

# 科学掌控地球微生物 让地球更健康

汪振立

江西应用技术职业学院, 江西 赣州

收稿日期: 2024年3月15日; 录用日期: 2024年4月10日; 发布日期: 2024年5月11日

## 摘要

地球微生物生物量巨大, 物种量巨大, 是人类文明高度发展阶段生产生活的重要资源。地球微生物中的大多数是与动植物和谐共存的, 是与人类和谐共存的, 但其中一部分是制约、加害动植物的, 是对人类有害的。人类需要科学、合理引导微生物技术的发展, 充分发挥微生物资源的绿色效能, 助力人类经济社会发展逐渐趋向于绿色转型。使微生物成为真正意义上的人与自然和谐共生的促进性因素, 需要地球科学与生命科学高度发展、高度融合, 需要地球科学工作者和生命科学工作者各司其职, 各显其能又通力协作, 为实现生态文明的共同目标并驾共进, 以高度发达的科技操控、改造巨量的地球微生物, 使之“为我所用”, 让人类更健康, 让地球更健康。

## 关键词

地球微生物, 学科融合, 操控, 人菌共赢, 和谐共生

# Scientific Control of Earth's Microbes to a Healthier Planet

Zhenli Wang

Jiangxi College of Applied Technology, Ganzhou Jiangxi

Received: Mar. 15<sup>th</sup>, 2024; accepted: Apr. 10<sup>th</sup>, 2024; published: May 11<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The microbial biomass and species on Earth are enormous, and they are important resources for production and life in the highly developed stage of human civilization. Most of the microorganisms on Earth coexist harmoniously with animals and plants as well as humans. However, some of them are harmful to humans as they restrict and harm animals and plants. Human beings need scientific and rational guidance for the development of microbial technology, fully leveraging the green efficiency of microbial resources, in order to helping human economic and social develop-

ment gradually move towards a green transformation. To make microorganisms a truly promoting factor for the harmonious coexistence between humans and nature, it requires a high degree of development and integration between Earth science and life science. Earth science and life science workers need to each fulfill their respective responsibilities, demonstrate their abilities and work together to achieve the common goal of ecological civilization. With highly developed technology, they can manipulate and transform a huge amount of Earth microorganisms to make them “for our own use”, making humans and the Earth healthier.

## Keywords

**Geomicrobes, Interdisciplinary Integration, Manipulation, Human-Microbe Mutualism, Harmonious Coexistence**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

地球上已知微生物约 20 万种，学界认为，未知微生物大约有一千亿到一万亿种。

反映生态系统状况的一个重要指标叫生物量。生物量是指活生物体内剔除水分之后有机物的重量，通常用地球生活的核心元素——碳的重量来衡量。

据以色列魏茨曼科学研究所和美国加州理工学院研究人员对数百项研究的数据进行综合分析后估算，目前地球全部生物量相当于 5500 亿吨碳，其中植物占了大头，约为 4500 亿吨；其次是细菌和古细菌，分别为 700 亿吨和 70 亿吨；蘑菇之类的真菌为 120 亿吨；海藻、变形虫等原生生物为 40 亿吨；包括人类在内的全部动物不足 20 亿吨，大部分来自昆虫、虾蟹等节肢动物以及鱼类。

从地球生态系统的视角看，如此巨大的地球微生物生物量，并且分布于整个生物圈包括动植物体内无处不在，所以，如何操控和改造在生态系统中起主要作用的地球微生物，关乎土地的健康，关乎水体的健康，关乎空气的健康，关乎人类的健康，也关乎地球的健康。

从黑色文明走向绿色文明，是人类的共识；操控、改造巨量的地球微生物，使之“为我所用”，成为人类生产生活中一类重要的资源，是生物学界和地学界的共识。因此，研究、掌控、利用地球微生物的前景是明朗的、广阔的。

## 2. 趋利避害，使地球微生物无害化

### 2.1. 让有害微生物无害化

微生物之间存在着各种关系，其中最为重要的是微生物的拮抗关系。微生物拮抗关系是指微生物之间通过竞争、抑制、杀死等方式相互作用的关系。细菌与细菌之间，细菌与真菌之间，真菌与真菌之间，细菌与病毒之间，真菌与病毒之间，都存在拮抗关系。如一些细菌可以分泌抗菌物质，抑制真菌和其他细菌的生长和繁殖[1] [2]。例如，一些乳酸菌可以分泌乳酸和醋酸等有机酸，抑制霉菌、酵母菌和其他一些细菌的生长。又如一些细菌、真菌可以分泌抗病毒物质，抑制病毒的生长和繁殖。例如，衣霉素 Tunicamycin，为放线菌 *Streptomyces lysosuperficus* 产生的核苷酸抗生素，可抑制具有被膜(Envelope, 含糖蛋白)的病毒的繁殖。

科学、适度利用微生物之间的拮抗关系，发挥微生物拮抗作用，可以实现使部分有害微生物无害化的目的。

## 2.2. 通过微生物使有害物质无害化

人类的生产生活会产生许多难处理的有害物质，有些微生物可以协助人类对其做无害化处理。例如：

### 2.2.1. 氰渣无害化处理的微生物修复

氰浸提金技术是国内外金矿普遍使用的，但产生的氰渣含有大量的氰化物和重金属，属于危险废物。万云洋等选用耐氰微生物对氰渣进行无害化处理，生化反应器中对总氰化物浓度 728 ppm 的含氰矿渣进行微生物处理 33 天，氰化物浓度降为 7.5 ppm，降解率达到 99.4%；生物反应器中上清液重金属浓度大幅降低，其中 Pb 由 566  $\mu\text{g/L}$  降低到 0.05  $\mu\text{g/L}$ ，Ba 的含量甚至降低到我国土壤环境背景值之下[3]。

### 2.2.2. 利用微生物对核废料进行无害化处理

核废料是令人望而生畏闻之色变的难处理有害物质。美国的研究人员已经排出一一种奇怪细菌的基因组序列，它可以在辐射超过人类承受能力 100 万倍的环境下很好地生存，并发现这种细菌能清除核废料。

这种耐放射异常球菌能承受 150 万拉德(辐射计量单位)的辐射，是其它生命形式的 1000 倍，它紧密的基因排列在吞食核废料时抵御了辐射的作用，它健康的胃口使它在核废料场所成了可靠的清洁工，它吃进核废料，把核废料转变成更容易处理的衍生物。科学家把这种耐放射异常球菌称为环境清洁细菌，它能清除核废料。科学家们正在进一步研究它的基因结构，期望用生物基因工程技术对这种细菌的基因进行改造，使它能更耐辐射，为核废料无害化处理服务[4]。

随着研究的深入，科学培养某些特异构建的特殊微生物，许多难处理的危险废物都能通过微生物进行无害化处理。

## 2.3. 巧用微生物，使微生物的环境净化作用最大化

在地球演化史上，地壳运动和动植物生死荣枯物种演替中也产生自然污染，但地质环境存在自我净化的机制和能力。远古的环境自净，靠的就是生物自净，其中主力是微生物自净作用。

工业革命近 300 年来，地质环境逐渐受到污染，早期是在环境自净能力范围内。第二次工业革命以后，污染日甚，逐渐超出环境自净能力。第三次工业革命以来，环境问题日益引起人类的高度重视。微生物作为生物界的分解者，在水体污染、土壤污染、大气污染等治理过程中，均取得显著效果且不易造成二次污染。微生物对生态地质环境的净化(污染修复)是利用微生物的代谢反应使污染物无害化，在低污染的状态下，地质环境中的土著微生物或人为添加外来微生物即可实现环境自净[5] [6] [7] [8] [9]。

### 2.3.1. 土壤自净

土壤污染物在土壤微生物的参与下可以发生复杂的生物化学变化而达到自净。自净功能主要有：

1) 生物降解：有些农药能在土壤微生物作用下得到一定程度的降解。如六六六和 DDT 等经土壤微生物的脱氯作用而发生降解。

2) 氨化作用：污染物中的蛋白质及其它含氮有机物(如人、畜粪尿等)在土壤中的氨化微生物作用下，首先分解成氨盐，这个过程叫氨化作用。参加分解有机物的微生物种类很多，有细菌、放线菌及霉菌等。

3) 病原体死灭：土壤中病原微生物和寄生虫卵由于外界不利的环境因素，微生物之间的互相拮抗和噬菌体等的作用而死灭。死灭所需时间因病原体种类和外界环境条件不同而不同，多数病原体在几小时至几个月死亡，但芽孢杆菌可活数年以上。土壤自净过程可在需氧条件下进行，也可在厌氧条件下进行。在需氧条件下，有机物分解氧化进行快，病原体死灭也快，土壤能迅速地由污染状态恢复到清洁状态。

在厌氧条件下, 有机物分解缓慢且不彻底, 常产生一些中间产物污染环境, 如氨、硫化氢、吲哚等, 病原体死灭速度也较慢。

4) 有机物的腐殖化: 腐殖化是有机物在土壤微生物的参与下不断分解又不断合成, 最后变成腐殖质的过程。腐殖化不同于无机化, 腐殖质含有大量的有机物质, 如蛋白质、脂肪、木质素、碳水化合物、有机酸等。一般认为腐殖质虽然含有大量有机物质, 尚未无机化, 但不再腐败, 不产生臭气, 不招引苍蝇, 而且病原微生物和寄生虫卵均已死灭, 从卫生角度看是安全的。

### 2.3.2. 水体自净

水体微生物自净的基本过程是水中微生物(尤其是细菌)在溶解氧充分的情况下, 将一部分有机污染物当作食饵消耗掉, 将另一部分有机污染物氧化分解成无害的简单无机物。影响生物作用的关键是: 溶解氧的含量、有机污染物的性质、浓度以及微生物的种类、数量等。降解不同的污染物, 培育、选用不同的微生物, 例如:

1) 降解蛋白质的微生物有好氧细菌(链球菌、葡萄球菌、枯草芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌等)、厌氧细菌(腐败梭状芽孢杆菌、生孢梭状芽孢杆菌等)、真菌(曲霉、毛霉和木霉等)、放线菌(链霉菌等)。

2) 降解含氮有机物的微生物有细菌(紫色杆菌、假单胞菌等)、放线菌(诺卡氏菌等)、真菌(氧化性酵母菌和霉菌中的赤霉菌等)。

3) 降解农药(杀虫剂、除草剂等)的微生物有细菌(假单胞菌、芽孢杆菌、产碱杆菌、黄杆菌等)、放线菌(诺卡氏菌等)、真菌(曲霉等)。

4) 降解油脂的微生物有细菌(荧光杆菌、绿脓杆菌、灵杆菌等)、真菌(青霉、乳霉、曲霉等)。

5) 降解氯苯类的微生物有细菌(产碱杆菌、不动杆菌、假单胞菌、芽孢杆菌等)。

6) 降解石油的微生物有 200 多种, 如细菌(假单胞菌、棒杆菌属、微球菌属、产碱杆菌属等)、放线菌(诺卡氏菌等)、酵母菌(假丝酵母等)、霉菌(青霉属、曲霉属等)、藻类(蓝藻和绿藻)等。

### 2.3.3. 大气自净

微生物参与大气污染物净化的主要方式有:

1) 通过降解有机物的方式净化大气污染物: 大气中的一些有机物质, 例如苯、甲苯、二甲苯等, 对人体健康有害。而微生物可以通过分解这些有机物质来实现净化。例如, 甲烷氧化细菌可以分解大气中的甲烷, 从而减少温室气体的排放, 保护环境。

2) 通过生物吸附的方式吸附大气污染物: 微生物的表面可以带有电荷, 这使得它们可以吸附在大气污染物表面, 并且通过代谢活动将它们分解或者转化为无害物质, 实现大气污染的净化。例如, 硫氧化细菌可以将  $\text{SO}_2$  转化为硫酸, 从而降低大气中  $\text{SO}_2$  的浓度。

3) 通过还原的方式净化大气污染物: 氮氧化物在大气中的浓度越来越高, 给环境带来了很大的危害, 而微生物可以通过还原氮氧化物来将其转化为无害的氮气。例如, 一些细菌可以将亚硝酸盐还原为氮气。

污染与污染防治, 是永恒的话题、永恒的课题。工业革命以来, 人类生产生活对环境污染日益严重, 有重金属污染, 有有机污染物污染, 也有人为的微生物污染等。长期以来, 人类利用微生物治污, 采取微生物降解有机污染物、微生物修复重金属污染、微生物净化水体、微生物治理土壤污染等, 是事后被动的“治理污染”, 是“治己病”。

生态文明的理想境界是掌控微生物, 对环境污染是事前事中“预测预控”, 是“免污染”, 是“治未病”。随着科技的进步, 随着生态文明建设的进程, 将来对生产生活过程中产生的有害物质应先有处理预案, 能用微生物处理的, 应当同步跟进。如在某项生产活动前预测可能产生某种有害物质时, 应预先选择、培养某些拮抗细菌(真菌)、降解细菌(真菌)抑或是用特异构建的降解功能菌, 与有害微生物或有

害物质出现时先后投放或同时投放，防患于未然，在环境净化中将微生物的作用发挥到极致，以更低碳耗却更高效地实现环境自净以至“免污染化”的目的——这才是建设生态文明的文明形态所需要的绿色发展的绿色技术、绿色手段。

### 3. 物尽其用，让地球微生物资源化

微生物资源在自然生态系统中广泛分布，约占地球生物量的 17%，具有资源丰富、生长快、易改造等特征，与工业、农业、食品、酿造、医药、能源及环境等领域密切相关。微生物资源可被直接开发为食品原料或用以酿造生产，也可作为服务农牧业生产的菌剂产品或用于生产医疗药品和清洁能源，是支撑微生物学研究、生物技术研究及微生物产业持续发展的重要基础[10]。

#### 3.1. 向微生物要碳源、要能量、要蛋白

人以食为天，根据“大食物观”向微生物要碳源、要能量、要蛋白等国家重大战略需求，需要对可培养微生物的功能进行开发，更要进一步挖掘未/难培养微生物的基因组资源，以服务人类生产和生活。

许多微生物种类可供人类直接食用。我国已经报道食用菌种近 1000 种，药用菌种超过 500 种。目前，国内已经开始人工栽培的食药菌超过 100 种，形成规模栽培的种类有 30 种以上，尚有大量的野生食药菌有待开发。在中国，食用菌已成为一个重要产业[11]。同时，中国菌草技术已传播到 106 个国家和地区，为全球减贫提供中国方案。从南太平洋到非洲再到拉美，许多人通过种菌草、种菇摆脱了贫困，改变了命运。

又如，肉类是人类获取蛋白质的主要来源之一，随着人口数量增长、城市化进程加快，全球植物蛋白和动物蛋白人均需求量和年需求量均显著增长。传统肉类的生产消耗大量淡水、土地资源，并增加温室气体的排放。以牛肉为例，生产 1 千克牛肉需消耗 15 吨水，排放 36 千克~300 千克当量的二氧化碳，生产 1 千克牛肉所需的土地面积为 1 千克粮食生产所需土地面积的 13 倍。传统肉类生产方式难以满足人类对肉类蛋白的可持续需求。动物肉，特别是“红肉”富含胆固醇与饱和脂肪，摄入过多会增加肥胖及心脑血管疾病产生的风险。因此，人类一直在寻找替代蛋白，以期制造出健康又环保的“肉”。目前替代蛋白主要有三类：植物蛋白、细胞蛋白、发酵蛋白，其中发酵蛋白最具发展前景。发酵蛋白也叫微生物蛋白，是一种以葡萄糖、淀粉、糖蜜、合成气、二氧化碳等为底物，利用微生物发酵方式生产的蛋白。发酵蛋白中的蛋白含量高达 40%~80%，含有多种维生素、纤维素、碳水化合物、脂类、矿物质，以及丰富的酶类和生物活性物质等，且不含胆固醇，对心脑血管疾病患者更加友好。目前，利用发酵蛋白制作的鸡肉，在口感、香味、质构、咀嚼特性等方面的仿真度可达 85%左右。将来，人类吃的很多“肉”可能是微生物造的[12][13]。

#### 3.2. 促进农业生产发展的新兴方向

农业微生物(农业生产、农产品加工、农业生物技术、农业生态环境保护等有关应用微生物)的开发，覆盖种植业、养殖业、农业环境等领域，涉及与农业有关微生物的特性、生命活动规律、作用过程调控等。广泛应用的有微生物肥料、微生物农药、微生物饲料、微生物食品、微生物能源、微生物生态环境保护剂 6 大板块，是促进农业生产发展的新兴方向。

#### 3.3. 扩大人们对食物选择的空間

食品工业因微生物的引入，突破传统食物的局限，利用微生物进行发酵、保鲜、添加剂和酶制品等的生产，如乳酸菌、酿酒酵母、大肠杆菌等。在以传统食物为基础食材的基础上，制造出各种新式食物，正不断扩大人们对食物选择的空間。

### 3.4. 不断开发医药微生物

现代医药工业中, 微生物利用技术的开发日益显示出其广阔的前景, 不少药品和精细化学制品已可应用遗传工程的技术利用微生物进行生产。制药工业中, 有些药品和制剂, 本身就是微生物。有些药品是以微生物的代谢产品作为原料或以其有效作用参与制药过程。常见的微生物药物如抗生素(青霉素、链霉素、氯霉素、土霉素、金霉素等)、维生素(维生素 B、维生素 C 等)、氨基酸(谷氨酸、苏氨酸、丙氨酸等)、核酸类物质、酶制剂和酶抑制剂(链激酶、青霉素酶、蛋白酶、脂肪酶等)、甾体化合物(胆甾醇、胆酸、肾上腺素等), 还有防治某些疾病的疫苗等。

微生物组在地球生态系统和人类健康中的作用超乎想象, 它不仅将极大地帮助人类克服当今所面临的生存挑战, 还能提供人类未来生存之道, 这其中有一个道理, 就是微生物之间能够互相协作, 使得它们在生态系统中更加稳定、更加有效发挥作用, 并赋予微生物组(群)具有超越单个微生物的更为强大的功能[14]。

### 3.5. 工业微生物广泛应用

微生物在工业生产领域得到广泛应用, 除了食品、制药, 还涉及冶金、采矿、石油、皮革、轻化工等多种行业。其中地质微生物利用较多的是冶金、采矿、石油行业[15]-[21]。

**微生物冶金:** 是指在相关微生物存在时由于微生物的催化氧化作用将矿物中有价金属以离子的形式溶解到浸出液中以回收或将矿物中有害元素溶解并除去的方法。常用的有氧化亚铁硫杆菌(*Thiobacillus ferrooxidans*), 氧化硫硫杆菌(*T. thiooxidans*), 氧化亚铁微螺菌(*L. ferrooxidans sulfobacillus*), *Thermoacidophilic archaeobacteria* 等。早期主要用于从废石和低品位硫化矿中回收铜, 美国、智利、前苏联、日本、加拿大、澳大利亚、巴西、西班牙、印度等国都先后采用微生物堆浸法来处理低品位的混合型铜矿石, 智利的 Lo Aguirre 采用生物冶金对铜矿石进行堆浸, 仅 10 余年时间处理量就达到 16,000 t/d。澳大利亚一家铜矿企业用氧化亚铁硫杆菌浸出铜精矿, 浸出液再采用萃取-电积工艺处理, 证明了铜精矿的微生物浸出在技术和经济上都具有可行性。1997 年, 江西德兴铜矿建成了我国第一家年产 2000 t 阴极铜的微生物堆浸厂; 此后西藏玉龙铜矿、福建紫金山铜矿等矿山都采用生物提铜中的菌群调控技术及选择性浸出技术, 使矿石入选品位、吨矿成本逐年降低, 而金属回收率大大提高。

迄今为止, 生物冶金在工业上应用最多的还是从铜矿中回收金属铜。20 世纪 80 年代, 生物冶金开始推广到其他贵金属的提取。金精矿通常采用槽浸法来处理, 堆浸工艺主要用于处理低品位金矿石, 细菌的预氧化技术已成为极具竞争力的金矿预氧化工艺。国内微生物提金技术近年来也进入了工业化的应用阶段, 烟台的黄金冶炼厂在 2000 年建成投产了生物预氧化工厂, 对含砷较高的金精矿进行预处理, 处理量达到 60 t/d, 高砷金精矿常规浸出仅能回收 10% 的金。而经过生物预氧化后, 回收率能够达到 96%。此外, 铀矿的生物冶金也逐渐开始进行工业应用。生物冶金的巨大优势使得这项技术迅猛发展, 生物冶金在矿冶工业中已得到广泛应用。继铜、金、铀的生物冶金实现工业化生产之后, 镍、钴、锌、锰也逐渐实现工业化应用。

**微生物采矿:** 主要是采用原位浸出法, 适合于处理贫矿、废矿、表外矿、炉渣以及处理某些难以开采或者按常规处理不经济的富矿, 变“废”为宝。利用这一技术, 可以提取包括金、银、铜、铀、锰、钼、锌、钴、钨等在内的十几种贵金属和稀有金属。一般在矿山原地, 不需要经过选矿和冶炼等复杂工序。且设备简单, 操作方便, 成本低, 见效快, 利于群众办矿。有人估算, 微生物湿法冶金的费用仅是目前“采、选、火法冶炼”工艺的 20% 左右。

例如在铀矿山应用细菌浸滤法, 有可能从已无法开采的铀矿中采铀。使含有细菌的水通过地下矿脉渗透到竖井中, 然后用泵把溶有铀的水提升到地面回收铀。这种方法称为“地下溶解冶炼”, 已经在加

拿大应用。使用这种方法可以大幅度减轻对地面风景及建筑物的破坏,有利于保护环境。另外,使用这种方法虽然比采矿石花费的时间长,但由于不需要破碎矿石的机械操作,操作系统比较简单,因此需要的经费也少,特别对矿脉深、品位低的矿山更有利。

**微生物采油:**是技术含量较高的一种提高采收率技术,包括微生物在油层中的生长、繁殖和代谢等生物化学过程,还包括微生物菌体、微生物营养液、微生物代谢产物在油层中的运移,以及与岩石、油、气、水的相互作用引起的岩石、油、气、水物性的改变。自20世纪90年代以来,我国大庆、胜利、辽河、大港和中原等大型油田加快了微生物采油技术的引进、研发和推广,已初显成效。微生物采油施工简单、成本低,是一种廉价有效的采油技术,有望成为未来油田开发后期稳油控水、提高采收率的主要技术之一。

微生物资源对于人类生产生活贡献至大,对人类生命健康的维护居功至伟,是国家发展的战略性资源,也是人类社会高级文明阶段生产生活不可或缺的重要资源。

## 4. 科技引领,实现人与微生物和谐共生

### 4.1. 地球微生物组计划的全球协作

地球微生物如此巨大的生物量,如此巨大的物种量,要全面鉴定、研究这些微生物极具挑战性,需要全球生物学家界的通力合作。为此,全球微生物学界逐步形成共识,2008年“国际人类微生物组联盟”正式成立;“地球微生物组计划”于2010年启动;2019年5月国际人类微生物组联盟(IHMC)倡议发起“国际微生物组大科学计划”,各种国际合作正逐步开展。

地球微生物组计划(EMP)由美国阿贡实验室 J.A 吉尔伯特(Jack A Gilbert)等学者于2010年8月发起,旨在尝试为地球和人类的利益描述全球微生物的分类和功能多样性的系统性。致力于构建全球不可培养微生物多样性目录,通过与世界各地科学家进行多学科、大规模的合作,最大程度地认知地球微生物资源及其潜力,以提高对微生物及其与环境(包括植物、动物和人类)关系的科学理解。主要目标是:①完成20万份土壤环境样品的宏基因组分析,构建宏大的可比较的微生物生态数据库,形成地球基因图谱,提供可搜索格式的注释、环境数据和序列信息。②构建地球微生物的宏基因组数据库,涵盖所有地球微生物数据的基因组大片段集合,这些数据将衍生一个分析平台,能够与已知的基因组和宏基因组进行比较基因组分析。③定向发掘地球微生物利用潜力,形成地球微生物代谢网络重构模型。④建设可视化的数据分析平台,从多维尺度分析数据并提供多重比较功能,用于检测已有的理论,发展并创新微生物和生态学理论[22]。

地球微生物组计划自正式启动以来,举办了系列研讨会。首届会议于2011年6月在中国深圳举办,探讨其意义、模型、研究标准和生物信息学技术;同年在美国犹他州研讨会上明确了样品收集和元数据分析的基本标准。至2017年地球微生物组计划已覆盖了从北极到南极的七大洲43个国家;截至2020年11月12日,已经达到264,918份样品,拥有超过280,000个扩增子数据集、11,000多个配对元基因组、819个元转录组和407个代谢组数据集。伴随着新合作者和新技术的加入,地球微生物组计划已经建立了标准化的技术、数据和分析工具,并且可以公开访问,从而提供了一个框架来支持集成规模的研究,形成了稳定的运行机制[22][23][24]。

2017年我国科技部也推出了“中国微生物组计划”,以“国家需求导向、科学假设驱动、技术创新支撑”为基本原则,2018年“中国科学院微生物组计划”启动,设5个课题,分别聚焦研究人体肠道微生物组、家养动物肠道微生物组、活性污泥微生物组的功能网络解析与调节机制,创建微生物组功能解析技术与计算方法学,以及建设中国微生物组数据库与资源库;同时,也积极参与国际合作。经多年努力,取得丰硕成果,为今后研究、开发、利用、操控地球微生物打下了扎实的基础。

## 4.2. 微生物新技术的加持

微生物学新技术的发展为生物学研究提供了新手段，“观察”微生物、“检测”微生物、“利用”微生物有了更多的新算法、新思路。从“和谐共生”的角度看，为“改造”微生物创造了更多有利条件，特别是基因组工程技术、代谢工程技术、高通量组学技术、生物计算技术、生物信息技术、合成生物学技术等系统生物技术快速发展，基于微生物构建非天然的高效生物制造系统变得日益简便。构建微生物细胞工厂可以合成有机酸、有机醇、有机胺等小分子产物以及多糖、聚酯等大分子产物，还可以高效生产植物天然产物、抗生素、淀粉等各种目标产品，并实现重要资源的回收利用[25][26][27]。

例如，通过遗传改造和代谢进化，构建出高效生产丁二酸的大肠杆菌细胞工厂，丁二酸产量达 125 g/L；在此基础上，又将丁二酸合成途径分为若干个功能模块进行改造提升，最终获得丁二酸生产速率和产量提升的新菌种。萜类化合物和苯丙素类等植物天然产物的人工合成菌种也取得突破，青蒿素的微生物合成就是成功的典范，将青蒿素前体的产量提升至 25 g/L。设计构建的新金分枝杆菌工业菌种可以高效生产黄体酮前体支链醇、A 环开环物(谷内酯)、A-环酮酸、雄烯二酮等一系列甾体化合物及中间体，使 19-去甲雄烯二酮合成反应步骤由原来化学转化的 14 步，缩短至生物转化的 2 步，实现以大豆甾醇为原料规模化生产。通过改造微生物进行物质加工与合成的生产方式，有望彻底改变传统生产模式，触发新的产业变革。

随着微生物学新技术的发展，生物科技产业将迎来新一轮的重大转型，未来发展趋势包括：

- 1) 微生物学新技术向产业化方向发展，实现微生物工艺的规模化、标准化和自动化生产；
- 2) 微生物学新技术向合成生物学方向发展，实现微生物的生物多样性探索和新物质创新开发；
- 3) 微生物学新技术向智能化方向发展，实现人工智能和微生物生物技术的有机结合，提高微生物代谢工程的精度、效率和可控性；
- 4) 微生物学新技术向协同化方向发展，实现微生物、基因工艺和功能材料的交叉融合，推动微生物技术产业和材料科学的快速发展。

微生物学新技术为人类生产生活 and 环境保护等方面提供了重要的技术支撑和应用基础。随着微生物学新技术的不断发展，未来将会出现更多的新型微生物产品和微生物科技，为社会经济发展和人类福祉做出更大的贡献。

## 4.3. 地学与生物学融合，地学工作者与生物学工作者协作

地质环境是指大气圈、水圈、土壤圈、生物圈和科学技术研究可及的岩石圈之总称，又称为自然环境。生态地质环境是指地质环境中与生物生存发展密切相关的部分，即地球表层岩石圈(上部)、土壤圈、水圈、生物圈、大气圈(下部)，是以人类为中心的地球生物生存发展的基本场所和物质基础。

“地球微生物组计划”、“国际微生物组大科学计划”，其实都在宏观地质环境中实施。大计划需要大协作，生物学、地学、农学、林学、医学、环境学以至社会科学的一些学科(如人类学、考古学)等等，不同学科领域各司其职，协同实施。

术业有专攻，实施“地球微生物组计划”、“国际微生物组大科学计划”，了解、掌控微生物群系并为人类所用，生物学界尤其是微生物学界是主力军，是操盘手；地学界则要为地球微生物组计划实施提供地学理论、地学技术支撑。

地质微生物组的研究在地学界方兴未艾。地质微生物是参与地质过程的各种微生物的统称。地质微生物在地球表层无处不在，种类繁多，功能丰富，且在漫长的地质演化历史中发挥着重要作用。地球生命的起源、物种演替和功能多样性得益于早期地球演化，各种极端地质环境(如盐湖、热泉或热液喷口、深地、深海、酸性矿坑水、冰川、沙漠等)造就了特有的微生物物种、基因资源和生态功能。微生物又通

过一系列代谢活动参与地球环境的改造中,决定了地球生态系统的演化方向[28]。

地质微生物组的研究中,当前地学界尤为关注“四深”微生物。“四深”微生物是指深海、深地、深空和深时环境的微生物,特别是细菌、古菌、真菌、病毒等。随着我国深海、深空、深地等重大工程计划的推进,一系列与“四深”微生物有关的前沿科学问题不断提出,包括地质微生物与气候环境的相互作用、地质微生物的生物安全与生态安全、地质微生物参与的隐匿地质过程等。特别是,“四深”环境活性氧自由基对微生物的影响、地质病毒对生物演化和地质过程的影响等前沿领域都亟待突破。活性氧自由基能对生物分子、细胞、组织和器官,乃至整个生物圈的演化以及微生物地质作用都产生重要影响。病毒引发了现代和近代诸多全球性疫情爆发,地质病毒则可能对生物的背景灭绝和大灭绝以及一些地质过程产生影响[29]。因此,“四深”微生物也是地学界研究重点之一配合微生物学界,发掘地质微生物资源,发挥地质微生物资源优势,也已成为地学界的一项重要任务。

以微观地质环境视角看,在一定区域内,不同的地层岩性,组成物质的理化性质不同。地质构造是地壳中的岩层受到外力作用(尤其是地壳运动)的影响所产生的变形和变位的形态,在变形和变位的过程中,构造带组成物质的理化性质发生变化,有的甚至长期处于动态变化中。因此,不同地层岩性、不同地质构造衍生的土壤理化性质也不同,其承载的地表水、地下水水质也有差异,对于生物而言,提供不同的生态地质环境。所以,不同地质环境提供给地球微生物的生态地质条件是不同的。从全球生态系统看,不同地理气候不同地层岩性或相同(相近)地理气候条件不同地层岩性区、不同的构造带,微生物群落的种、种群构成不同,微生物群系内部复杂的相互作用不同,即微生物地球化学作用也是不同的。因此,研究地球微生物,实施地球微生物组计划,需要地学工作者提供透明的“玻璃地球”。

按“玻璃地球”的最初构想,是大陆地表以下、深度 1000 m 以内的地质状况、矿产资源状况透明化、数字化。从生态地质学的视角看,全球地表的植物、动物、微生物主要的地理地质分区也要透明化、数字化。摸清全球生态地质环境家底,查明地下地层岩性、地质构造和地表基质、地表水、地下水的地球物理、地球化学分布,地学工作者是主力军。在地球物理、地球化学透明化的“玻璃地球”上实施“地球微生物组计划”、“国际微生物组大科学计划”,微生物学界应能更加得心应手。

#### 4.4. 人与微生物和谐共生

生态文明追求人与自然和谐共生,其中很重要的是要做到人与微生物和谐共生。

地球自有生命的 35 亿年以来,首先是有微生物,世界首先是它们的;接下来才有植物、动物。而自有动植物以来,一部分微生物就附着在动植物体内,成为动植物体的一部分,其中绝大多数是与动植物和谐共存的,而有一部分是制约、加害动植物的;自有人类以来,一部分微生物也附着在人类体内,其中绝大多数也是与人类和谐共存的,附着在人类体内和自然界中一部分微生物对人类也是有害的。如何趋利避害、化害为利,实现人菌共生、人菌共赢,是生物学界永恒的课题,也是地学界永恒的课题。

微生物对于自然环境与生态系统具有双刃剑的作用。欲使微生物资源朝向有益于社会的方向发挥作用,需要合理引导微生物技术的发展。如此,既可以避免微生物技术的滥用与误用,又可以使微生物资源充分发挥绿色效能,进而为建设环境友好型社会提供保障。通往生态文明的路上,人类经济社会发展将逐渐趋向于绿色转型,如何统筹生态与经济的全面发展,实现人与自然和谐共生是人类面临的重大历史任务。在此情况下,唯有合理引导微生物技术的发展,将微生物技术发展与生态治理有机结合,实现二者相辅相成、相互促进。如此既能让微生物资源的有益功能得以充分发挥,又能全面抑制其带来的负面效应,使微生物成为真正意义上的人与自然和谐共生的促进性因素[30]。

人与自然和谐共生需要全人类的共同努力,首当其冲的是地球科学与生命科学高度发展、高度融合,以高度发达的科技引领社会文明形态的去黑换绿。这就需要地球科学工作者和生命科学工作者各司其职,

各显其能又通力协作，为实现生态文明的共同目标并驾共进。

随着社会的不断变革，科技的不断进步，人类走向生态文明(绿色文明)的愿望日益强烈，掌控地球微生物的技能、手段将日趋成熟，人类将通过操控、改造巨量的地球微生物，使之“为我所用”，使土地更健康，使水体更健康，使空气更健康，使人类更健康，使地球更健康。

## 参考文献

- [1] 刘海桑. 是颉颃, 还是拮抗[J]. 中国科技术语, 2008, 10(6): 39.
- [2] 柳焕章, 刘建钊, 周敬霄. 微生物间拮抗的研究方法与农业应用[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(3): 1310-1314, 1332.
- [3] 万云洋, 王宇天, 高涵帅, 等. 氰渣无害化处理的微生物修复研究[C]//中国化学会第 29 届学术年会摘要集——第 20 分会: 环境与健康. 北京, 2014: 60.
- [4] 张安. 用微生物对核废料进行无害化处理介绍[J]. 环境保护科学, 2003, 29(5): 34-35.
- [5] 马一鸣, 郝子垚, 黄泽涵, 等. 微生物在水体自净中的作用: 以清溪河为例[J]. 环境工程, 2022, 40(2): 20-26.
- [6] 和兵, 马一鸣, 王孟茹, 等. 水体自净能力的量化评估方法论述[C]//2022(第十届)中国水生态大会论文集. 南阳, 2022: 200-207.
- [7] 朱朵菊, 黄茜蕊, 熊欢, 等. 和美乡村建设背景下农村黑臭水体成因及治理技术探讨——以个旧市卡房镇为例[J]. 农村经济与科技, 2023, 34(23): 165-169.
- [8] 董丽艳. 有效解决土壤污染问题提高土壤自净化能力[J]. 吉林农业, 2016(24): 95.
- [9] 黄耀思. 车河-拉么矿区环境自净能力研究[J]. 大众科技, 2013, 15(3): 43-48.
- [10] 阮志勇, 彭楠, 赵述森. 微生物资源: 发掘、利用、展望与挑战[J]. 微生物学通报, 2023, 50(2): 785-787.
- [11] 薛达元. 微生物在人类历史和社会发展中的重要作用[J]. 人民论坛, 2021(22): 14-18.
- [12] 陈曦. 未来我们吃的“肉”可能是微生物造的[N]. 科技日报, 2023-02-23(006).
- [13] 李德茂, 童胜, 曾艳, 等. 未来食品的低碳生物制造[J]. 生物工程学报, 2022, 38(11): 4311-4328.
- [14] 刘双江. 掌控人类幸福的重要因子[J]. 中国战略新兴产业, 2016(15): 96.
- [15] 罗宁, 张晓伟, 柳召刚, 等. 微生物冶金及其在稀土资源利用中的研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023, 52(8): 75-82.
- [16] 宋执. 微生物冶金技术的应用及研究综述[J]. 黑龙江科技信息, 2015(11): 52-53.
- [17] 刘佳晨, 刘金辉, 徐玲玲, 等. 生物浸矿微生物群落结构研究进展[J]. 稀有金属, 2021, 45(10): 1258-1268.
- [18] 李万学. 微生物技术在石油开采中的应用分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2021, 41(9): 169-170.
- [19] 陈紫荆, 韩明阳, 魏景垣. 微生物采油技术在石油开采中的应用研究[J]. 化学工程与装备, 2019(10): 170-171.
- [20] 姚密. 微生物采油技术在石油开采中的应用[J]. 化学工程与装备, 2018(9): 100-101.
- [21] 王娟, 王继国. 山东省自然硫矿资源前景及开发建议[J]. 化工矿产地质, 2019, 41(4): 243-247.
- [22] 褚海燕. 中国大百科全书(第三版网络版) [M]. 2023.
- [23] 刘双江, 施文元, 赵国屏. 中国微生物组计划: 机遇与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(3): 239-250.
- [24] 刘双江, 施文元, 赵国屏. 中国微生物组计划: 机遇与挑战[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2018, 30(6): 11-17.
- [25] 王四宝, 刘润进. 互惠共生微生物: 新资源, 新技术, 新机遇, 新挑战[J]. 微生物学通报, 2020, 47(11): 3777-3779.
- [26] 张太亮, 王佳伟, 鲁红升, 等. 油田控制 SRB 新技术——微生物竞争技术[J]. 广州化工, 2012, 40(13): 38-40.
- [27] 杨文秀, 谢建平. 系统生物技术在工业(药用)微生物菌种选育与高通量筛选中的应用[J]. 工业微生物, 2007, 37(3): 48-51.
- [28] 董海良. 中国大百科全书(第三版网络版) [M]. 2022.
- [29] 谢树成, 罗根明, 朱秀昌, 等. “四深”微生物的地质作用——从气候环境变化到生态灾难[J]. 地质论评, 2022, 68(5): 1575-1583.
- [30] 高德胜. 人类与微生物的和谐共生之道[J]. 人民论坛, 2021(22): 32-35.