植物营养与肥料学报 2015,21(4): 846 - 852 doi: 10.11674/zwyf.2015.0403
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http: //www.plantnutrifert.org

# 水稻最佳作物管理技术的增产增效作用

安 宁, 范明生*, 张福锁
(中国农业大学资源与环境学院,北京 100193)

**摘要:【目的】**水稻是我国主要粮食作物之一,为了进一步满足日益增长的人口对水稻生产的更大需求,需要在现有甚至减少种植面积的前提下提高水稻产量,同时实现高效利用水肥资源和减少对环境的压力。**【方法】**本研究基于2008～2011年间,在我国长江流域和南方稻区的主要省份(包括湖南、湖北、广东、安徽、江苏和重庆)开展的403个田间试验,比较了农民传统技术和最佳作物管理技术下(主要技术为氮肥总量控制分期调控,磷、钾衡量监控,增加水稻的栽插密度和后期干湿交替灌溉),水稻的施氮量、产量、氮肥利用率(氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥回收利用率)、水稻生长发育的主要时期(分蘖期、穗分化期、抽穗期和成熟期)的氮素吸收、干物质累积动态及产量构成。**【结果】**最佳作物管理技术处理的水稻产量平均为7917.0 kg/hm$^2$,显著高于农民传统处理($P<0.05$),增产量为690.6 kg/hm$^2$,增产率9.6%;而最佳作物管理技术处理的氮肥平均施用量为N 162.7 kg/hm$^2$,显著低于农民传统处理($P<0.05$),氮肥减少量为N 41.4 kg/hm$^2$,减少率20.3%;最佳作物管理技术处理的平均氮肥偏生产力、氮肥农学利用率和氮肥回收利用率分别为50.8 kg/kg、14.9 kg/kg和42.3%,均显著高于农民传统处理($P<0.05$),分别增加36.2%、75.3%和13.6个百分点;农民传统处理的水稻植株在生育前期表现出较大的氮吸收能力和干物质累积量,但从齐穗期开始,最佳作物管理技术处理的作物吸氮量和干物质累积量均大于农民传统处理;到成熟期,农民传统处理和最佳作物管理技术处理的作物吸氮量分别为151.7 kg/hm$^2$和165.9 kg/hm$^2$,干物质累积量分别为12914.2 kg/hm$^2$和13796.1 kg/hm$^2$($P<0.05$)。同时,农民传统处理和最佳作物管理技术处理的水稻花后干物质积累量表现出显著的差异,分别为4045.2 kg/hm$^2$和4654.5 kg/hm$^2$($P<0.05$);最佳作物管理技术处理的单位面积穗数、每穗粒数和千粒重分别为243.2、154.2和26.9 g,显著大于农民传统处理的231.7、150.0和26.6 g($P<0.05$)。**【结论】**通过最佳作物管理技术可以在节约水肥的条件下,进一步提高我国长江流域和南方水稻的产量,这一最佳作物管理技术也具有被农民采纳的现实可行性。研究结果可为我国水稻生产实现高产高效提供技术支撑。

**关键词:** 最佳作物管理技术; 产量; 氮肥利用率; 干物质积累; 产量构成
**中图分类号:** S511.06 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0846-07

# Best crop management practices increase rice yield and nitrogen use efficiency

AN Ning, FAN Ming-sheng*, ZHANG Fu-suo
(*College of Resources and Environmental Science, China Agricultural University, Beijing 100193, China*)

**Abstract:【Objectives】**Rice is one of the main staple crops in China. In order to meet the increasing demand of rice production for growing population with even reduced rice cultivation area, rice farming systems must be managed to achieve the goal of high rice productivity and primary resources (e.g. nitrogen and water) use efficiency while without further degradating environmental integrity. **【Methods】** Based on 403 on-farm trails conducted in China's major rice producing provinces (Including Hunan, Hubei, Guangdong, Anhui, Jiangsu and the Great Chongqing Area) from 2008 to 2011, nitrogen application rate, rice yield, nitrogen use efficiency (partial factor productivity, agronomic efficiency and recovery efficiency), nitrogen uptake and dry matter accumulation dynamics of rice plant during the main period of rice growth (tillering stage, panicle initiation stage,

**收稿日期:** 2014-04-13 **接受日期:** 2014-06-04 **网络出版日期:** 2015-05-06
**基金项目:** 农业部公益型行业专项"最佳养分管理技术"项目(201103003)资助。
**作者简介:** 安宁(1985—),女,内蒙古巴彦淖尔市人,博士研究生,主要从事养分资源管理方面的研究工作。E-mail: anning1011@163.com
* 通信作者 Tel: 010-62731661, E-mail: fanms@cau.edu.cn

full heading stage and mature stage) were compared between treatments of conventional farmers' practices (FPs) and the best crop management practices (BCMPs). The main technology of best crop management practices was optimum nitrogen management with side dressing while control the total amount of application, customized application rate of phosphorus and potassium by monitoring available phosphorus and potassium in the soil, increased transplanting density and optimized water management through controled dry and irrigation cycles after midseason drainage. 【**Results**】Compared with FPs, the yield of BCMPs was 7917.0 kg/hm$^2$ and increased significantly by 690.6 kg/hm$^2$(9.6%) ($P<0.05$) while nitrogen fertilizer application was significantly reduced by N 41.4 kg/hm$^2$ (20.3%) ($P<0.05$). The nitrogen partial factor productivity, agronomic efficiency and recovery efficiency of BCMPs were significantly higher than those of FPs by 36.2%, 75.3% and 13.6 percentage points, respectively ($P<0.05$). Nitrogen uptake and dry matter accumulation of rice plant under FPs were greater than those of BCMPs during earlier stage. After full heading stage, nitrogen uptake and dry matter accumulation of rice plant under treatment of BCMPs were greater than those of FPs. During mature stage, the nitrogen uptake of rice plant under treatment of FPs and BCMPs were 151.7 kg/hm$^2$ and 165.9 kg/hm$^2$, and dry matter accumulation were 12914.2 kg/hm$^2$ and 13796.1 kg/hm$^2$, respectively ($P<0.05$). The dry matter accumulation after flowering was significantly different between FPs and BCMPs, which was 4045.2 kg/hm$^2$ and 4654.5 kg/hm$^2$, respectively ($P<0.05$). Panicles number per square meter, spikelet number per panicle and 1000-grain weight of BCMPs were 243.2, 154.2 and 26.9 g respectively, which were significantly greater than those of FPs ($P<0.05$). 【**Conclusions**】Improved crop management practices as BCMPs could increase yield by 9.6% while reduce nitrogen and water use. These best crop management techniques are convenient and easily adopted practices that may be applied widely in rice cropping systems. This study provides the guide for sustainable rice-based cropping systems.

**Key words:** best crop management practices; yield; nitrogen use efficiency; dry matter accumulation; yield components

水稻是最重要的粮食作物之一,养活了世界上近50%的人口[1]。我国是主要的水稻生产国家,种植面积和总产量在世界水稻生产中都占据重要地位,以世界水稻总种植面积的19%生产了总产量的29%[2]。但是,近些年来我国水稻单产表现出停滞的趋势,从1998年到2006年,水稻单产的年平均增长率为-0.3%[3]。我国作为最主要的氮肥消费国之一,氮肥消费量占世界化肥消费总量32%,其中有19%是施在稻田中[4]。我国水稻氮肥的平均施用量为190 kg/hm$^2$,超出世界平均施氮水平近90%[4],有些地区施氮量甚至高于300 kg/hm$^2$[5-6]。因此,尽管我国水稻的单产水平高,和其他一些水稻高产国家如日本、韩国等相近,但是氮肥偏生产力仅为34 kg/kg[7],氮肥农学利用率不足10 kg/kg[8],氮肥回收利用率为30%～35%[9],低于亚洲其他主要水稻生产国家,如日本、印度尼西亚、泰国和菲律宾等[7, 10-11]。低的氮肥利用率导致大量的化学氮肥损失到大气、土壤和水体中,造成严重的环境污染[12-15]。

随着我国人口的不断增长,对稻谷的需求也日益增加。按照目前我国稻米的年消费量预测,到2030年我国的水稻需求量需增加30%以上[16]。为了满足未来水稻生产需求,必须通过在现有甚至减少的种植面积的条件下大幅度提高单产,同时应提高养分资源,尤其是氮肥的利用效率,从而减少对环境的影响[3]。目前我国水稻产量徘徊不前的主要原因可能是: 1)农民传统生产方式下的水稻平均产量已经达到可实现产量的70%以上[17],进一步提高产量需要更加精细的管理技术,但这往往在经济和实践中的可行性低; 2)目前农户不合理的管理措施仍然是增产和增效的限制因子,如水稻栽插密度低、水分管理不合理(大多数农民采用淹水—中期烤田—淹水的灌溉方式)、养分管理不合理等,如氮肥投入量过大,农民一般分两次施用(基肥和蘖肥)且基肥施用多,这样会造成更大的氮的损失,同时不能满足高产水稻的需求。而最近的研究表明,水稻的吸氮高峰期出现在幼穗分化期,而在水稻生长后期光照更加充足的年份,增加粒肥能促进籽粒灌浆和增产,因此,增加中后期的施用比例(穗肥和粒肥)是水稻高产和氮肥高效利用的基础[18-20]。

本研究在我国水稻主产区403个农民田块的试验示范基础上,利用试验示范数据,比较了最佳作物

管理技术和农民传统方式两种管理模式下的水稻产量、施氮量、氮肥利用率以及生长动态（作物吸氮量和干物质积累）的差异，在现有品种条件下，针对水稻生产的主要限制因子，通过管理技术的优化，明确增产与增效的实现程度，旨在为我国水稻生产实践提供理论与技术支撑。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验设计

2008～2011年，在我国水稻主产省（包括湖南、湖北、广东、安徽、江苏和重庆）开展了403个田间试验。试验设农民传统处理（FPs）、最佳作物管理技术（BCMPs）和不施氮肥3个处理。农民地块面积范围为0.2～0.4 $hm^2$。在每个点上，按照不同管理模式将农民的地块分为两个裂区，用堤坝隔开，不设重复。农民传统处理和最佳作物管理技术处理随机分配到这两块地上，最佳作物管理技术地块同时设置不施氮肥小区。在农民传统处理地块上，农民按照当地习惯对水稻的生长进行管理。最佳作物管理技术地块的主要管理措施为：氮肥总量控制分期调控，磷、钾衡量监控[6, 18, 20]，增加栽插密度和后期干湿交替灌溉[21]。各处理的具体管理技术见表1。

**表1 田间试验中农民传统处理和最佳作物管理技术处理的管理信息**

**Table 1 Detailed information in management for farmer's practices and best crop management practices in 403 on-farm trials**

| 项目<br>Item | 管理模式 Management model | |
|---|---|---|
| | 农民传统<br>Farmer's practices | 最佳作物管理技术<br>Best crop management practices |
| 施氮量（N kg/$hm^2$）<br>Nitrogen fertilizer rate | 204.1±62.9 | 162.7±41.3 |
| 施磷量（$P_2O_5$ kg/$hm^2$）<br>Phosphorus fertilizer rate | 57.1±20.6 | 59.9±17.7 |
| 施钾量（$K_2O$ kg/$hm^2$）<br>Potassium fertilizer rate | 63.2±39.5 | 90.3±17.9 |
| 氮肥施用（次数和比例）<br>Nitrogen fertilizer<br>(time and ratio) | 2次或3次<br>1. 60%～80%作基肥，20%～40%作分蘖肥；<br>2. 60%作基肥，20%作分蘖肥，20%作穗肥（$n$=47）。<br>2 or 3 times:<br>1. 60%-80% as basal and 20%-40% tillering fertilization for most of locations.<br>2. 60% as basal, 20% tillering and 20% panicle fertilization for 47 locations. | 3次或4次<br>40%～50%作基肥，20%～30%作分蘖肥，30%作穗肥（根据气候条件会增施5%～10%的粒肥）。<br>3 or 4 times:<br>40%-50% as basal, 20%-30% tillering and 30% panicle fertilization for most locations. But about additional 5%-10% of total rate would be applied based on whether conditions at rice grain filling stage. |
| 磷肥施用（次数和比例）<br>Phosphorus fertilizer<br>(time and ratio) | 100%作基肥<br>100% as basal fertilization | |
| 钾肥施用（次数和比例）<br>Potassium fertilizer<br>(time and ratio) | 100%作为基肥<br>100% as basal fertilization | 100%作为基肥或50%作为基肥，50%作为穗肥。<br>100% as basal fertilization or 50% as basal fertilization and 50% as panicle fertilization |
| 密度（plants/$hm^2$）<br>Transplanting density | 22.2±5.8 | 26.6±6.5 |
| 水分管理<br>Water management | 淹水—中期晒田—淹水<br>Flooding-midseason drainage-reflooding | 淹水—中期晒田—干湿交替<br>Flooding-midseason drainage-drying-wetting alternation |
| 病虫害控制<br>Pest and disease control | 常规控制方法<br>Normal pest and disease control | |

### 1.2　测定项目与方法

1.2.1 产量和产量构成　在成熟期,在每个地块里选择 5 $m^2$ 的收获面积,脱粒,晒干,测定产量,最终产量以籽粒 14% 的含水量计[22];同时在成熟期取 8～12 穴水稻进行考种,测定单位面积穗数、每穗粒数和千粒重。

1.2.2 水稻吸氮量和干物质积累量　在 12 个试验点(其中包括南方双季早稻、双季晚稻和单季稻),分别于分蘖期、穗分化期、抽穗期和成熟期取植株样品。每个点在各地块取 0.5 $m^2$ 的植株样,于 105℃烘箱杀青 30 min,80℃烘 72 h 后称重,并折算成每公顷干重。样品经粉碎过筛,采用 $H_2S0_4-H_20_2$ 消化,以半微量凯氏定氮法测定植株氮含量。

### 1.3　计算方法和数据处理

氮肥利用率的计算公式为[23]:

氮肥偏生产力 (PFP,kg/kg) = 施氮小区水稻籽粒产量(kg/$hm^2$)/施氮量(N kg/$hm^2$)

氮肥农学利用率 (AE,kg/kg) = [施氮小区水稻籽粒产量(kg/$hm^2$) - 空白小区水稻籽粒产量(kg/$hm^2$)]/施氮量(N kg/$hm^2$)

氮肥回收利用率 (RE,%) = [施氮小区水稻吸氮量(N kg/$hm^2$) - 空白小区水稻吸氮量(N kg/$hm^2$)]/施氮量(N kg/$hm^2$) ×100

试验数据采用 EXCEL、SPSS 软件进行处理与分析。

## 2　结果与分析

### 2.1　施氮量、产量和氮肥利用率

表 2 显示,最佳作物管理技术表现出良好的减氮、增产和增效潜力。农民传统处理的平均施氮量为 204.1 kg/$hm^2$,最佳作物管理技术处理氮肥用量减少了 20.3%;氮肥的减少并没有使水稻的产量下降,反而表现出较大的增产效应。农民传统处理的平均产量为 7226.4 kg/$hm^2$,最佳作物管理技术处理的平均产量为 7917.0 kg/$hm^2$,增长率为 9.6%;由于氮肥施用量的减少和产量的增加,最佳作物管理技术处理的氮肥利用率大幅度增加,显著高于农民传统处理,农民传统处理和最佳作物管理技术处理的氮肥偏生产力(PFP)、农学利用率(AE)和氮肥回收率(RE)分别为 37.3 kg/kg 和 50.8 kg/kg,8.5 kg/kg 和 14.9 kg/kg,28.7% 和 42.3%,增长率分别为 36.2%、75.3% 和 13.6 个百分点,AE 的增长幅度最大,其次为 PFP 和 RE。

**表 2　农民传统处理和最佳作物管理技术处理的施氮量、产量、氮肥效率和减氮、增产、增效的百分比**

**Table 2　N rate, yield, nitrogen use efficiency under farmer's practices(FPs) and best crop management practices(BCMPs)**

| 管理模式 Management model | 施氮量 N rate (kg/$hm^2$) | 产量 Yield (kg/$hm^2$) | 氮肥偏生产力 PFP (kg/kg) | 氮肥农学利用率 AE (kg/kg) | 氮肥回收率 RE (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| 农民传统 FPs | 204.1 ±62.9 a | 7226.4 ±1371.4 b | 37.3 ±10.8 b | 8.5 ±5.4 b | 28.7 ±4.5 b |
| 最佳作物管理技术 BCMPs | 162.7 ±41.3 b | 7917.0 ±1399.7 a | 50.8 ±10.5 a | 14.9 ±6.3 a | 42.3 ±4.1 a |

注(Note): FPs—Farmer's practices; BCMPs—Best crop management practices; PFP—Partial factor productivity; AE—Agronomic efficiency; RE—Recovery efficiency. 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

### 2.2　水稻的氮素吸收动态

农民传统和最佳作物管理技术处理的氮素吸收在水稻整个生长期表现出相似的规律,齐穗期之前氮素迅速累积,到齐穗期之后氮素的吸收速率下降,但具体在各个时期的累积吸氮量和阶段吸氮量不同,从图 1 可以看出,农民传统和最佳作物管理技术处理的累积吸氮量,在分蘖期分别为 39.8 kg/$hm^2$ 和 40.2 kg/$hm^2$,占作物收获期吸氮量的 26.2% 和 24.2%;在穗分化期分别为 88.2 kg/$hm^2$ 和 81.6 kg/$hm^2$,占作物收获期吸氮量的 58.1% 和 49.2%;在齐穗期分别为 134.9 kg/$hm^2$ 和 147.7 kg/$hm^2$,占作物收获期吸氮量的 88.9% 和 89.0%;在成熟期分别为 151.7 kg/$hm^2$ 和 165.9 kg/$hm^2$。两种管理措施下,水稻的阶段氮素吸收量也存在差异:从分蘖期到穗分化期,农民传统和最佳作物管理技术处理的阶段吸氮量分别为 48.4 kg/$hm^2$ 和 41.4 kg/$hm^2$,占作物收获期吸氮量的 31.9% 和 24.9%;穗分化期到齐穗期,阶段吸氮量分别为 46.7 kg/$hm^2$ 和 66.1

kg/hm$^2$,占作物收获期吸氮量的30.8%和39.8%;齐穗期到成熟期,阶段吸氮量分别为16.8 kg/hm$^2$和18.2 kg/hm$^2$,占作物收获期吸氮量的11.1%和11.0%。农民传统处理在生育前期表现出较大的氮吸收能力,但从齐穗期开始,最佳作物管理技术处理的氮吸收能力要大于农民传统处理。由于试验点分布在不同的水稻种植地区,土壤供氮能力不同,不同地区的水稻累积吸氮量和阶段吸氮量也有一定差异,虽然没有达到差异显著水平,但总体趋势明显。

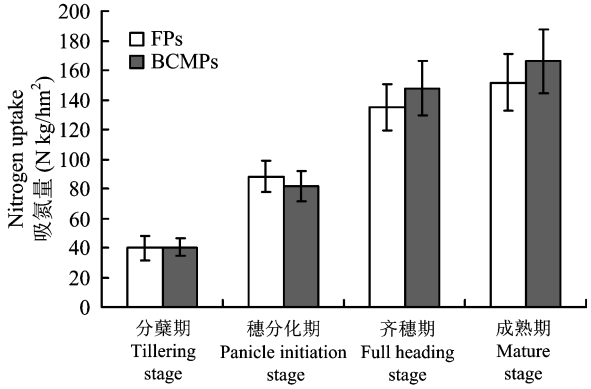


**图1 农民传统处理(FPs)和最佳作物管理技术处理(BCMPs)水稻不同生育期的吸氮量**

**Fig. 1 Nitrogen uptake of farmer's practices (FPs) and best crop management practices (BCMPs) at different rice growth stages**

## 2.3 水稻的干物质累积动态

农民传统和最佳作物管理技术处理水稻的干物质累积与氮素吸收的趋势类似。穗分化期之前干物质累积相对缓慢,到穗分化期之后干物质的积累开始迅速上升,但在各个时期的干物质积累的绝对值不同。图2显示,农民传统和最佳作物管理技术处理的干物质累积量,在分蘖期分别为1399.9 kg/hm$^2$和1524.0 kg/hm$^2$,占作物收获期干物质累积量的10.8%和11.0%;在穗分化期分别为3875.0 kg/hm$^2$和3856.4 kg/hm$^2$,占作物收获期干物质累积量的30.0%和28.0%;在齐穗期分别为8869.0 kg/hm$^2$和9141.6 kg/hm$^2$,占作物收获期干物质累积量的68.7%和66.3%;成熟期时别为12914.2 kg/hm$^2$和13796.1 kg/hm$^2$,在收获期,干物质的累积量表现出显著差异($P<0.05$)。同时,农民传统和最佳作物管理技术处理的花后干物质积累量分别为4045.2 kg/hm$^2$和4654.5 kg/hm$^2$,二者差异显著($P<0.05$)。

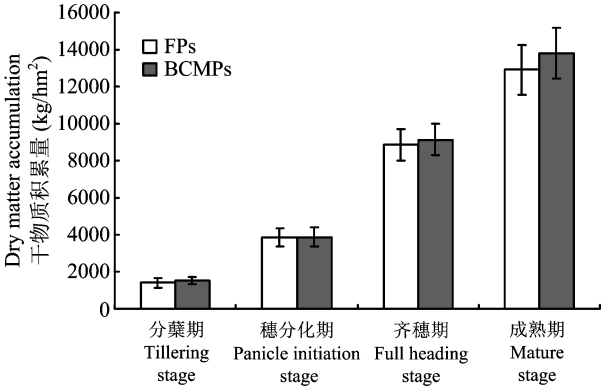


**图2 农民传统处理(FPs)和最佳作物管理技术处理(BCMPs)水稻不同生育期干物质累积量**

**Fig. 2 Dry matter accumulation of farmer's practices (FPs) and best crop management practices (BCMPs) at different rice growth stages**

## 2.4 产量构成

不同管理措施对水稻的产量构成因素有明显影响,从表3可以看出,最佳作物管理技术处理的每平方米平均穗数为243.2,显著大于农民传统处理的231.7($P<0.05$);最佳作物管理技术处理的平均穗粒数为154.2,显著大于农民传统处理的150.0($P<0.05$);同时,最佳作物管理技术处理的平均千粒重为26.9 g,显著大于农民传统处理的26.6 g($P<0.05$)。

**表3 农民传统处理和最佳作物管理技术处理的产量构成**

**Table 3 Yield components of farmer's practices (FPs) and best crop management practices (BCMPs)**

| 管理模式 Management model | 平方米穗数(No./m$^2$) Panicles number per m$^2$ | 每穗粒数(No./panicle) Spikelet number per panicle | 千粒重(g) 1000-grain weight |
|---|---|---|---|
| 农民传统 FPs | 231.7±9.2 b | 150.0±5.0 b | 26.6±0.3 b |
| 最佳作物管理技术 BCMPs | 243.2±8.0 a | 154.2±4.9 a | 26.9±0.3 a |

注(Note):同列数据后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level.

## 3 讨论与结论

尽管我国水稻种植历史悠久,种植技术相对成熟,农民的水稻平均产量达到可实现产量的 70% 以上[17],但是,不合理的水肥以及作物管理仍然是水稻高产高效的限制因子。目前的研究表明,我国的水稻仍然能够通过优化水肥以及作物管理技术实现增产 10%,增产的原因可能是:1)氮肥施用量和时期匹配高产水稻的生理需求,减少早衰,促进干物质累积,尤其是后期干物质的累积,促进了氮素吸收和千粒重的增加[18, 24-25]。增加生物产量是获得高产的物质基础,且经济产量主要决定于齐穗后群体的光合生产量,即花后期的干物质积累量[26-27]。在本研究条件下,最佳作物管理技术的水稻花后干物质积累量为 4655 kg/hm$^2$,占总干物质积累的 34%;2)增加钾肥的施用,尤其是增加抽穗期钾肥的施用,这可能增加水稻根系的活力,促进对养分的吸收,有利于形成高产群体[28-29];3)个别点($n=43$)施用硅肥或微量元素,可能也有一定的增产效果;4)增加栽插密度,保障了合理的群体数量和穗数;5)后期的干湿交替灌溉,促进了弱势粒灌浆,增加每穗粒数[30]。同时,本研究也表明,最佳作物管理技术可以实现在增产的基础上同时减少氮肥施用量,即与农民传统的管理方式相比,氮肥用量节省 20%,氮肥偏生产力、农学利用率和氮肥回收利用率分别增加 36.2%、75% 和 13.6 个百分点。由此可见,我国的水稻生产系统有更大的节氮和增效的潜力。

本研究的最佳作物管理技术具有现实的可行性。如:1)增加插播密度,可以通过机插秧技术来实现[31];2)我国在水稻养分管理技术方面的研究已取得显著进展[8, 32];3)由于水资源短缺以及水稻生产技术的发展,水稻生育后期的干湿交替灌溉在生产上也越来越普遍[33-34]。然而,需要进一步研究明确的是:1)目前这些最佳养分管理技术的净温室气体排放,因为节水灌溉会减少甲烷的排放,但是会增加氧化亚氮的排放[35];2)不同稻作系统在增产增效方面的表现。此外,由于我国粮食生产的长期目标需要增产 30%～50%,因此,目前 10% 的增产量,仍不能满足未来对水稻生产的需求[16],水稻生产的更大增加量仍需要管理技术进一步的重大突破、品种的改良以及土壤生产力的改善等[3, 36]。

**参 考 文 献:**


[1] Frolking S, Qiu J J, Boles S *et al*. Combining remote sensing and ground census data to develop new maps of the distribution of rice agriculture in China[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16: 1091-1101.

[2] FAO. http://faostat.fao.org. 2010.

[3] Fan M S, Shen J B, Yuan L X *et al*. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13-24.

[4] Heffer P. Assessment of fertilizer use by crop at the global level: 2006/07-2007/08[R]. Pairs, France: International Fertilizer Industry Association, 2009.

[5] Roelcke M, Han Y, Schleef K H *et al*. Recent trends and recommendations for nitrogen fertilization in intensive agriculture in eastern China[J]. Pedosphere, 2004, 14: 449-460.

[6] Peng S B, Buresh R J, Huang J L *et al*. Improving nitrogen fertilization in rice by site-specific N management. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30: 649-656.

[7] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 等. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J]. 中国农业科学, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H *et al*. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(9): 1095-1103.

[8] 林葆. 提高作物产量, 增加施肥效应[A]. 中国土壤学会. 中国土壤科学的现状与前景[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1991. 29-36.
Lin B. Make the most efficient use of fertilizers in increasing crop production[A]. Soil science society of China. Soil Science in China. Present and future[M]. Jiangsu: Jiangsu Science and Technology Press, 1991. 29-36.

[9] 李庆逵. 中国农业持续发展中的肥料问题[M]. 南昌: 江西科学技术出版社, 1997.
Li Q K. Fertilizer issues in the sustainable development of China agriculture[M]. Nanchang: Jiangxi Science and Technology Press, 1997.

[10] Cassman K G, Gines H C, Dizon M A *et al*. Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: contributions from indigenous and applied nitrogen[J]. Field Crops Research, 1996, 47: 1-12.

[11] Cassman K G, Dobermann A R, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management[J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2002, 3(2): 132-140.

[12] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W *et al*. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences[J]. Ecological Application, 1997, 7: 737-750.

[13] Zhu Z L, Xiong Z Q, Xing G X. Impacts of population growth and economic development on the nitrogen cycle in Asia[J]. Science in China (Series C: Life Science), 2005, 48: 729-737.

[14] Guo J H, Liu X J, Zhang Y *et al*. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327: 1008-1010.

[15] Zheng X H, Han S H, Huang Y *et al*. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the

direct $N_2O$ emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18: GB2018, doi: 10.1029/2003GB002167.

[16] Shen J B, Cui Z L, Miao Y X *et al*. Transforming agriculture in China: From solely high yield to both high yield and high resource use efficiency[J]. Global Food Security, 2013, 2(1): 1-8.

[17] Wart J V, Christian Kersebaum K, Peng S B *et al*. Estimating crop yield potential at regional to national scales[J]. Field Crops Research, 2013, 143: 34-43.

[18] Fan M S, Lü S H, Jiang R F *et al*. Triangular transplanting pattern and split nitrogen fertilizer application increase rice yield and nitrogen fertilizer recovery[J]. Agronomy Journal, 2009, 101(6): 1421-1425.

[19] 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[M]. 北京：中国农业出版社，2013. 199-204.
Zhang F S, Fan M S. The basic research of high yield and high resources use efficiency of the main food crops[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2013. 199-204.

[20] 申建波，张福锁. 水稻养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京：中国农业出版社，2006. 37-43.
Shen J B, Zhang F S. Theory and practice of rice nutrient integrated management[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2006. 37-43.

[21] Zhang H, Chen T T, Wang Z Q *et al*. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation[J]. Journal of Experimental Botany, 2010, 61: 3719-3733.

[22] Doberman A, Fairhurst T H. Rice: Nutrient disorders and nutrient management[M]. Singapore: Potash and Phosphate Institute, and Manila, IRRI, 2000.

[23] Cassman K G, Peng S B, Olk D C *et al*. Opportunities for increased nitrogen-use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems [J]. Field Crops Research, 1998, 56: 7-39.

[24] 肖恕贤，覃步生，陈盛球. 等. 杂交早稻需肥特性和施肥技术研究[J]. 作物学报，1982，8(1)：23-32.
Xiao S X, Qin B S, Chen S Q *et al*. Studies on the characteristics of fertilizer requirement of hybrid rice and the application technique[J]. Acta Agronomica Sinica, 1982, 8(1): 23-32.

[25] 石庆华，潘晓华，钟旭华. 等. 杂交早稻的吸氮特性与产量形成的初步研究[J]. 江西农业大学学报，1989，11(1)：18-24.
Shi Q H, Pan X H, Zhong X H *et al*. Studies on the characteristics of nitrogen absorption and the yield formation in early hybrid rice [J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 1989, 11(1): 18-24.

[26] 陈温福，徐正进，张文忠，等. 水稻新株型创造与超高产育种[J]. 作物学报，2001，27(5)：665-672.
Chen W F, Xu Z J, Zhang W Z *et al*. Creation of new plant type and breeding rice for super high yield[J]. Acta Agronomica Sinica, 2001, 27(5): 665-672.

[27] 凌启鸿. 作物群体质量[M]. 上海：上海科学技术出版社，2001. 16-42.
Lin Q H. Crop population quality[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2001. 16-42.

[28] 何电源，吕龙石，李桂花，等. 中国南方土壤肥力与栽培植物施肥[M]. 北京：科学出版社，1994.
He D Y, Lü L S, Li G H *et al*. Soil fertility and fertilization of cultivated plant in South China [M]. Beijing: Science Press, 1994.

[29] 胡泓，王光火. 钾肥对杂交水稻养分积累以及生理效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2003，9(2)：184-189.
Hu H, Wang G H. Influence of potassium fertilizer on nutrient accumulation and physiological efficiency of hybrid rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(2): 184-189.

[30] 杨建昌. 水稻弱势粒灌浆机理与调控途径[J]. 作物学报，2010，36(12)：2011-2019.
Yang J C. Mechanism and regulation in the filling of inferior spikelets of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(12): 2011-2019.

[31] 吴良泉，蔡国学，石孝均，等. 水稻配方肥与机插秧集成技术应用效果研究[J]. 中国农技推广，2013，29(1)：35-36.
Wu L Q, Cai G X, Shi X J *et al*. The agronomical effects of formulated fertilizer and mechanical transplanting of rice[J]. China Agricultural Technology Extension, 2013, 29(1): 35-36.

[32] Zhang F S, Fan M S, Zhao B Q *et al*. Fertilizer use, soil fertility and integrated nutrient management in China [A]. Zhang F S, Fan M S. Improving plant nutrient management for better farmer livelihoods [C]. Beijing: Food Security and Environmental Sustainability Proceeding of a Regional Workshop, 2005.

[33] 许迪，康绍忠. 现代节水农业技术研究进展与发展趋势[J]. 高技术通讯，2002，12：103-108.
Xu D, Kang S Z. Research progress and development trend on modernized agriculture water-saving technology [J]. High Technology Letters, 2002, 12: 103-108.

[34] Zou J W, Huang Y, Qin Y M *et al*. Changes in fertilizer-induced direct $N_2O$ emissions from paddy fields during rice-growing season in China between 1950s and 1990s[J]. Global Change Biology, 2009, 15: 229-242.

[35] 石生伟，李玉娥，刘运通，等. 中国稻田 $CH_4$ 和 $N_2O$ 排放及减排整合分析[J]. 中国农业科学，2010，43(14)：2923-2936.
Shi S W, Li Y E, Liu Y T *et al*. $CH_4$ and $N_2O$ emission from rice field and mitigation options based on field measurements in China: An integration analysis[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(14): 2923-2936.

[36] Fan M S, Lal R, Cao J *et al*. Plant-based assessment of soil productivity and contributions to China's cereal crop yield increase since 1980[J]. Plos One, 2013, 8(9): e74617. doi: 10.1371/journal.pone.0074617.