

水分与氮素及其互作对水稻产量和水肥利用效率的影响研究进展

李俊峰 杨建昌*

(扬州大学 江苏省作物遗传生理国家重点实验室培育点/粮食作物现代产业技术协同创新中心, 江苏 扬州 225009; *通讯联系人, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Research Advances in the Effects of Water, Nitrogen and Their Interaction on the Yield, Water and Nitrogen Use Efficiencies of Rice

LI Junfeng, YANG Jianchang*

(Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology/Co-Innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; *Corresponding author, E-mail: jcyang@yzu.edu.cn)

Abstract: Understanding the effects of water, nitrogen (N) and their interaction on the yield, water and N use efficiencies of rice would have great significance in synergistically realizing high yield, high water use efficiency (WUE) and high N use efficiency (NUE). This paper reviewed the advances achieved in water-saving irrigation techniques, NUE and N fertilizer application techniques, coupling effect of water and N on grain yield, WUE and NUE in rice, and crop-soil relationship and its mechanism regulated by water and N. The existing problems were discussed, i.e., very limited work on synergistic interaction between water and N on the crop growth and soil quality; little information on the molecular mechanism that water and nitrogen interact on the efficient absorption and utilization of water and nitrogen in high-yielding rice; and yet to be established the crop-soil integrative management system for simultaneous increases in grain yield, WUE and NUE. Aiming to solve these problems, several important issues meriting further investigation were suggested, that is, the synergistic interaction between water and N on the crop and soil for high yield, high WUE and high NUE and its biological process, the physiological and molecular mechanism in which high-yielding rice absorbs and utilizes water and N efficiently, and crop-soil integrative approaches and key techniques to simultaneously increase grain yield, WUE, and NUE in rice.

Key words: rice; water-nitrogen interaction; grain yield; water use efficiency; nitrogen use efficiency

摘 要: 了解水分、氮素及其互作对水稻产量与水、氮利用效率的影响, 对协同提高水稻产量与水氮利用效率有重要意义。本文概述了水稻节水灌溉技术、氮肥利用效率与氮肥施用技术、水分与氮素对水稻产量及水氮利用效率的耦合效应、作物-土壤关系及水氮调控机制等方面取得的进展; 讨论了存在的问题, 这些问题包括: 高产水稻作物与土壤的水氮互作效应尚不明确; 高产水稻水氮耦合与高效利用的分子机理不清楚; 协同提高水稻产量与水氮利用效率的调控途径尚未掌握。针对这些问题, 建议今后重点研究: 高产水稻作物与土壤的水氮互作效应及其机制; 水氮互作调控水稻吸收利用水分和氮素的生理与分子机理; 协同提高水稻产量和水氮利用效率的调控途径与关键技术。

关键词: 水稻; 水氮互作; 产量; 水分利用效率; 氮肥利用率

中图分类号: S143.1; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2017)03-0327-08

水稻是我国主要的粮食作物^[1]。随着人口的增长和经济的发展, 需要不断增加粮食产量。但另一方面, 随着产量的增加, 需要加大水肥资源的投入,

在生产上往往出现高产、水肥利用效率低的情况。如何实现高产与水肥利用效率的协同提高, 这是生产上亟待解决的问题, 也是国内外水稻栽培研究领

收稿日期: 2016-05-11; 修改稿收到日期: 2016-8-22。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31461143015, 31271641, 31471438); 国家科技支撑计划资助项目(2014AA10A605, 2013BAD07B09); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD); 扬州大学高端人才支持计划资助项目(2015-1)。

域的热点^[1,2]。在诸多影响作物生长的因素中,水分和氮素是决定作物产量的两个最重要因素,也是人为调控最频繁、影响最大的作物生长环境因子^[3-5]。在水、肥供应不受限制的条件下,水分和氮素对作物产量和品质的影响在数量和时间上存在着最佳的匹配或耦合。在水分亏缺条件下,氮素是开发土-水系统生产效能的激活剂,水是肥效发挥的关键。水分和氮素这两者既互相促进,又互为制约。只要水分和氮肥供应合理匹配,就会产生相互促进机制,实现作物产量、水分与氮肥利用效率的协同提高^[6-8]。因此,国内外对于水稻高产与水分养分高效利用的管理技术及水、氮的互作效应等进行了大量研究。本文概述了以下几个方面取得的进展:水稻节水灌溉技术,水稻氮肥利用效率与氮肥施用技术,水分与氮素对水稻产量及水、氮利用效率的耦合效应,作物-土壤关系及其水氮调控机制,讨论了存在的问题并对今后研究重点提出了建议,以期协同提高水稻产量、水分与氮肥利用效率提供参考。

1 水稻节水灌溉技术

二十一世纪的全球农业面临两大挑战:一是为满足人口的增长需要不断增加粮食产量;二是在不断增加粮食产量的同时需要应对水资源的日益减少^[9]。中国是世界上 13 个水资源贫乏国家之一,人均拥有的水资源量仅为世界平均水平的四分之一。水稻是我国主要的粮食作物,也是用水的第一大户,约占农业用水的 60%~70%^[10]。在过去 10 年中,平均每年农业灌溉缺水 300 亿 m^3 ,每年受旱面积 2000 万~2600 万 hm^2 ,即使在水资源丰富的南方,每年有 160 万~200 万 hm^2 水稻因季节性干旱而严重减产^[11-12]。不仅如此,我国稻田的灌溉用水量,水分利用效率低。在水稻生育期内降雨量相近情况下,我国水稻的灌溉水量比美国高出 30%~40%,灌溉水利用效率(单位灌溉水的稻谷生产量)比美国低 40%~50%^[12]。随着人口的增长、城镇和工业的发展、全球气候的变化以及环境污染的加重,用于作物灌溉的水资源愈来愈匮乏,严重威胁作物特别是水稻生产的发展^[5, 12, 13]。

为减轻水资源紧缺对水稻生产的威胁,国内外稻作科学工作者对水稻的需水供水规律、需水供水的形态生理指标、不同稻作制度下的灌溉模式和技术等进行了大量的研究,创建了多种节水灌溉技术如畦沟灌溉、干湿交替灌溉、间歇湿润灌溉、覆膜旱种、生育中期搁田、无水层种稻、旱育秧、水稻

强化栽培等^[5, 14-19],为推动稻作科学的进步和发展做出了重要贡献。在众多的节水技术模式中,水稻干湿交替灌溉被认为是最为行之有效的节水灌溉技术之一。目前该技术已在亚洲主要水稻生产国推广应用^[20-22]。干湿交替灌溉主要技术特点是在水稻生育过程中,在一段时间里保持水层,自然落干至土壤不严重干裂再灌水,再落干,再灌水,如此循环^[20-22]。干湿交替灌溉技术虽然有显著的节水和提高水分利用效率的效果,但对水稻产量的影响,因土壤质地、土壤落干程度以及水稻生长季节温度和降雨量等因素不同而异,有的报道增产,有的报道减产^[20-25]。

Yang 等^[23]和 Zhang 等^[26]研究表明,在温带地区(如江苏省),干湿交替灌溉对水稻产量的正负效应主要取决于土壤落干的程度。在干湿交替灌溉中进行轻度土壤落干(土壤水势不低于 -15 kPa ,或中午叶片水势不低于 -1.1 MPa),则这种干湿交替灌溉(称之为轻干湿交替灌溉),不仅可以节约用水和提高水分利用效率,而且可以较常规灌溉(以水层灌溉为主,中期搁田,收获前一周断水)显著提高产量和改善稻米品质。在轻干湿交替灌溉条件下,根干质量和根系活性的增加、无效分蘖的减少和分蘖成穗率的提高、冠层结构的改善(顶部叶片挺立和绿叶面积持续期长)、花前储存在茎鞘中非结构性碳水化合物(NSC)向籽粒运转的增多、灌浆期迟开花弱势粒中蔗糖-淀粉代谢途径关键酶活性的增强,是该灌溉模式提高产量和品质的重要生理原因^[23, 25-27]。

有关干湿交替灌溉对水稻氮肥利用效率影响的研究,不仅数量少,而且存在不同的研究结果。一些研究者认为,干湿交替灌溉会增强土壤硝化与反硝化作用,增加氧化亚氮的排放,因而可减少氮素在稻株中的积累,降低氮肥利用效率^[24, 28-30]。但 Liu 等^[8]和 Wang 等^[31]研究表明,在轻干湿交替灌溉模式下,稻株中氮的吸收量、单位吸氮量的生产力(产量/氮吸收量)和氮肥偏生产力(产量/施氮量)均显著高于常规灌溉。但对于在干湿交替灌溉模式下氮肥利用效率降低或提高的机理尚不清楚。

2 我国的氮肥利用效率与氮肥施用技术

氮素是水稻生产中另一个关键因子,也是水稻生产成本投入的重要部分。遗传改良、栽培技术进步和化肥投入量的不断增加使得我国水稻单产从 1950 年的 2.1 t/hm^2 增加到 2014 年的 6.81 t/hm^2 ^[32,33],

为保证我国粮食安全和社会稳定起到了十分重要的作用。但自 20 世纪 90 年代开始,我国作物生产出现了氮肥投入过量、利用效率低的问题^[34]。我国目前水稻平均氮肥施用量为 180 kg/hm^2 , 比世界水稻氮肥平均施用量高出 75%^[34-36]。在高产的太湖稻区,近年水稻平均产量为 8.6 t/hm^2 , 较全国平均产量高出 37%, 氮肥(以纯氮计)平均施用量为 300 kg/hm^2 , 较全国一季水稻的平均氮肥施用量高出 67%, 氮肥平均农学利用率(单位施氮量增加的产量)不足 12 kg/kg , 不到发达国家一半^[36-38]。氮肥投入量过多、利用效率低不仅增加生产成本,而且还会造成严重的环境污染^[36-39]。

为了提高氮肥利用效率,减少氮素损失对环境的不利影响,我国农业科学工作者对水稻氮肥吸收规律、氮肥的损失途径和施用技术等进行了大量研究,创建、集成或引进了一系列水稻氮肥高效利用施肥技术。这些技术包括:氮肥总量控制与作物分生期调控相结合的氮素管理技术、实地养分管理技术、水稻精确施肥技术、测土配方施肥、“三定”栽培技术、“三控”施肥技术等^[34,40-43]。这些技术的共同特点是:根据目标产量和土壤供肥能力确定总施氮量,根据水稻长势长相或叶色对追肥进行调节;减少基肥施用量,增加穗肥施用比例(前氮后移)。这些技术可以减少无效分蘖,减轻病虫害发生和倒伏。但这些技术大多集中在保持目前产量水平或略有增产前提下提高氮肥利用效率^[44]。自 1997 年以来,尽管化肥投入量不断增加,但我国水稻单产增加却十分缓慢。我国水稻单产的年增产率,20 世纪 80 年代为 3.7%,90 年代为 0.9%^[45];2000—2007 年为 0.5%^[46]。

值得一提的是,日本农学家对稻田“反硝化脱氮损失”研究以及采用深层施肥、施用缓释肥、控释肥和硝化抑制剂等措施减少了稻田氮的损失,取得了一定的节氮和提高氮肥利用率的效果^[47]。但这些措施或因生产成本低,或因增产不显著,未能在我国水稻生产上大面积推广应用。

随着人口增长和经济发展,我国的粮食需求仍将呈现持续刚性增长。到 2030 年,我国的水稻产量必须较现有水平提高 20%^[13]。因此,实现作物高产高效的任務非常艰巨。为了加强作物高产与资源高效利用的基础研究,实现作物高产高效,2009 年,国家启动了重点基础研究项目(973 计划)“主要粮食作物高产栽培与资源高效利用的基础研究”,拟解决“作物群体结构与花后物质生产、分配的动态协调及其栽培调控原理”与“稳定实现作物高产高效

的土壤条件及其调控途径”这两个关键科学问题。中国科学院南京土壤研究所和扬州大学等单位的一些科技工作者承担了以上 973 项目的第三课题“南方水稻高产与氮肥高效利用的机制与途径”的研究。他们分析了南方水稻主产区水稻产量与氮肥效率的限制因子,探索了维持和提高水稻产量和氮肥利用效率的技术途径与原理,评估了这些技术措施的环境影响。通过培育壮秧、增加栽插密度、前氮后移、增施有机肥、轻干湿交替灌溉和花后喷施叶面肥等措施,在试验和示范田实现了增产 10%~15%、氮肥利用效率提高 15%~20%的预期目标^[37,44]。但对于高产水稻的水肥互作效应及其机理、高产水稻的作物-土壤互作机制等尚缺乏深入研究。

3 水分与氮素对水稻产量和水、氮利用效率影响的耦合效应

作物的水氮耦合,通常是指土壤水分和氮肥相互作用,共同影响作物生长、产量和品质^[48-53]。有关土壤水分与肥料(主要是氮素)耦合效应的研究,早期的工作主要集中在干旱土壤增施氮肥的“以肥补水”、“以肥调水”或“以水调肥”作用以及水氮互作产生协同作用的条件和互作效应等方面^[48-53]。较多的结果表明:在土壤干旱条件下作物的“以肥调水”作用受到土壤干旱程度及施氮量的影响,土壤干旱程度轻,增施氮肥后“以肥调水”作用明显,在土壤干旱程度较重时,“以肥调水”的效应减小或不明显;水分不足会限制肥效的正常发挥,水分过多则易导致肥料的淋溶损失和作物减产;施肥过量或不足均会影响作物对水分的吸收利用,进而影响作物产量;在一定的范围内,氮素和水分对作物产量、品质及养分和水分利用效率有明显的协同促进作用^[48-53]。但也有不同的研究结果,Sadras 等^[54,55]在小麦上观察到,在施氮量不过量情况下,单位吸氮量的生产力(产量/氮吸收量)随着施氮量的增加而降低,但水分利用效率(产量/蒸腾蒸发量)随着施氮量的增加而提高。

近年来,水稻水氮互作效应的研究主要集中在灌溉模式与施氮量或施肥模式对水稻产量和品质的互作效应方面^[55-59]。这些研究的共同结论是,干湿交替灌溉配合适宜的施氮量可较“常规灌溉+低施氮量”或“常规灌溉+高施氮量”处理组合显著提高产量、改善稻米品质。干湿交替灌溉配合适宜施氮量对水稻产量和品质的协同效应,其原因主要在于这种水氮管理模式增加了水稻各器官氮、磷、钾的

有效积累,提高了叶片光合速率,增强了叶片中氮代谢有关酶如硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、谷氨酸合酶(GOGAT)活性和根系氧化力,促进了结实期营养器官矿质养分和光合同化物向籽粒的转运^[55-59]。

以上研究虽然明确了水氮对水稻产量和品质影响的互作效应,但从土壤水分与施氮量与产量关系的数学模型^[50]($Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_1^2+b_4x_2^2+b_5x_1x_2$, $b_0, 1, 2, 3, 4, 5$ 为模型系数, x_1 为施氮量, x_2 为土壤水势, Y 为产量)可以看出,获取一定产量的适宜施氮量因土壤水分不同而异,或适宜的土壤水分因施氮量不同而异。因此,对于提高水稻产量的水氮耦合模型需要深入研究。

有研究表明,灌溉方式和施氮模式对氮肥利用的影响有明显的互作效应^[8, 31]。Liu 等^[8]观察到,在“轻干湿交替灌溉+实地氮肥管理模式、轻干湿交替灌溉+当地施氮模式、常规灌溉+实地氮肥管理模式、常规灌溉+当地施氮模式”4 种处理中,氮肥利用效率以轻干湿交替灌溉+实地氮肥管理模式处理最高,以常规灌溉+当地施氮模式处理最低。Wang 等^[31]最近报道,水稻产量、水分利用效率和氮肥利用效率不仅受到灌溉模式的影响,而且受到灌溉模式与施氮量互作的影响。采用轻干湿交替灌溉(土壤落干至土壤水势 -15 kPa 时复水,或生育前、中期中午的叶片水势分别为 -0.69 MPa 和 -0.86 MPa 时复水)和适宜的施氮量(200 kg/hm²,或生育前、中期单位叶面积的含氮量分别为 $2.2\sim 2.3$ g/m² 和 $2.0\sim 2.1$ g/m²)可以协同提高产量、水分利用效率和氮肥利用效率。

需要指出的是,以往对水氮互作效应的研究,大多在盆钵栽培条件下进行,研究结果难以反映大田生产的实际情况,对于水氮互作效应的机理也缺乏深入探讨。

4 作物-土壤关系及其水氮调控机制

作物与土壤关系研究的重点是作物根系与土壤关系^[60]。植物根系不仅是水分和养分吸收的主要器官,而且可以通过调节根系构型,合成或分泌激素、有机酸和酶等物质来适应多变的土壤环境,调节根系对水分和养分的吸收和植株的生长^[61-64]。人们认识到,植物根系可以产生脱落酸,对干旱土壤作出响应并通过木质部输送到地上部分调控叶片气孔的开闭,从而减少叶片蒸腾失水,减少干旱对植株的伤害^[65,66]。水稻根系通过分泌过氧化物酶和

过氧化氢来氧化根际环境,免受 H_2S 和 Fe^{2+} 等还原性强的有毒物质对根系呼吸和代谢的影响^[67,68]。另一方面,土壤结构和养分与水分等条件、根际微生物种类和数量等可以影响根系生长发育、形态和分布、分泌物的种类和数量及其对水分养分的吸收利用^[67-69]。

随着分子生物学研究的发展,人们用分子生物学手段来研究根-土关系以及根系吸收和利用水分养分的机理^[70-72]。研究表明,在土壤干旱条件下通过提高水稻深根基因(*DEEPER ROOTING 1, DRO1*)表达或将该基因转入浅根系水稻后,根系角度发生改变而向土壤深处下扎,使得水稻根系能有效吸收土壤水分而提高产量^[64];水稻和拟南芥在适度干旱条件下根系中 ABA 合成基因表达量上调,ABA 累积量增加,ABA 的增加促进了生长素向根尖的运输,生长素向根尖运输的增加激活质膜 ATP 酶,促使根尖分泌更多的质子(H^+),从而使根系适应干旱,维持根系生长^[73]。有研究表明,低氮胁迫可以诱导水稻根中铵转运基因 *OsAMT1;1* 和硝酸盐转运基因 *OsNRT2;1* 在转录水平上的表达,从而促进根对氮素的吸收^[74]。Kamada-Nobusada 等^[75]观察到,氮素能促进水稻根和苗中细胞分裂素合成酶—腺苷磷酸异戊烯基转移酶(IPT)相关基因(*OsIPT4*, *OsIPT5*, *OsIPT7*, *OsIPT8*)的表达,增加稻株体内细胞分裂素含量和氮素累积;抑制这些基因表达则会降低稻株体内细胞分裂素含量和氮素累积,水稻生长受阻。这些研究进展为人们对根-土关系尤其是作物吸收水分和氮素的机理提供了新的认识。但有关水氮互作对水稻吸收利用水分和氮素的分子机理,尚未见研究报道。

5 存在问题与研究展望

5.1 存在问题

虽然国内外科技工作者为实现水稻高产与水分、养分高效利用进行了大量的研究并取得了重要进展,但仍存在许多问题。

1) 高产水稻作物与土壤的水氮互作效应尚不明确。水分和氮素是决定作物产量的两个最重要因素,两者对产量及水分和氮肥利用效率存在着显著的互作效应。虽然以往有关水、肥对水稻产量和品质的影响进行了较多的研究,但多集中于水、肥单因子效应方面,对于水氮的耦合效应研究较少;或农学家主要重视作物的研究,土壤学家主要重视土壤的研究,有关高产水稻水氮互作的作物-土壤效应

及其机制缺乏深入研究。

2) 高产水稻水氮耦合与高效利用的分子机理不清楚。分子生物学的发展为人们研究水稻对水分和养分吸收利用机理提供了新的手段, 开辟了新的途径。但目前有关水氮互作对水稻吸收利用水分和氮素的分子机理, 尚未有相关研究报道。

3) 协同提高水稻产量与水氮利用效率的调控途径尚未掌握。经过广大科技工作者的多年努力, 我国创建或引进、集成了一批水稻高产的水分和养分管理技术, 为稳定和发展水稻生产做出了重要贡献。但是, 我国的水、氮投入量仍然很高, 水、氮利用效率仍然很低, 目前水稻单产增长率还不能满足人口增长和社会经济发展的需求。此外, 当前水稻生产上还出现机插稻穗型不整齐和小穗多、秸秆还田后僵苗不发等问题, 严重影响产量和水分养分的高效利用。

5.2 研究展望

针对以上问题, 建议今后拟重点研究以下几个方面。

1) 高产水稻作物与土壤的水氮互作效应及其生物学过程。研究在不同土壤水分和供氮水平下水氮互作对水稻产量形成的影响, 水稻高产与水氮高效利用的水氮耦合模型; 从内源激素、酶学机制、物质生产与运转、产量形成等方面研究水氮互作调控水稻产量形成及水氮吸收利用的生物学过程; 研究水稻主要生育期水氮互作对根系形态生理的影响及其与地上部生长发育的关系, 从根系形态生理方面阐明水氮互作调控水稻产量形成及水氮吸收利用的机制; 研究水氮互作对土壤物理性状、化学性状、生物学性状、硝化与反硝化作用、氮挥发和氮淋失的影响; 分析上述土壤质量指标与水稻根系形态生理、地上部生长发育、产量形成和水氮吸收利用的关系, 阐明高产水稻水氮互作的作物-土壤效应。

2) 水氮互作调控水稻吸收利用水分和氮素的生理与分子机理。研究水稻根系激素对水氮互作的响应及其对水氮吸收利用的调控机制; 研究水稻抗旱性和氮敏感性不同品种在不同水氮处理下的蛋白质表达差异, 并分析其功能, 从蛋白质表达方面揭示水稻对水氮互作的响应与水氮高效吸收利用的机理; 研究水氮互作对水稻根系激素和氮代谢相关基因及籽粒中蔗糖-淀粉代谢途径关键酶基因表达的影响及其与水氮吸收利用和产量形成的关系, 揭示高产水稻水氮耦合与水氮高效利用的生理与分子机理。

3) 协同提高水稻产量和水氮利用效率的调控途径与关键技术。研究不同灌溉模式和养分管理模式及各模式组合对产量形成、水氮利用效率及土壤质量的影响, 建立产量和水氮利用效率协同提高的水肥管理模式; 研究在不同稻作方式下水氮互作对水稻生长发育、产量形成和土壤质量的影响, 构建适合于各稻作方式的协同提高水稻产量和水氮利用效率的水肥管理技术; 研究在秸秆还田条件下, 水氮互作对水稻生长发育、产量形成和水氮利用效率、土壤质量、氮损失和稻田温室气体排放的影响, 构建在秸秆还田条件下协同提高水稻产量和水氮利用效率及减少氮损失和稻田温室气体排放的水氮管理技术。

通过以上研究, 不仅可以探明水稻特别是水稻根系的水分养分利用能力和根系-土壤互作这一重要的科学前沿问题, 而且可以找到控制水稻群体质量和提高水分养分利用效率技术的突破口^[36,60,76,77]。这对于进一步阐明水稻高产与水分养分高效利用的机制, 充分发挥水氮耦合效应以提高水分和氮肥利用效率, 节约水资源和保护环境均具有十分重要的科学价值和实践意义。

参考文献:

- [1] Yang J. Approaches to achieve high yield and high resource use efficiency in rice, *Front Agric Sci Engin*, 2015, 2 (2): 115-123.
- [2] GRiSP (Global Rice Science Partnership), Rice almanac, 4th edition, Los Baños (Philippines): International Rice Research Institute, 2013, 283.
- [3] Haefele S M, Jabbar S M A, Siopongco J D L C, Tirol-Padre A, Amarante S T, Cruz P C S, Cosico W C. Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels. *Field Crop Res*, 2008, 107(2): 137-146.
- [4] Pan S G, Cao C G, Cai M L, Wang J P, Wang R H, Zhai J, Huang S Q. Effects of irrigation regime and nitrogen management on grain yield, quality and water productivity in rice. *J Food Agric Environ*, 2009, 7(2): 559-564.
- [5] Bouman B A M, Peng S, Castaneda A R, Visperas R M. Yield and water use of irrigated tropical aerobic rice, systems. *Agric Water Manag*, 2005, 74(2): 87-105.
- [6] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 张荣萍, 郭翔, 马均. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2010, 36(4): 655-664.
- Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y, Zhang R P, Guo X, Ma J. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice. *Acta Agron Sin*, 2010, 36(4): 655-664. (in Chinese with English abstract)

- [7] 孙爱华, 朱士江, 郭亚芬, 张忠学. 控灌条件下稻田田面水含氮量、土壤肥力及水氮互作效应试验研究. *土壤通报*, 2012, 43(2): 362-368.
Sun A H, Zhu S J, Guo Y F, Zhang Z X. Experimental research on nitrogen content, soil fertility and water-nitrogen interaction in surface water of rice field under controlled irrigation model. *Chin J Soil Sci*, 2012, 43(2): 362-368. (in Chinese with English abstract)
- [8] Liu L J, Chen T T, Wang Z Q, Zhang H, Yang J C, Zhang J H. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice. *Field Crop Res*, 2013, 154: 226-235.
- [9] Bouman B A M. A conceptual framework for the improvement of crop water productivity at different spatial scales. *Agric Syst*, 2007, 93(1-3): 43-60.
- [10] 李保国, 彭世琪. 1998—2007 年中国农业用水报告. 北京: 中国农业出版社, 2009: 72-78.
Li B G, Peng S Q. Chinese Agricultural Water Use Bulletin 1998-2007. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2009: 72-78. (in Chinese).
- [11] Qin J T, Hu F, Zhang B, Wei Z, Li H. Role of straw mulching in non-continuously flooded rice cultivation. *Agric Water Manag*, 2006, 83(3): 252-260.
- [12] 郑捷, 李光永, 韩振中. 中美主要农作物灌溉水分生产率分析. *农业工程学报*, 2008, 24(11): 46-50.
Zheng J, Li Y G, Han Z Z. Sino-US irrigation water use efficiencies of main crops. *Trans CSAE*, 2008, 24(11): 46-50. (in Chinese with English abstract)
- [13] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12(1): 3-8.
- [14] Borrell A, Garside A, Fukai S. Improving efficiency of water use for irrigated rice in a semi-arid tropical environment. *Field Crop Res*, 1997, 52(3): 231-248.
- [15] Ockerby S E, Fukai S. The management of rice grown on raised beds with continuous furrow irrigation. *Field Crop Res*, 2001, 69(3): 215-226.
- [16] Liu X J, Wang J C, Lu S H, Zhang F S, Zeng X Z, Ai Y W, Peng S B, Christie P. Effects of non-flooded mulching cultivation on crop yield, nutrient uptake and nutrient balance in rice-wheat cropping systems. *Field Crop Res*, 2003, 83(3): 297-311.
- [17] Zhang H, Li H W, Yuan L M, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. Post-anthesis alternate wetting and moderate soil drying enhances activities of key enzymes in sucrose-to-starch conversion in inferior spikelets of rice. *J Exp Bot*, 2012, 63(1): 215-227.
- [18] Zhang Y B, Tang Q Y, Peng S B, Xing D Y, Qin J Q, Laza R C, Punzalan B R. Water use efficiency and physiological response of rice cultivars under alternate wetting and drying conditions. *Sci World J*, 2012, (6): 287-907.
- [19] Thakur A K, Rath S, Mandal K G. Differential responses of system of rice intensification (SRI) and conventional flooded-rice management methods to applications of nitrogen fertilizer. *Plant Soil*, 2013, 370(1-2): 59-71.
- [20] Bouman B A M, Tuong T P. Field water management to save water and increase its productivity in irrigated lowland rice. *Agric Water Manag*, 2001, 49(1): 11-30.
- [21] Belder P, Spiertz J H J, Bouman B A M, Lu G, Tuong T P. Nitrogen economy and water productivity of lowland rice under water-saving irrigation. *Field Crop Res*, 2005, 93(2-3): 169-185.
- [22] Yao F, Huang J, Cui K, Nie L, Xiang J, Liu X, Wu W, Chen M, Peng S. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crop Res*, 2012, 126: 16-22.
- [23] Yang J C, Liu K, Wang Z Q, Du Y, Zhang J H. Water-saving and high-yielding irrigation for lowland rice by controlling limiting values of soil water potential. *J Integr Plant Biol*, 2007, 49(10): 1445-1454.
- [24] Wang J Y, Jia J X, Xiong Z Q, Khalil M A K, Xing G X. Water regime-nitrogen fertilizer-straw incorporation interaction: Field study on nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Nanjing, China. *Agric Ecosyst Environ*, 2011, 141(3-4): 437-446.
- [25] Wang X T, Suo Y Y, Feng Y, Shohag M J I, Gao J, Zhang Q C, Xie S, Lin X Y. Recovery of N^{15} labeled urea and soil nitrogen dynamics as affected by irrigation management and nitrogen application rate in a double rice cropping system. *Plant Soil*, 2011, 343(1-2): 195-208.
- [26] Zhang H, Xue Y G, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. An alternate wetting and moderate soil drying regime improves root and shoot growth in rice. *Crop Sci*, 2009, 49(6): 2246-2260.
- [27] Xue Y G, Duan H, Liu L J, Wang Z Q, Yang J C, Zhang J H. An improved crop management increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in rice. *Crop Sci*, 2013, 53(1): 271-284.
- [28] Belder P, Bouman B A M, Cabangon R, Guoan L, Quilang E J P, Li Y, Spiertz J H J, Tuong T P. Effect of water-saving irrigation on rice yield and water use in typical lowland conditions in Asia. *Agric Water Manage*, 2004, 65(3): 193-210.
- [29] Sah R N, Mikkelsen D S. Availability and utilization of fertilizer nitrogen by rice under alternate flooding. *Plant Soil*, 1983, 75(2): 227-234.
- [30] Eriksen A B, Kjeldby M, Nilsen S. The effect of intermittent flooding on the growth and yield of wetland rice and nitrogen-loss mechanism with surface applied and deep placed urea. *Plant Soil*, 1985, 84(3): 387-401.
- [31] Wang Z Q, Zhang W Y, Beebout S S, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Grain yield, water and nitrogen use efficiencies of rice as influenced by irrigation regimes and their interaction with nitrogen rates. *Field Crops Res*, 2016, 193(4): 54-69.
- [32] FAO. Statistical databases, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations, 2015. <http://www.faostat.fao.org>.
- [33] 国家统计局. 粮食产量公告 <http://data.stats.gov.cn>,

- 2015-12-09.
National Bureau of Statistics of China. Grain yield Announcement. <http://data.stats.gov.cn>, 2015-12-09. (in Chinese)
- [34] Ju X T, Xing G X, Chen X P, Zhang S L, Zhang L J, Liu X J, Cui Z L, Yin B, Christea P, Zhu Z L, Zhang F S. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems. *PNAS*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [35] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Zhong X H, Zou Y B, Yang J C, Wang G H, Liu Y Y, Tang Q Y, Cui K H, Zhang F S, Dobermann A. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review. *Agron Sustain Dev*, 2010, 30(3): 649-656.
- [36] Zhang F S, Chen X P, Vitousek P. An experiment for the world. *Nature*, 2013, 497(7447): 33-35.
- [37] 薛亚光, 葛立立, 王康君, 颜晓元, 尹斌, 刘立军, 杨建昌. 不同栽培模式对杂交粳稻群体质量的影响. 作物学报, 2013, 39(2): 280-291.
Xue Y G, Ge L L, Yang K J, Yan X Y, Yin B, Liu L J, Yang J C. Effects of different cultivation patterns on population quality of japonica hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(2): 280-291. (in Chinese with English abstract)
- [38] Zhang Z J, Chu G, Liu L J, Wang Z Q, Wang X M, Zhang H, Yang J C, Zhang J H. Mid-season nitrogen application strategies for rice varieties differing in panicle size. *Field Crop Res*, 2013, 150: 9-18.
- [39] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, Shen J L, Han W X, Zhang W F, Christie P, Goulding K W T, Vitousek P M, Zhang F S. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [40] 张福锁, 马文奇, 陈新平. 养分资源综合管理理论与技术概论. 北京: 中国农业出版社, 2006: 48-58.
Zhang F S, Ma W Q, Chen X P. Theory and technology of the integrated nutrient resource management. Beijing: China Agricultural University Press, 2006: 48-58. (in Chinese)
- [41] 凌启鸿. 水稻精确定量栽培理论与技术. 北京: 中国农业出版社, 2007.
Ling Q H. Theory and technology of precise and quantitative cultivation in rice. Beijing: China Agriculture Press, 2007. (in Chinese)
- [42] 蒋鹏, 黄敏, Md. Ibrahim, 曾燕, 夏冰, 施婉菊, 谢小兵, 邹应斌. “三定”栽培对双季超级稻养分吸收积累及氮肥利用率的影响. 作物学报, 2011, 37(12): 2194-2207.
Jiang P, Huang M, Ibrahim M, Zeng Y, Xia B, Shi W J, Xie X B, Zou Y B. Effects of “sanding” cultivation method on nutrient uptake and nitrogen use efficiency in double cropping super rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2194-2207. (in Chinese)
- [43] 钟旭华, 黄农荣, 胡学应. 水稻“三控”施肥技术. 北京: 中国农业出版社, 2011.
Zhong X H, Huang N R, Hu X Y. “Three Controls” Nutrient Management Technology for Rice. Beijing: China Agriculture Press, 2011. (in Chinese)
- [44] 张福锁, 范明生. 主要粮食作物高产栽培与资源高效利用的基础研究. 北京: 中国农业出版社, 2013.
Zhang F S, Fan M S. Basic research on high yield cultivation and efficient use of resources in main grain crops. Beijing: China Agriculture Press, 2013. (in Chinese)
- [45] Katsura K, Maeda S, Horie T, Shiraiwa T. Analysis of yield attributes and crop physiological traits of Liangyoupeijiu, a hybrid rice recently bred in China. *Field Crop Res*, 2007, 103(3): 170-177.
- [46] Normile D. Reinventing rice to feed the world. *Science*, 2008, 321(5887): 330-333.
- [47] Horie T, Shiraiwa T, Homma K, Katsura K, Maeda Y, Yoshida H. Can yields of lowland rice resume the increases that they showed in the 1980s? *Plant Prod Sci*, 2005, 8(3S1): 259-274.
- [48] 戴庆林, 杨文耀. 阴山丘陵旱农区水肥效应与耦合模式的研究. 干旱地区农业研究, 1995, 13(1): 20-24.
Dai Q L, Yang W Y. Water-fertilizer effects and their coupling reaction model in Yinshan hilly rainfed agricultural region. *Agric Res Arid Areas*, 1995, 13(1): 20-24. (in Chinese with English abstract)
- [49] 杨建昌, 王志琴, 朱庆森. 不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究. 中国农业科学, 1996, 29(4): 59-67.
Yang J C, Wang Z Q, Zhu Q Z. Effect of nitrogen nutrition on rice yield and its physiological mechanism under different status of soil moisture. *Sci Agric Sin*, 1996, 29(4): 59-67. (in Chinese with English abstract)
- [50] 陈新红. 土壤水分与氮素对水稻产量和品质的影响及其生理机制. 扬州: 扬州大学, 2004.
Chen X H. Effect of moisture and nitrogen nutrient on grain yield and quality of rice and their physiological mechanism. Yangzhou: Yangzhou University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [51] 王绍华, 曹卫星, 丁艳锋, 田永超, 姜东. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响. 中国农业科学, 2004, 37(4): 497-501.
Wang S H, Cao W X, Ding Y F, Tian Y C, Jiang D. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice. *Sci Agric Sin*, 2004, 37(4): 497-501. (in Chinese with English abstract)
- [52] 王小燕, 于振文. 水氮互作对小麦籽粒蛋白质组分和品质的影响. 麦类作物学报, 2009, 29(03): 518-523.
Yang X Y, Yu Z W. Effect of interactions between water management and nitrogen fertilizer on wheat processing quality and their relationship to protein fractions. *J Triticeae Crops*, 2009, 29(03): 518-523. (in Chinese with English abstract)
- [53] Li Y, Yin Y P, Zhao Q, Wang Z L. Changes of Glutenin Subunits due to Water-Nitrogen Interaction Influence Size and Distribution of Glutenin Macropolymer Particles and Flour Quality. *Crop Sci*, 2011, 51(6): 2809-2819.
- [54] Sadras V O, Rodriguez D. Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field*

- Crop Res*, 2010, 118(3): 297-305.
- [55] Sadras V O, Lawson C. Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Eur J Agron*, 2013, 46: 34-41.
- [56] 李国生, 王志琴, 袁莉民, 刘立军, 杨建昌. 结实期土壤水分和氮素营养对水稻产量与品质的交互影响. *中国水稻科学*, 2008, 22(2): 161-166.
Li G S, Wang Z Q, Yuan L M, Liu L J, Yang J C. Coupling effects of soil moisture and nitrogen nutrient during grain filling on grain yield and quality of rice. *Chin J Rice Sci*, 2008, 22(2): 161-166. (in Chinese with English abstract)
- [57] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2221-2232. (in Chinese with English abstract)
- [58] Xu B C, Xu W Z, Gao Z J, Wang J, Huang J. Biomass production, relative competitive ability and water use efficiency of two dominant species in semiarid Loess Plateau under different water supply and fertilization treatments. *Ecol Res*, 2013, 28(5): 781-792.
- [59] Ye Y S, Liang X Q, Chen Y X, Liu J, Gu J T, Guo R, Li L. Alternate wetting and drying irrigation and controlled-release nitrogen fertilizer in late-season rice. Effects on dry matter accumulation, yield, water and nitrogen use. *Field Crop Res*, 2013, 144: 212-224.
- [60] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, Cassman K G, Matson P A, Bai J S, Meng Q, Hou P, Yue S C, Romheld V, Zhang F S. Integrated soil-crop system management for food security. *PNAS*, 2011, 108(16): 6399-6404.
- [61] Inukai Y, Ashikari M, Kitano H. Function of the root system and molecular mechanism of crown root formation in rice. *Plant Cell Physiol*, 2004, 45(S): 17.
- [62] Kiba T, Kudo T, Kojima M, Sakakibara H. Hormonal control of nitrogen acquisition: roles of auxin, abscisic acid, and cytokinin. *J Exp Bot*, 2011, 62(4): 1399-1409.
- [63] Khan A L, Hamayun M, Kang S M, Kim Y H, Jung H Y, Lee J H, Lee I J. Endophytic fungal association via gibberellins and indole acetic acid can improve plant growth under abiotic stress: an example of *Paecilomyces formosus* LHL10. *BMC Microbiol*, 2012, 12(1): 1-14.
- [64] Uga Y, Sugimoto K, Ogawa S, Rane J, Ishitani M, Hara N, Kitomi Y, Inukai Y, Ono K, Kanno N, Inoue H, Takehisa H, Motoyama R, Nagamura Y, Wu J, Matsumoto T, Takai T, Okuno K, Yano M. Control of root system architecture by *DEEPER ROOTING 1* increases rice yield under drought conditions. *Nat Genet*, 2013, 45(9): 1097.
- [65] Davies W J, Zhang J H. Root signals and the regulation of growth and development of plant in drying soil. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1991, 42(1): 55-76.
- [66] Davies W J, Kudoyarova G, Hartung W. Long-distance ABA signaling and its relation to other signaling pathways in the detection of soil drying and the mediation of the plant's response to drought. *J Plant Growth Regul*, 2005, 24(4): 285-295.
- [67] Mishra A, Uphoff N. Morphological and physiological responses of rice roots and shoots to varying water regimes and soil microbial densities. *Arch Agron Soil Sci*, 2013, 59(5): 705-731.
- [68] Zhang H, Forde B G. An Arabidopsis MADS box gene that controls nutrient-induced changes in root architecture. *Science*, 1998, 279(5349): 407-409.
- [69] 肖新, 杨露露, 邓艳萍, 汪建飞. 水氮耦合对水稻田间氨挥发规律的影响. *农业环境科学学报*, 2012, 31(10): 2066-2071.
Xiao X, Yang L L, Deng Y P, Wang J F. Effects of irrigation and nitrogen fertilization on ammonia volatilization in paddy field. *J Agro-Environ Sci*, 2012, 31(10): 2066-2071. (in Chinese with English abstract)
- [70] Ruffel S, Krouk G, Ristova D, Shasha D, Birnbaum K D, Coruzzi G M. Nitrogen economics of root foraging: Transitive closure of the nitrate-cytokinin relay and distinct systemic signaling for N supply vs. demand. *PNAS*, 2011, 108(45): 18524-18529.
- [71] Humbert S, Subedi S, Cohn J, Zeng B, Bi Y M, Chen X, Zhu T, McNicholas P D, Rothstein S J. Genome-wide expression profiling of maize in response to individual and combined water and nitrogen stresses. *BMC Genomics*, 2013, 14(3).
- [72] Shaik R, Ramakrishna W. Genes and Co-Expression Modules Common to Drought and Bacterial Stress Responses in Arabidopsis and Rice. *Plos One*, 2013, 8(UNSP e7726110).
- [73] Xu W F, Jia L G, Shi W M, Liang J S, Zhou F, Li Q F, Zhang J H. Absciscic acid accumulation modulates auxin transport in the root tip to enhance proton secretion for maintaining root growth under moderate water stress. *New Phytol*, 2013, 197(1): 139-150.
- [74] Shi W M, Xu W F, Li S M, Zhao X Q, Dong G Q. Responses of two rice cultivars differing in seedling-stage nitrogen use efficiency to growth under low-nitrogen conditions. *Plant Soil*, 2010, 326(1-2): 291-302.
- [75] Kamada-Nobusada T, Makita N, Kojima M, Sakakibara H. Nitrogen-dependent regulation of de Novo cytokinin biosynthesis in rice: The role of glutamine metabolism as an additional signal. *Plant Cell Physiol*, 2013, 54(11): 1881-1893.
- [76] Liang Y C, Zhu Y G, Smith F A, Lambers H. Soil-plant interactions and sustainability of eco-agriculture in arid region: a crucially important topic to address. *Plant Soil*, 2010, 326(1-2): 1-2.
- [77] Chu G, Wang Z Q, Zhang H, Liu L J, Yang J C, Zhang J H. Alternate wetting and moderate drying increases rice yield and reduces methane emission in paddy field with wheat straw residue incorporation. *Food Ener Secur*, 2015, 4(3): 238-254.