

稻麦轮作高标准农田控制排水对排水与氮素输出 削减效果模拟

罗 纨 王嘉诚 贾忠华 刘文龙 卫同辉 邹家荣 朱梦妍 吴 慧 彭佳雯

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

摘要: 稻麦轮作区高标准农田建设中,通过加深排水沟提高麦作期农田排水降渍能力的同时,加大稻作期农田排水输出,不仅降低了水资源利用效率,而且加重了接纳水体的污染。本文基于江苏省扬州市沿运灌区稻麦轮作农田排水水文水质过程的监测结果,利用田间水文模型(DRAINMOD)模拟了长序列气象条件下,灌区提高农田降渍能力对稻田排水、氮素流失及灌溉需求的负面影响以及控制排水措施的积极效果。结果表明,在节水灌溉模式下,研究区排水沟深度由现状的60 cm加深至120 cm,排水间距由120 m加密至20 m时,稻作期排水量与总氮(TN)输出负荷增加9.0%~22.2%、氨氮($\text{NH}_3\text{-N}$)输出负荷增加4.0%~16.8%、灌溉用水量增加9.6%~23.4%。若结合田间管理要求,实施控制排水则可有效缓解提高农田降渍能力造成的负面影响;当排水沟深为120 cm,间距为120~20 m时,稻作期控制排水可使排水量和TN输出负荷减少19.3%~35.3%、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 输出负荷减少7.6%~27.2%、灌溉用水量减少22.9%~40.0%。由于控制排水降低了地下排水梯度,相较于传统排水,农沟从60 cm加深至120 cm时,地下排水平均占比降至50.7%,灌溉用水量相应减少。综上,稻麦轮作农田控制排水具有显著的节水减排作用,可有效降低高标准农田建设中提高降渍能力所产生的负面影响。研究成果可为稻麦轮作区高标准农田建设与水环境保护提供理论依据与技术支持。

关键词: 控制排水; 氮素; 灌溉; 高标准农田; DRAINMOD模型; 稻麦轮作农田

中图分类号: S276.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0272-08

OSID:



Simulation of Effect of Controlled Drainage on Reducing Drainage and Nitrogen Output from High Standard Farmland in Rice and Wheat Rotation Area

LUO Wan WANG Jiacheng JIA Zhonghua LIU Wenlong WEI Tonghui

ZOU Jiarong ZHU Mengyan WU Hui PENG Jiawen

(College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract: In the high standard farmland construction in the plain river network areas, improving field drainage capacity for waterlogging reduction may increase drainage and the associated pollutants discharge to the receiving water bodies. So it is necessary to take controlled drainage (CD) measures to mitigate the adverse impact of crop production on the ecological environment. Based on a monitoring study on drainage and water quality processes conducted in the rice and wheat rotation fields in the Yanyun Irrigation District of Yangzhou, Jiangsu Province from 2021 to 2022, an analytical study by using the field hydrological model—DRAINMOD was presented to examine the impact of increasing drainage intensity and controlled drainage (CD) on rice field drainage, nitrogen losses, and irrigation demands based on long-term meteorological records. The simulation results showed that under the traditional drainage (TD) conditions, when the drainage spacing (L) was between 120 m and 20 m and the depth (D) was increased from 60 cm to 120 cm, the predicted drainage and total nitrogen (TN) losses were increased by 9.0%~22.2%, the ammonia nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) loss was increased by 4.0%~16.8%, and the irrigation demand was increased by 9.6%~23.4%. The increases in drainage, irrigation, and nitrogen losses were more pronounced when the drainage intensity was high. Considering the differences in drainage requirements during different periods of rice and wheat rotation, the aforementioned negative

收稿日期: 2023-08-30 修回日期: 2023-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52379050, 51979239)

作者简介: 罗纨(1967—),女,教授,博士,主要从事农业水资源与环境保护研究, E-mail: luowan@yzu.edu.cn

effects can be avoided with controlled drainage measures. Under the controlled drainage conditions, when the drainage spacing (L) was at 120 ~ 20 m and the depth was at 60 cm, the predicted drainage and TN losses were decreased by 12.0% ~ 22.9%, $\text{NH}_3\text{-N}$ loss was decreased by 3.4% ~ 22.0%, and irrigation demand was decreased by 14.6% ~ 28.5%. When the drainage depth was at 120 cm, the predicted drainage and TN losses were decreased by 19.3% ~ 35.3%, $\text{NH}_3\text{-N}$ loss was decreased by 7.6% ~ 27.2%, and irrigation demand was decreased by 22.9% ~ 40.0%. For smaller drainage spacing, the water-saving and nitrogen reduction effect of CD was more significant. The controlled drainage changed the proportion of surface drainage to subsurface drainage. By restricting subsurface drainage, CD reduced the amount of subsurface drainage by 14% and 23% drainage for drainage depth at 60 cm and 120 cm. The results showed that controlled drainage in the rice and wheat rotation fields had very positive effect on irrigation water-saving, drainage and nitrogen reduction, which can effectively alleviate the negative impact of increasing drainage intensity to improve field drainage capacity. Findings from this research can provide theoretical basis and technical support for the construction of high standard farmland and water environment protection in the rice and wheat rotation areas.

Key words: controlled drainage; nitrogen; irrigation; high standard farmland; DRAINMOD model; rice and wheat rotation fields

0 引言

高标准农田建设是实现国家粮食生产安全战略的一项重要举措。其中,对排灌系统的提档升级是抵御气象灾害、保证农作物丰产丰收的前提。江苏省以占全国 3.8% 的耕地面积生产了全国 5.5% 的粮食,为国家粮食生产做出了积极贡献^[1]。省内大面积的平原区广泛实行稻麦轮作的生产模式,高效利用了土地资源以及夏秋季丰富的雨热资源。虽然水稻生长季降雨较多,但降雨过程与水稻耗水过程不同步,每年仍需大量补充灌溉水来满足水稻生长。为了防止涝渍灾害,稻麦轮作农田配套有完整的排水系统,以满足水旱两种作物不同的排水需求。由于冬小麦生长季的排水降渍要求较高,一般据此决定排水沟的设计深度;而在喜水耐淹的水稻生长季,排水沟形成的水力梯度导致了大量排水与污染物输出;这不仅降低了稻田水肥利用效率,而且加重了接纳水体的污染。

目前江苏省稻麦轮作区广泛采用明沟排水,排水沟间距较大,实际排水强度很难满足麦作期的降渍要求。在气象条件的影响下,小麦渍害风险较高^[2];尤其是在平原河网地区,初春降雨较多时需要人工疏通田块内部浅沟,及时排除地表积水;这与现代化农业发展相矛盾。在当前江苏省高标准农田建设标准中,要求提高排水强度、控制农田地下水位埋深在田面 0.8 m 以下^[3]。如吉凤鸣等^[4]指出,江苏里下河地区高标准农田中末级排水沟需加深至 120 cm。这一要求虽然可以减轻麦田渍害,但也加大了稻作期的水肥流失风险^[5]。因此,迫切需要通过控制排水的工程措施来缓解排水强度提高带来的不利影响。农田控制排水技术通过在排水出口处加

筑控制性建筑物(如闸门或堰),在保留排水系统基本功能的前提下,根据作物生长或田间作业要求适时调整水位,达到减少排水及污染物输出量的目的^[6-8];控制排水措施贯彻的按需排水、精准排水的理念是现代农业排水工程应遵循的指导原则。在控制排水条件下,旱作农田适当抬高地下水位后可增加作物对浅层地下水的利用,具有抗旱稳产的效果^[9-10];水田则可减小水分流失梯度,提高灌溉水和雨水的利用效率^[11-12]。通过水分调控稳定作物产量也是提高氮肥利用率、减少氮素流失的重要途径^[13-15]。现有研究成果表明,控制排水可有效减少氮素输出 40% 左右^[8,16-17],因此其在欧美等地区被列为农业面源污染控制的佳生产管理措施^[6,18]。

针对稻田排灌控制措施,彭世彰等^[19-20]提出以土壤含水率作为灌溉控制指标,与浅水灌溉模式相比,控制灌溉的水稻需水量平均减少 34.6%。高世凯等^[21]进行水稻栽培试验时发现,相较于常规控制灌溉,控制排灌条件下灌水量与排水量都明显减少,污染物负荷降低。李铁成等^[22]设置不同的灌溉模式进行大田试验,得出控制灌溉模式下减施氮肥能提高氮肥吸收利用率,并达到稳产增产效果。HE 等^[23]研究发现,控制排水措施对稻田氮素流失的影响显著,施肥后 7 d 地下排水与氮挥发损失分别减少 17.2% 和 9.3%,联合使用控制排水与灌溉措施可以有效减少氮素损失。俞双恩等^[24]在江苏涟水地区开展了 2 年的控制灌排试验发现,调控措施具有明显的节水减排效果,且轻旱控制灌排效果更佳。鉴于控制灌溉与控制排水之间的互作关系以及气象条件多变的因素,应用模型模拟可以更好地探讨两种控制措施的节水减排潜力。如邹家荣等^[25]针对江苏扬州沿运灌区稻

麦轮作农田排水系统现状,运用田间水文模型(DRAINMOD)模拟分析了不同排灌控制措施削减稻作期农田排水量的作用;但研究中考虑的排水农沟深度(60 cm)较小,控制排水的减排效果不明显,控制灌溉的减排效果更为显著。

目前江苏省稻麦轮作区排水农沟间距(100~200 m)较大,高标准农田建设中仅通过加深排水沟的方式难以满足农田及时降渍要求。若采用暗管排水技术来提高排水系统的降渍能力,则可大力提高农业机械化、现代化发展水平。陈诚等^[26]以江苏扬州沿运灌区为例开展的模拟研究发现,满足研究区水稻收获期机械下田要求保证率为95%的高标准农田需要的暗管排水布局为埋深90~150 cm,间距为18.2~30.9 m。为了探讨稻麦轮作区高标准农田建设中提高农田降渍能力时,排水与氮素输出过程变化以及采取控制排水措施的效果,本文在上述相关研究的基础上,考虑未来暗管排水发展趋势,运用DRAINMOD模型深入分析高标准农田建设背景下,稻麦轮作农田不同排水布局采取控制排水的节水减排效果;结合近年来稻田干湿交替节水灌溉技术的推广,以及传感器技术与智慧农业发展趋势,假定稻田灌溉方法为考虑降雨影响的干湿交替节水型灌溉模式,以便深入探讨控制排水措施的积极作用,以期稻麦轮作区农业水资源高效利用与水环境保护提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与数据收集

研究区位于江苏省扬州市江都区京杭大运河东侧的沿运灌区,属于北亚热带季风性湿润气候,年平均气温15.6℃,年蒸发量1 009.6 mm;年均降雨量约1 020 mm,其中70%左右的降雨发生在5—9月。研究区地处江淮冲积平原,地势平坦,土壤以粉质砂壤土为主;区内普遍实行水稻-冬小麦轮作制度,以明沟排水为主。试验地点为灌区内农田水利科学研究所(32°33'N,119°30'E)。图1为研究站试验田以及观测点布置情况,大田块尺寸为100 m×100 m,四周为排水沟;大田由中间通过的灌溉渠分开,然后又划分为6块面积相同的长方形田块,即试验田由12小块矩形格田组成。水稻生长期,在格田内安装水位仪(HOBO U20-001-04 Onset型)记录灌溉前后水位差,无水层灌溉时需通过土壤可排空体积进行估算,进而获得灌溉水量。农田排水量通过在排水口末端设置的三角堰及水位记录仪器监测。此外,试验田内安装了地下水位与水质监测井组,监测井深度分别为30、60、90、120、200 cm;水质取样频率

为每14 d一次,监测时段为2021—2022年。水质样品冷藏后运至扬州大学农业水土环境与生态实验室进行检测,水质指标包括氨氮、总氮含量,分别采用纳什试剂分光光度法与碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定。此外,在试验田西侧约100 m处装有全自动气象站(ET107型,Campbell Scientific,美国),实时记录降雨量、气温、气压、相对湿度、风速、太阳辐射等气象参数,记录间隔为15 min。

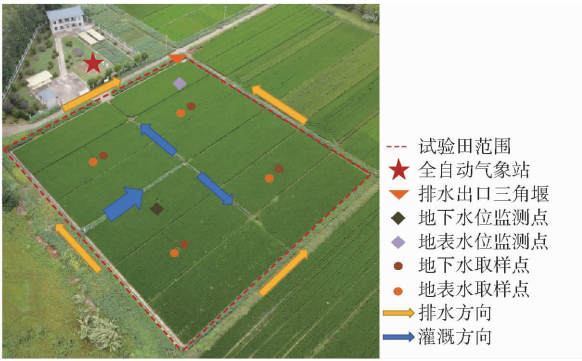


图1 试验区监测点布置示意图

Fig. 1 Layout of monitoring points in experimental area

1.2 DRAINMOD 模型原理与输入参数确定

DRAINMOD是由美国农业部自然资源保护局(NRCS)推荐的一个田间水文预测模型^[27-28]。针对地下水位浅埋区,模型通过输入气象、土壤、作物以及排水系统布局等参数,逐日、逐时计算田间水量平衡过程,包括入渗、蒸发蒸腾、地下排水、地表径流以及地下水位埋深等水文要素^[29]。国内外应用实践表明,其在作物产量^[30-31]、机械收获要求^[26]、排水氮素输出^[32-33]及土壤脱盐过程^[34-36]等方面预测结果都较为准确。本文运用DRAINMOD模型中控制排水和地表灌溉模块来模拟稻田控制排水的节水减排效果。其中,地表灌溉模块首先需要输入灌溉制度(包括灌水率、灌溉时间以及灌溉周期);在既定灌溉日,模型首先检查田间地下水位埋深以及当日降雨量,如果当日地下水位高于设定值,或降雨量大于设定的免灌雨量时,模型取消本次灌溉,自动推迟到下一个灌水周期。这与当前国际上提倡的干湿交替控制灌溉方法接近,可模拟未来传感器技术与自动化水平提高后的一种优化灌溉方式。根据研究区土壤状况以及扬州地区水稻干湿交替灌溉的研究成果,本文模拟稻田水位降至田面以下25 cm时恢复灌溉的情形,并设置降雨量10 mm为推迟灌溉下限。在此基础上,运用控制排水模块进一步探讨排水沟加深后,调整排水出口水位控制排水的减排效果。

图2为控制排水地下水位埋深变化过程。需要排水降渍的时段包括水稻收获期与小麦生长季(即

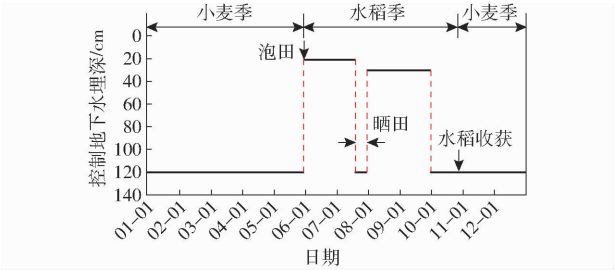


图 2 稻麦轮作农田控制排水地下水埋深变化
Fig.2 Change of groundwater depth of controlled drainage for rice and wheat rotation fields

表 1 DRAINMOD 模型主要输入参数
Tab.1 Main input parameters for DRAINMOD simulations

类别	参数	数值							
土壤水分特征曲线	吸水水头/cm	0	19	102	603	1 995	3 020	8 128	10 000
	体积含水率/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.444	0.430	0.409	0.322	0.273	0.256	0.214	0.204
土壤排水特性	地下水位埋深/cm	0	9	15	35	45	75	90	150
	土壤可排空体积/cm	0	0.094	0.244	1.157	1.636	3.620	4.529	12.10
	潜水上升通量/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	0.600 0	0.584 9	0.201 2	0.056 4	0.041 0	0.029 0	0.002 4	0.000 3
排水系统设计	排水沟间距/m	20 ~ 120							
	排水沟埋深/cm	60、120							
	不透水层深度/cm	215							
	排水模数/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$)	2.5							
	明沟水力半径/cm	10							
	农田最大积水深度/cm	5							
	控制排水设计	日期	1 月 1 日— 5 月 31 日	6 月 1 日— 7 月 19 日	7 月 20— 31 日	8 月 1 日— 9 月 30 日	10 月 1 日— 12 月 31 日		
		控制地下水埋深/cm	120	20	120	30	120		

1.3 DRAINMOD 模型模拟结果评价方法

根据试验站 2021—2022 年农田地下水位动态变化监测数据,输入气象、土壤以及灌溉数据,将 DRAINMOD 模型预测的同期田间地下水位埋深与实测值比较,以率定模型参数,并验证模型应用的准确性。选取决定系数 (Coefficient of determination, R^2)、均方根误差 (Root mean square error, RMSE) 和纳什效率系数 (Nash-sutcliffe efficiency coefficient, NSE) 作为统计参数来评价 DRAINMOD 模型预测精度。

2 结果与分析

2.1 DRAINMOD 模型验证结果

因试验田四周为排水沟,农田实际排水强度为两条平行排水沟间距 (100 m) 的两倍,故取等效排水间距 50 m 进行模拟。图 3 为 DRAINMOD 模型预测的研究站试验田地下水位埋深与实测值比较情况,可见预测值与实测值吻合较好。统计分析显示,模型率定期 (2021 年) R^2 为 0.90, RMSE 为 14.37 cm, NSE 为 0.89;模型验证期 (2022 年) R^2 为 0.86, RMSE 为 16.78 cm, NSE 为 0.84。这表明

10 月至次年 5 月,240 d 左右);除水稻晒田期以外,排水需求较小的稻作期 (6—9 月) 采取控制排水的天数约 110 d;6 月至 7 月中旬控制水深为 20 cm,8 月至 10 月控制水深为 30 cm,其余时期为排水沟实际深度。

结合研究区农田排水系统布置及土壤理化性质测定结果,确定 DRAINMOD 模型主要输入参数,同时参考吉凤鸣等^[4]和陈诚等^[26]对研究区高标准农田排水系统布局的建议,确定长序列模拟的排水系统设置方案,见表 1。

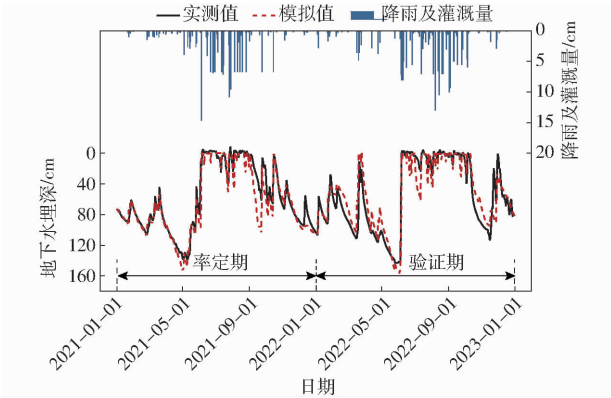


图 3 稻麦轮作农田地下水位埋深实测值与 DRAINMOD 模型预测值比较

Fig.3 DRAINMOD predicted water table depth as compared with measured values in rice and wheat rotation fields

DRAINMOD 模型能够准确地模拟研究区稻麦轮作农田地下水位动态变化过程。

从图 3 可知,每年 11 月至次年 5 月的冬小麦生长季,麦田地下水位埋深普遍大于 40 cm,两年时间内有 2 次降雨事件将地下水位抬升至地表附近,分别为 2022 年 3 月 27 日与 2022 年 12 月 1 日。每年 6 月至 10 月为水稻生长季,6 月初泡田灌溉将地下

水位抬升至地表;除分蘖末期晒田与成熟期收获需加强排水外,稻田地下水位需维持在较高水平。可见,稻作期大量补充灌溉导致水肥流失风险较大。本文监测的 2021 年与 2022 年水稻生长期降雨量分别为 543.1 mm 与 319.0 mm,记录的补充灌溉水量分别为 920.5 mm 与 1515.0 mm。2022 年灌溉量较大主要是 8 月高温少雨的原因。所以,有必要采取控制排水措施来降低稻作期灌区“大引大排”的不利影响。

2.2 农田排水强度对排水量、灌溉需求量及氮素流失的影响

稻田地表与地下水氮素质量浓度监测结果显示,NH₃-N 总体呈现地表水中质量浓度高、地下水中质量浓度较低的分布规律;稻作期农田地表水氨氮质量浓度均值为 4.53 mg/L,受施肥事件影响在全生育期内质量浓度变化幅度较大;深度 30 ~ 120 cm 范围内地下水氨氮质量浓度均值低于 3.0 mg/L,说明土壤颗粒与土壤胶体对铵离子吸附作用显著,阻滞了铵离子向深层土壤淋失^[37];埋深 200 cm 的地下水氨氮质量浓度仅为 0.44 mg/L。总氮(TN)在不同深

度(包括地表)呈相对均匀分布,质量浓度均值为 5.0 mg/L 左右。在下面的分析中,将地表水中氮素质量浓度及埋深 30 ~ 120 cm 地下水中氮素质量浓度均值分别作为农田地表排水与地下排水中的氮素质量浓度。图 4 中 TD 表示传统排水模式,CD 表示控制排水模式;D60 与 D120 表示排水沟深 60 cm 与 120 cm;蓝色阴影部分显示排水沟深度 *D* 由目前的 60 cm 加深到 120 cm 情况下,DRAINMOD 模型预测的稻田排水量、氮素(氨氮与总氮)流失以及灌溉需求量随排水间距 *L* 的变化情况。由图 4a 可知,在传统排水模式下,加深排水沟所增加的排水量随着排水间距的增大而减小。对于研究区现有排水间距(*L* = 50 m),加深排水沟后,总排水量预测值由 60.6 cm 增加到 72.2 cm,增加量为 11.6 cm,增幅为 19.1%;当排水间距缩小为 20 m 时,模拟排水量由 88.1 cm 增加到 101.6 cm,提高 13.5 cm,增幅为 15.3%;间距较小时,增幅最高为 22.2%,增量最大为 14.8 cm;而当间距为 120 m 时,排水量增幅仅为 9.0%,增量最小仅为 4.0 cm。说明在间距较大时,加深排水沟对于改善农田降渍效果的影响有限。

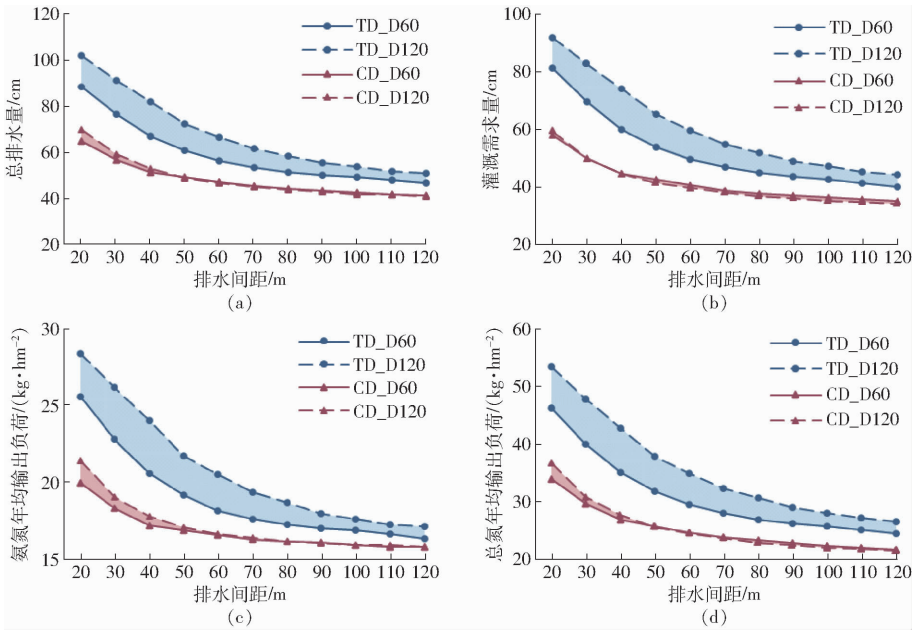


图 4 DRAINMOD 模拟的排水量、灌溉需求量及氮素流失在 TD 与 CD 模式下随排水布局的变化曲线
Fig. 4 DRAINMOD predicted annual drainage, irrigation requirement and nitrogen losses as affected by drainage layout under traditional and controlled drainage conditions

本文模拟研究采用按需灌溉的精准控制灌溉模式,模型根据土壤水分状况判断是否需要进行灌溉,排水系统布局对于土壤水分的影响决定了补充灌溉量。由图 4b 可知,模拟灌溉需求量随排水强度变化的规律与排水一致,加深排水沟加大了农田水分流失梯度,稻作期灌溉需求量随之增加,增幅与增量随着排水间距的减小而增大,增幅为 9.6% ~ 23.4%,

增量为 4.0 ~ 14.0 cm。
图 4c、4d 为稻田氮素输出负荷随排水沟深度及间距的变化规律。当排水沟深从 60 cm 加大到 120 cm,排水间距为 50 m 时,TN 输出负荷从 31.8 kg/hm²增加到 37.9 kg/hm²,NH₃-N 输出负荷从 19.1 kg/hm²增加到 21.7 kg/hm²;排水间距缩小至 20 m 时,TN 输出负荷从 46.2 kg/hm²增加到

53.4 kg/hm², NH₃-N 输出负荷从 25.6 kg/hm² 增加到 28.4 kg/hm²。不同排水间距下, TN 输出增加量为 2.1 ~ 7.8 kg/hm², 其增幅与排水量增幅一致; 而 NH₃-N 增加量最小为 0.8 kg/hm², 最大仅为 3.5 kg/hm², 增幅为 4.0% ~ 16.8%。说明在研究区降雨规律下, 排水间距变化对于氮素输出的影响不大。

2.3 稻田控制排水措施的节水减排效果

图 4 中红色线条区域显示, 控制排水条件下, 农田排水量、灌溉需求量和氮素流失量均显著降低。为便于分析, 挑选排水间距为 20、50、100 m 表示高、中、低 3 种排水强度, 削减率见表 2。在低排水强度

($D = 60\text{ cm}$, $L = 100\text{ m}$) 时, 控制排水将排水量从 49.1 cm 降低到 42.8 cm, 降幅仅为 12.9%; 当前排水沟深度, 排水量降幅最高为 22.9%, 最低为 12.0%。而在高排水强度 ($D = 120\text{ cm}$, $L = 20\text{ m}$) 时, 控制排水可以将排水量从 101.6 cm 降低到 69.9 cm, 降幅为 31.2%; 排水沟加深后, 排水量降幅最高为 35.3%, 最低为 19.3%。高强度排水意味着农田降渍保证率较高, 即高标准农田建设的目标。因此, 控制排水措施可以很好地化解稻麦轮作农田水旱两种作物不同排水需求之间的矛盾, 为高标准农田稳产减污提供支撑。

表 2 控制排水对排水量、氮素流失量和灌溉量的削减率
Tab.2 Reduction rate of controlled drainage on annual drainage, nitrogen loss and irrigation volume %

排水间距/m	排水沟深 60 cm				排水沟深 120 cm			
	排水量	灌溉量	NH ₃ -N 流失量	TN 流失量	排水量	灌溉量	NH ₃ -N 流失量	TN 流失量
20	26.4	28.7	22.0	26.6	31.2	35.3	24.5	31.3
50	19.1	21.3	11.8	19.2	32.0	36.6	21.6	32.2
100	12.9	25.4	5.6	13.0	21.5	25.3	9.8	21.7

由于排水强度的增加会导致灌溉需求量的增加, 两者变化量之间存在很好的线性关系 ($R^2 = 0.97$); 如图 5 所示, 排水增量与灌溉需求增量基本与 1:1 关系线重合。同样, 排水增量与 NH₃-N、TN 流失增量呈强相关关系 ($R^2 = 0.99$), 其中 TN 流失增量随排水增量的变化更大(图 5)。上述结果表明, 通过加深排水沟或缩小排水间距的方法来提高农田降渍能力(即提高排水强度)的同时, 将会产生增加排水量、加大灌溉量和氮素流失等负面影响, 需要采取控制排水措施进行抑制, 适时降低农田排水强度, 实现节水减排的目的。

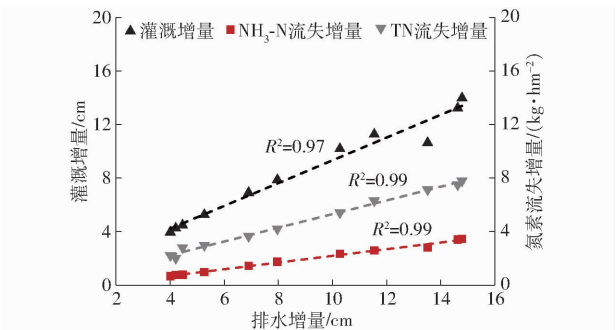


图 5 排水增量与灌溉增量、氮素流失增量的关系
Fig.5 Relationship between drainage increment, irrigation increment and nitrogen loss increment

图 5 中, 排水强度变化时, 灌溉增量与排水增量变幅近似。由于 TN 在地表水与地下水中差异较小, 控制排水对于灌溉量和 TN 输出负荷的削减趋势与排水量基本一致, 其中 TN 输出负荷与排水量削减率相同。 L 为 120 ~ 20 m, 排水沟加深前后, 灌

溉需求量削减率分别为 14.6% ~ 28.5%、22.9% ~ 40.0%。因 NH₃-N 含量随埋深的增加呈现降低趋势, NH₃-N 输出负荷与排水量变化规律有一定区别。在高排水强度 ($L = 20\text{ m}$) 时, 控制排水的 NH₃-N 输出负荷降低到 20.0 kg/hm² ($D = 60\text{ cm}$) 和 21.4 kg/hm² ($D = 120\text{ cm}$), 降幅为 22.0% 和 24.5%; 而在低排水强度 ($L = 100\text{ m}$) 时, NH₃-N 输出负荷降低到 15.9 kg/hm² ($D = 60\text{ cm}$ 、120 cm), 降幅为 5.6% 和 9.8%; L 为 120 ~ 20 m, 排水沟加深前后, NH₃-N 流失降幅分别为 3.4% ~ 22.0%、7.6% ~ 27.2%。说明农田排水能力较差时, 排水与氮素输出负荷都不大, 变化幅度也较小, 但此时渍害会影响作物生长。

上述分析结果说明, 针对研究区作物生长排水需求设计的控制排水方案在稻作期减排的效果非常显著; 即使在现有排水沟较浅的情况, 控制排水也具有较好的节水减排效果。图 4 中不同间距与不同沟深之间差距较小, 说明控制排水可同时削弱排水强度变化对灌溉需求量与氮素输出的影响。因此, 高标准农田建设中提高麦作期降渍能力后, 采用控制排水措施可有效减少稻作期农田排水, 同时节约灌溉用水、减少排水氮素输出。

2.4 控制排水对地下排水的削减作用

图 6 为 DRAINMOD 模拟的实施控制排水前后, 地下排水组成部分的变化情况。由图 6 可知, 传统排水条件下地下排水所占比例随排水间距增加而减少, 几乎呈严格的线性关系 (R^2 分别为 0.97、0.98); $L = 20\text{ m}$ 时, 地下排水占比高达 84.5% ($D = 60\text{ cm}$)

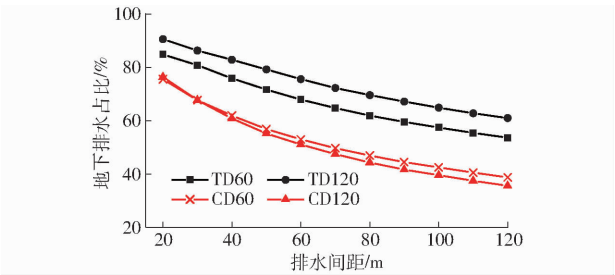


图6 传统排水和控制排水条件下农田地下排水占比变化模拟结果

Fig.6 DRAINMOD predicted changes in proportion of subsurface drainage under traditional and controlled drainage conditions

和90.6% ($D=120\text{ cm}$)。加深排水沟后,地下排水强度提高,地下排水占比较浅沟增加5.5~7.7个百分点。从图6可以看出,控制排水对地下排水量的削减非常显著; $L=20\text{ m}$ 时,地下排水占比分别为75.6% ($D=60\text{ cm}$)和76.4% ($D=120\text{ cm}$); $L=50\text{ m}$ 时,地下排水占比分别为56.9%和55.2%; $L=120\text{ m}$ 时,地下排水占比分别为38.8%和35.6%。当 L 为120~20 m、 $D=120\text{ cm}$ 时,控制排水模式地下排水平均占比为50.7%;较传统排水下 D 为60、120 cm,地下排水平均占比分别降低16.0、23.2个百分点。可见,控制排水有效缓解了排水深度变化

对地下排水量的影响。控制排水措施减少稻作期地下排水量的同时,会一定程度上增加地表排水量。不过,排水总量的显著减少使得污染物输出总量仍呈现下降趋势。

3 结论

(1)传统排水条件下,排水沟深度由60 cm加深至120 cm,排水间距为120~20 m时,预测排水量增加4.0~14.8 cm,TN流失增加2.1~7.8 kg/hm²,增幅均为9.0%~22.2%;NH₃-N输出负荷增加0.8~3.5 kg/hm²,增幅为4.0%~16.8%;灌溉用水量增加4.0~14.0 cm,增幅为9.6%~23.4%;增量与增幅随排水间距的缩小而增大。

(2)采取控制排水措施后,因地下排水量减少,灌溉用水量与氮素流失量随之减少;模拟结果表明,控制排水的节水减排效果随排水强度增加而增加; L 为120~20 m、 $D=60\text{ cm}$ 时,预测排水量和TN输出负荷减少12.0%~22.9%,NH₃-N输出负荷减少3.4%~22.0%,灌溉用水量减少14.6%~28.5%。 L 为120~20 m、 $D=120\text{ cm}$ 时,预测排水量和TN输出负荷减少19.3%~35.3%、NH₃-N输出负荷减少7.6%~27.2%、灌溉用水量减少22.9%~40.0%。

参 考 文 献

[1] 殷琳琳,尹心安. 中国主要粮食作物种植结构调整区域优先序研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2020, 56(6):856-863.
YIN Linlin, YIN Xin'an. Priority area determination for planting structure adjustment of main food crops in China[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2020,56(6):856-863. (in Chinese)

[2] 吴洪颜,高苹,徐为根,等. 江苏省冬小麦渍害的风险区划[J]. 生态学报, 2012,32(6):1871-1879.
WU Hongyan, GAO Ping, XU Weigen, et al. Risk division on winter wheat suffering from spring wet damages in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012,32(6):1871-1879. (in Chinese)

[3] 江苏省人民政府办公厅关于印发江苏省高标准农田建设标准的通知[J]. 江苏省人民政府公报, 2021(6):8-11.

[4] 吉凤鸣,陈于,孙晨,等. 江苏省里下河地区高标准农田中田块规格的标准分析[J]. 江苏水利, 2021(10):33-38.
JI Fengming, CHEN Yu, SUN Chen, et al. Standard analysis of high standard farmland in Lixia River area of Jiangsu Province [J]. Jiangsu Water Resources, 2021(10):33-38. (in Chinese)

[5] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2012,156:1-11.

[6] SKAGGS R W, FAUSEY N R, EVANS R O. Drainage water management[J]. Soil Water Conservation, 2012,67:167-172.

[7] EVANS R O, SKAGGS R W, GILLIAM J W. Controlled versus conventional drainage effects on water quality[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995,121(4):271-276.

[8] GILLIAM J W, SKAGGS R W, WEED S B. Drainage control to diminish nitrate loss from agricultural fields[J]. Journal of Environmental Quality, 1979,8(1):137-142.

[9] YOUSSEF M A, STROCK J, BAGHERI E, et al. Impact of controlled drainage on corn yield under varying precipitation patterns:a synthesis of studies across the U. S. Midwest and Southeast[J]. Agricultural Water Management, 2023,275:1-14.

[10] GHANE E, FAUSEY N R, SHEDEKAR V S, et al. Crop yield evaluation under controlled drainage in Ohio, United States [J]. Soil Water Conservation, 2012,67(6):465-473.

[11] 武迪,罗纨,周明耀,等. 平原河网地区稻田排水过程及其受外河影响的研究[J]. 灌溉排水学报, 2015,34(3):28-33.
WU Di, LUO Wan, ZHOU Mingyao, et al. Paddy field drainage processes and its influence by lateral ditches in the polder area of southeastern China[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015,34(3):28-33. (in Chinese)

[12] 陈凯文,俞双恩,李倩倩,等. 不同水文年型下水稻节水灌溉技术方案模拟与评价[J]. 农业机械学报, 2019,50(12):

268 – 277.

CHEN Kaiwen, YU Shuang'en, LI Qianqian, et al. Simulation and evaluation of technical schemes for water-saving irrigation of rice in different hydrological years[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(12): 268 – 277. (in Chinese)

[13] POOLE C A, SKAGGS R W, CHESCHIER G M, et al. Effects of drainage water management on crop yields in North Carolina [J]. Soil Water Conversation, 2013,68(6):429 – 437.

[14] 张洪程,王秀芹,戴其根,等. 施氮量对杂交稻两优培九产量、品质及吸氮特性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(7):800 – 806.

ZHANG Hongcheng, WANG Xiuqin, DAI Qigen, et al. Effects of N-application rate on yield, quality and characters of nitrogen uptake of hybrid rice variety Liangyoupeijiu[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003,36(7):800 – 806. (in Chinese)

[15] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 河套灌区控制排水对氮素流失与利用的影响[J]. 农业机械学报, 2021,52(11):315 – 322,420.

DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of controlled drainage on loss and utilization of nitrogen in Hetao Irrigation District[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(11):315 – 322,420. (in Chinese)

[16] LUO W, JIA Z, FANG S, et al. Outflow reduction and salt and nitrogen dynamics at controlled drainage in the Yinnan Irrigation District[J]. Agricultural Water Management, 2008,95(7):809 – 816.

[17] WESSTRÖM I, MESSING I. Effects of controlled drainage on N and P losses and N dynamics in a loamy sand with spring crops[J]. Agricultural Water Management, 2007,87(3):229 – 240.

[18] WARD A, SHARPLEY A, MILLER K, et al. An assessment of in-field nutrient best management practices for agricultural crop systems with subsurface drainage[J]. Soil Water Conservation, 2018,73(1):5 – 10.

[19] 彭世彰,朱成立. 节水灌溉的作物需水量试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2003,22(2):21 – 25.

PENG Shizhang, ZHU Chengli. Experimental research on crop water requirement under water-saving irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2003,22(2):21 – 25. (in Chinese)

[20] 彭世彰. 节水高产水稻控制灌溉技术[J]. 水利水电科技进展, 1991,11(4):75 – 77.

PENG Shizhang. Controlled irrigation technology for water saving and high yield rice[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 1991,11(4):75 – 77. (in Chinese)

[21] 高世凯,俞双恩,王梅,等. 旱涝交替下控制灌溉对稻田节水及氮磷减排的影响[J]. 农业工程学报, 2017,33(5):122 – 128.

GAO Shikai, YU Shuang'en, WANG Mei, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on saving water and reducing nitrogen and phosphorus loss in paddy field under alternate drought and flooding condition [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(5):122 – 128. (in Chinese)

[22] 李铁成,张忠学,张作合,等. 氮肥减施对节水灌溉稻田 NH₃与 N₂O 排放及氮肥利用的影响[J]. 农业机械学报,2023, 54(10):348 – 355.

LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, ZHANG Zuohe, et al. Effects of nitrogen fertilizer reduction under water-saving irrigation on NH₃, N₂O emissions and absorption of nitrogen fertilizer in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):348 – 355. (in Chinese)

[23] HE Y P, ZHANG J Y, YANG S H, et al. Effect of controlled drainage on nitrogen losses from controlled irrigation paddy fields through subsurface drainage and ammonia volatilization after fertilization[J]. Agricultural Water Management, 2019,221:231 – 237.

[24] 俞双恩,李偲,高世凯,等. 水稻控制灌排模式的节水高产减排控污效果[J]. 农业工程学报, 2018,34(7):128 – 136.

YU Shuang'en, LI Si, GAO Shikai, et al. Effect of controlled irrigation and drainage on water saving, nitrogen and phosphorus loss reduction with high yield in paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(7):128 – 136. (in Chinese)

[25] 邹家荣,罗纨,李林,等. 灌排控制措施结合沟塘湿地改善水稻灌区排水水质的模拟分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(11):98 – 107.

ZOU Jiarong, LUO Wan, LI Lin, et al. Simulating the effects of irrigation and drainage control combined with ditch-pond wetlands on drainage water quality improvement in a rice irrigation area[J]. Transactions of the CSAE, 2022,38(11):98 – 107. (in Chinese)

[26] 陈诚,罗纨,唐双成,等. 满足机械收割农艺条件下稻田排水暗管布局 DRAINMOD 模型模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14):86 – 93.

CHEN Cheng, LUO Wan, TANG Shuangcheng, et al. Drainage layout in paddy fields meeting machinery harvest requirement based on DRAINMOD model[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(14):86 – 93. (in Chinese)

[27] CHANG A C, SKAGGS R W, HERMSMEIER L F, et al. Evaluation of a water management model for irrigated agriculture [J]. Transactions of the ASAE, 1983,26(2):412 – 418.

[28] GAYLE G A, SKAGGS R W. Surface storage on bedded cultivated lands[J]. Transactions of the ASAE, 1978,21(1):101 – 104.

[29] 梁超凡,周蓓蓓,陈晓鹏,等. DRAINMOD 模型在农田排水系统中的应用及进展[J]. 灌溉排水学报, 2020,39(增刊 1):101 – 106.

LIANG Chaofan, ZHOU Beibei, CHEN Xiaopeng, et al. The application and advance of DRAINMOD in farmland drainage system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020,39(Supp.1):101 – 106. (in Chinese)

[30] NEGM L M, YOUSSEF M A, SKAGGS R W, et al. DRAINMOD-DSSAT model for simulating hydrology, soil carbon and nitrogen dynamics, and crop growth for drained crop land[J]. Agricultural Water Management, 2014,137:30 – 45.

[35] 谢军飞, 李玉娥. DNDC 模型对北京旱地农田 N₂O 排放的模拟对比分析[J]. 农业环境科学学报, 2004,23(4):691–695.
XIE Junfei, LI Yu'e. Comparative analysis on measured and DNDC (DeNitrification-DeComposition) modeled N₂O emissions from upland farm in Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2004,23(4):691–695. (in Chinese)

[36] MARY E F, JULIE L Z, SOTIRIA K. Prediction of N₂O emissions under different field management practices and climate conditions[J]. Science of the Total Environment, 2019,646:872–879.

[37] ZHAO Z, CAO L, DENG J, et al. Modeling CH₄ and N₂O emission patterns and mitigation potential from paddy fields in Shanghai, China with the DNDC model[J]. Agricultural Systems, 2020,178:102743.

[38] 李文娟,蔡延江,朱同彬,等. 土壤团聚体氧化亚氮排放及其微生物学机制研究进展[J]. 土壤学报,2021,58(5):1132–1144.
LI Wenjuan, CAI Yanjiang, ZHU Tongbin, et al. Release of nitrous oxide from soil aggregates and its microbial mechanism [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,58(5):1132–1144. (in Chinese)

[39] 高小叶,袁世力,吕爱敏,等. DNDC 模型评估苜蓿绿肥对水稻产量和温室气体排放的影响[J]. 草业学报,2016, 25(12):14–26.
GAO Xiaoye, YUAN Shili, LÜ Aimin, et al. Effects of alfalfa green manure on rice production and greenhouse gas emissions based on DNDC model simulation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016,25(12):14–26. (in Chinese)

[40] 陈桀,包云轩,吕青,等. 基于 DNDC 模型的不同秸秆还田填埋深度下农田 N₂O 气体排放模拟[J]. 安徽农业科学, 2018,46(14):64–67,74.
CHEN Can, BAO Yunxuan, LÜ Qing, et al. Simulation of nitrous oxide emission under different straw retention depths based on denitrification-decomposition model[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2018,46(14):64–67,74. (in Chinese)

[41] 郑文琦,谭文峰,刘昭,等. 氮肥减施对红壤旱坡花生地氮素径流和渗漏损失及表观平衡的影响[J]. 土壤学报, 2022,59(6):1540–1550.
ZHENG Wenqi, TAN Wenfeng, LIU Zhao, et al. Effect of reduced nitrogen fertilization on nitrogen runoff loss and apparent balance on red-soil dry slope peanut land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022,59(6):1540–1550. (in Chinese)

[42] 巨晓棠. 理论施氮量的改进及验证——兼论确定作物氮肥推荐量的方法[J]. 土壤学报, 2015,52(2):249–261.
JU Xiaotang. Improvement and validation of theoretical N rate(TNR)—discussing the methods for N fertilizer recommendation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(2):249–261. (in Chinese)

[43] 巨晓棠,张翀. 论合理施氮的原则和指标[J]. 土壤学报, 2021,58(1):1–13.
JU Xiaotang,ZHANG Chong. The principles and indicators of rational N fertilization[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1):1–13. (in Chinese)

(上接第 279 页)

[31] 温季,宰松梅,郭树龙,等. 利用 DRAINMOD 模型模拟不同排水管间距下的作物产量[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8):20–24.
WEN Ji, ZAI Songmei, GUO Shulong, et al. Simulation of crop yield for different spacing of drainage ditches by using DRAINMOD model[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(8):20–24. (in Chinese)

[32] 曾文治,黄介生,谢华,等. 不同暗管布置下棉田排水的硝态氮流失量分析[J]. 农业工程学报, 2012,28(4):89–93.
ZENG Wenzhi, HUANG Jiesheng, XIE Hua, et al. Analysis of nitrate-nitrogen loss under different underground pipe layout [J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(4):89–93. (in Chinese)

[33] 洪林,罗文兵. 基于 DRAINMOD 的农田地表径流氮素流失动态模拟[J]. 水科学进展, 2011,22(5):703–709.
HONG Lin, LUO Wenbing. Dynamic simulation of nitrogen losses in surface runoff from farmlands using the DRAINMOD model[J]. Advances in Water Science, 2011,22(5):703–709. (in Chinese)

[34] 窦旭,史海滨,李瑞平,等. 农田排水改良盐渍化土壤效果与环境污染研究[J]. 农业机械学报,2022,53(4):372–385.
DOU Xu, SHI Haibin, LI Ruiping, et al. Effect of farmland drainage on improving saline soil and environmental pollution[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,53(4):372–385. (in Chinese)

[35] 陈瑾,罗纨,贾忠华,等. 江苏沿海垦区土壤脱盐过程受排水条件影响的模拟研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 185–191.
CHEN Jin, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Simulating the rainfall leaching effect on coastal saline soil facilitated with subsurface drainage systems[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7):185–191. (in Chinese)

[36] 李山,罗纨,贾忠华,等. 基于 DRAINMOD 模型估算灌区浅层地下水利用量及盐分累积[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22):89–97.
LI Shan, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Shallow groundwater use and salinity buildup based on DRAINMOD predicted field hydrology in irrigated areas[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(22):89–97. (in Chinese)

[37] 冯绍元,郑耀星. 农田氮素的转化与损失及其对水环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 1999, 15(6):277–279.
FENG Shaoyuan,ZHENG Yaoquan. Transformation and loss of nitrogen in farmland and its impact on water environment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 1999, 15(6):277–279. (in Chinese)