

细菌岩及其分类*

金振奎¹ 王金艺^{2,1}

1 中国石油大学(北京), 北京 102249

2 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206

摘要 微生物岩分类是研究微生物岩成因和分布规律的重要基础。鉴于微生物岩含义存在的问题, 将微生物岩改称细菌岩, 并在常规碳酸盐岩分类中将其列为独立的一类, 与礁碳酸盐岩并列。据矿物成分, 细菌岩可分为细菌碳酸盐岩、细菌硅岩等 7 大类。据构造, 细菌岩分为凝块岩、叠层岩、菌包粒岩和均一岩。凝块岩分为骨架和非骨架凝块岩。骨架凝块岩分为亮晶、灰泥—亮晶和灰泥凝块岩。从亮晶骨架凝块岩到灰泥骨架凝块岩, 水动力逐渐变弱, 水深通常逐渐变大。叠层岩可分为纹理清晰与纹理模糊 2 类, 前者形成于潮间—潮上带(水上), 后者形成于潮下带(水下); 还可分为柱状、波状、层状、丘状、锥状、墙状、皮壳状叠层岩, 每一类根据大小还可以细分。菌包粒岩可分为纹理清晰和模糊 2 类, 分别形成于潮间带、潮下带; 还可以据菌包粒大小分为菌毡岩和核形岩, 每一类还可细分。均一岩分为微晶和颗粒均一岩。本分类的特点: (1) 提出以矿物成分作为细菌岩的大类划分标准。(2) 将前人的“微生物岩”改称“细菌岩”, 将前人分类命名中的“石”(如凝块石)改为“岩”(如凝块岩)。(3) 对于骨架凝块岩, 提出了基于结构组分的分类, 能更好地反映沉积环境。(4) 基于纹理清晰度、形态或大小, 提出了叠层岩的分类, 并认为纹理清晰度具有指相意义。(5) 将菌包粒岩分为纹理清晰和纹理模糊菌包粒岩, 可反映形成环境。(6) 提出了均一岩的分类, 总结了其主要识别标志。

关键词 细菌岩 微生物岩 分类 凝块石 叠层石 均一石

第一作者简介 金振奎, 男, 1963 年生, 教授, 1983 年毕业于华东石油学院石油地质专业, 获学士学位; 1987 年毕业于加拿大卡尔加里大学碳酸盐岩沉积学专业, 获硕士学位; 1992 年毕业于石油大学(北京)沉积学专业, 获博士学位; 1994 年中国地质科学院构造地质博士后出站。主要研究方向为沉积地质学。E-mail: jinzhenkui@188.com。

中图分类号: P588.24⁺8 文献标志码: A

Bacterialites and their classification

JIN Zhenkui¹ WANG Jinyi^{2,1}

1 China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2 Sinopec Petroleum Exploration and Development Institute, Beijing 102206, China

Abstract The classification of microbialites constitutes a fundamental basis for investigating their origin and distribution. Owing to ambiguities in the definition of microbialites, these rocks are, in essence, predominantly bacterial in origin. Consequently, the term “bacterialite” is considered more precise than “microbialite” when referring to sedimentary rocks formed through bacterial activity. Bacterialites

谨以此文纪念冯增昭先生诞辰 100 周年。

* 国家自然科学基金(编号: 41872108)资助。[Financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41872108)]

收稿日期: 2025-09-08 改回日期: 2025-12-14

may be recognized as an independent category within the conventional classification of carbonate rocks, positioned alongside reef carbonates. Based on mineral composition, bacterialites can be divided into seven primary types; bacterial carbonates, siliceous, ferrous, phosphate, saline, bauxitic, and clastic bacterialites, each of which allows for further subdivision. Taking bacterial limestones as a representative example, they are classified according to macrostructural features into thrombolites, stromatolites, coatites, and leiolites. Thrombolites are subdivided into framework-bearing and non-framework types. Framework thrombolites can be further categorized into sparry, micritic-sparry, and micritic types, reflecting a progressive decrease in hydrodynamic energy and a corresponding increase in water depth from sparry to micritic forms. Stromatolites are classified based on lamination clarity into lamination-clear and lamination-obscure types; the former typically form in intertidal to supratidal (subaerial) environments, while the latter occur in subtidal (subaqueous) settings. Additionally, stromatolites are categorized morphologically into columnar, wavy, planar laminar, domal, conical, and wall-like forms, with each morphotype further differentiated by size. Coatites are similarly classified according to the distinctness of concentric lamination into lamination-clear and lamination-obscure types, which correspond to intertidal and subtidal depositional environments, respectively. They may also be subdivided based on size into oncolites and bacterial oolites. Leiolites are classified into microcrystalline and granular varieties. This classification system presents several innovative aspects: (1) mineral composition is introduced as the principal criterion for defining major bacterialite categories; (2) the nomenclature is revised by replacing “microbialite” with the more accurate term “bacterialite”; (3) the texture-based classification of framework thrombolites provides enhanced environmental interpretation; (4) stromatolites are classified both by lamination clarity—indicative of depositional conditions—and by morphology and size; (5) coatites are systematically categorized according to the degree of concentric lamination, which serves as an environmental indicator; and (6) a formal classification of leiolites is proposed, accompanied by clearly defined diagnostic criteria.

Key words bacterialite, microbialite, classification, thrombolite, stromatolite, leiolite

About the first author JIN Zhenkui, born in 1963, is a professor. He earned bachelor degree in petroleum geology from East China Petroleum Institute in 1983; master degree in carbonate sedimentary geology from University of Calgary, Canada; Ph.D. in sedimentary geology from University of Petroleum (Beijing) in 1992; finished postdoctor research in structural geology in China Academy of Geosciences in 1994. He is mainly engaged in sedimentary geology. E-mail: jinzhenkui@188.com.

1 概述

微生物是地球上数量庞大、种类繁多的生物,几乎遍布地壳表层沉积岩形成区域:从地表到地下数千米处,从水上到水下,从咸水到淡水,从富氧到缺氧,从酸性到碱性,从零下几十度到零上几十度甚至几百度(如海底烟囱)。微生物广泛参与了沉积岩的形成与成岩演化。就碳酸盐岩来说,其相当大一部分是由微生物直接或间接形成的。例如,大量灰泥灰岩中的灰泥是微生物贡献的(Thompson and Ferris, 1990; Pratt, 2001);灰岩颗粒中的核形石是微生物形成的;越来越多的鲕粒被发现是

微生物成因的(郭芪恒等, 2023);一些球粒也被认为是钙化的微生物团块(Riding, 2000);许多胶结物是微生物沉淀的;很多白云岩是微生物形成的(Vasconcelos *et al.*, 1995)。随着研究的深入,越来越多的沉积岩会被发现与微生物有关。

此外,微生物岩原生孔隙较发育,有利于后期岩溶,可以形成优质碳酸盐岩储集层,如四川盆地震旦系、寒武系和三叠系,鄂尔多斯盆地奥陶系,渤海湾盆地元古宇、寒武系和奥陶系,塔里木盆地寒武系和奥陶系,柴达木盆地古近系,许多微生物岩形成了重要油气层。掌握微生物岩的发育特征及

其分布规律对油气勘探开发有重要指导意义。

微生物岩分类是研究微生物岩成因和分布规律的重要基础。关于微生物岩及其分类，国内外学者都进行了大量研究。Steel (1825) 首次描述了现在被称为叠层石的岩石。Hall (1883) 认为这种岩石是某种动物化石，并称之为 *Cryptozoon*。Kalkowsky (1908) 提出了“叠层石”术语，并认为是低等植物形成的。Walcott (1914) 描述了湖泊中一种现代结核（核形石），并提出是蓝绿藻沉淀形成的。Heim (1916) 提出了“核形石”术语。Pia (1927) 称具有纹层构造的岩石为“绵层石” (*Spongostromata*)，并按照生物科属种命名的方式将其分为 2 个亚科：叠层石和核形石，还识别出了 3 个叠层石种和 3 个核形石种。

Logan 等 (1964) 根据形态把叠层石分为 3 大类：侧向连接的半球状 (LLH 型)、垂向叠加半球状 (SH 型) 和球状 (SS 型)。根据半球间距对每一大类进行了细分，并把核形石归为 SS 型叠层石。Allwood 等 (2006) 根据形态把叠层石分为 7 类。

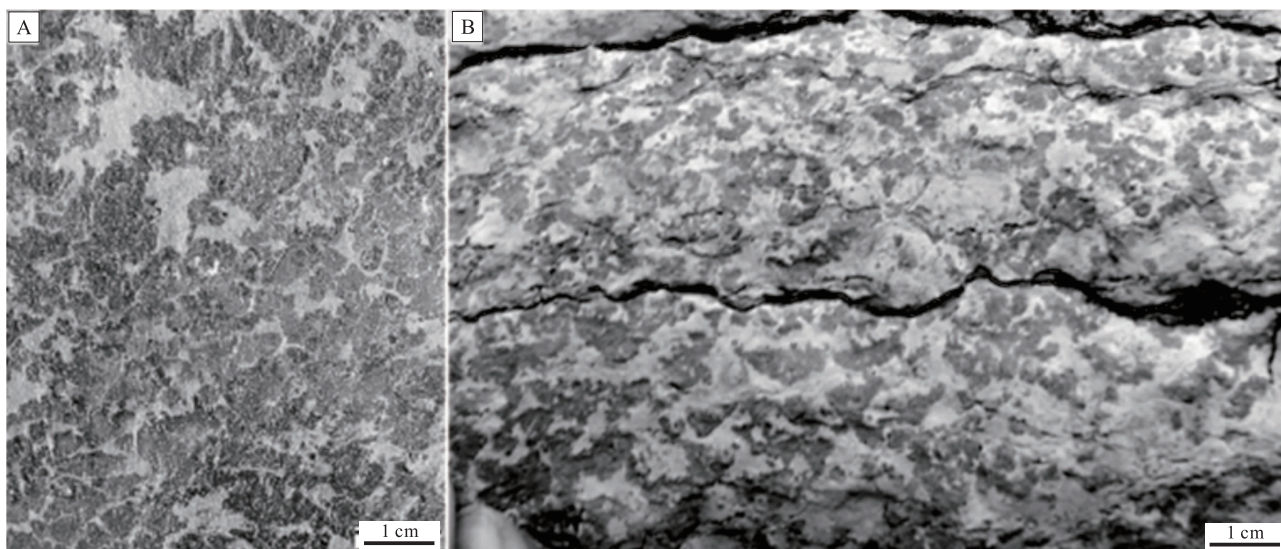
Folk (1959) 提出了“生物岩” (*Biolithite*)，指生物原地形成的石灰岩。Aitken (1967) 提出了“藻碳酸盐岩”和“凝块石” (*Thrombolite*)。他将藻碳酸盐岩分为钙化和隐藻碳酸盐岩，后者又分为隐藻生物岩和隐藻粒屑碳酸盐岩。隐藻生物岩分为核形石、叠层石、凝块石、隐藻纹理碳酸盐岩。他把叠层石分为丘状、柱状和指状；把核形石分为筒

单和海绵状核形石。Stanier 和 Cohen-bazire (1977) 发现蓝绿藻是原核生物，并将其命名为“蓝细菌”。蓝绿藻的细菌属性激发了对其他细菌在沉积岩形成中所起作用的思考和研究。

Burne 和 Moore (1987) 提出了“微生物岩 (*Microbialite*)”，指“由底栖微生物群落捕获和粘结碎屑沉积物/矿物沉淀而形成的有机沉积物”。他们将微生物岩分为 3 类：粘结岩、格架岩和泉华。Braga 等 (1995) 识别出了一类新的微生物岩——均一石 (*Leiolite*)。

Riding (1991, 2000) 将微生物岩分为 4 类：凝块石、树枝石 (*Dendrite*)、叠层石和均一石。这个分类简要实用，但也存在一些问题。首先，树枝石与凝块石外观上相似，都呈花斑状 (图 1)，只是斑的形态略有不同；其次，显微镜下两者也相似，许多凝块石也像树枝石一样由树枝状蓝细菌组成。这 2 类应该合并为 1 类，都归凝块石，可作为不同类型的凝块石。此外，把核形石归为叠层石不妥，因为核形石在形成过程中可以滚动。

国内一些学者也提出了微生物岩分类方案。如梅冥相 (2007) 将微生物岩分为叠层石、核形石、凝块石、纹理石、树形石、均一石。吴亚生等 (2018) 将微生物岩分为非钙化微生物岩和矿化微生物岩；将非钙化微生物岩分为底栖类和浮游/漂浮类，底栖类微生物岩进一步分为叠层石、核形石、层纹石、凝块石、均一石，浮游/漂浮类则为



A—凝块石，摩洛哥 Tiout 附近下寒武统；B—树枝石，中国济南附近中寒武统张夏组

图 1 凝块石与树枝石外观比较 (据 Riding, 2000)

Fig. 1 Comparison of macroscopic characteristics between dendrite and thrombolite (after Riding, 2000)

模铸岩；将矿化微生物岩也分为底栖类和浮游/漂浮类，底栖类微生物岩进一步分为格架岩和粘结岩，浮游/漂浮类微生物岩则分为放射虫颗粒岩、放射虫泥粒岩等等。

虽然前人做了大量研究工作，但关于微生物岩的含义和分类仍存在一些问题。微生物指显微级别的生物 (Riding, 2000)。理论上，微生物岩应指微生物形成的沉积岩。目前存在的问题是有些微生物形成的岩石被当作微生物岩，而另一些却不被当作微生物岩。例如，很多介形虫、有孔虫、绿藻、颗石藻等均属于微生物，而由这些微生物形成的石灰岩却不被当作微生物岩 (Riding, 2000)，而被归为传统石灰岩分类中的“生屑灰岩”。实际上只有由细菌类微生物 (如蓝细菌、硫酸盐还原菌等) 形成的沉积岩才被当作微生物岩。为了消除这种概念与内容的矛盾，笔者提出目前所说的微生物岩应改称“细菌岩” (bacterialite)，因为这个术语才名副其实。细菌岩在此定义为“由细菌类微生物通过捕获/沉淀作用形成的沉积岩”。“捕获作用”指细菌类微生物通过自身的粘结、障积作用使机械搬运的碎屑物质沉积下来的作用，属于机械沉积作用；“沉淀作用”既包括形成细菌化石的钙化 (矿化)，也包括细菌新陈代谢或死后腐烂在细菌周围微环境中诱导的沉淀，属于化学沉积作用。

在分类方面，虽然以往的分类方案各有特色，但在类型与沉积环境之间的关系方面仍有进一步深入研究的空間。本次从分类需尽可能反映沉积环境的角度提出了新的分类方案。

2 笔者分类原则

细菌岩分类应该本着 3 个原则：

- 1) 分类标准应是描述性的；
- 2) 划分出的类型特征应明显，在野外和室内容易识别；
- 3) 分类应尽可能反映其成因和形成环境。

本次选择的分类依据包括矿物成分、构造、细菌种类、结构组分、形态和大小等。

3 基于矿物成分的分类

根据矿物成分，细菌岩可分为 7 大类：细菌碳酸盐岩、细菌硅岩、细菌铁岩、细菌磷岩、细菌盐

岩、细菌铝土岩、细菌碎屑岩 (金振奎和王金艺, 2025; 王金艺, 2025)。

细菌碳酸盐岩主要由细菌捕获/沉淀的碳酸盐矿物组成，可分为细菌灰岩和细菌云岩。细菌硅岩主要由细菌沉淀的玉髓、蛋白石组成。细菌铁岩主要由细菌沉淀的赤铁矿、磁铁矿等组成。细菌磷岩主要由细菌沉淀/捕获的胶磷矿、磷灰石组成。细菌盐岩主要由细菌沉淀/捕获的石膏、石盐等易溶盐类矿物组成。细菌铝土岩主要由细菌沉淀/捕获的铝土矿组成。细菌碎屑岩主要由细菌捕获的陆源碎屑物质组成，并可分为细菌砂岩 (如叠层石砂岩)、细菌粉砂岩、细菌泥岩。有些细菌可通过沉淀黏土矿物形成泥岩 (谢树成等, 2023)。细菌碳酸盐岩最常见，通常所说的细菌岩皆指该类细菌岩，除非特别说明。下面以细菌灰岩为例阐述细菌岩分类方案，细菌云岩和其他细菌岩的分类与之类似，只需将“灰岩”替换为“云岩”、“硅岩”、“铁岩”等。

4 基于宏观构造的分类

根据宏观构造，细菌灰岩分为 4 类：凝块岩 (凝块灰岩)、叠层岩 (叠层灰岩)、菌包粒岩 (菌包粒灰岩) 和均一岩 (均一灰岩) (表 1) (金振奎和王金艺, 2025)。凝块岩、叠层岩和均一岩都为细菌原地沉积，菌包粒岩可为异地沉积。

本文的凝块岩、叠层岩和均一岩分别相当于前人的凝块石、叠层石和均一石。本文将“石”改为“岩”，一是因为凝块岩与凝块石、叠层岩与叠层石的含义确实不同 (详见后)；二是因为在中文命名系统中，“岩”是岩石的统一名称，如灰岩、云岩等，而“石”多为矿物名称，如方解石、白云石等，将“岩”称为“石”不符合中文命名习惯和原则。

4.1 凝块石、凝块岩及其分类

不同学者对凝块石的定义有差异。Aitken (1967) 的“Thrombolite”指凝块，用“Thrombolitic limestone”指凝块灰岩。Kennard 和 James (1986) 则将“Thrombolite”定义为凝块岩，指具有凝块构造的一种微生物沉积类型，其中的凝块 (clot) 大小为毫米级到厘米级，形状和分布不规则，颜色暗，由泥晶或微晶组成，并被泥晶或砂级

表 1 细菌岩（细菌灰岩）分类
Table 1 Classification of bacterialites (bacterial limestones)

岩石名称	类	亚类	小类	种
细菌岩 (细菌灰岩)	凝块岩	骨架凝块岩	亮晶骨架凝块岩	亮晶灌丛菌(肾形菌等)凝块岩
			亮晶—灰泥骨架凝块岩	亮晶—灰泥灌丛菌(肾形菌等)凝块岩
		灰泥骨架凝块岩	灰泥灌丛菌(肾形菌等)凝块岩	
		非骨架凝块岩	微晶凝块岩	
	叠层岩	纹理清晰叠层岩(A型)、 纹理模糊叠层岩(B型)	柱状叠层岩	极细、细、粗、极粗柱状叠层岩
			波状叠层岩	小、中、大波状叠层岩
			层状叠层岩	薄、中、厚层状叠层岩
			丘状叠层岩	小、中、大丘状叠层岩
			锥状叠层岩	小、中、大锥状叠层岩
			墙状叠层岩	薄、中、厚墙状叠层岩
菌包粒岩	纹理清晰菌包粒岩(A型)、 纹理模糊菌包粒岩(B型)	核形岩	细、中、粗核形岩	
		菌鲕岩	细、中、粗菌鲕岩	
均一岩		微晶均一岩		
		颗粒均一岩		

沉积物或亮晶分隔开。在中国，Thrombolite 被译为凝块石，指岩石。

笔者认为，凝块岩与凝块石应该分开，凝块岩(Thrombolite)应指主要由凝块或称凝块石(Thromboid)组成的细菌岩，且凝块的含量应在50%以上。凝块(凝块石)只是一种结构组分，是细菌成因的。凝块之间为非细菌成因的充填物，通常为机械或无机化学沉积。

凝块岩呈花斑状(或称凝块状)(图1)，由暗色斑(深灰色)和浅色斑(灰色、浅灰色)混杂组成。暗色斑通常为凝块，浅色斑通常为充填物。充填物主要为灰泥基质和亮晶胶结物。斑形状多不规则，大小通常为毫米级到厘米级。

如果凝块的含量在50%以下，可按照三级命名法命名(金振奎等，2021)，如凝块质鲕粒灰岩(凝块含量25%~50%)、含凝块鲕粒灰岩(凝块含量10%~25%)。

根据不同的分类依据，凝块岩可有不同的分类方案。

4.1.1 基于钙化细菌的分类

细菌可分钙化(或矿化)菌和非钙化(或非矿化)菌，前者形成细菌化石，如灌丛菌(Epiphyton)等；后者则没有留下化石。据此，凝块岩可分为2类：骨架凝块岩和非骨架凝块岩。

骨架凝块岩指主要由钙化菌形成的凝块岩，钙

化菌形成骨架(图1；图2-A)，含量大于10%(通常在30%以上)。非骨架凝块岩指主要由非钙化菌诱导沉淀的微晶(泥、粉晶)方解石(或文石)组成的凝块岩，细菌化石含量小于10%(图2-B)。暗色和浅色凝块分别由泥晶和粉晶方解石组成(图2-B)。

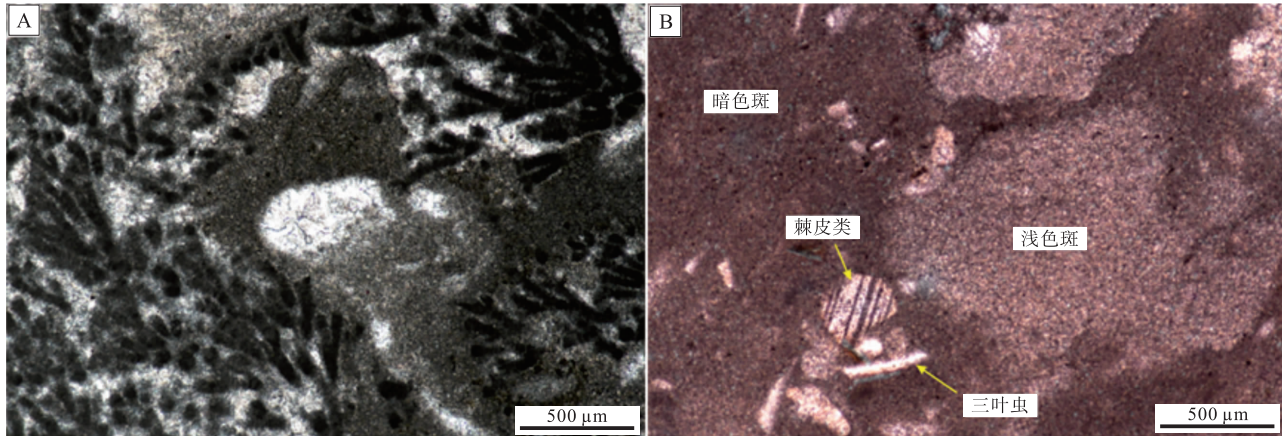
4.1.2 基于结构组分的分类

凝块岩的结构组分可分5种：细菌骨架、灰泥(基质)、亮晶(胶结物)、颗粒和细菌微晶(简称菌晶)，其中前3类主要是骨架凝块岩的结构组分，菌晶主要是非骨架凝块岩的结构组分，颗粒可出现于骨架和非骨架凝块岩中，数量一般较少。

细菌骨架即钙化菌化石，是骨架凝块岩的主要组分。灰泥指机械沉积的泥级方解石，代表低能环境，是水体安静时从悬浮状态沉积下来的。亮晶是胶结物，代表动荡环境。亮晶和灰泥充填于细菌骨架之间的孔隙中，统称填隙物。颗粒主要是鲕粒、球粒、生屑等，有些生屑是原地埋藏的。菌晶指细菌诱导沉淀的晶粒，通常为泥晶或粉晶。

对于骨架凝块岩，可据填隙物类型进一步分为3类：亮晶骨架凝块岩、灰泥—亮晶骨架凝块岩和灰泥骨架凝块岩(金振奎和王金艺，2025)。每一类可据细菌的种类进一步细分，并用细菌名称代替“骨架”，如亮晶灌丛菌凝块岩。

亮晶骨架凝块岩是填隙物以亮晶占绝对优势的



A—灰泥—亮晶—菌丛骨架凝块岩，山东汶南类王庄寒武系张夏组；B—非骨架凝块岩，由暗色凝块（暗色斑）和浅色凝块（浅色斑）组成，含少量生屑，北京门头沟下苇甸寒武系张夏组。均为单偏光

图 2 不同类型凝块岩显微特征

Fig. 2 Microscopic characteristics of different thrombolites

凝块岩，亮晶大于 75%（亮晶+灰泥=100%）。这类凝块岩形成于以动荡为主的环境中，水深多在正常浪基面附近或之上，灰泥难以沉积下来。

灰泥—亮晶骨架凝块岩是填隙物为灰泥和亮晶且两者含量相近的凝块岩，亮晶与灰泥含量都在 25%~75%之间（图 2）。这类凝块岩形成于间歇动荡环境中，动荡与安静交替，水深多在正常浪基面与风暴浪基面之间。

灰泥骨架凝块岩是填隙物以灰泥占绝对优势的凝块岩，灰泥大于 75%。这类凝块岩形成于以安静为主的环境中，水深多在风暴浪基面附近或之下。

从亮晶骨架凝块岩到灰泥骨架凝块岩，水动力逐渐变弱，水深通常逐渐变大。

细菌的形态与水动力之间也有一定关系。灌丛菌呈灌木丛状，抗风浪能力弱。肾形菌呈团块状，葛万菌集合体多呈缠绕束状，抗风浪能力均比灌丛菌强些。岩石类型相同时（如都是灰泥骨架凝块岩），肾形菌（或葛万菌）凝块岩代表的水动力比灌丛菌凝块岩略强些。

骨架凝块岩中，凝块主要由细菌化石组成，为暗色斑块，而凝块间的填隙物为浅色斑块（图 2-A）。

非骨架凝块岩中，暗色和浅色斑块均为凝块，分别由泥晶和粉晶方解石组成（图 2-B），可称“微晶凝块岩”。在此不用“灰泥凝块岩”，因为“灰泥”是机械沉积的，与陆源泥相当，而微晶是

沉淀的。暗色斑晶粒更细，是因为这里细菌更密集，诱导沉淀速率更快。细菌席（或膜）中细菌的密集程度是不一样的。此外，微晶凝块岩中微窗格构造常见，是细菌席（膜）遮挡或腐烂形成的孔隙，后期被方解石充填。

4.2 叠层石、叠层岩及其分类

4.2.1 叠层石的定义

叠层石与叠层岩不同，前者只是后者的一种结构组分。例如，柱状叠层岩由柱状叠层石和柱间充填物组成。

其实 Kalkowsky（1908）当时提出了 2 个术语，即“Stromatoid”和“Stromatolith”。“Stromatoid”是生物成因的纹理构造，“Stromatolith”指含有“Stromatoid”的岩石。两者之间的关系就像鲕粒（oolite）与鲕粒岩（oolite）一样。后来，这 2 个术语没有得到普遍应用，而被“Stromatolite”取代了。“Stromatolite”源自希腊文 stroma 与 lithos，-lithos 和 -lite 均具有岩的含义，因此本应译为“叠层岩”。但从其定义看，是指“Stromatoid”，应被译成“叠层石”。许多学者的叠层石 Stromatolite 既指“Stromatoid”，又指“Stromatolith”。笔者不赞同这种用法。

关于叠层石的定义和成因，有不同观点。Kalkowsky（1908）最初给叠层石的定义是生物成因的纹理构造。Reis（1908）认为叠层石是从某种胶体中无机沉淀形成的（Riding, 2000）。Black

(1932) 根据现代叠层石研究提出是由周期性蓝绿藻生长和捕捉/粘结沉积物形成的。Hofmann (1973) 提出叠层石是形态多样、内部具有纹理的生物沉积构造, 是由微生物通过捕捉、粘结和新陈代谢引起的沉淀而形成的。Awramik 等 (1976) 将叠层石定义为由生物 (主要是蓝绿藻) 通过捕捉、粘结和新陈代谢引起的沉淀而形成的宏观生物沉积构造。然而, 该定义过于宽泛, 几乎涵盖了所有细菌岩, 无论其有无纹理构造。Semikhatov 等 (1979) 把具有纹理构造的岩石定义为叠层石, 不论这种纹理是无机成因还是微生物成因。Riding (1991) 将叠层石定义为具有纹理构造的底栖微生物沉积。然而, 他将核形石也归入叠层石。

作者将叠层石定义为“细菌类微生物通过捕获/沉淀作用形成的具有纹理构造的原地沉积”。强调“原地”, 是为了将其与核形石等菌包粒区分。

叠层岩则是指叠层石含量大于 50% 的岩石。叠层石含量为 25%~50% 时称叠层石质灰岩, 如叠层石质鲕粒灰岩; 为 10%~25% 时称含叠层石灰岩。有些叠层岩全部由叠层石组成, 如层状叠层岩和波状叠层岩。

4.2.2 叠层石的分类

关于叠层石, 目前并没有一个统一的、普遍接受的分类。本次基于纹理清晰度、形态或大小对叠层石进行了分类(表 1)。

4.2.2.1 基于纹理清晰度的叠层石分类

根据纹理清晰程度, 叠层石可分 2 类: 纹理清

晰叠层石(A型)、纹理模糊叠层石(B型)(图 3)(王金艺, 2025; 王金艺和金振奎, 2025a)。

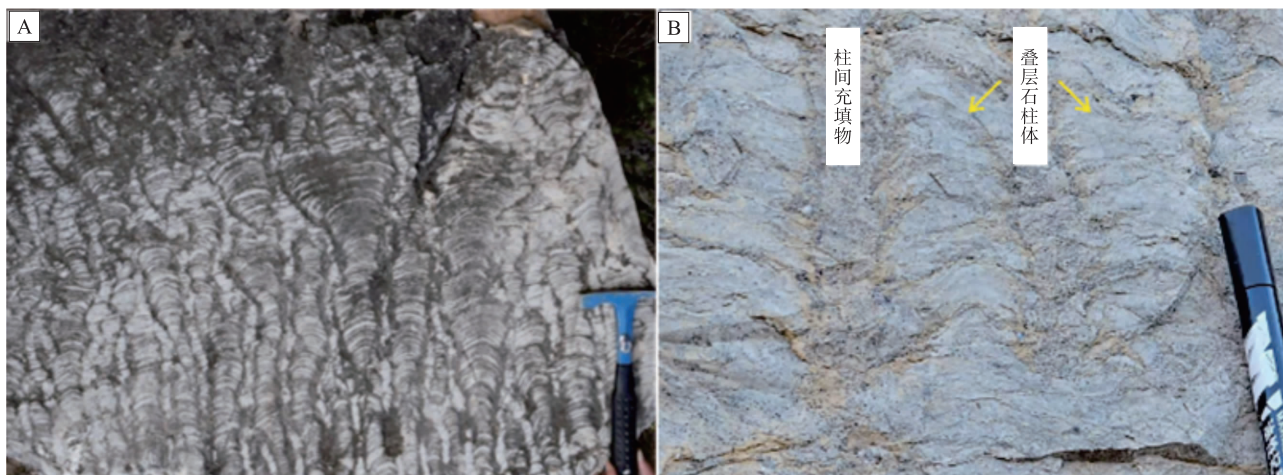
A型叠层石中, 纹理清晰可见(图 3-A), 纹层通常很薄, 多小于 2 mm, 横向连续性好, 主要由灰泥组成, 并可分亮、暗层。暗层主要为泥晶, 且富含有机质; 亮层主要为粉晶, 且有机质含量较低(图 4-A)。

B型叠层石中的纹理模糊(图 3-B), 纹层较厚, 多为数毫米到数厘米, 断断续续。纹层中常发育钙化菌(多为葛万菌), 并常见微窗格构造(图 4-B)。纹层内常见三叶虫、介形虫等化石。

根据岩石共生组合, 纹理清晰叠层石形成于潮间—潮上带, 与不含化石、常见鸟眼构造的薄层灰泥灰岩伴生; 纹理模糊叠层石形成于潮下带, 与常含三叶虫等化石的灰泥灰岩或颗粒灰岩伴生。现代叠层石也展示了类似特征。例如澳大利亚鲨鱼湾现代柱状叠层石处于潮下带部分纹理模糊, 处于潮间带部分纹理清晰(图 5); 巴哈马台地潮间—潮上带层状叠层石普遍纹理清晰(James, 1983)。

为什么潮间—潮上带的叠层石纹理清晰而潮下带的叠层石纹理模糊? 原因可能如下:

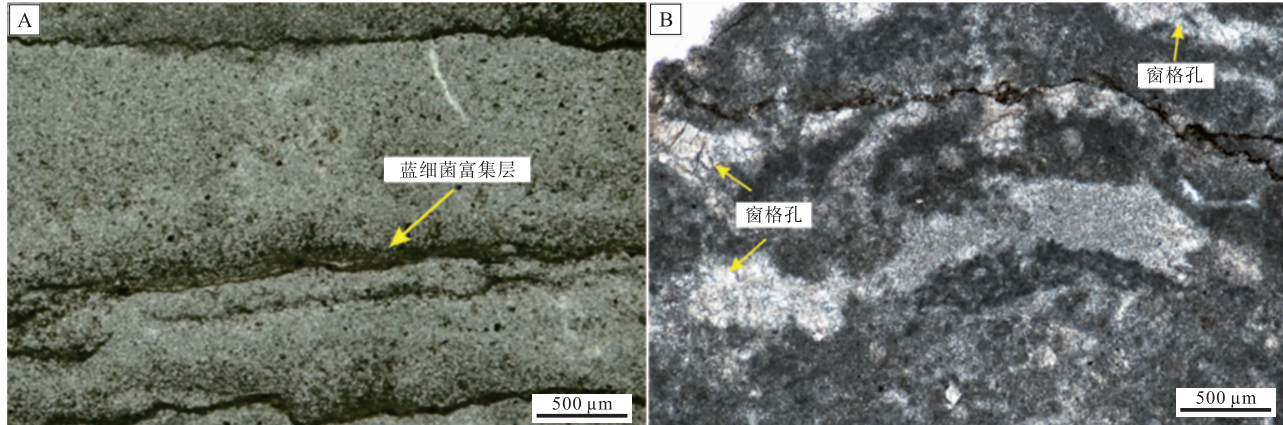
1) 纹理构造是环境变化频繁程度的反映(王金艺, 2025; 王金艺和金振奎, 2025a)。环境稳定时, 纹理构造往往不发育; 环境变化频繁时, 有利于纹理形成。潮下带始终处于水下, 持续稳定的环境不利于叠层石纹理发育。相比之下, 潮间—潮上带经历周期性潮汐作用, 时而淹没时而暴露, 环境



A—纹理清晰柱状叠层石, 柱间充填灰泥, 天津蓟县元古宇铁岭组; B—纹理模糊柱状叠层石, 柱间充填鲕粒, 山西左权寒武系张夏组

图 3 叠层石纹理特征

Fig. 3 Lanmination characteristics of columnar stromatolite



A—纹理清晰柱状叠层石中的灰泥纹层，暗层晶粒比亮层更细，天津蓟县剖面蓟县系铁岭组，单偏光；B—纹理模糊柱状叠层石中的葛万菌及其粘结纹层，见微窗格构造，山东汶南类王庄寒武系凤山组，单偏光

图 4 纹理清晰柱状叠层石与模糊柱状叠层石的微观特征

Fig. 4 Microscopic characteristics of lamination in columnar stromatolites



A—柱状叠层石下部处于潮下带，中上部处于潮间；B—柱状叠层石剖面，潮下带部分纹理模糊（下部），潮间带部分纹理清晰（中上部）。照片据 James, 1983

图 5 澳大利亚西部鲨鱼湾现代柱状叠层石

Fig. 5 Modern columnar stromatolites in Shark Bay, western Australia

变化相当频繁，因此有利于叠层石纹理发育。

2) 潮下带的菌席与潮间—潮上带的菌席生长状态和表面粗糙程度有差异（王金艺，2025；王金艺和金振奎，2025a）。在水下，由于水体的浮力作用，菌席中的丝状细菌普遍近乎直立，菌席表面参差不齐。这种菌席即使捕捉粘结沉积物，也不易形成纹理。在潮间—潮上带，由于经常暴露且频繁遭受潮汐流的冲刷，菌席中的丝状细菌更容易倒伏

并相互纠缠在一起，形成的菌席的表面比较光滑。这种菌席捕捉粘结沉积物后显然更容易形成纹理。

3) 钙化蓝细菌化石指示水下环境（王金艺，2025；王金艺和金振奎，2025b）。钙化蓝细菌是固着底栖微生物，钙化时需从周围水体中汲取 Ca^{2+} 、 CO_3^{2-} 等有关离子，这就要求其生活环境必须是水下，且水体稳定，以保证矿物质的稳定供给，就像所有钙藻都生活在水下一样。如果经常露

出水面，这种供给就不能稳定，不利于其生存。因此，葛万菌等钙化蓝细菌会“择木而栖”，选择更优越的水下环境繁衍生息。

可见叠层石纹理能够指示水下或水上环境，具有指相意义。

4.2.2.2 基于形态的分类

根据形态，将叠层石分为7大类：柱状、波状、层状、丘状、锥状、墙状和皮壳状(图6)，前3类较常见。

柱状叠层石(可简称柱纹石)总体呈圆柱形，纹层上凸、上下叠置且直径大体一致，柱之间一般不相连，被充填物分隔(图6-A)。横截面呈同心圆状(图6-A)。

波状叠层石(可简称波纹石)的纹层呈不规则波状起伏且连续，像不太规则的波痕(图6-B)，起伏幅度多为厘米级。

层状叠层石(可简称层纹石)的纹层与层面平行，但多不平整，有毫米级(或更小)褶皱(图6-C)。

丘状叠层石(可简称丘纹石)呈半球状，上覆纹层包覆下伏纹层(图6-D)。

锥状叠层石(可简称锥纹石)呈锥状，上覆纹层包覆下伏纹层(图6-E)。

墙状叠层石(可简称墙纹石)由长条状上凸纹层(类似琉璃瓦片)叠置形成，墙体之间不连接，有充填物分隔(图6-F)(金振奎等, 2020)。其横剖面(垂直墙体)像柱状叠层石，纵剖面

(平行墙体)像层状叠层石。

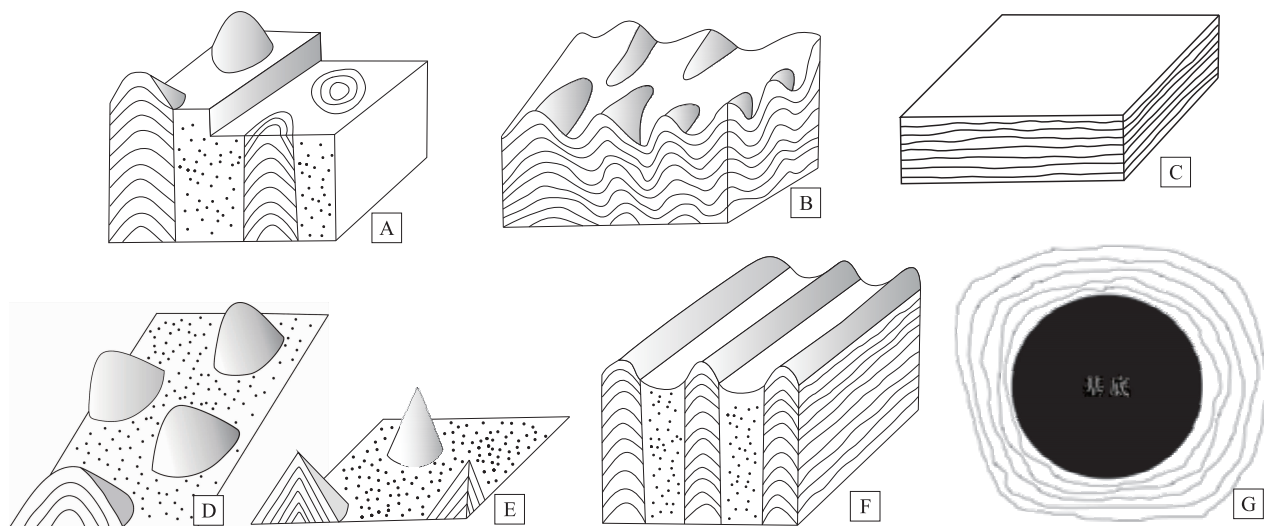
皮壳状叠层石(可简称皮壳石)指围绕枝状、柱状等基底(基底多为苔藓虫、珊瑚等造礁生物化石)形成的叠层石，呈皮壳状，其纹层多不平滑(图6-G)。皮壳石只能包裹基底的侧面和顶面，不能包裹其底面，因为在皮壳石形成过程中其基底始终是固着的，与核形石不同。皮壳石也被称为包壳石(吴亚生等, 2023)。

叠层石形态反映沉积环境。根据现代沉积环境，柱状叠层石发育在潮间带下部到潮下带，波状叠层石发育在潮间带中部，层状叠层石发育在潮间带上部到潮上带。从柱状到层状，纹层连续性逐渐变好，水深逐渐变浅，水动力逐渐变弱。丘状和锥状叠层石介于柱状与波状叠层石之间，应形成于潮间带偏下的部位。墙状叠层石实际上是一种定向拉长的柱状叠层石。根据现代沉积，墙状叠层石发育于有较强定向潮汐水流的潮间带或潮下带。总之，水动力越强，纹层连续性越差。皮壳状叠层石通常见于生物礁中，应该是造礁生物死亡后才形成的，至少被包裹部分已经死亡。因此皮壳状叠层石的出现有可能表明生物礁曾经暴露过。

根据野外观察，层状、波状、丘状和锥状叠层石的纹理普遍清晰，柱状、墙状和皮壳状叠层石有的纹理清晰，有的纹理模糊。

4.2.2.3 基于大小的分类

对于柱状叠层石，根据柱体直径分为4类：极



A—柱状；B—波状；C—层状；D—丘状；E—锥状；F—墙状；G—皮壳状(横切面，黑色为基底)

图6 不同形态类型叠层石示意图

Fig. 6 Different form types of stromatolites

细 (直径 < 2 cm)、细 (直径 2 ~ 5 cm)、粗 (直径 5 ~ 20 cm) 和极粗 (直径 > 20 cm) 柱状叠层石, 其中极细柱状叠层石也可称指状叠层石。柱体越粗, 抗风浪和水流能力越强, 代表的水动力也越强。

对于波状叠层石, 根据波长分为 3 类: 小波状 (< 5 cm)、中波状 (5 ~ 20 cm) 和大波状 (> 20 cm) 叠层石。

对于层状叠层石, 根据纹层厚度分为 3 类: 薄纹层状 (< 1 mm)、中纹层状 (1 ~ 5 mm) 和厚纹层状 (> 5 mm) 叠层石。

对于丘状叠层石, 根据丘的直径分为 3 类: 小丘状 (< 5 cm)、中丘状 (5 ~ 20 cm) 和大丘状 (> 20 cm) 叠层石。

对于锥状叠层石, 根据锥的直径分为 3 类: 小锥状 (< 5 cm)、中锥状 (5 ~ 20 cm) 和大锥状 (> 20 cm) 叠层石。

对于墙状叠层石, 根据墙体厚薄可分为薄墙状 (< 5 cm)、中墙状 (5 ~ 20 cm) 和厚墙状 (> 20 cm) 叠层石。

对于皮壳状叠层石, 根据皮壳厚度和基底半径的相对大小可分为薄皮壳状 (皮壳厚度小于基底半径) 和厚皮壳状 (皮壳厚度大于或等于基底半径) 叠层石。

4.2.3 叠层岩的分类

叠层岩的分类与叠层石的基本相同, 只需将“叠层石”替换为“叠层岩”即可, 例如柱状叠层岩、波状叠层岩等。

4.3 菌包粒、菌包粒岩及其分类

菌包粒是细菌类微生物围绕核心生长而形成的具有同心圈层的颗粒。在生长过程中, 菌包粒经常滚动、被搬运, 其最终的沉积环境未必是其形成的环境, 这与叠层石不同。

菌包粒可根据同心层清晰度或大小划分。

根据同心层的清晰度, 菌包粒可分为纹理清晰菌包粒 (A 型) 和纹理模糊菌包粒 (B 型)。纹理模糊的菌包粒内常见葛万菌。与柱状叠层石纹理清晰度的原因一样, 纹理清晰菌包粒通常是在潮间带形成的, 而纹理模糊菌包粒通常是在潮下带形成的。如果部分纹理清晰, 部分纹理模糊, 则说明清晰的纹理是在潮间带形成的, 而模糊的纹理是在潮下带形成的。因此, 根据纹理清晰度可判断菌包粒是在潮间带还是在潮下带 (水上还是水下) 滚动形成的。

根据大小, 菌包粒分为菌鲕和核形石, 前者的直径小于 2 mm, 后者的直径大于或等于 2 mm。直径越大, 通常代表水动力越强。

菌鲕与无机沉淀形成鲕粒的区别主要在于菌鲕的截面呈梅花状, 每个同心层的厚度横向上有显著变化, 忽厚忽薄, 这是由于不同部位细菌生长速度不同导致的。有些情况下, 菌鲕圈层中见葛万菌化石。无机沉淀形成的鲕粒同心层厚度较均匀, 且呈较规则的圆形或椭圆形 (金振奎等, 2021)。核形石的同心圈层的厚度也有显著变化, 其内常见葛万菌化石。

菌包粒岩是主要由菌包粒组成的细菌岩, 可根据菌包粒的大小或纹理清晰度分类。主要由菌鲕组成的菌包粒岩称菌鲕岩, 根据菌鲕直径分为细 (< 0.25 mm)、中 (0.25 ~ 0.5 mm)、粗 (> 0.5 mm) 菌鲕岩。主要由核形石组成的菌包粒岩称核形岩, 根据核形石直径分为细 (< 1 cm)、中 (1 ~ 3 cm)、粗 (> 3 cm) 核形岩。

4.4 均一岩及其分类

均一岩 (Leiolite) 即前人翻译的均一石, 指宏观上呈均质的细菌岩 (Braga *et al.*, 1995)。但均一岩在微观上并不呈均质, 而是常呈微小的斑状 (可称“微斑状”), 斑的直径通常小于 2 mm (Wang *et al.*, 2024)。均一岩常呈丘状, 常发育微窗格构造。丘状形态、微斑状组构、微窗格构造等都是识别均一岩的重要标志。

根据结构组分, 均一岩可分为微晶均一岩和颗粒均一岩, 前者主要由细菌诱导沉淀的微晶方解石组成, 后者主要由细菌粘结的颗粒 (如鲕粒) 组成。微晶均一岩通常与暗色页岩、灰泥石灰岩互层共生, 形成于水下安静低能环境。颗粒均一岩通常形成于水下动荡环境。

5 关于细菌岩的归属

在传统的石灰岩分类中, 没有充分考虑细菌岩或微生物岩的位置 (Folk, 1959; Dunham, 1962; 冯增昭, 1982, 1994; 金振奎, 2014)。在以前, 对于凝块石, 如果是钙化蓝细菌形成的, 会被归为 skeletal limestone (生屑石灰岩或骨屑石灰岩); 如果是非钙化蓝细菌形成的, 会被归为灰泥石灰岩。“叠层石”仅指一种沉积构造, 不是岩石类型。对于非钙化蓝细菌形成的叠层石, 其岩石类型根据常

规结构组分命名,如灰泥石灰岩(主要由灰泥组成)、球粒石灰岩(主要由球粒组成)等。对于钙化蓝细菌形成的叠层石,可能会被归为生屑石灰岩(或骨屑石灰岩)。“藻鲕”和“核形石”都属于颗粒,由这些颗粒形成的石灰岩都归颗粒石灰岩,不管这些颗粒是钙化还是非钙化蓝细菌形成的。对于均一石,会被归为灰泥石灰岩(如果主要由灰泥组成)或颗粒石灰岩(如果主要由颗粒组成)。

现在看来,由细菌形成的石灰岩是有其特殊性的。由细菌形成的“灰泥石灰岩”“生屑石灰岩”或“颗粒石灰岩”分别与常规的灰泥石灰岩、生屑石灰岩或颗粒石灰岩(生屑石灰岩也是一种颗粒石灰岩)在成因和指示的沉积环境方面都有显著差异,将它们归为这些常规岩石类型是不合适的。

细菌岩似乎可归为传统分类中的礁石灰岩,与珊瑚礁、海绵礁、苔藓虫礁等石灰岩并列,因为细菌岩多为原地沉积,而且在地貌上多呈凸起状。细菌有多种,珊瑚、海绵、苔藓虫等也都有多种。将凝块岩、叠层岩和均一岩归为礁石灰岩似乎比较合理,但将菌包粒岩也归为礁石灰岩就不合适了,因为菌包粒在形成过程中经常滚动,还会被异地搬运,不具有“原地”的属性。此外,传统意义上的礁通常指由珊瑚等大型生物形成,且抗风浪,沉积环境较特殊,正因如此,常规分类方案中没有把礁石灰岩归为生屑石灰岩。凝块岩、叠层岩和均一岩虽然具有“原地”的属性,但大都不抗风浪,其沉积环境的水动力总体较弱。可见,细菌岩与礁石灰岩还是有很大不同的。

能否将细菌岩和礁石灰岩统称“生物岩”?前者为微生物礁石灰岩,后者为宏生物礁石灰岩。关键是如何定义生物岩。如果将生物岩定义为“由生物粘结、障积、沉淀或遗体堆积形成的岩石”,那么生物岩的含义就太广泛了。例如,在石灰岩中,由介壳原地或异地堆积形成的岩石应属于生物岩,而这类岩石在常规石灰岩分类中被归为生屑石灰岩(Folk, 1959; Dunham, 1962; 冯增昭, 1982; 金振奎, 2014)。在碎屑岩中,很多砂岩、粉砂岩和泥岩是由水上或水下植物障积形成的,其成因与一些叠层岩、凝块岩等细菌岩相同,但如果也归为生物岩似乎不妥,而且与纯机械沉积的砂岩、粉砂岩和泥岩不易区分。因此,“生物岩”这个术语需慎用。

鉴于上述种种问题,笔者认为在常规石灰岩分类中应增加“细菌石灰岩”这一类,与礁石灰岩类、灰泥—颗粒石灰岩类并列。

6 结论

本文提出了细菌岩分类方案,主要结论如下:(1)细菌岩可据成分、构造、细菌种类、结构组分、形态、大小等参数划分为多类。(2)骨架凝块岩分为亮晶、亮晶—灰泥、灰泥骨架凝块岩,该分类能反映沉积环境和水动力。(3)叠层岩和菌包粒岩的纹理清晰度均具有指相意义,纹理清晰者形成于水上(潮间—潮上带),纹理模糊者形成于水下。(4)均一岩分为微晶和颗粒均一岩,前者形成于水下安静低能环境,后者形成于动荡环境。(5)蓝细菌化石代表水下环境,具有指相意义。

致谢 在本文完成过程中,多位学者给予了帮助。程浩博士、华珂焙和冉浩轩硕士参加了野外工作;中国矿业大学(北京)鲁静教授、中国石油勘探开发研究院吴因业教授级高级工程师、中国石油大学(北京)鲍志东教授、鲜本忠教授、王贵文教授、季汉成教授、朱世发教授、牛花朋教授及3位审稿人都给予了重要建议。在此一并致谢!

参考文献(References)

- 冯增昭. 1982. 碳酸盐岩分类. 石油学报, 3(1): 11-18. [Feng Z Z. 1982. Classification of carbonate rocks. Acta Petroli Sinica, 3(1): 11-18]
- 冯增昭. 1994. 沉积岩石学(第二版). 北京: 石油工业出版社. [Feng Z Z. 1994. Sedimentary Petrology(2nd Edition). Beijing: Petroleum Industry Press]
- 郭芪恒, 金振奎, 史书婷, 刘元博, 王金艺. 2023. 鲕粒成因研究进展. 沉积学报, 41(4): 959-967. [Guo Q H, Jin Z K, Shi S T, Liu Y B, Wang J Y. 2023. Research progress on the formation of ooids. Acta Sedimentologica Sinica, 41(4): 959-967]
- 金振奎. 2014. 石灰岩分类新方案. 新疆石油地质, 35(2): 235-242. [Jin Z K. 2014. New classification of limestones. Xinjiang Petroleum Geology, 35(2): 235-242]
- 金振奎, 朱小二, 王金艺, 王昕尧, 任奕霖, 王凌, 郭芪恒, 李阳, 史书婷, 李硕, 袁坤, 黎瑞, 闫伟. 2020. 天津市蓟州区元古宇地层与沉积野外考察指导书. 北京: 石油工业出版社. [Jin Z K, Zhu X E, Wang J Y, Wang X Y, Ren Y L, Wang L, Guo Q H, Li Y, Shi S T, Li S, Yuan K, Li R, Yan W. 2020. Field Guide of Stratigraphy and Sedimentary Facies of the Proterozoic in Jizhou District, Tianjin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 金振奎, 王金艺, 梁婷, 朱小二, 余宽宏, 苏妮娜, 赵建华, 郭芪恒, 程浩, 焦盼盼, 任奕霖. 2021. 沉积地质学. 北京: 石油工业出版社.

- [Jin Z K, Wang J Y, Liang T, Zhu X E, Yu K H, Su N N, Zhao J H, Guo Q H, Cheng H, Jiao P P, Ren Y L. 2021. *Sedimentary Geology*. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 金振奎,王金艺. 2025. 细菌岩及其分类. 第十八届全国岩相古地理会议论文摘要集. [Jin Z K, Wang J Y. 2025. Bacterialites and their classification. Proceedings of the 18th National Lithofacies Palaeogeography Conference]
- 梅冥相. 2007. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充. *地学前缘*, 14(5): 222-234. [Mei M X. 2007. Revised classification of microbial carbonates: complementing the classification of limestones. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 222-234]
- 王金艺. 2025. 华北地台前寒武系—寒武系微生物岩发育特征及控制因素. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Wang J Y. 2025. Development characteristics and controlling factors of Precambrian—Cambrian microbialites in North China Platform. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]
- 王金艺,金振奎. 2025a. 柱状叠层石纹理的环境意义. 第十八届全国岩相古地理会议论文摘要集. [Wang J Y, Jin Z K. 2025a. The environmental significance of the texture of Columnar Stromatolite. Proceedings of the 18th National Lithofacies Palaeogeography Conference]
- 王金艺,金振奎. 2025b. 钙化蓝细菌的指相意义: 以华北地台寒武系为例. 第十八届全国岩相古地理会议论文摘要集. [Wang J Y, Jin Z K. 2025b. The facies significance of calcified Cyanobacteria: a case study of the Cambrian system in the North China platform. Proceedings of the 18th National Lithofacies Palaeogeography Conference]
- 吴亚生. 2023. 生物岩的分类. *古地理学报*, 25(3): 511-523. [Wu Y S. 2023. Classification of biolith (biogenic rocks). *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 25(3): 511-523]
- 吴亚生,姜红霞,虞功亮,刘丽静. 2018. 微生物岩的概念和重庆老龙洞剖面 P-T 界线地层微生物岩成因. *古地理学报*, 20(5): 737-775. [Wu Y S, Jiang H X, Yu G L, Liu L J. 2018. Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(5): 737-775]
- 谢树成,颜佳新,杨义,杨江海. 2023. 微生物与沉积岩的协同演化. *沉积学报*, 41(6): 1635-1644. [Xie S C, Yan J X, Yang Y, Yang J H. 2023. Coevolution of microorganisms and sedimentary rocks. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1635-1644]
- Aitken J D. 1967. Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of Southwestern Alberta. *Journal of Sedimentary Research*, 37: 1163-1178.
- Allwood A C, Walter M R, Kamber B S, Kamber B S, Marshall C P, Burch L W. 2006. Stromatolite reef from the Early Archaean era of Australia. *Nature*, 441: 714-718.
- Awramik S M, Margulis L, Barghoorn E S. 1976. Evolutionary processes in the formation of stromatolites. *Developments in Sedimentology*, 20: 149-162.
- Black M. 1932. The algal sediments of Andros Island, Bahamas. *Biological Sciences*. London: Royal Society of Philosophical Transactions, 222: 165-192.
- Braga J C, Martin J M, Riding R. 1995. Controls on microbial dome fabric development along a carbonate-siliciclastic shelf-basin transect, Miocene, SE Spain. *Palaios*, 10(4): 347-361.
- Burne R V, Moore L S. 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*, 2: 241-254.
- Dunham R J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham W E (ed). *Classification of Carbonate Rocks*. AAPG Memoir, 1: 108-121.
- Folk R L. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *American Association of Petroleum Geologists*, 43: 1-38.
- Hall J. 1883. *Cryptozoon*, n. g., *Cryptozoon proliferum*. n. sp. Thirty-sixth Annual Report of the Trustees of the State Museum of Natural History to the Legislature.
- Heim A. 1916. Monographie Churfursten-Mattstock-Gruppe. 3. Lithogenensis. *Beitrag Geologische Kart Schweiz*, NF, 20: 369-662.
- Hofmann H J. 1973. Stromatolites: characteristics and utility. *Earth-Science Reviews*, 9: 339-373.
- James N P. 1983. Reef environments. In: Scholle P A, Bebout D G, Moore C H (eds). *Carbonate Depositional Environments*. AAPG Memoir, 33: 346-462.
- Kalkowsky E. 1908. Oolith und stromatolith im nord-deutschen Buntsandstein. *Z. Deuts. Geologischen*, 60: 68-125.
- Kennard J M, James N P. 1986. Thrombolites and stromatolites: two distinct microbial structures. *Palaios*, 1: 492-503.
- Logan B W, Rezak R, Ginsburg R N. 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology*, 72: 68-83.
- Pia J. 1927. Thallophyta. In: Hirmer M (ed). *Handbuch der Paläobotanik*. Oldenbourg, Munich, 1: 31-136.
- Pratt B R. 2001. Calcification of cyanobacterial filaments: girvanella and the origin of lower Paleozoic lime mud. *Geology*, 29: 763-766.
- Reis O M. 1908. Discussion of paper by Kalkowsky E (Oolith und stromatolith im nord-deutschen Buntsandstein. *Z. Deuts. Geol. Gesellschaft*, 60). *Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie, Paläontologie*, 2: 114-133.
- Riding R. 1991. Classification of microbial carbonates. In: Riding R (ed). *Calcareous Algae and Stromatolites*. Berlin: Springer-Verlag, 21-25.
- Riding R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47 (Supplement 1): 179-214.
- Semikhatov M A, Gebelein C D, Cloud P. 1979. Stromatolite morphogenesis: progress and problems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 992-1015.
- Stanier R Y, Cohen-bazire G. 1977. Phototrophic prokaryotes: the cyanobacteria. *Annual Review of Microbiology*, 31: 225-274.
- Steel J H. 1825. A description of the Oolite Formation lately discovered in the county of Saratoga, and state of New York. *American Journal of Science* 9, (1): 16-19.
- Thompson J B, Ferris F G. 1990. Cyanobacterial precipitation of gypsum, calcite, and magnesite from natural alkaline lake water. *Geology*, 18: 995.
- Vasconcelos C, McKenzie J A, Bernasconi S, Grujic D, Tian A J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. *Nature*, 377: 220-222.
- Walcott C D. 1914. Cambrian geology and paleontology, III: precambrian Algonkian algal flora. *Smithsonian Miscellaneous Collection*, 64: 77-156.
- Wang J Y, Jin Z K, Cheng H, Hua K B, Ran H X. 2024. Origin and depositional environments of mounded, banded and bedded dolostones in the clastic deposits of the Paleoproterozoic Chuanlinggou Formation in Beijing, North China. *Journal of Palaeogeography*, 13(2): 629-650.

(责任编辑 郑秀娟)