

不同灌溉施肥时机对稻田肥料分布和水稻生长的影响

刘德利¹, 吴文勇^{2*}, 肖娟¹, 牛晓宇¹

(1.太原理工大学 水利科学与工程学院, 太原 030000; 2.中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要:【目的】探索水肥耦合灌溉方式下最佳的灌溉施肥时机。【方法】设置 4 个处理, 分别为撒施(CK)、灌水 0~2 h 内灌液体肥(T1)、灌水 2~4 h 内灌液体肥(T2)和灌水 4~6 h 内灌液体肥料(T3), 研究了不同施肥时机对稻田肥料分布均匀性、水稻农艺性状、产量及水分利用效率的影响。【结果】在相同施肥量与灌水量条件下, T1 处理在肥料分布均匀度、分蘖数、产量、水分利用效率方面均高于其他处理($p < 0.05$); 施肥后第 3 天 CK 田间氨态氮和硝态氮量达到最高, 而其他水肥耦合处理均为第 1 天气态氮和硝态氮量最高且在肥料分布均匀度方面较 CK 高 5.63%~21.65%; 孕穗期后各处理株高比 CK 增加 6.37%~6.53%; 在分蘖数和干物质量方面, T1 处理较其他处理分别高 11.25%~23.17%和 5.75%~8.48%; 在产量和水分利用效率方面, T1 处理较其他处理分别高 13.73%~17.46%和 14.15%~17.47%。【结论】从肥料分布均匀度与增产节水效益方面考虑, 灌水 0~2 h 是最佳的施肥时机。

关键词: 稻田; 灌溉; 施肥; 水稻产量

中图分类号: S275.3

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2020580

OSID:



刘德利, 吴文勇, 肖娟, 等. 不同灌溉施肥时机对稻田肥料分布和水稻生长的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 29-36.

LIU Deli, WU Wenyong, XIAO Juan, et al. The Timing of Irrigation and Fertilization Affects Fertilizer Distribution and Rice Growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 29-36.

0 引言

【研究意义】中国是世界上水稻种植的主要国家之一, 其栽种技术已达到世界先进水平^[1]。随着水稻种植技术的提高, 肥料资源的大量投入也给环境带来极大的风险^[2]。过量使用氮肥会导致水体富营养化、大量温室气体排放以及地下水污染^[3]。因此, 合理的施肥方式对提高肥料利用率和环境保护具有重要意义^[4]。【研究进展】与旱田灌溉施肥方式不同, 水田生育期内有田面水层, 不同灌溉和施肥方式对稻田水氮分布有很大影响^[5-6]。多年来众多学者对如何科学合理地管理稻田水肥以提高水肥利用效率进行了广泛的研究。徐国伟等^[7]、许怡等^[8]、林彦宇等^[9]研究不同水氮耦合对水稻生长的影响, 结果发现适当的水分胁迫有助于水稻的生长, 少量的施肥量可获得最佳的氮肥农学利用率; 张作合等^[10]、张忠学等^[11]应用¹⁵N 示踪技术研究不同灌溉水平下的水稻对氮肥的吸收, 得出合理的水肥运筹能显著提高水稻植株对氮素的吸收与产量。漆栋良等^[12]研究不同水肥管理对氮磷流失与产量的影响, 结果获得既减少肥料流失又保证

产量的水肥管理方式。【切入点】前人围绕水氮耦合对水稻生长进行了深入研究, 但大多数集中在水量和肥量对水稻生长的影响, 施肥方式依然采用传统的撒施方式^[13-14], Santos 等^[15]和 Dillion 等^[16]最先研究将肥料预先充分溶解并与灌溉水充分混合的液体施肥方式对水氮运移及肥料利用率的影响, 并进行推广应用。梁艳萍等^[17]、白美健等^[18]研究不同畦灌水肥耦合方式对灌水及施肥均匀度的影响, 得出最优施肥均匀度的水肥管理方式。不同施肥方式会对肥料分布状况产生影响, 进而影响到水稻植株的生长^[19]。国内外学者从灌水方式、肥料施用量、比例等方面对水稻生长发育、产量、根系形态、水分及辐射利用率等方面进行广泛而深入的研究^[22-25]。但大多数集中在水量与肥量对水稻生长的影响, 而对于水肥耦合下肥料在田间的分布状态对水稻生长的影响研究较少。

【拟解决的关键问题】因此, 本试验采用将氮肥预先充分溶解并与灌溉水混合后进行液施的方式, 研究不同时机施用液体肥料与传统撒施方式相比对稻田肥料分布均匀性以及水稻农艺性状的影响, 旨在为稻田水肥管理和生产实践提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地基本情况

试验地位于黑龙江省绥化市庆安县, 地处东经 127°39'37", 北纬 46°58'1", 属寒温带大陆性气候, 多年平均降雨量 608 mm, 降雨量年内分布不均, 主

收稿日期: 2020-10-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400102); 山西省重点研发计划项目(201903D221058)

作者简介: 刘德利(1994-), 男, 黑龙江双鸭山人。硕士研究生, 主要研究方向为水文与水资源。E-mail: 1466687098@qq.com

通信作者: 吴文勇(1977-), 男, 江苏射阳人。教授级高级工程师, 博士, 主要研究方向为农业节水、水文与水资源。E-mail: wenyongwu@126.com

要集中在6—9月。多年平均水面蒸发量1 285.6 mm。年日照时间为2 600~2 800 h,无霜期时间128 d,全年大于10 ℃的有效积温2 518 ℃,可以满足1年1季的水稻生长。该地区土壤为黑土,土壤有机质量29 g/kg, pH值6.0,有效氮量173.6 mg/kg,有效磷量62 mg/kg,速效钾量108 mg/kg。

1.2 试验设计

试验于2020年开展,试验地面积3.6 hm²,试验小区面积50 m×60 m=300 m²。根据当地标准整个生育期稻田施用尿素240 kg/hm²,按基肥、蘖肥、穗肥质量比为5:3:2施入。磷肥采用45 kg/hm² P₂O₅作为基肥施入,钾肥使用80 kg/hm² K₂O于移栽前和孕穗期分2次施用且施用量比例为1:1。基肥采用农机施洒并翻入土壤,本次试验于第2次追肥时进行,田间一次灌水时长为6 h,且施肥时间为2 h。追肥试验以施肥时机为变量设1组对照、3组施肥处理(表1),分别为撒施(CK)、灌水0~2 h灌液体肥(T1)、灌水2~4 h灌液体肥(T2)和灌水4~6 h灌液体肥料(T3),每个处理进行3次重复。液体肥料溶解于肥料罐中并使用水泵在灌溉时将肥料与灌溉水充分混合后施入田块。灌溉方式采用常规淹灌,田面无水层即进行灌溉,返青期田间水层控制在30 mm以内,除分蘖末期与黄熟期不保留水层外,其他生育期控制田面水层在50 mm以内,试验选用当地的水稻品种绥粳18,其为黑龙江全省水稻主要品种,具有适应性强,抗倒伏,既高产又优质的特点。于5月17日进行插秧,株距16 cm,行距30 cm,每穴3株,9月28日收获。其他田间管理与当地一致。

表1 试验设计

Table 1 Experimental treatment design

处理	灌水方式	施肥时机
T1	水肥耦合	1/3N-2/3W
T2	水肥耦合	1/3W-1/3N-1/3W
T3	水肥耦合	2/3W-1/3N
CK	传统漫灌	撒施

1.3 试验观测项目

1.3.1 田间水样氨态氮、硝态氮量测定

在进行灌水施肥后,为避免扰动水层,每日采用离心泵采集田面水层水样,每个处理均匀选取3×5=15个取样点进行采样,样品储存于4 ℃冰箱中。采用AA3连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH)测定样品氨态氮、硝态氮量。

1.3.2 水稻株高及分蘖

每个生育期选择各处理3株长势均匀的水稻进行定点观测。用卷尺测量植株高度,孕穗前为植株根部至最高叶尖的高度,孕穗后为根部至最高穗顶的高度。测定完株高后计算每穴植株分蘖数。

1.3.3 水稻地上干物质量

每个生育期取每个处理生长均匀的植株3穴,冲

洗干净后带回实验室,将植株装袋,经烘箱105 ℃杀青30 min,再经80 ℃干燥至恒定质量,测定植株的干物质量。

1.3.4 不同施肥模式性能评价

目前国内外评价灌溉施肥性能的指标是针对肥料溶于水后直接形成不同形态氮素的化肥建立的^[19],尿素溶于水施入到田间后会水解成氨态氮,氨态氮进一步氧化还原产生硝态氮,本文采用施肥均匀度 DU_{NQ} (%)来反映施肥后氮素在田间分布的均匀程度,计算式^[20]为:

$$DU_{NQ} = \frac{\overline{X_{NQ}}}{\overline{X_N}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

式中: $\overline{X_N}$ 为整个田面水层中氮素平均质量浓度(mg/L); $\overline{X_{NQ}}$ 为整个田块氮素量具有最低值的1/2部分的平均质量浓度(mg/L),其计算方法为田间取样点测量的氮素量按从大到小顺序排列,取后1/2部分计算平均值。

1.3.5 水分利用效率

水分利用效率公式为:

$$WUE = Y/I_{RR}, \quad (2)$$

式中: WUE 为水分利用效率(kg/m³); Y 为产量(kg/hm²); I_{RR} 为灌溉用水量(m³/hm²)。

1.3.6 产量及穗部性状考察

乳熟期各处理取5穴用于考种,考察单位面积穗数、穗粒数、结实率和千粒质量。取2 m²实收计产。

1.4 数据处理

应用SPSS 20.0对数据进行整理、使用Excel制作图表、使用ArcGIS进行空间克里金差值分析。

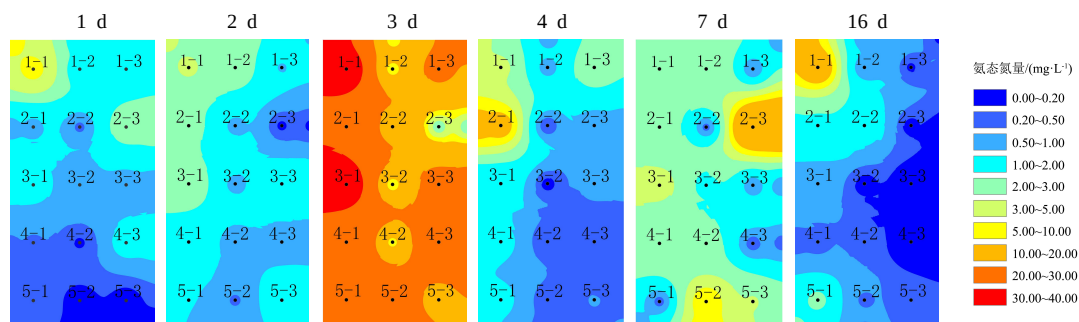
2 结果与分析

2.1 不同灌溉施肥时机对氨态氮、硝态氮分布的影响

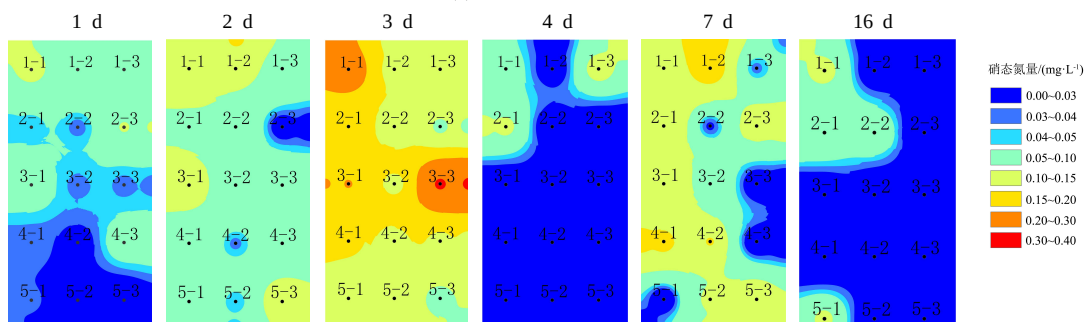
施肥后不同处理氨态氮、硝态氮量分布情况如图1所示,表2为施肥后各处理氨态氮、硝态氮均值变化。由图1可看出,CK在施肥后第3天田间氨态氮、硝态氮量达到峰值,其平均值分别为12.60 mg/L和0.15 mg/L,而其他处理均是施肥第1天氨态氮、硝态氮量最高,其中T1处理平均值分别为12.55 mg/L和0.14 mg/L, T2处理平均值分别为12.65 mg/L和0.16 mg/L, T3处理平均值分别为10.01 mg/L和0.12 mg/L,其原因是传统撒施方式固体肥料在田间存在溶解的过程而水肥耦合方式已事先将肥料溶解。由表3的施肥均匀性评价结果可知,施肥后前3天T1、T3处理与CK施肥均匀性总体差异不大($p>0.05$),第4天之后T1、T3处理施肥均匀性明显优于其他处理($p<0.05$),较CK高5.63%~21.65%,而T2处理均匀性始终最差,由此可见,就田间肥料分布而言采用灌水0~2 h液施(T1)的方式有助于形成较佳的氨态氮及硝态氮空间分布状态。

随着时间的推移各处理氨态氮及硝态氮量逐渐下降，而到第 7 天各处理氨态氮及硝态氮量突然增加，是由于第 7 天发生降雨导致田间氨态氮及硝态氮量突增。田间水样中氨态氮量均远高于硝态氮量，其原

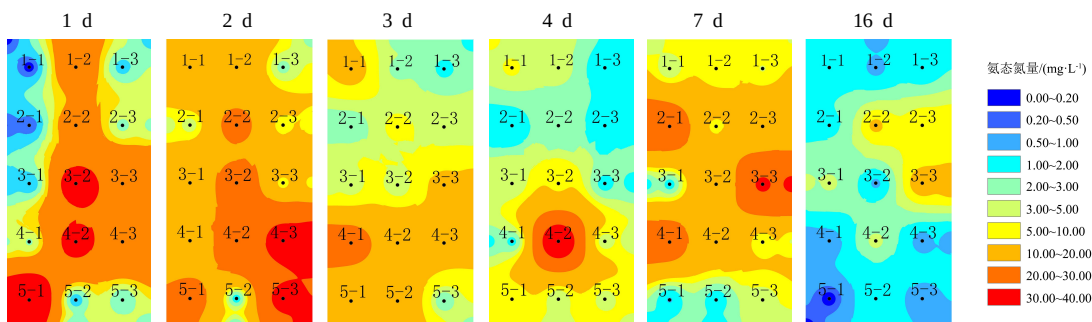
因是尿素首先分解为氨态氮，需要在土壤中进一步氧化还原才能转化成硝态氮，此结果与张忠学等^[21]研究结果一致。T3 处理由于第 4 天田间水层消退，因此没有取样。



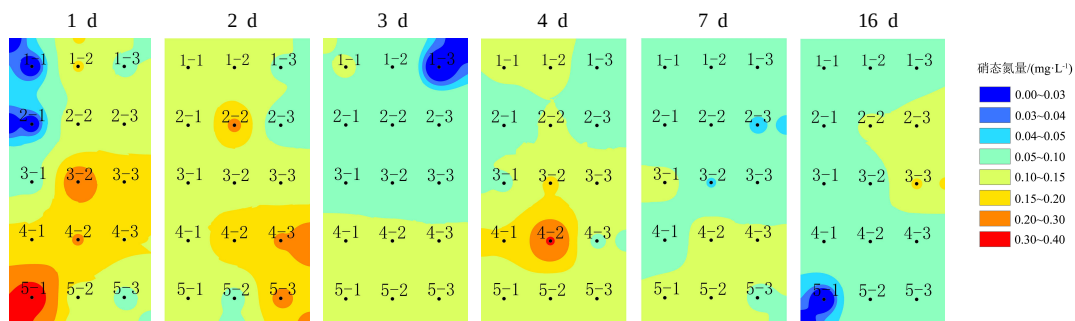
(a) 施肥后 CK 氨态氮分布



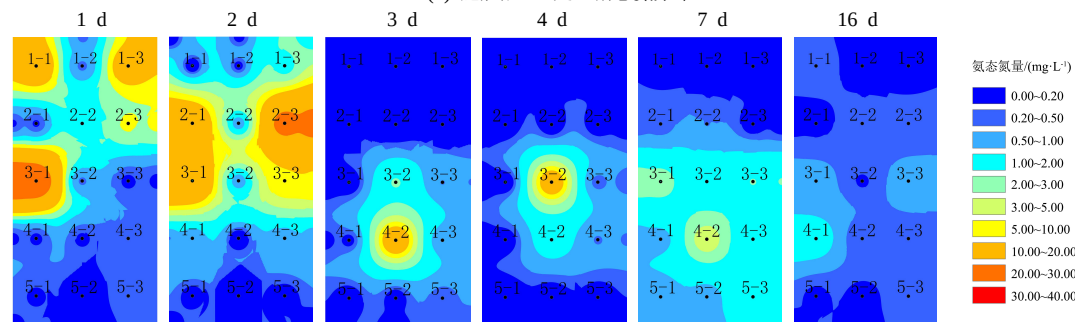
(b) 施肥后 CK 硝态氮分布



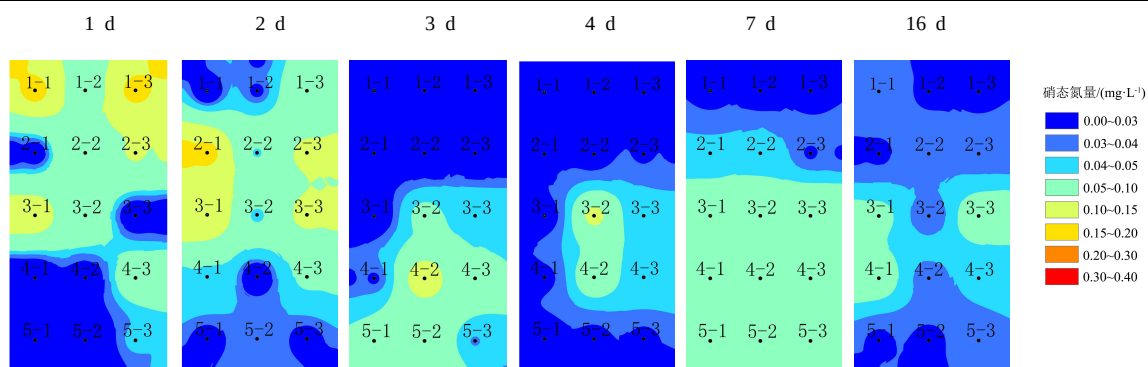
(c) 施肥后 T1 处理氨态氮分布



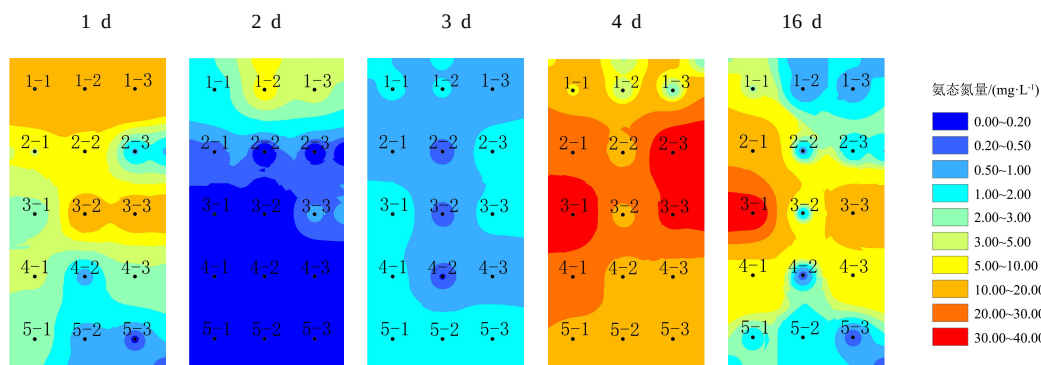
(d) 施肥后 T1 处理硝态氮分布



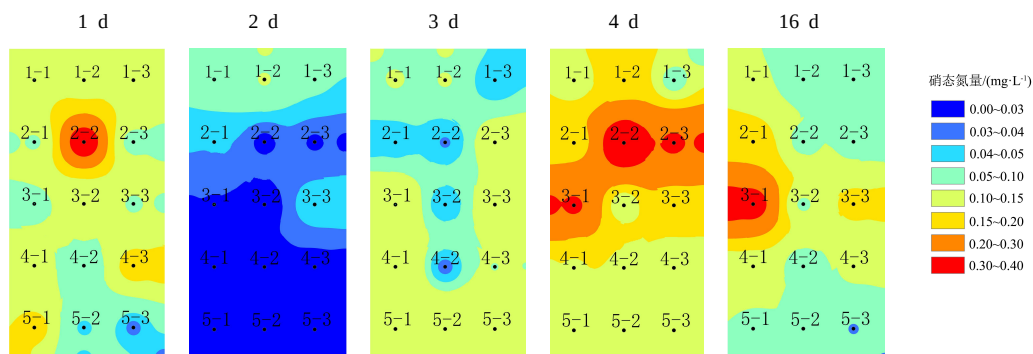
(e) 施肥后 T2 处理氨态氮分布



(f) 施肥后T2处理硝态氮分布



(g) 施肥后T3处理氨态氮分布



(h) 施肥后T3处理硝态氮分布

图1 施肥后各处理氨态氮、硝态氮量分布状况

Fig.1 Distribution of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in each treatment after fertilization

表2 施肥后各处理氨态氮、硝态氮量均值统计

Table 2 Statistics of the average ammonia nitrogen and nitrate nitrogen content of each treatment after fertilization							mg/L
处理	1 d	2 d	3 d	4 d	7 d	16 d	
氨态氮	CK	1.20±1.46a	1.42±0.92a	12.60±8.01a	1.29±1.62a	2.47±2.31a	1.09±1.79a
	T1	12.55±2.32b	10.02±4.33b	4.62±3.67b	4.91±4.15b	6.52±6.05b	2.13±1.89a
	T2	12.65±4.29b	10.52±3.90b	4.77±1.92b	3.67±1.77b	1.02±1.07a	0.34±0.40a
	T3	10.01±3.01b	8.74±1.41b	3.98±0.50b	-	11.80±4.12c	7.38±4.97b
硝态氮	CK	0.05±0.04a	0.08±0.04a	0.15±0.06a	0.02±0.04a	0.10±0.06a	0.03±0.05a
	T1	0.14±0.09b	0.14±0.05b	0.09±0.03b	0.12±0.05b	0.11±0.02a	0.08±0.02b
	T2	0.16±0.06b	0.12±0.05b	0.03±0.04c	0.02±0.03a	0.05±0.03b	0.03±0.02a
	T3	0.12±0.09b	0.13±0.03b	0.05±0.02c	-	0.17±0.11c	0.12±0.08b

注 同列不同字母表示差异显著 ($p<0.05$), 下同。

表 3 施肥后各处理施肥均匀性评价结果

Table 3 Evaluation results of fertilization uniformity of each treatment after fertilization

处理		1 d	2 d	3 d	4 d	7 d	16 d
氨态氮	CK	24.81±2.31a	47.43±4.35a	39.86±2.36b	28.14±3.58b	42.94±3.58a	23.42±1.57b
	T1	31.14±3.11a	50.88±5.62a	53.55±4.67b	40.66±4.37a	43.17±4.97a	36.74±3.58a
	T2	8.61±3.42b	8.82±1.27b	6.89±3.59c	7.77±2.46c	30.96±2.56b	30.26±1.93b
	T3	42.27±1.56a	6.69±0.98b	63.43±7.32a	-	38.57±5.54b	19.40±2.46b
硝态氮	CK	46.93±4.16a	73.85±5.24a	91.42±5.84a	13.27±4.25b	57.46±8.43b	7.82±2.49c
	T1	58.69±6.57b	77.93±6.31a	80.83±6.29a	84.53±6.26a	86.4±9.54a	79.01±4.96a
	T2	31.44±2.36c	33.89±1.24b	60.06±4.28b	20.00±2.44b	54.22±6.38b	35.97±2.56b
	T3	77.58±4.24b	17.88±2.38b	70.95±5.94b	-	92.16±3.46a	64.07±5.27a

2.2 不同灌溉施肥时机对水稻农艺性状的影响

不同施肥时机下的水稻株高及分蘖数变化如图 2 所示。从图 2 (a) 可以看出，不同处理株高随生育期的延长而增加，在分蘖中期以后进入高速生长阶段并在孕穗期达到最大值。从返青期到分蘖中期各处理株高没有显著变化 ($p>0.05$)，从分蘖期施肥后差异逐渐表现出来，孕穗期 CK 株高最小 (82.3 cm)，3 个处理较 CK 株高增加 6.37%~6.53%，且差异显著 ($p<0.05$)。

从图 2 (b) 可以看出，各处理分蘖数变化趋势基本一致，从返青期开始分蘖数迅速增多，到达分蘖中期以后有逐渐减小的趋势，其原因是分蘖期晒田导致无效分蘖消亡。分蘖中期之前各处理分蘖数没有显著差异 ($p>0.05$)，分蘖末期之后 T1、T3 处理分蘖数显著高于 T2、CK ($p<0.05$)，增加幅度在 11.25%~23.17% 之间。说明就水稻叶片发育而言，灌水 0~2 h 液施处理 (T1) 最优。

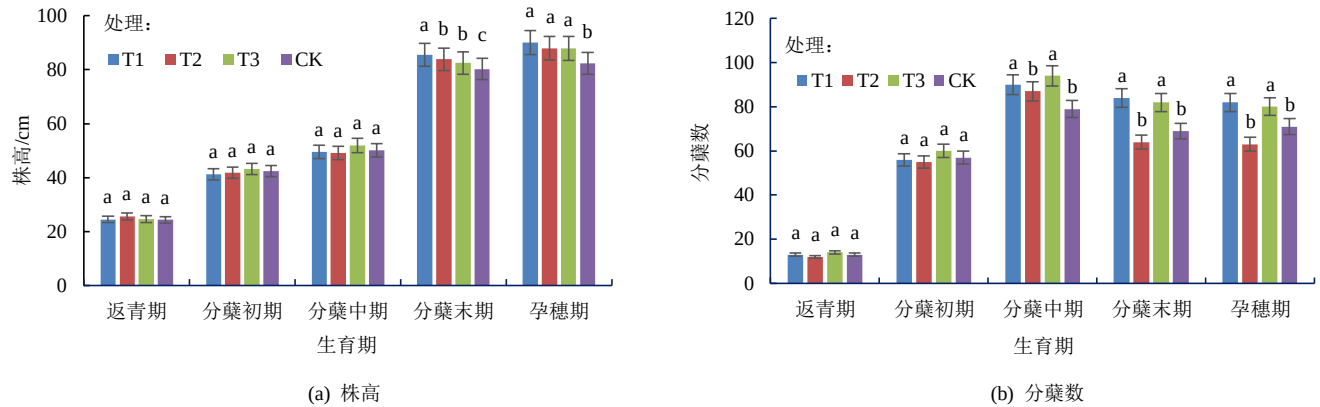


图 2 不同灌溉施肥时机下水稻株高与分蘖数

Fig.2 Rice plant height and tiller number under different fertilization modes

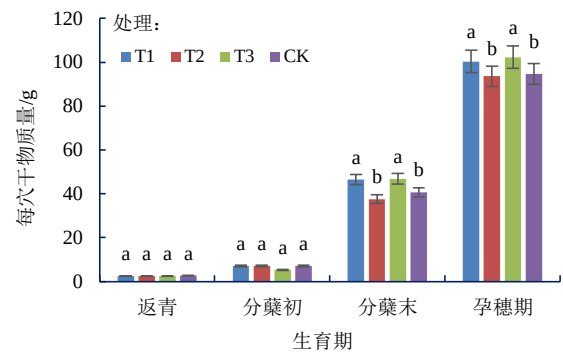


图 3 不同施肥时机下水稻干物质质量

Fig.3 Dry matter quality of rice under different fertilization modes

图 3 是不同处理各生育期水稻干物质质量变化。从图 3 可以看出，水稻干物质质量变化趋势与株高变化趋势类似，在分蘖期之后进入高速生长阶段，在分蘖末

期和孕穗期出现差异 ($p<0.05$)，T1、T3 处理干物质质量 (T1 处理干物质质量 102.37 g，T3 处理干物质质量 101.26 g) 显著高于 T2 处理、CK (T2 干物质质量 93.58 g，CK 干物质质量 94.60 g)，增加幅度在 5.75%~8.48%。说明就水稻干物质而言，灌水 0~2 h 液施方式 (T1 处理) 更有利于水稻植株的发育。

2.3 不同灌溉施肥处理对产量及水分利用效率的影响

表 4 为不同灌溉施肥处理对产量的影响，由表 4 可知，水肥耦合施肥方式对水稻的单位面积穗数以及产量有较大影响，但 T2 处理产量与 CK 差异不显著 ($p>0.05$)，虽然 T2 处理穗粒数最高 (为 111.36 粒)，但结实率却很低 (为 89.74%)。而 T1 处理与 T3 处理虽然穗粒数较低 (T1 处理为 106.34 粒，T3 处理为 102.74 粒)，但单位面积穗数 (T1 处理为 480.62 穗/m²，

T3 处理为 504.65 穗/m²)与千粒质量(T1 处理为 27.65 g, T3 处理为 27.62 g) 较高, 因此 T1 处理、T3 处理产量明显高于 CK 与 T2 处理且达到 13.73%~17.46%, 其中就产量而言以 T1 处理最佳(为 13 501.4 kg/hm²)。

由表 4 可知, 各处理在灌溉水量没有明显差异的

表 4 不同灌溉施肥处理产量及其要素

Table 4 Yield and its factors under different irrigation and fertilization treatments

处理	单位面积穗数/(穗 m ⁻²)	穗粒数	结实率/%	千粒质量/g	产量/(kg hm ⁻²)	灌水量/(m ³ hm ⁻²)	水分利用效率/(kg m ⁻³)
CK	416.21±21.86b	107.51±3.46b	93.85±2.94a	26.35±1.34b	11 143.8±103.46b	6 540.36±78.64a	1.70±0.03b
T1	480.62±27.64a	106.34±2.94b	95.52±3.43a	27.65±1.68a	13 501.4±124.52a	6 550.25±86.59a	2.06±0.05a
T2	432.74±16.82b	111.36±4.32a	89.74±2.42b	26.52±2.34b	11 510.2±114.36b	6 535.43±83.64a	1.76±0.04b
T3	504.65±28.37a	102.74±3.85b	93.06±4.31a	27.62±1.95a	13 343.7±134.67a	6 520.84±79.53a	2.05±0.05a

3 讨论

与传统撒施方式相比, 灌水 0~2 h 液施处理与其他处理相比肥料分布均匀度提高了 6.33%~17.44%。这与 Abbasi 等^[26]研究结果相似, 证实了水肥耦合施肥方式与撒施方式相比, 确实能提高肥料在田间分布的均匀性。说明通过施肥装置控制施肥时机可以使施肥均匀、完善人工撒施的不足。此外, 本研究还发现, 与传统撒施方式相比, 在分蘖末期之后水肥耦合施肥方式株高增加了 6.37%~6.53%, 而分蘖末期之后 T1、T3 处理分蘖数较 T2 处理、CK 增加 11.25%~23.17%, 且 T1、T3 处理干物质质量较 T2 处理、CK 增加 5.75%~8.48%。这一结果与谷少委等^[20]研究结果一致, 即水肥耦合施肥方式会对作物生长产生积极影响。经初步分析, 水肥耦合施肥方式能够促进作物生长的原因可能是不同施肥时机的水肥耦合改变了肥料在田间的分布, 使肥料更加均匀分布在田间, 减少了肥料无效损失, 促进了植株的生长发育。但关于不同施肥时机的水肥耦合施肥方式这方面的前期研究主要针对旱田, 而对水田在该方面的研究较少, 这也为今后的研究提供了一定参考。

在水稻产量与水分利用效率方面, 高剑民等^[27]研究表明, 不同液施方式对水氮均匀度影响显著, 从而提高了产量与水分利用效率。本试验也发现, 灌水 0~2 h 液施和灌水 4~6 h 液施处理的水稻产量较撒施与灌水 2~4 h 液施处理高 13.73%~17.46%, 同时水分利用效率高 14.15%~17.47%, 其中 T1 处理均高于其他处理。

在降雨对田间氨态氮及硝态氮分布影响方面, 本试验研究发现, 降雨后田间水层中氨态氮及硝态氮量有不同程度的增加, CK、T1 处理降雨后氨态氮量增加范围在 1.18~1.61 mg/L, 而 T3 处理降雨后氨态氮量增加 7.82 mg/L, 其原因是降雨时 CK 与 T1 处理田间尚存水层, 对雨水中氮素有稀释作用, 而 T3 处理降雨时田间无水层, 因此 T3 处理水样中氨态氮及硝态氮质量浓度较高。说明降雨对田间氨态

情况下 ($p>0.05$), T1、T3 处理水分利用效率明显高于 CK 及 T2 处理 ($p<0.05$), 其中 T1 处理水分利用效率最高 (为 2.06 kg/m³), T3 处理次之, 说明灌水 0~2 h 液施处理 (T1) 有利于水分利用效率的提高。

氮及硝态氮量具有补给作用。在肥料分布均匀性方面, 降雨后各处理氨态氮分布均匀性与降雨前相比增加 2.51%~23.19%, 硝态氮分布均匀性增加 1.87%~41.19%。

4 结论

1) 与 CK 相比, 灌水 0~2、4~6 h 液施处理施肥均匀性高 5.63%~21.65%, 其中灌水 0~2 h 液施的方式 (T1) 最有助于形成较佳的肥料空间分布状态。

2) 水肥耦合的液施方式的株高比撒施方式增加 6.37%~6.53%。灌水 0~2 h 液施和灌水 4~6 h 液施的方式分蘖数和干物质质量分别较撒施与灌水 2~4 h 液施处理高 11.25%~23.17%和 5.75%~8.48%, 其中灌水 0~2 h 液施处理最优。

3) 灌水 0~2 h 液施和灌水 4~6 h 液施的方式产量与水分利用效率分别较撒施与灌水 2~4 h 液施处理方式高 13.73%~17.46%和 14.15%~17.47%, 其中灌水 0~2 h 液施处理最优。

4) 降雨中氨态氮及硝态氮量较高, 降雨对田间氨态氮及硝态氮量与分布均匀度有不同程度的增加。

5) 综合考虑肥料分布均匀性与增产节水效益得出, 灌水 0~2 h 液施处理是最佳的施肥方式。

参考文献:

- [1] 吴汉, 柯健, 何海兵, 等. 不同间歇时间灌溉对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 37-44.
WU Han, KE Jian, HE Haibing, et al. Experimental study on the effects of different intermittent irrigations on yield and water use efficiency of rice [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 37-44.
- [2] 晏军, 吴启俊, 朱建强, 等. 适雨灌溉下不同施肥模式对机插稻田水环境及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(2): 56-63.
YAN Jun, WU Qixia, ZHU Jianqiang, et al. Effects of different fertilization models on paddy water environment and yield in machine-transplanted rice under irrigation adjusted by rainfall[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(2): 56-63.
- [3] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 284-291.
ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effects of different water and nitrogen managements on soil nitrogen and fertilizer nitrogen in

- maize field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 284-291.
- [4] 张作合, 张忠学. 水炭运筹对寒地黑土区稻田土壤肥料氮素残留的影响[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 284-294.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. Effects of water and biochar management on nitrogen fertilizer residue in paddy fields of cold and black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 284-294.
- [5] 庞喆, 王启龙. 不同灌溉量对土壤理化性质及水稻生长发育的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(S2): 40-44.
PANG Zhe, WANG Qilong. Effects of different irrigation amount on reconstructing soil physical and chemical properties and rice growth[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(S2): 40-44.
- [6] GARG K K, DAS B S, SAFEEQ M, et al. Measurement and modeling of soil water regime in a lowland paddy field showing preferential transport[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(12): 1 705-1 714.
- [7] 徐国伟, 陆大克, 孙会忠, 等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响[J]. 农业工程学报, 2017(4): 186-194.
XU Guowei, LU Dake, SUN Huizhong, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017(4): 186-194.
- [8] 许怡, 吴永祥, 王高旭, 等. 小区和田块尺度下水稻不同灌溉模式的节水减污效应分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(5): 62-68.
XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Impact of irrigation methods on saving water and alleviating pollutant at different scales in paddy field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(5): 62-68.
- [9] LIN Yanyu. Effect of water and fertilizer coupling optimization test on water use efficiency of rice in black soil regions[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(2): 151-156.
- [10] 张作合, 张忠学. 稻作水炭运筹下氮肥吸收转运与分配的¹⁵N示踪分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 239-249.
ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue. ¹⁵N Tracer-based analysis of effects of water and biochar management on nitrogen absorption, transport and distribution in rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 239-249.
- [11] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. ¹⁵N示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配[J]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 309-317,346.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. ¹⁵N Tracer-based analysis of water and nitrogen management differences in uptake and partitioning of n applied at different growth stages in transplanted rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 309-317,346.
- [12] QI D, WU Q, ZHU J. Nitrogen and phosphorus losses from paddy fields and the yield of rice with different water and nitrogen management practices[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1):1-12.
- [13] 陈鹏, 张忠学, 陈帅宏, 等. 寒地黑土区节水灌溉下水稻对基肥氮素的吸收分配[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2):36-43.
CHEN Peng, ZHANG Zhongxue, CHEN Shuaihong, et al. Uptake of basal application nitrogen by rice from black soil under water-saving irrigation in temperate region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2):36-43.
- [14] 王长明, 张忠学, 吕纯波, 等. 不同灌溉模式寒地稻田CH₄和N₂O排放特征及增温潜势分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 14-20, 68.
WANG Changming, ZHANG Zhongxue, LYU Chunbo, et al. CH₄ and N₂O emission from paddy field in cold region is impacted by irrigation methods[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 14-20, 68.
- [15] SANTOS D V, SOUSA P L, SMITH R E. Model simulation of water and nitrate movement in a level-basin under fertigation treatments[J]. Agricultural Water Management, 1997, 32(3): 293-306.
- [16] DILLON J, EDINGER-MARSHALL S, LETEY J. Farmers adopt new irrigation and fertilizer techniques: Changes could help growers maintain yields, protect water quality[J]. California Agriculture, 1999, 53(1): 24-31.
- [17] 梁艳萍, 许迪, 李益农, 等. 冬小麦不同畦灌施肥模式水氮分布田间试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(3): 22-27.
LIANG Yanping, XU Di, LI Yinong, et al. Field experiment on water and nitrogen distribution for winter wheat under border strip fertigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(3): 22-27.
- [18] 白美健, 许迪, 李益农. 冬小麦表施尿素畦灌下土壤水氮分布试验研究[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1 256-1 260.
BAI Meijian, XU Di, LI Yinong. Experimental study on spatial distribution of soil water and inorganic nitrogen under border irrigation after scattering urea[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(10): 1 256-1 260.
- [19] 张志昊, 王珍, 栗岩峰, 等. 滴灌系统毛管单/双向供水方式对灌水和施肥均匀性的影响[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 727-737.
ZHANG Zhihao, WANG Zhen, LI Yanfeng, et al. Effect of lateral layout on fertigation uniformity in drip irrigation system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(6): 727-737.
- [20] 谷少委, 高剑民, 邓忠, 等. 畦灌与施肥时机对土壤硝态氮分布和冬小麦产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(9): 134-142.
GU Shaowei, GAO Jianmin, DENG Zhong, et al. Effects of border irrigation and fertilization timing on soil nitrate nitrogen distribution and winter wheat yield[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(9): 134-142.
- [21] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 控制灌溉下秸秆还田对稻田土壤氮素组成的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(11): 229-238.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of straw returning on nitrogen composition in paddy soil under controlled irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 229-238.
- [22] 陈姣, 吴凤平, 王辉, 等. 生物炭对南方红壤和水稻土水力学特性的影响分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(9): 73-80.
CHEN Jiao, WU Fengping, WANG Hui, et al. The effects of biochar amendment on hydraulic properties of red and paddy soils in Southern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(9): 73-80.
- [23] 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[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(6): 67-72.
HE Jun, HE Tiankai, ZHANG Yuhang, et al. The combined effects of water and fertilizer applications on root uptake of N and P and yield of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(6): 67-72.
- [24] SANDHU S S, MAHAL S S, VASHIST K K, et al. Crop and water productivity of bed transplanted rice as influenced by various levels of nitrogen and irrigation in northwest India[J]. Agricultural Water Management, 2012, 104(2): 32-39.
- [25] LIU Lijun, CHEN Tingting, WANG Zhiqin, et al. Combination of site-specific nitrogen management and alternate wetting and drying irrigation increases grain yield and nitrogen and water use efficiency in super rice[J]. Field Crops Research, 2013, 150(12): 226-235.
- [26] ABBASI F, ADAMSEN F J, HUNSAKER D J, et al. Effects of flow depth on water flow and solute transport in furrow irrigation: field data analysis[J]. Journal of Irrigation & Drainage Engineering, 2003, 129(4): 237-246.
- [27] 高剑民, 邓忠, 吕谋超, 等. 畦灌液施方式对夏玉米灌溉质量和水分利用率的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 79-86.
GAO Jianmin, DENG Zhong, LYU Mouchao, et al. Effect of border fertigation model on irrigation quality and water using efficiency of summer maize[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 81-88.

The Timing of Irrigation and Fertilization Affects Fertilizer Distribution and Rice Growth

LIU Deli¹, WU Wenyong^{2*}, XIAO Juan¹, NIU Xiaoyu¹

(1.School of Water Conservancy Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030000, China;

2.China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: **【Background】** China is one of major rice-growing countries in the world. Excessive use of nitrogen fertilizers has led to eutrophication, increase in greenhouse gas emissions and groundwater pollution. Improving fertilizer utilization efficiency and reducing its adverse impact on the environment is hence essential to sustaining rice production. Differing from crops in dryland, paddy field has a water layer on its surface which has a significant impact on efficacy and consequence of irrigation and fertilization. Previous studies on water-nitrogen coupling in paddy field focused on its impact on rice growth while overlooking the impact of timing of irrigation and fertilization. **【Objective】** The objective of this paper is to investigate the impact of fertilizer types, timing of irrigation and fertilization on nitrogen distribution and traits of rice, aimed to improve water and fertilization management of paddy fields and reduce their detrimental impact on environment. **【Method】** The experiment used liquid fertilizer and sprinkler irrigation. The treatments included: applying the fertilizer in the first two hours after irrigation (T1), applied the fertilizer between 2~4 hours following irrigation (T2), and applied the fertilizer between 4~6 hours after irrigation (T3). Traditional surface-broadcasting was taken as the control (CK). During the experiment, we measured the uniformity of fertilizer distribution, traits, yield and water use efficiency of the rice in each treatment. **【Result】** When irrigation and fertilization amount were the same, T1 was most effective for making fertilizer distribution uniform, increasing tiller numbers, yield and water utilization efficiency at significant level ($P<0.05$). In CK, nitrogen content peaked three days after the fertilization, while in other treatments it maximized just one day after the fertilization with the associated fertilizer distribution uniformity increased by 5.63%~21.65% compared to CK. After the booting stage, the treatment increased plant height by 6.37%~6.53%. T1 increased tiller numbers and dry matter by 11.25%~23.17% and 5.75%~8.48%, respectively, compared to CK. T1 also increased the yield and water utilization efficiency by 13.73%~17.46% and 14.15%~17.47%, compared to other treatments and CK. **【Conclusion】** Considering fertilizer distribution uniformity and increase in yield and water use efficiency, the best fertilization timing is to apply the liquid fertilizer in the first two hours following irrigation.

Key words: paddy field; irrigation; fertilization timing; rice yield

责任编辑: 白芳芳