植物营养与肥料学报 2015,21(4): 836 - 845 doi: 10.11674/zwyf.2015.0402
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

# 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡

侯云鹏[1], 韩立国[2], 孔丽丽[1], 尹彩侠[1], 秦裕波[1], 李 前[1], 谢佳贵[1]*
(1 农业部东北植物营养与农业环境重点实验室,吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,长春 130033;
2 吉林省前郭县红光国营农场,吉林松原 138100)

**摘要:【目的】**为解决东北地区水稻合理施用氮肥问题,系统研究了不同施氮水平条件下,东北水稻产量及构成因素、养分吸收、转运、氮肥利用效率及土壤氮素平衡的变化,并探讨各养分间及其与产量间的关系,为东北地区水稻合理施氮提供理论基础。**【方法】**于 2012 ~ 2013 年在吉林省松原市前郭县红光农场,选用当地主栽水稻品种富优 135 和吉粳 511 为材料,设置施 N 0、60、120、180 和 240 kg/hm$^2$ 5 个水平。于水稻返青期、分蘖期、抽穗期、灌浆期及成熟期采集植株样本,分为茎鞘、叶片和籽粒三部分,测定氮、磷、钾含量,计算水稻主要生育期植株养分吸收、转运、氮素利用特性的相关参数及各养分吸收、转运与产量间的关系。水稻移栽前和收获后采集 0—100 cm 土壤样品,每 20 cm 为一层(共 5 层),测定铵态氮、硝态氮含量,并根据各层土壤容重计算 0—100 cm 土体无机氮积累量,分析土壤氮素平衡状况。**【结果】**施氮量 60 ~ 180 kg/hm$^2$ 范围内,水稻产量随着施氮水平的提高而增加,氮肥用量超过 180 kg/hm$^2$ 水稻产量下降。结合当年水稻和肥料价格,根据水稻产量(y)和施氮量(x)拟合方程,得出最高产量氮肥用量分别为 212.8 kg/hm$^2$ 和 220.6 kg/hm$^2$,施氮范围在 202.2 ~ 231.6 kg/hm$^2$ 之间,最佳经济产量氮肥用量分别为 203.0 和 209.1 kg/hm$^2$,施氮范围在 192.9 ~ 219.6 kg/hm$^2$ 之间。施用氮肥可显著提高水稻主要生育期氮、磷、钾吸收量,且能提高水稻抽穗期氮、磷、钾养分向籽粒的转运,施氮量 180 kg/hm$^2$ 处理抽穗期各养分累积量与籽粒转运量呈正比,当氮肥用量超过 180 kg/hm$^2$ 后,氮、磷、钾养分向籽粒转运出现负效应。氮素农学利用率和偏生产力随着施氮水平的提高而显著下降,氮肥当季回收率以施氮量 180 kg/hm$^2$ 处理最高。相关分析表明,水稻主要生育期氮、磷、钾的吸收、转运与产量间均存在显著或极显著的正相关性,其中灌浆期氮、磷、钾的吸收状况与产量间的相关系数最大。施用氮肥可显著提高收获后 0—100 cm 土壤中残留无机氮($N_{min}$),氮素表观损失量随施氮水平的提高而增加。**【结论】**适宜的氮肥用量可显著提高水稻产量,各生育时期养分吸收总量,提高水稻生育后期秸秆中氮、磷、钾向籽粒的转运量,并能降低土壤氮素表观损失量。综合考虑提高水稻产量、效益、氮肥当季回收率及维持土壤氮素平衡等因素,在本试验条件下,施氮范围在 192.9 ~ 219.6 kg/hm$^2$。

**关键词:** 氮水平; 产量; 养分吸收; 养分转运; 氮素平衡
**中图分类号:** S511.2$^+$2.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)04-0836-10

# Nutrient absorption, translocation in rice and soil nitrogen equilibrium under different nitrogen application doses

HOU Yun-peng[1], HAN Li-guo[2], KONG Li-li[1], YIN Cai-xia[1], QIN Yu-bo[1], LI Qian[1], XIE Jia-gui[1]*
(*1 Key Laboratory of Plant Nutrition and Agro-Environment in Northeast Region, Ministry of Agriculture, /Agricultural Resources and Environment Research Institute, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2 Hongguang State Farm, Qianguo County, Songyuan, Jilin 138100, China*)

**Abstract: 【Objectives】** A systematic analysis on the rice yield, component factors, nutrient absorption, translocation, nitrogen use efficiency and nitrogen balance in soil under different nitrogen levels was performed to provide theoretical basis for rational amount of applied nitrogen in rice field in northeast China, and the interactions

**收稿日期:** 2014-04-11 **接受日期:** 2014-09-12 **网络出版日期:** 2015-04-07
**基金项目:** 国家科技支撑计划(2012BAD04B02); 中国-国际植物营养研究所(IPNI)合作项目(BFDP-Jilin-2013)资助。
**作者简介:** 侯云鹏(1982—),男, 吉林公主岭人,助理研究员,主要从事植物营养研究。E-mail: exceedfhvfha@163.com
* 通信作者 Tel: 0431-87063167, E-mail: xiejiagui@163.com

relationship between nitrogen, phosphorus and potassium in soil as well as relationships between nutrient and yield were discussed.【**Methods**】The field experiment was carried out by using local major rice varieties (Fuyou 135 and Jijing 511) at Hongguang State Farm of Qianguo County in Songyuan City of Jilin province from 2012 to 2013, and the experiment includes five treatments with different nitrogen levels (0, 60, 120, 180 and 240 kg/hm$^2$). As plant samples, stem-sheath, leaf and grain parts at returning green stage, mid-tillering stage, heading stage, filling stage and maturity stage were collected to measure the contents of nitrogen, phosphorus and potassium, respectively. Based on these data, the nutrient absorption, translocation, nitrogen use characteristics parameters, and the relationships between nutrient absorption, translocation and yields of the plant at the main growth stages of rice were calculated or evaluated. The soil samples from 0–100 cm soil depth (each layer 20 cm) were respectively collected before transplanting and after harvest of rice to measure the contents of ammonium and nitrate nitrogen. Depending on the soil bulk density of each layer, the amount of inorganic nitrogen accumulation in 0–100 cm soil layer was calculated to profile soil nitrogen balance.【**Results**】Data showed that when the amounts of applied N were ranged from 60 kg/hm$^2$ to 180 kg/hm$^2$, the rice yield increased with increasing amounts of nitrogen fertilizer, and decreased when the amount of applied N was over N 180 kg/hm$^2$. Based on the prices factors of rice and fertilizers in the past years, N rates for obtaining maximum yield were 212.8 kg/hm$^2$ and 220.6 kg/hm$^2$ respectively, and the range of nitrogen application was ranged from 202.2 kg/hm$^2$ to 231.6 kg/hm$^2$. N rates for getting the optimum yield were 203.0 kg/hm$^2$ and 209.1 kg/hm$^2$, and the range of nitrogen application was determine to be between 192.9 kg/hm$^2$ and 219.6 kg/hm$^2$ by simulating between rice yield (y) and nitrogen fertilizer application (x), respectively. Nitrogen fertilizer application could significantly improve the accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium at main growing stages, and increased the translocation of nitrogen, phosphorus and potassium to grains at heading stage. The accumulation amount of nutrients at heading stage is proportional to the amount of translocation to grain under N 180 kg/hm$^2$. Nitrogen fertilizer rates over 180 kg/hm$^2$ had negative effects on the translocation of nitrogen, phosphorus and potassium to grain. Nitrogen agronomic efficiency and partial factor productivity were significantly decreased because of increasing nitrogen fertilizer application. The highest nitrogen recovery efficiency in current season was in the treatment of N 180 kg/hm$^2$. Correlation analysis showed that the yield had significantly or extremely significantly positive correlations with absorption and translocation of nitrogen, phosphorus and potassium at the main growth periods of rice, and the highest correlation coefficient was exhibited at the filling stage. Nitrogen fertilizer application could significantly improve residual Nmin at 0–100 cm soil after harvesting, and increase in nitrogen fertilizer application apparently enhanced the losses of N.【**Conclusions**】Optimum nitrogen fertilizer application could significantly improve rice yield, the total nutrient accumulation at different growing stages, the translocation amount of nitrogen, phosphorus and potassium from straw to grain during the late growth period of rice, and apparently reduce losses of soil N. Comprehensively, considering on the rice yield, benefit, nitrogen recovery efficiency in season and nitrogen balance in soil, the optimum nitrogen application rate was determined to be ranged from 192.9 kg/hm$^2$ to 219.6 kg/hm$^2$ in this experiment.

**Key words:** nitrogen level; yield; nutrient absorption; nutrient translocation; nitrogen balance

水稻是我国第二大粮食作物,种植面积3013.7万公顷,总产量达20422万吨,占我国粮食总产量的1/3以上[1]。可见,确保水稻高产稳产对我国粮食安全起着十分重要的作用。在各种营养元素中,氮素是影响水稻生长发育和产量最敏感的因素,并与磷、钾素的吸收存在着密切关系。然而,在水稻生产中,氮肥的使用存在着很大程度的盲目性和不合理性,不仅不会提高水稻产量,还会导致水稻产量、品质及氮肥利用效率下降,并且造成土壤质量退化、地表水和地下水体硝酸盐含量超标等一系列环境问题,严重影响到农田的可持续利用[2-4]。施用氮肥影响着水稻的农学效应、品质及环境。在一定的施氮范围内,提高施氮水平可以显著增加水稻产量和水稻氮素吸收总量,但超过这一范围,增施氮肥不能

使产量继续增加,施入的氮素以硝态氮的形式残留在土壤中,随灌溉水或降雨进入地下水,造成环境污染[5-9]。适当增加氮肥用量、提高氮肥在穗肥中追施比例,可以提高籽粒蛋白质含量,降低稻米垩白粒率和直链淀粉含量[10-13]。为此,本文通过连续两年田间试验,研究了不同施氮水平条件下东北水稻主要生育期对氮、磷、钾养分吸收利用,氮肥利用效率及土壤氮素平衡的变化,并探讨各养分吸收、转运与产量间的关系,从而探明水稻氮肥调控机理。

# 1 材料与方法

## 1.1 试验区概况

试验于 2012 年和 2013 年在吉林省松原市前郭县红光农场(123°08′32 E″、44°38′16″ N)进行,该地区位于吉林省中西部,属中温带大陆性季风气候区,四季分明,据当地气象局资料,2012 年前郭县水稻生长季内≥10℃积温为 3018℃,降雨量为 422.5 mm,2013 年前郭县水稻生长季内≥10℃积温为 2981℃,降雨量为 438 mm。0—20 cm 层土壤基本养分状况见表 1。

**表 1 供试土壤基本养分状况**

**Table 1 The basic nutrient characteristics of the tested soils**

| 年份 Year | 有机质 (g/kg) OM | 全氮 (g/kg) Total N | 碱解氮 (mg/kg) Available N | 有效磷 (mg/kg) Available P | 速效钾 (mg/kg) Available K | pH |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 2012 | 36.5 | 1.21 | 133.28 | 53.68 | 73.29 | 6.26 |
| 2013 | 32.4 | 1.16 | 125.45 | 63.23 | 83.54 | 6.41 |

## 1.2 试验设计

试验共设 5 个处理,氮肥用量分别设为 N 0、60、120、180 和 240 kg/hm$^2$,依次以 $N_0$、$N_{60}$、$N_{120}$、$N_{180}$、$N_{240}$表示。按基肥∶分蘖肥∶孕穗肥 = 30%∶40%∶30%施用,基肥于移栽前 3 d 施入,分蘖肥于移栽后 20 d 施入;孕穗肥于移栽后 70 d 施入。各处理均基施 $P_2O_5$ 100 kg/hm$^2$ 和 $K_2O$ 120 kg/hm$^2$。试验用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙($P_2O_5$ 46%),钾肥为氯化钾($K_2O$ 60%)。2012 年供试水稻品种为富优 135,2013 年供试水稻品种为吉粳 511。5 月 21 日移栽,大田栽插密度为 20 万穴/hm$^2$,9 月 30 日收获。小区面积为 30 m$^2$,随机区组排列,3 次重复,两边设有保护行。每小区间筑埂(宽 30 cm)并用塑料薄膜包裹,以减少各小区间的相互影响,其他田间管理按生产田进行。

## 1.3 样品采集与测定

分别于水稻移栽前和收获后采取 0—100 cm 土壤样品,每 20 cm 为一层(共 5 层),用环刀法测定该层土壤容重。每小区随机取 5 点,土壤样品混匀后,立即置于 -20℃冷冻保存。土壤样品解冻后,将样品混匀过 2 mm 筛,称取 5 g 土壤样品,加入 100 mL 0.01 mol/L $CaCl_2$ 溶液浸提,震荡 50 min 后过滤,浸提液用丹麦 Foss(FIA STAR 5000)流动注射分析仪测定铵态氮、硝态氮含量,并根据各层土壤容重将铵态氮和硝态氮含量换算成 0—100 cm 土体无机氮积累量。同时采用烘干法测定土壤含水量。

分别于水稻返青期、分蘖期、抽穗期、灌浆期和成熟期(移栽后 8、20、70、90 和 126 d)采集植株样本,每小区采取有代表性水稻 5 穴(返青期取 30 穴),剪去根部,分为叶片、茎鞘和穗部三部分,于 105℃杀青 30 min 后,75℃烘干至恒重,称重并计算地上部干物重。样品粉碎过 0.5 mm 筛,分别测定氮、磷、钾养分含量。分析均采取 $H_2SO_4-H_2O_2$ 法消煮,采用凯氏定氮法测定氮素含量,钒钼黄比色法测定磷素含量,火焰光度法测定钾素含量;成熟期各小区单收,按实收株数计产。

## 1.4 计算公式及统计方法[8-14]

养分吸收量为某生育期单位面积植株(茎鞘、叶片、穗部)氮(磷、钾)的吸收量;

氮收获指数(N harvest index,%) = 成熟期籽粒氮吸收量/植株氮总吸收量 ×100;

氮肥当季回收率(N recovery efficiency,%) = (收获期施氮区地上部总吸氮量 - 收获期不施氮区地上部总吸氮量)/氮肥施用量 ×100;

氮肥农学效率(N agronomy efficiency, kg/kg) = (施氮区水稻产量 - 不施氮区水稻产量)/氮肥施用量;

氮肥偏生产力(N partial factor productivity, kg/kg) = 施氮区产量/氮肥施用量;

转运量(Translocation, kg/hm$^2$) = 抽穗期茎

鞘、叶片氮(磷、钾)吸收量 - 成熟时茎鞘、叶片氮(磷、钾)滞留量;

转运率(Transportation efficiency,%) = 单位面积植株成熟期叶、茎鞘元素氮(磷、钾)的表观输出量/抽穗期叶、茎鞘该元素总吸收量 ×100;

转运贡献率(Translocation conversion rate of vegetative organ,%) = 氮(磷、钾)转运量/抽穗至成熟期穗部氮(磷、钾)素吸收总量 ×100;

土壤氮素表观净矿化量(kg/hm$^2$) = 不施氮区作物地上部氮积累量 + 不施氮肥区土壤残留无机氮量 - 不施氮肥区土壤起始无机氮量;

氮素表观损失量(kg/hm$^2$) = 施氮量 + 土壤起始无机氮量 + 土壤氮素净矿化量 - 作物收获氮移走量 - 土壤残留无机氮量;

最佳施氮范围(The range of optimal N application)为理论产量的 95% 及以上时的施氮范围。

试验数据用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 9.0 统计软件处理。

## 2　结果与分析

### 2.1　不同施氮水平对水稻产量及其构成因子的影响

施用氮肥对水稻的产量及其构成因子产生重要影响。表 2 可知,两年的产量结果趋势一致,施氮处理水稻产量均显著高于不施氮肥($N_0$)处理($P < 0.05$),其中 2012 年增产幅度为 23.7% ～ 51.0%,2013 年增产幅度为 18.0% ～ 44.1%;在不同氮水平处理中,水稻产量随施氮水平的提高呈先增后降的趋势,在 60 ～ 180 kg/hm$^2$ 范围内水稻产量显著提高($P < 0.05$),当施氮量超过 180 kg/hm$^2$ 后,水稻产量开始下降。从产量构成因子结果看出,与产量结果趋势一致,有效穗数和穗粒数随着施氮水平的提高而增加,当施氮量超过 180 kg/hm$^2$ 后,有效穗数和穗粒数减少,水稻千粒重随着施氮水平的提高而下降。由此可见,适宜的氮肥用量可以提高水稻有效穗数和穗粒数,从而提高水稻产量。

**表 2　不同处理对水稻产量及其构成因子的影响**

**Table 2　Effect of different treatments on grain yield and its components of rice**

| 处理 Treatment | 2012 | | | | 2013 | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 有效穗数 Valid panicles per m$^2$ | 穗粒数 Grains per panicle | 千粒重(g) 1000-grain weight | 产量 Yield (kg/hm$^2$) | 有效穗数 Valid panicles per m$^2$ | 穗粒数 Grains per panicle | 千粒重(g) 1000-grain weight | 产量 Yield (kg/hm$^2$) |
| $N_0$ | 192.1 ±5.7 d | 102.3 ±5.3 d | 28.9 ±0.9 a | 7139 ±285 d | 284.5 ±9.1 d | 96.8 ±3.3 c | 26.5 ±0.5 a | 7634 ±357 d |
| $N_{60}$ | 257.2 ±3.5 c | 118.9 ±3.2 c | 28.4 ±1.0 a | 8833 ±389 c | 322.6 ±7.3 c | 104.5 ±4.1 c | 26.1 ±0.4 ab | 9008 ±395 c |
| $N_{120}$ | 305.5 ±9.5 b | 124.0 ±5.3 bc | 26.2 ±0.4 b | 9746 ±313 b | 354.3 ±6.4 b | 121.1 ±6.6 b | 25.9 ±0.6 ab | 9893 ±169 b |
| $N_{180}$ | 352.5 ±9.2 a | 136.5 ±2.9 a | 25.9 ±0.7 b | 10777 ±253 a | 371.2 ±4.9 a | 136.5 ±3.0 a | 25.6 ±0.5 b | 10999 ±148 a |
| $N_{240}$ | 348.5 ±4.1 a | 131.7 ±3.3 ab | 25.7 ±0.7 b | 10467 ±204 a | 359.3 ±7.6 b | 134.1 ±1.8 a | 25.5 ±0.4 b | 10608 ±296 a |

注(Note):同列数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Valeus followed by different letters in a column are significantly different among treatments at the 5% level; 2012、2013 年氮肥价格分别为 5.00 和 4.76 yuan/kg,水稻价格为 3.30 和 3.15 yuan/kg, N fertilizer price was 5.00 and 4.76 yuan/kg,rice price was 3.30 and 3.15 yuan/kg in 2012 and 2013.

依据水稻产量($y$, kg/hm$^2$)与施氮量($x$, kg/hm$^2$)的关系可建立一元二次回归方程($y = Ax^2 + Bx + C$),2012 年和 2013 年得到方程式分别为 $y = -0.0772x^2 + 32.857x + 7116.7$($R^2 = 0.9871^{**}$)和 $y = -0.0657x^2 + 28.988x + 7568.2$($R^2 = 0.9744^{**}$)。结合当年水稻和氮肥的价格,求得水稻最高产量氮肥用量、最佳经济氮肥用量、范围及其对应的最高产量和最佳经济产量(表 3)。由表 3 可知,2012 年和 2013 年最高产量氮肥用量分别为 212.8 和 220.6 kg/hm$^2$,施氮范围在 202.2 ～ 231.6 kg/hm$^2$ 之间,最佳经济产量氮肥用量分别为 203.0 和 209.1 kg/hm$^2$,施氮范围在 192.9 ～ 219.6 kg/hm$^2$之间,与最高产量氮肥用量及范围相比,采用最佳经济氮肥用量及范围在保证产量基本不降低的条件下(为最高产量的 99% ～ 100%),可节约氮肥 4.6% ～ 5.2%。

表 3 水稻最高产量和最佳经济产量氮肥用量及其范围（kg/hm²）

Table 3 Nitrogen rates and range for the maximum and optimum yields of rice

| 年份 Year | 最高产量 Max. yield | | | 经济产量 Optimum yield | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 产量 Yield | 施氮量 N rate | 施氮范围 N rang | 产量 Yield | 施氮量 N rate | 施氮范围 N rang |
| 2012 | 10612.8 | 212.8 | 202.2～223.4 | 10605.3 | 203.0 | 192.9～213.2 |
| 2013 | 10765.7 | 220.6 | 209.6～231.6 | 10757.0 | 209.1 | 198.6～219.6 |

## 2.2 不同施氮水平对水稻养分吸收动态的影响

由不同施氮水平水稻养分吸收动态结果（表 4）可知，返青期至分蘖期，水稻生长缓慢，氮、磷、钾吸收量也较少，分蘖期至灌浆期，水稻生长加快，氮、磷、钾吸收量迅速增加，灌浆期至成熟期，作物体内的养分主要是进行转运分配，养分的累积量趋于平缓。表 4 还表明，施用氮肥可以明显提高水稻各生育期氮、磷、钾的吸收量。与不施氮肥（$N_0$）处理相比，施氮各处理各生育期氮、磷、钾吸收量的提高幅度均达到显著水平（$P < 0.05$）。在不同施氮处理中，氮、磷、钾吸收量均随着施氮水平提高而增加，但整个生育期表现并不一致，返青期至抽穗期以 $N_{240}$ 处理氮、磷吸收量最高，灌浆期至成熟期氮、磷吸收总量发生变化，以 $N_{180}$ 处理最高。钾素吸收量与氮、磷吸收量不同，整个生育期均以 $N_{240}$ 处理最高，主要是由于钾在营养体内所占比例较大，在籽粒中养分所占的比例较小。由此可见，氮肥供应过量虽然可以提高水稻植株中的养分积累总量，但不利于水稻生育后期籽粒中养分的积累，从而使灌浆期至成熟期养分积累总量降低。

表 4 不同处理水稻各生育时期氮、磷、钾吸收总量（kg/hm²）

Table 4 The total nitrogen, phosphorus and potassium accumulation under different treatments of rice

| 处理 Treat. | 返青期 Returning green stage | | | 分蘖期 Mid-tillering stage | | | 抽穗期 Heading stage | | | 灌浆期 Filling stage | | | 成熟期 Maturity stage | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | N | P | K | N | P | K | N | P | K | N | P | K | N | P | K |
| $N_0$ | 1.7 c | 0.2 b | 2.4 b | 23.0 d | 2.0 c | 27.0 c | 92.6 d | 22.8 d | 100.1 d | 102.4 e | 26.8 d | 98.7 d | 100.2 e | 31.3 d | 111.9 d |
| $N_{60}$ | 1.9 b | 0.3 a | 3.1 a | 26.7 cd | 2.5 b | 32.1 b | 107.4 c | 25.8 c | 114.6 c | 125.5 d | 33.2 c | 119.3 c | 121.5 d | 37.5 c | 127.5 c |
| $N_{120}$ | 1.9 b | 0.3 a | 3.3 a | 28.7 bc | 2.9 a | 37.5 a | 124.7 b | 29.3 b | 131.0 b | 144.0 c | 38.6 b | 138.0 b | 146.3 c | 40.4 b | 144.6 b |
| $N_{180}$ | 2.1 a | 0.3 a | 3.3 a | 32.8 b | 3.0 a | 40.5 a | 134.6 a | 33.5 a | 143.1 ab | 174.8 a | 43.5 a | 157.1 a | 177.7 a | 45.2 a | 160.9 a |
| $N_{240}$ | 2.1 a | 0.3 a | 3.3 a | 37.6 a | 3.2 a | 41.4 a | 134.8 a | 33.8 a | 148.8 a | 166.9 b | 43.1 a | 158.4 a | 170.0 b | 45.0 a | 166.8 a |

注（Note）：数据为 2012 年和 2013 年平均值 The data was the average of 2012 and 2013；同列数值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.

## 2.3 不同施氮水平对氮、磷、钾养分转运及分配的影响

2.3.1 氮、磷、钾养分的转运 水稻籽粒中养分吸收的一部分来源于根系吸收养分的直接供应，另一部分是营养器官中养分的转移。养分的转运量可用抽穗期和成熟期营养体中养分累积量之差来表示，养分的转运量和转运效率，是营养体养分向籽粒转移量的重要指标。抽穗期营养体氮、磷、钾对籽粒养分的贡献分析结果（表 5）表明，施氮可以提高各营养器官的氮、磷、钾转运量和穗部养分增加量，与不施氮肥处理相比，施氮处理各营养器官的氮、磷、钾转运量和穗部养分增加量的提高幅度均达到显著水平（$P < 0.05$），其中叶片转运量提高幅度分别为 9.0%～22.3%、10.3%～15.1% 和 8.1%～19.4%，茎鞘转运量提高幅度分别为 16.4%～42.8%、15.7%～38.8% 和 10.7%～30.8%，穗部养分增加量提高幅度分别为 22.4%～97.6%、16.6%～40.5% 和 11.9%～45.0%。在不同施氮处理中，各营养器官氮、磷、钾转运量及穗部养分增加量随着施氮水平的提高呈先增后降的趋势，当氮肥用量超过 180 kg/hm² 后，氮、磷、钾转运量和穗部养分增加量开始下降。表明适宜的氮肥用量可以促进水稻生育后期氮、磷、钾养分向籽粒的转运，使籽粒养分显著提高，达到源库平衡。氮肥过量施用会导致营养体氮、磷、

钾代谢过旺,不利于营养体中氮、磷、钾养分向籽粒中转运,导致氮、磷、钾素过多地保留在营养体中。而各营养器官氮、磷、钾转运率随着施氮量的提高而降低。

表5 还表明,在氮、磷、钾养分中,转运效率以磷最高(107.5% ～ 124.7%),其次为氮(98.3% ～ 113.0%),钾最低(53.8%～63.9%)。表明作为主要代谢库的籽粒对氮、磷的需求量大于对钾的需求,是造成养分转运效率差异的主要原因。

**表5　不同处理抽穗至成熟期叶片及茎鞘氮、磷、钾的转运**

**Table 5　N, P and K exportation from leaves and stem-sheaths to ears at the heading to maturity under different treatments**

| 处理 Treatment | 养分 Nutrient | 叶片 Leaf | | 茎鞘 Stem-sheath | | 穗部养分增加量 Ear nutrient increase | 转运贡献率(%) Contribution rate from exportation |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | (kg/hm$^2$) | (%) | (kg/hm$^2$) | (%) | (kg/hm$^2$) | |
| $N_0$ | N | 42.37 c | 75.85 a | 11.07 d | 37.12 a | 56.01 e | 95.42 a |
| $N_{60}$ | | 46.20 b | 72.30 a | 12.89 c | 36.37 a | 68.57 d | 86.17 b |
| $N_{120}$ | | 47.85 b | 68.32 ab | 14.36 b | 35.45 a | 83.82 c | 74.21 c |
| $N_{180}$ | | 51.80 a | 69.59 ab | 15.81 a | 36.27 a | 110.67 a | 61.08 d |
| $N_{240}$ | | 50.37 a | 66.56 b | 14.27 b | 31.69 b | 99.85 b | 64.74 d |
| $N_0$ | P | 4.16 b | 62.20 a | 9.78 b | 62.45 a | 20.37 d | 68.42 a |
| $N_{60}$ | | 4.65 a | 57.68 a | 11.32 ab | 62.01 a | 23.75 c | 67.24 ab |
| $N_{120}$ | | 4.71 a | 56.85 ab | 12.20 ab | 61.45 a | 25.58 b | 66.11 b |
| $N_{180}$ | | 4.79 a | 56.35 ab | 13.57 a | 61.26 a | 28.63 a | 64.15 b |
| $N_{240}$ | | 4.59 a | 51.86 b | 12.71 a | 55.63 b | 26.92 ab | 64.26 b |
| $N_0$ | K | 12.94 b | 39.77 a | 16.88 b | 24.09 a | 34.74 d | 85.82 a |
| $N_{60}$ | | 13.99 b | 39.43 a | 18.68 b | 23.15 a | 38.86 c | 84.09 a |
| $N_{120}$ | | 15.40 a | 37.87 a | 20.48 a | 22.80 a | 44.46 b | 80.71 b |
| $N_{180}$ | | 15.45 a | 36.29 a | 22.08 a | 22.26 ab | 50.39 a | 74.49 c |
| $N_{240}$ | | 14.91 a | 34.44 a | 20.51 a | 19.40 b | 47.41 b | 74.71 c |

注(Note): 数据为2012 年和2013 年平均值 The data was the average of 2012 and 2013; 同列数值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.

2.3.2 水稻不同器官氮、磷、钾的分配　由图1 可知,不同氮水平处理下成熟期各器官氮、磷素分配量为穗 > 茎鞘 > 叶,而钾素的分配不同于氮、磷, 表现为茎鞘 > 穗 > 叶。施氮处理成熟期各器官的氮、磷、钾素分配量均显著的高于不施氮肥($N_0$)处理($P < 0.05$)。在不同施氮处理中,各器官氮、磷、钾分配量均随施氮水平的提高而增加,其中籽粒中氮、磷、钾积累量呈现先增后降的趋势,以 $N_{180}$处理最高,而茎鞘和叶片与籽粒表现不同,以 $N_{240}$处理最高。说明氮肥用量对成熟期氮、磷、钾养分向营养器官和生殖器官的分配量有调控效应,适宜的氮肥用量有利于籽粒中养分的积累,使籽粒养分比例明显提高,进而提高籽粒产量。而氮肥过量供应使水稻茎鞘和叶片中的养分过多地滞留于营养器官中,不利于籽粒中养分的积累。

### 2.4　不同施氮水平对水稻氮肥利用效率的影响

用以表征农田肥料利用效率最常用的有肥料利用率(RE)、肥料农学利用率(AE)及肥料偏生产力(PFP)[16]。表6 可知,不同施氮处理的氮肥农学利用率和氮肥偏生产力呈现出随施氮水平的提高而下

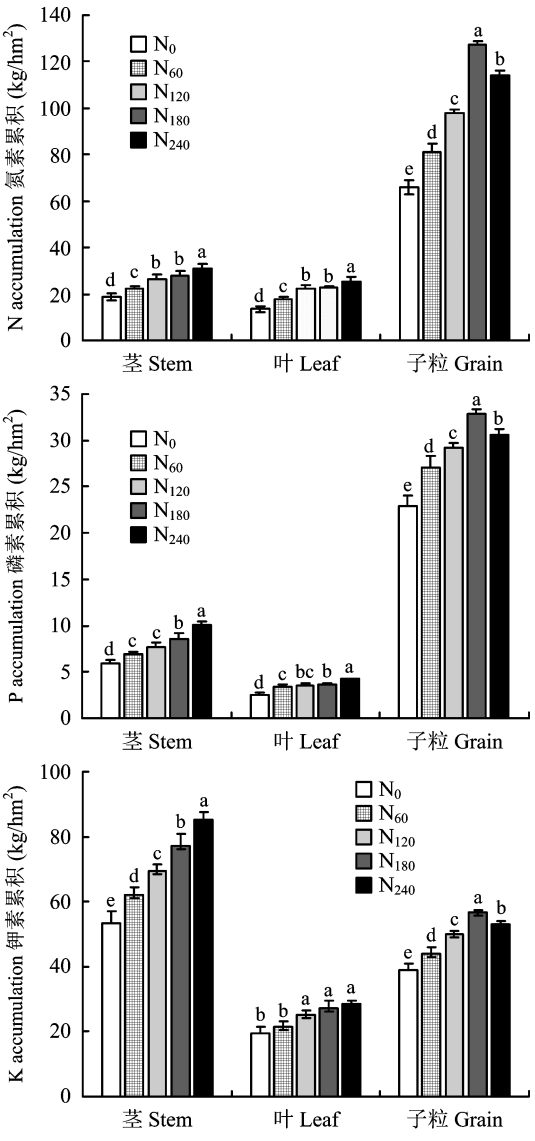


**图 1 水稻成熟期植株各器官氮、磷、钾养分分配**

**Fig. 1 Distribution of N, P and K in different organs of rice at maturity**

[注(Note):数据为 2012 年和 2013 年平均值 The data was the average of 2012 and 2013;方柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters means significant differences among treatments at the 5% level.]

降的趋势,氮肥用量从 60 增加到 240 kg/hm$^2$,水稻氮肥农学利用率和氮肥偏生产力分别从 25.6 和 148.7 kg/kg 下降到 13.1 和 43.9 kg/kg。氮肥当季回收率与氮肥农学利用率和偏生产力趋势不同,在 60～180 kg/hm$^2$ 范围内氮肥当季回收率随着氮肥用量的增加而提高,当施氮量超过 180 kg/hm$^2$ 后,氮肥当季回收率显著下降。由表 6 还可知,水稻氮收获指数随着施氮水平的提高也呈先增后降的趋势,当施氮量超过 180 kg/hm$^2$时,水稻氮收获指数开始下降,说明过量施用氮肥提高了氮素在水稻秸秆中的比例,使水稻植株中的氮素成为奢侈吸收。

**表 6 不同施氮水平对水稻氮肥利用率的影响**

**Table 6 Effects of different nitrogen levels on nitrogen utilization efficiency of rice**

| 处理 Treatment | NHI (%) | NAE (kg/kg) | NRE (%) | NPFP (kg/kg) |
|---|---|---|---|---|
| $N_0$ | 67.2 b | | | |
| $N_{60}$ | 66.9 b | 25.6 a | 38.9 ab | 148.7 a |
| $N_{120}$ | 67.0 b | 20.3 b | 40.1 a | 81.8 b |
| $N_{180}$ | 71.6 a | 19.5 b | 44.2 a | 60.5 c |
| $N_{240}$ | 67.1 b | 13.1 c | 29.9 b | 43.9 d |

注(Note):NHI—氮收获指数 N harvest index;NAE—氮肥农学利用率 Agronomic efficiency;NRE—氮肥当季回收率 Recovery efficiency;NPFP—氮肥偏生产力 Partial factor productivity;数据为 2012 年和 2013 年平均值 The data was the average of 2012 and 2013;同列数值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.

### 2.5 不同施氮水平对土壤氮素平衡的影响

氮素平衡状况是田间和区域尺度上评估氮素表观损失的有效方法。本研究计算了 0—100 cm 土层内的氮素平衡用以评估水稻对氮肥的利用状况。土壤氮素平衡结果(表 7),在氮素输入项中,施氮量起着主要作用,占总输入项的 25.3%～57.5%。而在氮素的输出项中,作物携出量并没有随着施氮水平的提高而一直增加,当施氮量超过 180 kg/hm$^2$ 后作物携出量开始下降,导致 $N_{240}$ 处理土壤表观损失量显著增加,为 57.2 kg/hm$^2$,$N_{60}$ 和 $N_{120}$ 处理由于氮素供应不足,使作物携出量大于氮素总输入项,导致氮素表观损失量为负值。而 $N_{180}$ 处理的作物携出量与氮素总输入量相近,因而氮素表观损失较低,仅为 16.2 kg/hm$^2$。

## 3 讨论与结论

本研究利用肥料效应函数法对当地水稻产量和施氮水平进行拟合,确定最佳施氮量及施氮范围。回归分析表明,2012 年和 2013 年最高产量氮肥用量分别为 212.8 kg/hm$^2$ 和 220.6 kg/hm$^2$,施氮范围在 202.2 kg/hm$^2$ ～231.6 kg/hm$^2$ 之间,最佳经济产量氮肥用量分别为 203.0 kg/hm$^2$ 和 209.1 kg/hm$^2$,施氮范围在 192.9 ～219.6 kg/hm$^2$ 之间,采用最佳经济氮肥用量在保证产量基本不降低的条件下,可

**表 7　不同施氮水平下土壤氮素平衡**

**Table 7　Nitrogen balance in soil under different nitrogen rates**

| 处理 Treatment | 输入 Input (kg/hm²) | | | 输出 Output (kg/hm²) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 施氮量 N rate | 起始无机氮 Initial Nmin | 净矿化 Mineralization | 作物吸氮量 N uptake | 残留无机氮 Residual Nmin | 表观损失量 Apparent N loss |
| $N_0$ | 0 | 165.3 | 11.8 | 100.2 d | 76.9 e | 0 |
| $N_{60}$ | 60 | 165.3 | 11.8 | 121.5 c | 136.7 d | -21.1 d |
| $N_{120}$ | 120 | 165.3 | 11.8 | 146.3 b | 151.9 c | -1.1 c |
| $N_{180}$ | 180 | 165.3 | 11.8 | 177.7 a | 163.2 b | 16.2 b |
| $N_{240}$ | 240 | 165.3 | 11.8 | 170.0 a | 189.9 a | 57.2 a |

注(Note): Nmin—Mineral N; 数据为 2012 年和 2013 年平均值 The data was the average of 2012 and 2013; 同列数值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.

节约氮肥 4.6%～5.2%。当施氮量高于推荐量时,水稻产量开始下降。主要是由于氮肥的过量供应会造成水稻植株对氮素的奢侈吸收,使作物籽粒灌浆不充分,从而影响产量。这与晏娟等[17]和张耀鸿等[3]的研究结果基本一致。

陈新红等[18]研究表明,施用氮肥可显著增加水稻成熟期氮、磷、钾吸收总量。潘圣刚等[19]研究表明,成熟期氮吸收总量与磷吸收总量、钾吸收总量具有显著的正相关性。本研究结果表明,不同氮水平条件下,各生育时期氮、磷、钾的吸收均有极显著的正相关性($0.821^{**}$～$0.991^{**}$),并随着生育进程的推进氮、磷、钾吸收量间的相关性增加。其相关性最大时期出现在灌浆期($0.988^{**}$～$0.991^{**}$),表明氮肥可以提高水稻对磷、钾的协同吸收。这进一步证实和补充了前人的研究结果。此外,不同生育期水稻氮、磷、钾吸收总量与产量间均具有极显著的正相关性($0.820^{**}$～$0.970^{**}$),但不同生育期的相关性存在一定差异,氮、磷、钾吸收量与产量间的相关性最大时期均发生在灌浆期,分别为 $0.959^{**}$、$0.970^{**}$ 和 $0.958^{**}$,本研究中,$N_{180}$ 处理灌浆期养分的吸收积累总量最高,同时所获水稻产量也最高,由此可见,氮肥用量调控能否提高水稻灌浆期氮、磷、钾养分吸收,对产量影响十分显著。

施氮对作物生长发育的调节及产量的影响很大程度上取决于作物器官内氮、磷、钾吸收与转运关系协调的结果[15]。孙永健等[13]研究表明,在一定范围内,氮、磷、钾转运量随施氮量的增加而提高,但过量施用氮肥会使养分转运量下降。赵营等[20]认为,施用氮肥有利于提高玉米养分向籽粒转运,并提高玉米产量。本结究结果表明,在不同氮水平条件下,水稻产量与成熟期各器官氮、磷、钾转运量具有显著或极显著的相关性($0.629^{*}$～$0.910^{**}$),其中产量与茎鞘转运量的相关性($0.733^{**}$～$0.910^{**}$)要高于与叶片转运量的相关性($0.629^{*}$～$0.858^{**}$)。本研究中,施氮量 180 kg/hm² 处理抽穗期各养分累积量与籽粒的转运呈正比,当氮肥用量超过 180 kg/hm² 后,抽穗期各养分累积量过高,导致各养分向籽粒转运量出现负效应。由此可见,适宜的氮肥用量不仅可以促进水稻的养分吸收,并且还可以提高营养体养分向籽粒的运输,提高籽粒氮、磷、钾养分含量,最终影响产量。

一般来讲,随着氮肥用量的提高,作物产量和氮吸收量增加,而氮肥利用效率降低[13,20-21]。本研究结果表明氮肥用量在 60～180 kg/hm² 范围内,氮素吸收量和水稻产量显著提高,达到 N 240 kg/hm² 后,氮素吸收量和水稻产量呈下降趋势。虽然减量施用氮肥处理($N_{60}$、$N_{120}$)的农学利用率和氮肥偏生产力较高,但水稻产量和氮素吸收量却显著低于适当的高施肥量。因此,协调产量和氮肥利用率之间的矛盾,应需在保证作物产量的前提下,提高氮肥利用效率,同时避免水稻营养体对氮素的奢侈吸收[21]。

水稻吸收利用土壤氮素的比例高于肥料[22],氮肥施用是否合理,除了考虑到氮肥的增产效应和氮肥利用率外,还应考虑土壤残留无机氮的高低[23]。农田长期大量施用氮肥会造成土壤氮素的大量盈余[24-26],这些氮素一部分残留于土壤中,为后季作物吸收利用,另一部分氮素通过硝态氮淋溶、氨挥发和反硝化作用而损失,降低氮肥利用率并污染环境[27]。因此在保证作物高产和土壤氮素平衡的同

时,降低硝态氮在土壤中残留及损失十分重要。本研究结果表明,不同氮水平下水稻0—100 cm土体残留的无机氮变化在76.9～189.9 kg/hm$^2$之间。在施氮处理中,以N 180 kg/hm$^2$处理氮素表观损失量最少,氮素输入与氮素输出基本保持平衡,氮素表观损失最低。

综上所述,水稻各生育期氮、磷、钾吸收量与养分转运量存在协同性,且与产量存在显著或极显著的正相关性。适宜的施氮水平可以提高植株(茎鞘、叶片、籽粒)养分吸收总量、抽穗期至成熟期植株运转量及穗部养分增加量,最终提高产量,并且减少了土壤中氮素的残留及损失,降低了对环境的威胁。因此,综合产量与效益、养分吸收、氮肥利用率及土壤氮素平衡等因素,氮肥最佳施氮范围在192.9～219.6 kg/hm$^2$。

## 参考文献:


[1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2013.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistics yearbook 2013[M]. Beijing: China Statistics Press, 2013.

[2] 张洪程, 王秀芹, 戴其根, 等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7): 800-806.
Zhang H C, Wang X Q, Dai Q G *et al*. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupeijiu[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(7): 800-806.

[3] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 616-621.
Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W *et al*. Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 616-621.

[4] 潘圣刚, 黄胜奇, 翟晶, 等. 氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J]. 土壤, 2012, 44(1): 23-29.
Pan S G, Huang S Q, Zhai J *et al*. Effects of nitrogen rate and its basal to dressing ratio on uptake, translocation of nitrogen and yield in rice[J]. Soils, 2012, 44(1): 23-29.

[5] 串丽敏, 赵同科, 安志装, 等. 土壤硝态氮淋溶及氮素利用研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 200-205.
Chuan L M, Zhao T K, An Z Z *et al*. Research advancement in nitrate leaching and nitrogen use in soils[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(11): 200-205.

[6] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 太湖地区稻麦轮作系统中氮肥效应的研究[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 61-66.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al*. Studies on the nitrogen fertilizer application of rice-wheat rotation system in Taihu Lake Region[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(1): 61-66.

[7] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al*. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 757-764.

[8] 陈爱忠, 潘晓华, 吴建富, 等. 氮肥运筹对不同生育期晚稻品种产量及氮素吸收利用的影响[J]. 作物研究, 2011, 25(1): 4-6, 10.
Chen A Z, Pan X H, Wu J F *et al*. Effects of nitrogen fertilizer planning on yield and nitrogen absorption and utilization of late rice varieties with different growth duration[J]. Crop Research, 2011, 25(1): 4-6, 10.

[9] 易琼, 张秀芝, 何萍, 等. 氮肥减施对稻-麦轮作体系作物氮素吸收、利用和土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1069-1077.
Yi Q, Zhang X Z, He P *et al*. Effects of reducing N application on crop N uptake, utilization, and soil N balance in rice-wheat rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1069-1077

[10] 潘圣刚, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(2): 283-289.
Pan S G, Cao C G, Cai M L *et al*. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency, grain yields and qualities of rice under different water regimes[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(2): 283-289.

[11] 刘立军, 王志琴, 桑大志等. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响[J]. 扬州大学学报, 2002, 23(3): 46-50.
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z *et al*. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality[J]. Journal of Yangzhou University, 2002, 23(3): 46-50.

[12] 孙伟晶, 王伯伦, 陈丛斌. 不同施氮水平对水稻产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(20): 9411-9413.
Sun W J, Wang B L, Chen C B. Effects of different nitrogen levels on the yield and quality of rice[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(20): 9411-9413.

[13] 孙永健, 孙园园, 李旭毅, 等. 水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报, 2010, 36(4): 655-664.
Sun Y J, Sun Y Y, Li X Y *et al*. Effects of water-nitrogen interaction on absorption, translocation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(4): 655-664.

[14] 张秀芝, 易琼, 朱平, 等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 782-788.
Zhang X Z, Yi Q, Zhu P *et al*. Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields[J]. Plant

Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 782-788.

[15] 景立权, 赵福成, 王德成, 等. 不同施氮水平对超高产夏玉米氮磷钾积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(8): 1478-1490.
Jing L Q, Zhao F C, Wang D C *et al*. Effects of nitrogen application on accumulation and distribution of nitrogen, phosphorus, and potassium of summer maize under super-high yield conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(8): 1478-1490.

[16] 郑伟, 何萍, 高强, 等. 施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 301-309.
Zheng W, He P, Gao Q *et al*. Effect of N application on nitrogen absorption and utilization of spring maize under different soil fertilities[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 301-309.

[17] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al*. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 835-839.

[18] 陈新红, 徐国伟, 王志琴, 等. 结实期水分与氮素对水稻氮素利用与养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 35-40.
Chen X H, Xu G W, Wang Z Q *et al*. Effects of water and nitrogen on nitrogen utilization and nutrient uptake of rice at late stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(2): 35-40.

[19] 潘圣刚, 翟晶, 曹凑贵, 等. 氮肥运筹对水稻养分吸收特性及稻米品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 522-527.
Pan S G, Zhai J, Cao C G *et al*. Effects of nitrogen management practices on nutrition uptake and grain qualities of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 522-527.

[20] 赵营, 同延安, 赵护兵. 不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(5): 622-627.
Zhao Y, Tong Y A, Zhao H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2006, 12(5): 622-627.

[21] 李伟波, 吴留松, 廖海秋. 太湖地区高产稻田氮肥施用与作物吸收利用的研究[J]. 土壤学报, 1997, 34(1): 67-73.
Li W B, Wu L S, Liao H Q. Application and crop recovery of N-fertilizer in high-yielding paddy fields of Taihu Region[J]. Acta Pedologica Sinica, 1997, 34(1): 67-73.

[22] 陈星, 李亚娟, 刘丽, 等. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 283-290.
Chen X, Li Y J, Liu L *et al*. Effects of water management patterns and nitrogen fertilizer levels on nitrogen use efficiency of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 283-290.

[23] 郭李萍, 王兴仁, 张福锁, 等. 不同年份施肥对作物增产效应及肥料利用率的影响[J]. 中国农业气象, 1999, 20(4): 20-23.
Guo L P, Wang X R, Zhang F S *et al*. Effect of fertilizer application in different years on crop yields and fertilizer recovery[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 1999, 20(4): 20-23.

[24] 叶东靖, 高强, 何文天, 等. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 552-558.
Ye D J, Gao Q, He W T *et al*. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 552-558.

[25] 蔡红光, 米国华, 张秀芝, 等. 不同施肥方式对东北黑土春玉米连作体系土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1): 89-97.
Cai H G, Mi G H, Zhang X Z *et al*. Effect of different fertilizing methods on nitrogen balance in the black soil for continuous maize production in Northeast China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(1): 89-97.

[26] 周顺利, 张福锁, 王兴仁. 土壤硝态氮时空变异与土壤氮素表观盈亏研究Ⅰ. 冬小麦[J]. 生态学报, 2001, 21(11): 1782-1789.
Zhou S L, Zhang F S, Wang X R *et al*. Studies on the spatio-temporal variations of soil $NO_3^-$-N and apparent budget of soil nitrogen I. Winter wheat[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(11): 1782-1789.

[27] 隽英华, 汪仁, 孙文涛, 等. 春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 544-551.
Juan Y H, Wang R, Sun W T *et al*. Response of spring maize to nitrogen application in grain yield, nitrogen utilization and mineral nitrogen balance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 544-551.