doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025

不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响

张忠学^{1,2} 陈 鹏^{1,2} 聂堂哲^{1,2} 姜 浩^{1,2} 孟翔燕³ 杨军明^{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; 3.东北农业大学理学院,哈尔滨 150030)

摘要:为了进一步阐明寒地黑土区不同水氮调控模式对铵态氮、硝态氮在不同土层累积及土壤氮素有效性的影响, 以田间小区试验为基础,结合¹⁵N示踪微区试验,研究了不同水氮调控模式下土壤剖面的无机氮以及肥料氮素的 NH₄*-¹⁵N 和 NO₄⁻⁻¹⁵N 累积情况,并根据同位素测定结果分别计算了土壤氮素有效性"A"值,从不同角度分析了不 同水氮调控模式对土壤氮素有效性的影响。研究结果表明:控制灌溉和常规灌溉两种灌溉模式下土壤无机氮和以 无机氮形态残留的肥料氮素在土壤剖面的累积量均随施氮量的增加而增大,并随土层深度的增加而减少。不同施 氮量下稻作控制灌溉模式表层土壤(0~20 cm)中无机氮和以无机氮形态残留的肥料氮素的累积量均高于常规灌 溉,20~40 cm 和 40~60 cm 土层的无机氮和 NO3-15N 总累积量均低于常规灌溉,两种灌溉模式低施氮处理(N1、 N2)下40~60 cm 土层中 NH₄⁺-¹⁵N 的累积量差异不显著(P>0.05)。相同施氮量下常规灌溉模式 20~40 cm 土层 的 NO₃⁻¹⁵N 累积量较控制灌溉模式增长了 10~11 倍;40~60 cm 土层的 NO₃⁻¹⁵N 累积量较控制灌溉模式增长了近 3 倍。不同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻成熟期氮素积累量中 77.77%~84.51%来自于土壤氮素,较常规灌溉 提高了 12.91% ~23.12%,且相同施氮量下稻作控制灌溉模式土壤氮素有效性"A"值较常规灌溉模式分别提高了 9.41%、5.65%和3.69%。与常规灌溉相比,不同施氮量下稻作控制灌溉模式可以有效提高稻田土壤氮素有效性, 减少肥料氮素的淋溶损失,起到节水减排的作用,研究结果可为制定黑土区稻田合理的水氮调控措施提供参考。 关键词:水稻;灌溉;铵态氮;硝态氮;氮素有效性;同位素示踪技术 中图分类号: S511; S154.4 文献标识码:A 文章编号: 1000-1298(2018)11-0210-10

Effects of Different Water and Nitrogen Regulation Models on Nitrogen Distribution and Availability in Paddy Soils

ZHANG Zhongxue^{1,2} CHEN Peng^{1,2} NIE Tangzhe^{1,2} JIANG Hao^{1,2} MENG Xiangyan³ YANG Junming^{1,2}

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

Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China
College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to further elucidate the effects of different water and nitrogen regulation models on the accumulation of ammonium and nitrate in different soil layers and the effectiveness of soil nitrogen in the black soil region of cold area, based on field plot experiment and ¹⁵N tracing micro-zone test, the inorganic nitrogen and NH_4^+ -¹⁵N and NO_3^- -¹⁵N accumulations of nitrogen in soil profiles under different water and nitrogen regulation models were studied, and the effect of different water and nitrogen regulation models were studied, and the effect of different water and nitrogen regulation models on soil nitrogen availability was calculated according to the results of isotopic determination. The results showed that the accumulation of soil inorganic nitrogen and fertilizer nitrogen application and decreased with the increase of soil depth in two irrigation modes under controlled irrigation and conventional irrigation. The accumulation of inorganic nitrogen and nitrogen in the form of inorganic nitrogen in surface soil (0 ~ 20 cm) of paddy-controlled irrigation mode under different nitrogen application rates was higher than that of conventional irrigation. The total amount of inorganic nitrogen and 40 ~ 60 cm soil layers was lower than that of conventional irrigation, and the accumulation of NH_4^+ -¹⁵N in 40 ~ 60 cm soil layer under low nitrogen fertilization between two

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)

收稿日期: 2018-03-30 修回日期: 2018-06-04

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

irrigation modes was not significant (P > 0.05). The NO₃⁻¹⁵N accumulation of 20 ~ 40 cm soil layer in conventional irrigation mode at the same nitrogen application rate was 10 ~ 11 times than that of controlled irrigation mode. The NO₃⁻¹⁵N accumulation of 40 ~ 60 cm soil layer was nearly three times higher than that of control irrigation mode. Totally 77.77% ~ 84.51% of the accumulation of nitrogen under rice-controlled irrigation mode at different nitrogen application rates was from soil nitrogen, which was 12.91% ~ 23.12% higher than that under conventional irrigation, and the "A" value expressing soil nitrogen availability in rice-controlled irrigation mode under the same nitrogen application was increased

by 9.41%, 5.65% and 3.69%, respectively. Compared with conventional irrigation, the rice-controlled irrigation mode can effectively improve the nitrogen efficiency of paddy soil, reduce the leaching loss of fertilizer nitrogen, and play an important role in saving water and reducing emissions, and the research results can provide a reference for the formulation of reasonable water and nitrogen control measures in the black soil area.

Key words: rice; irrigation; ammonium nitrogen; nitrate nitrogen; nitrogen availability; isotope tracer technique

0 引言

中国是全球主要的水稻种植国家之一,水稻单 产在 2012 年就稳定在 6.5 t/hm²以上,达到了世界 先进水平^[1-2],但这离不开水氮资源的大量投入,不 合理的水氮管理方式会使土壤中累积过量的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N,并以地表径流和淋溶等方式进入农田生 态环境中,容易对农田地表及地下水环境造成污染, 同时还降低了肥料的利用率,是影响农田氮素有效 性及其损失的重要原因^[3]。因此,明确不同水氮调 控下无机氮在土壤中的累积情况,对农田生态环境 安全具有重要的指导作用。

我国目前氮肥的过量投入导致作物-土壤系统 中的氮素输入与输出比例增大,氮素平衡严重失调, 未被作物吸收利用的肥料氮素一部分以氨挥发、硝 化和反硝化作用等气态形式损失[4-7],另一部分未 被利用的肥料氮素残留在土壤中^[8]。相关研究表 明,不合理的灌溉模式会限制氮肥肥效的发挥,使大 量未被作物吸收利用的肥料氮素淋溶至地下水 中[9-10]。巨晓棠等[11]通过多年试验表明肥料氮素 在土壤中的残留率可达到 21%~45%; BHOGAL 等^[12]在英国 Ropsley 长期试验站的研究结果表明, 施用的肥料氮素一部分以无机态氮形态残留在土壤 中;JU 等[13] 研究发现当施氮量高时肥料氮素主要 以 NO₃⁻-N 形态残留在土壤各剖面中,而当施氮量较 低时肥料氮素主要以有机氮形态残留在土壤各剖面 中。残留在土壤中的肥料氮素既可以提高土壤的氮 素有效性,又可以补充土壤氮库供下季作物吸收利 用,但同时以无机态氮残留的肥料氮素在土壤中的 累积会增加氮素淋失的潜在风险^[14-15]。肥料氮素 以无机氮形态在土壤中的累积量受多种田间管理模 式影响,而目前对于不同水氮调控模式对土壤氮素 有效性的影响多集中于土壤中无机氮的总体累积情 况,对肥料氮素以无机氮形态在土壤中的累积量研 究较为模糊。

本文基于田间小区和微区的试验结果,通过对 比分析不同水氮调控模式对稻田土壤的无机氮以及 肥料氮素的 NH₄⁺¹⁵N 和 NO₃⁻¹⁵N 累积量、水稻对土 壤氮素的吸收利用量和土壤氮素有效性的影响,以 期为制定合理的稻田水氮调控措施提供参考。

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 熟该地区总降雨量为 232 mm,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。供试土壤为白浆型水 稻土,种植水稻时间 20 a 以上,土壤耕层厚度 11.3 cm,在移栽和施肥前,对试验小区 0~20 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。



1.2 试验设计

1.2.1 小区试验

试验采用灌水方式和施氮量2因素全面试验,

表1 供试土壤基本特性

Tab.1 Basic characteristics of tested soil

土壤类型	土层/cm	有机质质量比/	碱解氮质量比/	有效磷质量比/	速效钾质量比/		上撞岳地
		$(g \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	$(mg \cdot kg^{-1})$	рпш	上康灰地
	0 ~20	40. 6	186. 8	34.9	106.8	6.6	
黑土	$20 \sim 40$	36.9	152.6	30.3	96. 9	7.0	砂黏土
	$40 \sim 60$	32.7	135.3	24.4	90. 3	7.2	

设置2种灌水方式:控制灌溉(C)、常规灌溉(F),水 稻控制灌溉模式除水稻返青期田面保持 5~25 mm 浅薄水层外,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,分蘖前期、分蘖中 期、分蘖末期、拔节孕穗期、抽穗开花期及乳熟期土 壤含水率下限分别为饱和含水率的85%、85%、 60%、85%、85%、70%。常规灌溉除分蘖后期为控 制无效分蘖适当排水晒田和黄熟期自然落干以外, 其余水稻生育期田面均保持3~5 cm 水层。设3个 施氮水平,即 N1(85 kg/hm²)、N2(110 kg/hm²)、 N3(135 kg/hm²)。共6个处理,每个处理设3次重 复,共18个试验小区,每个小区面积100m²(10m× 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、穗肥施用量比例为4.5:2:3.5分施,基肥于水稻 移栽前1d施入, 蘖肥于移栽后24d施入, 穗肥于移 栽后72 d 施入,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, 施用量比例为1:1。试验选用当地的水稻品种龙庆 稻3号,于2017年5月17日将长势相同的水稻幼 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126d,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。

1.2.2 微区试验

在上述各试验小区内设置了¹⁵N示踪微区(微 区内水稻种植模式同试验小区),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 1m、宽1m、高0.5m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。 氮肥、磷肥、钾肥用量及灌溉方式同所在的试验小 区,试验微区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 观测内容与方法

1.3.1 植株氮含量及¹⁵N 丰度 于水稻成熟期从每个微区内外随机选取代表性 水稻各3穴,然后用农用压缩喷雾器冲洗干净,并将 水稻植株地上部分为茎、叶、穗3部分,装入样品袋, 带回实验室,放入干燥箱经过105℃、鼓风条件下杀 青30min,然后70℃下干燥至恒质量后称量不同部 位的干物质量。称量后的样品使用球磨机进行粉碎 处理,过80目筛后混匀,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮法 和AA3型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH, 德国,灵敏度0.001 AUFS)测定各部位全氮含量,剩 余样品粉碎过筛后放入样品袋中密封保存。

将密封保存的水稻各器官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, Thermo Fisher Scientific,美国)和 同位素质谱仪(DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific,美国)联用的方法测定成熟期水稻各器 官¹⁵N 丰度。

不同水氮调控下水稻植株样品氮素积累量中来 自尿素-¹⁵N的百分数(*N_{df}*),根据 WANG 等^[16]的公 式计算,即

$$N_{dff} = (a - b) / (c - d) \times 100\%$$
(1)

式中 a——微区内植株样品的¹⁵N 丰度

b——相同水氮处理微区外植株样品中¹⁵N 丰度

c-----¹⁵N标记肥料中¹⁵N丰度

d----天然¹⁵N 丰度标准值(0.3663%)

水稻植株样品氮素积累量中来自土壤氮素的百分数(N_{dfs})为

$$N_{dfs} = 1 - N_{dff} \tag{2}$$

水稻植株样品从土壤中吸收的氮素量为

$$P_{sn} = D_M D_C N_{dfs} \tag{3}$$

式中 D_M ——植株干物质量,kg/hm²

D_c----植株含氮率,%

1.3.2 土壤氮素有效性

从施肥角度分析并表示土壤中原有的氮素营养 有效性等同于施入氮肥的供应量定义为"A"值,根 据吴海卿等^[17]的公式,可以直接从上述的 N_{df}和 N_{df}计算出土壤氮素的"A"值,即

$$A = \frac{N_{dfs}}{N_{dff}} N_F \tag{4}$$

式中 N_F ——施氮量, kg/hm²

1.3.3 土壤无机氮累积量

在采集水稻植株样品后,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 元素分析土样,供试土壤为白浆型水稻土,其典型特 点是具有容重高、硬度大、通气和透水性差的白浆 层,因此土壤取样深度为0~60 cm,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带回实验室,原状土105℃ 干燥至恒定质量,并计算土壤容重及含水率。其余 土壤样品用2 mol/L KCl 浸提,并使用 AA3 型连续 流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国,灵敏度 0.001 AUFS)测定土壤各层 NO₃⁻-N 和 NH⁴₄-N 的含 量,并同时低温保存一部分土壤浸提液供同位素测 定使用。

不同土层无机氮(铵态氮和硝态氮)累积量 (*N*_{min}),根据文献[18]中公式计算,即

 $N_{\min} = 0. \ 1DP_bC \tag{5}$

式中 D----土层厚度, cm

 P_b ——土壤容重,g/cm³

C——某土层中无机氮质量比,mg/kg

1.3.4 以无机氮形式残留的肥料-¹⁵N含量

本试验采用张珮仪等^[19-20]的微扩散法制备各 处理土壤浸提液中无机氮的¹⁵N稳定同位素比值样 品。并通过元素分析仪和同位素质谱仪联用的方法 测定样品的¹⁵N稳定同位素比值^[21]。为更准确地测 定样品中无机氮的¹⁵N丰度,在样品制备过程中设 置了空白对照对测定结果进行校正。校正公式为

$$E_{s} = \frac{E_{m}M_{s+b} - M_{b}E_{b}}{M_{s+b} - M_{b}} \times 100\%$$
(6)

式中 E_s ——校正后的样品¹⁵N 丰度,%

E_m——实际测定的样品¹⁵N丰度,%

一空白对照的¹⁵N 丰度,%

 M_{s+b} ——空白对照氮量和样品氮量的总和, μ g

 M_b ——空白对照的氮量, μg

 E_{k} -

1.4 数据统计分析

采用 SPSS 13.0 单因素方差分析及 Duncan 多重比较方法进行显著差异性分析及均值比较,并采用 Origin 9.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮调控对土壤无机氮累积量的影响

2.1.1 不同水氮调控对土壤剖面 NH₄⁺-N 累积量的 影响

稻作控制灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤(0~20 cm)的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 8.06%、43.49%;20~40 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 5.80%、27.38%;40~60 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 7.86%、32.12%;常规灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤(0~20 cm)的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 6.13%、10.90%;20~40 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 5.40%、8.38%;40~60 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较 N1 处理增加了 3.86%、4.49%。相同灌溉模式下 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 NH₄⁺-N 的累积量均随施氮量的增加而增大(图 2,不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著,下同)。

两种灌溉模式间对比可知,稻作控制灌溉模式 下表层土壤(0~20 cm)的 NH₄⁺-N 累积量高于常规 灌溉模式,相同施氮量下稻作控制灌溉模式 0~20 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较常规灌溉分别增加了 12.23%、14.85%和45.21%;但稻作控制灌溉模式 20~40 cm和40~60 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量均低 于常规灌溉,相同施氮量下稻作控制灌溉模式 20~ 40 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较常规灌溉分别减少 了 19.84%、17.96%和 3.59%;40~60 cm 土层的 NH₄⁺-N 累积量较常规灌溉分别减少了 35.03%、 33.51%和15.94%,稻作控制灌溉模式下表层土壤 较高的 NH₄⁺-N 累积量有利于水稻对土壤中养分的 吸收利用。两种灌溉模式下土壤剖面 NH₄⁺-N 累积





量均随土层深度的增加而减少,与常规灌溉相比,不同施氮量下稻作控制灌溉模式 0~20 cm 至 20~40 cm 土层 NH₄⁺-N 的累积量下降幅度较大,降幅达49.70%~51.51%,相同施氮量下较常规灌溉提高了 68.00%~91.03%,这是由于 NH₄⁺-N 极易被带负电荷的土壤胶体所吸附,向下层土壤的淋失能力较弱^[4]。

 2.1.2 不同水氮调控对土壤剖面 NO₃⁻-N 累积量的 影响

稻作控制灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NO₃⁻-N 累积量较 N1 处理增加了 9.89%、32.69%;20~40 cm 土层的 NO₃⁻-N 累积量 较 N1 处理增加了 5.77%、34.21%;40~60 cm 土层 的 NO₃⁻-N 累积量较 N1 处理增加了 3.71%、 35.38%;常规灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NO₃⁻-N 累积量较 N1 处理增加了 32.67%、51.68%;20~40 cm 土层的 NO₃⁻-N 累积量 较 N1 处理增加了 19.22%、33.30%;40~60 cm 土 层的 NO₃⁻-N 累积量较 N1 处理增加了 9.89%、 20.75%。相同灌溉模式下 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 NO₃⁻-N 的累积量均随施氮量的 增加而增大(图 3)。





两种灌溉模式间对比可知,稻作控制灌溉模式 下表层土壤 $(0 \sim 20 \text{ cm})$ 的 NO₃⁻-N 的累积量高于常 规灌溉模式,相同施氮量下稻作控制灌溉模式0~ 20 cm 土层的 NO₃⁻-N 的累积量较常规灌溉分别增 加了 38.48%、14.70% 和 21.14%;但稻作控制灌溉 模式 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 NO₃-N 累积量 均低于常规灌溉,相同施氮量下稻作控制灌溉模式 20~40 cm 土层的 NO₃⁻-N 累积量较常规灌溉分别 减少了 36.23%、39.82% 和 32.53%;40~60 cm 土 层的 NO₃-N 累积量较常规灌溉分别减少了 63.56%、65.61%和61.45%。研究结果表明,稻作 控制灌溉模式下 NO₃-N 累积区域主要集中在表层 土壤(0~20 cm),在水稻收获后存在一定的 NO₃⁻-N 淋失风险,而常规灌溉模式下 NO,-N 累积区域主要 集中在深层土壤(20~60 cm),表明水稻生长期内 NO,⁻-N已随水分淋失至下层土壤中,对地下水资源 安全造成威胁。两种灌溉模式下土壤剖面 NO₃⁻-N 的累积量均随土层深度的增加呈先增大后减少趋 势。不同施氮量下稻作控制灌溉模式 0~20 cm 至 20~40 cm 土层 NO3-N 的累积量增幅达 27.17%~ 42.58%; 而常规灌溉模式下 0~20 cm 至 20~40 cm 土层 NO₃⁻-N 的累积量增幅达 142.39% ~ 192.63%。土壤各剖面的 NO₃-N 累积量受灌溉模 式的影响较大, NO₃-N 极易随水分淋失到土壤深 层,从而造成地下水的面源污染,因此应注意采取合 理的稻田水氮调控方式。

2.2 不同水氮调控下土壤中无机氮形态的肥料氮 素累积量

2.2.1 不同水氮调控下土壤剖面 NH₄⁺-¹⁵N 形态的 肥料氮素累积量

稻作控制灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NH₄⁺-¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 77.61%、163.65%; 20~40 cm 土层的 NH₄⁺-¹⁵ N 累 积量较 N1 处理增加了 80.34%、48.45%; 40~60 cm 土 层的 NH₄⁺-¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 81.39%、 50.63%; 常规灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NH₄⁺-¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 28.69%、105.76%; 20~40 cm 土层的 NH₄⁺-¹⁵ N 累积量 较 N1 处理增加了 32.76%、58.58%; 40~60 cm 土 层的 NH₄⁺-¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 33.58%、 60.32%。相同灌溉模式下 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 NH₄⁺-¹⁵ N 的累积量均随施氮量的 增加而增大(图 4, ns 表示在 5% 水平上不显著, 下 同)。

由两种灌溉模式对比可知,稻作控制灌溉模式 下表层土壤(0~20 cm)的 NH₄⁺-¹⁵N 累积量高于常 规灌溉模式,相同施氮量下稻作控制灌溉模式 0~ 20 cm 土层的 NH₄⁺-¹⁵N 累积量较常规灌溉分别增加





Fig. 4 Accumulation of NH4 -15 N in soil profile of each treatment after rice harvesting

了 27.57%、78.25% 和 106.98%:由图 4 可知,两种 灌溉模式下 N1 处理对 20~40 cm 土层 NH⁺-¹⁵N 累 积量影响不显著,稻作控制灌溉模式 N2、N3 处理下 20~40 cm 土层的 NH⁺-¹⁵N 累积量较常规灌溉分别 增加了 41.53% 和 55.71%; 两种灌溉模式下 N1、N2 处理对 40~60 cm 土层的 NH⁺-¹⁵N 累积量影响不显 著,N3 处理下稻作控制灌溉模式 40~60 cm 土层的 NH⁺-¹⁵N 累积量较常规灌溉增加了 21.07%。两种 灌溉模式下土壤剖面 NH⁺-¹⁵N 的累积量均随土层 深度的增加呈减少趋势,与其他土层相比,表层土壤 (0~20 cm)的 NH₄⁺-¹⁵N 累积量最高,与常规灌溉相 比,不同施氮量下稻作控制灌溉模式0~20 cm 至 20~40 cm土层 NH₄⁺-¹⁵N 的累积量下降幅度较大, 降幅达 72.77%~73.35%。研究结果表明,不同施 氮量下稻作控制灌溉模式水稻生育期内施用的肥料 氮素在水稻收获后土壤各剖面以 NH⁺-¹⁵N 形态残 留的累积量均高于常规灌溉。

2.2.2 不同水氮调控下土壤剖面 NO₃⁻¹⁵N 形态的 肥料氮素累积量

稻作控制灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NO₃⁻¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 6.60%、16.95%; 20~40 cm 土层的 NO₃⁻¹⁵ N 累积 量较 N1 处理增加了 15.14%、8.24%; 40~60 cm 土 层的 NO₃⁻¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 19.63%、 16.41%; 常规灌溉模式下 N2、N3 处理表层土壤 (0~20 cm)的 NO₃⁻¹⁵ N 累积量较 N1 处理增加了 10.75%、21.51%; 20~40 cm 土层的 NO₃⁻¹⁵ N 累积 量较 N1 处理增加了 19.63%、16.41%;40~60 cm 土层的 NO₃⁻¹⁵N 累积量较 N1 处理增加了 9.31%、 27.40%。相同灌溉模式下 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层中 NO₃⁻¹⁵N 的累积量均随施氮量的 增加而增大(图 5)。

由两种灌溉模式对比可知,相同施氮量两种灌 溉模式下同一土层的 NO3-15N 累积量差异显著(P< 0.05),稻作控制灌溉模式下表层土壤(0~20 cm)的 NO₂⁻¹⁵N累积量显著高于常规灌溉模式(P< 0.05),相同施氮量下稻作控制灌溉模式 0~20 cm 土层的 NO₃⁻⁻¹⁵ N 累积量较常规灌溉分别增加了 92.43%、53.40%和62.01%;而不同施氮量下稻作 控制灌溉模式 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 NO3-15N 累积量均低于常规灌溉,相同施氮量下常 规灌溉模式 20~40 cm 土层的 NO,--15 N 累积量较控 制灌溉模式增长了 10~11 倍:40~60 cm 土层的 NO3-15N 累积量较控制灌溉模式增长了近3倍。与 常规灌溉模式相比,水稻收获后稻作控制灌溉模式 下水稻生育期内施用的肥料氮素在下层土壤(20~ 60 cm) 中以 NO3--15 N 形态的累积量较低,肥料氮素 的淋溶现象不明显。稻作控制灌溉模式下土壤剖面 $NO_3^{-15}N$ 的累积量随土层深度的增加而减少,而常 规灌溉模式下土壤剖面 NO3-15N 的累积量随土层 深度的增加呈先增大后减小趋势。稻作控制灌溉模 式下 NO₂⁻¹⁵N 累积区域主要集中在土壤表层(0~ 20 cm),常规灌溉模式下 NO3-15N 累积区域主要集 中在 20~40 cm 土层。与稻作控制灌溉模式相比,





不同施氮量下常规灌溉模式 0~20 cm 至 20~40 cm 土层 NO₃⁻¹⁵N 的累积量增长幅度较大,相同施氮量 下较 0~20 cm 土层 NO₃⁻¹⁵N 的累积量增长了 9 倍 左右。研究结果表明,稻作控制灌溉模式下水稻生 育期内施用的肥料氮素在水稻收获后以 NO₃⁻¹⁵N 形态在表层土壤(0~20 cm)的累积量较高,对表层 土壤的速效养分起到了补充作用,但同时有较高的 肥料氮素淋溶损失风险,而常规灌溉模式下肥料氮 素的淋溶现象较明显,且水稻收获后肥料氮素已淋 溶至下层土壤。





4.75%,研究结果表明,稻作控制灌溉模式下水稻对 土壤氮素的吸收利用情况优于常规灌溉。

两种灌溉模式下水稻不同器官的土壤氮素积累 量随施氮量的增加整体呈增大趋势(表 2),且两种 灌溉模式不同施氮量下土壤氮素在水稻地上部各器 官的积累量由大到小均表现为穗、茎和鞘、叶。稻作 控制灌溉模式下水稻从土壤中吸收的氮素总量的 8.79% ~ 9.87% 分布在水稻叶片: 18.82% ~ 22.11% 分布在水稻茎鞘:68.10%~72.39% 分布在 水稻穗部。常规灌溉不同施氮量下水稻从土壤中吸 收氮素总量的 9.80%~11.10% 分布在水稻叶片; 21.24%~21.94%分布在水稻茎鞘;67.03%~ 68.79%分布在水稻穗部。不同灌溉模式处理间对 比显示,两种灌溉模式下不同施氮水平间水稻茎鞘 和穗部土壤氮素的积累量差异显著(P < 0.05),在 施氮量为110 kg/hm²和135 kg/hm²时稻作控制灌溉 模式下水稻茎鞘部土壤氮素的积累量较常规灌溉分 别增加了 9.09% 和 9.05%;穗部增加了 11.10% 和 3.72%。与常规灌溉相比,稻作控制灌溉模式下水 稻对土壤氮素吸收利用情况较优的同时,吸收的土 壤氮素往水稻穗部的运移积累量较高。

2.4 不同水氮调控对土壤"A"值的影响

土壤"A"值是假定土壤中的氮素有两个来源, 作物从每个来源吸收的氮素分别与两个来源的数量 成正比,只需分别测定出作物从每个来源吸收的氮

表 2 不同处理下水稻地上部各器官中土壤氮素的积累量 Tab. 2 Accumulation of soil nitrogen in various organs

2.3 不同水氮调控下水稻对土壤氮素的利用

如图6所示,两种灌溉模式下水稻从土壤中吸

收的氮素量均随施氮量的增加而增大,稻作控制灌溉模式下 N2、N3 处理较 N1 处理水稻从土壤中吸收

的氮素量增加了 12.91% 和 23.12%。相同施氮量

下不同灌溉模式间水稻从土壤吸收的氮素量差异显

著(P<0.05),与常规灌溉相比,稻作控制灌溉模式

水稻在 N2、N3 处理下均具有较高的从土壤中吸收 的氮素量,相同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻从

土壤中吸收的氮素量较常规灌溉增加了9.09%和

of rice under different treatments kg/hm²

灌溉方式 施氮量 水稻不同器官土壤氮素积累量 叶 茎和鞘 穗 水稻不同器官土壤氮素积累量 叶 茎和鞘 穗 季約 12.18° 26.08° 100.32° 控制灌漑 110 15.45 ^b 34.21 ^b 106.81 ^b 135 16.69 ^a 37.73 ^a 116.20 ^a 素数 13.94 ^c 31.21 ^b 97.13 ^b 常规灌漑 110 15.92 ^b 31.36 ^b 96.14 ^b 135 16.24 ^a 34.60 ^a 112.03 ^a							
相執力式 加氮重 叶 茎和鞘 穗 85 12.18° 26.08° 100.32° 控制灌溉 110 15.45 ^b 34.21 ^b 106.81 ^b 135 16.69 ^a 37.73 ^a 116.20 ^a 85 13.94 ^c 31.21 ^b 97.13 ^b 常规灌溉 110 15.92 ^b 31.36 ^b 96.14 ^b 135 16.24 ^a 34.60 ^a 112.03 ^a	漢源古書	祐気县	水稻不同器官土壤氮素积累量				
85 12. 18° 26. 08° 100. 32° 控制灌溉 110 15. 45 ^b 34. 21 ^b 106. 81 ^b 135 16. 69 ^a 37. 73 ^a 116. 20 ^a 85 13. 94 ^c 31. 21 ^b 97. 13 ^b 常规灌溉 110 15. 92 ^b 31. 36 ^b 96. 14 ^b 135 16. 24 ^a 34. 60 ^a 112. 03 ^a	催帆刀八	旭氛里	叶	茎和鞘	穂		
控制灌溉 110 15. 45 ^b 34. 21 ^b 106. 81 ^b 135 16. 69 ^a 37. 73 ^a 116. 20 ^a 85 13. 94 ^c 31. 21 ^b 97. 13 ^b 常规灌溉 110 15. 92 ^b 31. 36 ^b 96. 14 ^b 135 16. 24 ^a 34. 60 ^a 112. 03 ^a		85	12. 18 [°]	26. 08 [°]	100. 32 [°]		
135 16.69 ^a 37.73 ^a 116.20 ^a 85 13.94 ^c 31.21 ^b 97.13 ^b 常规灌溉 110 15.92 ^b 31.36 ^b 96.14 ^b 135 16.24 ^a 34.60 ^a 112.03 ^a	控制灌溉	110	15.45 ^b	34. 21 ^b	106. 81 ^b		
85 13.94 ^c 31.21 ^b 97.13 ^b 常规灌溉 110 15.92 ^b 31.36 ^b 96.14 ^b 135 16.24 ^a 34.60 ^a 112.03 ^a		135	16. 69 ^a	37. 73ª	116. 20 ^a		
常规灌溉 110 15.92 ^b 31.36 ^b 96.14 ^b 135 16.24 ^a 34.60 ^a 112.03 ^a		85	13. 94°	31. 21 ^b	97. 13 ^b		
135 16. 24 ^a 34. 60 ^a 112. 03 ^a	常规灌溉	110 135	15. 92 ^b	31. 36 ^b	96. 14 ^b		
			16. 24 ^a	34. 60 ^a	112. 03 ^a		

素,即可计算出土壤中固有的营养物质氮素,"A"值 在评价土壤氮素有效性上有一定的应用价值,是与 产量无关的同位素判断数据^[22]。稻作控制灌溉模 式下土壤"A"值随施氮量的增加呈先减小后增大趋 势,常规灌溉模式下土壤"A"值随施氮量的增加而 增大,且相同施氮量下稻作控制灌溉模式的土壤 "A"值均高于常规灌溉(图7),稻作控制灌溉模式 下土壤"A"值在相同施氮量下与常规灌溉相比分别 提高了9.41%、5.65%和3.69%。研究结果表明, 稻作控制灌溉模式可以有效提高土壤氮素有效性, 有利于水稻对土壤氮素的吸收利用。

3 讨论

对于不同田间管理模式对农田土壤无机氮的累 积与分布的影响研究较多,本试验中两种灌溉模式





下土壤剖面的无机氮累积量均随施氮量的增加而增 大,且无机氮的累积量随土层深度的增加而减小,这 与王孟雪等^[23]在寒地黑土区的研究结果一致。不 同施氮量下稻作控制灌溉模式土壤剖面的 NH₄⁴-N 和 NO₃⁻-N 累积区域集中在表层土壤(0~20 cm),随 土层深度的增加而减小,相同施氮量下稻作控制灌 溉模式表层土壤的 NH₄⁴-N 和 NO₃⁻-N 的累积量均高 于常规灌溉模式,且稻作控制灌溉模式下表层土壤 中 NH₄⁴-N 的累积量略高于 NO₃⁻-N 的累积量,这是 因为稻作控制灌溉模式提高了土壤的通气性,提高 了土壤氧气含量从而使土壤脲酶活性增强,脲酶活 性的上升有利于施用的肥料氮素水解,从而提高了 土壤无机氮的累积量^[24]。

目前此类研究对节水灌溉下土壤无机氮总累积 量中作物生长期内施用的肥料氮素的贡献量研究较 为模糊,本试验利用¹⁵N示踪技术,并结合微扩散法 制备同位素样品,微扩散法适合测定¹⁵N 丰度较高 的示踪样品,避免了传统蒸汽蒸馏法引起的有机氮 分解和同位素分馏对测定值的干扰^[19-20],定量分析 了以无机氮形态残留的肥料氮素在土壤剖面的累积 与分布。试验结果表明,不同施氮量下稻作控制灌 溉模式下表层土壤的 NH4-15 N 和 NO3-15 N 的累积 量均高于常规灌溉,相同施氮量下不同灌溉模式间 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 NH4 -15 N 累积量差 异不显著,但稻作控制灌溉模式下 20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 NO₃⁻¹⁵ N 累积量均小于常规灌 溉,相同施氮量下常规灌溉模式 20~40 cm 和 40~ 60 cm 土层的 NO₃⁻⁻¹⁵N 累积量均显著高于控制灌溉 模式(P<0.05),水稻生长期内常规灌溉模式下肥 料氮素以 NO₃⁻¹⁵N 形态淋溶现象明显,这与商放泽 等^[25]、杜军等^[26]的研究结果一致。相关研究表明, 水稻对 NH₄⁺-N 的吸收利用量较高,且距离根尖0~ 2 cm 区域内 NH₄⁺-N 的吸收速率最高^[27-28], 而稻作 控制灌溉模式下表层土壤具有较高的 NH⁺-¹⁵ N 累 积量,在降低了肥料氮素淋溶损失的同时还有利于 水稻对土壤中无机氮的吸收利用。

本试验中不同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻

成熟期氮素积累量中 77.77%~84.51%来自于土 壤氮素,略高于已有研究结果^[29-30],这可能是由于 供试土壤为黑土,基础肥力较高且保水保肥能力强, 有利于水稻对土壤氮素的吸收利用。除 N1 处理 外,稻作控制灌溉模式 N2 和 N3 处理下水稻对土壤 氮素的吸收利用量均高于常规灌溉,且稻作控制灌 溉模式下土壤氮素有效性"A"值在相同施氮量下与 常规灌溉相比分别提高了 9.41%、5.65% 和 3.69%,表明稻作控制灌溉模式可以有效提高土壤 氮素有效性,提高水稻对土壤氮素的吸收利用量。 本试验仅研究了水稻收获时土壤刻面中无机氮的累 积和肥料氮素以无机态形态的累积情况,而对不同 水氮调控下水稻各生育期内对土壤氮素的吸收利用 及土壤氮素的迁移转化还需进一步研究。

4 结论

(1)控制灌溉和常规灌溉两种灌溉模式下土壤 各剖面的铵态氮、硝态氮总累积量均随施氮量的增 加而增大。不同水氮调控模式下土壤剖面的 NH₄⁺-N 累积量均随土层深度的增加而降低,但不同水氮调 控下土壤剖面的 NO₃⁻-N 累积量随土层深度的增加 变化规律不一致,表现为不同施氮量下稻作控制灌 溉模式土壤剖面的 NO₃⁻-N 累积量随土层深度的增 加而降低,常规灌溉模式下表现为随土层深度的增 加呈先增大后减小趋势。不同施氮量下稻作控制灌 溉模式表层土壤(0~20 cm)的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 累 积量均高于常规灌溉,但 20~60 cm 的 NH₄⁺-N 和 NO₃⁻-N 总累积量均低于常规灌溉。表明稻作控制 灌溉可以有效降低无机氮素的淋失。

(2)两种灌溉模式下土壤各剖面 $NH_4^{+}-^{15}N$ 和 $NO_3^{-}-^{15}N$ 的累积量随施氮量及土层深度的变化规律与相同处理下土壤剖面 $NH_4^{+}-N$ 和 $NO_3^{-}-N$ 累积量的 变化规律一致。不同施氮量下稻作控制灌溉模式表 层土壤(0~20 cm)的 $NH_4^{+}-^{15}N$ 累积量均显著高于常规灌溉模式(P < 0.05);在低施氮量处理(N1、 N2)下两种灌溉模式 40~60 cm 土层的 $NH_4^{+}-^{15}N$ 累 积量差异不显著, N3 处理下控制灌溉模式下 20~60 cm 土层的 $NH_4^{+}-^{15}N$ 累积量高于常规灌溉模式; 相同施氮量下稻作控制灌溉模式仅表层土壤(0~20 cm) $NO_3^{-}-^{15}N$ 的累积量高于常规灌溉,常规灌溉 模式下 $NO_3^{-}-^{15}N$ 在 20~60 cm 土层的累积量较高, 肥料氮素的淋溶现象较明显。

(3)不同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻成熟 期氮素积累量中 77.77% ~ 84.51% 来自于土壤氮 素,较常规灌溉提高了 12.91% ~ 23.12%,且水稻 从土壤中吸收的氮素量随施氮量的增加而增大,不 同施氮量下稻作控制灌溉模式水稻从土壤中吸收的 氮素总量的 8.79% ~ 9.87% 分布在水稻叶片; 18.82% ~ 22.11% 分布在水稻茎鞘; 68.10% ~ 72.39% 分布在水稻穗部,除 N1 处理外,稻作控制 灌溉模式 N2 和 N3 处理下水稻对土壤氮素的吸 收利用量均高于常规灌溉。从作物角度分析表 明稻作控制灌溉模式可以改善水稻对土壤氮素 的吸收利用情况。同位素测定结果表明,稻作控 制灌溉模式下土壤氮素有效性"A"值在相同施氮 量下均高于常规灌溉,控制灌溉模式可以提高土 壤氮素的有效性,有利于水稻对土壤氮素的吸收 利用。

参考文献

1 刘立军, 王康君, 卞金龙, 等. 水稻产量对氮肥响应的品种间差异及其与根系形态生理的关系[J]. 作物学报, 2014, 40(11):1999-2007.

LIU Lijun, WANG Kangjun, BIAN Jinlong, et al. Differences in yield response to nitrogen fertilizer among rice cultivars and their relationship with root morphology and physiology[J]. Acta Agronomy Sinica, 2014, 40(11):1999 - 2007. (in Chinese)

2 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)

- 3 陈林,张佳宝,赵炳梓,等.不同水氮耦合管理下耕层土壤的氮动态[J].土壤学报,2013,50(3):459-468. CHEN Lin, ZHANG Jiabao, ZHAO Bingzi, et al. Dynamics of nitrogen in topsoil related to integrated water and nitrogen management[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(3):459-468. (in Chinese)
- 4 吕殿青,杨进荣.灌溉对土壤硝态氮淋吸效应影响的研究[J].植物营养与肥料学报,1999,5(4):307-315.
- LÜ Dianqing, YANG Jinrong. Study on effect of irrigation on soil nitrate leaching and uptake [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 1999, 5(4):307-315. (in Chinese)
- 5 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)

6 岳文俊,张富仓,李志军,等.水氮耦合对甜瓜氮素吸收与土壤硝态氮累积的影响[J/OL].农业机械学报,2015,46(2): 88-96. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150214&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.014.

YUE Wenjun, ZHANG Fucang, LI Zhijun, et al. Effects of water and nitrogen coupling on nitrogen uptake of muskmelon and nitrate accumulation in soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):88 - 96. (in Chinese)

7 银敏华,李援农,李昊,等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(6):129-138. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160617&journal_id = jcsam. DOI:10. 6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017.

YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6):129-138. (in Chinese)

8 商放泽,杨培岭,任树梅,等. 施肥模式对日光温室土壤铵态氮和硝态氮的影响[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(7): 73-78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20120713&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.013.

SHANG Fangze, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of fertilization patterns on NH_4^+ -N and NO_3^- -N in solar greenhouse soils [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(7):73 – 78. (in Chinese)

- 9 SPALDING R, EXNER M. Occurrence of nitrate in groundwater—a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1993, 22(3): 392-402.
- 10 HOOKER M L, GWIN R E, HERRON G M, et al. Effects of long-term, annual applications of N and P on corn grain yields and soil chemical properties1[J]. Agronomy Journal, 1983, 75(1):94-99.
- 11 巨晓棠, 刘学军, 邹国元,等. 冬小麦/夏玉米轮作体系中氮素的损失途径分析[J]. 中国农业科学, 2002, 35(12):1493-1499. JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZOU Guoyuan, et al. Evaluation of nitrogen loss way in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(12):1493-1499. (in Chinese)
- 12 BHOGAL A, ROCHFORD A D, SYLVESTERBRADLEY R. Net changes in soil and crop nitrogen in relation to the performance of winter wheat given wide-ranging annual nitrogen applications at Ropsley, UK [J]. Journal of Agricultural Science, 2000, 135(2):139-149.
- 13 JU Xiaotang, LIU Xuejun, PAN Jiarong, et al. Fate of ¹⁵N-labeled urea under a winter wheat-summer maize rotation on the north China plain[J]. Pedosphere, 2007, 17(1):52-61.
- 14 丁世杰, 熊淑萍, 马新明,等. 耕作方式与施氮量对小麦-玉米复种系统玉米季土壤氮素转化及产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(1):142-150.

DING Shijie, XIONG Shuping, MA Xinming, et al. Effects of tillage and nitrogen application rate on soil nitrogen transformation

and yield in a winter wheat summer maize multiple cropping system [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(1): 142 - 150. (in Chinese)

- 15 王振华,权丽双,郑旭荣,等.水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL].农业机械学报,2016, 47(10):91-100.http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161013&journal_id= jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013. WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate
- WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(10):91 100. (in Chinese)
- 16 WANG D, XU C, YAN J, et al. ¹⁵N 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.
- 17 吴海卿,杨传福,孟兆江.应用¹⁵N示踪技术研究土壤水分对氮素有效性的影响[J].中国土壤与肥料,2000(1):16-18,37. WU Haiqing, YANG Chuanfu, MENG Zhaojiang. Application of ¹⁵N tracer technique to study the effect of soil moisture on nitrogen efficiency[J]. Soil and Fertilizer Science, 2000(1):16-18,37. (in Chinese)
- 18 杜臻杰,齐学斌,李平,等. 猪场废水灌溉对土壤氮素时空变化与氮平衡的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 262-269. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170830&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.030. DU Zhenjie, QI Xuebin, LI Ping, et al. Effect of piggery wastewater irrigation on temporal-spatial variation and balance of
 - nitrogen[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8):262 269. (in Chinese)
- 19 张珮仪,温腾,张金波,等. 扩散法测定土壤无机氮¹⁵N 丰度方法优化研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(4):948-957. ZHANG Peiyi, WEN Teng, ZHANG Jinbo, et al. On improving the diffusion method for determination of δ¹⁵ N-NH₄⁺ and δ¹⁵ N-NO₃⁻ in soil extracts[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4):948-957. (in Chinese)
- 20 温腾,曹亚澄,张珮仪,等.微扩散法测定铵态氮、硝态氮的¹⁵N稳定同位素研究综述[J]. 土壤, 2016, 48(4):634-640. WEN Teng, CAO Yacheng, ZHANG Peiyi, et al. On progress in use of micro-diffusion method in δ¹⁵N-NH₄⁺ and δ¹⁵N-NO₃⁻ measurements[J]. Soils, 2016, 48(4):634-640. (in Chinese)
- 21 孙建飞,白娥,戴崴巍,等.¹⁵N标记土壤连续培养过程中扩散法测定无机氮同位素方法改进[J]. 生态学杂志,2014, 33(9):2574-2580.

SUN Jianfei, BAI E, DAI Weiwei, et al. Improvements of the diffusion method to measure inorganic nitrogen isotope of ¹⁵N labeled soil[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(9):2574-2580. (in Chinese)

- 22 曹亚澄, 张金波, 温腾, 等. 稳定同位素示踪技术与质谱分析[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- 23 王孟雪,张忠学,吕纯波,等.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. 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. (in Chinese)
- 24 肖新,朱伟,肖靓,等.适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮[J].农业工程学报,2013, 29(21):91-98.

XIAO Xin, ZHU Wei, XIAO Liang, et al. Suitable water and nitrogen treatment improves soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities of paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21):91-98. (in Chinese)

25 商放泽,杨培岭,任树梅.水氮量对层状包气带土壤氮素迁移累积的影响分析[J/OL].农业机械学报,2013,44(10): 112-121. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20131019&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.019. SHANG Fangze, YANG Peiling, REN Shumei. Effects of nitrogen fertilizer application and irrigation level on soil nitrogen

leaching and accumulation in deep soil[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 112 - 121. (in Chinese)

26 杜军,杨培岭,李云开,等. 灌溉、施肥和浅水埋深对小麦产量和硝态氮淋溶损失的影响[J]. 农业工程学报,2011, 27(2):57-64.

DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Influence of the irrigation, fertilization and groundwater depth on wheat yield and nitrate nitrogen leaching [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(2):57-64. (in Chinese)

- 27 张亚丽,董园园,沈其荣,等.不同水稻品种对铵态氮和硝态氮吸收特性的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(6):918-923. ZHANG Yali, DONG Yuanyuan, SHEN Qirong, et al. Characteristics of NH₄⁺ and NO₃⁻ uptake by rice of different genotypes[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(6):918-923. (in Chinese)
- 28 TAYLOR A R, BLOOM A J. Ammonium, nitrate, and proton fluxes along the maize root[J]. Plant Cell & Environment, 1998, 21(12):1255-1263.
- 29 ZHANG Q, YANG Z, ZHANG H, et al. Recovery efficiency and loss of ¹⁵N-labelled urea in a rice-soil system in the upper reaches of the Yellow River basin[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 158:118-126.
- 30 魏颖娟, 夏冰, 赵杨,等.¹⁵N 示踪不同施氮量对超级稻产量形成及氮素吸收的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(4):783-791. WEI Yingjuan, XIA Bing, ZHAO Yang, et al. Effects of nitrogen application on yield formation and the nitrogen absorption and
 - well linguan, AlA bing, ZHAO lang, et al. Effects of nitrogen application on yield formation and the nitrogen absorption and utilization of super rice based on ¹⁵N-tracing[J]. Acta Agriculturae Nucleatae Sinica, 2016, 30(4):783 791. (in Chinese)