

灌排方式与控释肥耦合对水稻生长、氮素利用及环境的影响

白海洋, 林俊宪

河海大学农业科学与工程学院, 江苏 南京

收稿日期: 2023年5月12日; 录用日期: 2023年6月9日; 发布日期: 2023年6月21日

摘要

水稻生产灌溉用水量大, 具有较大的节水潜力; 过去片面追求高产而施加大量肥料导致了严重的污染问题。为解决上述问题, 现引进一种智能控释肥料, 为研究这种肥料在不同的灌排模式下的节水减排机理, 现采用竖筒试验。试验表明: 秸秆覆盖处理下水稻的灌水、排水量最小; 秸秆覆盖和控灌中蓄处理下省工效益较好; 秸秆覆盖及控灌中蓄均在一定程度上比浅水勤灌更有减排、降低氮素流失的效果。本研究揭示了智能控释肥对水稻的生理、生长、产量、水氮利用效率、氮素运移规律的影响, 为实现科学的水肥管理模式提供依据。

关键词

节水灌排, 控释肥, 水稻, 氮磷利用, 环境

Effects of Irrigation and Drainage Methods Coupled with Controlled-Release Fertilizer on Rice Growth, Nitrogen and Phosphorus Utilization and Environment

Haiyang Bai, Junxian Lin

College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu

Received: May 12th, 2023; accepted: Jun. 9th, 2023; published: Jun. 21st, 2023

Abstract

The irrigation water consumption of rice production is large, which has great water-saving potential. In the past, the one-sided pursuit of high yield and large amounts of nitrogen fertilizer were applied, which caused serious pollution problems. In order to solve the above problems, an intelligent controlled-release fertilizer is introduced. In order to study the mechanism of water-saving and emission reduction of this fertilizer under different irrigation and drainage modes, a bucket test is adopted. The results showed that the irrigation and displacement of rice under straw mulching treatment were the smallest. The benefits of straw mulching and control irrigation are better. Straw mulching and storage in controlled irrigation have a better effect of reducing emissions and reducing nitrogen loss than shallow water irrigation to some extent. This study revealed the impact of intelligent controlled-release fertilizer on rice physiology, growth, yield, water and nitrogen utilization efficiency and nitrogen transport law under different water control modes, so as to provide a basis for realizing scientific water and fertilizer management mode.

Keywords

Water-Saving Irrigation and Drainage, Controlled-Release Fertilizer, Rice, Nitrogen and Phosphorus Utilization, Environment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

施用氮肥是目前提高水稻产量最直接、有效的途径之一,然而,我国水稻栽培普遍存在氮肥施用量过高、施用方式不合理、养分损失严重等问题[1]。其氮肥利用率仅为28.3%,与国际水平相比差异明显,同时未利用的氮肥会造成严重的环境污染,甚至危害到人类自身。优化氮肥投入技术、减少氮肥损失,实现农业节氮减氮、提高氮肥利用率的同时,做到稳产增产,是农业生产和环境和谐共存、可持续发展的必然趋势[2]。

水稻是我国的主要粮食作物,是农业的用水大户,其种植面积约为3021.6万 hm^2 ,占全国粮食作物总面积28%左右,而水稻的产量占粮食总产量的40%左右。我国南方地处亚热带或热带季风气候区,雨量丰沛,是水稻种植的典型区[3]。水稻相比于其他作物具有良好的生产特性,是高产作物。由于水稻施用的大量氮肥是农业面源污染的主要污染源,土壤中的氮素随着地表径流以及地下水进入河流、湖泊等水体中,造成水体富营养化,促进了水中微生物(藻类等)的大量繁殖。这些生物增殖过多挤压了其他水生生物的生存空间,同时藻类等覆盖在水面,导致太阳光难以到达水面以下为下层生物提供氧气和营养。最终会导致大量水中生物死亡,破坏当地水体的生物多样性,严重影响当地的自然环境。

过去我们使用的氮肥多为尿素这类化学肥料,现如今为解决污染等问题,已经出现了可控释的水稻专用肥料。控释肥作为一种持久缓释的新型肥料,一次性施用不仅能够满足作物各个生长时期的肥料需求[4],而且还能降低农田的面源污染。近年来,国内外学者对控释肥和普通尿素在氮素利用效率方面做了大量的研究,肖梦华等人[5]利用蒸渗测坑试验探究不同渗漏强度下氮素流失的规律;高焕芝等人[6]研究了控制灌溉与常规灌溉下各氮素水平的流失;殷国玺等人[7]发现,地表控制排水可显著减少农田氮排放量。但在不同灌溉模式下,控释肥对水稻的生长、产量、水氮利用效率、氮素运移转化规律方面的研究相对较少。

2. 试验方法

2.1. 试验设计

本试验采用方桶试验, 取高 0.8 m、底面边长 0.5 m 的柱状方桶, 并在方桶高度方向均分为三部分, 各分界线布置圆孔, 平时用木塞塞住, 需要时用于取水与取土。填土时, 先在底部铺设一层砂石反滤层, 随后晒干、打碎、过筛土样, 分层压入桶内。试验设置 3 种灌排模式: 浅水勤灌、控灌中蓄、秸秆覆盖旱作, 2021 年五月上旬开始育秧, 六月下旬选择三叶一心大小基本一样的秧苗进行移栽, 株间距 15 cm*20 cm, 一桶 4 穴, 每穴 3 株, 全生育期 160 d。在基肥时一次性施用, 后续不再追肥, 氮肥水平(以 N 计)为 240 kg/hm²。除灌排方式外, 其他农技措施均相同。每个处理设置 3 个重复(见表 1)。

Table 1. Control indicators of irrigation and drainage of different Irrigation and drainage modes

表 1. 不同灌排模式的灌排控制指标

灌排模式	控制指标	返青期	分蘖前期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期
FSI	灌水上限	30	30	0	40	40	40	0
	灌水下限	10	10	60%	10	10	10	自然落干
	蓄雨上限	40	100	0	150	200	200	0
RC-CI	灌水上限	30	100%	0	100%	100%	100%	80%
	灌水下限	10	70%	60%	70%~80%	80%	70%	自然落干
	蓄雨上限	40	60	0	80	80	80	0
DPS	灌水上限	100%	100%	0	100%	100%	100%	80%
	灌水下限	80%	60%	50%	60%	60%	50%	自然落干
	蓄雨上限	40	60	0	80	80	80	0

注: 表中数字单位为 mm, “mm”表示田面水深; “%”表示 30 cm 土壤含水率占饱和含水率的比例。

2.2. 观测内容及方法

2.2.1. 气象因子观测

搜集试验区附近国家气象基准站点资料, 包括温度、湿度、太阳辐射量、风速、降雨量等, 降雨资料利用试验场量雨筒所测数据进行修正, 田间蒸发资料利用试验场蒸发皿测定。

2.2.2. 土壤水分情况

每日上午 8 点测定, 当田面有水层时, 通过钢尺读取水层深度, 遇降雨进行加测; 当田面无水层时, 利用烘干法测定 20 cm 土层范围内的土壤含水率。

2.2.3. 灌排水情况及水样采集

灌水和排水参照各处理灌排控制标准, 当土壤水分降至灌水下限时, 及时灌水至上限, 若水层深度超过最大蓄雨深度, 则及时排水至蓄雨上限, 每次灌排水时记录灌排时间和灌排水量[8]。

地表排水: 在尽量不扰动土壤表层的情况下, 用针筒抽取地表水样 300 ml 置于塑料瓶中。

土壤溶液采集: 稻田地表排水或灌水前, 由上而下依次打开测桶内预先埋置的三根取水管的橡皮塞, 用塑料瓶采集土壤 0~18 cm、18~36 cm 和 36~54 cm 深度处的土壤溶液。由于土壤溶液采集频率较低, 采集水量较少, 该水量忽略不计, 在稻田水量计算中不加以分析。

2.2.4. 氮素浓度测定

测定内容包括土壤溶液、地表水和地下排水水样中的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度。其中, 总氮测定采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012) [9], 铵氮测定采用纳氏试剂比色法(HJ 535-2009) [10], 硝氮测定采用紫外分光光度法(GB/T 7480-87) [11]。所有水样采集后尽量 2 h 内测试分析, 或放入冰箱冷藏(4℃)在 24 h 内分析完毕。

3. 结果与分析

3.1. 灌水量比较

FSI、DPS、RC-CI 三种处理下的灌水量分别为 561.47 mm、378.24 mm、457.98 mm。由灌水量可直接得到 DPS 的节水效果最好, 其次是 RC-CI。DPS 灌水上限、下限在 3 个处理中最低, DPS 降水后田面保留的水层不超过 80 mm, 其余时间均无水层, 棵间蒸发、深层渗漏量最小, 在保障水稻基本生理需水的前提下, 最大限度地减少了稻田生态需水, 有效降低了水稻需水量和深层渗漏量。

3.2. 地下排水量比较

地下水排水量大小关系为: $\text{FSI} > \text{RC-CI} > \text{DPS}$, 三种处理方式对地下排水量影响巨大, 图 1 为各灌排水方式下不同生育期的地下排水量。其中, 各处理组全生育期地下排水量为: 276.69 mm、179.64 mm、81.73 mm。

2021 年全生育期秸秆覆盖(DPS)处理的地下排水总量为 81.73 mm, 比浅水勤灌(FSI)处理、控灌中蓄(RC-CI)处理显著减少地下排水量 70.46%、54.51%; RC-CI 处理的地下排水总量为 179.64 mm, 较 FSI 处理显著减少 35.08%。其原因为返青期后 DPS 处理和 RC-CI 开始进行水分调控, 除雨后剩余一定高度水层外, 其他时间均无水层, 该举措显著减少了入渗量, 从而引起了地下排水量的降低。秸秆覆盖和控灌中蓄在减少地下排水量方面具有明显优势。且各生育期阶段的地下排水量同样存在着巨大差异, 其中分蘖期稻田地下排水量最大, 占全生育期的 30.01%~41.39%。原因是分蘖期降雨较多, 田面水层深度较大, 造成了稻田排水量增多。

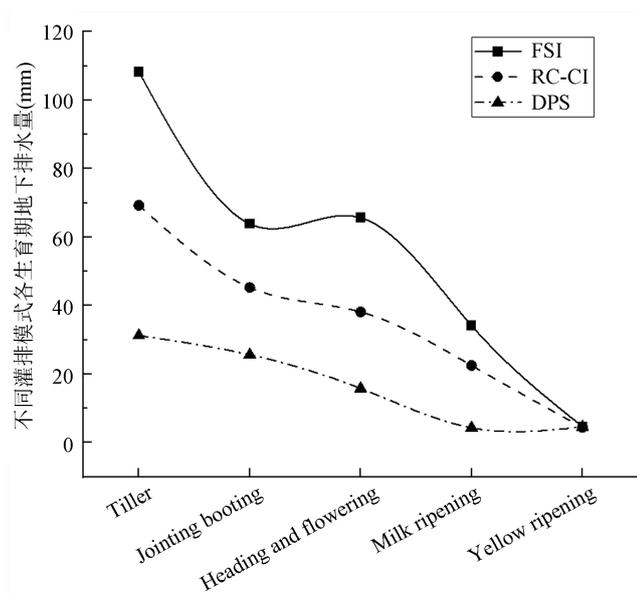


Figure 1. Underground displacement in growth period under different irrigation and drainage modes (unit: mm)

图 1. 各灌排模式下生育期地下排水量(单位: mm)

3.3. 省工效益

同时从灌排水次数上看, DPS (灌 4 次, 排 4 次)以及 RC-CI (灌 6 次, 排 2 次)要优于 FSI (灌 8 次, 排 4 次)。从节水和省工的效益来看, DPS 以及 RC-CI 两种处理更好。

3.4. 地下排水中总氮、铵氮、硝氮浓度动态变化

3.4.1. 地下排水中 TN 浓度变化

施分蘖肥和穗肥后, 稻田地下排水中的 TN 浓度逐渐增加。施分蘖肥后 5 d 内各处理出现第一次浓度峰值, 之后 11 d 内迅速下降, 并逐渐趋于稳定。FSI 处理、RC-CI 处理、DPS 处理第一次浓度峰值分别为 7.39 mg/L、8.65 mg/L、6.46 mg/L, DPS 处理较 FSI 处理显著降低 12.59%, CI 处理较 FSI 处理显著增加 17.05%。肥添加过后 3 d 后上升达到最高点, 之后 11 d 内快速下降, 并逐渐趋于稳定。

其原因是, 尿素施入稻田后先以尿素氮的形态存在于田表土壤中, 再逐渐水解为无机氮, 无机氮随土壤溶液垂向迁移, 因此引起了 TN 指标在地下水中的提升, 而后由于土壤截留, 使得 TN 下降。由于控水指标的差异, FSI 处理地下排水量较大, 基质浓度偏低, 导致地下排水中 TN 浓度低于 CI 处理; DPS 处理自移栽后田面除雨后保留蓄水深度外, 其余时间田面不保留水层, 故尿素氮存在在地表土层, 缺乏向下迁移动力, 因此地下排水 TN 浓度较低。

3.4.2. 地下排水中 N_4^+ -N 浓度变化

施分蘖肥和穗肥后, 稻田地下排水中的 N_4^+ -N 浓度逐渐增加。施分蘖肥后 5 d 内各处理出现第一次浓度峰值, 随后浓度波动下降。FSI 处理、RC-CI 处理、DPS 处理第一次浓度峰值分别为 4.73 mg/L、5.11 mg/L、3.68 mg/L, DPS 处理较 FSI 处理显著降低 22.20%, CI 处理较 FSI 处理显著增加 8.04%。穗肥添加过后 3 d 后上升达到最高点, 随后浓度波动下降, 波动性较分蘖期降低。FSI 处理、RC-CI 处理、DPS 处理第一次浓度峰值分别为 3.23 mg/L、3.57 mg/L、3.08 mg/L, DPS 处理较 FSI 处理显著降低 4.64%, CI 处理较 FSI 处理显著增加 10.53%。

施分蘖肥和穗肥后, 地下排水中的 N_4^+ -N 浓度均呈现先上升后下降的特点, 施肥 5 d 内达到峰值, 而且施穗肥后 N_4^+ -N 浓度峰值明显低于施分蘖肥后的浓度峰值。分蘖肥和穗肥成分为尿素, 施入稻田后先以尿素氮的形式存在于土壤表面, 而后逐渐通过水解等一系列反应产生 N_4^+ -N, 且由于土壤对铵离子的吸附作用于硝化反硝化的作用, 肥后 1 d 内 N_4^+ -N 浓度变化不大。当土壤对 N_4^+ -N 的吸附达到饱和后, 铵离子开始向下迁移, 地下排水中 N_4^+ -N 浓度逐渐升高, 随后由于作物对氮素的吸收利用等, 地下排水中 N_4^+ -N 浓度逐渐降低。试验结果表明, 不同灌排模式对稻田地下排水中 N_4^+ -N 浓度峰值产生了一定影响, RC-CI 处理 N_4^+ -N 浓度峰值最大, DPS 处理最低。

3.4.3. 地下排水中 NO_3^- -N 浓度变化

NO_3^- -N 浓度在分蘖期、拔节孕穗期维持在较高水平, 进入抽穗开花期后逐渐下降并维持在较低水平。施分蘖肥后 7 d 内 FSI 处理、RC-CI 处理、DPS 处理出现第一次浓度峰值, 分别为 2.14 mg/L、2.46 mg/L、2.56 mg/L, RC-CI 处理、DPS 处理较 FSI 处理增加了 14.96%、19.63%, 随后浓度波动下降。施穗肥后 7 d 内 FSI 处理、RC-CI 处理、DPS 处理出现第二次浓度峰值, 分别为 1.65 mg/L、1.78 mg/L、1.99 mg/L, RC-CI 处理、DPS 处理较 FSI 处理增加了 7.88%、20.61%, 随后浓度波动下降, 波动性较分蘖期降低。

与 N_4^+ -N 浓度变化规律对比可知, NO_3^- -N 与 N_4^+ -N 浓度变化的总体趋势和规律相似, NO_3^- -N 是 N_4^+ -N 通过硝化反应生成的, 而且这一转化受土壤温度等因素的影响, 因此 NO_3^- -N 较 N_4^+ -N 达到浓度峰值的时间有滞后。分蘖前期受降雨、控水条件等因素影响, 土壤含水率较高, 通气性差, 厌氧环境抑制消化细菌活性, 硝化作用弱, 且 NO_3^- -N 易被作物吸收, 导致地下排水中 NO_3^- -N 浓度降低。随着土壤中 N_4^+ -N

浓度提升, 加速了硝化反应, 地下排水中 NO_3^- -N 浓度逐渐升高, 而后由于作物对氮素的吸收利用等, 地下排水中 NO_3^- -N 浓度逐渐降低。不同的生育阶段, DPS 处理的 NO_3^- -N 浓度始终高于 FSI 处理, 这是因为 DPS 处理移植后, 除雨后保留小于 80 mm 水层外, 其余时间田面均无水层, 土壤含水率较低、透气性强, 加速了硝化反应, 导致地下排水中 NO_3^- -N 浓度较高。

3.4.4. 氮素流失负荷

不同灌排模式各生育期地下排水氮素流失负荷见表 2。全生育期 FSI 处理稻田氮素流失负荷最大, 原因是 FSI 处理稻田地下排水量最大, 地下排水中氮素浓度也较大。RC-CI 处理稻田全生育期氮素流失量为 3.97 kg/hm^2 ; DPS 处理稻田全生育期氮素流失量为 2.46 kg/hm^2 。

Table 2. Nitrogen loss load of underground drainage at different growth stages under different irrigation and drainage modes
表 2. 不同灌排模式各生育期地下排水氮素流失负荷

年份	灌排模式	分蘖期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	黄熟期	全生育期
2021	RC-CI	1.30b	1.66b	0.65b	0.23b	0.15b	3.99b
	DPS	0.98c	1.03c	0.32c	0.07c	0.05c	2.45c
	FSI	2.16a	2.52a	0.80a	0.27a	0.28a	6.02c

注: a、b、c 为灌排方式不同生育期地下排水氮素流失负荷的显著性分析结果, 相同字母代表差异较小, 不同字母代表差异大, 显著性强。

4. 结语

由于在水稻生产过程中大量施用氮肥造成的非点源污染随着近几年极端气候发展越发严重, 迫切需要在施用新型控释肥的基础上找到最适宜的水稻灌排模式, 提高水稻的产量和用水效率、氮素利用率, 降低污染, 提高应对气候变化的能力。本次试验项目做了初步的探寻工作, 对于水稻生长设置了浅水勤灌(FSI)、秸秆覆盖(DPS)、控灌中蓄(RC-CI)三种灌排模式, 采用桶栽试验研究。其中, 研究表明:

- 1) 秸秆覆盖(DPS)处理下水稻的灌水、排水量相对另外两种更小。
- 2) 秸秆覆盖(DPS)和控灌中蓄(RC-CI)处理下省工效益较好。
- 3) 秸秆覆盖(DPS)及控灌中蓄(RC-CI)均在一定程度上比浅水勤灌(FSI)更有减排、降低氮素流失的效果。

基金项目

江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(2021102941053)。

参考文献

- [1] 吴文革, 习敏, 李红春, 等. 不同水稻专用新型肥料减肥增效对比研究[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(2): 135-137+140.
- [2] 徐俊增. 节水控制灌溉水稻生理生长响应机理研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 河海大学, 2007.
- [3] 李竞春. 南方稻作区不同水肥调控方案对稻田水分利用、水稻生长与污染物排放的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [4] 赵燕汝. 不同钾肥对樱桃萝卜和花生生长及土壤化学性质的影响[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- [5] 肖梦华, 俞双恩, 章云龙. 控制排水条件下淹稻田田面及地下水氮浓度变化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 180-186.
- [6] 高焕芝, 彭世彰, 茆智, 等. 不同灌排模式稻田排水中氮磷流失规律[J]. 节水灌溉, 2009(9): 1-3+7.

- [7] 殷国玺, 张展羽, 郭相平, 等. 地表控制排水对氮质量浓度和排放量影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(1): 21-24.
- [8] 李玥瑶, 吴梦洋, 操信春, 等. 稻田水资源利用效用的灌排模式响应[J]. 水土保持学报, 2022, 36(3): 213-219+227.
- [9] 大连市环境监测中心. HJ 636-2012 水质 总氮的测定 碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [10] 沈阳市环境监测中心站. HJ 535-2009 水质 铵的测定 纳氏试剂比色法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- [11] 杭州市环境保护监测站. GB/T 7480-87 水质 硝酸盐氮的测定 酚二磺酸分光光度法[S]. 1987.