

缓释肥对水稻生长特性、产量及干物质积累的影响

张宝龙¹ 何军^{1,2} 张艺¹ 汤驰³ 张宏涛³ 廖薇¹ 李飞⁴

(¹三峡大学水利与环境学院, 443002, 湖北宜昌; ²三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 443002, 湖北宜昌; ³湖北省漳河工程管理局, 448156, 湖北荆门; ⁴南水北调中线实业发展有限公司, 100038, 北京)

摘要 为探究缓释肥对水稻的增产潜力, 2020年在湖北漳河灌区选取常规稻品种(钻两优超占)和超级稻品种(Y两优957)为试验材料, 分别设置常规肥和缓释肥的处理, 开展了田间效果试验。结果表明, 缓释肥对超级稻和常规稻的株高、分蘖数、叶绿素、干物质积累、干物质净积累量和群体生长率皆有明显的促进作用。“超级稻+缓释肥”处理产量最高, 为8644.44 kg/hm²。单位面积穗数、每穗粒数和千粒重的增加是缓释肥作用下超级稻增产的主要原因, 而单位面积穗数的增加是缓释肥作用下常规稻增产的主要原因。施用缓释肥可以使水稻在中后生育期有更好的干物质积累优势, 增加了水稻分蘖后期至乳熟期的干物质积累量, 为水稻高产提供了物质基础。

关键词 超级稻; 缓释肥; 生长特性; 产量; 干物质积累

水稻是我国的主要粮食作物之一, 在保障国家粮食安全方面具有难以替代的作用。施肥是水稻高产不可或缺的重要环节, 相较于普通肥料, 缓释肥因具有养分缓释, 施用方便, 省工省力, 并可显著降低农业面源污染和提高肥料利用率等优点而得到广泛推广^[1-3]。施用缓释肥能有效提高水稻籽粒数量, 从而促进水稻增产^[4], 也能维持较高的氮肥利用率, 保证水稻的高产^[5]。

不同施肥类型对优质高产的超级稻品种生长发育的影响也不同。施用缓释肥可促进超级稻根系生长, 有利于有效分蘖数和叶绿素含量的增加, 增强了超级稻对养分的吸收转化能力^[6-7], 保障其高产。研究^[8]显示, 缓释肥施用下的双季超级稻的穗数会降低, 但每穗粒数和结实率的提高可使其增产。随着超级稻优质新品种的不断开发, 对不同施肥类型下超级稻高产潜力的研究迫在眉睫。加大超级稻的推广力度, 强化其栽培技术以充分释放超级稻的增产潜力, 对超级稻的发展具有重要意义^[9]。

基于以上情况, 本试验选取超级稻品种Y两优957, 在长江中游典型水稻种植区湖北省漳河灌区开展缓释肥对超级稻生长特性、产量及干物质积累影响的研究, 旨在为漳河灌区及类似区域超级稻高产栽培提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2020年5-9月在湖北省漳河灌区的湖北省灌溉试验中心站(112°05'16" E, 30°54'15" N)进行。该地区位于湖北省中部, 是典型的丘陵地带, 其气候为亚热带季风气候, 年无霜期260 d, 年均气温16℃, 最高月均气温27.7℃, 最低月均气温3.9℃, 年降水量700~1100 mm, 多年年均降水量947 mm, 年蒸发量1300~1800 mm。土壤以质地黏重的黄棕壤为主, pH 6.8~7.2(水土比1:1), 土壤孔隙率为45.5%, 容重1.33~1.44 g/cm³, 全氮0.03~0.17 g/kg, 全磷0.24~0.60 g/kg, 速效磷6.45~13.96 mg/kg, 其夏季农作物以水稻为主。

1.2 试验设计

采用二因素二水平随机区组试验设计, 大田育秧, 小区栽种(长6 m, 宽5 m), 共4个处理: 常规稻+常规肥(S1N1)、常规稻+缓释肥(S1N2)、超级稻+常规肥(S2N1)、超级稻+缓释肥(S2N2), 每个处理3次重复, 共计12个试验小区, 行间距25 cm×30 cm。常规稻(S1)采用当地当季大面积推广的钻两优超占, 于2020年6月1日移栽, 9月10日收获, 共102 d; 超级稻(S2)采用湖南袁创超级稻技术有限公司育成农业农村部认定的

作者简介: 张宝龙, 研究方向为节水灌溉理论与技术, E-mail: blong0515@163.com

何军为通信作者, 研究方向为节水灌溉理论与技术, E-mail: hejun50@163.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1508302); 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202207, HBSLKY202411)

收稿日期: 2023-06-08; 修回日期: 2023-07-26; 网络出版日期: 2024-08-23

2019 年超级稻新品种—Y 两优 957（审定编号：国审稻 20170035）^[10]，于 2020 年 6 月 1 日移栽，9 月 14 日收获，共 106 d。常规肥（N1）为传统氮、磷、钾肥，氮肥水平（以 N 计）为 180 kg/hm²，50%基肥、50%追肥，基肥在泡田整地时施入，追肥（分蘖肥）在移栽后 15 d 左右施入，基肥采用碳酸氢铵 NH₄HCO₃，追肥为尿素 CO(NH₂)₂；磷肥水平（以 P₂O₅ 计）为 72 kg/hm²，为过磷酸钙[主要成分为 Ca(H₂PO₄)₂·H₂O]；钾肥水平（以 K₂O 计）为 115 kg/hm²，为氯化钾（KCl）。磷肥、钾肥均作为底肥一次性施入。缓释肥（N2）的氮（N）、磷（P₂O₅）、钾（K₂O）有效含量及配比与常规肥（N1）一致，泡田时作底肥一次性施入。小区水分管理与当地常规管理保持一致。

1.3 测定项目与方法

每小区定苗 10 株，每 10 d 左右对水稻的株高、分蘖数和相对叶绿素含量（SPAD）进行一次测定。其中株高在抽穗前为水稻根茎部至叶顶的高度，在抽穗后为水稻根茎部至穗顶的高度。采用 SPAD-502Plus 叶绿素测定仪测取水稻顶部完全展开叶片的上、中、下 3 个叶位点的 SPAD。根据各生育期分蘖数平均值选择 3 株代表性植株，根、茎、叶、穗分离，烘箱杀青（105 °C，30 min），烘干（80 °C，24 h 直至恒重），称重，测定水稻干物质。水稻在黄熟期收割时取 3 穴考察其单位面积穗数、每穗粒数、千粒重、结实率并测产。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019、SPSS 25.0 和 Origin 2021 软件进行数据分析及制图。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻株高变化的影响

从图 1 可知，常规稻株高在 8 月 8 日前一直处于增长状态，且保持较高的增长率，在 8 月下旬达到最大值，S1N1 处理为 118.5 cm，S1N2 处理为 127.6 cm。超级稻品种植株较矮，其株高在 8 月 21 日前一直保持较高的增长率，在 8 月 21 日后增长率明显下降，在 9 月 14 日达到最大值，S2N1 处理为 100.5 cm，S2N2 处理为 120.9 cm。

相同品种的水稻在缓释肥作用下全生育期内的平均株高大于常规肥。S1N2 处理全生育期内的平均株高比 S1N1 处理高 11.1 cm；S2N2 处理全生育期内的平均株高比 S2N1 处理高 14.8 cm。表明

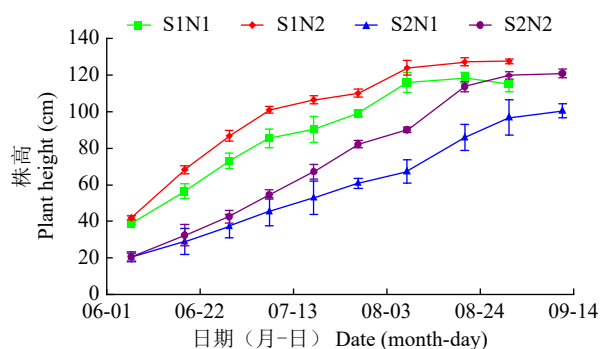


图 1 不同处理对水稻株高的影响

Fig.1 Effects of different treatments on plant height in rice

缓释肥对水稻株高生长有促进作用。

2.2 不同处理对水稻分蘖数变化的影响

从图 2 可知，水稻分蘖数随着生育期的推进整体呈现出先增后减的趋势。S1N2 处理比 S1N1 处理全生育期的平均分蘖数多 15.3%（2.2）；S2N2 处理比 S2N1 处理全生育期的平均分蘖数多 42.2%（3.6），表明缓释肥可以促进水稻分蘖，且对超级稻效果更为明显，也为水稻单位面积穗数的增加奠定了基础。

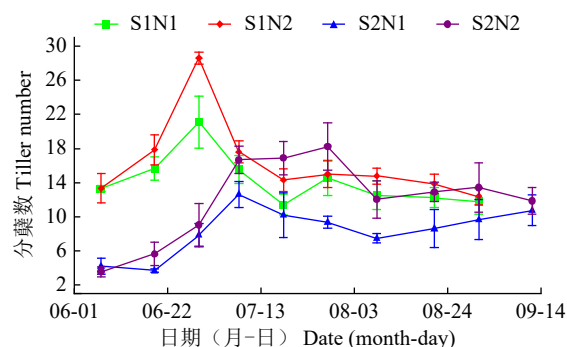


图 2 不同处理对水稻分蘖数的影响

Fig.2 Effects of different treatments on tiller number in rice

常规稻处理分蘖数峰值较高，4 种处理分蘖数峰值由高到低依次为 S1N2（28.6）、S1N1（21.1）、S2N2（18.2）、S2N1（12.6）。超级稻前期分蘖数较少，分蘖数峰值出现的时间相比于常规稻延迟，缓释肥作用下超级稻分蘖数峰值出现最晚。

2.3 不同处理对水稻叶绿素 SPAD 的影响

从图 3 可知，4 种处理的水稻叶绿素 SPAD 在后期均呈现出下降的趋势。相同品种水稻在缓释肥作用下的全生育期内的水稻 SPAD 相较于常规肥均能一直保持在较高的水平，S1N2 处理比 S1N1 处理水稻全生育期的 SPAD 均值高 10.3%；S2N2 处理比 S2N1 处理水稻全生育期的 SPAD 均值高 7.3%。全生育期内 S1N2 处理 SPAD 在 26.3~45.3，

S2N2 处理 SPAD 在 28.5~47.2。表明缓释肥养分释放平缓, 延缓了叶片衰老, 有利于水稻维持较强的光合作用。

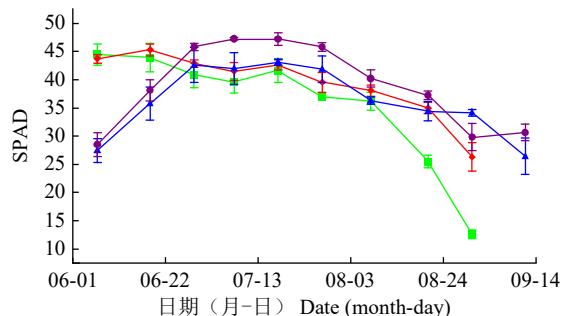


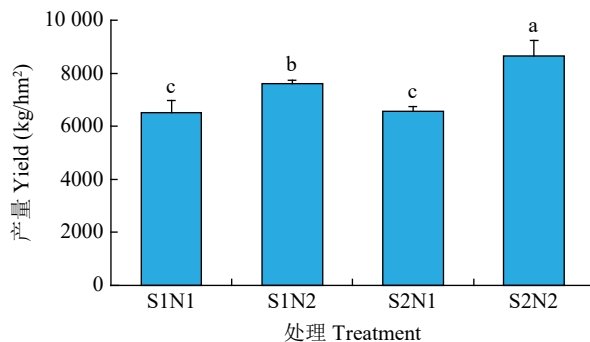
图 3 不同处理对水稻 SPAD 的影响

Fig.3 Effects of different treatments on SPAD in rice

2.4 不同处理对水稻产量的影响

由图 4 可知, 4 种处理下的产量表现为 S2N2 > S1N2 > S2N1 > S1N1, 其中 S2N2 处理水稻产量最高, 达到 8644.44 kg/hm²。由表 1 可知, S1N2 处理产量比 S1N1 增长了 17.0%, S2N2 处理产量比 S2N1 增长了 31.9%。表明缓释肥可以显著促进水稻增产。

S2N1 和 S2N2 处理之间仅在每穗粒数和产量上存在显著差异, S2N2 处理每穗粒数相比 S2N1



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P < 0.05$).

图 4 不同处理下水稻产量对比

Fig.4 Comparison of rice yields under different treatments

增加了 20.1%, 单位面积穗数增加了 11.0%, 千粒重增加了 1.5%, 表明缓释肥促进超级稻增产主要表现在增加每穗粒数、单位面积穗数和千粒重。S1N1 和 S1N2 处理之间仅在单位面积穗数和产量上存在显著差异, S1N2 处理单位面积穗数相比 S1N1 增加了 17.3%, 表明缓释肥促进常规稻增产主要表现在增加单位面积穗数。

从不同处理间显著性分析来看, 施肥类型对单位面积穗数有显著差异 ($P < 0.05$), 对产量有极显著差异 ($P < 0.01$)。缓释肥的施用促进了水稻

表 1 不同处理下水稻产量及其构成因素

Table 1 Yields and its components of rice under different treatments

处理 Treatment	单位面积穗数 Number of panicles per unit area ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	每穗粒数 Number of grains per panicle	千粒重 1000-grain weight (g)	结实率 Seed-setting rate (%)	产量 Yield (kg/hm ²)
S1N1	213.33±13.20b	176.87±17.99c	20.53±0.69a	84.31±1.41a	6509.31±454.70c
S1N2	250.33±13.61a	175.93±3.64c	20.01±0.79a	86.55±2.65a	7613.67±134.69b
S2N1	192.22±22.37b	229.33±21.09b	16.07±0.40b	93.14±1.00a	6552.91±199.40c
S2N2	213.33±16.52b	274.93±6.65a	16.31±0.20b	90.72±8.47a	8644.44±597.53a
水稻品种 Rice variety	9.010*	82.316**	153.278**	6.198*	5.570*
施肥类型 Fertilization type	8.805*	7.033*	0.193	0.001	49.286**
水稻品种×施肥类型 Rice variety×Fertilization type	0.706	7.682*	1.317	0.799	4.703

“**”、“*” 分别表示处理在 $P < 0.01$ 、 $P < 0.05$ 水平上差异显著; 同列数据后不同小写字母表示处理在 $P < 0.05$ 水平下存在显著差异。下同。“**”, “*” indicate that the treatment is significantly different at the level of $P < 0.01$ and $P < 0.05$, respectively; Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level. The same below.

单位面积穗数的增加, 从而促进水稻增产。

2.5 不同处理对水稻干物质积累的影响

由表 2 可知, 不同施肥类型对水稻拔节孕穗期和乳熟期的干物质积累量均有显著影响, 表明缓释肥对水稻干物质积累的促进作用在拔节孕穗期和乳熟期较为明显。常规稻干物质积累量在乳熟期达到峰值, 其中 S1N2 处理高于 S1N1 处理, 为 14 241.82 kg/hm², 在黄熟期略有下降; 超级稻干物质积累量在黄熟期达到峰值。S2N2 处理的干物质

积累量峰值最大, 为 19 025.29 kg/hm², 表明缓释肥可以明显提高超级稻的干物质积累。S1N2 处理的全生育期干物质积累量比 S1N1 处理平均高 18.9%, S2N2 处理的全生育期干物质积累量比 S2N1 处理平均高 13.9%, 表明缓释肥可促进水稻干物质积累。

图 5 直观地反映出水稻全生育期干物质积累动态, 不同处理的水稻在干物质积累上均呈现出前期 (返青期、分蘖前期、分蘖后期) 慢, 中期 (拔节

表 2 不同处理下水稻全生育期干物质积累量
Table 2 Dry matter accumulation during the whole growth period of rice under different treatments kg/hm²

处理 Treatment	干物质积累量 Dry matter accumulation						
	返青期 Regreening stage	分蘖前期 Early tillering stage	分蘖后期 Late tillering stage	拔节孕穗期 Jointing-booting stage	抽穗开花期 Heading and flowering stage	乳熟期 Milk ripening stage	黄熟期 Yellow ripening stage
S1N1	299.11a	1581.50a	3437.93a	4983.83b	8936.10b	11 862.85b	11 407.06b
S1N2	304.89a	1790.50a	3892.47a	6924.76a	9933.85a	14 241.82a	13 448.28b
S2N1	86.67b	714.24b	1386.90b	5871.10ab	9096.09ab	10 429.42c	16 010.49ab
S2N2	111.33b	674.09b	1532.30b	6841.91a	9861.36a	11 613.20b	19 025.29a
水稻品种 Rice variety	403.775**	86.061**	35.663**	1.265	0.010	54.156**	14.507**
施肥类型 Fertilization type	2.270	0.622	0.660	16.570**	4.101	41.661**	3.578
水稻品种×施肥类型 Rice variety×Fertilization type	0.873	1.361	0.175	1.839	0.071	4.689	0.133

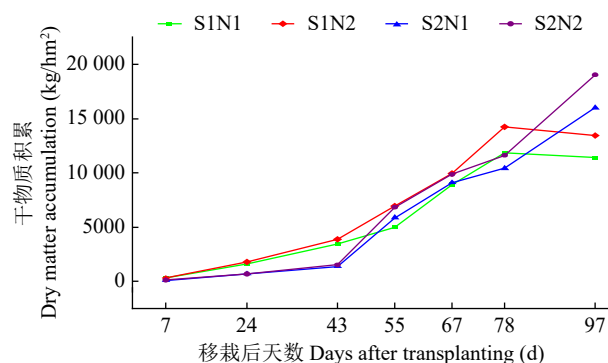


图 5 不同处理下水稻全生育期干物质积累动态
Fig.5 Dry matter accumulation dynamics of rice during the whole growth period under different treatments

孕穗期、抽穗开花期) 明显加快的趋势。在分蘖后期以后, 缓释肥处理的水稻干物质积累量明显高于常规肥, 表明缓释肥作用下的水稻在生育期的中后期有着更高的干物质积累优势。

2.6 不同处理对水稻各生育期干物质净积累量及群体生长率的影响

由表 3 可知, 同一品种水稻干物质净积累量 (NDMA) 和群体生长率 (CGR) 的态势大体一致。常规肥与缓释肥作用下的水稻有着不同的物质积累速度, 缓释肥处理下水稻全生育期内的 NDMA 和 CGR 均能保持在较高水平, 较高的 NDMA 和

表 3 不同处理下水稻各生育期干物质净积累量及群体生长率
Table 3 Net dry matter accumulation and crop growth rate in rice at different growth stages under different treatments

处理 Treatment	返青期—分蘖期 Regreening to tillering		分蘖期 Tillering		分蘖期—拔节孕穗期 Tillering to jointing-booting		拔节孕穗期—抽穗开花期 Jointing-booting to heading-flowering		抽穗开花期—乳熟期 Heading-flowering to milk ripening		乳熟期—黄熟期 Milk ripening to yellow ripening	
	NDMA	CGR	NDMA	CGR	NDMA	CGR	NDMA	CGR	NDMA	CGR	NDMA	CGR
	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]	(g/m ²)	[g/(m ² ·d)]
S1N1	1282.4a	75.4a	1856.4ab	97.7ab	1545.9c	128.8c	3952.3a	329.4a	2926.8ab	266.1a	-455.8b	-24.0b
S1N2	1485.6a	87.4a	2102.0a	110.6a	3032.3b	252.7b	3009.1a	250.8a	4308.0a	391.6a	-793.5b	-41.8b
S2N1	627.6b	36.9b	672.7c	35.4c	4484.2a	373.7a	3225.0a	268.8a	1333.3c	121.2b	5581.1a	293.7a
S2N2	562.8b	33.1b	858.2bc	45.2bc	5309.6a	442.5a	3019.5a	251.6a	1751.8bc	159.3b	7412.1a	390.1a

CGR 表明缓释肥作用下的水稻有着更高的干物质积累优势和较强的光合生产能力。

S1N1 处理的 NDMA 和 CGR 在拔节孕穗期至抽穗开花期达到峰值。施肥类型改变了常规稻 NDMA 和 CGR 峰值出现的生育阶段, S1N2 处理的峰值推迟, 为抽穗开花期至乳熟期, 且 S1N2 处理的 NDMA 和 CGR 峰值较 S1N1 处理分别提高了 9.0%与 18.9%, 在峰值外的其他生育期, S1N2 处理的 NDMA 和 CGR 也保持在较高水平。

S2N1 和 S2N2 处理的 NDMA 均在乳熟期至黄熟期达到最大峰值, 其中 S2N2 处理的 NDMA 峰值较 S2N1 处理提高了 32.8%; S2N1 和 S2N2 处理

的 CGR 均在分蘖期至拔节孕穗期达到最大峰值, 其中 S2N2 处理的 CGR 峰值较 S2N1 处理提高了 18.4%。全生育期内, S2N2 处理的 NDMA 和 CGR 也保持在较高水平。结果表明缓释肥可以促进水稻的 NDMA 和 CGR。

2.7 不同处理对水稻黄熟期干物质积累量的影响

由表 4 可知, 4 种处理下的水稻黄熟期各个器官干物质积累量的比重均表现出一致的趋势, 即穗 > 茎 > 根 > 叶。缓释肥作用下的水稻黄熟期穗的积累量均较高, 可为其产量提升打下基础。

缓释肥处理下的超级稻黄熟期干物质积累量最大, 为 19 025.29 kg/hm²。S1N2 处理比 S1N1 处

表 4 不同处理下水稻黄熟期干物质积累量
Table 4 Dry matter accumulation during the yellow ripening period of rice under different treatments

处理 Treatment	根 Root		茎 Stem		叶 Leaf		穗 Panicle		合计 Total	
	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	百分比 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	百分比 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	百分比 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	百分比 Percentage (%)	积累量 Accumulation (kg/hm ²)	百分比 Percentage (%)
S1N1	2483.11a	21.77	3497.78b	30.66	1005.28c	8.81	4420.89c	38.76	11 407.06b	100
S1N2	3005.33a	22.35	3599.56b	26.77	1098.50bc	8.17	5744.89bc	42.72	13 448.28b	100
S2N1	2595.11a	16.21	3974.67ab	24.83	1378.04ab	8.61	8062.67ab	50.36	16 010.49ab	100
S2N2	2662.67a	14.00	5264.44a	27.67	1669.29a	8.77	9428.89a	49.56	19 025.29a	100

理高 17.9%，S2N2 处理比 S2N1 处理高 18.8%。结果表明缓释肥可以提高水稻黄熟期干物质积累。

3 讨论

缓释肥对水稻的生长特性有促进作用^[11-13]。本研究发现缓释肥对水稻的株高、分蘖数、SPAD 具有明显的促进作用，这可为缓释肥作用下的水稻高产稳产奠定基础。“常规稻+缓释肥”处理比“常规稻+常规肥”处理全生育期内平均株高提高 11.1 cm，全生育期平均分蘖数多 15.3% (2.2)；“超级稻+缓释肥”处理比“超级稻+常规肥”处理全生育期平均株高提高 14.8 cm，全生育期平均分蘖数多 42.2% (3.6)。但超级稻在生育期前期分蘖数低下，且缓释肥作用下的超级稻分蘖数峰值出现最晚，可能与前期供氮不足有关^[14-15]，这也导致超级稻单位面积穗数较少，只基施缓释肥导致前期养分释放不能满足超级稻氮肥吸收规律，表明超级稻的施肥技术有待优化。

缓释肥作用下的常规稻与超级稻产量高于常规肥，分别增加了 17.0% 和 31.9%，这与 Ding 等^[16]、陈恺林等^[17]研究结果一致，缓释肥能促进水稻产量的增加。“超级稻+缓释肥”处理相比“超级稻+常规肥”处理每穗粒数增加了 20.1%，单位面积穗数增加了 11.0%，千粒重增加了 1.5%，“常规稻+缓释肥”处理相比“常规稻+常规肥”单位面积穗数增加了 17.3%，表明缓释肥使超级稻增产的主要原因是单位面积穗数、每穗粒数和千粒重的增加，而缓释肥提高常规稻增产的主要原因是单位面积穗数的增加。这与前人^[18-19]研究缓释肥能使水稻产量提高是因为增加了单位面积有效穗数的结论一致，通过增加单位面积穗数增加“库”容量对于水稻获得超高产至关重要^[20-21]。

施用缓释肥的水稻在中后期有着更强的干物质积累能力和较强的光合生产能力，施用缓释肥增加了水稻分蘖后期至乳熟期的干物质积累量，为高

产奠定了物质基础。“常规稻+缓释肥”处理的全生育期干物质积累量比“常规稻+常规肥”处理平均高 18.9%，“超级稻+缓释肥”处理的全生育期干物质积累量比“超级稻+常规肥”处理平均高 13.9%。张小翠等^[22]研究也表明，缓释肥能显著提高水稻的干物质质量。王佰成等^[23]、杨惠杰等^[24]、朱庆森等^[25]研究也表明超高产水稻干物质积累优势在中期和后期。施用缓释肥的水稻叶片 SPAD 在中后期能一直保持较高的水平。“库”大“源”强是水稻高产的前提^[26]，较高的 SPAD 说明水稻光合器官的衰老延缓，有利于提高光合产物“源”的供应能力，更有助于水稻在中后期的干物质积累，提高自身增产潜力。

4 结论

缓释肥能促进水稻的植株生长和分蘖，有利于水稻 SPAD 保持较高水平。单位面积穗数、每穗粒数和千粒重的增加是超级稻施用缓释肥增产的主要原因，而单位面积穗数增加是常规稻施用缓释肥产量提高的主要原因。相比于常规肥，缓释肥对水稻的干物质积累、干物质净积累量和群体生长率有着更好的促进作用，施用缓释肥增加了分蘖后期至乳熟期的干物质积累量，为水稻高产提供了物质基础。需要关注的是，超级稻前期较低的分蘖数和施用缓释肥后较晚出现的分蘖数峰值导致其黄熟期单位面积穗数偏少，表明超级稻在漳河灌区及类似区域的施肥或水分管理种植技术有待进一步优化。

参考文献

- [1] 李世发, 刘元英, 范立春, 等. 缓释肥对水稻生长发育及产量的影响. 东北大学学报, 2008, 161(7): 38-43.
- [2] Liu X D, Chen L Y, Hua Z L, et al. Comparing ammonia volatilization between conventional and slow-release nitrogen fertilizers in paddy fields in the Taihu Lake region. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(8): 8386-8394.
- [3] Shojl S, Delgado J A, Mosier A, et al. Use of controlled release

- fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2001, 32(7/8): 1051-1070.
- [4] 何军, 何天楷, 张宇航, 等. 不同水肥处理水稻氮磷吸收利用及产量试验研究. *灌溉排水学报*, 2020, 39(6): 67-72.
- [5] 杨阳, 刘灿华, 葛树春, 等. 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. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(3): 442-447.
- [6] 徐培智, 解开治, 卢钰升, 等. 超级稻高产栽培施肥技术研究. *广东农业科学*, 2014, 41(14): 1-3, 19.
- [7] 胡柯鑫, 谢宜, 董春华, 等. 超级稻晚稻‘5 优 103’不同缓/控释肥应用效果研究. *中国农学通报*, 2019, 35(17): 1-7.
- [8] 钱银飞, 邵彩虹, 邱才飞, 等. 包膜缓释尿素与普通尿素配施对双季超级稻产量及氮肥利用的影响. *中国土壤与肥料*, 2015, (5): 27-32.
- [9] 梁健, 吕修涛, 冯宇鹏, 等. 我国超级稻发展现状及建议. *中国稻米*, 2020, 26(3): 1-4.
- [10] 科技教育司. 农业农村部办公厅关于发布 2019 年超级稻确认品种的通知: 农办科[2019]12 号. (2019-03-26)[2023-06-07]. http://www.moa.gov.cn/govpublic/KJJYS/201904/t20190410_6178517.htm.
- [11] Wu Q, Wang Y H, Ding Y F, et al. Effects of different types of slow-and controlled-release fertilizers on rice yield. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(6): 1503-1514.
- [12] 周洁宇, 何军, 李杜白, 等. 不同栽培方式下缓释肥施用对水稻生长特性及产量的影响. *中国稻米*, 2022, 28(3): 92-95.
- [13] 王爽, 张平, 龚明强, 等. 不同施肥方式对水稻生产特性及经济效益的影响. *安徽农业科学*, 2021, 49(22): 155-157, 160.
- [14] 田小海, 马国辉, 杨令芝, 等. 缓释氮肥对超级杂交稻后期生长与生理功能的影响. *杂交水稻*, 2010, 25(5): 64-69.
- [15] 朱发林, 邓启云, 周萍, 等. Y 两优 957 特征特性及高产栽培技术. *耕作与栽培*, 2018(6): 55-56.
- [16] Ding W C, Xu X P, He P, et al. Improving yield and nitrogen use efficiency through alternative fertilization options for rice in China: A meta-analysis. *Field Crops Research*, 2018, 227: 11-18.
- [17] 陈恺林, 刘功朋, 张玉焯, 等. 不同施肥模式对水稻干物质、产量及其植株中氮、磷、钾含量的影响. *江西农业学报*, 2014, 26(4): 1-5.
- [18] 胡丹丹, 范呈根, 洪欠欠, 等. 养分条件下缓/控释肥料替代部分速效化肥对中稻生产效益的影响. *中国稻米*, 2018, 24(1): 16-19.
- [19] Deng F, Wang L, Ren W J, et al. Optimized nitrogen managements and polyaspartic acid urea improved dry matter production and yield of indica hybrid rice. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 1-9.
- [20] 杨惠杰, 杨仁崔, 李义珍, 等. 水稻超高产品种的产量潜力及产量构成因素分析. *福建农业学报*, 2000, 25(3): 1-8.
- [21] 夏冰, 赵杨, 魏颖娟, 等. 不同种植地点超级杂交稻产量及其构成的变化特点. *作物研究*, 2015, 29(5): 457-462.
- [22] 张小翠, 戴其根, 胡星星, 等. 不同质地土壤下缓释尿素与常规尿素配施对水稻产量及其生长发育的影响. *作物学报*, 2012, 38(8): 1494-1503.
- [23] 王佰成, 孟祥海. 牡丹江地区超级稻物质生产特性的研究. *中国稻米*, 2021, 27(6): 80-85.
- [24] 杨惠杰, 李义珍, 杨仁崔, 等. 超高产水稻的干物质生产特性研究. *中国水稻科学*, 2001, 33(4): 26-31.
- [25] 朱庆森, 张祖建, 杨建昌, 等. 亚种间杂交稻产量源库特征. *中国农业科学*, 1997, 30(3): 52-59.
- [26] 杨建昌, 张文虎, 王志琴, 等. 水稻新株型与粳/籼杂种源库特征物质运转的研究. *中国农业科学*, 2001, 34(5): 511-518.

Effects of Slow-Release Fertilizers on Rice Growth Characteristics, Yield and Dry Matter Accumulation

Zhang Baolong¹, He Jun^{1,2}, Zhang Yi¹, Tang Chi³, Zhang Hongtao³, Liao Wei¹, Li Fei⁴

(¹College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; ²Engineering Research Center of Eco-Environment in Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; ³Hubei Zhanghe Project Administration Bureau, Jingmen 448156, Hubei, China; ⁴South-to-North Water Diversion Middle Route Industrial & Development Co., Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract In order to explore the potential of slow-release fertilizer for increasing rice yield, the conventional rice variety (Zuanliangyouchaozhan) and the super rice variety (Y Liangyou 957) were selected as experimental materials, and conventional fertilizer and slow-release fertilizer treatments were respectively set up to conduct field effect experiments in the Zhanghe Irrigation District of Hubei Province in 2020. The results showed that slow-release fertilizer had a significant promoting effect on plant height, tiller number, chlorophyll content, dry matter accumulation, net dry matter accumulation, and population growth rate of super rice and conventional rice. The yield of the “super rice+slow-release fertilizer” treatment was the highest, at 8644.44 kg/ha. The increase in number of panicles per unit area, number of grains per panicle, and 1000-grain weight were the main reason for the yield increase of super rice under the effect of slow-release fertilizer, while the increase in number of panicles per unit area was the main reason for the yield increase of conventional rice under the effect of slow-release fertilizer. The application of slow-release fertilizers can give rice a better advantage in dry matter accumulation during the middle and late growth stages, increasing the dry matter accumulation from late tillering stage to milk ripening stage, and providing a material basis for high yield of rice.

Key words Super rice; Slow-release fertilizer; Growth characteristics; Yield; Dry matter accumulation