

氮肥用量和运筹对冷浸田水稻产量和氮素利用率的影响

方林发¹, 张宇亭¹, 谢 军¹, 黄兴成²,
赵亚南³, 杨林生¹, 石孝均¹

1. 西南大学 资源环境学院, 重庆 400715; 2. 贵州省农业科学院 土壤肥料研究所, 贵阳 550006;

3. 河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450002

摘要: 冷浸田是我国西南地区主要的水稻田, 通过合理的氮肥管理, 以提高冷浸田水稻产量和氮肥利用率十分必要。本研究通过田间试验研究了不同的氮肥用量和氮肥运筹对稻谷产量及其构成、氮素利用效率的影响, 以期为西南地区冷浸田合理的氮肥管理提供依据。试验设 5 个氮肥施用水平: 0(N0), 90(N90), 120(N120), 150(N150), 180(N180) kg/hm², 3 个氮肥运筹方式, 即底肥: 分蘖肥: 穗粒肥氮肥施用比例分别为 60:40:0(T1), 40:60:0(T2) 和 40:20:40(T3), 以及控释氮肥 1 次施用处理(T4)。结果表明, N120, N150 和 N180 处理水稻产量均显著高于 N0 和 N90 处理, 其中以 N150 处理稻谷产量和氮肥利用率最高, 分别为 9 466.65 kg/hm² 和 30.75%, 氮肥的回收利用率比 N120 和 N180 处理高 2.37, 3.54 个百分点, 且 N150 处理水稻收获指数显著高于 N120 和 N180 处理。3 种氮肥运筹方式及控释氮肥处理间水稻产量、生物量及籽粒氮素吸收量差异均无统计学意义, 但氮肥采用底肥: 分蘖肥: 穗粒肥=60:40:0 处理, 水稻收获指数、结实率、每穗粒数均高于其余氮肥运筹及控释氮肥处理。鉴于西南地区的冷浸田氮素水平和基础地力较高, 施氮量宜为 120~150 kg/hm²; 氮肥运筹以普通尿素按底肥: 分蘖肥: 穗肥=60:40:0 施用较为适宜。

关键词: 氮肥用量; 氮肥运筹; 冷浸田; 氮肥利用率

中图分类号: S511

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2020)03-0053-08

冷浸田是我国西南地区主要的水稻田之一, 其面积约 346 万 hm², 分别占全国稻田和低产稻田面积的 15% 和 44%^[1-2]。冷浸田由于长期受地表水及地下水渍害, 导致土壤水热不协调、物理性质差、有机质积累多、还原性有毒物质累积等^[3-7], 直接或间接影响水稻的生长发育及产量水平。有效的田间管理措施, 能够提高冷浸田作物养分利用率, 增加作物产量。而氮肥管理是影响作物产量最直接的因素, 氮素营养状况与水稻产量等密切相关^[8]。氮肥在我国水稻增产中有重要贡献^[9-10], 合理施用氮肥是提高水稻产量、维持农田氮素平衡、保证土壤可持续利用的途径^[8], 但是氮肥施用过量则导致作物易遭受病虫害和易倒伏等问

收稿日期: 2018-12-18

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2016YFD0200104)。

作者简介: 方林发(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事植物营养与土壤肥力研究。

通信作者: 石孝均, 研究员, 博士研究生导师。

题,进而影响水稻产量^[11-12]。在福建冷浸田试验中发现,增施氮肥显著促进了水稻分蘖,提高了水稻产量^[6]。但过量施用氮肥,将引起氮肥利用率的下降,导致环境污染^[13-14]。前人研究表明,氮肥施用时期对水稻的生长发育产生影响,在农民重施基肥的基础上,采用前氮后移,能够提高水稻成穗率,使有效光合面积和光合速率提高,促进中后期干物质积累,提高产量^[15-17]。冷浸田由于长期处于水饱和状态,水稻移栽初期地温低,土壤养分尤其是氮释放慢,影响水稻生长前期养分吸收和分蘖,从而影响产量;合理施肥能减少这种不利影响。目前针对冷浸田的养分管理研究大部分集中于通过适量增施磷钾肥^[3, 5, 8, 18-19],来改善土壤有效磷钾质量分数,促进水稻增产;而氮肥用量及氮肥运筹方式对西南地区冷浸田水稻产量和氮肥吸收利用率的影响却鲜有报道。因此,本研究以西南地区冷浸田为研究对象,研究不同氮肥用量和不同氮肥运筹方式对水稻产量及其构成、氮素吸收和利用率的影响,以期为西南地区冷浸田水稻增产和氮肥合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在重庆市铜梁区小林镇鱼龙村农户稻田中进行,试验点属典型亚热带季风气候,年平均气温 17.8 °C,年均降雨量 1 003 mm。供试土壤为遂宁组紫色泥岩发育的石灰性紫色水稻土,属冷浸田,土壤理化性质如表 1 所示。种植制度为单季稻制,4 月下旬插秧,8 月下旬收获。

表 1 土壤基本性质

pH 值	有机质/ (g · kg ⁻¹)	全氮/ (g · kg ⁻¹)	有效氮/ (mg · kg ⁻¹)	有效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)
8.0	34.2	1.61	232.2	2.2	76

1.2 试验设计

试验设氮肥用量和氮肥运筹两个因素。氮肥用量设 5 个水平: 0(N0), 90(N90), 120(N120), 150(N150), 180(N180) kg/hm², 以上处理均按底肥—分蘖肥—穗粒肥为 60-40-0 的比例施用。

氮肥运筹是在施氮量为 150 kg/hm² 基础上,按底肥—分蘖肥—穗粒肥比例 60-40-0(T1), 40-60-0(T2) 和 40-20-40(T3) 设 3 个运筹方式; 同时设置控释氮肥一次施用处理(T4), 以 60% 控释尿素和 40% 普通尿素混合, 作底肥一次撒施。除控释氮肥处理, 其他处理氮肥用普通尿素; 磷肥和钾肥分别为过磷酸钙和氯化钾, 用量为 75 kg/hm² (P₂O₅) 和 90 kg/hm² (K₂O), 磷钾肥均作底肥一次撒施。分蘖肥和穗粒肥分别于播种后 80, 104 天施用。

每个处理设 3 次重复, 共 24 个小区, 随机区组排列。小区面积为 20 m² (4m × 5m), 各小区单独起田埂, 并用塑料薄膜覆盖包埋, 保证各小区能独立排灌, 田水互不渗窜。水稻品种为缙优 217, 株行距分别为 20 cm 和 30 cm, 水稻于 3 月 1 日进行播种育秧, 4 月 22 日进行移栽, 8 月 24 日收获, 其他田间管理根据当地农民习惯进行, 并在处理间保持一致。

1.3 测定方法

水稻收获时, 在小区的对角线上按 S 型选取 5 个点, 每点取有代表性的植株 4 穴, 每个小区共取 20 穴, 整株取回用于考种及养分质量分数测定, 其余植株分小区单独收获, 测定实际产量。植株氮质量分数测定采用常规方法^[20]。

1.4 数据处理与统计分析

水稻籽粒氮素累积量(kg/hm²) = 籽粒产量 × 籽粒氮质量分数;

水稻秸秆氮素累积量(kg/hm²) = 秸秆产量 × 秸秆含氮量;

籽粒收获指数 $HI(\%) = \text{籽粒产量} / \text{生物量} \times 100$;

氮收获指数 $NHI(\%) = (\text{籽粒吸氮量} / \text{地上部总吸氮量}) \times 100$;

氮素利用效率的计算方法如下^[21-24]:

肥料氮表观利用率表征作物对肥料中氮的回收效率, $RE_N = (N - N_0) / F \times 100$;

肥料氮偏生产力表征投入单位氮肥所生产的作物产量, $PFN = Y / F$;

肥料氮贡献率指施氮增加的产量占总产量的比率, $FCR_N = (Y - Y_0) / Y \times 100$;

肥料氮生理利用率指作物吸收单位氮素所收获的籽粒产量的增加量, $PE_N = (Y - Y_0) / (N - N_0)$;

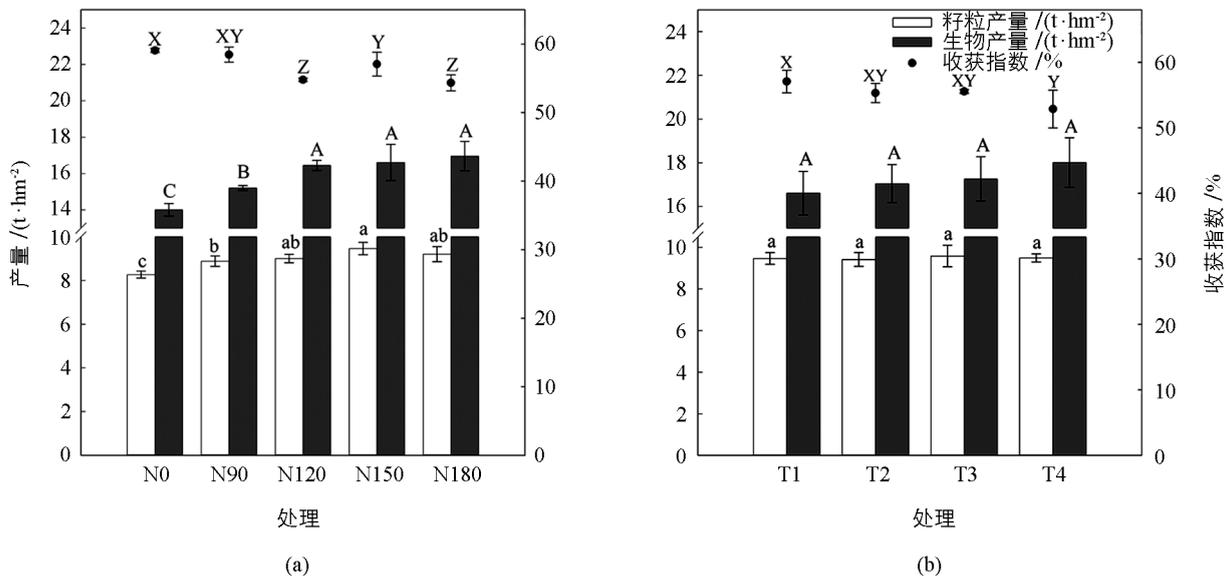
式中: Y 为施氮肥处理作物籽粒产量; Y_0 为未施氮处理作物籽粒产量; N 为施氮处理作物收获时地上部总吸氮量; N_0 为未施氮收获时地上部总吸氮量; F 为施氮量;

采用单因素方差分析进行差异显著性检验,显著性在 0.05 水平有统计学意义;数据处理与统计分析在 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 20.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 氮肥用量和运筹对水稻产量及地上部生物量的影响

不同氮肥用量对水稻产量的影响存在差异(图 1a),其中以施氮 150 kg/hm^2 产量最高,为 9466.65 kg/hm^2 。氮肥用量在 $120, 150, 180 \text{ kg/hm}^2$ 时产量差异无统计学意义,但比不施氮肥处理分别增产 $8.9\%, 14.4\%, 11.3\%$,地上部生物量分别增加了 $17.39\%, 18.56\%$ 和 21.01% 。不同氮肥用量处理的籽粒收获指数从大到小依次为: $N_0, N_{90}, N_{150}, N_{120}, N_{180}$ 。3种氮肥运筹方式和控释氮肥处理间水稻产量及地上部生物量差异均无统计学意义(图 1b)。但是,在同一施氮水平下(150 kg/hm^2),3种氮肥运筹方式和控释氮肥处理间水稻收获指数从大到小依次为: T_1, T_3, T_2, T_4 ,处理 T_1, T_2, T_3 间差异无统计学意义,但均高于控释氮肥处理 T_4 。



图中籽粒产量(a, b, c),生物量(A, B, C)和收获指数(X, Y, Z)不同字母表示处理间 $p < 0.05$, 差异有统计学意义。

图1 不同氮肥用量(a)和氮肥运筹(b)对水稻产量及生物量的影响

2.2 氮肥用量和运筹对水稻产量结构的影响

从施肥对水稻产量结构的影响来看(表 2),不同氮肥用量处理均显著提高了水稻成熟期的有效穗数,其中以施氮 180 kg/hm^2 最高,比不施氮肥处理显著提高了 27.37% 。而对于每穗粒数而言,不同氮肥用量差异并无统计学意义,但是穗粒数和结实率较低。相比 N_0 处理, N_{180} 处理显著降低了水稻结实率和千粒

质量,降幅分别为 8.25%和 3.99%。

由表 2 可知,氮肥运筹处理之间对水稻有效穗数和每穗粒数差异无统计学意义,但与控释氮肥处理 T4 相比,3 种施氮运筹方式处理水稻结实率均显著提高了 5.35%~8.47%。在氮肥运筹方式中,处理 T3 千粒质量显著高于其他 3 种氮肥运筹处理。

表 2 氮肥用量及运筹处理水稻产量结构的差异

处 理		有效穗数/	每穗粒数/	结实率/	千粒质量/
		($10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	个	%	g
氮肥用量处理	N0	156.75±23.27b	248.55±14.61a	75.27±2.20a	25.58±0.097a
	N90	182.05±16.85a	255.42±30.09a	72.84±1.33ab	24.93±0.29b
	N120	183.15±14.38a	247.98±21.07a	67.95±1.56b	25.16±0.35ab
	N150	179.30±22.40a	253.10±21.17a	71.81±3.19ab	24.79±0.30b
	N180	199.65±6.40a	228.87±5.00a	69.06±3.25b	24.56±0.29b
氮肥运筹处理	T1	179.30±22.40a	253.10±21.17a	71.81±3.19a	24.79±0.30b
	T2	182.05±28.68a	242.89±15.43a	70.09±1.57a	25.02±0.36b
	T3	163.35±24.30a	245.17±20.41a	69.45±3.58a	25.52±0.13a
	T4	183.70±20.63a	237.10±25.47a	65.73±4.00b	24.58±0.22b

注:同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异有统计学意义。下同。

2.3 不同氮肥用量和运筹处理的氮素吸收量及表观平衡

不同氮肥用量水稻氮素吸收量及表观平衡如表 3 所示。秸秆、地上部氮素吸收量在不同氮肥用量处理间从大到小依次为: N180, N150, N120, N90, N0, 其中,以施氮量 180 kg/hm^2 为最高,秸秆和地上部氮素吸收量比不施氮肥处理显著增加 68.5%和 37.6%,而秸秆及地上部氮素累积量在处理 N120, N150, N180 间差异均无统计学意义。不同氮肥用量下籽粒氮素吸收量最高为 N150,比对照(N0)显著提高了 31.40%,虽和 N120, N180 处理没有明显差异,但却表现出高于二者的趋势。

在相同氮肥用量下,不同氮肥运筹处理对籽粒氮素吸收量没有显著影响。施用控释氮肥(T4)显著提高了秸秆和地上部氮素吸收量,比其他氮肥运筹处理高 51.70%~63.19%和 21.6%~23.7%,而 T1, T2 和 T3 处理间差异均无统计学意义。

表 3 不同施氮量和氮肥运筹对氮素吸收量及表观平衡

处 理		当年氮投入量/ kg	氮素吸收量/kg			氮素表观平衡/ kg
			秸秆	籽粒	地上部	
氮肥用量处理	N0	0	34.27±2.88c	88.96±5.13c	123.23. ±2.85c	-123.23
	N90	90	40.6±1.71b	103.01±0.22b	143.61±1.74b	-53.61
	N120	120	49.12±6.96ab	108.17±4.20ab	157.29±10.61ab	-37.29
	N150	150	52.47±9.04a	116.89±0.97a	169.36±8.85a	-19.36
	N180	180	57.77±6.56a	114.44±9.99a	172.21±16.27a	7.79
氮肥运筹处理	T1	150	52.47±9.04b	116.89±0.97a	169.36±8.85b	-19.36
	T2	150	50.52±9.47b	116.67±6.06a	167.19±8.48b	-17.19
	T3	150	51.07±2.89b	115.36±7.57a	166.43±10.16b	-16.43
	T4	150	82.43±20.68a	123.46±4.37a	205.89±16.34a	-55.89

2.4 氮肥用量和运筹对氮素利用率的影响

不同氮肥用量处理间氮收获指数存在差异(表 4),均值从大到小依次为: N90, N150, N120, N180,

但 N120, N150 和 N180 处理间差异并没有统计学意义. N120, N150, N180 处理间肥料氮表观利用率差异无统计学意义, 但是以 N150 处理最高, 为 30.75%, 比 N90, N120, N180 高 8.11, 2.37, 3.54 个百分点. 随着氮肥用量的增加, 肥料氮偏生产力依次降低, 且不同氮肥用量下肥料氮偏生产力之间差异有统计学意义. N150 处理的肥料贡献率显著高于 N90 和 N120 处理, 但不同处理间肥料氮生理利用率差异并无统计学意义.

在相同施氮量(150 kg/hm²)时, 相对于控释氮肥 T4 处理, T1, T2, T3 处理氮收获指数分别显著提高了 12.74%, 15.81%, 14.85%, 而 T4 处理的肥料氮表观利用率高达 55.1%, 比其他 3 个处理提高 24.35%~26.3%. 说明施用控释氮肥显著提高了水稻对氮素的吸收利用率, 但是吸收的氮主要保留在茎叶中. 不同氮肥运筹处理间肥料氮偏生产力和肥料贡献率差异无统计学意义. 而相比 T4 处理, 处理 T3 显著提高了肥料氮的生理利用率.

表 4 氮肥用量及运筹处理氮素利用效率

处理		氮收获指数 <i>NHI</i> /%	肥料氮表观利用率 <i>RE_N</i> /%	肥料氮偏生产力 <i>PFP_N</i> /(kg·kg ⁻¹)	肥料氮贡献率 <i>FCR_N</i> /%	肥料氮生理利用率 <i>PE_N</i> /(kg·kg ⁻¹)
氮肥用量处理	N90	71.74±0.85a	22.64±1.94b	98.77±2.65a	6.88±2.46b	30.46±12.16a
	N120	68.87±2.46ab	28.38±8.84a	75.08±1.59b	8.15±1.94b	22.23±5.44a
	N150	69.15±3.77ab	30.75±5.71a	63.11±1.87c	12.55±2.59a	26.77±8.65a
	N180	66.48±0.98b	27.21±9.05a	51.16±1.92e	10.07±3.34ab	18.94.±0.99a
氮肥运筹处理	T1	69.15±3.77a	30.75±5.71b	63.11±1.87a	12.55±2.59a	26.77±8.65ab
	T2	69.88±4.47a	29.30±5.65b	62.79±2.21a	12.08±3.15a	27.38±12.40ab
	T3	69.30±0.74a	28.80±6.77b	63.89±3.45a	13.52±4.53a	29.67±4.66a
	T4	60.34±7.11b	55.10±10.89a	63.32±1.29a	12.87±1.77a	15.53±5.73b

3 讨论

3.1 氮肥用量对水稻产量及氮素利用的影响

合理施用氮肥是提高冷浸田氮肥利用率和生产力的重要途径. 本研究结果表明, N120, N150, N180 处理水稻籽粒产量和地上部生物量均显著高于对照(N0)和低氮处理(N90), 虽然三者间差异并没有统计学意义, 但 N150 籽粒收获指数显著高于 N120, N180 处理(图 1), 原因主要是在施氮量为 150 kg/hm² 条件下, 通过提高肥料氮贡献率和肥料氮表观利用率(表 4), 从而提高了籽粒氮素吸收量和结实率(表 3), 进而提高了水稻产量和收获指数(图 1). 可见在西南紫色土丘陵冷浸水稻田中, 氮肥施用量维持在 150 kg/hm² 可以明显提高水稻对氮肥的吸收利用, 以保证水稻的产量和生物量. 前人研究表明, 广东、福建、安徽冷浸田氮肥推荐量分别为 165~195、105~153.9, 153.9~169 kg/hm² [6, 8, 25], 和本研究氮肥推荐量(120~150 kg/hm²)大致相同, 而相比于常规稻田氮肥推荐量(140~206 kg/hm²) [25], 冷浸田氮肥用量属于低限范围. 其原因可能是本研究的地块有较高的基础地力, 不施用氮肥处理中产量也高达 8 273.70 kg/hm². 而在安徽沿江稻区田块基础地力为 3 750~4 500 kg/hm² [15], 西南常规稻区(四川、重庆、云南和贵州 4 省(市))田块基础地力为 6 488.6~7 772.1 kg/hm² [26], 因此, 本试验冷浸田的基础地力远高于常规稻田. 前人研究发现, 常规稻田有机质和有效氮质量分数分别为 17.2~23.9, 93.2~95.3 mg/kg [26-27], 远低于本试验冷浸田有机质和有效氮质量分数(34.2 g/kg 和 232.2 mg/kg). 另外, 于飞等 [25] 总结 2004 年以来氮肥效应研究, 得出我国水稻氮肥表观利用率为 39%, 而本研究中, 不同氮肥施用量水稻氮表观利用率(除控释氮肥处理外)均小于 39%, 原因可能是冷浸田含有大量的还原性亚铁、有机酸等物质, 其会抑制水稻地上部和根系的生长, 降低叶片叶绿素质量分数, 从而影响水稻对肥

料氮的高效吸收利用^[28].

3.2 氮肥运筹对水稻产量及氮素利用的影响

水稻对氮素吸收不仅与氮肥用量有关,而且受氮肥运筹策略影响较大^[25].前人研究表明^[15-17],在长江下游及北方稻区,氮肥运筹以基肥、分蘖肥、穗粒肥分3次施用为宜.而本研究表明,氮肥分两次(底肥60%,分蘖肥40%)施用较为适宜,即前氮后移对冷浸田水稻籽粒产量和地上部生物量无显著影响,原因可能是由于西南稻区水稻生长发育受前期低温、后期高温天气的影响^[29-30];以及冷浸田养分释放缓慢,能够满足水稻生长后期养分需求.与王飞等^[6]在福建冷浸田的研究结果相一致.虽然处理T3的水稻产量与处理T1,T2相比差异并无统计学意义,但由于其显著提高了水稻千粒质量(表2),而对产量有增加趋势(图1),说明冷浸田适当降低基蘖肥、增加穗粒肥可以有效提高后期干物质的积累,从而增加水稻的千粒质量,提高产量水平.王斌等^[31]研究表明,控释尿素肥料具备最高和最稳定的氮素利用效果,水稻地上部特别是秸秆的吸氮量远高于常规尿素.本研究也表明,相比于常规尿素处理(T1),控释氮肥处理秸秆氮素吸收量提高了57.1%,且控释氮肥处理肥料氮表观利用率显著高于其余3种氮肥运筹处理(表4),原因主要是施用控释氮肥后明显提高了水稻有效穗数(表2),从而提高了水稻地上部生物量和水稻产量(图1),进而提高了肥料氮素利用率.另外,由于控释氮肥养分缓慢释放,释放的氮素被水稻吸收后主要保留在秸秆中(表3),而能够达到减少氮素损失和减少环境污染的作用.因此,考虑到西南冷浸稻田基础地力氮素水平高等特点,控释氮肥的施用量及释放速率的调整还需进一步的研究.

4 结 论

1) 西南地区冷浸田在施氮量为90~180 kg/hm²均显著提高籽粒产量,为8 889.6~9 466.6 kg/hm².其中氮肥用量为150 kg/hm²时,籽粒产量和肥料氮利用率达最高.

2) 在施氮量同为150 kg/hm²条件下,氮肥运筹以普通尿素按底肥:分蘖肥:穗肥=60:40:0施用适宜,可提高水稻收获指数和结实率.

3) 在同等施氮量下,一次性施用控释尿素的水稻产量与施用普通尿素差异无统计学意义,但显著提高了氮肥的回收利用效率.

参考文献:

- [1] XIAO Z H. Principal Types of Low Yield Paddy Soil in China [M] //Proceedings of Symposium on Paddy Soils. Berlin, Heidelberg; Springer Berlin Heidelberg, 1981: 151-159.
- [2] 全国土壤普查办公室. 中国土壤 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [3] 柴娟娟, 廖 敏, 徐培智, 等. 我国主要低产水稻冷浸田养分障碍因子特征分析 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 284-288.
- [4] QIU S L, WANG M K, WANG F, et al. Effects of Open Drainage Ditch Design on Bacterial and Fungal Communities of Cold Waterlogged Paddy Soils [J]. Brazilian Journal of Microbiology, 2013, 44(3): 983-991.
- [5] 林增泉, 徐 朋, 彭加桂, 等. 冷浸田类型与改良研究 [J]. 土壤学报, 1986, 23(2): 157-162.
- [6] 王 飞, 林 诚, 李清华, 等. 不同氮肥用量与施肥时期对冷浸田单季稻生长及农学效率的影响 [J]. 土壤, 2017, 49(5): 882-887.
- [7] 邓绍欢, 曾令涛, 关 强, 等. 基于最小数据集的南方地区冷浸田土壤质量评价 [J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1326-1333.
- [8] 张祥明, 王文军, 凌国宏, 等. 不同氮量水平下冷浸田水稻氮和钾的吸收特征研究 [J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 180-184.

- [9] 张卫峰,马林,黄高强,等. 中国氮肥发展、贡献和挑战 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(15): 3161-3171.
- [10] 王伟妮,鲁剑巍,陈防,等. 湖北省水稻施肥效果及肥料利用效率现状研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 289-295.
- [11] CU R M. Effect of Sheath Blight on Yield in Tropical, Intensive Rice Production System [J]. Plant Disease, 1996, 80(10): 1103.
- [12] QUANG DUY P, ABE A, HIRANO M, et al. Analysis of Lodging-Resistant Characteristics of Different Rice Genotypes Grown under the Standard and Nitrogen-Free Basal Dressing Accompanied with Sparse Planting Density Practices [J]. Plant Production Science, 2004, 7(3): 243-251.
- [13] 张维理,田哲旭,张宁,等. 我国北方农用氮肥造成地下水硝酸盐污染的调查 [J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(2): 82-89.
- [14] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径 [J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [15] 吴文革,张四海,赵决建,等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
- [16] 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.
- [17] 杨安中,吴文革,李泽福,等. 氮肥运筹对超级稻库源关系、干物质积累及产量的影响 [J]. 土壤, 2016, 48(2): 254-258.
- [18] 林诚,李清华,王飞,等. 不同施磷水平对冷浸田水稻磷含量、光合特性及产量的影响 [J]. 热带亚热带植物学报, 2016, 24(5): 553-558.
- [19] 徐祥玉,张敏敏,刘晔,等. 磷钾调控对冷浸田水稻产量和养分吸收的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1076-1083.
- [20] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [21] CASSMAN K G, PENG S, OLK D C, et al. Opportunities for Increased Nitrogen-use Efficiency from Improved Resource Management in Irrigated Rice Systems [J]. Field Crops Research, 1998, 56(1-2): 7-39.
- [22] 王伟妮,鲁剑巍,鲁明星,等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究 [J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(5): 1058-1065.
- [23] 徐培智,解开治,刘光荣,等. 冷浸田测土配方施肥技术对水稻产量及施肥效应的影响 [J]. 广东农业科学, 2012, 39(22): 70-73.
- [24] 谢军,赵亚南,陈轩敬,等. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率 [J]. 中国农业科学, 2016, 49(20): 3934-3943.
- [25] 于飞,施卫明. 近10年中国大陆主要粮食作物氮肥利用率分析 [J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1311-1324.
- [26] 徐富贤,熊洪,张林,等. 西南地区氮肥后移对杂交中稻产量及构成因素的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1): 29-36.
- [27] 王光火, A. DOBERMANN, C. WITT, 等. 浙江金华地区水稻土养分供应能力研究 [J]. 中国水稻科学, 2001, 15(3): 201-205.
- [28] 王飞,林诚,李清华,等. 江南冷浸田治理利用研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(9): 1151-1160.
- [29] 高升,钟万顺,隗溟,等. 水稻不同秧龄和气温对生育初期生育的影响研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(11): 23-29.
- [30] 赵艺,秦宁生,卢杰,等. 近53年四川省水稻生育期热量条件变化规律研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2016, 38(11): 8-15.
- [31] 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): 1104-1112.

Effects of Nitrogen Rate and Application Regime on Rice Yield and Nitrogen Use Efficiency in Cold Waterlogged Paddy Fields

FANG Lin-fa¹, ZHANG Yu-ting¹, XIE Jun¹, HUANG Xing-cheng²,
ZHAO Ya-nan³, YANG Lin-sheng¹, SHI Xiao-jun¹

1. School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Guizhou Institute of Soil and Fertilizer, Agricultural Resources and Environment, Guiyang 550006, China;

3. College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China

Abstract: Cold waterlogged paddy fields were the main form of paddy fields in Southwest China and, therefore, it is necessary to improve rice yield and nitrogen fertilizer utilization rate in cold waterlogged paddy fields through reasonable nitrogen fertilizer management. In order to provide guidance in nitrogen management of cold waterlogged paddy fields in Southwest China, a field experiment was conducted to study the effects of different nitrogen rates and application regimes on the seed yield and yield components of rice and on nitrogen use efficiency. In the experiment, nitrogen was applied at 0, 90, 120, 150 and 180 kg/hm², designated N0, N90, N120, N150 and N180, respectively. Three nitrogen application regimes were designed, i. e. the proportion of base fertilizer : tillering fertilizer : panicle fertilizer were 60 : 40 : 0 (T1), or 40 : 60 : 0 (T2), or 40 : 20 : 40 (T3), and a single application of controlled release nitrogen fertilizer before transplanting (T4). The results showed that the rice yield of N120, N150 and N180 treatments were significantly higher than that of N0 and N90 treatments. N150 have the highest yield of rice (9 466.65 kg/hm²), and nitrogen use efficiency (30.75%), and its recovery rate of nitrogen fertilizer was 2.37% and 3.54% higher than that of N120 and N180. The rice harvest index (HI) in N150 plot was significantly higher than that in N120 and N180 plots. Although there was no significant difference in rice yield, biomass and grain nitrogen absorption between the three nitrogen fertilizer application regimes and controlled release nitrogen treatment, the harvest index, seed setting rate and grain number per panicle of T1 were higher than those of the other application regimes and controlled release nitrogen treatment. Taking into consideration the fact that the nitrogen level and basic soil fertility of the cold waterlogged paddy fields of Southwest China are relatively high, a nitrogen rate of 120~150 kg/hm² and an application regime of base fertilizer : tillering fertilizer : panicle fertilizer 60 : 40 : 0 are recommended.

Key words: nitrogen dosage; nitrogen application regime; cold waterlogged paddy field; nitrogen use efficiency