

洞穴黑暗带中是否有叠层石?^{*}

王福星 曹建华 黄俊发

(国土资源部岩溶地质研究所, 桂林 541004)

摘 要 本文从叠层石概念入手,通过介绍前人大量关于蓝藻(蓝细菌)和细菌在弱光和黑暗环境中的习性,及其在叠层石形成中的作用,讨论了叠层石形成的两大影响要素:生物控制和环境影响。并提出了以模拟试验的有效方法论证叠层石在洞穴黑暗带中形成的可能性。

关键词 叠层石 岩溶洞穴 黑暗带 蓝藻

迄今已有不少论文涉及洞穴生物成因的次生化学沉积物^[1,2],并普遍认为它们是细菌和真菌沉淀碳酸钙的产物。从目前资料看,蓝藻或蓝细菌在地下洞穴中沉淀碳酸钙的作用,较多地发生于洞穴弱光带(多为近洞口处),其产物包括洞口钟乳石、洞口叠层石等^[3]。关于洞穴黑暗带中的叠层石研究,报道得很少。贵州织金洞中许多钟乳石被认为是蓝藻成因的叠层石^[4],这意味着蓝藻(蓝细菌)不仅可以在黑暗环境中大量繁殖,并沉淀大量碳酸钙,而且还可以形成大量的叠层石。一般认为,蓝藻(蓝细菌)等沉淀碳酸盐岩的机理主要是靠其光合作用(新陈代谢)过程中吸收水中的 CO₂,导致水中 CO₂分压降低,使得碳酸钙在水中的溶解度降低而析出沉淀。光合作用需靠光,而黑暗洞穴中又无光,是什么样的机理使蓝藻(蓝细菌)在黑暗洞穴中不仅沉淀了碳酸钙,而且还可以形成叠层石呢?本文就此提出一些看法供讨论。

1 什么是叠层石?

叠层石(stromatolite)一词是 Kalkowsky 于 1908 年在研究法国三叠纪地层中一种成层构造时提出。后来人们把由亮、暗纹层组成的生物沉积构造称为叠层石。它们已在海岸的潮上、潮间和潮下带及深海中,在陆地上湖泊、河流、干旱地区甚至沙漠,以及在洞穴弱光带中被发现并加以研究。然而,分布最广、研究较多的是古代和现代海相叠层石。

叠层石是蓝藻(蓝细菌)和细菌生命活动及沉积作用的综合产物,被称为生物沉积构造(organosedimentary structure),形态上呈分叉或不分叉的柱形、瘤形、结核形、层形等。自然界中还有一种分布广泛的席状生物沉积构造,称为藻席或微生物席(algal-mat 或 microbial-

* 本项目获地矿部岩溶动力学开放研究实验室赞助。

第一作者简介:王福星,男,1939年生,研究员,1965年毕业于北京地质学院地质测量及找矿专业。从事过前寒武纪生物地层学,现从事生物岩溶、洞穴和洞穴生物、洞穴开发研究。通讯地址:广西桂林七星路50号。

mat), 它们实际上就是叠层石的层状单元, 在一定条件下可发展成叠层石。简单说, 从形态上(宏观上)判断叠层石, 要看其是否具成层性, 是否由一层亮和一层暗的非生物和生物纹层交互组成。亮纹层是由生物作用和沉积作用促成碳酸钙沉淀形成的, 而暗纹层是由生物遗体及其分解产物(有机物质)等为主组成。从微观上, 叠层石的暗纹层由各种微构造组成, 这些微构造是由不同的藻和细菌种类的活动形成; 而其亮纹层则多由亮晶方解石组成。叠层石的纹层, 不论是亮的还是暗的, 均是由生物参与作用形成的。由于叠层石是由生物和生态环境相互作用协同形成的, 因此, 对叠层石的研究不仅对生态环境的研究(特别是古环境)有重大意义, 而且有些叠层石在生物地层学的研究中(如前寒武系)起到了极重要的作用。

叠层石是生物作用形成生的生物沉积构造, 它不是生物本身而是一种或多种生物活动, 在一定的生态环境的控制下沉淀碳酸盐岩形成的沉积构造。然而, 不是所有由生物作用沉淀形成的沉积构造都是叠层石, 如一种由生物作用形成的不具层纹的构造, 被命名为凝块石(Thrombolite)^[5]和许多泉华(tufa)、钙质壳(caliche)、边石坝(rim stone)、洞外钟乳石等, 以及洞穴中的月奶石(monmilk)、铁锰沉积、洞穴的某些柱形体、洞口的钟乳石等, 都至少部分地由生物作用形成^[1, 2, 3, 6, 7], 它们中不少也有成层构造, 但都不是严格的叠层石。

经多年的研究认为, 不管是化石叠层石还是现代叠层石, 参与作用的生物主要是蓝藻或蓝细菌和细菌微生物^[8]。现代地表叠层石中还有绿藻、硅藻等真核藻类。一些由地衣形成的特殊叠层石称为地衣叠层石^[9]。经研究苔藓、地衣也参与某些叠层石的形成^[3]。组成叠层石的矿物绝大部分是方解石, 部分为白云石, 但也有特殊环境下的叠层石含有大量硅质、锰质、磷质等, 分别称其为硅叠层石、锰叠层石和磷叠层石等。

2 黑暗洞穴中有叠层石建造的生物依据

2.1 蓝藻(蓝细菌)

论证黑暗洞穴中有无蓝藻(蓝细菌)形成的叠层石, 首先要论证光合作用蓝藻(蓝细菌)能否生长在洞穴黑暗带中。

蓝藻是较低等藻类, 是地球早期最早出现的自养原核生物。原核生物只包括蓝藻和细菌两类, 其特点是细胞中的细胞核无核膜, 不成核, 而只是核物质。蓝藻许多特征和性能与细菌相似, 所以又称其为蓝细菌(Cyanophyta=Cyanobacteria), 二者的重要区别是蓝藻有叶绿素, 可进行光合作用。澳大利亚和南非 35 亿年左右前寒武纪地层中发现的地球生命的最早记录, 多为蓝藻(蓝细菌)和细菌, 它们曾统治地球长达 20 亿年(15 亿年前地球上才开始有真核生物)。地球生命演化中重要的阶段之一是由异养生物演化到自养生物, 即从只能靠现存的有机物质作为碳源, 演化成能靠 CO₂ 光合形成营养。细菌是异养生物, 蓝藻是最原始的自养生物, 或者说, 蓝藻中的最原始属种, 既有细菌、有异养生物的特性, 也有光合藻类、有自养生物的特性。有学者早就指出, 有些蓝藻的种, 普遍缺乏三羧酸环中的一个关键酶, 即 α -酮戊二酸氢酶, 它们与厌氧性化能自养微生物和甲基营养微生物一样, 可以利用有机碳及能源、葡萄糖和少数糖类。因此, 蓝藻是混合营养, 既可以自养(利用 CO₂ 和水, 靠光的作用营养), 也可以利用有机物质异养营养^[8, 10, 11]。

据报道, 现实中蓝藻可以在低光度条件下生长, 如在光强度仅为水表面的 1% 的海洋 100m 深处, 光强度仅为水表面 10% 的湖泊 10m 深处, 在大于 2m 深的土壤中, 以及厚的生物

席中生长。蓝藻的光合作用色素的藻胆素使它们在低光度条件下具有较广的生态优势,只是其生长速度比在光照下低得多。而且,人们也发现,蓝藻可以在完全无光的黑暗水下、土壤下和洞穴中生长,可以异养地生长于有有机物质存在的黑暗中。早在1955年及以后几年,国外就有人在黑暗洞穴中发现过蓝藻等微型植物^[12,13]。然而,与本文讨论的主题有关的是,需要论证与叠层石形成有关的少数几种蓝藻,是否也能够活跃地生存于洞穴黑暗带中。

2.2 细菌

细菌种类多、量大、分布广泛。在许多矿物、岩石的形成中,细菌起了重大的作用。细菌氧化形成铁锰氧化物,硫酸还原细菌形成硫化矿床,细菌作用形成狗头金等,是众所周知的。据研究,黑暗洞穴中细菌分布广泛,其中次生化学沉积物的某些类型(如月奶石)也是细菌和真菌作用形成的。

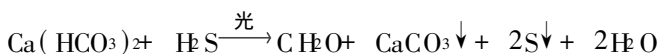
细菌参与叠层石的形成已有不少研究。大洋底(5000~6000m深处)铁锰金属结核实际上是细菌将二价锰氧化成四价锰而沉淀形成的具成层结核,是一种特殊的叠层石^[14]。在古代和现代叠层石的研究中(包括藻席),也发现了与藻类共生的细菌。那么细菌在叠层石的形成中到底起到什么作用?

前已述,叠层石的形成与蓝藻光合作用沉淀碳酸钙有密切的关系。这种机理普遍被应用于其它非叠层石生物成因碳酸钙沉积构造中(如泉华、钙质壳等^[6,7])。然而,在海相叠层石或藻席的研究中人们发现藻席层自上而下分层如下:①最顶层是新的席层,由丝状蓝细菌组成;②其下是以光合细菌占主导的层;③再下是厌氧异养生物和硫酸盐-还原细菌的层。因此,整个层显示出由绿色-紫粉红色到黑色的色调变化^[15],反映了从顶层到底层由蓝细菌-光合细菌-厌氧异养微生物的变化。此外人们还发现:①在生物(藻)席中,随深度的增加,碳酸盐岩含量增加;②大部分碳酸盐岩沉淀于无光带;③只有死亡的蓝细菌丝状体才钙化;④碳酸盐的沉淀作用在死亡蓝细菌丝状体上比在方解石表面均匀得多;⑤藻席表面不石化(钙化)^[15]。很显然,似乎是沉淀碳酸盐岩的主要是细菌而不是活蓝细菌(蓝藻)。在陆表泉华、石灰华和湖泊碳酸盐沉积的研究中,普遍结论是:①碳酸盐岩(钙)的沉积是有机和无机综合作用的结果,如在泉的出口处发生的泉华沉积,由于水温度高,泉水刚出口CO₂释放迅速等条件使碳酸钙(非生物)无机沉淀迅速,而随着泉水的流淌,水温逐渐降低,生物逐渐繁盛,则生物沉淀趋于主导;②蓝细菌(蓝藻)和其它藻类(绿藻、硅藻、红藻),以及其它生物(如地衣、苔藓)凭借光合作用可以沉淀碳酸钙,凭借它们中有些种的鞘粘液,可以捕捉、粘结水中的碳酸盐岩微粒,结壳于植物体上。而光合或非光合细菌也积极沉淀碳酸钙,如在一些泉华中,细菌沉淀碳酸钙形成丛体,丛体集成灌木状体,由灌木状体排列成暗色生物纹层。这种层相似于叠层石纹层^[16]。

因此,在生物沉淀碳酸盐的过程中,细菌是很重要的因素。

在富硫化物的热泉水中,或者在处于还原环境、充满腐烂生物体的藻席厌氧下部层中,厌氧光合细菌很繁盛,它们吸收、固定CO₂,方程如下:

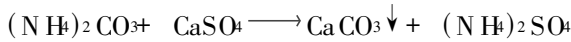
(1) 硫氧化细菌是光合性的,它们用光的能量从H₂S中取出H,从HCO₃⁻中取得C,合成营养,在这个过程中沉淀碳酸钙^[16]:



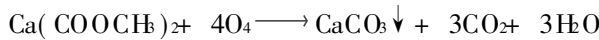
(2) 硫酸盐还原作用沉淀碳酸钙的方程^[17]:



(3) 产生 NH_4^+ 的喜氧和厌氧作用与 CO_3^{2-} 作用产生碳酸盐^[17]:



(4) 在厌氧细菌死亡分解过程中, 由蛋白质和氨基酸产生的氨产物, 以及由简单有机酸和糖类产生的 CO_2 和 HCO_3^- , 可以导致喜氧的碳酸盐的迅速沉淀^[17]:



因此, CO_2 的固定和碳酸钙的沉淀, 并非局限于光合作用生物, 也并非局限于喜氧环境。细菌对碳酸钙的沉淀至关重要, 对叠层石的形成也起了关键的作用。

3 叠层石的形成环境

蓝藻(蓝细菌)等光合植物性生物对碳酸钙沉淀的作用是众所周知的, 然而, 从上述的许多研究表明, 不论是在氧化环境还是在还原环境, 也不论是在有光还是无光条件, 各种细菌在碳酸盐岩(钙)的沉淀中起着重要的作用。对叠层石的形成来讲, 由于叠层石形成、生长环境的差异, 其形成机理也各种各样, 然而, 就其沉淀碳酸盐岩(钙)而言, 不外乎是蓝藻(蓝细菌)和细菌作用以及无机作用。在洞穴黑暗带中细菌、真菌和部分蓝藻沉淀碳酸钙的实例已有不少报道。然而, 黑暗环境中是否适合叠层石的形成, 还未取得统一的认识。

M. R. Walter(1976)^[18]在进行叠层石形成的模拟试验时发现, 在无光条件下, 7个月后, 在有光条件下原已形成的叠层石上只形成不成层的、厚仅 0.5mm 的沉积物。在有红外线供光以抑制蓝藻(蓝细菌)的光合作用, 但不抑制细菌的光合作用的条件下, 3个月后同样不形成叠层石。但是, 在同一时间同一试验池中, 有光条件下则形成了 0.5~2mm 的叠层石构造。

作为叠层石, 其形成不像蓝藻(蓝细菌)那样具有适应各种恶劣环境的能力。在研究中人们发现, 在叠层石和藻席中仅极少数几个优势种群与碳酸钙的沉淀有关, 而且丝状藻比球状藻更活跃, 生长更迅速, 因而也就可能更多和快地沉淀碳酸钙。叠层石的生长, 多数情况下不是单一藻、细菌种活动形成的, 而是由一个以上(1~6个)种所共同组成的藻共生体(Community)协同作用形成叠层石微构造套^①, 再由微构造形成叠层石体。在环境(水温、水化学、水动力、气候、水量、外来干扰因素等)变化到一定程度, 藻共生体可以迅速消亡, 或者代之以另一些藻、细菌种组合形成的新共生体, 并形成另一类型的微构造和叠层石。在叠层石形成模拟试验过程中, 人们发现, 在同一时间阶段, 即使在各边界条件相近的情况下, 有些叠层石的纹层形态、厚度、数目等均存在差异。很显然, 叠层石的形成受到藻和细菌本身功能的控制, 同时严格受到环境的制约。

在只有蓝藻(蓝细菌)和细菌统治地球的前寒武纪时期, 叠层石才得以广泛发育和长时间延续, 而到了前寒武纪末, 真核生物的大量出现及以后动物的开始出现, 叠层石的形成环境受到严重的干扰, 使其分布骤然减少。现代叠层石仅见于沙克湾、百慕达、佛罗里达南部和波斯湾等地。叠层石的形成需要比较严格的环境和比较有效的生物作用, 也就是要有生物作用和沉积作用(包括环境)的适当结合。古代叠层石柱体高度一般在几十厘米左右, 大于 1m 的较少; 现代叠层石更小, 这也反映了它们的形成受环境影响的局限性。

① 西南地质研究所. 前寒武纪专辑(叠层石汇编). 西南地质科技参考资料, 1975

4 洞穴黑暗带中是否有叠层石存在之我见

近几年,在我国关于洞穴叠层石的研究已引起有关人士的关注。值得注意的是,洞穴叠层石有两种截然不同的类型,即洞穴弱光带的叠层石和洞穴黑暗带的可能的叠层石。前者国内外已有不少的研究,Co_x等人 1989年发表了近地表蓝细菌沉积洞穴次生化学沉积物(近地表叠层石)^[18];1994年又发表了其对叠层石状洞穴次生化学沉积物自下而上的分层氨基酸研究,证实了该沉积物的生物成因特征^[19];1984年 Proudlove在加勒比海所谓 Blue Hole的洞穴中发现并报道了其中的蓝藻成因成层状藻席^[20];作者之一在 1983年研究云南省大营盘地区元古界青龙山组顶部古岩溶洞穴时,发现了其中的铁矿叠层石^①;作者在对广西桂林罗田大岩和角田大岩的研究中,发现了几种类型的洞穴弱光带叠层石,经研究发表了相关论文^[21,22];李景阳、安裕国等人,对贵州织金洞的研究,也证明了洞穴洞口弱光带叠层石的存在^[4];田友萍等人(1996)对贵州盘县风洞等藻席进行了详细的研究^[23]。显然,洞穴弱光带叠层石的存在是毫无疑问的。

至于洞穴黑暗带环境中叠层石的存在,从理论上需要论证:①造叠层石的少数几种蓝藻(蓝细菌)可以活跃地生存于洞穴黑暗带中;②一般认为,叠层石亮、暗纹层代表着因日夜、季节等变化,生物活跃与停止活动,导致生物沉积与非生物沉积的差异形成的纹层。那么在无光的洞穴黑暗带中,亮暗纹层又代表什么因素的交替呢?在现实中,要去发现、要去论证洞穴黑暗带中的叠层石也需要做大量细致的工作,除证实叠层状构造中有生物存在外,还要论证这些构造是生物作用形成的,即这些构造是生物沉积构造,由生物成因微构造组成。可靠的方法是,除了从形态上进行论证,最好能用生物化学和同位素等手段进行研究。贵州织金洞黑暗带的类叠层石构造的研究已有不少报道^[4],从蓝藻和生物沉积构造(?)的存在似乎也表明了其叠层石性质。作者在对桂林地区盘龙洞大石笋类叠层石构造的岩石薄片研究中,没能够找到令人信服的叠层石依据。宏观形态呈叠层石构造的形体中,确是由亮、暗纹层组成,然而亮、暗纹层厚度比、组成结构构造,以及有关生物及其沉积构造的缺乏均非叠层石性质;在对广西天等地区几个洞穴中类叠层石构造的研究中,发现了一些由亮暗纹层组成的交互层,许多现象证明它们是生物沉积构造而不是单一的(无机)沉积构造^[3],但还没有足够证据论证其叠层石性质。此外,在对许多大石笋纵剖面的观察和研究发现,在较平稳的石笋成层构造中,有时可以见到局部呈类叠层石的构造,柱状或假柱状直径在 1cm左右,高度在几厘米左右,柱体或假柱体群宽度约 5cm或更大,柱体之间没见到有沉积构造特点的“填平补齐”现象,然而其岩石薄片观察,未能发现可靠的生物或生物活动遗迹,乃至叠层石的证据。

洞穴中石笋的高度一般在几十厘米到 5~6m左右,高的可达 20m或更大,如果它们是叠层石,这意味着需要有稳定期很长的叠层石形成环境。根据同位素测定研究,1m多长石笋的形成,少则几万年,多则可达几十万年。而众所周知,岩溶洞穴次生化学沉积物一般开始形成于第四纪中晚期,迄今也就几十万年。在这个地质历史时期,新构造运动、气候变化、水和物质(包括生物)的迁移等因素更替频繁,从而导致洞穴石笋中纹层形态不规则及其许多间断频繁出现。这样的环境是否适合叠层石的生长?值得探讨。

① 地矿部岩溶地质研究所,洞穴现场讨论会论文集,1989,10

不能否认,如地球表面一样,有时在极复杂动荡环境中,出现有被称为“安全岛”的稳定局部环境,比如,水的 pH 值等因子不利于其它生物而只有利于蓝藻(蓝细菌)和细菌的生长的地段。也许在洞穴或钟乳石中的这种“安全岛”可能存在有利于叠层石的生长,但这需要进一步论证。就目前的研究结果而言,作者初步的看法是,黑暗洞穴中有叠层石形成所需的条件,叠层石的规模不会太大,比如在一个大的石笋体中的某些部位存在叠层石构造。然而这种观点的进一步确认,尚需要从多方面来论证,而论证的最有效方法之一,是在洞穴黑暗带进行叠层石形成模拟试验

参 考 文 献

- 1 Peck, SB. Bacterial deposition of iron and manganese oxides in North American caves. *NSS Bulletin*, 1986, 48(1): 26~ 30
- 2 Williams, AM. The formation and deposition of moonmilk. *Trans. Cave Res. Group G. B.*, 1959, 5: 135~ 137
- 3 王福星等. 生物岩溶. 地质出版社, 1993
- 4 李景阳等. 贵州织金洞沉积物形成特征的初步研究. *中国岩溶*, 1994, 13: 11~ 16
- 5 Aitken, JD. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of south-west Alberta. *J Sed. Petrol.*, 1967, 37: 1163~ 1178
- 6 Emeis, KC, Richnow, HH. and Kempe, S. Travertine formation in plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology*, 1987, 34: 595~ 609
- 7 Klappa, CF. Clarified Filaments in Quaternary Calcretes: organo-mineral interactions in the subaerial vadose environment. *Jour. Sed. Petrol.*, 1979, 49: 995~ 968
- 8 Walter, MR. *Stromatolites*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 1976
- 9 Klappa, CF. Lichen stromatolites: criterion for subaerial exposure and a mechanism for the formation of laminar calcretes (caliche). *J. Sed. Petrol.*, 1979, 49: 387~ 400
- 10 Stanier, RY, Adelberg EA and Ingrahan JL. *The Microbial World*. Prentice-Hall Inc. New Jersey, 1976, (中译本)
- 11 Moore, GW, Nicholas, G. and Sullivan, FSC. *Cave Microflora*, 1980
- 12 Fott, B, Alegnkunde. 1979, 中译本. 上海科技出版社, 1980
- 13 Hoeg, O A. Cyanophyceae and bacteria in calcareous sediments in the interior of limestone cave in Nord-Rama, Norway. *Nytt. Mag. Naturvidensk.*, 1964, 85: 99~ 104
- 14 Monty, CLV. Les nodules de manganese sont des stromatolithes oceaniques. *C. R. Acad. Sci., Paris, Ser. D*, 1973, 276: 3285~ 3288
- 15 Chafetz, HS. and Buczynski, C. Bacterially induced lithification of microbial mats. *Palaos*, 1992, 7: 277~ 293
- 16 Chafetz, HS. and Folk, RL. Travertines: depositional morphology and the bacterially constructed constituents. *J. Sed. Petrol.*, 1984, 54: 289~ 316
- 17 Krumbein, WE. Photolithotrophic and Chemoorganotrophic Activity of Bacteria and Algae as related to Beachrock Formation and Degradation (Gulf of Aqaba, Sinai). *Geomicrobiology Journal*, 1979, 1: 149~ 203
- 18 Cox, C, James, JM, Leggett, KEA & Osborne, RAL. Cyanobacterially Deposited Speleothems: Subaerial Stromatolites. *Geomicrobiology J.*, 1989, 7: 245~ 252
- 19 James, JM, Patsalides, E. & Cox, G. Amino Acids - A fingerprint for cyanobacteria in stromatolitic speleothem. In Sasowsky, ID. & Palmer, MV. (eds) *Breakthroughs in Karst Geomicrobiology and Redox Geochemistry*, Karst Water Institute, Inc. 1994
- 20 Proudlove, GS. Preliminary Observations on the Biology of inland Blue Holes, Andros Island. *Cave Sci.* 1984, 11(1): 53~ 56
- 21 Wang Fuxing. Karst Cave Stromatolites in Guilin, China. *Stromatolite Newsletter*, 1993, No. 16: 54~ 56

- 22 王福星,曹建华,江利登,黄俊发,黄基富.岩溶洞穴叠层石.古生物学报,1994,33(2): 172- 179
23 田友萍,何复胜.贵州盘县风洞藻席蓝藻群落生态初探.中国岩溶,1996,15(3): 233- 238

DO STROMATOLITES OCCUR IN THE DARK-ZONE OF KARST CAVES?

Wang Fuxing Cao Janghai Huang Junfa
(*Institute Karst Geology, CAGS, Guilin 541004*)

Abstract

The paper starts with the concept of stromatolite, and summarizes the previous studies of cyanophytic and bacterial habits in twilight-zone and dark-zone and their significance in the formation of stromatolites. And then the paper discusses the significance of the two factors, biological and environmental controls in the formation of stromatolites. Finally, an in-situ simulated-test is suggested to be the effective method for proving the formation possibility of stromatolites in the dark-zone of karst caves.

Key words Stromatolite Karst cave Dark-zone Cyanophyta