营力,无疑要远大于仅考虑大气降水作用的传统石林岩表侵蚀强度估计,在侵蚀营力的性质上也与传统认识有很大的差异。诚然,藻类、地衣由于它们在岩表覆盖均匀且个体小,尚不足以改变岩面水流性质(如梳状溶痕等重力定向型溶痕表面的藻类分布,不能改变其定向性质),但却可以加速溶蚀形态发育,槽状溶沟底部藻类的持水作用,无疑是有利于这种形态的进一步发育的。同时,生物的持水作用,大大地延长了水流在岩表的停留时间及其与岩表发生溶蚀反应的时间,因而使得这些溶痕的形成过程已不局限于 Bogli(1959)所说的石灰岩溶蚀过程中的第 I—II 阶段(溶蚀反应时间通常在 1 秒以内,转引自[14])的化学相了。此外,在永安石林,可看到由于生物作用参与在石林表面形成了棘皮状溶痕或刺状溶痕(Spitskarren)。同时,从生物溶蚀营力的分布性质而言,在灰岩裂隙及灰岩体的基部,由于潮湿而导致了更茂盛的藻类等生物的生长并产生相应的较强侵蚀作用,这种性质无疑是有利于柱状灰岩体(石林)的形成。因此从永安石林表面生物喀斯特侵蚀作用的微形态分析来看,可以认为在石林的演化和发育过程中,石林表面的溶蚀作用决非限于改造表面的微形态,而是参与了石林地貌的形成过程。

必须强调,就土壤  $\text{CO}_2$  测定结果而言,可以说明土壤微生物对现代石林地区的区域溶蚀强度起着重要作用,同时也意味着它在石林发育中的重要地位。事实上,永安石林的高大石灰岩柱状体侧部仍可见内凹弧形曲面,即是土下溶蚀的产物,只不过目前已被剥露出地表了。

### 3 结 语

本文对永安石林这一我国东南地区具特殊意义的喀斯特地貌进行了野外及室内的观察和分析,结果表明,地表及地下的生物喀斯特侵蚀营力是石林区的主要侵蚀营力,对石林发育起着重要作用。值得注意的是,石林表面的生物侵蚀现象十分广泛(几乎覆盖了永安石林的全部“裸岩”),说明生物作用是石林地表侵蚀作用的主要营力之一,并且石林地区地表喀斯特溶蚀强度性质(无论是类型还是强度)与传统认识间存在着很大的差异,这一现象促使人们对石林地貌发育的理论来进行新的思考,因为石林表面的生物覆盖着生现象,在我国云南、广西、贵州的一些石林地貌中也是较普遍的,如路南石林表面也存在生物覆盖并可见其明显的相关侵蚀形态。至于具体强度特征的定量化研究,尚有待于今后

工作的深入.

## 参 考 文 献

- [1] 张寿越. 路南石林发育及其演进. 中国岩溶, 1984, 3(2): 78—88.
- [2] 俞锦标, 王雪瑜, 王宗汉. 路南石林形成时代及古地理环境的初步分析. 南京大学学报(自然科学版), 1983, 19(2): 362—374.
- [3] Chen Z P, Song L H, Sweeting M M. The pinnacle karst of the stone forest, Lunan, Yunnan, China. New directions in Karst. Norwich: Geo-Books, 1986. 597—607.
- [4] Jakucs L. Morphogenetics of karst regions. Bristol: Adam Hilger, 1977. 139, 107.
- [5] Ford D, Williams P. Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman, 1989. 391—392.
- [6] Viles H A. Biokarst review and prospect. *Progress in physical Geography*, 1984, 8(4): 523—542.
- [7] Viles H A. Organisms and karst geomorphology. In: Ha Viles ed. Biogeomorphology. Oxford: Basil Blackwell, 1988. 319—350.
- [8] 包浩生, 张捷. 生物喀斯特微形态特征研究. 见: 包浩生编. 任美镛教授 80 华诞地理论文集. 南京: 南京大学出版社, 1993. 172—179.
- [9] Viles H A. 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.
- [10] 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.
- [11] Wall J R D, Wilford G E. Two small-scale solution features of limestone outcrops in Sarawak, Malaysia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 1966, 10(1): 90—94.
- [12] 任美镛, 刘振中主编. 岩溶学概论. 北京: 商务印书馆, 1983. 55—57.
- [13] Trudgill S. Limestone geomorphology. London: Longman, 1985. 38.
- [14] Sweeting M M. Karst landforms. London: Macmillan, 1972. 27.
- [15] 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.
- [16] 华汝成. 单细胞藻类的培养与利用. 北京: 农业出版社, 1980. 199—207.

## ON MODERN BIOKARST EROSION ON YONGAN STONE PINACLES, FUJIAN PROVINCE

Zhang jie Bao Haosheng Li Chunhua

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

### Abstract

Based on both field and laboratory observations on erosion features of Yongan Stone Pinnacles, Fujian Province, the morphologic characteristics and the types of modern biokarst erosion were elucidated and analysed in the paper. It is concluded that both surface and subsoil biokarst erosion agents are main causes for modern erosional processes of the stone pinnacles. As it is found that there is organic coating by microorganisms on most part of surface of stone pinnacle with related obvious erosional features in micro or ultra scale, it suggests that surface erosional agent of stone pinnacles should be much larger than that of traditional estimation.

**Key words** stone pinnacles, biokarst, modern erosion agent