

# 智能设计育种技术实现水稻抗“镉”

——“生物技术兴农”系列报道之三

◎本报记者 俞慧友

镉含量超标，既影响粮食安全，又影响稻米产业健康发展。如何破解这一难题？湖南省农业科学院湖南杂交水稻研究中心副主任、研究员李莉团队给出了他们的答案。团队应用自主研发的染色体片段缺失型镉低积累水稻智能设计育种技术，成功培育出我国首个通过国家品种审定的镉低积累水稻品种“西子3号”。无需特殊栽培方式，它产出的稻米镉含量就远低于0.20毫克/千克的国家标准限量值。

日前，染色体片段缺失型镉低积累水稻智能设计育种技术入选2024年农业重大引领性技术。

## 应急品种特性不稳定

农田土壤受到镉污染，最严重的影响之一便是稻米会吸收和积累了过多的镉。镉含量超标的稻米若被人食用，将严重影响人体健康。如何降低水稻对镉的吸收和积累，一直是科研人员关注的问题和研究重点。

在李莉团队开展这项研究之前，科研人员已尝试在水稻生产中筛选出应急性镉低积累水稻品种。所谓应急性镉低积累水稻品种，主要指在现有杂交水稻组合中筛选出具有一定镉低积累特征的水稻品种。但从应急性镉低积累水稻品种的田间表现来看，其镉低积累特性存在不稳定性，且需要采用特殊栽培方式与之配套。

为解决应急性镉低积累水稻在生产实践中出现的这一难题，李莉团队开始探索研究，试图找到一种可在中、重度镉污染农田种植，无需特殊栽培方式也能保持稳定镉低积累特性的水稻资源。

“多年来，国内外鉴定了大量可育水稻表型，但未能发现稳定镉低积累种质。而水稻不育系一般不能自交结实，所以通常无法鉴定籽粒镉积累表型。我们前期研究发现，籽粒镉积累表型由孢子体基因型决定，对于不育材料采用任意父本异交授粉结实的方法能鉴定其表型。因此，我们开始了大规模、高强度的不育系籽粒镉含量鉴定。”李莉说。

## 另辟蹊径找到核心种质

为此，团队另辟蹊径，建立了不育系籽粒镉积累表型鉴定方法。这种方法能够利用花期相遇的任意可育材料，对三系不育系及未恢复育性的两系不育系开展异交授粉。待不育系受精结实后，再鉴定其籽粒镉积累特性。“这种方法扩大了镉低积累资源筛选范围。”湖南省农业科学院湖南杂交水稻研究中心研究员王天抗说。

团队将搜集到的大量国内外杂交水稻亲本资源种植于中、重度镉污染田。2018年，团队利用不育系籽粒镉积累表型鉴定方法，率先挖掘出稳定的镉低积累不育系珞红3A和珞红4A。鉴定结果显示，珞红3A和珞红4A在全镉含量为0.80毫克/千克土壤中种植，籽粒镉含量分别为0.027毫克/千克和0.017毫克/千克；在全镉含量为5.00毫克/千克的土壤种植，籽粒镉含量分别为0.043毫克/千克和0.037毫克/千克，大幅低于国家标准限量值。

为解析珞红3A、珞红4A镉低积累的遗传基础，团队利用第二代和第三代高通量测序技术，对珞红4A进行了全基因组测序。他们发现，珞红3A和珞红4A的第7号染色体有一段长度为408481个碱基对并包含多个



农机手操作插秧机插秧。 新华社记者 陈思汗摄

吸收、转运关键基因的大片段(Org)缺失，且在缺失处插入了一段长度为2980个碱基对的序列(Tons)。共分离试验结果证明，Org缺失和水稻籽粒镉低积累性状存在紧密关联。

“应急性品种的镉低积累特性不稳定，且需要结合后期灌水、调节pH值等栽培措施，操作比较复杂，农民不容易接受。我们发掘的镉低积累种质具有稳定的镉低积累性状，这为选育稳定镉低积累水稻新品种提供了重要的材料基础。”中国工程院院士、湖南省农业科学院党委书记柏连阳介绍。

## 建立精准分型技术体系

针对Org缺失及Tons插入，团队开发了共显性Taqman分子标记组合，建立了水稻镉积累精准分型技术体系。王天抗说，这一体系可保障科研人员在水稻苗期快速、精准地区分镉低积累、非镉低积累及杂合单株，准确率100%。

李莉告诉记者，利用该技术体系，团队以珞红3A、珞红4A转育的多基因聚合镉低积累中间材料作为供体，以主推常规稻或杂交稻亲本作为受体，采用杂交、回交育种策略，开始品种选育。技术体系的应用，大大加速了团队镉低积累水稻品种创制速度。

在精准分型技术体系的基础上，团队最终建立了聚合镉低积累、抗病虫、优质、高产等分子标记前景和全基因组背景选择的染色体片段缺失型镉低积累水稻智能设计育种技术，极大提升了镉低积累、优质、高产新品种的选育效率。

2020年起，团队选育出适合在中、重度镉污染稻田种植的“西子3号”“西子9号”“西子17号”等高产优质镉低积累常规稻品种10个，“西3S”等镉低积累两系不育系2个，“西恢3号”“西恢5号”等镉低积累恢系7个，测配出“西两优4号”等镉低积累苗头组合2个。

“西子3号”在国家区试中的表现十分突出，在2021年和2022年国家各区试点“西子3号”糙米镉含量仅为0.000—0.098毫克/千克，大幅低于国家限量标准0.20毫克/千克；米质综合评级为部标优2级，平均亩产565.03千克。

2021年，“西子系列”镉低积累水稻新品系在湖南省湘阴县镉污染稻田率先开展试验示范，示范面积160亩；2022年，其在湖南省湘潭县、赫山区、湘阴县等15个县市区开展示范，总面积1155亩；2023年，其在湖南省内外13个县市区开展示范，总面积600亩，均实现安全生产，并在各示范点表现出极显著的降镉效果。

李莉举例，“西子3号”“西子4号”“西子5号”“西子11号”“西两优2号”“西两优4号”的糙米平均镉含量分别为0.021毫克/千克、0.047毫克/千克、0.039毫克/千克、0.007毫克/千克、0.023毫克/千克、0.044毫克/千克，大幅低于国家限量标准值，与对照组相比降镉幅度达到95%以上。在镉低积累的基础上，“西子系列”镉低积累水稻还表现出了优质、高产特性，真正实现了土壤镉超标稻田里产放心大米。

2023年，“西子3号”成为我国首个通过国家审定的镉低积累水稻品种，可在湖南、江西、浙江、湖北等地的双季稻区的耕地安全利用区(镉含量小于或等于1.5毫克/千克)开展晚稻种植。

染色体片段缺失型镉低积累水稻智能设计育种技术助力我国实现了镉低积累水稻重大品种选育的种质创新，引领南方镉污染稻田走上了绿色优质、增产增效之路，为粮食丰产、农业增效、农民增收、产业兴旺提供了重要技术支撑。

今年，“西子3号”已在我国长江中下游地区省份开展大面积推广种植，这对保障食品安全、国家粮食安全具有重要意义。

“未来，我们将重点攻关杂交水稻智能设计育种技术，培育超高产、口感好、镉低积累、多抗、广适的杂交水稻新品种，为保障国家粮食安全作出应有贡献。”柏连阳说。

## 研究进展

### “蚕姑娘”性染色体基因组密码破解

科技日报讯(记者雍黎)7月8日，记者从西南大学获悉，该校教授方银团队首次获得了家蚕W染色体完整基因组序列，并揭示了鳞翅目昆虫W染色体起源与进化新机制。相关研究成果近日发表于期刊《科学进展》。

家蚕性别的决定机制一直受到科学界关注。以家蚕为代表的鳞翅目昆虫性染色体在昆虫界独树一帜。不同于大多数昆虫性染色体组为XX/X系统，其性染色体以ZZ/ZW系统为主，其中雄性为ZZ，雌性为ZW。1916年，日本学者首次发现家蚕W染色体。然而，该染色体序列一直没有被破译。

“我们这次攻克了家蚕基因组全序列研究的最后堡垒。”方银介绍，在20余年的家蚕基因组研究中，虽然科学家们完成了种质资源“千蚕基因组计划”，发布了世界首张“家蚕超泛基因组图谱”，创建了“数字家蚕”基因库，但对家蚕性别起决定性作用的W染色体序列却从未发布。

“不是科学家们‘重男轻女’，而是‘蚕姑娘’的W染色体序列解析太难。”方银说，本次研究团队获得了高质量的家蚕W染色体序列，并且发现家蚕W染色体包含137个拷贝雌性性别决定因子(Fem)，76个蛋白编码基因。这解释了为什么通过基因组敲除Fem无法完全实现雌性向雄性转变，因为基因组操作很难将W染色体上数目众多的Fem拷贝完全敲除。在此之前，还没有任何关于家蚕W染色体蛋白编码基因的报道。

同时，研究揭示了鳞翅目昆虫W染色体形成的新机制——单个Z染色体转换。这一研究结果对家蚕性别调控研究、基于W染色体的遗传改造和分子育种研究意义重大。

## 我科学家发现调控水稻

### 高效吸收利用氮素的“闸门”

科技日报讯(记者金凤 通讯员赵广欣 许天颖)7月8日，记者从南京农业大学获悉，中国工程院院士、该校水稻遗传育种创新团队带头人万建民团队首次在分子遗传学层面阐明了过量施氮肥导致水稻无效分蘖形成的机理，从水稻自然群体中发掘出能高效吸收利用氮素的单倍型转录因子OsGA-TA8-H。同时，团队结合基因编辑和回交育种技术，创制了高效吸收利用氮素的水稻品种材料。相关成果发表在国际学术期刊《自然遗传学》上。

在稻田里施加氮肥会提高水稻产量，但过量施用却会加剧水稻无效分蘖，降低水稻产量和氮素利用效率。如何帮助水稻调控氮的吸收，成为科学家关注的热点。

“氮肥施加到农田以后，以两种形式存在，一种是铵态氮，一种是硝态氮。在稻田中，氮肥以铵态氮形式存在得更多。”论文共同通讯作者、南京农业大学教授王春明告诉记者，铵离子需要通过细胞膜上的转运蛋白，才能被水稻吸收利用。

“此次我们在地方水稻品种中发现了转录因子OsGA-TA8-H。它类似调控铵离子转运的一道‘闸门’，可以调控转运蛋白工作。”王春明介绍，这道“闸门”可以双向调控氮素利用效率。在低氮条件下，“闸门”通过增加水稻转录蛋白OsAMT3.2的表达，促进水稻对铵的吸收；在高氮条件下，它又能适当提高转录因子OsTCP19的表达，促进更多分蘖发育成有效分蘖，减少无效分蘖形成。

王春明说，2013年起，团队从近万份水稻育种材料中筛选出1000份性状明显分离的地方品种。在此基础上，他们又进一步筛选出175份材料进行全基因组测序和基因组关联分析，最终找到OsGATA8-H并进行3年的田间实验，通过基因敲除和过表达完成了从基因到表型的功能验证。

“我们通过基因组编辑和基因聚合技术，将OsGATA8-H导入现代栽培品种中。”王春明介绍，利用OsGATA8-H可以促进水稻吸收氮肥中的营养和有效分蘖形成，提高水稻产量。

国际专家评价，万建民团队鉴定了氮高效关键转录因子Os-GATA8-H并探索了等位基因多样性，获得了系统深入的创新性成果。在现代水稻品种中发现优异单倍型OsGATA8-H，将对水稻氮高效遗传育种研究产生深远影响。

## 害虫抗药性权衡机制揭示

科技日报讯(记者马爱平)7月8日，记者从中国农业科学院获悉，该院蔬菜花卉研究所研究员张友军团队系统全面地解析了关于昆虫抗药性演化与其适合度代价权衡机制的科学难题，为揭示害虫抗药性进化机制、指导害虫抗药性治理提供了新思路。相关研究成果日前发表在期刊《美国国家科学院院刊》上。

自然选择促使生物在适应性进化中获益，但同时经常伴随着适应性成本，形成了“鱼和熊掌不可兼得”的进化权衡现象。已有研究发现，害虫抗药性作为生物适应性进化的典型案例，时常伴随着适合度代价。

张友军介绍，烟粉虱是世界性重大农业害虫，也是抗药性问题最突出的害虫。研究发现，烟粉虱体内有一种叫作丝裂原激活蛋白激酶的信号通路。这个通路上的两个关键组件能够一起作用，激活一种转录因子，并让它发生磷酸化。磷酸化的过程会促进解毒酶基因大量表达，而解毒酶能够帮助烟粉虱抵抗新烟碱类药剂，从而产生广谱抗性。

“同时，研究发现，这两个关键组件还能激活另一种转录因子。这种转录因子会抑制卵子发生基因表达，导致烟粉虱卵巢发育异常。这是烟粉虱为了获得抗药性而付出的生殖代价。”张友军告诉记者。

《美国国家科学院院刊》责任编辑、美国科学院院士弗雷德·古尔德认为，该研究开辟了昆虫抗药性研究的新领域，并为其他研究者提供了重要参考。

# 筑牢免疫防线 保障肉鸭健康

◎本报记者 张晔 实习生 胡泽妍

如今，鸭子已经成为中国人餐桌上重要的肉制品。据统计，我国肉鸭的年出栏量已超过40亿只，鸭子成为我国肉产品的第三大来源。但长期以来，鸭用疫苗品种不全，特别是多种新发疫病仍无疫苗可用，成为制约我国养鸭业发展的短板。

近日，记者从江苏省农业科学院获悉，该院兽医研究所水禽疫病防控创新

团队经过十余年持续攻关，成功研制出3种用于鸭病防控的疫苗，并获得新兽药注册证书。这些疫苗现已在全国养鸭地区进行推广应用。

## 瞄准养鸭业疫苗缺口

尽管中国肉鸭生产量占全球70%以上，但相比鸡和猪，家鸭养殖历史短、研究起步晚。西方国家鸭类养殖量少，在鸭用疫苗的研发上基本没有投入，可供我国参考的疫苗产品也少。这些因素造

成国内鸭用疫苗产品长时间短缺。

随着我国肉鸭养殖集约化程度不断提高，疫病的发生情况日趋复杂。肉鸭养殖出现老病反复、新病不断、多病原混合感染频发等现象。因此，鸭用疫苗短缺成为当前我国养鸭业急需解决的问题。

科学研究表明，H9N2亚型禽流感病毒在我国家禽和野鸟中广泛流行，严重威胁我国养殖业的健康发展。

江苏省农业科学院水禽疫病防控创新团队负责人、研究员刘青涛介绍，此前，在我国应用的H9N2灭活疫苗主要用于鸡，鸭用疫苗缺乏。为此，该团队针对H9N2亚型禽流感病毒在鸭群中的流行情况开展了系统调查，并对其流行和基因演化特点进行了研究，筛选出一株对鸭呈现高免疫原性的疫苗候选毒株。随后，团队在实验条件下建立动物感染与发病模型，成功研制了国际上首个鸭用H9N2亚型禽流感灭活疫苗。

该疫苗免疫原性好、免疫保护谱广。在经过疫苗制造规程和标准检验后，团队对研究资料进行汇总和整理，并申请临床试验批件。疫苗成功获得国家新兽药注册证书，并在7家动物保健品企业实现了转化和推广应用。

## 更多新型疫苗实现产业化

肝炎是一种让人闻之色变的传染性疫病。其实，不仅人会得肝炎，鸭子也会得。由于致死率较高，鸭肝炎病毒已成为

当前对我国养鸭业危害最为严重的病毒。

“在我国流行的鸭肝炎病毒主要为鸭甲肝病毒1型和3型，对雏鸭的致死率高达90%以上。”刘青涛介绍，他们通过技术攻关，在世界上首次解决了鸭肝炎病毒冷冻干燥保存的技术难题，针对鸭甲肝病毒1型率先成功研制活疫苗。该疫苗获得新兽药注册证书并实现转化。

此外，面对近年来在我国大规模暴发的鸭甲肝病毒3型情况，团队快速研制成功活疫苗，并于2017年获得国家新兽药临床试验批件。目前，该疫苗已进入新兽药注册申报阶段。

对于肉鸭养殖中危害最为严重的两种细菌性传染病——鸭传染性浆膜炎和大肠杆菌病，团队基于充分的流行病学调查研究，成功研制出鸭传染性浆膜炎、大肠杆菌病二联灭活疫苗。

这种二联灭活疫苗生产用菌株为当前鸭群中的优势流行菌株，通过采用高密度罐体发酵技术进行抗原生产，抗原含量高、免疫原性好。接种一针该疫苗可预防两种疫病，对鸭疫里氏杆菌和大肠杆菌的攻毒保护率分别达到90%和80%以上。

此外，团队还通过病毒生物学特性和免疫原性研究，以及疫苗安全性和免疫效力评价，成功研制了鸭禽流感(H9N2)、坦布苏二联灭活疫苗。目前该疫苗已完成临床试验评价。这些新型鸭用疫苗丰富了鸭细菌性疫病的免疫防控产品。



图为新疆洛浦县奋斗家禽养殖农民专业合作社鸭舍一角。 新华社记者 丁磊摄