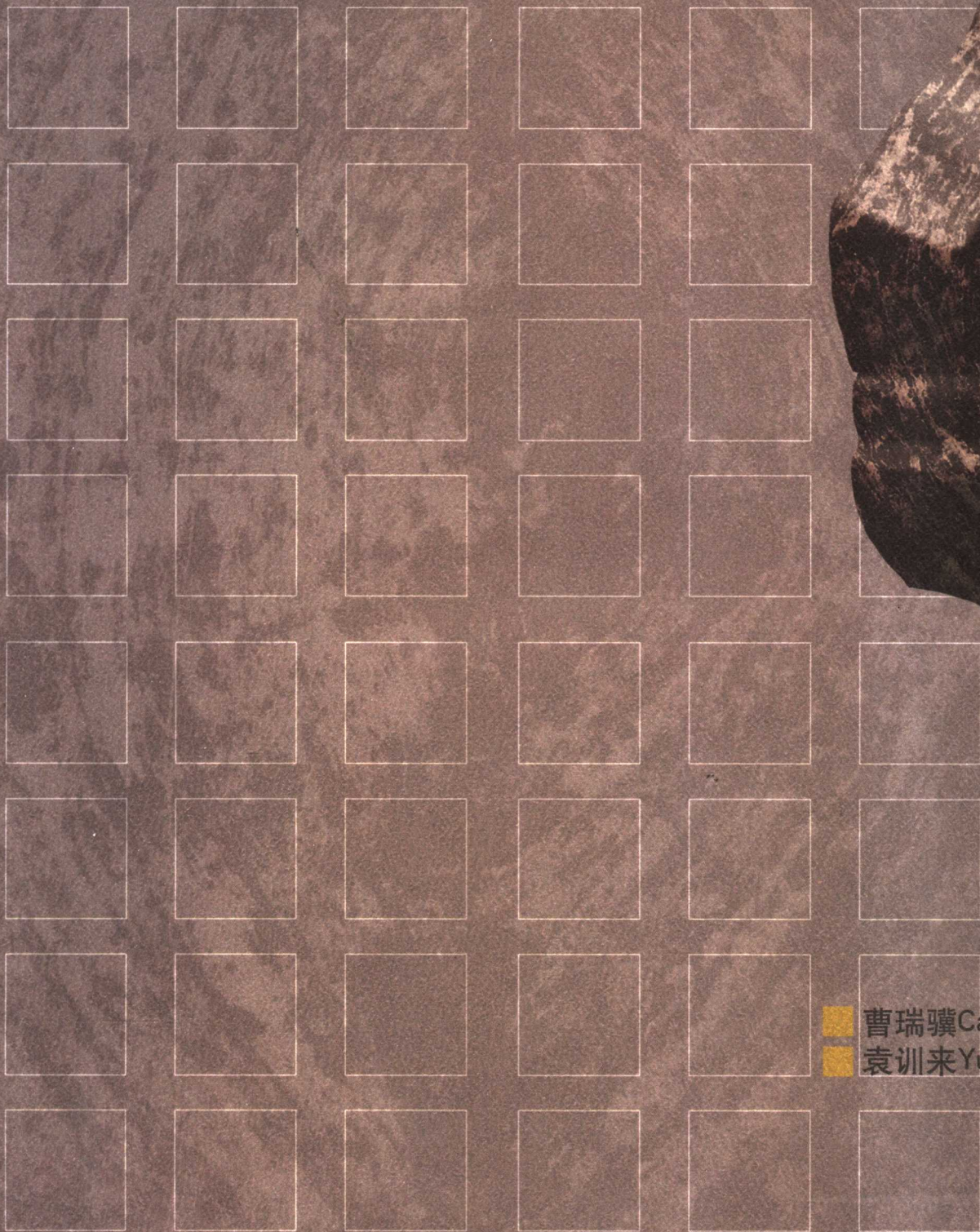


叠层石

STROMATOLITES



曹瑞骥 Cao Ruiji
袁训来 Yuan Xunlai

中国科学技术大学出版社

曹瑞骥Cao Ruiji 袁训来Yuan Xunlai

叠层石

图书在版编目 (CIP) 数据

叠层石/曹瑞骥, 袁训来著. —合肥: 中国科学技术大学出版社, 2006.12

ISBN 7-312-01800-9

(国家十五重点图书)

I. 叠… II. ①曹… ②袁… III. 叠层灰岩—研究 IV. P588.24

中国版本图书馆CIP数据核字 (2006) 第143279号

© 中国科学技术大学出版社 2006

© University of Science and Technology of China Press 2006

出版发行 中国科学技术大学出版社

(安徽省合肥市金寨路96号, 230026)

印 刷 安徽新华印刷股份有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 889×1194 1/16

印 张 24.5

插 页 1

字 数 380千

版 次 2006年12月第1版

印 次 2006年12月第1次印刷

印 数 1~1000册

定 价 120.00元



作者
简介

曹瑞骥
Cao Ruiji

中国科学院南京地质古生物研究所研究员，长期从事叠层石的分类学、生物地层学、古环境和成矿作用的研究。

袁训来
Yuan Xunlai

中国科学院南京地质古生物研究所、现代古生物学和地层学国家重点实验室研究员，主要从事新元古代真核生物的演化和环境背景的研究。

叠层石

STROMATOLITES



摘要

叠层石主要是由原核生物（包括蓝藻、光合细菌及其他微生物）周期性的生命活动所引起的矿物沉积和胶结作用形成的叠层状生物沉积构造，形成叠层石的微生物群落称为微生物席。叠层石代表了地球上最古老和最原始的微生物生态系统，最老的叠层石可以追溯到 35 亿年前的早太古代，最古老的原核生物化石就发现于澳大利亚西部距今 35 亿年的瓦拉伍纳群（Warrawoona Group）硅质叠层石中。迄今为止，已经在澳大利亚、北美和南非十几个地点、年龄超过 25 亿年的太古宙沉积岩石中发现了叠层石；而元古宙的叠层石分布更加广泛，在全球范围内，几乎所有的元古宙碳酸盐沉积中都产出丰富多样的叠层石；在末元古代大冰期以后，由于地球环境的巨变和后生动物的兴起，引发了整个海洋生态系统的重建，地球上自生命起源以来建立的、长达 30 亿年的、以原核微生物为主体的叠层石微生物生态系统迅速被以真核多细胞生物为主体的高级生态系统所取代；自显生宙之后，直達现代，只有在一些特殊的环境中，才可寻觅到叠层石的踪迹。

在地球早期的海洋中，组成叠层石的微生物群落参与了地球早期元素的氧化和还原反应，转移和积聚化学能和太阳能，在代谢过程中固定 CO_2 并释放 O_2 ，把早期地球的还原性大气圈逐渐转变成氧化性大气圈，为以后真核生物的出现和生物的多细胞化奠定了基础。

本书对叠层石的研究历史、形成机理、相关地质事件记录、环境意义、矿产资源、演化、生物地层学意义、命名和分类以及中国元古宙叠层石的时空分布和叠层石组合进行了全面的回顾和系统的阐述，并详细描述了产自中国元古宙和显生宙地层中的 151 个叠层石种。

前 言

叠层石主要是蓝菌类的微生物,通过生长和新陈代谢作用捕获、粘结和沉淀沉积物,形成的一种生物沉积构造(Walter,1976:1)。在叠层石形成过程中,蓝藻(或称蓝菌)类的微生物通常以层状微生物席的形式出现,故 Riding (2000) 给予叠层石一个简明的定义,即“叠层石是一个层纹状底栖微生物席的沉积”。因为叠层石主要是由蓝菌类的微生物构成的,多数学者主张将叠层石归属于藻类化石。又因叠层石成因特殊,本身又非实体化石,一些学者将它归于痕迹化石。

叠层石是地球上最古老的化石之一,现知最古老的叠层石产于距今约 35 亿年的太古宙早期,但它主要繁盛于元古宙。正如 Knoll 等 (1998) 所说,在地球历史上最初 85% 的记录中,叠层石是碳酸盐岩中最重要的沉积特征。在地球早期生命演化过程中,叠层石-微生物席生态系统主宰地球海洋近 30 亿年。大约在末元古代冰期以后,由于后生动物的兴起,引发了生态系统的重建,叠层石-微生物席生态系统在全球范围内被解体。尽管如此,在显生宙和现代某些特殊生境中,仍可寻觅到叠层石的踪迹。

研究证明,构成叠层石的微生物往往不是单一种的群体,常常是一个小的生态群落。在叠层石中不仅包含许多微生物演化资料,同时还保留有沉积的、古生态的以及地球物理等方面的信息,其中不少信息正等待科学家们去挖掘。此外,构成叠层石的微生物对地球早期地表元素的循环、有用元素的富集和能量转换起着非常重要的作用。一些前寒武纪铁质和磷质叠层石本身即为具工业价值的矿产资源。

由于叠层石的形态是复杂的物理和生物相互作用的结果(Pratt *et al.*, 1982),叠层石成因模式至今还没有被完全揭示,控制叠层石形态学特征的主要因素是生物类群,抑或是外部环境,尚无最后定论。因而,长期以来在叠层石研究中形成了两个学派,即所谓生物地层学派和环境学派。这两个不同观点的学派,同时活跃在叠层石研究的学术舞台。有关不同学派的观点,在 Walter (1976) 编辑的专著中有较全面论述。多年来,叠层石学家在不同学术观点的争论中,循着一条迂回曲折的道路摸索前进。

叠 层 石

STROMATOLITES

近二十余年来,由于多学科的交叉,特别是微生物学和沉积学的相互渗透,在叠层石成因理论和微生物席的剖析上取得了不少新的认识和新的学术观点。当然,其中一些观点也并非全无商榷之处。同时,数以千计的叠层石属、种被命名和描述。由于全球统一的叠层石生物学命名法规尚未建立,在文献中同物异名和同名异物的现象并不罕见。此外,大量区域性叠层石生物地层学资料被积累,但缺少系统清理和总结。

鉴于以上情况,在研究了国内实际材料的基础上,作者对当前叠层石研究最新成果进行了归纳和总结,对其中一些学术观点进行了客观评述。同时,汇聚了前人资料,对国内常见叠层石属、种进行了清理、厘定和系统描述,并对叠层石的生物地层学意义、环境解释和成矿作用也进行了初探。但由于作者水平所限和参阅的文献不全面,文中难免出现错误和片面之处,敬请读者批评指正。

在本书撰写中,作者援引了梁玉左、朱士兴、邱树玉、缪长泉、张录易、华洪、张昀、刘志礼、萧宗正、赵文杰、李军、高振家、杜汝霖和骆云生等同志的研究成果和国外一些学者的相关资料,对他们深表谢意。本书的完成得到国家自然科学基金(批准号:40472003,40372006)、科学技术部重大国际合作项目(2003CB716805)、科学技术部基础性工作专项(2001DEB20056)、国家重点基础研究发展规划项目(G2000077701)、中国科学院知识创新项目(KZCX-SW-141)、中国科学院南京地质古生物研究所、现代地层学和古生物学国家重点实验室的经费资助,得到中国科学院南京地质古生物研究所沙金庚所长、杨群副所长等领导在工作上的支持,并得到薛耀松、尹磊明、华洪、周传明、陈哲、王金龙、孟凡巍、胡杰、严贤勤、苏平等同志的诸多帮助,在此一并表示诚挚的感谢。

目 次

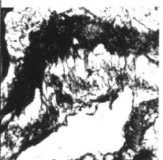
前 言	(i)
第一章 研究简史	(1)
第一节 叠层石研究的启蒙期 / (3)	
第二节 叠层石研究中两种对立的学术观点 / (6)	
第三节 叠层石研究的深化 / (9)	
第四节 中国叠层石研究简史 / (12)	
第二章 微生物席和生物膜	(15)
第一节 现生微生物席和生物膜 / (17)	
第二节 微生物席的垂直分带和微生物席在碳酸盐聚集中的作用 / (21)	
第三节 现生微生物席的形态、组分和环境的关系 / (24)	
第四节 地球早期的微生物席 / (27)	
第三章 叠层石形成机理的探讨	(43)
第一节 微生物的活动和碳酸盐岩的沉积 / (45)	
第二节 碳酸盐叠层石成因分析 / (49)	
第三节 叠层石成因归类的尝试 / (54)	
第四章 叠层石的层理及相关事件记录	(57)
第一节 叠层石层理与微生物席和沉积动力学的关系 / (59)	
第二节 被层理记录下来的地质事件证据 / (68)	
第五章 叠层石环境意义的评述及叠层石与矿产资源	(75)
第一节 叠层石形态分异和环境的变化 / (77)	
第二节 有用矿产与叠层石关系的探讨 / (88)	
第三节 叠层石成矿或矿化作用的解释 / (99)	

第六章 叠层石的命名和分类	(103)
第一节 叠层石生物学命名的现状 / (105)	
第二节 叠层石的分类 / (108)	
第七章 叠层石的地质历程及其生物地层学意义的探讨	(119)
第一节 叠层石的出现、繁盛和衰退 / (121)	
第二节 叠层石在生物地层学应用上的“临床试验” / (133)	
第八章 中国元古宙叠层石的时空分布及叠层石组合	(145)
第一节 中国元古宙地层及其中的叠层石组分 / (147)	
第二节 中国元古宙的叠层石组合 / (163)	
第三节 前寒武纪叠层石常见属、种的时限和微构造的演替 / (169)	
第九章 叠层石系统描述	(173)
参考文献	(369)

1

STROMATOLITES

第一章 研究简史



第一节 叠层石研究的启蒙期

一、关于叠层石成因的认识过程

叠层石的发现距今已有两百多年历史(见:佰纳德化石词典,1763:486)。在这两百多年中,人们对叠层石的认识在不断地深化。最初,科学家们围绕叠层石是生物还是非生物、是动物还是植物等方面的问题,进行了长时间的探索和讨论。1825年 Steel 报道了美国纽约萨拉托加泉附近晚寒武纪地层中分布一种具纹层构造的钙质体(即后来称谓的叠层石),并认为这些钙质体可能是无机成因的结核。这种认识大约延续了半个世纪。直至1883年,科学家们才查明这些钙质体应是生物化石,但猜测它们可能属于层孔虫类。1891~1897年间,一些古生物学家对这些钙质体成因提出了疑问,并认为这些具纹层构造的钙质体不像层孔虫,可能是一些与原生动物有亲缘关系的化石,并将它们归于原生动物门。

在启蒙期对叠层石研究做出杰出贡献的科学家是 Kalkowsky。Kalkowsky (1908) 不仅创造了“叠层石 (Stromatolites)”名称,并认为叠层石“或是由纯粹的叠层纹层 (Stromatoids) 组成,或者是由厚或薄的夹有少量矿囊、鲕石和数量不等的岩屑的许多薄层叠层纹层组成”(Kalkowsky, 1908:113, 114)。“叠层纹层的分层构造(不仅包括所有可能由其他因素造成的叠层石的分层构造)能在光面和薄片上识别……”(Kalkowsky, 1908:103),同时推测在叠层体中包含原始光合自养微生物。通过显微镜观察,他发现这些叠层纹层是由纤细的线体构成的,而这些纤线体经常呈现出十分规则的扇形排列,仿佛具有放射生长模式的趋势,叠层纹层的“纤维状线体”常常不太清晰,高倍镜下很模糊。当时 Kalkowsky 注意到,在生长形态上许多叠层石相似于珊瑚和海绵。他认为这些穹形叠层纹层的叠加、分叉柱体的生长趋向等,是生物寻求光线和食物的反映。通过深入研究,他排除了叠层石是珊瑚和海绵的可能性,并断定它们是一种能够导致碳酸钙沉淀的低等植物有机体。以上表明, Kalkowsky 是一个杰出的科学家,他通过野外工作和简单的古生物学方法,揭示了叠层石的真正性质。同时,通过薄片研究,他推断叠层纹层是构成叠层石的基本单元,而叠层纹层可以反映当时的沉积环境。

接着, Walcott (1914) 在一个元古宙硅质叠层石纹层中首次发现似蓝菌的微化石。因而他认为叠层石是在非海相环境下碳酸钙通过蓝菌的作用沉淀而成的。他将蒙大拿州贝尔特山元古宙叠层石的

总体特征与美国各地的小溪、湖泊和池塘中描述的淡水钙质结核进行比较,认为叠层石形成于淡水湖相环境。同时,他按照叠层石形态提出了一个分类系统,建立了 *Collenia*, *Newlandia*, *Cryptozoon* 等 3 个形态属,并断定它们都是沉积石灰质的蓝菌生命活动产生的结核。Walcott 在叠层石成因的研究中做出了杰出贡献,但他对叠层石形成环境上的认识显然是片面的。由于 Walcott 的上述结论和其他关于现代非海相蓝菌沉积碳酸盐岩的论文,在这一时期的地质文献中,普遍认为化石叠层石是非海相环境下的产物。

二、叠层石形成环境的讨论

在上个世纪初期,由于受地质界深孚众望的地质学家 Walcott 观点的影响,多数学者都将叠层石作为指示淡水沉积环境的标志。直至 20 世纪 30 年代,此种观点在大量实际材料面前受到挑战。

Black (1933) 研究了巴哈马群岛安德罗斯岛的藻类沉积物。他发现在海相潮间带和稍咸的水体中同样存在具纹层构造的蓝菌形成物,从而证实在海相环境中也适合叠层石的生存。Young (1934) 很快接受了这一观点,并论证前寒武纪叠层石产于海相环境。继之, Ginsburg (1955) 研究了佛罗里达潮坪的藻席(或称微生物席), Logan (1961) 研究了西澳大利亚鲨鱼湾(Shark Bay)潮间带的叠层石。这些资料为人们提供了大量现代叠层石产于海相环境的实例。Walcott 等的关于叠层石非海相成因的假定受到普遍的怀疑。

在 20 世纪 60 年代至 70 年代初,由于现代海相微生物席研究的普遍展开,不少西方学者采用物理的和机械的作用解释叠层石的特征和动力学。他们只孤立地关注蓝菌的生活环境,而忽视了许多其他方面的因素,如叠层石形成过程中的生物作用和生化作用,从而获得过于偏激的结论,与 Walcott 的叠层石淡水论一样,将叠层石研究引向了另一个极端。沉积学家 Monty (1977) 将他们的偏激称为教条主义的认识,并将这些偏激的结论归纳为以下三方面:①所有海相叠层石的分布只局限在潮间坪;②叠层石是机械成因的,它们是由蓝菌捕获和粘结碎屑颗粒形成的;③叠层石形态直接受环境因素控制。

但是随着现代叠层石和化石叠层石的深入研究,许多相反的有力证据表明,上述 3 点结论明显是片面的。

事实上,不论现代的或地质时期的叠层石,并不仅限于形成在海相潮间带环境。现代潮下带生长的叠层石已发现于百慕大(Gebelein, 1969)、巴哈马和西澳大利亚鲨鱼湾(Logan *et al.*, 1974)。据 Playford 和 Cockbain (1969) 的研究,澳大利亚 Canning 盆地的泥盆纪叠层石形成在水深 45 m 的潮下带。在晚中生代和新生代,发育大量淡水河和湖相叠层石岩礁(Ott and Volkheimer, 1972)。Monty (1977) 推测,由于没有竞争的动物群落,前寒武纪叠层石主要形成在潮下环境。

叠层石也并非都是蓝菌捕获和粘结碎屑颗粒而成。反之,碳酸钙的沉淀在元古宙叠层石(Maslov, 1961; Krylov, 1963)和新生代非海相叠层石(Freytet, 1965; 曹瑞骥和薛耀松, 1985)形成过程中同样起着主要作用。Hofmann (1969) 在论述叠层石成因时认为“……沉积物质是由于从有机薄膜之上的悬浮物中捕获或粘结微粒堆积的,或由于微生物的新陈代谢活动引起的直接或间接沉淀形

成的”。当然,环境因素无疑能够影响叠层石形态,但目前尚无实际材料证明,它是控制叠层石形态的惟一因素。相反,原苏联学者发现一些具特别形态的叠层石仅限制在元古宙某些特定时间内。Awramik (1971) 研究了硅质叠层石中的微化石,发现微化石群的特征控制和影响叠层石的形态。他的工作为叠层石形态学的演化提供了一定的生物学理论依据。

第二节 叠层石研究中两种对立的学术观点

一、叠层石是生物进化的里程碑,抑或是环境的指示器

对古老的化石叠层石的研究,有助于人们思考微生物的起源和揭示地球最早期生物圈贮存下来的微生物记录,因而前寒武纪地质学家对叠层石研究给予了极大的关注。特别是 20 世纪 60 年代和 70 年代是叠层石研究的黄金时期。据 Walter (1976) 不完全统计,从 19 世纪末至 20 世纪 70 年代中期,全球发表叠层石论文已达 2 034 篇。

通过上述系统深入的研究,叠层石学家似乎已取得以下两点共识:①叠层石形态学特征既受环境因素的影响,又受建造叠层石的微生物类群所制约;②叠层石礁(或生物层)和叠层石柱体的宏体特征受环境影响较大,而叠层石的细小特征,如柱体分叉、侧部装饰、层理和微构造等主要受制于微生物群的进化。尽管如此,不同学者由于立足于不同角度,从不同方面思考问题,在对叠层石总体形态变化规律的认识上产生严重分歧,从而在叠层石研究舞台上同时出现了两个相互对立的流派,即所谓环境派和古生物地层学派。

1. 环境派

环境派的主要观点由澳大利亚 Logan 等(1964,1974)首先提出,并受到沉积学家们的广泛引用和关注,并逐步形成一种学派。他们立足于现代叠层石的研究,并将研究中获得的结论直接用来解释化石叠层石的成因机制、形成环境和制约化石叠层石形态学的因素。他们认为,既然叠层石并非生物实体,而是一种由微生物参与的生物沉积构造,它们的形态特征就无所谓进化或演化问题,也就是说,不同形态的叠层石间不存在确定的先后顺序和不可逆的变化关系。但是,时至今日,环境派的学者并没有对叠层石某些在生物地层学上有鉴定价值的重要的特征标志,如柱体分叉机理、柱体边缘构造和层理形态等方面,从环境意义上做出明确的解释。

2. 古生物地层学派

古生物地层学派以原苏联 Krylov (1963) 为代表,并先后获得美国、澳大利亚、法国、印度和我国前寒武纪地层和古生物学家的继承和发展。他们主要致力于叠层石的形态学分类及地层分布规律的

探索。他们发现某些柱叠层石和少数层柱叠层石在时代分布上是短暂的,似乎为前寒武纪的某一段时代所专有。他们利用这些可视为“标准化石”的叠层石或由它们构成的叠层石组合,建立了全球元古宙对比的框架。依据叠层石组合获得的地层对比上的结论,多半已获得同位素年龄资料的佐证 (Preiss, 1976a)。他们也考虑到沉积环境或生态环境对叠层石局部形态的影响。为了从理论上解释叠层石形态学在地层上的演化序列,他们正从两个方面着手研究叠层石的形态发生。A. 以现代活的叠层石和微生物席为对象,在野外和实验室内研究叠层石形态变化与环境因素及生物因素的内在联系 (Walter *et al.*, 1976; Zhang Yun and Hoffmann, 1992); B. 以保存有微生物化石的古代叠层石为对象,研究叠层石形态学、微构造和内含微生物组成分子之间的关系 (Awramik, 1976; 曹瑞骥等, 2001)。多年来,尽管不少学者致力于探讨叠层石生物地层学的理论基础,但尚未取得突破性的进展,其中许多奥秘尚未被揭示。此学派的研究工作至今仍停留在经验认识的基础上。需要提及的是,在 20 世纪 50 年代末至 60 年代初,以原苏联 Vologdin (1962) 为代表的一些学者,致力于寻找碳酸盐叠层石中残留的藻类细胞遗体,进行传统的生物学研究。从理论上说 Vologdin 等的设想未必无其合理的一面,遗憾的是,由于长期的成岩过程,在前寒武纪碳酸盐叠层石中寻觅保存完好的藻类化石极其困难。因此,他们不得不借助笔墨的勾画来显示藻类的细胞结构。此类研究曾出现在 20 世纪 60 年代的一些学术刊物上。由于这些“藻类细胞结构”受到多数古生物学家的怀疑,此项研究未取得实质性进展,并逐步被古生物学家所摒弃。

二、在叠层石生物学命名上的争议

叠层石是一种生物沉积构造,不是传统的实体化石。单个叠层体不代表单一种的残体,能否给予叠层石生物学上的属、种名称,这是在叠层石研究中长期争议的问题之一。

叠层石在生物学命名上的争议,在上个世纪早期最为突出。Holtedahl (1919) 认为,确定叠层石的分类单位是困难的,不应把叠层石看做为应授予属、种名称的真正化石。同样,Hoeg (1929) 认为用生物学上的双名法给叠层石命名是荒谬的,因为形态完全相同的叠层石不一定全由相同种的生物构成,每个叠层石都可能由几个种的微生物构成的集合体。Young (1933) 虽然在研究南非叠层石上做出了很大贡献,但在评论叠层石分类时认为,这种命名不具有或很少具有分类学价值。Cloud (1942) 主张叠层石不予命名为好,但他认为那些已出现在文献上的名称可作为通俗名称保留下来。Logan 等 (1964) 主张叠层石不应接受生物学上的双名法,认为它们不具有严格生物种限定的形态学上的变化性。他们提议利用反映叠层石宏体几何特征的字母命名。最早对叠层石进行生物学命名的学者是 Matthew (1890a),他首次将北美一个元古宙的分叉叠层石命名为 *Archaeozoon* 属。20 世纪初,依据叠层石宏体构造特征,3 个重要的叠层石属,即 *Gymnosolen* (Steinmann, 1911), *Collenia* (Walcott, 1914) 和 *Conophyton* (Maslov, 1938) 被命名。并且这些属的名称,一直沿用至今。在同位素年龄未广泛利用于地层划分以前,前寒武系不仅在年龄上,而且在古生物学上都是一个未知的领域。由于叠层石是产于寒武纪以前地层中的惟一常见化石,它很自然地成为确定前寒武纪地层时代和对比的理想“候选人”。Walcott (1906), Howchin (1914) 和 Maslov (1939) 等学者最先认为叠层石

可以作为前寒武纪地层对比的标志,并强调为了发现和积累前寒武纪地层中叠层石形态学分异规律性的资料,首先必须对新发现的叠层石进行命名和分类。

随着叠层石研究者日众,以及研究方法的改进,特别是对分叉柱叠层石连续切片的研究和立体形态的复原,许多形态学相似的叠层石被发现于澳大利亚、加拿大、美国、印度、原苏联、非洲和中国的相近时代地层中,因而更多的学者成为叠层石双名法的捍卫者。尽管叠层石不一定是由单一微生物种构成的,但 Krylov (1976:32) 仍坚定地认为“……叠层石能够归于正式的古生物学分类的框架之中,包括严格的命名规则。利用对化石通用的双名法对叠层石命名是最为合适的,也是大多数研究者在实践中获得的认识……”因为,叠层石已被广泛运用于前寒武纪地层的对比和古生态的研究,如果不给叠层石命名,以上研究工作几乎无法开展。鉴于以上原因,Cloud 改变了最初不主张对叠层石进行生物学命名的看法。Cloud 和 Semikhatov (1969) 提出,对叠层石采用林奈命名法是合适的。他们特别强调,一个被命名的叠层石对科学交流是有利的,对任一化石而言,一个不变的和被普遍接受的科学名称可推进该化石的深层次研究。据不完全统计,至今全世界已描述的叠层石属(或称群)约 330 个,种(或称形)约 1 000 个。