

生化抑制剂组合与施肥模式对黄泥田水稻群体质量的影响

周旋^{1,2,3} 金蓉⁴ 吴良欢^{1,2,*} 戴锋⁵

(¹浙江大学 环境与资源学院/教育部环境修复与生态健康重点实验室, 杭州 310058; ²浙江大学 环境与资源学院/浙江省农业资源与环境重点实验室, 杭州 310058; ³湖南省土壤肥料研究所, 长沙 410125; ⁴浙江大学 农业试验站, 杭州 310058; ⁵浙江奥复托化工有限公司, 浙江 上虞 312300; *通讯联系人, E-mail: finm@zju.edu.cn)

Effects of Combined Biochemical Inhibitors and Fertilization Models on Rice Population Quality in Yellow Clayey Field

ZHOU Xuan^{1,2,3}, JIN Rong⁴, WU Lianghuan^{1,2,*}, DAI Feng⁵

(¹Key Laboratory of Environmental Remediation and Ecosystem Health, Ministry of Education, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ²Zhejiang Provincial Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ³Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; ⁴Agricultural Experiment Station, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; ⁵Zhejiang Aofutuo Chemical Limited Company, Shangyu 312300, China, *Corresponding author, E-mail: finm@zju.edu.cn)

Abstract: **【Objective】** Application of biochemical inhibitors is one of the effective ways to improve fertilizer use efficiency of rice. The objective of this study is to reveal rice population heterosis as affected by combined inhibitors and fertilization models, and find a suitable high-yield and efficient application method for rice growing region in yellow clayey soil. **【Method】** The experiment was conducted to study the interaction effect of biochemical inhibitor combinations and fertilization models (one-off and three-time fertilization) on population quality of rice in yellow clayey field using two factor randomized block design. **【Result】** Three-split urea fertilization significantly increased number of productive tillers, effective leaf area index(LAI), dry matter accumulation from heading to maturity, SPAD value at heading stage and grain yield of rice by 0.8%, 24.0%, 9.3%, 1.5% and 14.2% compared with those of one-off fertilization treatment, respectively. On the other hand, addition of biochemical inhibitor (NBPT/NPPT+CP) significantly increased number of productive tillers, panicle setting rate, dry matter accumulation after heading, efficient LAI, and SPAD value at heading stage of rice, and also improved the grain to leaf ratio, enhanced the source-sink relationship among different fertilization models. Correlation analysis showed that dry matter accumulation from heading to maturity was significantly positively related with rice grain yield. Application of new urease inhibitor NPPT alone or combined with CP had the same effect on population quality in paddy field with NBPT. **【Conclusion】** The integration and optimization of fertilization technique and combined inhibitors application can improve population quality of rice, photosynthetic product transformation and grain yield in yellow clay field.

Key words: urease inhibitor; nitrification inhibitor; *N*-(*n*-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT); *N*-(*n*-propyl) thiophosphoric triamide (NPPT); 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine (CP); yellow clay field; population quality.

摘要: **【目的】** 添加生化抑制剂是提高水稻肥料利用率的有效途径之一。本研究旨在结合不同施肥模式揭示其节肥增效的群体优势, 寻找适合黄泥田地区水稻高产高效的施用方式。 **【方法】** 采用二因素随机区组设计, 研究生化抑制剂组合与施肥模式(一次性和分次施肥)互作对黄泥田水稻群体质量的影响。 **【结果】** 尿素分次施用处理水稻有效茎蘖数、有效叶面积指数(LAI)、抽穗至成熟期干物质积累量、抽穗期 SPAD 值和籽粒产量较一次性施用处理分别显著提高 0.8%、24.0%、9.3%、1.5% 和 14.2%。不同施肥模式下, 配施生化抑制剂组合 *N*-丁基硫代磷酸三胺/*N*-丙基硫代磷酸三胺+2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(NBPT/NPPT+CP)显著提高水稻有效茎蘖数及茎蘖成穗率, 增加抽穗后干物质积累量, 增大有效 LAI, 增加抽穗期 SPAD 值, 提高水稻粒叶比, 改善源库关系。相关性分析表明, 抽穗至成熟期干物质积累与水稻籽粒产量呈显著正相关。新型脲酶抑制剂 *N*-丙基硫代磷酸三胺(NPPT)单独施用及与 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)配施的水稻群体质量与 *N*-丁基硫代磷酸三胺(NBPT)相似。 **【结论】** 通过施肥技

收稿日期: 2017-04-01; 修改稿收到日期: 2017-06-06。

基金项目: 苕溪流域农村污染治理技术集成与规模化工程示范(2014ZX07101-012); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB150502); 浙江省“三农六方”科研协作计划资助项目; 浙江大学—浙江奥复托化工有限公司合作项目。

术和抑制剂配施的集成与优化,可以改善黄泥田水稻群体质量,提高光合产物转化,获得更高产量。

关键词: 脲酶抑制剂; 硝化抑制剂; *N*-丁基硫代磷酰三胺(NBPT); *N*-丙基硫代磷酰三胺(NPPT); 2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP); 黄泥田; 群体质量

中图分类号: S143.1; S511.01

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)02-0169-12

氮(N)素是植物生长所必需的大量营养元素之一。我国是最大的化肥生产国和消费国,约占世界化肥消费总量的34%^[1]。氮肥施用不合理,不仅降低N肥利用效率^[2-4],劣化稻米品质^[5],由此造成的农业面源污染也备受关注^[6,7]。目前,减少化肥氮损失、提高氮素利用率的主要措施包括科学减施氮肥、改进氮肥施用技术、应用长效缓控释肥料、优化水肥管理与添加生化抑制剂等^[8-11]。

脲酶抑制剂通过抑制土壤脲酶活性,延缓尿素水解,但受土壤性质和环境影响较大^[12,13]。徐星凯等^[14]研究发现,尿素配施适量氢醌(HQ),能促进水稻(*Oryza sativa* L.)生长发育、干物质积累,并提高稻谷产量,还能提高稻田土壤供氮能力和植株含氮量。*N*-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)可以延长施肥点的尿素扩散,降低土壤溶液中 NH_4^+ 和 NH_3 的浓度,抑制 NH_3 的挥发损失,从而使释放出来的营养成分被作物吸收^[15]。硝化抑制剂双氰胺(DCD)对减少稻田土壤温室气体(CH_4 和 N_2O)的排放效果显著^[16,17],且低剂量DCD能增加根系体积,改善根系吸收能力,增强根系活力,并提高水稻植株下部叶片的光合性能,增加产量^[18]。

我国水稻种植面积与产量分别约占粮食作物总量的27%和38%^[19],主要分布在我国华南与长江中下游稻区。黄泥田是广泛分布于南方省份的一种典型渗育型水稻土^[20],通常水分供应不足,磷、钾养分缺乏,属于中低产水稻田^[21]。张宣等^[22]研究认为,黄泥田地区漏肥现象较为严重,需实行分期施肥。传统施肥方式采用“重施基肥、早施攻蘖肥”,依靠增加穗数来提高产量,有悖于以大穗形成较多颖花量来实现高产的栽培发展趋势,不利于高产优质的形成^[23,24]。同时,适当的基、蘖氮肥是构建超级稻最大库容量的基础,通过合理调控植株体内的氮使其维持营养生长阶段达到群体的最大光合水平,逐渐将光合产物转变为最大籽粒产量^[25]。

目前,在黄泥田上关于生化抑制剂组合配施的应用较少^[26],而结合施肥模式的研究更是鲜有报道。浙江奥复托化工公司经多次筛选发现一款有良好应用前景的脲酶抑制剂——*N*-丙基硫代磷酰三胺(NPPT),具有一定的抑制作用^[27]。因此,我们开展脲酶抑制剂(NBPT/NPPT)和硝化抑制剂(CP)配施结合不同施肥模式对黄泥田单季稻群体质量影响的

研究,旨在揭示黄泥田中合理的尿素与抑制剂配施的组合,寻找适合该地区水稻高产高效施用方式,为黄泥田生化抑制剂直接配施农用提供理论依据和技术途径。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2015年5—10月在浙江省金华市婺城区琅琊镇金朱村(29°01'19"N, 119°27'96"E)进行。该区地处金衢盆地东缘,属于中亚热带季风气候,海拔86 m,年均降雨量1424 mm,年均气温17.5℃。供试土壤为黄泥田水稻土,前茬为冬闲田。耕层土壤基本理化性质为pH(H_2O)值5.31($m \pm m_{\text{水}}=1:1$),有机质25.60 g/kg,全氮1.87 g/kg,碱解氮118.40 mg/kg,有效磷7.21 mg/kg,速效钾93.00 mg/kg。

1.2 供试材料

供试水稻品种为杂交籼稻两优培九。氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 12%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%),由金华市婺城区琅新粮食专业合作社提供。脲酶抑制剂*N*-丁基硫代磷酰三胺(NBPT)、*N*-丙基硫代磷酰三胺(NPPT)和硝化抑制剂2-氯-6-(三氯甲基)吡啶(CP)24%乳油剂型为分析纯,由浙江奥复托化工有限公司生产。

1.3 试验设计

试验采用生化抑制剂组合×施氮模式两因素随机区组设计,设置2种施氮模式(一次性和分次施肥)和6种生化抑制剂组合及不施氮处理(CK),共13个处理(表1)。氮肥与抑制剂配施前将二者混合均匀。磷(P_2O_5)、钾(K_2O)用量分别为90 kg/hm²和120 kg/hm²。磷肥和钾肥全部用作基肥于移栽前一次性施入。栽插密度为19.8 cm×19.8 cm,25万穴/hm²,每穴2苗。单季稻于2015年5月28日播种,6月21日移栽,10月14日收获。小区面积30 m²(5 m×6 m),重复3次。每小区之间筑埂并用塑料薄膜包裹,区组间设排灌沟,单灌单排。田间其他管理按常规进行。

水稻生长期(6—10月)气象温度数据由浙江省金华市气象站提供(图1),最高气温、最低气温及平均气温分别为29.9℃、22.6℃、26.2℃。

表 1 氮肥施用方式

Table 1. N application methods.

处理 Treatment	施 N 量 N rate/(kg hm ⁻²)	抑制剂 Type	抑制剂添加量(以 N 为基础) Rate/%	施肥方式 Application method
CK	0	无 NO	0	不施氮肥 Zero nitrogen fertilizer application
U	180	无 NO	0	一次性基施 One-off basal application
U+NBPT	180	NBPT	0.5	一次性基施 One-off basal application
U+NPPT	180	NPPT	0.5	一次性基施 One-off basal application
U+CP	180	CP	0.3	一次性基施 One-off basal application
U+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.5+0.3	一次性基施 One-off basal application
U+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.5+0.3	一次性基施 One-off basal application
U3	180	无 NO	0	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2
U3+NBPT	180	NBPT	0.5	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2
U3+NPPT	180	NPPT	0.5	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2
U3+CP	180	CP	0.3	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2
U3+NBPT+CP	180	NBPT+CP	0.5+0.3	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2
U3+NPPT+CP	180	NPPT+CP	0.5+0.3	m 基肥 : m 分蘖肥 : m 穗肥=5 : 3 : 2

分次施肥(基肥、分蘖肥、穗肥)时间分别为 6 月 21 日、7 月 8 日、8 月 10 日。U—尿素; NBPT—*N*-丁基硫代磷酰三胺; NPPT—*N*-丙基硫代磷酰三胺; CP—2-氯-6-(三氯甲基)吡啶。下同。

The time of split fertilization (basal, for tillering and topdressing for panicle initiation) are 21 June, 8 July, and 10 August, respectively. U, Urea; NBPT, *N*-(*n*-butyl) thiophosphoric triamide; NPPT, *N*-(*n*-propyl) thiophosphoric triamide; CP, 2-chloro-6-(trichloromethyl)pyridine. The same as below.

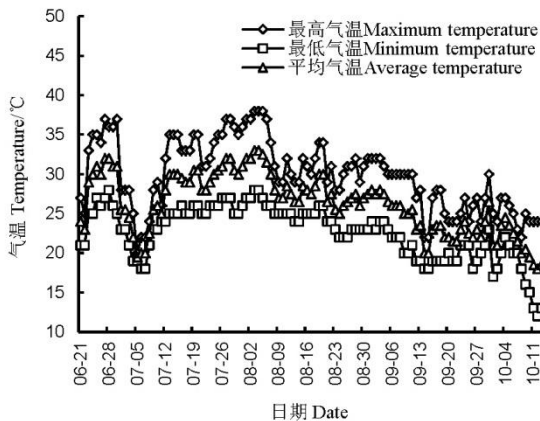


图 1 水稻生育期间气温

Fig. 1. Temperature during rice growth stage.

1.4 测定项目及方法

水稻成熟后,按小区收获脱粒风干后测实产。

干物质量和叶面积指数(LAI)分别于各主要生育期每小区取 5 穴,采用长宽系数法测定剑叶、倒 2、倒 3 叶和下部叶片绿叶面积,之后分植株部位烘干称量。

抽穗期有效叶面积指数、高效叶面积指数分别为有效分蘖的叶面积指数、上 3 叶的叶面积指数。有效叶面积率和高效叶面积率分别为有效叶面积和高效叶面积占总叶面积的比例。

颖花数/叶面积(cm²)、实粒数/叶面积(cm²)、粒重(mg)/叶面积(cm²):各指标中颖花数、实粒数、

粒重分别指总颖花数、总实粒数、总粒重,叶面积指最大叶面积期的叶面积^[28]。

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 数据分析软件进行统计分析。

2 结果与分析

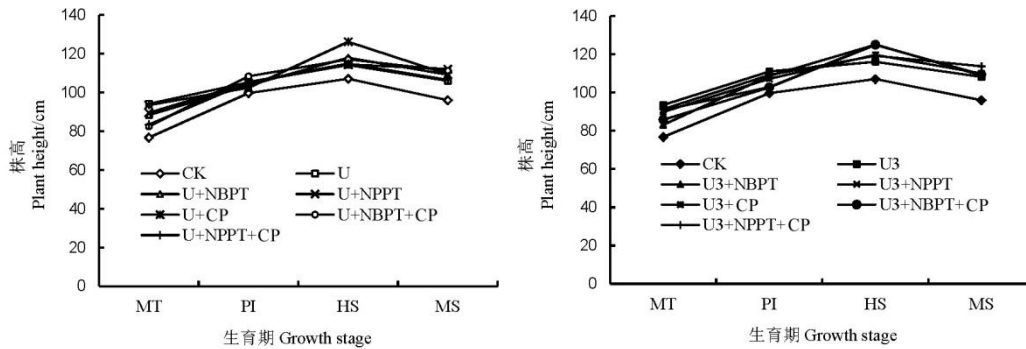
2.1 水稻株高

由图 2 可知,不同施肥模式下,各主要生育期施氮处理水稻株高均显著高于对照处理。生化抑制剂组合和施肥模式对水稻株高的交互效应不显著($P>0.05$)。抽穗期 U3 处理水稻株高较 U 处理提高 1.7%。尿素一次性施用中,各抑制剂处理较 U 处理增加 0.2%~10.5%。尿素分次施用中,各抑制剂处理较 U3 处理增加 2.7%~7.8%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供氮能力持续时间长,能提高水稻株高。

2.2 水稻茎蘖成穗率

由表 2 可知,施肥模式对水稻有效茎蘖数效应显著($P<0.05$),生化抑制剂组合对水稻最高茎蘖数和成穗率效应极显著($P<0.001$),两者交互效应不显著($P>0.05$)。

不同施肥模式下,施氮处理有效茎蘖数均显著高于对照处理。U3 处理水稻有效茎蘖数较 U 处理提高 0.8%。表明分次施肥有利于满足水稻的养分需求,可以增加有效茎蘖数。尿素一次性施用中,



MT—分蘖盛期; PI—孕穗期; HS—抽穗期; MS—成熟期。下同。
 MT, Mid-tillering stage; PI, Panicle initiation stage; HS, Heading stage; MS, Maturity stage. The same as below.

图2 不同处理下水稻的株高

Fig. 2. Plant height of rice under different treatments.

表2 不同处理下水稻的茎蘖成穗率

Table 2. Productive tiller rate of rice under different treatments

处理 Treatment	最高茎蘖数 Maximum tiller number/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	有效茎蘖数 Productive tiller number/($\times 10^4 \text{ hm}^{-2}$)	成穗率 Productive tiller rate/%
CK	250.0 \pm 7.2 d	216.7 \pm 6.3 d	86.7 \pm 2.5 ab
U	416.7 \pm 12.0 a	272.9 \pm 7.9 c	65.5 \pm 1.9 c
U+NBPT	354.2 \pm 10.2 bc	291.7 \pm 8.4 abc	82.4 \pm 2.4 ab
U+NPPT	343.8 \pm 9.9 bc	280.2 \pm 8.1 bc	81.5 \pm 2.4 ab
U+CP	350.0 \pm 10.1 bc	283.3 \pm 8.2 bc	81.0 \pm 2.3 ab
U+NBPT+CP	353.3 \pm 10.2 bc	284.6 \pm 8.2 abc	80.5 \pm 2.3 b
U+NPPT+CP	341.7 \pm 9.9 bc	285.5 \pm 8.2 abc	83.5 \pm 2.4 ab
U3	415.8 \pm 12.0 a	275.0 \pm 7.9 c	66.1 \pm 1.9 c
U3+NBPT	353.3 \pm 10.2 bc	291.7 \pm 8.4 abc	82.5 \pm 2.4 ab
U3+NPPT	370.8 \pm 10.7 b	300.0 \pm 8.7 ab	80.9 \pm 2.3 ab
U3+CP	366.7 \pm 10.6 bc	300.0 \pm 8.7 ab	81.8 \pm 2.4 ab
U3+NBPT+CP	358.3 \pm 10.4 bc	308.3 \pm 8.9 a	86.0 \pm 2.5 ab
U3+NPPT+CP	337.1 \pm 9.7 c	299.0 \pm 8.6 ab	88.7 \pm 2.6 a
ANOVA			
F	ns	*	ns
I	***	ns	***
F \times I	ns	ns	ns

F—施肥模式; I—抑制剂组合; F \times I—施肥模式 \times 抑制剂组合。表中数值为平均值 \pm 标准误 ($n=3$)。同列中标以不同字母的值在 0.05 水平上差异显著 (LSD 检验); *, **和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上差异显著。下同。

F, Fertilization model; I, Inhibitor combination; F \times I, Fertilization model \times Inhibitor combination. Data in the table are Mean \pm SE ($n=3$). Values followed by a different letter are significantly different at $P < 0.05$ (LSD). ns denotes insignificant difference; *, ** and *** are significantly different at the 0.05, 0.01 and 0.001 probability levels, respectively. The same as below.

U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理与 U 处理相比,有效茎蘖数分别提高 6.9%、2.7%、3.8%、4.3%和 4.6%。尿素分次施用中, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理与 U3 处理相比,有效茎蘖数分别提高 6.1%、9.1%、9.1%、12.1%和 8.7%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供氮能力持续时间长,能提高水稻有效茎蘖数。

U3 处理水稻成穗率较 U 处理提高 1.0%。尿素

一次性施用中,各抑制剂处理较 U 处理增加 23.0%~27.6%。尿素分次施用中,各抑制剂处理较 U3 处理增幅为 22.3%~34.1%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长,能提高水稻成穗率;未添加抑制剂处理无效分蘖较多,养分消耗过大。

2.3 水稻抽穗期和成熟期干物质积累及其与籽粒产量的关系

由表 3 可知,施肥模式对水稻抽穗至成熟期干物质积累量、成熟期干质量和收获指数效应显著或

表 3 不同处理下水稻的干物质生产特性

Table 3. Properties of dry matter production of rice under different treatments.

处理 Treatment	抽穗期干质量 Biomass at heading (t hm ⁻²)	抽穗期干质量占总干质量比例 Biomass at heading to total biomass/%	抽穗至成熟期干物质积累 Biomass from heading to maturity/(t hm ⁻²)	花后干质量占总干质量比例 Post-anthesis biomass to total biomass/%	成熟期干质量 Total biomass at maturity/(t hm ⁻²)	收获指数 Harvest index/%
CK	9.8±0.3 b	12.4±0.4 e	1.4±0.1 f	87.6±2.5 a	11.2±0.3 g	57.5±1.7 a
U	10.8±0.3 a	28.0±0.8 d	4.2±0.1 e	72.0±2.1 b	15.0±0.4 f	47.7±1.4 d
U+NBPT	10.3±0.3 ab	32.0±0.9 c	4.9±0.1 d	68.0±2.0 bcd	15.2±0.4 ef	50.1±1.4 cd
U+NPPT	10.1±0.3 ab	36.3±1.0 ab	5.7±0.1 c	63.7±1.8 de	15.8±0.5 cdef	52.5±1.5 bc
U+CP	10.4±0.3 ab	37.5±1.1 ab	6.3±0.2 b	62.5±1.8 de	16.7±0.5 abcd	51.5±1.5 bcd
U+NBPT+CP	10.2±0.3 ab	36.8±1.1 ab	5.9±0.1 bc	63.2±1.8 de	16.2±0.5 abcdef	52.6±1.5 bc
U+NPPT+CP	10.6±0.3 ab	35.4±1.0 b	5.8±0.2 c	64.6±1.9 de	16.4±0.5 abcde	51.1±1.5 bcd
U3	10.9±0.3 a	29.7±0.9 cd	4.6±0.1 de	70.3±2.0 bc	15.5±0.4 def	52.1±1.5 bcd
U3+NBPT	10.5±0.3 ab	35.3±1.0 b	5.7±0.2 c	64.7±1.9 de	16.2±0.5 abcdef	52.6±1.5 bc
U3+NPPT	10.4±0.3 ab	35.3±1.0 b	5.6±0.1 c	64.7±1.9 cde	16.0±0.5 bcdef	52.7±1.5 bc
U3+CP	10.9±0.3 a	36.6±1.1 ab	6.3±0.2 b	63.4±1.8 de	17.2±0.5 ab	53.3±1.5 abc
U3+NBPT+CP	10.8±0.3 a	36.8±1.1 ab	6.3±0.2 b	63.2±1.8 de	17.0±0.5 abc	55.3±1.6 ab
U3+NPPT+CP	10.7±0.3 ab	38.8±1.1 a	6.8±0.2 a	61.2±1.8 e	17.4±0.5 a	54.2±1.6 abc
ANOVA						
F	ns	ns	***	ns	*	***
I	ns	***	***	**	**	ns
F×I	ns	ns	*	ns	ns	ns

极显著($P<0.05$ 或 0.001), 生化抑制剂组合对水稻抽穗期干质量和收获指数效应不显著($P>0.05$), 两者交互效应对水稻抽穗至成熟期干物质积累影响显著($P<0.05$)。

U3 处理水稻抽穗至成熟期干物质累积较 U 处理提高 9.3%。说明分次施肥有利于满足水稻的养分需求, 可以增加水稻抽穗至成熟期干物质积累量。尿素一次性施用中, 各抑制剂处理抽穗至成熟期干物质累积较 CK 处理增加 202.5%~350.4%。与 U 处理相比, U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理分别显著提高 16.3%、36.7%、48.9%、41.5%和 38.2%; 与 U3 处理相比, 分别提高 6.4%、25.0%、36.2%、29.4%和 26.4%。说明尿素添加抑制剂一次性施用可以持续供给水稻养分, 较尿素分次施用增加生育后期干物质积累。尿素分次施用中, 各抑制剂处理抽穗至成熟期干物质累积较 CK 处理增加 230.7%~386.5%。与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理分别显著提高 24.5%、22.7%、36.7%、36.5%和 47.1%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供氮能力持续时间长, 能显著提高水稻抽穗后干物质积累量, 为高产奠定基础。

水稻产量除取决于抽穗至成熟的光合生产能力, 也取决于前期营养器官的贮藏物质和花后向籽粒的高效运转^[29]。相关性分析表明, 不同施肥模式

下水稻抽穗期干物质质量($r=0.380$)、成熟期干物质质量($r=0.917^{**}$)及抽穗至成熟期干物质积累($r=0.941^{**}$)均与产量呈显著正相关(图 3)。

2.4 水稻叶面积指数

由图 4 可知, 不同施肥模式下, 各主要生育期施氮处理水稻叶面积指数(LAI)均显著高于 CK 处理。U 和 U3 处理生育前期 LAI 均显著高于抑制剂处理, 并分别于抽穗前期和后期开始下降, 逐渐开始低于抑制剂处理。

由表 4 可知, 施肥模式对水稻抽穗期总 LAI、有效 LAI 和高效 LAI 效应极显著($P<0.001$), 生化抑制剂组合及两者交互效应对水稻总 LAI 和高效 LAI 效应显著或极显著($P<0.01\sim 0.001$)。

不同施肥模式下, 施氮处理有效 LAI 均显著高于 CK 处理。U3 处理水稻有效 LAI 较 U 处理显著提高 24.0%。说明分次施肥有利于满足水稻的养分需求, 可以显著增加水稻有效 LAI。尿素一次性施用中, 各抑制剂处理抽穗期有效 LAI 较 CK 处理增加 72.1%~96.3%; 与 U 处理相比, U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP 和 U+NPPT+CP 处理抽穗期有效 LAI 分别提高 9.5%、14.1%、7.2%、5.3%和 4.5%。尿素分次施用中, 各抑制剂处理抽穗期有效 LAI 较 CK 处理增加 113.5%~125.8%; 与 U3 处理相比, U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理抽穗期有效 LAI 分别提高 4.7%、

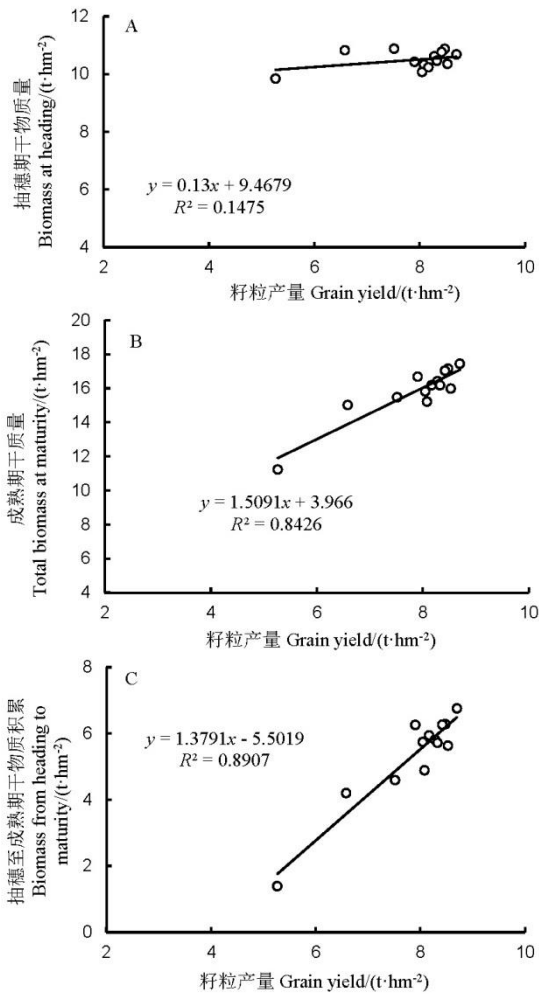
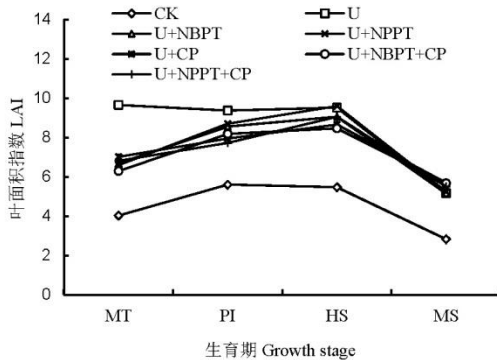


图3 不同处理下水稻籽粒产量与抽穗期干质量(A)、成熟期干质量(B)和抽穗至成熟期干物质积累(C)的相关性分析

Fig. 3. Correlation between grain yield and biomass at heading (A), at maturity (B), and from heading to maturity (C).

2.0%、3.4%、5.7%和5.8%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供氮能力持续时间长,能提高水稻抽穗后



有效 LAI, 为增加生育后期光合产物的积累打下基础。

2.5 水稻粒叶比

由表5可知,施肥模式对水稻颖花数/叶、实粒数/叶和粒重/叶效应极显著(P<0.001),生化抑制剂组合对水稻实粒数/叶和粒重/叶效应显著或极显著(P<0.05~0.01),两者交互效应不显著(P>0.05)。

不同施肥模式下,施N处理水稻粒重/叶均显著低于CK处理。U3处理水稻粒重/叶较U处理降低8.0%。说明一次性施肥会提高叶源数量,同时施肥量较大无效分蘖较多,有效叶面积较小,通风透光性差,造成叶面积衰减较快,水稻结实率低,不利于产量的提高。尿素一次性施用中,U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP和U+NPPT+CP处理与U处理相比,粒重/叶分别提高12.1%、7.2%、12.0%、17.9%和20.3%。尿素分次施用中,U3+NBPT、U3+NPPT、U3+CP、U3+NBPT+CP和U3+NPPT+CP处理与U3处理相比,粒重/叶面积分别提高5.8%、11.3%、9.1%、5.9%和9.5%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供氮能力持续时间长,能提高水稻粒重/叶面积。虽然库的增加不及叶量的变化,但叶源质量的提高,能促进光合产物对籽粒产量的贡献。

2.6 水稻 SPAD 值

由图5可知,不同施肥模式下,各主要生育期施氮处理水稻 SPAD 值均显著高于CK处理,抽穗后 SPAD 值随着生育进程逐渐下降。叶片在灌浆后期保持高效的光合功能,切合籽粒灌浆需求是实现水稻超高产的关键^[30]。生化抑制剂组合和施肥模式对水稻 SPAD 值的交互效应不显著(P>0.05)。尿素分次施用处理 SPAD 值较一次性施用处理提高1.5%。尿素一次性施用中,U+NBPT、U+NPPT、U+CP、U+NBPT+CP和U+NPPT+CP处理与U处理相比,SPAD 值分别提高2.0%、5.1%、8.6%、3.4%和1.2%。尿素分次施用中,U3+NBPT、U3+NPPT、

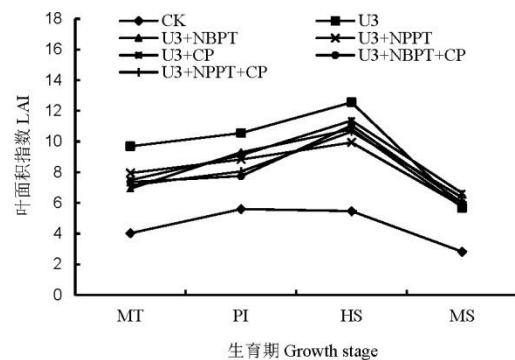


图4 不同处理下水稻的叶面积指数(LAI)

Fig. 4. Leaf area index (LAI) of rice under different treatments.

表 4 不同处理下抽穗期水稻的总叶面积指数(LAI)、有效 LAI 和高效 LAI

Table 4. Total leaf area index (LAI), efficient LAI, and high efficient LAI of rice at heading stage under different treatments.

处理 Treatment	总 LAI Total LAI	有效 LAI Efficient LAI	高效 LAI High efficient LAI	有效叶面积率 Efficient LAI rate/%	高效叶面积率 High efficient LAI rate/%
CK	5.5±0.2 g	4.3±0.1 d	2.2±0.1 f	78.8±5.7 ab	40.9±3.0 b
U	9.5±0.3 de	7.4±0.2 c	5.2±0.2 d	78.0±5.6 ab	54.8±4.0 a
U+NBPT	9.1±0.3 ef	8.1±0.2 bc	5.1±0.1 de	89.7±6.5 ab	55.9±4.0 a
U+NPPT	9.6±0.3 de	8.5±0.2 b	5.8±0.2 c	88.2±6.4 ab	60.6±4.4 a
U+CP	8.7±0.2 f	8.0±0.2 bc	5.2±0.2 d	91.9±6.6 a	60.0±4.3 a
U+NBPT+CP	8.5±0.2 f	7.8±0.2 bc	4.6±0.1 e	92.3±6.7 a	54.2±3.9 a
U+NPPT+CP	9.1±0.3 ef	7.8±0.2 bc	5.1±0.1 de	85.6±6.2 ab	55.7±4.0 a
U3	12.6±0.4 a	9.2±0.3 a	7.7±0.2 a	73.3±5.3 b	61.1±4.4 a
U3+NBPT	10.8±0.3 b	9.6±0.3 a	6.5±0.2 b	89.2±6.4 ab	60.1±4.3 a
U3+NPPT	9.9±0.3 cd	9.4±0.3 a	5.9±0.2 c	94.4±6.8 a	59.5±4.3 a
U3+CP	11.4±0.3 b	9.5±0.3 a	6.8±0.2 b	83.7±6.0 ab	60.1±4.3 a
U3+NBPT+CP	11.1±0.3 b	9.7±0.3 a	6.5±0.2 b	88.1±6.4 ab	58.9±4.3 a
U3+NPPT+CP	10.7±0.3 bc	9.7±0.3 a	6.4±0.2 b	91.4±6.6 ab	60.4±4.4 a
ANOVA					
F	***	***	***	ns	ns
I	**	ns	***	ns	ns
F×I	**	ns	***	ns	ns

表 5 不同处理下水稻的粒叶比

Table 5. Grain-leaf ratio of rice under different treatments.

处理 Treatment	颖花数/叶面积 Spikelet number/leaf area/(cm ⁻²)	实粒数/叶面积 Filled grain number/leaf area/(cm ⁻²)	粒重/叶面积 Grain yield/leaf area/(mg cm ⁻²)
CK	0.88±0.02 a	0.78±0.02 a	12.2±0.4 a
U	0.65±0.02 bcd	0.53±0.02 cde	8.9±0.3 def
U+NBPT	0.67±0.02 bc	0.55±0.01 cd	9.9±0.3 bc
U+NPPT	0.63±0.02 cde	0.55±0.02 cd	9.5±0.3 cd
U+CP	0.66±0.02 bc	0.55±0.01 c	9.9±0.3 bc
U+NBPT+CP	0.66±0.02 bc	0.56±0.02 c	10.5±0.3 b
U+NPPT+CP	0.69±0.02 b	0.61±0.02 b	10.7±0.3 b
U3	0.59±0.02 ef	0.48±0.01 f	8.2±0.2 f
U3+NBPT	0.55±0.01 f	0.49±0.01 ef	8.6±0.3 ef
U3+NPPT	0.60±0.02 def	0.51±0.01 def	9.1±0.3 de
U3+CP	0.57±0.02 f	0.50±0.01 ef	8.9±0.3 def
U3+NBPT+CP	0.56±0.01 f	0.49±0.01 ef	8.6±0.3 ef
U3+NPPT+CP	0.60±0.02 def	0.52±0.01 cdef	8.9±0.3 def
ANOVA			
F	***	***	***
I	ns	*	**
F×I	ns	ns	ns

U3+CP、U3+NBPT+CP 和 U3+NPPT+CP 处理与 U3 处理相比, SPAD 值分别提高 12.9%、8.9%、9.8%、7.4% 和 9.8%。说明施用尿素添加抑制剂土壤供 N 能力持续时间长, 能提高水稻 SPAD 值。

2.7 水稻籽粒产量

由图 6 可知, 生化抑制剂组合和施肥模式分别

对水稻籽粒产量效应极显著($P<0.001$), 其交互效应不显著($P>0.05$)。不同施肥模式下, 施氮处理籽粒产量均显著高于 CK 处理。U3 处理水稻籽粒产量较 U 处理显著提高 14.2%。尿素一次性施用中, 各抑制剂处理较 U 处理籽粒产量显著提高 20.1%~25.8%。尿素分次施用中, 各抑制剂处理较

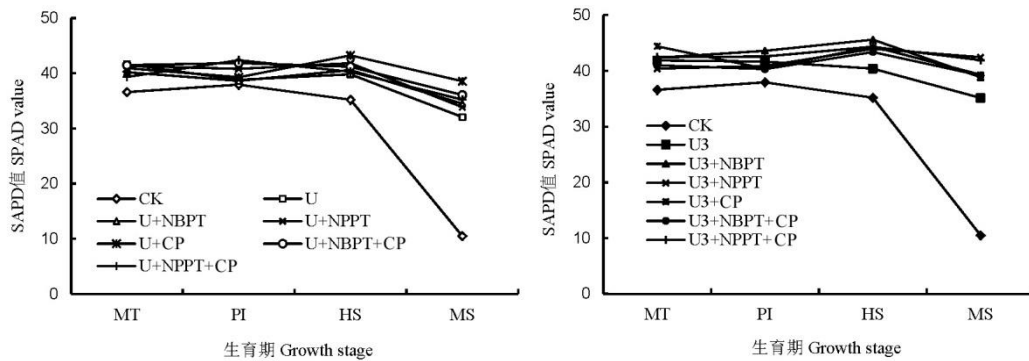
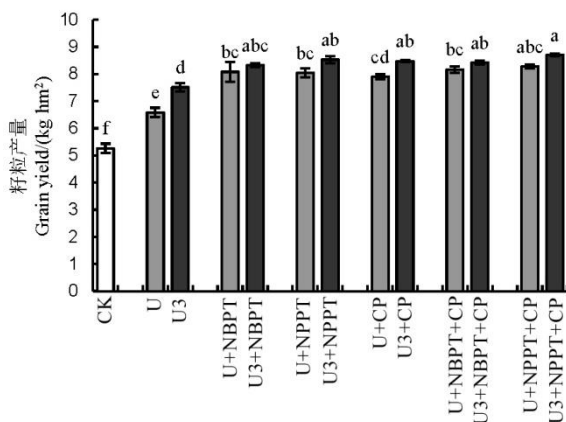


图5 不同处理下水稻的 SPAD 值

Fig. 5. SPAD value of rice under different treatments.



柱上不同小写字母代表处理间在 5% 水平差异显著 (LSD)。图中数值为平均值 \pm 标准误 ($n=3$)。

Different small letters above the bars mean significant difference among treatments at 5% level (LSD). Data in the figure are Mean \pm SE ($n=3$).

图6 不同处理下黄泥田水稻产量

Fig. 6. Grain yield of rice in yellow clay field under different treatments.

U3 处理籽粒产量显著提高 10.8%~15.8%。表明尿素添加生化抑制剂土壤供 N 能力持续时间长,能显著提高水稻籽粒产量。

3 讨论

3.1 施肥模式对水稻群体质量的影响

吴文革等^[23]研究发现,常规稻和杂交稻均以 $m_{基}:m_{蘖}:m_{穗} = 50:25:25$ 模式产量最高。薛利红等^[31]研究发现,相同落谷量、总氮量和穗肥氮量下,基肥增加降低水稻出苗率和前期分蘖速度,最高分蘖数和有效穗数在氮肥用量不足或过高时表现为随基肥增加而降低,适宜施氮量下则表现为先升后降;基肥增加会降低水稻生育后期功能叶的叶片含氮量和 LAI。张慧等^[32]研究发现,前氮后移处

理分蘖成穗率、抽穗期粒叶比和抽穗后干物质积累总量较农民常规施肥处理分别提高 5.6%、5.9% 和 21.1% (105 kg/hm^2), 5.2%、13.1% 和 26.9% (135 kg/hm^2)。本研究结果表明, U3 处理水稻有效茎蘖数、有效 LAI、抽穗至成熟期干物质累积和抽穗期 SPAD 值较 U 处理分别显著提高 0.8%、24.0%、9.3% 和 1.5%。N 素前期供应过多,基蘖肥占比例大,植株容易奢侈吸收,产生大量无效分蘖,拔节前群体增加,群体过大,无效生长增加,有效茎蘖个体弱小,颖花数不足,库容缩小,从而导致减产^[30]。因此,尿素分次施用可以有效减少无效分蘖的发生,提高水稻茎蘖成穗率,改善群体质量,延缓抽穗后叶片的大小和衰老,增加抽穗后干物质积累,从而提高产量。

3.2 抑制剂对水稻群体质量的影响

水稻是典型的喜 NH_4^+ 作物,硝化抑制剂与氮肥配合施用可以抑制硝化细菌的活性,使施入土壤中的 N 较长时间以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的形态存在,供作物吸收利用^[11,33-34]。Ghosh 等^[35]研究发现,施入 DCD 可提高水稻产量,与硫酸铵混施显著提高水稻生物量,但对分蘖数影响不大。脲酶抑制剂有一定的时效性,如 NBPT 施入土壤后 2 周左右可降解为 N、P、S 等元素^[36]。张文学等^[37]研究发现,尿素配施 NBPT 可以增加土壤有效氮的积累量,提高作物 N 素回收率,主要是在水稻孕穗期之前起作用^[15]。本研究表,一次性施肥结合抑制剂较 U 处理水稻有效茎蘖数显著提高 2.7%~6.9%,有效 LAI 显著提高 4.5%~14.1%,抽穗至成熟期干物质累积显著提高 16.3%~48.9%,抽穗期 SPAD 值提高 1.2%~8.6%;分次施肥结合抑制剂较 U3 处理水稻有效茎蘖数显著提高 6.1%~12.1%,有效 LAI 显著提高 2.0%~5.8%,抽穗至成熟期干物质累积显著提高 22.7%~47.1%,抽穗期 SPAD 值提高 7.4%~12.9%。分次施肥较一次

性施肥添加抑制剂组合的群体优势构建提升效果更好。

库容量大和生物产量高是超级杂交稻高产的决定因素^[38,39], 理想的超级杂交稻高产栽培技术是在碳水化合物运输与分配上形成“源”至“库”的畅通^[25]。冯跃华等^[40]研究发现, 随着施氮量(0~315 kg/hm²)的增加, 总颖花数、总库容量逐渐增大, 而饱粒千粒重、颖花数/叶、实粒数/叶、粒重/叶逐渐降低。由于超级稻库容量大, 抽穗后茎鞘和叶片贮藏物质迅速输出以满足库容需要, 常常导致后期叶片衰老加快、结实率低, 后期库大源不足往往是影响产量潜力发挥的主要障碍^[30]。要保证超级稻中、后期具有较高的物质生产能力完成库容积累, 其叶片中后期在有足量叶面积的基础上, 必须延缓衰老, 保持旺盛的光合生产能力^[41,42]。本研究结果表明, 适宜的抑制剂组合结合合理的运筹模式在黄泥田地区, 可以在稳定单位面积适宜穗数的基础上, 提高 SPAD 值, 增加抽穗至成熟期的光合产物, 防止“一头轰”式施肥引发的后期脱肥早衰, 提高抽穗后的有效 LAI, 有利于促进干物质积累, 从而提高产量。

4 结论

适宜的抑制剂组合结合合理的运筹模式, 可以有效改善黄泥田水稻的群体结构, 在获得适宜穗数的基础上, 降低高峰苗, 提高有效茎蘖数及成穗率; 有利于培育健壮个体, 构建丰产群体。同时减缓后期叶面积和 SPAD 的下降, 促进中、后期物质转运与积累, 提高群体光合效率, 增加总生物量而实现增产。

参考文献:

- [1] 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259-273.
Zhu Z L, Jin J Y. Fertilizer use and food security in China. *Plant Nut Fertil Sci*, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese with English abstract)
- [2] Wang D J, Liu Q, Lin J H, Sun R J. Optimum nitrogen use and reduced nitrogen loss for production of rice and wheat in the Yangtse Delta Region. *Environ Geochem Heal*, 2004, 26(2): 221-227.
- [3] Jiang L G, Dong D F, Gan X Q, Wei S Q. Photosynthetic efficiency and nitrogen distribution under different nitrogen management and relationship with physiological N-use efficiency in three rice genotypes. *Plant Soil*, 2005, 271(1): 321-328.
- [4] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, Yang J C, Zou Y B, Zhong X H, Wang G H, Zhang F S. Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China. *Field Crops Res*, 2006, 96(1): 37-47.
- [5] Wopereispura M M, Watanabe H, Moreira J, Wopereis M C S. Effect of late nitrogen application on rice yield, grain quality and profitability in the Senegal River valley. *Europ J Agron*, 2002, 17(3): 191-198.
- [6] Xing G X, Zhu Z L. An assessment of N loss from agricultural fields to the environment in China. *Nut Cycl Agroecos*, 2000, 57(1): 67-73.
- [7] Xie Y X, Xiong Z Q, Xing G X, Sun G Q, Zhu Z L. Assessment of nitrogen pollutant sources in surface waters of Taihu Lake region. *Pedosphere*, 2007, 17(2): 200-208.
- [8] Qiao J, Yang L Z, Yan T M, Xue F, Zhao D. Nitrogen fertilizer reduction in rice production for two consecutive years in the Taihu Lake area. *Agric Ecosys Environ*, 2012, 146(1): 103-112.
- [9] 朱兆良. 中国土壤氮素研究. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
Zhu Z L. Research on soil nitrogen in China. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45(5): 778-783. (in Chinese with English abstract)
- [10] Huang J K, Huang Z R, Jia X P, Hu R, Xiang C. Long-term reduction of nitrogen fertilizer use through knowledge training in rice production in China. *Agric Sys*, 2015, 135(6): 105-111.
- [11] 孙海军, 闵炬, 施卫明, 冯彦房, 李卫正, 初磊. 硝化抑制剂施用对水稻产量与氨挥发的影响. 土壤, 2015, (6): 1027-1033.
Sun H J, Min J, Shi W M, Eeng Y F, Li W Z, Chu L. Effects of nitrification inhibitor on rice production and ammonia volatilization in paddy rice field. *Soils*, 2015, (6): 1027-1033. (in Chinese with English abstract)
- [12] Wang Z P, Van Cleemput O, Demeyer P, Baert L. Effect of urease inhibitors on urea hydrolysis and ammonia volatilization. *Biol Fertil Soils*, 1991, 11(1): 43-47.
- [13] Antisari L V, Marzadori C, Gioacchini P, Ricci S, Gessa C. Effects of the urease inhibitor N-(n-butyl) phosphorothioic triamide in low concentrations on ammonia volatilization and evolution of mineral nitrogen. *Biol Fert Soils*, 1996, 22(3): 196-201.
- [14] 徐星凯, 周礼恺, Van Cleemput O. 脲酶抑制剂/硝化抑

- 制剂对植稻土壤中尿素N行为的影响. *生态学报*, 2001, 21(10): 1682-1686.
- Xu X K, Zhou L K, Van Cleemput O. Effect of urease/nitrification inhibitors on the behavior of urea-N in the soil planted to rice. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(10): 1682-1686. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张文学, 孙刚, 何萍, 梁国庆, 余喜初, 刘光荣, 周卫. 双季稻田添加脲酶抑制剂 NBPT 氮肥的最高减量潜力研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 821-830.
- Zhang W X, Sun G, He P, Liang G Q, Yu X C, Liu G R, Zhou W. Highest potential of subtracting nitrogen fertilizer through addition of urease inhibitor NBPT in double-cropping paddy fields. *J Plant Nut Fertil Sci*, 2014, 20(4): 821-830. (in Chinese with English abstract)
- [16] 周礼恺, 徐星凯, 陈利军, 李荣华, van Cleemput O. 氢醌和双氰胺对种稻土壤 N_2O 和 CH_4 排放的影响. *应用生态学报*, 1999, 10(2): 189-192.
- Zhou L K, Xu X K, Chen L J, Li R H, Van Cleemput O. Effect of hydroquinone and dicyandiamide on N_2O and CH_4 emissions from lowland rice soil. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 10(2): 189-192. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李香兰, 马静, 徐华, 曹金留, 蔡祖聪, Yagi K. DCD 不同施用时间对水稻生长期 CH_4 和 N_2O 排放的影响. *生态学报*, 2008, 28(8): 3675-3681.
- Li X L, Ma J, Xu H, Cao J L, Cai Z C, Yagi K. Effect of different application time of DCD on methane and nitrous oxide emissions during rice growth period. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(8): 3675-3681. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王少先, 彭克勤, 萧浪涛, 夏石头, 童建华, 王若仲. 双氰胺对水稻根系及光合特性和经济性状的影响. *湖南农业大学学报: 自然科学版*, 2003, 29(1): 18-21.
- Wang S X, Peng K Q, Xiao L T, Xia S T, Tong J H, Wang R Z. Study on the effects of Dicyandiamide on root system, photosynthetic and economic characteristics of rice. *J Human Agric Univ*, 2003, 29(1): 18-21. (in Chinese with English abstract)
- [19] 朱德峰, 陈惠哲, 徐一成, 张玉屏. 我国双季稻生产机械化制约因子与发展对策. *中国稻米*, 2013, 19(4): 1-4.
- Zhu D F, Chen H Z, Xu Y C, Zhang Y P. Constraints and countermeasures of the mechanization of double rice production in China. *China Rice*, 2013, 19(4): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王飞, 林诚, 李清华, 何春梅, 李昱, 林新坚. 长期不同施肥对南方黄泥田水稻子粒品质性状与土壤肥力因子的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 283-290.
- Wang F, Lin C, Li Q H, Li Yu, Lin X J. Effects of long-term fertilization on rice grain qualities and soil fertility factors in yellow paddy fields of southern China. *Plant Nut Fertil Sci*, 2011, 17(2): 283-290. (in Chinese with English abstract)
- [21] 林诚, 王飞, 李清华, 李昱, 何春梅, 林新坚. 不同施肥制度对黄泥田土壤酶活性及养分的影响. *中国土壤与肥料*, 2009, (6): 24-27.
- Lin C, Wang F, Li Q H, Li Yu, He C M, Lin X J. Effects of different fertilizer application strategies on nutrients and enzymatic activities in yellow clayey soil. *Soil Fertil Sci China*, 2009, (6): 24-27. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张宣. 南方中低产黄泥田科学施肥技术研究. 杭州: 浙江大学, 2014.
- Zhang X. Study on rational fertilization technology of low-medium yielding yellow-clayed paddy field in south China. Hangzhou: Zhejiang University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [23] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 汪汉林, 周美兰. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用. *杂交水稻*, 2003, 18(1): 44-48.
- Tang Q Y, Zou Y B, Mi X C, Wang H L, Zhou M L. Grain yield construction and N fertilizer efficiency of super hybrid rice under different N applications. *Hybrid Rice*, 2003, 18(1): 44-48. (in Chinese with English abstract)
- [24] 吴文革, 张四海, 赵决建, 吴桂成, 李泽福, 夏加发. 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. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13(5): 757-764.
- Wu W G, Zhang S H, Zhao J J, Wu G C, Li Z F, Xia J F. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies. *Plant Nut Fertil Sci*, 2007, 13(5): 757-764. (in Chinese with English abstract)
- [25] 石丽红, 纪雄辉, 李永华, 朱校奇, 李洪顺, 彭华, 刘昭兵. 施氮量和时期运筹对超级杂交稻植株氮含量与籽粒产量的影响研究. *土壤*, 2011, 43(4): 534-541.
- Shi L H, Ji X H, Li Y H, Zhu X Q, Li H S, Peng H, Liu Z B. Effect of nitrogen application amount and stage management on nitrogen content in plant and grain yield of super hybrid rice. *Soils*, 2011, 22(1): 207-209. (in Chinese with English abstract)
- [26] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 生化抑制剂组合对黄泥田土壤尿素态氮转化的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 95-100.
- Zhou X, Wu L H, Dai F. Effects of combined biochemical inhibitors on transformation of urea-N in yellow clayey soil. *J Soil Water Conser*, 2015, 29(5): 95-100. (in Chinese with English abstract)

- Chinese with English abstract)
- [27] 周旋, 吴良欢, 戴锋. 新型磷酰胺类脲酶抑制剂对不同质地土壤尿素转化的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 4003-4012.
Zhou X, Wu L H, Dai F. Influence of a new phosphoramidate urease inhibitor on urea-N transformation in different texture soil. *Chin J Appl Ecol*, 2016, 27(12): 4003-4012. (in Chinese with English abstract)
- [28] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科学技术出版社, 2000.
Ling Q H. Crop population quality. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈惠哲. 水稻物质运转规律及其产量形成的研究. 北京: 中国农业科学院, 2007.
Chen H Z. Study on matter translocation characteristic and yield formation in rice (*Oryza sativa* L.). Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李木英, 石庆华, 郑伟, 潘晓华, 谭雪明. 杂交稻后期叶片早衰特征及其与叶片N含量和根系活力关系初探. *江西农业大学学报*, 2008, 30(5): 757-765.
Li M Y, Shi Q H, Zheng W, Pan X H, Tan X M. A preliminary study on relationship between leaf premature senescence characteristic and leaf N content, roots activity in hybrid rice during grain filling stage. *Acta Agric Univ Jiangxi*, 2008, 30(5): 757-765. (in Chinese with English abstract)
- [31] 薛利红, 覃夏, 李刚华, 杨林章. 基肥氮不同比例对直播早稻群体动态、氮素吸收利用及产量形成的影响. *土壤*, 2010, 42(5): 815-821.
Xue L H, Qin X, Li G H, Yang L Z. Effect of basal and tiller nitrogen rates on population dynamics, nitrogen uptake and utilization, and yield formation of direct-seeding early rice. *Soils*, 2010, 42(5): 815-821. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张慧, 彭显龙, 刘元英, 郁燕, 陈丽楠. 前氮后移对寒地水稻群体质量的影响. *土壤通报*, 2011, 42(2): 402-406.
Zhang H, Peng X L, Liu Y Y, Yu Y, Chen L N. Effect of N application at later stages on population quality of rice in cold area. *Chin J Soil Sci*, 2011, 42(2): 402-406. (in Chinese with English abstract)
- [33] 俞巧钢, 陈英旭. 尿素添加硝化抑制剂 DMPP 对稻田土壤不同形态矿质态氮的影响. *农业环境科学学报*, 2011, 30(7): 1357-1363.
Yu Q G, Chen Y X. Effect of the urea with nitrification inhibitor DMPP addition on different form nitrogen transformation in rice fields. *J Agro-Environ Sci*, 2011, 30(7): 1357-1363. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张怡, 吕世华, 马静, 徐华, 袁江, 董瑜皎. 覆膜栽培及抑制剂施用对稻田 N₂O 排放的影响. *土壤*, 2013, 45(5): 830-837.
Zhang Y, Lv S H, Ma J, Xu H, Yuan J, Dong Y J. Effects of cultivation pattern and inhibitor application on nitrous oxide emission from paddy fields. *Soils*, 2013, 45(5): 830-837. (in Chinese with English abstract)
- [35] Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India. *Chemosphere*, 2003, 51(3): 181-195.
- [36] Chaiwanakupt P, Freney J R, Keerthisinghe D G, Phongpan S, Blakeley R L. Use of urease, algal inhibitors, and nitrification inhibitors to reduce nitrogen loss and increase the grain yield of flooded rice (*Oryza sativa*, L.). *Biol Fertil Soils*, 1996, 22(1-2): 89-95.
- [37] 张文学, 孙刚, 何萍, 梁国庆, 王秀斌, 刘光荣, 周卫. 脲酶抑制剂与硝化抑制剂对稻田氨挥发的影响. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(6): 1411-1419.
Zhang W X, Sun G, He P, Liang G Q, Wang X B, Liu G R, Zhou W. Effects of urease and nitrification inhibitors on ammonia volatilization from paddy fields. *J Plant Nutr Fertil Sci*, 2013, 19(6): 1411-1419. (in Chinese with English abstract)
- [38] 邹应斌, 敖和军, 王淑红, 唐启源. 超级稻“三定”栽培法研究: I. 概念与理论依据. *中国农学通报*, 2006, 22(5): 158-162.
Zou Y B, Ao H J, Wang S H, Tang Q Y. Studies on San-Ding cultivation method for super rice I. The concept and the principle. *Chin Agric Sci Bull*, 2006, 22(5): 158-162. (in Chinese with English abstract)
- [39] 吴文革, 张洪程, 吴桂成, 翟超群, 钱银飞, 陈焯, 徐军, 戴其根, 许珂. 超级稻群体籽粒库容特征的初步研究. *中国农业科学*, 2007b, 40(2): 250-257.
Wu W G, Zhang H C, Wu G C, Zhai C Q, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Dai Q G, Xu K. Preliminary study on super rice population sink characters. *Sci Agric Sin*, 2007b, 40(2): 250-257. (in Chinese with English abstract)
- [40] 冯跃华, 潘剑, 何腾兵, 刘应春, 王尚有, 赵福胜, 田晋文, 潘兴书, 范乐乐. 不同施氮水平对超级稻源库特性的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(15): 252-256.
Feng Y H, Pan J, He T B, Liu Y C, Wang S Y, Zhao F S, Tian J W, Pan X S, Fan L L. Effect of different fertilizer-N application rate on source-sink characteristics of super hybrid rice. *Chin Agric Sci Bulletin*, 2010, 26(15): 252-256. (in Chinese with English abstract)
- [41] 林忠成, 李土明, 吴福观, 张洪程, 戴其根, 叶世超,

郭宏文. 基肥与穗肥氮比例对双季稻产量和碳氮比的影响. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(2): 269-275.

Lin Z C, Li T M, Wu F G, Zhang H C, Dai Q G, Ye S C, Guo H W. Effects of nitrogen application on yield and C/N of double-cropping rice. *Plant Nutr Fertil Sci*, 2011, 17(2): 269-275. (in Chinese with English abstract)

[42] 刘彦伶. 南方中低产黄泥田改良和产量提升技术研究. 杭州: 浙江大学, 2013.

Liu Y L. Study on the technology of soil and grain yield improvement for low-medium yielding yellow-clayed paddy field in south China. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese with English abstract)