



# 合成微生物群落ARC耦合抑制黄曲霉毒素与促进根瘤菌-豆科植物结瘤

张奇<sup>1,2</sup>, 王涛<sup>2</sup>, 唐晓倩<sup>1</sup>, 岳晓凤<sup>1</sup>, 梁美娟<sup>1</sup>, 张晓君<sup>1</sup>, 韩琴<sup>1</sup>, 周扬<sup>1</sup>, 李培武<sup>1,3</sup>

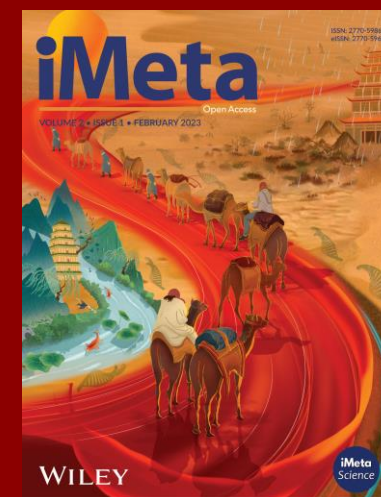
<sup>1</sup>中国农业科学院油料作物研究所,

农业农村部油料作物生物学与遗传改良重点实验室,

农业农村部真菌毒素检测重点实验室

<sup>2</sup>湖北洪山实验室

<sup>3</sup>湘湖实验室

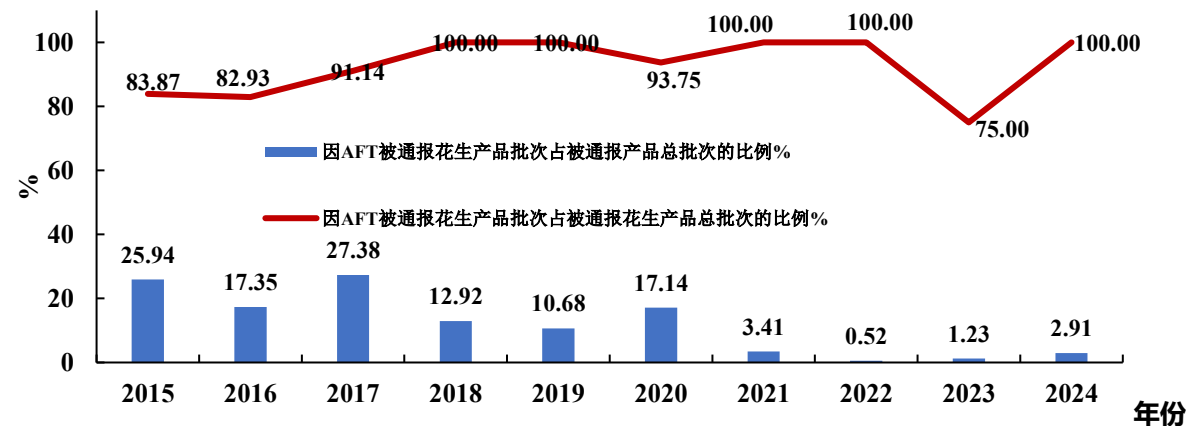


Qi Zhang, Tao Wang, Xiaoqian Tang, Xiaofeng Yue, Meijuan Liang, Xiaojun Zhang, Qin Han, et al. 2026. Microbial Synthetic Community ARC Prevents Aflatoxin and Increases Rhizobia-Legume Nodulation Couplingly. *iMeta* 5: e70125.

<https://doi.org/10.1002/imt2.70125>

# 背景简介：豆科作物提质增产保安全面临两大共性国际难题

- 以豆科花生为例，花生是我国重要的粮、油、饲兼用作物，提升产能是国家重大战略需求
- 共性难题1：**易受黄曲霉毒素污染，威胁粮食安全与生命健康。** 毒性最大、致癌力最强真菌毒素，I类致癌物





# 花生大田生产结瘤少，结瘤固氮减肥增产百年未解难题

- 共性难题2: **结瘤固氮、减肥增产是百年未解的世界性前沿热点难题**
- 花生等豆科作物具备与根瘤菌**共生固氮习性**，生物固氮约占全球总固氮量的90%，但大田环境下结瘤较少



1910年德国根瘤菌产品

- 1886年，Hermann公开报道豌豆根瘤固氮
- 1895年，世界首个根瘤菌产品在德国问世
- 1950年，陈华癸院士开创国内生物固氮研究
- 1900年-2025年5月，125年11.8万篇论文（外9.6万/中2.2万）  
Nature 174篇、Science 122篇、Cell 19篇，CNS共315篇
- 已报道200多个基因参与豆科植物-根瘤菌共生固氮
- AON理论：Peter Gresshoff\*, 1986  
过多结瘤抑制生长发育，过多结瘤导致产量下降

花生主产区河南花生饱果期结瘤情况



# 探明花生黄曲霉毒素污染主要源头是土壤带菌

- 本团队对中国花生产区黄曲霉发生与分布进行20年系统性监测研究
- 揭示产毒菌、土壤气候等53因素与黄曲霉污染时空关联，发现**土壤中的黄曲霉是主要污染源**

| 贡献率顺序 | 2009年              | 2010年              | 2011年              | 2012年              | 2013年              | 2014年              | 2015年              |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1     | $T_{\min}$         | $AT_{10}$          | $T_{\min}$         | $T_{\max}$         | $AT_{10}$          | $RH_{\min}$        | $AT_{10}$          |
| 2     | $AT_{10}$          | $T_{\text{mean}}$  | $AT_{10}$          | $AT_{10}$          | $T_{\max}$         | $T_{\max}$         | $T_{\text{mean}}$  |
| 3     | $RH_{\min}$        | R                  | $T_{\text{mean}}$  | R                  | $T_{\min}$         | $T_{\min}$         | $T_{\max}$         |
| 4     | $T_{\text{mean}}$  | $RH_{\min}$        | R                  | $T_{\text{mean}}$  | R                  | $AT_{10}$          | R                  |
| 5     | $T_{\max}$         | $T_{\min}$         | S                  | $RH_{\min}$        | SA                 | R                  | SA                 |
| 6     | R                  | $T_{\max}$         | $RH_{\min}$        | S                  | $T_{\text{mean}}$  | $T_{\text{mean}}$  | $RH_{\min}$        |
| 7     | S                  | S                  | $T_{\max}$         | $RH_{\text{mean}}$ | $RH_{\text{mean}}$ | $RH_{\text{mean}}$ | $T_{\min}$         |
| 8     | $AT_{20}$          | $RH_{\text{mean}}$ | $RH_{\text{mean}}$ | SA                 | S                  | S                  | S                  |
| 9     | SA                 | $AT_{20}$          | SA                 | $AT_{20}$          | $RH_{\min}$        | SA                 | $AT_{20}$          |
| 10    | $RH_{\text{mean}}$ | SA                 | $AT_{20}$          | $T_{\min}$         | $AT_{20}$          | $AT_{20}$          | $RH_{\text{mean}}$ |

# 发现花生根际黄曲霉毒素产毒真菌与根瘤菌呈“跷跷板”效应

- 根际微生物组分析发现，土壤中的曲霉属和根瘤菌属的丰度呈现此消彼长的“跷跷板”效应

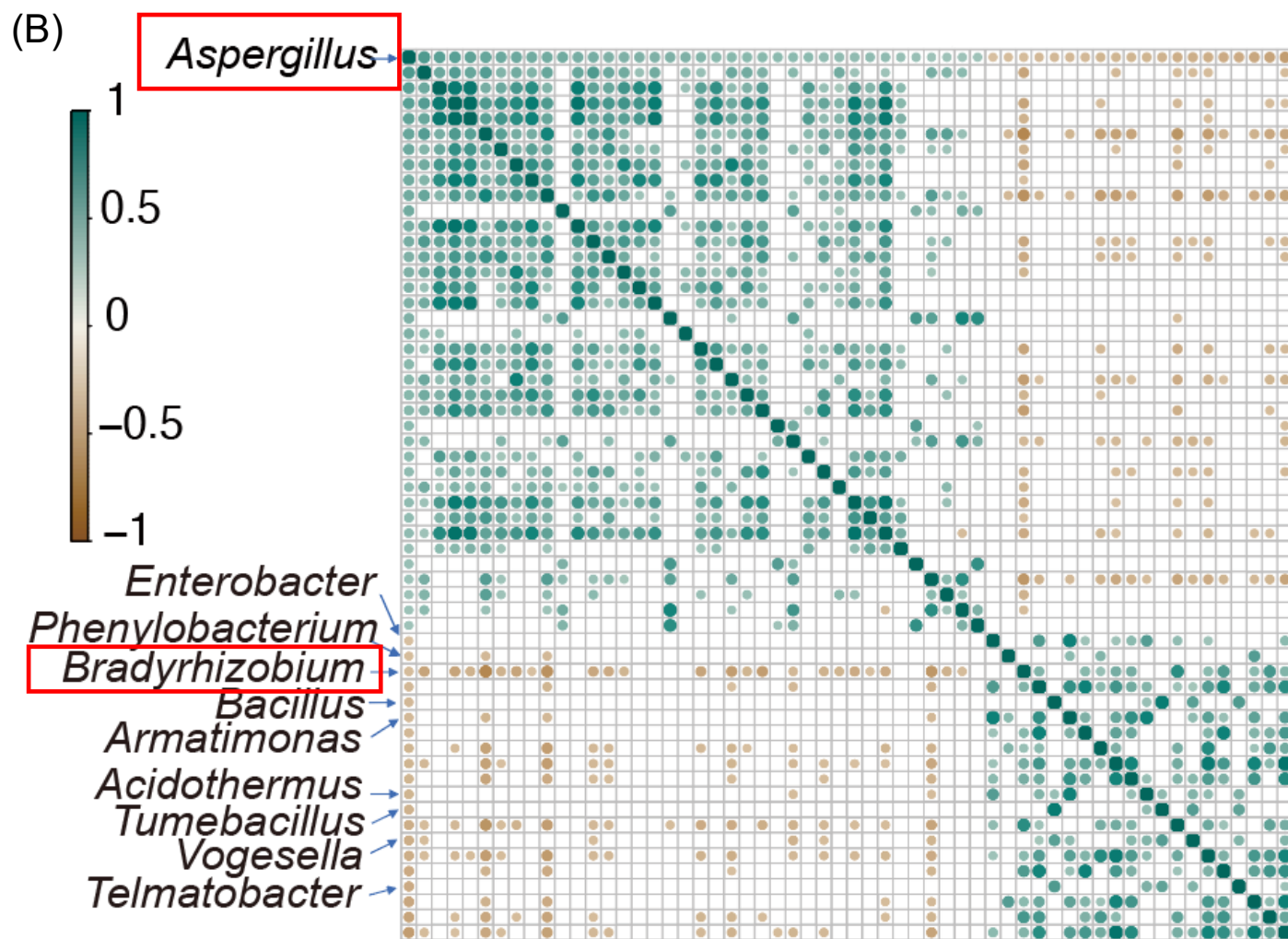
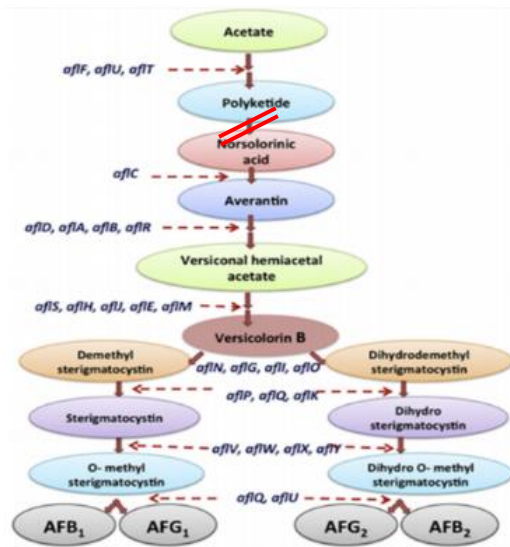


图1(B) 不同地区根际微生物属水平的相关性分析

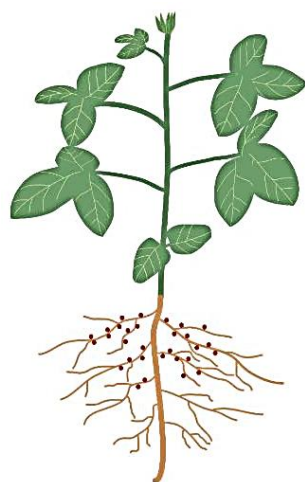


# 研究概述——提出耦合研究科学设想

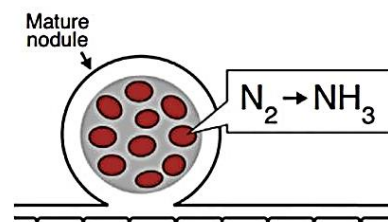
- 一种技术能够同时解决两个问题的科学设想：**将黄曲霉毒素的土壤源头阻控与促进结瘤-固氮进行生物耦合**



上游阻断黄曲霉毒素合成通路



花生结瘤固氮





# 揭示花生根际微生物组结构，挖掘耦合功能潜在目标菌

- 根际微生物组分析发现，有20个属与曲霉属丰度呈显著负相关，其中8个属与根瘤菌无显著负相关，为**候选耦合菌属**

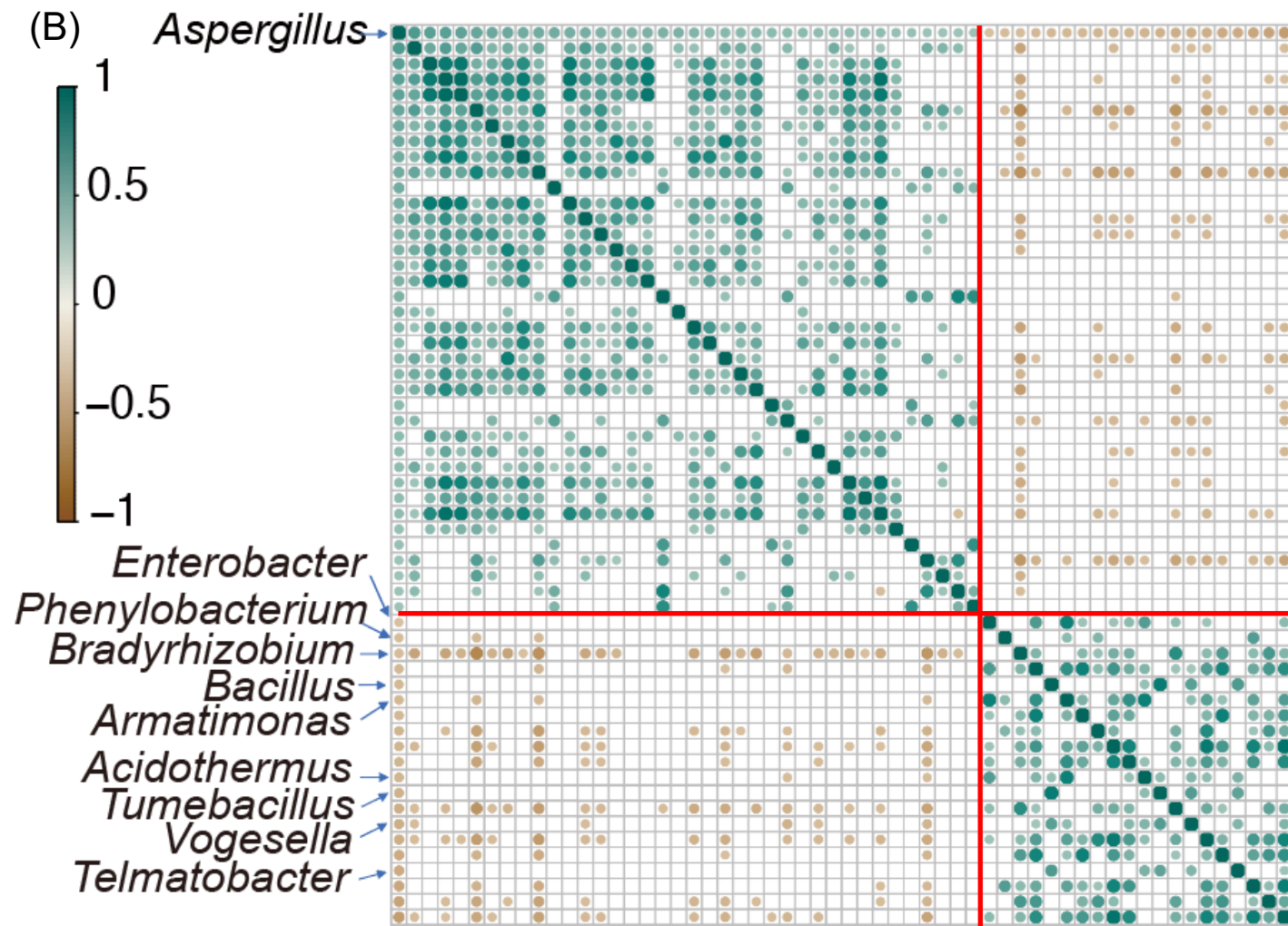
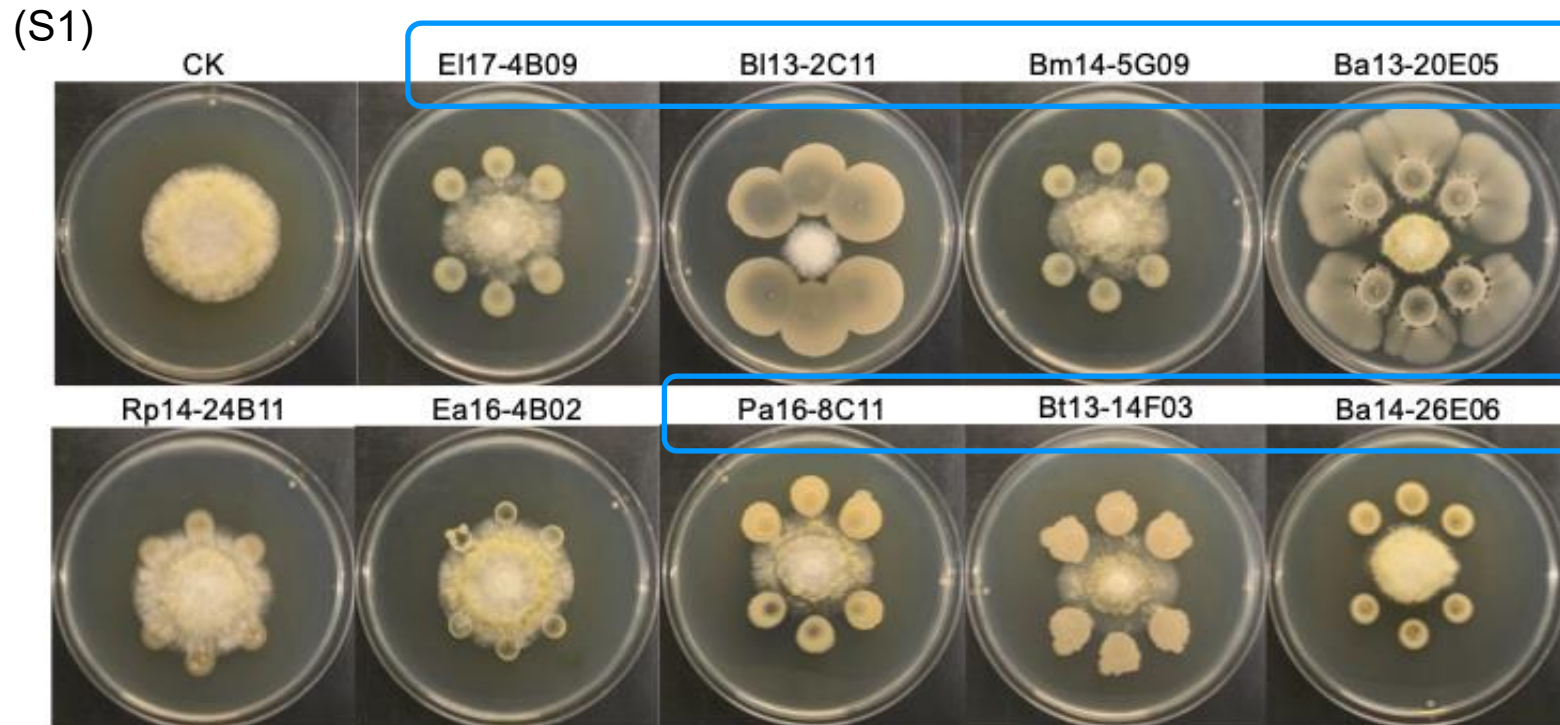


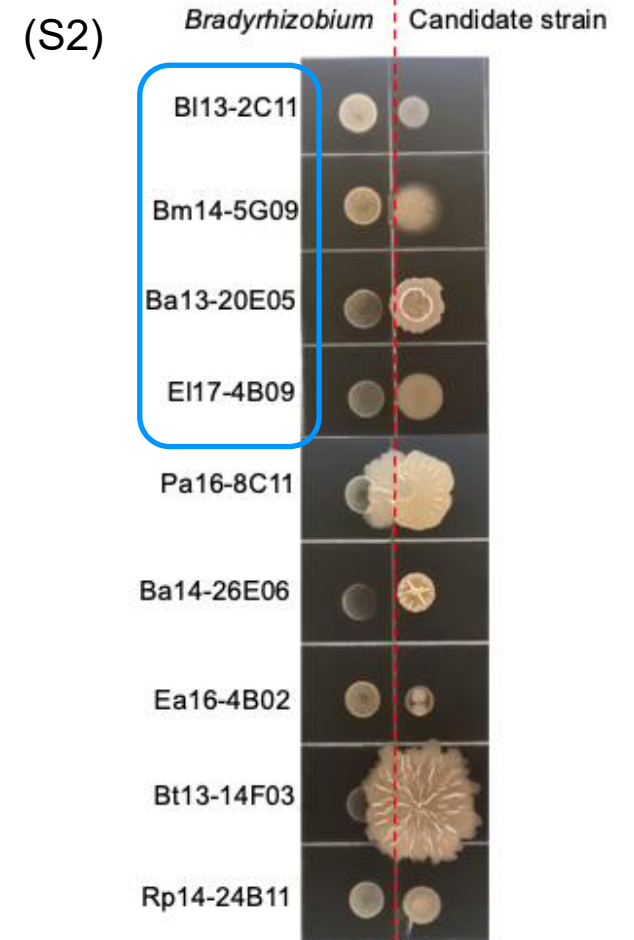
图1(B) 不同地区根际微生物属水平的相关性分析

# 分离与鉴定建株，功能表征与验证，层层遴选，获代表性4株菌株

- 通过培养组学技术，分离到上述8个属的**127个**菌株
- 与黄曲霉液体共摇培及平板对峙试验：**6株芽孢杆菌和1株肠杆菌**能够抑制黄曲霉菌丝生长，3株菌抑制根瘤菌生长
- 综合抗真菌活性和根瘤菌兼容性，获代表性**3株芽孢杆菌与1株肠杆菌**，用于后续合成群落组配研究



图S1 9株候选菌株与黄曲霉的平板对峙试验



图S2 9株候选菌株与慢生根瘤菌的共培养

# ▶ 众多组配功能表征：3个芽孢杆菌+1个路德维希希肠杆菌组合最佳

- 利用上述4株菌株构建了多个合成群落组合并进行了功能表征
- 与单菌株及其他组合相比，包含**全部4株菌株的合成群落对黄曲霉的抑制效果最优**
- 田间试验进一步表明，**该组合诱导的花生根瘤数量最多**

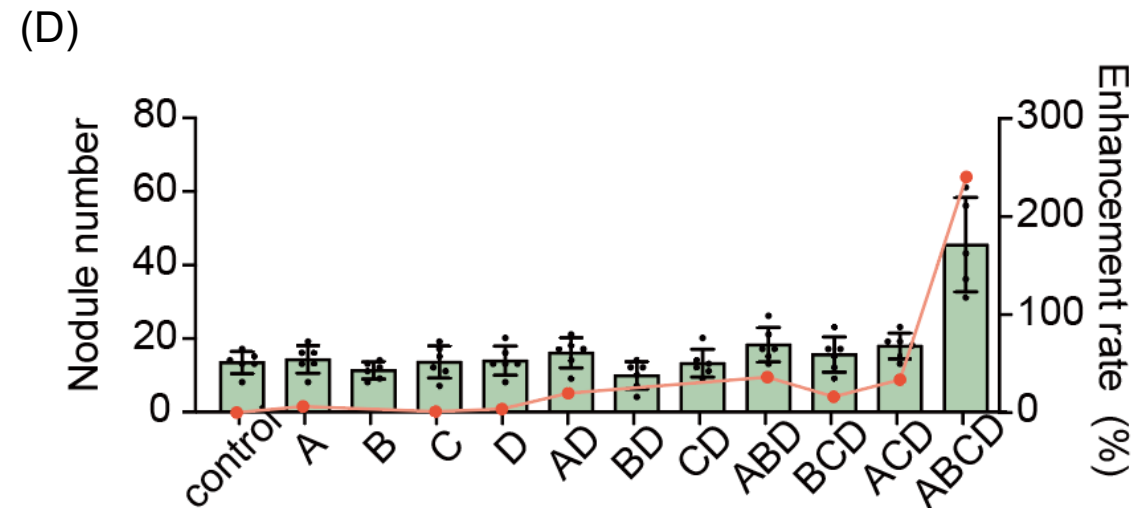
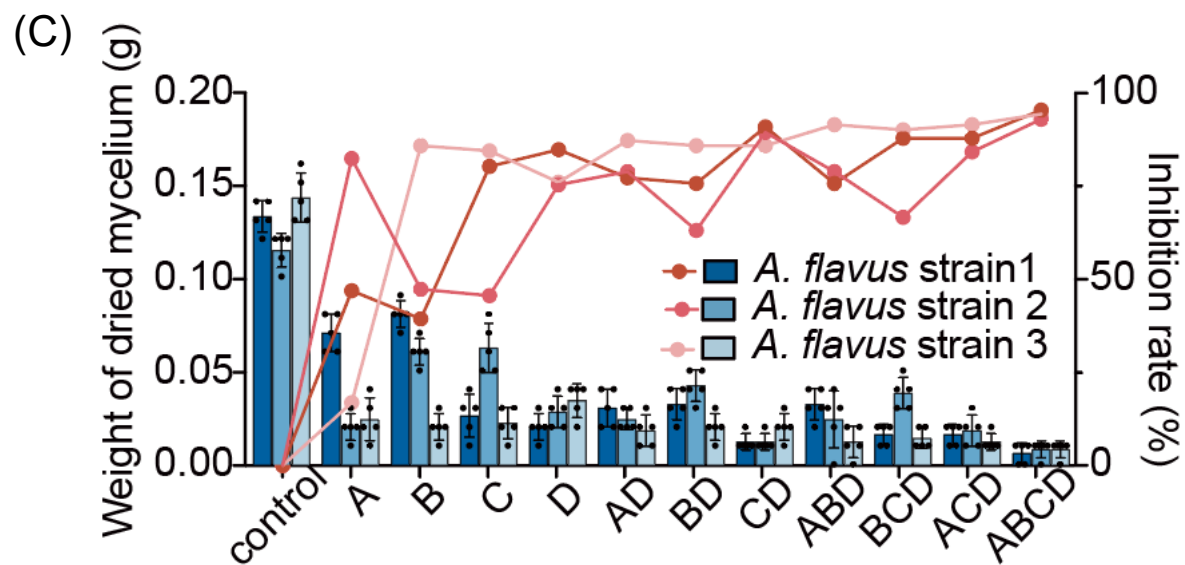
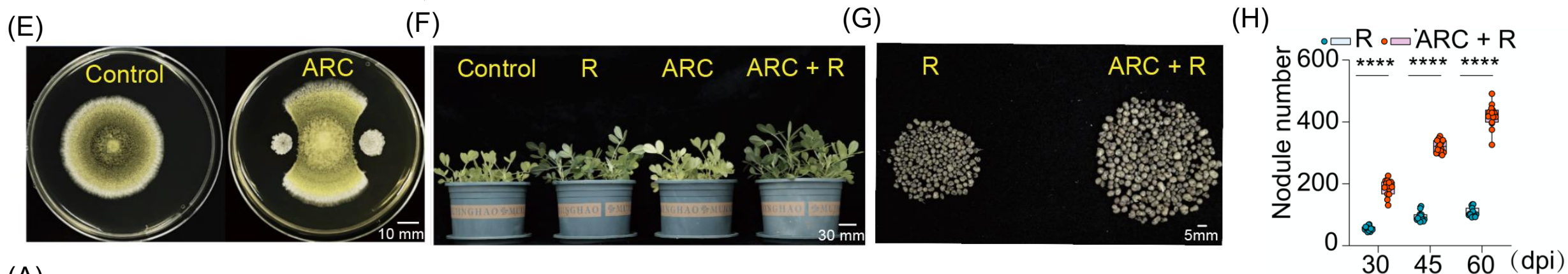


图1(C) ARC内不同菌株组合对黄曲霉的抑制作用。(D) ARC内不同菌株组合对根瘤数的促进作用。

# 系统性接种表征：获得ARC生物菌剂，实现控毒固氮耦合效应

- 该四个菌株组合的合成群落被命名为**ARC** (**A**: 黄曲霉毒素阻控; **R**: 诱导根瘤菌结瘤固氮; **C**: 耦合)
- 无菌体系验证: ARC生物菌剂自身不能结瘤, 但与根瘤菌共接种时, 能够显著增加根瘤数量; 同步抑制曲霉



(A)

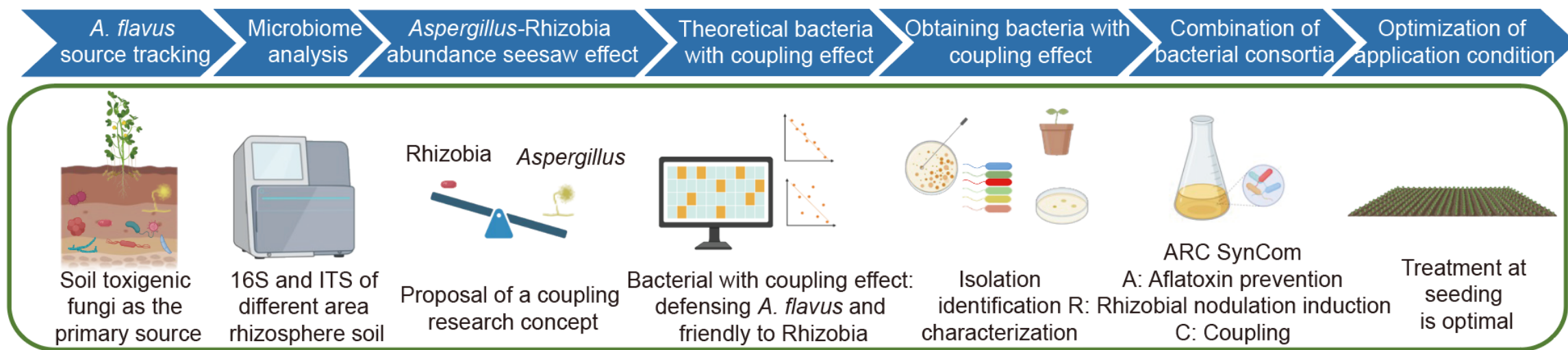


图1 (A) ARC的开发流程。(E) 体外条件下对照与ARC处理组的黄曲霉菌落形态。(F) 不同处理下接种后60天花生植株的表型。(G) 接种后60天的根瘤表型。(H) 根瘤数量测定。

# 多年多点大田试验示范结果揭示ARC生物菌剂高效阻控花生黄曲霉毒素

- 大规模生产大田应用：建立了ARC生物菌剂田间应用技术规程和模式，**4年19省325点**开展了生产大田试验示范
- ARC生物菌剂显著减少了花生表面霉斑，花生黄曲霉产毒菌降低**63.2%–71.8%**，黄曲霉毒素水平降低**85.6%**

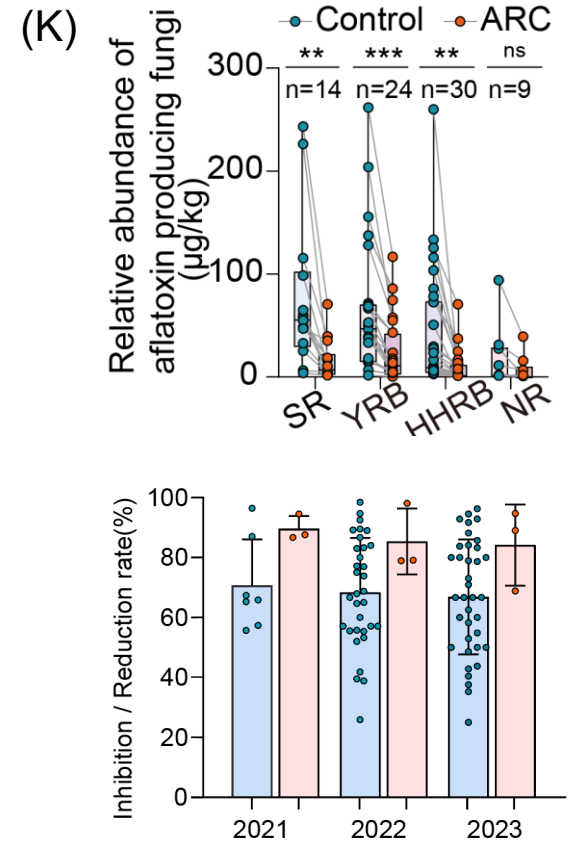
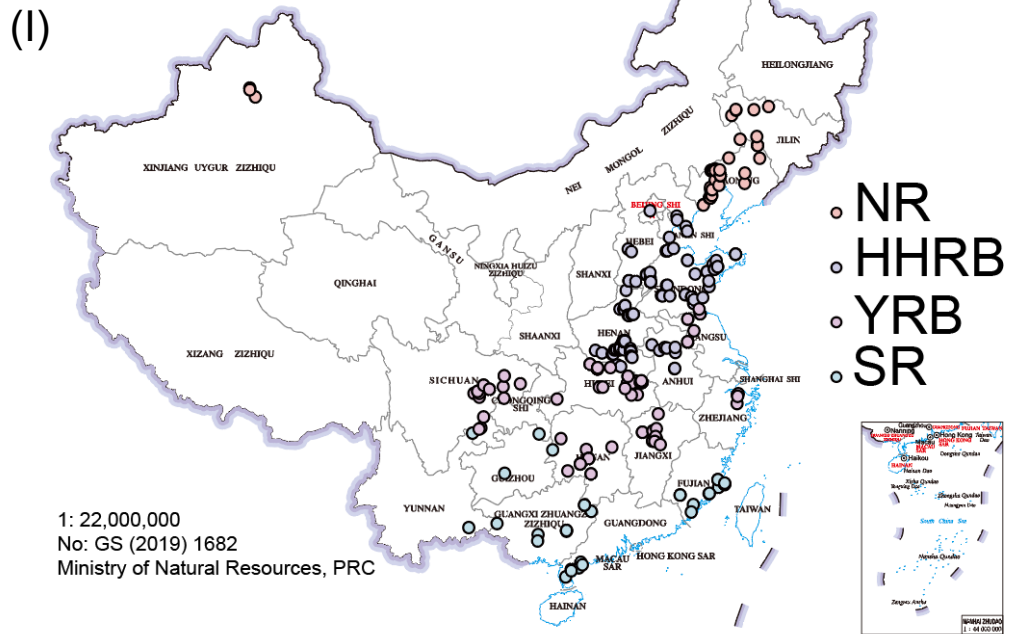


图1(I) 全国田间试验点分布。(J) 对照与ARC花生荚果表面菌斑对比。(K) 四大主产区花生中产毒黄曲霉的丰度。



# ARC生物菌剂在全国花生产区表现出促进结瘤固氮效果

- 325点田间试验示范结果表明，ARC生物菌剂使花生根瘤数平均增加**5.3倍**，固氮酶活提高**7.4倍**
- ARC生物菌剂处理植株在**收获时仍保有大量鲜活根瘤**，实现全生育期持续供氮

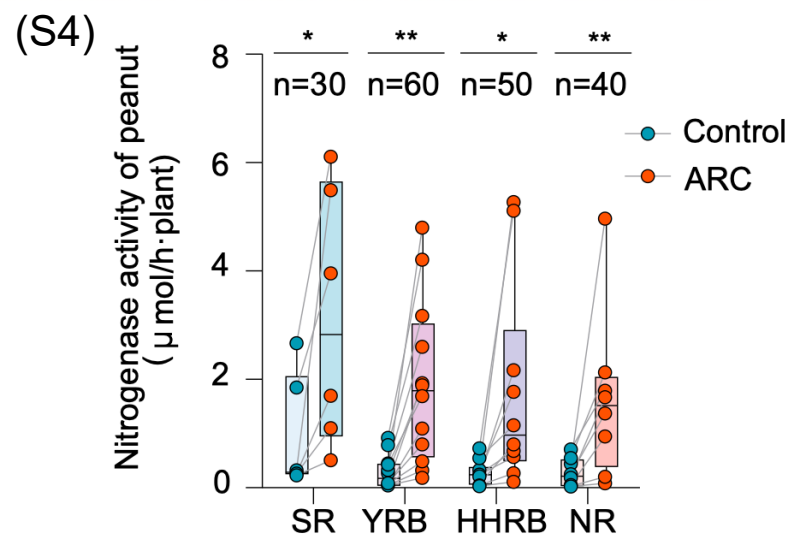
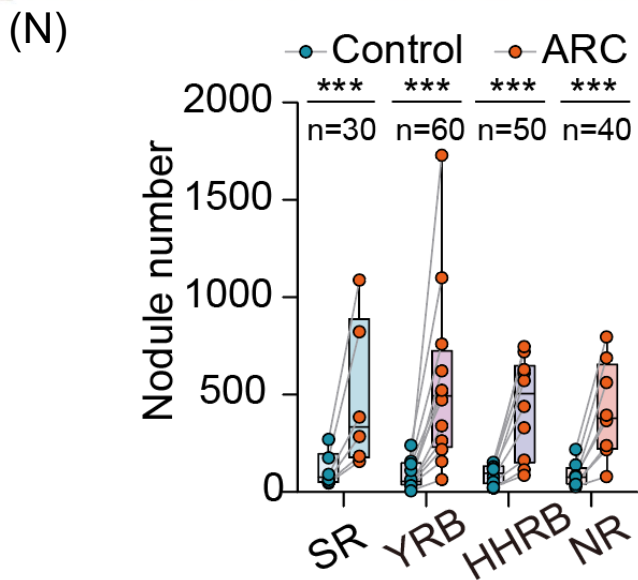
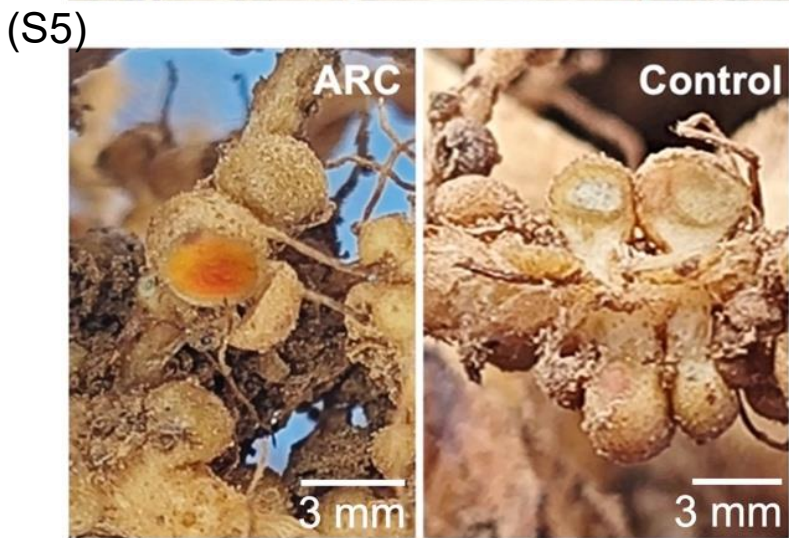


图1 (L, M) 田间对照与ARC生物菌剂处理根系的特写。(N) 四大主产区根瘤数量。图S4 ARC田间应用提高了固氮酶活性。图S5 花生收获期根瘤的横剖面。



# ARC生物菌剂在全国范围内使花生生产量平均提高19.8%

- 325点田间试验表明，ARC生物菌剂可增强了花生光合作用，促进植株健壮生长，生物量和产量性状均显著提升
- 全国农业技术推广服务中心等第三方组织专家组产量测定结果表明，多年多点田间试验中产量平均提高19.8%

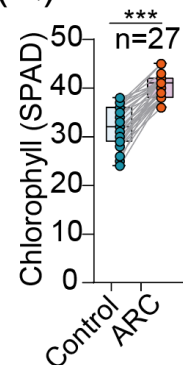
(O)



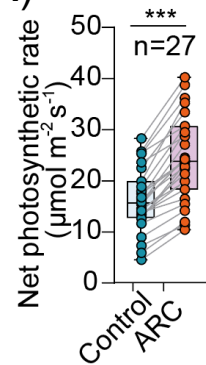
(P)



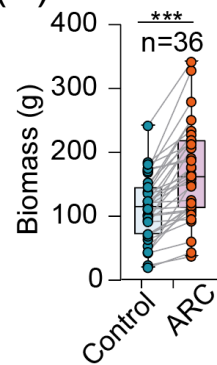
(Q)



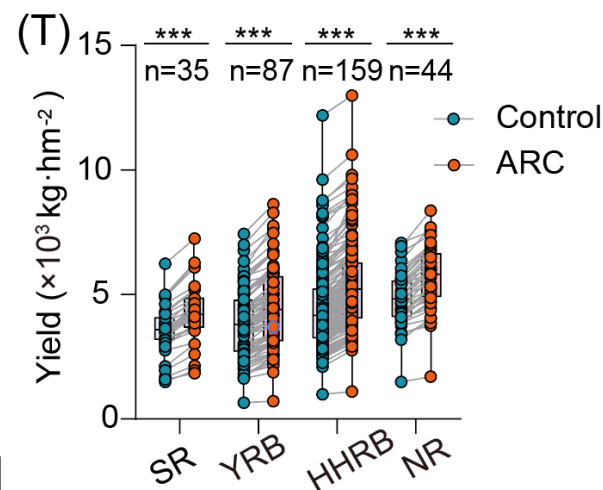
(R)



(S)



(T)



**ARC生物菌剂在大规模花生生产中  
首次同步实现了黄曲霉毒素阻控、超结瘤与高效固氮及显著增产**

图1 (O) 田间对照与ARC处理地块的航拍视图。(P) 田间植株冠层对比。叶绿素II (Q)、净光合速率 (R) 和生物量 (S) 的统计分析。(T) 四大主产区花生生产量。



# ARC生物菌剂重塑了花生根际和根内微生物组结构

- ARC生物菌剂**重塑了微生物群落结构**，显著富集了固氮功能菌，病原真菌丰度减少
- ARC生物菌剂显著提高了根际土壤和根系中**慢生根瘤菌的丰度**，同时**降低了曲霉菌的丰度**

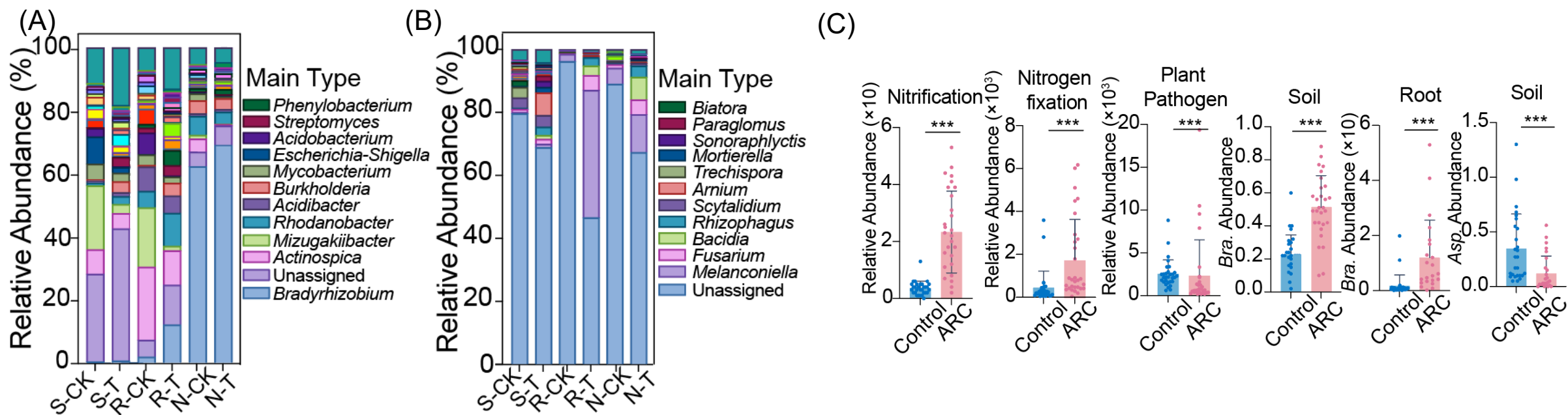


图2 施用ARC后与对照的根际土壤、根系及根瘤中细菌 (A) 和真菌 (B) 的群落组成。(C) 土壤、根系及根瘤中硝化、固氮及植物病原细菌的丰度 (ARC/对照) 以及慢生根瘤菌的丰度。



# ARC生物菌剂损伤了黄曲霉多个生物学过程

- 黄曲霉转录组分析表明，下调基因富集在DNA代谢/修复、蛋白水解和脂肪酸生物合成过程中
- 提示ARC生物菌剂损伤了黄曲霉的**基因组稳定性、蛋白质稳态以及脂质代谢过程**

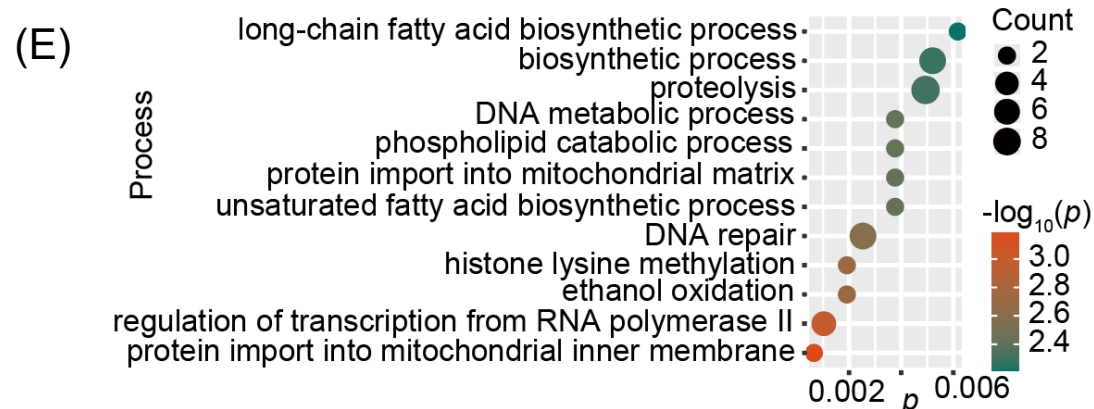
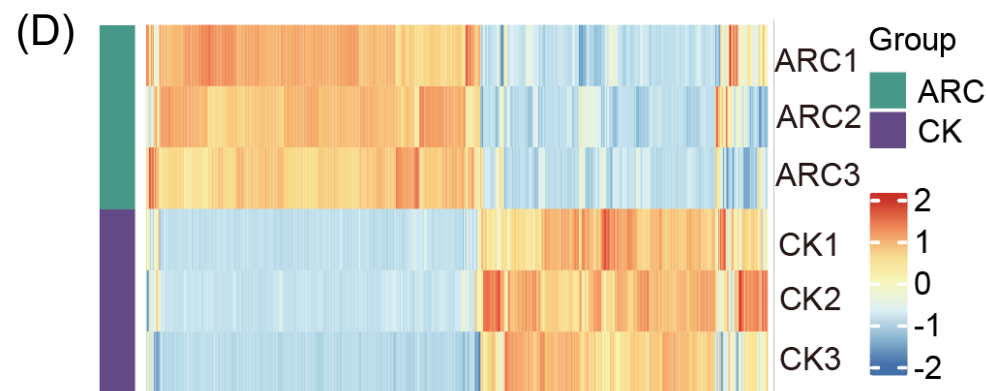


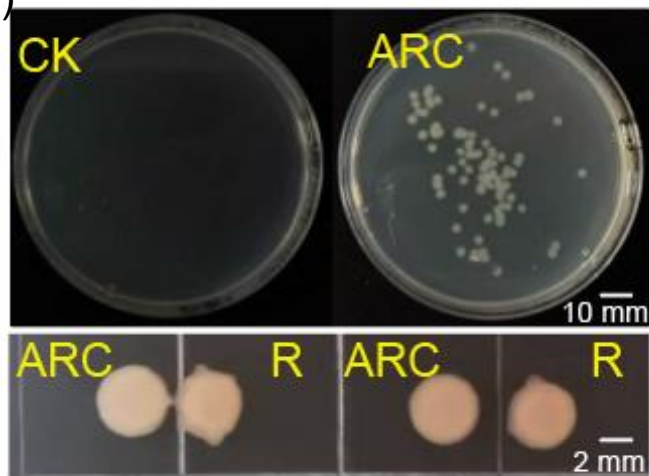
图2 (D) ARC介导抑制黄曲霉过程中的差异表达基因。(E) 参与ARC介导抑制黄曲霉的基因的GO富集分析.



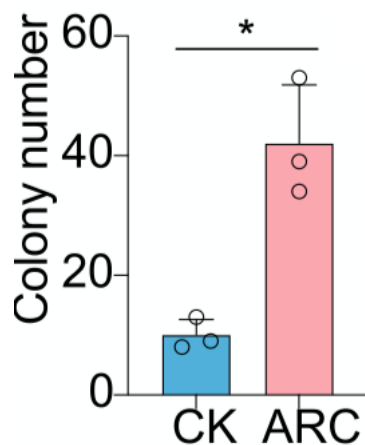
# ARC生物菌剂招募根瘤菌，激活根瘤菌结瘤基因表达

- 将慢生根瘤菌与ARC发酵上清液共培养，其菌落数量是对照的3倍，表明ARC生物菌剂可**招募根瘤菌**
- 基因表达分析显示，ARC生物菌剂**诱导根瘤菌中的结瘤基因表达**

(F)



(G)



(H)

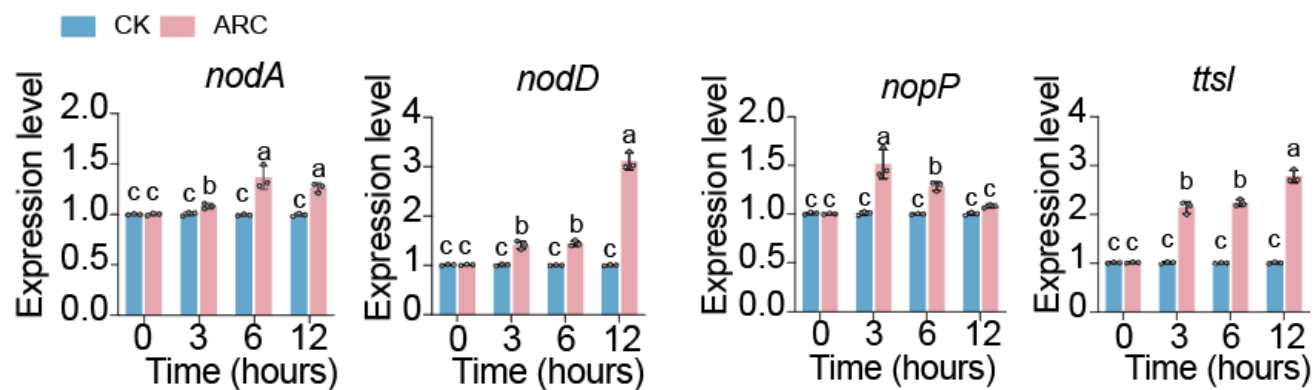


图2 (F) 招募 (上) 与对峙 (下) 试验显示ARC对根瘤菌的作用。(G)ARC招募根瘤菌的定量分析。(H) ARC处理下根瘤菌结瘤相关基因的表达。





# ARC生物菌剂增强花生光合和碳供应形成正反馈回路

- ARC生物菌剂重新编程了**碳分配动态**，上调了根和根瘤中 SWEET 家族糖转运蛋白基因，表明**碳向根部的分配增强**
- 形成了一个强大的**正反馈回路**：碳供应增加支撑了固氮作用，固氮作用又促进植株生长和光合作用

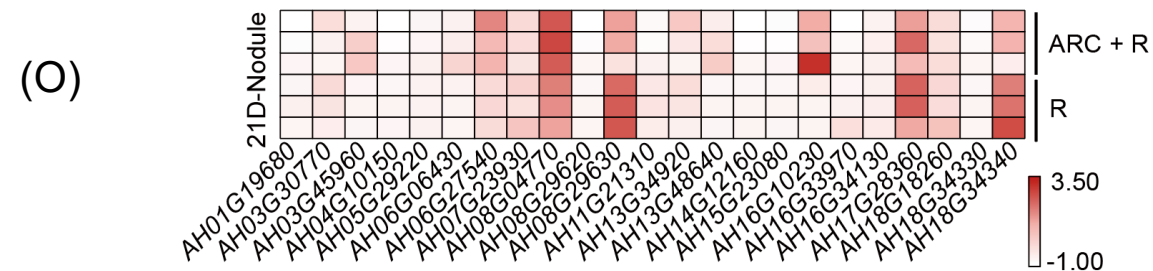
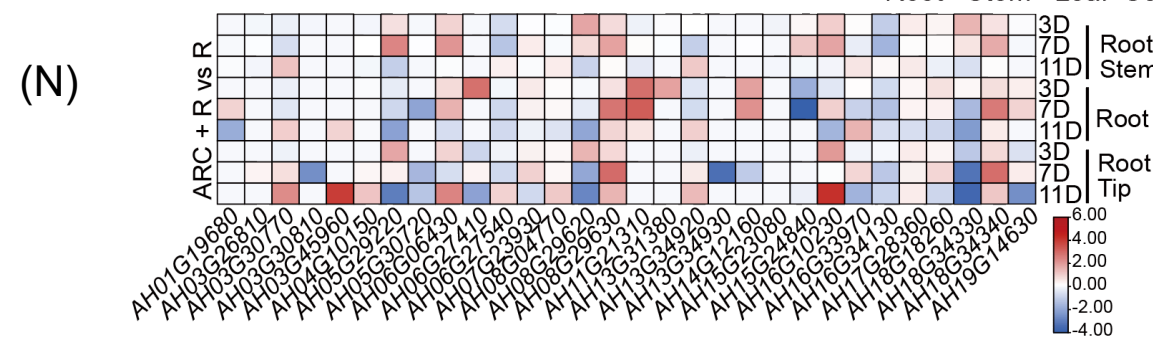
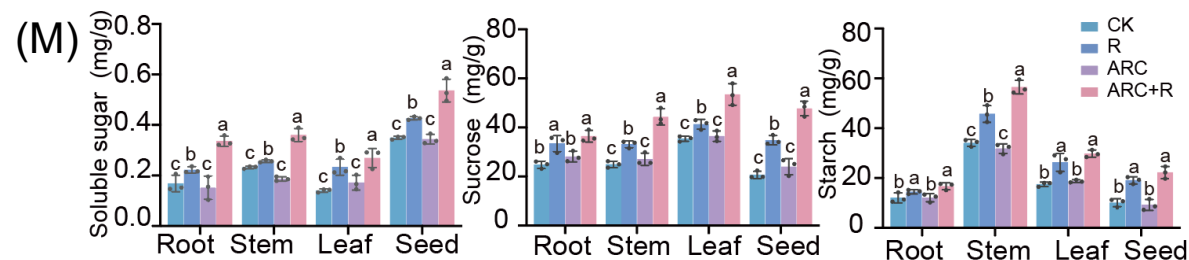
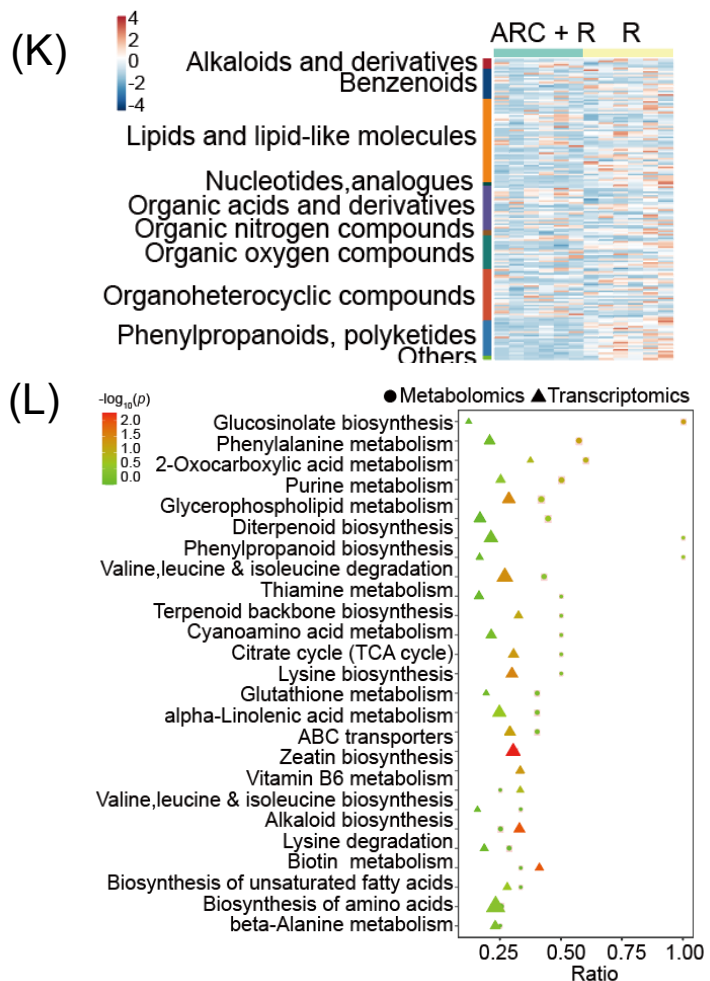


图2(K) 花生基因表达热图。(L) 差异表达基因与代谢物的KEGG富集分析。(M) ARC处理后花生各组织中的糖含量。(N) 早期根系中SWEET基因表达热图。(O) 后期根瘤中SWEET基因表达热图。



# 总结

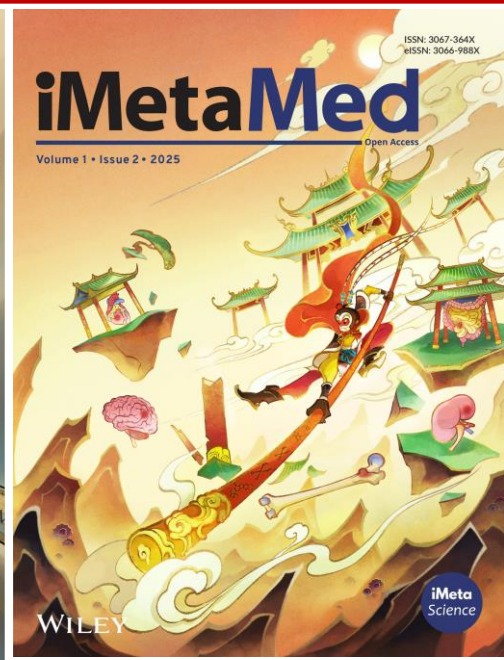
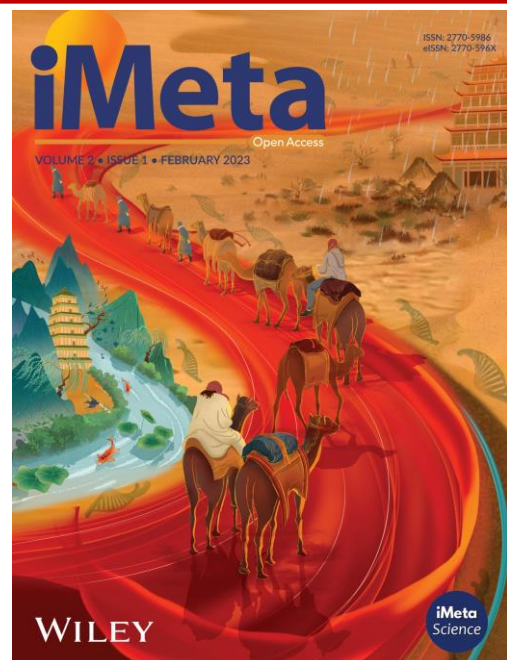
- ❑ 这项研究中，我们首创了同步解决黄曲霉污染和生物固氮两大难题的ARC新策略
- ❑ ARC生物菌剂通过抑制黄曲霉多个靶点、招募并激活根瘤菌结瘤固氮基因、以及重新编程植物碳源动态以建立氮-碳正反馈回路，实现了抑制黄曲霉、诱导超结瘤与产量增加的协同效应，尤其破解了历史上公认的超结瘤与增产之间矛盾
- ❑ 经过在中国四大花生主产区325个大规模生产田间示范点的成功验证，ARC生物菌剂代表了一种全新的、可持续且可规模化应用的豆科作物提质固氮绿色增产技术
- ❑ 本研究为保障食品安全、提升豆科作物固氮效率与产量、促进生态低碳可持续农业发展开辟了重大原创性生物技术路径，并揭示了固氮理论有望从“根瘤菌专属共生”向“非共生微生物协同固氮”方向拓展

Qi Zhang, Tao Wang, Xiaoqian Tang, Xiaofeng Yue, Meijuan Liang, Xiaojun Zhang, Qin Han, et al. 2026. Microbial Synthetic Community ARC Prevents Aflatoxin and Increases Rhizobia-Legume Nodulation Couplingly. *iMeta* 5: e70125.

<https://doi.org/10.1002/imt2.70125>

# iMeta(宏): 生物和医学顶级成果发表平台

# iMeta WILEY



**iMeta** (宏)期刊是由宏科学和威立共同出版，对标**Cell**的生物/医学期刊，主编刘双江和傅静远教授，欢迎高影响力的研究、方法和综述投稿。已被**SCIE**、**PubMed**等收录，最新影响因子(IF)33.2，位列全球第65，中国第5，**分区表生物学1区Top**，CNS级成果发表平台，外审平均21天，投稿至发表中位数87天。

**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](mailto:office@imeta.science)

[imetaomics@imeta.science](mailto:imetaomics@imeta.science)



宣传片



[iMeta](#)



更新日期  
2026/3/30