

水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响

郑恩楠 朱银浩 胡建宇 孟凡香 张戈 徐天宇
(黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为研究不同灌水方式配施腐植酸肥对水稻干物质转运、碳含量和土壤呼吸速率以及无机氮含量的影响,在大田试验条件下设置了3种灌水方式(控制灌溉、淹灌和浅湿灌溉)和5种施肥方式(100% 尿素(T1,为当地传统施肥方式,纯氮量 110 kg/hm²)、30% 腐植酸肥 + 70% 尿素(T2)、50% 腐植酸肥 + 50% 尿素(T3)、70% 腐植酸肥 + 30% 尿素(T4)和 100% 腐植酸肥(T5,1 500 kg/hm²)),共计 15 个试验处理,并对水稻的抽穗后期干物质转运、成熟期水稻各器官的碳含量以及土壤呼吸速率和无机氮含量进行观测。结果表明:水肥处理影响了水稻的干物质转运、碳含量和土壤呼吸速率以及氮素形态的积累,在 CT5、WT5 和 FT5 处理下水稻抽穗后期茎叶干物质转运相比较其他水肥处理,具有显著优势,且在成熟期各器官的碳含量也相对较大;随着腐植酸肥的增加,3 种灌水方式下的土壤呼吸速率逐渐增大,控制灌溉不同施肥处理下的土壤呼吸速率大于淹灌和浅湿灌溉,而淹灌和浅湿灌溉各处理之间的差异不显著;腐植酸肥的增加,提高了土壤铵态氮和硝态氮含量,并在 CT5 处理下达到最大值。因此,控制灌溉下施加 1 500 kg/hm² 腐植酸肥,能够提高水稻的生长和改善土壤的呼吸和无机氮含量,综合考虑 CT5 处理为最佳的水肥模式。

关键词: 水稻; 灌水方式; 腐植酸肥; 干物质转运; 呼吸速率; 无机氮含量

中图分类号: S51; S143 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)09-0272-08 OSID: 

Coupling of Water and Fertilizer Methods on Growth of Rice, Soil Respiration and Inorganic Nitrogen

ZHENG Ennan ZHU Yinhao HU Jianyu MENG Fanxiang ZHANG Ge XU Tianyu
(School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to study the effects of humic acid on rice growth, soil respiration and inorganic nitrogen with different irrigation methods, three irrigation methods (control irrigation, flood irrigation and shallow wet irrigation) and five fertilization methods, including 100% inorganic nitrogen fertilizer (T1, 110 kg/hm²), 30% humic acid fertilizer + 70% inorganic nitrogen fertilizer (T2), 50% humic acid fertilizer + 50% inorganic nitrogen fertilizer (T3), 70% humic acid fertilizer + 30% inorganic nitrogen fertilizer (T4), 100% humic acid fertilizer (T5, 1 500 kg/hm²) were set up. The dry matter transport, carbon content of different organs, soil respiration and inorganic nitrogen were observed. The results showed that different irrigation and fertilizer treatments affected rice growth, soil respiration and nitrogen accumulation. Compared with other irrigation and fertilizer treatments, CT5, WT5 and FT5 treatments had significant advantages in dry matter transport of stems and leaves at the late heading stage, and the carbon content of each organ was relatively large at the mature stage; with the increase of humic acid content, soil respiration was increased under the three irrigation methods, the soil respiration rate under different fertilization rates with control irrigation was higher than that of flood irrigation and shallow wet irrigation, but there was no significant difference between flood irrigation and shallow wet irrigation, with the increase of humic acid, the contents of ammonium nitrogen and nitrate nitrogen was increased, and reached the maximum value under CT5 treatment. Therefore, under the control irrigation condition, application 1 500 kg/hm² humic acid in the soil, the growth of rice and soil respiration and inorganic

收稿日期: 2020-09-28 修回日期: 2020-11-23
基金项目: 黑龙江省省属高校基本科研业务费项目(2020-KYYWF-1042)
作者简介: 郑恩楠(1993—),男,讲师,博士,主要从事农业水土资源环境效应研究,E-mail: 2020024@hlju.edu.cn
通信作者: 徐天宇(1991—),男,讲师,博士,主要从事农业水土资源环境效应研究,E-mail: 2021007@hlju.edu.cn

nitrogen content can be improved. After comprehensive consideration CT5 treatment can be the best treatment.

Key words: rice; irrigation methods; humic acid fertilizer; dry matter transportation; respiration rate; inorganic nitrogen content

0 引言

21 世纪以来,我国农田灌溉取得了有效进步,在农业增产中发挥了重要作用。但也面临着提高农业用水效率、控制农业用水总量等的主要问题^[1]。1990 年以来,我国农业用水总量下降,粮食生产需求继续增加。“节水增产”矛盾突出。粮食生产和流通也由“南粮北运”向“北粮南运”转变。这种新格局严重扰乱了水资源的分布,加剧了北方缺水地区的水资源承载压力。部分地区不得不依靠超采地下水维持农业生产,致使地下水位大幅下降,出现大面积的地下水洼地^[2-3]。如何在北方农业生产中实现水资源的可持续利用,已成为当前亟待解决的重要命题。东北黑土作为世界四大黑土带之一,是国家重要的商品粮和水稻生产供应基地^[4-5]。但该地区同时也是缺水 and 气候变化影响最敏感的地区之一^[6]。该地区水稻种植面积不断扩大,农业用水需求急剧上升^[7],供需矛盾日益突出^[8-10],导致井灌水稻种植增加,占区域农业用水量的 70% 以上^[6,11,13-14],地下水开采较为严重。

水稻作为主要粮食作物^[15],在今后几十年为了满足日益增长的粮食需求,每年需增加 1.2% 以上的水稻产量^[16],为了使产量最大化,氮肥的使用量增加,“愈多越好”不科学的施肥方式导致大量的氮素随着灌溉水进入土壤,造成严重面源污染^[17],而合理的水肥管理不但减少污染,且达到了增产效果。有研究指出,在节水灌溉条件下,水田施加复合微生物有机肥配施传统尿素可增产 22.50%,同时改善水稻品质,达到节水调质的作用^[18]。施加微生物有机肥代替 20% 的尿素,可以有效提高水稻的产量构成要素,相比于传统单施尿素增产 2.72%,显著提高水稻各生育期细菌、放线菌和微生物总数量,降低真菌数量,并减小微生物群落结构变化^[19]。50% 的有机肥替代化肥处理,能够结合化肥和有机肥的优势,既能缓解前期土壤养分不足,又能保证养分供给的持续性和全面性^[20]。张作合等^[21]以水稻为研究对象,利用生物炭代替氮肥,表明合理的水炭调控对于氮素的积累量、吸收量以及产量有促进作用,对氮素总的积累量贡献率达到 17.81% ~ 20.60%,同时相比较不施加生物炭处理,施加生物炭处理不同时期的肥料利用率显著提高。王琳等^[22]以硫包衣尿

素为例,探索其在水稻种植上的最佳施用方式和施肥量,发现减量 20% ~ 40% 的硫包衣尿素处理下的水稻产量与传统尿素全量施加处理下的水稻产量之间的差异不显著,每公顷可以减少氮肥施加量 24.75 kg,充分发挥了硫包衣尿素的生态效益,有效地降低了化肥的施用量和农业的面源污染,增加了肥料利用效率和经济效益,起到节本增效的作用。因此合理的施加肥料对于提高作物产量、土壤理化性质的改善、土壤结构的改良以及调节土壤的通气状况和土壤的供肥能力有着重要作用。

腐植酸作为一种新型肥料,目前在水稻上的应用研究较少,特别是在黑土区,相比较其他肥料,腐植酸含植物生长所必需的 16 种元素及有益元素硅,且易被植物吸收利用。因此,本文进行水田不同灌水方式配施腐植酸的试验研究,分析不同灌水方式配施腐植酸对水稻收获后干物质转运、不同器官含碳量以及土壤呼吸和无机氮素的影响,以期在黑土区稻田灌水施肥提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于黑龙江省绥化市庆安县国家灌溉重点试验站,是典型的寒地黑土区。多年平均降水量 550 mm,平均水面蒸发量 750 mm,平均气温为 2.5℃,作物主要生长期为 156 ~ 171 d,全年无霜期 128 d,平均日照时数 2 600 h。该区土壤类型为白浆土型水稻土,容重 1.01 g/cm³,孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为:有机质质量比 41.8 g/kg、pH 值 6.45、全氮质量比 1.72 g/kg、全磷质量比 15.23 g/kg、全钾质量比 20.11 g/kg、碱解氮质量比 198.29 mg/kg、有效磷质量比 36.22 mg/kg 和速效钾质量比 112.06 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验设计 3 个灌水方式为主处理,如表 1 所示。控制灌溉(C)小区用 TPIME-PICO64/32 型土壤水分测定仪每天(07:00 和 18:00 各测 1 次)测取土壤含水率,当土壤含水率低于或接近于灌水下限时,人工灌水至灌水上限,维持土壤含水率处于相应生育阶段的灌水上限和灌水下限之间。淹灌(F)和浅湿灌溉(W)在每天 08:00 前后通过预埋在田面的砖块和竖尺读取水层深度,确定是否需要灌水。

表 1 不同灌水方式
Tab.1 Different irrigation methods

处理	返青期	分蘖初期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
C	0 ~ 30 mm	85% θ_s ~ θ_s	85% θ_s ~ θ_s	晒田	85% θ_s ~ θ_s	85% θ_s ~ θ_s	85% θ_s ~ θ_s	落干
F	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 30 mm	晒田	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 30 mm	落干
W	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	晒田	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水率,为 53.25%。“~”前数据为水分控制下限,“~”后数据为水分控制上限。

施肥处理为 5 个不同肥料配比,如表 2 所示。各小区磷肥(纯 P_2O_5) 45 kg/hm²,钾肥(纯 K_2O) 80 kg/hm²。氮肥施肥比例按照基肥、蘖肥、穗肥为 5:3:2 分别施加,磷肥作为基肥一次施加,钾肥施肥比例按照基肥与 8.5 叶龄 1:1 比例两次施加。试验各项农艺措施同大田,手工除草以避免杂草危害水稻生长发育,同时遵循当地传统方法进行水稻病虫害控制以保证水稻稳产。供试腐植酸肥由云南格瑞环保工程有限公司生产,有机质质量分数大于等于 61.4%,总养分(氮磷钾)质量分数(以烘干基计)大于等于 18.23%,其中 N 大于等于 3.63%, P_2O_5 大于等于 2.03%, K_2O 大于等于 12.57%。含水率为 2.51%,蛔虫卵死亡率大于等于 95%,粪大肠杆菌数小于等于 3.0%。含有大量植物所必需的碳、氢、氧、氮、磷、钾、钙、镁、硫、铁、锰、锌、硼、铜、氯、钼全部 16 种元素及有益元素硅。有害元素砷、汞、铅、镉、铬含量分别小于等于 2.8%、0.01%、7.6%、0.1%、4.7%,远低于检测标准要求。

表 2 施肥处理
Tab.2 Treatment of fertilizer

处理	施肥比例
T1	100% 尿素(纯氮量 110 kg/hm ²)
T2	30% 腐植酸肥 + 70% 尿素
T3	50% 腐植酸肥 + 50% 尿素
T4	70% 腐植酸肥 + 30% 尿素
T5	100% 腐植酸肥(1 500 kg/hm ²)

试验共计 15 个处理,每个处理 3 次重复,随机区组排列,每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m),小区四周同样种植水稻以加设保护行(为了减小边际效应的影响,在试验小区四周分别种植两行水稻作为保护行,在管理上与小区其他植株一样,只是不作为观察、测量和计产的对象)。水稻品种、育秧、移栽、植保及用药等技术措施以及田间管理条件相同。为减小侧向渗透对试验的影响,小区与小区之间采用隔渗处理,即小区四周用塑料板 and 水泥埂作为隔渗材料,埋入田间地表以下 40 cm 深。

1.3 指标观测

1.3.1 水稻生长指标测定

分别于抽穗期和成熟期,各处理选取有代表性

且长势一致水稻植株 3 穴,将各器官分离,120℃ 杀青 30 min,80℃ 干燥至质量恒定。并计算茎叶干物质转运量、茎叶物质转运率、茎叶物质转运贡献率^[23]。茎叶干物质转运量为抽穗期茎叶干质量与成熟期茎叶干质量之差,茎叶物质转运率(%)为抽穗期茎叶干质量与成熟期茎叶干质量之差占抽穗期茎叶干质量百分比,籽粒贡献率(%)为抽穗期茎叶干质量与成熟期茎叶干质量之差占成熟期稻谷干质量百分比。

1.3.2 各器官碳含量测定

成熟期每个试验田分别选取具有代表性且长势一致水稻植株 3 穴,将其叶、茎鞘、穗分开,用去离子水冲洗干净,于干燥箱中 120℃ 杀青 30 min,80℃ 干燥至质量恒定,过 80 目筛后混合均匀,使用总有机碳分析仪(Elementarvario TOC)测定水稻各器官碳含量。

1.3.3 土壤呼吸速率测定

在水稻生长期,选择晴朗少云天气,用 LI-8100 型开路式土壤碳通量测量系统(Li-Cor Inc., Lincoln, NE, 美国)进行田间土壤呼吸速率测定。于水稻返青期开始至乳熟期结束,每隔 10 d 左右测定 1 次,遇阴雨天气顺延 1 ~ 2 d。每次测定时间为北京时间 11:00—14:00,该时间段土壤呼吸速率测量值与日平均值基本一致。采用轮回测量方法,每次测量顺序均与第 1 次测量顺序相同,以避免由于测量时间差异而导致的试验结果误差。测定基座为内径 20 cm 的聚氯乙烯(Polyvinyl chloride,PVC)圈,嵌入土壤后露出土壤表面 2 cm。每个试验小区内放置 3 根,整个生育期不移动。在每次测定的前 1 d,去除基座内土壤表层的一切活体及掉落物,在整个观测过程中 PVC 圈埋设位置保持不变。为了减小安置测定基座对土壤系统的破坏,在测定基座安置 24 h 后进行第 1 次测定。

1.3.4 土壤无机氮含量测定

水稻籽粒成熟期用土钻在田间进行采样,采样深度为水稻根层 0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 的土壤,取出新鲜土样,装入泡沫保温箱内,放置冰袋保鲜,带回实验室冷冻贮存。测定方法:称取 5 g 待测土样加 2 mol/L KCl 溶液 50 mL,25℃ 恒温振荡

1 h 后,过滤,滤液用 AA3 (Auto analyzer3) 型流动分析仪测定土壤硝态氮和铵态氮含量。

1.4 数据分析

应用 SPSS 20.0 软件对数据进行整理,使用 Original 和 WPS 软件进行图表的绘制,并对数据进行 Duncan 显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同水肥处理对干物质转运的影响

不同水肥处理方式下,水稻茎叶干物质转运量如表 3 所示。抽穗后期不同灌水方式配施腐植酸肥影响了水稻的茎叶干物质转运量、转运率和籽粒贡献率。CT2、WT2 和 FT2 处理的转运量、转运率和籽粒贡献率较小,比其他水肥处理减少了 18.51% ~ 55.56%、5.60% ~ 32.61% 和 6.09% ~ 38.59%,达到了显著水平 ($P < 0.05$);而茎叶干物质的转运量、转运率和籽粒贡献率在 3 种不同灌水方式下 T4 和 T5 处理高于其他施肥处理,由大到小表现为 T5、T4、T3、T1、T2,而 T4 和 T5 处理在 3 种灌水方式下也有所差异,但差异较小。综合水稻茎叶干物质转运量、转运率和籽粒贡献率 3 个指标来看,CT5、WT5 和 FT5 处理下水稻抽穗后期茎叶干物质转运量以及籽粒贡献率比其他水肥处理具有显著优势。

2.2 不同水肥处理对各器官碳含量的影响

不同水肥处理方式不仅影响着水稻干物质的积累和转运,同时也影响水稻的固碳能力,水稻成熟期地上各器官碳含量如图 1 所示。不同水肥处理方式下成熟期水稻穗部碳含量显著高于叶和茎鞘 ($P < 0.05$),茎鞘碳含量最低。3 种灌水方式下,T2 处理下各器官总碳含量均显著小于其他施肥处理 ($P < 0.05$),其中 T5 处理最高,其叶、茎鞘和穗部碳含量分别为 39.99%、36.78% 和 51.98%。相同施肥量下,淹灌和浅湿灌溉下水稻各器官碳含量之间差异不显著 ($P > 0.05$),但均小于控制灌溉。综合灌水

表 3 水稻茎叶干物质转运量、转运率和籽粒贡献率
Tab.3 Stem and leaf transport capacity, transport rate and grain contribution rate of rice

处理	茎叶干物质转运量/ (t·hm ⁻²)	茎叶干物质 转运率/%	籽粒贡献率/ %
CT1	0.32 ^c	11.82 ^e	10.10 ^e
CT2	0.21 ^d	10.55 ^f	7.35 ^f
CT3	0.28 ^c	11.80 ^e	9.02 ^d
CT4	0.38 ^b	13.47 ^c	10.89 ^b
CT5	0.45 ^a	15.66 ^a	11.57 ^a
WT1	0.35 ^b	12.88 ^d	11.02 ^b
WT2	0.22 ^d	12.35 ^d	8.01 ^e
WT3	0.31 ^c	12.86 ^d	9.91 ^c
WT4	0.38 ^b	14.14 ^b	11.01 ^b
WT5	0.43 ^a	15.24 ^a	11.21 ^{ab}
FT1	0.31 ^c	13.27 ^c	9.54 ^{cd}
FT2	0.20 ^d	10.60 ^f	7.39 ^f
FT3	0.27 ^c	11.23 ^e	8.53 ^e
FT4	0.41 ^b	14.94 ^b	11.97 ^a
FT5	0.45 ^a	15.73 ^a	11.63 ^a

注：同列数字后不同小写字母表示不同处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

和施肥两因素来看,CT5 处理下水稻各器官的含量碳最大,表明该处理水稻的固碳能力大于其他水肥处理方式。

2.3 不同水肥处理对稻田土壤呼吸速率的影响

不同水肥处理是改善田间作物生长和水土环境的重要手段和方式,同时也影响着土壤呼吸速率。不同水肥处理的土壤呼吸速率如图 2 所示。试验结果表明:不同水肥处理之间的土壤呼吸速率在水稻生育期变化规律一致,不同生育时期的土壤呼吸速率从返青期到乳熟期整体呈先升高后下降的变化趋势。水稻的生长初期和后期,在温度和土壤肥力较低的综合影响下,土壤呼吸速率较弱,而在生长旺盛时期,随着温度的升高和土壤肥力较强,土壤呼吸速率也较大。3 种灌水方式下,在拔节期随着腐植酸施用量的增加,土壤的呼吸速率也逐渐

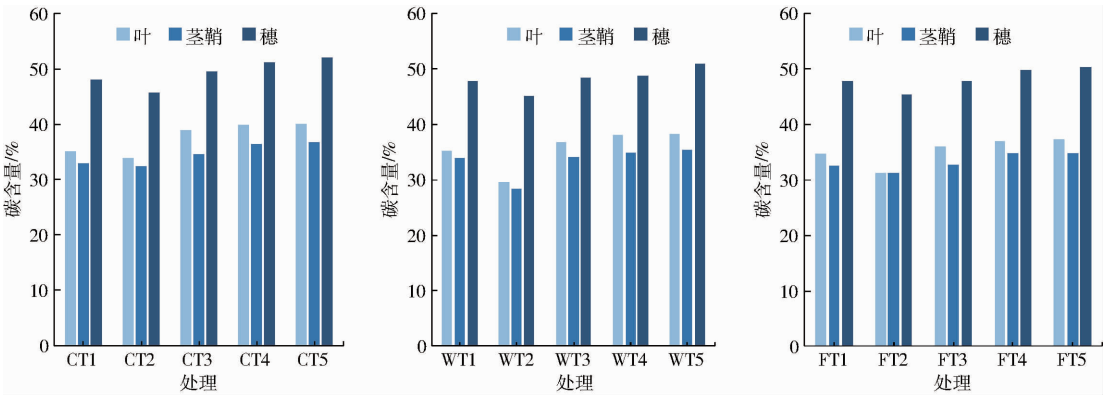


图 1 水稻成熟期不同器官碳含量

Fig. 1 Carbon content in different organs of rice at maturity

升高,T5 处理下土壤呼吸速率显著大于其他施肥处理($P < 0.05$),相比较单一施加尿素,腐植酸的施加有利于土壤微生物菌落增多,呼吸速率因此增加;而控制灌溉条件下不同施肥处理的土壤呼

吸速率大于淹灌和浅湿灌溉,主要由于控制灌溉表层土壤温度大于淹灌和浅湿灌溉,有利于土壤微生物的活动和土壤矿物质的化学反应,因此呼吸速率较大。

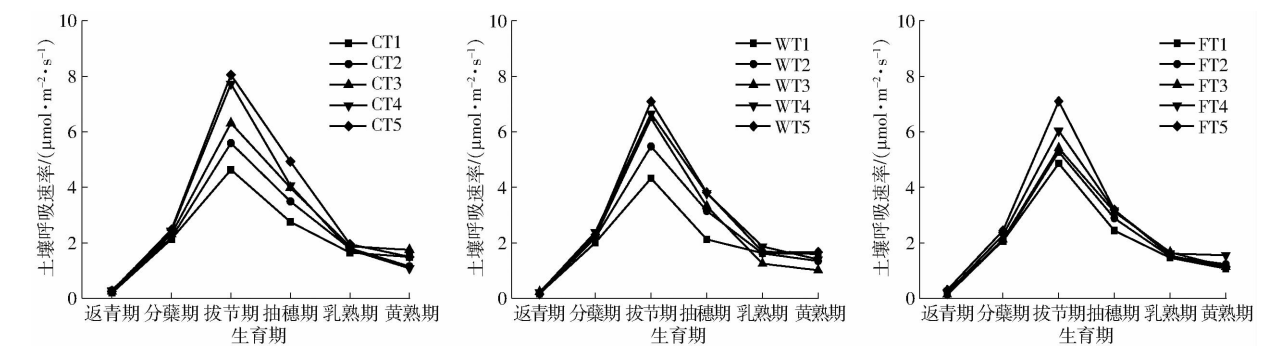


图 2 不同生育时期土壤呼吸速率变化曲线
Fig. 2 Variation curves of soil respiration rate at different growth stages

2.4 不同水肥处理对稻田土壤铵态氮累积量的影响

对成熟期水稻土壤不同土层铵态氮累积量进行观测,结果如图 3 所示。不同水肥处理下的铵态氮累积量随着土层深度的增加逐渐降低,而随着腐植酸肥含量的增加不同施肥处理之间的铵态氮累积量逐渐增加,且 0 ~ 20 cm 土层之间差异显著($P < 0.05$)。施肥处理之间对比发现,0 ~ 20 cm 土层铵态氮累积量在 T5 处理下取得最大值,且显著大于其

他水肥处理($P < 0.05$); T3、T4 和 T5 施肥处理在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的铵态氮累积量之间差异不显著($P > 0.05$),但显著大于 T1 和 T2 处理($P < 0.05$)。水分处理之间对比发现,淹灌和浅湿灌溉处理之间差异不显著($P > 0.05$),控制灌溉条件下的 0 ~ 20 cm 土层的铵态氮累积量大于淹灌和浅湿灌溉,而 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的铵态氮累积量小于淹灌和浅湿灌溉。

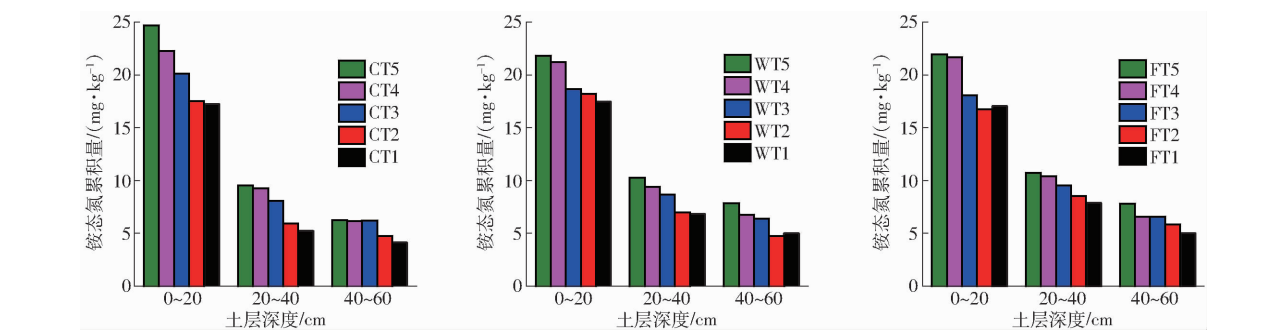


图 3 不同土层铵态氮累积量
Fig. 3 Accumulation of ammonium nitrogen in different soil layers

2.5 不同水肥处理对稻田土壤硝态氮累积量的影响

成熟期稻田土壤硝态氮累积量的变化与铵态氮累积量的变化规律有所差异,如图 4 所示。在 20 ~ 40 cm 土层的硝态氮累积量最大,其次是 0 ~ 20 cm 和 40 ~ 60 cm。3 种灌水方式下,随着腐植酸含量的增加 0 ~ 20 cm 土层的硝态氮累积量逐渐增加,而全面淹灌和浅湿灌溉在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的硝态氮累积量,呈下降趋势。施肥处理之间对比发现,在 0 ~ 20 cm 土层,3 种灌水条件下均 T5 处理下累积量最高,而在 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层,控制灌溉下不同施肥处理之间的差异不显著($P > 0.05$),而浅湿灌溉和淹灌下在 T5 处理累积量最低。水分处理之间对比发现,控制灌溉条件下 0 ~ 20 cm 土层的硝态氮累积量大于淹灌和浅湿灌溉

($P < 0.05$),而 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层的硝态氮累积量显著低于淹灌和浅湿灌溉($P < 0.05$),主要原因在于硝态氮易淋失,淹灌和浅湿灌溉由于田间存在水层,导致硝态氮向土壤深层淋失量较大,而控制灌溉土壤水分较少,其硝态氮向土壤深层淋失量较小。

2.6 各指标之间的关系

将水稻各指标之间进行相关分析(表 4)。硝态氮含量与各指标之间的相关性不显著($P > 0.05$),水稻的干物质量、土壤呼吸速率、碳含量和铵态氮含量相互之间关系显著($P < 0.05$),表明各指标之间相互关联相互影响。由于水稻是喜铵作物,土壤中的铵态氮能够被直接利用,而大部分硝态氮不能直接利用,需要转换成铵态氮才能被吸收,同时硝态氮

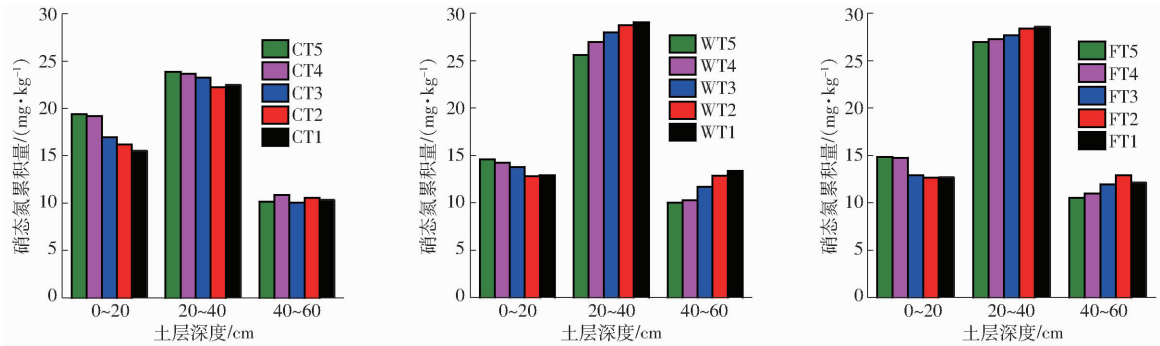


图 4 不同土层硝态氮累积量

Fig. 4 Accumulation of nitrate nitrogen in different soil layers

表 4 各指标之间的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient of each index

	干物 质量	土壤呼吸 速率	碳含量	铵态氮 含量	硝态氮 含量
干物质量	1	0.67	0.93	0.85	-0.08
土壤呼吸速率		1	0.74	0.79	-0.14
碳含量			1	0.76	-0.04
铵态氮含量				1	0.12
硝态氮含量					1

淋容量较大,因此水稻直接利用量较少,所以相关性不大。而土壤呼吸速率的增大,促进了土壤与外界的气体交换,有利于水稻的生长,提高干物质的积累和碳含量的增加。

3 讨论

3.1 对干物质转运和碳含量的影响

提高作物生长后期的干物质转运是提高作物籽粒干物质质量的主要途径之一^[24],前人在水稻产量形成的转运上进行了较多研究,表明茎鞘中储存营养物质的运转和籽粒形成的贡献为 20% ~ 40%^[25]。本研究发现,3 种灌水方式下腐植酸肥的施加量为 1 500 kg 时,茎叶物质的转运量、茎叶物质的转运率和茎叶物质的籽粒贡献率大于其他水肥处理,研究结果与姜佰文等^[23]研究结果类似,表明施加腐植酸肥对于提高抽穗后期光合生产能力大于单一施加尿素处理。农田碳排放是大气二氧化碳的主要来源,因此减少农田的碳排放,增加其固碳能力是减少二氧化碳的主要途径^[26]。目前,对于水稻的固碳能力尚不明确,而提高水稻的固碳能力首先要提高水稻不同器官的碳含量。本研究表明,当施肥量相同时,控制灌溉下的水稻不同器官的碳含量较大,这与曹凑贵等^[27]的研究结果一致,原因在于控制灌溉条件下相比于淹灌和浅湿灌溉,稻田土壤的通透性较大,增大了土壤的气体交换,土壤的氧气增多,有利于水稻根系的呼吸,改善了水稻根系的生态环境,减弱了水稻根系的衰老速率,对于水稻后期生长起到了促

进作用。灌水方式相同时,T5 处理下不同器官的碳含量较大,而 T2 处理下不同器官的碳含量最小,表明合理的施肥方式对于提高水稻不同器官的碳含量具有促进作用,能够增加植物对碳的同化作用。

3.2 对土壤呼吸速率的影响

土壤呼吸包括植物根系呼吸、土壤微生物呼吸和土壤矿化物化学反应 3 部分组成,较好的土壤呼吸速率对于田间气体交换有着积极作用。本研究发现,随着生育期的进行土壤呼吸速率表现为先增加后下降的变化趋势,在拔节期的呼吸速率达到最大值,原因在于拔节期温度较高,土壤的微生物活动较旺盛,根系较发达^[28],矿物质的化学反应较强,导致土壤呼吸速率较大,而生长前期和后期温度较低,植物各根系衰老,因此土壤的呼吸速率较低。3 种灌水方式处理之间对比发现,控制灌溉下土壤的呼吸速率大于淹灌和浅湿灌溉,原因在于土壤的呼吸速率与土壤表层 0 ~ 5 cm 的温度具有显著的指数关系^[29],而控制灌溉条件下表层 0 ~ 5 cm 的土壤温度较大,有利于土壤的呼吸速率。不同施肥处理之间对比发现,施加腐植酸肥处理的土壤呼吸速率均大于单一施加尿素处理的土壤呼吸速率,且随着腐植酸肥的增加,土壤呼吸速率也逐渐增大,由大到小表现为 T5、T4、T3、T2、T1。腐植酸肥相比较其他肥料能够较好地改善土壤理化特性,从而提高土壤的透气性,同时也易于活化土壤中的养分,使农作物易于吸收,增强作物营养和根系发育,提高土壤中矿物质的分解速率,因此土壤呼吸速率相比较单一施加尿素较大,而且随着腐植酸肥的增加逐渐增加。

3.3 对土壤无机氮含量的影响

土壤中的无机氮大多以铵态氮和硝态氮形式存在,而不同施肥处理对于调节和改善土壤氮素形态起着重要作用。本试验研究表明,施加腐植酸肥土壤的铵态氮含量波动较大,特别是表层土壤,显著大于单一施加尿素处理,这可能是因为土壤中施加腐植酸肥,使土壤中的矿物分解较快,导致土壤铵态氮

含量较高^[30],而硝态氮含量的变化与铵态氮有所差异,主要是硝态氮淋失较大,所以 0 ~ 20 cm 土层的硝态氮含量小于 20 ~ 40 cm 土层的硝态氮含量。但从 20 ~ 40 cm 处土壤硝态氮的含量来看,随着腐植酸肥的增加,硝态氮含量下降,说明施加腐植酸肥减弱了土壤硝态氮的淋失量。不同水分处理之间,0 ~ 20 cm 处铵态氮和硝态氮含量控制灌溉大于淹灌和浅湿灌溉,这是由于控制灌溉相比较淹灌和浅湿灌溉增加了土壤的通气性,使土壤脲酶活性增强,从而提高了铵态氮和硝态氮含量^[31],同时由于控制灌溉下的田面无水层,使硝态氮向深层土壤淋失量显著降低,所以上层含量较大。因此在进行稻田管理时应选择合理水肥运筹方式。

4 结 论

(1)不同水肥处理下,CT5、FT5 和 WT5 处理水稻抽穗后期茎叶干物质转运量较优,而不同器官的碳含量穗部最高,茎鞘碳含量最低。施肥处理之间,随着腐植酸含量的增加,T5 处理各器官的碳含量较

大,而水分处理之间,淹灌和浅湿灌溉处理之间差异不显著,但小于控制灌溉。

(2)不同水肥处理下,水稻不同生育期的土壤呼吸速率在拔节期出现最大值,不同灌溉方式下,控制灌溉下的土壤呼吸速率大于淹灌和浅湿灌溉,而不同施肥处理下,土壤呼吸速率随着腐植酸含量的增加而增加,在拔节期,T5 处理显著大于其他施肥处理。

(3)不同水肥处理下,土壤铵态氮累积量随着腐植酸肥的增加逐渐增加,且大于单一施加尿素处理,而 3 种灌水处理之间对比发现,控制灌溉下的 0 ~ 20 cm 土层铵态氮累积量大于淹灌和浅湿灌溉;硝态氮含量在 20 ~ 40 cm 土层显著高于其他土层,0 ~ 20 cm 土层硝态氮含量在 T4、T5 处理下较大,而 20 ~ 40 cm 和 40 ~ 60 cm 土层下 T1 处理较大。

(4)综上分析,在 CT5、FT5 和 WT5 处理下,水稻的干物质转运量大于其他处理,而地上干物质的固碳能力和土壤呼吸以及无机氮含量的变化均在 CT5 处理较优。因此,控制灌溉下施加 1 500 kg/hm² 的腐植酸肥(CT5 处理)为最佳水肥处理。

参 考 文 献

[1] 操信春,任杰,吴梦洋,等. 基于水足迹的中国农业用水效果评价[J]. 农业工程学报,2018,34(5):1-8.
CAO Xinchun, REN Jie, WU Mengyang, et al. Assessing agricultural water use effect of China based on water footprint framework [J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese)

[2] LU H N, KANG S Z, DU T S, et al. Current status and future research trend on water-saving high-efficiency and eco-friendly agriculture [J]. Journal of Agriculture, 2018, 8(1): 155-162.

[3] WANG Q R, MEI X R. Strategies for sustainable use of agricultural water resources in China [J]. Journal of Agriculture, 2017, 7(10): 80-83.

[4] CAVIGLIA O P, SADRAS V O, AADRADEF H. Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean [J]. Field Crops Research, 2014, 87(2-3): 117-129.

[5] 陈温福,潘文博,徐正进. 我国粳稻生产现状及发展趋势[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 7(6): 801-805.
CHEN Wenfu, PAN Wenbo, XU Zhengjin. Current situation and trends in production of japonica rice in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2006, 7(6): 801-805. (in Chinese)

[6] FANG F P, XU C C, LI F G, et al. Analysis on the current situation of rice production and market in Northeast China [J]. China Rice, 2010, 16(1): 44-47.

[7] GAO Y, WU P T, ZHAO X, et al. Growth, yield, and nitrogen use in the wheat/maize inter-cropping system in an arid region of Northwestern China [J]. Field Crops Research, 2014, 167(5): 19-30.

[8] 陈恒洪,柴守玺,黄彩霞,等. 地膜覆盖对旱地春小麦土壤温度的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(1): 63-67.
CHEN Henghong, CHAI Shouxi, HUANG Caixia, et al. Effect of plastic film mulching on soil temperature of spring wheat in dry land [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2013, 48(1): 63-67. (in Chinese)

[9] 程建平,曹凑贵,蔡明历,等. 不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 28-33.
CHENG Jianping, CAO Coughui, CAI Mingli, et al. Effects of different irrigation modes on the yield and water productivity of rice [J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(12): 28-33. (in Chinese)

[10] CHEN Y J, ZHANG P Y, LIU S W, et al. The spatio-temporal pattern change and optimum layout of grain production in the west of northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2016, 36(9): 1397-1407.

[11] 冯玉龙,刘恩举,孙国斌. 根系温度对植物的影响(I)—根温对植物生长及光合作用的影响[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(3): 63-69.
FENG Yulong, LIU Enju, SUN Guobin, et al. Effects of root temperature on plants (I)—effects of root temperature on plant growth and photosynthesis [J]. Journal of Northeast Forestry University, 1995, 23(3): 63-69. (in Chinese)

[12] LIU Z J, YANG X G, WANG W F. Characteristic of agricultural climate resource in the context of global climate change in three provinces of Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(9): 2199-2206.

[13] 姜晓剑,汤亮,刘小军,等. 中国主要稻作区水稻生产气候资源的时空特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 238-245, 395-396.
JIANG Xiaojian, TANG Liang, LIU Xiaojun, et al. Spatial and temporal characteristics of rice production climatic resources in main growing regions of China [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 238-245, 395-396. (in Chinese)

- [14] 王晓煜,杨晓光,TAO Li,等. 东北三省水稻干湿交替灌溉模式适宜性分区[J]. 农业工程学报,2018,34(6):111–120. WANG Xiaoyu,YANG Xiaoguang,TAO Li,et al. Rice suitability zoning of alternative wetting and drying irrigation mode in three provinces of Northeast China[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(6):111–120. (in Chinese)
- [15] PANDEY S,BYERLEE D,DAWE D,et al. Rice in the global economy: strategic research and policy issues for good security [M]. IRRI,Los Baños, Philippines,2010.
- [16] NORMILE D. Reinventing rice to feed the world[J]. Science,2008,321(5887):330–333.
- [17] WU Y,SHI X H,LI C Y,et al. Simulation of hydrology and nutrient transport in the Hetao Irrigation District, Inner Mongolia, China[J]. Water,2017,9(3):138–147.
- [18] 张忠学,冯子珈,齐智娟,等. 节水灌溉下复合微生物有机肥对水稻光合与产量的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):313–321.
ZHANG Zhongxue,FENG Zijia,QI Zhijuan,et al. Effects of compound microbial organic fertilizer with water-saving irrigation on photosynthetic and yield of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(7):313–321. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190734&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.034. (in Chinese)
- [19] 崔月贞,吴玉红,郝兴顺,等. 不同有机氮替代部分无机氮对水稻产量及土壤微生物的影响[J]. 西北农业学报,2019,54(10):1–9.
CUI Yuezhen,WU Yuhong,HAO Xingshun,et al. Effects of partial replacement of chemical fertilizer by organic manure on rice yield and soil microorganisms in Hanzhong basin[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica,2019,54(10):1–9. (in Chinese)
- [20] MCDOWELL R W,SHARPLEY A N. Variation of phosphorus leached from Pennsylvanian soils amended with manures, composts or inorganic fertilizer[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2003,102(1):17–27.
- [21] 张作合,张忠学. 水炭运筹对寒地黑土区稻田土壤肥料氮素残留的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):239–249.
ZHANG Zuohe,ZHANG Zhongxue. Effects of water and biochar management on nitrogen fertilizer residue in paddy fields of cold and black region[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(11):239–249. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20191127&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.027. (in Chinese)
- [22] 王琳,杨小敏,高鹏,等. 硫包衣尿素在水稻上的应用效果研究[J]. 陕西农业科学,2018,64(10):24–26.
WANG Lin,YANG Xiaomin,GAO Peng,et al. Application effect of sulfur coated urea on rice[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences,2018,64(10):24–26. (in Chinese)
- [23] 姜佰文,李贺,王春红,等. 有机无机肥料配合施用对水稻干物质积累及运转的影响[J]. 东北农业大学学报,2013,44(5):10–13.
JIANG Baiwen,LI He,WANG Chunhong,et al. Effect of mixed application of organic-inorganic fertilizers on dry matter accumulation and translocation of rice[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2013,44(5):10–13. (in Chinese)
- [24] 张忠学,刘明,齐智娟. 喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(8):299–308.
ZHANG Zhongxue,LIU Ming,QI Zhijuan. Effect of water nitrogen dosage on nitrogen absorption and transformation of maize under sprinkler irrigation condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):299–308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20190833&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.033. (in Chinese)
- [25] 曹小闯,李烽铎,吴龙龙,等. 有机水溶肥对水稻干物质、氮素累积和转运的影响[J]. 作物杂志,2020(5):110–118.
CAO Xiaochuang,LI Yefeng,WU Longlong,et al. Effects of organic soluble fertilizer on the accumulation and translocation of dry matter and nitrogen of rice[J]. Crops,2020(5):110–118. (in Chinese)
- [26] 田莉. 施肥对水稻碳积累的影响研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
TIAN Li. Studies on carbon phyto-fixaction in rice as affected by different fertilization[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2013. (in Chinese)
- [27] 曹凑贵,李成芳,展茗,等. 稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(1):93–98.
CAO Coughui,LI Chengfang,ZHAN Ming,et al. Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields [J]. Scientia Agricultura Sinica,2011,44(1):93–98. (in Chinese)
- [28] 毛一男,胡振华,彭致功,等. 不同施肥水平对夏玉米土壤呼吸的影响研究[J]. 中国农村水利水电,2019(4):42–46.
MAO Yi'nan,HU Zhenhua,PENG Zhigong,et al. Effects of different nitrogen levels on soil respiration of summer maize[J]. China Rural Water and Hydropower,2019(4):42–46. (in Chinese)
- [29] 杨士红,王乙江,徐俊增,等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报,2015,31(8):140–146.
YANG Shihong,WANG Yijiang,XU Junzeng,et al. Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):140–146. (in Chinese)
- [30] 王伟,杨文浩,毛艳玲,等. 水稻生育期对不同施肥条件下黄泥田土壤无机氮及细菌群落的影响[J]. 应用与环境生物学报,2019,25(6):1352–1358.
WANG Yi,YANG Wenhao,MAO Yanling,et al. Effect of the phenological stage of rice growth on soil-soluble inorganic nitrogen and bacterial communities in a yellow clayey soil under different fertilization patterns[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology,2019,25(6):1352–1358. (in Chinese)
- [31] 肖新,朱伟,肖靛,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)