

黑土区节水灌溉对各期肥料氮素在土壤中残留的影响

张忠学^{1,2} 陈鹏^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 尚文彬^{1,2} 姜丽莉^{1,2} 侯景翔^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为揭示松嫩平原低温黑土区节水灌溉模式下肥料氮素在稻田土壤中的残留情况, 采用在田间小区内原位设置¹⁵N 示踪微区的方法, 分别标记施用的基肥、蘖肥、穗肥, 以常规淹灌模式作为对照, 研究了稻作控制灌溉模式下水稻收获后各期肥料氮素在稻田土壤中的残留情况, 以及残留在稻田土壤中的肥料氮素在 0 ~ 60 cm 土层的分布。试验结果表明, 不同施氮水平下稻作控制灌溉模式基肥氮素在稻田土壤中的残留率为 29.7% ~ 32.7%; 蘖肥氮素的残留率为 54.9% ~ 57.3%; 穗肥氮素的残留率为 29.4% ~ 35.4%; 肥料氮素在土壤中的总残留率为 36.4% ~ 37.1%, 相同施氮量下稻作控制灌溉模式下各期肥料氮素在土壤中的残留率均高于常规淹灌, 且相同施氮水平不同灌溉模式下肥料氮素在相同深度土层中的残留量差异显著, 不同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻生长期施用基肥、蘖肥、穗肥氮素在稻田表层土壤(0 ~ 20 cm)中的残留量均高于常规淹灌模式; 而在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的残留量均低于常规淹灌, 与常规淹灌相比, 稻作控制灌溉模式可以提高肥料氮素在根区土壤(0 ~ 20 cm)中的残留量, 减少了肥料氮素损失, 同时残留的肥料氮素可以在一定程度上补充黑土区的土壤氮库, 有利于黑土区稻田土壤的保护及肥力的提升。相关性分析表明: 肥料氮素在土壤中的总残留量除与各时期肥料氮素在土壤中的残留量呈极显著正相关外, 与基肥和穗肥氮素在表层土壤的残留量呈显著正相关。研究结果可为制定黑土区稻田适宜的水氮调控模式, 有效管理和充分利用土壤残留氮肥, 改善黑土区稻田生态环境提供参考。

关键词: 黑土; 节水灌溉; 氮; 氮残留; 同位素示踪技术

中图分类号: S511; S15 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2018)11-0240-10

Effects of Water-saving Irrigation on Residues of Different Periods Fertilizer Nitrogen in Black Soils

ZHANG Zhongxue^{1,2} CHEN Peng^{1,2} CHEN Shuaihong^{1,2} SHANG Wenbin^{1,2} JIANG Lili^{1,2} HOU Jingxiang^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the residue of fertilizer nitrogen in paddy soil under the water-saving irrigation model in the low temperature black soil area of Songnen Plain, two irrigation modes were set up in the field experiment, which were controlled irrigation and conventional flooding, and three nitrogen levels (85 kg/hm², 110 kg/hm² and 135 kg/hm²) and six treatments. At the same time, by using the method of ¹⁵N tracer in situ in the field plot, the basal, tillering and panicle nitrogen fertilizers were labeled and treated with a total of 18 parts. The residue of fertilizer nitrogen in paddy soil after rice harvest was studied, and the distribution of fertilizer nitrogen in 0 ~ 60 cm soil in paddy field was investigated. The results showed that the residual rate of basal nitrogen in paddy soil was 29.7% ~ 32.7% under different nitrogen levels, and the residue rate of tillering fertilizer was 54.9% ~ 57.3%, and the residue rate of panicle was 29.4% ~ 35.4%; the total residue rate of fertilizer nitrogen in soil was 36.4% ~ 37.1%, the residual rate of the fertilizer nitrogen in the soil was higher than that of the conventional flooded irrigation under the same nitrogen application. There were significant differences in the residues of fertilizer nitrogen in the same depth soil under different irrigation modes. Under different nitrogen application conditions, the residue in rice paddy soil (0 ~ 20 cm) was higher than that in the normal flooded irrigation mode during the growth period of paddy-field. The residual amount of 20 ~ 40 cm and 40 ~ 60 cm soil was lower than that of conventional flooded irrigation. Compared with the

收稿日期: 2018-06-07 修回日期: 2018-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)和国家自然科学基金面上项目(51779046)

作者简介: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhangzhongxue@163.com

conventional flooding irrigation, the rice-irrigated model can improve the residue of fertilizer nitrogen in root soil (0 ~ 20 cm), and reduce the loss of fertilizer nitrogen, and the residual fertilizer nitrogen can supplement the soil nitrogen reservoir in the black soil area to some extent. It was beneficial to soil protection and fertility improvement of paddy field in black soil area. The correlation analysis showed that the total residue of fertilizer nitrogen in soil was positively correlated with the residue of fertilizer nitrogen in soil, and the residue of basal and spike fertilizer was significantly positive. The research results provided a reference for the formulation of suitable water and nitrogen regulation model in the black soil region, effectively managed and made full use of residual nitrogen fertilizer, and improved the paddy field ecological environment in black soil area.

Key words: black soil; water-saving irrigation; nitrogen; nitrogen residue; isotope tracer technology

0 引言

实际生产中,田间灌溉模式以及氮肥的投入对提高水稻产量及稳定粮食生产起着重要作用,为了满足日益增多的人口对粮食的需求量,氮肥的施用量还会进一步增加^[1-2]。随着稻田氮素肥料施用量的增加以及田间节水措施的加强,肥料氮素在稻田中的迁移转化机制也随之发生变化^[3]。施入到稻田中的肥料氮素一部分被作物吸收利用,一部分通过气态形式损失,还有一部分肥料氮素残留在稻田土壤中,而残留在土壤中的肥料氮素既是对稻田土壤氮库的补充,可供后季作物吸收利用,又可通过淋溶和地表径流等途径进入河流及稻田地下水体中,以及通过反硝化作用转化成 N₂O 和 N₂ 进入到大气中,对稻田的生态环境安全造成严重威胁,包括温室效应、地下水硝酸盐污染和生物多样性衰减等^[4-7]。相关研究表明,黑龙江省西部的黑土区土壤氮残留明显高于其他区域,且呈现出快速增加的趋势,因此,需要对黑土区作物收获后肥料氮素在土壤中的残留情况予以重视^[8-9]。

研究表明,与差减法相比,¹⁵N 示踪法更适于研究肥料氮素在土壤中的残留情况^[10]。巨晓棠等^[11]利用¹⁵N 示踪法研究表明,华北平原常规灌溉下小麦-玉米轮作体系下肥料氮素在土壤中的残留率为 21% ~ 45%,且肥料氮素的土壤残留量随施氮量的增加而增大;吴永成等^[12]采用¹⁵N 标记土柱模拟法研究了肥料氮素的去向,研究结果表明,夏玉米收获后土壤肥料氮残留率为 41% ~ 48%,且表层土壤(0 ~ 20 cm)残留量高;JIAO 等^[13]研究表明黄土高原一个牧草生长季后肥料氮素在草原土壤中的残留率为 50.4% ~ 84.4%;POULTON 等^[14]研究了土壤质地对肥料氮素残留量的影响,对比分析发现砂壤土及白垩质壤土的肥料氮素残留量最高。综上,不同区域、不同作物、不同土壤类型以及不同田间管理方式对肥料氮素的残留量影响较大。

与旱作模式不同,稻作控制灌溉模式下肥料氮

素在稻田土壤中的迁移转化过程更为复杂,已有对氮素残留的研究多采用差减法进行,无法定量区分肥料氮素的残留情况,且对节水灌溉下各期肥料氮素在土壤中的残留情况研究较模糊。因此本试验采用在田间小区试验中开设¹⁵N 示踪微区的方法,以常规淹灌模式作为对照,在研究稻作节水灌溉模式下肥料氮素在水稻收获后土壤中残留情况基础上,分别计算和分析基肥、蘖肥、穗肥在收获后稻田土壤的残留情况,以及不同时期施用的肥料氮素在各不同深度土层的残留量,为制定松嫩平原低温黑土区适宜的农田生态系统养分管理策略提供依据,以期实现减少稻田土壤残留肥料氮素损失和提高稻田土壤残留肥料氮素利用率的目标。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2017 年在黑龙江省水稻灌溉试验站进行,该站(127°40'45"E,46°57'28"N)位于庆安县和平镇,是典型的寒地黑土分布区。从水稻移栽到成熟,该地区水稻生长期日气温和降雨量变化如图 1 所示,多年平均水面蒸发量 750 mm,作物水热生长期为 156 ~ 171 d,全年无霜期 128 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候。供试土壤为黑土型水稻土,种植水稻时间 20 a 以上,土壤耕层厚度 11.3 cm,犁底层厚度 10.5 cm,在移栽和施肥前,对试验小区 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层进行 5 点对角取样后混合,并对其主要土壤理化性质进行分析,供试土壤基本性质见表 1。

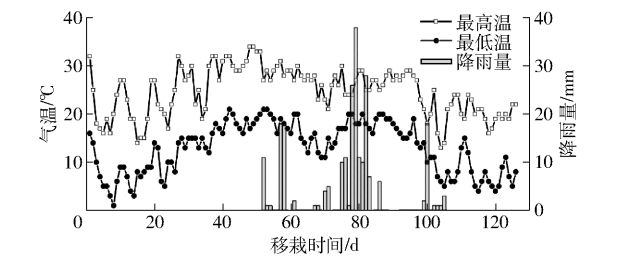


图 1 水稻生长期空气温度和降雨量的日变化
Fig. 1 Changes of daily air temperature and rainfall during rice growth period

表 1 供试土壤基本特性

Tab.1 Basic characteristics of tested soil

土壤类型	土层深度/	有机质质量比/	碱解氮质量比/	有效磷质量比/	速效钾质量比/	pH 值	土壤质地
	cm	(g·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)	(mg·kg ⁻¹)		
黑土	0~20	40.6	186.8	34.9	106.8	6.6	砂黏土
	20~40	36.9	152.6	30.3	96.9	7.0	
	40~60	32.7	135.3	24.4	90.3	7.2	

1.2 试验设计

1.2.1 小区试验

采用灌水方式和施氮量因素随机区组试验。设置 2 种灌水方式:控制灌溉(C)、常规淹溉(F)。水稻不同生育时期各处理土壤水分管理方式详见表 2。水稻控制灌溉模式除水稻返青期田面保持 0~30 mm 浅薄水层、分蘖末期晒田和黄熟期自然落干外,其余各生育阶段均不建立水层,以根层的土壤含水率为控制指标确定灌水时间和灌水定额,灌水上限为土壤饱和含水率,各生育阶段土壤含水率下限分别取饱和含水率的百分比,用 TPIME-PICO64/32 型土壤水分测定仪于每日 07:00 和 18:00 分别测定各试验小区土壤含水率,当土壤含水率接近或低于处理灌水下限时,人工灌水至灌水上限,维持土壤含水率处于相应生育阶段的灌水上限和灌水下限之间,并记录各处理相应灌水量;常规灌溉处理的试验小区于每日 08:00 通过预先埋设的竖尺读取田面水层深度,以确定是否需要灌水。

根据当地节水灌溉下适宜施氮量设置 3 个施氮水平(纯氮),即 N1(85 kg/hm²)、N2(110 kg/hm²)、N3(135 kg/hm²),以便对最佳施氮量下稻田土壤氮素平衡进行试验分析。试验处理设计详见表 3,每个处理设 3 次重复,共 18 个试验小区,每个小区面积 100 m²(10 m×10 m),各小区之间田埂向地下内嵌 40 cm 深的塑料板,防止各小区间的水氮交换。氮肥按照基肥、蘖肥、穗肥施用量比例 4.5:2:3.5 分施,各处理磷、钾肥用量均一致,施用 P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 80 kg/hm²,磷肥在移栽前一次性施用,钾肥于移栽前和水稻 8.5 叶龄分 2 次施用,前后比例为 1:1。试验选用当地种植面积最大的水稻品种龙庆稻 3 号,在充满土壤的育秧盘中将预发芽的种子培育成幼苗,并于 5 月 17 日选取长势相同的水稻幼苗进行移栽,株距 16.67 cm,行距 30 cm,每穴定 3 株,9 月 20 日收割,生育期为 126 d,在水稻各生长阶段及时除草,防治病虫害,以免影响水稻养分吸收。

表 2 稻田生育期内各处理土壤水分管理方式

Tab.2 Different water management patterns at rice growth stages

处理	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
控制灌溉	0~30 mm	85% θ _s	85% θ _s	晒田	85% θ _s	85% θ _s	70% θ _s	落干
常规淹灌	10~50 mm	10~50 mm	10~30 mm	晒田	10~50 mm	10~50 mm	10~30 mm	落干

注:θ_s为土壤饱和含水率。

表 3 试验处理设计

Tab.3 Design of experimental treatments

灌溉模式	小区试验	微区试验	总施氮量	各期施氮量			灌溉模式	小区试验	微区试验	总施氮量	各期施氮量			kg/hm ²
				基肥	蘖肥	穗肥					基肥	蘖肥	穗肥	
控制灌溉	CN1	CN1M1	85	38.25 *	17	29.75	常规灌溉	FN1	FN1M1	85	38.25 *	17	29.75	
		CN1M2		38.25	17 *	29.75			FN1M2		38.25	17 *	29.75	
		CN1M3		38.25	17	29.75 *			FN1M3		38.25	17	29.75 *	
	CN2	CN2M1	110	49.50 *	22	38.50		FN2	FN2M1	110	49.50 *	22	38.50	
		CN2M2		49.50	22 *	38.50			FN2M2		49.50	22 *	38.50	
		CN2M3		49.50	22	38.50 *			FN2M3		49.50	22	38.50 *	
		CN3M1		60.75 *	27	47.25			FN3M1		60.75 *	27	47.25	
	CN3	CN3M2	135	60.75	27 *	47.25		FN3	FN3M2	135	60.75	27 *	47.25	
		CN3M3		60.75	27	47.25 *			FN3M3		60.75	27	47.25 *	

注: * 代表施用的是¹⁵N-尿素。

1.2.2 微区试验

为了明确不同水氮调控下不同时期施入氮肥在

各土层的残留情况,在上述试验小区内设置了¹⁵N 示踪微区(微区内水稻种植模式同试验小区),每个

试验小区内设置 1 个微区,即单一处理下设置 3 个微区试验(3 个分处理),试验处理设置详见表 3,分处理 1 为仅基肥施用¹⁵N-尿素,蘖肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 2 为仅蘖肥施用¹⁵N-尿素,基肥和穗肥施用未标记的普通尿素;分处理 3 为仅穗肥施用¹⁵N-尿素,基肥和蘖肥施用未标记的普通尿素。于稻田整地后和基肥尿素施用前在每个小区内预先埋设 1 个长 1 m、宽 1 m、高 0.5 m 的无底 PVC 矩形框,将微区埋深至犁底层下(深 30 cm),施用的标记肥料为上海化工研究院生产的丰度为 10.22% 的¹⁵N 标记尿素。试验微区的氮肥、磷肥、钾肥用量及灌溉方式同所在的试验小区,并采用农用小型潜水泵单独排灌,其余田间管理同试验小区。

1.3 观测内容及方法

1.3.1 各层土壤容重及全氮含量

根据巨晓棠等^[15-16]对土壤-作物体系肥料氮素主要运动及去向的研究,水田的稻作体系肥料氮素的残留应考虑 0~20 cm 土层,旱作作物的肥料氮素残留应考虑 0~60 cm 土层。本试验采用的节水灌溉模式与旱作模式相似,因此,综合已有的研究成果本试验对肥料氮素的残留情况考虑 0~60 cm 土层。土壤样品在水稻收获后采集,用 100 mL 的环刀在各处理微区内外分别按照“S”型分层取原状土样和供元素分析用土样,取样分层为 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm,每个层次取 3 个平行样,取后的环刀用胶带密封后,连同装入样品袋中的供同位素分析用的土样一并带回实验室,原状土 105℃ 干燥至恒质量,并计算土壤容重;各处理供元素分析用的土样带回实验室后,仔细挑去石块、根茎及各种新生体和侵入体,放置在硬纸板上风干后放入瓷研钵中研磨,并将研磨过筛后的土样分为两部分,一部分使用开氏法测定土壤全氮含量,另一部分样品装入样品袋中密封保存,供样品同位素测定用。

1.3.2 肥料氮素在土壤中的残留量

将粉碎过筛后的各处理各层土壤样品带回实验室进行同位素测定,稳定同位素测试在东北农业大学农业部水资源高效利用重点实验室完成,采用元素分析仪(Flash 2000 HT 型, Thermo Fisher Scientific, 美国)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific, 美国)联用的方法测定样品的¹⁵N 丰度。

不同水氮调控下各层土壤样品中基肥氮素含量为 $A_{(b)}$ 、蘖肥氮素含量为 $A_{(t)}$ 、穗肥氮素含量为 $A_{(p)}$,根据文献[13,17]的公式分别计算

$$A_{(b,t,p)} = (a - b) / (c - d) \times 100\% \quad (1)$$

式中 a ——微区内土壤样品的¹⁵N 丰度

b ——相同水氮处理微区外同一土层土壤样品中¹⁵N 丰度

c ——¹⁵N 标记肥料中¹⁵N 丰度

d ——天然¹⁵N 丰度标准值(0.366 3%)^[18]

各层土壤的氮素总量按杜会英等^[19]的公式估算

$$T_s = \rho V N_s \quad (2)$$

式中 T_s ——各层土壤的氮素总量,kg/hm²

ρ ——各层土壤容重,g/cm³

V ——各层土壤体积,m³

N_s ——各层土壤的全氮质量比,g/kg

基肥(b)、蘖肥(t)和穗肥(p)氮素在稻田土壤中的残留量为

$$R_{(b,t,p)} = T_s A_{(b,t,p)} \quad (3)$$

式中 $R_{(b)}$ 、 $R_{(t)}$ 、 $R_{(p)}$ ——土壤中基肥、蘖肥、穗肥的残留量,kg/hm²

肥料氮素在土壤中的总残留量为

$$R_{(total)} = R_{(b)} + R_{(t)} + R_{(p)} \quad (4)$$

施用的各期肥料氮素在土壤中的总残留率以及基肥、蘖肥和穗肥的残留率为

$$N_{(b,t,p,total)} = R_{(b,t,p,total)} / F_{(b,t,p,total)} \times 100\% \quad (5)$$

式中 $N_{(b,t,p,total)}$ ——各期肥料氮素在土壤中残留率,%

$F_{(b,t,p,total)}$ ——各期施氮量(纯氮),kg/hm²

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 13.0 单因素方差分析及 Duncan 多重比较方法对相同施氮量下不同灌溉模式之间基肥、蘖肥和穗肥氮素在稻田不同土层的残留量进行差异性分析及均值比较,并对基肥、蘖肥、穗肥和各期肥料氮素在土壤中的残留量与各期肥料在稻田不同土层的残留量进行相关性分析,采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮调控下各期肥料氮素在土壤中的总残留

如图 2a(不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著,下同)所示,不同水氮调控下各期肥料氮素在土壤中的总残留量为 28.6~47.7 kg/hm²,两种灌溉模式下各期肥料氮素在土壤中的总残留量均随施氮量的增加而增大,且不同灌溉方式之间各期肥料氮素在土壤中的总残留量差异显著($P < 0.05$),且稻作控制灌溉模式下施用的肥料氮素总量的 36.4%~37.1% 残留在稻田土壤中,与常规淹灌相比,稻作控制灌溉模式在 3 个施氮水平下肥料氮素在水稻收获后稻田土壤中均具有较高的残留量,在

相同施氮量下较常规淹灌增加了 10.3%、10.8% 和 18.3%。虽然两种灌溉模式下各期肥料氮素在土壤中的总残留量均随施氮量的增加而增大,但各期肥

料-¹⁵N 在土壤中的总残留率却随着施氮量的增加而逐渐减少(图 2b),意味着更多的氮素通过其他途径流失到稻田环境中。

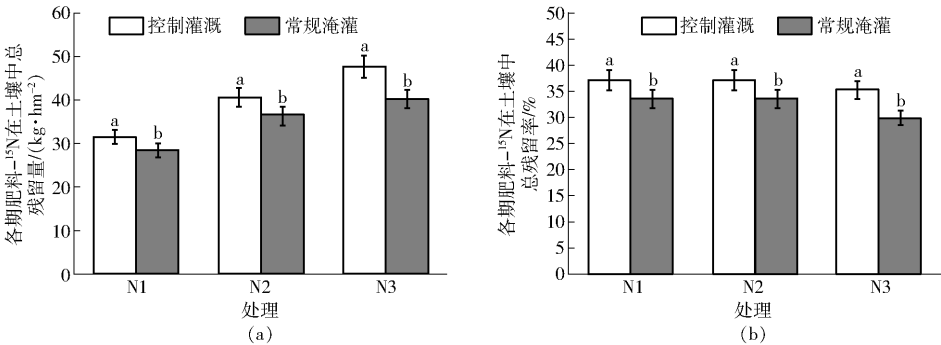


图 2 不同处理下各期肥料-¹⁵N 在稻田土壤中的总残留量和总残留率

Fig. 2 Retention amount for labeled-¹⁵N and retention rate for labeled-¹⁵N in paddy soil under different treatments

由不同深度土壤中肥料氮素残留量对比可知(表 4),不同施氮水平下两种灌溉模式各期肥料氮素在土壤表层(0~20 cm)的残留量最高,稻作控制灌溉模式不同施氮量下各期肥料氮素在表层土壤(0~20 cm)的残留量占肥料氮素在各层土壤中总残留量的 51.9%~59.0%,在相同施氮量下较常规淹灌增加了 41.5%、54.0% 和 53.9%;而相同施氮量下稻作控制灌溉模式 20~40 cm 土层的肥料氮素残留量较常规淹灌分别降低了 9.6%、20.5% 和 4.0%;40~60 cm 土层残留量分别降低了 12.7%、21.9% 和 17.4%,研究表明,稻作控制灌溉模式下肥料氮素在根层土壤(0~20 cm)的总残留量高于常规淹灌,有利于补充土壤氮库的肥力,而常规淹灌模式下肥料氮素的残留集中于 20~60 cm 土层,易发生氮素的淋溶,从而对稻田地下水环境造成威胁。

表 4 水稻收获后肥料-¹⁵N 在土壤各层的残留量
占肥料氮素总残留量的百分比

Tab. 4 Percentage of residue of fertilizer-¹⁵N in different soil layers to total residue of fertilizer-¹⁵N

灌溉方式	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	不同土层肥料- ¹⁵ N 残留量占肥料 氮素总残留量的百分比/%		
		0~20 cm	20~40 cm	40~60 cm
控制灌溉	85	51.9 ^b	28.9 ^a	19.3 ^a
	110	59.0 ^a	25.3 ^b	15.7 ^b
	135	56.8 ^a	27.7 ^a	15.5 ^b
常规淹灌	85	40.4 ^b	35.3 ^a	24.3 ^a
	110	42.5 ^a	35.3 ^a	22.3 ^b
	135	43.7 ^a	34.1 ^a	22.2 ^b

注:表中同列不同小写字母表示相同灌溉模式不同施氮水平下数据在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2 不同水氮调控下基肥氮素在土壤中的残留

如图 3a 所示,两种灌溉模式下基肥氮素在土壤

中的残留总量均随施氮量的增加而增大,不同施氮量下稻作控制灌溉模式基肥氮素在 0~60 cm 土壤中的残留总量为 11.4~19.0 kg/hm²,相当于基肥氮素施用总量的 29.7%~32.7% 残留在稻田土壤中;常规淹灌处理下为 10.1~15.3 kg/hm²,相当于基肥氮素施用总量的 25.1%~28.0% 残留在稻田土壤中(图 3b)。相同施氮量下稻作控制灌溉模式基肥氮素在土壤中的残留总量较常规淹灌增加了 12.3%、16.6% 和 24.8%,试验结果表明稻作控制灌溉模式基肥氮素在稻田土壤中残留量较高。当施氮量为 N2 和 N3 处理时两种灌溉方式之间各期肥料氮素总残留量中基肥残留量的占比差异显著(图 3c,图中 ns 表示在 5% 水平上不显著,下同),稻作控制灌溉模式下肥料氮素在土壤中总残留量的 39.5%~39.9% 来自于基肥氮素的残留,显著高于常规淹水灌溉($P < 0.05$)。

由于基肥是水稻移栽前施入到稻田中的,一直到水稻收割后基肥氮素在稻田中经历了完整的水稻生长发育过程,因此不同深度土层中的基肥残留量可以更好地反映不同灌溉模式对肥料氮素运移的影响。当仅基肥施用¹⁵N-尿素时,水稻收获后稻作控制灌溉模式不同施氮量下基肥氮素在 0~20 cm 土层残留量为 6.2~10.5 kg/hm²;20~40 cm 土层残留量为 3.0~5.7 kg/hm²;40~60 cm 土层残留量为 2.1~2.8 kg/hm²。不同灌溉模式之间基肥氮素在不同深度土壤中的残留量差异显著($P < 0.05$),与常规淹灌相比,稻作控制灌溉模式基肥氮素在 0~20 cm 的残留量较高,同一施氮水平下较常规淹灌增加了 52.1%、66.7% 和 67.4%;而在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的残留量较低,同一施氮水平下 20~40 cm 的基肥氮素残留量较常规淹灌降低了 10.8%、22.8% 和 1.9%;40~60 cm 土层的残留量

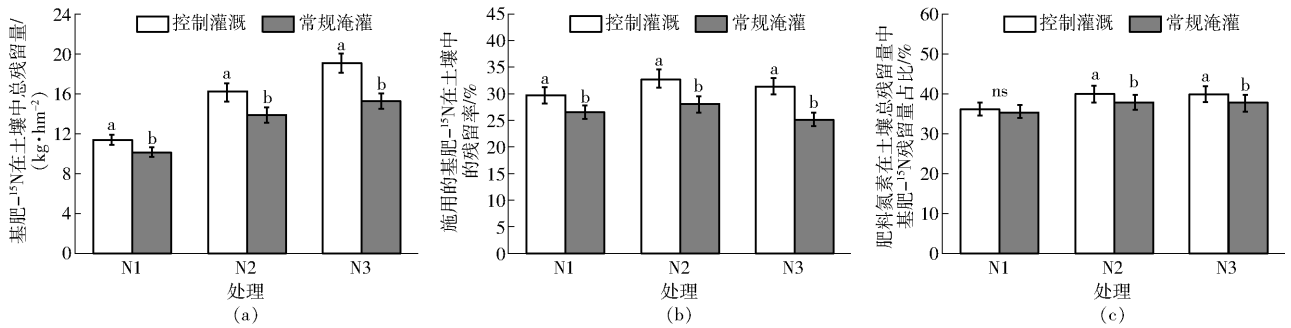


图 3 不同处理下基肥-¹⁵N 在不同土层的残留量、各土层基肥-¹⁵N 的残留量占基肥施氮量的百分比和肥料氮素在土壤总残留量中基肥-¹⁵N 残留量占比

Fig. 3 Retention amount for basal-¹⁵N, retention rate of basal-¹⁵N and proportion of basal-¹⁵N retention amount in soil total retention amount from fertilizer nitrogen under different treatments

降低了 18.9%、13.4% 和 16.6% (表 5)。与常规淹灌相比,稻作控制灌溉模式有效降低了基肥氮素向下层土壤的运移,防止了肥料氮素污染地下水环境,并保证了作物根区土壤的肥力。

表 5 水稻收获后基肥-¹⁵N 在土壤各层的残留量占基肥氮素土壤总残留量的百分比

Tab. 5 Percentage of residue of basal-¹⁵N in different soil layers to total residue of basal-¹⁵N when only basal fertilizer-N was ¹⁵N-labelled urea

灌溉方式 (kg·hm ⁻²)	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	不同土层基肥- ¹⁵ N 残留量占基肥 氮素总残留量的百分比/%		
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
控制灌溉	85	54.2 ^b	27.0 ^b	18.7 ^a
	110	59.9 ^a	25.0 ^c	15.0 ^b
	135	55.2 ^b	30.3 ^a	14.5 ^b
常规淹灌	85	40.0 ^a	34.0 ^b	26.0 ^a
	110	41.9 ^a	37.8 ^a	20.2 ^b
	135	41.2 ^a	37.1 ^a	21.7 ^b

2.3 不同水氮调控下蘖肥氮素在土壤中的残留

如图 4a 所示,两种灌溉模式下蘖肥氮素在土壤各层的残留总量均随施氮量的增加而增大,不同施氮水平下稻作控制灌溉模式下蘖肥氮素在土壤各层的残留总量为 9.7 ~ 14.8 kg/hm²,蘖肥氮素在土壤

各层的残留总量占蘖肥氮素施用总量的 54.9% ~ 57.3% (图 4b)。与常规淹灌模式相比,稻作控制灌溉模式相同施氮水平下蘖肥氮素在稻田土壤中的残留总量增加了 9.2%、11.1% 和 23.8%,随着施氮量的增大,稻作控制灌溉蘖肥残留量的增幅高于常规淹灌。对比两种灌溉模式下蘖肥氮素的土壤残留量在各期肥料氮素总残留量中占比可知 (图 4c),仅有当施氮量为 N3 时两种灌溉方式之间各期肥料氮素总残留量中蘖肥氮素残留量占比差异显著,此施氮量下稻作控制灌溉模式各期肥料氮素在土壤中总残留量的 31.0% 来自于蘖肥氮素的残留,较常规淹灌增加了 4.4%。

当仅蘖肥施用¹⁵N-尿素时,稻作控制灌溉模式不同施氮量下施用的蘖肥总量的 31.3% ~ 36.5% 残留在 0 ~ 20 cm 土层中;12.4% ~ 15.3% 残留在 20 ~ 40 cm 土层中;7.6% ~ 10.2% 残留在 40 ~ 60 cm 土层中。两种灌溉模式相同施氮水平下蘖肥氮素在同一深度土层的残留量对比可知,稻作控制灌溉模式下蘖肥氮素在 0 ~ 20 cm 土层的残留量在相同施氮水平下较常规淹灌增加了 40.8%、47.0% 和 62.5%,且随着施氮量的增加,稻作控制灌溉模式下蘖肥在土壤表层(0 ~ 20 cm)的残留量增幅高于常规

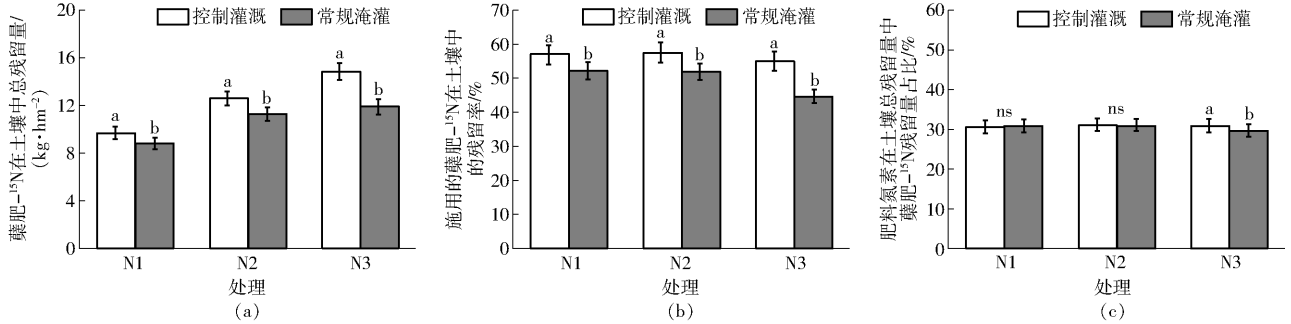


图 4 不同处理下蘖肥-¹⁵N 在不同土层的残留量、施用的蘖肥-¹⁵N 在土壤中的残留率和肥料氮素在土壤总残留量中蘖肥-¹⁵N 残留量占比

Fig. 4 Retention amount for tillering-¹⁵N, retention rate of tillering-¹⁵N and proportion of tillering-¹⁵N retention amount in soil total retention amount from fertilizer nitrogen under different treatments

淹灌;而常规淹灌模式下蘖肥氮素在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的残留量较高,同一施氮水平下 20 ~ 40 cm 土层的蘖肥氮素残留量较稻作控制灌溉模式增加了 18.3%、30.2% 和 4.4%;40 ~ 60 cm 土层的蘖肥氮素残留量增加了 14.5%、25.7% 和 28.3% (表 6)。由于蘖肥是在水稻生长中期施入的,因此在表层土壤中的残留量较高,但常规淹灌下蘖肥氮素往深层土壤的运移仍比较明显。

2.4 不同水氮调控下穗肥氮素在土壤中的残留

如图 5a 所示,两种灌溉模式下穗肥氮素在土壤各层的残留总量均随施氮量的增加而增大,不同施氮水平下稻作控制灌溉模式下穗肥氮素在土壤各层的残留总量为 10.5 ~ 13.9 kg/hm²,穗肥氮素在土壤各层的残留总量占穗肥氮素施用总量的 29.4% ~ 35.4% (图 5b)。与常规淹灌模式相比,不同施氮量下稻作控制灌溉模式穗肥氮素在土壤各层的总残留量均高于常规淹灌,且稻作控制灌溉模式下穗肥氮素在稻田土壤中的总残留量在相同施氮量下较常规淹

灌增加了 9.2%、3.4% 和 6.5%。当施氮量为 N2 和 N3 时两种灌溉方式之间各期肥料氮素总残留量中穗肥残留量的占比差异显著 (图 5c),常规淹灌模式下肥料氮素在土壤中总残留量的 31.1% 和 32.4% 来自于穗肥氮素,显著高于稻作控制灌溉模式 ($P < 0.05$)。

表 6 水稻收获后蘖肥-¹⁵N 在土壤各层的残留量占蘖肥氮素土壤总残留量的百分比

Tab. 6 Percentage of residue of tillering-¹⁵N in different soil layers to total residue of tillering-¹⁵N when only tillering fertilizer-N was ¹⁵N-labelled urea

灌溉方式	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	不同土层蘖肥- ¹⁵ N 残留量占蘖肥 氮素总残留量的百分比/%		
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
控制灌溉	85	55.1 ^b	26.9 ^a	18.0 ^a
	110	63.6 ^a	21.6 ^c	14.8 ^b
	135	62.9 ^a	23.3 ^b	13.8 ^b
常规淹灌	85	42.7 ^b	34.7 ^a	22.5 ^a
	110	48.1 ^a	31.3 ^b	20.6 ^b
	135	47.9 ^a	30.1 ^b	22.0 ^a

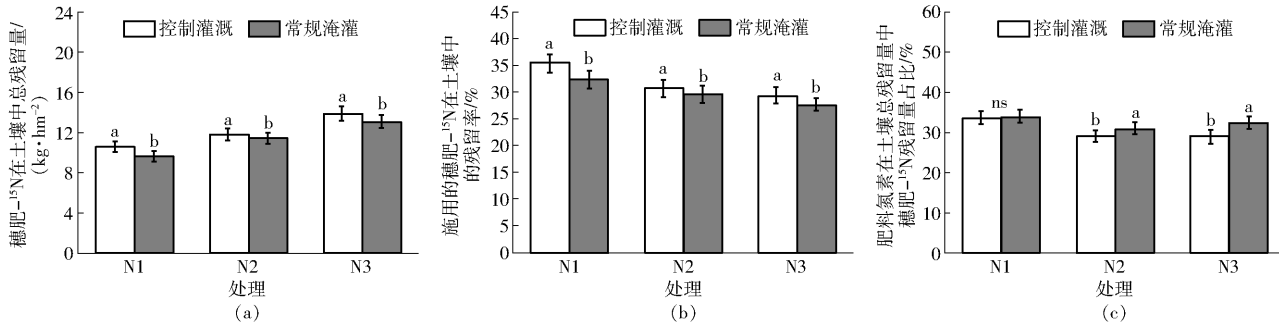


图 5 不同处理下穗肥-¹⁵N 在不同土层的残留量、施用的穗肥-¹⁵N 在土壤中的残留率和肥料氮素在土壤总残留量中穗肥-¹⁵N 残留量占比

Fig. 5 Retention amount for panicle-¹⁵N, retention rate of panicle-¹⁵N and proportion of panicle-¹⁵N retention amount in soil total retention amount from fertilizer nitrogen under different treatments

当仅穗肥施用¹⁵N-尿素时,稻作控制灌溉模式不同施氮量下穗肥氮素在 0 ~ 20 cm 土层残留量为 4.9 ~ 7.3 kg/hm²;20 ~ 40 cm 土层残留量为 3.5 ~ 4.0 kg/hm²;40 ~ 60 cm 土层残留量为 2.1 ~ 2.6 kg/hm²。不同灌溉模式之间穗肥氮素在不同深度土壤中的残留量差异显著 ($P < 0.05$),与常规淹灌相比,稻作控制灌溉模式穗肥氮素在 0 ~ 20 cm 的残留量较高,同一施氮水平下较常规淹灌增加了 30.7%、45.5% 和 29.9%,而常规淹灌模式下穗肥氮素在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的残留量较高,同一施氮水平下 20 ~ 40 cm 土层的穗肥氮素残留量较稻作控制灌溉模式增加了 3.6%、17.9% 和 10.0%;40 ~ 60 cm 土层的穗肥氮素残留量增加了 6.1%、44.9% 和 16.6% (表 7)。

2.5 不同水氮调控下各期肥料氮素残留率相关性分析

统计分析表明 (表 8), $R_{(total)}$ 与 $R_{(b)}$ 、 $R_{(t)}$ 、 $R_{(p)}$

表 7 水稻收获后穗肥-¹⁵N 在土壤各层的残留量占穗肥氮素土壤总残留量的百分比

Tab. 7 Percentage of residue of panicle-¹⁵N in different soil layers to total residue of panicle-¹⁵N when only panicle fertilizer-N was ¹⁵N-labelled urea

灌溉方式	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	不同土层穗肥- ¹⁵ N 残留量占穗肥 氮素总残留量的百分比/%		
		0 ~ 20 cm	20 ~ 40 cm	40 ~ 60 cm
控制灌溉	85	46.4 ^b	32.7 ^a	21.0 ^a
	110	52.7 ^a	29.6 ^b	17.6 ^b
	135	52.5 ^a	28.9 ^b	18.7 ^b
常规淹灌	85	38.7 ^b	37.0 ^a	24.3 ^b
	110	37.5 ^b	36.1 ^a	26.4 ^a
	135	43.0 ^a	33.8 ^b	23.2 ^b

均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 且与 $R_{(b,0-20)}$ ($R = 0.872, P < 0.05$) 和 $R_{(p,0-20)}$ ($R = 0.916, P < 0.05$) 呈显著正相关, $R_{(b)}$ 和 $R_{(p)}$ 均仅与稻田表层土壤 (0 ~

20 cm)中肥料氮素的残留量呈显著正相关($P < 0.01$),与 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的肥料氮素残留量相关性不显著($P > 0.05$),而 $R_{(t)}$ 与 藁肥氮素在各土层的残留量相关性均不显著($P > 0.05$)。

表 8 各期肥料氮素在稻田土壤中的残留量相关性分析

Tab.8 Correlation analysis of retention for ¹⁵N labeled fertilizer in different soil layers

	$R_{(total)}$	$R_{(b)}$	$R_{(t)}$	$R_{(p)}$
$R_{(b)}$	0.997 **			
$R_{(t)}$	0.995 **			
$R_{(p)}$	0.962 **			
$R_{(b,0\sim20)}$	0.872 *	0.897 *		
$R_{(b,20\sim40)}$	0.794	0.763		
$R_{(b,40\sim60)}$	0.401	0.360		
$R_{(t,0\sim20)}$	0.717		0.753	
$R_{(t,20\sim40)}$	0.442		0.407	
$R_{(t,40\sim60)}$	0.272		0.399	
$R_{(p,0\sim20)}$	0.916 *			0.863 *
$R_{(p,20\sim40)}$	0.495			0.656
$R_{(p,40\sim60)}$	0.266			0.427

注: $R_{(b,0\sim20)}$ 、 $R_{(t,0\sim20)}$ 、 $R_{(p,0\sim20)}$ 分别表示基肥、藁肥和穗肥氮素在 0~20 cm 土层的残留量; $R_{(b,20\sim40)}$ 、 $R_{(t,20\sim40)}$ 、 $R_{(p,20\sim40)}$ 分别表示基肥、藁肥和穗肥氮素在 20~40 cm 土层的残留量; $R_{(b,40\sim60)}$ 、 $R_{(t,40\sim60)}$ 、 $R_{(p,40\sim60)}$ 分别表示基肥、藁肥和穗肥氮素在 40~60 cm 土层的残留量。* 表示变量之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,**表示变量之间在 $P < 0.01$ 水平差异显著。

3 讨论

黑龙江省黑土区水田多分布在低平原地区,土壤通透性差,排水不良,氧化还原电位低^[20],因此,此地区稻田应大力推广节水灌溉模式,改善稻田土壤通透性和土壤含氧量,使水稻根系活力增强,有助于水稻对氮素的吸收^[21-22]。本试验为了更符合实际生产的条件,采用在田间原位开设试验微区的方式,采用¹⁵N 示踪技术,分别施用带有标记的基肥、藁肥和穗肥,以常规淹灌作为对照,定量研究了黑土区稻作控制灌溉模式下肥料氮素在收获后稻田土壤中的残留情况。试验结果表明:不同施氮水平下稻作控制灌溉模式各期肥料氮素在稻田土壤中的总残留量为 31.6~47.7 kg/hm²,且随着土层深度的增加肥料氮素的残留量逐渐减少,肥料氮素在土壤中的总残留率为 36.4%~37.1%,试验结果与李建辉^[23]在寒地黑土区稻田的试验结果相近,但略高于彭佩钦等^[24]在洞庭湖平原和朱兆良等^[25]在太湖平原稻田的试验结果,这可能是由于气候及土壤因素不同造成的,黑土区土壤保肥能力较强,因此肥料氮素在黑土区稻田土壤中的残留率较高^[26]。对比两种灌溉模式间肥料氮素在稻田土壤中的残留量可知,相

同施氮量下稻作控制灌溉模式各期肥料氮素在稻田土壤中的残留总量较常规淹灌增加了 10.3%、10.8% 和 18.3%,这一方面可能是由于节水灌溉下土壤通透性好,含氧量高,提高了土壤微生物及酶活性,有利于肥料氮素的转化,增强了土壤固氮能力,使肥料氮素的残留量增加^[27];另一方面,节水灌溉下水稻生长期内经挥发等途径损失的肥料氮素量低于常规淹灌^[28],因此稻作控制灌溉模式下肥料氮素在土壤中的总残留量较高。

目前已有对节水灌溉下基肥、藁肥、穗肥氮素分别在稻田土壤中的残留情况的研究,但研究结果较模糊,本试验中,基肥氮素在稻田土壤中的残留率为 29.7%~32.7%;藁肥氮素的残留率为 54.9%~57.3%;穗肥氮素的残留率为 29.4%~35.4%,相关研究表明,基肥氮素经挥发、渗漏等途径损失的量较大^[29-30],且一部分无效分藁带走了一部分基肥氮素^[31],而由于节水灌溉后期水稻有明显的补偿效应,对穗肥的吸收利用情况优于对基肥、藁肥氮素的利用^[32],且水稻在幼穗分化至抽穗期的吸氮高峰时对穗肥氮素的吸收高于对藁肥氮素的吸收利用^[33],因此导致基肥、穗肥氮素在土壤中的残留率较低,而藁肥氮素的残留率较高。稻作控制灌溉模式基肥、藁肥、穗肥氮素在稻田土壤表层(0~20 cm)的残留量显著高于常规淹灌,而在 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的残留量低于常规淹灌,这与张君等^[34]的研究结果一致,水稻生育期内节水灌溉模式可以有效降低氮素渗漏损失的风险^[35]。稻作控制灌溉模式下表层土壤(0~20 cm)较高的肥料氮素残留对补充黑土区稻田土壤地力、维持土壤氮库稳定起着重要的作用,但同时采用节水灌溉后氮素在土壤中的残留形态多以 NO₃⁻ 为主,较高的肥料氮素残留构成了潜在的污染源,残留的 NO₃⁻ 极易随雨水等淋溶、渗漏到地下水中,使地下水污染。本试验仅分析了不同时期施用的肥料氮素在土壤中的残留量,而采用节水灌溉后各期肥料氮素在土壤剖面的残留形态还需进一步研究,且根据本试验结果作为参考,稻作控制灌溉模式水稻收割后如何采取合理的土地管理策略,降低残留肥料氮素的损失,使残留的肥料氮素得到高效的利用还需更进一步的研究。

4 结论

(1)水稻收获后,控制灌溉和常规淹灌两种灌溉模式下肥料氮素在稻田土壤中的总残留量均随施氮量的增加而增大,且不同灌溉模式间肥料氮素在稻田土壤中的总残留量差异显著($P < 0.05$),不同施氮水平下稻作控制灌溉模式各期肥料氮素在稻田

土壤中的总残留量为 31.6 ~ 47.7 kg/hm², 占水稻生长期施用的氮肥总量的 36.4% ~ 37.1%, 在相同施氮量下较常规淹灌增加了 10.3%、10.8% 和 18.3%, 表明稻作控制灌溉模式可以有效地提高土壤的“保肥”能力, 对水稻种植后的土壤氮库起到了一定的补充作用。

(2) 不同施氮水平下稻作控制灌溉模式基肥氮素在稻田土壤中的残留率为 29.7% ~ 32.7%; 蘖肥氮素的残留率为 54.9% ~ 57.3%; 穗肥氮素的残留率为 29.4% ~ 35.4%, 各期肥料氮素的残留率均高于常规淹灌模式。对不同深度土壤中肥料氮素的残留量分析可知, 相同施氮量下两种灌溉模式间同一深度土壤中肥料氮素的残留量差异显著 ($P < 0.05$), 不同施氮量下稻作控制灌溉模式下各时期

肥料氮素在表层土壤 (0 ~ 20 cm) 的残留量均高于常规淹灌处理, 有效补充了水稻生长期对表层土壤氮素养分的消耗, 与常规淹灌相比, 稻作控制灌溉模式还降低了各时期肥料氮素在 20 ~ 60 cm 土层的残留量, 降低了肥料氮素向深层土壤的运移, 有利于黑土区稻田生态环境的可持续发展。

(3) 相关性分析表明, 稻作控制灌溉模式下各期肥料氮素的残留量与基肥、蘖肥、穗肥的残留总量呈极显著正相关, 同时还与基肥氮素和穗肥氮素在 0 ~ 20 cm 土层的残留量呈显著正相关, 基肥和穗肥氮素在稻田土壤中的总残留量与其在表层土壤 (0 ~ 20 cm) 的残留量呈显著正相关, 蘖肥氮素在土壤中的残留量与其各层土壤的残留量相关性不显著。

参 考 文 献

- 1 PENG S, TANG Q, ZOU Y. Current status and challenges of rice production in China[J]. Plant Production Science, 2009, 12(1): 3 - 8.
- 2 FAN M, SHEN J, YUAN L, et al. Improving crop productivity and resource use efficiency to ensure food security and environmental quality in China[J]. Journal of Experimental Botany, 2012, 63(1): 13 - 24.
- 3 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.
- TAN Xuezhi, SHAO Dongguo, LIU Huanhuan, et al. Modeling and experiment of water and nitrogen balance in paddy fields under water saving irrigation and controlled drainage[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(11): 193 - 198. (in Chinese)
- 4 CHEN X, CUI Z, FAN M, et al. Producing more grain with lower environmental costs[J]. Nature, 2014, 514(7523): 486.
- 5 高大伟, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 168 - 174. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2014s127&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.027.
- GAO Dawei, REN Shumei, YANG Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 168 - 174. (in Chinese)
- 6 陈淑峰, 李帷, 胡克林, 等. 基于 GIS 的华北高产粮区地下水硝态氮含量时空变异特征[J]. 环境科学, 2009, 30(12): 3541 - 3547.
- CHEN Shufeng, LI Wei, HU Kelin, et al. GIS-based analysis of spatio-temporal variability of groundwater nitrate concentration in high-yield region in north China plain[J]. Environmental Science, 2009, 30(12): 3541 - 3547. (in Chinese)
- 7 钟爽, 臧小平, 曾会才, 等. 水肥耦合对香蕉园土壤线虫群落结构及多样性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 130 - 139.
- ZHONG Shuang, ZANG Xiaoping, ZENG Huicai, et al. Effect of different water and fertilizer coupling on soil nematode community structure and diversity in banana plantation[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23): 130 - 139. (in Chinese)
- 8 李勇, 赵军, YANG Jingyi, 等. 黑龙江省县域黑土农田土壤氮残留估算[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 120 - 125.
- LI Yong, ZHAO Jun, YANG Jingyi, et al. Residual soil nitrogen estimation of black soil farmland at county scale in Heilongjiang province[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 120 - 125. (in Chinese)
- 9 邱建军, 李虎, 王立刚. 中国农田施氮水平与土壤氮平衡的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 40 - 44.
- QIU Jianjun, LI Hu, WANG Ligang, et al. Simulation of nitrogen level and balance in cropland in China[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 40 - 44. (in Chinese)
- 10 杨宪龙, 同延安, 路永莉, 等. 农田氮肥利用率计算方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 2203 - 2212.
- YANG Xianlong, TONG Yan'an, LU Yongli, et al. Research advances in the calculating method of nitrogen use efficiency in cultivated lands[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(7): 2203 - 2212. (in Chinese)
- 11 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361 - 1368.
- JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZHANG Fusuo. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361 - 1368. (in Chinese)

- 12 吴永成, 王志敏, 周顺利. ^{15}N 标记和土柱模拟的夏玉米氮肥利用特性研究[J]. 中国农业科学, 2011, 44(12):2446 – 2453.
WU Yongcheng, WANG Zhimin, ZHOU Shunli. Studies on the characteristics of nitrogen fertilizer utilization in summer maize based on techniques of soil column and ^{15}N -label[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(12):2446 – 2453. (in Chinese)
- 13 JIAO T, WU J, ZHAO S, et al. Distribution and utilization of nitrogen on moderately and heavily grazed temperate desert steppe using the ^{15}N tracing technique[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 124:69 – 74.
- 14 POULTON P R, POWLSON D S, JENKINSON D S. Effects of season, soil type and cropping on recoveries, residues and losses of ^{15}N -labelled fertilizer applied to, arable crops in spring[J]. Journal of Agricultural Science, 1997, 129(2):125 – 154.
- 15 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(4):783 – 795.
JU Xiaotang, GU Baojing. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(4):783 – 795. (in Chinese)
- 16 巨晓棠. 氮肥有效率的含义及意义:兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5):921 – 933.
JU Xiaotang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio-discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5):921 – 933. (in Chinese)
- 17 ZHANG Q, YANG Z, ZHANG H, et al. Recovery efficiency and loss of ^{15}N -labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River basin[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 158:118 – 126.
- 18 WANG D, XU C, YAN J, et al. ^{15}N tracer-based analysis of genotypic differences in the uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J]. Field Crops Research, 2017, 211:27 – 36.
- 19 杜会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3):159 – 165.
DU Huiying, FENG Jie, GUO Haigang, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat-summer maize rotation system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3):159 – 165. (in Chinese)
- 20 雷国平, 代路, 宋戈. 黑龙江省典型黑土区土壤生态环境质量评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):243 – 248.
LEI Guoping, DAI Lu, SONG Ge. Evaluation of soil ecological environment quality of typical black soils in Heilongjiang Province [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(7):243 – 248. (in Chinese)
- 21 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.
XU Guowei, WANG Hezheng, ZHAI Zhihua, et al. Effect of water and nitrogen coupling on root morphology and physiology, yield and nutrition utilization for rice [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):132 – 141. (in Chinese)
- 22 孟兆江, 段爱旺, 高阳, 等. 调亏灌溉对冬小麦氮、磷、钾养分吸收与利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(12): 203 – 212. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161225&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.025.
- MENG Zhaojiang, DUAN Aiwang, GAO Yang, et al. Effect of regulated deficit irrigation on uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium for winter wheat [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12):203 – 212. (in Chinese)
- 23 李建辉. 施氮对寒地水稻 ^{15}N 吸收、利用及氮代谢的影响[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2015.
LI Jianhui. Effects of fertilizing nitrogen on ^{15}N absorption and utilization and nitrogen metabolism of rice in cold region [D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- 24 彭佩钦, 仇少君, 侯红波, 等. ^{15}N 交叉标记有机与无机肥料氮的转化与残留[J]. 生态学报, 2011, 31(3):858 – 865.
PENG Peiqin, QIU Shaojun, HOU Hongbo, et al. Nitrogen transformation and its residue in pot experiments amended with organic and inorganic ^{15}N cross labeled fertilizers[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3):858 – 865. (in Chinese)
- 25 朱兆良, 张绍林, 尹斌, 等. 太湖地区单季晚稻产量-氮肥施用量反应曲线的历史比较[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):1 – 5.
ZHU Zhaoliang, ZHANG Shaolin, YIN Bin, et al. Historical comparison on the response curves of rice yield nitrogen application rate in Tai Lake region[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2010, 16(1):1 – 5. (in Chinese)
- 26 王秋菊, 刘峰, 焦峰, 等. 盐化草甸土和黑土型水田土壤连续深耕改土效果[J]. 农业工程学报, 2017, 33(22):152 – 158.
WANG Qiuju, LIU Feng, JIAO Feng, et al. Effect on improving mollisol paddy soil and saline meadow soil by continuous deep ploughing[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(22):152 – 158. (in Chinese)
- 27 胡继杰, 朱练峰, 胡志华, 等. 土壤增氧方式对其氮素转化和水稻氮素利用及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(1):167 – 174.
HU Jijie, ZHU Lianfeng, HU Zhihua, et al. Effects of soil aeration methods on soil nitrogen transformation, rice nitrogen utilization and yield[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1):167 – 174. (in Chinese)
- 28 谷晓博, 李援农, 杜娅丹. 水氮供应对冬油菜氮素积累和产量的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):271 – 278. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170236&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.036.
- GU Xiaobo, LI Yuannong, DU Yadan. Effects of irrigation and nitrogen regimes on seed yield and nitrogen accumulation of winter

- oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):271 – 278. (in Chinese)
- 29 WANG X, SUO Y, LIN X, et al. Recovery of ^{15}N -labeled urea and soil nitrogen dynamics as affected by irrigation management and nitrogen application rate in a double rice cropping system[C] // Abstract of the International Symposium on Ecological Remediation of Environmental Pollution and Bioenergy Exploitation, 2010:195 – 208.
- 30 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ^{15}N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8):1424 – 1434.
- LIN Jingjing, LI Ganghua, XUE Lihong, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ^{15}N tracer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8):1424 – 1434. (in Chinese)
- 31 丁艳锋, 刘胜环, 王绍华, 等. 氮素基、肥用量对水稻氮素吸收与利用的影响[J]. 作物学报, 2004, 30(8):762 – 767.
- DING Yanfeng, LIU Shenghuan, WANG Shaohua, et al. Effects of the amount of basic and tillering nitrogen applied on absorption and utilization of nitrogen in rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2004, 30(8):762 – 767. (in Chinese)
- 32 郝树荣, 郭相平, 张展羽. 水分胁迫及复水对水稻冠层结构的补偿效应[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3):52 – 55.
- HAO Shurong, GUO Xiangping, ZHANG Zhanyu. Compensation effects of water stress and rewating on the structure of rice canopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):52 – 55. (in Chinese)
- 33 周伟, 田玉华, 尹斌. 太湖地区水稻追肥的氨挥发损失和氮素平衡[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(1):32 – 36.
- ZHOU Wei, TIAN Yuhua, YIN Bin. Ammonia volatilization and nitrogen balance after topdressing fertilization in paddy fields of Taihu Lake region[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1):32 – 36. (in Chinese)
- 34 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12):136 – 143.
- ZHANG Jun, ZHAO Peiyi, PAN Zhihua, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12):136 – 143. (in Chinese)
- 35 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):280 – 285.
- CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LÜ Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3):280 – 285. (in Chinese)

(上接第 194 页)

- 17 CLOVER G R G, JAGGARD K W, SMITH H G, et al. The use of radiation interception and transpiration to predict the yield of healthy, droughted and virus-infected sugar beet[J]. The Journal of Agricultural Science, 2001, 136(2): 169 – 178.
- 18 ZHOU H, SUN Y, TYREE M T, et al. An improved sensor for precision detection of in situ stem water content using a frequency domain fringing capacitor[J]. New Phytologist, 2015, 206(1): 471 – 481.
- 19 周海洋, 孙宇瑞, SCHULZE L P, 等. 基于内边缘场电容效应的树干/枝水分传感器研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1):317 – 323. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160143&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.043.
- ZHOU Haiyang, SUN Yurui, SCHULZE L P, et al. Inner fringing-field capacitance sensor for measurement of stem water content [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):317 – 323. (in Chinese)
- 20 赵燕东, 高超, 张新, 等. 基于驻波率原理的植物茎体水分无损检测方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1):310 – 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160142&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.042.
- ZHAO Yandong, GAO Chao, ZHANG Xin, et al. Non-destructive measurement of plant stem water content based on standing wave ratio[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1):310 – 316. (in Chinese)
- 21 严太淑. 紫薇虫害紫薇绒蚧形态特征及防治对策探讨[J]. 农业灾害研究, 2017, 7(3): 44 – 45.
- YAN Taishu. Discussion on morphological features and countermeasures of *Eriococcus lagerstroemiae* Kuwana on *Lagerstroemia indica*[J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 2017, 7(3): 44 – 45. (in Chinese)
- 22 SOPHIAN A, TIAN G Y, TAYLOR D, et al. A feature extraction technique based on principal component analysis for pulsed eddy current NDT[J]. NDT & E International, 2003, 36(1): 37 – 41.
- 23 SAEYS Y, INZA I, LARRAÑAGA P. A review of feature selection techniques in bioinformatics[J]. Bioinformatics, 2007, 23(19): 2507 – 2517.
- 24 BALLABIO D. A MATLAB toolbox for principal component analysis and unsupervised exploration of data structure[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems, 2015, 149(12): 1 – 9.
- 25 ABDI H, WILLIAMS L J. Principal component analysis[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 2010, 2(4): 433 – 459.
- 26 BRO R, SMILDE A K. Principal component analysis[J]. Analytical Methods, 2014, 6(9): 2812 – 2831.
- 27 MATHUR A, FOODY G M. Multiclass and binary SVM classification: implications for training and classification users[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 241 – 245.