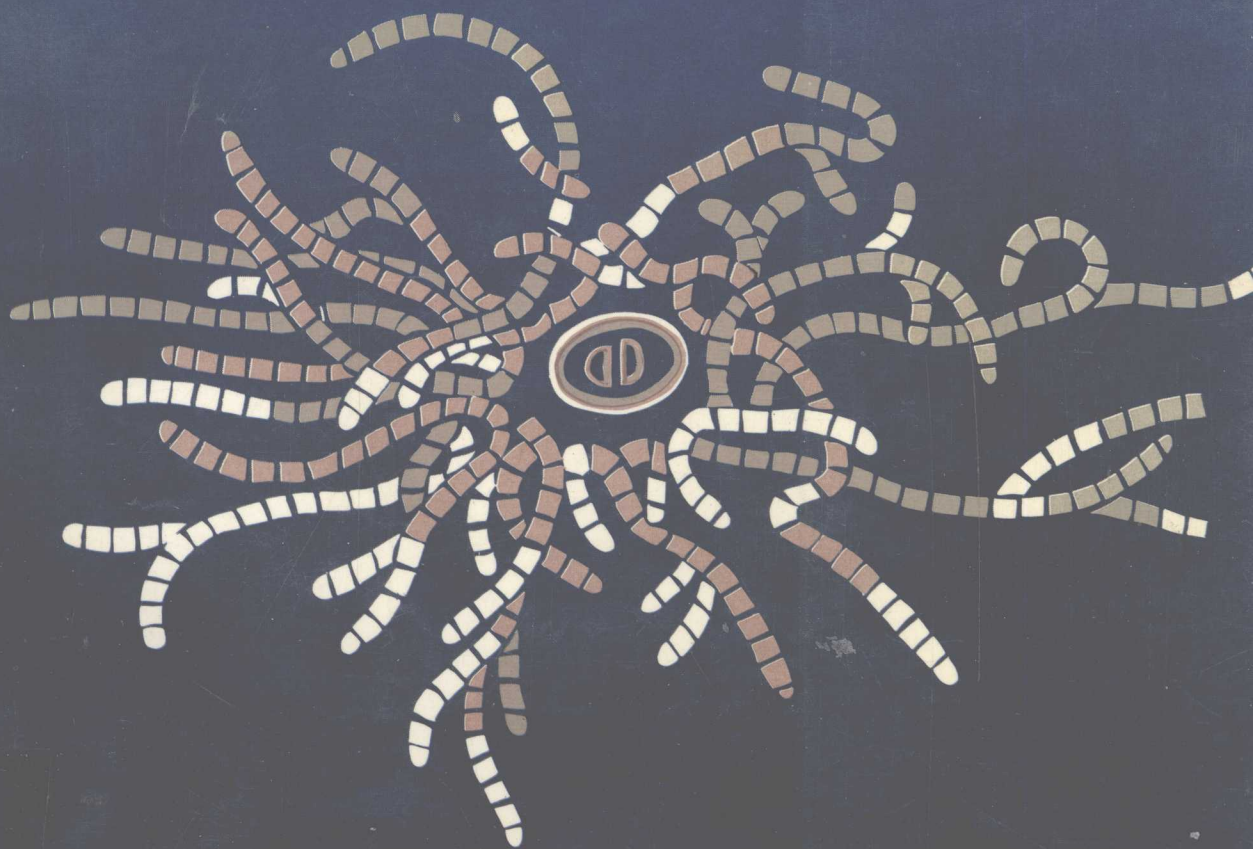




国际地质对比计划299项

生物岩溶

王福星 曹建华 黄俊发
江利登 黄基富 王 晶



地质出版社

(京) 新登字 085 号

内 容 提 要

生物岩溶是指岩溶形成发育过程中的生物作用及其产物。本书的主要研究对象是藻类、真菌、地衣等的生物沉积和生物溶蚀作用。研究区主要是亚热带的广西天等县、恭城县和桂林市以及贵州荔波县茂兰森林岩溶自然保护区。部分样品采自山东沂源县和土耳其西南部。本书通过对洞口石钟乳、石鳞片(叠层石)和几种洞内钟乳石的生物沉积以及洞口石刺和微溶孔、溶孔、溶坑、溶盆等的生物溶蚀机理的研究,阐明了生物岩溶作用在岩溶形成发育过程中的重要意义。

本书对当前有关生物岩溶的研究进行了较全面的综述。通过实地调查和室内研究,丰富了这方面的研究资料和理论,是目前仅有的生物岩溶专著。书中附有 33 个图版,26 幅插图和 13 张附表。本书可作为从事岩溶地质、生物成矿、文物保护、藻类、真菌、地衣的研究者和大专院校有关专业师生的参考用书。

国际地质对比计划第 299 项

生 物 岩 溶

王福星 曹建华 黄俊发

江利登 黄基富 王 晶

*

责任编辑:戴鸿麟 陈云程

地质出版社 出版发行

(北京和平里)

广西桂林市印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张: 8.375 字数: 200000

1993 年 6 月桂林第一版·1993 年 6 月桂林第一次印刷

印数: 1—1000 册 定价: 12.00 元

ISBN7-116-01426-8 / P·1166

序

岩溶作用是在岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的界面上，以碳、水、钙循环为主要形式的物质能量运移转换过程的表现。它同时发生在地表和地下，这不仅导致了岩溶和许多有用资源的形成，也带来了一系列岩溶环境问题。

回顾岩溶学的发展历史，以往的工作多着重于从水岩相互作用去研究岩溶的形成与发育。IGCP 299“地质、气候、水文与岩溶形成”和地矿部重点基础研究项目“中国岩溶形成与环境变化预测研究”把岩溶作用放到发生在岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的碳、水、钙循环中去研究，从而为加深对岩溶形成机理、岩溶发育分布规律的理解提供了新的思路。

新兴的生物岩溶学的研究对象是生物岩溶作用及其产物。这一作用是有机和无机的复杂过程，是岩溶形成发育过程的重要环节，并反馈于岩石圈、大气圈和水圈。环境变化可以改变生物的生存和演化，生物活动又可以改变环境。在四大圈之间的彼此关系中，生物圈与其它圈的相互关系是一个关键。生物岩溶作用包括两个方面，一方面生物生理生化过程分泌的大量有机酸和排泄物、生物呼吸作用放出的大量二氧化碳以及生物死亡分解后产生的大量腐殖酸参与了碳、水、钙循环，间接影响了溶蚀作用过程；另一方面，生物的某种习性，如高等植物的根劈和钻孔作用，低等地衣、藻类、真菌和一些动物的钻孔作用既可以直接破坏岩石，也同时起到扩大岩石表面溶蚀的效应。生物的这两方面溶蚀作用构成了岩溶作用的重要组成部分，不能再被忽视。同时，生物岩溶沉积作用也极为重要。

本书通过对我国亚热带地区大量的生物岩溶标本（包括沉积和溶蚀产物）的宏观和微观研究首次从形态学和生物学的角度全面、系统地详细描述了洞口石钟乳、洞口石刺、地表生物凹陷溶蚀痕迹（微溶孔、溶孔、溶坑和溶盆）的特征，进行了系统统计分类、揭示了它们的生物成因机理；对首次发现的洞穴叠层石进行了详细研究；对地衣、藻类和真菌的生物岩溶作用特征进行了专章论述；并回顾了生物岩溶研究历史。本书是目前第一部全面、系统、详细的生物岩溶研究专著，其成果和一些新的认识丰富了岩溶研究内容，对进一步完善岩溶学理论具有重要意义。

中国科学院学部委员、地矿部岩溶地质研究所教授 袁道先

1993.3

目 录

序

绪论	(1)
第一章 生物岩溶研究概况	(3)
第二章 研究区概况及研究方法	(10)
一、研究区地质、气候特征	(10)
(一) 广西天等地区	(10)
(二) 广西桂林地区	(11)
(三) 贵州茂兰喀斯特森林自然保护区	(12)
(四) 土耳其西南部	(12)
二、样品和研究方法	(12)
(一) 样品	(12)
(二) 研究方法	(14)
第三章 生物岩溶沉积	(16)
一、生物岩溶沉积碳酸盐岩	(16)
二、洞口向光石钟乳	(17)
(一) 向光石钟乳的特征	(17)
(二) 生物沉积构造	(17)
(三) 生物发育特征	(18)
(四) 形成机理讨论	(19)
三、洞口向光石鳞片——洞穴叠层石	(20)
(一) 石鳞片的生长环境	(21)
(二) 形态和内部构造	(21)
(三) 生物类型	(24)
(四) 形成机理讨论	(25)
四、岩溶区边石坝形成机理讨论	(26)
(一) 样品产地	(27)
(二) 样品描述	(27)
(三) 显微研究结果	(28)
(四) 生物成因讨论	(28)
五、洞穴钟乳石形成中的生物作用	(29)
(一) 钟乳石结构构造特点	(29)
(二) 钟乳石生物遗迹	(31)
(三) 钟乳石形成中的生物作用的可能性	(31)
第四章 生物岩溶溶蚀	(33)

一、洞口石刺	(33)
(一) 石刺的分布	(33)
(二) 石刺体的生物及其有关构造	(35)
(三) 石刺形成机理初探	(37)
二、生物岩溶微溶孔、溶孔、溶坑和溶盆	(38)
(一) 微溶孔	(39)
(二) 溶孔	(43)
(三) 溶坑	(45)
(四) 溶盆	(47)
三、桂林生物岩溶溶蚀率初探	(50)
第五章 藻类、地衣、苔藓和真菌的生物岩溶作用方式和结果	(53)
一、藻类	(54)
(一) 藻类对石灰岩的溶蚀作用	(54)
(二) 藻类对碳酸盐的沉淀作用	(55)
二、地衣	(57)
(一) 地衣对石灰岩的溶蚀作用	(57)
(二) 地衣对碳酸盐的沉淀作用	(61)
三、苔藓和真菌	(61)
小结和讨论	(63)
参考文献	(65)
后记	(69)
附录一 主要藻类描述	(71)
附录二 图版及其说明	(75)
英文摘要	(121)

CONTENT

PREFACE

INTRODUCTION	(1)
--------------------	-----

CHAPTER I STUDY ON BIOKARST	(3)
-----------------------------------	-----

CHAPTER II GEOLOGY, KARST GEOMORPHOLOGY AND CLIMATE

OF THE STUDIED AREAS	(10)
----------------------------	------

I. Geology and Climate	(10)
------------------------------	------

(I) Tiendeng area (Guangxi)	(10)
-----------------------------------	------

(II) Guilin area (Guangxi)	(11)
----------------------------------	------

(III) The Maolan Karst Forest Preserve (Guizhou)	(12)
--	------

(IV) South-west Turkey	(12)
------------------------------	------

II. Sampling and Methods	(12)
--------------------------------	------

(I) Sampling	(12)
--------------------	------

(II) Methods	(14)
--------------------	------

CHAPTER III BIOKARST DEPOSITION	(16)
---------------------------------------	------

I. Biokarst carbonate deposits	(16)
--------------------------------------	------

II. The light-oriented stalactite	(17)
---	------

(I) Characteristic of the light-oriented stalactite	(17)
---	------

(II) Organosedimentary structure	(17)
--	------

(III) Biology	(18)
---------------------	------

(IV) Discussion of formation mechanism	(19)
--	------

III. The new-finding karst cave stromatolites	(20)
---	------

(I) Growth environment	(21)
------------------------------	------

(II) Morphology and internal structure	(21)
--	------

(III) Biology	(24)
---------------------	------

(IV) Formation mechanism	(25)
--------------------------------	------

IV. Subaerial Rimstone	(26)
------------------------------	------

(I) Location	(27)
--------------------	------

(II) Description	(27)
------------------------	------

(III) Results	(28)
---------------------	------

(IV) Discussion of formation	(28)
------------------------------------	------

V. Microbial buildup possibility of some speleothems	(29)
--	------

(I) Characteristic of texture and structure	(29)
---	------

(II) Biological remains	(31)
-------------------------------	------

(III) Possible bio-process in the formation of some speleothems	(31)
---	------

CHAPTER IV BOKARST EROSION	(33)
I . The Cave Pinnacles	(33)
(I) Distribution of the cave pinnacles	(33)
(II) Micromorphological and biological characteristic of the cave pinnacle	(35)
(III) Formation	(37)
II . Subaerial Bioerosional depressed Micromorphologies	(38)
(I) Bioerosional microholes	(39)
(II) Bioerosional holes	(43)
(III) Bioerosional hollows	(45)
(IV) Bioerosional basins	(47)
III . Bioerosional rate in Guilin area	(50)
CHAPTER V BOKARST ACTIONS OF ALGAE, LICHENS,	
MOSES AND FUNGUS	(53)
I . Algae	(54)
(I) Algal erosion on limestone	(54)
(II) Algal deposition of carbonate	(55)
II . Lichen	(57)
(I) Lichen erosion on limestone	(57)
(II) Lichen deposition of carbonate	(61)
III . Mosses and fungus	(61)
DISCUSSION AND CONCLUSION	(63)
REFERENCES	(65)
DESCRIPTION OF THE MAIN ALGAE	(69)
EXPLANATION OF PLATES	(71)
PLATES I —XXXIII	(75)
ABSTRACT IN ENGLISH	(121)

绪 论

岩溶被定义为“水对可溶性岩石（碳酸盐岩、硫酸盐岩、卤化物岩等）进行以化学溶蚀作用为特征（并包括水的机械侵蚀和崩塌作用以及物质的携出、转移和再沉积）的综合地质作用，以及由此所产生的现象的统称”^{〔1〕}。因此，岩溶溶蚀和沉积形态形成的动力是水。一般认为，水中的二氧化碳含量起了决定性的作用。生物因素仅仅作为水中二氧化碳的来源被考虑；同时，岩溶机械破坏过程也有植物体、植物根的作用。在岩溶物质的携出、转移和再沉积方面，也主要考虑了介质水及其中二氧化碳分压的变化。然而，生物在岩溶溶蚀形态形成发育中的作用是很重要的，有直接和间接作用。间接作用主要是指生物的新陈代谢或死亡腐烂，为水提供了大量的二氧化碳，提高了水对可溶岩的溶蚀能力；直接作用是指大量的生物（藻类、真菌、地衣、细菌等）对可溶岩石的溶蚀和钻孔作用（主要通过生物化学作用）以及植物、动物对可溶岩石的破坏作用。在岩溶形成发育中，生物作用意义受生物发育程度和气候、地质、地貌和水文条件的控制。在某些生物繁盛和其它条件合适的地区，生物岩溶作用在岩溶形成发育中起着重要、甚至是决定性的作用。因此，在定义岩溶时，岩溶形成发育的动力应包括生物作用因素，是否称“水和生物因素”进行的“以化学溶蚀作用和生物化学作用为特征……”为好。生物岩溶应是指由生物引起的岩溶作用现象及其产物，即生物溶蚀、破坏可溶岩和沉淀形成次生化学沉积物的作用及其所遗留或形成的形态。Bull 等（1982）和 Viles（1984）对此也进行过讨论^{〔2, 3〕}。就目前所报道，在生物岩溶中起作用的生物包括有生物学中的各界：动物、植物、原核生物（蓝藻或蓝细菌和细菌）、原生生物和真菌的某些属种。地衣（藻类和真菌的共生体）、苔藓、藻类、真菌是生物岩溶作用中的重要分子，也是本书研究的主要对象。

近年来，不少论文介绍了生物岩溶研究的成果^{〔2, 3, 4〕}，提出了与生物岩溶作用有关的一些名词，如“植物岩溶”（phytokarst）^{〔4〕}。Folk 等人（1971, 1973）认为，对多孔蜂窝状岩石的形成起作用的是藻类生物，因此取名“植物岩溶”（严格讲，起作用的是非植物界的蓝藻原核生物）。虽然不少学者也常用此术语，但它不能概括所有生物的岩溶作用。Viles 1986 年提出过“藻岩溶”（algal karst）^{〔5〕}此术语更具有局限性，可以作为生物岩溶的次级分类术语。对一些受光影响的生物岩溶现象，有人命名为趋光溶痕（photokarren）^{〔3〕}。不同国别、不同语言的学者曾提出过许多不同的术语，但不具普遍性。我们认为，施奈德（1976）所提的“生物岩溶”（Biokarst）^{〔6〕}一词最能概括生物在岩溶中所起的作用。因此，我们采用这一术语。各种确切术语的提出，推动了该项研究的发展。

生物沉淀碳酸盐的研究很早就有人进行过。不少人认为，作为岩溶体的碳酸盐岩本身的沉积，大量也是由生物作用堆积和沉积形成的。在地球形成以后，几次大的全球性碳酸盐岩的形成，无不与当时地球上藻类和细菌的大量繁盛有关^{〔7〕}。不少证据表明，地球上不少的次生碳酸盐沉积^{〔8, 9, 10, 11〕}和沙漠环境中的叠层石^{〔12〕}、海相潮汐带叠层石^{〔13〕}、湖泊碳酸盐沉积^{〔8〕}等的形成均与生物的作用有关。据报道，甚至在黑暗无光的洞穴中，生物也参与了某些沉积物的形成，如铁锰氧化物^{〔14〕}和某些柱形钟乳石^{〔15, 16〕}。

在众多的岩溶溶蚀形态中, 石刺^[22]、溶盘^[17]、溶孔^[18, 19, 20, 21]和所谓“植物岩溶”的蜂窝状灰岩^[4]等的形成均被认为是受生物作用的控制。海滩钙质生物骨骼的破坏、粉碎和沙化^[22]、岩石的风化和土壤化^[19, 20]也被认为与生物作用有密切的关系。那么, 对岩溶宏观大形态、岩溶宏观地貌(如峰林、峰丛)的形成, 生物到底起到了什么作用? Folk 等人(1973)^[4]指出, 中国南方等地奇异锥状岩溶和塔状岩溶出现在富有植被的潮湿热带区域。这些地方恰是钻孔蓝藻繁盛的地区。他们认为:“或许钻孔藻的活动与最为壮观的岩溶景观类型的出现有某种联系。”岩溶环境被认为是脆弱的, 一旦被破坏, 则不易恢复, 植被很难生长。在岩溶发育的大部分地区, 山丘光秃, 旱涝灾害严重, 土地贫瘠。然而, 作者认为, 在形成众多奇形怪状的岩溶形态的当初, 植被是繁盛的, 气候温暖湿润, 生物对岩溶的形成发挥了重要的作用^[23]。在降雨量只有 100 mm/a 的中东干燥地区的灰岩表面, 见到了不少的生物钻孔。它们被认为是在比现在潮湿温暖的生物繁盛的环境中形成的^[24]。据作者考察, 生物钻孔现象见于几乎所有石灰岩、白云岩的露头分布区, 特别是在植被发育的温暖湿润地区。在几百年前用石灰岩石材建造的许多古建筑物石柱, 如土耳其西南部的古罗马帝国废墟和中国的一些古代动物石像上都可见到许多生物钻孔(图版Ⅲ-3)。著者认为, 在岩溶地貌宏观形态的形成过程中, 特别是在初期, 生物发挥了一定的作用。生物钻孔扩大了可溶岩石的溶蚀表面, 加速了岩石的溶蚀和岩溶化。

国内外学者对生物破坏岩石和沉积岩石的作用进行过多方面的研究, 归纳为以下几个方面: 一是以生物地层学、古环境学和生物演化为目的, 研究生物沉积碳酸盐岩(如叠层石、核形石等^[13]); 二是以生物成矿研究为目的(如生物矿化^[25]、生物成因的铁锰矿、磷矿^[7]等); 三是研究生物或生物化学风化作用和成土作用^[26]; 四是以研究生物本身的生理、生化性能为目的(如生物富集元素的习性、生物沉淀碳酸钙的本能)^[27, 28]; 五是以生态和古地理环境研究为目的的生物钻孔研究^[29]; 六是从岩溶的角度, 研究生物岩溶沉积作用(如石灰华、月奶石、泉华)^[30]和生物岩溶溶蚀作用(如石刺、溶孔等)^[31]。从岩溶的角度研究生物岩溶作用, 迄今还未进入全面系统阶段。我国近年来有人进行过少量工作^[21, 32]。作者在研究中也撰写了一些论文^{●[33, 34]}。

本书系统地介绍了国内外生物岩溶研究概况, 对生物岩溶沉积物和溶蚀产物进行了较详细的扫描电镜、双目实体镜、岩石薄片和生物薄片的研究, 对一些主要的生物岩溶现象的形成机理提出了新的认识; 系统地总结了与生物岩溶作用有关的几种生物类型及其作用, 进行了一些生物岩溶溶蚀量和溶蚀速率的概略计算。在研究中, 发现并研究了新的洞口生物岩溶沉积物——石鳞片。从其内部结构构造、生物沉淀成因的亮暗分明交互纹层和生物遗迹特征看, 石鳞片的形成机理类似于叠层石, 可以认为是在洞口环境中形成的滴水陆相叠层石, 或称为洞穴叠层石。对洞穴次生化学沉积物的内部结构构造进行了研究, 并根据亮、暗颗粒的形态大小及其分布, 划分出了九个微构造类型。它们的特征与叠层石的微构造特征极为相似。本书还通过对生物岩溶溶蚀形态(孔)直径的大量统计, 以统计直径范围的集中分区, 划分出了微溶孔、溶孔、溶坑和溶盆四种溶蚀形态类型。

●王福星、曹建华、江利登、黄俊发, 1991, 生物成因洞穴石鳞片初探。中国地质学会洞穴研究会第一层年会论文集, 岩溶地质研究所, 44—50 页; 曹建华、王福星、王晶、黄基富, 1991, 洞穴生物岩溶溶蚀产物——石刺。同上, 51—58 页。

第一章 生物岩溶研究概况

生物对碳酸盐(钙)的作用很早就为人们所注意,有人提到过石头房屋墙上的“真菌侵染”,“凹陷”比墙表面要深^[26]。古代埃及、希腊和罗马的科学家们也注意到了材料中的“生物循环”。1250年, Magnus 提出了“关于生物化学循环”的问题。1535年, Bombatus 描述到“河流砾石表面的粘液可以转变为石头,并胶结砾石成硬岩石”,他将粘液进行实验室培养,制成了类似的岩石。1584年, Bruno 全面论述了地球表层及空间中的生命和生物地球化学循环之间的密切关系。他的许多观点为后来许多学者所接受,并传播迄今。

现代生物岩溶现象的详细研究始于19世纪末至20世纪早期。Cohn 等人(1862年)将生物成因沉积岩溶景观与植物当成一个组合来研究。Sollas (1880年)认为,石灰岩表面的微小凹坑是地衣对石灰岩的侵蚀造成的。他的研究被认为是具有先导性的。自那时开始,生物岩溶的许多不同类型陆续被认识,并出现了不少新观点。

60年代初期,扫描电子显微镜的出现,促进了生物岩溶的研究。研究领域从海滨到内陆,从高山到河流、湖泊,从地表到地下(土壤覆盖下的岩石和洞穴)(见表1)。随研

表1 国内、外主要生物岩溶研究点地理分布

Table 1 Geographical distribution of the main biokarst research areas

环 境	地 点	基 质	作 者	生物类型	研 究 内 容
大陆架—斜坡潮间→530 m	波多黎各	钙质沉积物	D. A. Budd, R. D. Perkins, 1980 ⁽²²⁹⁾	蓝藻、绿藻、红藻、真菌、海绵	上阳光带(<20 m)以蓝藻为主;下阳光带(20—85 m)为绿藻;无光带为真菌
大陆架海盆底部	卡罗来纳陆架	钙质碎屑	R. D. Perkins, S. D. Halsey, 1971 ⁽²²²⁾	真菌、藻	生物作用加速碳酸盐碎屑的沙化
大陆架潮间—潮下	加勒比海 St. Croix	动物壳、无机方解石	R. D. Perkins, C. I. Tsentas, 1976 ⁽³³⁵⁾	蓝藻、绿藻、红藻、真菌	样品置于潮间—30 m 深处, 9—540 d。电镜研究钻孔,主要是蓝藻,其次是绿藻,再次是红藻、真菌。10%样品 9 d 后为石内藻殖居,4 个月后,95%为石内藻殖居,具古生态意义
中纬度 N 48° 15' 潮间—潮下	英属哥伦比亚 Juan de Fuca 海峡岸边、Gulf 群岛	软体动物壳碎屑	C. M. Henderson, W. B. Styan, 1982 ⁽³³⁶⁾	绿藻、蓝藻、红藻、多毛类动物	深<30 m,石内藻生物减少,可能是由于环境动荡,或因为壳较新鲜,>45 m(红藻最深)见不少石内藻生物
浅潮下环境	牙麦加 Discovery 湾	冰洲石晶体	D. R. Kobluk, M. J. Risk, 1977 ⁽³⁷⁾	绿藻	藻沉淀碳酸钙、镁
潮间—潮下	中国江苏连云港	碳酸盐基质	钱凯先、朱浩然 1982 ⁽³⁸⁾	藻类	潮上、潮间—蓝藻;潮下一蓝、绿、红藻;潮下一蓝藻

续表

环 境	地 点	基 质	作 者	生物类型	研 究 内 容
大陆边缘	南卡罗来纳— 中佛罗里达	碳酸钙 沉积物	B. D. Edwards, R. D. Perkins, 1974 ⁽³⁹⁾	真 菌、藻 类、海绵	生物与钻孔类型: 丝状钻孔 ($d=1-4\ \mu\text{m}$) —真菌; 放射钻孔 ($8-10\ \mu\text{m}$) —分节绿藻; 星形钻孔 (中心直径 $40-50\ \mu\text{m}$) —真菌; 管形钻孔 ($15-20\ \mu\text{m}$) —管状绿藻; 刺形钻孔 ($20-30\ \mu\text{m}$) —海绵, 具古生态意义
沙坝后沉积 界面堤礁	南卡罗来纳 州伯利兹	动物壳、 方解石	J. A. May, R. D. Perkins, 1979 ⁽⁴⁰⁾	真 菌、藻 类、细菌、 海绵	不同气候带 (热带—温带), 不同 深度 (潮间— $30.5\ \text{m}$) 发育不同的钻 孔生物组合。沉积界面以下的样 品, 石内生物组合有限
礁	澳大利亚 Arlington	礁	W. S. Rooney, R. D. Perkins, 1986 ⁽⁴¹⁾	真 菌、红 藻、绿藻、 海绵	红藻在深度 $< 18\ \text{m}$ 处, 海绵 $> 18\ \text{m}$ 处, 绿藻可达 $30\ \text{m}$ 处, 可作为 深度指示
地表与潮间 —潮下环境	印度洋塞舌 尔、加勒比 海卡伊曼岛	海滩岩、胶 结 海 滩、 砂、石灰岩 块	H. A. Viles, T. Spencer, 1986 ⁽⁵⁾	钻 孔 蓝 藻、 动物	潮间带蓝藻在石灰质基质表面的 殖居及其作用, 实地研究及石灰岩 块的试验
海岸带	地中海西部	钙结层 灰质壳	C. F. Klappa, 1979 ⁽¹²⁾	地 衣 (藻 类、真菌)	地衣叠层石
海岸带	印度洋 塞舌尔	石灰岩 (珊瑚礁)	H. A. Viles, 1987 ⁽¹⁸⁾	蓝藻	生物钻孔深度可达 $800\ \mu\text{m}$ 。电镜 研究
海滩	加勒比海 巴哈马滩	鲕粒	S. Margolis, F. R. W. Rex, 1971 ⁽⁴²⁾	蓝藻	藻类钻孔及微晶套的形成。电镜 研究
海岛地表	加勒比海 卡伊曼群岛	石灰岩	R. L. Folk, H. H. Roberts, C. H. Moore, 1973 ⁽⁴⁾	蓝藻	1971 年提出“植物岩溶”一词, 1973 年详细描述
海岸带	地中海西部	钙质壳中 的藻体	C. F. Klappa, 1978 ⁽⁴³⁾	<i>Microcodium</i>	<i>Microcodium</i> 的钙化 (岩化)
海岸带 海 洋→泻湖 间, 降雨 $1071\ \text{mm}/\text{a}$	印度洋 Aldabra Atoll	钙质	H. A. Viles, 1988 ⁽²⁰⁾	蓝 细 菌、动 物	1. 海岸陆地藻残居低于潮间带 10 倍; 2. 年降雨量的增加使蓝细菌活动 增加; 3. 从海洋到泻湖间海岸带, 不同 岩性、特征表面, 不同环境的研究
地表 渗滤 成岩环境	佛罗里达	石灰岩表 面、钙质壳	C. F. Kahle, 1977 ⁽⁴⁴⁾	藻类、真菌	钙质壳生物成因
山地 海拔 $700-800\ \text{m}$ 降雨 $550-100\ \text{mm}/\text{a}$	Judan 山→地 中海 (距海 $60\ \text{km}$)	石灰岩	A. Danin, R. Gerson, K. Marton, J. Garty, 1982 ⁽²⁴⁾	地衣、蓝藻	海拔高度和降雨量的不同, 钻孔 特征、深度、密度也不同
山地	英格兰、 Mendip	石灰岩	H. A. Viles, 1987 ⁽⁴⁵⁾	地衣	双目实体镜与电镜研究, 定量分 析地衣分布及其作用。地衣下有真 菌和藻钻孔, 深可达 $2\ \text{m}$

续表

环 境	地 点	基 质	作 者	生物类型	研 究 内 容
陆地地表	意大利中部、 美国中西部	石灰华	H. S. Chafetz, R. L. Folk, 1984 ⁽⁹⁾	细菌	详细研究石灰华生物结构构造, 结论为生物成因
沙漠高地	沙物阿拉伯 内夫得高地	石灰岩	A. Danin, J. Garty, 1983 ⁽⁴⁶⁾	地衣、蓝细 菌	生物钻孔对风化、地貌和气候研 究的意义
高地 海拔 700—800 m 降雨 206— 1091 mm/a	耶路撒冷	石灰岩 建筑物	A. Danin, 1983 ⁽⁴⁷⁾	蓝细菌	400—700 a 前的建材, 没有蓝细 菌殖居, 环境严酷, 不风化。被生 物殖居的岩石 (与建材同母岩) 有 深 2—4 mm 孔
沙漠 (一年仅几 小时降雨)	美国加州 Borrego 沙漠、中东 西奈沙漠	沙漠叠层石	W. E. Krumbein, G. Giele, 1979 ⁽⁴⁸⁾	蓝细菌 <i>Pleurocapsa</i> sp.	<i>Pleurocapsa</i> 钙化作用与沙漠叠层 石的生物作用
湖泊	美国加州 Mono 湖	泉华	D. W. Scholl, W. H. Taft, 1964 ⁽¹⁰⁾	蓝藻	泉华内部结构构造的生物成因, 泉华的生物成因作用
湖泊及其 支流河	南斯拉夫 Plitvice 国家公园	石灰华及 湖泊碳酸 盐沉积	K. C. Emeis, H. H. Richnow, S. Kempe, 1987 ⁽⁸⁾	硅藻、蓝细 菌、细菌	详细研究石灰华的生物成因。通 过试验方法证实生物在石灰华形成 中的作用
洞穴	美国衣阿华州 Dubuque	铁锰氧化物	S. B. Peck, 1986 ⁽¹⁴⁾	细菌	氧氨铁锰氧化物常呈石钟乳、壁 壳和厚沉积层, 含丰富的显微、弯 曲、杆形铁、锰沉积细菌鞘。矿物 起码部分是细菌成因
洞穴	美国弗吉 尼亚州西部	锰矿	G. W. Moore, 1981 ⁽⁴⁹⁾	细菌	石灰岩洞穴中, 锰矿物主要是钠 水锰矿。还原锰来自腐烂叶子, 氧 化性洞穴溪水, 导致水锰矿饱和, 细菌促使其沉淀成钠水锰矿
洞穴	美国加州、 新墨西哥 州, 西弗 吉尼亚州	锰矿物、 月奶石	G. W. Moore, G. Nicholas, F. S. C. Sullivan, 1980 ⁽³⁰⁾	微植物、放 线菌	综合性: 洞穴微植物群落、锰矿 物、月奶石、洞穴医学 (放线菌)
洞穴	法国 Vitalis 洞、意大利 Toirano 洞	边石坝 “棍” (柱形体)	J. Adolphe, J. Choppy, J. Loubiere, J. Paradas, 1991 ⁽¹⁵⁾	细菌	洞穴边石坝壁上柱形沉积物的细 菌成因

究工作的不断深入提高, 出现了不少生物岩溶名词词汇, 用来定义各种生物岩溶类型。在现代岩溶学的发展过程中, 以各种目的研究生物作用与碳酸盐岩 (钙) 的溶蚀和沉积的关系, 促进了生物岩溶研究的发展。使生物岩溶研究逐步成为岩溶学领域中的一部分岩溶学与生物学的边缘学科。

60 年代中, Oppenheimer (1961)⁽⁵⁰⁾ 研究了加勒比海安德罗斯岛巴哈马滩的球形文

石体(后来被定为鲕粒),发现了其中的棒形细菌,提出了在文石晶体生长过程中细菌的影响。Scholl 和 Taft (1964)^[10]研究了美国加州 Mono 湖的泉华,发现其中有许多蓝藻丝状和球形,它们组成了泉华结构构造的支架,认为其形成与蓝藻有关。Jones (1965)^[51]在英格兰约克郡观察到了石灰岩表面的溶痕,认为是在土壤覆盖下生物作用形成的。Neumann (1968)^[52]提出了海岸溶痕(Costal karren)一词,提出了其形成过程中生物作用的重要性。

70 和 80 年代是生物岩溶研究发展较快的时代,真正从生物岩溶的角度研究生物岩溶的学者不断增加;对生物岩溶提出了系统的分类,并对一些名词术语进行了讨论;许多定性和定量的研究初步导出了生物岩溶的理论,出现了不少的生物岩溶综合性论文。

Folk 等(1971、1973 年)较详细地研究了加勒比海卡伊曼岛上岩溶地貌(渐新世至中新世石灰岩),将生物岩溶的微观作用特征与独特的蜂窝状石牙地貌的形成联系起来,认为由蓝藻对石灰岩进行钻孔而形成黑色、无定向、多孔蜂窝状的生物风化物是形成卡伊曼群岛上高差达 3 m 的石牙地貌的原因,并首次命名为植物岩溶^[4]。Golubic 等人(1975 年)从生物学的角度综述了蓝藻对碳酸盐岩的沉积、侵蚀本能。认为碳酸钙的生物沉积、溶蚀作用取决于生物本身的特性及微环境条件的影响^[53]。Schneider (1976、1977 年)研究了石灰岩海岸破坏的生物和非生物因素,第一次提出了“生物岩溶”一词;同时,还较系统地论述了生物在淡水和海水环境中对碳酸盐岩的破坏和堆积作用^[16],并认为生物对碳酸盐岩的堆积方式有四种:①颗粒的捕获和粘结(Trapping and binding);②胶结作用或同化作用(Assimilation);③结壳作用(Encrustation);④粘液中碳酸钙的分泌作用(Secretion)。生物对碳酸盐岩的破坏作用有:①石内微生物的生物溶蚀作用(Bio-logical corrosion),为无机溶解作用(尤其陆地环境)提供了有效的表面;②生物磨蚀作用(Biological abrasion),使碳酸盐岩表面变松软,经侵蚀破坏而形成的地貌形态称之为生物岩溶(Biokarst)^[6]。在这一时期 Edwards & Perkins (1974)^[54]、Kobluk & Risk (1977)^[38]、Frydl & Stearn (1978)^[55]、Kahle(1977)^[56]、Klappa (1978、1979)^[12,43]和 May & Perkins (1979)^[40]等先后分别著文介绍了他们在澳大利亚、加勒比海岸和一些岛上及地中海西部对海滩岩、大陆架潮间下带、生物礁和陆地上的各种环境中碳酸钙沉积物、地衣叠层石和碳酸盐岩及钙质生物壳的钻孔与蓝藻(蓝细菌)、真菌、地衣、细菌和某些钻孔动物活动的密切关系。他们的研究除促进了生物岩溶的研究外,其研究成果还为研究区古生态环境的恢复提供了重要的证据。

进入 80 年代,生物岩溶研究有几个特点:第一是继续更深入、更广泛细致地进行生物岩溶沉积和溶蚀研究。已报道的文献反映出,研究区包括了陆表高地环境^[9,20,46,47],也包括了低纬度^[5,29]和中纬度^[39]的浅海(潮上、潮间、潮下、陆架至陆坡)环境,同时还有河湖环境^[8];第二是在研究方法上更多地运用了扫描电子显微镜^[18,21];一些学者进行了一些室内和野外生物岩溶机理模拟试验研究^[8],从而为生物岩溶理论的建立获得了重要的根据;第三是在前人研究的基础上,发表了一些生物岩溶研究的总结性、综合性论文;提出了:①生物殖居岩石的生态特征,划分为表生、穴生和内生三种^[56];②生物溶蚀、钻孔在风化作用中的重要意义^[26,57];③对已出现的生物岩溶名词、概念、形态类型、成因机理等方面进行了讨论^[3,31],为统一生物岩溶划分类型,提高研究程度和建立生物岩溶理论打下了基础;第四,生物岩溶的研究延续到了黑暗环境的洞穴中^[14,15,30,49,58,59];洞穴

内,被认为是生物岩溶沉积产物者主要有月奶石、边石坝上的柱形体、铁锰氧化物、石膏等;与这类沉积物的形成有关的生物主要是细菌;第五,对生物岩溶形态进行了一些定量的研究。根据生物溶蚀孔的深度与生物类型和降雨量的关系总结出了一些规律^[24];探讨了洞口石刺距洞口的距离与光线强弱和石刺的形态的关系^[2]。

在我国,对生物岩溶现象的观察和初步研究始于80年代初。邓自强(1982)^[60]从水化学、地质学的角度对广西弄岗自然保护区的植被对岩溶发育的作用进行了论述。钱凯先和朱浩然(1982)^[38]从生物学的角度,分析研究了江苏连云港海岸钻钙藻的生态特征。通过系统采样,列举了钻钙藻一些门类。其分布特点是:潮上带、潮间带为蓝藻;潮下带为蓝藻、绿藻和红藻;再往下又为蓝藻。朱德浩(1986)^[61]、朱学稳(1990)^[62]、袁道先(1989)^[1]也对一些地表生物岩溶形态进行过报道。张捷(1991)在国内首次从生物岩溶学的角度对地衣与岩溶发育之间的关系进行了研究^[21]。安玉国等(1991)发表了贵州织金打鸡洞中滴水沉积物的生物成因研究成果^[32]。作者从1990年开始,对中国南方的生物岩溶沉积和溶蚀进行了研究……。然而生物岩溶学的研究在中国毕竟是一个薄弱环节,而且在很多方面的研究仍然是空白。

在诸多研究者近一个世纪的努力下,生物岩溶概念由单一的“植物”丝状体钻孔溶蚀作用发展到有动、植物参与的,包括溶蚀和沉积的生物岩溶;研究内容也由单纯从生物学的角度去研究生物风化、生物沉积作用,发展到将生物作用与岩溶地质、地貌相结合,研究生物作用与岩溶形成、发育之间的关系。但是,无论是研究区的地理分布,还是研究者人数和研究范围都是有限的。还未能将生物作用与岩溶环境紧密相结合去研究生物作用在各种环境中对岩溶形成、发育的影响。目前,生物岩溶研究有两个方面值得强调。

(1) 概念及研究目的

生物岩溶是生物学与岩溶学相结合、相交叉的一门岩溶学的分支学科。其研究所必备的基本理论和基本方法依赖于生物学、岩溶学及方法学的有机结合(图1)。研究总目标

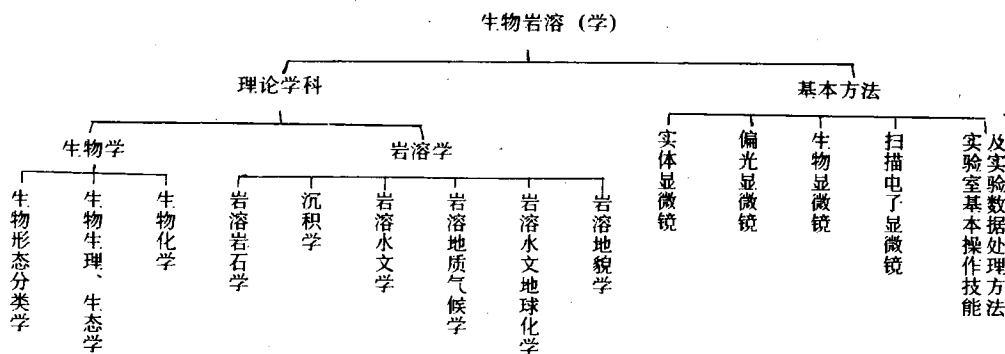


图 1a 生物岩溶(学)的基础理论学科及基本方法

Fig. 1a Foundation theoretical subjects and methods on biokarst

是解决生物对岩溶形成、发育所起的作用和机理;要解决的主要问题是各不同岩溶环境中生物岩溶作用方式、作用程度和作用产物,并探讨岩溶环境中生物圈的特征。

①系统内部元素之间相互关系的研究，即研究参与生物岩溶作用的生物类型及其生理生态特征、可溶岩的岩石结构构造、力学性质等与可溶岩之间的关系，即生物如何使可溶岩发生溶蚀和沉积，可溶岩的性质又如何影响生物的生理、生态习性。如高等植物的根劈作用和溶蚀作用，又如居栖于石灰岩表面的藻类生物的穴居、表居或内居习性（见第五章）。

②研究外部环境因子对系统发生影响的规律性，亦即光、温度、湿度、水、地貌、地质、土壤、空气与生物岩溶作用之间存在的内在联系。如石刺的研究表明，由洞向洞内延伸，光线渐弱，石刺的形状、大小、分布密度和方向等特征呈现出有规律的变化（见第四章）。这表明了对生物岩溶系统输入什么样的物质、能量和信息，通过系统内部元素的协调，就会产生相应的输出——生物岩溶作用产物。

③系统的输出——生物岩溶作用产物的研究，是研究的落脚点和重点。它集中了整个生物岩溶系统的信息，通过它可以揭开生物岩溶作用之谜。生物岩溶作用产物的类型是多种多样的，从成因上可分为两大类：沉积形态和溶蚀形态。最近研究表明，还存在着多种类型的微形态。这些形态都与特定的生物组合以及环境因子的变化存在密切的关系。生物岩溶微形态与非生物成因的宏观形态之间存在的差异，也是生物岩溶研究的范畴。

我国岩溶发育十分广泛，碳酸盐岩面积大而连续。相信生物岩溶理论的发展、完善和重要理论问题的突破将在中国出现，并将极大地推动岩溶学的发展和进步。

第二章 研究区概况及研究方法

一、研究区地质、气候特征

研究区地处广西壮族自治区东北部的桂林市、阳朔县、恭城县和西南部的天等县；贵州高原南部荔波县茂兰喀斯特森林自然保护区。作为研究参考，在山东省沂源县和土耳其西南部，以及四川省彭县等地采集了少量样品。

(一) 广西天等地区

天等县位于广西壮族自治区西南部，南宁市以西约 180 km。研究点位于天等县城附近的向都镇、龙茗镇、进结镇、宁干乡和福新乡等地。地势中南部高，东部低。水文网以小溪为主，地下水丰富。

1. 地质地貌概况

研究区位于右江褶皱区北隆起褶皱束的北缘，红水河褶皱束南侧，经历了加里东期、印支—燕山期和喜山期构造运动。本区受德保山字型构造和右江构造体系复合的影响，构造较复杂，其中以东西向构造最发育。如南部龙茗一带的背斜，核部由寒武系碎屑岩组成，两翼由中、上泥盆统灰岩组成。其次是北西向构造，由褶皱和断裂组成。褶皱开阔，由泥盆、石炭、二叠、三叠系等组成，主要分布于北部。与本区岩溶发育有关的地层主要是泥盆系中、上统，石炭系和二叠系下统^[63]。

(1) 泥盆系中统东岗岭组以灰岩为主，夹白云质灰岩，厚 210 m 左右。

(2) 泥盆系上统“榴江组”以厚层灰岩为主，其次是白云质灰岩、白云岩，厚 147—1156 m。

(3) 石炭系下统（岩关阶和大塘阶）以厚层灰岩为主，夹生物碎屑灰岩和少量白云岩、硅质岩，厚 209—841 m。

(4) 石炭系中、上统，厚层灰岩、白云质灰岩夹少量透镜状白云岩、燧石灰岩、硅质岩，厚 333—848 m。

(5) 二叠系下统栖霞组和茅口组，深灰、灰黑色含燧石灰岩夹薄层状硅质岩，厚 150—560 m。

2. 气候

研究区属亚热带季风气候，四季分明，年平均气温为 20℃ 左右，6—8 月气温最高，可达 38.6℃，1—2 月最低，达 -1℃。雨量充沛，多年平均降水量为 1450 mm，降水多集中于 6—8 月。本区气候有利于生物岩溶的发育。

3. 岩溶地貌特征

本区属桂西南岩溶山地，地貌以峰丛洼地、谷地、峰林谷地、孤峰残丘平原为主，海拔在 400—800 m，最高峰达 1073 m，研究点相对高差达 200 m。