

《古地理学术论坛》腾讯会议905162148, 2025年2月14日晚20:00-22:00.
寇享学术 <https://www.koushare.com/topic-hd/i/AGAF>

碳酸盐岩研究进展与发展方向

吴亚生

(中国科学院大学岗位教授)

2025年2月14日

The ppt of this speech has been published in the journal *Biopetrology*. Please cite it as : 吴亚生, 2025. 碳酸盐岩研究进展与发展方向. *Biopetrology*, 5(1): 8-68. <https://biopetrology.com/tsyyyj>
Cite it as: Wu, Y.S. 2025. Research progresses and development directions of carbonate rocks. *Biopetrology*, 5(1): 8-68. <https://biopetrology.com/tsyyyj>

向中国碳酸盐岩研究做出贡献的前辈（1）、同辈（2）、青年学者（3）致敬！

（拼音排序、没有列全）

1边立曾	2陈代钊	2李忠	2田景春	3宋金民
1曾鼎乾	2陈洪德	2林畅松	2王红梅	3王建坡
1曾永孚	2陈中强	2刘建波	2王永标	3王小芳
1范嘉松	2董发勤	2刘树根	2吴因业	3文华国
1冯增昭	2代群威	2罗平	2肖传桃	3要乐
1黄志诚	2巩恩普	2马永生	2颜佳新	3由雪莲
1齐文同	2韩作振	2梅冥相	2袁训来	3郑剑锋
1沙庆安	2何幼斌	2齐永安	2余克服	3翟秀芬
1王英华	2何治亮	2钱一雄	2郑荣才	
1杨承运	2侯明才	2邵龙义	2钟建华	
1杨万容	2胡明毅	2沈安江	3陈吉涛	
1朱宗德	2金振奎	2时志强	3李飞	
2包洪平	2旷红伟	2孙海龙	3刘邓	
2鲍志东	2李越	2谭秀成	3沈越峰	

中国碳酸盐岩研究八大方面军：

- ① 微生物矿化实验
- ② 现代珊瑚礁
- ③ 古代生物礁
- ④ 微生物岩
- ⑤ 钙华
- ⑥ 白云岩形成机制
- ⑦ 碳酸盐工厂
- ⑧ 碳酸盐岩沉积学

Contents

碳酸盐岩结构组分最新认识

碳酸盐岩形成机制最新认识

碳酸盐岩结构类型最新认识

碳酸盐岩几乎全部是生物成因的

碳酸盐岩为主的生物岩是组成地球的第二大岩

碳酸盐岩最新分类方案

生物矿化作用研究进展

生物礁岩分类和相带划分可以细化

大陆架、半深海和深海也有珊瑚礁

微生物碳酸盐岩必须以微观研究为主导

微生物碳酸盐岩研究必须以模孔作为关键内容

对古代微生物碳酸盐岩必须进行结构和成分的反演研究

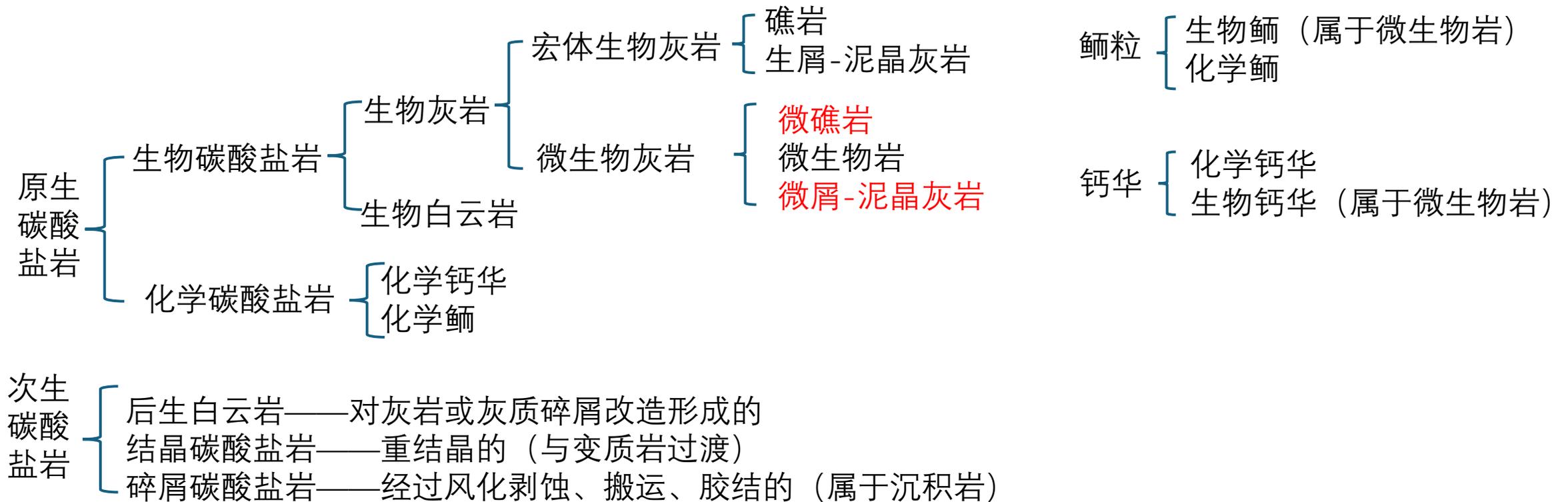
工具局限是制约微生物碳酸盐岩研究进步的重要因素

生物碳酸盐岩研究的重点方向

碳酸盐岩结构组分最新认识

1、本报告的“碳酸盐岩”的范畴

(本报告的“碳酸盐岩”限于灰岩和白云岩，不讨论镁、铁、锰质岩)



2、碳酸盐岩结构组分

	一级结构组分	二级结构组分	岩石举例
原始结构组分 14种	宏体生物骨骼		骨架岩
	微生物骨骼		微骨架岩
	(凝块)	微凝块	凝块石 (基里巴斯)
	(纹层)	微纹层	层纹石
	叠层石、核形石、 生物鲕粒	微纹层	叠层石岩、核形石岩、鲕粒岩
	模孔		各类生物碳酸盐岩
	孔隙		各类生物碳酸盐岩
	生屑 (宏生物骨骼的碎屑)		颗粒灰岩
	微屑 (微骨骼屑、微凝块屑、微纹层屑)		微屑岩
	泥晶 (生物泥晶、化学泥晶)		泥晶灰岩
	内碎屑 (盆内、半固结岩石的碎屑)		砂屑颗粒灰岩
	亮晶 (层状晶、放射晶、树状晶)		化学钙华、 化学鲕粒岩
次生结构组分 3种	孔隙胶结物		不单独构成岩石
	晶屑 (晶体溶蚀形成的)		
	次生孔隙		

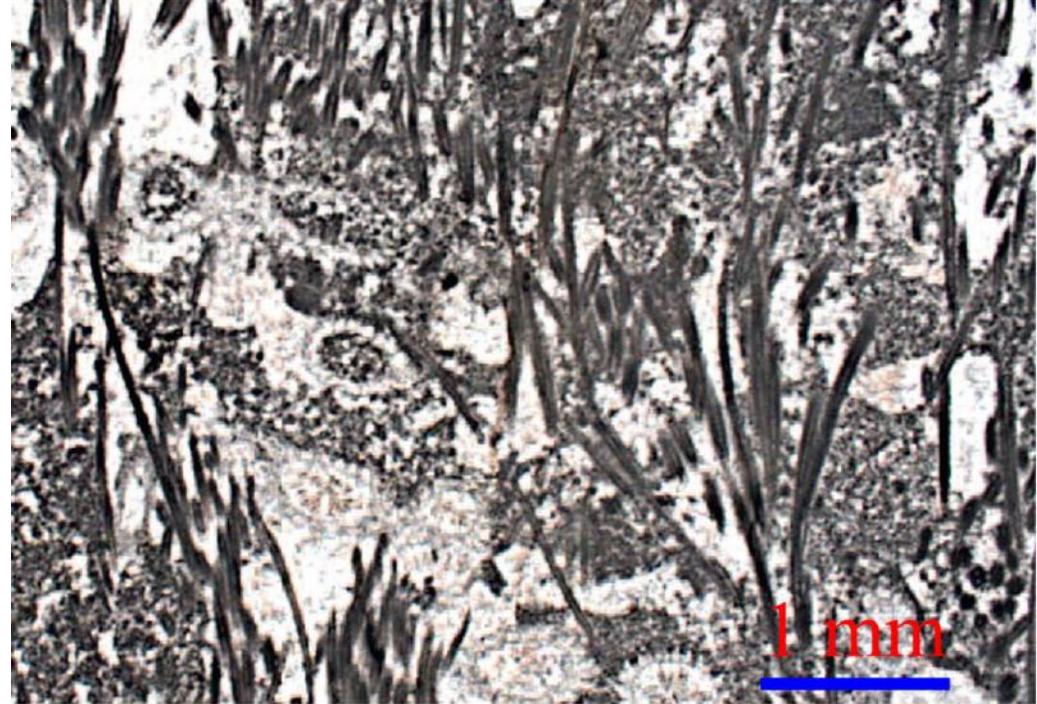
3、举例

宏生物骨骼



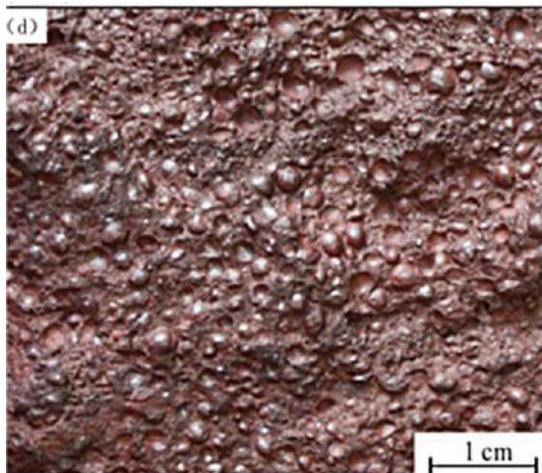
珊瑚骨架岩

微生物骨骼



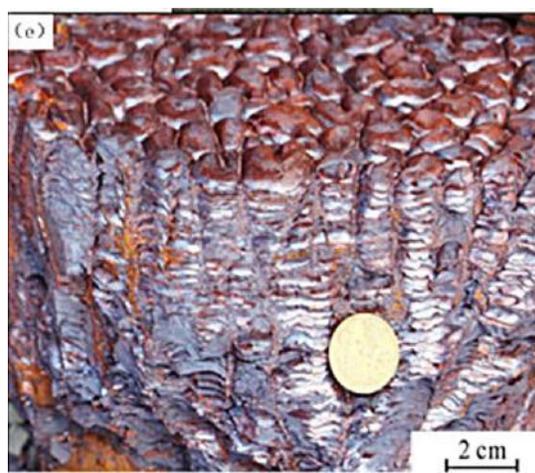
由丛藻（一种钙化蓝细菌）的原地骨骼构成的丛藻微生物骨架岩。引自（Liu et al., 2016）

鲕粒岩一级组分：鲕粒



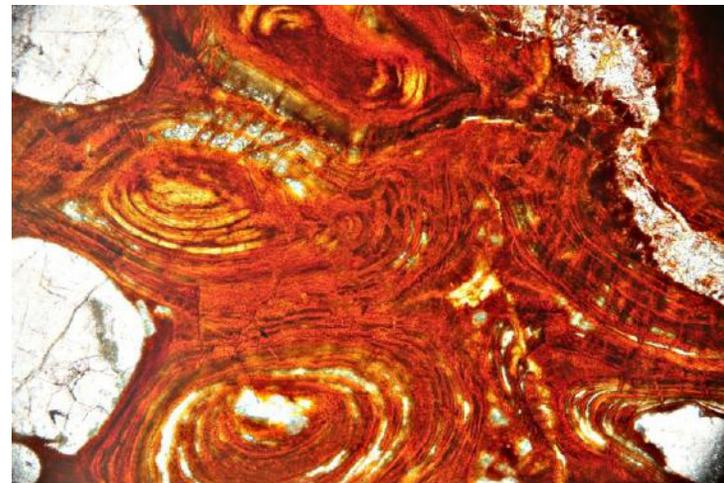
宣化串岭沟组铁质鲕粒岩

叠层石岩的一级组分：叠层石

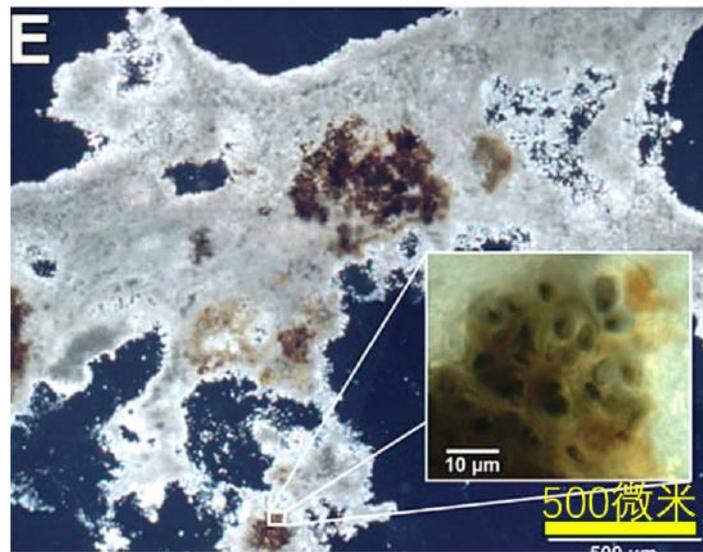
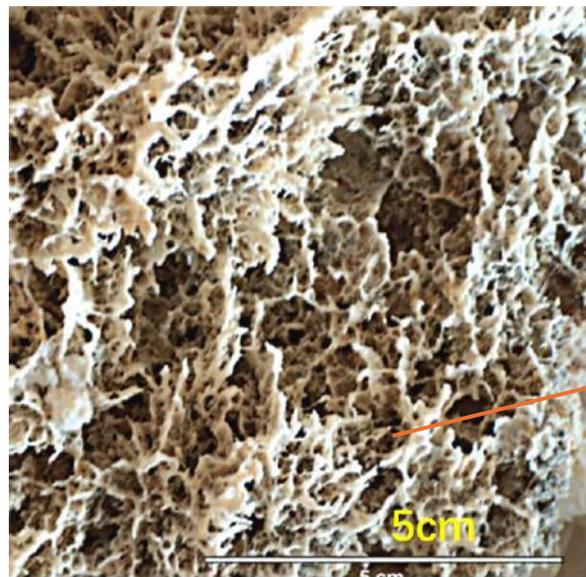


宣化串岭沟组铁质叠层石岩

鲕粒和叠层石的结构组分：微纹层



宣化串岭沟组铁质鲕粒岩薄片显微照片



基里巴斯群岛湖中的微生物席（左上）、席下的凝块石（左下、中、右）（Arp et al., 2012）

碳酸盐岩形成机制最新认识

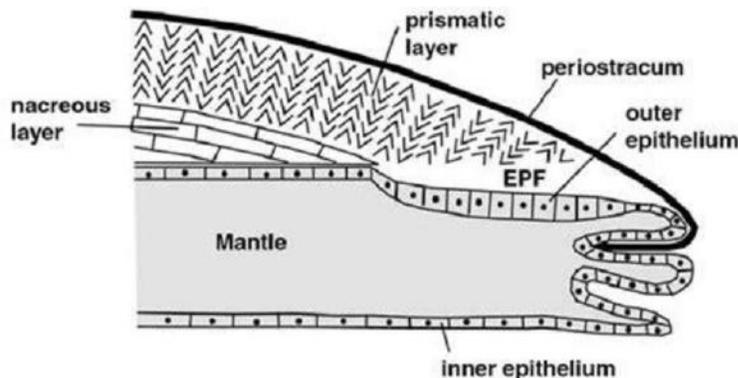
①生物碳酸盐岩形成机制，②化学碳酸盐岩形成机制

一、生物碳酸盐岩形成机制: 主要是生物矿化作用，即生物作用导致的矿物结晶作用，包括:

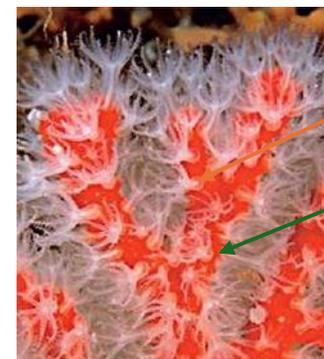
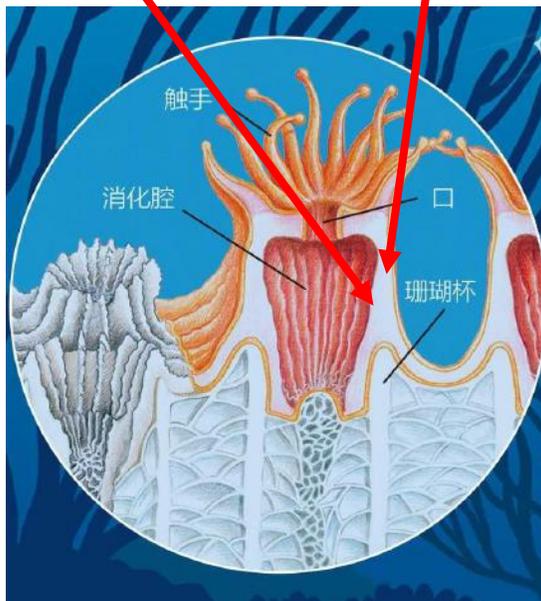
(1) **生物控制矿化作用:** 生物的生理作用促成矿物结晶，而且控制所形成矿物的大小、形状和排列；形成特定形状和结构的生物骨骼，主要形成生物礁岩、非礁石灰岩。



软体动物门双壳类的贝壳是由外套膜的表皮层的腺细胞的生理活动引起的碳酸钙矿物结晶形成的矿物组成的，矿物晶体有特定的大小、排列方式。



CaCO₃晶体形成于外胚层或中胶层



珊瑚动物的骨骼由珊瑚虫的外胚层分泌矿物形成，少数属种由中胶层分泌矿物形成。

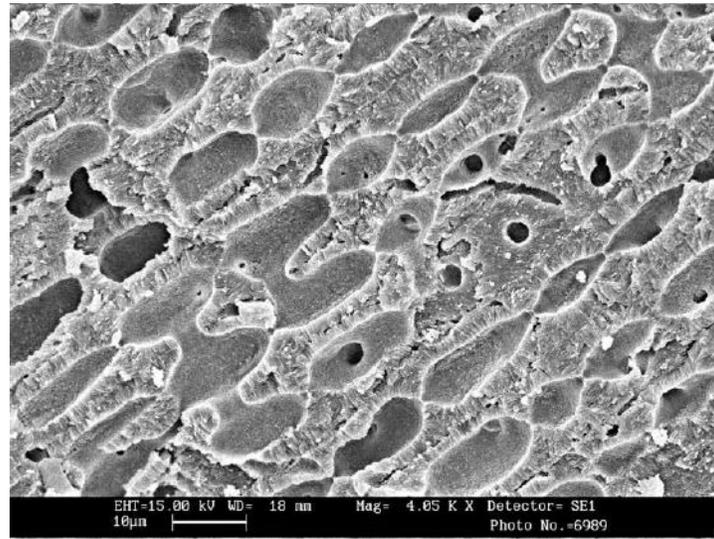
珊瑚虫的内胚层有大量虫黄藻共生，每mm³的珊瑚组织内有3万个虫黄藻，它们吸收CO₂，促进矿物在外胚层的结晶，然后分泌到体外，逐渐形成骨骼。

红藻因其为粉红至紫色而得名，由叶状体和生殖窝组成
红藻门珊瑚藻亚纲的细胞壁内均能分泌碳酸盐，形成镁方解石骨骼

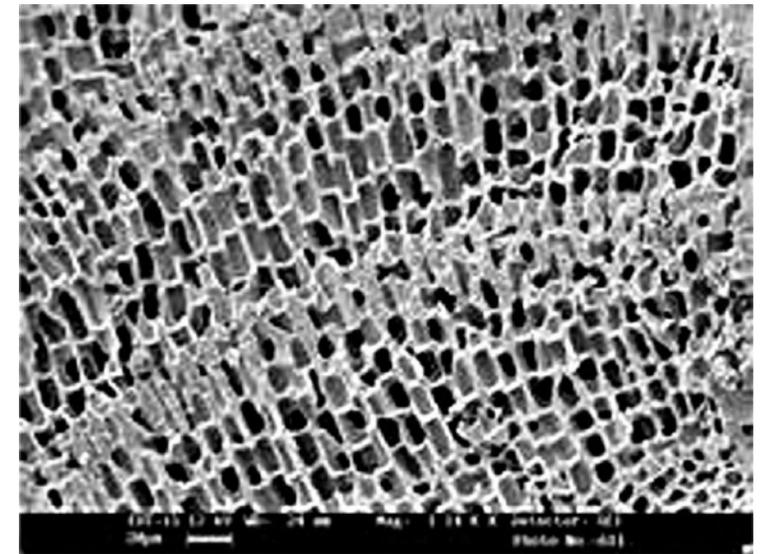


Lithothamnion corallioides

石枝藻 (lithothamnium)

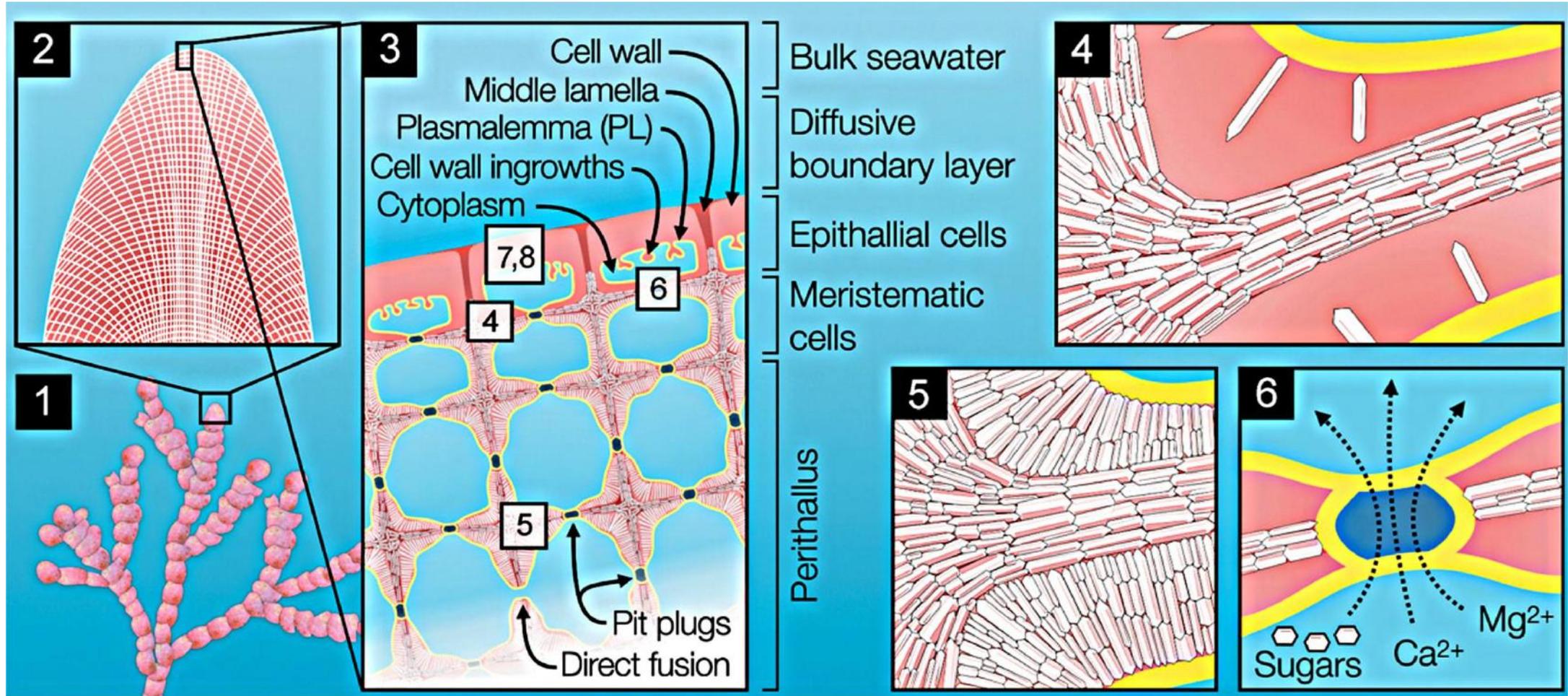


LITHOTHAMNION



LITHOTHAMNION

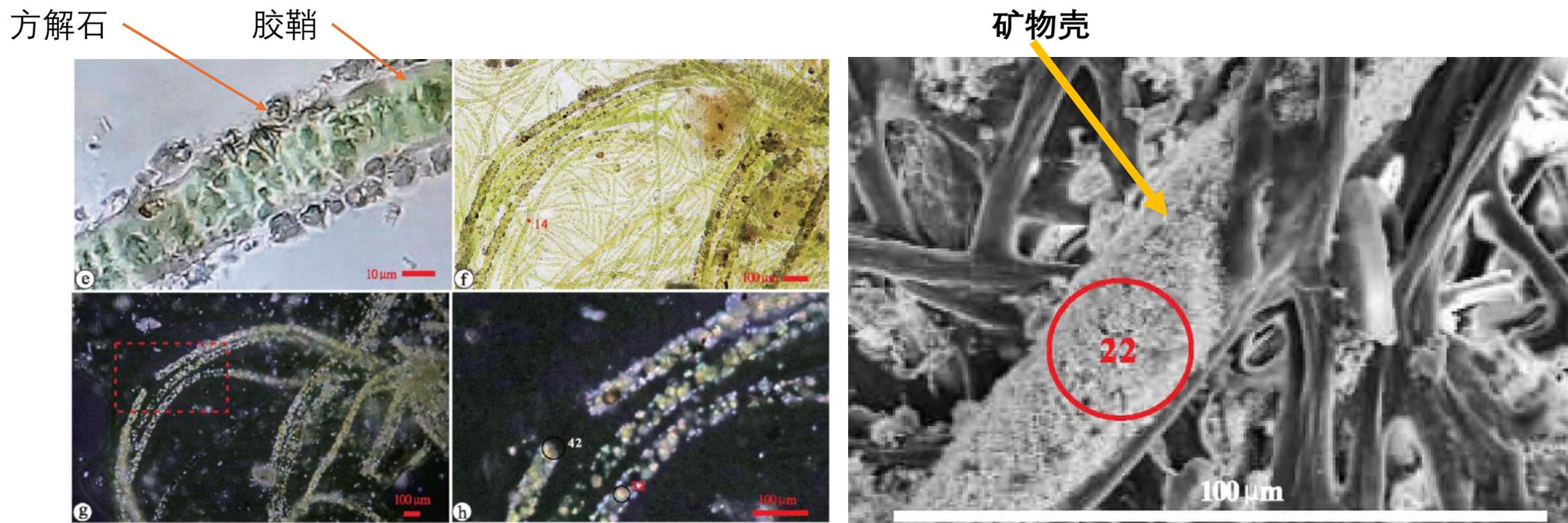
碳酸盐岩基本组成单元--形成机制 (英文稿) /2023-
MCCOY--生物控制矿化-红藻矿化的机制.pdf



(McCoy et al., 2023)

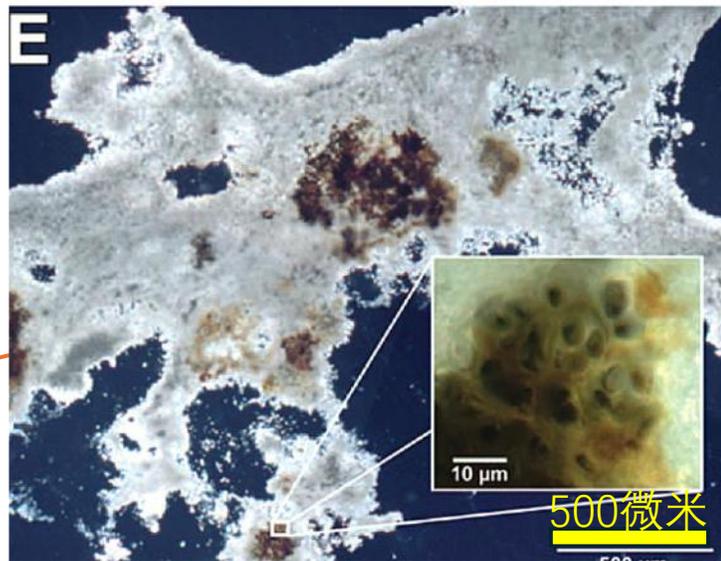
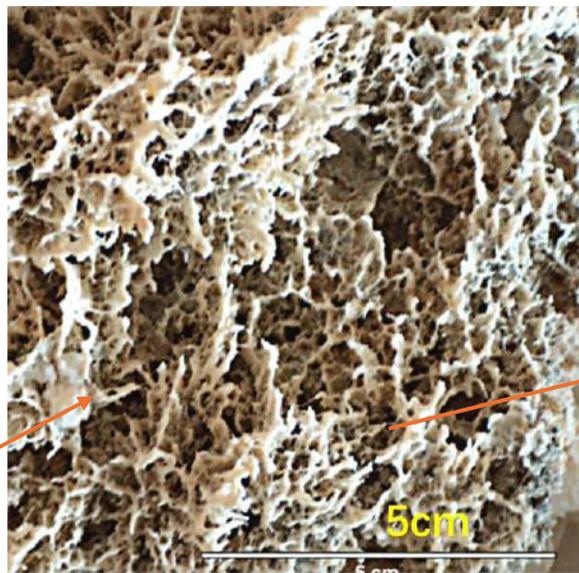
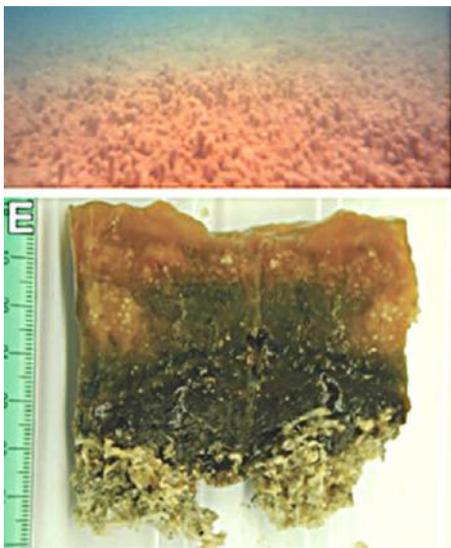
McCoy et al.: Calcification in the red algae – a synthesis. *PHYCOLOGIA* 2023, VOL. 62, NO. 6, 648–666
<https://doi.org/10.1080/00318884.2023.2285673>

(2) **生物诱导矿化作用**：生物生理活动引起周围水体微环境变化（例如pH上升、含氧量变化），导致物结晶，形成**泥晶颗粒**、**矿物壳**、**微凝块**、**微纹层**等，构成微生物岩石；矿物大小、形状、排列方式无严格规律，不构成可以鉴定的属种。

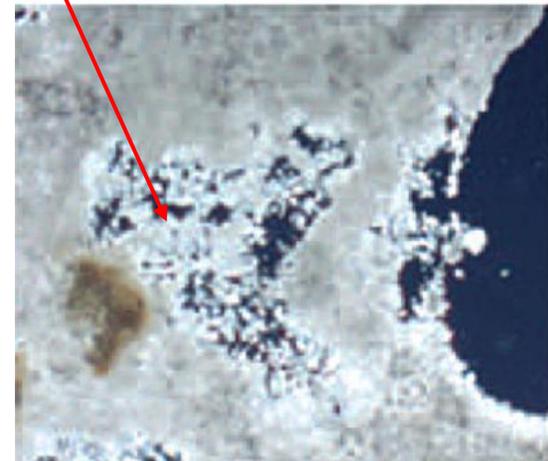


(吴亚生等, 2021: 微生物碳酸盐岩的显微结构基本特征)

Wu et al. Journal of Palaeogeography, 2021, 10(3): 321-333. <https://doi.org/10.1186/s42501-021-00100-5>



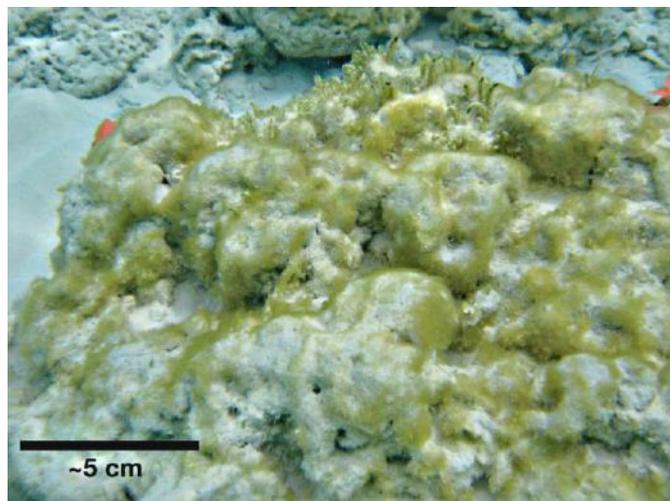
微凝块



Republic of Kiribati

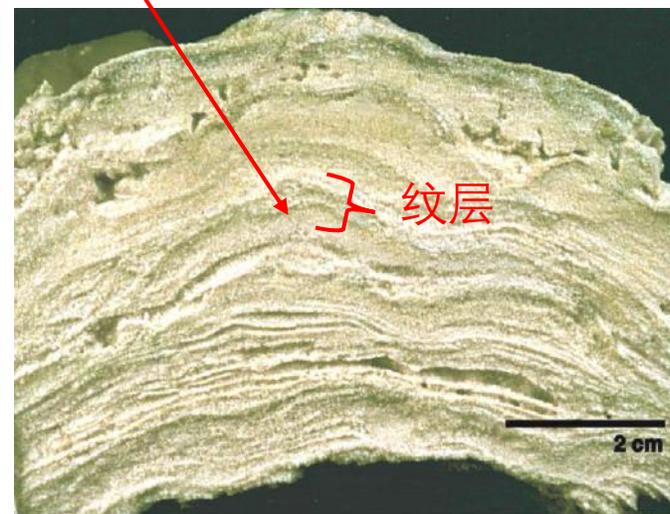


(微生物席顶视)



(Perkins et al. 2007)

微纹层



碳酸盐岩的形成机制

生物碳酸盐岩形成机制

浮游和底栖, 胞内或外 $\xrightarrow{\text{BIM, BCM}}$ 矿物晶体 (纳米级) \rightarrow 泥晶级颗粒 \rightarrow 泥晶灰岩

生物膜 $\xrightarrow{\text{BIM}}$ 矿物晶体 \rightarrow 同心纹层 \rightarrow 生物鲕粒岩

微生物席 $\xrightarrow{\text{BIM}}$ 矿物晶体 (纳米级) \rightarrow 矿物壳 \rightarrow 微凝块

- (无变化的3D) \rightarrow 凝块石
- (+模孔) \rightarrow 微纹层 \rightarrow 层纹石, 叠层石, 包壳石, 核形石

分离的胶鞘或细胞壁 $\xrightarrow{\text{BCM}}$ 矿物晶体 \rightarrow 微骨骼

- 微生物席 \rightarrow 骨骼核形石、骨骼叠层石
- 微生物席 \rightarrow 微礁岩
- 分散的或碎屑 \rightarrow 微屑岩
- 数量少 \rightarrow 微生物化石

生物组织 $\xrightarrow{\text{BCM}}$ 矿物晶体 \rightarrow 宏骨骼

- 造礁生物 \rightarrow 生物礁岩
- 非造礁生物 \rightarrow 生屑灰岩
- 数量少 \rightarrow 化石

化学碳酸盐岩形成机制: 泉水、蒸发水体 $\xrightarrow{\text{过饱和}}$ 矿物晶体 \rightarrow 化学钙华, 化学鲕粒岩 (含沙动荡水), 泥晶灰岩 (静水)

初始生物岩 + 多期胶结物 (溶蚀作用) \rightarrow 现今成分和结构的生物岩

白云石化

区分: 矿物壳, 骨骼

碳酸盐岩结构类型最新认识

生物碳酸盐岩的原始结构：

1. 骨架结构：由原位附着生物生长形成的相互联结的宏体生物骨骼组合
2. 颗粒结构：由相互接触或不接触的生物骨骼、骨骼碎屑、泥晶组成
3. 微纹层结构：由相互接触的微生物席矿化作用形成的泥晶微纹层形成
4. 微凝块结构：由相互联结的微生物矿化作用形成的泥晶微凝块组成
5. 微骨架结构：由附着微生物矿化作用形成的相互联结的微骨骼组成
6. 微屑结构：由相互接触或不接触的非附着微生物的骨骼、骨骼/凝块/纹层的碎屑、泥晶组成
7. 泥晶结构：生物泥晶含量>95%
8. 内碎屑结构：泥晶、生屑、微屑半固结之后，破碎形成

生物碳酸盐岩的次生结构：

- ◆ 粗晶/中晶/细晶/粉晶结构
- ◆ 晶屑结构

最新认识：碳酸盐岩几乎全部是生物岩

- 生物作用形成的：骨骼，及其碎屑
- 生物作用形成的：微凝块、微纹层，及其碎屑
- 生物作用形成的：生物泥晶 (<6 μm)
- 化学作用形成的：部分钙华、部分鲕粒、岩石中的胶结物

泥晶

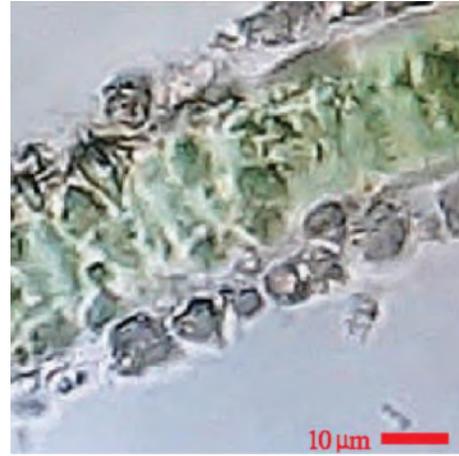
1. 未完全矿化宏体生物分解：未完全钙化的绿藻→泥晶
2. 底栖微生物诱导矿化早期分解：未形成矿物壳的分散状方解石颗粒，
3. 浮游蓝藻矿物壳
4. 任何碳酸盐组分的机械破碎作用



笔藻 (*Penicillus*)
钙化率60%，死亡后分解为文石针。



钙扇藻 (钙化率37%)，死亡后分解为文石针



生物诱导结晶形成的泥晶

鲕粒

- 化学成因鲕粒
- 微生物成因鲕粒

- ◆ 除化学钙华和化学鲕，没有在现今环境发现大规模的化学结晶形成的碳酸盐岩；
- ◆ 未见被确切证明为化学成因的大规模古代碳酸盐岩

最新认识：碳酸盐岩为主的生物岩是第二大岩

(Wu, 2023)

生物岩：①成因独特，②数量巨大

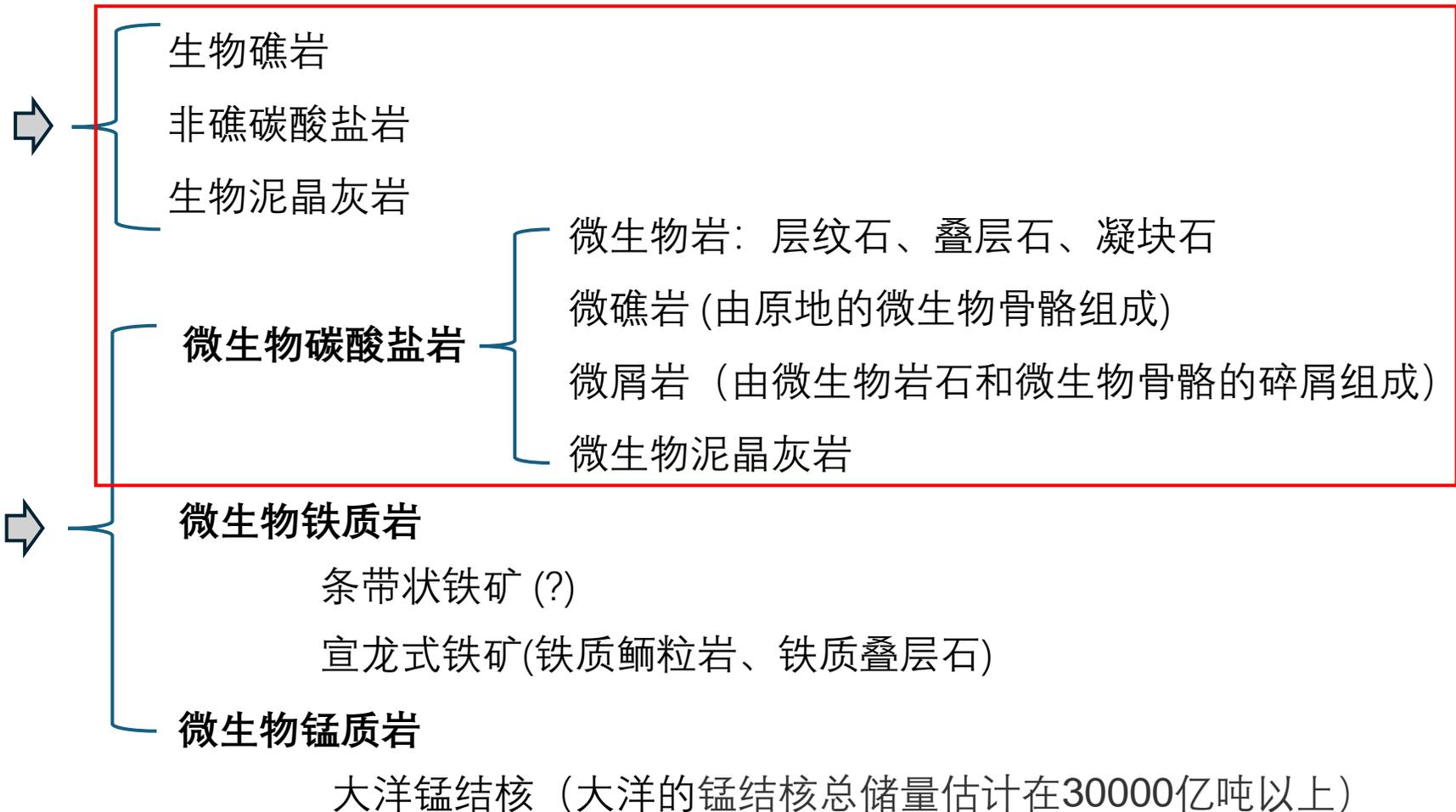
生物岩的主要类型

1. 宏体生物作用形成的：

- (1) 动物骨骼
- (2) 钙化的藻类：绿藻、红藻等
- (3) 泥晶
- (4) 煤炭

2. 微生物作用形成的：

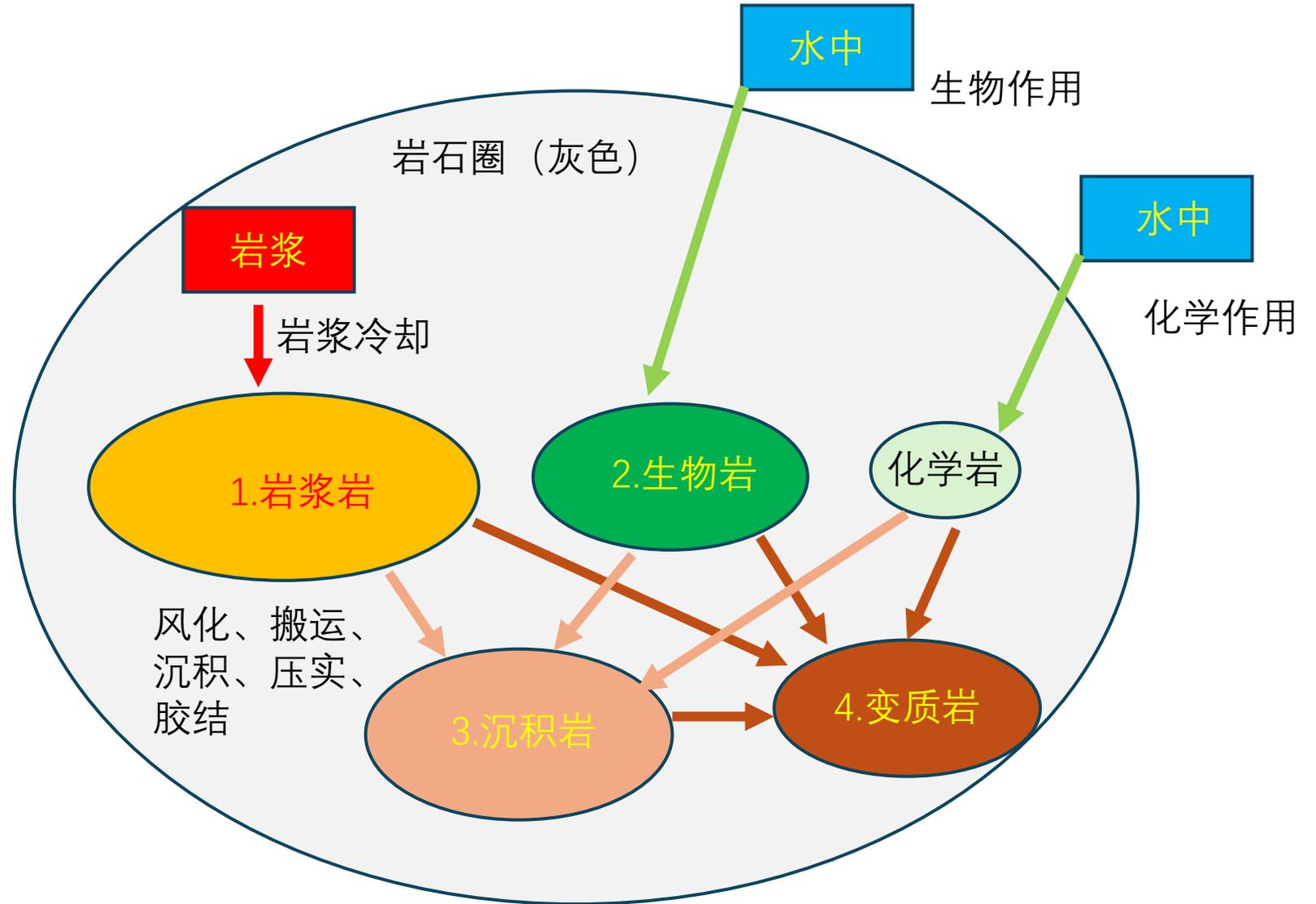
- (1) 生物诱导矿化——形成泥晶、凝块、纹层等
- (2) 生物控制矿化作用——形成微生物骨骼
- (3) 放射虫硅质岩
- (4) 黑色岩



1、岩浆岩、生物岩是原生岩石，碎屑沉积岩和变质岩是次生岩石

组成地壳的主要岩石类型的成因：

1. 化学结晶→岩浆岩（花岗岩）
2. 化学结晶→化学岩（石盐）
3. 生物结晶→生物岩（生物礁岩）
4. 风化碎屑沉积→沉积岩（砂岩）
5. 变质成因→变质岩（大理岩）



组成地壳岩石的4大岩的关系

(1) 化学结晶的岩石——岩浆岩、化学岩



岩浆冷却导致矿物从岩浆中结晶、形成岩浆岩。

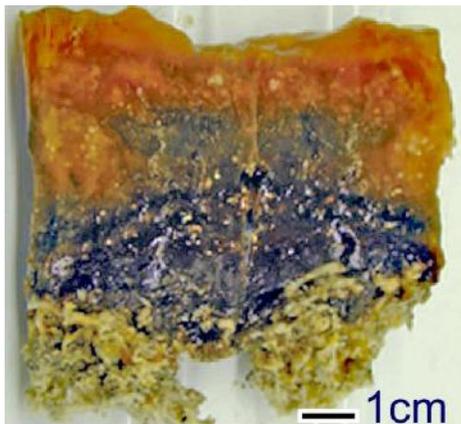
opentextbc.ca



青海湖的湖水蒸发作用导致矿物结晶，形成化学岩。

dxbei.com

(2) 生物矿化作用形成的岩石——生物岩

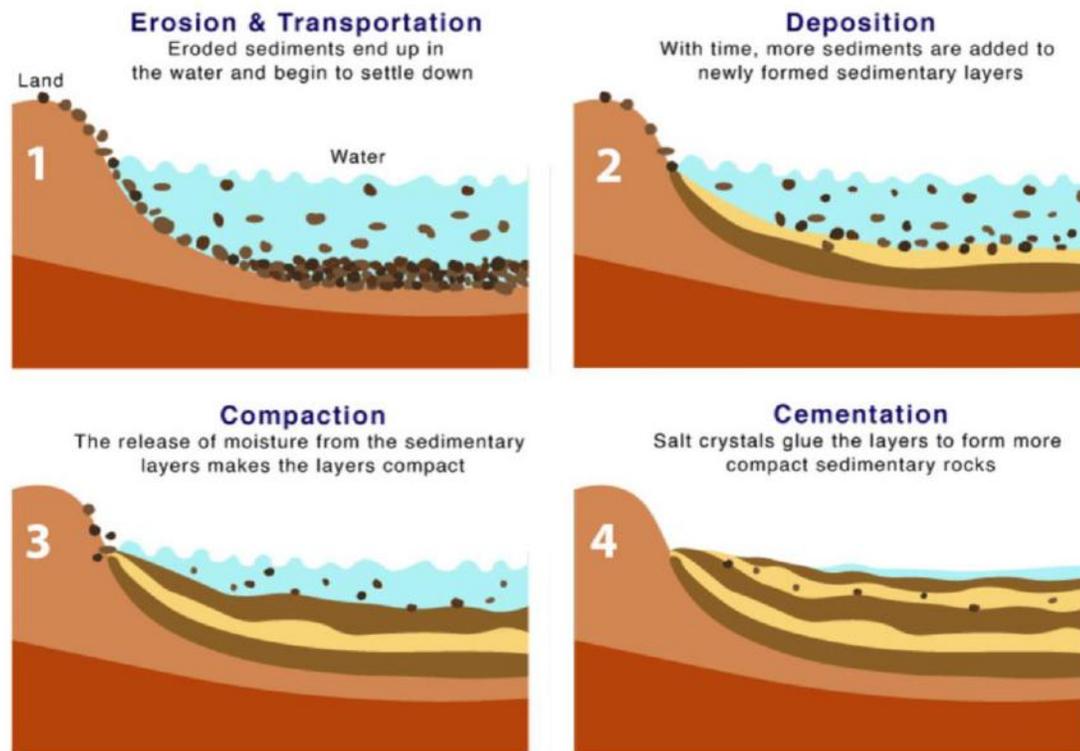


基里巴斯群岛上的湖泊里，微生物新陈代谢引起矿物结晶，形成凝块石。照片引自Fig. 13 of Arp (2012)

(3) 风化+沉积+物理压实+化学结晶形成的岩石——碎屑沉积岩

How are Sedimentary Rocks Formed

ScienceFacts.com



(4) 热液、区域挤压、高温影响——变质岩

2、生物岩数量巨大

(1) 形成时间长：39亿年前-现今



37亿年前的叠层石 (Wu and Jiang, 2022)
<http://biopetrology.com/eositb>)



加拿大Saglek有39亿年前的碳酸盐岩

地球表面平均温度

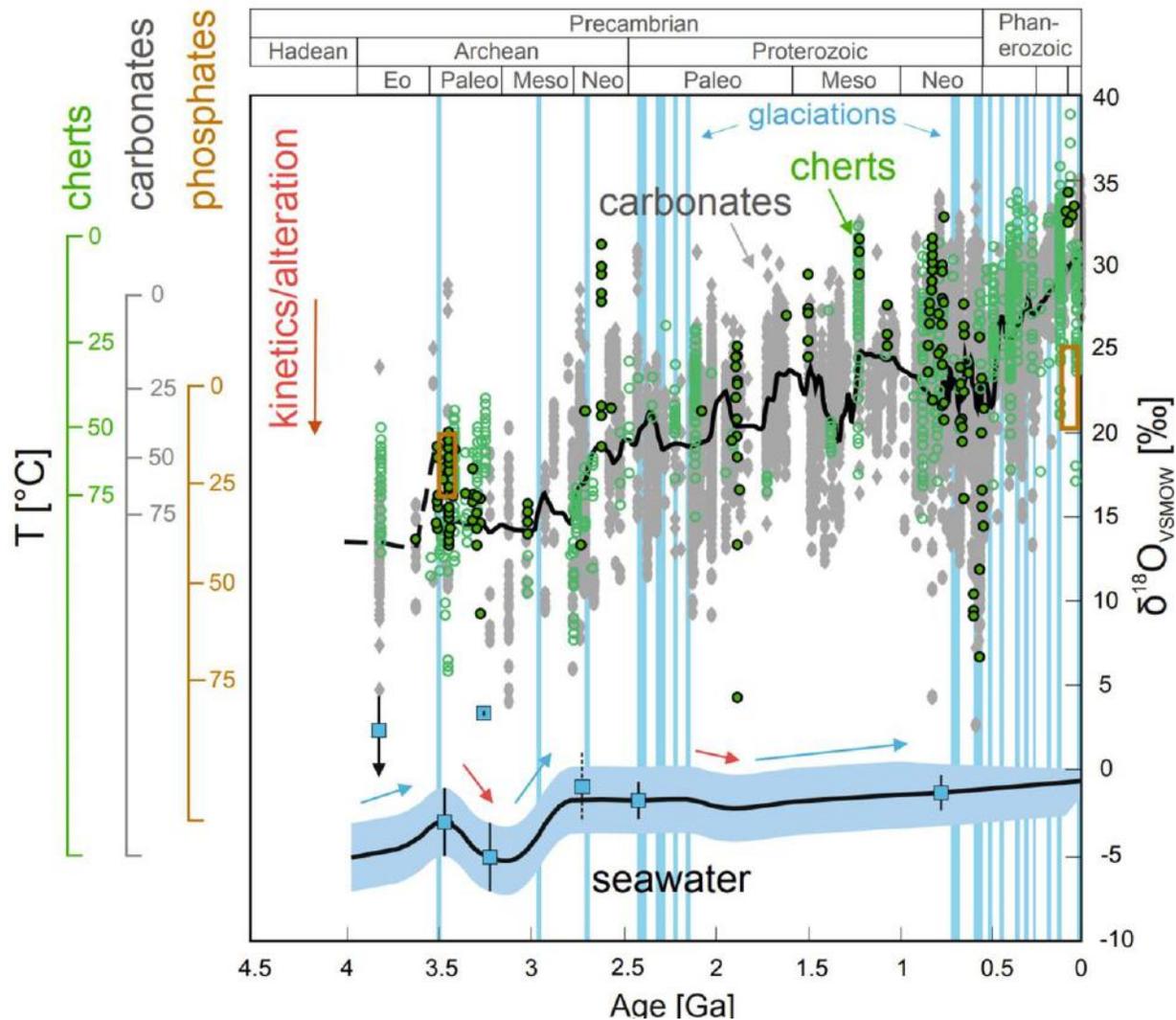
(2) 地理分布广

40-4.6亿年前：整个地球（低、中、高纬度）——微生物岩石为主

5亿年前，地球平均温度 $>20^{\circ}\text{C}$ ，全球表面温度适合微生物生长

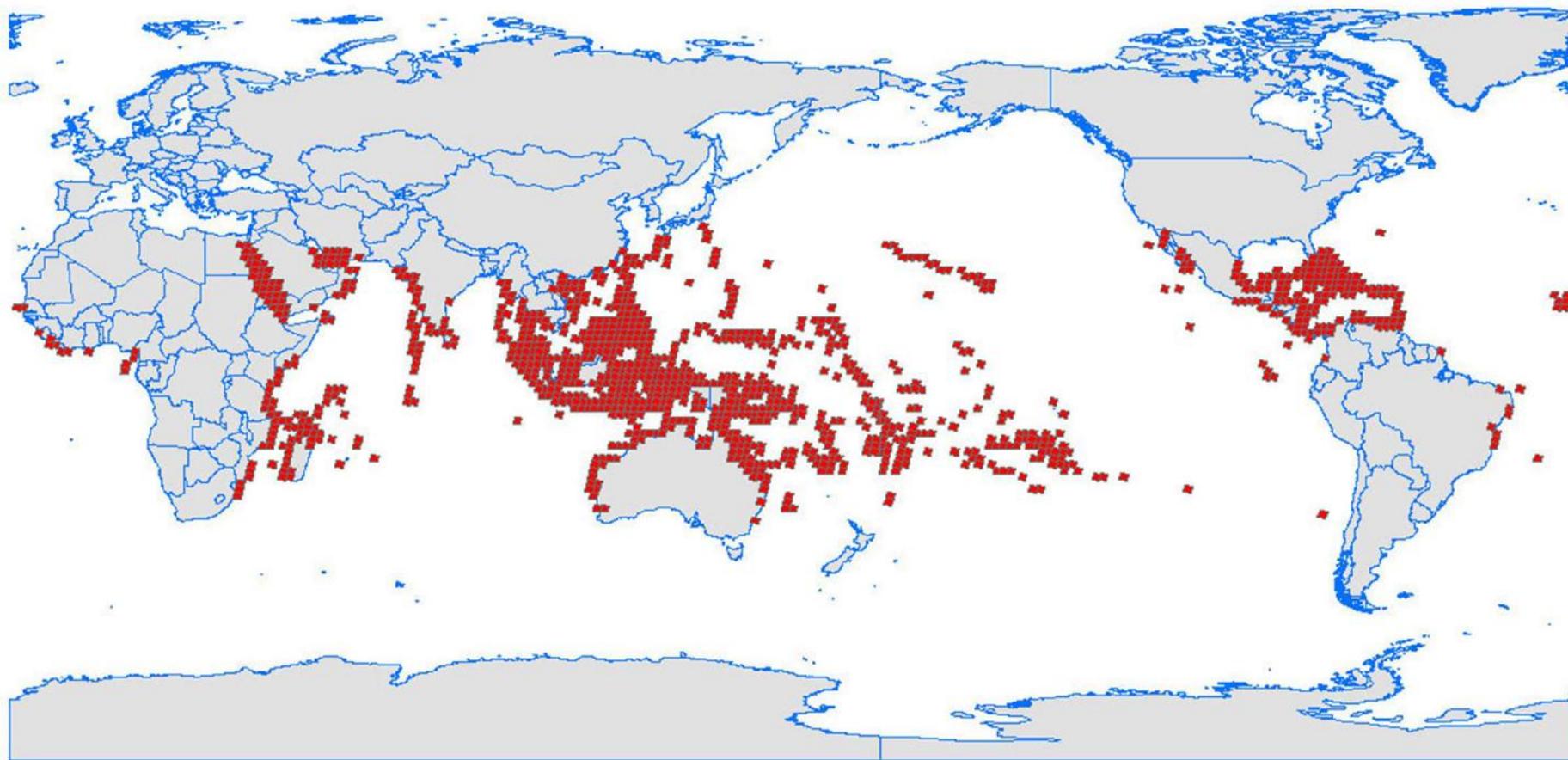
4.6亿年以后：低纬度——生物礁岩、暖水碳酸盐岩（主要是生物碳酸盐岩）；高纬度——冷水碳酸盐岩（生物骨骼组成）

大洋——白垩纪之前的钙质泥晶灰岩、白垩纪之后的钙质软泥（有孔虫）



<https://doi.org/10.1073/pnas.2023617118>

现代全球珊瑚礁（红色方块）分布图



珊瑚礁（岩）是生物岩的主要类型之一，由宏体生物的骨骼形成。

用人工智能方法确定的全球古代叠层石（绿色圆圈）分布图

<https://doi.org/10.1130/G50775.1>



叠层石只是微生物岩石的一种，时代分布为39-0亿年

全球碳酸盐岩（蓝色区域）露头分布图

DOI 10.1186/s40677-017-0084-y



根据统计，中国国土面积的38.5%被碳酸盐岩地层覆盖（李大通, 罗雁. 1983）；全球陆地表面面积的15%被碳酸盐岩地层覆盖（<http://www.china-shj.org.cn/post/11294>）。

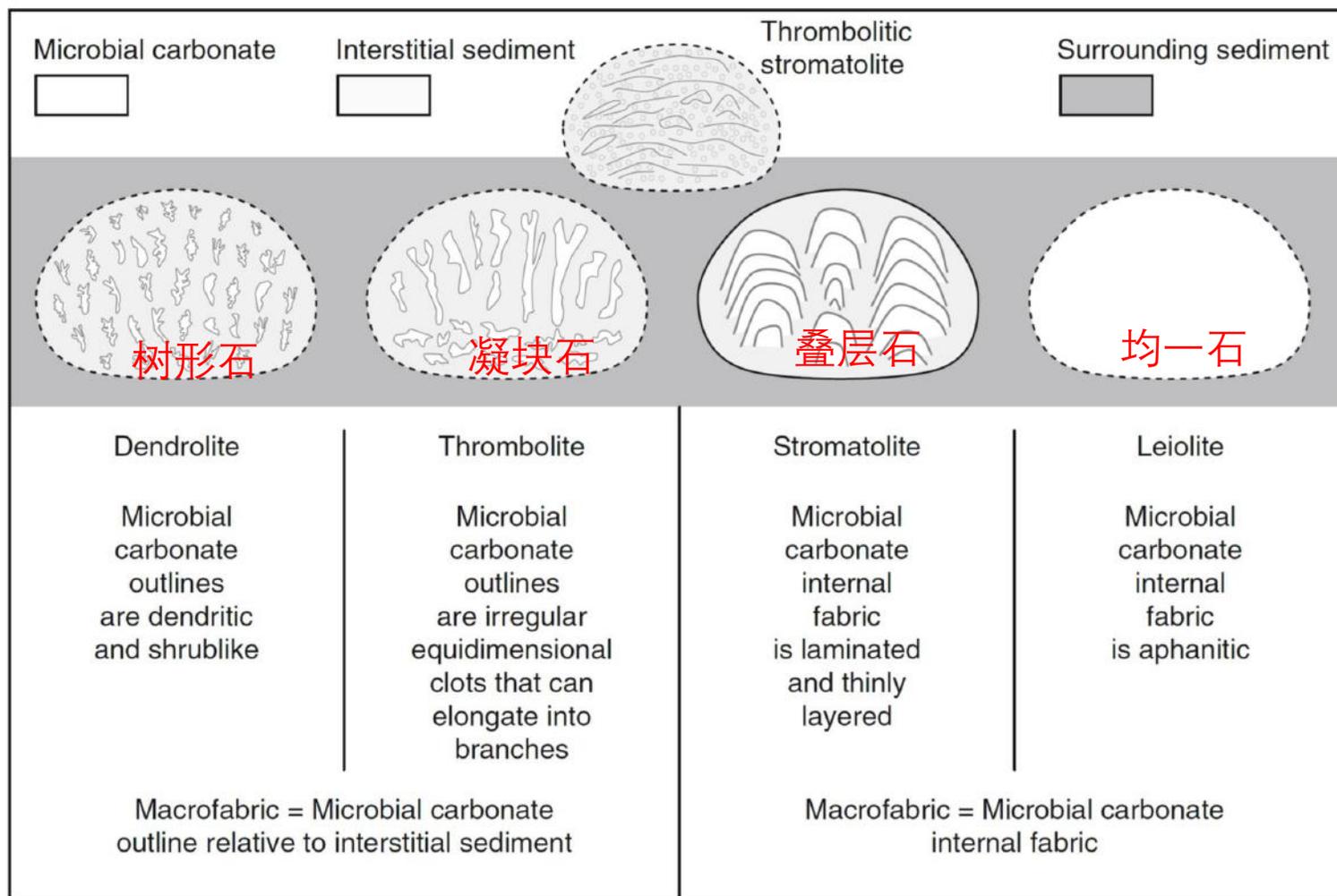
碳酸盐岩最新统一分类方案

三个经典分类→生物岩分类

生物礁岩和非礁石灰岩的经典分类 (Dunham 1962) :

异地灰岩：原始组分在沉积时未被生物粘结						原地灰岩：岩石组分在沉积时被生物粘结		
大于2mm的组分 ≤10% 含有灰泥(<0.03mm)		无灰泥		大于2mm的组分 >10%		障积生物形成	包壳或粘结生物形成	具有生物骨骼的骨架
灰泥支撑		颗粒支撑	无灰泥且颗粒支撑	基质支撑	大于2mm的组分支撑	障积灰岩	粘结灰岩	骨架灰岩
颗粒 ≤10%	颗粒 >10%							
泥晶灰岩	粒泥灰岩	泥粒灰岩	颗粒灰岩	漂砾灰岩	砾屑灰岩	结晶灰岩		
Allochthonous limestone original components not organically bound during deposition						Autochthonous limestone original components organically bound during deposition		
Less than 10% >2 mm components				Greater than 10% >2 mm components		Boundstone		
Contains lime mud (<0.02 mm)			No lime mud			By organisms which act as barriers	By organisms which encrust and bind	By organisms which build a rigid framework
Mud supported		Grain supported						
Less than 10% grains (>0.02 mm to <2 mm)	Greater than 10% grains							
Mudstone	Wackestone	Packstone	Grainstone	Floatstone	Rudstone	Bafflestone	Bindstone	Framestone

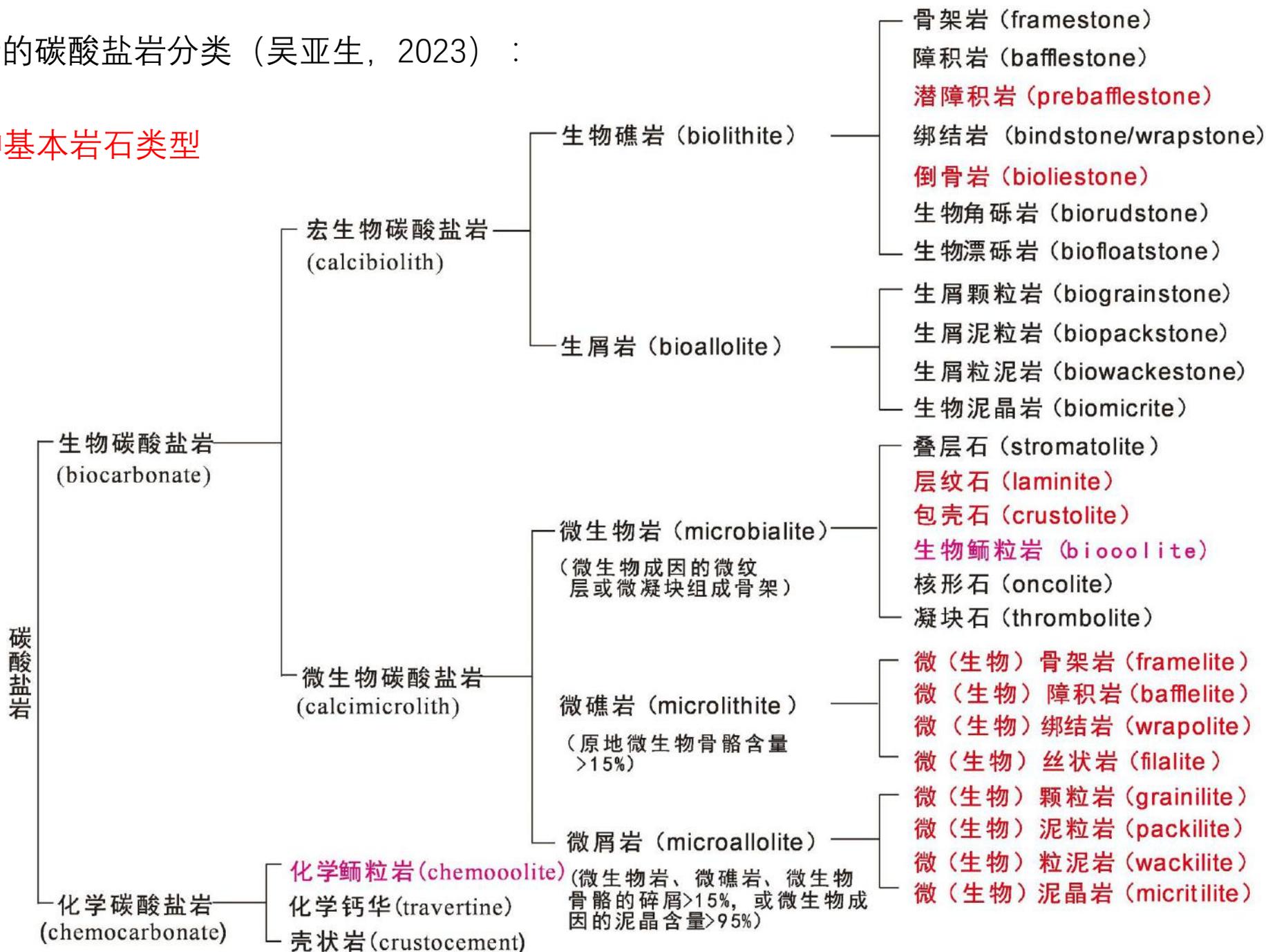
微生物岩的经典分类 (Riding, 2000) :



Riding, 2011: Figure 1 Microbial carbonates defined by **macrofabric**: leiolite (aphanitic),stromatolite (laminated), thrombolite (clotted), dendrolite (dendritic).

最新的碳酸盐岩分类 (吴亚生, 2023) :

25种基本岩石类型



传统碳酸盐岩沉积学的主要研究对象

吴亚生. 2023. 生物岩的分类. 古地理学报, 25(03): 511-523. (<https://biopetrology.com/wyspdf>)

生物礁岩：骨架岩



这是一种由丛状珊瑚（属于四射珊瑚类）的原地骨骼构成的**骨架岩**，来自湖南慈利上二叠统生物礁。

骨架岩中的生物骨骼必须相互连接。

生物礁岩：绑结岩



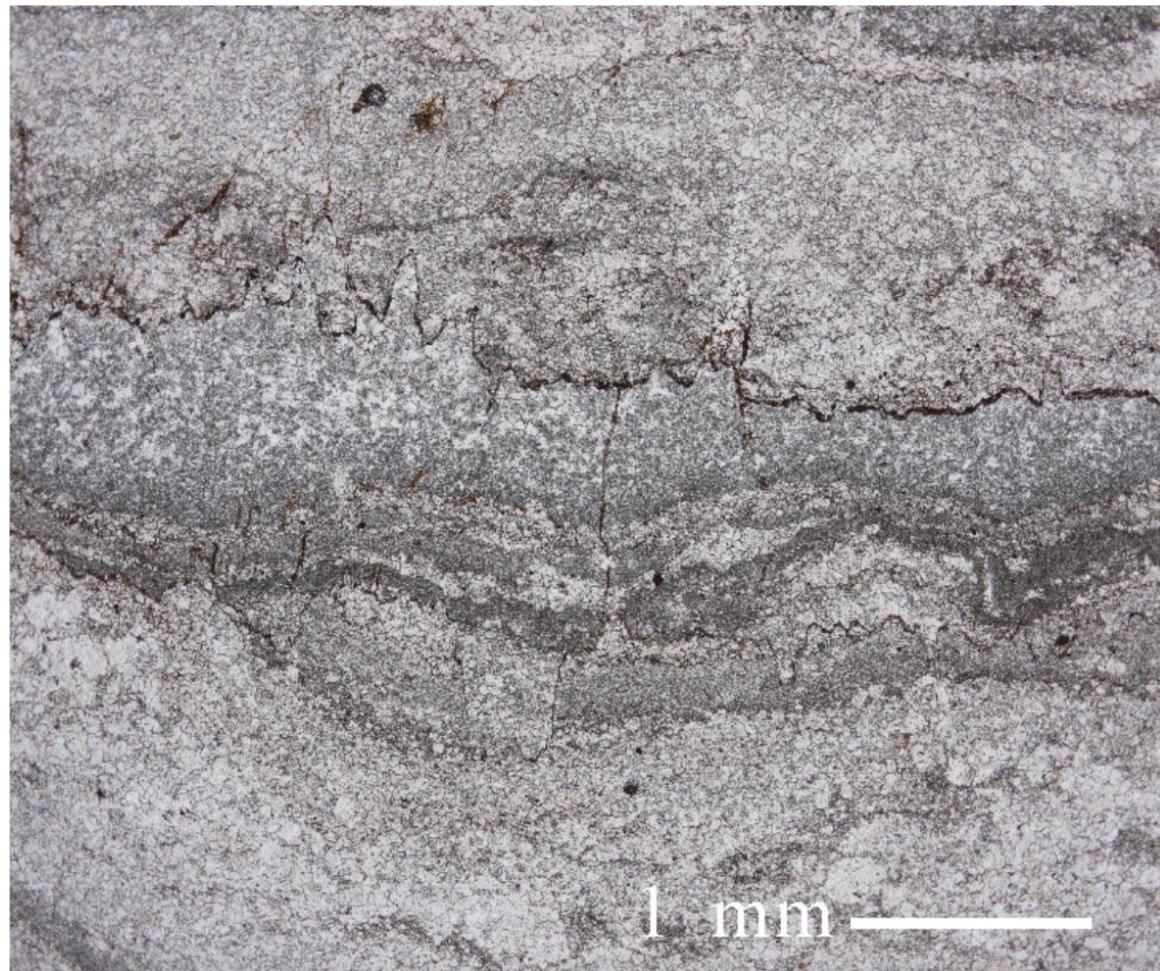
这是一种由一种红藻(*Corallina*)的皮壳状骨骼构成的**绑结岩**，来自中国南海的新生代生物礁。岩心照片。

生物礁岩：倒骨岩



这是一种由倒伏的丛状珊瑚（属于四射珊瑚类）的骨骼组成的**倒骨岩**，来自湖南慈利的上二叠统生物礁。

微生物岩石：微生物岩：层纹石



细-粉晶云质**层纹石**，由暗色泥晶微纹层与凝块石构成的浅色细-粉晶粗纹层的交互构成，来自新疆阿克苏下寒武统第三阶肖尔布拉克组，标本号S-17。

微生物岩石：微生物岩：叠层石

叠层石必须具有微生物席形成的微纹层组成的骨架，或者有微生物席形成的纹层状孔洞。

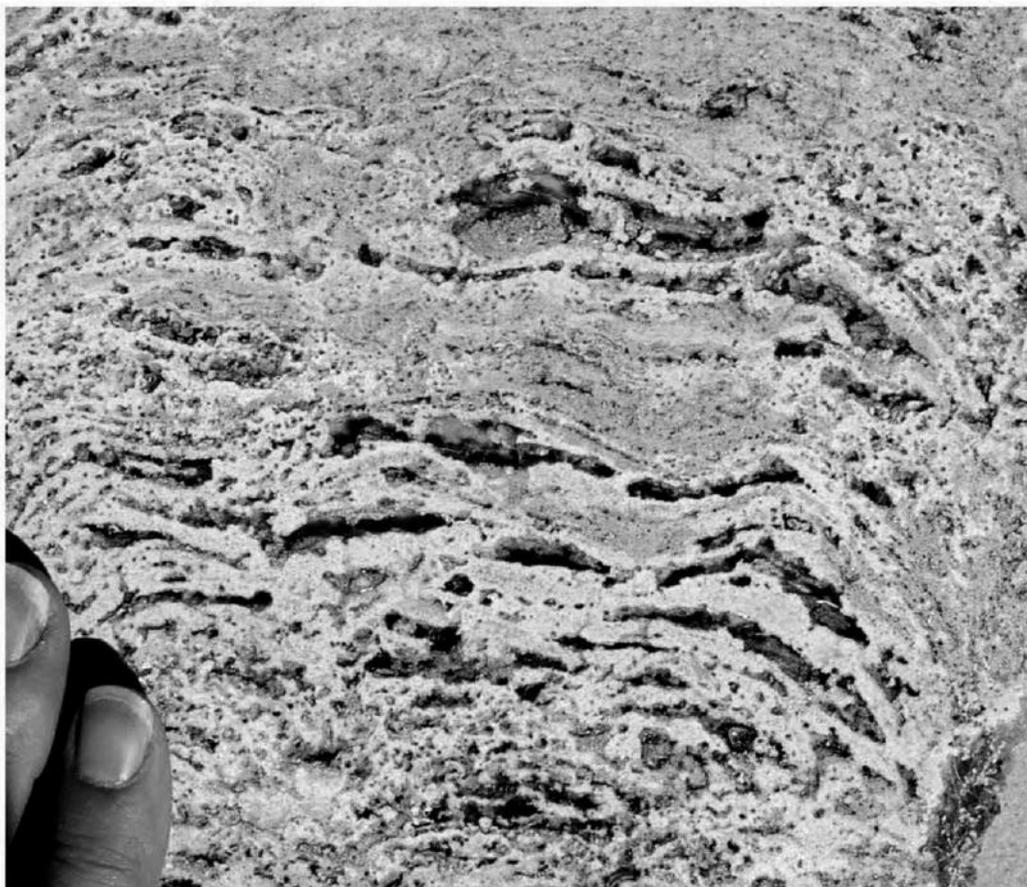
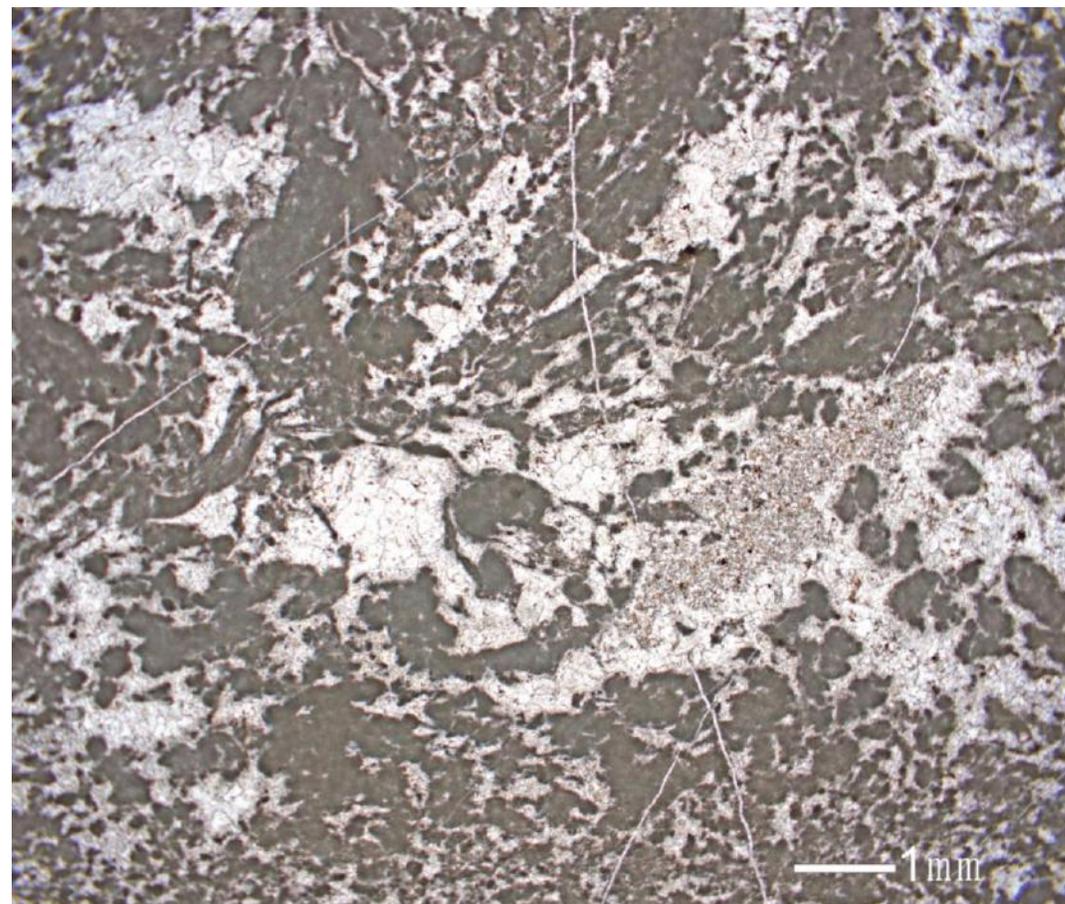


Fig. 9 of Riding (2000): 一种具有纹层状孔洞的现代叠层石，由微生物席捕集沉积物形成。

微生物岩石：微生物岩：凝块石

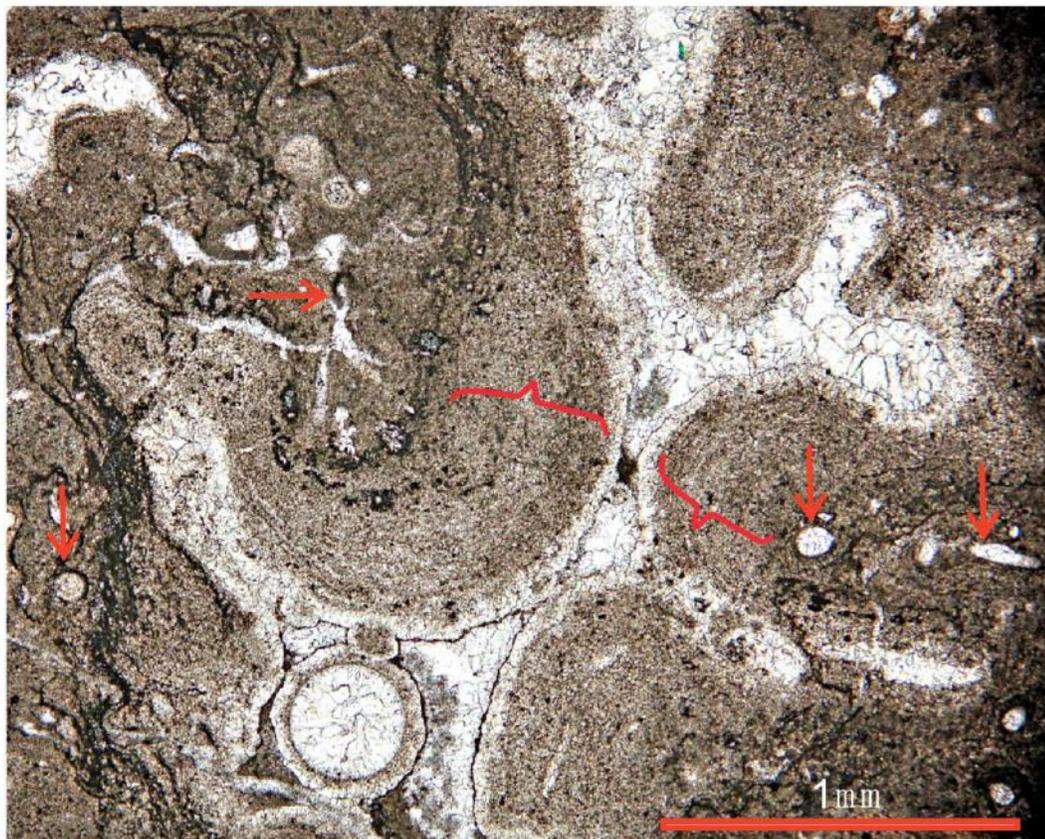
凝块石必须具有泥晶微凝块组成的骨架。



一种具有网状凝块结构的凝块石，暗色泥晶微凝块组成岩石的骨架，来自陕西耀县陶曲坡中奥陶统。

微生物岩石：微生物岩：包壳石

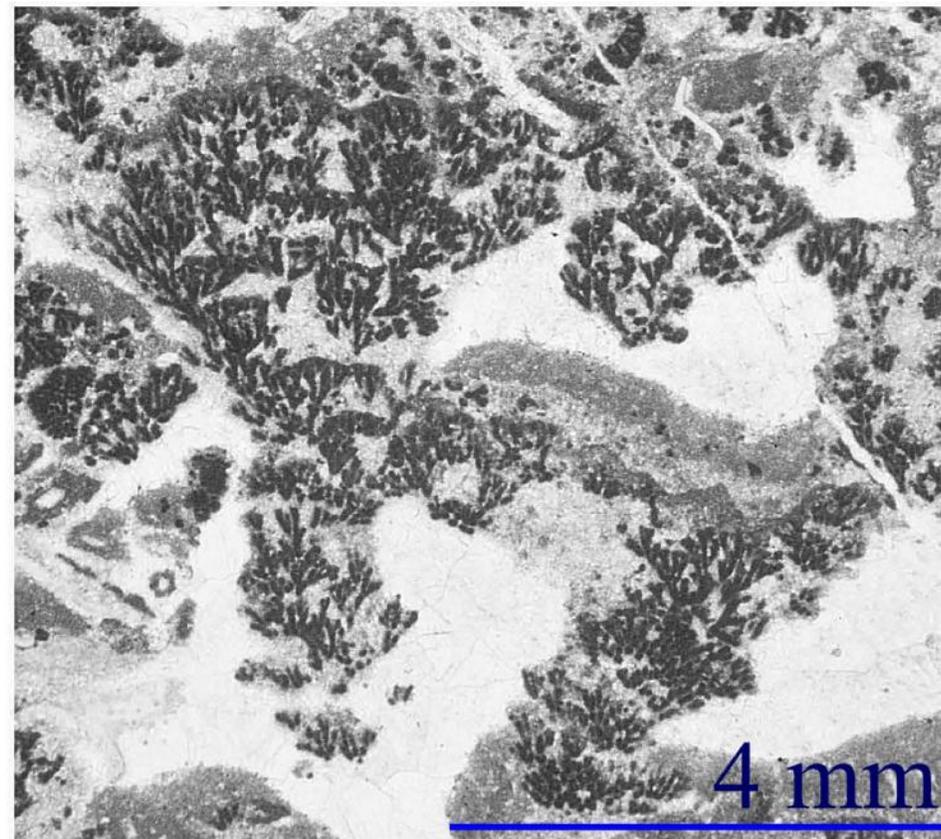
由层层包裹在它物上的微生物成因的泥晶微纹层组成岩石的主体



一种包壳石，由层层包裹在一些蓝藻的矿物壳（红色箭头）上的泥晶纹层（红色括号）组成，来自青海新生代湖相地层。（标本由中国石油杭州地质研究院朱超提供）

微生物岩石：微礁岩：微骨架岩

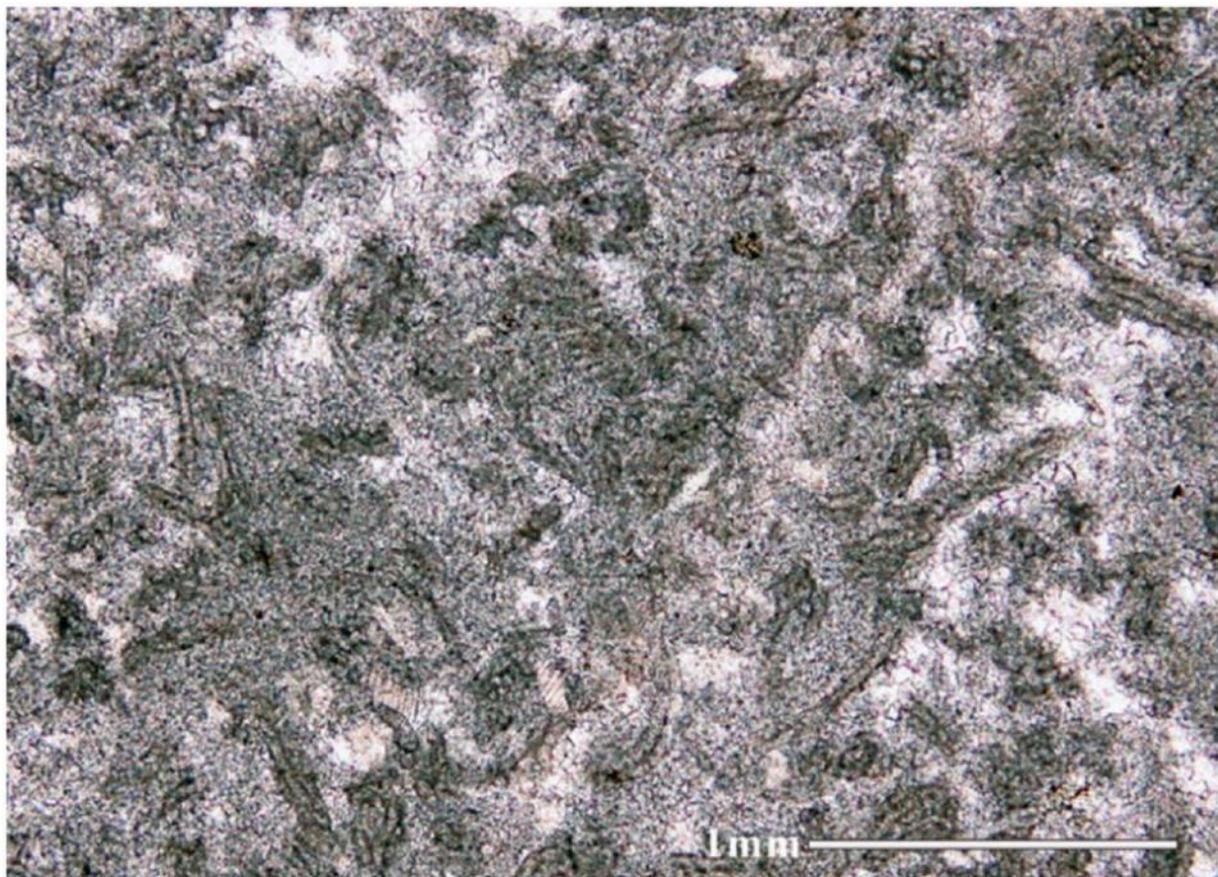
由微生物骨骼构成岩石的骨架



一种由表附藻（*Epiphyton*）的树枝状骨骼组成的微骨架岩

微生物岩石：微礁岩：微丝状岩

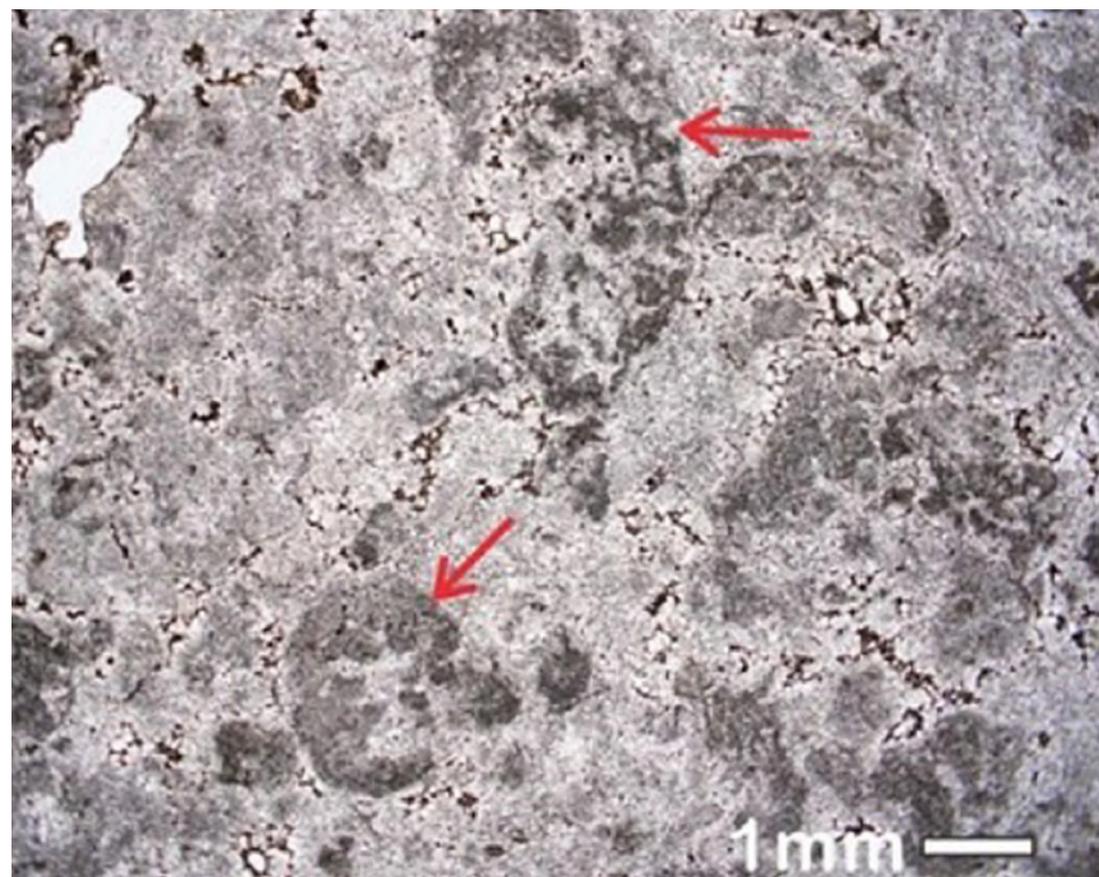
由丝状微生物骨骼构成岩石的骨架



一种由一些蓝藻的丝状骨骼构成的**微丝状岩**，来自新疆阿克苏下寒武统第二阶玉尔吐斯组。

微生物岩石：微屑岩：云质微颗粒岩

由微生物骨骼或微纹层、微凝块的碎屑组成的亮晶颗粒岩，经历了白云石化、重结晶、溶蚀作用等



一种由肾形藻 (*Renacis*) 骨骼的碎屑组成的**云质微颗粒岩**，来自新疆阿克苏下寒武统第三阶肖尔布拉克组。

生物矿化作用研究进展

能矿化的生物:

- ✓ 细菌
- ✓ 蓝藻
- ✓ 绿藻
- ✓ 红藻
- ✓ 后生动物

1、微生物矿化实验研究确定这些细菌具有矿化能力

黄色粘球菌 (*Myxococcus xanthus*)

小红卵菌属 (*Rhodovulum*)

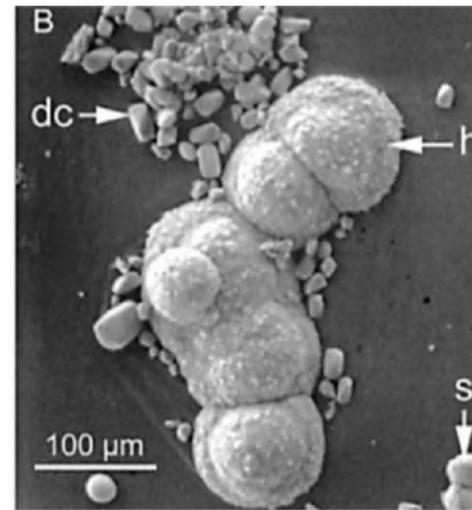
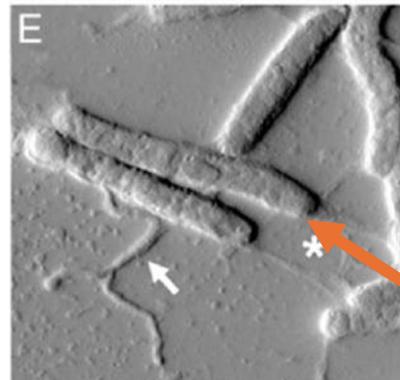
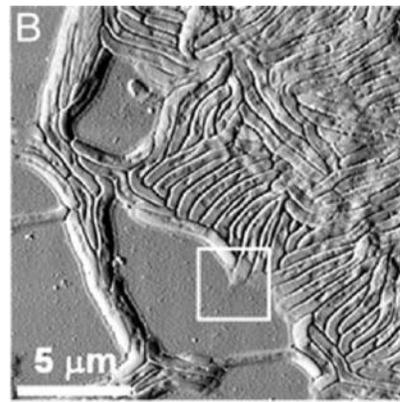
盐单胞菌 (*Halomonas*)

芽孢杆菌 (*Bacillus*)

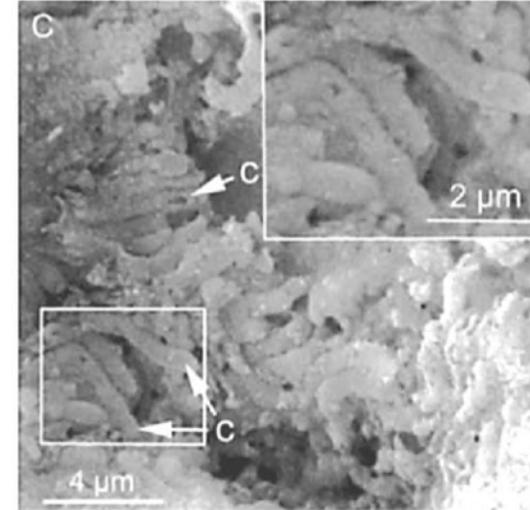
枝芽孢菌 (*Virgibacillus*)

芽孢八叠球菌属 (*Sporosarcina*)

短波单胞菌 (*Brevundimonas*)



活细胞诱导晶出的
半球状集合体



半球状集合体中的
钙化细胞

黄色粘球菌 (*Myxococcus xanthus*)

2、微生物矿化实验研究确定这些蓝藻具有矿化能力

聚球藻 (*Synechococcus*)

集胞藻 (*Synechocystis*)

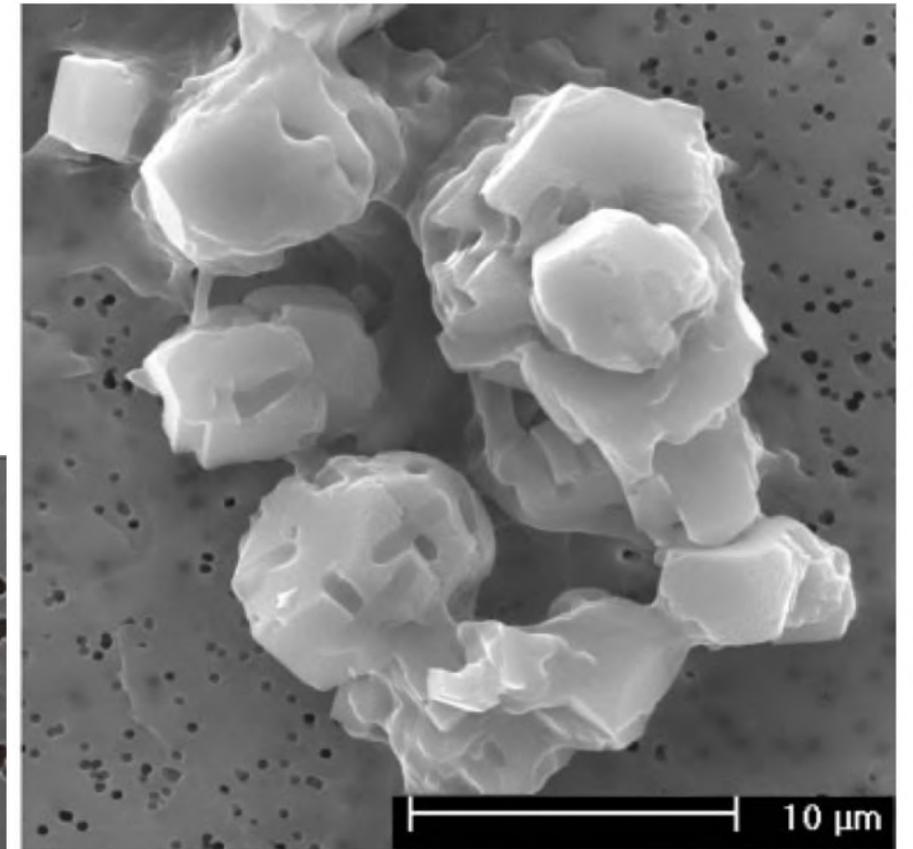
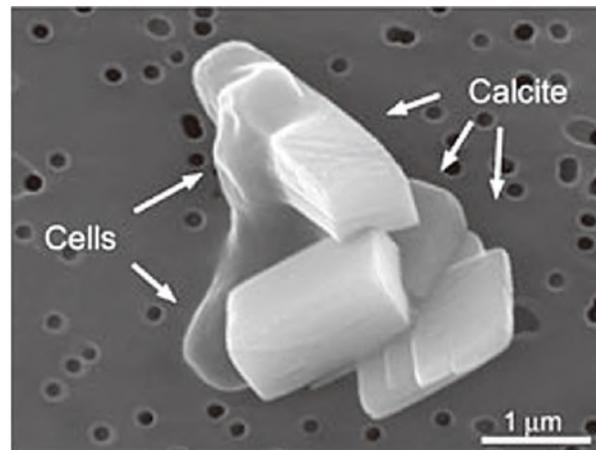
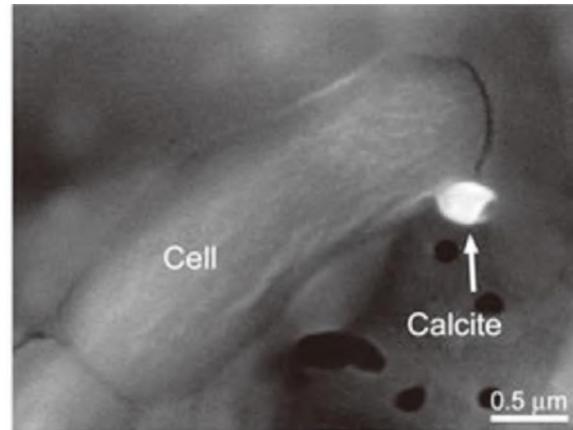
粘球藻 (*Gloeocapsa sp.*)

红海束毛藻 (*Trichodesmium erythraeum*)

黏珍珠藻 (*Gloeomargarita*)

蓝杆藻 (*Cyanothece*)

拟色球藻属 (*Chroococidiopsis*)



生物礁岩分类和生物礁相带划分的细化方案

礁、滩、层、丘、礁组合的概念：

- ◆ 生物礁：原地生物骨骼组成的、隆起。**不一定是丘形的。**
- ◆ 生物丘：原地生物骨骼或泥晶组成的、丘状。
- ◆ 生物滩：被波浪改造的生物骨骼组成的。
- ◆ 生物层：原地生物骨骼组成的层状的。
- ◆ 生物礁组合：礁核+礁前+礁后；礁前+礁翼。



这是一个礁组合

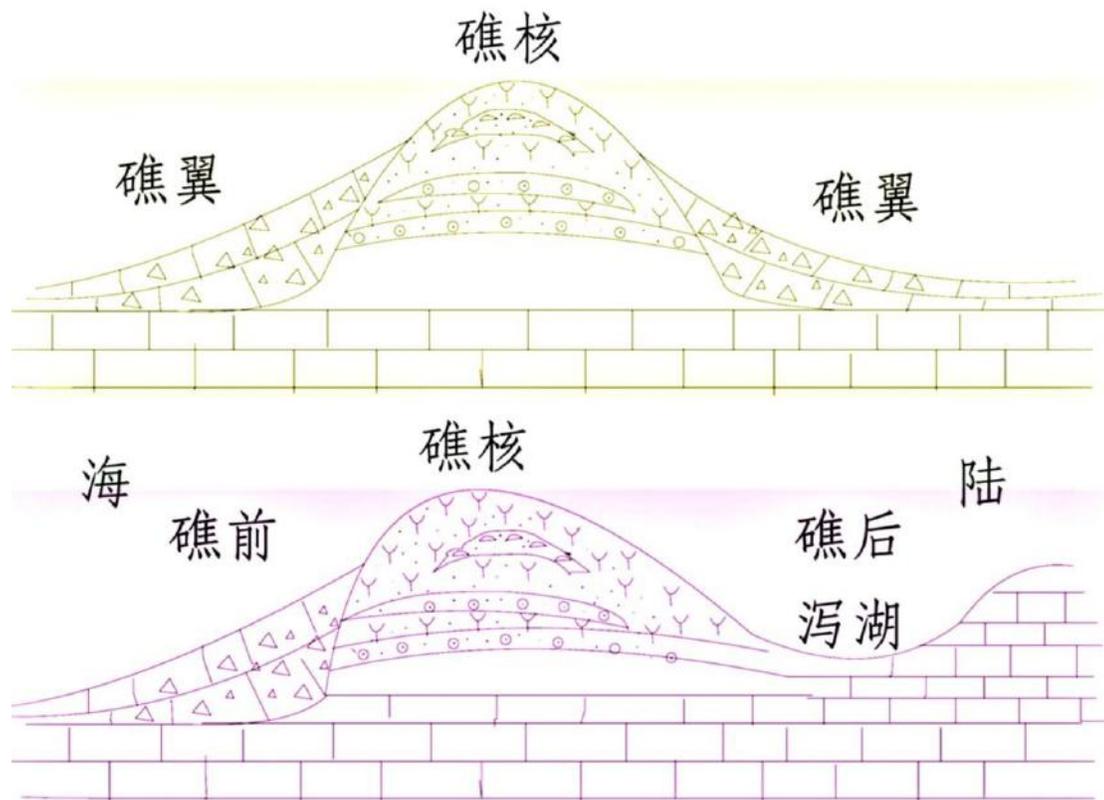
生物礁岩划分的细化方案 (吴亚生, 1992)

	岩石名称	本文定义	吴亚生 1992年 的定义	Embry & Klovan 的定义
原生礁岩	骨架岩	同右	原地、硬骨的造礁生 物生长形成,密集相 邻者相接触,间距 0-10cm	块状生物原地构成 三维骨架的岩石
	障积岩	同右	原地、硬骨的造礁生 物较丰富,但相邻 者 不相接触,间距10- 50cm	具柄生物挡集沉积 物形成,少见
	潜障积岩	同右	原地、硬骨的造礁生 物稀少,间距 50cm 以上	无
	粘结岩	同右	(=钱宪和的“生物 胶结岩”)软的、纤状 的藻类捕获粘结沉 积物形成	无
	盖覆岩	同左	钱宪和定义的盖覆 岩(covestone):板状 生物覆盖碎屑沉积 物而成	绑结岩(bindstone): 原地的板状 生物包裹和捆绑沉 积物而成;沉积物 支撑

Wu Ya Sheng. 1992. Fabric-facies and fabric-rock-types of reefs. Science in China (Series B), 35/12: 1503-1511.

次生礁岩	骨源次生礁岩	支撑状	倒骨岩	由倒骨组成,倒骨呈支撑状	生物砾岩	角砾岩:粒径大于 2cm 的颗粒为主(支撑)
			巨骨砾(屑灰)岩	支撑组分中巨骨砾(直径>50cm) 含量最高	生物砾岩	角砾岩
			骨砾(屑灰)岩	支撑组分中骨砾(直径 50-6.4 cm)含量最高	生物砾岩	角砾岩
			细骨砾(屑灰)岩	支撑组分中细骨砾(直径 6.4-0.2 cm)含量最高	生物砾岩	角砾岩
			骨砂(屑灰)岩	支撑组分中骨砂(直径 0.2- 0.00625 cm)含量最高	生物砂岩	角砾岩
	星散状	含倒骨礁(灰)岩	含倒骨,倒骨呈星散状	含生物砾岩	漂砾岩:基质支撑; 粒径大于 2cm 的颗粒占 10%以上	
		含巨骨砾礁(灰)岩	含巨骨砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩	
		含骨砾礁(灰)岩	含骨砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩	
		含细骨砾礁(灰)岩	含细骨砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩	
		含骨砂礁(灰)岩	含骨砂的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩	
	礁源次生礁岩	支撑状	巨礁砾(屑灰)岩	支撑组分中巨礁砾(直径>50 cm) 含量最高	巨角砾岩	角砾岩
			礁砾(屑灰)岩	支撑组分中礁砾(直径 50-6.4 cm)含量最高	礁砾岩	角砾岩
			细礁砾(屑灰)岩	支撑组分中细礁砾(直径 6.4-0. 2 cm)含量最高	礁砾岩	角砾岩
			礁砂(屑灰)岩	支撑组分中礁砂(直径 0.2- 0.00625 cm)含量最高	礁砂岩	角砾岩
		星散状	含巨礁砾礁(灰)岩	含巨礁砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩
			含礁砾礁(灰)岩	含礁砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩
			含细礁砾礁(灰)岩	含细礁砾的沉积岩(含量>5%)	含角砾岩或漂砾岩	漂砾岩
含礁砂礁(灰)岩			含礁砂的沉积岩(含量>5%)	含礁砂岩或漂砾岩	漂砾岩	

传统的二相带或三相带划分模式



(引用)

根据结构对生物礁进行更细的相带划分:

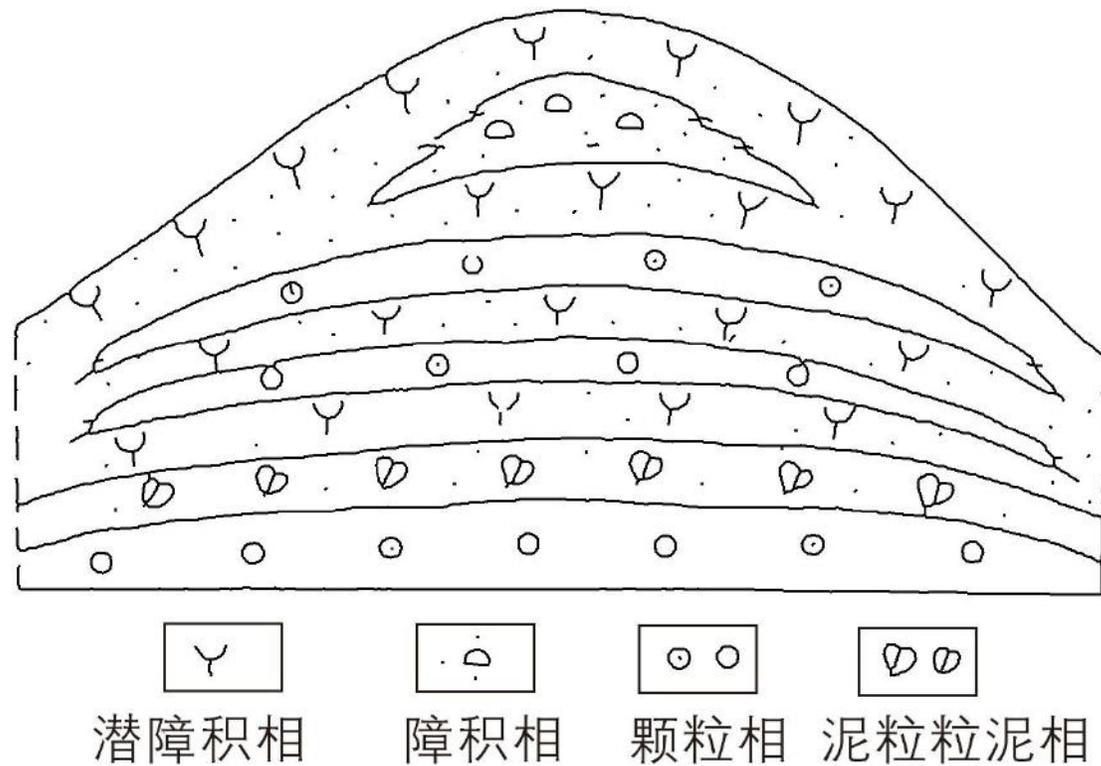


图1 四川安县睢水晚三叠世生物礁的结构相图

(吴亚生, 1992)

生物礁的结构相划分 (吴亚生, 1992)

	后斜坡脚	后斜坡	礁坪		主生长带	前斜坡	前斜坡脚
			后礁坪	前礁坪			
骨架相					+++		
障积相					+++		
隐障积相					+++		
潜障积相		+			+++	+	
盖覆相			++	++			++
粘结相					+++		
骨片相					+++		
角砾相	+						+++
含角砾相	+					++	++
砂砾相		+++					
砾砂相		+++					
巨角砾相			++				

“+”代表出现的频率高低

吴亚生, 1992, 生物礁的结构岩石类型和结构相。中国科学, B, 3: 304-310.

大陆架、半深海和深海也有珊瑚礁

浅水礁+中光带礁+深水礁

“中光带珊瑚生态系”的定义:30-150m水深范围的珊瑚和其它生物的群落, 包括生物礁 (Puglise et al. 2009; Hinderstein et al. 2010)

文献中的划分

- <30m: shallow reef, 浅水礁
- 30-150m: 中光带礁
- 50-4000m: deep reef, 深水礁。

主要珊瑚属种:

Pachyseris speciosa 美丽波纹珊瑚

Agaricia undata

吴亚生建议

- <60m: 浅水礁
- 60-150m: 中光带礁
- >150m: 深水礁

由于30-60m的动物组成与60-150的不同
(<https://doi.org/10.1016/j.tree.2024.01.011>), 应当将<60m的叫浅水礁, 把>60m的叫深水礁, 可以把60-150m的叫中光带礁。



Tahiti, reef of *Pachyseris speciosa*, depths of 50 to 55 metres.

中光带礁



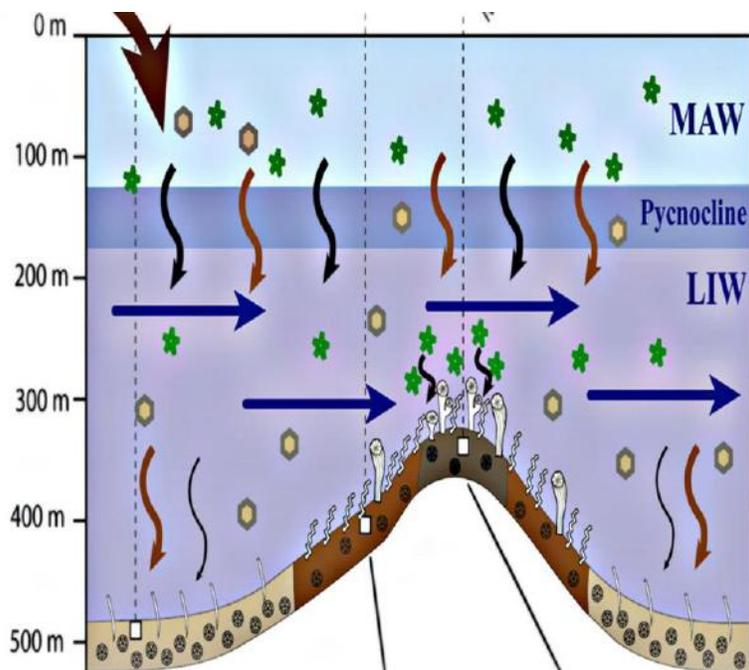
这种壮观的玫瑰形珊瑚是在太平洋塔希提岛海岸附近35到70米的深处发现的。它是珊瑚礁的一部分，延伸超过3公里，最宽的地方有70米。**The pristine coral reef, newly discovered in deep water near Tahiti**

<https://www.newscientist.com/article/2305315-pristine-coral-reef-discovered-in-deep-water-off-the-coast-of-tahiti/>



Okinawa冲绳县, 90 m;

深水礁 (deep reef/deep sea reefs) /冷水礁 (Cold water reefs,) : 水深>150 m



西地中海冷水珊瑚系统
(Stalder et al., 2021)

珊瑚: *Lophelia pertusa*, *Madrepora oculata*



Mound top: 330m
珊瑚砾以及活珊瑚



Mound base: 346m
含珊瑚碎屑的粉砂岩

最大的深水礁

地点：美国东部的大西洋黑高原；大小：109X965 km；水深：200-1000 m



A cold water coral mound in the center of the Blake Plateau off the southeastern coast of the U.S.

<https://apnews.com/article/largest-deep-sea-coral-reef-5895cfd24f3de2a13515241d12bb8f89>

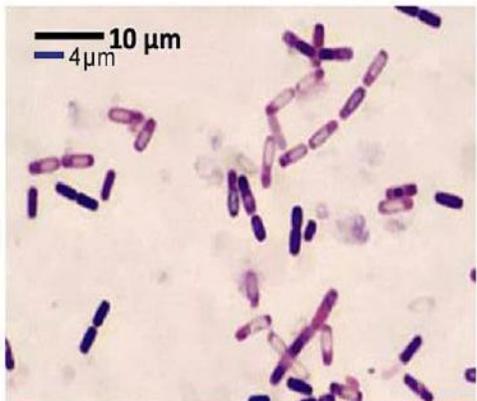


Desmophyllum pertusum
syn. *Lophelia pertusa*
(Linnaeus, 1758)

Reef of the Blake Plateau 布雷克海底高原

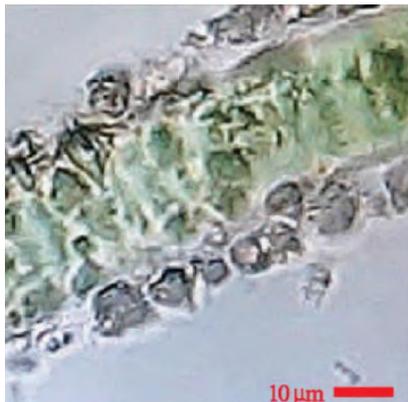
微生物碳酸盐岩研究必须以微观研究为主导

必须根据微观特征识别微生物岩石、必须以微观研究作为微生物岩石学研究的核心内容



Bacillus thuringiensis

苏云金杆菌

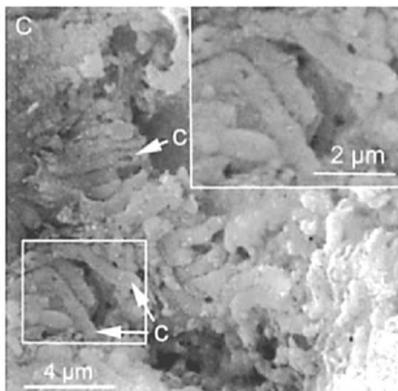


生物诱导结晶形成的
颗粒



Cyanobacteria:

Fischerella 费氏藻

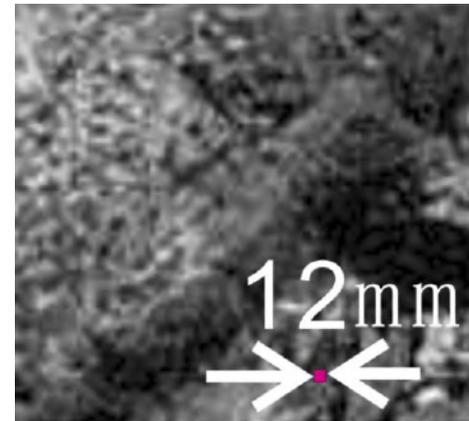


黄色粘球菌 (*Myxococcus xanthus*)

微生物岩研究始于宏观



Pitted thrombolite, 美国阿尔伯特
(Aitken, 1967)



凝块的原始定义：
8-20μm 泥晶

The microfabric of thrombolites consists of centimeter-sized patches or clots of microcrystalline limestone (grain-size 8-20 microns) with rare clastic particles, in part indistinctly con-

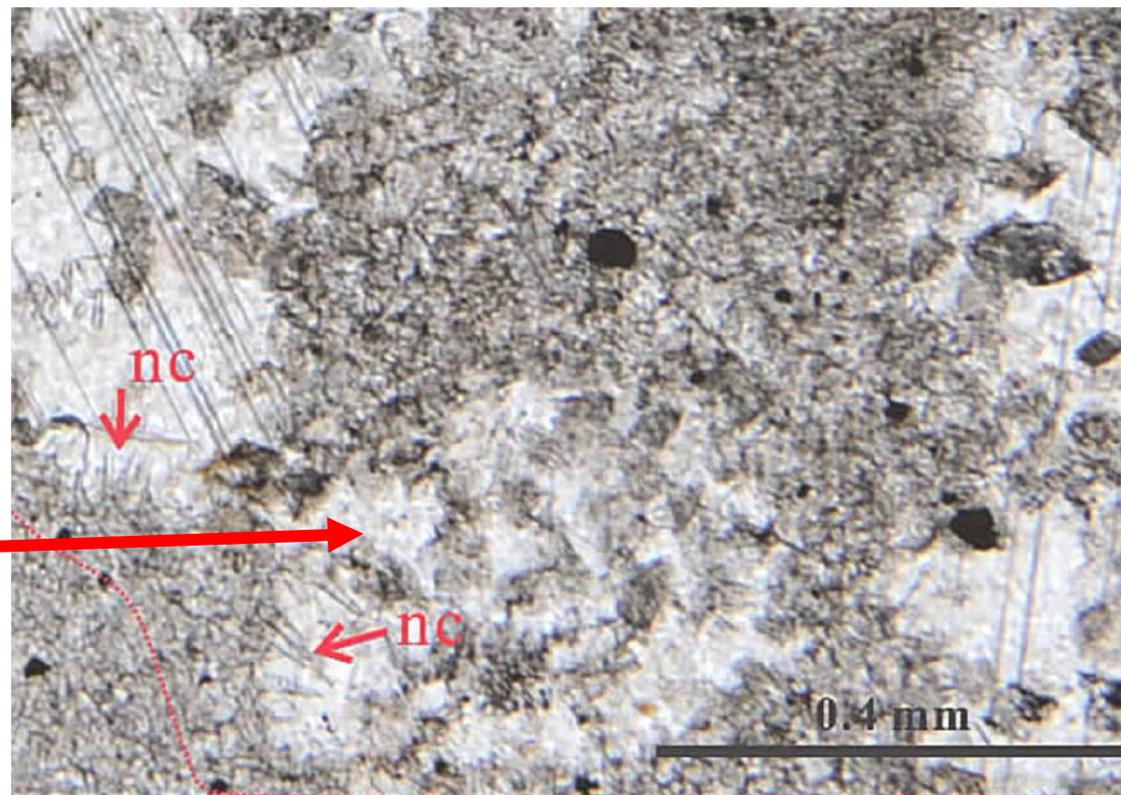
只有进行微观和超微观的研究，才能识别微生物岩石的初始结构

二叠纪-三叠纪界线地层“微生物岩”

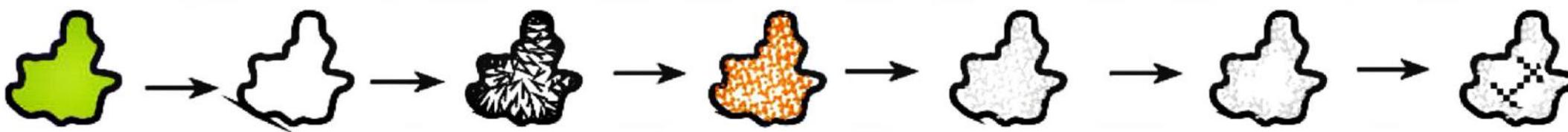
根据宏观特征识别凝块，导致认识错误：



重庆北碚PTB微生物岩石露头照片



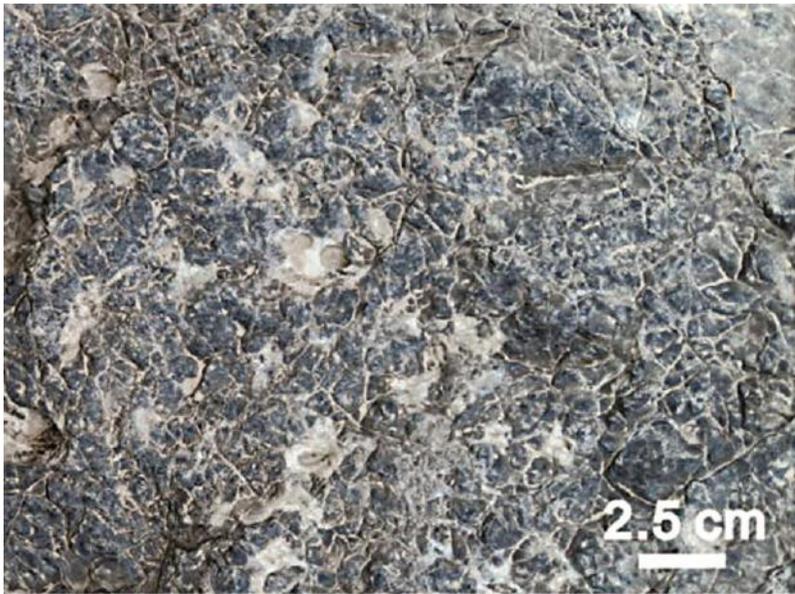
漂浮状菱形方解石和少数针状方解石(nc)



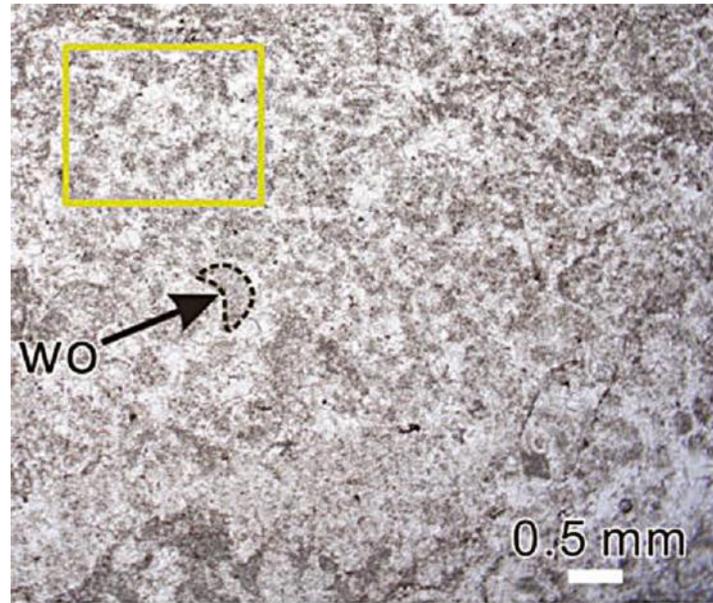
宏观的“凝块”实际上是石头，不一定是微生物岩石，其微观结构不一定是凝块结构。

微观尺度才能识别微生物作用形成的凝块。

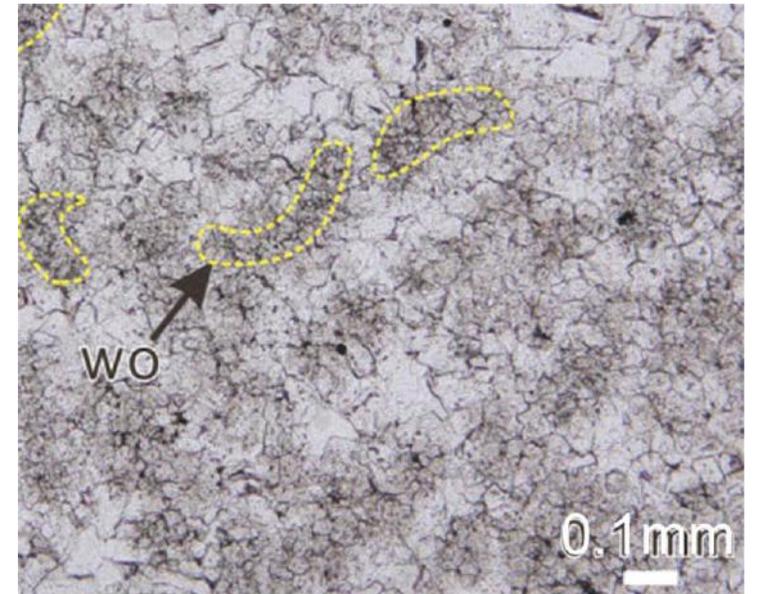
塔里木盆地寒武系第三阶白云岩



Cambrian Stage 3, Sugaitblak section



Vermicular clotted fabric



Enlargement of the yellow rectangle in

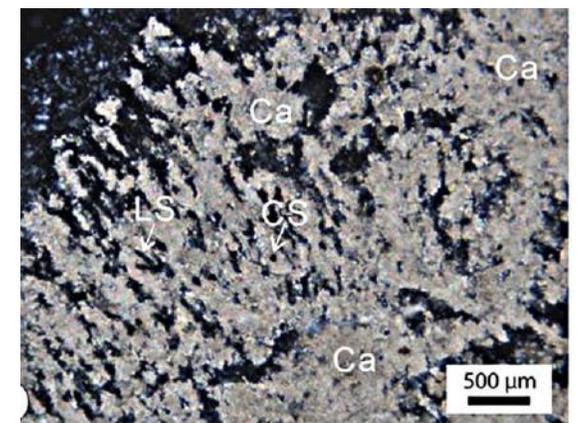
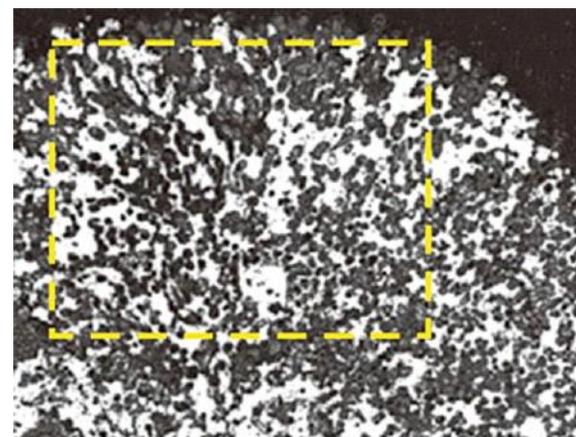
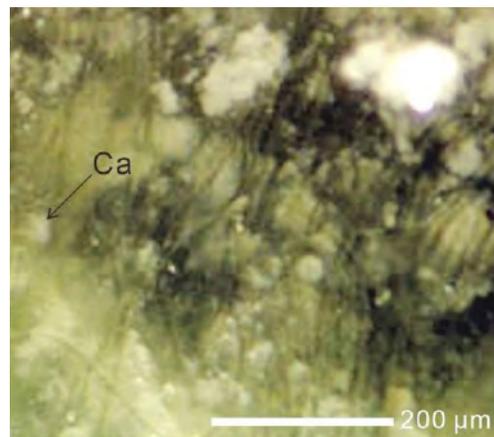
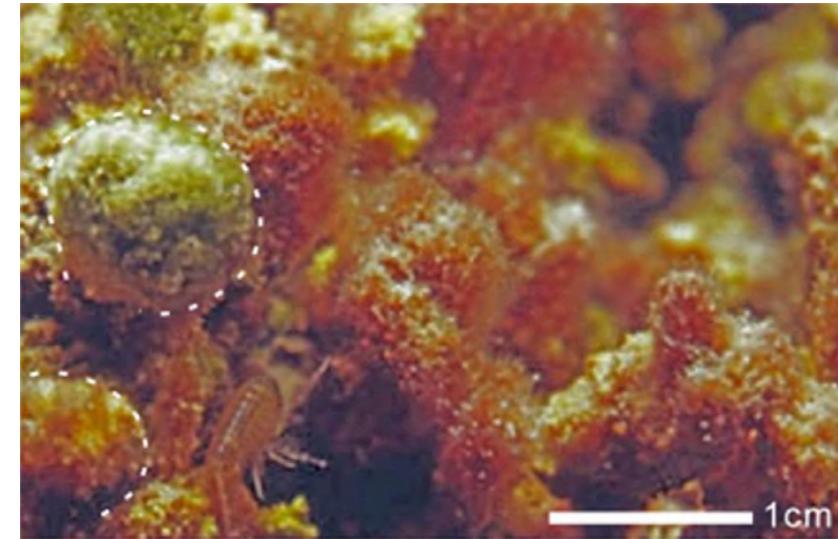
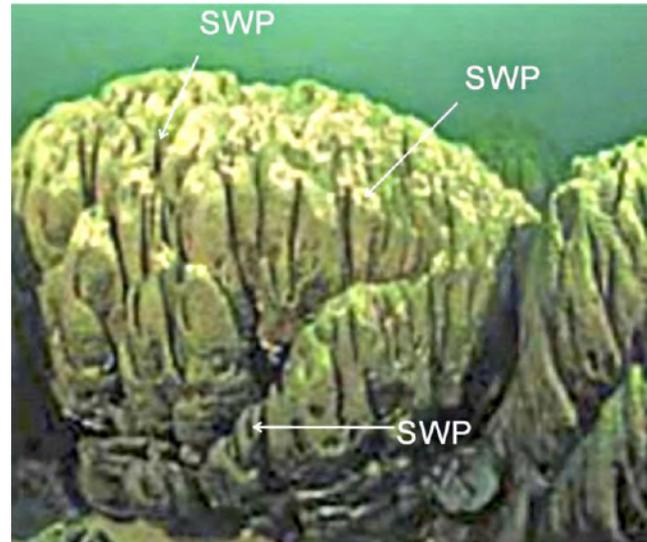
微生物碳酸盐岩研究必须以恢复、鉴定模孔作为关键研究内容

模孔：微生物在岩石中留下的大小和形状与其一致的孔洞，以模孔、铸体、残孔三种形式出现

[Mold & Cast Fossils | Sciencing:](#)

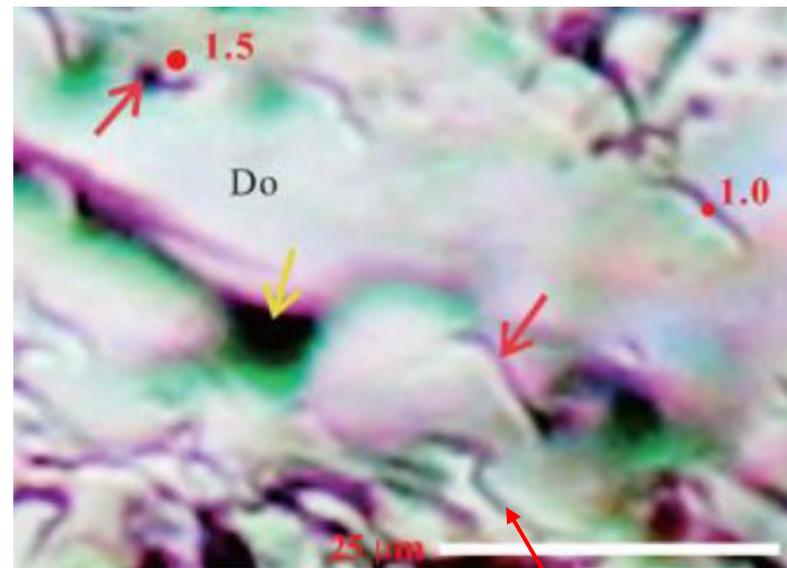
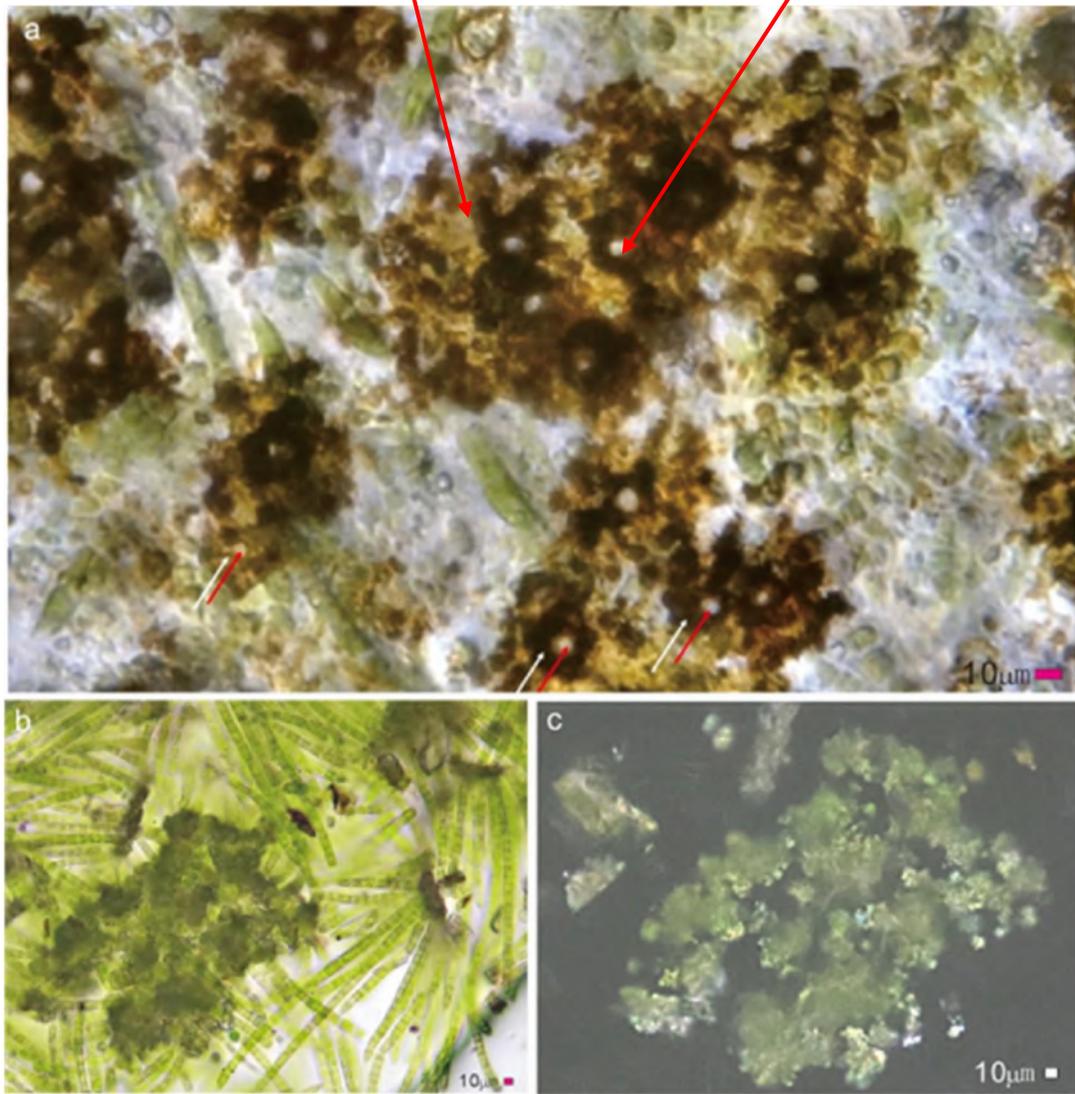
“Molds and casts that faithfully replicate the external form of an organism provide paleontologists clues about the surface anatomy and behavior of an ancient organism.”

Travertine stones in Pavilion Lake, Canada



生物诱导矿化成因碳酸盐矿物

模孔



(Wu et al., 2021)



模孔

群动盖丝藻 (*Geitlerinema ionicum*)

对古代微生物碳酸盐岩的研究必须进行结构和成分的反演

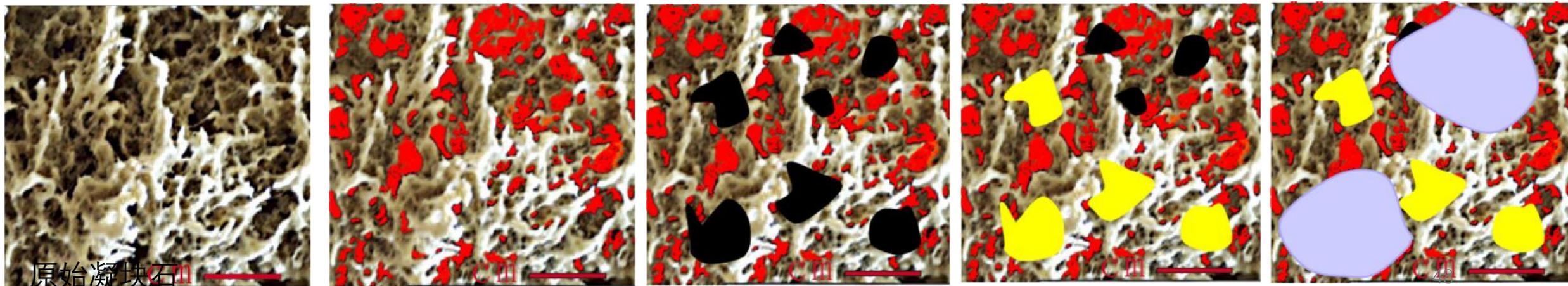
所有的古代生物岩都经历了结构成分的正演化，所以，需要通过反演研究，恢复生物岩的原始显微结构和组分。

反演研究：通过对大量材料的细致、系统的研究，将分散观察到的各种成岩作用按照时间顺序关联起来，恢复微生物岩石的成岩演化历史，从而确定其初始的结构和成分。

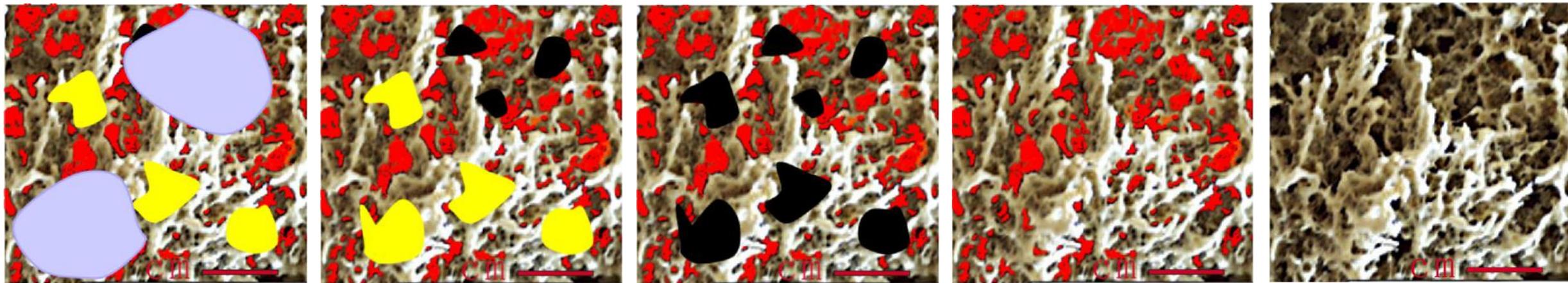
原始的微生物岩石→成岩作用1,2,3,4, N→现今的微生物岩石（原始结构和成分被改造）

主要成岩作用类型：溶蚀作用-形成溶蚀孔洞、白云石化作用、晶体在孔隙中生长（胶结作用）、重结晶作用

结构正演示意图：



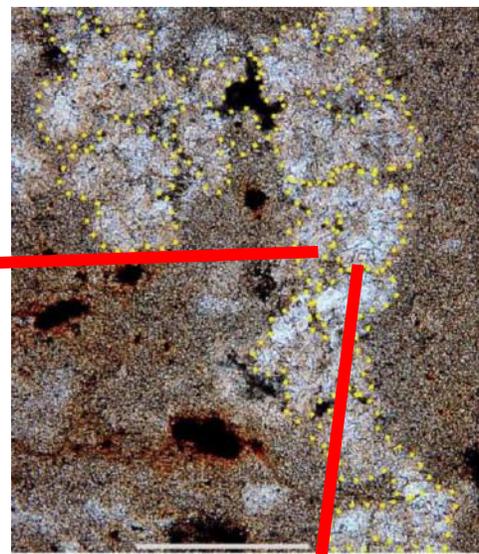
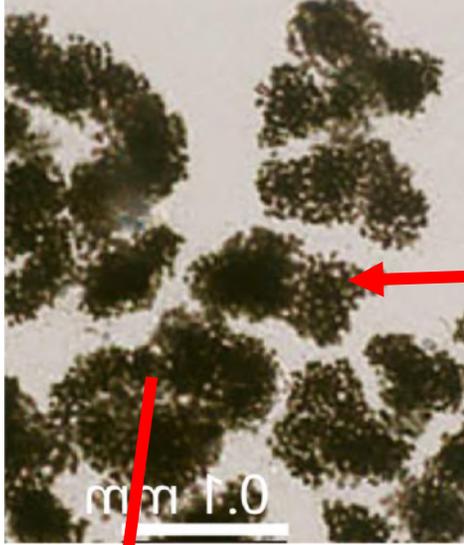
结构反演示意图：



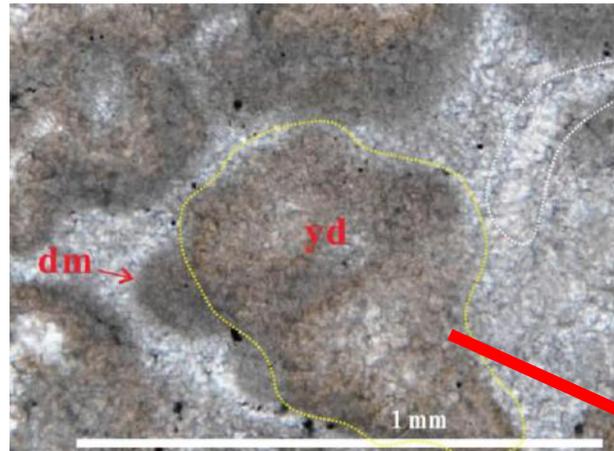
矿物反演举例：

粗晶白云岩 ➡ 中晶白云岩 ➡ 细晶白云岩 ➡ 粉晶白云岩 ➡ 泥晶白云岩 ➡ 泥晶灰岩 ➡ 超微晶灰岩

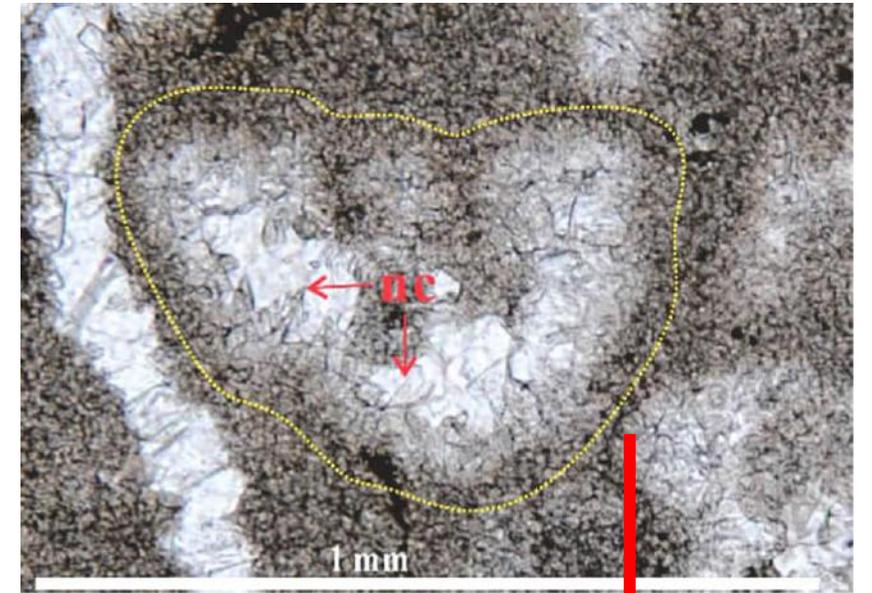
原始凝块石



Fossil casts of planktic cyanobacterium, *Microcystis*, in P-T boundary “microbialite” (Wu et al., 2014. Scientific Reports)

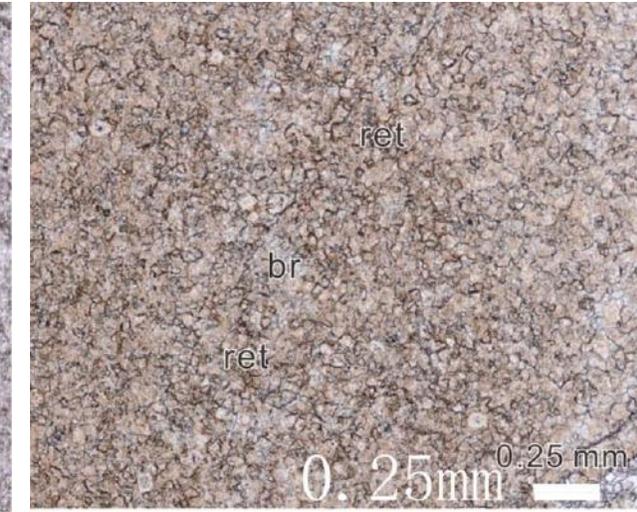
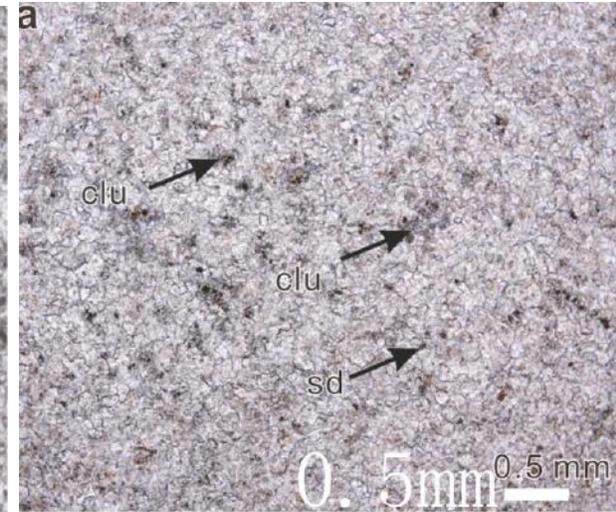
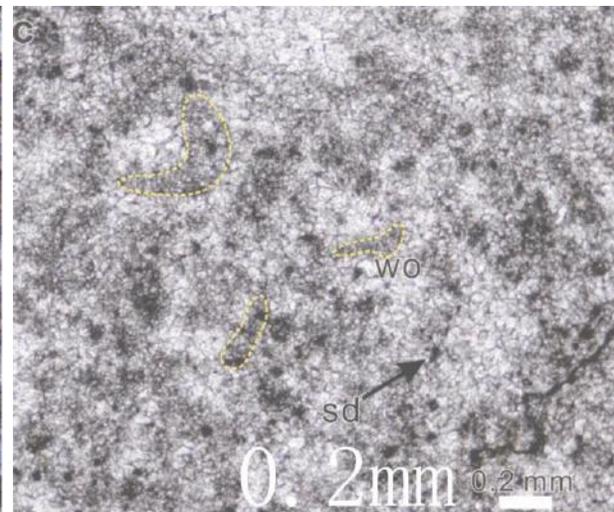
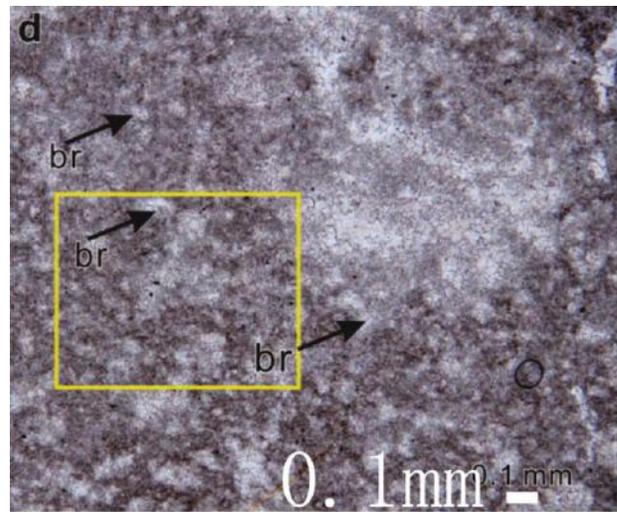


二叠纪-三叠纪界线地层的所谓“凝块石”，其实为微生物**模铸岩**（吴亚生等，2018）



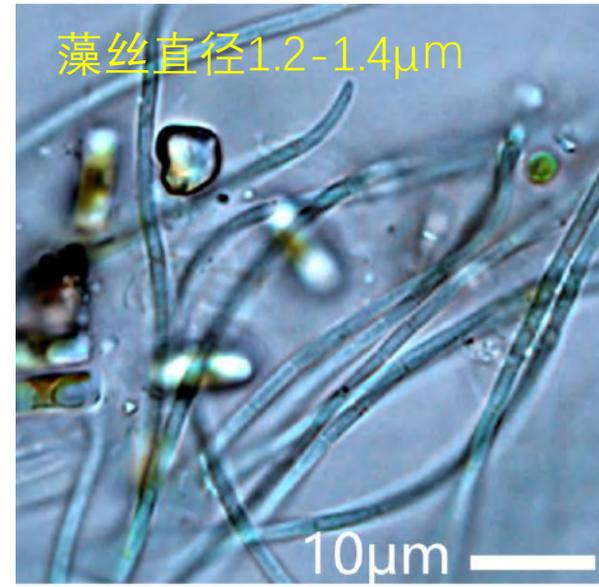
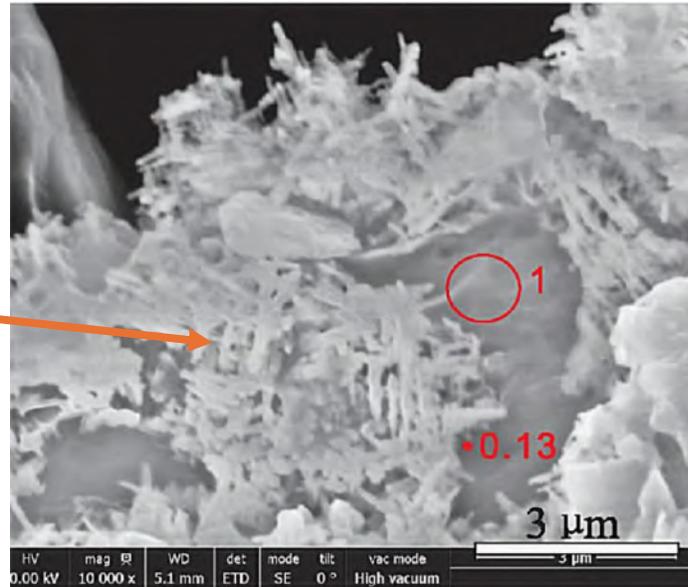
寒武系第三阶白云质微生物岩石结构反演

(Li, Jiang, Wu, et al., 2021. JOP)

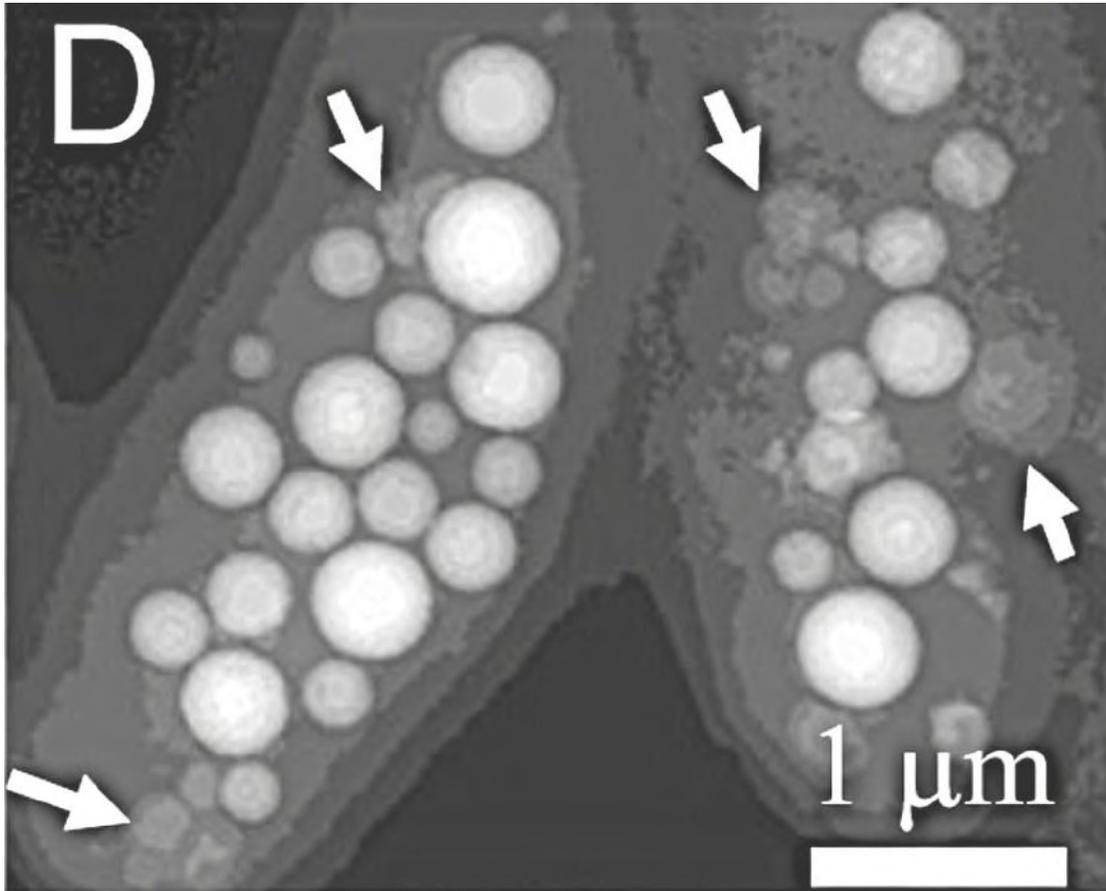


工具局限性严重制约了微生物碳酸盐岩的研究

需要分辨率至少达到130纳米的观察工具和成分分析工具



群动盖丝藻
(*Geitlerinema ionicum*)
(王梦梦等, 2017)



蓝杆菌细胞内部的球形碳酸盐矿物颗粒

Electron microscopy images of cyanobacteria forming intracellular carbonates scattered throughout the cells. (D) STEM-HAADF images of *Cyanothece* sp. PCC 7425. Ca-carbonate inclusions appear as bright round-shaped objects. PolyP granules are darker, sometimes shapeless forms (arrows).

Benzerara et al. 2014. Intracellular Ca-carbonate biomineralization is widespread in cyanobacteria. PNAS, 111(30): 10933–10938

碳酸盐岩研究的重点方向

- 大规模开展实验研究和野外观察，确定几大类微生物哪些属种在何种条件下可以发生矿化作用，以及形成的矿物的特征与形成环境之间的关系，建立这方面的数据库；
- 大规模开展实验研究和野外观察，确定各种微生物属种的形态和结构特征与古海洋环境参数之间的关系，建立这方面的数据库；
- 大力开发百纳米级的高分辨率的观察和测试仪器，打破微生物岩石研究的工具瓶颈；
- 对各时代各个板块的古代微生物岩石开展系统的显微尺度的研究，尤其是模孔研究、成分和结构反演研究，恢复其原始结构和成分，解读其中的生命和古海洋环境信息，为地球圈层演变历史提供数据；
- 大规模开展观察和实验研究，建立现代海洋生物骨骼，包括生物礁系统，的物理化学特征与海洋物理化学条件之间的关系，建立这样的数据库；
- 大力开展古代生物礁特征和结构研究、系统古生物研究、生物骨骼成分和结构反演研究，解读古海洋环境信息，为建立生物演化历史和古海洋环境演化历史提供数据。

谢谢！请批评指正。