

基肥结合抽穗期追肥稳定稻麦产量并提高氮肥 利用率及经济效益

宁运旺¹, 张辉¹, 王磊¹, 许仙菊¹, 汪吉东¹, 马洪波¹, 朱德进²,
黄卉², 王少华³, 马朝红^{4*}, 张永春^{1*}

(1 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所/农业农村部江苏耕地保育科学观测实验站, 江苏南京 210014;
2 江苏省泰州市姜堰区农委, 江苏泰州, 225500; 3 江苏省苏州市昆山市农委, 江苏苏州, 215300;
4 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北武汉, 430000)

摘要:【目的】普遍认为, 相同施肥量下增加施肥次数有利于提高肥料利用率, 但施肥次数偏多已成为江苏稻麦化肥过量投入的主要因素。一次施肥仍存在争议, 基肥结合分蘖期追肥的两次施肥也会导致水稻生长后期养分供应不足, 明确基肥结合抽穗期追肥的两次施肥效果对稻麦化肥减量具有重要意义。【方法】2016—2019 年开展稻麦轮作田间定位试验, 分析产量和产量组成、氮肥累积效率和氮素累积盈余。定位试验为完全随机区组设计、4 次重复, 设不施氮 (CK)、习惯施肥 (CF)、推荐施肥 (相对于 CF 处理水稻减氮 18.2%、小麦减氮 22.2%, RF) 和推荐施氮量下基施 4 种类型氮肥 (尿素 U、硫包膜尿素 SCU、聚合物包膜尿素 PCU 和尿素添加 5% 双氰胺 NIU) 结合抽穗期追肥 (BH) 两次施肥, 共 7 个处理。2018—2019 年, 使用以普通尿素为氮源的改良配方肥 (IFF) 和含硝化抑制剂的稳定性复合肥 (SCF) 做基肥, 进行稻麦两次施肥 (BH) 田间验证试验, 以农户实际 (FP) 为对照比较施肥成本和种植效益。【结果】定位试验结果表明, 与农户习惯 (CF) 比较, 推荐施肥处理 (RF) 对稻麦产量均无显著影响; 与推荐施肥比较, 相同施氮量下基施不同类型氮肥结合抽穗期追肥的两次施肥处理对稻麦产量也无显著影响。施氮量减少可使稻麦氮肥累积效率显著增加、氮素累积盈余显著减少, 而施肥次数减少对稻麦氮肥累积效率和氮素累积盈余均无显著影响。相同施氮量下基施不同类型氮肥结合抽穗期追肥两次施肥条件下, 稻麦产量和氮肥效率均以含硝化抑制剂的尿素处理 (NIU-BH) 表现较好; 小麦上使用聚合物包膜尿素处理 (PCU-BH) 效果不稳定。验证试验结果表明, 基施改良配方肥两次施肥 (IFF-BH) 和基施稳定性复合肥两次施肥 (SCF-BH) 与农户实际比较, 水稻可在施氮量减少 18.2%~33.8% 条件下使产量分别增加 1.8%~4.5% 和 2.6%~6.1%, 施肥成本分别减少 1069~1538 和 473~1029 元/hm², 净收益分别增加 1950~2270 和 1168~2126 元/hm²; 小麦可在施氮量减少 30.0% 条件下使产量分别增加 0.7% 和 9.7%, 施肥成本分别减少 1132 和 495 元/hm², 净收益分别增加 1387 和 2045 元/hm²。【结论】在本研究条件下, 定位试验和验证试验结果均表明, 采用基肥加抽穗期追肥两次施肥, 配合选择合适类型的肥料做基肥, 可在施氮量减少 18.2%~33.8% 前提下稳定稻麦产量、提高氮肥效率和种植效益。

关键词: 水稻; 小麦; 化肥减量; 两次施肥

Maintaining yields and improving nitrogen use efficiencies and economic benefits of rice and wheat by double fertilization of combining basal dressing with top dressing at heading stage

NING Yun-wang¹, ZHANG Hui¹, WANG Lei¹, XU Xian-ju¹, WANG Ji-dong¹, MA Hong-bo¹, ZHU De-jin²,
HUANG Hui², WANG Shao-hua³, MA Chao-hong^{4*}, ZHANG Yong-chun^{1*}

[1 Institute of Agricultural Resources and Environmental, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Jiangsu), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing, Jiangsu 210014,

收稿日期: 2019-11-06 接受日期: 2020-02-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0201306, 2016YFD0200800, 2018YFD0200500)。

联系方式: 宁运旺 Tel: 025-84391523, E-mail: ningyunwang460@sina.com

* 通信作者 马朝红 E-mail: 857492370@qq.com; 张永春 E-mail: yczhang66@sina.com

China; 2 Agricultural and Rural Bureau of Jiangyan, Taizhou, Jiangsu 225500, China; 3 Agricultural and Rural Bureau of Kunshan, Suzhou, Jiangsu 215300, China; 4 Institute of Plant Protection and Soil Sciences, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan, Hubei 430000, China]

Abstract: 【 Objectives 】 It is generally believed that increasing fertilization times under the same dosage of fertilizer is conducive to improve fertilizer efficiencies, however, too frequent fertilization often leads to excessive fertilizer input in actual production of rice and wheat in Jiangsu. Single fertilization is still controversial, double fertilization pattern of basal dressing with top dressing at tillering stage has been found insufficient N supply during the late growth of rice. It is important to study the effects of fertilization pattern of basal dressing with top dressing at heading stage of rice and wheat, and the availability of reducing chemical fertilizer. **【 Methods 】** From 2016 to 2019, a positioning field experiment in rice-wheat rotation was conducted to investigate yield and yield components, cumulative nitrogen (N) efficiencies and surplus. The positioning experiment had seven treatments, including no N control (CK), conventional fertilization (CF), recommended fertilization (compare with CF, nitrogen application rate was reduced by 18.2% in rice and by 22.2% in wheat, RF), and treatments using four types of nitrogen fertilizer as basal combined with topdressing at heading stage (BH) under the recommended N rate, including urea (U), sulfur-coated urea (SCU), polyolefin-coated urea (PCU) and urea + 5% dicyandiamide (NIU). During 2018 to 2019, the BH fertilization pattern were applied in demonstration field experiment, in which, the basal applied N were from two compound fertilizers, improved formula fertilizer (IFF) using U as N source and stable compound fertilizer (SCF) containing nitrification inhibitor. The fertilization costs and planting benefits were compared to that of farmer's practice (FP). **【 Results 】** According to the results of the positioning experiment, the RF had no significant effect on rice and wheat grain yields compared with CF, and the BH treatments of different N sources also had no effects on rice and wheat grain yields compared with RF. As the reduction of N amount, cumulative N efficiencies were significantly increased and the cumulative N surplus was significantly decreased. However, cumulative N efficiencies and N surplus were not affected by the reduction of fertilization times. Under the same N application rate of double fertilization of BH, NIU-BH had a better performance in rice and wheat, PCU-BH had a unstable performance in wheat. According to the results of the demonstration experiment, under the condition of 18.2%–33.8% N reduction in rice, the rice yields in IFF-BH and SCF-BH treatments were respectively increased by 1.8%–4.5% and 2.6%–6.1%, fertilization costs were respectively decreased by 1069–1538 yuan/hm² and 473–1029 yuan/hm², and the net incomes were respectively increased by 1950–2270 yuan/hm² and 1168–2126 yuan/hm². Under the condition of 30.0% N reduction in wheat, the wheat yield were respectively increased by 0.7% and 9.7%, fertilization costs were respectively decreased by 1132 yuan/hm² and 495 yuan/hm², and net incomes were respectively increased by 1387 yuan/hm² and 2045 yuan/hm². **【 Conclusions 】** Under the condition of this study, both positioning and demonstration experiments had proved that, the double fertilization method was available in keeping rice and wheat yields, improving N efficiencies and planting benefits under the premise of 18.2%–33.8% current N input through basal application with topdressing at heading stage and combining the selection of a suitable type of fertilizer as base fertilizer.

Key words: rice; wheat; chemical fertilizer reduction; double fertilization

江苏是我国粮食大省, 2016年水稻、小麦播种面积分别达到229.48和218.99万hm², 平均施氮量分别为N 325.4和268.8 kg/hm², 总播种面积位居全国前列, 单位产量化肥氮投入也远超其他省份。化肥过量投入引起肥料利用率下降、耕地质量变差以

及一系列环境问题, 科学家们对此提出了实地养分管理^[1]、实时定时调控氮素管理^[2]、精确施肥^[3]、测土配方施肥^[4]等技术措施, 其中测土配方施肥2005年以来已得到普遍推广。江苏稻麦种植以单季粳稻和冬小麦为主, 生育期均较长, 农户习惯于“看苗施

肥”, 常以追施氮肥来保证叶色浓绿, 导致生产实际中施肥行为频繁, 水稻和小麦平均施肥次数多达 4 次和 3 次^[5-6]。普遍认为, 相同施肥量条件下增加施肥次数, 即“少量多次”施肥有利于提高肥料利用率和减少化肥用量^[7], 配方施肥在施肥次数上亦未有改变^[4]。但据调查, 施肥次数偏多已成为江苏稻麦化肥过量投入的主要因素, 减少施肥次数是当前稻麦化肥减量增效的主要着力点^[5-6]。

近年来尝试的一次性施肥, 省工省力, 虽然一些研究表明其能增加稻麦产量、减少氮肥损失、提高氮肥利用率^[8-11], 但一次性施肥所依赖的缓控释肥料养分释放受到土壤水分、温度等因素的影响, 不同区域气候和土壤条件下的效果不稳定^[12-14], 加之价格成本等原因, 一次性施肥仍存在一定争议, 在稻麦生产实际中应用很少^[5-6, 15]。最近, 有研究者对基肥缓控释肥结合分蘖期追施尿素 (BT) 的两次施肥技术做了尝试, 但其应用于大穗型品种甬优 2640 时, 也难以满足生长后期对氮的需求, 导致减产^[16]。为此, 笔者根据稻麦养分吸收主要集中在分蘖期和抽穗期^[17]、水稻分蘖期氮肥利用率较低^[18-19]以及分蘖期时间较短等特点, 提出基肥结合抽穗期追施尿素 (BH) 的两次施肥方法, 并通过 2016—2019 年开展的稻麦轮作定位试验和验证试验, 试图明确基肥结合抽穗期追施尿素两次施肥法对稻麦产量、产量组成、氮肥效率、氮素盈余和经济效益的影响, 以期为江苏稻麦化肥减量提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域

稻、麦田间定位试验于 2016—2019 年在江苏省泰州市姜堰区张甸镇进行, 水稻验证试验于 2018 年

分别在江苏省泰州市姜堰区张甸镇、常州市溧阳市南渡镇和苏州市昆山市淀山湖镇进行, 小麦验证试验于 2018—2019 年在江苏省泰州市姜堰区张甸镇进行。研究地点均处于长江三角洲平原, 具亚热带季风气候, 日平均温度 14.5℃~17.6℃, 年降雨量 992~1200 mm。试验土壤均属于水稻土, 0—20 cm 土壤理化性质见表 1。

1.2 试验设计

稻麦定位试验小区面积 30 m² (5.0 m × 6.0 m), 完全随机设计, 4 次重复。稻麦验证试验在种植大户的连片田块进行, 田块面积不低于 0.2 hm², 不设重复。定位试验设 7 个处理, 包括不施氮 (CK)、习惯施肥 (CF)、推荐施肥 (RF, 相对 CF 处理水稻减氮 18.2%、小麦减氮 22.2%) 和 4 种类型氮肥的两次施肥处理, 分别为 100% 普通尿素 (U-BH)、100% 硫包衣尿素 (SCU-BH)、100% 聚合物包膜尿素 (PCU-BH) 和 100% 普通尿素添加 5% 双氰胺 (NIU-BH)。验证试验包括 3 个处理, 通用配方肥 (FP, 15-15-15, 施可丰化工股份有限公司)、改良配方肥 (IFF-BH, 26-10-12, 新洋丰肥业股份有限公司) 和稳定性复合肥 (SCF-BH, 26-10-12, 施可丰化工股份有限公司)。习惯施肥和农户实际施氮量根据事先调查得出, 推荐施肥施氮量根据当地测土配方施肥数据推荐。定位和验证试验追肥均为含 N 46.2% 的普通尿素。定位试验所有处理磷钾肥用量一致, 稻季分别为 P₂O₅ 60 kg/hm² 和 K₂O 90 kg/hm², 麦季分别为 P₂O₅ 75 kg/hm² 和 K₂O 90 kg/hm², 磷、钾肥分别为过磷酸钙、氯化钾, 全部用于基肥。具体试验处理代码、氮素来源和施用方法见表 2。

1.3 试验管理

定位试验小区之间筑埂并包膜覆盖隔离, 验证

表 1 试验地点和试验土壤基本性状

Table 1 Experimental location and the basic properties of the tested soil

试验 Experiment	试验地点 Experiment location	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	碱解氮 (mg/kg) Alkali-hydrolyzale N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
稻麦定位试验 Positioning experiment	张甸 Zhangdian	6.77	18.6	102.8	13.6	60.9
水稻验证试验 Rice demonstration experiment	张甸 Zhangdian	7.07	17.6	109.8	15.8	90.0
	南渡 Nandu	6.35	23.3	129.8	13.6	126.0
	淀山湖 Dianshanhu	6.09	32.0	173.0	14.1	165.0
小麦验证试验 Wheat demonstration experiment	张甸 Zhangdian	7.02	19.8	112.3	16.6	96.0

表 2 试验各处理氮素来源、施用量和氮肥运筹

Table 2 Details of N source, application rate and management in each treatment

试验 Experiment	处理代码 Treatment code	氮肥来源 N source	施氮量 N rate (kg/hm ²)		氮肥运筹 N management	
			水稻 Rice	小麦 Wheat	水稻 Rice	小麦 Wheat
定位试验 Positioning experiment	CK		0	0		
	CF	尿素 Urea	330	270	4-2-2-2	4-2-4
	RF	尿素 Urea	270	210	4-2-2-2	4-2-4
	U-BH	尿素 Urea	270	210	6-0-4-0	6-0-4
	SCU-BH	硫包衣尿素 S-coating urea (N 37%)	270	210	6-0-4-0	6-0-4
	PCU-BH	聚合物包膜尿素 (N 44%) Polyolefin-coating urea (N 44%)	270	210	6-0-4-0	6-0-4
	NIU-BH	添加 5% 双氰胺尿素 (N 46.2%) Urea (N 46.2%) + 5% dicyandiamide	270	210	6-0-4-0	6-0-4
大田试验 Field experiment	FP	复合肥 (15-15-15) Compound fertilizer (15-15-15)	300~330	300	4-2-2-2	4-2-4
	IFF-BH	复合肥 (26-10-12) Compound fertilizer (26-10-12)	220.5~270	210	6-0-4-0	6-0-4
	SCF-BH	稳定性复合肥 (26-10-12) Stable compound fertilizer (26-10-12)	220.5~270	210	6-0-4-0	6-0-4

注 (Note): 水稻氮肥运筹为“基肥—分蘖肥—促花肥—保花肥” Nitrogen management in rice was applying nitrogen fertilizer at “basal-tillering stage-panicle initiation stage-spikelet differentiation stage”; 小麦氮肥运筹为“基肥—分蘖肥—拔节肥” Nitrogen management in wheat was applying nitrogen fertilizer at “basal-tillering stage-jointing stage”. CF—习惯施肥 Conventional fertilization; RF—推荐施肥 Recommended fertilization; BH—基肥结合抽穗期追肥 Two times of fertilization including basal application and top dressing at heading stage; NIU—添加硝化抑制剂尿素 Nitrification inhibitor + urea; FP—农户实际 Farmer's practice; IFF—改良配方肥 Improved formula fertilizer; SCF—稳定性复合肥 Stable compound fertilizer.

试验田块之间筑埂隔离, 便于单排单灌。基肥撒施与耕层土壤混合, 不同时期的追肥均为土壤表面撒施。定位实验小区水稻秧苗手栽, 验证试验田块水稻机插秧。张甸、南渡和淀山湖试验点水稻品种均为当地常规品种, 分别为淮稻 5 号、南粳 46 和南粳 46, 移栽日期分别为 6 月 15—20 日、6 月 8 日和 6 月 10 日; 定位试验小区水稻移栽密度为 24 穴/m², 每穴 2~3 苗, 株行距 13.9 cm × 30 cm。验证实验田块水稻机插秧密度均与当地习惯一致, 为 24 穴/m²。定位试验与田间验证试验水分管理一致, 即: 水稻移栽后一周, 田面保持水层 1~2 cm, 分蘖期保持水层 2~3 cm, 分蘖足够多时排水晒田, 此后土壤反复干湿交替直至收获前, 其他管理均与当地常规相同。

定位试验小区小麦定量撒播, 验证试验田块小麦机条播。小麦品种为华麦 5 号, 播种日期在 11 月 5—10 日, 定位实验小区播种量均为 15 g/m², 验证试验田块播种量 150 kg/hm²; 小麦其他管理均与当地常规一致。

1.4 取样、测产和分析

定位和验证试验均全部收割、实打实收, 其中定位试验小区人工收割后脱粒、秸秆不还田, 验证试验机械收割脱粒, 籽粒称重、测水分, 按照水稻籽粒 14.5% 含水量、小麦籽粒 13.5% 含水量折算成标准粮质量。2018 年选择南渡验证试验, 分别在移栽时、分蘖中期、分蘖末期、拔节期和齐穗期调查并计算每穴茎蘖数。取样测产的具体方法为: 定位试验每个小区中间位置设置 1 个取样调查点, 验证试验每个田块按照对角线分布设置 3 个取样调查点。水稻每个取样点调查 50 穴茎蘖数并计算平均茎蘖数, 小麦每个取样点调查 1 m² 茎蘖数。成熟期, 水稻选具有平均茎蘖数的 3 穴植株, 小麦选长势中等的 20 株, 齐地剪断, 测每穗粒数、结实率和千粒重, 植株在 80℃ 烘至恒重, 粉碎过 0.5 mm 筛, 浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮—凯氏定氮法测定全氮量^[20]。

1.5 数据计算和统计

定位试验中, 氮肥效率和氮素盈余均为累积

值, 其中氮素累积利用效率和氮素累积盈余根据文献[21]计算:

氮素累积利用效率 (%) = 氮素累积输出量/氮素累积输入量 × 100

氮素累积盈余 (kg/hm²) = 氮素累积输入量 - 氮素累积输出量

氮肥累积回收率 (%) = (施氮区作物氮素累积摄取量 - 不施氮区作物氮素累积摄取量)/累积施氮量 × 100

氮肥累积农学效率 (kg/kg) = (施氮区作物累积产量 - 不施氮区作物累积产量)/累积施氮量

氮素累积生理效率 (kg/kg) = (施氮区作物累积产量 - 不施氮区作物累积产量)/(施氮区作物氮素累积摄取量 - 不施氮区作物氮素累积摄取量)

氮素累积偏生产力 (kg/kg) = 施氮区籽粒累积产量/累积施氮量

其中, 氮素输入和输出量分别指施氮量和成熟期作物带走的氮量。用 IBM SPSS Statistics 19 软件

表 3 两次施肥条件下不同处理的水稻产量和产量组成

Table 3 Rice yield and yield components of different treatments under the condition of double fertilization

年份 Year	处理 Treatment	产量 (t/hm ²) Yield	单位面积穗数 Panicles per m ²	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 (%) Grain filling rate	千粒重 (g) 1000-grain weight
2016	CF	10.24 a	401.2 ab	101.6 a	95.2 a	25.9 a
	RF	10.30 a	388.0 b	103.1 a	95.8 a	27.0 a
	U-BH	10.01 a	400.9 ab	99.9 a	94.9 a	26.6 a
	SCU-BH	9.84 a	385.9 b	100.6 a	95.2 a	26.4 a
	PCU-BH	10.31 a	389.9 b	103.3 a	95.8 a	26.8 a
	NIU-BH	10.66 a	433.2 a	96.2 a	96.1 a	26.8 a
2017	CF	9.17 a	355.7 a	112.0 a	90.7 a	26.1 a
	RF	9.20 a	355.8 a	111.4 a	91.3 a	26.3 a
	U-BH	9.15 a	375.9 a	105.7 a	90.4 a	26.3 a
	SCU-BH	9.18 a	371.0 a	111.7 a	90.7 a	26.2 a
	PCU-BH	9.28 a	369.9 a	108.1 a	91.2 a	26.1 a
	NIU-BH	9.41 a	356.7 a	109.3 a	91.5 a	26.3 a
2018	CF	9.37 a	360.4 a	116.3 b	92.8 a	24.8 a
	RF	9.39 a	346.5 ab	117.2 b	92.4 a	25.7 a
	U-BH	9.02 a	342.2 ab	113.1 b	92.8 a	25.9 a
	SCU-BH	9.39 a	309.4 c	134.3 a	92.2 a	25.3 a
	PCU-BH	9.04 a	327.3 bc	120.1 b	93.9 a	25.2 a
	NIU-BH	9.24 a	328.2 bc	116.6 b	94.4 a	26.3 a
平均值 Mean value	CF	9.59 a	372.4 a	110.0 a	92.9 a	25.6 a
	RF	9.63 a	363.4 a	110.6 a	93.2 a	26.3 a
	U-BH	9.39 a	373.0 a	106.2 a	92.7 a	26.3a
	SCU-BH	9.47 a	355.4 a	115.5 a	92.7 a	26.0 a
	PCU-BH	9.54 a	362.4 a	110.5 a	93.6 a	26.0 a
	NIU-BH	9.77 a	372.7 a	107.4 a	94.0 a	26.5 a
处理 Treatment		ns	ns	ns	ns	ns
年份 Year		***	***	***	***	***

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示相同年份各处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column represent significant difference among different treatments within the same year at the 0.05 probability level. ns—不显著 Not significant; ***— $P < 0.001$.

进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 定位试验不同处理的水稻产量和产量组成

表 3 表明, 试验年份对水稻产量和产量组成有显著影响, 各施肥处理之间产量和产量组成的差异均不显著。与习惯施肥 (CF) 比较, 相同施肥次数但施氮量减少 18.2% 的推荐施肥 (RF) 对水稻产量无显著影响。与推荐施肥 (RF) 比较, 相同施氮量下, 基施不同类型氮肥的两次施肥 (BH) 各处理对水稻产量也无显著影响。BH 两次施肥条件下, 不同类型氮肥间水稻产量无显著差异。表明在推荐施氮量下, 采用基肥加抽穗期追肥的两次施肥方法, 无论基施普通尿素、包膜尿素还是添加硝化抑制剂尿素, 在供试水稻品种和土壤条件下均没有显著影响水稻的

产量。

2.2 定位试验不同处理的水稻氮肥利用效率和氮素盈余

与习惯施肥 (CF) 比较, 相同施肥次数下施氮量减少 18.2% 的推荐施肥 (RF) 显著增加了水稻的氮肥累积效率, 降低了氮素盈余 (表 4)。3 季水稻累计, 推荐施肥的氮肥累积回收率、累积农学效率、累积生理效率、累积偏生产力 and 累积利用效率比习惯施肥分别平均增加 12.0%、23.9%、10.2%、22.7% 和 16.7%, 累积氮素盈余平均减少 39.8%。与推荐施肥比较, 相同施氮量下减少施肥次数的两次施肥处理 (U-BH、SCU-BH、PCU-BH 和 NIU-BH) 对氮肥效率和氮素盈余的影响总体不显著, 但不同类型氮肥的表现有所不同, 定位试验第 1 季, 基施硫包衣尿素两次施肥处理 (SCU-BH) 的氮肥累积回收率和累积农

表 4 两次施肥条件下不同处理的水稻累积氮肥利用效率和累积氮素盈余量

Table 4 Cumulative nitrogen efficiencies and cumulative nitrogen surplus of rice in different treatments under the condition of double fertilization

年份 Year	处理 Treatment	累积回收率 Cumulative NRF (%)	累积农学效率 Cumulative NAE (kg/kg)	累积生理效率 Cumulative NPE (kg/kg)	累积偏生产力 Cumulative NFPF (kg/kg)	累积利用效率 Cumulative NUE (%)	累积氮素盈余 Cumulative N surplus (kg/hm ²)
2016	CF	30.2 c	7.7 d	31.0 b	25.4 c	65.2 b	114.9 a
	RF	33.5 ab	9.6 b	38.1 a	28.7 ab	76.3 a	64.0 b
	U-BH	31.4 bc	8.6 c	37.1 a	27.2 abc	74.2 a	69.8 b
	SCU-BH	30.1 c	7.9 c	36.4 a	26.2 bc	72.9 a	73.3 b
	PCU-BH	33.6 ab	9.6 b	38.2 a	28.7 ab	76.3 a	63.9 b
	NIU-BH	36.2 a	10.9 a	39.5 a	30.2 a	78.9 a	56.8 c
2017	CF	30.5 c	8.3 c	27.0 b	29.4 b	61.8 b	252.4 a
	RF	34.0 ab	10.3 ab	30.1 a	36.1 a	72.2 a	150.0 b
	U-BH	32.8 bc	9.6 b	29.4 ab	35.5 a	71.0 a	156.7 b
	SCU-BH	32.2 bc	9.4 b	29.0 ab	35.2 a	70.4 a	159.6 b
	PCU-BH	34.3 ab	10.4 a	30.3 a	36.3 a	72.6 a	148.3 c
	NIU-BH	36.1 a	11.3 a	31.3 a	37.2 a	74.3 a	138.7 c
2018	CF	31.6 c	8.8 c	41.0 c	29.1 b	61.1 b	385.6 a
	RF	35.4 ab	10.9 ab	45.2 ab	35.7 a	71.3 a	232.2 b
	U-BH	33.6 abc	10.1 b	43.4 abc	34.8 a	69.6 a	246.2 b
	SCU-BH	34.2 abc	10.3 b	42.8 bc	35.1 a	70.2 a	241.8 b
	PCU-BH	34.9 abc	10.6 ab	45.1 ab	35.3 a	70.7 a	236.8 b
	NIU-BH	36.3 a	11.4 a	47.0 a	36.2 a	72.4 a	224.5 b

注 (Note): NRF—N recovery fraction; NAE—N agronomic efficiency; NFPF—N partial factor productivity; NPE—N physiological efficiency; NUE—N use efficiency. 同列数据后不同小写字母表示相同年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column represent significant difference among different treatments within the same year at the 0.05 probability level.

学效率显著低于基施聚合物包膜尿素两次施肥处理 (PCU-BH) 和基施添加硝化抑制剂尿素两次施肥处理 (NIU-BH), 2 季之后两次施肥各处理的氮肥效率和氮素盈余与推荐施肥均无显著差异。两次施肥条件下不同类型氮肥之间比较, 定位试验第 1 季以及第 2 季均以基施添加硝化抑制剂尿素和聚合物包膜尿素的氮肥累积回收率、累积农学效率和累积偏生产力高于 SCU-BH 和 U-BH 处理, 累积氮素盈余则反之; 3 季水稻累计, 各类型氮肥的氮肥效率和氮素盈

余差异均不显著, 其中氮肥效率以基施添加硝化抑制剂尿素两次施肥最高、基施聚合物包膜尿素两次施肥次之, 氮素盈余以基施添加硝化抑制剂尿素两次施肥最低、基施聚合物包膜尿素两次施肥次之。表明施氮量减少 18.2% 可使氮肥效率显著增加, 氮素盈余显著减少, 而施肥次数减少 2 次 (即采用两次施肥处理) 对氮肥效率和氮素盈余均无显著影响。在两次施肥下, 基肥选择添加硝化抑制剂尿素或者聚合物包膜尿素, 可进一步提高氮肥效率, 降低氮素

表 5 两次施肥条件下不同处理的小麦产量和产量组成

Table 5 Wheat yield and yield components of different treatments under the condition of double fertilization

年份 Year	处理 Treatment	产量 (t/hm ²) Yield	单位面积穗数 (No./m ²) Panicles number	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 (%) Grain filling rate	千粒重 (g) 1000-grain weight
2016—2017	CF	6.48 a	410.9 a	32.3 a	77.7 a	43.2 a
	RF	6.33 a	382.2 ab	32.7 a	76.9 a	45.2 a
	U-BH	6.20 a	377.5 ab	32.8 a	77.3 a	44.2 a
	SCU-BH	6.31 a	383.9 ab	33.1 a	75.8 a	45.1 a
	PCU-BH	6.31 a	359.9 b	33.0 a	77.9 a	46.2 a
	NIU-BH	6.40 a	388.4 ab	33.0 a	76.6 a	44.8 a
2017—2018	CF	6.89 a	567.9 a	34.5 b	84.7 a	41.7 a
	RF	6.64 a	504.2 b	35.6 ab	85.1 a	44.2 a
	U-BH	6.58 a	492.5 b	37.0 ab	83.4 a	44.2 a
	SCU-BH	6.69 a	500.5 b	36.8 ab	83.6 a	44.6 a
	PCU-BH	6.77 a	508.0 b	37.0 ab	83.5 a	44.2 a
	NIU-BH	6.81 a	507.3 b	38.4 a	81.8 a	43.8 a
2018—2019	CF	7.57 a	551.1 a	39.9 a	79.6 a	44.6 a
	RF	7.63 a	542.8 a	40.0 a	78.1 a	46.4 a
	U-BH	7.56 a	537.8 a	40.1 a	81.0 a	44.7 a
	SCU-BH	7.65 a	555.2 a	39.9 a	77.8 a	45.9 a
	PCU-BH	6.47 b	465.4 b	37.4 a	80.5 a	47.8 a
	NIU-BH	7.56 a	555.9 a	37.7 a	81.0 a	45.9 a
平均值 Mean value	CF	6.98 a	510.0 a	35.6 a	80.7 a	43.2 a
	RF	6.87 a	476.4 ab	36.1 a	80.0 a	45.3 a
	U-BH	6.78 a	469.3 ab	36.6 a	80.6 a	44.4 a
	SCU-BH	6.88 a	479.9 ab	36.6 a	79.1 a	45.2 a
	PCU-BH	6.52 a	444.4 b	35.8 a	80.6 a	46.1 a
	NIU-BH	6.92 a	483.9 a	36.4 a	79.8 a	44.8 a
	处理 Treatment	ns	ns	ns	ns	ns
年份 Year	***	***	***	***	**	

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示相同年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column represent significant differences among different treatments within the same year at the 0.05 probability level. ns—不显著 Not significant; **— $P < 0.01$; ***— $P < 0.001$.

盈余。

2.3 定位试验不同处理的小麦产量和产量组成

由表 5 可见, 年份对小麦产量和产量组成均有显著影响, 而不同施肥处理之间的小麦产量和产量组成差异总体不显著。与习惯施肥 (CF) 比较, 相同施肥次数下减少 22.2% 施氮量的推荐施肥处理 (RF) 对小麦产量的影响不显著。与推荐施肥比较, 相同施氮量下减少 1 次施肥的两次施肥处理 (BH) 对小麦产量的影响总体也不显著。两次施肥条件下, 不同类型氮肥之间比较, 基施聚合物包膜尿素的表现不稳定, 第 3 季产量 (2018—2019 年度) 显著低于其他氮肥处理。表明, 与习惯施肥比较, 推荐施氮量采用两次施肥需注意基施肥料选择, 本试验条件下选择普通尿素、添加硝化抑制剂尿素和硫包膜尿素做基肥较为适宜。

从产量构成看, 与习惯施肥比较, 推荐施肥单位面积穗数平均减少 6.6%, 而每穗粒数平均增加 1.4%; 与等氮量推荐施肥比较, 第 3 季小麦基施聚合物包膜尿素两次施肥处理的单位面积穗数显著减少, 导致当季产量显著降低, 3 季平均基施聚合物包膜尿素两次施肥的单位面积穗数和每穗粒数分别平均减少 6.7% 和 0.8% ($P > 0.05$), 但对 3 季小麦平均产量的影响不显著。

2.4 定位试验不同处理的小麦累积氮肥效率和累积氮素盈余

由表 6 可知, 与习惯施肥 (CF) 处理比较, 不论施肥次数, 施氮量减少 22.2% ($N 60 \text{ kg/hm}^2$) 的推荐施肥 (RF)、基施普通尿素两次施肥 (U-BH)、基施硫包衣尿素两次施肥 (SCU-BH)、基施聚合物包膜尿素两次施肥 (PCU-BH) 和基施添加硝化抑制剂尿素两次

表 6 两次施肥条件下不同处理的小麦累积氮肥效率和累积氮素盈余

Table 6 Cumulative nitrogen efficiencies and cumulative nitrogen surplus of wheat in different treatments under the condition of double fertilization

年份 Year	处理 Treatment	累积回收率 Cumulative NRF (%)	累积农学效率 Cumulative NAE (kg/kg)	累积生理效率 Cumulative NPE (kg/kg)	累积偏生产力 Cumulative NFPF (kg/kg)	累积利用效率 Cumulative NUE (%)	累积氮素盈余 Cumulative N surplus (kg/hm ²)
2016—2017	CF	32.0 b	10.2 b	31.7 a	21.6 b	58.4 b	124.9 a
	RF	43.8 a	13.8 a	31.5 a	30.2 a	81.4 a	39.0 bc
	U-BH	42.0 a	13.1 a	31.3 a	29.5 a	79.7 a	42.7 b
	SCU-BH	43.4 a	13.6 a	31.4 a	30.1 a	81.0 a	39.7 bc
	PCU-BH	43.5 a	13.7 a	31.5 a	30.0 a	81.1 a	39.6 bc
	NIU-BH	44.7 a	14.1 a	31.6 a	30.5 a	82.3 a	37.1 c
2016—2018	CF	30.6 b	10.4 c	34.1 a	22.3 b	57.9 b	252.6 a
	RF	41.3 a	14.0 b	33.8 a	30.9 a	80.2 a	83.0 b
	U-BH	41.4 a	13.5 b	33.8 a	30.9 a	80.3 a	82.5 b
	SCU-BH	40.7 a	14.0 ab	33.8 a	30.7 a	79.7 a	85.4 b
	PCU-BH	41.9 a	14.2 ab	33.9 a	31.1 a	80.8 a	80.4 b
	NIU-BH	42.2 a	14.5 a	33.9 a	31.2 a	81.1 a	79.4 b
2016—2019	CF	34.5 c	12.2 c	35.4 a	23.3 b	59.6 b	363.3 a
	RF	47.8 a	16.9 a	35.3 a	32.7 a	83.8 a	102.2 c
	U-BH	47.5 a	16.8 a	35.3 a	33.0 a	84.5 a	97.7 c
	SCU-BH	47.0 ab	16.6 a	35.2 a	32.4 a	83.0 a	107.0 c
	PCU-BH	43.3 b	15.1 b	34.8 a	30.9 a	79.2 a	130.8 b
	NIU-BH	47.9 a	16.9 a	35.3 a	32.8 a	83.9 a	101.5 c

注 (Note): NRF—N recovery fraction; NAE—N agronomic efficiency; NFPF—N partial factor productivity; NPE—N physiological efficiency; NUE—N use efficiency. 同列数据后不同小写字母表示相同年份不同处理间在 0.05 水平上差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column represent significant difference among treatments within the same year at the 0.05 probability level.

施肥 (NIU-BH) 的氮肥累积回收率、累积农学效率、累积偏生产力和累积利用效率均显著提高, 累积氮素盈余均显著减少, 而累积生理效率差异不显著。与推荐施肥比较, 定位试验第一季 (2016—2017), 相同施氮量下减少 1 次施肥的两次施肥处理的 5 个氮素效率指标均没有显著差异; 两季累积 (2016—2018) 结果, 两次施肥条件下基施硫包衣尿素、聚合物包膜尿素和添加硝化抑制剂尿素的氮肥累积农学效率均比推荐施肥有所增加, 其中基施添加硝化抑制剂尿素两次施肥处理显著高于推荐施肥和基施普通尿素两次施肥; 3 季累积结果 (2016—2019), 两次施肥条件下基施聚合物包膜尿素的氮肥累积回收率和累积农学效率均比推荐施肥显著降低、而氮素累积盈余比推荐施肥显著增加, 基施普通尿素、硫包衣尿素和添加硝化抑制剂尿素的氮肥效率和氮素盈余均与推荐施肥无显著差异。表明, 减少施氮量是增加小麦氮肥效率和减少氮素盈余的主要因素; 相同施氮量下减少施肥次数, 使用聚合物包膜尿素可降低氮肥效率和增加氮素盈余可能。

2.5 验证试验施肥成本和种植效益

2.5.1 水稻 表 7 可见, 施肥次数由 4 次减为 2 次、氮肥投入量减少 18.2%~33.8%, 基肥无论是

使用稳定性复合肥 (SCF) 还是改良配方肥 (IFF), 两次施肥的水稻产量和产值均比农户实际 (FP) 有所增加, 其中使用稳定性复合肥两次施肥处理 (SCF-BH) 的产量增加 2.6%~6.1%, 产值增加 653~1653 元/hm²; 使用改良配方肥两次施肥处理 (IFF-BH) 的产量增加 1.8%~4.5%, 产值增加 412~1174 元/hm²。从施肥成本看, 由于施氮量降低和施肥次数减少, 稳定性肥料两次施肥的施肥成本比农户实际减少 473~1029 元/hm²。改良配方肥因价格低于稳定性肥料, 其两次施肥的施肥成本比农户实际降低 1069~1538 元/hm²。与农户实际综合比较, 稳定性肥料两次施肥净收益增加 1168~2126 元/hm², 改良配方肥两次施肥净收益增加 1950~2270 元/hm²。表明, 基施试验所用的商品复混肥结合抽穗期追施尿素的两次施肥有利于降低水稻施肥成本, 提高产值和净收益。稳定性复合肥由于肥料价格较高其净收益还低于改良配方肥, 提示水稻采用两次施肥应注意选择合适的肥料。

2.5.2 小麦 由表 8 可知, 与农户实际比较, 在施氮量减少 30.0%、采用 BH 两次施肥时, 稳定性复合肥 (SCF-BH) 产量增加 9.7%, 产值增加 1550 元/hm², 施肥成本降低 495 元/hm², 净收益增加 2045 元/hm²;

表 7 验证试验点两次施肥的水稻产量、施肥成本和种植效益

Table 7 Rice yield, fertilization cost, and planting profits under double fertilization in demonstration experiment sites

项目 Item	张甸 Zhangdian			南渡 Nandu			淀山湖 Dianshanhu		
	FP	IFF-BH	SCF-BH	FP	IFF-BH	SCF-BH	FP	IFF-BH	SCF-BH
施氮量 N rate (kg/hm ²)	330	270	270	300	240	240	333	220.5	220.5
施肥次数 Fertilization times	4	2	2	4	2	2	4	2	2
产量 Yield (t/hm ²)	9.32	9.72	9.89	8.70	9.09	8.93	7.90	8.04	8.17
产值 Output (yuan/hm ²)	27014	28188	28667	25230	26361	25883	22896	23308	23694
复混肥用量 (kg/hm ²) Compound fertilizer amount	880	623	623	800	554	554	888	509	509
尿素用量 Urea amount (kg/hm ²)	429	234	234	390	208	208	432	191	191
肥料成本 (yuan/hm ²) Fertilizer costs	3055	2259	2882	2777	2008	2562	3083	1845	2354
施肥成本 (yuan/hm ²) Fertilization costs	3655	2559	3182	3377	2308	2862	3683	2145	2654
其他成本 Other cost (yuan/hm ²)	16200	16200	16200	16200	16200	16200	16200	16200	16200
净收益 Net profit (yuan/hm ²)	7159	9429	9285	5653	7853	6821	3013	4963	4840

注 (Note): FP—通用配方复混肥 General formula fertilizer, 2.4 yuan/kg; IFF—改良配方复混肥 Improved formula fertilizer, 2.8 yuan/kg; SCF—稳定性复合肥 Stable compound fertilizer, 3.8 yuan/kg; 尿素 Urea, 2.2 yuan/kg; 水稻 Rice, 2.9 yuan/kg; 施肥成本包括用工和肥料 Fertilization costs include fertilizer and employment (20 yuan/labor); 其他成本包括机械 3300 元/hm²、植物保护 3300 元/hm²、耕地租金 9000 元/hm² 和种子 600 元/hm², Other costs include 3300 yuan/hm² for machinery, 3300 yuan/hm² for plant protection, 9000 yuan/hm² for land rent and 600 yuan/hm² for seeds.

表 8 两次施肥的小麦产量、施肥成本和种植效益

Table 8 Wheat yield, fertilization cost, and planting profits under double fertilization of BH

项目 Items	FP	IFF-BH	SCF-BH
施氮量 N rate (kg/hm ²)	300	210	210
施肥次数 Fertilization times	3	2	2
产量 Yield (t/hm ²)	7.65	7.77	8.39
产值 Output (yuan/hm ²)	16065	16320	17615
复混肥用量 Compound fertilizer amount (kg/hm ²)	800	485	525
尿素用量 Urea amount (kg/hm ²)	391	183	183
施肥用工 Fertilization employment (h/hm ²)	22.5	15	15
施肥成本合计 Total cost of fertilization (yuan/hm ²)	3118	1986	2623
其他成本 Other cost (yuan/hm ²)	9750	9750	9750
净收益 Net profit (yuan/hm ²)	3197	4584	5242

改良配方肥 (IFF-BH) 产量增加 0.7%，产值增加 255 元/hm²，施肥成本降低 1132 元/hm²，净收益增加 1387 元/hm²。表明基施商品复混肥结合抽穗期追施尿素的两次施肥也有利于降低小麦施肥成本，提高产值和净收益。

3 讨论

一般情况下，土壤供应的氮可占稻麦全生育期吸收量的 2/3 左右^[19, 22]。本研究定位试验中，第 1 季水稻和小麦不施氮产量占所有施氮处理当年平均产量的比例分别达到 75.3% 和 70.8%，显示试验开始时，土壤氮的供应尚可。由于试验地土壤供肥能力较低 (表 1)^[23]，第 1 季土壤氮的供应可以认为是之前长期大量施用氮肥的残效。研究表明，土壤氮的供应在作物生长期比较平稳，作物关键生育期养分需求强度需依靠施肥来满足^[24]，土壤氮持续供应也需依靠施肥来补充^[11, 25]。由于稻麦全生育期只有分蘖期和抽穗期两个养分吸收高峰^[26-27]，基肥结合抽穗期追肥的两次施肥符合其养分吸收和土壤养分供应特性。

水稻分蘖期从大田移栽开始主要包括返青和分蘖，大约经历 4 周左右；小麦营养生长期从播种开始主要包括出苗、三叶、分蘖、越冬和返青，除去三叶期之前的种子营养时期和生长处于停滞的越冬期其持续时间也只有 4 周左右；稻麦抽穗期主要包括拔节孕穗和扬花，持续时间也只有 4 周左右。在水稻分蘖期，农户习惯上会施用基肥、返青肥和分蘖肥，在抽穗期施用保花肥和促花肥^[28]；在小麦的抽

穗期也采用多次施肥^[29]。也就是说，农户习惯上会在稻麦的两个养分吸收高峰期即一个月内分别施肥 2~3 次，由于肥效的滞后作用实际施肥行为一般发生在期间内的前半段，2~3 次的施肥时间跨度实际只有 2~3 周。研究表明，肥料在施入土壤后需经过转化和迁移才能被作物吸收利用，如尿素大约为 1 周左右^[30-31]，复合肥中的氮素养分与磷钾相互包裹，其过程大约持续 10 天以上^[32]。显然，短时间内多次密集施肥容易造成肥料养分损失，从而降低肥料利用率^[18-19]。

营养生长期促进分蘖早发是稻麦形成产量的关键。从 2018 年南渡点水稻验证试验的茎蘖动态调查发现 (图 1 和图 2)，在分蘖中期，即农户实际 (FP) 追施分蘖肥前，基施稳定性复合肥和改良配方肥两次施肥处理 (SCF-BH 和 IFF-BH) 的单株茎蘖数比农户实际高出 3.1~3.5 个 ($P < 0.05$)，分蘖末期农户实际的单株分蘖数与两次施肥无显著差异，在齐穗期还比两次施肥高出 7.8%~9.3% ($P > 0.05$)，但农户实际的成穗率比两次施肥显著减少 8.2%~12.8% ($P < 0.05$)，显然与农户追施分蘖肥导致无效分蘖增加有关。同样两次施肥，基施稳定性复合肥的单株成穗数高于普通改良复合肥，可能与稳定性复合肥含硝化抑制剂能稳定尿素水解后的氮肥形态有关^[33-34]。

值得注意的是，本研究定位试验中采用基肥结合抽穗期追肥两次施肥时，在小麦上出现了聚合物包膜尿素效果不稳定现象，第 3 季小麦单位面积穗数显著减少导致小麦当季产量和氮肥效率均显著降低、氮素盈余显著增加 (表 5 和表 6)，这一现象在水

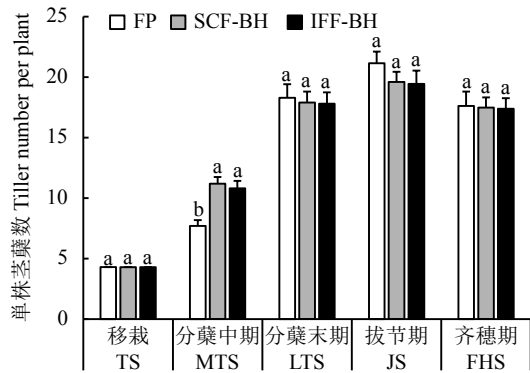


图 1 两次施肥条件下不同肥料处理的水稻茎蘖动态

Fig. 1 Tiller dynamics of different fertilizer treatment under double fertilization in rice

[注 (Note): TS—Transplanting stage; MTS—Middle tillering stage; LTS—Late tillering stage; JS—Jointing stage; FHS—Full heading stage.]

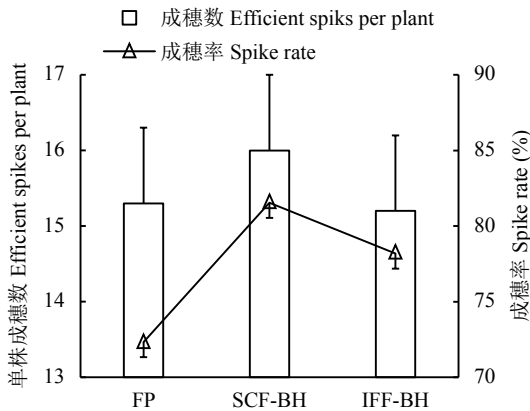


图 2 两次施肥条件下不同肥料处理的水稻成穗数和成穗率

Fig. 2 Efficient spikes and spike rate of different fertilizer treatment under double fertilization in rice

稻定位试验中基施 100% 硫包膜尿素 (SCU) 也有发生, 基施硫包衣尿素两次施肥处理 (SCU-BH) 的单位面积穗数明显低于其他处理 (表 3)。这可能与定位试验中基肥使用的是 100% 包膜尿素 (表 2) 有关, 免追分蘖肥情况下基施 100% 包膜尿素会导致生长前期养分释放不足, 不利于形成水稻^[24]和小麦单位面积穗数^[35]。

4 结论

基肥结合抽穗期追肥两次施肥是根据习惯施肥中施肥次数存在不合理分布而设计, 符合稻麦养分吸收和土壤供肥特性, 在本研究多点多年试验条件下基肥结合抽穗期追肥两次施肥对稻麦产量无不利影响。采用基肥结合抽穗期追肥两次施肥时, 需特

别注意选择合适的基施肥料, 在本研究定位试验条件下基施聚合物包膜尿素对小麦的效果不稳定, 生产条件下稳定性复合肥因价格原因其水稻净收益还低于普通改良配方复合肥。但对于稻麦施肥来说, 基肥结合抽穗期追肥两次施肥是一种值得研究和推广的施肥技术模式, 涉及肥料品种、施肥时间、施肥方式和施肥用量等多方面的变化, 其对不同土壤、不同稻麦品种的生长发育进程、干物质累积和分配、养分吸收利用、养分损失等的影响及机理尚不清楚, 还有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] Dobermann A, Witt C, Dawe D, *et al.* Site-specific nutrient management for intensive rice cropping system in Asia[J]. *Field Crops Research*, 2002, 74: 37-66.
- [2] Peng S B, Roland J B, Huang J L, *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96: 37-47.
- [3] 凌启鸿, 张洪程, 戴其根, 等. 水稻精确定量施氮研究[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(12): 2457-2467.
Ling Q H, Zhang H C, Dai Q G, *et al.* Study on precise and quantitative N application in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(12): 2457-2467.
- [4] 陈新平, 张福锁. 通过“3414”试验建立测土配方施肥技术指标体系[J]. *中国农技推广*, 2006, (4): 36-39.
Chen X P, Zhang F S. Establishment of technical index system of soil testing and formula fertilization through "3414" experiment[J]. *Chinese Promotion of Agricultural Technology*, 2006, (4): 36-39.
- [5] 宁运旺, 张辉, 张永春. 江苏省水稻种植行为的南北差异及其对化肥投入的影响—以苏州、盐城为例[J]. *江苏农业学报*, 2018, 34(3): 533-539.
Ning Y W, Zhang H, Zhang Y C. North and south difference of rice planting behavior in Jiangsu Province and its influences on input of chemical fertilizer: A case study in Suzhou and Yancheng[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2018, 34(3): 533-539.
- [6] 宁运旺, 张辉, 戴娟, 张永春. 江苏省小麦化肥投入现状与影响因素分析—以苏州市和盐城市为例[J]. *江苏农业科学*, 2019, 15: 269-273.
Ning Y W, Zhang H, Dai J, Zhang Y C. Analysis of the present situation and influencing factors of wheat chemical fertilizer input in Jiangsu Province: A case study in Suzhou and Yancheng[J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2019, 15: 269-273.
- [7] Chen Y T, Peng J, Wang J, *et al.* Crop management based on multi-split topdressing enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 50-57.
- [8] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 等. 不同水分条件下缓控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. *作物学报*, 2014, 40(5): 859-870.
Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, *et al.* Effects of water management and slow-controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice[J]. *Acta Agronomic*

- Sinica*, 2014, 40(5): 859–870.
- [9] 王强, 姜丽娜, 潘建清, 等. 缓释氮肥一次性施肥对单季稻氮素吸收和产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3951–3960.
Wang Q, Jiang L N, Pan J Q, *et al.* Yield and nitrogen adsorption of single-cropping rice as influenced by one-off fertilization of slow-released nitrogen fertilizer[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3951–3960.
- [10] Li J L, Li Y E, Wan Y F, *et al.* Combination of modified nitrogen fertilizers and water saving irrigation can reduce greenhouse gas emissions and increase rice yield[J]. *Geoderma*, 2018, 315: 1–10.
- [11] 李鹏飞, 李小坤, 侯文峰, 等. 应用¹⁵N 示踪技术研究控释尿素在稻田中的去向及利用率[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(20): 3961–3971.
Li P F, Li X K, Hou W F, *et al.* Studying the fate and recovery efficiency of controlled release urea in paddy soil using ¹⁵N tracer technique[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(20): 3961–3971.
- [12] Mi W H, Zheng S H, Yang X, *et al.* Comparison of yield and nitrogen use efficiency of different types of nitrogen fertilizers for different rice cropping systems under subtropical monsoon climate in China[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 90: 78–86.
- [13] Terry J R, Peter Q, Stephen G M, *et al.* No evidence for higher agronomic N use efficiency or lower nitrous oxide emissions from enhanced efficiency fertilizers in aerobic subtropical rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 225: 47–54.
- [14] Chen H N, Cao F B, Xiong H R, *et al.* Effects of single basal application of coated compound fertilizer on yield and nitrogen use efficiency in double-cropped rice[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5: 265–270.
- [15] 朱伟锋, 陆若辉, 孔海民, 等. 浙江省 2015 年缓控释肥料使用情况及发展建议[J]. *浙江农业科学*, 2017, 58(11): 1873–1875, 1880.
Zhu W F, Lu R H, Kong H M, *et al.* The application situation and development suggestions of slow-controlled release fertilizer in Zhejiang Province in 2015[J]. *Zhejiang Agricultural Science*, 2017, 58(11): 1873–1875, 1880.
- [16] 魏海燕, 李宏亮, 程金秋, 等. 缓释肥类型与运筹对不同穗型水稻产量的影响[J]. *作物学报*, 2017, 43(5): 730–740.
Wei H Y, Li H L, Cheng J Q, *et al.* Effects of slow/controlled release fertilizer types and their application regime on yield in rice with different types of panicle[J]. *Acta Agronomic Sinica*, 2017, 43(5): 730–740.
- [17] Ke J, Xing X M, Li G H, *et al.* Effects of different controlled-release nitrogen fertilizers on ammonia volatilization, nitrogen use efficiency and yield of blanket-seedling machine-transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2017, 205: 147–156.
- [18] Li G H, Lin J J, Xue L H, *et al.* Fate of basal N under split fertilization in rice with ¹⁵N isotope tracer[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(1): 135–143.
- [19] Wang D Y, Xu C M, Ye C, *et al.* Low recovery efficiency of basal fertilizer-N in plants does not indicate high basal fertilizer-N loss from split-applied N in transplanted rice[J]. *Field Crops Research*, 2018, 229: 8–16.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [21] 欧盟氮素专家组 (白由路译). 氮素利用效率—农业和食物链系统中的氮素利用指标[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.
European Union Nitrogen Expert (Translated by Bai Y L). Nitrogen use efficiency (NUE)—An indicator for the utilization of nitrogen in agriculture and food systems[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2018.
- [22] 李泽丽, 刘之广, 张民, 等. 控释尿素配施黄腐酸对小麦产量及土壤养分供应的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 24(4): 959–968.
Li Z L, Liu Z G, Zhang M, *et al.* Effects of controlled release urea combined with fulvic acid on wheat yield and soil physical and chemical property[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 24(4): 959–968.
- [23] 王华为, 朱金兰. 泰州市主要土壤类型水稻小麦施肥参数及适宜施氮量研究[J]. *中国农业信息*, 2015, (11): 151–154.
Wang H W, Zhu J L. Study on fertilization parameters and suitable nitrogen application amount of rice and wheat in Taizhou[J]. *China Agricultural Information*, 2015, (11): 151–154.
- [24] 张敬昇, 李冰, 王昌全, 等. 控释氮肥与尿素掺混比例对作物中后期土壤供氮能力和稻麦产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 110–118.
Zhang J S, Li B, Wang C Q, *et al.* Effects of the blending ratio of controlled nitrogen fertilizer and urea on soil nitrogen supply in the mid-late growing stage and yield of wheat and rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(1): 110–118.
- [25] 赵伟, 梁斌, 杨学云, 周建斌. 长期不同施肥对小麦-玉米轮作体系土壤残留肥料氮去向的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(8): 1628–1634.
Zhao W, Liang B, Yang X Y, Zhou J B. Effects of long-term different fertilizations on the fate of residual fertilizer N in a wheat-maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(8): 1628–1634.
- [26] 李超, 韦还和, 许俊伟, 等. 甬优系列籼粳杂交稻氮素积累与转运特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(5): 1177–1186.
Li C, Wei H H, Xu J W, *et al.* Characteristics of nitrogen uptake, utilization and translocation in the indica-japonica hybrid rice of Yongyou series[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(5): 1177–1186.
- [27] 代新俊, 杨珍平, 陆梅, 等. 不同形态氮肥及其用量对强筋小麦氮素转运、产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(5): 710–720.
Dai X J, Yang Z P, Lu M, *et al.* Effects of nitrogen forms and amounts on nitrogen translocation, yield and quality of strong-gluten wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(5): 710–720.
- [28] DB32/T3321–2017. 水稻“盐稻 11 号”栽培技术规程[S].
DB32/T3321–2017. Technical regulation of cultivating Yandao11[S].
- [29] DB32/T 2435–2013. 撒播小麦栽培技术规程[S].
DB32/T 2435–2013. The rules for production techniques of broadcast sown in wheat[S].
- [30] 董燕, 王正银. 尿素在土壤中的转化及植物利用效率[J]. *磷肥与复肥*, 2005, 20(2): 76–78.
Dong Y, Wang Z Y. Conversion of urea in soil and its plant use

- efficiency[J]. *Phosphate and Compound Fertilizer*, 2005, 20(2): 76–78.
- [31] 周旋. 生化抑制剂组合对黄泥土土壤氮素转化的影响及其环境生态效应[D]. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2017.
- Zhou X. Influence of biochemical inhibitor combination on nitrogen transformation in yellow clayey soil and its ecological environment effect[D]. Hangzhou: PhD Dissertation of Zhejiang University, 2017.
- [32] 刘玉红. 不同工艺复合(混)肥养分释放及营养效应研究[D]. 重庆: 西南大学博士学位论文, 2012.
- Liu Y H. Study on nutrient release and nutritional effect of compound (mixed) fertilizer made by different process[D]. Chongqing: PhD Dissertation of Southwestern University, 2012.
- [33] 冯来定, 蒋彭炎, 洪晓富, 等. 土壤铵态氮浓度与水稻分蘖发生和终止的关系[J]. *浙江农业学报*, 1993, 5(4): 203–207.
- Feng L D, Jiang P Y, Hong X F, *et al.* Concentration of nitrogen in soil and growth of tillers in rice plants[J]. *Zhejiang Journal of Agricultural Science*, 1993, 5(4): 203–207.
- [34] 周毅, 郭世伟, 宋娜, 等. 供氮形态和水分胁迫对苗期—分蘖期水稻光合与水分利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(3): 334–339.
- Zhou Y, Guo S W, Song N, *et al.* Effects of nitrogen forms and water stress on photosynthesis and water use efficiency of rice at seeding-tillering stage[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(3): 334–339.
- [35] 杨金宇, 李援农, 王凯瑜, 等. 控释氮肥与普通尿素配比比例和方法对冬小麦灌浆特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(3): 442–452.
- Yang J Y, Li Y N, Wang K Y, *et al.* Effects of blending ratio and application method of controlled-release nitrogen fertilizer and common urea on grain-filling properties of winter wheat[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(3): 442–452.