

DOI: 10.13376/j.cblls/2018133

文章编号: 1004-0374(2018)10-1108-05



罗利军, 上海市农业生物基因中心首席科学家, 华中农业大学博士生导师。长期从事水稻遗传资源的基础与应用基础研究, 研究领域涉及农业基因资源的收集与保护、水稻重要基因的发掘与功能等。近年来致力于水稻节水抗旱的遗传基础与品种选育研究, 提出了发展“节水抗旱稻”理念与培育策略, 选育出“沪优2号”、“早优73”等多个常规和杂交节水抗旱稻, 在生产上大面积推广。在 *JXB* 等刊物发表论文 200 余篇, 主持获得国家技术发明奖二等奖 1 项, 省级科技进步奖或技术发明奖一等奖 4 项。

节水抗旱稻的培育与应用

罗利军

(上海市农业生物基因中心, 上海 201106)

摘要: 节水抗旱稻是指结合了水稻的高产优质和旱稻的节水抗旱特性的新的栽培稻品种类型。不同的遗传资源在不同的抗旱性上表现优势, 培育节水抗旱稻要充分注意整合避旱性、耐旱性和水分利用效率。长期的育种实践和组学研究表明, 水旱稻配组结合大田强胁迫鉴定和选择是培育节水抗旱稻的有效途径。目前, 早优 73、沪早 61 等不同类型的节水抗旱稻新品种在生产上推广应用展示了广阔的前景, 既可在中低产田中实现旱种旱管、增产稳产, 又可在高产田节水栽培、少施化肥农药, 大幅度减少面源污染。

关键词: 节水抗旱稻; 抗旱性; 避旱性; 耐旱性; 水分利用效率

中图分类号: S511 **文献标志码:** A

Development of water-saving and drought-resistance rice (WDR)

LUO Li-Jun

(Shanghai Agrobiological Gene Center, Shanghai 201106, China)

Abstract: Water-saving and drought-resistance rice (WDR) refers to a new type of cultivated rice combined both high yields potential and acceptable grain quality as current paddy rice, as well as water saving and drought resistance as traditional upland rice. It is important to integrate the drought avoidance, drought tolerance and high water use efficiency (WUE) together in WDR breeding as different germplasm resources have advantage in different kind of drought resistance. The breeding history and genomics studies have indicated that the paddy rice and upland rice hybridization breeding with identification and strong selection in field stress is an effective approach to develop WDR. Several WDR varieties, such as Hanyou 73 and Huhan 61 were registered and released to farmers and show promising application prospects in production.

Key words: WDR; drought resistance; drought avoidance; drought tolerance; WUE

收稿日期: 2018-09-19

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)“绿色超级稻新品种培育”(2014AA10A600)

通信作者: E-mail: lijun@sagc.org.cn

1 提高节水抗旱性是水稻品种改良的重要目标

水稻是最主要的粮食作物之一，全世界一半以上的人口以稻米为主食，因此，水稻品种的选育与生产一直受到广泛的重视。过去几十年，立足于增加水稻单产、改善稻米品质、提高对病虫害的抗性，我国水稻育种取得了举世瞩目的成就，为保障国家粮食安全做出了重大的贡献。

然而，水稻生产消耗了大量的淡水资源。据估计，我国农业用水 3 920 亿 m^3 ，占用水总量的 70.4%。其中水稻生产用水占农业用水的 70%^[1]。我国是贫水大国，是世界上 13 个严重缺水的国家之一，农业水资源紧缺已经成为继耕地之后，长期制约我国农业发展的因素，我国有限的水资源已不能满足水稻生产的需要。

同时，我国又是一个干旱频繁发生的国家，即使是降水量相对较为丰富的长江流域和华南稻区，也经常发生区域性、季节性的干旱危害。由于干旱，我国水稻损失在 143~250 kg/hm^2 ，严重干旱年份达 2 700 kg/hm^2 ^[2]。更为严重的是，近年来，我国主要稻区的旱灾有加剧的趋势，伏旱和秋旱的频繁发生造成了水稻大幅度减产^[3]。

另一个严重的问题是，由于水稻品种对水分的过度依赖，已形成了在水稻生产过程中田间长期保持水层的水稻种植方式，随着化肥和农药施用量的不断增加，形成了严重的农业面源污染；同时，由于田间长期淹水，产生大量的温室气体排放，稻田甲烷排放量占总排放量的 9%~30%^[4]。

因此，提高水稻的节水抗旱性已成为水稻品种改良的重要目标，培育和应用节水抗旱的水稻品种，对于增加和稳定水稻单产、缓解我国水资源短缺状况、保护生态环境和保障粮食安全均具有十分重要的意义。

2 节水抗旱稻的概念

栽培稻 (*Oryza sativa* L.) 由普通野生稻 (*Oryza rufipogon* L.) 进化而来。野生稻起源于干湿交替的沼泽地带，属于中生植物，对水生和旱生环境具有双重适应性。在野生稻通往栽培稻的长久演化过程中，形成了二类对水分需求不同的生态类型，一类是适应于水生环境的水稻 (paddy rice, lowland rice)，一类是在干旱条件下完成其生长发育过程的旱稻 (upland rice)。

水稻已在世界上广泛栽培，这一方面得益于水田条件的不断完善，另一方面得益于水田栽培条件

下的品种改良与栽培技术研究。其中，两个标志性的成果使水稻的产量潜力实现了质的飞跃，一是 20 世纪 50 年代的高秆变矮秆，一是 70 年代的杂交水稻选育成功。近年来，随着籼粳杂交、理想株型、抗病抗虫等方面的研究深入，产量潜力进一步提高，大部分品种的稻米品质也得到较大的改善。

旱稻又称陆稻、山栏稻，生长于山坡地，在我国西南、华南有着悠久的种植历史。现在，有些地区仍保持刀耕火种的习俗。当地山民往往先放火烧山，然后采取点播或撒播的方式，将旱稻种子直播于山坡地，待种子吸水萌发生长；整个生育期没有灌溉，完全靠雨水，不施肥料与农药。这类旱稻属于传统的旱稻品种，产量水平低，一般为 1.50~2.25 t/hm^2 。在产量与米质等方面，大大落后于现在大面积种植的水稻品种。

旱稻与水稻在抗旱性上有着明显的遗传分化^[5]和表观遗传分化^[6]。旱稻适应于旱作农业生态系统，在生长过程中所需水分主要依赖降水，土壤没有犁底层，难以保存水分。长期的驯化过程中，会遇到较高频次和较强程度的干旱胁迫，因此，其抗旱性特别是避旱性强。水稻则是适应于水田种植，水田具有犁底层，保水条件较好，但在没有灌溉条件下的望天田，也会遇到一定时期或相当程度的干旱胁迫；由于犁底层限制了根系的生长，植物主要依靠耐旱性抵御干旱，因此有些水稻品种具有比较好的耐旱性。

节水抗旱稻 (water-saving and drought-resistance rice, WDR) 是指既具有水稻的高产优质特性，又具有旱稻的节水抗旱特性的一种新的栽培稻品种类型。它是在水稻科技进步的基础上，引进旱稻的节水抗旱特性而育成的新品种。在灌溉条件下，其产量、米质与水稻基本持平，但可节水 50% 以上；在没有灌溉条件的中低产田种植，具有较好的抵抗干旱的能力，可实现旱直播旱管，增产稳产；在栽培上，简单易行，既可在水田节水栽培，又可在旱地直播种植，生产过程中节能低碳环保^[7]。2016 年 4 月，中华人民共和国农业部正式发布实施《节水抗旱稻术语》行业标准 (NY/T 2862-2015)。

3 培育节水抗旱稻应充分整合耐旱性、避旱性和水分利用效率

抗旱性是指在干旱条件下水稻生存并形成产量的能力。抗旱性是一个极其复杂的性状，根据植株在遇到干旱胁迫时的反应，抗旱性分为以下四种类型。

(1) 逃旱性：指植物通过调节生育进程避免干旱影响的能力。具体表现是在干旱来到之前加快成熟，或作物水分敏感期与雨季高峰一致，从而避过干旱。事实上，逃旱性也反映了植物利用雨水的能力。

(2) 避旱性：指植物在干旱的条件下减少水分丧失或维持吸水，从而保持高水势的能力。主要是通过发展强大的根系来吸收水分并运转至地上部分，以及通过适量关闭气孔或不渗透的角质层来减少水分消耗。传统旱稻生长于没有犁底层的山坡地，遇到干旱胁迫时，往往通过根系向下生长以吸收土壤深层的水分，因此传统旱稻品种的避旱性较强。

(3) 耐旱性：指植物受干旱影响叶片水势变低的情况下维持代谢的能力。主要表现在两个方面：一是植物通过细胞内渗透调节物质的主动积累，进而增加渗透调节能力以维持较高的膨压；二是植物提高清除体内所积累的有害物质和抗氧化的能力。应该指出，一些传统水稻品种遇干旱胁迫时，根系受制于犁底层不能向下生长增加避旱性，但耐旱性受到选择，即耐旱性较强。

(4) 复原抗旱性：指作物在经过一段时期的干旱后的恢复能力，主要与植株耐干化、耐脱水的耐力有关。

事实上，植物的抗旱性往往是上述能力的综合表现，但不同抗旱资源在不同特性上表现优势。综合抗旱性强的品种不一定避旱性和耐旱性都强。例如，著名的抗旱品种 IRAT109 的抗旱系数达 1.12，抗旱性一级，本团队利用 IRAT109 构建的作图群体，定位和克隆了几个重要的避旱性基因^[8-9]。以其为抗源，育成了粳型节水抗旱稻品种沪早 3 号，通过国家审定并在生产上大面积推广。但是，IRAT109 的耐旱性较差，其耐旱系数仅为 0.21，甚至低于水稻品种珍汕 97B。本团队从珍汕 97B/IRAT09 的作图群体中定位到一个抗旱 QTL，克隆了转录因子 OsGRAS1，其通过调控抗氧化酶相关基因的表达增加耐旱性^[10]。

值得提出的是，来源于非洲的旱稻品种 IAC1246 不但抗旱性强（抗旱系数达 1.32），而且表现出较强的耐旱性（耐旱系数为 0.47），具体表现为：在干旱胁迫下，IAC246 的渗透调节和抗氧化能力强于 IRAT09，在干旱早期可保持正常的光合作用。转录组研究表明，IAC1246 和 IRAT09 的光合作用相关差异基因表现不同的调控模式；代谢组分析揭示，光合作用保护物质阿魏酸在 IAC1246 中显著增加^[11]。因此，在节水抗旱稻的选育过程中，一定要充分考虑兼顾避旱性和耐旱性。在亲本选择时，注意避旱

性主要来源于旱稻，而耐旱性则来源于旱稻与水稻。

另一个关键的问题是水分利用效率。水稻水分利用效率涉及两个方面的范畴，一是植株维持正常生理代谢活动所需的生理需水量，二是在一定水分状态下的生产能力。水分利用效率与抗旱性不同，前者更多地依赖于产量潜力。本团队曾对节水抗旱稻中早 3 号与杂交水稻汕优 63 在不同需水量条件下的产量与水分利用效率进行比较，结果显示，汕优 63 的水分利用效率显著高于中早 3 号^[12]，表明抗旱性强的品种不一定水分利用效率高。从提高水分利用效率上讲，品种的产量潜力往往比抗旱性更为重要。因此，在节水抗旱稻选育时，还要充分利用高产品种作为亲本之一。

4 水旱稻配组结合大田强胁迫鉴定和选择是培育节水抗旱稻的有效途径

节水抗旱稻既要具有水稻的高产优质特性，又要具有旱稻的节水抗旱特性，在育种亲本的选择上，至少要包括水稻和旱稻两种类型，而实行“水旱稻杂交育种”是有效的途径。

品种的抗旱性实际反映品种在干旱胁迫下生存与生产能力的总和，也就是说，在干旱条件下，不但要生存，而且要尽可能的获得产量。因此，在育种后代的选择过程中，必须设置不同的目标环境进行交叉选择。例如，在没有犁底层的山地进行避旱性选择，在水田旱种进行耐旱性选育，在高产栽培条件下进行产量选择，以充分整合避旱性、耐旱性和高水分利用效率。

近年来，本团队采用水旱稻配组结合大田强胁迫鉴定和选择技术，选育出沪早 3 号、沪早 15、沪早 61 等一系列常规节水抗旱稻^[13]。通过结合水稻的耐旱性、旱稻的避旱性及高水分利用效率，育成了沪早 1A、沪早 2A 及相应的杂交节水抗旱稻，通过国家或省级审定，在生产上大面积推广，普遍表现为节水抗旱、优质高产^[14-15]。

值得提出的是，抗旱性是数量性状，涉及众多的基因位点与调控网络，通过设置目标环境高强度胁迫筛选，可使抗旱基因及其网络在世代中进行传递^[16]。

例如，粳型节水抗旱保持系沪早 2B 是在优质粳稻保持系寒丰 B 的基础上，通过杂交与多代回交导入抗旱性后育成的新型节水抗旱保持系。导入的抗旱性来源于沪早 3 号，而沪早 3 号的亲本包括旱稻品种 IRAT109、耐旱品种麻晚糯和 P77。干旱胁迫条件下，沪早 2B 与亲本寒丰 B 的表型存在显著

差异，沪早 2B 的枯死叶数量较低，持绿性、产量显著高于亲本寒丰 B。

本团队对沪早 2B 和寒丰 B 进行了基因组和转录组分析。首先，在基因组层面上，沪早 2B 与亲本寒丰 B 之间的基因组遗传相似性为 84%，包含差异 SNP 突变位点的基因有 7 256 个，暗示沪早 2B 中改良的节水抗旱性状可能是来源于继承的祖先亲本中的抗旱相关基因。其次，在转录组层面上，干旱响应差异基因在沪早 2B 中显著富集于转录调控生物学通路，而在不抗旱亲本寒丰 B 中主要富集于氧化还原生物学过程，提示抗旱性改良具有明确的表达网络富集的差异。最后，在转录后修饰层面，基因受到干旱胁迫后的可变剪接在沪早 2B 与亲本寒丰 B 的表达具有显著差异，并富集在转录因子调控网络。这些结果表明，常规杂交结合在目标环境高强度胁迫选择下，其基因组保留了更多干旱适应位点；抗旱相关基因聚合于转录因子调控网络，通过网络协同效应，使得子代的抗旱性得到显著提高^[16-17]。

事实上，即使是水稻品种，通过长期的旱地种植，其抗旱性也会增加。本团队将水稻品种 II-32B 在干旱条件下连续人工驯化 10 代，发现大量的干旱诱导的表观遗传分化；驯化后的 II-32B 在干旱胁迫下，细胞损伤减少，活性氧清除酶系统活性增强，结实率提高^[18]。因此，在节水抗旱稻的培育过程中，高强度的干旱胁迫筛选非常重要。

基于节水抗旱的遗传背景，利用分子标记与全基因组辅助选择，可快速实现节水抗旱稻质量性状如抗病虫特性的加值改良。例如，为改良节水抗旱不育系申 3S 的抗病虫性，本团队利用申 3S 为受体，R3(带有抗稻瘟病基因 *Pi9* 和抗褐飞虱基因 *Bph14*) 为供体，利用分子标记进行前景选择，利用全基因组芯片 (90K) 进行背景选择，至 BC₂F₂ 代，对 71 个同时带有 *Pi9* 和 *Bph14* 的单株检测相似度，结果最低 89.35%，最高 93.35%，平均达到 91.14%。从中选出的改良不育系 (BC₂F₆) 兼抗稻瘟病和褐飞虱。

5 节水抗旱稻的应用(举例)

近年来，包括籼型常规、籼型杂交、粳型常规和粳型杂交 4 个系列的节水抗旱稻已通过省级以上审定推广。这些品种适应性广，既可在高产稻田栽培，又可在中低产田种植；在栽培方式上，可实现水种水管、水种(直播或移栽)旱管、旱直播旱管等多种方式，也可与棉花、玉米等旱作物进行间作，还可在山坡地上与传统旱稻一样种植。

5.1 籼型杂交节水抗旱稻：早优 73

早优 73 是以沪早 7A 为母本与早恢 3 号配组而成，2014 年通过安徽省农作物品种审定委员会审定，以后分别通过江西、湖南、河南等省认定。早优 73 适应性广，在南至海南、北至河南、西至云贵 1 400 m 海拔、东到上海的广大地区均可种植。在安徽沿淮流域，全生育期 123 d 左右。株高 105 cm，根系发达，苗期早生快发，适合直播。2011 年参加安徽省早稻区试，平均产量为 7.08 t/hm²，比对照绿早 1 号增产 31.38%，达极显著水平。稻米品质经农业部稻米及制品质量监督检验测试中心检测，达国家二级优质米标准。2018 年 4 月召开的第二届中国(三亚)国际水稻论坛上，早优 73 被评为最受喜爱的十大优质稻米品种。

早优 73 适合多种种植模式。既可像一般水稻一样育秧移栽、水种水管，也可像小麦一样旱地直播、旱种旱管；可采用机直播、机穴播；可与玉米、棉花、芝麻等旱作物进行间作栽培。在有水灌溉的高产田种植，产量可达 12 t/hm² 以上；在无灌溉的中低产田进行旱种旱管，产量可达 9 t/hm²。

2012 年，安徽省阜南县洪河桥示范种植 6.67 hm²，采用机械旱直播，全生育期灌水 2 次，总灌水量 1 200 m³/hm²。专家组现场考察测产，经实收整田 0.18 hm²，按 13.5% 标准水分折算后，获实际产量 9.29 t/hm²。

2016 年，江西省永修县三角乡周坊村示范种植 24 hm²，采用人工旱直播，4 月 15 日播种，8 月 1 日齐穗，以复合肥 (N16:P16:K16) 为基肥施用 375 kg/hm²，后期追肥尿素 225 kg/hm²，全生育期无灌水，病虫害防治按一般水稻田管理。专家组现场测产，实际产量 9.54 t/hm²。

2017 年，安徽省颍上县润河镇盘庄示范种植 2 hm²，采用人工散播、水种水管，播种量 30 kg/hm²，6 月 3~5 日播种，基肥施用 (N18:P18:K18) 复合肥 525 kg/hm²，后期追肥尿素 150 kg/hm²，全生育期进行灌溉，在分蘖末期进行烤田，干湿交替。10 月 6 日实地现场收割测产，产量达 12.38 t/hm²。

早优 73 根系发达，再生能力强。2017 年，在湖南澧县、沅江做再生稻示范种植 40 hm²，其中在湖南省澧县梦溪镇涇河村示范面积 13.33 hm²，采用防高温、防低温、防倒伏、防纹枯病等病虫害、增强再生出苗能力的再生稻“四防一增”栽培技术，于 4 月 14 日直播，头季 8 月 14 日成熟。湖南省作物学会组织专家测产，采用联合收割机进行

实割, 平均产量达 10.36 t/hm² (10.14~10.59 t/hm²); 再生季 10 月 20 日收割, 产量 4.68 t/hm², 周年产量达 15.04 t/hm²。

5.2 粳型常规节水抗旱稻沪旱61

以 (沪旱 3 号 × 沪旱 11 号) F₁ 与 (武育粳 3 号 × 秀水 128) F₁ 复交选育而成, 2014 年参加上海市水稻品种区域试验, 2016 年通过上海市水稻新品种审定。属中熟晚粳类型, 在上海种植全生育期 161 d, 株高 95.1 cm。株型适中, 抗倒性强, 抗旱性 3 级, 米质主要指标达优质米 3 级。

沪旱 61 较好地结合了节水抗旱稻 (沪旱 3 号和沪旱 11 号) 的节水抗旱性和高产水稻 (武育粳 3 号和秀水 128) 的高产潜力, 全生育期田间不需保留水层, 水分利用效率较高。2016 年在上海市金山区廊下镇进行大田“节肥节水减排”示范种植, 实行水种旱管, 水田机械穴直播, 全生育期基本只靠雨水, 产量达 10.77 t/hm², 比大面积推广品种秀水 134 增产 5.4%, 稻米品质达二级优质米标准。

更为重要的是, 与种植秀水 134 (水种水管) 相比, 种植沪旱 61 不但减少灌水 53.3%, 少施尿素 76%, 少施复合肥 23.3%, 而且大幅度地减少了农业面源污染: 其中, 总氮和总磷的排放分别减少 69% 和 36.6%, 茚虫威和烯啶虫胺排放分别减少 88.9% 和 86.1%, 而灭草松、阿维菌素在旱作模式下几乎零排放^[19]。

6 节水抗旱稻育种展望

综上所述, 节水抗旱稻的育种取得了一些重要的进展, 现有品种在生产上也展示出广阔的应用前景, 随着我国农业绿色和持续发展的不断需求, 应进一步立足不同生态区不同稻作模式的特点, 调整育种目标, 特别注重多个绿色性状的整合, 培育“少打农药、少施化肥、节水抗旱、优质高产”的绿色超级稻。

一是加强氮磷营养元素高效利用的基因资源筛选、创新和育种利用, 在产量不明显降低的前提下培育可大量减少化肥施用的节水抗旱稻新品种;

二是实现多个抗病虫基因的有效累加, 或培育具有多个抗病虫基因的品种群体, 增强品种的抗病虫性;

三是注重稻米品质特别是食用米质的改良, 在实现绿色生产的基础上, 大幅度提高稻米的经济价值;

四是立足于轻型栽培, 注意整合耐直播 (长中胚轴)、耐盐碱、再生力强、耐高 (低) 温等优良性状相关基因。

[参 考 文 献]

- [1] Zhang Q. Strategies for developing green super rice. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 16404-9
- [2] 陈玉萍, 陈传波, 丁士军. 南方干旱及其对水稻生产的影响——以湖北、广西和浙江三省为例. 农业经济问题, 2009, (11): 51-7
- [3] 张启发. 绿色超级稻的构想与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 2
- [4] 张稳, 黄耀, 郑循华, 等. 稻国甲烷排放模型研究-模型及其修正. 生态学报, 2004, 24: 2347-52
- [5] Xia H, Zheng XG, Chen L, et al. Genetic differentiation revealed by selective loci of drought-responding EST-SSRs between upland and lowland rice in China. PLoS One, 2014, 9: e106352
- [6] Xia H, Huang WX, Xiong J, et al. Adaptive epigenetic differentiation between upland and lowland rice ecotypes revealed by methylation-sensitive amplified polymorphism. PLoS One, 2016, 11: e0157810
- [7] Luo LJ. Breeding for water-saving and drought-resistance rice (WDR) in China. J Exp Bot, 2010, 61: 3509-17
- [8] Lou QJ, Chen L, Mei HW, et al. Quantitative trait locus mapping of deep rooting by linkage and association analysis in rice. J Exp Bot, 2015, 66: 4749-59
- [9] Zhou LG, Liu ZC, Liu YH, et al. A novel gene *OsAHL1* proved to improve both drought avoidance and drought tolerance in rice. Sci Rep, 2016, 6: 30264
- [10] Xu K, Chen SJ, Li TF, et al. *OsGRAS23*, a rice GRAS transcription factor gene, is involved in drought stress response through regulating expression of stress-responsive genes. BMC Plant Biol, 2015, 15: 141-53
- [11] Ma XS, Xia H, Liu YH, et al. Transcriptomic and metabolomic studies disclose key metabolism pathways contributing to well-maintained photosynthesis under the drought and the consequent drought-tolerance in rice. Front Plant Sci, 2016, 7: 1886
- [12] 邹桂花, 梅捍卫, 余新桥, 等. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响. 作物学报, 2006, 32: 1179-83
- [13] 罗利军, 梅捍卫, 余新桥, 等. 节水抗旱稻及其发展策略. 科学通报, 2011, 56: 804-11
- [14] 余新桥, 李明寿, 梅捍卫, 等. 杂交节水抗旱稻新组合沪优2号的选育. 分子植物育种, 2010, 8: 1177-9
- [15] 余新桥, 李明寿, 刘国兰, 等. BT型节水抗旱不育系‘沪旱2A’的选育. 上海农业学报, 2011, 27: 43-6
- [16] Wei HB, Feng FJ, Lou QJ, et al. Genetic determination of the enhanced drought resistance of rice maintainer HuHan2B by pedigree breeding. Sci Rep, 2016, 6: 37302
- [17] Wei HB, Lou Q, Xu K. Alternative splicing complexity contributes to genetic improvement of drought resistance in the rice maintainer HuHan2B. Sci Rep, 2017, 7: 11686
- [18] Zheng XG, Chen L, Xie H, et al. Transgenerational epimutations induced by multi-generation drought imposition mediate rice plant's adaptation to drought condition. Sci Rep, 2017, 7: 39843
- [19] 高欢, 赵洪阳, 聂元元, 等. 节水抗旱稻研究进展及其在水稻绿色生产中的作用. 上海农业学报, 2017, 33: 123-8