

减量配施新型基质缓释肥对水稻产量及氮肥利用率的影响

杨 阳¹, 刘灿华², 葛树春², 李广斌³, 董守兵³, 冯梦喜⁴,
钟雯瑾⁴, 倪晓宇¹, 刘斌美¹, 林先贵⁵, 吴跃进^{1*}

(1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥 230031; 2. 河南省土壤肥料站, 郑州 450003; 3. 河南省信阳市平桥区农业技术推广站, 信阳 464100; 4. 河南心连心化学工业集团股份有限公司, 新乡 453731; 5. 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 为探究减量配施新型基质缓释肥对水稻 (*Oryza sativa* L.) 的影响, 通过两年田间试验研究了水稻籽粒产量及氮肥利用率的响应。两年平均结果显示, 与全量施用普通肥 (180 kg·hm⁻²) 相比: 全量施用缓释肥水稻增产 13.4% ($P < 0.05$), 植株氮吸收量提高 9.1% ($P < 0.05$), 氮肥农学效率提高 50.4% ($P < 0.05$), 氮肥表观利用率提高 37.8% ($P > 0.05$); 减量 10% 施用缓释肥水稻增产 9.6% ($P < 0.05$), 植株氮吸收量提高 3.3% ($P > 0.05$), 氮肥农学效率提高 51.1% ($P < 0.05$), 氮肥表观利用率提高 26.6% ($P > 0.05$); 而在减量 10% 施用缓释肥的同时以有机肥代替部分化肥, 水稻增产 11.1% ($P < 0.05$), 植株氮吸收量提高 7.3% ($P > 0.05$), 氮肥农学效率提高 57.6% ($P < 0.05$), 氮肥表观利用率提高 44.8% ($P < 0.05$)。缓释肥处理促进水稻增产增效的原因是其叶面积指数、叶绿素含量、净光合速率、硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性较高。综上, 基质缓释肥减量 10% 施用 (尤其在配施有机肥条件下) 可维持较高的水稻产量和氮肥利用率, 在水稻生产中具有应用前景。

关键词: 水稻; 施肥量; 光合; 氮肥利用率; 新型肥料

中图分类号: S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2020)03-0442-06

Effects of reduced application of novel matrix-based slow-release fertilizer on rice grain yield and nitrogen use efficiency

YANG Yang¹, LIU Canhua², GE Shuchun², LI Guangbin³, DONG Shoubing³, FENG Mengxi⁴,
ZHONG Wenjin⁴, NI Xiaoyu¹, LIU Binmei¹, LIN Xiangui⁵, WU Yuejin¹

(1. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031; 2. Henan Soil and Fertilizer Station, Zhengzhou 450003; 3. Pingqiao Agricultural Technology Extension Station, Xinyang 464100; 4. Henan Xinlianxin Chemical Industry Group Co., Ltd., Xinxiang 453731; 5. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: In order to elucidate the effects of reduced application of novel matrix-based slow-release fertilizer on rice (*Oryza sativa* L.), a two-year field experiment was conducted to determine the responses of rice grain yield and nitrogen use efficiency. The means from the two-year experiment showed that compared with 100%RF treatment (full application of regular fertilizer, 180 kg N·hm⁻²), 100%SF treatment (full application of slow-release fertilizer) increased rice grain yield by 13.4% ($P < 0.05$), plant N uptake by 9.1% ($P < 0.05$), agronomical efficiency by 50.4% ($P < 0.05$), and recovery efficiency by 37.8% ($P > 0.05$); 90%SF treatment (reduced application of slow-release fertilizer) increased rice grain yield by 9.6% ($P < 0.05$), plant N uptake by 3.3% ($P > 0.05$), agronomical efficiency by 51.1% ($P < 0.05$), and recovery efficiency by 26.6% ($P > 0.05$); while 90%SF+OF treatment (added organic fertilizer) increased rice grain yield by 11.1% ($P < 0.05$), plant N uptake by 7.3% ($P > 0.05$), agronomical efficiency by 57.6% ($P < 0.05$), and recovery efficiency by 44.8% ($P < 0.05$). In all the slow-release fertilizer treatments, the greater rice grain yield was largely due to higher leaf area index, chlorophyll concentration, net photosynthetic rate, nitrate reductase, and glutamine synthetase activity. Overall, matrix-based slow-release fertilizer can increase rice grain yield and nitrogen use efficiency, even if its application rate was reduced to 90% of full application rate (especially added

收稿日期: 2019-09-25

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0301302), 国家自然科学基金项目(31601828), 中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-STQ-QYZD-008; KFJ-STQ-ZDTP-054)和安徽省科技重大专项(18030701205)共同资助。

作者简介: 杨 阳, 博士, 副研究员。E-mail: yangyang19860207@163.com

* 通信作者: 吴跃进, 研究员。E-mail: yjwu@ipp.ac.cn

organic fertilizer). Therefore, it is a promising option for efficient rice production.

Key words: *Oryza sativa*; fertilizer application rate; photosynthesis; nitrogen use efficiency; novel fertilizer

我国水稻 (*Oryza sativa* L.) 种植面积占谷类粮食作物总播种面积的 30.5%, 水稻籽粒产量占谷类粮食作物总产量的 34.6% [1]。水稻生产对保障我国粮食安全具有重要意义。水稻生产在很大程度上依赖肥料投入 [2]。然而, 常规肥料养分释放快, 施用后易通过氨挥发、径流和淋溶等途径损失, 造成肥料资源浪费和环境污染 [3-5]。增加施肥次数、减少单次施肥量、提高施肥深度等措施可减轻水稻田养分损失 [6-7], 但受人力及机械条件制约尚难推广。缓释肥具有养分缓慢释放的特点, 在不额外增加人力和机械投入的前提下可减少养分损失、提高水稻生产力 [2,8]。不过, 多数缓释肥生产成本偏高, 限制了其在大田作物上的应用 [9]。为此, 低成本缓释肥逐渐成为新型肥料研究领域的热点 [10]。

基质缓释肥是近年来发展起来的一类新型肥料 [9,11]。该型肥料基于天然改性黏土矿物材料生产, 利用黏土矿物絮凝团聚效应在施肥区域形成微团聚体, 减少土壤养分释放孔隙, 减缓养分释放 [9]。相对于其他缓释材料, 黏土矿物材料成本低、环境安全性高 [9,12]。前期研究发现, 全量施用 (与常规肥等量) 基质缓释肥可明显提高水稻、玉米、小麦等作物的产量及氮肥利用率 [2,9,13]。由于缓释肥具有养分损失少、肥料利用率高的特点, 在合理减量施用的条件下, 有望实现减少化肥投入、维持作物丰产的目标 [14]。不过, 目前关于减量施用缓释肥的研究多集中在包膜肥等肥料类型 [14-15], 有关减量施用基质缓释肥对水稻产量及氮肥利用率的影响还缺乏研究。本研究通过 2 年田间试验, 探讨减量施用基质缓释肥对水稻产量及氮肥利用率的影响, 以期为指导基质缓释肥在水稻生产中的应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

于 2017 年 6 月 14 日—10 月 26 日和 2018 年 6 月 13 日—10 月 20 日两个水稻生长季, 实施田间试验。试验田位于河南省信阳市平桥区平昌关镇王畈村 (32°23' N, 113°53' E; 海拔 88 m)。在 2017 和 2018 年水稻生长期间, 日平均气温分别为 24.1 和 25.4 °C, 总降水量分别为 641.3 和 535.1 mm。耕层水稻土主要性状为: 有机碳 12.2 g·kg⁻¹, 全氮 1.07 g·kg⁻¹, 全磷 1.14 g·kg⁻¹, 全钾 14.7 g·kg⁻¹, 碱解氮 126.1 mg·kg⁻¹, 速效磷 17.4 mg·kg⁻¹, 速效钾 118.4

mg·kg⁻¹, pH (土:水, 1:2.5) 6.6。

1.2 试验材料

氮肥为普通尿素 (46.4% N) 和基质缓释尿素 (43.2% N), 磷肥为过磷酸钙 (16% P₂O₅), 钾肥为氯化钾 (59% K₂O), 均由河南心连心化学工业集团股份有限公司提供; 有机肥 (1.5% N, 1.5% P₂O₅, 1% K₂O, 40% 有机质) 由江苏亿海肥业有限公司提供。供试水稻为脆秆水稻‘科辐粳 7 号’ (*Oryza sativa* L. ‘Kefujing 7’), 该品种是研究区域近年来主推的高效水稻品种之一。

1.3 试验设计

包含 5 个处理: 无氮对照 (CK)、全量施用普通肥 (农民习惯, 100%RF)、全量施用缓释肥 (100%SF)、减量 10% 施用缓释肥 (90%SF)、减量 10% 施用缓释肥同时配施有机肥 (90%SF+OF)。小区按照随机区组设计, 重复 3 次。小区面积为 10 m×20 m, 在小区之间保留 0.5 m 宽的走道, 田埂埋设塑料薄膜 (深 40 cm) 防止小区间水分流动。所有处理磷和钾投入量一致, 均施用磷肥 (P₂O₅) 40 kg·hm⁻² 和钾肥 (K₂O) 80 kg·hm⁻² 作基肥。在 100%RF 和 100%SF 处理, 氮肥施用量均为 180 kg·hm⁻²; 在 90%SF 和 90%SF+OF 处理, 氮肥施用量均为 162 kg·hm⁻², 其中, 90%SF+OF 处理的氮、磷、钾施用量为缓释肥和有机肥 (1 500 kg·hm⁻², 作基肥) 中的氮、磷、钾总量。所有施氮处理中, 60% 氮肥做基肥, 40% 氮肥在分蘖期追肥。参照本地水稻种植习惯, 水稻栽植穴距 15 cm, 行距 15 cm, 每穴栽 2 株。水稻生长期间, 田面维持约 3~5 cm 水层, 在分蘖末期和黄熟期晒田。

1.4 样品采集与测定方法

在水稻抽穗期, 用叶绿素计 (日本 SPAD-502) 测定叶片 (剑叶) 叶绿素相对含量, 每小区随机测定 10 个数据求平均值。用光合分析系统 (美国 LI-6400) 测定叶片 (剑叶) 净光合速率, 每小区随机测定 5 个数据求平均值。于每小区随机采集 10 个叶片 (剑叶), 剪碎混匀, 用于测定叶片硝酸还原酶和谷氨酰胺合成酶活性 [16]。在水稻成熟期, 每小区随机采集 3 个 1 m×1 m 的样方, 按常规计产方法测算亩穗数、穗粒数、千粒重和生物学产量 [2]; 籽粒产量通过机械收获种植小区 (不含边行) 测算 [2]。对水稻植株样品, 用浓硫酸-过氧化氢消解法提取全氮 [17], 然后用全自动凯氏定氮仪 (瑞士 BUCHI) 测

定全氮含量。

1.5 计算与统计分析

植株氮吸收量、氮肥农学效率与表观利用率分别用如下公式计算^[18-19]：

$$\text{植株氮吸收量 (kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{)} = \text{植株干物质质量 (kg}\cdot\text{hm}^{-2}\text{)} \times \text{干物质全氮含量 (kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)}$$

$$\text{氮肥农学效率 (kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{)} = (\text{施氮处理籽粒产量} - \text{无氮对照籽粒产量}) / \text{施氮量}$$

$$\text{氮肥表观利用率 (\%)} = (\text{施氮处理植株氮吸收量} - \text{无氮对照植株氮吸收量}) / \text{施氮量} \times 100\%$$

用 SAS 9.1 统计分析软件的 ANOVA 过程对试验数据进行方差分析和 LSD 多重比较。

2 结果与分析

2.1 籽粒产量与生物学产量

与 CK 相比, 各施肥处理均显著提高籽粒和生

物学产量 ($P < 0.05$) (表 1)。与 100%RF 相比, 各缓释肥处理均有提高籽粒产量的趋势 (表 1): 两年平均值显示, 100%SF、90%SF 和 90%SF+OF 处理的水稻籽粒产量分别显著提高 13.4%、9.6%和 11.1% ($P < 0.05$)。与 100%RF 处理相比, 各缓释肥处理对生物学产量无显著影响 ($P > 0.05$)。与 100%SF 处理相比, 90%SF 处理有降低籽粒和生物学产量的趋势; 与 90%SF 处理相比, 90%SF+OF 处理有提高籽粒和生物学产量的趋势。

与 100%RF 处理相比, 各缓释肥处理均有提高亩穗数的趋势 (表 1): 两年平均值显示, 100%SF、90%SF 和 90%SF+OF 处理的亩穗数分别显著提高 15.0%、7.9%和 21.4% ($P < 0.05$)。与 100%RF 处理相比, 各缓释肥处理对穗粒数和千粒重无显著提高作用 (甚至有降低趋势)。上述结果表明, 缓释肥处理水稻增产的主要原因是提高亩穗数。

表 1 减量施用基质缓释肥对水稻籽粒产量和生物学产量的影响

Table 1 Effects of reduced application of matrix-based slow-release fertilizer on rice grain yield and biomass

年份 Year	处理 Treatment	亩穗数 / $\times 10^6 \cdot \text{hm}^{-2}$ Spike density	穗粒数 Grain number	千粒重/g Thousand grain weight	籽粒产量 /kg·hm ⁻² Grain yield	生物学产量 /kg·hm ⁻² Biomass
2017	CK	2.21±0.05 ^d	103.4±1.2 ^c	27.7±0.8 ^a	6 329±253 ^d	14 439±839 ^b
	100%RF	2.62±0.07 ^c	127.9±4.3 ^a	27.3±0.8 ^a	9 158±401 ^c	17 785±1 255 ^a
	100%SF	3.12±0.10 ^a	126.7±4.3 ^a	27.3±0.7 ^a	10 791±158 ^a	19 291±1 348 ^a
	90%SF	2.89±0.08 ^b	129.3±1.3 ^a	27.3±0.1 ^a	10 171±194 ^b	17 638±340 ^a
	90%SF+OF	3.11±0.06 ^a	120.4±1.8 ^b	27.2±0.5 ^a	10 196±518 ^{ab}	18 260±612 ^a
2018	CK	2.34±0.13 ^d	115.7±2.3 ^b	27.9±1.5 ^a	7 517±200 ^c	14 763±176 ^b
	100%RF	2.70±0.02 ^c	130.7±4.9 ^a	27.4±0.1 ^a	9 691±270 ^b	19 242±437 ^a
	100%SF	3.00±0.12 ^b	129.6±2.1 ^a	27.2±0.1 ^a	10 583±581 ^a	20 435±1 290 ^a
	90%SF	2.86±0.15 ^{bc}	133.6±3.2 ^a	27.5±0.4 ^a	10 483±505 ^{ab}	20 116±1 438 ^a
	90%SF+OF	3.35±0.06 ^a	118.4±4.1 ^b	27.1±0.8 ^a	10 746±549 ^a	20 973±1 344 ^a
两年平均 Mean of 2017&2018	CK	2.28±0.11 ^e	109.6±6.9 ^c	27.8±1.1 ^a	6 923±682 ^c	14 601±570 ^b
	100%RF	2.66±0.06 ^d	129.3±4.4 ^a	27.4±0.5 ^a	9 424±423 ^b	18 514±1 159 ^a
	100%SF	3.06±0.12 ^b	128.2±3.4 ^a	27.3±0.4 ^a	10 687±398 ^a	19 863±1 336 ^a
	90%SF	2.87±0.11 ^c	131.5±3.2 ^a	27.4±0.3 ^a	10 327±383 ^a	18 877±1 648 ^a
	90%SF+OF	3.23±0.14 ^a	119.4±3.0 ^b	27.1±0.6 ^a	10 471±564 ^a	19 616±1 755 ^a

注: CK 为无氮对照; 100%RF 为全量施用普通肥(农民习惯); 100%SF 为全量施用缓释肥; 90%SF 为减量 10%施用缓释肥; 90%SF+OF 为减量 10%施用缓释肥同时配施有机肥。同年同列带有不同字母的数值具有显著差异 ($P < 0.05$), 下同

Note: CK is the control test without N application; 100%RF is full application of regular fertilizer (as local farmers' practices); 100%SF is full application of slow-release fertilizer; 90%SF is reduced application of slow-release fertilizer (reduced by 10%); 90%SF+OF is reduced application of slow-release fertilizer (reduced by 10%) while added organic fertilizer. Means with no letter in common are significantly different ($P < 0.05$). The same below

2.2 植株氮吸收量、氮肥农学效率与表观利用率

与 CK 相比, 各施肥处理均显著提高植株氮吸收量 ($P < 0.05$) (表 2)。与 100%RF 处理相比, 各缓释肥处理均有提高植株氮吸收量、氮肥农学效率和表观利用率的趋势 (表 2): 两年平均值显示,

100%SF、90%SF 和 90%SF+OF 处理的植株氮吸收量分别提高 9.1% ($P < 0.05$)、3.3% ($P > 0.05$) 和 7.3% ($P > 0.05$), 氮肥农学效率分别显著提高 50.4%、51.1%和 57.6% ($P < 0.05$), 氮肥表观利用率分别提高 37.8% ($P > 0.05$)、26.6% ($P > 0.05$)

和 44.8% ($P < 0.05$)。与 100%SF 处理相比, 90%SF 处理对植株氮吸收量、氮肥农学效率和表观利用率无显著影响 ($P > 0.05$); 与 90%SF 处理相比,

90%SF+OF 处理有提高植株氮吸收量、氮肥农学效率和表观利用率的趋势, 但差异未达统计学显著水平 ($P > 0.05$)。

表 2 减量施用基质缓释肥对水稻植株氮吸收量、氮肥农学效率与表观利用率的影响

Table 2 Effects of reduced application of matrix-based slow-release fertilizer on rice N uptake, agronomical efficiency, and recovery efficiency

年份 Year	处理 Treatment	植株氮吸收量/kg·hm ⁻² Plant N uptake	氮肥农学效率/kg·kg ⁻¹ Agronomical efficiency	氮肥表观利用率/% Recovery efficiency
2017	CK	132.5±8.1 ^c	—	—
	100%RF	172.8±8.5 ^b	15.7±3.6 ^b	22.4±4.6 ^a
	100%SF	192.1±15.4 ^a	24.8±1.7 ^a	33.1±12.6 ^a
	90%SF	176.4±2.7 ^{ab}	23.7±2.1 ^a	27.1±5.3 ^a
	90%SF+OF	181.1±4.0 ^{ab}	23.9±1.9 ^a	30.0±5.1 ^a
2018	CK	140.2±0.7 ^b	—	—
	100%RF	186.7±4.4 ^a	12.1±2.0 ^b	25.8±2.8 ^a
	100%SF	200.2±18.4 ^a	17.0±2.9 ^{ab}	33.3±10.6 ^a
	90%SF	195.1±8.3 ^a	18.3±3.0 ^a	33.9±5.4 ^a
	90%SF+OF	204.5±19.7 ^a	19.9±2.7 ^a	39.7±12.5 ^a
两年平均 Mean of 2017&2018	CK	136.3±6.6 ^c	—	—
	100%RF	179.7±9.7 ^b	13.9±3.3 ^b	24.1±3.9 ^b
	100%SF	196.1±15.8 ^a	20.9±4.7 ^a	33.2±10.4 ^{ab}
	90%SF	185.7±11.7 ^{ab}	21.0±3.8 ^a	30.5±6.1 ^{ab}
	90%SF+OF	192.8±18.0 ^{ab}	21.9±3.0 ^a	34.9±10.1 ^a

表 3 减量施用基质缓释肥对抽穗期水稻叶面积指数、叶片 SPAD 与净光合速率的影响

Table 3 Effects of reduced application of matrix-based slow-release fertilizer on leaf area index, SPAD, and net photosynthetic rate at rice anthesis stage

年份 Year	处理 Treatment	叶面积指数 Leaf area index	叶片 SPAD Leaf SPAD	净光合速率/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ Net photosynthetic rate
2017	CK	3.65±0.05 ^c	36.57±0.51 ^c	15.43±0.85 ^b
	100%RF	5.34±0.19 ^b	42.34±1.72 ^b	21.67±0.25 ^a
	100%SF	5.68±0.18 ^a	46.78±1.83 ^a	22.45±0.53 ^a
	90%SF	5.41±0.20 ^b	45.66±2.21 ^a	22.33±0.33 ^a
	90%SF+OF	5.53±0.02 ^{ab}	46.13±0.84 ^a	22.42±0.57 ^a
2018	CK	3.89±0.13 ^b	38.73±1.68 ^c	17.12±0.80 ^b
	100%RF	5.15±0.27 ^a	41.60±0.23 ^b	23.65±1.15 ^a
	100%SF	5.34±0.10 ^a	44.13±1.49 ^a	24.62±1.20 ^a
	90%SF	5.27±0.17 ^a	42.97±0.79 ^{ab}	23.95±1.27 ^a
	90%SF+OF	5.37±0.16 ^a	43.87±1.46 ^{ab}	24.13±0.79 ^a
两年平均 Mean of 2017&2018	CK	3.77±0.16 ^c	37.65±1.62 ^c	16.28±1.18 ^b
	100%RF	5.25±0.23 ^b	41.97±1.17 ^b	22.66±1.31 ^a
	100%SF	5.51±0.23 ^a	45.46±2.08 ^a	23.54±1.45 ^a
	90%SF	5.34±0.18 ^{ab}	44.31±2.09 ^a	23.14±1.21 ^a
	90%SF+OF	5.45±0.13 ^{ab}	45.00±1.64 ^a	23.28±1.12 ^a

2.3 叶面积指数、叶片 SPAD 与净光合速率

与 CK 相比, 各施肥处理均显著提高抽穗期水稻叶面积指数(LAI)、叶片 SPAD 和净光合速率(P_n) ($P < 0.05$) (表 3)。与 100%RF 处理相比, 各缓释肥处理均有提高 LAI、SPAD 和 P_n 的趋势 (表 3), 两年平均值显示, 100%SF、90%SF 和 90%SF+OF 处理的 LAI 分别提高 5.0% ($P < 0.05$)、1.7% ($P >$

0.05) 和 3.8% ($P > 0.05$), SPAD 分别显著提高 8.3%、5.6%和 7.2% ($P < 0.05$), P_n 分别提高 3.9%、2.1%和 2.7% ($P > 0.05$)。与 100%SF 处理相比, 90%SF 处理有降低 LAI、SPAD 和 P_n 的趋势 ($P > 0.05$); 与 90%SF 处理相比, 90%SF+OF 处理有提高 LAI、SPAD 和 P_n 的趋势 ($P > 0.05$)。

表 4 减量施用基质缓释肥对抽穗期水稻叶片硝酸还原酶与谷氨酰胺合成酶活性的影响

Table 4 Effects of reduced application of matrix-based slow-release fertilizer on leaf nitrate reductase and glutamine synthetase activities at rice anthesis stage

年份 Year	处理 Treatment	硝酸还原酶活性/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ Nitrate reductase	谷氨酰胺合成酶活性/ $\text{A}_{540}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ Glutamine synthetase
2017	CK	5.87±0.10 ^b	3.75±0.07 ^c
	100%RF	9.45±0.09 ^a	4.33±0.05 ^b
	100%SF	9.88±0.28 ^a	4.76±0.11 ^a
	90%SF	9.53±0.26 ^a	4.41±0.08 ^b
	90%SF+OF	9.72±0.38 ^a	4.62±0.09 ^a
2018	CK	6.22±0.04 ^c	3.66±0.11 ^d
	100%RF	10.83±0.40 ^b	4.24±0.03 ^c
	100%SF	11.65±0.34 ^a	4.59±0.11 ^a
	90%SF	10.96±0.20 ^b	4.33±0.16 ^{bc}
	90%SF+OF	11.24±0.31 ^{ab}	4.48±0.09 ^{ab}
两年平均 Mean of 2017&2018	CK	6.05±0.20 ^b	3.71±0.09 ^c
	100%RF	10.14±0.80 ^a	4.29±0.06 ^b
	100%SF	10.77±1.01 ^a	4.68±0.13 ^a
	90%SF	10.25±0.81 ^a	4.37±0.12 ^b
	90%SF+OF	10.48±0.89 ^a	4.55±0.11 ^a

2.4 叶片硝酸还原酶与谷氨酰胺合成酶

与 CK 相比,各施肥处理均显著提高抽穗期水稻叶片硝酸还原酶(NR)和谷氨酰胺合成酶(GS)活性($P < 0.05$) (表 4)。与 100%RF 处理相比,各缓释肥处理均有提高 NR 和 GS 活性的趋势(表 4):两年平均值显示,100%SF、90%SF 和 90%SF+OF 处理的 NR 活性分别提高 6.2%、1.1%和 3.4% ($P > 0.05$),GS 活性分别提高 9.1% ($P < 0.05$)、1.9% ($P > 0.05$) 和 6.1% ($P < 0.05$)。与 100%SF 处理相比,90%SF 处理有降低 NR 和 GS 活性的趋势($P > 0.05$);与 90%SF 处理相比,90%SF+OF 处理有提高 NR ($P > 0.05$) 和 GS 活性 ($P < 0.05$) 的趋势。

3 讨论与结论

3.1 减量施用基质缓释肥对水稻产量和氮肥利用率的影响

与普通肥相比,缓释肥具有养分缓慢释放的特点,在施用后可减少养分损失、提高作物养分利用效率^[9,13]。在合理减量施用的情况下,缓释肥有望维持作物丰产高效^[14-15]。本研究探讨了减量施用新型基质缓释肥对水稻的影响,发现该缓释肥在减量 10%施用条件下,水稻籽粒产量和氮肥利用率均高于农民习惯施肥模式(全量施用普通肥),但相比全量施用缓释肥处理有下降趋势(氮肥农学效率除外)。该缓释肥在减量 10%施用条件下,如果以有机肥部分替代化肥,对水稻籽粒产量和氮肥利用率

有一定补偿效应。Yao 等^[20]、徐一兰等^[21]和杨清龙等^[22]研究也表明,通过有机无机肥配施可提高水稻、玉米等作物的籽粒产量和氮肥利用率。上述结果表明,基质缓释肥减量 10%施用(尤其配施有机肥)是促进水稻丰产增效的有效措施。

本研究还发现,基质缓释肥处理提高籽粒产量的主要原因是提高亩穗数,而非提高穗粒数和千粒重。该结果说明,基质缓释肥可调节水稻营养生长和前期生殖生长,提高有效分蘖数,增加亩穗数;不过,其在水稻生殖生长后期不能充分满足穗生长发育养分需求,因而穗粒数和千粒重没有明显提高(甚至有降低趋势)。穗粒数和千粒重也是决定水稻籽粒产量的重要因素^[2],因此,未来需要探究改善水稻生长后期养分供应的方法,为提升基质缓释肥对水稻的增产效果提供依据。

3.2 减量施用基质缓释肥对水稻叶片光合和氮素同化能力的影响

作物产量和氮肥利用率与叶片光合和氮素同化能力密切相关^[23-24]。在作物养分供应不足的情况下易出现光合和氮素同化能力下降的问题^[25-26]。本研究探讨了减量施用基质缓释肥对水稻光合和氮素同化相关形态生理特征的影响,发现该缓释肥在减量 10%施用条件下,水稻叶面积指数、叶片 SPAD 和净光合速率均高于农民习惯施肥模式(全量施用普通肥);而在减量施用条件下以有机肥部分替代化肥,对上述参数有增益效应。该结果为揭示减量施

用基质缓释肥促进水稻增产机制提供了一定依据。

硝酸还原酶 (NR) 和谷氨酰胺合成酶 (GS) 是植物氮素同化过程中的关键酶^[25]。本研究探讨了减量施用基质缓释肥对水稻叶片 NR 和 GS 活性的影响, 发现该缓释肥在减量 10% 施用条件下, 水稻叶片 NR 和 GS 活性均高于农民习惯施肥模式 (全量施用普通肥); 该缓释肥在减量 10% 施用条件下, 如果以有机肥部分替代化肥, 可进一步提高 NR 和 GS 活性。基质缓释肥提高 NR 和 GS 活性的主要原因可能是基质缓释肥具有养分缓释的特点^[9], 可延长养分有效期, 改善水稻施肥后期的氮素营养^[2], 对 NR 和 GS 可能产生刺激作用^[25]。基质缓释肥处理较高的 NR 和 GS 活性有利于水稻氮素同化, 这是其提高水稻氮肥利用率的重要原因。

综上, 减量 10% 施用基质缓释肥 (尤其配施有机肥) 可维持较高的水稻光合和氮素同化能力, 从而提高水稻籽粒产量和氮肥利用率, 可在水稻生产中应用。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [2] YANG, LIU B M, YU L X, et al. Nitrogen loss and rice profits with matrix-based slow-release urea[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2018, 110(2): 213-225.
- [3] YANG Y, NI X Y, LIU B M, et al. Measuring field ammonia emissions and canopy ammonia fluxes in agriculture using portable ammonia detector method[J]. *J Clean Prod*, 2019, 216: 542-551.
- [4] 晏娟, 方舒, 杨绳岩, 等. 巢湖地区水稻氮肥利用率和最大经济效益施氮量的研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(1): 105-109.
- [5] 杨阳, 李娜, 王林权, 等. 垄作对降低黄土高原南部冬小麦田氨挥发风险的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(3): 431-439.
- [6] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 优化施氮下稻-麦轮作体系氮肥氨挥发损失研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(1): 6-13.
- [7] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Urea deep placement for minimizing NH₃ loss in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crop Res*, 2018, 218: 254-266.
- [8] 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.
- [9] YANG Y, NI X Y, ZHOU Z J, et al. Performance of matrix-based slow-release urea in reducing nitrogen loss and improving maize yields and profits[J]. *Field Crop Res*, 2017, 212: 73-81.
- [10] NAZ M Y, SULAIMAN S A. Attributes of natural and synthetic materials pertaining to slow-release urea coating industry[J]. *Rev Chem Eng*, 2017, 33(3): 293-308.
- [11] 张晓冬, 史春余, 隋学艳, 等. 基质肥料缓释基质的筛选及其氮素释放规律[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 62-66.
- [12] NI X Y, WU Y J, WU Z Y, et al. A novel slow-release urea fertiliser: Physical and chemical analysis of its structure and study of its release mechanism[J]. *Biosyst Eng*, 2013, 115(3): 274-282.
- [13] YANG, YU L X, NI X Y, et al. Reducing nitrogen loss and increasing wheat profits with low-cost, matrix-based, slow-release urea[J]. *Agron J*, 2018, 110(1): 380-388.
- [14] 孙晓, 景建元, 吕慎强, 等. 不同缓/控释尿素在黄土台塬区春玉米的减量施用效果[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(6): 848-855.
- [15] GENG J B, SUN Y B, ZHANG M, et al. Long-term effects of controlled release urea application on crop yields and soil fertility under rice-oilseed rape rotation system[J]. *Field Crops Research*, 2015, 184: 65-73.
- [16] SINHA S K, RANI M, BANSAL N, et al. Nitrate starvation induced changes in root system architecture, carbon:nitrogen metabolism, and miRNA expression in nitrogen-responsive wheat genotypes[J]. *Appl Biochem Biotech*, 2015, 177(6): 1299-1312.
- [17] KALRA Y P. Handbook of Reference Methods for Plant Analysis[M]. Boca Raton: CRC Press, 1998, 75-102.
- [18] QIAO J, YANG L Z, YAN T M, et al. Rice dry matter and nitrogen accumulation, soil mineral N around root and N leaching, with increasing application rates of fertilizer[J]. *EUR J Agron*, 2013, 49: 93-103.
- [19] FAGERIA N K, MOREIRA A, MORAES L A, et al. Nitrogen uptake and use efficiency in upland rice under two nitrogen sources[J]. *Commun Soil Sci Plan*, 2014, 45(4): 461-469.
- [20] YAO Y L, ZHANG M, TIAN Y H, et al. Azolla biofertilizer for improving low nitrogen use efficiency in an intensive rice cropping system[J]. *Field Crops Research*, 2018, 216: 158-164.
- [21] 徐一兰, 唐海明, 程爱武, 等. 双季稻区长期不同施肥模式对水稻干物质积累及产量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(5): 674-680.
- [22] 杨清龙, 刘鹏, 董树亭, 等. 有机无机肥配施对夏玉米氮素气态损失及籽粒产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2476-2488.
- [23] THAKUR A K, MANDAL K G, MOHANTY R K, et al. Rice root growth, photosynthesis, yield and water productivity improvements through modifying cultivation practices and water management[J]. *AGR Water Manage*, 2018, 206: 67-77.
- [24] YIN X M, LUO W, WANG S W, et al. Effect of nitrogen starvation on the responses of two rice cultivars to nitrate uptake and utilization[J]. *Pedosphere*, 2014, 24(5): 690-698.
- [25] HOPKINS W G, HUNER N P A. Introduction to plant physiology[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009, 204-208.
- [26] 张木, 唐拴虎, 逢玉万, 等. 不同氮肥及施用方式对水稻养分吸收特征及产量形成的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2017 (2): 69-75.