文章编号：1672 - 3317（2023）12 - 0044 - 09

不同灌溉模式下缓释施肥水平对水稻生长特性、产量和品质的影响

汪乐养[1]，何 军[1,2*]，华克骥[1]，张才军[3]，叶子米[4]，张 磊[5]
（1.三峡大学 水利与环境学院，湖北 宜昌 443002；2.三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心，湖北 宜昌 443002；3.湖北省漳河工程管理局，湖北 荆门 448156；4.新疆农业大学水利与土木工程学院，乌鲁木齐 830052；5.华北水利水电大学 水利学院，郑州 430046）

摘 要：【目的】揭示不同灌溉模式下缓释施肥水平对水稻生长特性、产量和品质的影响，优选高产优质的水肥管理模式。【方法】设置淹水灌溉（W1）、间歇灌溉（W2）2 种灌溉模式，常规肥（F）和缓释肥（SF）2 种施肥类型，其中，常规肥常量（F_{100}）、缓释肥增量 20%（SF_{120}）、缓释肥增量 10%（SF_{110}）、缓释肥常量（SF_{100}）、缓释肥减量 10%（SF_{90}）、缓释肥减量 20%（SF_{80}）6 种施肥水平，于 2021 年 5—9 月在湖北省灌溉试验中心站开展水稻测桶试验，测定各生育期的株高、分蘖数、叶绿素 SPAD 值和产量及其构成因子以及直链淀粉量、谷蛋白量，应用熵权 TOPSIS 法评价各处理综合表现。【结果】2 种灌溉模式下，SF_{100} 处理较 F_{100} 处理株高、分蘖数、产量平均分别高 24.65%、34.90%、11.90%；叶绿素降低 24.98%，直链淀粉量降低 7.37%，谷蛋白量显著提高 32.72%。W1 模式较 W2 模式下株高、叶绿素和产量分别平均高 19.01%、20.73%和 12.82%，而分蘖数、直链淀粉和谷蛋白量平均分别低 31.05%、0.30%、0.90%；$W1SF_{90}$ 处理产量较 W1 模式下最低的 SF_{120} 处理高 12.41%，直链淀粉量较 W1 模式下最高的 SF_{120} 处理低 6.68%，谷蛋白量较 W1 模式下最高的 SF_{110} 处理仅低 5.33%。熵权 TOPSIS 法结果表明：$W1SF_{90}$ 处理与理想解相对贴近度最大，综合得分为 0.985。【结论】淹水灌溉配施缓释肥减量 10%（648 kg/hm^2 施肥量）为最具高产优质潜力的水肥管理模式。本研究可为长江中下游地区的水稻水肥管理模式提供理论指导和技术支持。

关 键 词：缓释肥；施肥水平；水稻生长特性；产量；品质；熵权 TOPSIS 法
中图分类号：S274；TV93 **文献标志码：**A doi：10.13522/j.cnki.ggps.2023158 OSID：

汪乐养, 何军, 华克骥, 等. 不同灌溉模式下缓释施肥水平对水稻生长特性、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(12): 44-52.
WANG Leyang, HE Jun, HUA Keji, et al. Combined Effect of Slow-release Fertilizer and Irrigation Method on Growth, Yield and Grain Quality of Rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(12): 44-52.

0 引 言

【研究意义】水稻是中国的主要粮食作物之一，对灌溉用水和肥料需求很大[1]。水、肥是影响水稻生长的 2 个重要因素，适宜的水肥管理模式能显著改善水稻生长特性、实现增产并提升品质[2]。灌溉用水是保证水稻产量的关键因素，氮素是影响作物产量的最主要肥料元素，我国水稻水分利用效率、氮素利用效率低下，分别为 30%~40%、35%~40%，合理的水氮运筹是有效提高水和氮素利用效率的一项必要的水肥管理措施[3-4]。因此，探求一种高效的施肥水平对提高氮素利用效率，实现水稻高产优质以及解决田间多余氮素引起的农业面源污染和水体富营养化等环境问题具有重要的意义[5]。

【研究进展】淹水灌溉和间歇灌溉在水稻生产中应用广泛且各有其优缺点。淹水灌溉可以实现水稻有效增产，然而耗水量大、水分生产率较低[6]。间歇灌溉由于减少渗漏并增加地下水毛细上升，在很大程度上减少了灌溉用水，但在丰水期也可能面临排水负荷增加的风险[7]。此外，缓释肥作为一种高效利用肥料养分的肥料类型，以影响水稻生长特性、实现增产稳产和促进稻米品质优化被广泛报道[8-10]。水稻合理的肥料运筹是提高产量、提升品质的基础，适量施氮有利于提高水稻产量与改善稻米品质，但过度施氮则适得其反，造成水稻减产、品质劣化[11]。近年来有许多施肥水平对水稻产量、品质的研究，

收稿日期：2023-04-10 **修回日期：**2023-09-11
基金项目：国家自然科学基金项目（51909092）；湖北省水利重点科研项目（HBSLKY201801、202207）
作者简介：汪乐养（1998-），男，浙江龙游人。硕士研究生，研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: 1742438691@qq.com
通信作者：何军（1981-），男，湖北沙洋人。副教授，博士，主要从事节水灌溉理论与技术方面的研究。E-mail: hejun50@163.com
©《灌溉排水学报》编辑部，开放获取 CC BY-NC-ND 协议

但仍存在一些争议。产量方面，卢丽丽等[12]发现随着施氮量的增加，作物产量会呈现先增加后不变的趋势，而彭显龙等[13]认为合理减氮能够增加水稻产量。品质方面，陈新红等[14]发现减少施氮量会显著降低稻米直链淀粉量和蛋白质量，而 Gomez[15]认为直链淀粉量随施氮量增加而有所降低。协调好灌溉模式与施肥水平对产量和品质的影响，寻求一种合适的综合评价方法，成为优选出水稻高产优质水肥管理模式的关键。熵权 TOPSIS 法具有应用灵活、数据利用率高、结果量化客观等优点，近年来广泛应用于农业生产决策评估[16]。俞双恩等[17]基于熵权 TOPSIS 理想解法从节水、高产、减排、控污等 4 方面对水稻灌排模式进行了优选决策。当前研究对水稻生长特性、产量和品质随施肥水平增减的规律以及具有高产优质效果的施肥水平仍不明确。【切入点】在缓释肥减量 20%至增量 20%范围寻找水稻生长特性、产量和品质随着施肥水平增减的变化规律，应用熵权 TOPSIS 法对各指标进行量化分析，以避免数据差异显著性不够的局限，解决不同指标的优势处理不同的问题，最终选出综合最优的水肥处理。【拟解决的关键问题】鉴于此，本研究选取长江中下游典型灌区开展水稻测桶试验，试验设置常规肥料常量以及缓释肥减肥 20%至增肥 20%（以 10%为梯度）共 6 个施肥水平，运用熵权 TOPSIS 法从水稻生长特性、产量、品质等方面综合评价。旨在保证水稻增产稳产的前提下提高稻米品质，以期为长江中下游地区的水稻种植提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 5—9 月在湖北省荆门市漳河镇却集村湖北省灌溉试验中心站（112°05′16″ E，30°54′23″ N）进行。试验区地处丘陵地带，土壤类型为黄壤土，其气候温暖湿润，年无霜期长，多年平均气温 17 ℃，最低月平均气温为 3.9 ℃，最高月平均气温 27.7 ℃，年降水量 700~1 100 mm，多年平均降水量 947 mm，年蒸发量（20 cm 蒸发皿）1 300~1 800 mm，年日照总时间 1 300~1 600 h，是长江中游主要水稻种植区。

1.2 试验设计

本试验采用钢制测桶，桶口直径 0.618 m，桶深 1.20 m。桶内装土 90 cm 深，土壤采用当地耕作土，平均体积质量 1.46 g/cm^3，底部为 20 cm 的反过滤层，反滤层由下至上为碎石、粗砂、细砂，并设置侧向排水。试验水稻品种为当地大面积种植的 Y 两优 957，采用大田育秧、成苗移栽的栽种方式，每桶 5 穴，设置防雨棚排除降雨影响。

本试验采用裂区设计，主区为 2 种灌溉模式，包括淹水灌溉 W1 和间歇灌溉 W2，水稻各生育期水层控制标准见表 1；副区为 6 种施肥水平，包括常规肥常量（F_{100}）、缓释肥增量 20%（SF_{120}）、缓释肥增量 10%（SF_{110}）、缓释肥常量（SF_{100}）、缓释肥减量 10%（SF_{90}）、缓释肥减量 20%（SF_{80}），试验共设 12 个处理，每个处理 3 次重复，共计 36 个测桶。常规肥 F_{100} 分 2 次施用，施氮量 180 kg/hm^2（以纯 N 计），其中 50%碳酸氢铵在泡田期基施，分蘖期追施 50%尿素，磷肥采用过磷酸钙，P_2O_5 用量 43.2 kg/hm^2，钾肥采用氯化钾，K_2O 用量 64.8 kg/hm^2，磷、钾肥均一次基施；缓释肥 SF_{100} 采用宜昌富升化工有限公司的硫包膜复合肥料（总养分比例≥40.0%，N∶P_2O_5∶K_2O=25∶6∶9），施用量为 720 kg/hm^2（有效肥量与常规肥一致），作为基肥一次性施入。

表 1 淹水灌溉和间歇灌溉各生育期水层控制标准

Table 1 Standard table of water layer control in each growth period of flooded irrigation and intermittent irrigation

生育阶段	返青复苗		分蘖前期		分蘖后期（晒田）		拔节孕穗		抽穗开花		乳熟		黄熟	
灌溉模式	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
灌前下限	10	100	10	85	20	65~70	20	90	20	90	20	85		65
灌后上限	40	30	40	40	50~60	晒田	50~60	40	50~60	70	50~60	70	落干	落干
间歇脱水时间/d	0	0	0	3~5	0		0	1~3	0	1~3	0	1~3		

注 W1，mm；W2，占土壤饱和含水率的百分比%。

1.3 测定指标与方法

1）水稻生长特性的测定。主要包括：株高、分蘖数、叶绿素 SPAD 值。水稻移栽至测桶之后从 6 月 23 日至 9 月 24 日每隔 10 d 观测 1 次，共观测 10 次，其中叶绿素 SPAD 值由 SPAD-502PLUS 叶绿素测定仪测得。将 10 次观测数据按水稻生育期进行划分处理，得到返青期、分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期、黄熟期 6 组观测结果。

2）水稻产量构成因子的测定。每桶栽有 5 穴，全部收割进行考种测产。主要考察有效穗数、每穗粒数、空粒数、实粒数、千粒质量、结实率、产量等。

3）稻米品质的测定。主要测取稻米直链淀粉与谷蛋白 2 个指标。为保证稻米品质的稳定性，应将水稻收割脱粒晒干后于室温下储存 3 个月。直链淀粉量根据 GB/T 15683—2008 中规定步骤由直链淀粉测定仪（DPCZ-II 型）测定，谷蛋白量应用考马斯

亮蓝 G-250 染色法[18]，紫外分光光度计测定。

4）水肥管理模式优选综合评价方法。熵权 TOPSIS 法的计算过程由 SPSS PRO 完成，各指标计算式[16]如下：

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min(X_j)}{\max(X_j)-\min(X_j)}, \quad (1)$$

$$Y_{ij}=\frac{\max(X_j)-X_{ij}}{\max(X_j)-\min(X_j)}, \quad (2)$$

式中：X_{ij}为初始数据；Y_{ij}为数据标准化后的值。

$$e_j=-\frac{1}{\ln(n)}\sum_{i=1}^{n}P_{ij}\ln(P_{ij}), \quad (3)$$

$$P_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Y_{ij}}, \quad (4)$$

$$\lim_{P_{ij}\to 0}P_{ij}\ln P_{ij}=0, \quad (5)$$

$$d_j=1-e_j, \quad (6)$$

$$W_j=\frac{d_j}{\sum_{j=1}^{m}d_j}, \quad (7)$$

式中：e_j 为信息熵值；d_j 为信息效用值；W_j 为权重，信息熵值越大，其携带的信息越少，其所占权重越小。

$$R^{+}=\{\max(R_{ij})|j=1,2,\cdots,m\}, \quad (8)$$

$$R^{-}=\{\min(R_{ij})|j=1,2,\cdots,m\}, \quad (9)$$

$$D_i^{+}=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(R_{ij}-R^{+})^2}, \quad (10)$$

$$D_i^{-}=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(R_{ij}-R^{-})^2}, \quad (11)$$

$$C_i=\frac{D^{-}}{(D^{+}+D^{-})}, \quad (12)$$

式中：R^{+}、R^{-}为正、负理想解；D^{+}、D^{-}为评价对象到正、负理想解欧式距离，值越大，距离越远；C_i 代表评价对象与理想解的相对贴近度，即各评价对象的评分，$0<C_i<1$。

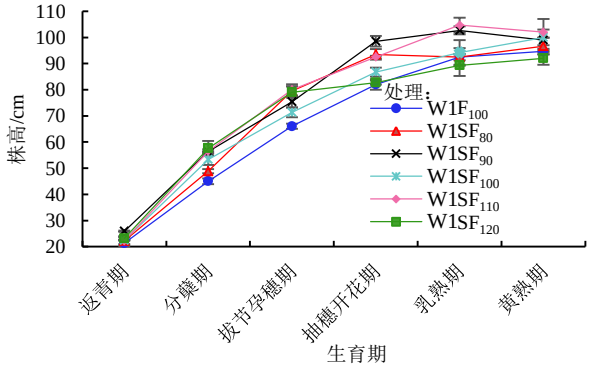
1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019、SPSS 25.0 进行数据统计分析，Excel 2019 制图，运用 Duncan 法进行显著性分析（$P<0.05$），综合评价利用 SPSS PRO 进行熵权 TOPSIS 法实现。

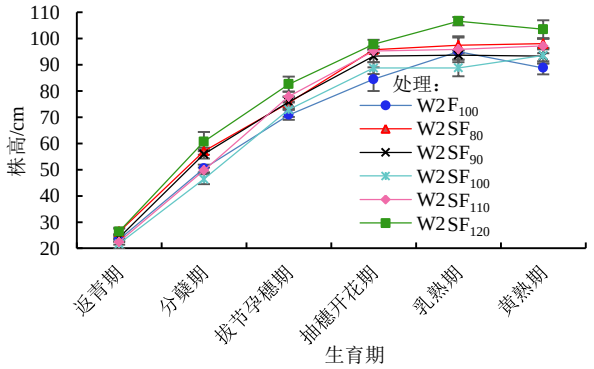
2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对水稻生长特性的影响

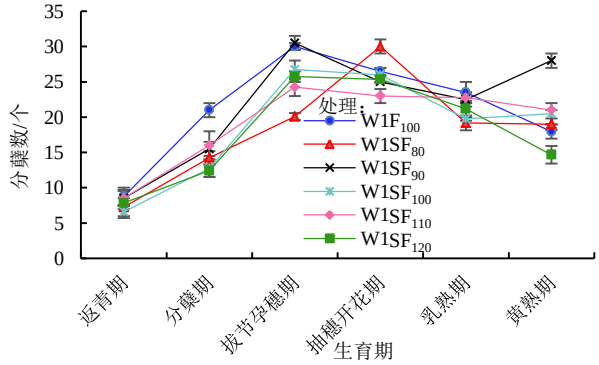
不同水肥处理水稻株高、分蘖数、叶绿素 SPAD 值动态变化如图 1 所示。同一灌溉模式下，SF_{100} 处理株高增长幅度均高于 F_{100} 处理，W1 模式和 W2 模式下 SF_{100} 处理株高比 F_{100} 处理高 24.05%（5.36 cm）、25.24%（5.67 cm）。缓释肥株高增长幅度随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先上升后下降的趋势，在 SF_{110} 达到峰值，W1 模式和 W2 模式下分别为 356.38%（79.65 cm）、332.81%（74.72 cm），缓释肥增量 10%最有利于株高增长。缓释肥同一施肥水平下，W1 模式株高增长幅度总体上比 W2 模式平均高 19.01%（1.77 cm），表明淹水灌溉配施缓释肥更利于株高增长。



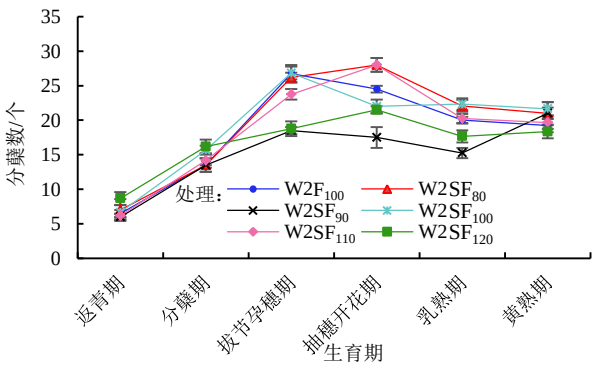
(a) W1 模式株高



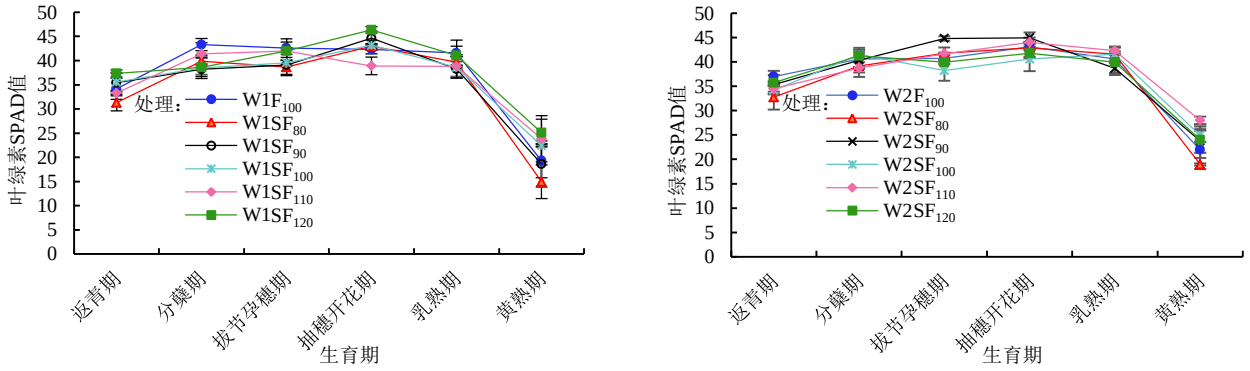
(b) W2 模式株高



(c) W1 模式分蘖数



(d) W2 模式分蘖数



(e) W1 模式叶绿素 SPAD 值　　(f) W2 模式叶绿素 SPAD 值

图 1 不同水肥处理的水稻株高、分蘖数、叶绿素动态变化

Fig.1 Dynamic changes of plant height, number of tillers and chlorophyll in rice under different water and fertilizer treatments

同一灌溉模式下，SF_{100} 处理分蘖数增多幅度均高于 F_{100} 处理，W1 模式和 W2 模式下 SF_{100} 处理分蘖数比 F_{100} 处理分别高 37.10%（2.55 个）、32.69%（2.43 个）。缓释肥分蘖数增多幅度随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先上升后下降的趋势，在 SF_{90} 达到峰值，W1 模式和 W2 模式下分别为 229.41%（19.5 个）、250.00%（15 个），缓释肥减量 10%最促进有效分蘖。缓释肥同一施肥水平下，W2 模式分蘖数增多幅度比 W1 模式平均多 31.05%（0.53 个），表明间歇灌溉配施缓释肥更促进有效分蘖。

同一灌溉模式下，SF_{100} 叶绿素 SPAD 值降低幅度均低于 F_{100} 处理，W1 模式和 W2 模式 SF_{100} 处理叶绿素 SPAD 值比 F_{100} 处理分别高 31.43%（3.13）、18.52%（2.95）。缓释肥叶绿素 SPAD 值降低幅度随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先下降后上升的趋势，在 SF_{110} 处理达到最小，W1 模式和 W2 模式下分别为 39.62%（9.45）、23.21%（6.50），表明缓释肥增量 10%最能减少叶绿素的降解。缓释肥同一施肥水平下，W2 模式叶绿素 SPAD 值降低幅度比 W1 模式平均低 20.73%（3.03），表明间歇灌溉配施缓释肥更能减少叶绿素降解。

2.2 不同水肥处理对水稻产量及其构成因子的影响

不同水肥处理水稻产量及其构成因子如表 2 所示。同一灌溉模式下，SF_{100} 处理产量均高于 F_{100} 处理，W1 模式和 W2 模式下 SF_{100} 处理产量比 F_{100} 处理分别高出 19.43%（1 119.96 kg/hm^2）、4.36%（251.82 kg/hm^2），淹水灌溉配施缓释肥增产效果较为明显。缓释肥产量随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先上升后下降的趋势，在 SF_{90} 处理达到峰值，W1 模式和 W2 模式下分别为 7 035.62、6 786.65 kg/hm^2。W1 模式 SF_{90} 处理产量较该模式下最低的 SF_{120} 处理高 12.41%（776.89 kg/hm^2），W2 模式 SF_{90} 处理产量较该模式下最低的 SF_{120} 处理显著高 37.31%（1 844.19 kg/hm^2），缓释肥减量 10%最利于增产。从产量构成因子看，$W1SF_{90}$ 处理主要是通过增加千粒质量来提高产量，$W1SF_{90}$ 处理千粒质量较 $W1SF_{120}$ 处理显著高出 11.88%（2.56 g），而 $W2SF_{90}$ 处理通过增多有效穗数来提高产量，$W2SF_{90}$ 处理有效穗数较 $W2SF_{120}$ 处理显著高 32.31%（35.00 个/m^2）。缓释肥同一施肥水平下，W1 模式产量总体上比 W2 模式平均高 12.82%（703.04 kg/hm^2）。

表 2 不同水肥处理对水稻产量及其构成因子的影响

Table 2 Effects of different water and fertilizer treatments on rice yield and its component

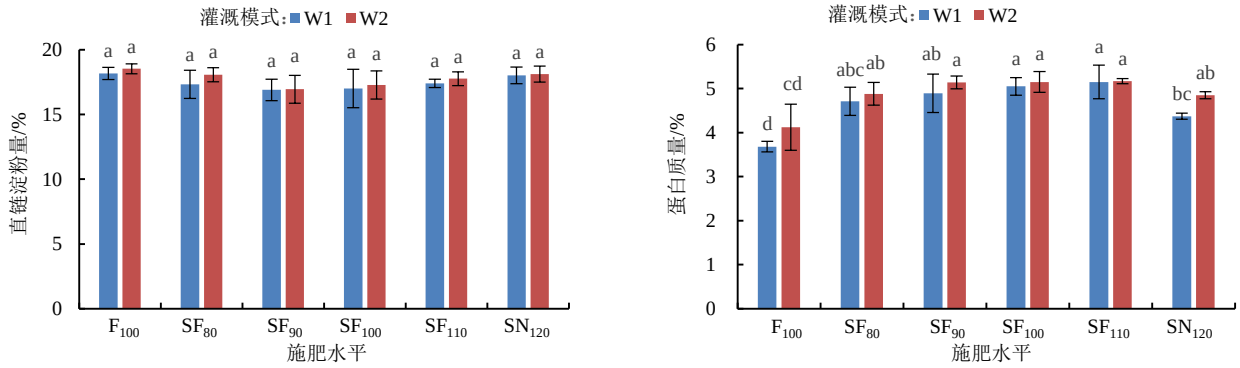
灌溉模式	施肥水平	有效穗数/(个 m^{-2})	每穗粒数/(颗 穗$^{-1}$)	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg hm^{-2})
W1	F_{100}	119.67cd	139.00a	93.00ab	23.07abcd	5 765.50bcd
	SF_{80}	120.33cd	141.80a	95.67a	23.67ab	6 269.73abc
	SF_{90}	127.67c	151.00a	94.00ab	24.10a	7 035.62a
	SF_{100}	126.67c	158.80a	95.67a	22.13abcd	6 885.46ab
	SF_{110}	129.33c	149.80a	94.33ab	22.43abcd	6 617.81abc
	SF_{120}	126.00c	151.93a	94.00ab	21.54cd	6 258.73abc
W2	F_{100}	115.33cd	141.07a	93.33ab	23.51abc	5 779.38bcd
	SF_{80}	116.00cd	160.53a	94.00ab	22.10abcd	6 230.79abc
	SF_{90}	143.33b	139.60a	94.33ab	22.34abcd	6 786.65ab
	SF_{100}	123.67cd	148.80a	95.00ab	21.31d	6 031.20abcd
	SF_{110}	116.00cd	147.13a	91.67b	21.99bcd	5 561.04cd
	SF_{120}	108.33d	140.73a	95.67a	20.99d	4 942.46d

注　不同字母表示差异性显著（P<0.05，Duncan 检验）。

2.3 不同水肥处理对稻米品质的影响

不同水肥处理水稻直链淀粉量与谷蛋白量如图 2 所示。同一灌溉模式下，SF_{100} 处理直链淀粉量均低于 F_{100} 处理，$W1SF_{100}$ 处理的直链淀粉量较 $W1F_{100}$ 处理低 7.45%（1.15%），$W2SF_{100}$ 处理的直链淀粉量较 $W2F_{100}$ 处理低 7.29%（1.26%）。缓释肥直链淀粉量随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先下降后上升的趋势，在 SF_{90} 处理达到最低，W1 模式和 W2 模式下分别为 16.91%、16.96%。W1 模式 SF_{90} 处理直链淀粉量较该模式下最高的 SF_{120} 处理低 6.68%（1.13%），W2 模式 SF_{90} 处理直链淀粉量较该模式下最高的 SF_{120} 处理低 6.94%（1.17%），缓释肥减量 10%最利于降低直链淀粉量，但差异并不显著。缓释肥同一施肥水平下，W1 模式直链淀粉量总体上低于 W2 模式，但差异并不显著。

同一灌溉模式下，SF_{100} 处理谷蛋白量均显著高于 F_{100} 处理，$W1SF_{100}$ 处理的谷蛋白量显著高 $W1F_{100}$ 处理 39.95%（1.37%），$W2SF_{100}$ 处理的谷蛋白量较 $W2F_{100}$ 处理显著高 25.49%（1.03%）。缓释肥谷蛋白量随施肥水平提高的变化趋势总体一致，均呈先上升后下降的趋势，在 SF_{110} 处理达到最高，W1 模式和 W2 模式下分别为 5.15%、5.17%。W1 模式 SF_{110} 处理谷蛋白量较该模式下最低的 SF_{120} 处理显著高 17.89%（0.78%），W2 模式 SF_{110} 处理谷蛋白量较该模式下最低的 SF_{120} 处理高 6.54%（0.32%），缓释肥增量 10%最利于提高谷蛋白量，且淹水灌溉模式下显著提高。缓释肥同一施肥水平下，W2 模式谷蛋白量总体上高于 W1 模式，差异不显著。



(a) 直链淀粉量　　(b) 谷蛋白量

图 2 不同水肥处理对直链淀粉含量与谷蛋白量的影响

Fig.2 Effects of different water and fertilizer treatments on amylose content and grain protein content.

2.4 水肥管理模式优选

为给漳河灌区水稻种植提供借鉴，科学制定水稻水肥管理模式，本文应用熵权 TOPSIS 法进行水肥管理模式优选，结合试验数据结果，筛选出水稻生长良好、高产、优质效果趋向于最优化的水肥管理模式。评价指标层及各指标赋值如表 3 所示。在评价指标层中，一级指标选择了生长特性、产量、稻米品质 3 个指标，二级指标在生长特性方面考量株高、分蘖数、叶绿素，产量方面以提高产量各构成因子为目标，稻米品质主要考察直链淀粉量与谷蛋白量。

表 3 评价指标层及各指标赋值

Table 3 Evaluation index layer indices assignment

一级指标	二级指标	指标类型	信息熵 e_j	信息效用值 d_j	权重 W_j	正理想解距离 R^+	负理想解距离 R^-
生长特性	株高	正向	0.999 7	0.000 3	1.94%	2.007	1.745
	分蘖数	正向	0.995 6	0.004 4	25.75%	7.210	3.777
	叶绿素	正向	0.993 3	0.006 7	39.08%	12.504	5.842
产量	有效穗数	正向	0.999 0	0.001 0	5.70%	8.158	6.161
	每穗粒数	正向	0.999 5	0.000 5	2.63%	4.222	3.656
	结实率	正向	1.000 0	0.000 0	0.18%	0.002	0.002
	千粒质量	正向	0.999 7	0.000 3	2.01%	0.484	0.422
	产量	正向	0.998 2	0.001 8	10.58%	744.557	523.045
稻米品质	谷蛋白	正向	0.998 1	0.001 9	11.08%	0.006	0.004
	直链淀粉	逆向	0.999 8	0.000 2	1.05%	0.002	0.002

熵权法计算各指标所占权重过程中，直链淀粉为逆向指标，运用式（2）进行标准化，其余指标为正向指标，应用式（1）。叶绿素信息熵最小，为 0.993 3，信息效用值最大，达 0.006 7，其携带信息

最大，所占权重最大，达 39.08%。利用 TOPSIS 法可得各水肥处理综合得分指数及排序，如表 4 所示。结果显示 12 种水肥处理中 $W1SF_{90}$ 处理与理想解相对贴近度最大，即综合得分指数最高，为 0.985，该处理为最理想水肥管理模式。

表 4 各水肥处理综合得分指数及排序

Table 4 Comprehensive score index and ranking of different water and fertilizer treatments

处理	正理想解距离（D^+）	负理想解距离（D^-）	综合得分指数（C_i）	排序
$W1F_{100}$	134.482	87.178	0.393	10
$W1SF_{80}$	81.245	140.480	0.634	5
$W1SF_{90}$	3.340	221.569	0.985	1
$W1SF_{100}$	16.272	205.667	0.927	2
$W1SF_{110}$	44.260	177.434	0.800	4
$W1SF_{120}$	82.338	139.358	0.629	6
$W2F_{100}$	133.067	88.593	0.400	9
$W2SF_{80}$	85.478	136.346	0.615	7
$W2SF_{90}$	26.930	195.187	0.879	3
$W2SF_{100}$	106.379	115.273	0.520	8
$W2SF_{110}$	156.105	65.569	0.296	11
$W2SF_{120}$	221.558	3.672	0.016	12

3 讨 论

缓释肥是一种养分释放速率慢、养分释放与水稻需肥同步率高的施肥类型，具备促进水稻生长与增产的优点，在水稻生产中应用广泛[19]。本研究发现，缓释肥较常规肥有促进株高增长、有效分蘖增加、减缓叶绿素降解等优势，同等施肥水平下还能实现增产，且能通过降低直链淀粉量和提高谷蛋白量进而提高稻米品质。这与王斌等[20]通过 4 个稻季试验发现的缓释肥能够明显且稳定促进水稻株高增长、提高叶绿素量，增多茎蘖数、成穗数和穗粒数，且提高结实率和千粒质量，以促进籽粒产量的增长的结果一致。唐拴虎等[21]研究同样表明缓释肥中后期氮素供应较为充足，促进水稻成穗，较常规施肥可增产 5.51%~21.56%。此外，聂军等[22]研究表明，缓释施肥有利于水稻生育后期叶片中蛋白质降解，同时增强籽粒中谷氨酰胺合成酶活性，这会促进叶片中氮素向籽粒运转，使籽粒蛋白质量提高。

灌溉方式能够显著影响水稻源特性和产量构成因素，从而实现水稻增产[23]。本文中淹水灌溉能够促进株高增长以及实现增产，与前人研究[24]发现的淹水灌溉能够有效保证产量提高的结论一致。本文研究发现间歇灌溉能促进有效分蘖和减缓叶绿素降解，可能是淹水灌溉模式下水稻长期淹水后会产生过量的 H_2O_2 积累，破坏了叶绿体结构所致[25]，此外长期淹水会使叶片碳氮比失调，叶绿体的分解大于合成，也会导致叶绿素量降低[26]。本研究中，间歇灌溉处理直链淀粉与谷蛋白量均比淹水灌溉处理高，但差异并不显著。而程建平等[27]发现间歇灌溉下随着稻田耗水量的减少，水稻的直链淀粉量降低，而蛋白质量提高，可能的原因是间歇灌溉通过改善作物根系中含氧量和微生物群落增加了谷蛋白量，而蛋白质与直链淀粉存在互补效应，直链淀粉量与蛋白质量呈线性负相关[28-29]。

水稻植株生长动态变化、产量及其构成因子和稻米品质与施氮量密切相关，有效评估水稻不同生育期的生长特性、产量和品质，对于种植水稻早期诊断和定量调控施肥水平具有重要意义[30-31]。本研究发现缓释肥减量 10%利于促进有效分蘖，缓释肥增量 10%利于株高增长、减缓叶绿素降解。这与李帅等[32]发现的减量施肥能够有效促进水稻生长和产量提高的结果一致。赵学梅等[33]认为增减施氮量对水稻植株高度、和叶绿素 SPAD 值的变化趋势无显著影响，但研究[34-36]表明增施氮量可以有效提高水稻株高、分蘖数和叶绿素量，与本文在分蘖数上的规律有所不同，可能的原因是缓释肥的减量处理更利于保存土壤肥力，从而促进有效分蘖[37]。本研究发现随着施肥水平的增加，产量呈先上升后下降的趋势，且缓释肥减量 10%最利于提高产量。与李虎等[38]发现随着施氮量的增加，千粒质量和产量呈先升高后降低的变化趋势，有效穗数呈逐渐升高的变化趋势结论一致。此外，王颖姮等[39]研究表明减氮施肥提高穗粒数和田间产量，结实率、千粒质量随施氮量增加而降低，可能的原因是过量施氮使得植株贪青迟熟，导致非结构性碳水化合物在茎秆中积累，从而造成结实率和产量降低[40]。本研究发现缓释肥减量 10%利于降低直链淀粉量，缓释肥增量 10%则利于提高谷蛋白量。张庆等[41]研究与本文相符，其发现增加施氮量能够提高稻米的蛋白质量，降低直链淀粉量，其原因可能为植株体内氮素积累，蛋白合成相关酶活性加强，从而促进蛋白质合成。而减氮处理更好地抑制了直链淀粉生成的关键酶（颗粒结合淀粉合成酶）的活性[42]。

4 结 论

1）缓释肥较常规肥有促进株高增长、有效分蘖增加、减缓叶绿素降解等优势，同等施肥水平下缓释肥更具增产和提升稻米品质的潜力，较常规肥平均同比增产 11.90%、降低直链淀粉量 7.37%、显著提高谷蛋白量 32.72%。

2）淹水灌溉较间歇灌溉能够促进株高增长且平均增产 12.82%；间歇灌溉则一定程度上能促进有效

分蘖增多、减缓叶绿素降解以及提高直链淀粉与谷蛋白量，但品质差异并不显著。

3）增肥 10%（792 kg/hm^2）的施肥量最具促进株高增长、合成谷蛋白以及减缓叶绿素降解的优势；增肥 10%（648 kg/hm^2）的施氮量最有促进有效分蘖、增产以及降低直链淀粉量以提升稻米食味品质的潜力。

综合考虑各处理水稻生长特性、产量及其构成因子、品质 3 方面，淹水灌溉配施缓释肥减量 10%（648 kg/hm^2 施肥量）为最具高产优质潜力的水肥管理模式。

（作者声明本文无实际或潜在利益冲突）

参考文献：

[1] 叶玉适, 梁新强, 周柯锦, 等. 节水灌溉与控释肥施用对太湖地区稻田土壤氮素渗漏流失的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(1): 270-279.
YE Yushi, LIANG Xinqiang, ZHOU Kejin, et al. Effects of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application on nitrogen leaching loss of paddy soil in Taihu Lake region[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(1): 270-279.

[2] 何振嘉, 范王涛, 杜宜春, 等. 基于土体有机重构的水肥耦合对土壤理化性质和水稻产量的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, 24(3): 176-185.
HE Zhenjia, FAN Wangtao, DU Yichun, et al. Effects of water and fertilizer coupling on the physical and chemical properties of rice soil and yield based on soil organic reconstruction[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, 24(3): 176-185.

[3] 徐国伟, 谈桂露, 王志琴, 等. 秸秆还田与实地氮肥管理对直播水稻产量、品质及氮肥利用的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2 736-2 746.
XU Guowei, TAN Guilu, WANG Zhiqin, et al. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on grain yield and quality and nitrogen use efficiency in direct-seeding rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2 736-2 746.

[4] 高翠民. 氮素形态影响水稻幼苗抗旱特性及根系通气组织形成机理的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
GAO Cuimin. Effect of nitrogen forms on drought-resistance and mechanism of root aerenchyma formation of rice seedlings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.

[5] 熊正琴, 邢光熹, 沈光裕, 等. 太湖地区湖、河和井水中氮污染状况的研究[J]. 农村生态环境, 2002, 18(2): 29-33.
XIONG Zhengqin, XING Guangxi, SHEN Guangyu, et al. Non-point source N pollution of lakes, rivers and wells in the Taihu Lake region[J]. Rural Eco-Environment, 2002, 18(2): 29-33.

[6] 茆智. 水稻节水灌溉[J]. 中国农村水利水电, 1997(4): 45-47.

[7] TAN X Z, SHAO D G, LIU H H. Simulating soil water regime in lowland paddy fields under different water managements using HYDRUS-1D[J]. Agricultural Water Management, 2014, 132: 69-78.

[8] 刘汝亮, 李友宏, 王芳, 等. 缓释肥侧条施肥技术对水稻产量和氮素利用效率的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(1): 45-49.
LIU Ruliang, LI Youhong, WANG Fang, et al. Effect of slow-release fertilizer side bar fertilization technology on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2014, 31(1): 45-49.

[9] 高捷, 李思宇, 成大宇, 等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(3): 20-26.
GAO Jie, LI Siyu, CHENG Dayu, et al. Research progress on the effects of slow/controlled release fertilizers on rice yield and quality[J]. Crops, 2022(3): 20-26.

[10] 吴巍, 赵军. 植物对氮素吸收利用的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 75-78.
WU Wei, ZHAO Jun. Advances on Plants'Nitrogen assimilation and utilization[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 75-78.

[11] 张绍文, 何巧林, 王海月, 等. 控制灌溉条件下施氮量对杂交籼稻 F 优 498 氮素利用效率及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1): 82-94.
ZHANG Shaowen, HE Qiaolin, WANG Haiyue, et al. Effects of nitrogen application rates on nitrogen use efficiency and grain yield of *indica* hybrid rice F You498 under controlled intermittent irrigation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(1): 82-94.

[12] 卢丽丽, 吴根义. 农田氨排放影响因素研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(1): 149-162.
LU Lili, WU Genyi. Advances in affecting factors of ammonia emission in farmland[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(1): 149-162.

[13] 彭显龙, 车俊杰, 宋聪, 等. 确定经济合理施氮量的新方法: 基于施氮量与稻米产量效应函数[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(7): 1 182-1 193.
PENG Xianlong, CHE Junjie, SONG Cong, et al. A new method for determining the economic optimum nitrogen application rate: Fertilizer function based on nitrogen rate and milled rice yield[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(7): 1 182-1 193.

[14] 陈新红, 叶玉秀, 周青, 等. 实地氮肥管理对水稻品质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 258-260.
CHEN Xinhong, YE Yuxiu, ZHOU Qing, et al. Effect of site-specific nitrogen management on grain quality in rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(13): 258-260.

[15] Gomez KA. Effect of environment on rice grain quality[A]. Chemical Aspects of Rice Grain Quality, 1979: 59-65.

[16] LYU J Y, JIANG Y N, XU C, et al. Multi-objective winter wheat irrigation strategies optimization based on coupling AquaCrop-OSPy and NSGA-III: A case study in Yangling, China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 843: 157 104.

[17] 俞双恩, 李偲, 高世凯, 等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(7): 128-136.
YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(7): 128-136.

[18] YANG Y L, GUAN E Q, ZHANG T J, et al. Behavior of wheat flour dough at different pretreated temperatures through rheological characteristics and molecular interactions of proteins[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134 188.

[19] 张木, 唐拴虎, 逄玉万, 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.
ZHANG Mu, TANG Shuanhu, PANG Yuwan, et al. Effects of different nitrogen fertilizer and fertilization patterns on nutrients uptake and yield formation of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2017(2): 69-75.

[20] 王斌, 万运帆, 郭晨, 等. 控释尿素、稳定性尿素和配施菌剂尿素提高双季稻产量和氮素利用率的效应比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(5): 1 104-1 112.
WANG Bin, WAN Yunfan, GUO Chen, et al. A comparison of the effects of controlled release urea, stable urea and microorganisms increasing double rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(5): 1 104-1 112.

[21] 唐拴虎, 杨少海, 陈建生, 等. 水稻一次性施用控释肥料增产机理探讨[J]. 中国农业科学, 2006, 39(12): 2 511-2 520.

TANG Shuanhu, YANG Shaohai, CHEN Jiansheng, et al. Studies on the mechanism of single basal application of controlled- release fertilizers for increasing yields of rice (*oryza sativa* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(12): 2 511-2 520.

[22] 聂军, 肖剑, 戴平安, 等. 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[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2003, 29(4): 318-321.
NIE Jun, XIAO Jian, DAI Pingan, et al. Effect of controlled release nitrogen fertilizer on key enzymes activities of nitrogen metabolism and protein contents in brown rice[J]. Journal of Hunan Agricultural University, 2003, 29(4): 318-321.

[23] 李永松, 袁帅, 陈基旺, 等. 灌溉方式对湘南双季稻产量的影响机制研究[J]. 杂交水稻, 2022, 37(1): 103-110.
LI Yongsong, YUAN Shuai, CHEN Jiwang, et al. Mechanism of effects of irrigation modes on yield of double-cropping rice in Southern Hunan[J]. Hybrid Rice, 2022, 37(1): 103-110.

[24] 陈国林, 王人民, 王兆骞. 不同灌溉方式对水稻产量与生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 1998, 17(3): 20-26.
CHEN Guolin, WANG Renmin, WANG Zhaoqian. Effects of different irrigation patterns on the yield and physiological characteristics of rice[J]. Chinese Journal of Ecology, 1998, 17(3): 20-26.

[25] 姜卫兵, 高光林, 俞开锦, 等. 水分胁迫对果树光合作用及同化代谢的影响研究进展[J]. 果树学报, 2002, 19(6): 416-420.
JIANG Weibing, GAO Guanglin, YU Kaijin, et al. A review of studies on effect of water stress on photosynthesis and As-simila tion metabolism in fruit crops[J]. Journal of Fruit Science, 2002, 19(6): 416-420.

[26] 杨京平, 陈杰. 不同生长时期土壤渍水对春玉米生长发育的影响[J]. 浙江农业学报, 1998, 10(4): 188-192.
YANG Jingping, CHEN Jie. The effects of soil waterlogging at different growth stages on the growth and development of spring corn[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 1998, 10(4): 188-192.

[27] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(10): 1 859-1 865.
CHENG Jianping, CAO Cougui, CAI Mingli, et al. Effects of different irrigation modes on biological characteristics and water use efficiency of paddy rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(10): 1 859-1 865.

[28] HOU P F, XUE L X, ZHOU Y L, et al. Yield and N utilization of transplanted and direct-seeded rice with controlled or slow-release fertilizer[J]. Agronomy Journal, 2019, 111(3): 1 208-1 217.

[29] 阙金华, 张洪程, 戴其根, 等. 氮肥对稻米品质影响的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2002, 30(6): 14-16.

[30] 彭永彬, 谢先芝. 表型组学在水稻研究中的应用[J]. 中国水稻科学, 2020, 34(4): 300-306.
PENG Yongbin, XIE Xianzhi. Application of phenomics in rice research[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2020, 34(4): 300-306.

[31] 剧成欣, 陈尧杰, 赵步洪, 等. 实地氮肥管理对不同氮响应粳稻品种产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(3): 237-246.
JU Chengxin, CHEN Yaojie, ZHAO Buhong, et al. Effect of site-specific nitrogen management on grain yield and quality of japonica rice varieties differed in response to nitrogen[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2018, 32(3): 237-246.

[32] 李帅, 卫琦, 徐俊增, 等. 水肥一体化条件下控灌稻田土壤氮素及水稻生长特性研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(10): 79-86.
LI Shuai, WEI Qi, XU Junzeng, et al. Improving nitrogen use efficiency and growth of paddy rice using controlled fertigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(10): 79-86.

[33] 赵学梅, 刘笑吟, 黄涛, 等. 控制灌溉条件下不同氨基酸水溶肥对水稻生长和产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(10): 65-72.
ZHAO Xuemei, LIU Xiaoyin, HUANG Tao, et al. Effect of different soluble amino acid fertilizers on rice growth under controlled irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(10): 65-72.

[34] 陈桂芬, 黄雁飞, 刘斌, 等. 广西稻区不同水稻品种对氮肥施用量的响应差异[J]. 南方农业学报, 2021, 52(1): 137-144.
CHEN Guifen, HUANG Yanfei, LIU Bin, et al. Response difference of various rice varieties to nitrogen application rate in rice planting area in Guangxi[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(1): 137-144.

[35] 黄秋红, 刘智蕾, 李鹏飞, 等. 相同气候背景下南北方稻田土壤上水稻生长及氮响应差异研究[J]. 中国农业科学, 2021, 54(19): 4 143-4 154.
HUANG Qiuhong, LIU Zhilei, LI Pengfei, et al. Difference in nitrogen responses and nitrogen efficiency of different paddy soils in Southern and Northern China under the same climatic condition[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(19): 4 143-4 154.

[36] 张露, 梁青铎, 吴龙龙, 等. 减氮和增氧灌溉对水稻产量和氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 78-88.
ZHANG Lu, LIANG Qingduo, WU Longlong, et al. Effects of nitrogen-reducing and oxygen-increasing irrigation on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2023, 37(1): 78-88.

[37] 伍杂日曲, 郭长春, 李飞杰, 等. 减氮和机械侧深施肥对机插杂交稻产量及氮素吸收利用的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 1 034-1 041.
WU Zariqu, GUO Changchun, LI Feijie, et al. Effects of nitrogen reduction and mechanical side-deep fertilization on yield and nitrogen uptake and utilization of mechanically transplanted hybrid rice[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(5): 1 034-1 041.

[38] 李虎, 黄秋要, 陈传华, 等. 种植密度和施氮量对桂育 8 号产量及稻米外观和加工品质的影响[J]. 西南农业学报, 2020, 33(4): 718-724.
LI Hu, HUANG Qiuyao, CHEN Chuanhua, et al. Effects of density and nitrogen fertilizer rate on yield, appearance and processing quality of high quality rice Guiyu 8[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(4): 718-724.

[39] 王颖姮, 陈丽娟, 崔丽丽, 等. 施氮量对优质稻“福香占”光合特性、产量及品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2023, 37(1): 89-101.
WANG Yingheng, CHEN Lijuan, CUI Lili, et al. Effects of nitrogen rate on photosynthesis, yield and grain quality of superior quality rice “fuxiangzhan”[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2023, 37(1): 89-101.

[40] 李俊周, 邵鹏, 陈星, 等. 氮肥用量对杂交籼稻 Y 两优 886 冠层结构和产量的影响[J]. 中国稻米, 2018, 24(4): 113-116.
LI Junzhou, SHAO Peng, CHEN Xing, et al. Effects of nitrogen fertilizer amount on canopy structure and grain yield of hybrid indica rice Y liangyou 886[J]. China Rice, 2018, 24(4): 113-116.

[41] 张庆, 郭保卫, 胡雅杰, 等. 不同氮肥水平下优质高产软米粳稻的产量与品质差异[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(6): 606-616.
ZHANG Qing, GUO Baowei, HU Yajie, et al. Differences in yield and rice quality of soft japonica rice with high quality and high yield under different nitrogen levels[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2021, 35(6): 606-616.

[42] XIONG R Y, XIE J X, CHEN L M, et al. Water irrigation management affects starch structure and physicochemical properties of indica rice with different grain quality[J]. Food Chemistry, 2021, 347: 129 045.

Combined Effect of Slow-release Fertilizer and Irrigation Method on Growth, Yield and Grain Quality of Rice

WANG Leyang[1], HE Jun[1,2*], HUA Keji[1], ZHANG Caijun[3], YE Zimi[4], ZHANG Lei[5]

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education,

China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Hubei Zhanghe Project Administration Bureau, Jingmen 448156, China;

4. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Xingjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

5. School of Water Conservation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 430046, China)

Abstract: 【Objective】Slow-release fertilizer is efficient and environmentally friendly but its effectiveness is closely related to soil water. This paper studies the combined impact of slow-release fertilization and irrigation method on growth, yield and quality of rice.【Method】The pot experiment was conducted from May to September in 2021 at Hubei Irrigation Central Experimental Station. It consisted of flood irrigation (W1) and alternate wetting and drying irrigation (W2). Each irrigation treatment had six fertilizations: conventional fertilization (F_{100}), fertilizations using 120% (SF_{120}), 110% (SF_{110}), 100% (SF_{100}), 90% (SF_{90}) and 80% (SF_{80}) of the fertilizer used in F_{100} but replacing them by controlled-release fertilizer. In each treatment, we measured the plant height, numbers of tillers, chlorophyll SPAD, yield and its components, as well as amylose and gluten protein contents in each growth stage. The entropy weight TOPSIS method was used for comprehensive evaluation of the treatments.【Result】Compared with F_{100}, on average over the two irrigation treatments, SF_{100} increased plant height, tiller numbers, grain yield and glutenin content by 24.65%, 34.90%, 11.90% and 32.72%, respectively, while reduced the chlorophyll degradation and amylose content by 24.98% and 7.37%, respectively. Compared with W2, W1 increased the average plant height, chlorophyll degradation, and yield by 19.01%, 20.73%, and 12.82%, respectively, and reduced the number of tillers and the contents of amylose and glutenin by 31.05%, 0.30%, and 0.90%, respectively. Under W1, the yield of SF_{90} was 12.41% higher than that of SF_{120}; the amylose content in SF_{90} was 6.68% lower than that in SF_{120}; the glutenin content in SF_{90} was 5.33% lower than that in SF110. The entropy weight TOPSIS method showed that the relative yield of W1+SF90 was the closest to the potential yield, with the comprehensive score reaching 0.985.【Conclusion】Combining flood irrigation with a 10% reduction of conventional fertilization by using slow-release fertilizer (648 kg/hm^2 fertilizer) is a promising irrigation-fertilization for rice production in the middle and low reaches of the Yangtze River basin.

Key words: slow release fertilizer; fertilization level; growth characteristics; yield; quality; entropy weight TOPSIS method

责任编辑：赵宇龙