

2种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响

金丹丹¹, 宫亮¹, 李波¹, 曲航¹, 孙文涛¹, 张文忠²

(1.辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 沈阳 110161; 2.沈阳农业大学水稻研究所, 沈阳 110866)

摘要:为实现节本增效稻作,缓解大量、多次追肥引发不良环境效应,以中晚熟粳稻“盐丰47”为试材,设常规化肥、中科虹稳定性复合肥、炭基肥料3种处理及空白对照组,研究缓/控释肥对水稻生长发育、氮代谢酶活性及产量构成的影响。结果表明,施用2种新型肥料的产量与常规处理相比无显著差异。从产量构成来看,中科虹稳定性复合肥和常规化肥高产主要归因于较多的有效穗数,而炭基肥料依靠较高水平的穗粒数、结实率和千粒重维持产量;从氮代谢角度分析,2种新型肥料提高了齐穗期水稻功能叶硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、亚硝酸还原酶(NiR)活性及可溶性蛋白含量,而常规处理谷氨酰胺合成酶(GOGAT)活性显著高于其他处理和空白对照组。中科虹稳定性复合肥中硝化抑制剂、脲酶抑制剂等组分保证了较长的养分释放周期,改善了植株生长关键阶段氮代谢能力,特别是分蘖末期起保蘖增穗的作用;而炭基肥料中生物炭等有效组分增强了土壤养分固持能力,提高了可提取态养分含量及其有效性。因此,科学施用中科虹稳定性复合肥和炭基肥料可在稳产基础上减少化肥用量(较常规处理分别减少151.50、187.50 kg/hm²),对肥料投入较高的滨海盐碱地区发展绿色可持续农业具有应用价值。

关键词:水稻; 新型缓/控释肥; 滨海盐碱地; 产量; 氮代谢关键酶

中图分类号: S511

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0334-06

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.04.048

The Effects of Two Slow/Controlled Release Fertilizers on the Productivity and Nitrogen Metabolism of Rice in Coastal Saline-Alkaline Regions

JIN Dandan¹, GONG Liang¹, LI Bo¹, QU Hang¹, SUN Wentao¹, ZHANG Wenzhong²

(1. Plant Nutrition and Environmental Resources Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Science, Shenyang 110161; 2. Rice Research Institute of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866)

Abstract: In order to achieve cost-effective synergy as well as alleviate the adverse environmental effects caused by large and multiple topdressing, the mid-late-maturing *japonica* rice “Yanfeng 47” as test material was used in this research, three experimental groups (conventional fertilizer, Zhongkehong stable compound fertilizer, and carbon-based fertilizer) and a blank control group were established to study the growth and nitrogen metabolism of rice treated with slow/controlled release fertilizers as well as their effect on yield. The results showed that there is no significant difference in yield when comparing the two slow/controlled release fertilizers against conventional fertilizer. The high yields of the Zhongkehong stable compound fertilizer group and conventional fertilizer group could mainly be attributed to a larger number of effective panicles, while carbon-based fertilizers increased yield due to the higher numbers of grains, higher seed set rate, and higher 1 000-grain weight. As for nitrogen metabolism, the two slow/controlled release fertilizers increased the activities of nitrate reductase (NR), glutamine synthase (GS), nitrite reductase (NiR), and soluble protein content in functional rice leaves during the heading stage, while glutamate synthase (GOGAT) activity was significantly higher when using conventional fertilizer compared to all other groups. Zhongkehong stable compound fertilizer contained nitrification inhibitors, urease inhibitors and other components that ensure a longer nutrient release cycle and improve nitrogen metabolism capacity during key stages of plant growth, especially toward the end of the heading stage in order to preserve the stem and increase the number of

收稿日期: 2019-11-28

资助项目: 辽宁省博士科研启动基金项目(2019-BS-135); 国家重点研发计划专项(2018YFD0200200, 2018YFD0300300); 兴辽英才计划项目(XLYC1802044)

第一作者: 金丹丹(1985—), 女, 助理研究员, 主要从事水稻栽培生理与养分高效利用相关研究。E-mail: jdd851228@sina.cn

通信作者: 孙文涛(1969—), 男, 研究员, 主要从事土壤与肥料相关研究。E-mail: wentaosw@163.com

张文忠(1970—), 男, 教授, 主要从事水稻栽培生理生态相关研究。E-mail: zwzhong1@syau.edu.cn

panicles. Carbon-based fertilizers employed biochar and other functional groups to improve soil nutrient retention and improved the extractable nutrient content and its effectiveness. Because of this, a balanced usage of Zhongkehong stable compound fertilizer and carbon-based fertilizer could reduce the amount of chemical fertilizer during stable rice production (reduction of 151.50, 187.50 kg/hm² compared with conventional fertilizer) may have real-world value in the development of green sustainable agriculture cultivation in coastal saline-alkaline areas.

Keywords: rice; new slow/controlled release fertilizer; coastal saline-alkaline soil; yield; key enzymes of nitrogen metabolism

水稻是辽宁省第二大粮食作物, 种植面积约为 49.27 万 hm²[1]。特别是位于辽河三角洲中心地带的滨海盐碱稻区, 近 10 年种植面积平均为 24 万 hm²[2], 但氮肥施用量高达 260~280 kg/hm², 明显高于东北其他稻区, 氮肥利用率为 35% 左右, 远低于世界平均水平[3-5]。该地区盐渍化土壤及生产中大量投入化学氮肥的现状不但增加了生产成本, 还导致氮素流失、土壤养分失衡、水体污染等问题[6-7], 减产同时严重影响农田可持续利用[8]。为缓解盲目施肥引发不良环境效应, 减少稻田生态系统化肥投入和提高肥料利用率成为重要的农业和环境措施[9]。传统化肥利用率低, 施入土壤后极易挥发、淋溶及发生反硝化反应, 新型肥料的研发与应用成为重点发展趋势之一[10], 筛选适合滨海盐碱地区水稻生产的新型缓/控释肥对当地实现化肥减施增效、协调农业生产与环境之间的关系有深远意义。

新型缓/控释肥通过理化途径调控养分溶出速率, 根据作物各生育时期对营养物质的需求规律释放养分供其生长发育[11]。研究[12-13]发现, 一次性基施缓/控释肥料可显著提高水稻产量和氮肥利用率, 并减少农田氨挥发、氮素淋溶损失; 侯红乾等[14]通过 2 年田间定位试验发现, 在推荐施肥基础上减量 20% 施用缓/控释肥并不影响产量; 陈蕾等[15]认为, 水稻秸秆生物炭制成的炭基肥料具有固氮作用, 可削减稻田氮素的流失。植物对氮素的吸收利用效率与氮代谢密切相关, 而氮代谢途径需硝酸还原酶(NR)、谷氨酰胺合成酶(GS)、亚硝酸还原酶(NiR)和谷氨酸合成酶(GOGAT)等一系列氮代谢关键酶的参与, 并受环境、施肥措施等因素影响[16]。程金秋[17]研究发现, 缓/控释肥可提高水稻氮代谢酶和蛋白水解酶活性; 孙永健等[18]研究认为, 水氮对水稻氮代谢酶活性有显著互作效应, 并可用各生育时期功能叶 GS 活性评价植株氮素积累量, 用抽穗期剑叶各氮代谢酶活性综合评价产量及氮效率。此外, 可溶性蛋白是植物体内重要的有机渗透调节物质, 其含量高低与基础氮代谢密切相关[19]。

不同稻区种植品种、气候条件、土壤背景值及农艺制度差异较大, 有关新型肥料对水稻产量和氮肥利用

影响方面的研究应结合区域特性开展。滨海盐碱地区作为辽宁省水稻主产区和高肥区, 当前尚缺乏此方面的系统研究, 特别是从氮代谢角度解析缓/控释肥效应的研究更加少见。为此, 本研究以该地区主栽品种“盐丰 47”为试材, 选择中科虹稳定性复合肥和炭基肥料开展大田定位试验, 系统研究 2 种肥料对水稻产量形成和氮代谢酶活性的影响, 以期缓/控释肥的应用效果研究和因地制宜科学选用新型肥料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

滨海盐碱稻区位于辽河平原境内, 属温带半湿润季风气候类型。试验区土壤为盐渍型水稻土, 耕层土壤(0—20 cm)背景值为: pH 7.40, 有机质含量 26.47 g/kg, 全氮含量 1.55 g/kg, 速效氮含量 129.00 mg/kg, 全磷含量 1.34 g/kg, 有效磷含量 60.00 mg/kg, 全钾含量 25.20 g/kg, 有效钾含量 224.00 mg/kg。

1.2 试验设计

以中晚熟粳稻“盐丰 47”为材料, 分别于 2018 年和 2019 年 4—10 月在盘山县坝墙子农场(122°14'17" N, 41°09'31"E)开展大田试验。共设 4 种处理: (1) N1(常规化肥), 供试肥料为 46% 尿素、12% 过磷酸钙和 60% 氯化钾, 氮肥施用量为当地习惯施用量 260 kg/hm²(纯 N), 磷肥(P₂O₅)和钾肥(K₂O)施用量均为 90 kg/hm²; (2) N2(中国科学院研制的中科虹稳定性复合肥, 委托沈阳中科新型肥料有限公司生产, N、P₂O₅、K₂O 养分质量比为 26:10:12, 释放期 120 天); (3) N3(沈阳农业大学研制的炭基肥料, 委托沈阳隆泰生物工程有限公司生产, N、P₂O₅、K₂O 养分质量比为 24:8:10, 生物炭 10%, 含硅、钙、锌等); (4) N0(空白对照), 不施氮肥, 磷肥和钾肥施用量及施用方式与 N1 处理相同, N2、N3 处理肥料施用量均为 600 kg/hm²。N1 处理中氮肥分基肥、蘖肥和穗肥 3 次施入(4:3:3), 磷肥作为基肥一次性全量施入, 钾肥分基肥和穗肥 2 次等量施入, 中科虹复合肥和炭基肥料均作为基肥一次性施入。第 1 年试验于 2018 年 4 月 16 日育苗, 5 月 25 日移栽, 10 月 5 日

收获。第 2 年试验于 2019 年 4 月 18 日育苗,5 月 26 日移栽,10 月 9 日收获。每种处理 3 次重复,随机区组排列,各处理之间筑埂分隔(面积为 $25 \times 20 = 500 \text{ m}^2$),单独排灌。插秧苗龄为 3 叶 1 心期,行穴距为 $30 \text{ cm} \times 16.7 \text{ cm}$,每穴 3 株秧苗,田间管理措施与当地生产保持一致。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 茎蘖动态 每种处理定点选取有代表性的植株 10 穴,自移栽后 7 天开始,每隔 6 天调查 1 次茎蘖数,直到茎蘖数不再变化为止。

1.3.2 产量 于成熟期(2018 年 10 月 3 日和 2019 年 10 月 7 日)进行取样,每个小区收获 5 cm^2 (去除边行),脱粒后按照标准含水量(14%)计算产量。

1.3.3 产量构成 成熟期(2018 年 10 月 3 日和 2019 年 10 月 7 日)各处理选取 5 穴(3 次重复),按照标准含水量(14%)分别调查有效穗数、每粒数、结实率和千粒重。

1.3.4 可溶性蛋白含量 分别在齐穗期(2019 年 8 月 7 日)和灌浆期(2019 年 9 月 4 日)取剑叶,用液氮固定后置于超低温冰箱($-80 \text{ }^\circ\text{C}$)内保存待测,用 Modified Bradford 蛋白质浓度试剂盒测定可溶性蛋白含量,具体步骤参照 Bradford^[20] 的方法。每种处理 3 次重复。

1.3.5 氮代谢关键酶活性 分别在齐穗期(2019 年 8 月 7 日)和灌浆期(2019 年 9 月 4 日)取剑叶,液氮固定后置于超低温冰箱($-80 \text{ }^\circ\text{C}$)中保存待测, NR 和 GS 活性测定方法参照 Foyer 等^[21] 和 Hayakawa 等^[22] 的离体法, NiR 和 GOGAT 活性使用生化试剂盒测定,试剂盒购于苏州科铭生物技术有限公司,每种处理 3 次重复。

1.4 数据分析

采用 Microsoft excel 2010 进行数据整理及图表制作,采用 SPSS 21.0 (Chicago, USA) 软件进行方差分析及显著性检验,采用 Origin 8.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 试验区气候条件分析

2018 年和 2019 年 2 个生长季气象数据均来自盘山国家基本气象站(National Climatological Base Station of Panshan),数据真实可靠,可代表试验区气候特性。由图 1 可知,2 个生长季温差并不大,2018 年生长季总日照时间略高于 2019 年,尤其是齐穗期(7 月 25 日至 8 月 9 日)和灌浆中期(8 月 25 日至 9 月 9 日)较明显;而 2019 年生长季总降水量达 683.00 mm,比 2018 年高 256.30 mm,且主要集中在返青期(5 月 25 日至 6 月 9 日)、齐穗期(7 月 25 日至 8 月 9 日)和灌浆初期(8 月 10 日至 8 月 24 日)。

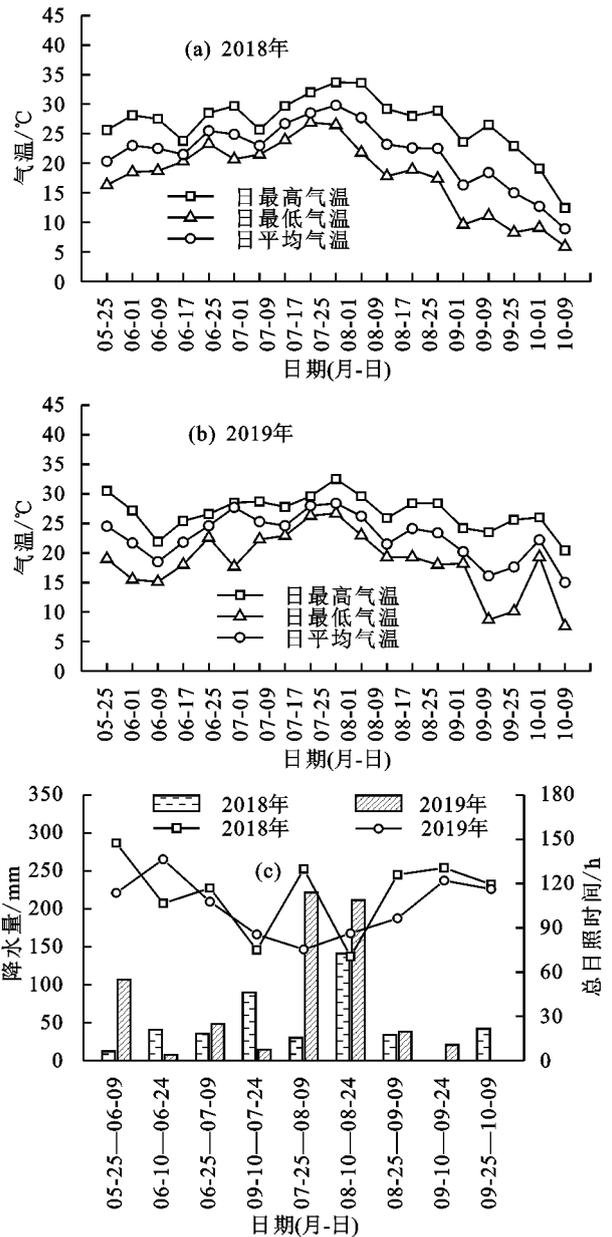


图 1 2018 年和 2019 年生育期试验区气温、降水量及日照时间

2.2 不同类型肥料对水稻茎蘖动态的影响

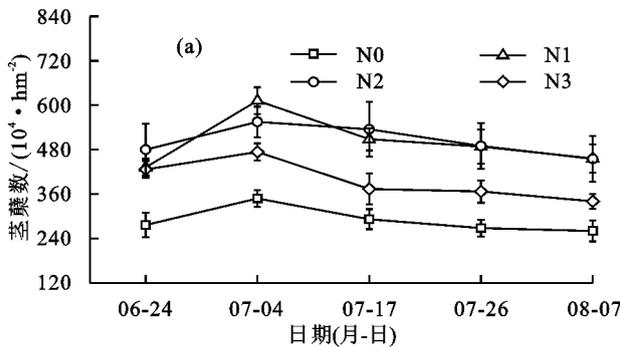
随着生育进程的推进,水稻茎蘖数均呈先增加后下降的单峰曲线趋势。分蘖初期,各处理茎蘖数基本一致(N0 除外),而 N1 处理的茎蘖数加速最快,N2、N3 次之,N0 最低,到 7 月 4 日茎蘖数达峰值,之后开始逐渐下降,直到齐穗期趋于平缓(图 2a)。由图 2b 可知,N1 和 N2 处理显著增加了水稻茎蘖数,保证了较多有效分蘖。处理之间的差异可能由肥料的组分、养分质量比及运筹模式不同导致。总体来看,中科虹稳定性复合肥可保证在肥料总量、次数减少前提下维持较多有效分蘖,具有保蘖增穗作用。

2.3 缓/控释肥对水稻氮代谢关键酶活性和可溶性蛋白含量的影响

由表 1 可知,不同生育时期氮代谢酶和可溶性蛋白的活跃程度不同,灌浆期水稻功能叶 NR、GS、NiR

和 GOGAT 较齐穗期分别下降 16.73%, 50.39%, 15.00% 和 5.87%, 而可溶性蛋白含量提高 61.82%, 即氮代谢酶在齐穗期活性较高, 而可溶性蛋白在灌浆期积累较多。从施肥处理来看, 齐穗期 N2、N3 处理在 NR、GS、NiR 及可溶性蛋白表现较大优势, 而 N1

处理 GOGAT 活性最高, 差异达显著水平; 灌浆期各处理组之间 NR、GS、NiR 和 GOGAT 活性差异不显著, 而 N2 处理可溶性蛋白含量低于其他处理。由此可见, 本研究中不同肥料对水稻氮代谢关键酶和可溶性蛋白的影响主要表现在齐穗期。



注: 图中不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

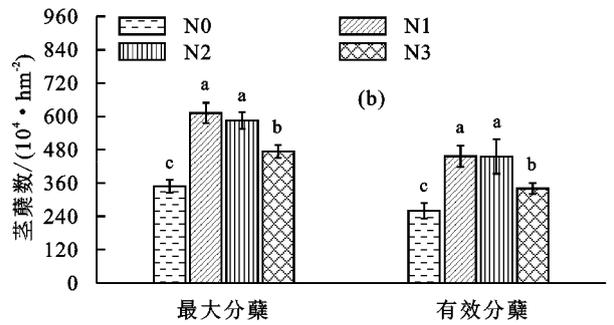


图 2 缓/控释肥料对水稻茎蘖数的影响

表 1 缓/控释肥对水稻功能叶氮代谢关键酶活性和可溶性蛋白含量的影响

生育期	处理	硝酸还原酶(NR)/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	谷氨酰胺合成酶(GS)/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	亚硝酸还原酶(NiR)/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	谷氨酸合成酶(GOGAT)/ ($\text{nmol} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)	可溶性蛋白/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{FW}$)
齐穗期	N0	10.85 ± 0.62c	15.73 ± 1.90b	16.01 ± 0.89c	33.26 ± 1.10c	47.31 ± 3.43b
	N1	12.99 ± 0.00b	16.47 ± 1.43b	19.42 ± 0.71b	50.28 ± 0.40a	48.60 ± 2.88b
	N2	15.96 ± 0.13a	20.96 ± 0.77a	21.04 ± 1.16ab	41.53 ± 2.04b	59.31 ± 0.37a
	N3	16.16 ± 0.98a	19.15 ± 0.94a	21.50 ± 0.82a	35.87 ± 1.10c	55.64 ± 5.59a
	均值	13.99 ± 0.43	18.08 ± 1.26	19.49 ± 0.90	40.24 ± 1.16	52.72 ± 12.27
灌浆期	N0	11.36 ± 0.65a	7.61 ± 0.72b	16.89 ± 0.69a	18.55 ± 0.63b	83.58 ± 2.96ab
	N1	11.72 ± 0.46a	9.65 ± 1.64ab	16.53 ± 0.22a	22.93 ± 1.25a	87.72 ± 0.10a
	N2	12.06 ± 0.01a	10.11 ± 0.76a	15.95 ± 0.89a	21.87 ± 1.70a	83.19 ± 1.05b
	N3	11.46 ± 0.23a	8.49 ± 0.07ab	16.35 ± 1.36a	23.78 ± 1.34a	86.76 ± 2.17ab
	均值	11.65 ± 0.34	8.97 ± 0.80	16.43 ± 0.79	21.78 ± 1.23	85.31 ± 1.57

注: 表中数据为平均值 ± 标准差; 不同小写字母表示各处理在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.4 缓/控释肥对水稻地上部生物量的影响

从图 3 可以看出, 不同肥料对水稻地上部生物量影响呈显著差异 ($P < 0.05$)。齐穗期总体表现为秸秆 > 籽粒, 而成熟期表现相反。齐穗期秸秆生物量以 N1、N2 处理最高, 分别为 6.20, 6.03 t/hm², 显著高于 N1、N3, 但此时期各处理籽粒生物量差异不显著

(图 3a)。成熟期 N2 处理秸秆生物量最高, N1、N3 次之, N0 最低 ($P < 0.05$), 而籽粒生物量最高为 N1、N2 处理, 分别为 14.52, 14.08 t/hm² ($P < 0.05$, 图 3b)。因此, 常规化肥和中科虹稳定性复合肥可显著增加水稻地上部生物量, 但二者对籽粒生物量的贡献无显著差异。

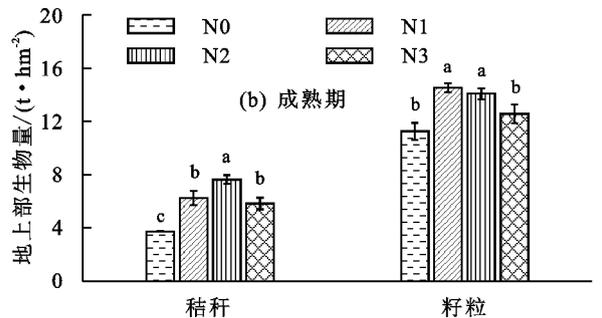
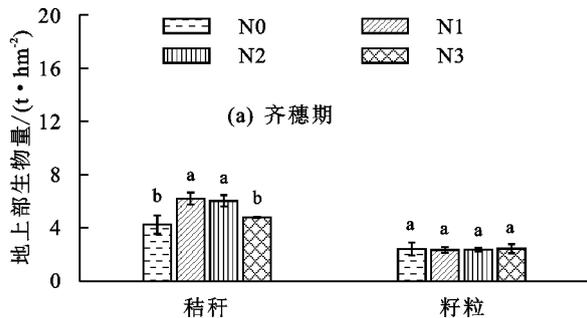


图 3 缓/控释肥料对水稻地上部生物量的影响

2.5 缓/控释肥对水稻产量及其构成的影响

由表 2 可知, 施肥可以显著提高水稻籽粒产量 ($P < 0.05$), 而 N1、N2 和 N3 产量无显著差异。不同施肥处理对产量构成影响不同, 且年际之间表现不

完全一致, 但 2 个生长季产量变化趋势相同, 显著高于 N0 处理。2018 年各处理有效穗数、穗粒数、结实率之间差异不显著, 而 N1 处理有效穗数显著高于 N2、N3; 2019 年 N1、N2 处理有效穗数显著高于 N3

和 N0, 而 N3 处理在穗粒数、结实率和千粒重均维持较高水平。

总体来看, N1、N2 处理高产主要归因于较多有效穗数, 而 N3 处理依靠穗粒数、结实率和千粒重维持

产量, 且补偿了有效穗数的不足。年际重复之间的差异可能由气候差异导致, 尤其是 2019 年生殖生长期降水较多(图 1), 推测不同肥料对温度、光照和降水等因素的响应存在差异。

表 2 缓/控释肥料对水稻产量及其构成因子的影响

年份	处理	有效穗数/ ($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	每穗 实粒数	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2018	N0	275.69±10.19b	85.25±8.16b	93.01±0.72a	28.45±0.92a	7.67±0.65b
	N1	356.85±4.72a	102.22±0.31ab	95.56±0.59a	28.27±0.61a	12.61±0.88a
	N2	360.18±18.87a	103.44±3.15a	92.77±1.41a	26.56±0.22b	12.32±0.81a
	N3	351.29±33.57a	98.50±10.13ab	93.16±1.89a	25.99±0.55b	11.31±0.99a
	均值	336.00±16.84	97.35±5.44	93.63±1.15	27.32±0.57	10.98±0.83
2019	N0	240.12±0.00b	100.71±4.65b	92.01±1.19b	28.16±0.51a	9.57±0.05b
	N1	450.23±14.15a	87.13±1.86c	89.79±0.25c	26.70±0.13b	12.09±0.41a
	N2	460.23±20.01a	93.47±3.91bc	91.11±1.23bc	26.51±0.31b	12.01±0.80a
	N3	246.79±11.55b	115.26±2.02a	94.70±0.25a	28.32±0.79a	11.32±0.28a
	均值	349.34±11.43	9.14±3.11	91.90±0.73	27.42±0.44	11.24±0.38

3 讨论与结论

传统氮肥活性高, 损失途径多, 磷肥和钾离子易被土壤固定或受径流、淋溶等影响, 加之我国化肥施用量居高不下, 造成肥料利用率低及环境负荷严重, 发展新型肥料对农业生产有重要意义^[23]。Wang 等^[24]通过 4 年大田定位试验发现, 控释尿素可促进植株对氮素的吸收, 从而增加有效穗数和单位面积实粒数。田昌等^[25]研究发现, 控释尿素减氮 20%~30% 能保证水稻稳产和较高的氮素收获指数; 侯红乾等^[26]研究认为, 缓/控释肥可通过增加植株吸氮量维持水稻产量, 当前生产情况下减量 20% 可同时保证较高的产量和氮肥利用率。本研究表明, N2、N3 处理养分含量(纯 N+P₂O₅+K₂O)较 N1 分别减少 151.50, 187.50 kg/hm², 且均为一次性基施, 同时减少了施肥总量和次数, 但二者产量与常规化肥相比无显著差异, 原因可能是缓/控释肥养分释放周期长, 可在生长关键阶段持续提供营养物质, 该结果与吴萍萍等^[27]报道一致。此外, 2 种肥料产量构成表现不同(表 2), N2 处理有效穗数显著高于 N3, 而 N3 在穗粒数、结实率和千粒重上维持较高水平($P < 0.05$), 此结果与前人^[24]研究不完全一致, 可能由于 N2、N3 组分释放特性不同导致。但本研究中 2 种新型肥料均通过增加植株吸氮量来维持水稻高产, 只是效应时期不同, 与过往研究^[24-26]结果类似。中科虹稳定性复合肥中氮、磷、钾含量均比后者高 12 kg/hm², 且肥效期在 120 天以上, 其养分供应可持续到生育后期, 保证较多有效分蘖的同时, 加速了灌浆期营养物质向籽粒库转运; 而炭基肥料中除含有氮、磷、钾外, 另含 12 kg/hm² 生物炭及少量硅、钙、锌, 生物炭的主要成分是有有机碳, 可提高土壤中提取态养分含量及其吸附能力, 减少铵盐、硝酸盐等淋失, 增强土壤氮素的有效性, 间接影响产量^[28-29]。本研究结果显示, N3 处理有效穗数显著低于其他处理, 可能由于组分中氮、

磷、钾含量相对低于 N1、N2 处理, 到分蘖末期养分释放效应未达高峰所致; 该肥料显著增加了穗粒数、结实率和千粒重, 推测生物炭表面疏松多孔的结构促进了土壤团聚体形成, 增强了生育中后期植株对营养物质的同化能力。

NR 是植物体内氮素同化的限速酶, 也是代谢系统中催化 NO₃⁻ 发生还原反应的第 1 个酶, 其活性与 NO₃⁻ 浓度有关^[23]; 植物吸收的硝酸盐先由 NR 还原成亚硝酸盐, 再被 NiR 还原成氨, 最终参与蛋白质合成, NR 和 NiR 在初级氮同化中起调控作用^[30]; GS 作为 NH₄⁺ 同化不可缺少的关键酶, 主要参与氨的初级同化和再同化, 将植物体内无机氮转化为有机氮; GOGAT 与 GS 协同构成 GS/GOGAT 途径, 催化 NH₄⁺ 同化反应, 此途径是整个氮代谢的中心, 植株体内的氮大多经此途径进行氮同化^[16]。初长江等^[31]在花生的研究中发现, 控释肥比普通无机肥更有利于生育后期氮素同化和蛋白质合成, 可以延缓根系和叶片衰老; 卫丽等^[32]研究认为, 控释肥能有效协调碳氮代谢, 并且提高叶片可溶性蛋白含量和 NR 活性。本研究中, 齐穗期 N2、N3 处理 NR、GS 和 NiR 活性显著高于 N1 处理, 该研究结果与前人^[31-32]研究相似, 推测中科虹稳定性复合肥中的硝化抑制剂可阻缓土壤中铵态氮转化为硝态氮的反应速度, 减少氮素的淋溶损失, 脲酶抑制剂可阻碍脲酶合成途径, 减少铵态氮挥发和硝化; 炭基肥料中含 10% 生物炭, 其较强吸附性提高了土壤对氮素的固持, 减少了铵盐、硝酸盐等淋失, 且硅、钙、锌可促进叶绿素和生长素合成, 改善植株碳、氮代谢。齐穗期 N1 处理显著提高了 GOGAT 活性, 可能与穗肥追施尿素有关, 并且 N2 处理显著高于 N3 处理, 推测由于中科虹稳定性复合肥中氮、磷、钾比例高于炭基肥料, 促进了 NH₄⁺ 的同化, 较长的肥效期增强了植株氮代谢能力, 加速

了氮素吸收和转化。此外,各处理在灌浆期氮代谢酶活性差异不大,说明影响氮代谢途径的主要时期为齐穗期,该研究结果与孙永健等^[18]报道一致。

由此可见,在肥料投入较高的滨海盐碱稻区,中科虹稳定性复合肥和炭基肥料均能在保证产量的基础上实现化学肥料的减施,可真正实现养分高效利用和节约生产成本,为该地区水稻稳产增效和发展环境友好型稻作提供材料基础。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2018.
- [2] 隋鑫,吕小红,付雪蛟,等.氮肥施入量对滨海盐碱地水稻生长发育及产量与光合效应的影响[J].江苏农业科学,2016,44(5):94-96.
- [3] 刘奕,王寅,李春林,等.吉林省中部一季稻区推荐施肥方法研究[J].水土保持学报,2018,32(4):273-278.
- [4] 姬景红,李玉影,刘双全,等.控释尿素对黑龙江地区水稻产量及氮肥利用率的影响[J].土壤通报,2018,49(4):876-881.
- [5] 宫亮,曲航,刘艳,等.辽河三角洲地区高产水稻氮肥投入阈值及利用率[J].中国土壤与肥料,2017(5):23-28.
- [6] Cameron K C, Di H J, Moir J L. Nitrogen losses from the soil /plant system: A review[J].Annals of Applied Biology,2013,162:145-173.
- [7] 朱海,杨劲松,姚荣江,等.有机无机配施对滨海盐渍农田土壤盐分及作物氮素利用的影响[J].中国生态农业学报,2019,27(3):441-450.
- [8] 潘圣刚,黄胜奇,翟晶,等.氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J].土壤,2012,44(1):23-29.
- [9] 段然,汤月丰,王亚男,等.不同施肥方法对双季稻区水稻产量及氮素流失的影响[J].中国生态农业学报,2017,25(12):1815-1822.
- [10] 武志杰,石元亮,李东坡,等.新型高效肥料研究展望[J].土壤与作物,2012,1(1):2-9.
- [11] Olad A, Zebhi H, Salari D, et al. Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil [J]. Materials Science and Engineering, 2018,90(1):333-340.
- [12] Wang B, Li Y E, Wan Y F, et al. Modifying nitrogen fertilizer practices can reduce greenhouse gas emissions from a Chinese double rice cropping system[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2016,215:100-109.
- [13] Ji Y, Liu G, Ma J, et al. Effects of urea and controlled release urea fertilizers on methane emission from paddy fields: A multi-year field study[J].Pedosphere,2014,24(5):662-673.
- [14] 侯红乾,黄永兰,冀建华,等.缓/控释肥对双季稻产量和氮素利用率的影响[J].中国水稻科学,2016,30(4):389-396.
- [15] 陈蕾,高山雪,Zhou G.施加炭基缓释肥对土壤氮素流失的影响[J].水土保持研究,2019,26(6):53-57.
- [16] 谷娇娇.盐胁迫对水稻氮代谢及产量的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2019.
- [17] 程金秋.缓控释肥类型及运筹对早熟晚粳水稻产量及稻米品质的影响[D].浙江 扬州:扬州大学,2018.
- [18] 孙永健,孙园园,李旭毅,等.水氮互作下水稻氮代谢关键酶活性与氮素利用的关系[J].作物学报,2009,35(11):2055-2063.
- [19] 沙汉景.水杨酸、脯氨酸和 γ -氨基丁酸对盐胁迫下水稻氮代谢及产质量的调控效应[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.
- [20] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein dye binding[J].Aaltical Biochemistry,1976,72(2):248-254.
- [21] Foyer C H, Valadier M H, Migge A, et al. Drought-induced effects on nitrate reductase activity and mRNA and on the coordination of nitrogen and carbon metabolism in maize leaves[J].Physiologia Plantarum,1998,117:293-292.
- [22] Hayakawa T T, Yamaya T, Mae T, et al. Changes in the content of two glutamate synthase proteins in spikelets of rice (*Oryza sativa* L.) Plants during Ripening[J].Plant Physiology,1993,101:1257-1262.
- [23] 赵秉强.传统化肥增效改性提升产品性能与功能[J].植物营养与肥料学报,2016,22(1):1-7.
- [24] Wang L, Xue C, Pan X, et al. Application of controlled-release urea enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in the Yangtze River Basin, China[J].Frontiers in Plant Science,2018,9:999-1012.
- [25] 田昌,周旋,刘强,等.控释尿素减施对双季稻田氮素渗漏淋失的影响[J].应用生态学报,2018,29(10):3267-3274.
- [26] 侯红乾,冀建华,刘益仁,等.缓/控释肥对双季稻产量、氮素吸收和平衡的影响[J].土壤,2018,50(1):43-50.
- [27] 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.
- [28] Laird D A, Brown R C, Amonette J E, et al. Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar[J].Biofuels Bioproducts and Biorefining,2009,3(5):547-562.
- [29] Kammann C I, Linsel S, Gobling J W, et al. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa*, Willd and on soil-plant relations[J].Biofuels Plant and Soil,2011,345(1):195-210.
- [30] Kyaing M S,顾立江,程红梅.植物中硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用[J].生物技术进展,2011,1(3):159-164.
- [31] 初长江,吴正锋,孙学武,等.控释肥对花生氮代谢相关酶活性的影响[J].花生学报,2017,46(2):32-39.
- [32] 卫丽,马超,黄晓书,等.控释肥对夏玉米碳、氮代谢的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):773-776.