DOI: 10.3724/SP.J.1006.2021.02038

控释尿素对环洞庭湖区双季稻吸氮特征和产量的影响

田 昌¹ 靳 拓^{1,2} 周 旋³ 黄思怡¹ 王英姿^{4,*} 徐 泽⁵
彭建伟¹ 荣湘民¹ 谢桂先¹

¹ 湖南农业大学资源环境学院 / 土壤肥料资源高效利用国家工程实验室, 湖南长沙 410128; ² 农业农村部农业生态与资源保护总站, 北京 100125; ³ 湖南省农业科学院土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; ⁴ 湖南农业大学园艺学院, 湖南长沙 410128; ⁵ 湖南省长沙县农业农村局, 湖南长沙 410100

摘 要: 缓控释肥料应用于我国水稻生产中, 对化肥使用量零增长和农业可持续发展具有重要推动作用。本研究以连续在湖南进行 6 年(2013—2018 年)的双季稻控释尿素施用试验为研究平台, 分析控释尿素施用下环洞庭湖区早晚稻主要生育期地上部氮素累积、氮素阶段吸收速率与氮素利用的关系, 探究控释尿素减施对水稻持续稳产增产的原因。结果表明: 早稻各施氮处理均有 1 次明显的氮素阶段吸收速率峰值, 控释尿素(controlled-release urea, CRU)处理氮素吸收相对延后, 氮素累积主要在幼穗分化始期至抽穗期阶段, 占生育期总量的 35.31%~42.33%, 其次为始分蘖期至幼穗分化始期和抽穗期至乳熟期。晚稻于始分蘖期至幼穗分化始期和抽穗期至乳熟期出现 2 次明显的氮素阶段吸收速率峰值, 均以 1.0 CRU (等氮量控释尿素)处理峰值最高; 始分蘖期至幼穗分化始期、抽穗期至乳熟期水稻大量吸收氮素, 累积增量分别占 35.92%~40.52%和 23.05%~24.58%。控释尿素还能显著提高双季稻产量, 早晚稻分别以 0.9 CRU (控释尿素减氮 10%)和 0.8 CRU (控释尿素减氮 20%)处理最佳, 控释尿素减施的晚稻增产效果优于早稻, 且显著提高早晚稻氮肥吸收利用率、农学利用率和偏生产力。CRU 处理早晚稻产量与幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期、腊熟期氮素累积量和有效穗数均呈极显著正相关, 且晚稻产量与穗长呈显著正相关; 早晚稻幼穗分化始期氮素累积量与氮肥农学利用率、生理利用率呈显著负相关, 氮肥偏生产力与早稻幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期和腊熟期氮素累积量呈极显著或显著负相关, 与晚稻抽穗期氮素累积量呈显著负相关。因此, 控释尿素施用使水稻氮素阶段吸收速率、地上部氮素累积后延, 有利于后期生殖生长及籽粒结实, 显著提高双季稻产量及氮肥利用效率。结合双季稻吸氮特征和籽粒产量, 建议环洞庭湖区早稻采用释放期较短的控释尿素或配合速效氮肥施用, 进一步实现增产。

关键词: 控释尿素; 双季稻; 吸氮特征; 产量

Effects of controlled-release urea on nitrogen uptake characteristics and yield of double-cropping rice around Dongting Lake area

TIAN Chang¹, JIN Tuo^{1,2}, ZHOU Xuan³, HUANG Si-Yi¹, WANG Ying-Zi^{4,*}, XU Ze⁵, PENG Jian-Wei¹, RONG Xiang-Min¹, and XIE Gui-Xian¹

¹ National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ² Rural Energy and Environment Agency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100125, China; ³ Institute of Soil and Fertilizer, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, Hunan, China; ⁴ College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; ⁵ Agricultural and Rural Bureau of Changsha County, Changsha 410100, Hunan, China

本研究由国家重点研发计划项目(2017YFD0200703), 国家自然科学基金区域创新发展联合基金项目(U19A2050), 湖南省自然科学基金青年项目(2019JJ50233, 2019JJ50337)和湖南省教育厅重点项目(20A250)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0200703), the Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (U19A2050), the Hunan Natural Science Foundation Project (2019JJ50233, 2019JJ50337), and the Key Project of Hunan Provincial Education Department (20A250).

* 通信作者(Corresponding author): 王英姿, E-mail: 83075688@qq.com

第一作者联系方式: E-mail: chtian12@126.com

Received (收稿日期): 2020-05-24; Accepted (接受日期): 2020-09-13; Published online (网络出版日期): 2020-10-05.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200930.1634.008.html>

Abstract: The application of slow- and controlled-release fertilizer in rice production plays an important role in promoting the zero growth of fertilizer use and the sustainable development of agriculture in China. In this study, six consecutive years from 2013 to 2018 of controlled-release urea application in double-cropping rice in Hunan province were used to analyze the relationship between N uptake rate and N utilization in the above part of early- and late- rice in the main growth period by controlled-release urea application around the Dongting Lake district, and to explore the reasons for the sustained and stable yield increase of controlled-release urea on rice. The results showed that there was an obvious peak of N uptake rate in each stage of early rice by different N treatments, while N uptake in controlled-release urea (CRU) treatment was relatively delayed. And N accumulation was mainly from panicle initiation stage to heading stage, accounting for 35.31%–42.33%, followed by tillering stage to young panicle differentiation stage and heading stage to milk stage. Two obvious peaks of N uptake rates occurred in late rice from tillering stage to panicle initiation stage and from heading stage to milk stage, and the peak value was the highest at 1.0 CRU treatment. Large amount of N uptake from tillering stage to young panicle differentiation stage and heading stage to milk stage accounted for 35.92%–40.52% and 23.05%–24.58% of total amount of the whole growing period, respectively. Controlled-release urea could also significantly increase the yield of double-cropping rice, especially in early- and late- rice were treated with 0.9 CRU and 0.8 CRU respectively, and the yield increase of late rice was better than that of early rice with reduced application of controlled-release urea, and the N absorption efficiency, N agronomic efficiency and N partial productivity of early- and late- rice were significantly improved. The yield of early- and late-rice treated by CRU was significantly positively correlated with N accumulation and effective panicle number at panicle initiation stage, heading stage, milk stage and waxen stage, and the yield of late rice was significantly positively correlated with panicle length. The N accumulation of early and late rice at the panicle initiation stage was significantly negatively correlated with the agronomic and physiological rates of N fertilizer. The N partial productivity was significantly or significantly negatively correlated with the N accumulation of early rice at the panicle initiation stage, heading stage, milk stage and waxen stage, and significantly negatively correlated with the N accumulation at the heading stage of late rice. Therefore, application of controlled-release urea delayed the N uptake rate and N accumulation in the above-ground part of rice, which was beneficial to the later reproductive growth and seed setting, and could significantly improve the yield and nitrogen utilization efficiency of double-cropping rice. Combined with N absorption characteristics and grain yield of double-cropping rice, it was suggested that controlled release urea with a short release period should be used for early rice around the Dongting Lake area or applied with quick-availability N fertilizer to achieve further increase in yield level.

Keywords: controlled-release urea; cropping; nitrogen uptake characteristics; production

氮素是水稻生长必不可少的营养元素之一, 对作物高产起着重要作用, 持续、大量增加氮肥投入是提高水稻产量的一项重要措施^[1], 但我国水稻氮肥吸收利用率较低, 仅 30%~35%, 较发达国家低 10~15 个百分点^[2], 损失率高达 30%~70%^[3], 引起一系列环境生态问题。因此, 稳定水稻产量的同时提高肥料利用效率、减少化肥投入备受关注。国内外学者在水稻化肥减施增效方面做了大量研究, 主要通过优化施肥方法、改变氮肥类型、确定最适施肥时期和最佳施氮量, 从而提高肥料利用效率^[4]。

控释肥料是采用物理、化学等手段对肥料进行包膜, 肥心养分通过扩散机制等缓慢释放, 并与作物吸收同步。影响包膜肥料养分释放的因素主要有肥料包膜层、土壤含水率、温度、土壤 pH 和微生物活动等。张海军等^[5]认为, 温度对包膜肥料的养分释放速率影响显著, 一定范围内随温度升高养分释放速率加快。李敏等^[6]认为树脂膜控释尿素较硫膜控释尿素后期氮素释放率更高, 利于作物后期生殖生长。因此, 控释氮肥减量施用是水稻化肥减施增效的重要手段之一。稻田施用控释氮肥, 既能满足水

稻前期氮素需要, 提高花后根系活力和齐穗期、乳熟期叶片氮转化关键酶活性, 增强稻株后期氮素吸收, 提高氮素累积, 协调氮素分配; 又能减少氮素损失, 提高氮肥利用率和水稻产量^[7-11]。具体表现为: 控释肥料能有效降低氮素 NH_3 挥发损失和 N_2O 排放^[12], 较常规施肥减少稻田 NH_3 挥发损失量 50.3%~70.1%^[8], 水稻生长期 N_2O 排放量 15.7%~28.6%^[9]。且控释尿素养分释放、稻田土壤养分供应与水稻氮素吸收呈显著正相关^[13], 有利于提高土壤矿质氮含量^[14], 稳定后期稻株根系活力, 确保茎叶储藏物质的再转移和抽穗后光合产物的形成^[15], 提高成穗率以及氮素在稻株中的分配、再分配和运转畅通, 从而提高氮肥偏生产力(6%~23%)、氮素农学利用率(26%~71%)和籽粒产量(8%~19%)^[16]。但有关控释尿素对环洞庭湖双季稻不同生育阶段氮素累积、氮素阶段吸收速率的动态变化研究还不够深入。本文在前期研究基础上, 主要分析控释尿素施用下早晚稻主要生育阶段氮素吸收速率和生育期氮素累积与产量和氮素利用的关系, 探究控释尿素的早晚稻持续稳产增产原因。以期优化环洞庭湖区双季稻田控释尿素施用方法提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试地点

双季稻田施用控释尿素长期定位试验于2013年开始,在湖南省长沙市浏阳原种场沿溪镇花园村(28°19'N, 113°49'E)进行,2018年为该试验持续的第6年。该地区属亚热带季风性湿润气候,年均气温17.3℃,日照时数1594.8 h,降水量1551.3 mm,全年最高温度集中在7月至8月。

1.2 供试材料

供试水稻品种早稻为中早39,晚稻为金优华占。供试肥料为普通尿素(46% N,湖南省宜化化工有限公司生产);树脂包膜控释尿素(42% N, 56、70和84 d的25℃水浸泡累积溶出率分别为77.4%、86.3%和90.5%,山东金正大生态工程股份有限公司生产);钙镁磷肥(12% P₂O₅,湖北祥云化工股份有限公司生产);氯化钾(60% K₂O,俄罗斯生产)。供试土壤为河流冲积物发育的潮沙泥,其原始土壤(2013年)基本理化性状pH值为5.61,有机质为16.62 g kg⁻¹,全氮、全磷、全钾分别为1.21、0.54和11.51 g kg⁻¹,碱解氮、有效磷、速效钾分别为48.93、21.25和155.68 mg kg⁻¹。

1.3 试验设计

大田小区试验的小区面积为20 m² (4 m × 5 m),小区间水泥田埂隔开。设5个处理:农民习惯施肥(普通尿素, U)、等氮量控释尿素(1.0 CRU)、控释尿素减氮10% (0.9 CRU)、控释尿素减氮20% (0.8 CRU)、不施氮肥(CK),重复3次,随机区组排列,连续6年早晚稻轮作均在其对应小区进行。早、晚稻各小区种植密度株行距分别为16.7 cm × 20.0 cm、20.0 cm × 20.0 cm,每穴2~3苗;上述处理氮用量(按纯N计)依次为150、150、135、120、0 kg hm⁻² (早稻)和180、180、162、144、0 kg hm⁻² (晚稻),P₂O₅、K₂O用量分别为72 kg hm⁻²、90 kg hm⁻² (早稻)和60 kg hm⁻²、105 kg hm⁻² (晚稻)。所有磷肥做基肥一次性施入,氮肥和钾肥60%做基肥(移栽前与土混施),40%做分蘖肥(移栽后10 d左右表层撒施)。其中U处理N、P₂O₅、K₂O用量及施肥方式同当地农民习惯。早稻于2018年4月24日施基肥移栽,5月6日追肥,7月11日收获;晚稻于7月13日施基肥移栽,7月23日追肥,10月26日收获。整个生育期按常规田间管理方式进行。

1.4 测定项目与分析方法

取样时间:早稻为移栽后6 d (始分蘖期)、28 d (幼穗分化始期)、54 d (抽穗期)、63 d (乳熟期)、78 d

(腊熟期);晚稻为移栽后8 d (始分蘖期)、32 d (幼穗分化始期)、68 d (抽穗期)、82 d (乳熟期)、105 d (腊熟期)。取样时齐地割取植株于105℃下杀青30 min,60℃恒温烘干称量,磨细过0.5 mm筛后,用凯氏定氮法测定全氮含量。收获时各小区单打单晒并称重。每小区采水稻地上部5穴进行室内考种,分别测定株高、穗长、有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重。

氮肥吸收利用率 = (施氮区地上部植株吸氮量 - 空白区地上部植株吸氮量) / 施氮量;

氮肥农学利用率 = (施氮区产量 - 空白区产量) / 施氮量;

氮肥生理利用率 = (施氮区产量 - 空白区产量) / (施氮区地上部植株吸氮量 - 空白区地上部植株吸氮量);

氮肥偏生产力 = 施氮区产量 / 施氮量;

氮收获指数 = 籽粒氮吸收量 / (籽粒氮吸收量 + 秸秆氮吸收量);

植株氮素累积量 = 植株干重 × 含氮量;

氮素阶段吸收速率 = 含氮量 × 某生育期水稻生物量 / 生育期时间。

1.5 数据方法

数据处理及作图使用Microsoft Excel 2007。数据分析使用DPS7.05统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),多重比较采用Duncan's新复极差法。

2 结果与分析

2.1 双季稻地上部分氮素累积动态

从图1可以看出,早稻地上部氮素累积规律表现为始分蘖期至幼穗分化始期U处理累积量迅速增加;幼穗分化始期至腊熟期CRU (1.0 CRU、0.9 CRU和0.8 CRU)处理累积较快,且随控释尿素用量的增加呈上升趋势,施氮处理氮素累积量均显著高于CK。始分蘖期各处理氮素累积量差异较小,U处理显著高于0.8 CRU处理。幼穗分化始期U处理氮素累积量最高,显著高于0.8 CRU和0.9 CRU处理。抽穗期各处理氮素累积量明显升高,1.0 CRU处理显著高于其他处理,U、0.9 CRU和0.8 CRU处理间差异不显著。乳熟期和腊熟期1.0 CRU、0.9 CRU和0.8 CRU处理间氮素累积量差异不显著,较U处理显著提高33.48%、24.98%、17.02% (乳熟期)和36.58%、29.65%、22.16% (腊熟期)。

晚稻地上部氮素累积规律表现为CK处理显著

低于施氮处理, 1.0 CRU 处理整个生育期均较高, CRU 处理随控释尿素用量减少氮素累积量降低; 始分蘖盛期至抽穗期 CRU 处理变化不规律, 乳熟期和腊熟期 CRU 处理明显高于 U 处理。始分蘖期至乳熟期均以 1.0 CRU 处理氮素累积量最高, 各施氮处理间差异不显著。腊熟期 1.0 CRU、0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理间氮素累积量差异不显著, 但较 U 处理显著提高 18.71%、13.94% 和 11.99%。

2.2 双季稻氮素阶段累积增量占比

由图 2 可知, 始分蘖期至幼穗分化始期和幼穗分化始期至抽穗期是早稻氮素累积的重要阶段, 其中 U 处理主要集中在始分蘖期至幼穗分化始期, CRU 处理稍延后, 在幼穗分化始期至抽穗期。前期(始分蘖期至抽穗期) CRU 处理氮素累积增量占比随控释尿素用量减少而降低, 后期(乳熟期至腊熟期)相反。早稻移栽至始分蘖期各处理氮素累积增量较

少, 占比为 1.50%~3.21%; 始分蘖期至幼穗分化始期 U 处理氮素累积增量占比为 52.88%, CRU 处理相对较少, 占 27.52%~33.56%; 幼穗分化始期至抽穗期 CRU 处理氮素累积增加明显, 占 35.31%~42.33%, 而 U 处理仅 25.36%; 乳熟期和腊熟期增量相对较少, U 处理分别为 11.91% 和 6.64%, CRU 处理稍高于 U 处理, 分别占 13.22%~25.20% 和 8.91%~10.46%。

晚稻变化规律与早稻类似, 始分蘖期至幼穗分化始期和幼穗分化始期至抽穗期是 U 处理氮素累积的重要阶段, 后期逐渐减少; CRU 处理在始分蘖期至幼穗分化期和抽穗期至乳熟期大量吸收氮素, 且前期随控释尿素用量减少其占比下降, 后期相反。移栽至始分蘖期各处理氮素累积增量占比仅 4.48%~6.30%; 始分蘖期至幼穗分化始期水稻大量吸收氮素, U 处理氮素累积增量占 42.69%, CRU 处理相对较低, 占 35.92%~40.52%; 幼穗分化始期至抽

图 1 早晚稻各生育期氮素累积动态

Fig. 1 Dynamics of nitrogen accumulation for early- and late-rice at different growth stages

CK: 不施氮肥; U: 常规施肥(普通尿素); 1.0 CRU: 等氮量控释尿素; 0.9 CRU: 控释尿素减氮 10%; 0.8 CRU: 控释尿素减氮 20%。
CK: no nitrogen control; U: conventional fertilization (commercial urea); 1.0 CRU: controlled-release urea; 0.9 CRU: nitrogen reduction 10% of controlled-release urea; 0.8 CRU: nitrogen reduction 20% of controlled-release urea.

图 2 双季稻氮素阶段累积增量占比

Fig. 2 Incremental proportion of accumulative nitrogen in double-cropping rice

处理同图 1。Treatments are the same as those given in Fig. 1.

穗期是 U 处理氮素累积的第 2 个高峰, 占 27.10%, CRU 处理仅 14.20%~20.80%; CRU 处理第 2 个氮素累积高峰期后移, 在抽穗期至乳熟期, 占 23.05%~24.58%, U 处理仅 18.98%; 腊熟期累积较少, CRU 处理占 10.66%~19.09%, 稍高于 U 处理(6.02%)。

2.3 双季稻地上部氮素阶段吸收速率

由图 3 可知, 早稻各处理有 1 次明显的氮素阶段吸收速率峰值, 分别出现在始分蘖期至幼穗分化始期(U 处理)、幼穗分化始期至抽穗期(1.0 CRU 处理)和抽穗期至乳熟期(0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理)。移栽至始分蘖期氮素阶段吸收速率较低, 为 0.26~0.49 kg hm⁻² d⁻¹。始分蘖期至幼穗分化始期, CK 和 U 处理出现第一个氮素阶段吸收速率高峰期, 峰值分别为 0.90 kg hm⁻² d⁻¹ 和 2.22 kg hm⁻² d⁻¹, CRU 处理也较高, 为 1.40~1.92 kg hm⁻² d⁻¹。幼穗分化始期至抽穗期 CRU 处理氮素阶段吸收速率增强, 为 1.54~2.07 kg hm⁻² d⁻¹, 明显高于 CK 和 U 处理, 且 1.0 CRU 处理出现吸收速率峰值(2.07 kg hm⁻² d⁻¹)。抽穗期至乳熟期 0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理出现明显的吸收速率峰值, 分别为 3.03 kg hm⁻² d⁻¹ 和 3.16 kg hm⁻² d⁻¹, U 和 CK 处理也有较小吸收速率峰值, 分别为 1.22 kg hm⁻² d⁻¹ 和 1.37 kg hm⁻² d⁻¹, 1.0 CRU 处理吸收速率相对较高, 为 1.84 kg hm⁻² d⁻¹, 仅次于幼穗分化始期至抽穗期(1.92 kg hm⁻² d⁻¹)和始分蘖期至幼穗分化始期(2.07 kg hm⁻² d⁻¹)。乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率仅高于移栽至始分蘖期, 为 0.36~0.80 kg hm⁻² d⁻¹。

晚稻各处理于始分蘖期至幼穗分化始期和抽穗期至乳熟期出现明显的氮素阶段吸收速率峰值。移栽至始分蘖期吸收速率较低, 为 0.54~0.75 kg hm⁻² d⁻¹。

始分蘖期至幼穗分化始期出现第一个氮素阶段吸收速率峰值, 施氮处理为 1.87~2.04 kg hm⁻² d⁻¹, 1.0 CRU 处理最高(2.04 kg hm⁻² d⁻¹)。幼穗分化始期至抽穗期吸收速率明显下降, 为 0.49~0.81 kg hm⁻² d⁻¹, U 处理高于 CRU 处理。抽穗期至乳熟期出现第 2 个氮素阶段吸收速率峰值, CRU 处理较高, 为 2.00~2.20 kg hm⁻² d⁻¹, U 处理仅 1.45 kg hm⁻² d⁻¹。乳熟期至腊熟期 CRU 处理吸收速率(0.80~0.92 kg hm⁻² d⁻¹)明显高于 U 处理(0.29 kg hm⁻² d⁻¹)。

2.4 双季稻产量和氮素利用效率

由表 1 可知, 2016—2018 年施氮处理早晚稻产量显著高于 CK, CRU 处理均显著高于 U 处理, 1.0 CRU、0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理间差异不显著, 早晚稻分别以 0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理籽粒产量最高, 达 5804.8 kg hm⁻² 和 6762.0 kg hm⁻²; 相对于 U 处理, 1.0 CRU、0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理 3 年平均增产率分别为 8.11%、14.34%、10.46% (早稻)和 6.19%、12.16%、12.71% (晚稻), 说明 0.8 CRU 处理晚稻的增产效果优于早稻。收获期产量构成因素中, 施氮处理有效穗数显著高于 CK, 株高、穗长、每穗粒数、千粒重和结实率处理间差异不显著; 早晚稻产量与每穗粒数极显著正相关(相关系数分别为 0.8882** 和 0.8336**), 且晚稻产量与穗长呈显著正相关(相关系数为 0.5768*)。早晚稻穗长与每穗粒数呈显著和极显著正相关(相关系数分别为 0.5764* 和 0.7138**), 早稻穗长与千粒重呈极显著负相关(相关系数为 -0.8990**).

由表 2 可知, 早晚稻施氮处理氮收获指数普遍低于 CK, CRU 处理早晚稻氮收获指数随着控释尿素用量减少而明显升高; 早稻 U 处理氮收获指数较

图3 双季稻地上部氮素阶段吸收速率

Fig. 3 Nitrogen uptake rate of above-ground in double-cropping rice
处理同图 1。Treatments are the same as those given in Fig. 1.

表 1 双季稻产量及其构成因素(2016–2018 年平均值)

Table 1 Average grain yield and its components in double-cropping rice from 2016 to 2018

稻季 Season	处理 Treatments	籽粒产量 Grain yield (kg hm ⁻²)	株高 Plant height (cm)	穗长 Spike length (cm)	有效穗数 Effective spike	每穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	结实率 Seed-setting rate (%)
早稻 Early rice	CK	4295.3±253.3 c	70.3 a	17.7 a	293.3 b	81.6 a	23.9 a	79.7 a
	U	5076.8±245.9 b	71.9 a	18.2 a	322.8 a	74.2 a	23.1 a	78.5 a
	1.0 CRU	5488.3±40.0 a	70.3 a	18.3 a	335.1 a	75.2 a	23.4 a	80.3 a
	0.9 CRU	5804.8±152.3 a	69.5 a	17.9 a	339.0 a	74.5 a	23.7 a	80.3 a
	0.8 CRU	5607.9±100.3 a	70.6 a	18.2 a	334.0 a	82.5 a	23.6 a	83.6 a
晚稻 Late rice	CK	4967.0±238.5 c	71.2 a	19.7 a	265.7 b	83.1 a	27.1 a	79.9 a
	U	5999.5±192.0 b	76.0 a	21.0 a	335.7 a	89.1 a	26.9 a	83.2 a
	1.0 CRU	6370.8±125.2 ab	80.4 a	22.3 a	350.0 a	96.7 a	27.4 a	85.1 a
	0.9 CRU	6729.3±301.8 a	80.0 a	22.4 a	362.3 a	87.3 a	27.5 a	84.0 a
	0.8 CRU	6762.0±372.2 a	76.6 a	22.4 a	381.7 a	92.4 a	26.9 a	83.4 a

处理和缩写同图 1。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 分早晚稻比较。

Treatments and abbreviations are the same as those given in Fig. 1. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level within a same season rice.

CRU 处理高, 且显著高于 1.0 CRU, CRU 处理间差异不显著; 晚稻 0.8 CRU 处理显著高于其他施氮处理。早晚稻 U 处理氮肥吸收利用效率分别为 20.73% 和 21.57%, 其中早稻 CRU 处理(37.52%~42.28%)均显著高于 U 处理; 晚稻 CRU 处理(34.02%~37.75%)也均显著高于 U 处理, 且 0.8 CRU 处理显著高于 1.0 CRU 处理。早晚稻氮肥农学利用率均以 CRU 处理明显高于 U 处理, 且早稻 0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理、晚稻 0.8 CRU 处理均显著高于 U 处理。氮肥生理利用效率变化不规

律, 处理间差异不显著。早晚稻氮肥偏生产力以 CRU 处理均显著高于 U 处理, 且 0.8 CRU 显著高于 1.0 CRU 和 0.9 CRU, 0.9 CRU 显著高于 1.0 CRU。

2.5 双季稻氮素吸收、累积与产量及其构成因素、氮肥利用效率的相互关系

水稻的氮素利用效率与氮素吸收和累积等密切相关。其中, 早稻控释尿素处理产量与始分蘖期至幼穗分化始期、抽穗期至乳熟期和幼穗分化始期至抽穗期氮素阶段吸收速率呈极显著或显著正相关

表 2 双季稻氮肥利用效率(2016–2018 年平均值)

Table 2 Nitrogen use efficiencies in double-cropping rice average from 2016 to 2018

稻季 Season	处理 Treatments	氮收获指数 NHI (%)	氮肥吸收利用率 NUE (%)	氮肥农学利用率 ANUE (kg kg ⁻¹)	氮肥生理利用率 PNUE (kg kg ⁻¹)	氮肥偏生产力 PFPN (kg kg ⁻¹)
早稻 Early rice	CK	64.31 a				
	U	60.96 a	20.73 b	5.21 b	24.35 a	28.64 d
	1.0 CRU	55.78 b	37.52 a	7.95 ab	21.27 a	33.85 c
	0.9 CRU	59.94 ab	42.28 a	11.18 a	26.42 a	40.65 b
	0.8 CRU	60.08 ab	41.10 a	10.94 a	26.66 a	48.37 a
晚稻 Late rice	CK	63.41 a				
	U	59.45 b	21.57 c	5.74 b	26.91 a	27.59 d
	1.0 CRU	56.42 b	34.02 b	7.80 ab	22.92 a	33.33 c
	0.9 CRU	57.78 b	36.90 ab	10.88 ab	29.45 a	39.33 b
	0.8 CRU	65.00 a	37.75 a	12.46 a	32.90 a	46.73 a

处理同图 1。不同字母表示在 0.05 水平上差异显著, 分早晚稻比较。

Treatments are the same as those given in Fig. 1. NHI: nitrogen harvest index; NUE: nitrogen absorption and utilization efficiency; ANUE: agronomic nitrogen use efficiency; PNUE: nitrogen physiological utilization efficiency; PFPN: nitrogen partial factor productivity. Values followed by different letters are significantly different at the 0.05 probability level within same season rice.

(相关系数分别为 0.7820^{**}、0.7707^{**}和 0.5956^{*}), 与幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期和腊熟期氮素累积量呈极显著正相关(相关系数分别为 0.7759^{**}、0.7208^{**}、0.9235^{**}和 0.9269^{**}); 始分蘖期至幼穗分化始期氮素阶段吸收速率与氮收获指数、氮肥偏生产力呈极显著或显著负相关(相关系数分别为 -0.7694^{**}和 -0.5981^{*}), 抽穗期至乳熟期氮素阶段吸收速率与氮肥农学利用率、乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率与氮肥吸收利用效率呈显著正相关(相关系数分别为 0.5961^{*}和 0.6413^{*}); 幼穗分化始期氮素累积量与氮收获指数、农学利用率、生理利用率和偏生产力呈极显著负相关(相关系数分别为 -0.7136^{**}、-0.7295^{**}、-0.7289^{**}和 -0.9130^{**}), 抽穗期氮素累积量与氮收获指数呈显著负相关(相关系数为 -0.6648^{*}), 氮肥偏生产力与抽穗期、乳熟期和腊熟期氮素累积量呈极显著或显著负相关(相关系数分别为 -0.7780^{**}、-0.7084^{**}和 -0.6212^{*})。有效穗数与始分蘖期至幼穗分化始期、抽穗期至乳熟期氮素阶段吸收速率呈极显著和显著正相关(相关系数分别为 0.7931^{**}和 0.6099^{*}), 每穗粒数与始分蘖期至幼穗分化始期氮素阶段吸收速率呈显著负相关(相关系数为 -0.5981^{*}); 有效穗数与幼穗分化始期、乳熟期、腊熟期氮素累积量呈极显著正相关(相关系数分别为 0.7942^{**}、0.8364^{**}、0.8212^{**}), 与抽穗期氮素累积量呈显著正相关(相关系数为 0.6965^{*}), 每穗粒数与幼穗分化始期氮素累积量呈显著负相关(相关系数为 -0.5973^{*})。

晚稻控释尿素处理水稻产量与移栽至始分蘖期和始分蘖期至幼穗分化始期、抽穗期至乳熟期、乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率呈显著或极显著正相关(相关系数分别为 0.6898^{*}、0.8097^{**}、0.7155^{**}和 0.8115^{**}), 与始分蘖期和幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期、腊熟期氮素累积量呈显著或极显著正相关(相关系数分别为 0.6898^{*}、0.8240^{**}、0.7147^{**}、0.8288^{**}和 0.9045^{**}); 始分蘖期至幼穗分化始期氮素阶段吸收速率与氮肥农学利用率、生理利用率呈极显著负相关(相关系数分别为 -0.7181^{**}和 -0.7517^{**}), 幼穗分化始期氮素累积量与氮肥农学利用率、生理利用率呈显著负相关(相关系数分别为 -0.6636^{*}和 -0.6818^{*})。穗长与始分蘖期至幼穗分化始期、乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率呈极显著正相关(相关系数分别为 0.7806^{**}和 0.7562^{**}), 有效穗数与抽穗期至乳熟期、移栽至始分蘖期、始分蘖期至幼穗分

化始期、乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率呈极显著或显著正相关(相关系数分别为 0.7596^{**}、0.6350^{*}、0.6887^{*}和 0.6386^{*}); 穗长与幼穗分化始期和腊熟期氮素累积量呈极显著或显著正相关(相关系数分别为 0.7762^{**}和 0.6435^{*}), 有效穗数与始分蘖期、幼穗分化始期、抽穗期和乳熟期、腊熟期氮素累积量呈显著或极显著正相关(相关系数分别为 0.6350^{*}、0.7052^{*}、0.6311^{*}、0.8012^{**}和 0.8201^{**})。

3 讨论

3.1 控释尿素对双季稻吸氮特征的影响

要提高水稻的氮素利用效率和籽粒产量必须提高抽穗前的氮素累积量、抽穗后的干物质累积和氮素运转量^[17]。本研究认为, 早稻 U 处理氮素阶段吸收速率峰值出现在始分蘖期至幼穗分化始期, 且氮素主要累积于幼穗分化始期, 氮素阶段累积增量占整个生育期的 52.88%, 后期逐渐降低; CRU 处理氮素阶段吸收速率峰值明显后移, 发生在幼穗分化始期至抽穗期(1.0 CRU)和抽穗期至乳熟期(0.9 CRU 和 0.8 CRU), 抽穗期和乳熟期也累积较多氮素, 且 CRU 处理腊熟期氮素累积量显著高于 U 处理。因为缓控释氮肥能提高花后根系活力及成穗率, 使植株中氮素转运畅通^[16]; 还能促进水稻生育中、后期叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性, 促进孕穗体内氮素吸收与同化, 提高吸氮量, 增强生育后期叶片蛋白水解酶活性, 促进叶片中蛋白质降解, 利于叶片氮素向籽粒转移^[7], 提高水稻产量。本研究还认为, 晚稻 0.8 CRU 处理乳熟期至腊熟期氮素阶段累积占比为 19.09%, 明显高于早稻的 10.46%, 可能由于晚稻 0.8 CRU 处理前期氮素释放较多, 后期控释尿素中存留的氮素相对较少, 减量施用对稻田氮素的激发效应更强^[18], 补充后期土壤氮素供应、利于氮素累积; 同时, 晚稻 0.8 CRU 处理氮收获指数达 65.00%, 高于早稻的 60.08%, 说明晚稻 0.8 CRU 处理后期地上部累积氮素更有利于转移至籽粒。

水稻氮素吸收与控释尿素氮素释放及土壤养分供应具有显著正相关性^[13], 但控释肥料的养分释放受土壤温度影响较大^[19]。本研究认为, 早稻 CRU 处理氮素阶段吸收速率峰值较 U 处理明显延后, 大量氮素累积时期推迟; 而晚稻 CRU 处理氮素阶段吸收速率峰值未延后, 且 1.0 CRU 处理高于 U 处理。主要因为早稻生育前期(4 月下旬月至 5 月), 我国南方气温相对较低(平均为 20.2^{°C})^[20], 控释尿素氮素释

放较慢,后期温度逐渐升高,氮素释放增强,水稻氮素吸收速率加快。而晚稻生长前期(7月下旬至8月)是南方地区全年的高温期(平均温度达 29.0°C)^[20],较高温度促进控释尿素的氮素释放,水稻吸收累积氮素更多^[19]。同时,控释尿素能通过降低田面水铵态氮浓度和pH,显著减少施肥后10 d内稻田氮素氮挥发损失,保持土壤氮含量,确保充足氮素供水稻吸收^[8]。0.9 CRU 和 0.8 CRU 处理氮素施入量减少,供水稻吸收的氮素有限,水稻氮素吸收速率弱于 U 处理。因此,南方区域双季稻田施用控释氮肥时,应考虑早稻配合施用速效氮肥或选用释放期更短的控释氮肥,以保证水稻生长前期氮素供应和水稻氮素吸收速率。

3.2 控释尿素对双季稻氮肥利用率的影响

张福锁等^[21]总结了全国粮食主产区1333个田间试验结果,分析了2001—2005年我国主要粮食作物水稻、小麦和玉米的氮肥利用率分别为28.3%、28.2%和26.1%,远低于国际水平(30%~50%)。鲁艳红等^[22]发现,湖南双季稻常规施肥处理早、晚稻氮肥吸收利用率分别为35.5%和31.9%。本研究认为,U 处理早、晚稻氮肥吸收利用率3年平均为20.73%和21.57%,低于上述研究结果。可能有两方面原因:一是土壤质地,本试验供试土壤为河流冲积物发育的潮沙泥田水稻土,质地较砂,通透性好,较粘壤土更易发生淋溶损失^[23],减少土壤氮素供给,降低氮肥利用率。二是施肥量和施肥方式,本研究 U 处理采用农民习惯施氮肥量(早稻 150 kg hm^{-2} 、晚稻 180 kg hm^{-2})及施肥方式(一基一追),而前人研究普遍为优化施肥方式,如“一基二追”或“一基三追”等,增加施肥次数可减少氮素损失,增强作物吸收,提高氮肥利用率^[14]。

控释氮肥的氮素缓慢释放有利于土壤对氮素的保持,满足作物后期对养分的需求,提高氮肥利用效率,保证作物产量。研究表明, Ji 等^[24]利用 ^{15}N 同位素法研究发现,一次施 90 kg hm^{-2} 控释氮肥的氮肥利用率比分2次施尿素高38.9%。本研究中,1.0 CRU 处理早晚稻 N 肥吸收利用率为37.52%和34.02%,较 U 处理(早稻20.73%,晚稻21.57%)显著提高80.99%和57.72%,与上述研究结果相符。控释氮肥能够协调养分释放速率,在水稻生育中后期稳定释放氮素,促进作物地上部及根系的生长,且肥效持续时间长,氮素释放的高峰期与作物吸肥高峰期基本吻合,能明显提高作物产量和氮肥利用率^[23]。

本研究还认为,水稻氮素吸收利用率随控释氮肥用量减少而提高,CRU 处理早晚稻氮肥吸收利用效率分别为37.52%~42.28%和34.02%~37.75%,均显著高于 U 处理。因为适量降低氮肥用量能增强水稻对氮素的吸收,保持水稻高产且提高氮肥利用效率。俞巧钢等^[25]也认为随着施氮量增加,水稻氮肥利用效率呈下降趋势。

3.3 控释尿素提高早、晚稻产量效应及其差异

施用控释氮肥,且适当减少用量,能提高双季稻产量、增加氮素利用效率、维持或提高土壤氮素肥力和可持续生产力^[26]。本研究认为,CRU 处理能显著增产,且适量减施能获得更高产量,如早稻0.9 CRU 处理(5804.8 kg hm^{-2})和晚稻0.8 CRU 处理(6762.0 kg hm^{-2})3年平均产量达到最高值。Geng 等^[27]7年稻—油轮作试验中,控释尿素减施30%较常规施肥水稻季连续7年增产,油菜季第4年开始增产,其原因主要是连续施用控释尿素能提升耕层土壤全氮、有机质含量,提高土壤供肥能力。且树脂包膜尿素能有效控制氮肥释放,水稻生育中后期氮肥释放率高,为水稻灌浆孕穗提供充足的氮素营养,明显提高每穗粒数等,利于籽粒产量建成,为水稻高产提供重要保障^[6,28]。同时,控释尿素处理早稻产量与幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期、腊熟期呈极显著正相关,与始分蘖期至幼穗分化始期、抽穗期至乳熟期、幼穗分化始期至抽穗期氮素阶段吸收速率呈极显著或显著正相关;晚稻产量与始分蘖盛期、幼穗分化始期、抽穗期、乳熟期、腊熟期氮素累积量,及其与移栽至始分蘖期、始分蘖期至幼穗分化期、抽穗期至乳熟期、乳熟期至腊熟期氮素阶段吸收速率呈显著或极显著正相关。邓飞等^[15]研究结果也认为,水稻产量与播种至幼穗分化始期、拔节期至孕穗期、成熟期干物质累积总量都呈显著正相关。因此,控释尿素能提高早晚稻主要生育阶段氮素吸收和累积,提高产量。

本研究还认为,0.8 CRU 处理晚稻的增产效果优于早稻。可能有两方面的原因:一是晚稻产量与穗长呈显著正相关,穗长与始分蘖期至幼穗分化始期、乳熟期至腊熟期水稻氮素阶段吸收速率呈极显著正相关,与幼穗分化始期和腊熟期氮素累积量极显著或显著正相关;由于晚稻生育前期气温明显高于早稻,控释尿素的氮素释放加强,土壤氮素供应能力增强,利于晚稻始分蘖期至幼穗分化始期氮素吸收及幼穗分化始期的氮素累积,为稻穗的生长提供

充足的养分。二是早稻抽穗期、乳熟期和腊熟期氮素累积量、始分蘖期至幼穗分化始期氮素阶段吸收速率与氮肥偏生产力呈极显著或显著负相关, 但抽穗期至乳熟期氮素阶段吸收速率与氮肥偏生产力呈显著正相关; 控释尿素提高水稻生长中期氮素吸收速率和中后期氮素累积, 影响氮肥偏生产力, 植株氮素向穗部运转氮素减少, 不利于产量的提高^[16], 且幼穗分化始期至抽穗期氮素吸收速率提高不利于后期地上部氮素向籽粒转移, 导致幼穗分化始期至抽穗期氮素吸收速率与氮收获指数呈显著负相关。因此, 控释尿素对晚稻的增产效果更优。

4 结论

施用控释尿素使环洞庭湖区双季稻氮素阶段吸收速率峰值和氮素累积时期明显后延, 提高后期氮素累积量, 腊熟期 CRU 处理氮素累积量显著高于 U 处理; 控释尿素减量施用有利于增强后期地上部累积氮素向籽粒转移, 提高氮收获指数。施用控释尿素能显著提高双季稻产量, 显著提高早晚稻氮肥吸收利用率、农学利用率和偏生产力。早、晚稻分别以 0.9 CRU 和 0.8 CRU 产量最佳, 且控释尿素减施的增产效果晚稻优于早稻。综合水稻吸氮特征和双季稻产量, 建议环洞庭湖双季稻区早稻配合速效氮肥施用或选用控释期更短的氮肥, 以确保水稻生长前期氮素供应和吸收, 充分挖掘控释尿素增产潜力。

References

- [1] 王敬国, 林杉, 李保国. 氮循环与中国农业氮管理. 中国农业科学, 2016, 49: 503–517.
Wang J G, Lin S, Li B G. Nitrogen cycling and management strategies in Chinese agriculture. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 503–517 (in Chinese with English abstract).
- [2] 刘立军, 杨立年, 孙小淋, 王志琴, 杨建昌. 水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因. 作物学报, 2009, 35: 1672–1680.
Liu L J, Yang L N, Sun X L, Wang Z Q, Yang J C. Fertilizer-nitrogen use efficiency and its physiological mechanism under site-specific nitrogen management in rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35: 1672–1680 (in Chinese with English abstract).
- [3] 朱兆良. 农田中氮肥的损失与对策. 土壤与环境, 2000, 9(1): 1–6.
Zhu Z L. Loss of fertilizer N from plants-soil system and the strategies and techniques for its reduction. *Soil Environ Sci*, 2000, 9(1): 1–6 (in Chinese with English abstract).
- [4] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland B, Christian W. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. 中国农业科学, 2002, 35, 1095–1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang G H, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Roland B, Christian W. Research strategy in improving fertilizer nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35: 1095–1103 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张海军, 武志杰, 梁文举, 解宏图. 包膜肥料养分控释机理研究进展. 应用生态学报, 2003, 14: 2337–2341.
Zhang H J, Wu Z J, Liang W J, Xie H T. Research advances on controlled-release mechanisms of nutrients in coated fertilizers. *Chin J Appl Ecol*, 2003, 14: 2337–2341.
- [6] 李敏, 郭熙盛, 叶舒娅, 刘枫, 袁漫漫, 黄义德. 硫膜和树脂膜控释尿素对水稻产量、光合特性及氮肥利用率的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19: 808–815.
Li M, Guo X S, Ye S Y, Liu F, Yuan M M, Huang Y D. Effects of sulfur-and polymercoated controlled release urea on yield, photosynthetic characteristics and nitrogen fertilizer efficiency of rice. *Plant Nutr Fert Sci*, 2013, 19: 808–815 (in Chinese with English abstract).
- [7] 聂军, 肖剑, 戴平安, 郑圣先. 控释氮肥对水稻氮代谢关键酶活性及糙米蛋白质含量的影响. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29: 318–321.
Nie J, Xiao J, Dai P A, Zheng S X. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on key enzymes activities of nitrogen metabolism and protein contents in brown rice. *J Hunan Agric Univ (Nat Sci Edn)*, 2003, 29: 318–321 (in Chinese with English abstract).
- [8] 黄思怡, 田昌, 谢桂先, 欧震, 刘强, 彭建伟. 控释尿素减少双季稻田氮挥发的主要机理和适宜用量. 植物营养与肥料学报, 2019, 25: 2102–2112.
Huang S Y, Tian C, Xie G X, Ou Z, Liu Q, Peng J W. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields. *Plant Nutr Fert Sci*, 2019, 25: 2102–2112 (in Chinese with English abstract).
- [9] 田昌, 周旋, 黄思怡, 袁浩凌, 谢桂先, 刘强, 彭建伟. 控释尿素减施对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及经济效益的影响. 生态环境学报, 2019, 28: 2223–2230.
Tian C, Zhou X, Huang S Y, Yuan H L, Xie G X, Liu Q, Peng J W. Effects of controlled-release urea reduction on CH₄ and N₂O emissions and its economic benefits in double cropping paddy fields. *Ecol Environ Sci*, 2019, 28: 2223–2230 (in Chinese with English abstract).
- [10] Wang S Q, Zhao X, Xing G X, Yang Y C, Zhang M, Chen H K. Improving grain yield and reducing N loss using polymer-coated urea in southeast China. *Agron Sustain Dev*, 2015, 35: 1103–1115.
- [11] 杜君, 孙克刚, 张运红, 和爱玲, 孙克振. 控释尿素对水稻生理特性、氮肥利用率及土壤硝态氮含量的影响. 农业资源与环境学报, 2016, 33: 134–141.
Du J, Sun K G, Zhang Y H, He A L, Sun K Z. Effects of controlled release urea on physiological characteristics and nitrogen use efficiency of rice and NO₃⁻-N contents in soil. *J Agric Res Environ*, 2016, 33: 134–141 (in Chinese with English abstract).
- [12] 纪雄辉, 罗兰芳, 郑圣先. 控释肥料对提高水稻养分利用率和削减稻田土壤环境污染的作用. 磷肥与复肥, 2007, 22(2): 67–68.
Ji X H, Luo L F, Zheng S X. Effect of controlled release fertilizer

- on increasing rice nutrient use efficiency and minimizing environmental contamination of rice field. *Phos Comp Fert*, 2007, 22(2): 67–68 (in Chinese with English abstract).
- [13] 蒋曦龙, 陈宝成, 张民, 李成亮, 马丽, 陈剑秋. 控释肥氮素释放与水稻氮素吸收相关性研究. *水土保持学报*, 2014, 28: 215–220.
- Jiang X L, Chen B C, Zhang M, Li C L, Ma L, Chen J Q. Study on the correlation between nitrogen release dynamics of controlled-release fertilizer and nitrogen uptake of the rice. *J Soil Water Conserv*, 2014, 28: 215–220 (in Chinese with English abstract).
- [14] 侯红乾, 冀建华, 刘益仁, 黄永兰, 冯兆滨, 刘秀梅, 胡兆平, 韦礼和, 王子君. 缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响. *土壤*, 2018, 50: 43–50.
- Hou H Q, Ji J H, Liu Y R, Huang Y L, Feng Z B, Liu X M, Hu Z P, Wei L H, Wang Z J. Effects of slow/controlled-release fertilizer on grain yield, N uptake and soil N balance in double cropping rice. *Soils*, 2018, 50: 43–50 (in Chinese with English abstract).
- [15] 邓飞, 王丽, 刘利, 刘代银, 任万军, 杨文钰. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响. *作物学报*, 2012, 38: 1930–1942.
- Deng F, Wang L, Liu L, Liu D Y, Ren W J, Yang W Y. Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions. *Acta Agron Sin*, 2012, 38: 1930–1942 (in Chinese with English abstract).
- [16] 彭玉, 孙永健, 蒋明金, 徐徽, 秦俭, 杨志远, 马均. 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. *作物学报*, 2014, 40: 859–870.
- Peng Y, Sun Y J, Jiang M J, Xu H, Qin J, Yang Z Y, Ma J. Effects of water management and slow/controlled release nitrogen fertilizer on biomass and nitrogen accumulation, translocation, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 859–870 (in Chinese with English abstract).
- [17] Jiang L G, Dai T B, Jiang D, Cao W X, Gan X Q, Wei S Q. Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars. *Field Crops Res*, 2004, 88: 239–250.
- [18] 刘德林, 聂军, 肖剑. ^{15}N 标记水稻控释氮肥对提高氮素利用效率的研究. *激光生物学报*, 2002, 11(2): 87–92.
- Liu D L, Nie J, Xiao J. Study on ^{15}N labeled rice controlled release fertilizer in increasing nitrogen utilization efficiency. *Acta Laser Bio Sin*, 2002, 11(2): 87–92 (in Chinese with English abstract).
- [19] 郑圣先, 肖剑, 易国英. 淹水稻田土壤条件下包膜控释肥料养分释放的动力学与数学模拟. *磷肥与复肥*, 2005, 20(4): 8–11.
- Zheng S X, Xiao J, Yi G Y. Kinetics and mathematic simulation of nutrient release from coated controlled release fertilizer under the condition of flooded paddy soil. *Phos Comp Fert*, 2005, 20(4): 8–11 (in Chinese with English abstract).
- [20] 田昌, 周旋, 刘强, 谢桂先, 荣湘民, 张玉平, 黄思怡, 彭建伟. 控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响. *应用生态学报*, 2018, 29: 3267–3274.
- Tian C, Zhou X, Liu Q, Xie G X, Rong X M, Zhang Y P, Huang S Y, Peng J W. Effects of the reduction of controlled-release urea application on nitrogen leaching in double cropping paddy field. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29: 3267–3274 (in Chinese with English abstract).
- [21] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 崔振岭, 马文奇, 陈新平, 江荣风. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径. *土壤学报*, 2008, 45: 915–924.
- Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, Cui Z L, Ma W Q, Chen X P, Jiang R F. Nutrients use efficiencies of major cereal crops in china and measures for improvement. *Acta Pedol Sin*, 2008, 45: 915–924 (in Chinese with English abstract).
- [22] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 王宇, 汤文光. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24: 95–104.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, Zhou X, Wang Y, Tang W G. Effects of urease and nitrification inhibitor on yield, nitrogen efficiency and soil nitrogen balance under double-rice cropping system. *Plant Nutr Fert Sci*, 2018, 24: 95–104 (in Chinese with English abstract).
- [23] Zhou J B, Xi J G, Chen Z J, Li S X. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation: a soil column method. *Pedosphere*, 2006, 16: 245–252.
- [24] Ji X H, Zheng S X, Shi L H, Liu Z B. Systematic studies of nitrogen loss from paddy soils through leaching in the Dongting Lake area of China. *Pedosphere*, 2011, 21: 753–762.
- [25] 俞巧钢, 叶静, 杨梢娜, 符建荣, 马军伟, 孙万春, 姜丽娜, 王强, 汪建妹. 不同施氮量对单季稻养分吸收及氮挥发损失的影响. *中国水稻科学*, 2012, 26: 487–494.
- Yu Q G, Ye J, Yang S N, Fu J R, Ma J W, Sun W C, Jiang L N, Wang Q, Wang J M. Effects of different nitrogen application levels on rice nutrient uptake and ammonium volatilization. *Chin J Rice Sci*, 2012, 26: 487–494 (in Chinese with English abstract).
- [26] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 周兴, 谢坚, 汤文光, 杨曾平. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响. *水土保持学报*, 2016, 30: 155–161.
- Lu Y H, Nie J, Liao Y L, Zhou X, Xie J, Tang W G, Yang Z P. Effects of application reduction of controlled release nitrogen fertilizer on yield of double cropping rice and nitrogen uptake. *J Soil Water Conserv*, 2016, 30: 155–161 (in Chinese with English abstract).
- [27] Geng J B, Sun Y B, Zhang M, Li C L, Yang Y C, Liu Z G, Li S L. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system. *Field Crops Res*, 2015, 184: 65–73.
- [28] 田昌, 周旋, 谢桂先, 刘强, 荣湘民, 张玉平, 谭力彰, 彭建伟. 控释尿素减施对双季稻田径流氮素变化、损失及产量的影响. *水土保持学报*, 2018, 32(3): 21–28.
- Tian C, Zhou X, Xie G X, Liu Q, Rong X M, Zhang Y P, Tan L Z, Peng J W. Effects of controlled-release urea application on dynamics and loss of nitrogen in runoff and yield in double-rice cropping field. *J Soil Water Conserv*, 2018, 32(3): 21–28 (in Chinese with English abstract).