doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.033

沿江单季稻区控释掺混肥施用效应研究

花可可[1,2]　李蒙蒙[3]　钟成虎[4]　郭志彬[1,2]　王道中[1,2]

(1. 安徽省农业科学院土壤肥料研究所, 合肥 230031; 2. 养分循环与资源环境安徽省重点实验室, 合肥 230031;
3. 山东蓝普检测技术有限公司, 东营 257000; 4. 茂施农业科技有限公司, 青阳 242800)

摘要: 为探寻沿江单季稻区高效环保的施氮方式,进行了不同用量控释掺混肥田间试验,分析单季稻-休闲种植制度下不施肥(CK)、常规施肥(NPK,225 kg/hm^2)、控释等氮(CRF1)、控释减氮 15%(CRF2)和控释减氮 25%(CRF3)5 种施肥方式对水稻氮素吸收、氮肥利用率、土壤氨氧化菌和田面水氮的影响。结果表明,与 NPK 处理相比,CRF1、CRF2 和 CRF3 处理均不会造成水稻减产,其中 CRF2 处理水稻产量、植株地上部吸氮量、氮肥利用率和经济效益分别提高 7.4%、10.7%、43.4% 和 27.2%;氨氧化古菌(Ammonia-oxidizing archaea, AOA)是稻田土壤氨氧化菌的优势菌(占 73.5% ~88.4%),CRF1、CRF2 和 CRF3 处理分别较 NPK 处理使 AOA 的比例降低了 13.6%、9.9% 和 6.0%($p<0.05$),说明控释掺混肥可有效降低以 AOA 为主导的土壤氨氧化强度;与 NPK 处理相比,CRF2 和 CRF3 处理可显著降低田面水总氮含量(降低比例分别为 13.2% 和 24.9%)、可溶性总氮含量(10.6% 和 22.9%)和颗粒态氮含量(33.7% 和 40.6%)。总之,施用控释掺混肥可提高水稻产量、减弱土壤氨氧化强度、提高氮肥利用率和减少氮素流失风险,具有显著的经济和生态效益,其中以控释减氮 15%(190 kg/hm^2)效果最好,宜在沿江单季稻区广泛应用。

关键词: 单季稻; 氮肥利用率; 氨氧化微生物; 田面水氮; 控释掺混肥

中图分类号: S147.3; S511.4$^+$1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0314-10　　**OSID**:

Controlled Release Mixing Fertilizer Application Effect in Region of Single Cropping Rice along Yangtze Rriver

HUA Keke[1,2]　LI Mengmeng[3]　ZHONG Chenghu[4]　GUO Zhibin[1,2]　WANG Daozhong[1,2]

(1. *Institute of Soil and Fertilizer Research, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei* 230031, *China*
2. *Anhui Key Laboratory of Nutrient Cycling, Resources and Environment, Hefei* 230031, *China*
3. *Shandong LANPU Detection Technology Co., Ltd., Dongying* 257000, *China*
4. *Maoshi Agriculture Science and Technology Co., Ltd., Qingyang* 242800, *China*)

Abstract: Aiming to analyze crop nitrogen uptake, nitrogen utilize efficiency, soil ammonia-oxidizing mushroom and nitrogen concentration in surface water based on a fertilization field experiment to select an environmentally friendly nitrogen application practice in the area along Yangtze River. Five treatments were designed, including non fertilization (CK), traditional fertilization (NPK, 225 kg/hm^2), equivalent nitrogen (CRF1), reducing 15% nitrogen (CRF2), and reducing 25% nitrogen (CRF3) by controlled release mixing fertilizer. Results showed that there was no significant difference in the rice yield except for CRF2 among NPK, CRF1 and CRF2 treatments. Compared with NPK treatment, the values of crop nitrogen uptake, nitrogen utilize efficiency and direct economic benefit under CRF2 treatment were increased by 7.4%, 10.7%, 43.4% and 27.2%, respectively. Ammonia-oxidizing archaea (AOA) accounted for between 73.5% and 88.4% was the dominate mushroom in the paddy soil. Compared with NPK treatment, the ratios of AOA accounted for ammonia-oxidizing mushroom under CRF1, CRF2 and CRF3 treatments were significantly ($p<0.05$) increased by 13.6%, 9.9% and 6.0%, respectively. It was indicated that the intensity of soil ammonia-oxidizing process could be reduced. Compared with NPK treatment, the concentrations of total, dissolved and particulate nitrogen in

收稿日期: 2021-02-02　修回日期: 2021-03-31

基金项目: 安徽省科技重大专项(201903a06020028)和安徽省自然科学基金面上项目(2008085MD108)

作者简介: 花可可(1983—),男,副研究员,博士,主要从事农田碳氮磷物质循环过程与调控机制研究,E-mail: huakeke1220@126.com

通信作者: 王道中(1968—),男,研究员,主要从事土壤改良与养分资源高效利用研究,E-mail: wdzhong-3@163.com

surface water under CRF2 treatment were significantly decreased by 13.2%, 10.6% and 33.7%, respectively. The corresponding values under CRF3 treatment were 24.9%, 22.9% and 40.6%, respectively. In conclusion, our findings indicated that controlled release mixing fertilizer application, especially for reducing 15% nitrogen (190 kg/hm^2), was a prefer nitrogen management practice for maintaining rice yield, decreasing intensity of soil ammonia-oxidizing process, improving nitrogen efficiency and reducing the risk of agricultural non-point nitrogen pollution. Therefore, the practice should be recommended in the single cropping rice region down the Yangtze River.

Key words: single cropping rice; nitrogen utilize efficiency; ammonia-oxidizing microorganism; nitrogen in surface water; controlled release mixing fertilizer

0　引言

施氮对提高作物产量和保证粮食安全具有重要作用,但同时也引发了氮氧化物排放、氨挥发和硝酸盐淋失等一系列的氮污染问题[1]。我国氮肥总产量占全球的35%,由于氮肥施用不当而造成的活性氮污染问题日趋严峻[2-3]。一些典型水稻种植区域如巢湖、太湖等淡水湖先后出现了严重的富营养化现象[4]。面对提高水稻产量和防控氮素污染的双重压力,稻田施氮策略需充分考虑氮肥利用率提升和氮素损失环境风险防控[5]。由于稻田生态系统土壤在淹水状态下所形成的氧化还原层使稻田氮素转化过程具有其特殊性,其氮肥损失率可高达50%[6]。近年来,田面水氮素形态及浓度变化被广泛用于稻田施氮环境效应的评估,可有效反映施氮引发的农业非点源氮污染风险。因此,加强稻田氮素吸收利用和田面水氮的研究对农田氮素管理具有重要参考价值。

控释氮肥可实现肥料氮的释放曲线与作物需氮规律相吻合,从而降低农田氨挥发、氧化亚氮排放和硝酸盐淋失等损失,是提高作物氮肥利用率的一种有效手段[7-11]。郑圣先等[12]利用^{15}N标记的控释氮肥模拟试验表明,控释氮肥能明显降低氨挥发、氮淋失和硝化-反硝化的损失,控释氮肥处理的氨挥发量比尿素降低54.0%,氮淋失量降低32.5%。邬刚等[13]关于江淮丘陵区稻田田间氨挥发的研究表明,控释氮肥可减少氨挥发26.2%。徐明岗等[14]研究了我国红壤地区控释氮肥对双季稻氮肥利用率的影响,结果表明,控释氮肥利用率较常规尿素提高了20个百分点。此外,控释氮肥还可有效降低稻田田面水氮浓度,进而降低极端降雨情况下稻田地表径流氮流失的环境风险。目前,国内外学者关于控释氮肥对稻田氮损失过程、通量及田面水氮形态等进行了大量研究,但这类研究结论多基于控释氮为主的室内或田间试验所获得。实际上,控释氮肥价格远高于普通肥料,多用于科学研究,难以在大田作物上广泛应用。为降低控释肥的生产成本,大田作物上所用的控释肥多为控释掺混肥[15]。但目前关于控释掺混肥一次性施用对稻田氮素吸收利用、土壤氨氧化过程及其田面水氮素形态变化尚未进行系统研究,因此限制了人们对控释掺混肥施用下稻田氮循环过程的全面认知。

沿江地区是我国长江中下游的水稻主产区,也是水环境的敏感地区,该地区降雨丰富,且种植类型复杂多样,具有稻-麦、稻-油、稻-稻和稻-休闲等典型的种植制度。相关研究较多集中在控释氮肥对稻-麦和稻-油轮作制度下水稻氮素累积、氮肥利用率及氮平衡的影响等方面[16],而关于控释掺混肥施用下单季稻氮素吸收利用率、土壤氨氧化过程及田面水氮形态特征的研究极少,特别是从植株-土壤-水体的角度系统阐述控释掺混肥对单季稻氮素利用及其环境效应的影响研究尚未见报道。本文对沿江地区进行不同用量控释掺混肥的田间肥效试验,分析单季稻种植制度下作物氮素吸收累积、氮肥利用率、土壤氨氧化菌组成和田面水氮的变化特征,阐明控释掺混肥一次性施用对水稻氮素农学及环境效应的影响,为确定单季稻区环境友好的施氮方式提供理论基础和科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区域概况

试验区域位于长江下游南岸,安徽省池州市贵池区江镇梅里村,气候属亚热带季风性湿润气候区,年平均温度16.1℃,年平均日照时间为1 900 h,多年平均降雨量为1 500 mm,6月中旬至7月中旬是主要雨季,为“梅雨期”。平均无霜期242 d,作物种植方式为单季稻-休闲。土壤类型为水稻土,质地为中壤,0~20 cm土壤基本理化性质为:pH值(土质量与水体积比为1∶2.5)为6.4,有机质质量比20.4 g/kg,总氮质量比2.2 g/kg,有效磷质量比64.6 mg/kg,速效钾质量比286.3 mg/kg。

1.2　试验材料

供试的水稻品种为“昌两优8号”,普通复合肥配方为18 N-18 P_2O_5-18 K_2O,普通氮肥为尿素

(含 N 46.4%)。控释掺混肥由茂施农业科技有限公司提供,配方为 28 N-9 P_2O_5-13 K_2O,控释氮 13%,释放期 120 d,释放曲线为 S 型,控释氮包膜材料为植物油合成的聚氨酯。

1.3 试验设计

试验共设 5 个处理:不施任何肥料(CK)、常规施肥(NPK)、控释等氮(CRF1)、控释减氮 15%(CRF2)、控释减氮 25%(CRF3)。每个处理 3 次重复,小区面积为 30 m^2(6 m×5 m)。试验于 2020 年 6 月 20 日开始,10 月 9 日结束。单季稻试验于 2020 年 5 月 23 日播种育秧,6 月 20 日移栽人工插秧,行距和株距分别为 0.25 m 和 0.18 m,移栽密度为 22.2 万穴/hm^2,10 月 9 日收获。整个试验过程中所有处理的田间管理与当地农民习惯保持一致。根据当地农民施肥习惯,NPK 代表常规施肥水平,总氮用量为 225 kg/hm^2,P_2O_5 和 K_2O 用量均为 108 kg/hm^2,其中氮肥分 3 次施用,分别为基肥 108 kg/hm^2,分蘖肥 70.5 kg/hm^2,穗肥为 49.5 kg/hm^2。基肥为复合肥(18 N-18 P_2O_5-18 K_2O),追肥为尿素。CRF1、CRF2、CRF3 均为控释掺混肥一次性施用,总氮量分别为 225、191、169 kg/hm^2,对应控释肥料施用量分别为 810、690、600 kg/hm^2。各处理详细施肥信息见表 1。

表 1 各处理肥料施用量

Tab.1 Information of fertilizer application for all treatments

处理	肥料种类	总氮量/(kg·hm^{-2})	基肥肥料量/(kg·hm^{-2})	追肥肥料量/(kg·hm^{-2})
CK				
NPK	复合肥(基肥,18 N-18 P_2O_5-18 K_2O)、尿素(追肥)	225	600	259(分蘖肥和穗肥分别为 152、107,尿素)
CRF1	控释掺混肥(28 N-9 P_2O_5-13 K_2O)	225	810	
CRF2	控释掺混肥(28 N-9 P_2O_5-13 K_2O)	191	690	
CRF3	控释掺混肥(28 N-9 P_2O_5-13 K_2O)	169	600	

1.4 样品采集与分析方法

样品采集:在水稻试验开始前,以整个试验田块为采样单元,利用不锈钢土钻(直径 0.03 m),采用“S”形取样方法在试验田块内采集耕层(0~20 cm)土样,人工除去肉眼可见的根茬及秸秆碎屑,掰碎混匀风干过 2 mm 筛后,分别过 20 目和 100 目筛以测定不同指标。收获水稻后,以每个试验小区为采样单元,用不锈钢土钻进行“S”形多点采取耕层土样,混合均匀。土样采集完毕后,立即取新鲜土壤样品测定自然含水率和氨氧化微生物基因丰度,剩余的土壤样品室内自然风干过 2 mm 筛,混匀后备用;在水稻收获前 1 d 在每个小区随机选择 5 穴水稻,将水稻籽粒和茎秆分开后于 60℃干燥至质量恒定,称量,获取谷草比,并将干燥的籽粒和秸秆样品粉碎测定植株全氮含量;在水稻基肥施用后定期采集田面水,采样时间为施基肥后 1、5、9、24 d(09:00—11:00)。用 100 mL 医用注射器,不扰动土层,小心抽取 5 处田面水混合成一个水样,注入聚乙烯塑料瓶中。水样取回后立即测定,少量不能测定的,滴加浓硫酸并冰冻保存,7 d 内测样完毕。

分析方法:土壤、植株及田面水样品分析均参照鲁如坤[17]的方法。土壤 pH 值(土质量与水体积比为 1∶2.5)测定采用电位法、土壤有机质含量测定采用重铬酸钾外加热法、土壤全氮含量采用凯氏定氮法、有效磷含量采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法、速效钾含量采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定;植株全氮含量采用浓硫酸-双氧水消化,凯氏定氮法测定植株各部分氮含量;田面水总氮(Total nitrogen, TN)含量和经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后的可溶性总氮(Dissolved total nitrogen, DTN)含量用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法测定,颗粒态氮(Particulate nitrogen, PN)含量为二者的差值;水稻产量采用小区实打实收法,同时取样测定稻谷含水率,折算成干物质量。秸秆生物量根据实测的草谷比计算。

土壤脱氧核糖核酸(DNA)提取与实时荧光定量聚合酶链式反应(PCR)分析根据董成等[18]的分析方法,由上海美吉生物医药科技有限公司测试完成。具体步骤为:每个样品称取 0.5 g 土壤到 Lysing Matrix E Tube。按照 MP Biomedicals 公司 FastDNA SPIN Kit for Soil 试剂盒方法和步骤进行土壤总 DNA 提取。用核酸定量仪(NanoDrop 2000 型)检测 DNA 的纯度和浓度,用浓度为 1% 的琼脂糖凝胶电泳检测提取 DNA 的完整性。氨氧化古菌(Ammonia-oxidizing archaea, AOA)所用引物和扩增条件为 Arch-*amoA* F(STAATGGTCTGGCTTAGACG 序列,95℃,5 min;95℃,30 s)和 Arch-*amoA* R(GCGGCCATCCATCTGTATGT 序列,58℃,30 s,72℃,1 min,35 次循环)。氨氧化细菌(Ammonia-oxidizing bacteria, AOB)所用引物和扩增条件为 *amoA* - 1F(GGGGTTTCTACTGGTGGT 序列,95℃,5 min;95℃,30 s)和 *amoA* - 2R(CCCCTCKGSAA

AGCCTTCTT 序列，58℃，30 s，72℃，1 min，35 次循环）。

1.5 水稻氮肥利用率相关指标

水稻氮肥利用率相关指标[19]分别为：氮肥吸收利用率（Nitrogen recovery efficiency，NRE）为施氮区地上部分总吸氮量和无氮区地上部分总吸氮量差占施氮量百分比；氮肥农学利用率（Nitrogen agronomy efficiency，NAE）为施氮区籽粒产量和无氮区籽粒产量差与施氮量比值；植株氮素吸收效率（Nitrogen uptake efficiency by plant，NUP）为施氮区地上部氮吸收量占施氮量百分比；氮肥偏生产力（Partial factor productivity of nitrogen fertilizer，NPFP）为施氮区稻谷产量与施氮量比值。

1.6 数据分析

所有的测定结果用 Excel 2010 进行数据的初步整理和汇总，用 SPSS 19.0 进行统计分析，多重比较采用最小显著差异法（LSD）检验，显著水平 $p < 0.05$；用 Excel 2010 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 控释掺混肥对水稻产量及生物量的影响

由表 2 可知，与 CK 处理（7.3 t/hm^2）相比，NPK 处理显著增加水稻产量，比例为 47.4%，基础地力贡献率为 67.8%。控释掺混肥处理均不会造成水稻减产，但其对产量的影响因减氮量的不同而呈现差异。其中 CRF1 和 CRF3 处理水稻产量均为 10.7 t/hm^2，与 NPK 处理（10.8 t/hm^2）相比，无显著性差异，而 CRF2 处理产量最高（11.5 t/hm^2），增产 7.4%，差异显著（$p < 0.05$）；所有施肥处理秸秆生物量均显著高于不施肥处理 CK（$p < 0.05$）。控释掺混肥处理秸秆生物量与常规施肥处理为同一水平，无显著差异。结果说明，控释掺混肥对水稻产量有很好的作用效果，其中控释减氮 15% 处理效果最佳，而对秸秆生物量并无显著影响。

表 2　不同施肥处理对水稻籽粒和秸秆生物量的影响

Tab. 2　Effects of different fertilization treatments on biomass of grain and straw for rice

处理	籽粒		秸秆		植株（地上部分）	
	生物量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%	生物量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%	生物量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%
CK	7.3^{c}	−32.4	6.1^{b}	30.4	13.4^{b}	−33.0
NPK	10.8^{b}		9.2^{a}		20.0^{a}	
CRF1	10.7^{b}	−0.9	9.6^{a}	4.3	20.3^{a}	1.5
CRF2	11.5^{a}	7.4	9.2^{a}	0	20.7^{a}	3.5
CRF3	10.7^{b}	−0.9	9.4^{a}	2.2	20.1^{a}	0.5

注：数值为 3 个重复的平均值，不同小写字母表示处理间差异显著（$p < 0.05$），下同。

2.2 控释掺混肥对水稻吸氮量及氮素吸收利用率的影响

由表 3 可知，所有施肥处理籽粒、秸秆和植株吸氮量均显著高于 CK（$p < 0.05$），这表明施氮利于提高水稻对氮素的吸收积累。与 NPK 处理相比，除 CRF3，CRF1 和 CRF2 对秸秆氮吸收均有不同程度的提升。CRF1 处理秸秆吸氮量提高 36.0%，对籽粒吸氮量无显著影响。CRF2 处理籽粒和秸秆吸氮量分别提高 12.2% 和 6.9%，这说明施用控释掺混肥（等氮或减氮 15%）能够提高水稻对氮素的同化和吸收能力，有利于氮素的吸收累积。利用氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率、植株氮素吸收效率、氮肥偏生产力这 4 个指标可以从不同角度描述水稻对氮肥吸收和利用的程度。控释掺混肥处理均有利于提高水稻氮素利用率，其中 CRF2 整体效果优于 CRF1 和 CRF3（表 4）。与 NPK 处理相比，CRF1、CRF2 和 CRF3 处理 NRE 分别提高 20.4%、43.4% 和 24.8%，NAE 分别提高 −2.6%、41.3% 和 29.3%，NUP 分别提高 9.8%、28.8% 和 29.8%，NPFP 分别提高 0.6%、24.6% 和 31.9%，且 CRF1

表 3　不同施肥处理对水稻籽粒、秸秆和植株吸氮量的影响

Tab. 3　Effects of different fertilization treatments on nitrogen uptake of grain, straw and plant for rice

处理	籽粒		秸秆		植株（地上部分）	
	吸氮量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%	吸氮量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%	吸氮量/（kg·hm^{-2}）	较 NPK 增加比例/%
CK	71.6^{c}	−47.3	27.7^{c}	−50.5	99.3^{c}	−48.3
NPK	135.9^{b}		56.1^{b}		192.0^{b}	
CRF1	134.6^{b}	−1.0	76.2^{a}	36.0	210.9^{a}	9.9
CRF2	152.5^{a}	12.2	59.9^{b}	6.9	212.4^{a}	10.7
CRF3	133.1^{b}	−2.1	52.9^{b}	−5.7	186.0^{b}	−3.1

与 CRF2 间差异达显著水平($p<0.05$)。这说明控释减氮 15% 后提高了土壤持续供应氮素营养的能力,提高了水稻 NRE、NAE、NUP 和 NPFP,为氮肥的高产高效奠定了基础。

表 4 不同施肥处理对水稻氮素利用率的影响

Tab. 4 Effects of different fertilization treatments on nitrogen utilize efficiency for rice

处理	NRE/%	NAE/(kg·kg^{-1})	NUP/%	NPFP/(kg·kg^{-1})
NPK	41.2^{c}	15.5^{b}	85.3^{c}	48.0^{c}
CRF1	49.6^{b}	15.1^{b}	93.7^{b}	47.7^{c}
CRF2	59.1^{a}	21.9^{a}	109.9^{a}	59.8^{b}
CRF3	51.4^{b}	20.0^{a}	110.7^{a}	63.6^{a}

2.3 控释掺混肥对土壤氨氧化微生物基因丰度的影响

为描述稻田土壤氨氧化过程,本文利用定量 PCR 的方法测定土壤 AOA 和 AOB 基因丰度,以剖析土壤氨氧化微生物的组成特征。不同施肥处理土壤 AOA 和 AOB 基因丰度如图 1(图中不同小写字母表示处理间差异显著($p<0.05$),下同)和图 2 所示。与 CK 和 NPK 相比,除 CRF1 处理,CRF2 和 CRF3 处理均显著增加 AOA 的基因丰度。与 AOA 不同,AOB 对施氮量较为敏感,由大到小总体表现为 CRF2、CRF3、CRF1、NPK、CK。整体而言,稻田土壤氨氧化菌以 AOA 为主,所占比例为 73.5% ~ 88.4%(图 3),这说明本区域稻田土壤氨氧化微生物以氨氧化古菌为主,其所占土壤氨氧化菌总量的比例可能是决定氨氧化过程强度的重要因素。进一步分析表明,CK、NPK、CRF1、CRF2 和 CRF3 处理 AOA 占比分别为 88.4%、85.1%、73.5%、76.7% 和 80.2%。与 NPK 处理相比,CRF1、CRF2 和 CRF3 分别降低 13.6%、9.9% 和 6.0%,差异均达显著水平($p<0.05$),这表明虽然控释掺混肥处理 AOA 和 AOB 基因丰度均有所提升,但显著降低 AOA 的比例,削弱土壤的氨氧化过程,降低活性氮的损失,利于氮肥利用率的提升。

2.4 控释掺混肥对田面水不同形态氮含量的影响

田面水 TN、DTN 和 PN 含量变化如图 4 ~ 6 所示,可看出,除 CK 处理,NPK、CRF1、CRF2 和 CRF3 处理含量变化趋势基本一致,田面水 TN 含量随施肥时间产生剧烈变化,施基肥后第 1 天为含量最高值,第 5 天开始降低,第 9 天急剧降低然后在较低水平波动,DTN 和 PN 具有相似的变化趋势。田面水 TN 和 DTN 含量的下降与水稻生长对氮素的吸收利用、土壤颗粒吸附、氨挥发、氧化亚氮排放、径流和淋失有关,氮浓度下降的快慢取决于上述各因素的综合作用。整体而言,施肥后 1 ~ 5 d 内是控制氮素损失的关键时期,在该时期内降雨径流和农田排水等活动均可使大量的氮素迁移损失进入水环境,增加水环境污染的风险,因此,在稻田生育前期水分管理对氮素的损失至关重要。

CRF1、CRF2、CRF3 处理与 NPK 处理相比,田面水的 TN 平均含量分别降低 -4.5%、13.2% 和

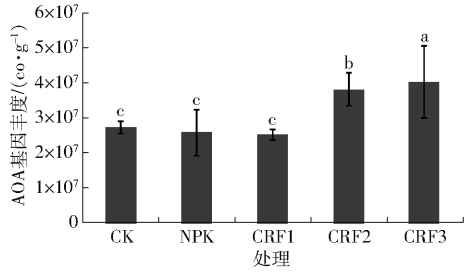

图 1 不同施肥处理对土壤 AOA 基因丰度的影响

Fig. 1 Effects of different fertilization treatments on gene abundances of AOA

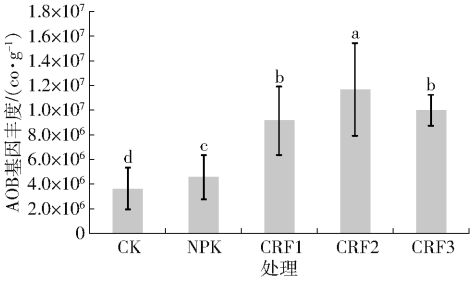

图 2 不同施肥处理对土壤 AOB 基因丰度的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on gene abundances of AOB

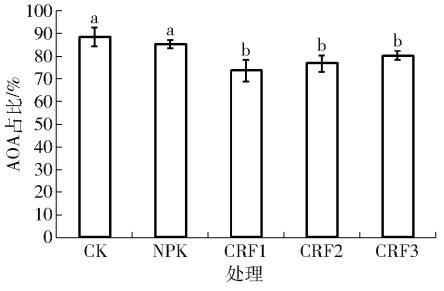

图 3 不同施肥处理 AOA 占氨氧化菌总量的比例

Fig. 3 Proportion of AOA accounted for ammonia-oxidizing mushroom under different fertilization treatments

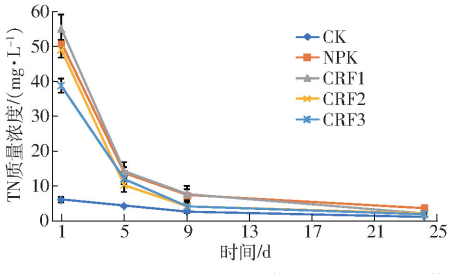

图 4 不同施肥处理的田面水 TN 含量变化曲线

Fig. 4 Dynamics curve of total nitrogen concentration in surface water under different fertilization treatments

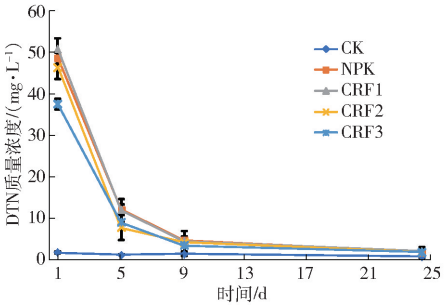

图 5　不同施肥处理的田面水 DTN 含量变化曲线

Fig. 5　Dynamics curve of dissolved nitrogen concentration in surface water under different fertilization treatments

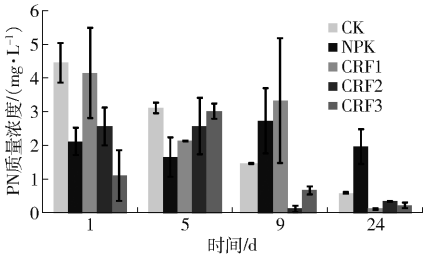

图 6　不同施肥处理的田面水 PN 含量变化

Fig. 6　Dynamics of particulate nitrogen concentration in surface water under different fertilization treatments

24.9%，DTN 平均含量分别降低 -3.3%、10.6% 和 22.9%，PN 平均含量分别降低 -14.6%、33.7% 和 40.6%，除 CRF1 处理外，CRF2 和 CRF3 均可显著降低田面水 TN、DTN 和 PN 含量，这说明控释等氮处理对田面水氮素控制效果欠佳，而控释减氮处理对稻田田面水氮浓度减控效果显著，可有效降低极端降雨事件下农业面源污染发生的风险，其中以减氮 25% 处理效果最好。进一步分析表明，不施肥处理稻田田面水氮素形态以颗粒态为主（占 62.3%），而施肥处理田面水氮素形态以可溶性为主（73.2% ~87.4%），且控释掺混肥施用还可显著提升可溶性氮占总氮的比例，CRF1、CRF2、CRF3 处理分别较 NPK 处理提升 12.2%、19.4% 和 17.2%（表 5），这可能有利于水稻对田面水溶解性氮的利用。

表 5　田面水 DTN 占 TN 的比例

Tab. 5　Proportion of dissolved nitrogen concentration accounted for total nitrogen in surface water　%

处理	时间				平均
	第 1 天	第 5 天	第 9 天	第 24 天	
CK	(27.0 ± 0.1)^{b}	(26.7 ± 0.7)^{c}	(46.0 ± 10.8)^{c}	(51.2 ± 14.9)^{c}	(37.7 ± 6.6)^{c}
NPK	(95.8 ± 0.9)^{a}	(87.8 ± 1.5)^{a}	(63.0 ± 4.1)^{b}	(46.4 ± 3.0)^{c}	(73.2 ± 1.9)^{b}
CRF1	(92.5 ± 1.9)^{a}	(84.9 ± 1.3)^{a}	(57.1 ± 11.4)^{b}	(94.0 ± 36.1)^{a}	(82.1 ± 6.0)^{a}
CRF2	(94.8 ± 1.4)^{a}	(74.9 ± 13.3)^{b}	(97.0 ± 24.5)^{a}	(82.9 ± 3.6)^{b}	(87.4 ± 10.7)^{a}
CRF3	(97.1 ± 1.8)^{a}	(74.7 ± 0.9)^{b}	(83.4 ± 16.8)^{a}	(87.9 ± 42.0)^{b}	(85.8 ± 5.7)^{a}

2.5　田面水氮素动态变化的模型表征

对施基肥后 24 d 内不同处理的田面水 TN、DTN 和 PN 含量随时间的变化趋势进行拟合，发现其最优回归方程均为

$$Y = C_0 e^{-kt}$$

式中　Y——氮含量　　C_0——反应常数

k——衰减速率　　t——时间

除 PN 外，TN 和 DTN 拟合结果均达显著水平（表 6）。从拟合方程可以看出，田面水 TN 和 DTN 含量在各种因素的共同作用下随时间呈指数递减。CRF1 和 CRF2 处理的 TN 含量反应常数 C_0 明显高于 NPK 处理，分别增加 9.6% 和 4.2%，DTN 含量反应常数 C_0 分别增加 6.0% 和 3.8%，而 CRF3 处理 TN 和 DTN 含量反应常数 C_0 分别较 NPK 处理降低 24.2% 和 52.0%。衰减速率 k 总体规律与反应常数 C_0 相似。

表 6　田面水 TN、DTN 和 PN 含量动态变化模型

Tab. 6　Dynamic models of total nitrogen, dissolved nitrogen and particulate nitrogen concentration in surface water

处理	TN			DTN			PN		
	拟合方程	相关系数	p	拟合方程	相关系数	p	拟合方程	相关系数	p
CK	$Y=6.54e^{-0.0850t}$	0.990 3	0.009 7	$Y=1.63e^{-0.0394t}$	0.943 9	0.049 0	$Y=5.04e^{-0.1130t}$	0.984 8	0.015 2
NPK	$Y=68.18e^{-0.2974t}$	0.991 7	0.008 3	$Y=68.09e^{-0.3352t}$	0.998 2	0.001 8	$Y=2.14e^{-0.0006t}$	0.028 8	0.971 2
CRF1	$Y=74.73e^{-0.3086t}$	0.995 0	0.005 0	$Y=72.13e^{-0.3482t}$	0.998 1	0.001 9	$Y=4.36e^{-0.0754t}$	0.863 1	0.136 9
CRF2	$Y=71.02e^{-0.3713t}$	0.997 2	0.002 8	$Y=70.66e^{-0.4201t}$	0.996 2	0.003 8	$Y=3.22e^{-0.1311t}$	0.832 1	0.167 9
CRF3	$Y=51.65e^{-0.2885t}$	0.997 9	0.002 1	$Y=52.97e^{-0.3437t}$	0.997 5	0.002 8	$Y=1.99e^{-0.0541t}$	0.526 7	0.473 3

2.6　控释掺混肥对经济效益的影响

表 7 为不同施肥方式下的水稻种植经济效应估算。单季稻种植方式下，虽然控释掺混肥成本高于普通复合肥和尿素，但控释掺混肥通过提高产量、减

少追肥人工足以弥补肥料成本劣势。2020 年当地稻谷收购价格为 2.2 元/kg,复合肥(18 N - 18 P_2O_5 - 18 K_2O)、尿素和控释掺混肥分别为 2.3、2.2、2.7 元/kg,当地人工成本为 1 500 元/hm^2,结合各施肥处理产量、施肥量和施肥次数,得出各施肥处理的经济效益。CRF1、CRF2 和 CRF3 处理分别较 NPK 处理相对收益增加 2 593.3、4 714.2、3 048.6 元/hm^2,增加比例分别为 15.0%、27.2% 和 17.6%(表 7),说明单季稻-休闲种植体系施用控释掺混肥能提高纯收入,其中以控施减氮 15% 处理最佳。

表 7 不同施肥处理对经济效益的影响

Tab.7 Effects of different fertilization treatments on economic benefit

处理	水稻产值/(元·hm^{-2})	肥料成本/(元·hm^{-2})	人工成本/(元·hm^{-2})	相对收益/(元·hm^{-2})	较 NPK 增加量/(元·hm^{-2})	较 NPK 增加比例/%
NPK	23 763.3	1 931.1	4 500.0	17 332.2		
CRF1	23 612.5	2 187.0	1 500.0	19 925.5	2 593.3	15.0
CRF2	25 405.4	1 859.0	1 500.0	22 046.4	4 714.2	27.2
CRF3	23 520.8	1 640.0	1 500.0	20 380.8	3 048.6	17.6

3 讨论

3.1 控释掺混肥提高水稻氮素利用率的机理

农田作物氮素利用率与土壤肥力水平、灌溉、耕作、轮作制度、施肥方式和肥料类型密切相关[3]。国内外大量研究表明,控释肥是提高作物氮肥利用率和氮肥减施增效的重要手段,主要因其可通过包膜技术来控制氮素向土壤中缓慢释放,延长作物对氮素吸收利用有效期,将其氮素释放速率与农作物生长规律相结合,达到安全、长效、高效等目的。本研究表明,施用聚氨酯包膜控释掺混肥处理可显著提升水稻地上部氮素累积量及氮肥吸收利用率,整体提升比例分别为 5.7% 和 29.5%,这与唐汉等[20]报道的结果类似。本试验点施用聚氨酯包膜控释掺混肥后,当季水稻氮肥吸收利用率平均值为 53.4%,这与吴萍萍等[21]对江淮地区水稻控释氮肥的研究结果较为一致(52.3%),但高于李敏等[16]对稻油轮作制下控释氮肥的研究结果(47.6%),这主要与土壤肥力状况和前茬种植的作物类型有关。

从机理上来说,控释氮肥一方面可有效地控制肥料中的氮素释放,实现氮素养分释放曲线与作物生长需氮规律相吻合,从而减少农田生态系统氨挥发、氧化亚氮排放和径流硝酸盐等活性氮的损失,提升氮肥利用率[22]。例如,邬刚等[13]研究表明,江淮丘陵区缓释尿素与普通尿素配施能显著降低稻田氨挥发。在相同施氮量下,较常规施肥模式,缓释尿素与普通尿素配施稻季氨挥发损失总量可降低 26.2%。另一方面由于控释肥中有包膜,特别是可降解的树脂类包膜的控释肥施入农田后,为土壤微生物提供了有效碳源,刺激微生物的生长,从而改变土壤氮循环微生物群落组成和结构。本研究表明,聚氨酯包膜控释掺混肥施用后土壤 AOA 和 AOB 基因丰富均显著高于常规施肥处理(图 1、2),主要因本控释肥的包膜材料为植物油基合成的聚氨酯,施入土壤后其可直接作为有效碳源被土壤氨氧化微生物利用,促进氨氧化微生物的生长繁殖。进一步分析发现,本试验稻田土壤氨氧化细菌群落以 AOA 为主,约占 80% 左右,说明本区域稻田土壤氨氧化过程以 AOA 为主导,这一结果与董成等[18]研究结果一致。此外,土壤氨氧化过程除与土壤 AOA 和 AOB 的基因丰度有关,还与二者的组成比例有密切关系。即仅仅对比基因丰度的变化不足以说明土壤氨氧化微生物对控释肥的响应机制,应密切关注土壤中 AOA 和 AOB 的群落结构变化对土壤氨氧化过程的影响。本试验中虽然控释掺混肥处理 AOA 和 AOB 基因丰度均有所提升,但显著降低 AOA 的比例(图 3),这表明控释肥施用后可能削弱了土壤的氨氧化过程,利于稻田土壤铵态氮的保持,降低土壤硝化和反硝化作用,减少活性氮损失,进而提升氮肥利用率。

整体而言,本研究植物油聚氨酯包膜控释掺混肥施用后,显著提高了水稻地上部氮素吸收和改变土壤氨氧化功能微生物的群落组成,提高水稻对氮素的累积和利用,对单季稻氮素利用率有显著的提升效果。由于农田生态系统氮素循环过程极为复杂,活性氮损失过程多样,影响氮肥利用率的因素较多,本试验仅从水稻氮素吸收和土壤氨氧化微生物的基因丰度及其组成比例的角度解释氮肥利用率具有一定局限性,今后还应加强土壤硝化潜势、土壤亚硝酸还原酶、氧化亚氮还原酶及土壤氨氧化微生物群落组成与氮肥利用率的定量耦合关系研究,以期更为清晰地解释植物油聚氨酯包膜控释掺混肥对稻田氮肥利用率的提升机理。

3.2 控释掺混肥对田面水氮形态及其流失风险的影响

田面水作为水稻与土壤间氮、磷等营养物质交

换的重要载体,其中的氮形态及含量与稻田氨挥发、氮随地表径流和淋溶损失直接相关[23],因此,研究稻田田面水氮含量变化,对于氮素损失,特别是农业非点源氮污染风险评估具有重要意义。王静等[19]研究表明,巢湖流域稻田田面水 TN 和 DTN 含量随施肥时间的动态变化特征符合指数模型,这与本文的研究结果类似(表 6),而 PN 无此规律,这可能与水稻生长主要吸收溶解性无机氮(铵态氮和硝态氮)有关。

大量研究表明,稻田田面水氮形态及含量受氮肥类型和施用量的双重影响[24]。从氮肥类型上看,控释肥等氮与常规施肥处理(225 kg/hm^2)相比,虽然在施用基肥后的第 1 天,田面水 TN、DTN 和 PN 含量均略高于常规氮肥处理,但从第 5 天开始,3 种氮形态的含量均低于常规施肥,整个观测期内(基肥施用后的 1 ~24 d)2 种施肥处理的氮素平均含量无显著差异。从施氮量上来说,本研究中控释减氮 15%(190 kg/hm^2)和减氮 25% 处理(170 kg/hm^2)均可显著降低田面水 TN、DTN 和 PN 含量(图 4 ~6),这与叶玉适等[25]研究结果相似。这说明通过控释肥一次性施用和氮肥减量措施减少了氮肥的投入量,提升水稻氮肥利用率,对稻田田面水氮素含量减控效果显著,并可有效降低农业非点源氮污染发生的风险。

全球气候持续变暖,极端降水和干旱等情况逐渐得到人们的关注[26]。有研究表明,加拿大、印度中部及加勒比海、美国和欧洲等地区的极端降水事件发生频次呈上升趋势[27],我国的极端降水变化态势与全球的态势基本一致,极端降水频数和强度增加的趋势较为明显[28-29]。王强等[24]研究表明,6—7 月是长江中下游地区单季稻的种植期,也是强降雨的频发期,该时间段农户常规种植中一般根据秧龄和气温确定水稻种植时间,对于施肥后是否会因为降雨产生氮素径流损失考虑较少。因此,根据区域降雨概率,合理安排基肥时间,首先应避开施肥后 5 d 内降雨概率较大的时间段,其次是通过调整施肥方式,采用水稻控释掺混肥减氮 15% ~25%(170 ~190 kg/hm^2)一次性施用的方法可有效地降低沿江单季稻区因氮素径流损失造成农业面源污染的风险。

3.3　施用控释掺混肥经济和生态效应评价

直接经济效应和生态效应评价被广泛用于评价农艺措施的推广应用前景[30]。控释肥一次性施用可保障作物产量,提高氮肥利用率,减少人工施肥的次数,增加直接经济收入[16,31-32]。本试验结果表明,控释肥处理(等氮、减氮 15% 和减氮 25%)较常规施肥相对收益分别增加 2 593.3、4 714.2、3 048.6 元/hm^2,直接经济收入增幅为 15.0%、27.2% 和 17.6%(表 7),其中控释减氮 15% 效果最好,说明本区域施用水稻植物油聚氨酯包膜控释肥,控释减氮 15% 不仅可以增加水稻产量,每公顷减少 34 kg 纯氮的投入,实现节本,还可以将氮肥利用率提高 19 个百分点,并有效降低田面水氮含量,降低农业非点源氮污染风险,利于水环境的保护,实现增效,具有显著的生态效益。

因此,在农业绿色可持续发展的大趋势下,在沿江单季稻区推广控施掺混肥减氮 15% 一次性施用技术模式符合国家和安徽省化肥减施增效的重大科技需求,实现节本增效,经济和生态环境保护的和谐统一。本试验的水稻种植方式为人工插秧,是本区域水稻种植的传统方式,今后应加强本区域稻田种肥同播关键技术的研发,减少育秧环节对人力物力资源的消耗,并探讨种肥同播关键技术模式下控释肥对水稻氮素利用效率和活性氮减排环境效应的影响,进一步发挥控释肥减施增效的潜能。

4　结论

(1)一次性施用控释掺混肥可有效提高单季稻氮素吸收量和氮肥利用率,其效果因施用量的不同而呈现差异。

(2)AOA 是单季稻土壤氨氧化菌的优势菌。控释掺混肥通过降低土壤 AOA 占比削弱土壤氨氧化过程,降低了活性氮损失,是提高氮肥利用率的重要微生物学机制。

(3)施肥后 5 d 内是稻田氮径流损失的高风险期。水稻一次性施用控释掺混肥减氮 15% ~25% 可有效降低沿江单季稻区农业面源污染发生的风险。

(4)综合考虑经济效益、氮肥利用率和田面水氮含量,控释掺混肥较普通复合肥在提高经济效益和生态效益(肥料减施和非点源氮污染防控)上均具有一定优势,节本增效,以控释减氮 15%(190 kg/hm^2)效果最好,宜在沿江单季稻区广泛应用。

参　考　文　献

[1]　GILES J. Nitrogen study fertilizes fears of pollution[J]. Nature,2005,433:791.

[2]　张福锁,崔振岭,王激清,等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. 植物学通报,2007,24(6):687-694.
ZHANG Fusuo, CUI Zhenling, WANG Jiqing, et al. Current status of soil and plant nutrient management in China and improvement strategies[J]. Chinese Bulletin of Botany,2007,24(6):687-694. (in Chinese)

[3] 蔡祖聪,颜晓元,朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报,2014,20(1):1-6.
CAI Zucong, YAN Xiaoyuan, ZHU Zhaoliang. A great challenge to solve nitrogen pollution from intensive agriculture[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(1): 1-6. (in Chinese)

[4] WANG J, LU G A, GUO X S, et al. Conservation tillage and optimized fertilization reduce winter runoff losses of nitrogen and phosphorus from farmland in the Chaohu Lake region, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101: 93-106.

[5] CHEN X P, CUI Z L, FAN M S, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514: 486-489.

[6] 朱兆良,金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(2):259-273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2013, 19(2): 259-273. (in Chinese)

[7] JI Y, LIU G, MA J, et al. Effect of controlled-release fertilizer on mitigation of N_2O emission from paddy field in South China: a multi-year field observation[J]. Plant Soil, 2013, 371(1): 473-486.

[8] KE J, HE R, HOU P, et al. Combined controlled-released nitrogen fertilizers and deep placement effects of N leaching, rice yield and N recovery in machine-transplanted rice[J]. Agricultural Ecosystems Environment, 2018, 265: 402-412.

[9] 张婧,李虎,朱国梁,等. 控释肥施用对土壤 N_2O 排放的影响——以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. 生态学报,2017,37(22):7624-7635.
ZHANG Jing, LI Hu, ZHU Guoliang, et al. Effect of controlled-release fertilization on nitrous oxide emission: a case study of a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(22): 7624-7635. (in Chinese)

[10] 黄思怡,田昌,谢桂先,等. 控释尿素减少双季稻田氨挥发的主要机理和适宜用量[J]. 植物营养与肥料学报,2019,25(12):2102-2112.
HUANG Siyi, TIAN Chang, XIE Guixian, et al. Mechanism and suitable application dosage of controlled-release urea effectively reducing ammonia volatilization in double-cropping paddy fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(12): 2102-2112. (in Chinese)

[11] 安文博,孙焱鑫,李占台,等. 不同缓控释肥对鲜食玉米产量、品质及氨挥发的影响[J]. 应用生态学报,2020,31(7):2422-2430.
AN Wenbo, SUN Yanxin, LI Zhantai, et al. Effects of different slow/controlled release fertilizers on yield, quality of fresh maize and ammonia emissions[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(7): 2422-2430. (in Chinese)

[12] 郑圣先,刘德林,聂军,等. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率[J]. 植物营养与肥料学报,2004,10(2):137-142.
ZHENG Shengxian, LIU Delin, NIE Jun, et al. Study on role of controlled release fertilizer in increasing the efficiency of nitrogen utilization and rice yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2004, 10(2): 137-142. (in Chinese)

[13] 邬刚,袁嫚嫚,曹哲伟,等. 江淮丘陵区不同氮肥管理模式下稻田氨挥发损失特征研究[J]. 水土保持学报,2017,31(4):286-331.
WU Gang, YUAN Manman, CAO Zhewei, et al. Study on the ammonia volatilization under different nitrogen schemes from paddy field in Jianghuai hilly region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(4): 286-331. (in Chinese)

[14] 徐明岗,李菊梅,李冬初,等. 控释氮肥对双季水稻生长及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(5):1010-1015.
XU Minggang, LI Jumei, LI Dongchu, et al. Effect of controlled-release nitrogen fertilizer on growth and fertilizer nitrogen use efficiency of double rice in Southern China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(5): 1010-1015. (in Chinese)

[15] 侯朋福,薛利祥,周玉玲,等. 掺混控释肥侧深施对稻田田面水氮素浓度的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(1):16-21.
HOU Pengfu, XUE Lixiang, ZHOU Yuling, et al. The effect of side deep fertilization for resin blending controlled-release fertilizer on nitrogen concentration in surface water of paddy field[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019(1): 16-21. (in Chinese)

[16] 李敏,武际,韩上,等. 稻油轮作制下控释氮肥的施用效应[J]. 植物营养与肥料学报,2018,24(1):105-113.
LI Min, WU Ji, HAN Shang, et al. Application effect of controlled-release nitrogen fertilizers under rice-rapeseed rotation systems[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 105-113. (in Chinese)

[17] 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,2000:13-52.

[18] 董成,陈智勇,谢迎新,等. 生物炭连续施用对农田土壤氮转化微生物及 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(19):4024-4034.
DONG Cheng, CHEN Zhiyong, XIE Yingxin, et al. Effects of successive biochar addition to soil on nitrogen functional microorganisms and nitrous oxide emission[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(19): 4024-4034. (in Chinese)

[19] 王静,王允青,张凤芝,等. 脲酶/硝化抑制剂对沿淮平原水稻产量、氮肥利用率及稻田氮素的影响[J]. 水土保持学报,2019,33(5):212-216.
WANG Jing, WANG Yunqing, ZHANG Fengzhi, et al. Effects of urease/nitrification inhibitors on yield and nitrogen utilization efficiency of rice and soil nitrogen of paddy field in plain along the Huaihe river[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 212-216. (in Chinese)

[20] 唐汉,王金武,徐常塑,等. 化肥减施增效关键技术研究进展分析[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(4):1-19.

TANG Han, WANG Jinwu, XU Changsu, et al. Research progress analysis on key technology of chemical fertilizer reduction and efficiency increase[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 1 - 19. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.001. (in Chinese)

[21] 吴萍萍,李录久,耿言安,等. 不同新型肥料对江淮地区水稻生长及氮素吸收利用的影响[J]. 中国土壤与肥料,2019(3):149 - 153.
WU Pingping, LI Lujiu, GENG Yan'an, et al. Effects of new-type fertilizers on rice growth, nitrogen uptake and utilization in Jianghuai region[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2019(3): 149 - 153. (in Chinese)

[22] SUN H F, ZHOU S, ZHANG J N. Effects of controlled-release fertilizer on rice grain yield, nitrogen use efficiency, and greenhouse gas emissions in a paddy field with straw incorporation[J]. Field Crops Research, 2020, 253: 107814.

[23] 蔡佳佩,朱坚,彭华,等. 有机肥施用对田面水氮磷流失风险的影响[J]. 环境科学研究,2020,33(1):211 - 217.
CAI Jiapei, ZHU Jian, PENG Hua, et al. Effects of organic fertilizer on the risk of nitrogen and phosphorus loss in soil surface water[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(1): 211 - 217. (in Chinese)

[24] 王强,姜丽娜,潘建清,等. 一次性施肥稻田田面水氮素变化特征和流失风险评估[J]. 农业环境科学学报,2019,38(1):174 - 181.
WANG Qiang, JIANG Li'na, PAN Jianqing, et al. Dynamic variation and runoff loss evaluation of nitrogen in the surface water of paddy fields as affected by single basal fertilizer application[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(1): 174 - 181. (in Chinese)

[25] 叶玉适,梁新强,金熠,等. 节水灌溉与控释肥施用对稻田田面水氮素变化及径流流失的影响[J]. 水土保持学报,2014,28(5):105 - 112.
YE Yushi, LIANG Xinqiang, JIN Yi, et al. Dynamic variation and runoff loss of nitrogen in surface water of paddy field as affected by water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 105 - 112. (in Chinese)

[26] ZHAI P M, ZHOU B Q, CHEN Y. A review of climate change attribution studies[J]. Journal of Meteorological Research, 2018, 32(5): 671 - 692.

[27] GOSWAMI B N, VENUGOPAL V, SENGUPTA D, et al. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment[J]. Science, 2006, 314(5804): 1442 - 1445.

[28] 王萃萃,翟盘茂. 中国大城市极端强降水事件变化的初步分析[J]. 气候与环境研究,2009,14(5):553 - 560.
WANG Cuicui, ZHAI Panmao. Changes of precipitation extremes in China's large cities[J]. Climatic and Environmental Research, 2009, 14(5): 553 - 560. (in Chinese)

[29] 车蕊,林澍,范中亚,等. 连续极端降雨对东江流域水质影响分析[J]. 环境科学,2019,40(10):4440 - 4449.
CHE Rui, LIN Shu, FAN Zhongya, et al. Effects of continuous extreme rainfall on water quality of the Dongjiang river basin[J]. Environmental Science, 2019, 40(10): 4440 - 4449. (in Chinese)

[30] 张鑫,李菁园,孟凡乔,等. 桓台县冬小麦和夏玉米秸秆长期还田的生态效益分析[J]. 生态学报,2020,40(12):4157 - 4168.
ZHAGN Xin, LI Qingyuan, MENG Fanqiao, et al. Ecological impacts of winter wheat and summer maize straw incorporation in Huantai County, Shandong Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 4157 - 4168. (in Chinese)

[31] 周昌明,李援农,陈朋朋. 一次性施肥模式对覆膜夏玉米产量与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(10):336 - 344.
ZHOU Changming, LI Yuannong, CHEN Pengpeng. Effects of single application of fertilizer on yield and nitrogen utilization of mulching summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 336 - 344. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20201037&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.037. (in Chinese)

[32] 银敏华,李援农,李昊,等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):129 - 138.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129 - 138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160617&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017. (in Chinese)