

# 水氮互作对冷凉区域稻田氮素特征的影响

王孟雪<sup>1,2</sup>, 张忠学<sup>2</sup>, 吕纯波<sup>3</sup>, 潘鹏<sup>1</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319;

2. 东北农业大学 水利与建筑学院, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省农田水利管理中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** [目的] 研究寒地稻田不同水肥管理模式下的土壤供氮特征, 为筛选环境友好型寒地稻作灌溉施肥模式提供支撑。[方法] 在大田试验条件下, 设置间歇灌溉、淹灌 2 种水管理模式及 4 个供氮水平(0, 75, 105, 135 kg/hm<sup>2</sup>), 以龙庆稻 2 号为材料, 研究水肥互作模式对水稻产量、土壤供氮特征及氮素利用率的影响。[结果] 灌溉模式和供氮水平对水稻产量、地上部氮素积累量、水稻氮素利用率均有显著( $p < 0.05$ )或极显著影响( $p < 0.01$ )。间歇灌溉模式下, 增加氮肥施用量有利于提高单位面积水稻有效穗数、籽粒产量、生物产量、籽粒氮素积累量, 均以施氮 105 kg/hm<sup>2</sup> 处理最高; 水肥互作对氮素利用率影响明显, 水稻的氮肥利用率在 21.4%~59.1%; 氮肥生理利用率、氮肥农学效率及氮肥偏生产力均随着施氮量的提高而降低, 施氮量 75 kg/hm<sup>2</sup> 处理的氮素吸收利用各项指标均高于其他处理。相关分析表明, 水肥因素是影响氮素积累及氮素吸收利用效率的重要因子。[结论] 综合考虑水稻产量及氮素利用率的矛盾, 间歇灌溉配合适宜减氮模式应予以高度重视。

**关键词:** 寒地稻作; 水肥互作; 供氮能力; 氮素利用

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)03-0075-06

中图分类号: S274.3

**文献参数:** 王孟雪, 张忠学, 吕纯波. 水氮互作对冷凉区域稻田氮素特征的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(3):75-80. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.013; Wang Mengxue, Zhang Zhongxue, Lü Chunbo, et al. Effects of water and nitrogen interaction on nitrogen characteristics of rice field in cold region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(3):75-80. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.013

## Effects of Water and Nitrogen Interaction on Nitrogen Characteristics of Rice Field in Cold Region

WANG Mengxue<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhongxue<sup>2</sup>, LÜ Chunbo<sup>3</sup>, PAN Peng<sup>1</sup>

(1. College of Agricultural, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China;

2. College of Water Conservancy and Architectural, Northeast Agricultural University, Harbin, Heilongjiang 150030, China; 3. Water Conservancy Management Center of Heilongjiang, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract:** [Objective] The soil nitrogen characteristics under different water management pattern on cold paddy were studied to provide support for selection of irrigation and fertilization pattern of environment friendly cold rice. [Methods] An in situ field experiment was conducted to investigate the effects of water and nitrogen interaction on rice yields, soil nitrogen supply and nitrogen utilization using materials Longqing rice No. 2. The experiment had two water management patterns (intermittent irrigation and flood irrigation), each pattern had four nitrogen levels(0, 75, 105, 135 kg/hm<sup>2</sup>). [Results] Rice yield, amount of accumulated nitrogen of aerial part and nitrogen use efficiency of rice were obviously affected by water management pattern and nitrogen supply level. Under intermittent irrigation pattern, indices of effective panicles per unit area, grain yield, biological yield and grain nitrogen accumulation amount were all improved when nitrogen level increased. All these indicators performed best in nitrogen level of 105 kg/hm<sup>2</sup>. Nitrogen use

收稿日期: 2016-09-12

修回日期: 2016-11-11

资助项目: 国家重点研发计划项目“水田高效节水灌溉技术集成应用”(2016YFC0400108); 黑龙江省农垦总局项目“寒地水稻高效、安全生产综合配套技术示范与应用”(HNK135-02-02)

第一作者: 王孟雪(1978—), 女(汉族), 黑龙江省铁力市人, 博士, 副教授, 主要从事农业水土工程研究。E-mail: wangmengxue1978@163.com。

通讯作者: 张忠学(1967—), 男(汉族), 黑龙江省哈尔滨市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事节水农业理论与技术研究。E-mail: zhangzhongxue@163.com。

efficiency was obviously affected by water and nitrogen interaction. The rice nitrogen utilization efficiency ranged from 21.4% to 59.1%. The nitrogen physiological utilization efficiency, nitrogen agronomic efficiency and nitrogen partial productivity were all decreased with the increase of nitrogen application. When nitrogen application level was 75 kg/hm<sup>2</sup>, the above three indicators of nitrogen uptake were higher than those of other treatment. Correlation analysis showed that the factors of water and fertilizer were the most important influence factors of nitrogen accumulation and nitrogen uptake efficiency. [Conclusion] Considering the contradiction between rice yield and nitrogen utilization efficiency, we should pay more attention to the pattern of intermittent irrigation plus appropriate nitrogen application.

**Keywords:** cold rice culture; water fertilizer interaction; nitrogen supply ability; nitrogen utilization

水稻是对氮肥敏感的作物,在水稻全生育期中,氮肥的施用对水稻的生长发育及后期产量起到至关重要的作用。但稻田氮素过量施用造成一系列的环境问题,国内外对稻田施氮的迁移转化及其环境效应开展了大量的研究<sup>[1-4]</sup>。氮素的流失不仅造成水体的富营养化,同时也使一部分氮素转化为 N<sub>2</sub>O 释放进入大气,对大气的温室效应造成一定的影响。

在稻田土壤氮素转化的研究中,对氮素损失的定量研究一直是个难点,常见的是研究稻田土壤氮素的淋溶规律<sup>[5-6]</sup>。此外,利用模型模拟土壤中氮素的动态变化的研究较多<sup>[7-9]</sup>。对稻田土壤氮素动态规律的研究,主要是研究土壤中氮素的转化过程,既稻田土壤的硝化及反硝化过程。稻田土壤水分状况是影响土壤硝化与反硝化过程的最重要因素之一<sup>[10-11]</sup>,也影响着水稻植株对土壤中氮肥的吸收利用。目前,国内对稻田氮素转化及水氮利用率的研究较多<sup>[12-16]</sup>,黑龙江寒地稻田的供氮特征也有相关研究<sup>[17-18]</sup>。但这些研究大多数为施肥管理或水分管理单一因素对氮素转化的影响,对寒地稻田水氮互作条件下土壤供氮特征的研究较少。黑龙江水稻种植面积达 4.00 × 10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,是全国最大的水稻种植区,也是中国北方重要的商品粮基地。稻田的节水灌溉模式,能有效改善稻田通透性和土壤含氧量,使水稻根系活力增强,提升对氮肥的吸收作用,从而减少氮素的损失。

本文拟对水氮互作条件下稻田土壤的无机态氮动态变化、水稻产量、水分利用效率及氮肥利用率开展研究,以期揭示寒地稻田不同水肥管理模式下的土

壤供氮特征,为筛选环境友好型寒地稻作灌溉施肥模式提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验于 2015 年在黑龙江省水稻灌溉试验中心站进行,该站位于庆安县和平镇。多年平均降水量 500~600 mm,多年平均气温为 2~3 ℃。作物水热生长期为 156~171 d,全年无霜期 120~130 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候<sup>[18]</sup>。土壤类型为白浆土型水稻土,耕层土壤(0—20 cm)容重 1.01 g/cm<sup>3</sup>,孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为:有机质含量 41.4 g/kg,pH 值 6.40,全氮 1.08 g/kg,全磷 15.23 g/kg,全钾 20.11 g/kg,碱解氮 154.36 mg/kg,有效磷 25.33 mg/kg 和速效钾 157.25 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设计间歇灌溉(C<sub>1</sub>)及淹灌(C<sub>2</sub>)2 种水分管理模式,4 个施氮肥水平,即氮肥用量分别为高肥水平处理 135 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>1</sub>),中肥水平 105/hm<sup>2</sup>(N<sub>2</sub>),低肥水平处理 75 kg/hm<sup>2</sup>(N<sub>3</sub>),不施氮肥(N<sub>4</sub>)处理,每个处理 3 次重复。其中间歇灌溉模式为节水灌溉模式,将每次灌溉水量分次灌入田面,田面无明显水层;淹灌处理田面水层较深,为当地常规灌溉方式。由于黑龙江春季气温较低,淹水状态有利于插秧后返青,因此在返青期田面保持较深水层。为减少水稻无效分蘖,分蘖末期均进行晒田。土壤水分调节标准如表 1 所示。

表 1 稻田生育期内各处理土壤水层深度

处 理	水层深度/mm			分蘖末	水层深度/mm			黄熟
	返青期	分蘖初	分蘖盛		拔节孕穗	抽雄开花	灌浆	
间歇灌溉	0—30	0—40	0—40	晒田	0—30	0—40	0—40	落干
淹 灌	0—30	0—60	0—60	晒田	0—60	0—60	0—60	落干

### 1.3 试验管理

共设置 8 个小区,各小区 100 m<sup>2</sup>,小区四周加设

保护行。为减少侧向渗透,小区四周用塑料板埋入田间地表以下 40 cm 深进行防渗。每个小区安装水表

及水尺控制灌溉水量和水层深度。

试验前均施尿素 105 kg/hm<sup>2</sup>, 五氧化二磷 45 kg/hm<sup>2</sup>, 氧化钾 80 kg/hm<sup>2</sup>。P 肥作基肥一次施用, K 肥分基肥和 8.5 叶龄(幼穗分化期)2 次施用, 前后比例为 1:1。尿素按照基肥、蘖肥、调节肥、穗肥比例为 5:2.5:1:1.5 分施。

供试水稻品种为龙庆稻 2 号, 4 月 10 日播种育苗, 种植密度为 30 cm×10 cm, 每 1 m<sup>2</sup> 33 穴。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。5 月 3 日施基肥, 5 月 20 日移栽, 5 月 28 日施返青肥, 6 月 15 日施分蘖肥, 7 月 9 日施穗肥, 9 月 20 日收获。水稻生育期为 126 d, 分为返青期(5 月 20 日至 5 月 29 日)、分蘖期(5 月 30 日至 7 月 7 日)、拔节孕穗期(7 月 8 日至 7 月 21 日)、抽雄开花期(7 月 22 日至 8 月 1 日)、灌浆期(8 月 2 日至 8 月 24 日)、黄熟期(8 月 25 日至 9 月 10 日)。

## 1.4 样品采集及分析

1.4.1 植株样品 植株样品的茎叶及籽粒分别测定植物养分含量。在水稻成熟期将植株地上部分茎叶和籽粒分别烘干称干重, 并测其全氮含量, 以估算各项氮肥利用效率指标。采用凯氏定氮法测定植株总氮<sup>[19]</sup>。

1.4.2 土壤样品 用土钻均匀取 0—20 cm 新鲜土样, 装入泡沫保温箱内, 放置冰袋保鲜, 带回实验室冷冻贮存, 测定土壤硝态氮和铵态氮含量。采样同时, 同步测定每个小区的水层深度及土壤 10 cm 温度。土壤铵态氮含量采用滴定法测定, 硝态氮含量采用比色法测定<sup>[19]</sup>。

## 1.5 计算方法和数据分析

试验数据采用 EXCEL 2007 和 SPSS 8.0 进行统计分析。均值之间的多重比较利用 Duncan's 分析,

统计性显著性假设为  $p < 0.05$ 。

氮素相关指标计算公式如下<sup>[6]</sup>:

$$\text{氮肥利用率 } R_E = (U_N - N_0) / F_N \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氮肥生理利用率 } P_E = (Y_N - Y_0) / (U_N - U_0) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{氮肥农学利用率 } N_{AE} = (Y_N - Y_0) / F_N \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{氮肥偏生产力 } P_{EP} = Y_N / F_N \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $Y_0, N_0$ ——不施氮小区作物籽粒产量和地上部总吸氮量(kg);  $Y_N, U_N$ ——施氮小区作物籽粒产量和地上部总吸氮量(kg);  $F_N$ ——施氮小区的氮肥用量(kg)。

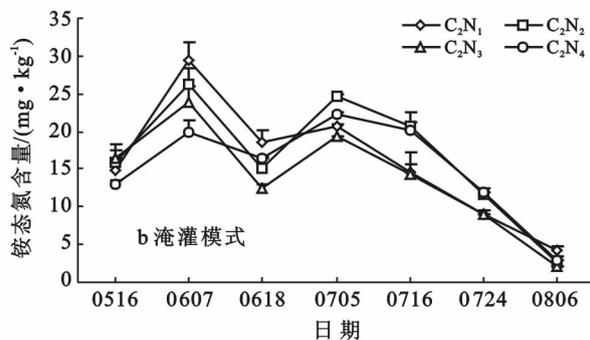
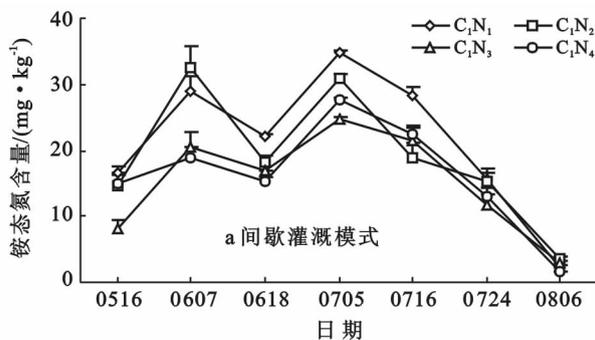
## 1.6 产量测定

在水稻收获期, 每个小区选取长势中等且一致的 5 块区域, 每个区域面积为 1 m<sup>2</sup>, 共计 5 m<sup>2</sup> 进行测产, 单收、单打和单晒, 计算实际产量; 同时在每个测产小区随机选取长势中等的水稻植株 20 株, 取样并装入网袋内, 用于测定各处理水稻生物量、有效穗数、实粒数、空壳率、千粒重和计算水稻理论产量。

# 2 结果与分析

## 2.1 不同处理土壤无机态氮浓度的变化

不同处理土壤铵态氮及硝态氮含量变化特征如图 1 所示。相同灌溉模式下, 各处理土壤铵态氮含量变化规律较一致, 均出现双峰型特征, 而各肥力水平之间没有表现出明显的规律性。从移栽后开始上升, 在分蘖期达到整个生育期高峰。这是由于在分蘖期水分供应较为充足, 土壤 N 矿化、分蘖肥施用和水稻吸收氮过程综合作用的结果。之后逐渐下降, 从分蘖末期开始小幅增长, 到孕穗期达到第 2 个峰值, 之后降低, 直至收获。在所有处理中, C<sub>1</sub>N<sub>2</sub> 处理在分蘖期出现最高值 6.7 mg/kg, C<sub>2</sub>N<sub>4</sub> 处理在分蘖末期出现最小值 3.24 mg/kg。



注: C<sub>1</sub> 为间歇灌溉; C<sub>2</sub> 为淹灌; N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub>, N<sub>3</sub>, N<sub>4</sub> 分别为施氮肥 135, 105, 75 kg/hm<sup>2</sup> 和不施氮肥。下同。

图 1 2015 年黑龙江省水稻生长季各处理土壤铵态氮的动态变化

各处理水稻生长季节土壤硝态氮含量的动态变化如图 2 所示。各处理土壤硝态氮含量明显低

于土壤铵态氮含量。在全生育期内, 各处理土壤硝态氮含量呈现相似的变化趋势。水稻泡田期土壤硝态

氮含量较高,之后下降,在分蘖期(6月7日)出现第1次峰值,在孕穗期(7月16日)出现第2次峰值,此阶段后再次下降,从灌浆期(7月24日)开始再次回升。

间歇灌溉模式下的各处理土壤硝态氮含量波动较大,在0.19~6.29 mg/kg,而淹灌模式下的各处理

波动较小,在1.14~5.15 mg/kg。各施肥水平间没有出现明显的规律性特征。在所有处理中, $C_1N_2$ 处理在抽雄开花期(7月5日)出现最低值0.34 mg/kg, $C_1N_4$ 处理在黄熟期(8月6日)出现最大值6.29 mg/kg。

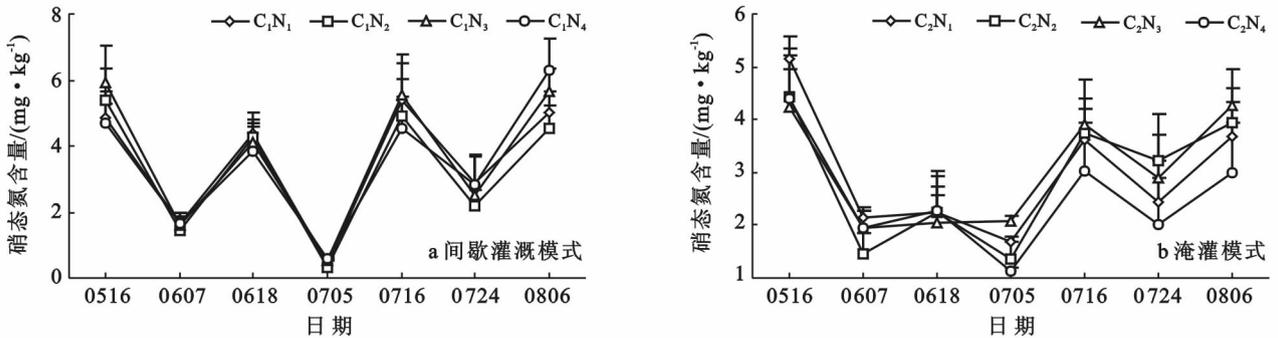


图2 2015年黑龙江省水稻生长季各处理土壤硝态氮的动态变化

## 2.2 不同处理水稻产量的变化

各处理水稻产量及生理指标结果见表2。间歇灌溉模式下,高施氮量具有明显的增产优势,中等施氮量处理及高施氮量处理的水稻产量相对于对照( $C_1N_4$ )均达到了显著性差异( $p < 0.05$ );但高施氮量和中施氮量处理之间没有显著性差异( $p > 0.05$ );其中 $C_1N_2$ 处理的水稻产量达到10 267 kg/hm<sup>2</sup>,为所有处理中最高。淹灌模式下,不同氮肥施用量,水稻增产优势明显,增产幅度在51.2%~61.5%;但施氮

量梯度的变化,没有使水稻产量具有显著性差异( $p > 0.05$ )。单从灌溉模式来看,对水稻产量的影响不显著。灌溉模式对水稻秸秆产量的影响较小,而相同灌溉模式下,秸秆产量随着施氮量的增加而呈上升趋势。各处理水稻收获指数并没有表现出和产量相似的规律性。灌溉模式相同,氮肥施用量的增加,既促进水稻籽粒形成,同时也增加了水稻秸秆的产量,使总的生物产量增加。

表2 各处理水稻产量及其生理指标

处理	单位面积穗数 (穗·m <sup>-2</sup> )	穗粒数/ 粒	结实率/ %	千粒重/ g	籽粒产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	秸秆产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	生物产量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	收获指数/ %	
间 歇 灌 溉	$C_1N_1$	70	99	89.30	27.67	10 081	7 798	17 879	43.62
	$C_1N_2$	71	102	88.95	28.67	10 267	6 995	17 262	40.52
	$C_1N_3$	62	83	85.45	28.33	7 489	5 523	13 012	42.45
	$C_1N_4$	58	73	84.17	26.5	6 371	4 930	11 301	43.62
淹 灌	$C_2N_1$	71	63	85.64	27.83	9 439	6 854	16 293	42.07
	$C_2N_2$	67	65	87.77	27.83	9 231	6 465	15 696	41.19
	$C_2N_3$	66	67	86.40	26.83	8 836	5 170	14 006	36.91
	$C_2N_4$	49	63.5	80.78	26.25	5 843	3 968	9 811	40.44

对水稻产量及构成因子进行相关分析,结果如表3所示:施氮量与千粒重呈显著性相关( $p < 0.05$ ),与有效穗数、结实率、籽粒产量和生物产量呈极显著相关( $p < 0.01$ ),与每穗粒数相关性不显著,与收获指数呈负相关关系,但相关性不显著。水稻籽粒产量及生物产量与千粒重及结实率关系密切,相关性均达到极显著水平,受每穗总粒数影响较小,没有达到显著性相关关系。水稻产量与产量构成因子与收获指数均呈现负相关性,但没有达到显著性水平。

## 2.3 不同水氮模式对水稻氮素吸收利用的影响

不同水氮管理模式各处理水稻氮素吸收和利用效率计算分析结果如表4所示。从表4的结果看出,各处理水稻氮肥利用率相对较高,在21.4%~59.1%。灌溉模式对水稻氮肥利用率没有规律性的变化。同一灌溉模式下,施肥量的变化对水稻氮肥利用率影响较大。淹灌模式下,随着施肥量的增加,氮肥利用率逐渐降低。间歇灌溉模式下,水稻氮肥利用率最高值均出现在中等肥量条件下 $C_1N_2$ 处理。

表 3 水稻产量及产量构成因子的相关性分析

因子	相关系数						
	施氮量	有效穗数	每穗总粒数	结实率	千粒重	籽粒产量	生物产量
有效穗数	0.907**						
每穗总粒数	0.400	0.544					
结实率	0.853**	0.908**	0.640*				
千粒重	0.677*	0.744**	0.591*	0.640*			
籽粒产量	0.925**	0.955**	0.540	0.943**	0.682*		
生物产量	0.937**	0.952**	0.564	0.929**	0.709**	0.981**	
收获指数	-0.334	-0.370	-0.057	-0.420	-0.128	-0.483	-0.306

注:\*,\*\*分别表示相关性达到显著(0.05)和极显著(0.01)水平。

水氮因素对水稻的氮肥生理利用率的影响没有发现明显的规律性特征。间歇灌溉模式和淹灌模式下,各处理水稻的氮肥生理利用效率差别不大,变化幅度分别为 62.8~69.5 kg/kg 和 68.4~80.8 kg/kg。

不同水氮处理的水稻农学利用效率的变化特征与氮肥利用率的特征相似。淹灌模式下,随着施肥量的增加,水稻农学利用率逐渐降低。间歇灌溉模式

下,C<sub>2</sub>N<sub>3</sub> 处理的氮肥农学效率值最小,为 14.9 kg/kg,最大值出现在 C<sub>2</sub>N<sub>3</sub> 处理,为 39.9 kg/kg。不同水氮条件下,水稻的氮肥偏生产力的变化趋势一致。相同灌溉模式下,氮肥用量的增加,水稻的氮肥偏生产力呈现降低的趋势。淹灌模式下的变化幅度最大,为 69.9~117.8 kg/kg,间歇灌溉模式下的变化幅度相对较小。

表 4 不同水氮模式下的水稻氮效率

处理	秸秆含氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒含氮量/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	水稻地上部分总 吸氮量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	氮肥利用 率/%	氮肥生理利用 率/(kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥农学效率/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )
C <sub>1</sub> N <sub>1</sub>	43.0	96.6	139.5	42.1	65.3	27.5	74.7
C <sub>1</sub> N <sub>2</sub>	35.4	109.3	144.7	59.1	62.8	37.1	97.8
C <sub>1</sub> N <sub>3</sub>	29.1	69.7	98.8	21.4	69.5	14.9	99.9
C <sub>1</sub> N <sub>4</sub>	23.8	58.9	82.7	—	—	—	—
C <sub>2</sub> N <sub>1</sub>	25.8	86.9	112.7	36.0	74.1	26.6	69.9
C <sub>2</sub> N <sub>2</sub>	23.7	90.0	113.7	47.2	68.4	32.3	87.9
C <sub>2</sub> N <sub>3</sub>	18.7	82.5	101.2	49.4	80.8	39.9	117.8
C <sub>2</sub> N <sub>4</sub>	12.3	51.9	64.1	—	—	—	—

如表 5 所示,水分管理和氮肥用量对水稻氮肥利用率和农学效率影响极显著( $p < 0.01$ )。水分管理对水稻氮肥生理利用率和氮肥偏生产力没有显著影响( $p > 0.05$ ),氮肥用量对二者影响极显著( $p < 0.01$ )。双因素方差分析结果表明,水分管理和氮肥用量 2 因素对水稻氮素利用率各项指标均具有交互作用,均达到极显著性水平( $p < 0.01$ )。

表 5 水肥因子和氮素利用率的方差分析结果

水肥因子	氮肥利 用率/%	氮肥生理 利用率/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥农学 效率/ (kg·kg <sup>-1</sup> )	氮肥偏 生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> )
水分管理(W)	**	ns	**	ns
氮肥用量(N)	**	**	**	**
水分管理×氮肥用量	**	**	**	**

注:\*\*表示相关性达到极显著(0.01)水平;ns表示差异不显著。

### 3 讨论与结论

在黑龙江寒地稻作区,水氮互作模式对稻田土壤供氮特征及稻米品质产生较大影响。水稻生育期内,土壤硝态氮、铵态氮存在着明显的季节性变化特征。土壤铵态氮在水稻生育前期含量较高,后期含量较低,而硝态氮含量随季节波动。但在水稻生育期水肥管理模式的不同,对土壤中氮素的转化没有发现明显的规律性特征。这与一些前人的研究不同<sup>[12,15,17]</sup>。刘立军等<sup>[15]</sup>在扬州的研究表明,土壤硝态氮含量的变化与铵态氮的变化规律相似。这一结果的产生是由于试验条件的差异造成。稻田土壤有较强对氮素的自我调节能力,即使氮肥用量降低,也会激发土壤自身的供氮能力。因此水氮互作模式下的无机态氮的动态变化还有待进一步研究。

本试验条件下,灌溉模式配合氮肥施用能显著增

加水稻产量。单从灌溉模式来看,对水稻产量的影响不显著。因此,施氮量成为影响产量的更为关键的因子。间歇灌溉模式下,施氮量的增加具有明显的增产优势,但当氮肥用量高于  $105 \text{ kg/hm}^2$  时,产量不再继续上升。此时,对氮肥施用量的管理成为限制因素。适当减少氮肥的施用量,既可以激发土壤自身的供氮能力,也可以大幅度提高水稻产量和氮肥利用率。

水分管理和氮肥用量两因素对水稻氮素利用率各项指标均具有交互作用,均达到极显著性水平( $p < 0.01$ )。水稻的氮肥利用率在  $21.4\% \sim 59.1\%$ ,其中间歇灌溉模式中氮肥处理的氮肥利用率最高,高出了中国一些区域水稻的氮肥利用率,说明在本试验条件下,水肥互作能有效提升氮肥利用率,减少氮素的损失。

降低氮肥的施用量是提高氮肥利用率的途径之一。但氮肥用量过少,又会影响水稻的产量。所以在实际生产中必须考虑二者之间的矛盾。但由于试验条件存在差异,如灌溉方式、灌溉时间、氮肥水平不同、试验作物品种、土壤类型、气候条件等,对水氮互作的具体机理等还有待进一步的探讨。

为协调水稻产量和氮肥利用率之间的矛盾,寒地稻作区可以在节水灌溉模式下适当减少氮肥的施用量,提高氮素利用率。在本试验条件下,采用适宜的节水灌溉模式,适量减少氮肥施用量,既能保证产量,同时也能提高氮肥的利用率。

在目前黑龙江省冷凉地区稻作开看,需要在保持作物高产稳产的前提下适当减少施肥量,提高氮素利用率。综合考虑水稻高产和氮肥高效利用,间歇灌溉模式下,氮肥用量  $105 \text{ kg/hm}^2$  是比较适宜的。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 陈星,李亚娟,刘丽,等. 灌溉模式和供氮水平对水稻氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2012,18(2):283-290.
- [2] Gonzalez-Dugo V, Durand J L, Gastal F. Water deficit and nitrogen nutrition of crops: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010,30(3):529-544.
- [3] Cossani C M, Slafer G A, Savin R. Co-limitation of nitrogen and water, and yield and resource-use efficiencies of wheat and barley[J]. Crop and Pasture Science, 2010,61(10):844-851.
- [4] Rejesus R M, Palis F G, Rodriguez D G P, et al. Impact of the alternate wetting and drying(AWD) water-saving irrigation technique: Evidence from rice producers in the Philippines [J]. Food Policy, 2011, 36(2): 280-288.
- [5] 连纲,王德建,林静慧,等. 太湖地区稻田土壤养分淋洗特征[J]. 应用生态学报,2003,14(11):1879-1883.
- [6] 李宗新,董树亭,王空军,等. 不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J]. 应用生态学报,2008,19(1):65-70.
- [7] 谭学志,邵东国,刘欢欢,等. 节水灌溉控制排水条件下稻田水氮平衡试验与模拟[J]. 农业工程学报,2011,27(11):193-198.
- [8] 陈效民,吴华山,孙静红. 太湖地区农田土壤中铵态氮和硝态氮的时空变异[J]. 环境科学,2006,27(6):1217-1222.
- [9] 陈星,李亚娟,刘丽,等. 灌溉模式与施氮水平对土壤渗滤液浓度动态变化的影响[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版,2012,38(4):438-448.
- [10] 彭英湘,王凯荣,彭娜,等. 不同灌溉条件下稻草还田对土壤供氮特征及水稻产量的影响[J]. 中国生态农业学报,2007,15(5):30-33.
- [11] 崔思远,尹小刚,陈阜,等. 耕作措施和秸秆还田对双季稻田土壤氮渗漏的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(10):174-179.
- [12] 徐国伟,王贺正,翟志华,等. 不同水氮耦合对水稻根系形态生理、产量与氮素利用的影响[J]. 农业工程学报,2015,31(10):132-141.
- [13] 刘培斌,张瑜芳. 稻田中氮素流失的田间试验与数值模拟研究[J]. 农业环境保护,1999,18(6):241-245.
- [14] 尹娟,费良军,田军仓,等. 水稻田中氮肥损失研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(6):189-191.
- [15] 刘立军,徐伟,唐成,等. 土壤背景氮供应对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学,2005,19(4):343-349.
- [16] 孙永健,孙园园,徐徽,等. 水氮管理模式对不同氮效率水稻氮素利用特性及产量的影响[J]. 作物学报,2014,40(9):1639-1649.
- [17] 彭显龙,刘洋,于彩莲,等. 寒地稻田土壤氮素矿化特征的研究[J]. 中国农业科学,2014,47(4):702-709.
- [18] 陈淑峰,孟凡乔,吴文良,等. 东北典型稻区不同种植模式下稻田氮素径流损失特征研究. 中国生态农业学报,2012,20(6):728-733.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:科学出版社,2000.