



# 生物技术将“废料”变“绿色饲料”

## ■ 解码生物经济④

◎ 本报记者 马爱平

“水稻秸秆不能烧，烂在田间会影响后续耕作，还易导致病虫害，成了‘生态包袱’。”近日，湖南省常德市农业农村局农业资源保护与利用科负责人罗元峰在接受科技日报记者采访时表

示，常德探索水稻秸秆产业化利用新模式，将回收的水稻秸秆制作成青贮饲料，将“生态包袱”变成“绿色财富”。  
“我国饲料工业发展突飞猛进，生产持续增长，集中度不断提高，转型升级步伐加快，但也面临资源约束日益突出、个别环节质量安全隐患仍然存在等挑战。大力发展生物饲料，是确保未来饲料工业高质量发展的必然方向和战略举措。”农业农村部畜牧兽医局局长辛国昌说。

## ■ 不仅绿色环保还可减少抗生素使用

《中国生物饲料行业市场调研及“十四五”发展趋势研究报告》指出，生物饲料是指以饲料和饲料添加剂为对象，以基因工程、蛋白质工程、酶工程、发酵工程等现代生物技术为手段，利用微生物酶解发酵开发的安全高效、环境友好、无残留的新型饲料资源和饲料添加剂的总称。生物饲料包括生物发酵饲料、酶解饲料、菌酶协同发酵饲料和生物饲料添加剂等。

生物饲料的取材非常广、成本也相对专用饲料更加经济实惠，并且生物饲料具有可再生性。生物饲料的应用有助于开发非常规饲料资源，降低养殖成本；有利于节约粮食，减缓人畜争粮的问题；可降低畜禽粪氮、粪磷的排放量，大幅度降低环境污染，促进畜牧饲料行业健康发展；减少养殖环节抗生素使用，对获得优质安全的畜产品具有重要意义。

近年来，生物发酵技术在改善饲料品质、提高利用效率、促进动物健康等方面的效果较好，生物饲料产品的市场接受度日益提高，已成为一个快速发展的新兴产业。

以生猪生态养殖为例，浙江大学动物科

学院院长、教授汪以真说，“生物发酵饲料是一种含有益生菌及其代谢产物的生物活性饲料，微生物发酵可以通过改变饲料底物的理化特性，提高饲料的消化利用率。同时在发酵过程中，可以扩大培养益生菌菌体，进而通过益生菌的作用，维持猪的肠道微生物稳态，改善其肠道功能和机体免疫，最终达到生猪机体健康提升和优质安全生产的目的。”因此，使用生物饲料是非洲猪瘟、饲料禁抗和环保压力下实现生猪健康绿色生态养殖的重要举措。

此外，生物饲料还可以延长农业产业链、提升价值链、优化供应链、构建利益链，促进农村一二三产业融合发展，是繁荣农村经济、增加农民收入的重要举措，是推进农业供给侧结构性改革、加快农业农村现代化的重要抓手。生物饲料上游关联种植业，下游关联养殖业和无抗畜产品加工业，能够大力带动种植和养殖业健康发展，是打造种植业、养殖业和无抗畜产品加工业三大产业融合的重要抓手。生物饲料高质量发展必将促进种植业、养殖业和无抗畜产品加工业三大产业融合。

## ■ 综合施策助力生物饲料产业发展

我国高度重视生物饲料产业发展，综合施策，从管理制度和技术标准等多方面采取有效措施，有力促进了产业规范化健康发展。

生物饲料领域第1个团体标准《生物饲料产品分类》于2018年1月1日发布，《发酵饲料技术规范》于2018年9月7日发布，正式结束了生物饲料市场混乱、产品质量良莠不齐的局面。

2020年，国务院办公厅印发的《关于促进畜牧业高质量发展的意见》明确提出“加快生物饲料开发应用”，为生物饲料产业加快发展指明了方向。此后，自2011年国务院修订发布《饲料和饲料添加剂管理条例》（以下简称《条例》）以来，又对《条例》进行了3次修订。

农业农村部依据《条例》规定，按照国务院

“放管服”改革有关要求，及时制定发布相应的配套规章和规范性文件，累计制定了5个部门规章、16个规范性文件，发布实施了600余项国家标准或行业标准，初步形成了相对完善的饲料管理制度体系。

全国各地也出台了有关政策，大力发展生物饲料。如早在2009年，贵州省政府印发了《贵州省人民政府办公厅关于开发利用农作物秸秆生物饲料推进我省生态畜牧业又好又快发展的意见》。该意见提出，科技、农业部门以及大中专院校、科研机构、龙头企业要积极引

进和消化省外的先进技术，开发、集成适宜贵州省不同区域、不同养殖方式的秸秆生物饲料多样化利用技术体系，加快生物饲料研发及其成果的转化应用，提高秸秆生物饲料的营养价值和利用率、消化率，增强适口性。今年3月30日，黑龙江省政府印发的《黑龙江省“十四五”生物经济发展规划》正式发布并实施。规划明确，推动兽药产业接轨先进水平，培育壮大生物饲料产业，谋划建设微生物制剂、发酵饲料、饲用维生素、新型饲料蛋白等饲料添加剂和生物饲料项目。

## ■ 生物饲料的未来机遇将与挑战并存

“政策和标准的建立对我国生物饲料行业的规范性和健康发展作出了重要贡献。使得我国生物饲料产业发展迅速，年产量已超过400万吨。目前，我国仅从事生物发酵饲料生产的企业就有1000余家。其中，发酵豆粕、酵母培养物、发酵糟渣和发酵构树叶等发酵产品呈稳定增长趋势，在饲料和养殖行业得到广泛应用。”汪以真表示。

预计到2025年，生物饲料产品市场份额将达到2000亿元/年，而且生产技术和应用技术水平将大幅度提高并实现标准化。

《中国生物饲料行业市场调研及“十四五”发展趋势研究报告》指出，发展健康、环保、高效的无抗替代品成为饲料行业未来的发展趋势，生物饲料将成为未来饲料行业抗生素减量替代的重要环节之一。随着养殖业日趋规模化、

集约化，将有力促进生物饲料行业的快速发展。

虽然我国生物饲料产业具有巨大的发展前景，但现阶段，我国生物饲料整体研发和产业化水平还有待提高，在产业发展中仍存在一些亟待解决的问题。

在标准制定方面，目前我国生物饲料产业急需研究制定完善具体的产品标准、质量检测评价方法标准、标签标识标准，以及生物饲料添加剂标准等。在生产制备方面，要提高菌种性能、原料配比科学性、产品稳定性等，减少杂菌污染，培养更多规模化生产工程技术人员。在推广应用方面，动物营养和微生物营养的协同性和安全性认识仍需提高，营养数据库和合适添加量尚需完善。在行业管理方面，生物安全防控和生物饲料评价体系的安全预警平台工作力度需要继续加强。

## ■ 相关链接

### ■ 全球生物饲料技术、产业发展迅速

国外从20世纪60年代初开始研发微生物发酵饲料。最初用于生产生物饲料的原料主要是一些富含纤维素的固体残渣（稻草、秸秆、甘蔗渣等）。

随着技术的进步，国外生物饲料的发展迅速，原料也越来越广泛，所采用的益生菌菌株数量也在不断增加。

在生物饲料的应用方面，欧美等国家和地区

生物饲料的使用比例已经大于50%；德国已有超过15%的猪场采用生物液体饲料；荷兰、芬兰规模化猪场应用生物饲料饲喂率达到60%；法国使用流体生物饲料设备的猪场约占猪场总数的15%。

在生物饲料技术研究方面，通过专利检索发现，在全球范围内，从2012年开始，相关专利数量快速上升，全球生物饲料技术进入研究爆发期。

除此之外，由于玉米对甲基汞没有招架之力，该团队进一步开展了“盆栽玉米试毒”实验，发现在绿僵菌的护佑下，土壤中的甲基汞层层降解，减少了汞进入植物体内的机会。10天以后，盆栽玉米中的汞已不见踪影，玉米长势良好。

“这证明了与植物共生的绿僵菌可修复土壤中的汞污染，降低植物的汞累积，促进植物健康与生长。”方卫国介绍，将绿僵菌菌株投入水中，也可以修复淡水和海水中的汞污染。让绿僵菌在广袤的农田和山林中参与污染土壤治理，将会是一种可行性很高的土壤汞污染微生物修复方法。

“目前，我们为该项成果申请了多项国内外专利，并正在开展相关的田间试验。”方卫国说，“由于绿僵菌是一种生物防治剂，在生态环境中的安全性已经得到证实，且它的批量生产技术也已成熟，因此从实验室到现实应用的距离并不遥远。”

## ■ 研究进展

### ■ 无融合生殖杂交稻遗传稳定性证实

科技日报讯（记者马爱平）近日，中国水稻研究所基因组编辑及无融合生殖创新团队将无融合生殖杂交水稻材料繁殖至第4代，从植株表型、基因组、甲基化、转录组和亚基因组转录等层面比较了不同世代克隆材料，证实了无融合生殖杂交稻在不同世代间的遗传稳定性，为未来人工无融合生殖体系在作物中的应用奠定了理论基础。相关研究成果在线发表于《植物通讯》。

2019年，该团队在杂交稻中建立了人工无融合生殖体系，实现了杂合基因型的固定，首次获得了杂交稻的克隆种子，证明了杂交稻进行自留种的可行性。但是，目前尚不清楚人工无融合生殖杂交稻的优异性状能否在不同世代间稳定遗传。而这一问题的解决是未来无融合生殖杂交稻走向生产应用的重要前提。

研究人员用连续4个水稻种植季将人工无融合生殖杂交水稻材料加代繁殖至第3代，然后借助流式细胞仪鉴定了第0代、第1代、第2代和第3代无融合生殖杂交水稻材料植株结实种子的倍性。结果发现，每个世代杂交水稻植株均保持了无融合生殖特性。接着，研究人员重点聚焦同一季节种植的不同世代二倍体克隆植株，考察了抽穗期、分蘖数、株高、穗长、每穗粒数、千粒重等重要农艺性状，发现它们表型相似。因此，在植株表型上，克隆植株后代保持了杂种子1代的优势表型。随后，研究人员分别从全基因组、甲基化、转录组、亚基因组转录表达等分子层面揭示了无融合生殖体系的遗传稳定性。



### ■ 二化螟虫害诱导的水稻挥发物可被邻近稻株感知和识别

科技日报讯（记者马爱平）近日，中国农业科学院植物保护研究所抗病虫作物生态安全评价与利用创新团队系统研究了虫害诱导植物挥发物（HIPVs）在稻株间信息交流过程中发挥的生态调控功能，发现二化螟为害诱导的水稻挥发物可以被邻近稻株感知和识别，迅速启动防御准备，当邻近水稻遭受二化螟为害时能够启动更快更强的防御反应，揭示了虫害诱导挥发物调控邻近稻株抗虫防御反应的生化与分子机理。研究结果发表在《新植物学家》上。

在植物与植物的交流中，虫害诱导植物挥发物可以被邻近植物识别，使其迅速进入“预警状态”，对后续潜在虫害胁迫提前做好防御准备。当虫害来临时，处于“预警状态”的植物会表现出更快的反应能力、更强的抗性和耐受性。该现象在玉米、番茄和茶树等多种植物中均有发现，但具体的分子和生化机制有待深入解析。水稻是我国重要的粮食作物，通常密集种植，因此虫害诱导挥发物在稻株间互作关系中可能发挥重要作用，然而有关虫害诱导挥发物介导的稻株间信息交流的研究少有报道。

该团队的研究结果显示，暴露于二化螟诱导挥发物的稻株在二化螟为害时，稻株组织中茉莉酸和蛋白酶抑制剂相关基因表达显著上调，茉莉酸和蛋白酶抑制剂的含量也随之提高，显著抑制二化螟幼虫的生长发育。此外，暴露于二化螟诱导挥发物的稻株，受二化螟为害后其挥发物的释放量明显增加，增强了邻近稻株的间接防御反应。

### ■ 小黄鱼全基因组精细图谱首次绘制

科技日报讯（洪恒飞 王夏君 记者江耘）近日，科技日报记者从浙江省农业科学院（以下简称浙江省农科院）获悉，该院水生生物研究所小黄鱼科研团队与厦门大学、美国奥本大学合作，首次完成了小黄鱼全基因组注释与精细图谱绘制，为建立小黄鱼基因组选择育种、培育高产抗病优质良种提供了基因资源和技术手段。相关研究论文近日在线发表于学术期刊《分子生态学资源》。

小黄鱼是中国重要的海产经济鱼，味道鲜美，广受青睐。随着小黄鱼全养殖产业的扩大和科研的深入，破译小黄鱼基因组，发掘其生长、性别决定等相关重要功能基因成为摆在科研工作者面前的重要课题。

“小黄鱼属包含东海四大海产中的小黄鱼与大黄鱼两个重要经济鱼类，虽然它们形态和染色体核型相似，但是黄鱼属物种之间的遗传关系尚未明确。”论文第一作者、浙江省农科院水生生物研究所（以下简称水生所）助理研究员谢庆平博士介绍，本研究结合4类基因组测序技术，构建了小黄鱼染色体水平的基因组精细图谱；揭示小黄鱼基因组大小为706兆，注释基因为25233个；进化分析表明小黄鱼与大黄鱼亲缘关系最近，大概在2540万年前开始分化。

谢庆平介绍，鱼类雌雄同体和雌雄异体的演化方向，在学术界仍然是一个有待解决的有趣谜团。此次研究通过转录组学、比较基因组学以及分子生物学的方法，鉴定出dmrt1基因为小黄鱼的雄性特异性基因，且dmrt1基因序列的演化可以作为鱼类中雌雄同体现象产生的生物标记。

论文通讯作者、浙江省农科院水生所所长楼宝研究员表示，小黄鱼全基因组的解译和基因组精细图谱的绘制，对于海洋渔业资源保护、小黄鱼养殖产业化以及分子遗传育种技术的研究意义重大。



受访者供图

本版图片除标注外由视觉中国提供

# 绿僵菌双基因联手，化汞于“无形”

◎ 洪恒飞 周炜 本报记者 江耘

近日，《美国科学院院刊》在线发表了浙江大学生命科学学院方卫国教授团队的最新研究成果。该团队发现，绿僵菌的MMD基因和MIR基因联手能将土壤和水体中剧毒的甲基汞和二价汞一步步转化为低毒易挥发的零价汞，从而揭示了绿僵菌抗汞能力的遗传和生化机制，可为汞污染治理提供更有效、更安全的生物修复方法。

## ■ 两个基因联手完成二次脱汞

绿僵菌是一种真菌，活跃于植物根系，能把土壤中的磷元素提取出来，供植物吸收，并帮助植物抵御一些微生物病原菌的侵袭。植物也会将制造的葡萄糖“回赠”给绿僵菌。

“在农业生产上，它也是一种广泛使用的生物杀虫剂。”方卫国说，如果你在田间看到发霉的绿色昆虫“干尸”，大概率是绿僵菌干的。

在以往的研究基础上，该团队在绿僵菌中发现了MMD和MIR两个抗汞基因。地球上的150多万种真菌中，同时拥有这两个基因的物种

很少见。  
方卫国介绍，基因MMD与甲基汞相关，它能产生脱甲基酶，将剧毒的甲基汞降解为二价汞的形态；而基因MIR则能产生汞离子还原酶，让二价汞再转化为零价汞，使汞的毒性进一步降低，且容易挥发到空气中，从而被活性炭吸附后轻松去除。

该团队通过设置对照试验，在每升培养基中倒入10毫克的甲基汞，模拟汞污染的重灾区，并“派出”敲除抗汞基因、野生、加强抗汞基因三类绿僵菌进行测试。

结果显示，野生绿僵菌能够在汞污染重灾区基本正常生长，不受妨碍；敲除抗汞基因的绿僵菌则奄奄一息，生存半径明显萎缩，最终“中毒身亡”；抗汞基因加强版的绿僵菌，则表现出了比野生绿僵菌更强的生命力。

## ■ 绿僵菌治污应用前景可观

汞污染严重威胁人类健康和粮食安全。方卫国介绍，汞有不同类型的化合物和单质，毒性各不相同，其中毒性最强的当属甲基汞。这种汞进入人体后会遍布全身器官组织，损害神经系

统，造成不可逆的损伤。目前，环境中的汞污染治理主要采用物理吸附、植物吸附等方式，但效果并不理想。  
该研究团队在绿僵菌身上看到了新的希望。绿僵菌维护成本很低，可依靠植物根系分泌的营养物质生长繁殖，具有一次释放、长期治理

的优点。  
“我们做了一组回补实验，将两个抗汞基因重新补回基因敲除的绿僵菌后，它们的抗汞性能又回来了。”方卫国说，研究证实，两个基因“联手”巧妙地化汞于“无形”。

除此之外，由于玉米对甲基汞没有招架之力，该团队进一步开展了“盆栽玉米试毒”实验，发现在绿僵菌的护佑下，土壤中的甲基汞层层降解，减少了汞进入植物体内的机会。10天以后，盆栽玉米中的汞已不见踪影，玉米长势良好。

“这证明了与植物共生的绿僵菌可修复土壤中的汞污染，降低植物的汞累积，促进植物健康与生长。”方卫国介绍，将绿僵菌菌株投入水中，也可以修复淡水和海水中的汞污染。让绿僵菌在广袤的农田和山林中参与污染土壤治理，将会是一种可行性很高的土壤汞污染微生物修复方法。

“目前，我们为该项成果申请了多项国内外专利，并正在开展相关的田间试验。”方卫国说，“由于绿僵菌是一种生物防治剂，在生态环境中的安全性已经得到证实，且它的批量生产技术也已成熟，因此从实验室到现实应用的距离并不遥远。”