



噬菌体免疫系统的双面性： 保全耐药宿主但抑制水平转移

张俊亚¹，卢铁东²，唐启河³，陈松灿⁴，Daniel Rios Garza⁵，刘斌¹，崔韵唯³，
魏源送¹，Hans Hermann Richnow⁶

¹中国科学院生态环境研究中心

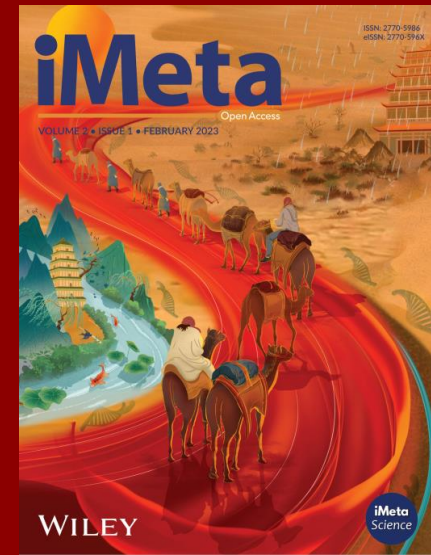
²广西壮族自治区农业科学研究院

³广西大学生命科学与技术学院

⁴浙江大学环境与资源学院

⁵Université Paris-Saclay, France

⁶Leibniz Institute for Tropospheric Research, TROPOS, Germany

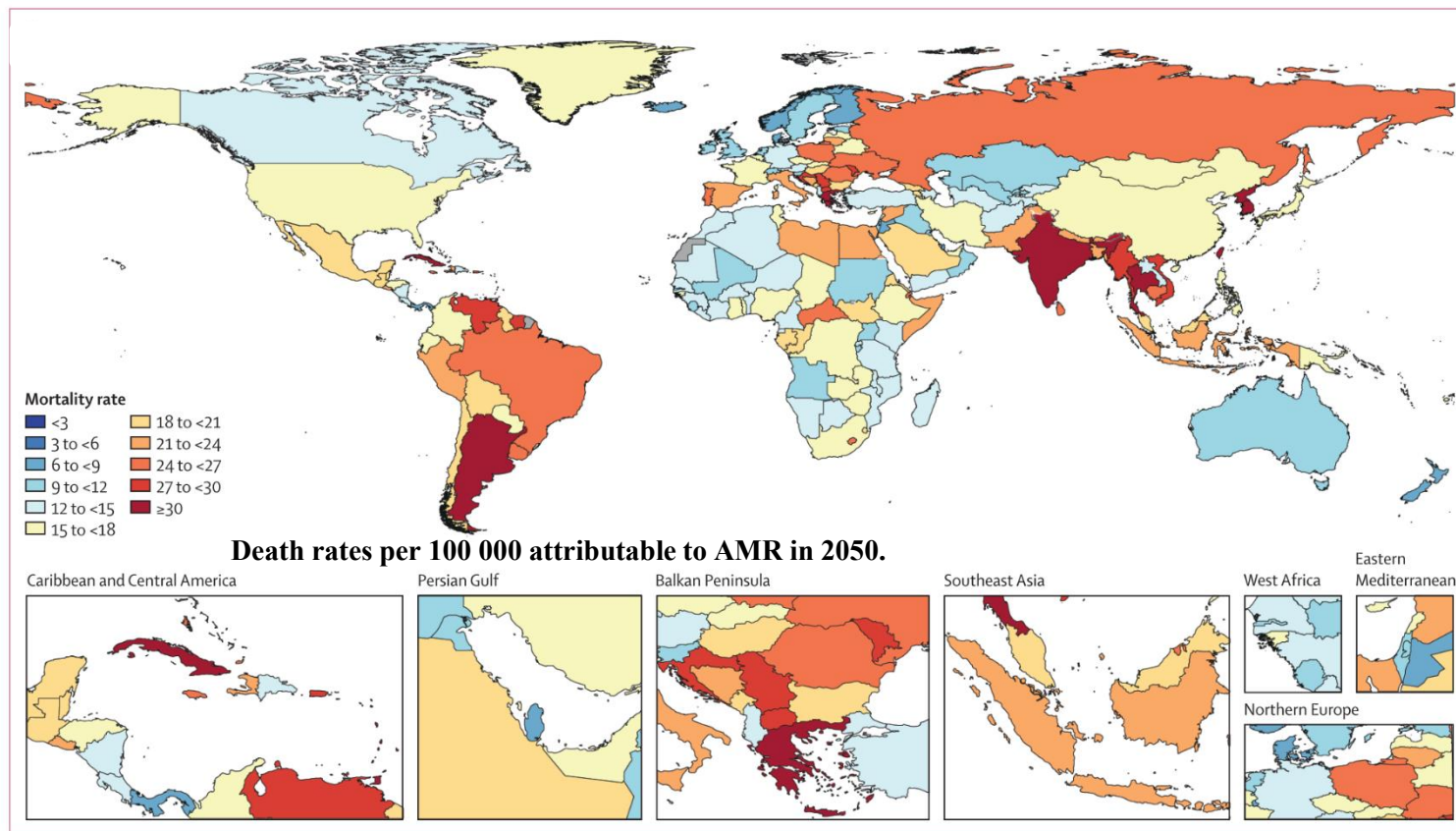


Junya Zhang, Tiedong Lu, Qihe Tang, Song-Can Chen, Daniel Rios Garza, Bin Liu, Yunwei Cui, et al. 2026. Antiviral Defense Systems Drive Persistence of Antimicrobial-Resistant Bacteria but Limit the Transfer of Antimicrobial Resistance Genes in Anaerobic Digestion. *iMeta* 5: e70145. <https://doi.org/10.1002/imt2.70145>



研究背景

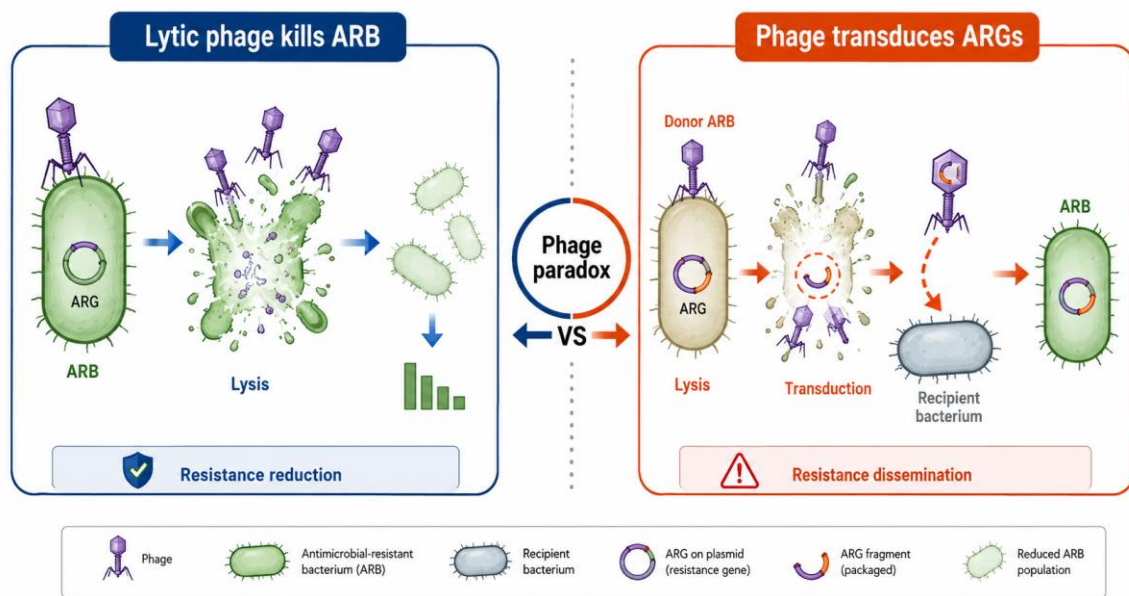
- 抗菌药物耐药性（AMR）是当前严峻的“同一健康”（One Health）危机，2021年全球约有471万例死亡与AMR相关
- 全球约73%的抗生素用于畜禽养殖，其在One Health 框架下扮演重要角色





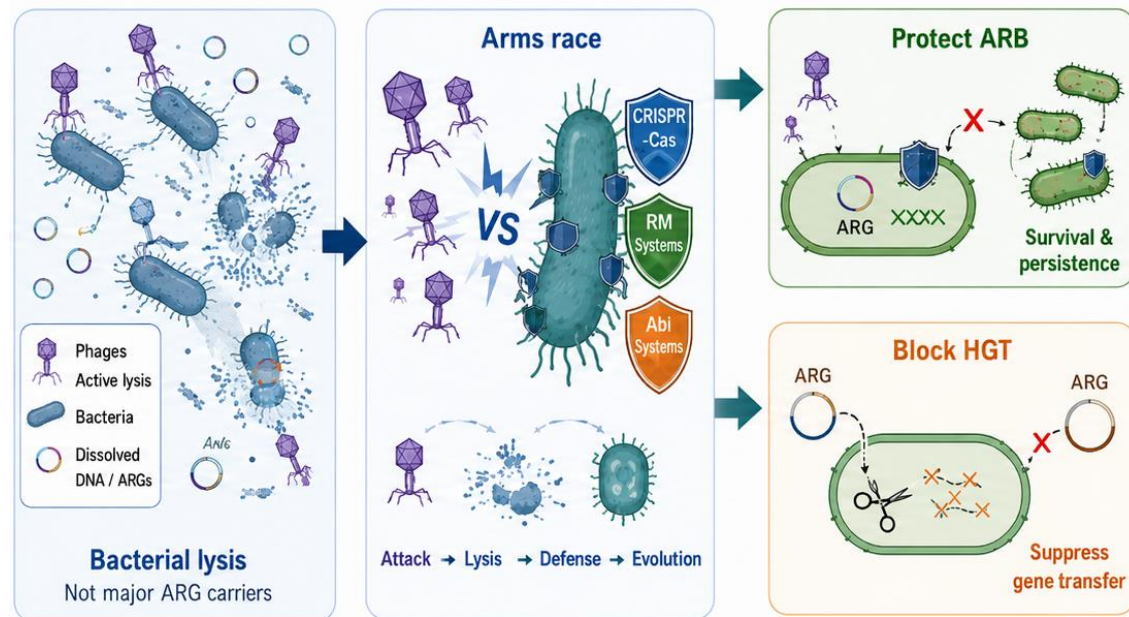
研究背景

噬菌体在AMR传播作用的矛盾：裂解清除 vs 转导传播

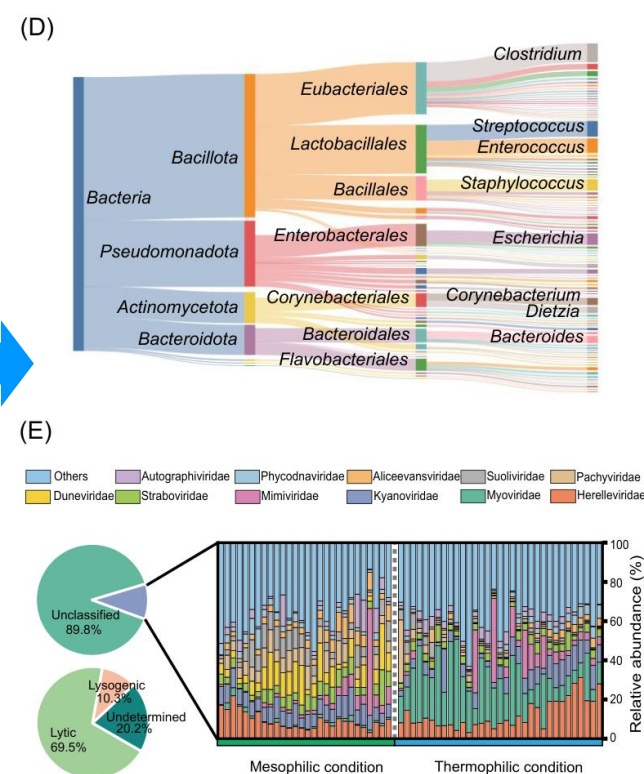
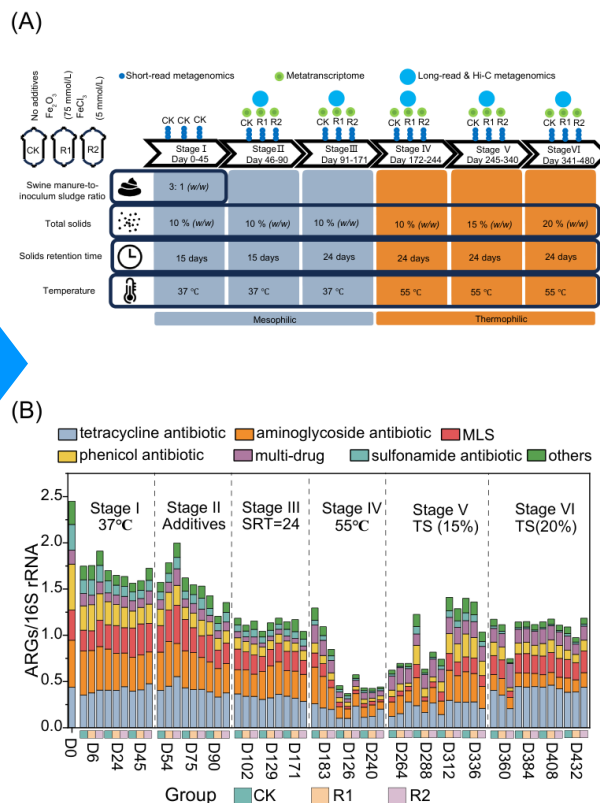


哪个在主导？

ADS在AMR传播的双重性：保护 ARB vs 抑制水平转移



有待证实



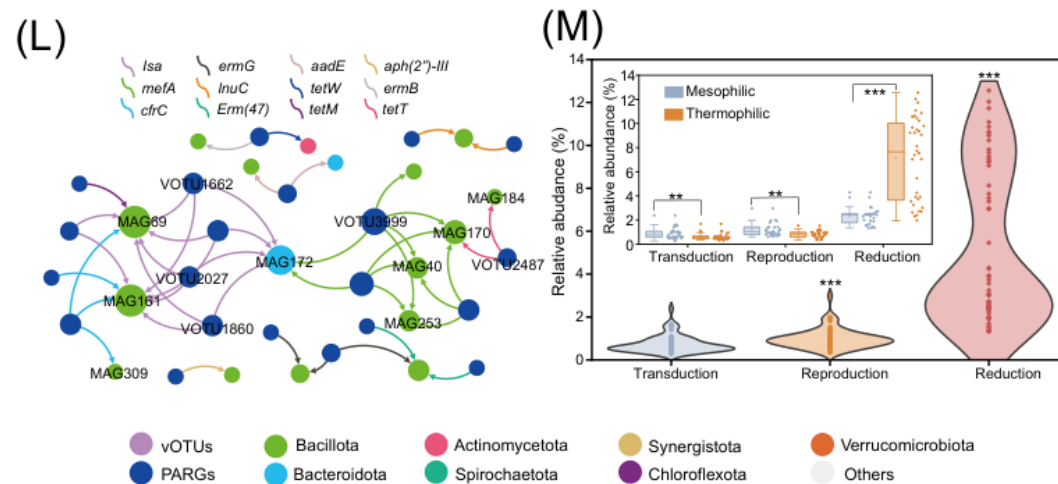
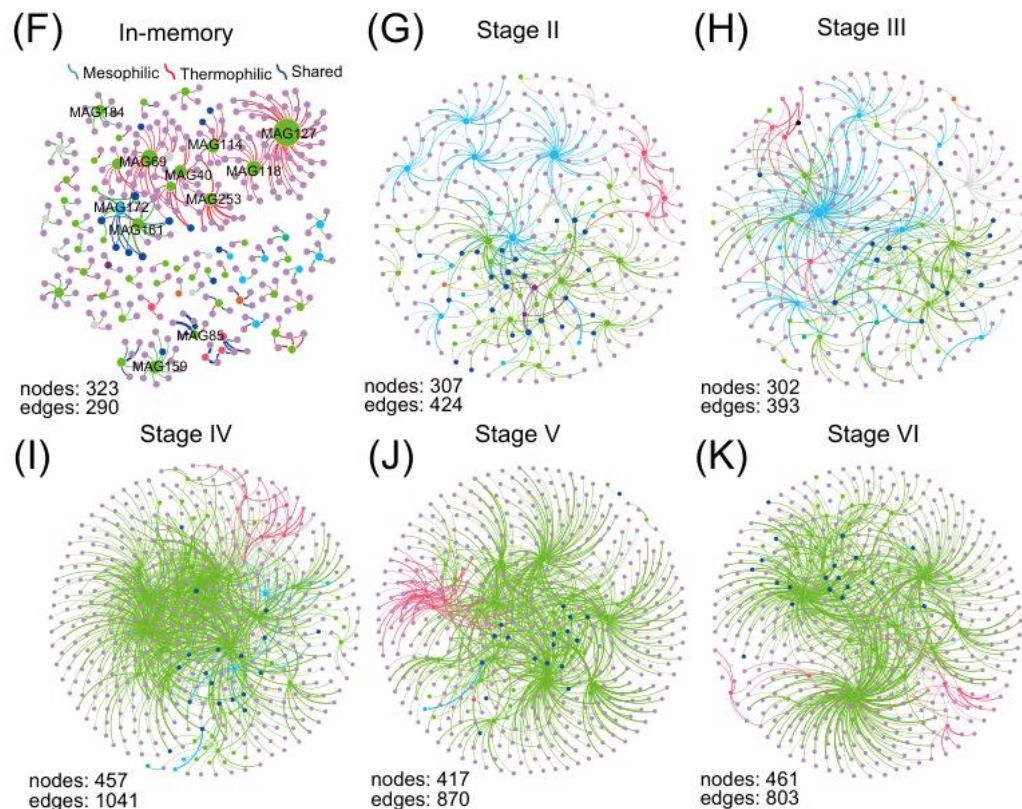
- 存在多样化的未知病毒群落，且**69.5%**为烈性噬菌体



结果一、噬菌体介导的削减>转导

❑ 基于CRISPR-Cas, tRNA和序列同源性构建了噬菌体-宿主历史 (In-memory) 互作关系

❑ 基于Hi-C构建了不同阶段噬菌体-宿主正在进行 (On-going) 互作关系



❑ 发现26个vOTUs携带ARGs, 占总ARGs的 $0.55 \pm 0.32\%$ 和病毒群落的 $2.56 \pm 1.04\%$

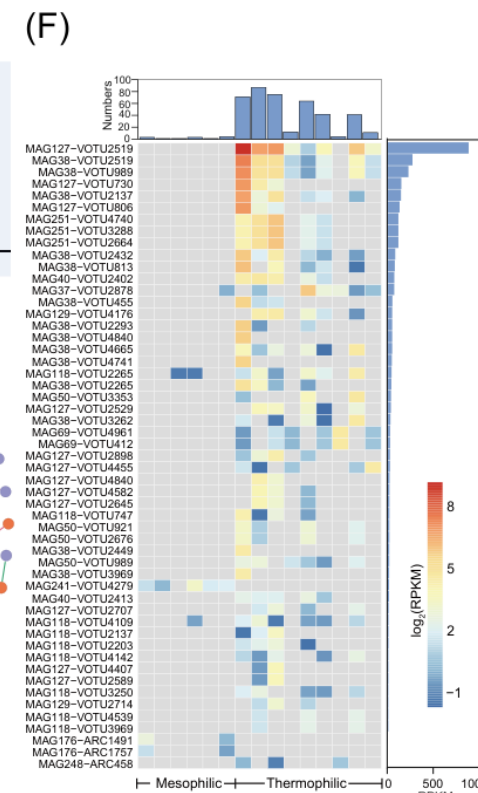
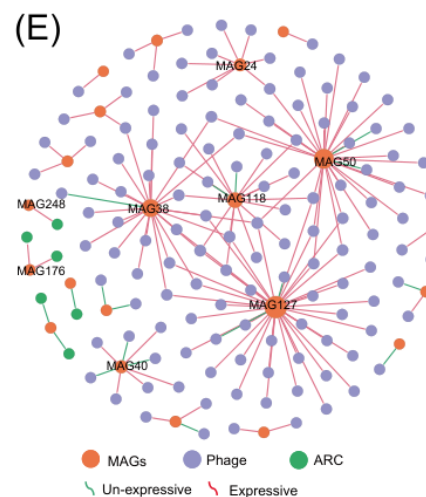
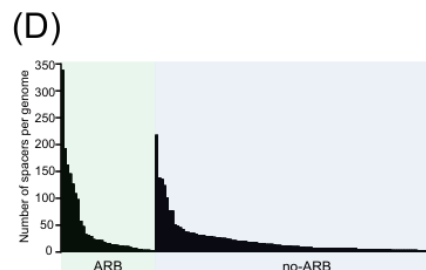
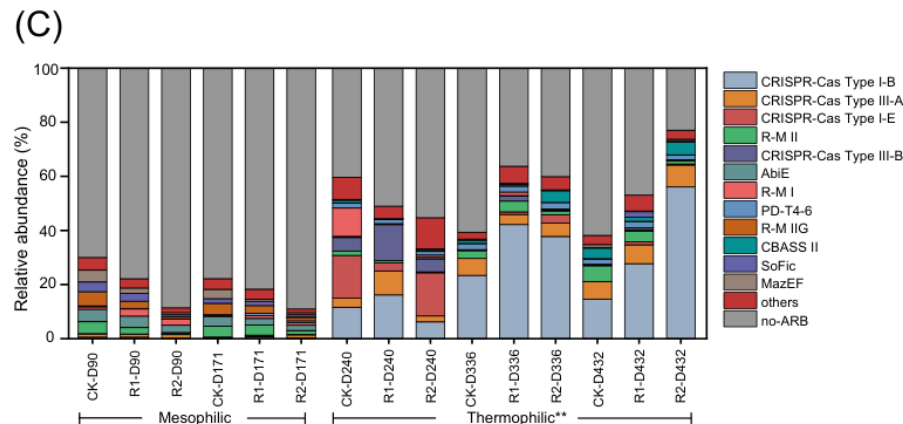
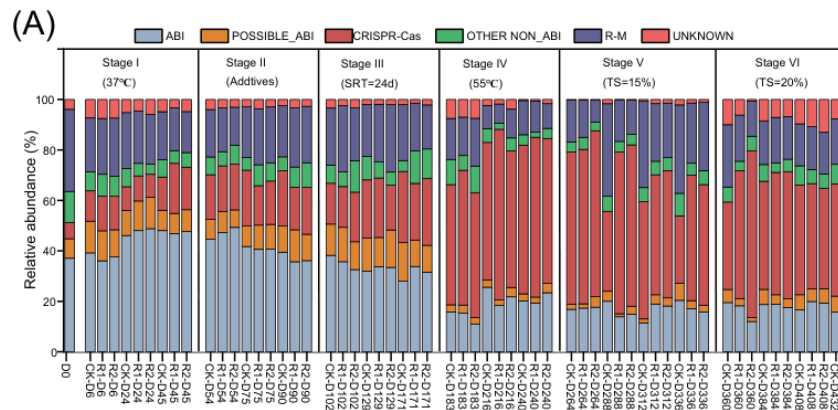
❑ 发现45个转导事件, 且存在不同门之间的转导发生

❑ 削减作用的噬菌体丰度 ($5.16 \pm 3.54\%$) 显著高于参与转导 ($0.74 \pm 0.39\%$) 和复制扩增 ($0.99 \pm 0.45\%$) 的噬菌体 ($p < 0.001$)

❑ 高温厌氧可显著削弱噬菌体对ARGs的转导与扩增能力, 但显著强化了其削减作用



结果二、噬菌体免疫系统的双面性



高温导致ARB中ADS表达的比例从 27.5%增至 46.4%。

ARB中CRISPR-Cas spacers的数量也显著高于非ARB。

CRISPR-Cas免疫网络证明了ARB对噬菌体裂解的免疫作用，并基于 spacer的表达，证明了确实正在发生。

CRISPR-Cas对携带 ARGs的contigs也具有靶向作用，说明了其对 ARGs水平转移的抑制作用。

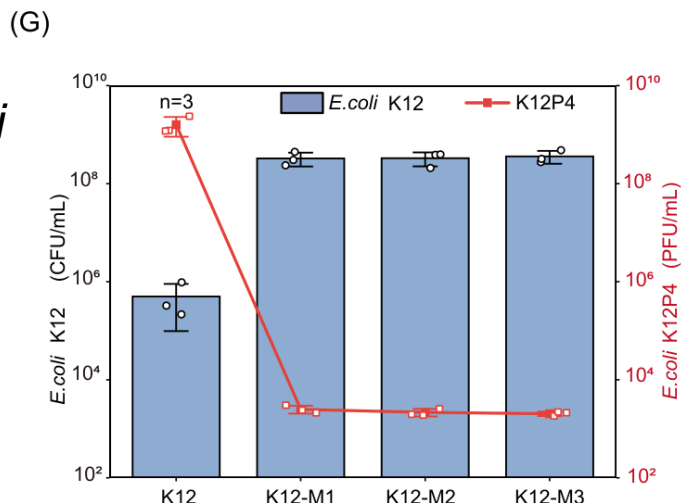
ADS广泛存在，以ABI，CRISPR-CAS和R-M系统为主，并在进入高温期后CRISPR-Cas得到显著富集。

平均而言，每个ARB携带4.5个ADS，显著高于非ARB的3.7个 ($p < 0.05$)。

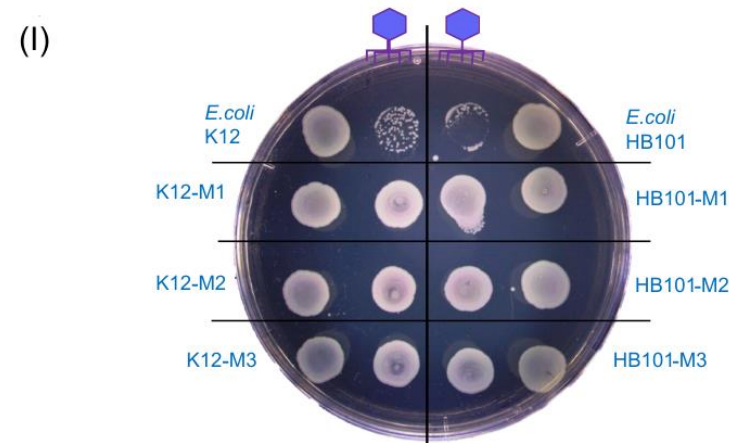


结果二、噬菌体免疫系统的双面性

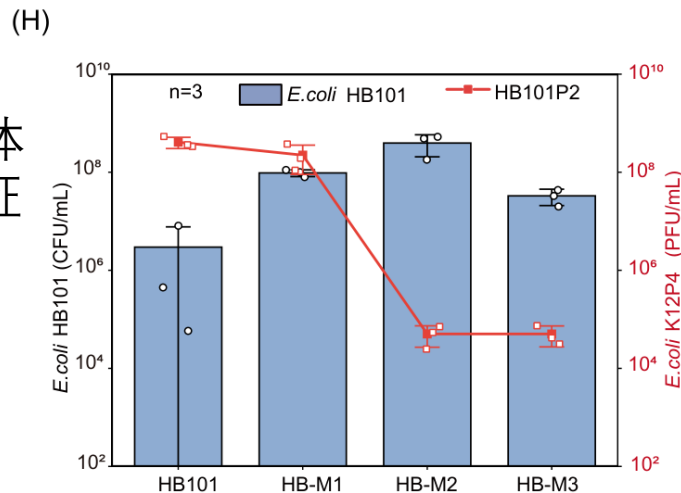
□ 供体: *E. coli* K12噬菌体免疫菌株验证



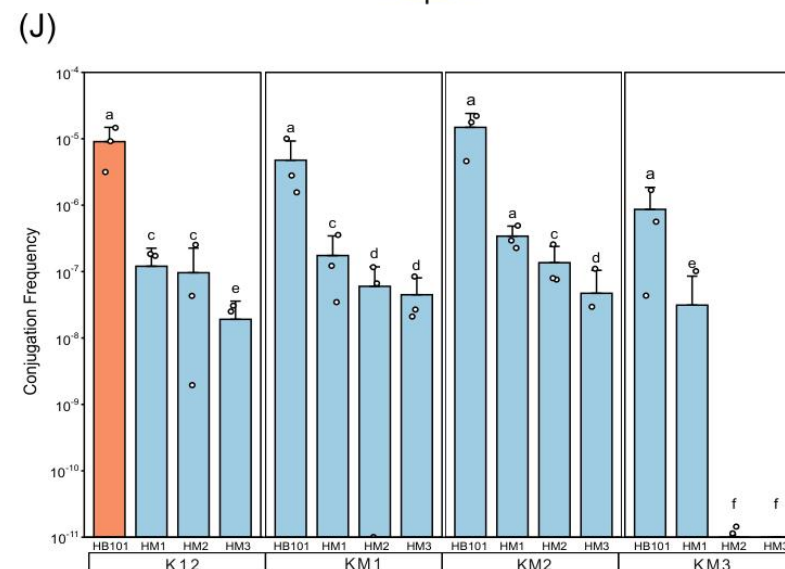
□ 噬菌体免疫菌株的表型验证



□ 受体: *E. coli* HB101噬菌体免疫菌株验证



□ 噬菌体免疫的产生显著降低了接合转移频率

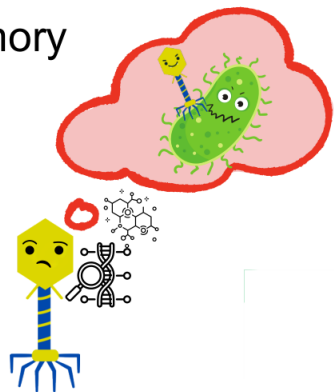


□ 噬菌体免疫发生后, 相较于野生型配对, 其通过接合转移获取RP4质粒的频率显著降低了 **98.7%–99.8%** (从 9.05×10^{-6} 跌至 1.91×10^{-8} , $p < 0.05$)。

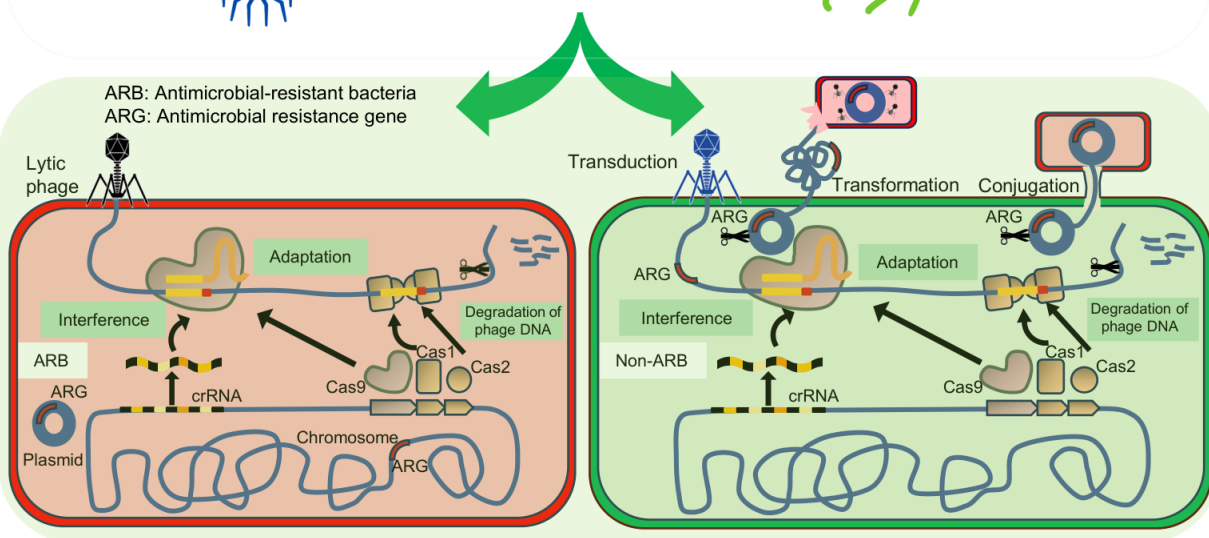
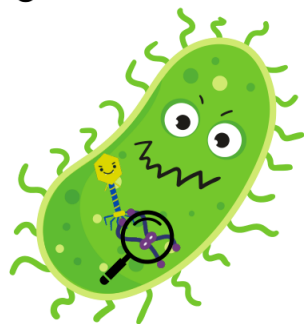


总结

In memory



On going



- 整合短/长读长宏基因组、宏转录组和Hi-C原位互作，并结合体外接合验证，系统解析了噬菌体-宿主军备竞赛对厌氧消化中**ARGs**归趋的影响。
- 发现噬菌体携带**ARGs**的比例较低，转导事件罕见，噬菌体更多是在**削减ARGs**而非其传播载体。
- 揭示了**ADS**的双重生态作用，一方面保护**ARB**免受噬菌体裂解并促进其长期赋存，另一方面抑制质粒介导的**ARGs**水平转移。

Junya Zhang, Tiedong Lu, Qihe Tang, Song-Can Chen, Daniel Rios Garza, Bin Liu, Yunwei Cui, et al. 2026. Antiviral Defense Systems Drive Persistence of Antimicrobial-Resistant Bacteria but Limit the Transfer of Antimicrobial Resistance Genes in Anaerobic Digestion. *iMeta* 5: e70145. <https://doi.org/10.1002/imt2.70145>

iMeta(宏): 生物和医学顶级成果发表平台

iMeta WILEY



iMeta(宏)期刊由宏科学创办，对标**Cell**的生物/医学综合期刊，**SCIE**、**PubMed**收录，影响因子(IF)44.4，位列全球第47，中国第4，**分区表生物学1区Top**，外审平均21天，投稿至发表中位数87天(比同水平期刊快3倍)，欢迎高影响力的研究、方法和综述投稿，CNS外审稿件可带意见和回复转投。

iMetaOmics (宏组学)，定位IF>15对标**NC/SA**的生物/医学综合期刊，已被**ESCI**、**PubMed**等收录。

iMetaMed (宏医学)定位IF>15的医学综合期刊，欢迎投稿！



主页: <http://www.imeta.science>

出版社: <https://wileyonlinelibrary.com/journal/imeta>

iMeta: <https://wiley.atyponrex.com/journal/IMT2>

投稿: iMetaOmics: <https://wiley.atyponrex.com/journal/IMO2>

iMetaMed: <https://wiley.atyponrex.com/journal/IMM3>



office@imeta.science

imetaomics@imeta.science



宣传片



iMeta



更新日期
2026/6/17