

DOI:10.12017/dzjx.2023.040

生物岩石学的定义*

吴亚生^{1,2,3}

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室 北京 100029;
2. 中国科学院地球科学研究院 北京 100029; 3. 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 生物岩石学是研究生物岩(即生物成因岩石)的特征、形成机制、形成环境及其与矿产资源关系的一门新兴交叉学科,其研究内容至少包括生物矿化、现代生物礁、古代生物礁、现代微生物岩石和古代微生物岩石5个方面。生物矿化作用和现代生物岩研究为古代生物岩研究提供了认识基础。由于现代生物圈和环境不同于古代,现代生物矿化作用和生物岩的研究成果并不能全部直接应用于古代生物岩研究。古代生物岩和生物矿化作用的类型比现代丰富得多,不可能全部从现代生物岩和生物矿化作用中找到参照,但可以为现代生物矿化实验研究提供设计思路。生物岩石学的相关学科包括生物学、微生物学、古生物学、古微生物学、沉积学、沉积岩石学、矿物学、地球化学、地质微生物学等。生物岩石学研究需要应用这些学科的知识,也会反哺这些学科。

关键词 生物岩石学 生物岩 微生物岩石学 生物矿化学 生物礁学 古微生物学

中图分类号: P53, P588, Q93 **文献标识码:** A **文章编号:** 0563-5020(2023)02-697-13

1 生物岩石学的定义和研究内容

生物岩石学(biopetrology)研究所有生物成因岩石的特征、形成机制、资源和环境意义(Wu, 2022),至少涵盖5个方面的研究:生物矿化作用、现代生物礁、古代生物礁、现代微生物岩石和古代微生物岩石(图1)。因为“微生物岩”这一术语作为英文术语“microbialite”(Burne and Moore, 1987)的中译已经得到广泛使用,特指由底栖微生物群落形成的岩石,不包括浮游微生物形成的岩石和被非生物作用改造的微生物成因岩石,因此有必要用“微生物岩石”一词指所有由微生物作用形成的岩石。因此,微生物岩石一词比微生物岩一词范围更广。所有生物成因的岩石,包括礁岩、非造礁生物形成的岩石和微生物岩石,都归入生物岩(biolith)这一名下。生物岩是19世纪上半叶德国文献中的一个地质学术语,指由生物遗骸或生物骨骼组成的岩石和由生物作用形成的岩石(Ehrenberg, 1853),这一术语在20世纪(Rivadeneyra et al., 1996)和21世纪很少使用。Wu(2022)提出用该术语来描述所有由生物遗骸、生物骨骼组成的岩石和生物作用形成的岩石。Biopetrology这个英文术语,本世纪有几位印度学者在几篇

* 国家自然科学基金面上项目(编号:41972320)资助。

吴亚生,男,1963年生,博士,副研究员(岗位教授),古生物与地层学专业。E-mail: wys@mail.igcas.ac.cn
2022-11-12收稿,2022-12-07改回。

关于煤的论文中使用过,但从未在其它岩石类型的论文中使用过。Wu (2022)提出将“biopetrology”作为一个新学科的名称,该学科包括对所有生物岩的特征、形成机制、形成环境及其与矿产和资源关系的研究,本文正式提出用生物岩石学作为与“biopetrology”对应的中文术语。

生物矿化作用研究包括对宏体藻类、植物和动物(如绿藻、红藻、珊瑚和双壳类)形成矿物、骨骼的作用、过程、机制、产物特征的研究,以及对微生物形成矿物、骨骼(有固定形状的泥晶结构)、岩石基本单元(矿物壳、泥晶微纹层或微凝块)、岩石的作用、机制、过程和产物特征的观察分析和实验研究。这个研究领域称为生物矿化学,英文名称“biomineralogy”。

生物礁指主要由原地生物骨骼构成的、具有地形隆起的岩石体。为方便起见,这里建议把生物礁研究作为生物岩石学的一个亚学科,称为生物礁学,英文“reefology”。其研究内容包括古今生物礁的特征、形成机制、与环境和矿产资源的关系等。

现代生物礁学研究的内容包括现代生物礁的生物群落、物理化学条件、结构和构造、矿物和化学成分。文献中的“建造”一词是英文术语“build-up”的中译,指由宏体生物或微生物的原位骨骼构成的、具有地形隆起的岩石体,或由宏体生物或微生物的作用,如宏体生物的障积作用、微生物的捕集沉积物作用形成的,具有地形隆起的岩石体。由宏体生物骨骼原地生长形成的碳酸盐岩结构体称为生物礁;由微生物成因的原生泥晶微纹层和/或微凝块构成的碳酸盐岩结构体称为微生物岩(Burne and Moore, 1987);由原地微生物骨骼组成的岩石在以往文献中被当做凝块石或枝状石(Yan et al., 2017)。然而,本文认为,微生物骨骼的形成不同于叠层石、层纹石中的泥晶微纹层和凝块石中的泥晶微凝块的形成;前者的形成作用是完全受生物的生理作用控制的,后者的形成是生物的生理活动引起微环境改变,导致微米或纳米级矿物在生物体外围结晶形成的,分别称为生物控制矿化作用(bio-controlled biomineralization)和生物诱导结晶作用(bio-induced precipitation)。因此,本文称由微生物原地生长的骨骼(即化石)组成的岩石建造为微生物礁。一个生物礁一定是海底的地形隆起。一个层状的岩石建造,即使它由原位的骨骼组成,不叫礁,而称作生物层(biostrome; Cumings and Shrock, 1928)。

古代生物礁学研究古代生物礁的结构和构造、矿物和化学成分、形成机制和形成环境、化石的古生物学、古群落、成岩历史、与矿产资源的关系等。

为了方便起见,这里把微生物岩石的研究定义为生物岩石学的一个亚学科,叫微生物岩石学,英文名称为“microbiopetrology”。现代微生物岩石的研究内容包括其结构和构造、矿物和化学成分、微生物和微生物群落、形成机制、形成环境、与矿产资源的关系等。古代微生物岩石的研究内容包括其宏观、中观和微观结构和构造、矿物和化学成分、形成机制、古微生物和古群落、形成环境、与矿产资源的关系等。

在此前的文献中,现代、古代生物礁的研究通常被归入沉积学。然而,生物矿化作用、现代和古代微生物岩石的研究还没有被归入任何现有的学科中。也许有些学者主张将它们归入沉积学,然而,最好将它们放在独立的学科中,因为它们的形成不是靠风、水流、冰川等的作用,而是靠微生物的作用。

虽然有些生物岩的形成经历了很短途的搬运和沉积过程，但大多数生物岩的形成与一般沉积过程无关，对它们的研究应基于不同的理论基础，采用不同的方法。

2 生物岩石学分支学科之间的关系

生物岩石学的5个研究领域之间存在很强的联系(图1)。现代生物礁主要由生物骨骼原地生长构成，这些骨骼主要由现生植物和动物的生物控制矿化作用形成。因此，研究现代生物的矿化作用可以为理解现代生物礁的形成机制提供基础。古代生物礁由原地古动植物骨骼构成。虽然大多数古植物和古动物已经灭绝，但它们中的一部分有现存的后代或亲属。对它们的后代或亲属的生物矿化作用的研究，有助于理解古代生物礁的形成机制。

现代微生物岩石的研究可以为认识和理解古代微生物岩石提供基础。对古代微生物岩石的研究，可为现代微生物矿化实验提供改进设计的依据。

古代生物礁和微生物岩石遭受了不同程度的成岩作用改造，它们的原生结构、矿物和化学成分遭到了不同程度的改变。现代生物礁和微生物岩石遭受的成岩作用改造较少，是研究原生结构、成分、形成环境的较好材料。现代生物礁和微生物岩石的研究可以为认识和理解古代生物礁和微生物岩石提供很好的参考。

然而，与地球漫长的历史相比，现代是短暂的一刻。在漫长的地质历史中，环境

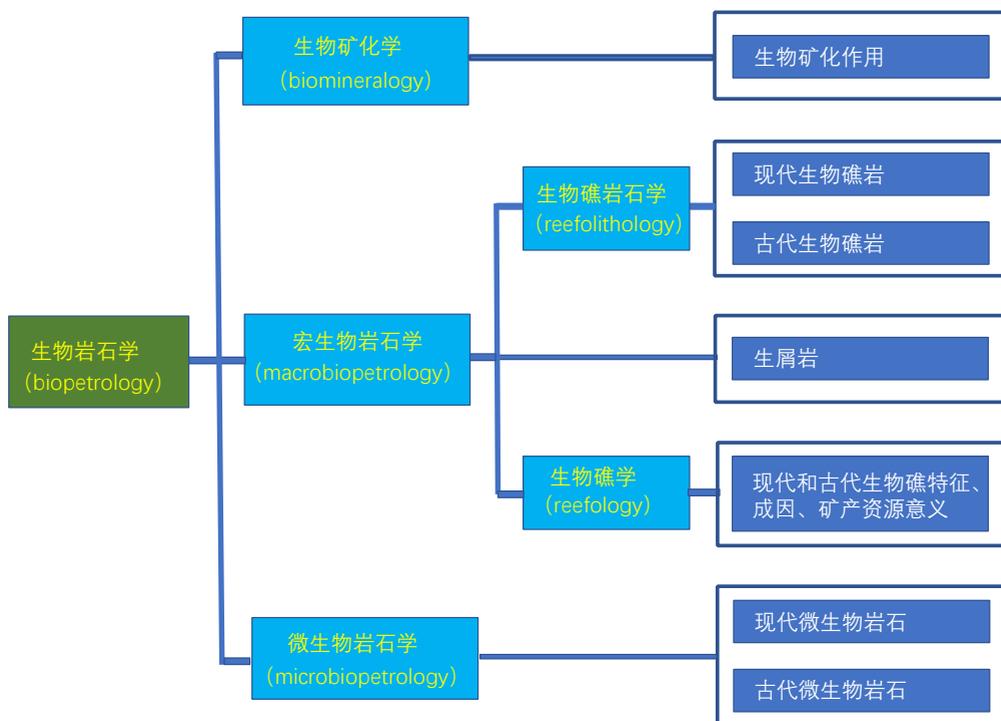


图1 生物岩石学的研究领域划分

Fig. 1 Research domains of biopetrology

在变化,生物圈在演变。因此,即使研究现代生物礁和微生物岩石的结果可以作为研究古代生物礁和微生物岩石的参考,它们的作用也是很有限的,因为有许多古代现象并没有当今的现象可作为参考。因此,研究古代生物礁和微生物岩石不仅需要借鉴对现代生物礁和微生物岩石的研究成果,还需要借助大量的模拟和实验,以及大量的推理和演绎。

由于这5个领域之间有着天然的联系,它们不应该被孤立地考虑,而应该被整合到生物岩石学这个新学科中。

3 生物岩石学的相关学科

3.1 生物学、微生物学、古生物学和古微生物学

古生物学研究地层中的化石,以解释古代生物的分类、古生态、古地理、演化等。根据古生物学所研究的化石的大小,把这门学科分为宏观古生物学和微观古生物学。宏观古生物学分为古植物学、古无脊椎动物学和古脊椎动物学。

生物岩石学研究由宏体生物和微生物形成的岩石。为了研究现代生物形成的岩石,有必要研究现代生物,因为我们需要知道是什么样的生物形成了岩石。所以,我们需要进行生物分类研究。

对于古代的生物岩,有必要研究古代生物,以确定哪些种类的生物形成了古代生物岩。因此,需要进行古生物学研究。过去,微体古生物学主要研究有孔虫、孢粉、介形类等小型化石,对蓝藻和细菌化石的研究很少。然而,在近四十亿年前的前寒武纪,蓝藻和细菌化石是生物圈的主角,是数量巨大微生物岩石的建造者;如果不把它们研究清楚,很难准确理解微生物岩石的特征、形成机制和形成环境,因此,古代微生物研究十分重要。为了促进对古微生物的研究,有必要建立一门新的学科——古微生物学(paleomicrobiology),作为古生物学的一个分支。古微生物学通过对地层中的微生物化石和模孔的研究(Wu, 2022),分析各个地质时期微生物的形态、结构、分类、古生态和演化等。

3.2 沉积学和沉积岩石学

沉积学主要研究岩石碎屑、沉积物的搬运和沉积作用,沉积物堆积体的各方面特征,以及如何根据沉积物的特征反推其形成机制和形成环境。沉积岩石学研究沉积岩的特征、形成机制、形成环境、成岩演化历史等。

生物岩的形成可以不需要沉积作用的介入,仅仅靠生物矿化作用就能形成生物岩。生物礁岩的主要类型是造礁生物的骨骼组成的。绝大多数微生物岩石是通过微生物矿化作用形成的,也是生长出来的。只有少数未钙化微生物席形成的叠层石,与沉积作用的关系较大。我们的实验研究表明,强烈的风浪作用会打散微生物席。此外,风浪作用会打碎已经形成的生物礁岩和微生物岩石,所以,如果风浪作用是一种常见的沉积营力的话,它不仅不是形成生物岩所需要的,反而是一种不利于生物岩形成的破坏作用。

除了风浪的破坏作用，陆源碎屑的沉积作用会使造礁生物窒息死亡、或将其埋葬，这是由于底栖固着的造礁生物没有躲避沉积物的能力。浑浊的水使透光率下降，不利于光合作用型微生物的生长，同样，太多的沉积物会把微生物群落埋葬，所以，沉积作用是微生物岩石形成作用的克星。

虽然现代生物礁上存在大量风浪打碎的造礁生物骨骼，但是，它们是构成现代生物礁系统的一部分，不应该把它们同原地生物礁岩割裂开。

即使是非造礁生物，沉积作用也不是其形成岩石的必要条件；大量的碎屑沉积物会造成很多非造礁生物的窒息死亡，或掩埋了它们；强烈的风浪作用也对它们的生长不利，因为在剧烈动荡的水体中，底栖生物会不断被沉积物埋葬。

鉴于以上事实，不赞同因为一部分生物岩在形成过程中曾经受到风浪作用的改造而把所有的生物岩归到沉积岩中的做法。不能把生物矿化作用当成沉积作用，因为生物矿化作用是一种生物生理作用引起的复杂生命化学过程，是与物质从水体上部沉降到水底完全不同的自然现象。一部分学者把矿物结晶作用当成沉积作用的一种，但是，岩浆岩也是由矿物的结晶作用形成的，是否岩浆岩也可以归到沉积岩中？当然不能。同理，不能把生物作用引起的矿物结晶作用当成沉积作用，不能把生物作用形成的生物岩归入到沉积岩中。基于以上原因，有必要把生物岩与普通沉积岩分列为不同的岩石大类，有必要将研究生物岩的生物岩石学与研究一般沉积岩的沉积学和沉积岩石学区分为不同的学科。

虽然沉积作用不是形成生物岩所必需的，但是，有一部分生物岩，例如：生屑岩（宏体非造礁生物的骨骼组成的岩石）、微屑岩（微生物岩石的碎屑组成的岩石），在形成过程中遭受了风浪作用不同程度的改造，因而其研究离不开沉积学理论和方法的应用。此外，所有的生物岩在形成之后会受到各种成岩作用，例如：胶结作用和溶蚀作用不同程度的改造，因此，生物岩的研究离不开沉积岩石学理论和方法的应用，所以，沉积学和沉积岩石学都是生物岩石学的密切相关学科。

3.3 矿物学

生物岩由宏体生物和微生物形成的矿物组成。腹足动物通过生物控制矿化作用形成容纳它们身体的壳；钙化型绿藻的矿化作用在其表面形成一层由文石针组成的包壳，从而能够形成化石；一部分蓝藻和细菌的新陈代谢作用可以导致矿物在其表面结晶，最终形成各种微生物岩石。

文石是一种不稳定的矿物，容易转变成方解石。因此，古代生物岩中的文石通常会转化为方解石。此外，古代生物岩中的文石和方解石矿物常遭受白云石化和重结晶作用的影响。由于生物岩的形成和演化通常涉及矿物的结晶和转化，因此对生物岩的研究需要矿物学知识。

3.4 地球化学

所有生物岩都是由矿物组成，而矿物是由化学元素组成。因此，对生物岩的研究不仅涉及它们的结构和矿物成分，还涉及它们的化学成分。生物岩石学不仅研究各种

生物岩原始化学成分的特征和差异,而且研究它们的化学成分在地质时期的演变。如果了解了它们化学成分的演变规律,就可以用它来帮助确定生物岩的形成历史。因此,地球化学特征是生物岩研究的一个很重要的方面。

3.5 地质微生物学

作为一门新兴交叉学科,地质微生物学研究微生物与地球环境的相互作用。地质微生物对地球环境的作用包括调控岩石矿物的风化、土壤的形成、元素的迁移与转化等地质过程,参与碳、氮、硫、磷等重要生命元素的循环(陈骏等,2005;李文均等,2018)。生物岩石学不仅研究微生物形成矿物和岩石的作用,还研究宏体生物形成矿物和岩石的作用。生物岩石学不限于此,但专注于对形成矿物和岩石的生物作用的机理、过程、产物的研究,而地质微生物学侧重于对地质微生物的微生物学特征及其地质作用的研究,是与生物岩石学侧重点不同的相关学科。综上,生物岩石学的相关学科包括生物学、微生物学、古生物学、古微生物学、沉积学、沉积岩石学、矿物学、地球化学、地质微生物学等至少9个学科(图2)。

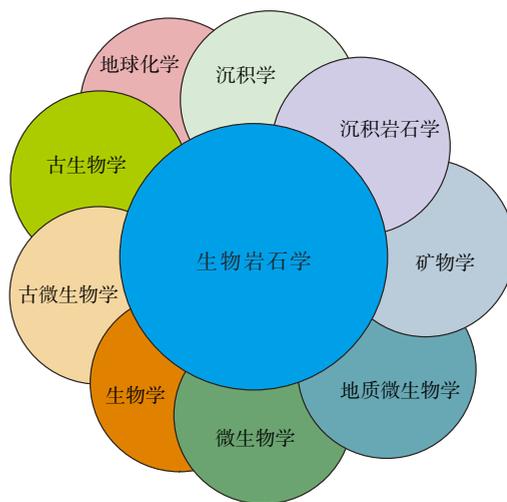


图2 生物岩石学的相关学科
(圆圈的重叠代表了研究范围的重叠)

Fig. 2 Related disciplines of biopetrology (research scope overlapping shown by the overlapping circles)

4 生物岩石学的研究方法

4.1 生物矿化学的研究方法

生物矿化学研究主要包括自然观察研究、实验研究、古代岩石结构和成分反演研究等。自然观察研究指对现代各种自然环境下能够发生生物矿化作用的生物的生物特征、矿化过程、矿化产物特征等方面的原地观察和样品室内研究,目的是确定哪些生物能够形成矿物和骨骼,形成矿物和骨骼的发生条件或控制因素,矿化的机制与过程,矿物或骨骼的形貌、结构和成分特征等。这一研究的优势是能够观察到现今各种自然环境的真实现象,能够对现代自然环境的各种环境参数进行实际观测。实验研究指模拟现今和古代的各种自然环境,观察不同环境条件下不同生物属种的矿化情况,以确定哪些属种能够发生矿化,在什么物理化学条件下发生矿化,矿化的机理和过程,矿化作用形成产物的形貌、结构、成分特征等。实验研究的优势是可以模拟现今已经不存在,但在地球的过去和将来曾经或将存在的自然环境下已经发生或可能发生的生物矿化作用的类型和特征。古代的生物岩是由古代生物矿化作用形成的,其结构组分包括骨骼、矿物壳(吴亚生等,2021;Wu,2022)、泥晶微纹层、泥晶微凝块、生物泥晶和微生物泥晶等。在进行矿物结构、矿物成分、化学成分反演研究的基础上,确

定这些结构的原始特征,然后将它们与自然观察研究和实验研究的结果进行比较,验证自然观察研究和实验研究的结果,为实验研究提供设计依据。

4.2 生物礁的研究方法

现代生物礁是活的海洋生态系统,其研究主要包括生物和生物群落、岩石和沉积物、环境特征、发育过程、空间分异等方面,包括礁上生物的系统分类学研究,礁各个亚环境的群落特征的研究,礁上所有的岩石和沉积物的成分、结构特征的研究,礁发育的各种环境参数的研究,礁的发育历史和过程的研究,礁的各项特征的空间变化的研究。在研究方法方面,需要用现代生物分类学知识进行生物分类研究,用现代生态学的理论去研究生物礁中的群落,用生物礁岩分类的理论和方法去确定生物礁岩石的类型;通过野外观察和采样分析,研究生物礁岩石的特征、成分、形成机制和形成过程;通过实际测量和地球化学分析,去确定生物礁形成环境的物理化学参数;通过生物礁岩石特征的垂向变化分析,去确定生物礁形成的历史;通过对礁体特征三维空间变化的研究,去确定礁体在三维空间的特征分异规律。

古代生物礁的研究包括造礁生物的系统分类学研究,生物礁岩石的特征、分类、形成机制、形成历史,生物礁的相带分异,生物礁的形成环境,生物礁的矿产资源意义等。在研究方法方面,要用古生物学的方法进行古代生物礁上生物的分类学研究,用古生态学方法研究古代生物礁上的古群落特征,用最新的生物岩分类学理论去确定古代生物礁岩石的类型;通过对露头的观察和标本的矿物学、岩石学、地球化学研究,确定生物礁岩石的特征、形成机制和形成环境;通过生物礁岩石孔隙演化历史分析,生储盖配置关系,与成矿、成藏事件的关系等研究,确定生物礁的矿产资源意义。

4.3 现代微生物岩石学研究

现代微生物岩石学研究现代自然环境中的微生物岩石的生物和生物群落特征,矿物和岩石的特征,环境特征,生物群落与环境、矿物岩石之间的关系,矿物和岩石的形成机制等;用现代生物学,特别是微生物学的方法和手段对生物进行系统分类学研究,例如,分别用形态分类和基因测序两种方法研究微生物的系统分类;通过野外和样品的观察、对样品和薄片的成分和结构的分析,确定岩石的特征和分类、形成机制;通过直接观察和测量等手段研究微生物岩石形成环境的物理—化学参数。

4.4 古代微生物岩石学研究

古代微生物岩石学通过野外和室内地质和地球化学,特别是生物岩石学手段,从不同尺度研究微生物岩石的特征、形成机制、形成环境、成岩历史、矿产资源意义等。传统的研究方法是野外观察,发现微生物岩,采样进行室内研究。一般而言,在野外发现了叠层石、核形石、层纹石后,进行宏观和中观尺度的观察、描述、采样,然后进行室内研究,对微观特征进行观察、描述,对形成机制和形成环境进行解释。虽然叠层石、层纹石、核形石是最容易在野外识别的3种微生物岩石,但它们的数量不如凝块石多。凝块石的传统研究方法是在野外识别凝块石,然后采样在室内对凝块石进行

微观特征的研究。但是,这种方法有很大局限性。微生物诱导矿化作用形成的微生物岩石的基本组成单元是矿物壳和模孔(Wu, 2022),矿物壳是由泥晶组成的小于1 mm的结构。在露头上见到的直径大于5 mm的所谓凝块,大多数是成岩后生作用形成的。由岩石的不均匀重结晶作用、溶蚀作用形成的树枝状结构、斑状结构等,例如,二叠纪—三叠纪界线附近的所谓凝块石,其实是某种浮游蓝藻的模孔被后来多期的成岩作用形成的矿物充填形成的结构(Wu et al., 2014; 吴亚生等, 2018)。Wu (2022)提出,微生物岩石应当从宏观、中观、微观、超微观4个尺度去研究,微生物岩石的分类必须以微观和宏观两方面的特征作为依据。微生物岩石研究的一个重要内容是根据模孔分析形成微生物岩石的古群落的特征。这个方向的研究可以为微生物岩石学打开一个新的天地。

5 生物岩石学研究现状

5.1 生物矿化学研究现状

目前已经对全球大多数的现代微生物岩石开展了各方面的研究,包括矿化机制的研究。通过微生物矿化实验研究,发现至少8个属的细菌和8个属的蓝藻具有在特定实验条件下形成碳酸盐矿物的能力;该方向研究的局限性主要是实验条件与自然环境相差很大,今后要加强微生物矿化实验条件与自然环境的对接;另外,目前只对少数微生物属种进行了矿化实验研究,还有大量的微生物属种尚未开展矿化实验研究;亟待在今后开展对所有微生物属种的矿化能力和特征的系统研究。关于宏体生物的矿化实验研究开展得还不多,今后要加强这方面的研究。

5.2 现代生物礁研究现状

国内外学者对现代生物礁的生物组成、生物群落、岩石、沉积物、相带分异等做了大量研究。我国学者对中国南海的现代珊瑚礁进行了全面的多学科研究,基本弄清了其生物组成、岩石和沉积特征、相带分异等(王国忠, 2001)。近十年来,很多学者把研究聚焦于环境变化在珊瑚等生物骨骼中的记录上,探索用生物骨骼的结构和成分恢复过去的地球环境及其变化(Jiang et al., 2021)。以往的现代珊瑚礁研究主要是对生物礁各个相带的生物、岩石、沉积物等组成和特征的描述,而对珊瑚礁生长过程、水动力破坏机制和过程研究很少。研究现代珊瑚礁的破坏机制、过程和规律不仅是全面认识现代珊瑚礁的需要,还能为认识古代生物礁的形成环境提供重要依据,是今后研究的重点方向之一。

5.3 古代生物礁研究现状

得益于油气勘探的需求推动,国内外的古代生物礁研究在20世界下半叶得到飞跃发展。目前基本弄清了显生宙各个时代主要生物礁露头的特征,并且出现了一些总结性的著作(范嘉松, 1996; Kiessling et al., 2002)。不足之处是,以往的古代生物礁研究一直以Embry and Klovan (1971)的生物礁岩分类方案和James (1978, 1984)的生物礁

相模式作为理论指导, 在理论上一直没有创新, 导致该领域的研究进入了瓶颈期。今后亟待开展生物礁岩分类、生物礁相带模式等方面的理论创新探索, 亟待开展更高层次、更高水平的研究, 此外, 一些疑难造礁生物的分类学研究, 例如二叠纪钙质海绵生物礁中的管壳石(*Tubiphytes*)、古石孔藻(*Archaeolithoporella*)的分类位置, 也亟待突破。

5.4 现代微生物岩石研究现状

现代微生物岩石在国外有很多分布, 最著名的如澳大利亚鲨鱼湾哈梅林潟湖的叠层石和凝块石, 巴哈马潟湖和潮坪环境的叠层石和凝块石(Reid et al., 1995; Planavsky and Ginsburg, 2009)。国内外学者已经对大多数现代自然环境的微生物岩石开展了微生物群落、岩石特征、环境参数等多方面的研究, 取得了基本的认识。然而, 绝大多数是采样研究, 原位的研究很少, 对形成机制和形成过程的认识比较少, 有些认识还不正确。今后应加强原位的研究, 加强对形成机制的研究。

5.5 古代微生物岩石研究现状

古代微生物岩石在国内外有非常广泛的分布, 有非常大的数量。国内外学者开展了很多研究。但是, 相对于浩瀚的微生物岩石而言, 已做的研究如同沧海一粟。以往的研究主要根据岩石的直观特征识别微生物岩石, 这导致很多微生物岩石未能被识别, 非微生物岩石被当成微生物岩石, 对微生物岩石的形成机制缺乏准确的理解, 还导致在微生物岩石研究中只见叠层石、核形石和假凝块石, 看不见真凝块石; 在分析微生物岩石的形成环境时, 存在一些生搬硬套已有模式, 缺乏具体问题具体分析的思考倾向。今后的研究要向微观、古老、广度、深度迈进, 要开展微观结构主导的四尺度研究, 要以模孔为关键手段, 开展古微生物岩石的延伸研究, 为地球系统演变和矿产资源勘探开发提供理论支持。

6 生物岩石学研究意义

6.1 生物岩石学研究的资源意义

我国近年的石油进口量一直占到总需求的70%以上, 油气已经成为事关国家安全的战略资源。得益于其一般很高的原生孔隙, 生物碳酸盐岩一般具有较高的孔隙, 生物碳酸盐岩的主要类型生物礁岩、微生物岩、微礁岩往往是优质油气储集层。生物礁型大油气田已经有很长的勘探和开发历史。据统计, 全球已发现的生物礁型大油气田的油气总储量达到40亿吨以上; 加拿大油气产量的60%、墨西哥油气产量的70%都产自生物礁油气藏(卫平生等, 2006)。我国也已在奥陶纪珊瑚层孔虫礁滩相、上二叠统长兴组钙质海绵礁滩相、新生代珊瑚礁相中发现了亿吨以上的油气储量。

油气勘探开发遵循由年轻浅地层到古老深层的一般规律。对绝大多数盆地而言, 越老的地层埋藏越深, 勘探程度越低。前寒武纪和早古生代的古老深层生物岩地层是今后油气勘探的重要方向之一。据统计, 中元古代地层厚度的70%以上是碳酸盐岩,

主要是微生物岩石。数量巨大的微生物岩石，是今后油气勘探的主要目标之一。

前寒武纪的微生物岩石数量远远大于显生宙的后生生物礁，因此，微生物岩石的油气规模和潜力比传统生物礁储层大很多。人们已经在全球范围的中元古代到显生宙微生物岩石中发现了十几个大油气田，包括我国的任丘油田、威远气田、资阳气田(罗平等，2013；刘树根等，2016)。但是，这些发现可能只是微生物岩石型油气总储量的冰山一角。要实现对微生物岩石型油气资源的高效勘探与开发，需要以高水准的微生物岩石学研究为基础。我国亟需开展前寒武纪—中奥陶世微生物岩石的大规模、系统、高层次研究，以便为实现我国油气安全战略做出应有的贡献。

铁矿是我国紧缺的重要矿产资源。开展高水平铁矿成因研究是对这类矿床进行高效勘探和开采的基础。以往大多数研究认为铁矿是化学沉积形成的。但是，已经有很多研究表明，很大一部分铁矿是微生物成因的。已有研究表明，中国的宣龙式铁矿主要是微生物成因的，因为它们具有叠层石、凝块石等典型微生物岩的结构(侯奎等，1983；杜汝霖等，1992；刘志礼等，1995；戴永定等，2003)。全球储量最大的铁矿类型是条带状铁建造(BIF)。已经有一部分研究表明，至少部分的BIF可能是微生物成因的。例如，世界上多个地点的BIF中具有可能是生物成因的碳质(Dodd et al., 2019)；我国海南新元古代的BIF具有微生物岩层纹石的特征(Sun et al., 2018)。如何识别微生物成因的BIF这个问题尚未解决；如果这个问题解决了，不排除绝大多数的BIF都是微生物成因的可能。亟待建立微生物型BIF的识别方法，亟待对BIF开展全面的、系统的、高层次的微生物岩石学研究，以准确认识其形成机制和时空分布规律，为解决我国铁矿资源短缺问题做贡献。

锰矿是我国高度短缺的战略矿种之一。要实现锰矿的高效探查，首先要准确认识锰矿的形成机制。以前一直认为锰矿是无机沉积成因的，但是，已有研究发现，至少一部分锰矿是微生物成因的(杜秋定等，2009；张懿等，2021)。微生物岩石型锰矿的研究尚在起步阶段。亟待开展中国大型锰矿的微生物岩石学研究，以准确确定它们的成因和时空分布规律，为高效探查和开发这类矿床提供科学依据。

6.2 生物岩石学研究在寻找地外生命中的作

月球上有没有生命，火星上有没有生命，这些都是科学界和大众普遍关注的问题。地外生命探寻研究是地球科学的前沿之一。地外生命探寻的主要手段至少包括化石、地球化学、微生物岩石3种手段。地球早期的26亿年历史(45亿年前~19亿年前)中，地球的生命形式是低等原核生物——主要是蓝藻和细菌。早期的低等生命虽然在特殊情况下可以保存为化石，但是其概率很小。相反，早期地球的微生物形成了巨量的微生物岩石。最新研究表明，格陵兰37亿年前的地层中保存了两种典型的微生物岩石类型——叠层石和层纹石(Wu and Jiang, 2022)，这一研究用微生物岩石学的手段识别出了地球最早的微生物席群落。根据对美国NASA发射的幸运号火星探测器发回的照片的分析，火星上可能有与地球上的叠层石相似的微生物岩石类型，表明火星有存在低等生物的可能性(Bianciardi et al., 2014)。但是，识别地外微生物岩石的方法尚未建立。亟待建立这样的方法，亟待通过高水准的微生物岩石学研究，确定火星上究竟有没有

微生物岩石、有没有生命存在, 以及如果有的话, 是哪种类型的生命形式。

6.3 生物岩石学研究在地球系统演变研究中的应用

地球系统演变过程以及地球宜居性演变是当前和今后地球科学研究的前沿和热点。早期地球系统演变研究的关键问题包括: 早期地球的氧化过程、碳循环变化历史、气候变化历史、生命演化历史, 以及这些关键要素的相互关系。解决这些大科学问题的手段包括矿物—岩石—沉积学的, 古生物学的, 地球化学的, 生物岩石学的4大类型。以往的研究中, 地球化学手段一枝独秀, 而古生物学研究, 由于化石的地层分布十分局限(主要分布在硅质岩和页岩中), 在解决古环境演变方面还没有能够发挥应有的作用。由于生物岩石学尚在发展初期, 其在地球系统演变研究中的价值尚未被认识。我国中元古代地层厚度的70%以上是碳酸盐岩, 主要是微生物岩石, 如果微生物岩石的研究没有做好, 其中的生命和环境信息未能被全面、准确解读, 重建早期地球系统演变历史的目标几乎无法实现。由于绝大多数微生物岩石是由原地微生物群落形成的, 微生物岩石中保存了巨量的当时生命和环境信息, 因此, 开展生物岩石学、矿物学—岩石学—沉积学、古生物学、地球化学4大手段的综合研究, 用不同的手段进行相互验证, 是全面、准确认识地球系统演变, 特别是前寒武纪地球系统演变过程和规律的必由之路。

参 考 文 献

- 陈 骏, 姚素平. 2005. 地质微生物学及其发展方向. 高校地质学报, 11(2): 154-166.
Chen Jun and Yao Suping. 2005. Geomicrobiology and its progress. *Geological Journal of China Universities*, 11(2): 154-166.
- 戴永定, 宋海明, 沈继英. 2003. 河北宣龙铁矿化石细菌. 中国科学: 地球科学, 33(8): 751-759.
Dai Yongding, Song Haiming and Shen Jiying. 2003. Fossil bacteria in Xuanlong iron ore deposits of Hebei Province. *Science China Earth Science*, 47(4): 347-355.
- 杜秋定, 伊海生. 2009. 滇东南中三叠统法郎组锰矿床微生物成因的新证据. 地质科技情报, 28(5): 78-83.
Du Qiuding and Yi Haisheng. 2009. New microbiological origin evidence of manganese deposit in the Falang Formation of Middle Triassic, Southeast Yunnan. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 28(5): 78-83.
- 杜汝霖, 李凤臣, 李培菊等. 1992. 冀西北长城纪宣龙式铁矿层中微体植物化石的发现及其意义. 地质论评, 38(2): 184-189.
- Du Rulin, Li Fengchen, Li Peiju et al. 1992. Discovery and significance of microfossils from the Changchengian Xuanlong-type iron formations in northwestern Hebei. *Geological Reviews*, 38(2): 184-189.
- 范嘉松. 1996. 中国生物礁与油气. 北京: 海洋出版社. 1-329.
- Fan Jiasong. 1996. Reefs and Oil-Gas in China. Beijing: China Ocean Press. 1-329.
- 侯 奎, 陈志明, 于 洁. 1983. 宣龙铁矿矿石结构特征及蓝藻对铁的富集作用. 地质科学, 18(3): 246-250.
Hou Qui, Chen Zhiming and Yu Jie. 1983. Ore fabric and effect of blue-algae on iron richment in Xuanlong iron mine, Hebei. *Chinese Journal of Geology*, 18(3): 246-250.
- 李文均, 蒋宏忱. 2018. 地质微生物学: 一门新兴的交叉学科. 微生物学报, 58(4): 521-523.
- Li Wenjun and Jiang Hongchen. 2018. Geomicrobiology: A new interdisciplinary subject. *Acta Microbiologica Sinica*, 58(4): 521-523.
- 刘树根, 宋金民, 罗 平等. 2016. 四川盆地深层微生物碳酸盐岩储层特征及其油气勘探前景. 成都理工大学学报

- (自然科学版), 43(2): 129-152.
- Liu Shugen, Song Jinmin, Lou Ping et al. 2016. Characteristics of microbial carbonate reservoir and its hydrocarbon exploring outlook in the Sichuan Basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 43(2): 129-152.
- 刘志礼, 刘雪娟, 李鹏富等. 1995. 宣龙式铁矿生物标志物(烷烃)的研究. *地质学报*, 69(2): 138-145.
- Liu Zhili, Liu Xuexian, Li Pengfu et al. 1995. Biomarkers (alkanes) of the Xuanlong-type iron deposits. *Acta Geologica Sinica*, 69(2): 138-145.
- 罗平, 王石, 李朋威等. 2013. 微生物碳酸盐岩油气储层研究现状与展望. *沉积学报*, 31(5): 807-823.
- Luo Ping, Wang Shi, Li Pengwei et al. 2013. Review and prospectives of microbial carbonate reservoirs. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(5): 807-823.
- 王国忠. 2001. 南海珊瑚礁区沉积学. 北京: 海洋出版社. 1-303.
- Wang Guozhong. 2001. Sedimentology of Coral Reef Area in the South China Sea. Beijing: China Ocean Press. 1-303.
- 卫平生, 刘全新, 张景廉等. 2006. 再论生物礁与大油气田的关系. *石油学报*, 27(2): 38-42.
- Wei Pingsheng, Liu Quaxin, Zhang Jinglian et al. 2006. Re-discussion of relationship between reef and giant oil-gas fields. *Acta Petrolei Sinica*, 27(2): 38-42.
- 吴亚生, 姜红霞, 虞功亮等. 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 Yasheng, Jiang Hongxia, Yu Gongliang et al. 2018. Conceptions of microbialites and origin of the Permian-Triassic boundary microbialites from Laolongdong, Chongqing, China. *Journal of Palaeogeography*, 20(5): 737-775.
- 张懿, 陈龙, 李建等. 2021. 渝东北陡山沱组碳酸锰微生物岩沉积环境初探. *沉积学报*, 39(6): 1387-1405.
- Zhang Yi, Chen Long, Li Jian et al. 2021. Preliminary study of manganese Carbonate microbialite sedimentary environment of the Doushantuo Formation in Northeast Chongqing. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(6): 1387-1405.
- Bianciardi G, Rizzo V and Cantasano N. 2014. Opportunity Rover's image analysis: microbialites on Mars? *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 15(4): 419-433. DOI: 10.5139/IJASS.2014.15.4.419.
- Burne R V and Moore L. 1987. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaos*, 2(3): 241-254. DOI: 10.2307/3514674.
- Cumings E R and Shrock R R. 1928. Niagaran coral reefs of Indiana and adjacent states and their stratigraphic relations. *Geological Society of America Bulletin*, 39(2): 579-620. DOI: 10.1130/GSAB-39-579.
- Dodd M S, Papineau D, She Z B et al. 2019. Widespread occurrences of variably crystalline ¹³C-depleted graphitic carbon in banded iron formations. *Earth and Planetary Science Letters*, 512: 163-174. DOI: 10.1016/j.epsl.2019.01.054.
- Ehrenberg C G. 1853. Weisser biolithischer Süsswasser-Mergel vom See Garag im Fajum, ein neuer Polygastern-Biolith. *Bericht über die zur Bekanntmachung geeigneten Verhandlungen der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1853: 200-220.
- Embry A and Klovan J E. 1971. A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19(4): 730-781. DOI: 10.35767/gscpgbull.19.4.730.
- Grotzinger J and Al-Rawahi Z. 2014. Depositional facies and platform architecture of microbialite-dominated carbonate reservoirs, Ediacaran-Cambrian Ara Group, Sultanate of Oman. *AAPG Bulletin*, 98(8): 1453-1494. DOI: 10.1306/02271412063.
- James N P. 1978. Facies models 10. reefs. *Geoscience Canada*, 5(1): 16-26.
- James N P. 1984. Facies Models. // Walker R G. Reefs in Facies Models. Newfoundland: Geological Association of Canada. 229-244.
- Jiang L L, Yu K F, Tao S C et al. 2021. ENSO variability during the medieval climate anomaly as recorded by porites corals from the northern South China Sea. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 36(4): e2020PA004173. DOI: 10.1029/2020PA004173.
- Kiessling W, Flügel E and Golonka J. 2002. Phanerozoic Reef Patterns. SEPM Special Publication No. 72. Tulsa: Society for Sedimentary Geology (SEPM). 775.
- Planavsky N and Ginsburg R N. 2009. Taphonomy of modern marine Bahamian microbialites. *Palaos*, 24(1): 5-17. DOI:

- 10.2110/palo.2008.p08-001r.
- Reid R P, James N P, Macintyre I G et al. 2003. Shark bay stromatolites: Microfabrics and reinterpretation of origins. *Facies*, 49: 299-324. DOI: 10.1007/s10347-003-0036-8.
- Rivadeneira M A, Ramos-Cormenzana A, Delgado G et al. 1996. Process of carbonate precipitation by *Deleya halophila*. *Current Microbiology*, 32: 308-313. DOI: 10.1007/s002849900055.
- Sun J, Zhu X K and Li Z H. 2018. Confirmation and global significance of a large-scale Early Neoproterozoic banded iron formation on Hainan Island, China. *Precambrian Research*, 307: 82-92. DOI: 10.1016/j.precamres.2018.01.005.
- Wu Y S, Yu G L, Li R H et al. 2014. Cyanobacterial fossils from 252 Ma old microbialites and their environmental significance. *Scientific Reports*, 4: 1-5. DOI: 10.1038/srep03820.
- Wu Y S. 2022. Definition of biopetrology. *Biopetrology*, 1(1): 3-8. <http://biopetrology.com/yswdob>.
- Wu Y S and Jiang H X. 2022. Earth's earliest stromatolites in the 3.7 billion years old rock from Greenland: evidence of benthic microbes. *Biopetrology*, 1(2): 61-69. <http://biopetrology.com/eositb>.
- Yan Z, Liu J B, Ezaki Y et al. 2017. Stacking patterns and growth models of multiscope structures within Cambrian Series 3 thrombolites at the Jiulongshan section, Shandong Province, northern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 474: 45-57. DOI: 10.1016/j.palaeo.2016.07.009.

Definition of biopetrology

Wu Yasheng^{1,2,3}

- (1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract

Biopetrology is a new interdisciplinary science dealing with the features, formation, environment of bioliths, i.e., the biogenic rocks, and their relationship with resources and ores. Currently it includes the five different but related research fields: biomineralization, modern reefs, ancient reefs, modern microbial rocks, and ancient microbial rocks. Research of biomineralization and modern bioliths provides the base for the study of ancient bioliths. Because present-day biosphere and environments are different from the ancient, the research results of modern bioliths and biomineralization cannot be directly applied to the ancient. The research results of the ancient bioliths can provide ideas for designing the research of modern bioliths and biomineralization. The related disciplines include biology, microbiology, paleontology, paleomicrobiology, sedimentology, sedimentary petrology, mineralogy, geochemistry and geomicrobiology. Biopetrological research needs the knowledge of these disciplines.

Keywords Biopetrology, Biolith, Microbiopetrology, Biomineralogy, Reefology, Paleomicrobiology