

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.12.034

水氮耦合对黑土稻作产量与氮素吸收利用的影响

秦子元^{1,2} 张忠学^{1,2} 孙迪^{1,2} 宋健^{1,2} 张作合³ 李铁成^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;
2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030;
3. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061)

摘要: 为探明不同水氮耦合模式下黑土区水稻产量形成和氮素吸收利用的规律,设置常规淹灌(F)、浅湿灌溉(W)和控制灌溉(C)3种灌溉模式,0、85、110、135 kg/hm² (N0、N1、N2、N3)4个施氮量水平,共12个处理,研究不同水氮耦合模式对水稻干物质、产量、氮素吸收转运、水氮利用效率的影响。结果表明:常规淹灌和浅湿灌溉模式下,水稻地上部各器官干物质累积量随施氮量的增加而增大,而控制灌溉模式随施氮量的增加先增大后减小;水稻地上部不同器官氮素累积量随施氮量的增加而增大,相同施氮水平,控制灌溉模式的叶、茎鞘和穗氮素累积量较常规淹灌提高了27.80%~43.42%、18.32%~24.97%、13.85%~24.25%,较浅湿灌溉提高了0.96%~13.18%、10.73%~12.86%、10.53%~12.61%;3种灌溉模式下,水稻地上部干物质、氮素累积速率均随施氮量的增加而增大,且控制灌溉模式高于浅湿灌溉和常规淹灌模式,干物质、氮素累积始盛期随施氮量增加而提前;水稻植株平均氮素累积速率达到峰值时间比平均干物质累积速率达到峰值时间提前11.39 d;相较于常规淹灌和浅湿灌溉模式,控制灌溉模式更有利于提高水稻产量,其中CN2处理产量最大,为10 272.57 kg/hm²;控制灌溉模式显著提升氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力;相同灌溉模式下,叶、茎鞘氮素转运率以及穗部氮素转运贡献率随施氮量增加而减小。水稻产量与灌溉水分利用效率、水分生产效率、氮肥农学利用效率、百千克籽粒吸氮量之间呈极显著正相关($P<0.01$),与氮素籽粒生产效率之间呈极显著负相关($P<0.01$)。适宜水氮耦合模式可提高水稻产量和氮素吸收利用,综合考虑CN2处理为最佳水氮耦合模式。

关键词: 水稻; 黑土区; 水氮耦合; 产量; 氮素吸收利用

中图分类号: S511; S143 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)12-0324-12 OSID: 

Effect of Water and Nitrogen Coupling on Rice Yield and Nitrogen Absorption and Utilization in Black Soil

QIN Ziyuan^{1,2} ZHANG Zhongxue^{1,2} SUN Di^{1,2} SONG Jian^{1,2} ZHANG Zuohe³ LI Tiecheng^{1,2}

(1. School 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 and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
3. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China)

Abstract: In order to find out the effects of different water and nitrogen coupling models on rice yield formation and nitrogen absorption and utilization in black soil area, three irrigation models, i. e., conventional flooded irrigation (F), shallow wet irrigation (W) and controlled irrigation (C), and four nitrogen application levels, i. e., 0 kg/hm², 85 kg/hm², 110 kg/hm² and 135 kg/hm² (N0, N1, N2, N3), were set up in the experiment. The effects of different water and nitrogen coupling models on dry matter, yield, nitrogen uptake and transport, water and nitrogen use efficiency of rice were studied. The results showed that under conventional flooded irrigation and shallow wet irrigation, dry matter accumulation was increased with the increase of nitrogen application rate, while under controlled irrigation, dry matter accumulation was firstly increased and then decreased with the increase of nitrogen

收稿日期: 2021-08-17 修回日期: 2021-10-14
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52079028, 51779046)
作者简介: 秦子元(1995—),男,博士生,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: 598760724@qq.com
通信作者: 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

application rate. The nitrogen accumulation in different organs of rice shoot was increased with the increase of nitrogen application rate. With the same nitrogen application level, the nitrogen accumulation in leaves, stem sheaths, and panicle of the controlled irrigation mode was increased by 27.80% ~ 43.42%, 18.32% ~ 24.97% and 13.85% ~ 24.25% compared with conventional flooded irrigation, which was increased by 0.96% ~ 13.18%, 10.73% ~ 12.86% and 10.53% ~ 12.61% compared with shallow wet irrigation. Under the three irrigation modes, the dry matter and nitrogen accumulation rates of rice shoot were increased with the increase of nitrogen application rate, and the controlled irrigation mode was higher than shallow wet irrigation and conventional flooded irrigation mode, and the initial peak of dry matter and nitrogen accumulation was advanced with the increase of nitrogen application rate. The peak time of the average nitrogen accumulation rate was 11.39 d earlier than that of the average dry matter accumulation rate. Compared with conventional flooded irrigation and shallow wet irrigation, controlled irrigation was more beneficial to increase rice yield, and CN2 treatment had the highest yield, which was 10 272.57 kg/hm². The controlled irrigation model significantly improved the agronomic N use efficiency and partial factor productivity of N. Under the same irrigation mode, the nitrogen transport rate in leaves and stem sheaths and the contribution rate of nitrogen transport in panicle were decreased with the increase of nitrogen application rate. There were significant positive correlations between rice yield and irrigation water use efficiency (*IWUE*), water use efficiency (*WUE*), agronomic N use efficiency and 100 kg grain nitrogen uptake ($P < 0.01$), and it was negatively correlated with grain production efficiency of nitrogen ($P < 0.01$). Appropriate water and nitrogen coupling mode can increase rice yield and nitrogen absorption and utilization. Comprehensive consideration of CN2 treatment was the best water and nitrogen coupling mode.

Key words: rice; black soil area; water and nitrogen coupling; yield; nitrogen absorption and utilization

0 引言

水稻是我国主要粮食作物,2021 年我国水稻总产量预计达到 2.14 亿 t, 约占我国粮食总产量的 1/3^[1]。在耕地数量有限、人口持续增长的背景下, 到 2030 年, 我国水稻产量需提高 20%, 才能满足国内粮食需求^[2]。农民通常施用高量氮肥, 以求最大限度地提升水稻产量, 但持续的高量投入水氮资源也带来了诸多负面影响^[3]。一方面, 由于过量施用氮肥、施肥方式不当以及田间水分管理不协调等因素, 使得我国氮肥利用率仅为 30% ~ 35%, 大量氮肥通过氨挥发、硝化与反硝化、地表径流和淋溶等方式损失, 导致土壤酸化、河流湖泊富营养化、地下水污染、温室气体排放加剧等环境问题^[4]; 另一方面, 我国水资源短缺严重, 而有约 70% 的农业用水用于稻田灌溉, 传统淹水灌溉模式不断增加耗水, 随着水资源供应紧缺, 稻田生态系统生产力将受到严重威胁^[5]。目前, 我国正在引导农业生产从单纯追求高产向稳定生产且注重资源节约和环境友好的新型农业发展, 因此, 推进节水灌溉和优化施肥技术的研究, 对我国农业可持续发展具有重要意义。

近 30 年, 我国东北平原稻田平均施氮量为 159 kg/hm², 远高于 99.5 kg/hm² 的世界平均水平, 减氮潜力巨大^[6]。同时, 随着我国粮食生产重心北移, 黑龙江省逐渐成为我国主要粮食生产基地和粮食战略储备基地, 农业水资源消耗日益增

加不仅加重了潜在旱灾风险而且削弱了水体自净能力^[7]。近年来, 随着农业水资源供需矛盾加剧、环境污染事件频发, 以节水灌溉和优化施肥来实现水稻稳产和高产的理论和技术研究成为热点^[8]。目前, 国内外专家学者关于水氮耦合对水稻产量和氮素吸收利用已有诸多研究^[9-14]。以往研究大多关注于水稻产量、氮素吸收和水氮利用效率等方面, 而对水稻干物质和氮素累积速率系统的研究较少, 且适宜水氮耦合方式能否进一步提升水稻产量与植株氮素吸收转运以及干物质和氮素累积速率的协同性还需探讨。

本文基于大田试验, 研究黑土地地区不同水氮耦合条件下的水稻产量、水氮利用效率、植株干物质累积量及累积速率、氮素累积量及累积速率、氮素在不同器官中的转运规律以及产量相关性分析, 旨在为建立区域性节水节肥、增产、减排的高效水氮耦合方式提供理论依据与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2020 年 5—10 月在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站(46°58'8"N, 127°40'2"E)进行。试验田位于庆安县平安镇, 地处松嫩平原呼兰河流域中下游, 是典型的寒地黑土分布区, 属寒温带大陆性季风气候, 夏季温热多雨, 冬季寒冷干燥。全年无霜期约 128 d, 多年平均气温 2.9℃, 多年平均蒸发量为

1 213.4 mm, 多年平均降水量 559.8 mm, 降水多集中在 7、8 月。供试土壤类型为黑土型水稻土, 试验前耕层土壤(0~20 cm)基本理化性质如下: pH 值 6.47, 有机质质量比 43.1 g/kg, 全氮质量比 1.69 g/kg, 全磷质量比 0.67 g/kg, 全钾质量比 19.99 g/kg, 碱解氮质量比 159.21 mg/kg, 速效磷质量比 27.56 mg/kg, 速效钾质量比 158.3 mg/kg。

1.2 试验设计

采用灌溉模式和施氮量 2 因素全面试验。设置常规淹灌(F)、浅湿灌溉(W)和控制灌溉(C)3种, 常规淹灌在水稻返青期后保持 30~50 mm 水层; 浅

湿灌溉采用“前水不见后水”的灌溉方式, 待田面呈湿润状态, 再灌下次水; 控制灌溉田面不再长时间建立水层, 以根层土壤含水率及土壤表相确定灌水时间、灌水次数及灌水定额。不同灌溉模式各生育期水分管理见表 1。全生育期施氮量设置 4 个水平: 0、85、110、135 kg/hm² (N0、N1、N2、N3)。试验共计 12 个处理, 每个处理 3 次重复, 共 36 个小区, 随机区组排列, 各试验小区面积为 100 m² (10 m×10 m), 田埂高 20 cm, 宽 25 cm, 小区四侧布置塑料板和水泥埂, 以减少串流和侧渗。各小区单独灌排, 进水管接装小型水表。

表 1 水稻各生育期水分管理

Tab.1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽穗开花期	乳熟期	成熟期
常规淹灌	灌水上下限	0~30 mm	30~50 mm	30~50 mm	晒田	30~50 mm	30~50 mm	30~50 mm	落干
	蓄雨上限	50 mm	100 mm	100 mm		100 mm	100 mm	100 mm	
浅湿灌溉	灌水上下限	0~30 mm	0~30 mm	0~30 mm	晒田	0~30 mm	0~30 mm	0~30 mm	落干
	蓄雨上限	50 mm	50 mm	50 mm		50 mm	50 mm	50 mm	
控制灌溉	灌水上下限	0~30 mm	0.85θ _s ~θ _s	0.85θ _s ~θ _s	晒田	0.85θ _s ~θ _s	0.85θ _s ~θ _s	0.70θ _s ~θ _s	落干
	蓄雨上限	50 mm	50 mm	50 mm		50 mm	50 mm	20 mm	

注: “~”前数据为水分控制下限, “~”后数据为水分控制上限。θ_s 为根层(0~20 cm)土壤饱和含水率。

供试水稻品种为当地广泛种植的“绥粳 18”, 水稻插秧每穴定 3 株, 株行距为 10 cm×30 cm。供试氮肥为尿素(含 N 46%), 分基肥(45%)、蘖肥(20%)和穗肥(35%)施用; 磷肥为过磷酸钙(含 P₂O₅ 12%), P₂O₅ 施入量为 45 kg/hm², 全部作为基肥施入; 钾肥为硫酸钾(含 K₂O 60%), K₂O 施入量为 80 kg/hm², 按基肥(50%)和 8.5 叶龄(50%)分施。2020 年 5 月 19 日大田施基肥, 5 月 20 日水稻幼苗移栽大田, 6 月 11 日施蘖肥, 7 月 18 日施穗肥, 9 月 25 日收获。稻田田间管理如病虫害防治等与当地大田生产相同。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 气象数据测定

降水量和气温等气象数据由自动气象站(DZZ 2 型, 天津气象仪器厂)记录(图 1)。

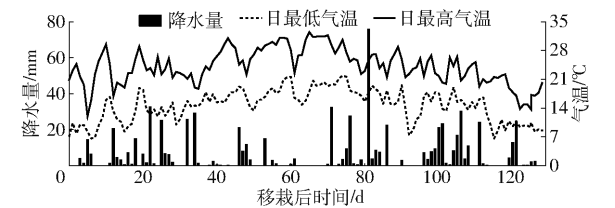


图 1 2020 年水稻生长期气温和降水量日变化

Fig.1 Daily variation of air temperature and precipitation during rice growing season in 2020

1.3.2 灌溉水量测定

水稻移栽大田后, 每日于固定时刻用毫米刻度

尺读取田面水层深度(当田面有水层时), 或用土壤水分检测仪测定大田土壤含水率(当田面无水层时), 当田面水层深度或土壤含水率达到各生育期水分管理下限时, 则灌水至水分管理上限, 记录灌溉日期, 并用小型水表计算各次灌溉水量。

1.3.3 干物质量与氮素含量测定

各小区分别于分蘖期、拔节孕穗期、抽穗开花期、乳熟期和成熟期随机选取水稻 5 穴, 将整株水稻挖起, 剪去根部后装入自封袋运回实验室清洗, 泥土清洗干净后, 将植株分为叶、茎鞘和穗(抽穗后)分别装入袋中, 置于干燥箱中 105℃ 杀青 0.5 h, 然后 80℃ 干燥至质量恒定, 冷却至室温用精度 0.01 g 电子天平测定各部分器官干物质量。称量后用粉碎机将植株各部分器官粉碎后过 80 目(0.18 mm)网筛, 经 H₂SO₄-H₂O₂ 法消煮后, 取待测液用连续流动分析仪(AutoAnalyzer-3 型, 德国 Bran + Luebbe 公司)测定氮素含量。

1.3.4 土壤无机氮含量测定

各小区分别于水稻施基肥前和收获后, 用土钻按照五点取样法取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 共 3 层土壤样品, 装入自封袋混合均匀后, -20℃ 保存, 各层土壤用 100 mL 环刀取土, 密封后立即带回实验室, 105℃ 干燥至质量恒定, 计算土壤容重和含水率。土壤样品解冻后, 称取 5 g 过 2 mm 筛孔新鲜土样于 250 mL 广口瓶中, 并加 1 mol/L KCl 100 mL

充分浸提后,经定性滤纸过滤,待测液用连续流动分析仪(AutoAnalyzer-3 型,德国 Bran + Luebbe 公司)测定铵态氮和硝态氮含量。

1.3.5 产量测定

水稻成熟期,各试验小区随机选取 1 m²水稻人工收割,用脱粒机脱粒,稻谷摊开晾晒至含水率约 14%时称量测产。

1.4 计算方法

采用 Logistic 生长方程进行水稻干物质、氮素累积量的非线性回归拟合^[15],其函数表达式为

$$y = a / (1 + b e^{-kt}) \tag{1}$$

式中 y ——水稻地上部干物质或氮素累积量, kg/hm²
 a ——干物质或氮素累积量的潜在最大值, kg/hm²
 b ——与干物质或氮素累积量有关的回归参数, $b > 0$
 k ——干物质或氮素累积量的增长率, $k < 0$
 t ——水稻移栽后时间, d

对 Logistic 函数分别求一阶、二阶导数,并求其特征值方程,可得 Logistic 曲线 3 个关键点,其横坐标分别对应始盛期(T_1 , d)、高峰期(T_2 , d)和盛末期(T_3 , d),以及最快增长速率($V_{\max}$, kg/(hm²·d)),利用始盛期和盛末期可将 Logistic 曲线拟合的生长过程分为渐增期(0 ~ T_1)、快增期(T_1 ~ T_3)和缓增期(T_3 ~ ∞)。特征值方程分别为

$$T_1 = (\ln b - 1.317) / k \tag{2}$$
$$T_2 = \ln b / k \tag{3}$$
$$T_3 = (\ln b + 1.317) / k \tag{4}$$
$$\Delta T = T_3 - T_1 \tag{5}$$
$$V_{\max} = ak / 4 \tag{6}$$

式中 ΔT ——快增期持续时间, d
作物耗水量(ET , mm)计算公式为

$$ET = P + I + G + \Delta W - R - D \tag{7}$$

式中 P ——降水量, mm
 I ——单位面积灌水量, mm
 G ——地下水补给量, mm, 由于试验区地下水埋深较大,故 G 取零
 ΔW ——水稻移栽和收获时 0 ~ 60 cm 土壤储水变化量, mm
 R ——水稻生育期内排水量, mm
 D ——深层渗漏量, mm

灌溉水分利用效率($IWUE$, kg/m³)计算公式为

$$IWUE = Y / I \tag{8}$$

式中 Y ——水稻产量, kg/hm²
水分生产效率(WUE , kg/m³)计算公式为

$$WUE = Y / ET \tag{9}$$

氮肥农学利用效率(A_{EN} , kg/kg)计算公式为

$$A_{EN} = (Y_a - Y_b) / N_a \tag{10}$$

式中 Y_a ——施氮处理水稻产量, kg/hm²
 Y_b ——不施氮处理水稻产量, kg/hm²
 N_a ——施氮量, kg/hm²

氮素籽粒生产效率(N_{GPE} , kg/kg)计算公式为

$$N_{GPE} = Y / T_n \tag{11}$$

式中 T_n ——水稻氮素总累积量, kg/hm²
氮肥偏生产力(PFP , kg/kg)计算公式为

$$PFP = Y_a / N_a \tag{12}$$

氮素收获指数(N_{HI} , %)计算公式为

$$N_{HI} = P_n / T_n \times 100\% \tag{13}$$

式中 P_n ——水稻穗部氮素累积量, kg/hm²
百千克籽粒吸氮量(N_{UG} , kg)计算公式为

$$N_{UG} = T_n / Y \times 100 \tag{14}$$

氮素吸收量(N_u , kg/hm²)计算公式为

$$N_u = ND_m \tag{15}$$

式中 N ——水稻植株氮素含量, %
 D_m ——水稻干物质质量, kg/hm²

氮素转运量(N_t , kg/hm²)计算公式为

$$N_t = N_h - N_m \tag{16}$$

式中 N_h ——抽穗期水稻茎鞘或叶氮素累积量, kg/hm²
 N_m ——成熟期水稻茎鞘或叶氮素滞留量, kg/hm²

氮素转运率(N_{te} , %)计算公式为

$$N_{te} = N_t / N_h \times 100\% \tag{17}$$

氮素转运贡献率(N_{tce} , %)计算公式为

$$N_{tce} = (N_{lt} + N_{sst}) / N_{pt} \times 100\% \tag{18}$$

式中 N_{lt} ——水稻叶氮素转运量, kg/hm²
 N_{sst} ——水稻茎鞘氮素转运量, kg/hm²
 N_{pt} ——抽穗期至成熟期水稻穗氮素增加量, kg/hm²

土壤氮素表观盈亏量(S_{apl} , kg/hm²)计算公式为

$$S_{apl} = N_a + N_{si} - T_n - N_{sr} \tag{19}$$

其中 $N_{si(sr)} = 0.1d\rho\omega(N)$ $\tag{20}$

式中 N_{si} ——土壤初始无机氮量, kg/hm²
 N_{sr} ——土壤残留无机氮量, kg/hm²
 d ——土层厚度, cm
 ρ ——土壤容重, g/cm³
 $\omega(N)$ ——土壤中无机氮质量比, mg/kg

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 和 Origin 2017 处理数据及作

图,利用 SPSS 22.0 进行方差分析,运用 Origin 2017 软件进行 Logistic 生长函数拟合,模型有效性通过效率系数(EF)、一致性指数(AI)^[16-17]和决定系数(R^2)评价。

2 结果与分析

2.1 水氮耦合对水稻收获后地上部干物质、氮素累积量的影响

不同水氮耦合处理下,水稻收获后地上部干物质、氮素累积量见图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)。试验结果表明,常规淹灌和浅湿灌溉模式下,水稻地上部各器官干物质累积量随施氮量增加而增大;控制灌溉模式下,地上部各器官干物质累积量随施氮量增加先增大后减小。除 CN0 处理茎鞘干物质累积量低于 WN0,CN0 处理穗干物质累积量低于 WN0 和 FN0 外,相同施氮量下,各处理不同器官干物质累积量,按灌溉模式由大到小依次为:控制灌溉、浅湿灌溉、常规淹灌。各处理穗干物质累积量均高于叶和茎鞘干物质累积量,叶、茎鞘和穗的干物质累积量分别占地上部干物质累积量的 8.72% ~ 11.24%、34.50% ~ 38.17%、50.59% ~ 56.15%,CN2 处理穗部干物质累积量最大,但与 CN3 处理不存在显著性差异($P > 0.05$)。3 种灌溉模式下,水稻地上部不同器官氮素累积量均随施氮量的增加而增大。相同施氮量下,常规淹灌和浅湿灌溉模式水稻地上部不同器官氮素累积量

均低于控制灌溉;相同灌溉模式下,除 FN0 和 FN1 茎鞘氮素累积量不存在显著性差异外($P > 0.05$),其余各施氮处理茎鞘和穗的氮素累积量显著高于不施氮处理($P < 0.05$)。从不同器官来看,叶、茎鞘和穗的干物质累积量分别占地上部氮素累积量的 7.24% ~ 9.26%、21.73% ~ 26.67%、65.99% ~ 70.55%,叶、茎鞘和穗的平均氮素累积量分别为 12.03、33.43、98.11 kg/hm²,分别占地上部平均氮素累积量的 8.38%、23.28%、68.34%,其中 CN3 处理叶、茎鞘和穗的氮素累积量最大,分别为 19.71、49.62、145.81 kg/hm²。控制灌溉处理相同施氮量下的叶、茎鞘和穗的氮素累积量较常规淹灌提高了 27.80% ~ 43.42%、18.32% ~ 24.97%、13.85% ~ 24.25%,较浅湿灌溉提高了 0.96% ~ 13.18%、10.73% ~ 12.86%、10.53% ~ 12.61%。

2.2 水氮耦合对水稻地上部干物质、氮素累积速率的影响

不同水氮耦合处理下,水稻地上部干物质、氮素累积量的 Logistic 生长方程拟合及模型有效性评估如表 2 所示。不同处理水稻地上部干物质、氮素累积量 Logistic 生长模型一致性指数分别为 0.998 4 ~ 0.999 8、0.996 1 ~ 0.999 2,效率系数分别为 0.955 0 ~ 0.995 3、0.890 1 ~ 0.977 9,决定系数 R^2 均不低于 0.975 6,模型有效性评估表明,利用 Logistic 生长方程拟合干物质、氮素累积过程效果较好,模型的预测值与实测值吻合度较高。拟合结果显示,不同水氮耦合条件下各处理水稻地上部干物质、氮素累积的理论最大值分别为 11 073.51 ~ 17 738.81 kg/hm²、73.49 ~ 213.89 kg/hm²,其中 CN2 处理干物质累积理论最大值较其他处理高 0.05% ~ 63.87%,CN3 处理氮素累积理论最大值较其他处理高 10.15% ~ 191.04%。

对 Logistic 生长方程求一阶导数,得到水稻地上部干物质、氮素累积速率随移栽后时间的变化曲线(图 3)。水稻地上部干物质、氮素累积速率的变化曲线为单峰曲线,随移栽后时间的推进呈现先增加后减小的趋势,不同水氮耦合方式下,氮素累积速率达到峰值时间早于干物质累积速率达到峰值的时间。相同灌溉模式下,水稻地上部干物质、氮素累积速率随施氮量的增加而增大,但当施氮量为 135 kg/hm²时,干物质、氮素累积速率明显减缓。相同施氮量下,3 种灌溉模式干物质、氮素累积速率由大到小依次为控制灌溉、浅湿灌溉、常规淹灌。

对 Logistic 生长方程求二阶导数,得到水稻地上部干物质、氮素累积过程主要特征参数(表 3)。不同水氮耦合处理地上部干物质、氮素累积速率平均

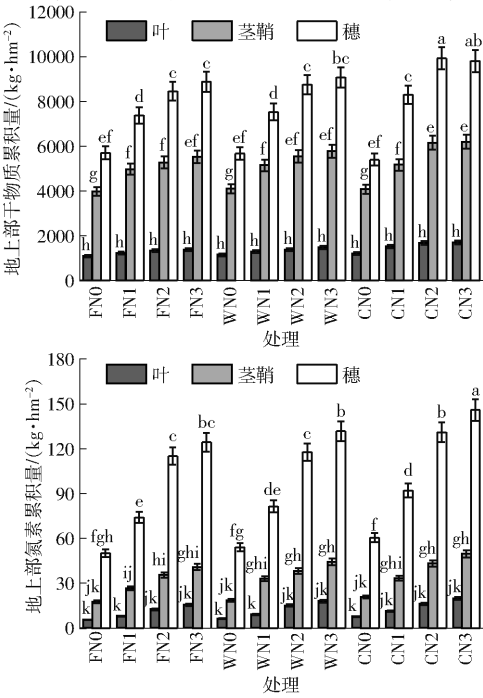


图 2 水稻收获后地上部干物质、氮素累积量
Fig. 2 Dry matter and nitrogen accumulation in shoots
of rice after harvest

表 2 水稻地上部干物质、氮素累积量的 Logistic 生长方程拟合及模型有效性

处理	干物质累积量 Logistic 方程	干物质累积量模型有效性			氮素累积量 Logistics 方程	氮素累积量模型有效性		
		AI	EF	R ²		AI	EF	R ²
FN0	$y = 11\,073.51 / (1 + 257.70e^{-0.075t})$	0.999 5	0.985 0	0.996 8	$y = 73.49 / (1 + 158.79e^{-0.082t})$	0.999 2	0.977 9	0.995 3
FN1	$y = 13\,857.25 / (1 + 181.86e^{-0.070t})$	0.999 6	0.989 6	0.997 8	$y = 111.81 / (1 + 117.41e^{-0.079t})$	0.998 5	0.957 0	0.990 8
FN2	$y = 15\,209.22 / (1 + 231.86e^{-0.076t})$	0.999 7	0.991 7	0.998 2	$y = 164.65 / (1 + 105.94e^{-0.076t})$	0.998 3	0.951 9	0.989 7
FN3	$y = 15\,913.06 / (1 + 210.03e^{-0.077t})$	0.999 5	0.984 8	0.996 7	$y = 183.91 / (1 + 77.02e^{-0.075t})$	0.996 1	0.890 5	0.976 5
WN0	$y = 11\,170.52 / (1 + 356.00e^{-0.081t})$	0.999 6	0.987 4	0.997 3	$y = 80.38 / (1 + 286.95e^{-0.088t})$	0.997 6	0.933 3	0.985 7
WN1	$y = 14\,129.54 / (1 + 264.33e^{-0.078t})$	0.999 8	0.995 3	0.999 0	$y = 125.68 / (1 + 167.09e^{-0.084t})$	0.998 1	0.947 5	0.988 2
WN2	$y = 15\,444.46 / (1 + 215.35e^{-0.077t})$	0.998 4	0.955 0	0.990 4	$y = 165.60 / (1 + 192.98e^{-0.091t})$	0.996 2	0.890 1	0.975 6
WN3	$y = 16\,188.94 / (1 + 194.52e^{-0.076t})$	0.999 0	0.971 0	0.993 8	$y = 194.19 / (1 + 108.14e^{-0.082t})$	0.997 1	0.917 5	0.982 3
CN0	$y = 10\,825.16 / (1 + 391.30e^{-0.085t})$	0.999 7	0.991 8	0.998 2	$y = 91.33 / (1 + 417.95e^{-0.097t})$	0.998 1	0.945 3	0.988 3
CN1	$y = 15\,047.25 / (1 + 212.81e^{-0.074t})$	0.999 1	0.975 1	0.994 7	$y = 136.82 / (1 + 306.10e^{-0.095t})$	0.998 9	0.968 7	0.993 3
CN2	$y = 17\,738.81 / (1 + 220.06e^{-0.075t})$	0.998 8	0.966 2	0.992 8	$y = 189.62 / (1 + 257.72e^{-0.093t})$	0.998 4	0.955 5	0.990 5
CN3	$y = 17\,729.94 / (1 + 227.98e^{-0.077t})$	0.999 4	0.982 5	0.996 2	$y = 213.89 / (1 + 241.37e^{-0.093t})$	0.997 5	0.929 4	0.984 9

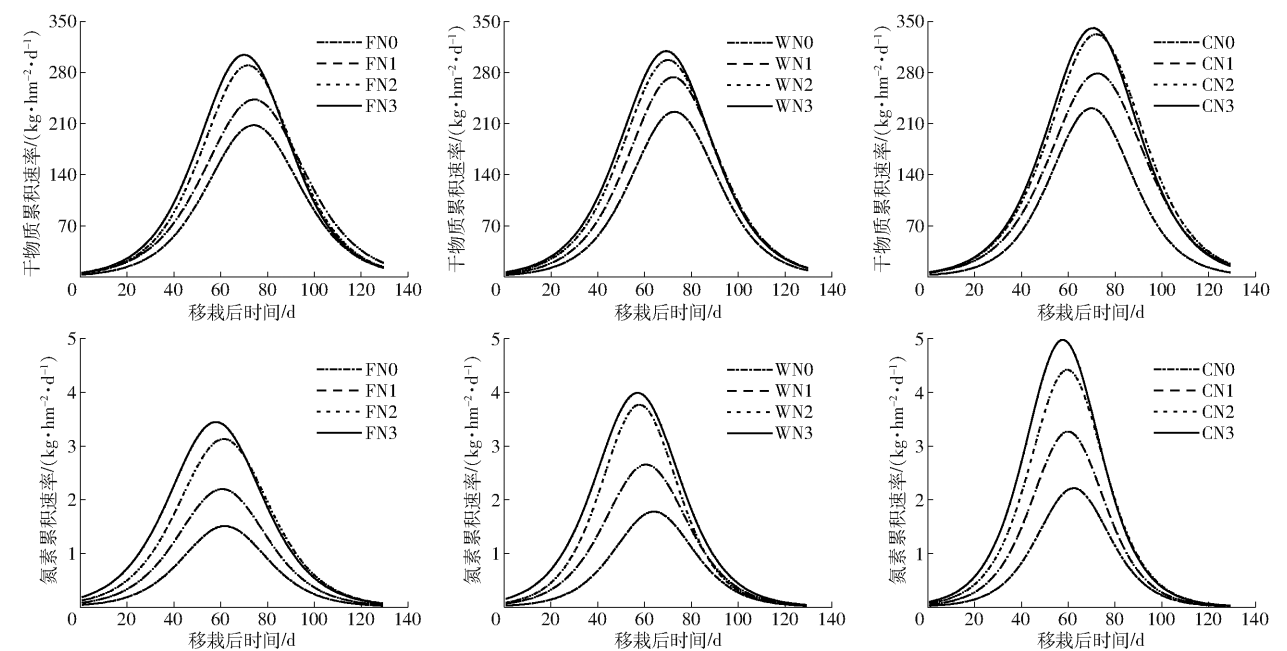


图 3 水稻地上部干物质、氮素累积速率随移栽后时间的变化曲线

Tab.3 Main characteristic values of dry matter and nitrogen accumulation process in shoots of rice										
处理	干物质累积主要特征值					氮素累积主要特征值				
	T ₁ /d	T ₂ /d	T ₃ /d	ΔT/d	V _{max} /(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)	T ₁ /d	T ₂ /d	T ₃ /d	ΔT/d	V _{max} /(kg·hm ⁻² ·d ⁻¹)
FN0	56.34	73.86	91.38	35.04	208.10	45.69	61.74	77.78	32.09	1.51
FN1	55.36	74.12	92.88	37.52	243.19	43.88	60.63	77.39	33.51	2.20
FN2	54.14	71.41	88.67	34.54	290.00	43.99	61.31	78.62	34.63	3.13
FN3	52.66	69.86	87.07	34.41	304.50	40.38	57.95	75.52	35.14	3.45
WN0	56.22	72.46	88.70	32.49	226.43	49.10	63.99	78.88	29.78	1.78
WN1	54.96	71.95	88.93	33.98	273.83	45.02	60.61	76.21	31.19	2.65
WN2	52.67	69.77	86.87	34.21	297.31	43.33	57.80	72.26	28.93	3.77
WN3	51.72	68.95	86.18	34.46	309.37	40.96	56.99	73.02	32.05	3.99
CN0	54.53	69.97	85.40	30.87	230.90	48.69	62.28	75.88	27.18	2.21
CN1	54.60	72.38	90.16	35.57	278.60	46.16	59.95	73.74	27.59	3.27
CN2	54.38	71.95	89.51	35.13	332.47	45.47	59.61	73.75	28.28	4.42
CN3	53.46	70.58	87.70	34.24	340.95	43.55	57.70	71.86	28.32	4.97

快增期分别为 34.37 d 和 30.72 d,地上部干物质、氮素累积达到最大增长速率分别为第 71.44 天和第 60.05 天,平均氮素累积速率达到峰值时间比平均干物质累积速率达到峰值时间提前 11.39 d。3 种灌溉模式下,干物质、氮素累积始盛期随施氮量提升而提前,施氮处理平均干物质、氮素累积速率始盛期比不施氮处理提前 3.08、6.20 d。在快增期内,施氮量为 135 kg/hm²时,各灌水模式下的地上部干物质、氮素最大增长速率达到最大值,其中 CN3 处理地上部干物质、氮素最大增长速率为 340.95、4.97 kg/(hm²·d),与其他处理相比分别提升了 2.55%~63.84%、12.56%~229.56%。

2.3 水氮耦合对水稻抽穗后氮素转运的影响

不同水氮耦合处理下,水稻抽穗期至成熟期的氮素转运见表 4。试验结果表明,灌溉模式和施氮量对叶片和茎鞘的氮素转运量、氮素转运率,穗部氮素增加量和氮素转运贡献率均有极显著影响

($P<0.01$),灌溉模式和施氮量的交互效应对叶片和茎鞘的氮素转运量、氮素转运率有显著影响($P<0.05$),对穗部氮素增加量和氮素转运贡献率有极显著影响($P<0.01$)。水稻抽穗期至成熟期叶片和茎鞘氮素转运量变化趋势一致,在 0~110 kg/hm²施氮量范围内,相同灌溉模式下,氮素转运量随施氮量的增加而增大,施氮量为 135 kg/hm²时,氮素转运量略有降低,但与施氮量为 110 kg/hm²时的氮素转运量差异不显著($P>0.05$)。水稻抽穗期至成熟期叶片氮素转运率高于茎鞘氮素转运率,相同灌溉模式下,叶片和茎鞘氮素转运率以及氮素转运贡献率随施氮量的增加而减小,穗部氮素增加量随施氮量增加而增大。相同施氮量,3 种灌溉模式对叶片和茎鞘氮素转运量以及穗部氮素增加量的影响,均以控制灌溉处理最高,表明适宜水分胁迫可促进叶片和茎鞘氮素转运以及籽粒氮素累积。

表 4 不同水氮处理水稻抽穗期至成熟期的氮素转运

Tab.4 Nitrogen transfer from heading stage to maturity stage of rice treated with different water and nitrogen treatments

处理		叶片		茎鞘		穗部氮素增加量/(kg·hm ⁻²)	氮素转运贡献率/%
灌溉模式	施氮量	氮素转运量/(kg·hm ⁻²)	氮素转运率/%	氮素转运量/(kg·hm ⁻²)	氮素转运率/%		
F	N0	13.45 ^a	70.76 ^b	10.45 ^a	37.34 ^{bc}	34.03 ^f	70.22 ^c
	N1	17.93 ^c	69.55 ^c	16.21 ^c	37.86 ^{ab}	50.96 ^e	66.99 ^{cd}
	N2	25.07 ^c	66.60 ^c	20.59 ^{bc}	36.76 ^{cd}	74.18 ^c	61.57 ^{de}
	N3	24.67 ^c	61.53 ^a	20.18 ^{bcd}	33.02 ^f	74.74 ^c	60.00 ^e
W	N0	15.40 ^f	70.96 ^b	11.16 ^a	37.59 ^{abc}	34.34 ^f	77.36 ^b
	N1	20.84 ^d	69.72 ^c	18.96 ^d	36.54 ^{cd}	51.52 ^e	77.27 ^b
	N2	30.12 ^b	66.64 ^c	20.89 ^b	35.37 ^c	74.23 ^c	68.72 ^c
	N3	30.05 ^b	62.60 ^f	20.09 ^{bcd}	31.23 ^a	80.87 ^b	62.00 ^{de}
C	N0	19.72 ^d	72.21 ^a	12.98 ^f	38.50 ^a	39.04 ^f	83.75 ^a
	N1	25.56 ^c	69.42 ^c	19.21 ^{cd}	36.62 ^{cd}	58.75 ^d	76.20 ^b
	N2	34.66 ^a	68.32 ^d	24.52 ^a	36.21 ^{de}	84.01 ^b	70.44 ^c
	N3	33.10 ^a	62.68 ^f	23.24 ^a	31.90 ^a	88.90 ^a	63.38 ^{de}
F	灌溉模式	191.15 ^{**}	13.55 ^{**}	48.54 ^{**}	10.27 ^{**}	55.86 ^{**}	33.82 ^{**}
	施氮量	391.68 ^{**}	554.37 ^{**}	317.6 ^{**}	176.8 ^{**}	1084.29 ^{**}	54.39 ^{**}
	灌溉模式×施氮量	2.64 [*]	3.55 [*]	3.31 [*]	3.26 [*]	6.79 ^{**}	4.24 ^{**}

注:同列数字后不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$),*表示达到显著水平($P<0.05$),**表示达到极显著水平($P<0.01$),下同。

2.4 水氮耦合对水稻产量和水氮利用效率的影响

不同水氮耦合处理下,水稻产量和水分利用效率如图 4 所示。试验结果表明,相同灌溉模式,不施氮处理水稻产量显著低于施氮处理($P<0.05$),常规淹灌、浅湿灌溉和控制灌溉增产幅度分别为 24.45%~76.31%、31.03%~62.37%和 66.30%~99.78%。常规淹灌和浅湿灌溉处理水稻产量随施氮量的增加而提升,施氮量超过 110 kg/hm²时,水稻增产幅度相对较小;控制灌溉处理水稻产量随施氮

量的增加先增加后小幅度下降,CN2 处理水稻产量最高,为 10 272.57 kg/hm²,但 CN2 和 CN3 处理水稻产量差异不显著($P>0.05$)。相同施氮量,除 CN0 外,控制灌溉模式各处理水稻产量均高于常规淹灌和浅湿灌溉模式水稻产量。施氮量为 110、135 kg/hm²时,3 种灌溉模式的 IWUE 和 WUE 差异不显著($P>0.05$),常规淹灌和浅湿灌溉处理 IWUE 和 WUE 随施氮量增加而增大,控制灌溉处理 IWUE 和 WUE 随施氮量增加先增后降,CN2 处理 IWUE 和 WUE 均最高,分

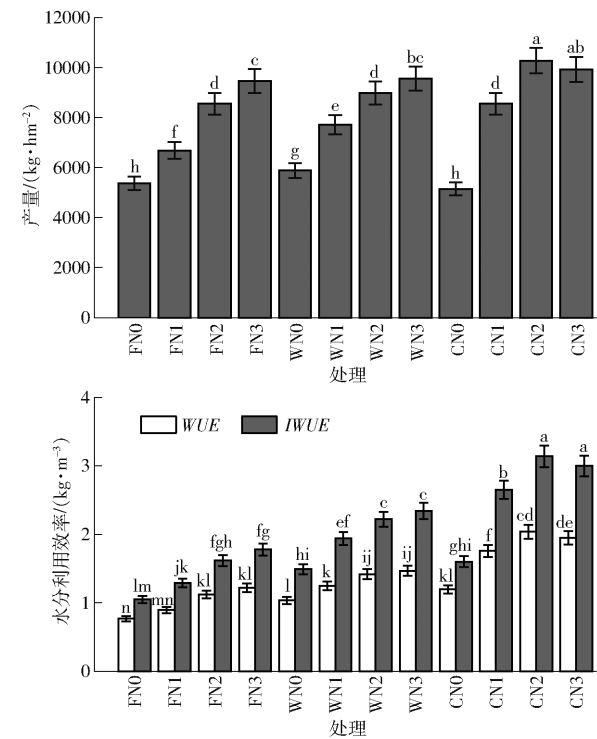


图 4 不同水氮处理下水稻产量和水分利用效率

Fig. 4 Rice yield and water use efficiency under different water and nitrogen treatments

别为 3.14、2.04 kg/m³, 与 CNO 相比提高了 96.25% 和 70.57%。

不同水氮耦合处理对水稻氮素利用的影响如表 5 所示。试验结果表明,灌溉模式、施氮量以及灌溉模式和施氮量的交互效应对氮肥农学利用率、氮肥偏生产力、百千克籽粒吸氮量、氮素籽粒生产效率和氮素收获指数均有极显著影响($P < 0.01$)。CN2 处理氮肥农学利用率显著高于其他处理($P < 0.05$),当施氮量相同时,常规淹灌和浅湿灌溉模式各处理氮肥农学利用率均小于控制灌溉模式。相同灌溉模式下,氮肥偏生产力随施氮量的增加而降低,施氮量相同时,3 种灌溉模式的氮肥偏生产力由大到小依次为控制灌溉、浅湿灌溉、常规淹灌,控制灌溉下氮肥偏生产力比常规淹灌和浅湿灌溉分别提升了 4.77% ~ 28.03% 和 3.79% ~ 14.41%。控制灌溉模式下水稻平均百千克籽粒吸氮量为 1.84 kg,较浅湿灌溉和常规淹灌分别提高了 6.84% 和 7.97%。施氮量为 110、135 kg/hm²时,常规淹灌和浅湿灌溉模式下氮素籽粒生产效率无显著差异($P > 0.05$),控制灌溉模式下氮素籽粒生产效率差异显著($P < 0.05$)。不同处理间氮素收获指数介于 65.99% ~

表 5 水氮耦合对水稻氮素利用的影响

Tab. 5 Effect of water and nitrogen interaction on rice nitrogen utilization

处理		氮肥农学利用率/	氮肥偏生产力/	百千克籽粒吸	氮素籽粒生产	氮素收获指数/
灌溉模式	施氮量	(kg·kg ⁻¹)	(kg·kg ⁻¹)	氮量/kg	效率/(kg·kg ⁻¹)	%
F	N0			1.36 ^e	73.38 ^a	68.44 ^{bc}
	N1	15.44 ^f	78.58 ^{cd}	1.62 ^d	61.59 ^b	68.24 ^{bcd}
	N2	28.95 ^d	77.74 ^d	1.91 ^{bc}	52.46 ^{de}	70.55 ^a
	N3	30.34 ^d	70.10 ^e	1.91 ^{bc}	52.38 ^{de}	68.81 ^b
W	N0			1.34 ^e	74.61 ^a	68.50 ^{bc}
	N1	21.48 ^e	90.69 ^b	1.60 ^d	62.44 ^b	65.99 ^e
	N2	28.14 ^d	81.63 ^{cd}	1.90 ^{bc}	52.55 ^{de}	68.84 ^b
	N3	27.18 ^d	70.76 ^e	2.03 ^{ab}	49.27 ^{ef}	67.92 ^{bcd}
C	N0			1.73 ^{cd}	57.91 ^c	68.09 ^{bcd}
	N1	40.11 ^b	100.61 ^a	1.60 ^d	62.67 ^b	67.39 ^d
	N2	46.64 ^a	93.39 ^b	1.85 ^{bc}	54.01 ^d	68.84 ^b
	N3	35.35 ^c	73.44 ^c	2.17 ^a	46.08 ^f	67.77 ^{cd}
F	灌溉模式	45.08 ^{**}	202.58 ^{**}	6.50 ^{**}	21.83 ^{**}	19.50 ^{**}
	施氮量	179.26 ^{**}	106.36 ^{**}	58.74 ^{**}	174.22 ^{**}	29.42 ^{**}
	灌溉模式 × 施氮量	19.78 ^{**}	18.50 ^{**}	4.36 ^{**}	17.13 ^{**}	3.98 ^{**}

70.55% 之间,表明水稻吸收的氮素大部分用于形成籽粒。

2.5 水稻产量相关性分析

水稻产量与植株成熟期地上部干物质、氮素累积量关系如图 5 所示。不同灌溉模式下,水稻产量和成熟期地上部干物质、氮素累积量之间存在显著或极显著的正相关(R^2 为 0.937 1 ~ 0.998 4),水稻

成熟期干物质、氮素累积量均可作为衡量产量的评价依据或指标,稻作控制灌溉模式下,水稻产量随地上部氮素累积量的增加先增大后减小,表明水稻植株对氮素吸收存在阈值,过多氮素累积不利于产量形成。水稻产量和水氮利用效率间相关分析见表 6。水稻产量与 $IWUE$ 、 WUE 、 A_{EN} 、 N_{UG} 之间呈极显著正相关($P < 0.01$),与 N_{GPE} 之间呈极显著负相关

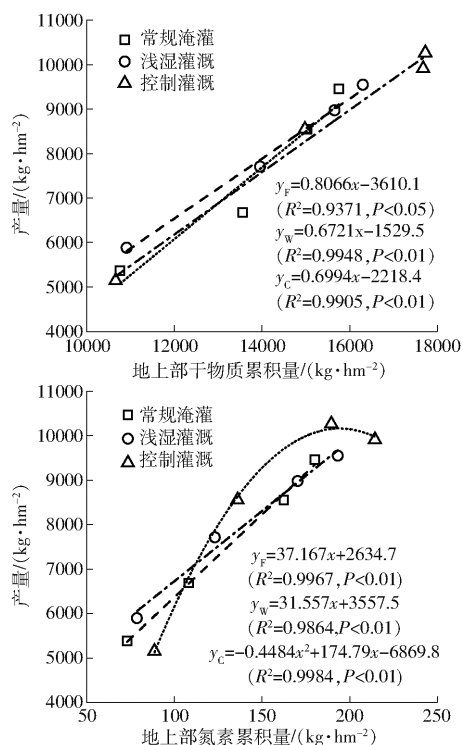


图5 水稻产量和地上部干物质、氮素积累量的关系
Fig.5 Relationships between rice yield, dry matter and nitrogen accumulation in shoot

($P<0.01$),与其他指标之间相关性不显著($P>0.05$); $IWUE$ 与 WUE 、 A_{EN} 之间呈极显著正相关($P<0.01$),与 N_{UG} 之间呈显著正相关($P<0.05$); WUE 与 A_{EN} 之间呈极显著正相关($P<0.01$),与 PFP 之间呈显著正相关($P<0.05$); A_{EN} 与 PFP 之间呈显著正相关($P<0.05$); PFP 与 N_{UG} 之间呈极显著负相关($P<0.01$),与 N_{GPE} 之间呈极显著正相关($P<0.01$); N_{UG} 与 N_{GPE} 之间呈极显著负相关($P<0.01$),与 N_{HI} 之间呈显著正相关($P<0.05$)。

3 讨论

水稻地上部干物质、氮素积累量能反映作物的生产能力^[18],是影响水稻产量的重要指标,水氮条件作为水稻生长发育的主要限制因子,适宜的水氮耦合模式不仅可以提高水稻产量和水氮利用效率,而且能够影响水稻不同器官中干物质、氮素累积和分配,对提高水稻干物质、氮素积累量产生正效应^[19],但过量的水氮供应也会使作物“徒长”,不利于产量形成^[20]。本研究表明,稻作控制灌溉模式下,施氮处理地上部不同器官干物质积累量高于常规淹灌和浅湿灌溉,控制灌溉地上部各器官干物质

表6 水稻产量和水氮利用效率的相关系数

Tab.6 Correlation coefficients between rice yield and water and nitrogen use efficiency								
	Y	$IWUE$	WUE	A_{EN}	PFP	N_{UG}	N_{GPE}	N_{HI}
Y	1							
$IWUE$	0.766**	1						
WUE	0.733**	0.991**	1					
A_{EN}	0.760**	0.848**	0.891**	1				
PFP	-0.148	0.355	0.382*	0.424*	1			
N_{UG}	0.745**	0.386*	0.359	0.267	-0.663**	1		
N_{GPE}	-0.727**	-0.342	-0.332	-0.262	0.688**	-0.933**	1	
N_{HI}	0.261	-0.161	0.114	0.172	-0.318	0.422*	-0.368	1

积累量随施氮量增加先增大后减小,这是因为控制灌溉模式下叶片光合能力提升,有利于有机质累积,同时控制灌溉可以改变土壤水分状况,改善根区通气条件,为水稻根系生长提供适宜环境,不仅能够促进根系发育,还能延缓后期根系衰老和退化,使得水稻在生长中后期能吸收更多养分^[21],这与孟翔燕等^[22]的研究结果一致,但当施氮量为135 kg/hm²,控制灌溉模式下水稻出现“贪青”现象,过量氮肥施用使得水稻晚熟,生育期推迟,地上部各器官干物质积累量小幅度下降,影响水稻产量。控制灌溉和浅湿灌溉模式下水稻地上部氮素积累量高于常规淹灌,水稻不同器官氮素积累量与施氮量呈正相关,控制灌溉和浅湿灌溉处理相同施氮量下的穗氮素积累量较常规淹灌提高了13.85%~24.25%、2.27%~10.09%,说明节水灌溉模式有利于氮素吸收转化并

促进植株氮素向籽粒转运,这与崔远来等^[23]的研究结果相似。

前人研究表明,水稻基因型、水分状况、施肥水平和气象因素等均会影响植株干物质和氮素累积过程,体现在Logistic模型上就是拟合参数的变化^[24]。本研究结果表明,从水稻干物质、氮素累积速率的变化过程看,不同水氮耦合模式基本不影响水稻干物质、氮素累积速率的变化趋势,各处理水稻干物质、氮素累积速率随移栽后时间的变化仍为单峰曲线,且随移栽后时间的推进先增后减,利用Logistic生长模型拟合效果较好,但不同水氮耦合模式下,水稻干物质和氮素累积对应的渐增期、快增期、缓增期、累积量和累积速率均有差异。叶廷红等^[25]研究表明,水稻氮素累积快增期明显早于干物质累积快增期,干物质累积最大速率出现在拔节孕穗期,这与本文

研究结果相似,这是由于水稻植株在分蘖期以生根、生叶和分蘖为主,需要大量的氮素来形成氮化物,当养分累积足够多时进行大量物质生产,因此,水稻氮素累积速率到达高峰期后,干物质累积速率逐渐进入始盛期。有关研究认为,植株干物质和氮素累积速率高峰期和最大增长速率出现时间越早,快增期持续时间越短,越有利于干物质和氮素累积以及优质群体结构的形成^[26],这与本文结论相似又有所不同,本研究表明,3 种灌溉模式下,干物质和氮素累积速率始盛期、高峰期和盛末期随施氮量的增加而提前,但快增期持续时间并没有随施氮量的增加明显缩短,甚至增加,相比于常规淹灌模式,浅湿灌溉和控制灌溉模式下水稻平均干物质累积速率快增期缩短 1.59 d 和 1.42 d,平均氮素累积速率快增期缩短 3.35 d 和 6.00 d,从干物质和氮素累积特征值看,节水灌溉处理具有快增期持续时间短和增长速率大的特征,更有利于水稻植株生长中期干物质和氮素累积。稻作控制灌溉模式,从抽穗开花期开始 N3 水平下植株干物质和氮素累积速率逐渐开始低于 N2 或 N1 水平,而成熟期水稻干物质累积量随施氮量的增加先增大后减小,氮素累积量随施氮量的增大而增大,说明水稻植株对氮素养分的空间竞争使其对氮素吸收存在阈值,植株氮素吸收过多并不会使水稻干物质持续增加,反而会导致水稻减产和品质下降^[27]。相同灌溉模式下,当施氮量为 135 kg/hm²时,干物质和氮素累积速率明显减缓,高氮条件下,水稻对氮素的需求与氮肥养分释放速率不匹配,氮肥的高投入并没有带来高回报。此外,本文 Logistic 模型是以移栽后时间为自变量对水稻生长过程进行模拟分析,而年际间气候状况有所差异,单纯通过移栽后时间表示植株不同生长过程可能会产生偏差,由于水稻生育期内不同阶段植株干物质和氮素累积所需热量固定,一些专家学者用有效积温作为自变量对不同植株生长过程进行 Logistic 模拟^[28],并取得良好效果,但目前尚无统一方法进行植株 Logistic 生长过程模拟分析,这将是今后进一步的研究重点。

水稻产量是植株干物质积累、分配、运输和转化的结果,水氮利用效率则可以反映作物生产过程中的能量转化效率,也能衡量作物水氮限制条件下的生长适宜程度^[29]。已有研究表明,一般情况下随着施氮量的增加,水稻产量、水分利用效率增加,而氮肥利用率降低^[30]。本研究表明,施氮量在 0~135 kg/hm²范围内,常规淹灌和浅湿灌溉模式下水稻产量和水分利用效率随着施氮量的增加而提升,控制灌溉模式下,当施氮量为 135 kg/hm²时,水稻产

量和水分利用效率呈下降趋势,同时,控制灌溉模式下施氮处理水稻产量和水分利用效率显著高于常规淹灌和浅湿灌溉模式,其原因在于控制灌溉模式可增强水稻根区通气性,改善稻田土壤条件,加速土壤有机质矿化,促使水稻产量提高,同时,控制灌溉模式降低了灌水频次和灌水量,田面不再长期建立水层,使得稻田渗漏量、蒸发量降低,田间蓄雨能力较常规淹灌和浅湿灌溉更高,径流量减小,雨水利用率提升,进而提升水分利用效率^[31]。相同灌溉模式下,不施氮或低氮处理的氮肥偏生产力 and 氮素籽粒生产效率较高,但水稻产量和水分利用效率却显著低于适当的高施肥处理。因此,协调水稻产量和水氮利用效率之间的矛盾,应在维持较高产量的基础上,提升水氮利用效率,同时降低水稻营养体对氮素的过多吸收。

水稻植株中来自土壤的氮素与土壤肥力关系密切,衡量最佳水氮耦合处理,不仅要考虑水稻产量、氮素吸收和水氮利用效率,还需考虑土壤氮素盈亏状况。研究区黑土层厚度一般在 53~58 cm 之间,黑土区水稻吸收肥料氮素的比例远低于土壤氮素,本文将 0~60 cm 土体无机氮作为整体,研究土壤氮素表观平衡,不同水氮处理下土壤氮素盈亏量见图 6。研究结果表明,相同施氮量下,不同灌溉模式对土壤氮素盈亏量的影响不显著($P>0.05$),在施氮量 0、85 kg/hm²条件下,土壤氮素亏损,在施氮量 110、135 kg/hm²条件下,土壤氮素盈余,施氮量为 85~110 kg/hm²时土壤氮素盈亏出现临界点。在水稻生产中,土壤氮素高盈余意味着高的土壤氮素损失风险,这些氮素一部分残留在土壤中供后季作物吸收利用,另一部分则通过淋溶、氨挥发和反硝化等途径损失,增加了环境污染风险;土壤氮素长期亏损则会造成土壤退化,土壤氮素耗竭阻碍稻田系统可持续发展,因此,根据黑土区环境特征选择适宜水氮耦合模式,将土壤氮素盈亏控制在合理范围内极其重要。

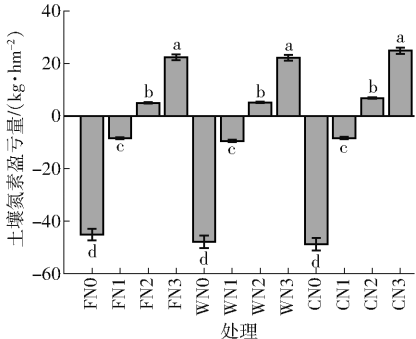


图 6 不同水氮处理下土壤氮素盈亏量
Fig. 6 Soil nitrogen surplus and deficiency under different water and nitrogen treatments

4 结论

(1) 水稻控制灌溉模式下, 施氮处理地上部不同器官干物质累积量高于常规淹灌和浅湿灌溉, 控制灌溉地上部各器官干物质累积量随施氮量的增加先增大后减小, 施氮量为 135 kg/hm^2 时抑制水稻干物质累积。相同灌溉模式下, 水稻地上部不同器官氮素累积量随施氮量的增加而增大, 相同施氮量, 控制灌溉模式下叶、茎鞘和穗的氮素累积量较常规淹灌提高了 $27.80\% \sim 43.42\%$ 、 $18.32\% \sim 24.97\%$ 、 $13.85\% \sim 24.25\%$, 较浅湿灌溉提高了 $0.96\% \sim 13.18\%$ 、 $10.73\% \sim 12.86\%$ 、 $10.53\% \sim 12.61\%$ 。

(2) 水稻地上部干物质、氮素累积速率随移栽后时间的推进先增加后减小, 平均氮素累积速率达到峰值时间比平均干物质累积速率达到峰值时间提前 11.39 d 。相同灌溉模式下, 干物质、氮素累积始盛期随施氮量增加而提前, 干物质、氮素累积速率随施氮量的增加而增大, 施氮量为 135 kg/hm^2 时, 干物质、氮素累积速率明显减缓。相同施氮量下, 控制灌溉模式干物质、氮素累积速率高于浅湿灌溉和常规淹灌。

(3) 常规淹灌和浅湿灌溉模式水稻产量和水分

利用效率随施氮量的增加而增大, 控制灌溉模式水稻产量和水分利用效率随施氮量的增加先增大后减小, 相同施氮量, 控制灌溉模式水稻产量 (CN0 处理除外) 和水分利用效率高于常规淹灌和浅湿灌溉模式, 其中 CN2 处理水稻产量、 WUE 和 WUE 均最大, 分别为 $10\,272.57 \text{ kg/hm}^2$ 、 3.14 kg/m^3 和 2.04 kg/m^3 。控制灌溉模式可显著提升水稻氮肥农学利用效率和氮肥偏生产力。

(4) 相同灌溉模式下, 水稻抽穗期至成熟期叶片和茎鞘氮素转运量随施氮量的增加先增大后减小, 叶片氮素转运率高于茎鞘氮素转运率, 叶片和茎鞘氮素转运率以及氮素转运贡献率随施氮量的增加而减小。相同施氮量, 控制灌溉模式叶片和茎鞘氮素转运量以及穗部氮素增加量高于常规淹灌和控制灌溉。

(5) 植株干物质、氮素累积量能够作为不同灌溉模式下衡量水稻产量的指示指标。水稻产量与灌溉水分利用效率、水分生产效率、氮肥农学利用效率、百千克籽粒吸氮量之间呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 与氮素籽粒生产效率之间呈极显著负相关 ($P < 0.01$)。综合考虑水稻产量、氮素吸收、水氮利用效率和土壤氮素盈亏等方面, CN2 处理为最佳水氮耦合模式。

参 考 文 献

- [1] 刘慧, 魏永霞, 汝晨. 寒地黑土区水稻植株干物质积累对耗水过程的响应[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(7): 195–204. LIU Hui, WEI Yongxia, RU Chen. Response of rice dry matter accumulation to water consumption process in cold black soil region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(7): 195–204. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180724&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.024. (in Chinese)
- [2] 张作合, 张忠学, 郑衍波, 等. 水炭运筹下稻田土壤氮素分布与盈亏 ^{15}N 示踪分析[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(6): 309–317. ZHANG Zuohe, ZHANG Zhongxue, ZHENG Yanbo, et al. ^{15}N tracer analysis of nitrogen distribution and break-even in paddy soil under water and biochar management[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 309–317. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200633&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.033. (in Chinese)
- [3] DONG Y J, YUAN J, ZHANG G B, et al. Optimization of nitrogen fertilizer rate under integrated rice management in a hilly area of Southwest China[J]. Pedosphere, 2020, 30(6): 759–768.
- [4] PENG S Z, YANG S H, XU J Z, et al. Nitrogen and phosphorus leaching losses from paddy fields with different water and nitrogen managements[J]. Paddy & Water Environment, 2011, 9(3): 333–342.
- [5] SHRESTHA R K, LADHA J K. Nitrate in groundwater and integration of nitrogen-catch crop in rice-sweet pepper cropping system[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1610–1619.
- [6] 朱相成, 张振平, 张俊, 等. 增密减氮对东北水稻产量、氮肥利用效率及温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(2): 453–461. ZHU Xiangcheng, ZHANG Zhenping, ZHANG Jun, et al. Effects of increased planting density with reduced nitrogen fertilizer application on rice yield, N use efficiency and greenhouse gas emission in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(2): 453–461. (in Chinese)
- [7] 喻朝庆. 水-氮耦合机制下的中国粮食与环境安全[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(12): 2018–2036. YU Chaoqing. The coupled effects of water and nitrogen on China's food and environmental securities[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2019, 49(12): 2018–2036. (in Chinese)
- [8] 晏军, 吴启侠, 朱建强, 等. 适雨灌溉下氮肥运筹对水稻光合特性、氮素吸收及产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2019, 33(4): 347–356. YAN Jun, WU Qixia, ZHU Jianqiang, et al. Effects of nitrogen application on rice photosynthetic characteristics, nitrogen uptake and grain yield formation under rainfall-adapted water management[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(4): 347–356. (in Chinese)

- [9] 王绍华,曹卫星,丁艳锋,等. 水氮互作对水稻氮吸收与利用的影响[J]. 中国农业科学,2004,37(4):497–501.
WANG Shaohua, CAO Weixing, DING Yanfeng, et al. Interactions of water management and nitrogen fertilizer on nitrogen absorption and utilization in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4):497–501. (in Chinese)
- [10] SUN Y J, MA J, SUN Y Y, et al. The effects of different water and nitrogen managements on yield and nitrogen use efficiency in hybrid rice of China[J]. Field Crops Research, 2012, 127:85–98.
- [11] CABANGON R J, CASTILLO E G, TUONG T P. Chlorophyll meter-based nitrogen management of rice grown under alternate wetting and drying irrigation[J]. Field Crops Research, 2011, 121(1):136–146.
- [12] 褚光,陈婷婷,陈松,等. 灌溉模式与施氮量交互作用对水稻产量以及水、氮利用效率的影响[J]. 中国水稻科学,2017,31(5):513–523.
CHU Guang, CHEN Tingting, CHEN Song, et al. Effects of interaction between irrigation regimes and nitrogen rates on rice yield and water and nitrogen use efficiencies[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2017, 31(5):513–523. (in Chinese)
- [13] PAN J F, LIU Y Z, ZHONG X H, et al. Grain yield, water productivity and nitrogen use efficiency of rice under different water management and fertilizer-N inputs in South China[J]. Agricultural Water Management, 2017, 184:191–200.
- [14] XU G W, LU D K, WANG H Z, et al. Morphological and physiological traits of rice roots and their relationships to yield and nitrogen utilization as influenced by irrigation regime and nitrogen rate[J]. Agricultural Water Management, 2018, 203(4):385–394.
- [15] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. 数理统计与管理,2005,24(1):112–115.
CUI Dangqun. Analysis and making good fitting degree test for Logistic curve regression equation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2005, 24(1):112–115. (in Chinese)
- [16] CHEN J L, KANG S J, DU T S, et al. Modeling relations of tomato yield and fruit quality with water deficit at different growth stages under greenhouse condition[J]. Agricultural Water Management, 2014, 146(1):131–148.
- [17] 王蕾,王鹏新,田苗,等. 效率系数和一致性指数及其在干旱预测精度评价中的应用[J]. 干旱地区农业研究,2016,34(1):229–235.
WANG Lei, WANG Pengxin, TIAN Miao, et al. Application of the coefficient of efficiency and index of agreement on accuracy assessment of drought forecasting models[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(1):229–235. (in Chinese)
- [18] 郑恩楠,杨桦,陈鹏,等. 水氮管理模式下水稻碳氮吸收、土壤呼吸与产量效应[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):287–295.
ZHENG Ennan, YANG Hua, CHEN Peng, et al. Effects of carbon-nitrogen absorption, soil respiration and yield of rice under water and fertilizer management modes[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):287–295. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180634&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.034. (in Chinese)
- [19] 张璐,黄晶,高菊生,等. 长期绿肥与氮肥减量配施对水稻产量和土壤养分含量的影响[J]. 农业工程学报,2020,36(5):106–112.
ZHANG Lu, HUANG Jing, GAO Jusheng, et al. Effects of long-term green manure and reducing nitrogen applications on rice yield and soil nutrient content[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(5):106–112. (in Chinese)
- [20] HAEFELE S M, JABBAR S, SIOPONGCO J, et al. Nitrogen use efficiency in selected rice (*Oryza sativa* L.) genotypes under different water regimes and nitrogen levels[J]. Field Crops Research, 2008, 107(2):137–146.
- [21] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):301–308.
ZHANG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):301–308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200632&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.032. (in Chinese)
- [22] 孟翔燕,周凌云,张忠学,等. 不同灌溉模式对水稻生长、水分和辐射利用效率的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):285–292.
MENG Xiangyan, ZHOU Lingyun, ZHANG Zhongxue, et al. Effects of different irrigation patterns on growth, water and radiation use efficiency of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11):285–292. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191132&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.032. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] DARROCH B A, BAKER R J. Grain filling in three spring wheat genotypes: statistical analysis[J]. Crop Science, 1990, 30(3):525–529.
- [25] 叶廷红,李鹏飞,侯文峰,等. 早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异[J]. 植物营养与肥料学报,2020,26(2):212–222.
YE Tinghong, LI Pengfei, HOU Wenfeng, et al. Differences in dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization among early, late and middle rice[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(2):212–222. (in Chinese)
- [26] 朱齐超,朱金龙,危常州,等. 不同施氮水平对膜下滴灌水稻干物质积累和养分吸收规律的影响[J]. 新疆农业科学,2013,50(3):433–439.
ZHU Qichao, ZHU Jinlong, WEI Changzhou, et al. Effects of nitrogen rates on dry matter accumulation and nutrient absorption of rice under film mulch with drip irrigation[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2013, 50(3):433–439. (in Chinese)