



细菌来源基因的驯化调控昆虫肠道微生物稳态并促进宿主适应

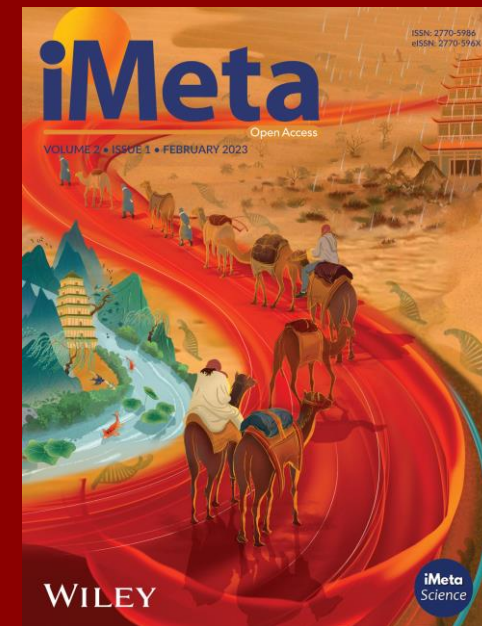
Domesticated bacterial origin genes regulate homeostasis of the insect gut microbiome and empower adaptation

张振甲[#] | 张宇博[#] | 赵坤[#] | 程光远 | 卢之皓 | 王东铜 | 刘轶群 | 吴建国 | 王丽英 | 张礼生 | 叶昕海 | 俞立 | 张蔚* | 李毅*

福建农林大学农林生物安全全国重点实验室
福建农林大学媒介病毒研究中心
北京大学生命科学学院

[#] 共同第一作者 (Equal contribution)

* 通讯作者 (Correspondence) : liyi@pku.edu.cn (李毅) ;
weizhangvv@pku.edu.cn (张蔚)



Zhenjia Zhang, Yubo Zhang, Kun Zhao, Guangyuan Cheng, Zhihao Lu, Dongju Wang, Yiqun Liu, et al. 2026.
Domesticated bacterial origin genes regulate homeostasis of the insect gut microbiome and empower adaptation.
iMeta 5: e70179. <https://doi.org/10.1002/imt2.70179>



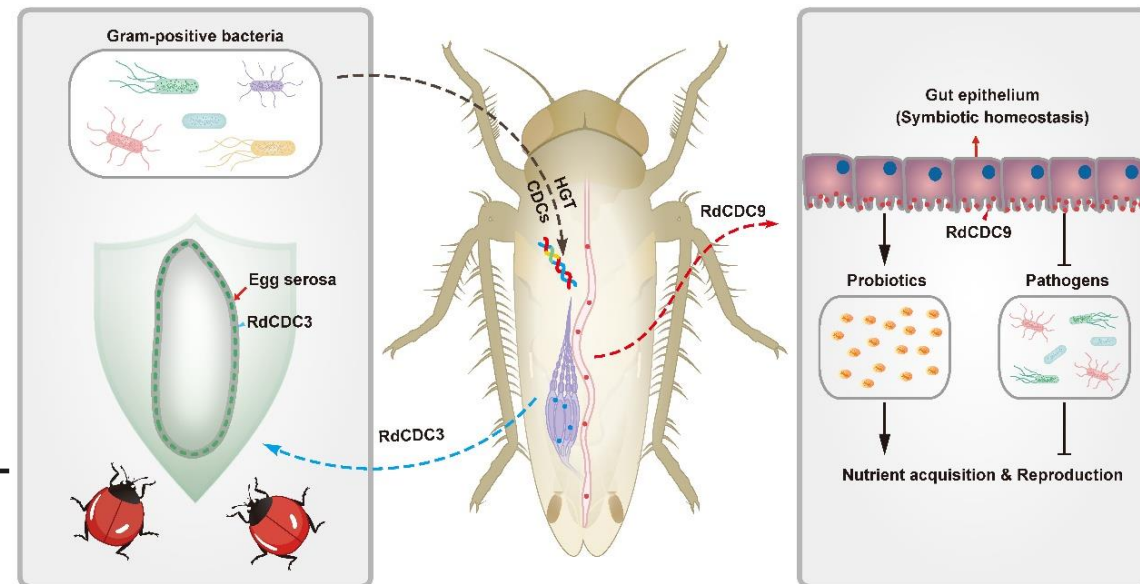
刺吸式昆虫：物种高度多样，食性和生活史独特

- 兼具猎物、传粉者和病原媒介等多重生态角色，关系生物多样性与农业安全
- 叶蝉科（Cicadellidae）：**超过2万个物种**
- 重要的农业害虫，植物病原体的主要昆虫媒介
- 研究昆虫、共生菌、植物和病原体之间复杂相互作用的理想系统
- 研究体系：三种代表性叶蝉——**电光叶蝉、黑尾叶蝉、二条黑尾叶蝉**
- 整合比较基因组、宏基因组、生物信息、分子生物和生物化学及行为学研究



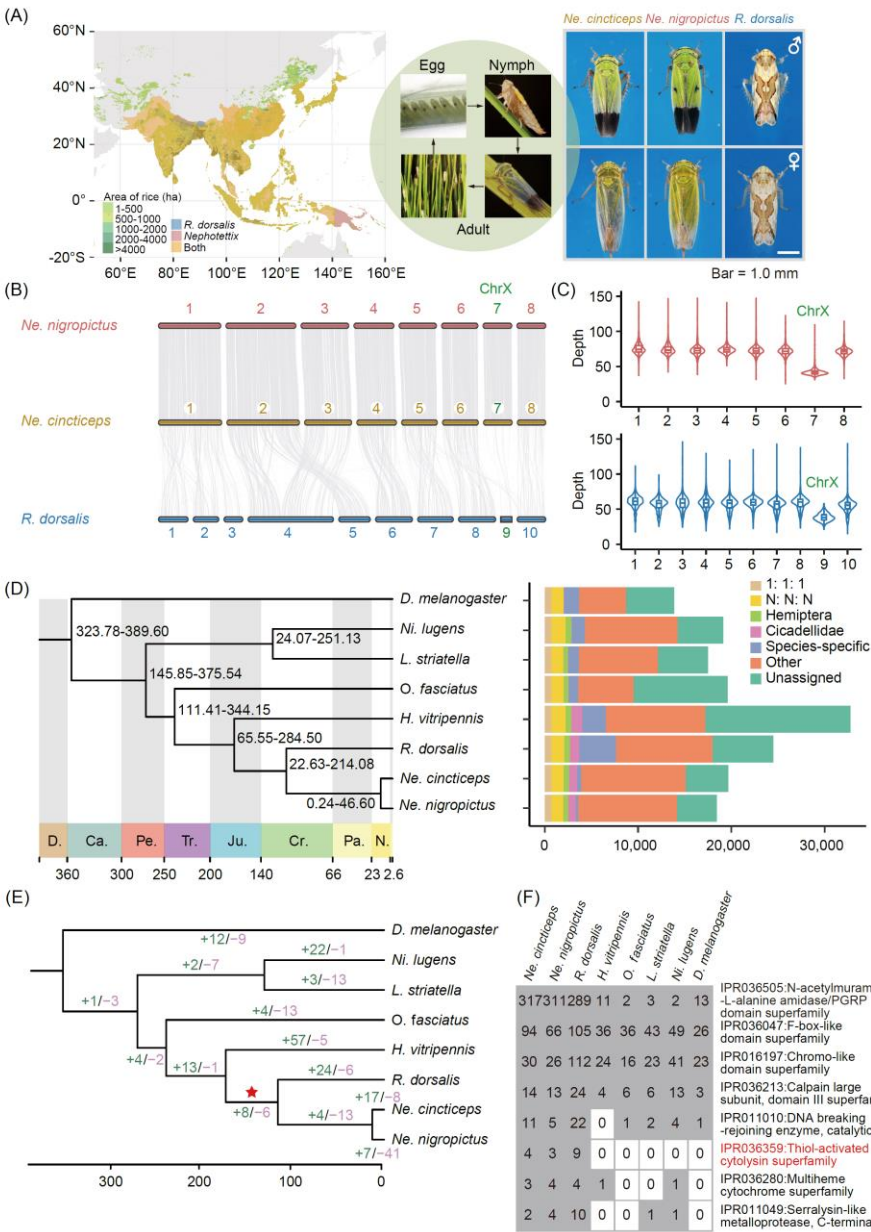
核心发现

- ① 叶蝉通过**水平基因转移 (HGT)** 从革兰氏阳性菌获得**胆固醇依赖性细胞溶素 (CDC)** 基因
- ② 保守且有毒的 CDC 特异性表达于**卵的浆膜**, 作为抵御天敌的**防御武器**
- ③ 无毒 CDC 获得新功能: 特异表达于**肠道**, 可能参与维持**肠道菌群稳态**, 调节叶蝉生长发育
- ④ 外源基因的驯化与分化从多方面**提高了叶蝉的适合度**





叶蝉基因组结构与跨物种比较

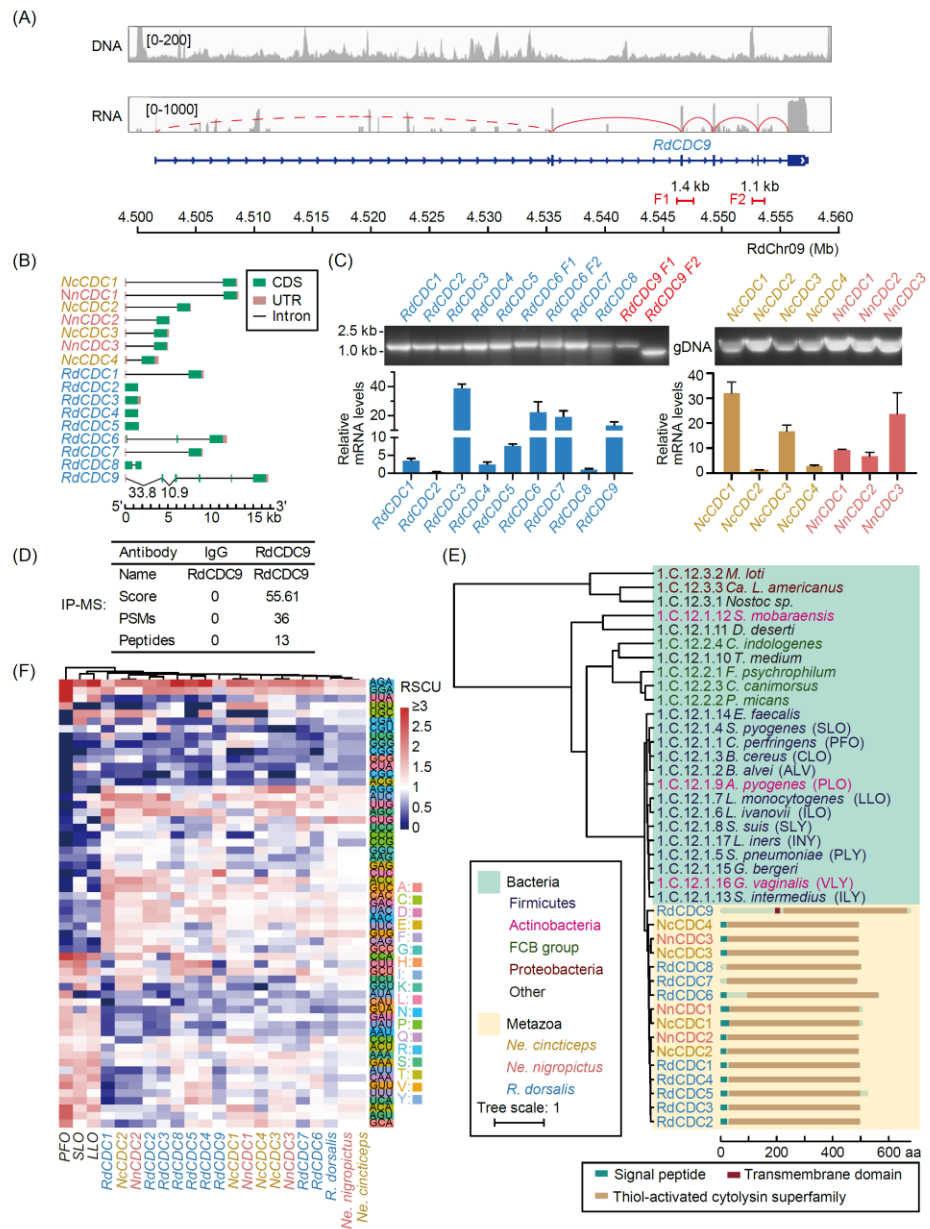


染色体水平基因组表明叶蝉存在 *CDC* 基因

- PacBio + Illumina + Hi-C 组装：
黑尾叶蝉 788 Mb、二条黑尾叶蝉 770 Mb、电光叶蝉 1223 Mb
- 性染色体相对保守
- 硫醇激活细胞溶素（*CDC*）超家族仅存在于叶蝉中——此前未在任何真核生物基因组中发现
- 推测：*CDC* 基因来自细菌的水平基因转移



CDC 基因来自细菌水平转移

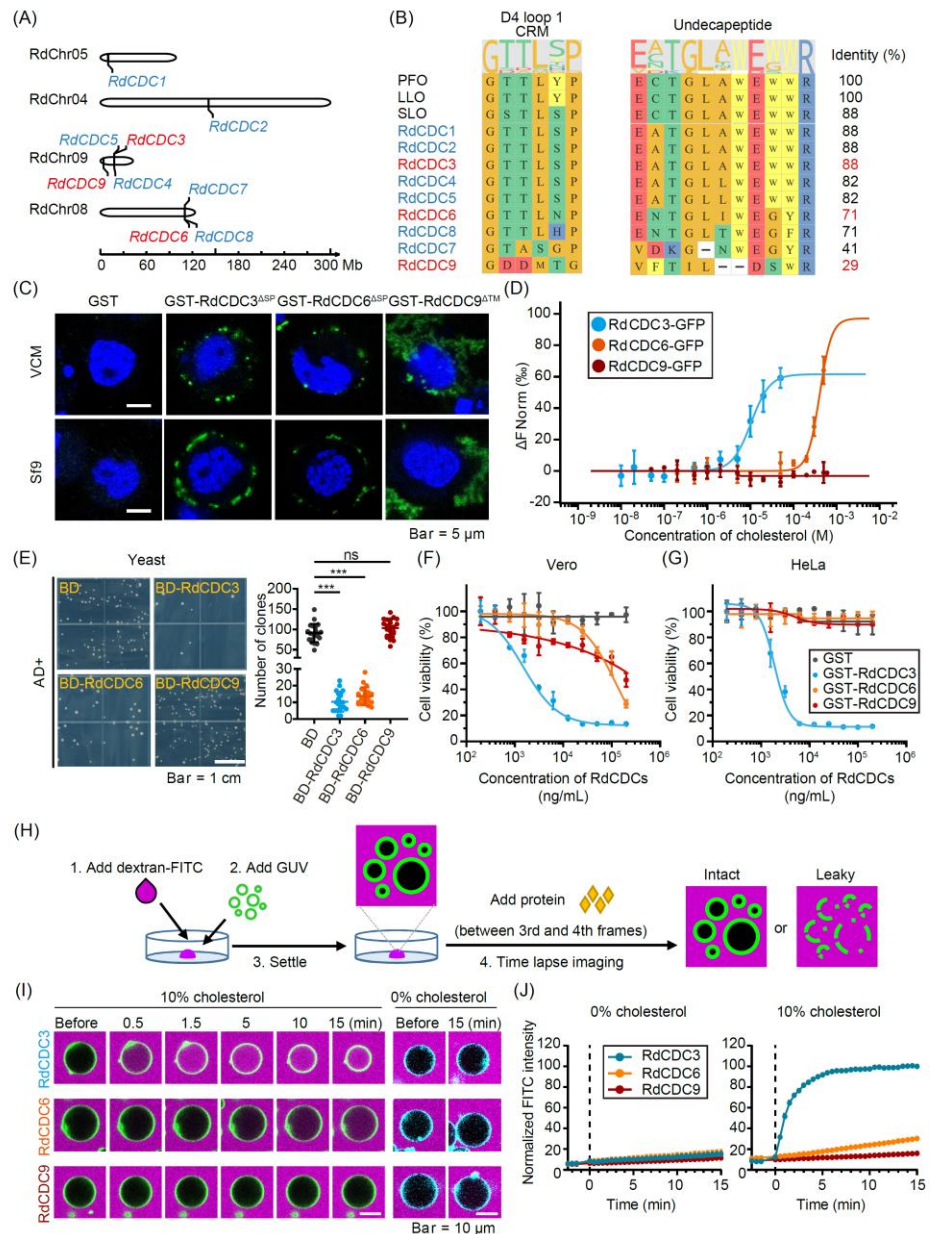


系统发育、基因结构与蛋白序列支持 HGT 起源

- 基因结构经分子克隆、PCR 和蛋白质谱验证
- 系统发育：叶蝉 CDC 与革兰氏阳性菌经典 CDC 分支聚类
- 存在于所有被检测的**角顶叶蝉**亚科物种中
- 具有**内含子**结构，密码子偏好性接近**叶蝉**基因
- 部分拷贝存在**正选择**信号和序列突变



RdCDC 存在细胞毒性分化

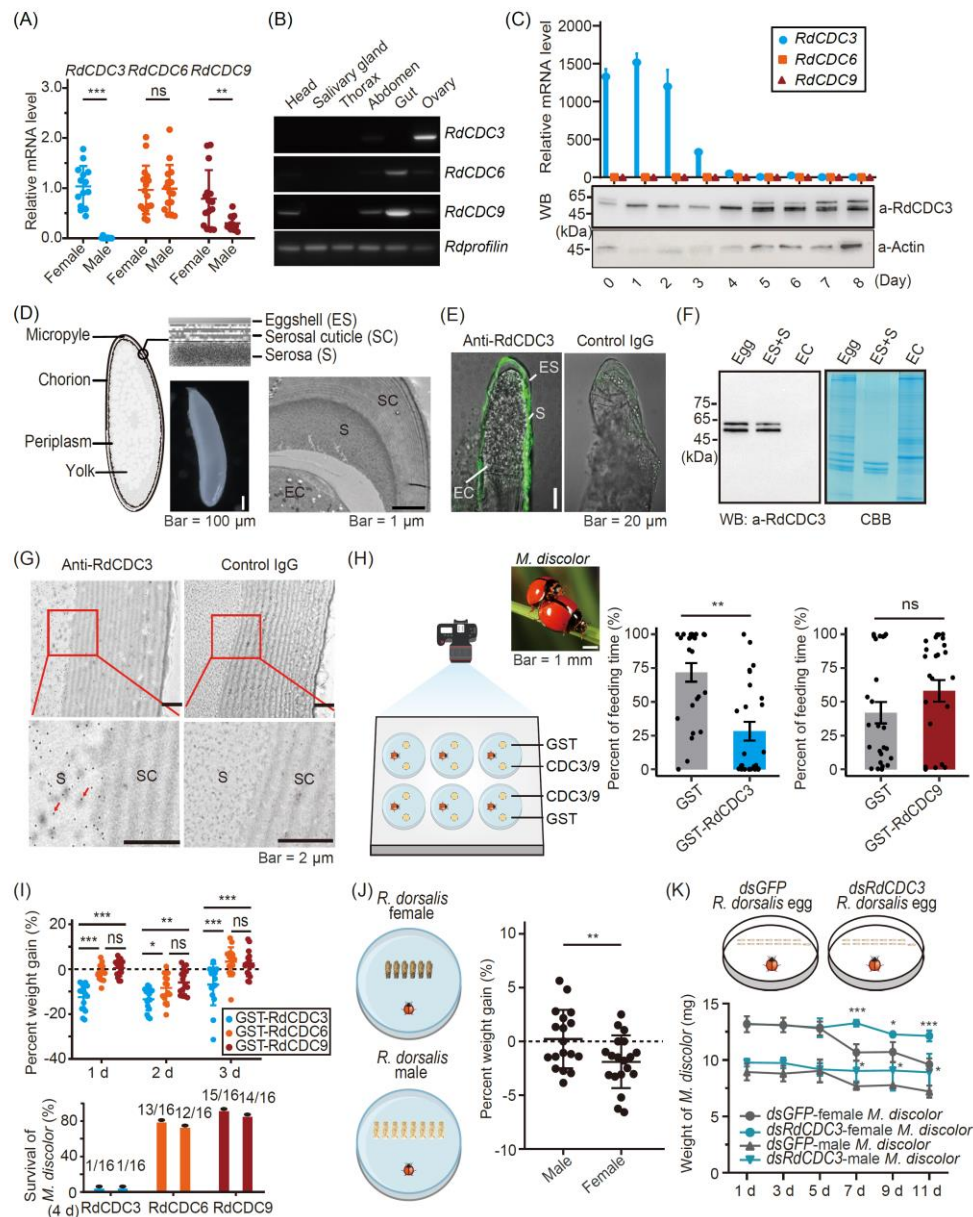


RdCDC3: 强胆固醇结合与高细胞毒性

- 选择三个代表性基因: RdCDC3、RdCDC6、RdCDC9
- RdCDC3 强结合胆固醇 (K_d : 6.8 μ M)、高细胞毒性 (IC_{50} : 1–3 μ g/mL)
- RdCDC6 较弱; RdCDC9 完全丧失
- 巨型单层脂质体 (GUV) 体系: 成孔活性严格依赖膜胆固醇
- RdCDC3 的成孔作用强于细菌 CDC



RdCDC3 保护叶蝉卵，抵御天敌



RdCDC3 具有卵壳表达模式，有效减少取食

- *RdCDC3* 主要在雌虫，特别是卵巢和卵中表达
- IF 和 WB 表明其特异性表达于卵壳
- 免疫金标记结果进一步证实其表达于浆膜

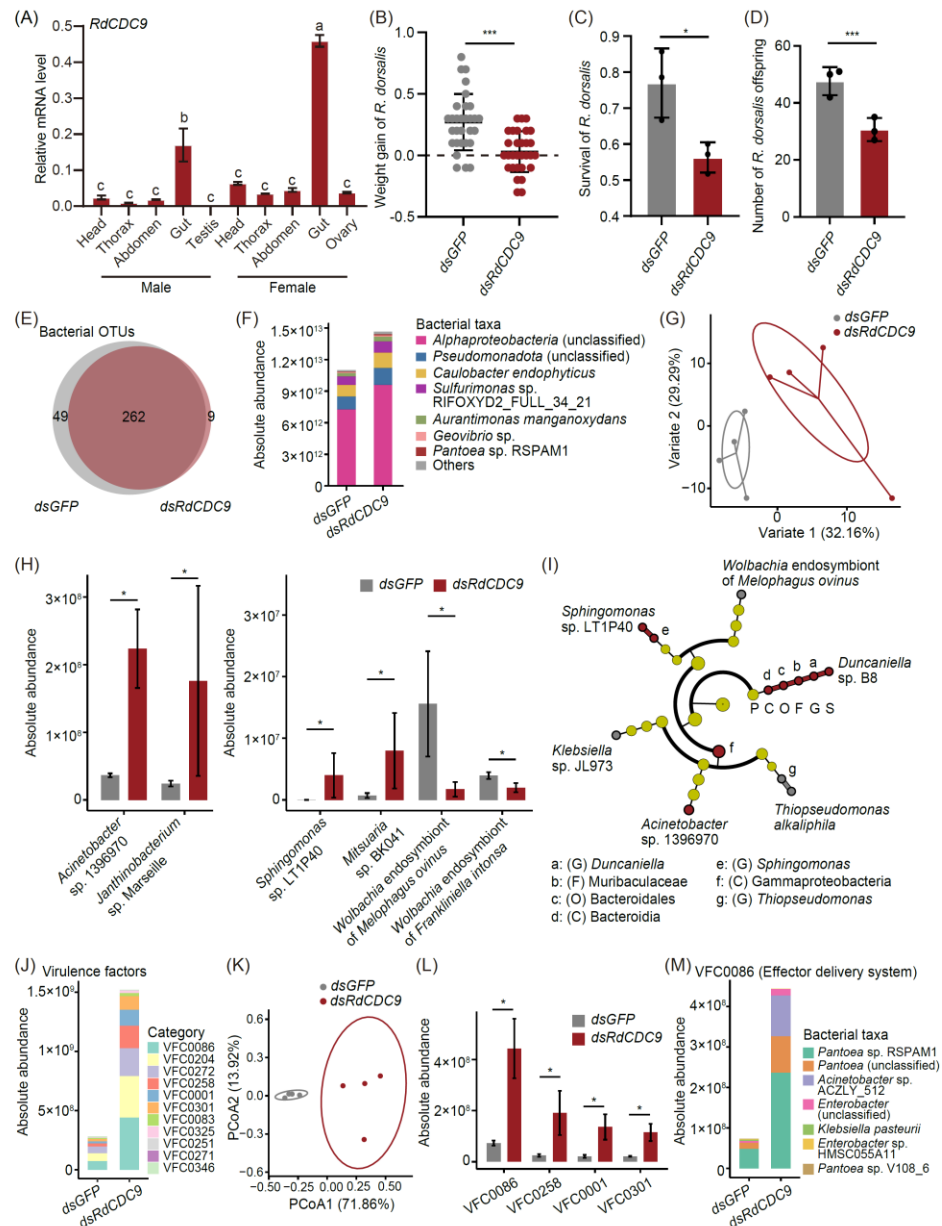
取食实验：天敌瓢虫对含 *RdCDC3* 食物的取食时间显著缩短

微量注射 *RdCDC3* 降低瓢虫的存活率和体重增长

精密调控：对宿主无害、对天敌有毒——保护后代



RdCDC9 维持肠道菌群稳态

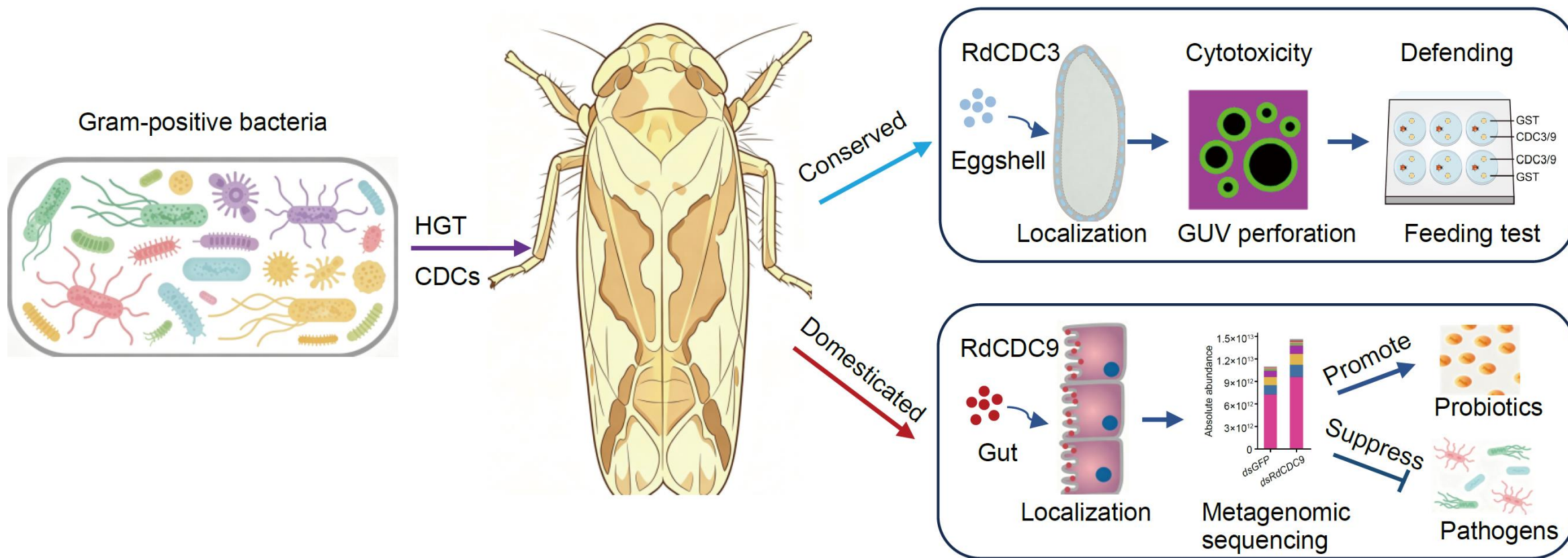


RdCDC9 调节叶蝉生长发育

- *RdCDC9* 特异表达于肠道
- 沉默 *RdCDC9* 后体重、存活率和产卵量显著降低
- 宏基因组：核心菌群相对稳定
- PLS-DA 分析两组明显分离
- 沉默后潜在致病菌和毒力因子绝对丰度显著升高



外源基因驯化与功能分化模型



保守有毒的 RdCDC3 → 卵防御

| 驯化的 RdCDC9 → 菌群稳态



主要结论

- 叶蝉经 **HGT** 从细菌获得 **CDC** 基因，随后发生**驯化和功能分化**
- 有毒 CDC：**卵浆膜表达、防御功能**；无毒 CDC：**肠道表达、新的分子和生理功能**
- 昆虫借用**外源基因产生演化创新**获得适合度优势
- 系统性追溯同一受体基因组中外源基因的演化历史及功能特征
- 为可持续害虫治理提供新思路

Zhenjia Zhang, Yubo Zhang, Kun Zhao, Guangyuan Cheng, Zhihao Lu, Dongju Wang, Yiqun Liu, et al. 2026.
Domesticated bacterial origin genes regulate homeostasis of the insect gut microbiome and empower adaptation.
iMeta 5: e70179. <https://doi.org/10.1002/imt2.70179>

论文相关领域专家名单

序号	姓名	所属单位	电子邮箱	序号	姓名	所属单位	电子邮箱
1	康乐	中国科学院	lkang@ioz.ac.cn	16	陈剑平	宁波大学	jpchen2001@126.com
2	沈星星	浙江大学	xingxingshen@zju.edu.cn	17	张守科	浙江农林大学	socrazhang@zafu.edu.cn
3	叶恭银	浙江大学	chu@zju.edu.cn	18	徐乐天	湖北大学	xuletian@hubu.edu.cn
4	张友军	中国农业科学院	zhangyoujun@caas.cn	19	吴少英	海南大学	wsywsy6000@hainanu.edu.cn
5	程功	清华大学	gongcheng@tsinghua.edu.cn	20	崔峰	中国科学院	cuif@ioz.ac.cn
6	王四宝	中国科学院	sbwang@cemps.ac.cn	21	张莉莉	中国科学院	zhangll@im.ac.cn
7	郭兆将	中国农业科学院	guozhaojiang@caas.cn	22	孙玉成	中国科学院	sunyc@ioz.ac.cn
8	栾军波	沈阳农业大学	jbluan@syau.edu.cn	23	魏太云	福建农林大学	weitaiyun@fafu.edu.cn
9	夏吉星	中国农业大学	jixingxia@cau.edu.cn	24	王宪辉	中国科学院	wangxh@ioz.ac.cn
10	詹帅	中国科学院	szhan@cemps.ac.cn	25	王慧东	河南大学	wanghd@henu.edu.cn
11	王文	西北工业大学	wwang@mail.kiz.ac.cn	26	赵婉	中国科学院	zhaow@ioz.ac.cn
12	张雅林	西北农林科技大学	yalinzh@nwsuaf.edu.cn	27	张晓明	中国科学院	xmzhang@genetics.ac.cn
13	王进军	西南大学	wangjinjun@swu.edu.cn	28	王少丽	中国农业科学院	wangshaoli@caas.cn
14	李飞	南京农业大学	lifei@njau.edu.cn	29	韩民锦	西南大学	minjinhan@126.com
15	王义平	浙江农林大学	wyp@zafu.edu.cn	30	姜枫	中国科学院	jiangf@biols.ac.cn



“iMeta” launched in 2022 by iMeta Science Society, **impact factor (IF) 44.4**, **ranking top 47/22643 in the world**. It aims to publish innovative and high-quality papers with broad and diverse audiences. Its scope is similar to *Cell*, *Nature* and *Science*. Its unique features include video abstract, bilingual publication, and social media with 800,000 followers. Indexed by [SCIE/ESI](#), [PubMed](#), [Google Scholar](#) etc.

“iMetaOmics” launched in 2024, indexed by [ESCI](#), [PubMed](#), [Google Scholar](#), with a **target IF>15**, and its scope is similar to *Nature Communications*, *Science Advances*, *Advanced Science*, *Nucleic Acids Research*, etc.

“iMetaMed” launched in 2025, with a target IF>15, similar to *Med*, *Cell Reports Medicine*, *eBioMedicine*, *eClinicalMedicine* etc.



Society: <http://www.imeta.science>

Publisher: <https://wileyonlinelibrary.com/journal/imeta>

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

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

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



[iMetaScience](#)



[iMetaScience](#)



office@imeta.science

imetaomics@imeta.science



[Promotion Video](#)

Update
2026/6/17