

编者按

从本文的题目来看，这似乎是一篇介绍海洋生物的文章。然而，于渺小的人类来说，浩瀚之海洋实在是有太多的线索与未知。因此，比起把有孔虫单纯看作一个海洋生物来说，我们更倾向于向读者介绍其对人类进一步理解海洋甚至是地球的重要科研作用，也正是因为如此，我们将本文纳入魅力科技栏目，以此提示读者，科学要解决的问题，是发现自然界中确凿的事实与现象之间的关系，并建立相关理论，把事实与现象联系起来。

> 壳体构造

有孔虫： 海洋的记录者

□ 文图 / 蔡鹏捷

作者简介 蔡鹏捷，工程师，主要从事海洋地质与矿产资源调查研究工作。

原生生物有孔虫（Foraminifera）是诞生于5亿年前（寒武纪）海洋中的“小精灵”。它的外壳上有孔（一个大孔或多个细孔），里面充填了原生质；这些原生质从孔中伸出，使身体表面生出无定形的指状、叶状或针状的突起，也就是一种“伪足”；有孔虫依靠这些伪

足进行捕食和行动。

有孔虫是海洋食物链中重要的一环，以硅藻、菌类以及甲壳类幼虫等为食，同时也是其他海洋生物的食物来源。一般有孔虫个体大小在 0.1~1 毫米，少数可达 10 毫米，如圆盘虫和圆笠虫类。有孔虫的分布极其广泛，全球海域均有发现，少数还可在淡水中存活。至今约有 1 400 种有孔虫被科研人员发现并研究。根据其在水体中的活动层位可分为浮游类与底栖类，早期以底栖类为主；浮游有孔虫在中生代之后方出现，数量丰富；抱球虫超科全为浮游类型，在海洋中占有主要空间和地位，在中生代之后与底栖类型平分秋色。有孔虫的形态可谓多种多样，按照其外壳的排列方式分为单房室壳、双房室壳和多房室壳三大类，每个大类又有不同的小类及排列方式，正是房室壳排列方式的不同造就了有孔虫壳形的千变万化。有孔虫的壳体成分主要有假几丁质壳、胶结质或砂质壳、硅质壳、钙质壳等。多数有孔虫的外壳以钙质或胶结质为主要组成部分，因而能够在地层中得以长期保存，有孔虫也因此被广泛应用于古海洋和现代海洋的研究之中。

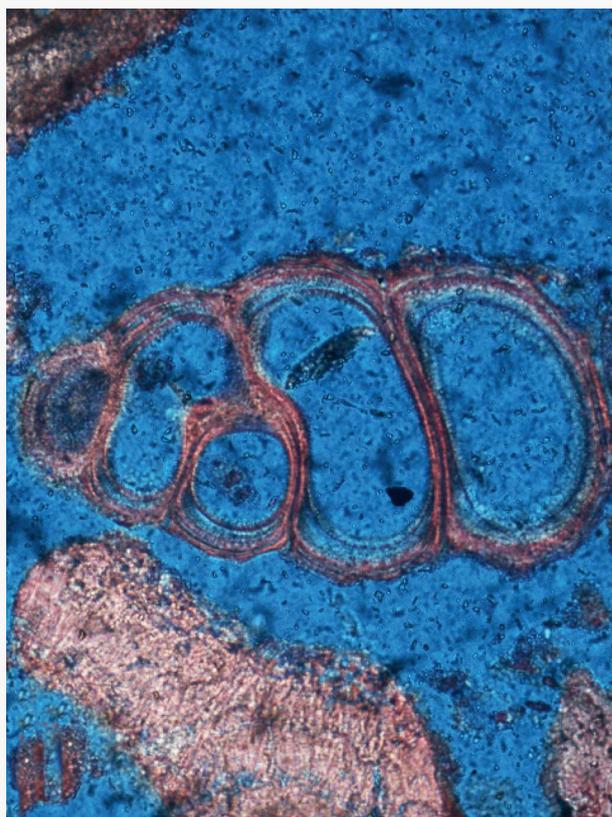
地层时代的锚定者

一直以来，利用古生物化石对地层进行相对地质年代判定是古生物地层学家常用的手段。比较常见的古生物研究类型包括恐龙、植物、介壳类、藻类、牙形石，等等。但这些化石往往受到地域、物种种类、数量等因素影响而具有一定的局限性。因此，地层学家一直在探索选取合适的化石作为地层定年的研究对象。

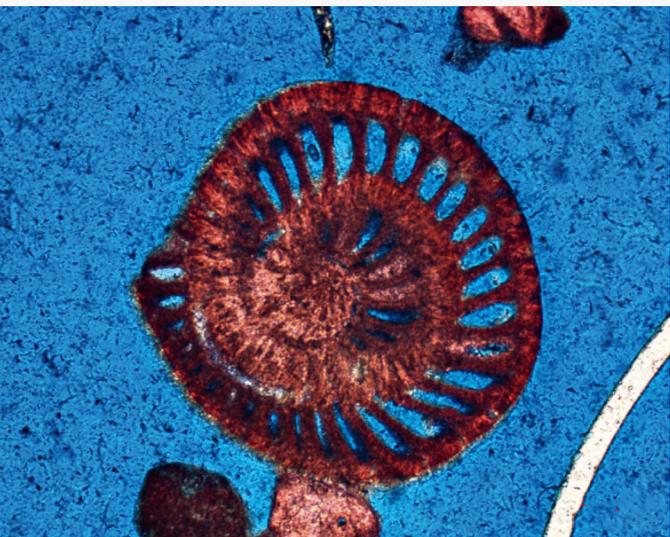
有孔虫从古至今的延续性和多样性决定了它能够作为确定海相地层时代的基准，从而进入了地层学家的视线。某一种类的有孔虫从起源到消亡的时间，相对于漫长的地质时间而言是瞬时的，因此有孔虫的种属分类能够作为年代地层划分的精确指针。一般国际上常用的是通过 RASC(Ranking and Scaling) 和 CASC (Correlation and Scaling) 方法建立浮游有孔虫生物年代地层格架，尤其是在白垩纪之后的海相地层中发挥着

重要作用，该方法简便、易懂。其中，RASC 方法是以化石事件出现的优势原则进行排序，并利用化石事件交替出现的频率来标定事件间的亲疏关系，从而进行化石分带的划分。CASC 方法则是将年代和区域化石事件相对应，从而建立区域地质年代表。随着地球化学测试技术，特别是同位素年代学的发展，涌现出多种以有孔虫作为对象的测年技术，如碳十四同位素、铯同位素等。目前传统的碳十四定年方法，仅能追索到 10 万年前，并存在较大误差。但是，最新科研成果显示，对有孔虫壳和块状沉积物进行加速器质谱仪碳十四测年能够追溯到 50 万年前，且误差率仅在 30 年左右。有孔虫的铯同位素测年虽然能够追踪到 5 亿年前，但对有孔虫中的铯含量要求较高，一般情况下误差较大。

可以肯定的是，这两类高精度同位素定年手段能够确定有孔虫形成的绝对地质年代，而为地层学家提供可靠地层年代数据。



> 有孔虫（横切面）



＞ 有孔虫（弦切面）

古海平面变化的尺子

海平面的变化能够直接影响地球的生态系统，而导致海平面变化的因素除了地球自身表面负荷变化引起的动态响应，还受冰盖和海洋两者间周期性水循环的影响。因此，如何有效揭示古海平面的变化不仅能够让科学家更加深入地了解冰盖与海洋的演化历史，同时也能够为开展地球表面负荷变化研究提供依据。最关键的是，这种海平面的变化是与气候变化息息相关的。科学家们能够根据海平面变化的数值与其他气候指标进行对比，利用计算机进行综合数据处理，从而对气候变化进行重建与模拟。

一般来说，我们可以通过海平面观测系统进行监测获取数据，随后开展海平面变化研究。但是，如何获取到没有监测数据的古海洋海平面数据呢？古海洋学家们需要寻找一种既能够有时间尺度又能够直接或间接记录海平面变化信息的研究对象。经过长期的研究，科研人员的眼光聚集在了有孔虫身上。

研究发现，深海沉积物中浮游类型有孔虫的氧同位素与全球大陆冰量的变化具有相关性。正是通过这种相关性，科学家们根据

有孔虫的氧同位素重建了古海平面演化历史。因为只有连续、准确的数据才能更好地将海平面变化与全球气候变化对应，而海洋沉积物中的有孔虫氧同位素数据恰好提供了过去几百万年以来海平面变化的信息。值得注意的是，考虑到浮游有孔虫的生态效应，一般选取特定种进行氧同位素测试。现有的重建方法主要包括：有孔虫氧同位素与古海平面之间建立关系的方法、红海和地中海水力模型与有孔虫氧同位素结合的重建方法、利用北半球冰盖和海水温度耦合模型的重建方法，等等。虽然有孔虫氧同位素具有能够记录长时间连续的海平面变化和 Related 古气候变化因素的优点，但也存在易受多重因素影响、重建结果误差性大等缺陷。但我们相信随着科技的进一步发展，有孔虫在古海平面研究方面的应用会取得更大的突破。

海岸带环境的监测者

海岸带是人类活动的重要区域，也是人类食物资源的重要仓库。但是，一系列的自然或人为影响改变了海岸带营养食物网的结构，进而影响了海岸带的环境质量。如何对海岸带环境质量进行监测，特别是选择合适的观测指标，一直以来都是环境学家们研究的热点。由于污染物存在而造成的环境污染，会直接影响生态系统的生物数量以及生物多样性，因此生物指示剂（一个/一组物种）常被用作监测指标。

底栖有孔虫因为分布广泛，对生态环境质量要求不同，能够有效地反映出自然环境的变化，备受科学家的青睐。监测主要基于有孔虫绝对丰度、相对丰度、个体总丰度、物种丰富度、物种均匀度和多样性，一般而言数值越大说明环境质量越好。此外，调查底栖有孔虫群落组合也是科学家们常用的手段，这是因为其群落组合受控于底层水体环境，从而能够有效指示环境特征。因此，海洋环境研究者常对海岸带中不同区域的有孔虫进行调查，通过上述指标对整个海岸带环境进行评价；此外，还能够通过海岸沉积物中的有孔虫化石种类配合有效的测年手段，给海洋环境加上一把时间的尺子，定量重建海岸带古环境演化，为研究地质历史时期气候变化、人类文明的历史痕迹提供重要参考；结合现代有孔虫的监测数据，甚至可以预测未来海岸带环境及气候的变化。

天然气水合物成藏的助力者

能源界的潜力股——天然气水合物是一种似冰状、固态的天然气矿藏，成分主要是烃类气体（甲烷等）与水分子，主要分布于水深大于300米的海底陆坡沉积物和陆地永久冻土带。众所周知，天然气水合物作为一种非常规能源，其成藏主要受到所处环境的温度、压力、气体组分和饱和度及孔隙水的影响。天然气水合物的结晶与生长亦受到形成环境中沉积物粒度、形状和成分等的制约，同时要保证充足的气源和良好的储存空间，其中储存空间与岩性组分密切相关。据科学家统计，典型海区内天然气水合物的饱和度为2%~30%，布莱克海台天然气水合物饱和度为3.3%~5.8%，南海神狐海域天然气水合物饱和度则高达20%~48%。此外，一般认为沉积物粒度越粗则天然气水合物的饱和度越高，而南海神狐海域的沉积物相对偏细，其水合物饱和度在世界海域沉积物中却属于高含量区。

到底是什么原因导致了这一异常的现象呢？

经过科学家们的海洋调查与实验模拟，终于揭开了谜底——有孔虫。科学家首先在神狐海域对含天然气水合物的沉积物进行钻探取样，对沉积物进行粒度分析、有孔虫鉴定以及沉积物显微结构分析，等等，发现含天然气水合物层的沉积物中富含钙质超微化石和有孔虫；这些有孔虫个体相对较大，并通过拟合发现有孔虫数量与天然气水合物的含量成正相关。科学家们又进一步以南海沉积物作为介质模拟天然气水合物的生长过程，观

察到了水合物存在于有孔虫的壳体内，认为多孔状有孔虫壳体有利于天然气水合物的富集。

这就解释了为什么南海神狐海域高饱和度天然气水合物主要集中在有孔虫含量高的层位。所以，在特定的环境下，有孔虫的存在能够有利于天然气水合物的成藏。

浩瀚的海洋里孕育着许许多多不同种类的生命，有孔虫只是其中渺小的一支，但是它们却凭借着顽强的生命力在漫长的地质历史长河中生生不息，用其渺小的壳体记录着海洋的各种繁杂信息供科学家们研究，从而在环境、地质、资源、气候等各个学科领域的研究中发挥着不可忽视的作用。随着人类科学技术的不断发展与创新，多学科和多领域间知识的不断交叉与碰撞，越来越多的新方法与新思想被注入到对有孔虫的研究中，相信不久的将来，科学家们能够挖掘出这个海洋“小精灵”更多更重要的科研潜力，从而助力人类探索和揭开更多的海洋奥秘。📖



➤ 有孔虫（弦切面）

本文由“中国地质调查局海洋专项（编号：DD20190627）”项目资助。

作者单位 / 中国地质调查局广州海洋地质调查局

（本文编辑：王依卓）