

重庆老龙洞二叠系-三叠系界线地层中的管状蓝细菌化石及其意义

姜红霞, 吴亚生, 蔡春芳

中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029

E-mail: jianghx@mail.igcas.ac.cn

2007-11-12 收稿, 2008-01-29 接受

地质过程与矿产资源国家重点实验室(中国地质大学)开放课题基金(批准号: GPMR2007-01)、中国博士后科学基金(批准号: 20070420523)、国家自然科学基金(批准号: 40472015)和中国科学院矿产资源研究重点实验室资助项目

摘要 二叠纪末生物大绝灭后出现的微生物群落是一个异常极端环境下的产物, 不同的地区微生物的类型也不同. 研究了重庆附近著名的二叠系-三叠系界线地层连续出露地区——老龙洞的界线剖面, 在发生生物大绝灭之后的地层内, 一段以管状蓝细菌化石为主的微生物群落的地层. 根据薄片观察, 管状蓝细菌化石的长度一般在 1 mm 以下, 粗端直径最大 0.08 mm, 几乎所有的管状化石都是向一端逐渐变细的, 管状体比较柔软, 管体的壁由隐晶到微晶的方解石组成, 横切面为圆形, 几乎所有的管状化石的内部都是空的, 并被泥晶方解石或细亮晶方解石充填. 总体上分布无规律, 但在若干视野中见到它们有呈放射状或束状排列的趋向. 通过综合对比研究认为, 该化石与蓝细菌门的胶须藻科(Rivulariaceae)的胶须藻很相似, 但是该化石是胶鞘钙化的种类, 而胶须藻科的 *Rivularia* 属种是不钙化的. 考虑到该化石保存的其他可供进一步分类的特征非常有限, 因此将其归入胶须藻 *Rivularia*, 描述为 *Rivularia* sp.[胶须藻(未定种)]. 因为蓝细菌是一种光合自养生物, 可以适应贫氧环境, 大绝灭后首先出现蓝细菌的群落可能说明环境是贫氧的. 由于光合作用需要浅水环境, 蓝细菌的存在也说明当时的水体是比较浅的.

关键词
二叠纪末
二叠系-三叠系界线地层
重庆
蓝细菌
胶须藻

二叠纪末的生物集群绝灭事件导致了 90% 以上的海洋生物, 包括 100% 的礁相生物的绝灭^[1,2]. 但在浓墨重彩地描述大绝灭发生的过程的时候^[3-12], 我们也应该对大绝灭后紧接出现的生物群类型给以注意. 在举世瞩目的煤山剖面, 大绝灭之后生存的是牙形刺为主的、外加少数小腕足类的一个单调的生物群^[13], 在贵州紫云剖面, 长兴期生物礁发生大绝灭后接着生存的是一个小腹足类或藻席为主的生物群^[12]. 根据 Lehrmann 等人^[14,15]的研究, 南盘江盆地内的浅水碳酸盐台地相地区大绝灭之后生存的是以钙质蓝细菌——肾形藻为主的微生物群和小腹足类的生物群. 在土耳其西南部, 二叠纪末大绝灭之后生存的是叠层石为主的微生物群落^[16].

本文报道一种在重庆老龙洞的生物礁顶部的碳酸盐岩相地层中发生大绝灭后出现的管状蓝细菌微

生物群.

1 剖面地质概况

重庆西北 30 km 处的老龙洞(图 1)是一个名不见经传的小山村. 由于长兴期生物礁剖面和二叠系-三叠系界线(PTB)地层剖面的发育, 这里早已经成为中外地质学家关注的焦点^[17-26].

早在 20 世纪 90 年代, 范嘉松等人^[19]把这里的长兴期生物礁介绍给了世界. 后来, Wignall 等人^[20]对这里的界线地层第一次作了系统研究, 提出这里在二叠纪-三叠纪之交发生了海平面上升, 导致海洋缺氧和生物大绝灭的发生. 再后来, Kershaw 等人^[21,22]对这里的剖面再研究之后又有惊人发现: 在界线地层中发现了微生物岩, 但对微生物岩的性质不很肯定. 作者一行于 2006 年 5 月对这里的 PTB 地层剖面也进行了研究, 在发生了生物大绝灭后的地层里发现了

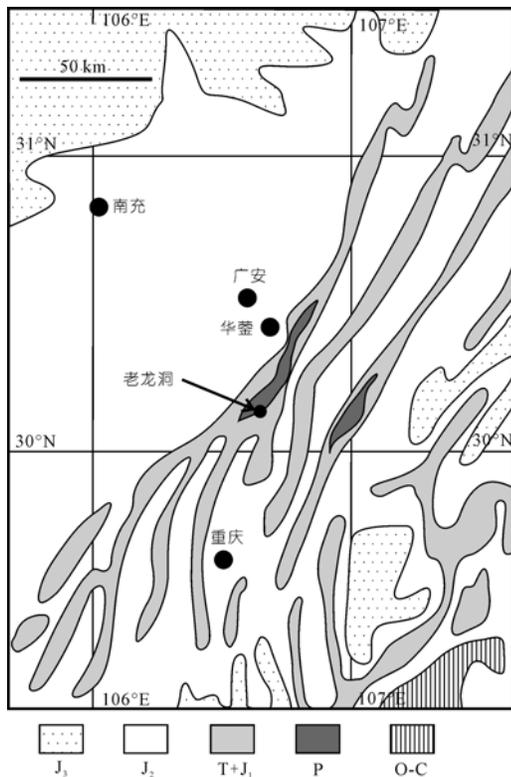


图1 重庆北碚老龙洞的地理位置和地质图
根据文献[21]中图1修改

一个未曾描述过的管状微生物群落。

在老龙洞地区的长兴期地层中发育有生物礁，但是这里的生物礁没有发育到长兴期末^[18]。在长兴后期，这里由生物礁相转变为台地相沉积。三叠纪初，这里发育下三叠统底部的飞仙关组薄板状泥灰岩夹页岩沉积。我们的地层剖面从长兴期生物礁的顶部向上测到下三叠统飞仙关组底部的薄板状泥灰岩夹页岩。

在野外将剖面分为7层(图2)。现将它们的特征自下而上，简述如下：

第1层(L01)，只测其顶部厚5 m，为灰白色、块状钙质海绵粒泥岩，露头上风化成石芽状地貌。露头上见到房室海绵(图3(a))。房室海绵是二叠纪的重要造礁生物，其钙质骨骼由叠置的房室组成。

第2层(L02~L04, L1-1, L1-2)厚10.6 m，为灰白色厚层状的生屑泥粒岩，含丰富的生物化石。生物化石以大有孔虫柯兰尼虫(图3(b))、棘皮类最为丰富，其他化石包括腕足类、苔藓虫、蜓类(包括古蜓)等。

第3层(L1-3-1~L1-3-3)，厚0.35 m，为中层到薄层状的斑点状灰岩，由棕色的灰岩中含灰色的或灰

黄色的灰岩斑点组成(图3(c))。灰色的和灰黄色的是原来的灰岩；棕色的灰岩是原来的灰岩重结晶和被大块方解石胶结形成的。在薄片上，灰色或灰黄色灰岩表现为暗区，而棕色灰岩区域表现为亮区，与露头的明暗正好相反。从露头看，棕色灰岩的含量比灰色-灰黄色灰岩的含量要多些。灰色-灰黄色灰岩为粒泥岩，含介形虫和小管状的微小化石，因为小管状化石大小小于1 mm，故视作微生物化石。

从薄片看，亮区由灰泥重结晶成的微亮晶和充填孔隙的大方解石胶结物构成，或有较多的介形虫，介形虫的空腔中也充填有大的方解石胶结物。此层的小管状微生物化石是本文研究的重点。

此层含分散的黄铁矿颗粒，大小在1 mm左右，在露头和薄片上都可以看到。它们切过化石和灰泥基质，既分布在暗色区，也分布在亮区。

第4层(L1-4下半)，厚0.1~0.2 m，为薄层状斑点状灰岩。薄片上的暗色区由泥粒岩或粒泥岩组成，粒为全脐螺的壳(图3(d))；亮区由与暗色区相同的岩石经过重结晶以及亮晶胶结物充填孔隙而成。全脐螺的壳具有叶片状结构，最大者可达1.4 mm。此层中亦有分散状黄铁矿颗粒，大小和分布特征与第3层相同。

第5层(L1-4上半、L1-5)，厚0.55 m，为中-薄层状斑点状灰岩。

灰岩中有不规则囊状的微生物化石构造(图3(e))。这种化石往往呈斑状分布，其分布的地方往往有灰泥的重结晶作用和大的方解石对孔隙的充填，从而形成薄片上的亮区，即露头上的棕色区。除了不规则囊状的生物，还有一些小腹足类，但不是全脐螺类的。此层中亦有分散状黄铁矿颗粒，大小和分布特征与第3层相同。

第6层(L1-6)，厚0.3 m，为薄层状的、具斑点状构造的灰岩。此层的岩性和生物化石与第五层一样。

第7层(L1-7~L1-9)，厚0.85 m，中层状，具树枝状构造的灰岩(图3(f))。树枝状构造由树枝状的灰色灰岩分布在暗色的(棕色的)灰岩中形成。暗色灰岩一般也呈树枝状。露头上的暗色区在薄片上为亮区，是由于重结晶后的微亮晶和孔隙中的较大的方解石胶结物有较好的透光性。薄片中的亮区含有更多的化石，主要是不规则囊状的微生物化石。它们的孔隙中充填了较大的方解石。

Kershaw等人^[22]在树枝状岩石顶面以下0.3 m处

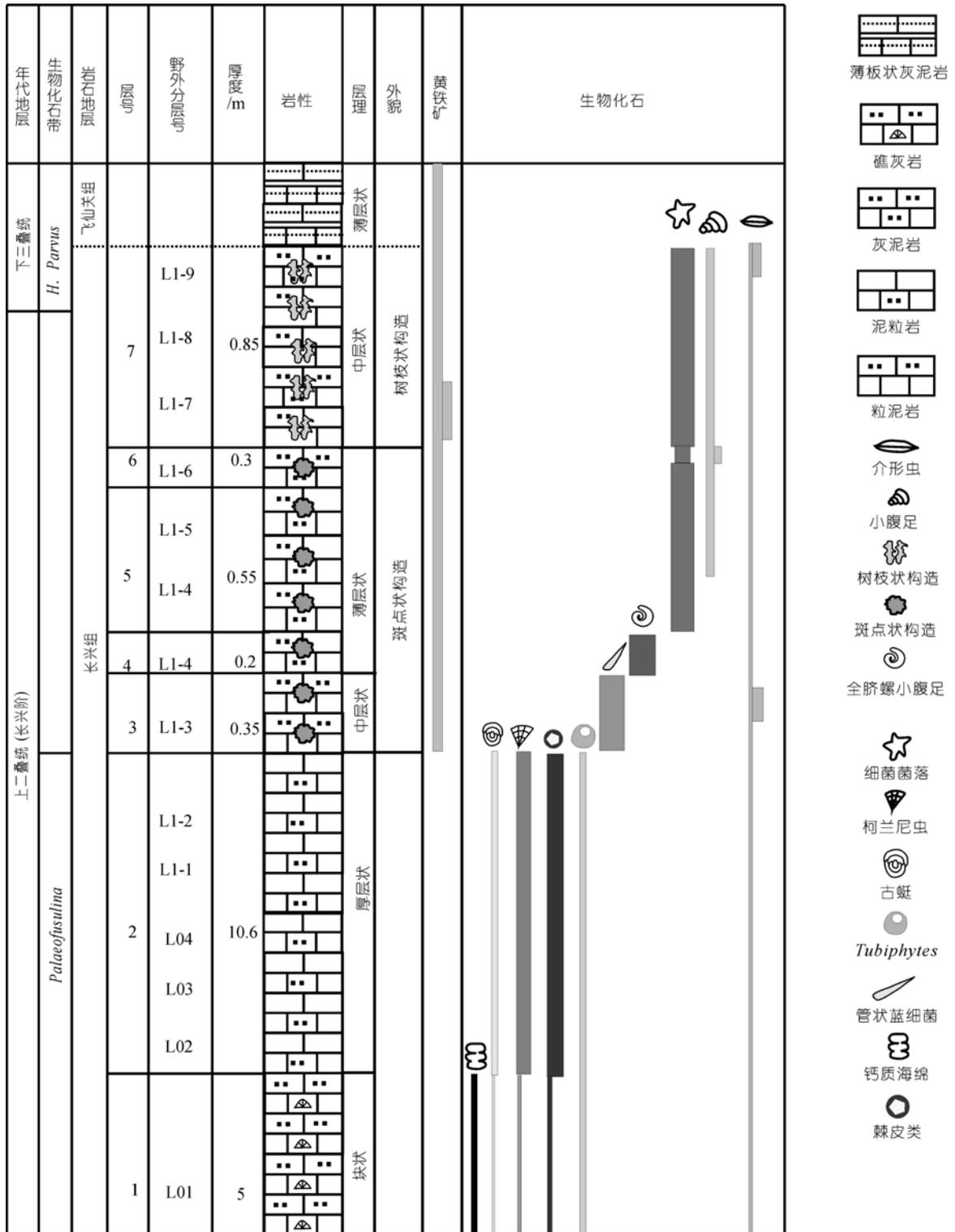


图 2 重庆老龙洞二叠系-三叠系界线剖面岩性柱状图和生物化石分布

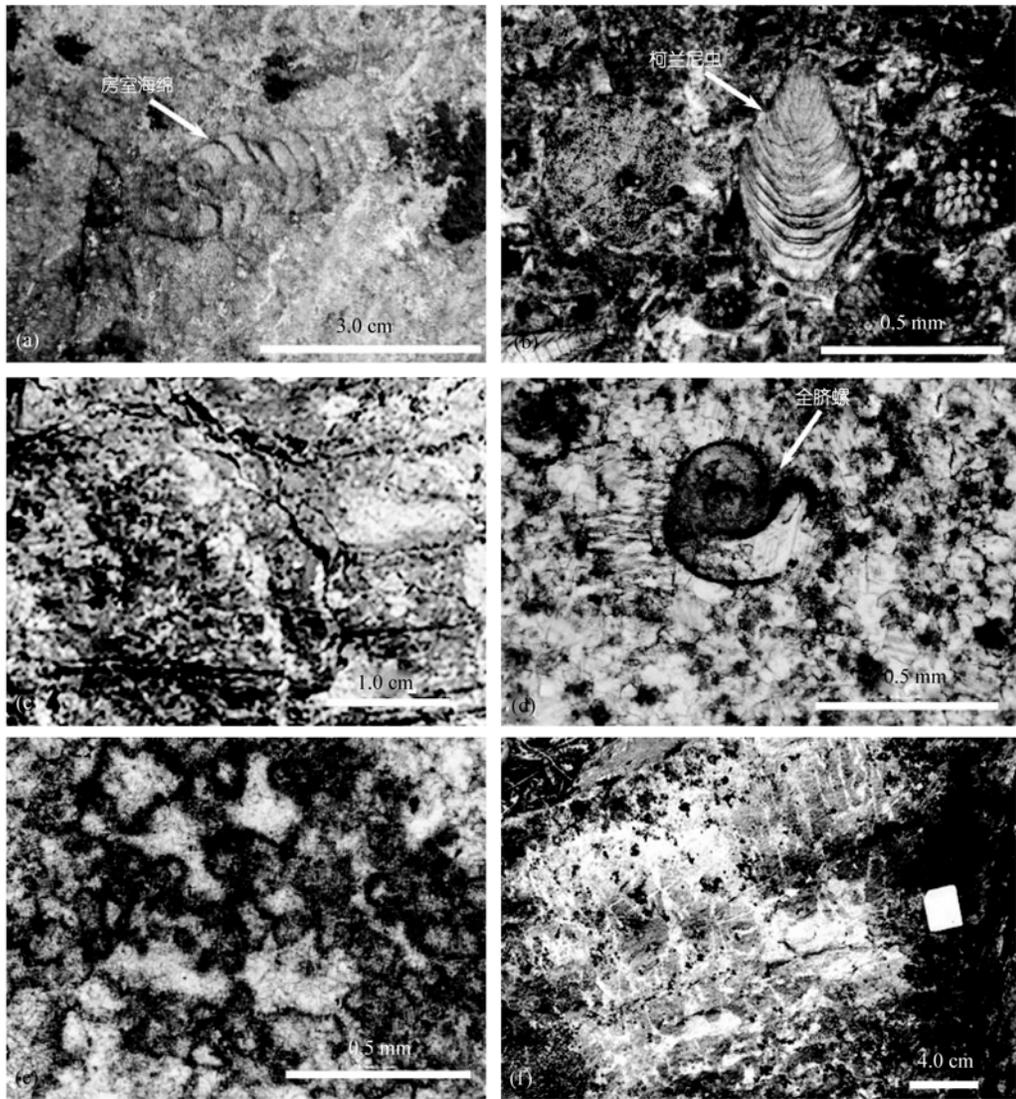


图3 重庆老龙洞二叠系-三叠系界线剖面岩石露头及显微照片

(a) 第1层, 生物礁灰岩, 含房室海绵化石; (b) 第2层, 泥粒岩, 含柯兰尼虫化石; (c) 第3层, 斑点状灰岩露头照片, 灰色和棕色斑点交错分布; (d) 第4层, 斑点状灰岩, 棕色的斑点在薄片上显示浅色的亮区, 含丰富的全脐螺化石; (e) 第5层, 斑点状灰岩, 含丰富的不规则囊状的微生物化石, 其中微生物化石被亮晶胶结物胶结; (f) 第7层, 树枝状灰岩, 呈树枝体部分为成岩改造过的灰岩, 树枝体间夹有灰色的残余的泥晶灰岩

发现了 *Hindeodus parvus*, 所以他们把界线定在距树枝状岩石顶面 0.3 m 处. 由于我们的牙形刺工作还没有完成, 暂时先采用他们的研究成果, 将 P-T 界线定在距第7层顶面 0.3 m 的地方(图2).

第7层之上为飞仙关组的薄板状灰岩, 未测.

2 小管状化石研究

2.1 化石特征

小管状化石分布在本剖面的第3层. 在露头上,

本层与其上的岩石无异, 也呈斑点状, 这种微生物化石由于个体细小, 而且没有形成特殊的岩石结构, 是不容易被发现的.

根据薄片观察, 管状化石的长度一般在 1 mm 以下. 几乎所有的管状化石都是向一端逐渐变细的. 粗端的直径最大的在 0.08 mm, 向另一端收缩尖灭(图4(a)), 或者改变直径大小, 呈现一处坡折, 尾端依然平直生长, 直至尖灭的情况(图4(b)). 管状体似乎比较柔软, 受外界的限制可以发生弯曲(图4(c)~(f)). 管

体的壁由隐晶到微晶的方解石组成，在纵切面上呈一条暗色细线，横切面为圆形。同一管体的壁厚度均匀，不同管体可能因生长期或获得的营养程度不同，其厚度不同，在 0.005~0.01 mm 之间。几乎所有的管状化石的内部都是空的，并被泥晶方解石或细亮晶方解石充填。

管状化石在岩石中总体上显示无规律的分布，因为管状体的横、纵切面分布杂乱无章(图 4(c))。但在显微镜下若干视野中见到它们有呈放射状或束状排列的趋向。

2.2 小管状化石的分类位置

小管状化石的大小属于微生物的范畴。微生物不是一个生物分类群，而是指个体很小，需要借助显微镜或电子显微镜才能观察研究的一切细小生物，包括细菌、古菌、真菌、细小藻类、细小原生动物。

原生动物大小一般在 0.03~0.3 mm，但也有大到超过 100 μm 的。当然只有细小的才能归入微生物的范畴。微生物包括鞭毛纲、肉足纲、孢子虫纲和纤毛虫纲。这些类群中，只有肉足纲的有孔虫亚纲可能有小管状的化石。但是，本文的小管状化石因为如下理

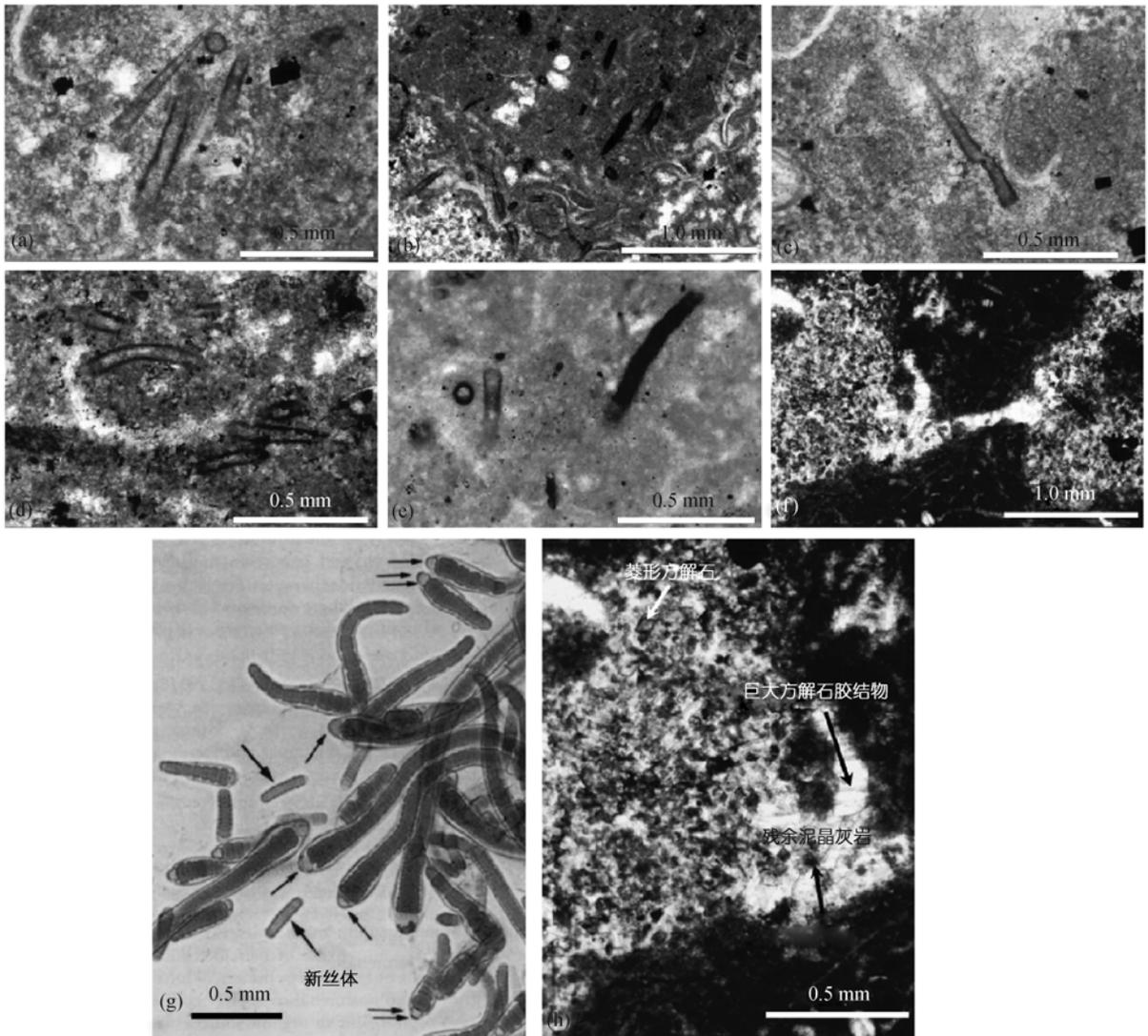


图 4

(a)~(f) 小管状蓝细菌的化石显微照片，(g) 蓝细菌 *Rivularia* PCC 7116 照片其丝状体由单列细胞构成，外被胶鞘，直径向一端变细(引自文献[27])，(h) 斑点状岩石的显微照片，其中的亮区为露头上的棕色斑点区域，由含有小的菱形的方解石晶体和残余泥晶灰岩的巨大方解石胶结物组成，暗区为露头上的灰色斑点区域，由泥晶灰岩组成

由不可能是小有孔虫: () 本文的小管状化石壁的微细结构不属于典型的有孔虫壁的任何一种; () 不具有任何房室的特征; () 本文的小管状化石在生活时可能显柔性, 这是有孔虫不具备的特点。

绿藻中只有丝藻目(Ulotrichales)具有不分枝的丝状体类型。但是它们是由圆筒状细胞相连而成的单列, 本文的化石不具备这种特征。此外, 丝藻目的分子大多数是淡水的, 只有少数是海生的。而且, 尚没有丝藻目钙化化石的报道。

真菌通常是分枝状的, 单个菌丝的直径比较稳定。本文的小管状化石形态简单, 直径向一端渐细, 不似真菌的丝体。

古菌一般呈小球状、不规则多边形, 少数呈棒状或线状。棒状和线状者长度只有几个到几十个微米, 宽度一般不到 1 μm , 而且不具有直径向一端变细的特征。本文的小管状化石长和宽分别在 1000 和 80 μm , 而且具有直径向一端变细的特征。

细菌中有单个不分枝丝状的类型, 但是都是等直径的, 而且很小, 直径只有 0.001 mm, 长度只有不到 0.05 mm。

蓝细菌的丝状体类型有不分枝的、分枝的、含有异形胞的。不分枝的包括: () 丝体由一系列球状或椭球状或腰鼓状细胞排列而成, 丝体外缘不平直的, 呈链状, 等直径; () 由一系列圆柱状细胞构成, 丝体外缘平直的, 但是等直径的; () 由一系列圆柱状或腰鼓状细胞排列而成, 丝体外缘有胶质鞘, 因而平直, 最大特点是丝体直径向一端渐细, (但幼体是等直径的), 特别是丝体粗端有一个球形的细胞。本文的小管状化石与()相似。()的分子原来被归入胶须藻科(Rivulariaceae)。在新的分类中被作为蓝细菌的 Subsection , 包括 3 个形态属(form-genus): *Calothrix* Agardh 1824, *Rivularia* Agardh 1824(图 4(h)), 和 *Tolypothrix* Kützing 1843^[27]。

本文的管状化石都具有直径向一端渐细的显著特点, 并且见到管体粗端有一个球状变细的部分(相当于球状细胞), 见到细胞为圆柱状, 见到幼体是等直径的, 管体是不规则分布的。这些特征与 *Rivularia* (图 4(g))很相似, 丝体是柔性的, 有的是弯曲的。但是老龙洞的化石是胶鞘钙化的种类, 而 *Rivularia* 不钙化的。考虑到该化石保存的其他可供进一步分类的特征非常有限, 建立新种的材料不足, 归入已知种也很困难, 因此将其归入 *Rivularia*, 描述为 *Rivularia*

sp.[胶须藻(未定种)]。

3 讨论

Ezaki等人^[23]文章中的图 3E和F描述的可能是与本文的管状蓝细菌相似的东西, 但是被认为是孔虫。Groves和Altiner^[8]报道了土耳其Central Taurides下三叠统叠层石相中的*Earlandia* sp., 他们认为这种化石与Ezaki等人^[23]的图 3E和F的东西是一样的。Angiolini等人^[24]研究了土耳其的Antalya Nappes的 P-T界线地层的化石, 其中发现的*Earlandia*(其图 6 中的 5-7)就明显与Ezaki等人^[23]提到的有孔虫化石不同。有孔虫*Earlandia*是有初房的, 而这类管状生物从未发现有房室特征, 所以笔者不认同Ezaki等以及Groves和Altiner的分类。

笔者认为这种生物不大可能是有孔虫, 理由如下: () 有孔虫大多数是正常海洋环境的生物, 大灭绝后的环境是极端恶劣的, 尽管在PT之交的研究中的确有小有孔虫生物群丰富的报道^[28-30], 但是在这些报道中所描述的有孔虫的特征与我们研究的大相径庭, 这些小有孔虫都有明显的多房室特征。不同地区的沉积环境是不同的, 在某些地区PT之交的环境中也不排除会出现这种短暂的机会主义者。另外, 某些研究有孔虫复苏的文献也提到有孔虫穿越界线的现象^[31], 然而其中报道的材料都与我们的不同。() 这个小管状生物的生物群具有排他性, 几乎没有其他生物共生, 这可能说明环境条件恶劣, 不适合大多数的生物生存; 只有能够适应特殊环境的生物才能在这样的环境中生活。现代微生物生态学研究也表明, 极端不良环境的微生物主要是蓝细菌等菌类。() Groves和Altiner^[8]报道这种生物是在叠层石里的。叠层石是蓝细菌和菌类形成的, 不是有孔虫形成的; 在现代叠层石的文献中也没有有孔虫的报道^[32]。Hips和Haas^[33]报道的匈牙利Bükk山的PTB剖面中, 界线之上有一层 0.5 m厚的薄层灰泥岩, 其中产有孔虫*Earlandia*、介形虫, 以及残留的生物碎屑。根据Groves和Altiner^[8]的研究认为这种有孔虫在意大利、奥地利、斯洛文尼亚、伊朗和土耳其皆有分布。

王永栋等人^[34]在对重庆附近以及其他一些地区的下三叠统微生物岩研究中发现了两种微生物化石, 一种为串囊状的肾形藻蓝细菌化石, 另一种为小球状的蓝细菌化石。与本文研究的微生物化石在大小和形态上都是各有其特点的。

4 管状蓝细菌群落的古生态意义及其对岩石形成的贡献

蓝细菌是自然界中生态适应范围最广的一类生物。各种盐度、各种温度、各种压力下都有蓝细菌存在。蓝细菌能够进行光合作用，能够在极端贫营养的环境中生活^[35]。在富营养化的水体中，蓝细菌是最重要的微生物^[35]。蓝细菌可能是最能适应缺氧环境的。许多蓝细菌在光合作用中能够放出氧气，所以能够在贫氧或缺氧的环境中生存。由于蓝细菌在生命活动中需要进行光合作用，所以一般分布在浅水中或者水体的上层^[35]。

前人的研究认为老龙洞剖面存在缺氧事件，依据是黄铁矿的存在。笔者在露头 and 薄片上都看到黄铁矿颗粒的存在，大小可以达到 1 mm 以上。薄片上看有的黄铁矿明显切割生物化石，所以应该是成岩期形成的或者是沉积期形成然后成岩期发生次生加大的。细小草莓状黄铁矿被认为是沉积环境缺氧的有效标志。通过扫描电镜观察，笔者没有在该层发现细小草莓状黄铁矿，所以不能从黄铁矿确定是否是缺氧环境。但是Crasquin-Soleau和Kershaw^[25]的介形虫化石研究认为二叠纪末生物大绝灭后是贫氧环境，而且大绝灭后首先出现蓝细菌的群落可能说明环境的确是贫氧的，因为蓝细菌是一种光合自养生物，是可以适应贫氧环境的。蓝细菌的存在也说明，这里大绝灭后的水体是比较浅的，因为蓝细菌的光合作用

需要浅水环境。

由于丝状蓝细菌化石十分细小，在岩石中不能形成显著的孔隙，所以对于成岩流体的运移没有明显的帮助。含有该蓝细菌化石的岩石外貌呈斑点状，由图 4(h)可以看出，斑点状构造的形成根本不需要微生物就可以形成。斑点状构造其实是一种成岩构造。其形成机制是溶蚀作用和胶结作用的共同作用^[36]。通过岩石薄片观察发现，浅色区和暗色区都没有微生物化石，由此可以认为这里的斑点状构造的形成与微生物的作用无关。所以，岩石的斑点状构造的形成与微生物的存在是没有关系的。

5 结论

() 在晚二叠世末生物集群灭绝之后的重庆老龙洞二叠系-三叠系界线地层首先出现的是管状蓝细菌群落。管状蓝细菌化石的长度一般在 1 mm 以下，直径向一端变细，粗端直径最大 0.08 mm，特征类似于 *Rivularia*，因此将其归入 *Rivularia*，描述为 *Rivularia* sp. [胶须藻(未定种)]。

() 这种微生物化石出现的地层与下伏的生物礁岩地层呈整合接触，这种微生物群落可能是适应贫氧环境的，说明导致生物大绝灭的恶劣环境持续了或者是更加恶劣了相当一段时间。

() 这种微生物化石出现的地层岩石呈现斑点状构造，但是由于它们在岩石中不能形成显著的孔隙，对斑点状构造的形成没有什么建设作用。

参考文献

- 1 Wu Y S. Conodont evolution during Permian-Triassic transition in mid-low latitudes: A close-up view. *Albertiana*, 2005, 33: 93—94
- 2 Wu Y S, Fan J S. Permian-triassic history of reefal thalimid sponges: Evolution and extinction. *Acta Palaeontol Sin*, 2002, 41(2): 163—177
- 3 Shen S Z, Shi G R. Paleobiogeographical extinction patterns of Permian brachiopods in the Asian-western Pacific region. *Paleobiology*, 2002, 28(4): 449—463 [\[doi\]](#)
- 4 Shen S Z, Zhang H, Li W Z, et al. Brachiopod diversity patterns from Carboniferous to Triassic in South China. *Geol J*, 2006, 41(3-4): 345—361 [\[doi\]](#)
- 5 Jin Y G, Wang Y, Wang W, et al. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 2000, 289: 432—436 [\[doi\]](#)
- 6 童金南. 华南古生代-中生代之交有孔虫的类群演替. 见: 戎嘉余, 方宗杰, 主编. 生物大灭绝与复苏来自华南古生代和三叠纪的证据. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2004. 701—719
- 7 Chen Z Q, Kaiho K, George A D. Survival strategies of brachiopod faunas from the end-Permian mass extinction. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2005, 224: 232—269 [\[doi\]](#)
- 8 Groves J R, Altiner D. Survival and recovery of calcareous foraminifera pursuant to the end-Permian mass extinction. *C R Palevol*, 2005, 4: 487—500 [\[doi\]](#)
- 9 Farabegoli E, Perri M C, Posenato R. Environmental and biotic changes across the Permian-Triassic boundary in western Tethys: The Bulla paratratype, Italy. *Global Planet Change*, 2007, 55: 109—135 [\[doi\]](#)
- 10 Yin H F, Feng Q L, Lai X L, et al. The protracted Permo-Triassic crisis and multi-episode extinction around the Permian-Triassic

- boundary. *Global Planet Change*, 2007, 55: 1—20[[doi](#)]
- 11 Xie S C, Pancost R, Huang X Y, et al. Molecular and isotopic evidence for episodic environmental change across the Permo/Triassic boundary at Meishan in South China. *Global Planet Change*, 2007, 55: 56—65 [[doi](#)]
- 12 吴亚生, 范嘉松, 姜红霞, 等. 二叠纪末生物礁生态系统绝灭的方式. *科学通报*, 2007, 52(2): 207—214
- 13 Yin H F, Wu X B, Ding M H, et al. The Meishan section, candidate of the Global Stratotype section and point of Permian-Triassic boundary. In: Yin H F, ed. *The Palaeozoic-Mesozoic Boundary Candidates of the Global Stratotype Section and Point of the Permian-Triassic Boundary*. Beijing: China University of Geosciences Press, 1996. 31—48
- 14 Lehrmann D J. Early Triassic calcimicrobial mounds and biostromes of the Nanpanjiang Basin, South China. *Geology*, 1999, 27: 359—362 [[doi](#)]
- 15 Lehrmann D J, Payne J L, Felix S V, et al. Permian-Triassic boundary sections from shallow-marine carbonate platforms of the Nanpanjiang Basin, south China: Implications for oceanic conditions associated with the end-Permian extinction and its aftermath. *Palaios*, 2003, 18 (2): 138—152[[doi](#)]
- 16 Baud A, Richoz S, Marcoux J. Calcimicrobial cap rocks from the basal Triassic units: Western Taurus occurrences (SW Turkey). *C R Palevol*, 2005, 4: 569—582[[doi](#)]
- 17 Reinhardt J W. Uppermost Permian reefs and Permo-Triassic sedimentary facies from the southeastern margin of Sichuan Basin, China. *Facies*, 1988, 18: 231—288[[doi](#)]
- 18 强子同, 郭一华, 张帆, 等. 四川盆地上二叠统生物礁及其成岩作用. *石油与天然气地质*, 1985, 6(1): 82—90
- 19 范嘉松, 杨万容, 闻传芬, 等. 四川重庆北碚老龙洞二叠纪生物礁. 见: 范嘉松, 主编. *中国生物礁与油气*. 北京: 海洋出版社, 1996. 170—244
- 20 Wignall P B, Hallam A. Facies change and the end-Permian mass extinction in S.E. Sichuan, China. *Palaios*, 1996, 11: 587—596[[doi](#)]
- 21 Kershaw S, Zhang T, Lan G. A microbialite carbonate crust at the Permian-Triassic boundary in South China, and its paleoenvironmental significance. *Paleogeogr Paleoclimatol Paleoeocol*, 1999, 146: 1—18[[doi](#)]
- 22 Kershaw S, Guo L, Swift A, et al. Microbialites in the Permian-Triassic boundary interval in central China: Structure, age and destruction. *Facies*, 2002, 47: 83—90[[doi](#)]
- 23 Ezaki Y, Liu J B, Adachi N. Earliest Triassic microbialite micro— to megastructures in the Huaying area of Sichuan Province, South China: Implications for the nature of oceanic conditions after the end-Permian extinction. *Palaios*, 2003, 18: 388—402[[doi](#)]
- 24 Angiolini L, Carabelli L, Nicora A, et al. Brachiopods and other fossils from the Permo-Triassic boundary beds of the Antalya Nappes (SW Taurus, Turkey). *Geobios*, 2007, 40: 715—729[[doi](#)]
- 25 Crasquin-Soleau S, Kershaw S. Ostracod fauna from the Permian-Triassic boundary interval of South China (Huaying Mountains, eastern Sichuan Province): Palaeoenvironmental significance. *Paleogeogr Palaeoclimatol Palaeoeocol*, 2005, 217: 131—141[[doi](#)]
- 26 吴亚生, 姜红霞, 廖太平. 重庆老龙洞二叠系-三叠系界线地层的海平面下降事件. *岩石学报*, 2006, 22(9): 2405—2412
- 27 Boon D R, Castenholz R W. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Vol 1. The Archaea and the Deeply Branching and Phototrophic Bacteria. Baltimore: Wilkins & Wilkins, 2001. 582—589
- 28 宋海军, 童金南, 何卫红. 浙江煤山剖面二叠纪末的小有孔虫动物群. *微体古生物学报*, 2006, 23 (2): 87—104
- 29 Shen S Z, Cao C Q, Henderson C M, et al. End-Permian mass extinction pattern in the northern peri-Gondwanan region. *Palaeoworld*, 2006, 15(1): 3—30[[doi](#)]
- 30 Wignall P B, Newton R. Contrasting deep-water records from the Upper Permian and Lower Triassic of South Tibet and British Columbia: Evidence for a diachronous mass extinction. *Palaios*, 2003, 18(2): 153—167[[doi](#)]
- 31 Márquez L. Foraminiferal fauna recovered after the Late Permian extinctions in Iberia and the westernmost Tethys area. *Paleogeogr Palaeoclimatol, Palaeoeocol*, 2005, 229: 137—157[[doi](#)]
- 32 Bathurst R G C. *Carbonate Sediments and Their Diagenesis*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1971. 658
- 33 Hips K, Haas J. Calcimicrobial stromatolites at the Permian-Triassic boundary in a western Tethyan section, Bükk, Hungary. *Sed Geol*, 2006, 185: 239—253[[doi](#)]
- 34 王永标, 童金南, 王家生, 等. 华南二叠纪末大绝灭后的钙质微生物岩反古环境意义. *科学通报*, 2005, 50(6): 552—558
- 35 池振明, 主编. *现代微生物生态学*. 北京: 科学出版社, 2005. 45—423
- 36 姜红霞, 吴亚生. 重庆二叠系-三叠系界线地层微生物岩新认识. *岩石学报*, 2007, 23(5): 1189—1196