

微生物也能发电？

——藏在微观世界里的绿色能源革命

撰文 / 李传福（清华大学乌镇实验室）

当我们谈论发电时，脑海中浮现的往往是高耸的火力发电厂、奔腾的水电站、旋转的风力发电机，或是戈壁滩上一望无际的太阳能板。但你是否想过，那些肉眼看不见、无处不在的微生物，也能成为我们的“发电工人”？它们在污水中、在土壤里，甚至在我们的肠道中，默默进行着能量转换，为人类开辟了一条全新的绿色能源之路。

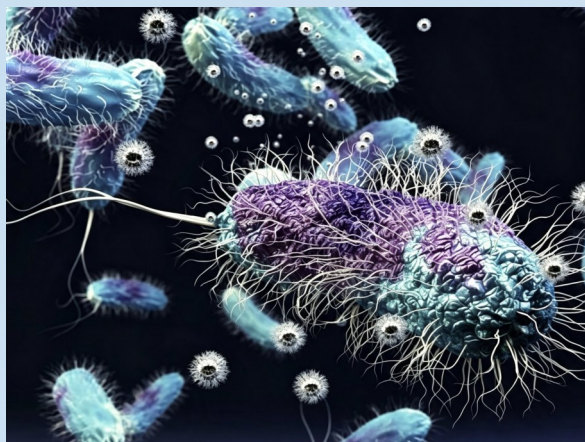
微生物发电的故事，始于一个多世纪前的意外发现。1911年，英国植物学家马克·皮特在研究酵母菌、大肠杆菌时，偶然发现这些微小的生物在代谢过程中会产生微弱的电流。这一发现当时并没有引起太多关注，依靠这点微弱电流，连一个小灯泡都无法点亮。直到20世纪60年代，美国宇航局为了解决宇航员在太空的废物处理和能源供应问题，重新拾起了这个被遗忘的研究方向。科学家们发现，某些细菌在分解有机物的同时，能够将化学能直接转化为电能，这种装置被称为微生物燃料电池。

微生物燃料电池的原理其实并不复杂。我们可以把它想象成一个微型的“生物发电厂”，由阳极、阴极和质子交换膜三部分组成。在阳极室，产电微生物附着在电极表面，它们以污水中的有机物为食物，通过呼吸作用将其分解。在这个过程中，有机物被氧化，释放出电子和质子。普通微生物大多会将电子直接传递给氧气或其他电子受体，但产电微生物拥有一项特殊的本领：能够通过自身的“纳米导线”——一种由蛋白质组成的导电纤维，或是分泌电子载体，将电子直接传递到阳极上。

这些电子沿着外电路流向阴极，形成可供利用的电流。与此同时，质子通过质子交换膜到达阴极，与电子和氧气结合生成水。整个过

程唯一的产物就是水和二氧化碳，真正实现了变废为宝的清洁能源转换。

并不是所有的微生物都能发电。目前科学家已经发现数百种具备产电能力的微生物，它们大多属于细菌或古菌域微生物。其中，最著名、研究最深入的当属希瓦氏菌和地杆菌。



电镜下的希瓦氏菌

希瓦氏菌是一种革兰氏阴性菌，广泛存在于土壤、淡水和海洋环境中。它最神奇的地方在于能够产生生长出长达数十微米的“纳米导线”。这些纳米导线就像一根根微型电缆，可将细菌体内产生的电子远距离传导至电极，大幅提升发电效率。更令人惊叹的是，希瓦氏菌可利用多种葡萄糖、乙酸等有机物作为能量来源，还能转化重金属等污染物质向外释放电子。地杆菌则是另一位“发电明星”，它最早被发现于美国华盛顿湖的沉积物中。与希瓦氏菌不同，地杆菌主要通过直接接触的方式传递电子，它们会紧密地附着在电极表面，形成一层致密的生物膜。地杆菌分解有机物的能力较强，甚至

可降解石油烃等难降解的污染物，在处理工业废水的同时产生电能，有望实现一举两得。

除了这两种明星细菌，科学家们还发现了许多其他的产电微生物，比如脱硫弧菌、大肠杆菌、枯草芽孢杆菌等。不同的微生物有着不同的代谢特点与产电能力，借助基因工程技术对它们进行改造，有望进一步提高微生物发电的效率。

微生物发电最吸引人的地方，不仅仅在于它能够产生电能，更在于它同时具备污水处理的功能。传统的污水处理厂需要消耗大量的电能来曝气和搅拌，处理1吨污水大约需要消耗0.3~0.5度电。而微生物燃料电池则完全相反，它在处理污水的过程中不仅不消耗电能，反而能够产生电能。据测算，1立方米生活污水中含有的有机物，理论上可以产生约0.5度电，足够普通家庭日常用电半天。

这意味着，如果我们将传统的污水处理厂改造成“微生物发电站”，不仅可以解决污水处理的能耗问题，甚至还能实现能源自给。目前，国内外已经有多个示范项目在运行。比如，英国纽卡斯尔大学的研究团队在当地的污水处理厂安装了微生物燃料电池装置，成功利用污水产生的电能点亮了污水处理厂的路灯。中国科学院微生物研究所也在天津建立了国内首个万吨级微生物燃料电池污水处理示范工程，处理效果达到了国家一级A排放标准，同时实现了电能的回收。



大型商用微生物发电污水处理站

除污水处理外，微生物发电还有许多其他的应用场景。在偏远地区，尤其是电网难以覆盖的区域，微生物燃料电池可以利用当地的有机废弃物（如秸秆、人畜粪便）发电，为居民提供基础电力供应。

微生物燃料电池还可以作为生物传感器使用。由于产电微生物的代谢活动与环境中的有机物浓度密切相关，我们能够通过测量电流的大小来实时监测水质、土壤污染程度等。与传统的化学传感器相比，微生物传感器具有成本低、灵敏度高、能够连续监测等优点。

尽管微生物发电技术有着广阔的应用前景，但目前它仍然面临着一些挑战。最大难题是发电效率偏低，实验室规模微生物燃料电池功率密度一般为每平方米数瓦至数十瓦之间，远低于传统燃料电池。此外，电极材料成本较高、质子交换膜寿命短有限、装置长期运行稳定性差不是问题，都制约着这项技术的大规模商业化落地。

不过，科学家们正在努力攻克这些难题。通过筛选和改造高产电菌株、开发新型低成本电极材料、优化电池结构设计等方式，微生物燃料电池的发电效率持续提升。近年来，研究人员还开发出微生物电解池、微生物脱盐电池等衍生技术，进一步拓展了微生物电化学技术的应用范围。

展望未来，微生物发电技术有望在多个领域实现突破。在家庭层面，我们可能会看到“家用微生物发电装置”，利用厨余垃圾、生活污水来发电，为手机、台灯等小型电器供电。在城市层面，未来污水处理厂将变为“能源工厂”，不仅能够处理污水，还能周边社区提供电力和热能。在太空探索领域，微生物燃料电池可以利用宇航员的排泄物来发电和净化水源，为长期太空任务提供能源支持。

编辑 / 努尔夏提·阿布都热西提