古菌的第四种共生机制：破解地球碳循环“暗箱”

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/31723.html

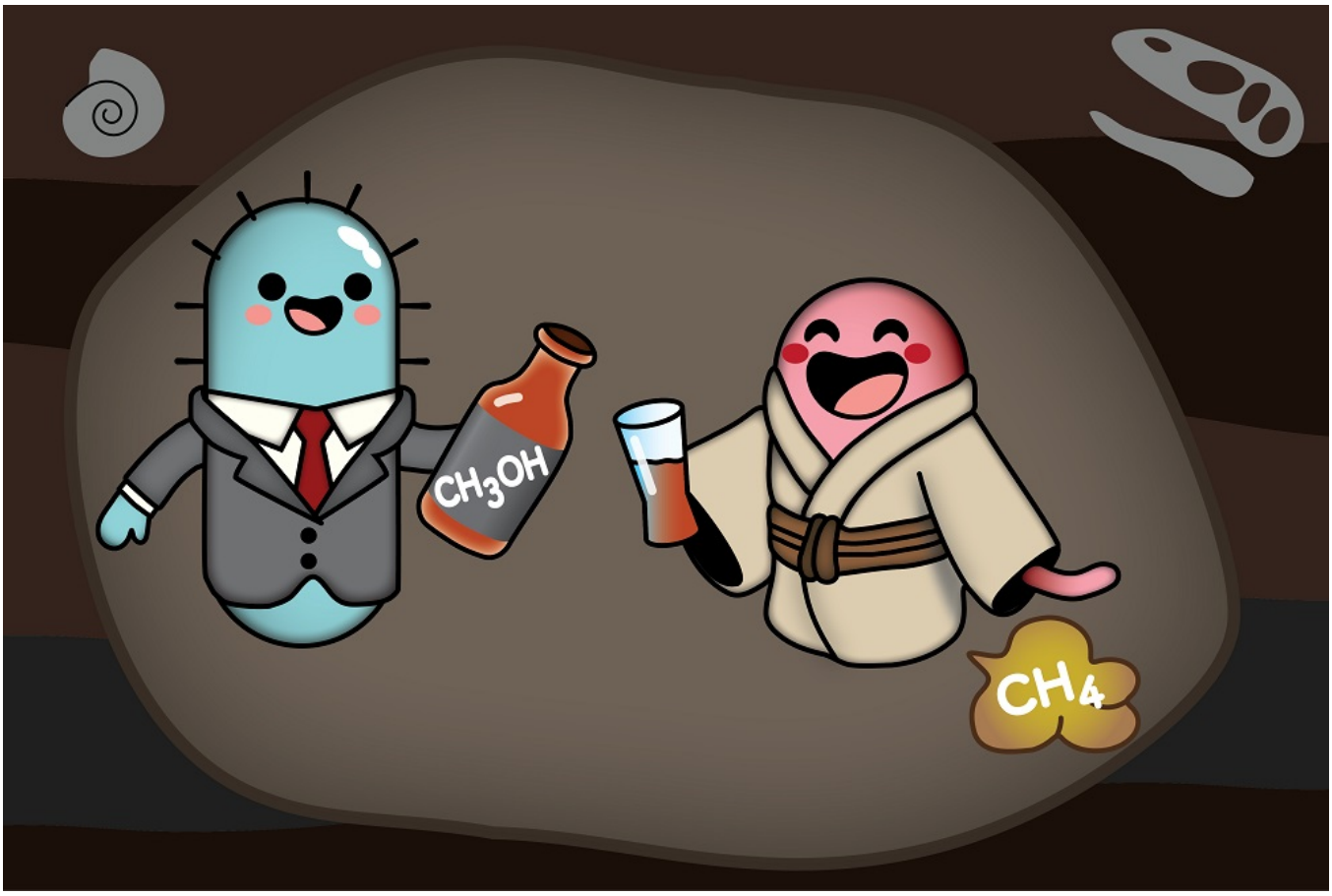
本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

古菌的第四种共生机制：破解地球碳循环“暗箱”。

地球深处，没有阳光也没有氧气，却生存着这个星球上最古老的生命体——拥有奇特生活习性的古菌。

在这些单细胞微生物中，产甲烷古菌备受人类关注，因为它们能产生天然气的主要成分——甲烷。

神秘古菌究竟如何产生甲烷？1月29日，《自然》杂志发表了农业农村部成都沼气科学研究所（以下简称“沼气所”）研究员承磊和日本国立海洋研究开发机构等团队合作的研究成果。他们发现了古菌和它们亲密的邻居细菌互赢共生的第四种生存模式，即种间甲醇转移，并鉴定出一条甘氨酸—丝氨酸循环介导的甲醇生成新途径。



厌氧细菌和产甲烷古菌的第四种共生模式——种间甲醇传递。中国农科院沼气所供图

?

论文审稿人、丹麦技术大学教授Pablo Ivan Nikel指出，这是一种此前未知的、由甲醇介导的古菌和细菌的共生关系。论文阐述了这种一碳醇如何促进代谢物的交换，从而有助于油藏中的碳循环。“这篇论文加深了我们对代谢相互作用和微生物生态学的理解。”他说。

《自然》高级编辑George Caputa则表示，这项研究揭示了一种新的微生物关系，并强调了甲醇不仅仅是微生物代谢的碳源。

爱喝“假酒”的神秘嗜热古菌

传统观点认为，细菌与古菌合作产甲烷只能利用简单的一碳或者二碳化合物，并且主要依赖三种模式：种间氢转移、种间甲酸转移和种间直接电子传递，这里所说的种间一般是指细菌和古菌之间。

而广泛分布于地球多种生态环境的甲基营养型产甲烷古菌，能将甲醇以及其他含甲基化学基团的化合物转化为甲烷，其背后机制和上述三种都不一样。“它们到底如何产生甲烷，是否也通过类似种间电子传递的方式来参与地下碳循环，是非常值得期待一个问题。”承磊对此充满了好奇。

他所在的沼气所厌氧微生物实验室，已有40余年历史，具有专业的厌氧微生物研究平台和技术，保藏了1400多种厌氧微生物模式物种。其中，一株2007年分离自我国胜利油田深层油藏的甲烷古

菌，让承磊看到了揭秘甲基营养型产甲烷古菌的希望。

这株产甲烷古菌是一个新科物种，由于分离自胜利油田、能在65℃高温下存活而被命名为“胜利甲烷嗜热球菌（Methermicoccus shengliensis）”。它对工作人员“投喂”的甲醇表现出强烈依赖，并能产生甲烷。“这是生长温度最高的甲基营养型产甲烷古菌。”承磊说。

“当时我们提出一个假设——地下细菌在分解有机物的时候，可能也会产生电子，并传递给甲基营养型产甲烷古菌”。承磊说。

2016年，承磊安排团队成员启动了这个研究，但是能用于产电的细菌主要是中温菌。所以，第一步是需要寻找新的高温产电细菌。

“幸运的是，我们在那个时候已经开发了新型的厌氧、无菌可控温的手套箱，以及半自动化的挑菌仪和快速鉴定系统，初步解决了厌氧微生物高通量分离筛选的技术瓶颈。”承磊说，他们做了大量的共培养试验，在不断的失败中坚持。

论文第一作者、沼气所副研究员黄艳在那时加入了承磊团队，并接手了这个课题。经过2年努力，终于建立了细菌和古菌共培养产甲烷体系。

其中的细菌也来自承磊团队前期从地下油藏中分离的新科物种，它能在高温下生存，而且爱“吃”甲酸，是胜利甲烷嗜热球菌的“好邻居”。为了纪念中国厌氧微生物学奠基人、沼气所研究员赵一章，他们将这一细菌命名为嗜甲酸赵氏杆菌（Zhaonella formicivorans）。

2018年，承磊参加日本微生物生态学年会。他和时任日本产业技术研究院（AIST）研究员Masaru K. Nobu交流了该项研究的进展和想法，并达成合作共识——通过联合培养博士研究生的方式，让黄艳带着这个课题读博，进一步开展细菌和古菌互作的分子机制研究。

一个酿“酒”一个买“醉”：微生物的共营奇缘

“从2019年到日本读博开始，我们想尽各种办法去验证古菌和细菌是通过种间直接电子转移的方式来产生甲烷的。”黄艳说，她经常在回到住所后，安静下来的脑子里冒出各种念头，第二天再到实验室里一个个去尝试，简直是“花式”验证。

然而这种情况持续了一年多，实验却毫无进展。“我还挺发愁的，一度觉得这个课题要挂掉。”黄艳说。

一天夜里，她又回想起白天的实验，在厌氧菌里添加了导电材料，但是并没有像文献报道的那样，如果古菌和细菌通过种间直接电子转移方式产生甲烷，应该可以看到产甲烷速率增加的趋势。

一个模糊念头一闪而过：“难道它们之间不是依靠直接电子转移方式？”这个想法在她脑子里越来越清晰。她决定第二天用不能导电却可以透过一些物质的渗透膜把古菌和细菌分开，看看它们还能不能产甲烷。

实验结果出乎意料，古菌依然可以正常的产出甲烷。

黄艳猜测，古菌和细菌之间不是通过种间电子传递，那么极有可能是一种新的互作机制。本来令

人沮丧的课题，突然之间可能会得到颠覆性的成果。她兴奋地向导师、日本产业技术研究院上级主任研究员Souichiro Kato提出她的新猜想。不料，Kato非常淡定地说：去证明它。

“我们通过热力学计算提出地下微生物可能代谢甲酸盐，甲酸盐是地下另一种常见的单碳化合物，从而生成甲醇。热力学特征表明，将甲酸盐转化为甲醇的微生物，需要与利用甲醇的微生物建立紧密的共生关系，这涉及到互营代谢作用。”黄艳说，于是研究团队开始尝试通过培养、基因表达情况、代谢分析等角度证明这个假设。

“甲酸盐的消耗和甲醇的生成符合预测的化学计量比例，但在少量甲醇积累后代谢就停止了。”承磊说。

黄艳发现，当上述细菌和古菌共同培养时，嗜甲酸赵氏杆菌对甲酸盐的降解直接与产甲烷菌的甲烷生成相耦合。

“这就像细菌酿了一壶‘假酒’，自己喝不下，古菌却甘之如饴。”承磊解释道，“这种互作不仅突破了热力学限制，还开辟了第四种产甲烷模式。我们证明了甲醇从细菌转移到了产甲烷古菌，从热力学角度可定义为一种新的互营代谢模式：种间甲醇转移。”

应用前景：从“地下沼气”到碳中和

但是，嗜甲酸赵氏杆菌和胜利甲烷嗜热球菌的生存模式和此前发现的共营模式都不一样。背后的代谢机制依然是一个“暗箱”。

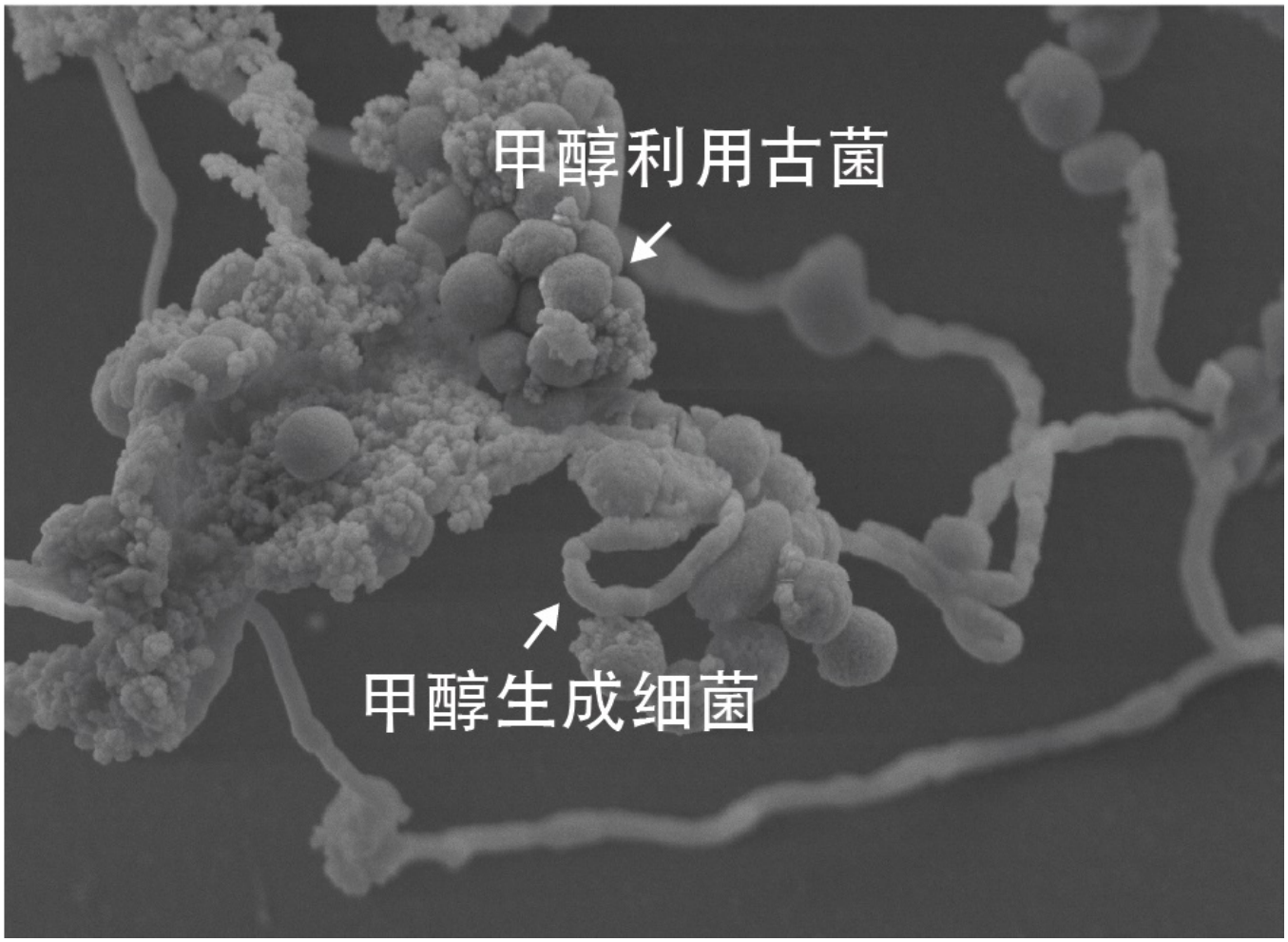
团队成员又一头扎进实验室。

黄艳说，从甲酸到甲醇是一个还原反应，需要消耗电子，按照电子守恒定律，同时需要一个甲酸到二氧化碳的氧化反应为这个还原反应提供电子。“但在我们的实验中没有检测到通常负责这个代谢过程的基因发挥作用。”

这个问题使研究一度陷入僵局。经过反复推敲和论证，他们发现二氧化碳是由一条此前未被报道的“甘氨酸—丝氨酸循环”产生的。和传统认知不尽相同，甚至有一点“南辕北辙”——整个代谢过程先进行还原反应，再进行氧化。“这个途径太神奇了！”黄艳说。

经过几个月的时间，他们终于重构了细菌将甲酸盐转化为甲醇和二氧化碳的代谢途径。而“甘氨酸—丝氨酸循环”与三羧酸循环有许多共同特征。三羧酸循环是一系列至关重要的反应，包括呼吸细胞中的能量产生以及氨基酸等细胞构成要素的合成。

“就好像解数学试卷的压轴题，花了两个小时用各种方法去求解都解不出来，但是找到正确方法后两分钟就解出来了。我们当时都非常兴奋，也终于松了口气。”黄艳说。



甲醇生成细菌和甲醇利用产甲烷古菌合作产甲烷。中国农科院沼气所供图

?

“ 据我们所知，这种代谢过程是首个已知的以甲醇作为主要代谢产物的生物反应。 ”承磊说，从能源角度来看，这种相互作用可能为提高或调控天然气生产提供新的思路。鉴于甲烷是一种强效温室气体，对地下碳循环的更深入理解，也有助于更精确地预测全球甲烷排放将如何影响气候变化。

2022年初，团队首次向《自然》投稿，第一轮审稿专家给了很高的评价，但是需要补充试验数据。这期间黄艳经历了博士答辩，Nobu去了日本国立海洋研究开发机构工作。再加上疫情影响，采集油藏样品、订购标记试剂、重新开展试验……前后又折腾了2年时间。论文最终在2024年12月被正式接收。

“ 论文从投递到接收花了三年时间，多少会影响青年科学家的项目申报和晋升，不过在折腾补充试验的过程中，他们有了新的发现。 ”沼气所所长孟海波说，“ 保持一颗平常心和好奇心，不轻言放弃，这样的磨练对青年人来说，也是成长的必然经历。 ”

与其他互营代谢模式相比，甲醇转移对碳通量的相对贡献也仍未明确。除了此处描述的细菌和代谢途径外，是否还有其他地下甲醇来源，也是未知数。承磊说，这些问题值得继续探讨。

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41586-024-08491-w

研究简报：https://doi.org/10.1038/d41586-025-00199-9

作者：李晨 来源：中国科学报

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发