

DIVERSITIES OF MARINE  
MICROBES IN CHINA

# 中国海洋微生物多样性

张 偲 等 著



科学出版社

## 内 容 简 介

本书以海洋微生物多样性为主题,从海洋环境多样性、遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性、化学及其生物活性多样性、天然产物生物合成机制多样性,以及海洋微生物多样性的利用等视角,对中国海洋微生物多样性进行全方位多层次的解析,将当前中国海洋微生物多样性的研究现状和亮点呈现在读者眼前,并展望海洋微生物学的未来发展趋势。

本书可作为从事生命科学、海洋生物学、物理海洋学、生物海洋学、海洋药物等科研、教学和开发工作的专业人员的学习指导和参考用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

中国海洋微生物多样性/张偲等著. —北京: 科学出版社, 2013. 5

ISBN 978-7-03-037384-7

I. 中… II. ①张… III. ①海洋微生物-生物多样性-研究-中国  
IV. ①Q939

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 085911 号

责任编辑: 岳漫宇 王 静 孙 青/责任校对: 包志虹 赵桂芬 郭瑞芝  
责任印制: 钱玉芬/封面设计: 耕者设计工作室

**科学出版社出版**

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

**中国科学院印刷厂印刷**

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 5 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 5 月 第一次印刷 印张: 45 插页: 12

字数: 1 050 000

**定价: 260.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

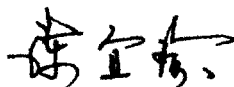
# 序 一

自 1985 年 W. G. Rosen 首次提出“生物多样性”（biodiversity）这一缩写术语以来，生物多样性研究突飞猛进。1977 年美国的“阿尔文”号深潜器在 2500m 深海热液区发现了完全不依赖光合作用而独立生存的生命体系之后，海洋微生物研究日益得到重视。深海钻探计划（DSDP）、大洋钻探计划（ODP）以及综合大洋钻探计划（IODP）等一系列科学大洋钻探计划的实施，日本启动的深海环境调查科技高级研究计划（DEEP STAR）以及欧洲科学基金会（ESF）发起的深海生物圈探测计划等都极大地促进了全球海洋微生物的研究。随着深海采样技术的不断进步，海洋微生物及其多样性研究也得到了飞速发展。

现代分子生物学技术的完善，特别是建立了以 DNA 序列分析为基础的现代微生物分子生态学研究方法，为微生物多样性研究提供了最有效的工具，极大地拓展了人们对微生物多样性在分子水平、个体水平、群落水平及生态系统水平的理解。组学（omics）技术的发展为实现从遗传和细胞水平至群落和生态系统水平多个层面研究海洋微生物多样性提供了新的先进手段。

海洋微生物是当前国际生命科学的研究热点和海洋科学的重要前沿，是最具优势和特色的海洋生物资源。海洋微生物研究代表了一个新的学科增长点，已经成为发达国家重点科技战略。该书系统、科学地综合集成国内外最新研究成果，以海洋微生物多样性为主题，从海洋环境多样性、遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性、化学多样性、代谢多样性、海洋微生物多样性利用等视角，对中国海洋微生物多样性进行多元化的全面解析，将当前中国海洋微生物多样性的研究现状和亮点成果呈现在读者眼前，充分展示了海洋微生物多样性研究的发展趋势和未来前景。《中国海洋微生物多样性》的问世，必将在海洋微生物研究与资源开发、国家海洋微生物战略资源的权益保障等方面发挥重要的促进作用。

国家自然科学基金委员会主任  
中国科学院院士



2012 年 11 月

## 序 二

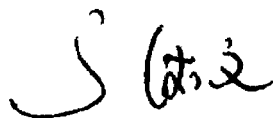
海洋表面积占地球表面积的 71%，是生命的摇篮，更是生物的圣地，生态系统复杂，物种丰富繁盛。为期 10 年的全球“海洋生物普查”项目最终报告指出，海洋动植物约有 100 万种，其中常见种约 25 万种；海洋微生物有 2 亿~10 亿种，生物量占海洋生物总生物量的 90%；印度尼西亚—新几内亚区域是海洋生物多样性最丰富的区域，我国领海属于该区域西北缘。由此可见，我国海洋微生物多样性资源必然极为丰富。

海洋微生物多样性研究关乎微生物资源的合理开发、利用和有效保护，是了解海洋微生物资源的种类和分布、资源与环境的关系，完善海洋微生物资源合理开发利用战略和策略，掌握海洋微生物资源有效保护措施的重要基础。我国海洋微生物多样性研究刚刚起步，特别需要重视和扶持。

在国家“973”计划项目、国家海洋公益性行业专项项目、国家自然科学基金重点项目和国家战略生物资源科技支撑项目的支持下，以作者大量第一手研究资料为主，参考国内外近 10 年的最新进展，以微生物多样性为主题，介绍微生物的新陈代谢机制和组合生物合成等新的学科方向，以及生物活性功能物质的应用等交叉学科的发展。数据翔实、图文并茂；视角独到，观点新颖。

海洋环境的多样性造就了海洋微生物的多样性，微生物的多样性及其代谢机制是微生物多方位应用的基础。《中国海洋微生物多样性》以全球视野，在地球系统中研究中国海洋微生物，从物种演化出发，以多层次全方位的多样性解析为主线，落脚于海洋微生物的应用，充分凸显了中国海洋微生物多样性的特征。该书的出版有助于促进学术交流，必将为相关研究者深入认识海洋微生物多样性提供翔实宝贵的材料，对海洋微生物学科的发展和海洋微生物资源的利用具有重要的推动作用。

中国工程院院士



2012 年 11 月

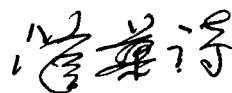
## 序 三

20 世纪七八十年代，从陆生微生物中发现新药或新先导化合物的优势正随着其资源的过度开发而逐渐消失，从特色生态环境中发现新的微生物资源越来越受到相关研究人员的关注。在此背景下，药源海洋微生物的研究逐渐进入活跃时期，到目前为止，有 3000 多个结构新颖、活性多样的海洋微生物代谢产物被发现，头孢菌素 C 是海洋微生物中发现的首个、具标志性意义的抗生素类药物。目前，已上市或处于临床期研究的海洋天然产物来源的药物有 20 种，其中约 18 种真正来源于海洋微生物，这体现了海洋微生物的潜在药用价值，但限于技术和方法，目前可利用的菌株资源依然非常有限。

海洋探测和取样技术的进步、微生物培养技术和装置的开发、基因测序技术的发展、基因信息的爆炸式增长和解码技术的完善，使全面深化地认知海洋微生物成为可能。丰富多样、新奇独特的海洋微生物是发现新材料、新功能、新基因、新机制的理想资源，为创新药物、新能源、环境修复技术等研发提供宝贵的材料。全面认识海洋微生物的多样性，可为更优质高效地开发利用海洋微生物资源提供坚实而宝贵的理论基础。

海洋微生物多样性的深化研究及其资源的深度挖掘，顺应了海洋科学的发展需求，关乎国家战略资源的权益保障。《中国海洋微生物多样性》不仅从遗传、物种和生态系统 3 个层次对海洋微生物多样性进行解析，还进一步拓宽视野，从生境、化学、功能活性及代谢机制等多元化的角度呈现海洋微生物的多样性，更加凸显海洋微生物在工业、农业、医药及环境工程等领域的应用价值。这是一部在作者多年的研究积累和对海洋微生物学科发展的深入思考的基础上，精心完成的海洋微生物领域的综合性专著，是海洋微生物学科发展的珍贵“结晶”。该书的问世将为发掘微生物资源、创新微生物技术、促进微生物产业提供强大的驱动力。

中国工程院院士



2012 年 11 月

# 前 言

海洋生物多样性，狭义范围包括海洋微生物的遗传多样性、物种多样性和生态系统多样性，广义上还应包括化学多样性、代谢多样性及其生存环境多样性。自 1838 年 C. G. Ehrenberg 第一次分离并详细描述了海洋细菌折叠螺旋体以来，经过近两个世纪的发展，海洋微生物正逐渐成为微生物学科发展的热点和重点前沿领域，海洋微生物学科也日趋成熟、蓬勃发展，取得了长足的进步。我国在战略上高度重视海洋微生物研究，在国家自然科技资源平台、国家自然科学基金、大洋科技专项、国家“973”计划项目、我国近海海洋综合调查与评价项目（“908”专项）等多个专项研究计划中强化支持我国海洋微生物学研究工作，促使我们在海洋微生物研究领域取得了丰硕的成果。

本书以海洋微生物多样性为主题，从海洋环境多样性、遗传多样性、物种多样性、生态系统多样性、化学及其生物活性多样性、天然产物生物合成机制多样性，以及海洋微生物多样性的利用等视角，对中国海洋微生物多样性进行全方位多层次的解析。将当前中国海洋微生物多样性的研究现状和亮点成果呈现在读者眼前，并展望海洋微生物学的未来发展趋势。本书可作为从事生命科学、海洋生物学、物理海洋学、生物海洋学、海洋药物等科研、教学和开发工作的专业人员的学习指导和参考用书。

作者策划了本书的编著目标，规划了全书的编著方向，设计了全书的编目，通读和审核了全部书稿，具体负责了第 1 章的编写，概述了海洋微生物多样性的定义、研究简史、研究意义和方向；第 2 章由陈忠研究员、刘建国副研究员、程旭华副研究员、龙爱民研究员、肖红伟博士、董俊德研究员、冯敬宾博士、孙红岩博士编写；第 3 章由李洁博士编写；第 4 章由田新朋副研究员、向文洲研究员、龙丽娟研究员编写；第 5 章由漆淑华研究员、徐新亚博士、贺飞博士、王发左副研究员编写；第 6 章由张长生研究员、鞠建华研究员、朱义广博士、马俊英副研究员、张光涛博士编写；第 7 章由董俊德研究员、张燕英副研究员、凌娟博士、冯敬宾博士、潘虎、黄小芳、陈蕾编写；第 8 章由孙恢礼研究员、尹浩副研究员、杨键博士、潘剑宇副研究员、蔡冰娜博士、陈忻教授、陈华博士、龙淑筠、陈得科、万鹏博士、徐向荣研究员、易湘茜博士、向文洲研究员、吴华莲博士、徐少琨、龙丽娟研究员、罗雄明副研究员、黄智编写。李洁博士对全书初稿进行了统稿、通读和初步审核。

本书在编写过程中，得到国家自然科学基金委员会主任、海洋生物学家、中国科学院院士陈宜瑜先生，海洋药物学家、中国工程院院士管华诗先生，海洋生态学家、中国工程院院士丁德文先生，中国人民解放军第二军医大学焦炳华教授和广东省微生物研究所郭俊研究员的支持和帮助，在此表示衷心感谢。

《中国海洋微生物多样性》是国家“973”计划项目“海洋微生物次生代谢的生理生态效应及其生物合成机制（2010CB833800）”、国家海洋公益性行业专项项目“几种南海特色海洋生物制品关键技术的研发与应用示范（201305018）”、国家自然科学基金重点项目

“季风环流影响下的南海海洋细菌多样性特征及其生物海洋学意义（41230962）”和国家战略生物资源科技支撑项目“海洋微生物资源收集及保藏（KSCX2-YW-Z-1018）”等的成果结晶，得到了中国科学院科学出版基金的资助。编纂工作得到科学出版社的大力支持和帮助，在此表示诚挚的谢意！

由于本书涉及学科众多，引用文献浩繁，不足和疏漏之处在所难免，敬请读者批评指正。

作者谨启

2012年11月29日

# 目 录

序一	
序二	
序三	
前言	
<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 海洋微生物多样性的定义和研究范围 .....	1
1.2 海洋微生物多样性的研究简史 .....	5
1.3 海洋微生物多样性的研究意义和方向 .....	8
结束语 .....	19
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 海洋环境多样性</b> .....	22
2.1 海洋地质环境.....	22
2.2 中国近海动力环境特征.....	42
2.3 海洋化学环境.....	77
2.4 海洋微生物的生物环境 .....	108
参考文献.....	126
<b>第 3 章 海洋微生物基因多样性</b> .....	136
3.1 基因多样性研究方法 .....	136
3.2 海洋微生物基因组 .....	145
3.3 基因多样性与环境适应性 .....	168
3.4 基因多样性与生物技术 .....	188
参考文献.....	192
<b>第 4 章 海洋微生物物种多样性</b> .....	198
4.1 海洋微生物物种多样性概况 .....	198
4.2 海洋细菌物种多样性 .....	203
4.3 海洋古菌物种多样性 .....	242
4.4 海洋真菌物种多样性 .....	258
4.5 海洋微藻物种多样性 .....	266
4.6 我国海洋微生物物种多样性的研究现状 .....	283
参考文献.....	292
<b>第 5 章 海洋微生物化学及其生物活性多样性</b> .....	303
5.1 海洋细菌化学及其生物活性多样性 .....	303
5.2 海洋真菌化学及其生物活性多样性 .....	347



5.3 海洋古菌化学及其生物活性多样性 .....	424
参考文献 .....	438
<b>第6章 海洋微生物天然产物生物合成机制多样性</b> .....	474
6.1 聚酮类化合物合成机制 .....	474
6.2 聚肽类化合物合成机制 .....	491
6.3 聚酮/聚肽杂合类化合物合成机制 .....	501
6.4 萜类化合物合成机制 .....	514
6.5 核苷类化合物合成机制 .....	520
6.6 展望 .....	522
参考文献 .....	523
<b>第7章 海洋微生物生态系统多样性</b> .....	528
7.1 河口、海湾微生物群落组成及其生态系统多样性 .....	528
7.2 海草床微生物群落组成及其生态系统多样性 .....	536
7.3 红树林区微生物群落组成及其生态系统多样性 .....	540
7.4 珊瑚礁微生物群落组成及生态系统多样性 .....	547
7.5 大洋、沉积物和深海微生物生态系统多样性 .....	559
参考文献 .....	570
<b>第8章 海洋微生物多样性的利用</b> .....	584
8.1 海洋微生物在酶制剂方面的应用 .....	584
8.2 海洋微生物在现代食品及其加工领域中的应用 .....	597
8.3 海洋微生物在精细化工领域的应用 .....	619
8.4 海洋微生物在农业领域的应用 .....	625
8.5 参与环境净化的海洋微生物 .....	635
8.6 海洋微藻在能源开发与工业废气(二氧化碳)治理领域的利用 .....	647
8.7 海洋微生物多样性在医药保健领域的应用 .....	662
参考文献 .....	678

索引

图版

# 第1章 概 论

浩瀚的海洋 3.6 亿 km<sup>2</sup>，蕴藏着丰富的生物资源。过去一般认为海洋动植物约有 20 万种，而为期 10 年的全球“海洋生物普查”项目最终报告指出，海洋动植物约有 100 万种，其中常见种约 25 万种 (www.coml.org)，南海及其邻近大洋是世界海洋生物多样性最丰富的区域 (Tittensor et al., 2010)。海洋环境复杂多样，理化性质独特纷繁，微生物群落结构奇特多样，包含了细菌域、古菌域、真核生物域和病毒等多个类群，物种有 2 亿~10 亿种，生物量占海洋生物总生物量的 90%。丰富多样、新奇独特的海洋微生物是发现新材料、新功能、新基因、新机制的理想资源。海洋微生物的物种、生理、代谢、生态以及遗传进化等方面的生物学特性，为创新药物、新能源、环境修复和温室气体减排等研发提供宝贵的材料 (张偲等, 2010)。掌握海洋微生物的多样性及其形成、演化本质和调控机理是认知微生物规律、发掘微生物资源、创新微生物技术、促进微生物产业发展的基础。

## 1.1 海洋微生物多样性的定义和研究范围

### 1.1.1 定义

#### 1. 生物多样性的定义

生物多样性 (biodiversity 或 biological diversity) 是指地球生态系统中所有生物和环境的丰富性和变异性，是它们包含的基因以及由这些生物与环境相互作用所构成的生态系统的多样化程度。地球生物圈的生物种类繁多，生物多样性极其丰富。目前全世界已鉴定了约 200 万种生物，而未知的物种数量在 10 亿左右，主要是海洋微生物。

生物多样性是一个内容广泛的概念，在不同时期不同的学者对其理解有所区别。例如，1986 年，Norse (1986) 认为，“生物多样性在多个层次上得到充分的体现”。而 1988 年 Wilson 等认为，“生物多样性就是生命形式的多样性 (diversity of life)” (Wilson and Peter, 1988; Wilson, 1992)。我国学者孙儒泳 (2001) 认为，“生物多样性一般是指地球上生命的所有变异”。蒋志刚等 (1997) 认为，“生物多样性是生物及其环境形成的生态复合体，以及它们的各种生态过程，包括生物和它们所拥有的基因以及它们与其生存环境形成的生态系统”。联合国《生物多样性公约》认为，“生物多样性是指所有来源的活的生物体中的变异性，这些来源包括陆地、海洋和其他生态系统及其所构成的生态复合体，包括物种内、物种之间和生态系统的多样性”。因此，生物多样性的认识是一个逐步发展、逐步完善的过程。笔者认为，生物多样性具有时间和空间维度上的动态特征，是物种内、物种间及物种与环境的丰富性、变异性及关联性的综合体现。

## 2. 海洋微生物多样性的定义

微生物 (microorganism, microbe) “是一切肉眼看不见或看不清的微小生物的总称”。广义的微生物包括了原核生物、微型真菌、蓝细菌、原生动物、显微藻类以及病毒等; 狭义的微生物概念是指原核微生物和微型真菌 (周德庆, 1993; 2002)。百度百科认为, 海洋微生物 “marine microorganism” 是 “分布在海洋中的个体微小、形态结构简单的单细胞或多细胞生物”。海洋微生物其实也可以描述为 “栖息在海洋环境中的微生物”。目前对海水等海洋环境因子依赖的微生物, 称为海洋专有微生物, 或海洋土著微生物, 即真正的海洋微生物。对不需要任何海洋相关因子仍能生长良好的微生物类群, 称为 “海洋来源的微生物” 较为合适。

海洋微生物多样性 (marine microorganisms diversity) 是指所有海洋微生物种类、种内遗传变异和它们的生存环境的总称 (薛超波等, 2004)。我们认为, 海洋微生物多样性应指海洋环境中各种微生物在基因、物种、生理代谢和生态系统多个水平上多样性的总称。

### 1.1.2 海洋微生物多样性的研究范围

海洋微生物多样性研究范围包括栖息环境多样性、物种多样性、基因 (遗传) 多样性、化学多样性、机制多样性和海洋微生物多样性利用等, 以及种内、种间、种群、物种与环境、环境与环境等时空变化的状态。目前海洋微生物多样性的研究正处于良好的发展期, 陆生微生物多样性的研究技术和方法近年来逐步应用到海洋环境微生物多样性的研究领域。

#### 1. 遗传多样性

广义的遗传多样性 (genetic diversity) 是指地球生物圈中生物个体所携带的各种遗传信息的总和或丰度 (葛颂和洪德元, 1994)。这些遗传信息储存在生物个体的核酸中, 因此遗传多样性也称为生物的基因多样性。任何一个生物个体或物种都保存着大量的遗传基因, 因此, 生物个体或物种可被认为是一个基因库 (gene pool)。一般认为, 一个物种所包含的基因越丰富, 它对环境的适应能力越强。遗传多样性或基因多样性是生命进化、生物演化和物种分化的物质基础。狭义的遗传多样性主要是指生物种内遗传物质的丰度, 包括种内不同种群以及同一种群内不同个体的遗传变异或基因变化。遗传多样性可以表现在不同结构层次上, 包括分子、细胞、个体等层次。

海洋微生物的遗传多样性可以理解海洋环境中微生物携带及其释放在环境中的遗传信息的总和, 它以分子、细胞、物种等多种形式显现, 是物种间遗传信息交流与演化的衡量尺度。在海洋微生物的长期演化过程中, 遗传物质的演化是遗传多样性的根本动力。遗传物质的演化主要有两种类型, 即基因位点内部核苷酸的突变以及染色体数目和结构的演化。前者也可称为基因突变 (或点突变), 后者可称为染色体的畸变。此外, 基因重组也可以致使海洋微生物产生遗传变异 (葛颂和洪德元, 1994)。

## 2. 物种多样性

物种 (species) 是生物分类的基本单元。在生命科学发展历程中, 关于物种的概念一直是分类学家和系统进化学家争论的热点和焦点。1953年 Ernst Walter Mayr 认为: “物种是能够 (或可能) 相互配育的、拥有自然种群的类群, 这些类群与其他类群存在着生殖隔离”。我国学者陈世骧 (1978) 认为: “物种是繁殖单元, 由又连续又间断的居群组成; 物种是进化的单元, 是生物系统的基本环节, 是分类的基本单元”。分类学概念上的物种必须同时具备以下特征: 与其他物种相区别、相对稳定一致的形态学特征; 生活并占据一定范围的生存和繁衍空间; 同种不同个体之间可以互相配对和繁殖后代, 而不同种的个体之间则存在生殖隔离。

广义的物种多样性 (species diversity) 是指地球生物圈中动物、植物、微生物等生物种类的丰度。物种多样性包括两个方面: 其一是指一定区域内的物种丰度, 可称为区域物种多样性; 其二是指生态学方面的物种分布的均匀程度, 可称为生态物种多样性或群落物种多样性 (蒋志刚等, 1997)。海洋微生物的物种多样性可以理解为海洋环境中存在 (过) 的所有微生物物种丰度的总和。物种多样性是衡量一定地区生物资源丰富程度的一个客观指标, 也是一个区域环境污染程度的指示指标。海洋微生物物种多样性研究范围包括海洋环境中存在的微生物细胞及遗传物质所反映出的物种总数、密度及分布均匀程度、特有种情况等。物种是遗传物质的最小生命载体, 也是生物研究最具体的可操纵单元, 因此, 海洋微生物物种多样性是其生物多样性研究的起点, 是海洋微生物遗传多样性、生态系统多样性、化学多样性、代谢多样性等研究的基础。

## 3. 生态系统多样性

生态系统是各种生物与其周围环境所构成的自然综合体。所有的物种都是生态系统的组成部分。在生态系统中, 不仅各个物种之间相互依赖、彼此制约, 而且生物与其周围的各种环境因子也相互作用着。从生物的功能结构上看, 生态系统主要由生产者、消费者和分解者构成。生态系统的功能是保证生物圈中各种化学元素的循环和生物能量在各组分之间的正常流动。生态系统多样性 (ecosystem diversity) 主要是指生物圈中生态系统组成、功能的多样性以及各种生态过程的多样性, 包括生境的多样性、生物群落和生态过程的多样化等多个方面。其中, 生境的多样性是生态系统多样性形成的基础, 生物群落的多样化可以反映生态系统类型的多样性。海水真光层生态系统、深海生态系统、冷泉和热液生态系统、海底重金属结核生态系统、极海生态系统、河口生态系统、珊瑚礁生态系统等均均为海洋典型的生态系统。由于海洋环境多样性非常复杂, 对海洋生物多样性影响很大, 因此, 在本书中我们将做专门论述。

近年来, 有些学者还提出了景观多样性 (landscape diversity), 作为生物多样性的第四个层次。景观多样性是指 “由不同类型的景观要素或生态系统构成的景观在空间结构、功能机制和时间动态方面的多样化程度”。遗传多样性是 “物种多样性和生态系统多样性的物质基础” (施立明等, 1993; 葛颂和洪德元, 1994), 或者说遗传多样性是生物多样性的内在形式。物种多样性是构成生态系统多样性的基本单元。因此, 生态系统

多样性离不开物种多样性，也离不开遗传多样性。

#### 4. 化学多样性

从生命最原始状态的开始到终结的整个过程，其自身始终发生着持续的不间断的化学变化，也可以说生命进化和生物演化本质就是化学演变，是为了生存或适应环境而不停地促进化学本质的改变，表现为结构丰富、功能多样的代谢产物的新生、发展、累积和消减等演变过程。

微生物化学多样性 (chemical diversity)，即微生物代谢产物化学结构多样性，是指微生物个体或群体生命过程中自然和非自然条件下合成、产生或分解的次生代谢产物结构类型和数量的丰度，蕴含功能多样性。广义上它包含了自然和非自然生活状态下微生物生命活动过程中产生的初级、次级代谢产物及其后修饰化学结构的总和。微生物的化学多样性是遗传和代谢多样性的一个最终体现形式，也是决定其功能多样性的一个重要基础。因此，发现和拓展海洋微生物的化学多样性研究将为发现海洋微生物功能先导化合物提供良好的机遇，克服长期以来对陆生微生物过度开发而导致新的生物活性先导化合物发现日趋困难的障碍。

#### 5. 代谢多样性

代谢是生物体内发生的用于维持生命的一系列有序的化学过程的总称，是生物繁殖和发育、保持结构、对环境作出反应的基本保障机制，通常可分为分解代谢和合成代谢两类。分解代谢，是对大的分子进行分解以获得能量；合成代谢，则是利用能量来合成细胞中的各个组分。代谢是生物体不断进行物质和能量的交换过程，物质和能量交换不止，生命必然不息。代谢中的化学过程即为代谢途径，它是指通过一系列酶的作用将一种化学物质转化为另一种化学物质。一个生物体的代谢机制决定了它对物质的利害取向，即哪些物质对于此生物体是有利的，而哪些是有害的。例如，深海热液口的微生物可利用硫化氢作为营养物质，但这种气体对于陆生动物来说却是致命的。

微生物代谢多样性 (metabolism diversity) 是指微生物生命过程中自然和非自然条件下合成或分解的化学过程的丰度，广义上包含了微生物生命活动中产生的初级、次级代谢产物的化学过程的类型总和。海洋微生物的遗传多样性和化学多样性是对海洋微生物代谢多样性的启示，天然产物生物合成机制多样性是海洋微生物代谢多样性的重要体现。海洋微生物代谢产物独特、新颖和复杂的化学结构，必然蕴含着新颖的酶学机理和不同于陆生微生物代谢产物的天然生物合成机制 (张偲等, 2010)。

#### 6. 生境多样性

生境是指生物的自然栖息地 (natural habitat)，是能为生物提供充足的水分、阳光、营养、隐蔽和繁衍等基本环境条件的地点或地区，包括该区域内的所有生物和非生物环境，是生态系统的重要组成部分。每一种生物都有它的生活栖息地，离开栖息地或栖息地遭到破坏，生物的生存就会受到威胁。浩瀚的海洋，丰富多彩的生境，海洋生物生存环境多样复杂。

中国海洋面积较大, 邻近中国大陆的海洋有渤海、黄海、东海和南海, 总面积为 473 万 km<sup>2</sup>。黄海、渤海生物区系处在北温带海的边缘, 东海属亚热带, 南海大部分属热带海域。在中国近海, 黑潮流域、河口水域和上升流区也呈现了丰富的生境多样性 (habitat diversity)。

渤海: 是中国大陆的内海, 面积约 8 万 km<sup>2</sup>, 最大深度 70 m, 平均深度 18 m。黄海: 是一个半封闭的海, 面积 38 万 km<sup>2</sup>, 平均水深 44 m, 最深只有 140 m, 主要为泥质粉砂质沉积环境, 沿岸地区的黄海暖流和沿岸流组成黄海环流系统。黄海处于北温带, 来自寒带、亚寒带、热带和亚热带的生物种群与本地土生种汇在一起构成独特的生物区系。东海: 面积约为 77 万 km<sup>2</sup>, 大部分陆架区平均水深 370 m, 最深达 2719 m。东海沿岸流和台湾暖流是东海浅水区域的两支主要海流。南海: 地处热带、亚热带, 面积 350 万 km<sup>2</sup>, 平均水深 1212 m, 除大陆架区外, 有约 30% 的面积是深海。南海北部有沿岸流和南海暖流两大流系。

黑潮是中国海陆架区毗邻的最大流系, 其热量和水量对中国陆架区浅海都有重大影响, 也是世界上强海流之一。中国沿海有 1500 多条江河入海。河口及其附近水域, 由于大量的淡水和陆源物质的注入, 形成了独特的河口类型的海洋生态系统。中国三大河口区——长江口、黄河口和珠江口, 生物种类组成复杂, 多样性指数较高。中国渤海中部、黄海冷水团区、山东半岛近海、浙江近海、闽南沿海、台湾西南、广东沿海、海南东南部都有上升流区。上升流形成了特定的生态系统, 往往具有生产力高、食物链短、物质循环快、能量转换效率高的特点。

## 1.2 海洋微生物多样性的研究简史

### 1.2.1 萌芽时期

海洋微生物研究始于 19 世纪中叶, 真正较为详细的描述开始于 19 世纪末期。1838 年 Ehrenberg 第一次分离并详细描述了海洋细菌折叠螺旋体 (*Spirocheata plicatilis*), 随后 Cohn、Warming 等先后报道了海洋微生物的研究情况。而 1884 年 Certes 从 Talisman 海洋调查远征队采集到的一些深海 (有些达 5100 m) 沉积物中首次分离到深海细菌 (Azam, 2001), 随后美国的 Russell、德国的 Fischer、苏联科学家 Issatchenko 等都从深海分离到细菌, 并首先推测深海细菌在海洋物质循环、能量流动中可能扮演着重要的角色。特别是 1914 年 Issatchenko 长达 300 页的卓越专著《北冰洋细菌的研究》, 首次提出并阐明了微生物在全球海洋环境中的物质转化作用。前期人们对海洋微生物的研究是基于兴趣, 而后受到活性天然产物开发的驱动, 研究有所进展。但早期由于战争的影响, 人们对海洋微生物的认识非常有限, 加上采样条件和培养方法的限制, 海洋微生物资源及多样性的研究在长达几十年的时间里都进展缓慢, 且当时对海洋微生物是否是海洋来源存在较大的争议, 致使早期海洋微生物学家的研究工作并没有得到海洋研究者和陆生微生物研究者的广泛认可 (ZoBell and Upham, 1944)。

### 1.2.2 诞生时期

随着社会的发展,环境问题日益严重,海洋再次成为专家们关注的焦点。此时对海洋微生物的研究,已经开始从资源向海洋微生物生理、多样性及其在海洋环境中的生态功能作用转移。1946年,美国 Claude E. ZoBell《海洋微生物学》一书的问世,促使海洋微生物的研究进入以生理、生态为基础的阶段。1959年以后,苏联学者 A. E. 克里斯连续出版了研究深海微生物的著作,提出微生物海洋学的研究设想。到20世纪60年代,由于当时社会活动者们对环境恶化的认识加深,提出了强烈的保护环境的倡议,特别提出重视海洋环境。这一活动激发了当时海洋微生物学者极大的研究兴趣,引起他们对海洋微生物的高度重视,并开展了关于海洋微生物学研究方法的一些工作。1961年国际海洋微生物学讨论会的召开,标志着以海洋微生物为主要内容的海洋微生物学已成为独立的学科。随后,以海洋微生物资源为中心的研究工作全面展开。60年代后,代表性的专著有美国学者 E. J. F. Wood 1965年出版的《海洋微生物生态学》,1974年日本多贺信夫编写的《海洋微生物学》,J. M. Sieburth 1979年出版的《海洋微生物》等,这些专著为后来海洋微生物学的发展奠定了基础。

随着科技的高速发展,深海采样技术得到逐步完善并快速应用于海洋生物的研究。日本早在20世纪中期,通过深海测量技术发现深海各大洋底绵延着数万千米的山脊,使人们认识到海洋环境与陆地环境的统一性。1977年,美国的“阿尔文”号深潜器最早在太平洋的加拉帕戈斯群岛附近2500m的深海热液区发现了完全不依赖于光合作用而独立生存的完整的生命体系。自1968年起,美国发起了深海钻探计划(DSDP)、大洋钻探计划(ODP)以及综合大洋钻探计划(IODP),日本启动了深海环境调查科技高级研究计划(DEEP STAR),欧洲科学基金会(ESF)发起了深海生物圈探测计划等,这些计划都极大地促进了全球海洋微生物的研究。

此外,现代分子生物学技术的不断完善,特别是建立了以DNA指纹图谱分析为基础的现代微生物分子生态学研究方法,使围绕环境微生物遗传物质展开的微生物多样性研究成为可能,也克服了微生物纯培养法的限制。从环境的角度深入探索微生物的多样性及其生态功能,极大地拓宽了人们对微生物多样性在分子水平、个体水平、种群及群落水平,甚至生态系统水平的理解。特别是基因组学(genomics)和后基因组学(post-genomics)的发展,使得科学家在群落水平以及系统进化的层面探讨海洋微生物的多样性成为可能。

随着海洋微生物样品采集手段和微生物多样性研究方法的不断发展与日臻完善,以及人们对海洋生态环境的重视,海洋微生物多样性作为一个重要的研究方向,终于顺利诞生了。

### 1.2.3 成长时期

进入21世纪后对海洋微生物资源及多样性的研究引起了各个临海国家的高度关注。

2000年,美国成立了著名的高登-贝蒂·摩尔基金会(Gordon and Betty Moore Foundation)基金组织,该组织在2004~2008年投入6000多万美元用于资助海洋微生物研究。美国、日本、英国、澳大利亚等国家先后成立了区域性海洋科学学术交流组织,如亚太海洋生物技术学会(APSMB)、欧洲海洋生物技术学会和泛美海洋生物技术协会、国际海洋生物技术大会(IMBC)等。各临海国家纷纷组建海洋生物研究中心,如美国马里兰大学海洋生物技术中心、J. Craig Venter Institute、加利福尼亚大学圣地亚哥分校海洋生物技术和环境中心、康涅狄格州立大学海洋生物技术中心、挪威贝尔根大学海洋分子生物学国际研究中心和日本海洋生物技术研究所等,以及一些老牌的海洋研究所,如美国的Scripps海洋研究所和海洋微生物研究所、欧洲马克斯·普朗克海洋微生物学研究所(不来梅)、法国Ifremer海洋研究所、英国普利茅斯海洋实验室(Plymouth Marine Laboratory)、德国蒂宾根大学(Tuebingen university)等,这些研究机构为向全球海洋科学研究全面进军提供了坚实的基地。2006年,美国科学基金会投入7600万美元资助4个新的跨学科科技中心之一的微生物海洋学研究与教育科技中心(C-MORE),主要开展海洋学、微生物学、生态学和遗传学方面的合作研究,该研究中心汇集了美国包括麻省理工学院、伍兹霍尔海洋研究所、蒙特利海湾研究所、加利福尼亚大学圣地亚哥分校等海洋研究实力派单位。2007年,德国马普学会、丹麦奥胡斯大学和丹麦国家研究基金合作成立地质微生物研究中心,开展海床表面下微生物活动驱动的元素循环,以及微生物作用对全球气候变化的影响。

随着海洋研究机构的建立,美国、日本及欧盟各国等科技发达的国家和地区推出了“全球海洋取样计划”、“国际海洋微生物普查”(International Census of Marine Microbes, ICoMM)、“海洋生物技术计划”、“海洋蓝宝石计划”、“海洋生物开发计划”等一系列海洋微生物相关的研究计划,投入巨资开展海洋微生物资源、多样性及其活性物质和功能基因开发等方面的研究。至此,海洋微生物多样性研究全面展开,进入了一个崭新的时代。

2004年,在高登-贝蒂·摩尔基金会的资助下,美国实施了海洋微生物研究计划(Marine Microbiology Initiative),该计划对155株以上的海洋微生物基因组进行测序。基于Genomes OnLine Database进行统计,截至目前已完成了350余株海洋微生物全基因组的测序。历时10年的国际海洋微生物普查(ICoMM)项目于2010年完成,这是一次全球范围内的海洋生物大普查,共收集到超过1200个区域的样本,获得DNA序列数量超过1800万个,通过分子生物学方法检测估计的海洋微生物种类达10亿种,海洋微生物的总重量相当于2400亿头非洲大象。在此期间,智利研究人员在南美洲西南岸发现了一个巨大的、以硫化氢为食的“微生物席”,覆盖面积相当于希腊。所有这些都充分显示了海洋微生物多样性的丰富和奇特。

技术的进步是海洋微生物学发展的基础,每一次技术的革新都带来了海洋微生物研究领域的新发现(图1-1)。当前,第二代、第三代测序技术快速发展,并逐步广泛应用于海洋微生物多样性调查研究中,相信在不久的将来海洋微生物多样性的研究将会更加广泛和深入,海洋微生物也必将在资源开发利用、海洋生态环境治理等领域发挥更大的社会作用,带来更大的经济效益。



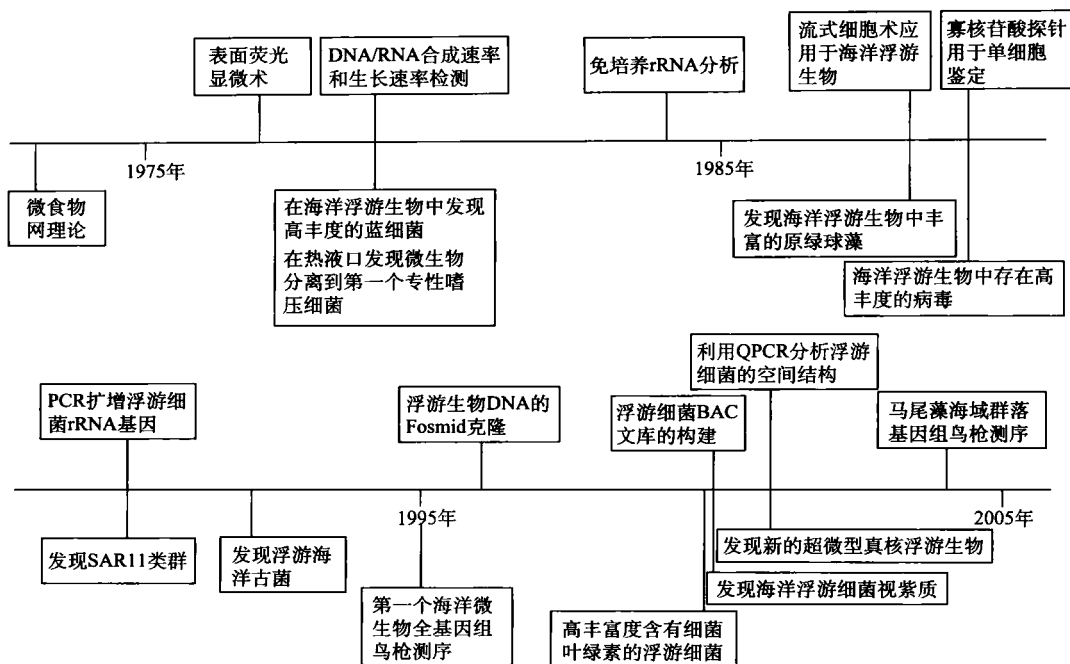


图 1-1 技术进步促进海洋微生物学的发展

### 1.3 海洋微生物多样性的研究意义和方向

#### 1.3.1 海洋微生物多样性的研究意义

海洋环境的多样性造就了海洋微生物的多样性。微生物的多样性是微生物全方位应用的基础。以全球视野，在地球系统中研究中国海洋微生物，从物种演化出发，以多层次全方位的多样性解析为主线，落脚于海洋微生物多样性的应用，将引发海洋微生物研究的一场新的革命。海洋微生物研究的热点领域及发展趋势是微生物的种群结构、生态系统、代谢多样性和微生物海洋学等。

##### 1. 海洋微生物是地球系统中的关键成员

海洋是地球系统中最重要的重要组成部分，如同地球“呼吸着的肺”，承载并驱动着地球上物质和能量的循环和流动；海洋环境复杂特异，物种丰富多样，独特的海洋环境，孕育着独特的海洋生物。海洋微生物是海洋生态系统中食物链的始端，通过同化海洋各种环境中的营养物质而实现初级生产者的角色，为大型生物提供营养；同时，海洋微生物更是海洋生态系统中食物链的终端，通过分化海洋各种环境中的有机碎屑，而实现分解者的角色，成为海洋环境的清道夫，也为海洋植物提供无机营养。海洋微生物既是海洋生态系统的初级生产者，同时也是分解者，从而维持着整个海洋生态系统的良性可持