

孙 冬,张耀元,郭 威,等. 半深水灌溉持续时间对水稻产量、品质及抗倒性的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(9):58-65.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.09.008

半深水灌溉持续时间对水稻产量、品质及抗倒性的影响

孙 冬,张耀元,郭 威,窦 志,徐 强,高 辉

(扬州大学/江苏省作物遗传生理重点实验室/江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心/水稻产业工程技术研究院,江苏扬州 225009)

摘要:半深水灌溉是稻渔共作区别于水稻单作的主要环境特征,且半深水灌溉持续时间因具体模式而异。迄今为止,水稻生产力对半深水灌溉的响应还并不清楚。以扬粳 805 为试验材料,通过设置 3 种水分管理模式:(1)“浅、搁、湿、露、晒”灌溉模式,即水稻常规高产灌溉模式(CI);(2)拔节期一抽穗后 10 d 维持半深水 30~35 cm 40 d(SDI40d);(3)拔节期一抽穗后 35 d 维持半深水 30~35 cm 65 d(SDI65d),初步研究了半深水灌溉处理对水稻产量、稻米品质和抗倒性的影响。结果表明,与 CI 处理相比,SDI40d 处理实际产量降低了 9.50%,SDI65d 处理减产了 13.20%,穗粒数和结实率降低是产量下降的主要原因。半深水灌溉处理下,扬粳 805 的加工品质和外观品质变劣;食味值降低,直链淀粉含量和各蛋白组分含量升高;RVA 特征谱值热浆黏度、最终黏度升高,崩解值降低,且随着半深水灌溉持续时间变长,稻米品质持续变劣。半深水灌溉处理下,扬粳 805 株高整体呈上升趋势,茎粗、壁厚和抗折力呈下降趋势。相较于 CI 处理,半深水灌溉处理下倒伏指数升高,扬粳 805 的易倒伏风险增加,且 2 个不同半深水灌溉持续时间处理下扬粳 805 的倒伏指数接近。

关键词:半深水灌溉;持续时间;水稻;产量;品质;抗倒性

中图分类号:S511.07 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)09-0058-07

稻渔综合种养是指在稻田一并开展水稻种植和水产动物养殖的农业生产模式,具有良好的经济效益和社会价值^[1-2]。与水稻单作相比,稻渔综合种养在灌溉方式上具有明显差别。现已明确,水稻高产灌溉以浅湿灌溉为主^[3],灌溉水层一般在 5 cm 以上,而稻渔综合种养为了充分满足水产动物生长活动的需要,往往要进行 20~50 cm 1 个月以上的半深水灌溉,不同稻渔综合种养模式、同一模式不同养殖目标的半深水灌溉持续时间不一致。掌握半深水灌溉对水稻综合生产力的影响是进一步研究稻渔综合种养下适应性栽培策略的基础。稻渔综合种养会引起田间水环境的明显变化,这种变化在一定程度上会影响水稻的产量、稻米品质以及茎秆抗倒伏能力。因此,开展半深水灌溉持续时间对稻米品质和抗倒伏能力的影响研究,对实现稻渔综

合种养稳产优质具有重要意义。

稻米品质是水稻生长环境条件和自身遗传特性互作的结果,环境条件包括水稻生长阶段的温度、光照、水分、肥力条件等。在影响稻米品质的诸多环境因素中,水分管理对稻米品质影响尤为显著。任祯的研究表明,淹涝胁迫下,水稻的加工品质显著降低,垩白粒率和垩白度增加,食味品质下降^[4]。赵启辉的研究表明,淹涝胁迫下,RVA 特征谱值中最高黏度、热浆黏度和崩解值下降^[5]。前人的研究表明了淹涝胁迫在一定程度上对稻米品质产生负面影响,但半深水灌溉持续时间对稻米品质的影响还缺乏相关研究。基于此,本试验研究 2 个半深水灌溉持续时间及对照(CI)对稻米品质的影响差异。半深水灌溉除了会降低稻米品质,还会降低水稻茎秆抗倒伏能力。倒伏是植物茎秆由自然竖直状态到永久错位的现象。水稻倒伏不仅会造成水稻产量下降、品质变劣,还会增加机械收获难度和成本^[6]。水稻倒伏一般分为根倒和茎倒,前者一般发生在直播和抛秧等水稻扎根较浅的种植方式下。稻渔综合种养多采用移栽方式,主要发生茎倒。倒伏指数法可将茎秆的折断弯矩、抗折力矩等物理参数与株高、茎粗、壁厚等形态指标关联起来,

收稿日期:2023-06-18

基金项目:国家重点研发计划(编号:2018YFD0300804);江苏省重点研发计划(编号:BE2018355)。

作者简介:孙 冬(1999—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要从事稻渔综合种养研究。E-mail:SUNDONG0816@126.com。

通信作者:高 辉,博士,教授,主要从事稻渔综合种养研究。E-mail:gaohui@yzu.edu.cn。

契合茎倒伏发生的物理学原理,在水稻抗倒伏能力评价中得到了较广泛的应用^[7]。宁金花等的研究表明,抽穗扬花期一般发生茎倒伏,同一淹水深度下,淹涝时间越长,植株茎倒伏率越高^[8]。吴海兵等的研究表明,淹水灌溉比干湿交替灌溉条件下水稻植株的抗折力下降,倒伏指数上升^[9]。但是,迄今为止水稻抗倒伏能力在半深水灌溉下的表现还鲜有报道。根据稻渔综合种养具体模式的要求以及农户对稻渔共作时间理解的差异,本研究设置了 2 个半深水灌溉持续时间的处理,分别为拔节期后半深水灌溉持续 40 d(SDI40d)和 65 d(SDI65d),以模拟稻渔共作生产的不同场景,并以水稻单作常规浅湿灌溉方式为对照(CI),探究水稻产量、稻米品质和抗倒伏特性对半深水灌溉的响应,旨在为阐明稻渔综合种养模式下水稻生产力变化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2022 年在安徽省滁州市天长市国家现代农业产业园科技试验示范基地(118°97′06″E, 32°69′75″N)进行。该基地地处高邮湖西岸,毗邻洪泽湖,属于季风性湿润气候区,气候温和,光照充足,雨水充沛。土壤类型为黏土,pH 值为 6.0,土壤有机质含量为 27.5 g/kg,全氮含量为 1.83 g/kg,有效磷含量为 17.8 mg/kg,速效钾含量为 123 mg/kg。供试水稻品种为扬粳 805,于 5 月 15 日采用塑料软盘育秧,6 月 12 日人工移栽,水稻行株距为 30 cm × 13 cm,每穴栽 3 株苗。水稻移栽至成熟期间的日均温、风速和降水量见图 1。

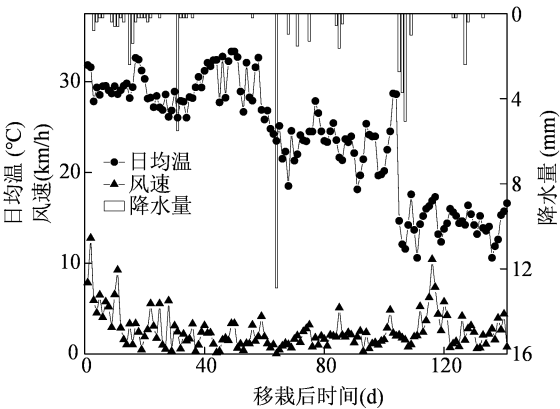


图1 试验地水稻移栽至成熟期间的日均温、风速和降水量

1.2 试验设计与田间管理

本试验在专门为稻渔综合种养试验建设的水泥池小区里进行。每个水泥池长 10 m、宽 5 m、深 50 cm,可实现本试验设计的不同水分管理模式。

试验设置 3 种不同水分管理模式:(1)“浅、搁、湿、露、晒”灌溉模式,即水稻常规浅湿灌溉模式,作为对照(CI);(2)拔节期—抽穗后 10 d 维持半深水 30 ~ 35 cm 40 d(SDI40d);(3)拔节期—抽穗后 35 d 维持半深水 30 ~ 35 cm 65 d(SDI65d)。每个处理田间重复 4 次。详见表 1。

各处理养分管理方案一致。施氮量均为 270 kg/hm²,其中 40% (108 kg/hm²) 作为基肥,30% (81 kg/hm²) 作为分蘖肥,30% (81 kg/hm²) 作为穗肥,所用氮肥均为尿素。此外,施用过磷酸钙(135 kg/hm²)和氯化钾(216 kg/hm²)作为基肥。水稻病虫害防控参照当地稻虾共作常规方法进行,采用人工方式除草。

表 1 各处理全生育期水分管理模式

生育时期	“浅、搁、湿、露、晒”灌溉(CI)	拔节期—抽穗后 10 d (SDI40d)	拔节期—抽穗后 35 d (SDI65d)
缓苗期	水深 0 ~ 2 cm	水深 0 ~ 2 cm	水深 0 ~ 2 cm
分蘖期	水深 2 ~ 4 cm	水深 2 ~ 4 cm	水深 2 ~ 4 cm
晒田期	排干水,搁至土表有鸡爪纹	排干水,搁至土表有鸡爪纹	排干水,搁至土表有鸡爪纹
拔节期	浅湿交替	水深 30 ~ 35 cm	水深 30 ~ 35 cm
抽穗后 10 d	浅湿交替	水深 30 ~ 35 cm	水深 30 ~ 35 cm
抽穗后 35 d	浅湿交替	浅湿交替	水深 30 ~ 35 cm
成熟期	干湿交替,收获前 7 d 断水	干湿交替,收获前 7 d 断水	干湿交替,收获前 7 d 断水

1.3 测定内容与方法

1.3.1 产量及其构成因素 每个小区连续调查 30 穴植株,对有效穗数进行统计;按照有效穗数,每个小区选取 4 穴进行考种,用于测定穗粒数、结实率。

取 3 个重复的 1 000 粒实粒,烘干后称量测得千粒重。成熟期每个小区去除边行后连续收割 30 穴,测定水分含量,按照 14.5% 的标准含水率折算实产^[10]。

1.3.2 稻米品质测定

1.3.2.1 加工品质和外观品质 各小区水稻成熟后进行收割并使用脱粒机脱粒,自然晾晒至含水率为 14.5% 左右。每个处理称取 150 g 左右的样品,采用 NP-4350 型风选机进行风选,根据 GB/T 17891—2017《优质稻谷》标准,对稻米的糙米率、精米率、整精米率、垩白粒率和垩白度等指标进行测定。

1.3.2.2 蛋白组分含量和直链淀粉含量的测定

称取 0.1 g 米粉于 15 mL 离心管中,加入 5 mL Tris-HCl 溶液,每 10 min 用振荡仪振荡 1 次,提取时间为 30 min,然后 4 000 g 离心 10 min。吸取 1 mL 提取液加入考马斯亮蓝 G-250 溶液,用分光光度计于 595 nm 波长处比色。在提取过清蛋白的米粉沉淀中加入 5 mL Tris-NaCl 溶液以提取球蛋白,提取方法及测定方法与上述相同。在提取过球蛋白的米粉中加入 5 mL Tris-正丙醇溶液,将其在 50 ℃ 水浴条件下振荡提取 30 min,测定过程与上述相同。在提取过醇溶蛋白的米粉沉淀中加入 5 mL 双缩脲溶液,将其在 50 ℃ 水浴条件下振荡提取 30 min,此提取液直接在分光光度计 580 nm 波长处比色。

直链淀粉含量的测定:将待测米粉过 60 目筛网后,称取 0.1 g,将其放入干燥洁净的 50 mL 试管中,使用碘比色法,在调至 620 nm 波长的分光光度计上,记录样品的吸光度。根据同样方法对已知 4 种不同直链淀粉含量的标准样品进行测定,绘制出标准曲线,计算样品的直链淀粉含量。

1.3.2.3 食味值 采用佐竹公司的 STA/A 米饭食味计进行食味指标测定。具体方法为:先取 30.00 g 精米放入不锈钢罐中,加入适量水淘洗,静置 30 min 后,米水按质量比 1.0:1.3 加水,滤纸覆盖后用橡皮筋牢固密封。随后将钢罐放入锅中蒸煮 30 min,关火后钢罐继续放在锅中保温 10 min。将米饭轻轻搅动,然后放入食味计的风冷装置中降温 20 min,取出后放在室温条件下 90 min。在此基础上,在每罐中部取 8 g 米饭制作测试样品,采用日本粳稻作为对照,直接记录外观、硬度、黏度、平衡度和食味值等指标数据。

1.3.2.4 稻米 RVA 特征谱 使用 Super3 型快速黏度分析仪(rapid viscosity analyzer,RVA,澳大利亚 Newport Scientific 仪器公司)进行黏度测定,配合 TCW(Thermal Cycle for Windows)软件进行分析,参

照美国谷物化学家协会(AACC 规程)进行检测。首先称取 3 g 米粉样品和 25 g 蒸馏水,然后将搅拌器在初始 10 s 内转速设为 960 r/min,其后保持在 160 r/min,测定峰值黏度、热浆黏度以及最终黏度等特征值。通过以上指标的计算得出崩解值、消减值和回复值。

1.3.3 茎秆抗倒伏特性

1.3.3.1 茎秆形态学指标 水稻抽穗后 30 d 每个处理选取 20 根生长状态基本相同的主茎进行测定。

(1)主茎高度(cm):以主茎基部为起点,测量至顶端高度;(2)单穗质量(g):主茎上单独穗的质量;(3)重心高度(cm):将从田间现取出的主茎放置在削好的铅笔尖上,前后缓慢移动以保持主茎在铅笔尖上平衡,并用铅笔标记出平衡点,测量主茎基部至平衡点的高度;(4)茎秆各节间长度(cm):在每个节间点用铅笔标记,用刻度尺测量主茎每个节间的长度;(5)壁厚和茎粗(mm):用剪刀在第 2 节间断裂处剪断,剥去鞘,用游标卡尺测量长轴外径(b_1)、长轴内径(b_2)、短轴外径(a_1)、短轴内径(a_2),计算茎粗和壁厚。

1.3.3.2 茎秆力学指标 水稻抽穗后 30 d 在每个处理中选取 20 根生长状态基本相同的主茎,使用铅笔标记各个节间点,将主茎放置在 2 点间隔为 8 cm 的支架上,前后移动保证主茎第 2 节间在支架正中间,使用推拉力计(RZ-5,AIKON,Japan)在第 2 节间中间垂直缓慢地向下施加压力直至茎秆断裂,读取推拉力计数值,记录为第 2 节间的抗折力(N)^[11]。利用以下方法计算茎秆力学指标,计算公式参照 Zheng 等的研究。(1)全株加在基部节间的弯曲力矩(WP ,g/cm): $WP = SL \times FW$ (FW 为基部节间折断部位到主茎顶端的鲜重, SL 为基部节间折断部位到主茎顶端的距离);(2)折断弯矩(M ,g/cm): $M = F \times L/4$ (F 为基部被测节间折断时所施加的力, L 为 2 点间的距离);(3)倒伏指数(LI ,%): $LI = WP/M \times 100\%$ ^[12]。

1.4 统计分析

采用 Excel 2016 录入数据,使用 SPSS 23.0 进行统计分析,将结果通过 OriginPro 2021 进行作图。

2 结果与分析

2.1 产量及其构成因素

由表 2 可知,不同处理下理论产量和实际产量均表现为 CI > SDI40d > SDI65d。与 CI 处理相比,

SDI40d 处理实际产量下降了 9.50%,SDI65d 处理减产了 13.20%。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理水稻实际产量下降了 4.09%。方差分析结果表明,实际产量 CI 处理与 SDI40d、SDI65d 处理之间差异均显著,SDI40d 与 SDI65d 处理之间差异不显著。与 CI 处理相比,SDI40d 处理的穗粒数下降了 12.80%,结实率下降了 6.55 百分点;SDI65d 处理穗粒数下降了 12.90%,结实率下降了 10.38 百分点。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理结实率下降了 3.83 百分点。

表 2 不同半深水灌溉持续时间对水稻产量及其构成因素的影响

处理	有效穗数 (万穗/hm ²)	穗粒数 (粒/穗)	结实率 (%)	千粒重 (g)	理论产量 (t/hm ²)	实际产量 (t/hm ²)
CI	307.69a	147.65a	95.85a	25.13a	10.93a	10.00a
SDI40d	330.92a	128.75b	89.30b	25.02a	9.50b	9.05b
SDI65d	326.13a	128.60b	85.47c	25.02a	8.98b	8.68b

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

2.2 不同半深水灌溉持续时间对稻米品质的影响

2.2.1 不同半深水灌溉持续时间对稻米加工品质和外观品质的影响 由表 3 可知,稻米的糙米率、精米率和整精米率均在 CI 处理下最高,SDI65d 处理下最低,其中精米率和整精米率在各处理间差异显著。SDI65d 处理下的垩白粒率和垩白度最高,CI 处理下最低,垩白粒率和垩白度在不同处理间的差异均达到显著水平。与 CI 处理相比,SDI40d 处理下稻米精米率和整精米率分别下降了 1.46、1.30 百分点;SDI65d 处理下稻米精米率和整精米率分别下降了 2.70、3.47 百分点。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下稻米精米率和整精米率分别下降了 1.24、2.17 百分点。

表 3 不同半深水灌溉持续时间对稻米加工品质和外观品质的影响

处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	垩白粒率 (%)	垩白度 (%)
CI	83.33a	74.73a	70.00a	12.47c	1.53c
SDI40d	83.10ab	73.27b	68.70b	22.75b	6.58b
SDI65d	82.90b	72.03c	66.53c	26.73a	7.44a

2.2.2 不同半深水灌溉持续时间对蛋白组分含量和直链淀粉含量的影响 由表 4 可知,在蛋白及其组分含量方面,清蛋白含量在 CI 处理与 SDI40d、SDI65d 处理间差异显著,而球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋

白和总蛋白含量在各处理之间差异均不显著。稻米的清蛋白、球蛋白、醇溶蛋白、谷蛋白和总蛋白含量从低到高依次是 CI、SDI40d、SDI65d。与 CI 处理相比,SDI40d 处理谷蛋白和总蛋白含量分别增加了 2.28% 和 3.38%,SDI65d 处理谷蛋白和总蛋白含量分别增加了 13.87% 和 13.98%。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下谷蛋白和总蛋白含量分别增加了 11.32% 和 10.26%。不同处理下稻米的直链淀粉含量由 18.15% 升至 20.47%,大小顺序表现为 CI < SDI40d < SDI65d,SDI65d 与 SDI40d 处理差异显著。

表 4 不同半深水灌溉持续时间对蛋白组分含量和直链淀粉含量的影响

处理	清蛋白含量 (mg/g)	球蛋白含量 (mg/g)	醇溶蛋白含量 (mg/g)	谷蛋白含量 (mg/g)	总蛋白含量 (mg/g)	直链淀粉含量 (%)
CI	2.19b	3.90a	5.01a	49.90a	61.01a	18.15b
SDI40d	2.72a	3.91a	5.40a	51.04a	63.07a	19.12b
SDI65d	2.86a	4.17a	5.69a	56.82a	69.54a	20.47a

2.2.3 不同半深水灌溉持续时间对稻米食味值的影响 由表 5 可知,CI 处理的外观、硬度、黏度、平衡度和食味值均与 SDI40d、SDI65d 处理差异显著,而 SDI40d 与 SDI65d 处理差异不显著。与 CI 处理相比,SDI40d 处理的外观、平衡度和食味值分别下降了 32.80%、34.68% 和 19.66%,SDI65d 处理的外观、平衡度和食味值分别下降了 36.80%、37.90% 和 21.88%。与 CI 处理相比,稻米的外观、平衡度和食味值在 SDI40d 处理下表现出不同程度的下降趋势,且在 SDI65d 处理下下降幅度更大。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理的外观、平衡度和食味值分别下降了 5.95%、4.94% 和 2.77%。

表 5 不同半深水灌溉持续时间对稻米食味值的影响

处理	外观	硬度	黏度	平衡度	食味值
CI	6.25a	6.60b	6.25a	6.20a	67.40a
SDI40d	4.20b	7.65a	4.30b	4.05b	54.15b
SDI65d	3.95b	7.80a	4.15b	3.85b	52.65b

2.2.4 不同半深水灌溉持续时间对稻米 RVA 谱特征值的影响 由表 6 可知,CI 处理的峰值黏度、热浆黏度、最终黏度和糊化温度与 SDI40d、SDI65d 处理之间差异显著,而崩解值、回复值在各处理间差异不显著。消减值 CI 处理与 SDI65d 处理差异显著,SDI40d 处理下与 CI、SDI65d 处理差异不显著。与 CI 处理相比,SDI40d 处理的热浆黏度、消减值、

糊化温度分别增加 6.18%、6.00% 和 2.46%，崩解值降低 6.00%，SDI65d 处理分别增加 7.01%、8.76% 和 3.05%，崩解值降低 12.52%。与 SDI40d

处理相比，SDI65d 处理的热浆黏度、消减值、糊化温度分别增加 0.78%、2.60% 和 0.58%。

表 6 不同半深水灌溉持续时间对稻米 RVA 谱特征值的影响

处理	峰值黏度 (cP)	热浆黏度 (cP)	崩解值 (cP)	最终黏度 (cP)	消减值 (cP)	回复值 (cP)	糊化温度 (℃)
CI	2 016.17b	1 596.00b	480.33a	2 337.00b	302.67b	741.67a	87.88b
SDI40d	2 159.33a	1 694.67a	451.50a	2 462.00a	320.83ab	767.67a	90.04a
SDI65d	2 175.00a	1 707.83a	420.17a	2 504.17a	329.17a	768.67a	90.56a

2.3 水稻茎秆抗倒性

2.3.1 水稻茎秆形态学特征 由表 7 可知,CI 处理的单穗重、茎粗、壁厚与 SDI40d、SDI65d 处理间差异不显著。CI 处理的株高、重心高度与 SDI65d 处理间差异显著,SDI40d 处理的株高、重心高度与 CI、SDI65d 处理间差异均不显著。SDI40d、SDI65d 处理的水稻株高分别为 100.07、101.20 cm,比 CI 处理分别上升了 3.99% 和 5.16%。SDI40d、SDI65d 处理的水稻重心高度分别为 46.47、48.90 cm,比 CI 处理分别上升了 7.32%、12.93%。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下株高和重心高度分别上升了 1.13% 和 5.23%。株高随半深水灌溉持续时间变长而增加;茎粗和壁厚随半深水灌溉持续时间变长而降低,但未到达显著水平。SDI40d、SDI65d 处理株高、重心高度相较于 CI 处理均有所上升,但 SDI40d 处理株高和重心高度小于 SDI65d 处理;SDI40d 处理的茎粗和壁厚比 SDI65d 处理大。

表 7 不同半深水灌溉持续时间对水稻茎秆形态特性的影响

处理	株高 (cm)	单穗重 (g)	重心高度 (cm)	茎粗 (mm)	壁厚 (mm)
CI	96.23b	5.05a	43.30b	5.28a	0.88a
SDI40d	100.07ab	4.43a	46.47ab	5.19a	0.75a
SDI65d	101.20a	4.01a	48.90a	4.50a	0.72a

注:茎粗和壁厚均为基部第 2 节间。

由图 2 可知,CI 处理下长轴外径与 SDI40d、SDI65d 处理均差异显著,而短轴外径、长轴内径和短轴内径在不同处理间差异均不显著。随着半深水灌溉持续时间变长,长轴外径、短轴外径、长轴内径和短轴内径均增加。SDI40d 处理下的长轴外径、短轴外径、长轴内径和短轴内径均小于 SDI65d 处理。对于节间长度,CI 处理下第 3 节间与 SDI65d 处理之间差异显著,第 3 节间 SDI40d 处理与 CI、SDI65d 处理差异均不显著;CI 处理与 SDI40d、SDI65d 处理在其他节间均无显著差异(图 3)。

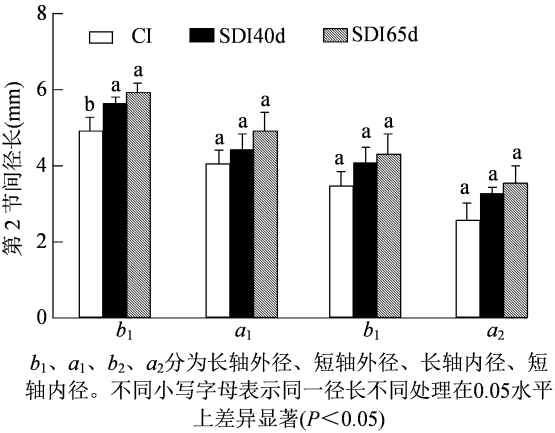
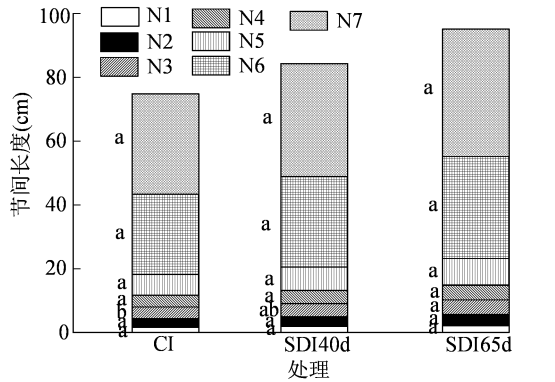


图 2 不同半深水灌溉持续时间下水稻的基部第 2 节间径长



N1~N7 表示第 1 节间到第 7 节间。不同小写字母表示同一节间不同处理在 0.05 水平上差异显著(P<0.05)

图 3 不同半深水灌溉持续时间下水稻的节间长度

2.3.2 水稻茎秆力学特征 由表 8 可知,倒伏指数随半深水灌溉持续时间变长而升高,但各处理间差异并未达到显著水平。SDI40d、SDI65d 处理下折断弯矩较 CI 处理分别降低了 19.20% 和 25.48%,且均与 CI 处理达到显著差异水平。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下折断弯矩降低了 7.77%。SDI40d 和 SDI65d 处理下弯曲力矩较 CI 处理分别降低了 15.20% 和 21.05%。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下弯曲力矩降低了 6.90%。SDI40d、SDI65d 处理下抗折力分别为 11.63、10.72 N,与 CI 处理相比

分别降低了 19.18% 和 25.50%。与 SDI40d 处理相比,SDI65d 处理下抗折力降低了 7.82%。CI 处理的

抗折力与 SDI40d、SDI65d 处理间达到显著差异水平。

表 8 不同半深水灌溉持续时间对第 2 节间力学特性和倒伏指数的影响

处理	抗折力 (N)	折断部位至穗顶 的鲜重(g)	折断部位至穗顶的 距离(cm)	折断弯矩 (g/cm)	弯曲力矩 (g/cm)	倒伏指数 (%)
CI	14.39a	18.60a	94.97a	2 878.00a	1 766.62a	61.43a
SDI40d	11.63b	15.21a	98.08a	2 325.33b	1 498.07a	64.88a
SDI65d	10.72b	14.18a	98.44a	2 144.67b	1 394.67a	64.99a

3 讨论

稻渔综合种养方式是近年来发展迅速的一种稻作方式,其经济效益相对较好且具有生态环境友好特点。为了同时满足鱼、虾、蟹、鳖等动物的养殖需求,这种方式需要在水稻的生长发育过程中营造出一定时期的半深水环境^[13]。一般研究认为,稻渔共生种养下水稻稻米品质较传统水稻单作有所下降;相较传统水稻常规浅湿灌溉模式,稻渔共生种养下水稻需要长期维持半深水状态,倒伏指数更高,但不同半深水灌溉持续时间对水稻稻米品质及抗倒性的影响并未明晰。因此,本试验对比了稻渔综合种养维持半深水灌溉 40 d 和 65 d 以及水稻常规浅湿灌溉方式“浅、搁、湿、露、晒”下的水稻稻米品质和抗倒伏性状的表现。李阳生等的研究表明,与营养生长相比,淹涝胁迫对水稻的生殖生长影响更大^[14]。武孟祥的研究表明,在抽穗开花期如果遭遇到淹涝胁迫会导致水稻植株的叶片数减少,从而使其光合作用受到削弱,穗部同化物积累也会降低,同时还会导致一些主茎和大分蘖的穗发生腐烂,从而导致穗数、结实率、千粒重下降,最终造成减产^[15]。本试验的半深水灌溉持续时间造成水稻的穗粒数、结实率明显下降,千粒重略微下降,最终造成理论产量和实际产量出现明显下降。本研究结果表明,与 CI 相比,半深水灌溉处理下水稻实际产量下降 9.50% ~ 13.20%,SDI65d 处理的实际产量下降幅度大于 SDI40d 处理。

水分管理对稻米品质的影响已被广泛报道。胡明明等的研究表明,在水稻孕穗期遭受淹涝胁迫会导致稻米的加工品质、蒸煮食味品质下降^[16]。姬静华等的研究表明,造成水稻加工品质下降的原因可能是淹涝胁迫破坏了水稻剑叶的叶绿体,减弱了其光合能力,阻碍光合产物向穗部运输,导致灌浆充实不良,垩白粒率和垩白度增加^[17]。陈旭的研究表明,淹水可能阻碍植物进行呼吸作用积累过多的

CO₂,抑制水稻对土壤中氮素的吸收,从而导致加工品质下降^[18]。吕艳梅的研究表明,淹水条件下,水稻中下部无法吸收到光照,出现籽粒灌浆期光照不足的情况,同时还会出现水稻叶片光合能力不足的情况,因此会造成水稻加速衰老的现象,同时还会加快水稻籽粒灌浆进程,导致籽粒灌浆不良,进而引起食味品质的下降^[19]。本研究中半深水灌溉持续时间会降低水稻的稻米品质,与吕艳梅在淹水条件下稻米品质变劣的研究情况^[19]基本一致。SDI40d 处理的加工品质、食味值相比 CI 处理均有所下降,但下降幅度小于 SDI65d 处理。与 CI 相比,SDI40d 处理下垩白粒率、各蛋白组分含量、直链淀粉含量明显升高,但上升幅度小于 SDI65d 处理。SDI40d 处理热浆黏度、最终黏度、消减值和糊化温度小于 SDI65d 处理;崩解值大于 SDI65d 处理。这可能是 SDI40d 处理半深水灌溉持续时间短于 SDI65d 处理,受水分胁迫影响相对较小,SDI40d 处理下的叶片光合能力强于 SDI65d 处理,光合产物的合成和转运完成度较高,导致 SDI40d 处理的垩白粒率和垩白度比 CI 增加,但小于 SDI65d 处理。此外,DI40d 处理光照比 SDI65d 处理充足,籽粒发育比 SDI65d 处理更充分,致使 SDI40d 处理食味值较 SDI65d 高。

半深水灌溉对水稻茎秆抗倒性的研究鲜有报道。倒伏指数评价方法将茎秆的株高、茎粗、壁厚等形态学指标和折断弯矩、弯曲力矩等物理参数紧密结合,更加符合大田生产中茎倒伏的原理,因此该方法具有较广泛的应用价值^[20]。郭相等等的研究表明,相比于常规灌溉,10 ~ 16 cm 灌溉深度下水稻的茎粗和壁厚均呈现下降趋势,第 2 节间长度增长明显^[21]。半深水灌溉处理模式下,折断部位至穗顶的鲜重和距离均呈现下降趋势,这就导致弯曲力矩也随之降低。当水稻主茎受到外力时,它会弯曲变形并发生折断,而抗折力则是维持弯曲变形的动力来源,因此折断弯矩的大小主要取决于水稻主茎

基部第 2 节间的抗折力,半深水灌溉处理模式下,与 CI 处理相比,SDI40d、SDI65d 处理的第 2 节间的抗折力显著下降,且降幅大于弯曲力矩的降幅,导致水稻倒伏指数升高。SDI40d 处理单穗重、折断部位至穗顶的鲜重比 SDI65d 处理大,SDI40d 处理与 SDI65d 处理折断部位至穗顶的距离相近,因此 SDI40d 处理弯曲力矩大于 SDI65d 处理。此外 SDI40d 处理折断弯矩大于 SDI65d 处理,最终导致 SDI40d 处理茎秆抗倒伏能力强于 SDI65d 处理。SDI40d 处理弯曲力矩和折断弯矩均大于 SDI65d 处理,且弯曲力矩下降幅度与折断弯矩接近,因此 SDI40d 处理和 SDI65d 处理倒伏指数差异较小。

此外,本研究表明由于长期处在半深水灌溉模式下,水稻易形成高位分蘖,一方面消耗植株中的养分,减少叶片光合产物向穗部运输,导致籽粒灌浆不良;另一方面降低主茎的节间充实度,造成水稻抗倒性变差。已有研究表明,在深水灌溉下由于长期处在缺氧条件下,水稻的中下部节间会产生大量的乙烯,导致中下部节间中赤霉素含量升高,引起中下部节间长度增加^[22-24]。本试验中发现在半深水灌溉模式下,水稻的株高整体呈现上升趋势,进一步分析发现,主要原因是半深水灌溉处理提高了水稻的前 5 节间总长度。不同半深水灌溉处理下株高表现为 $CI < SDI40d < SDI65d$, CI 处理和 SDI65d 处理之间第 3 节间长度差异显著,SDI40d 处理与 CI 处理、SDI65d 处理的第 3 节间长度无显著差异;CI 处理与 SDI40d、SDI65d 处理在其他节间长度上均无显著差异。这主要是因为 SDI65d 处理淹水时间长,节间充实度低,水稻抗倒伏能力较 SDI40d 处理差。然而,本研究未探究其他环境条件如温度、光照等对稻米品质的影响及茎秆化学成分对水稻倒伏特性的影响。因此,半深水灌溉持续时间对水稻生产力的影响机制还需要进一步研究。

4 结论

半深水灌溉下穗粒数和结实率明显下降,千粒重略微下降,导致扬粳 805 产量降低,且下降幅度随半深水灌溉持续时间增加而增大。与 CI 处理相比,半深水灌溉下扬粳 805 的糙米率、精米率、整精米率下降,垩白粒率、垩白度增加,导致外观品质和加工品质变劣;食味值降低,直链淀粉含量和各蛋白组分含量升高,RVA 特征谱值热浆黏度、最终黏度升高,崩解值降低。这最终导致半深水灌溉下扬粳

805 的稻米品质变劣,且随着半深水灌溉持续时间变长,扬粳 805 的稻米品质会持续变劣。另外,半深水灌溉下,扬粳 805 的株高、重心高度整体呈上升趋势,节间的茎粗、壁厚、茎秆的抗折力呈下降趋势,导致倒伏指数上升;2 个不同半深水灌溉持续时间处理下,扬粳 805 的倒伏指数接近。综上,半深水灌溉处理会降低扬粳 805 的产量、品质和抗倒伏能力,且随着半深水灌溉持续时间变长,扬粳 805 的产量、品质和抗倒伏能力会持续下降。因此,未来的研究需进一步探究半深水灌溉持续时间影响水稻产量、品质和抗倒伏能力下降的机制,注重筛选适宜稻渔综合种养下半深水灌溉的水稻品种,阐明稻、渔协同丰产优质的半深水灌溉起止时间。

参考文献:

- [1]唐建军,李巍,吕修涛,等.中国稻渔综合种养产业的发展现状与若干思考[J].中国稻米,2020,26(5):1-10.
- [2]Xu Q, Liu T, Guo H L, et al. Conversion from rice - wheat rotation to rice - crayfish coculture increases net ecosystem service values in Hung - tse Lake area, east China[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 319: 128883.
- [3]杨建昌,王志琴,朱庆森.不同土壤水分状况下氮素营养对水稻产量的影响及其生理机制的研究[J].中国农业科学,1996,29(4):59-67.
- [4]任桢.不同生育时期淹涝胁迫对水稻生长、产量与品质的影响及其生理机理研究[D].扬州:扬州大学,2022:68-80.
- [5]赵启辉.分蘖期淹涝胁迫对水稻农艺和品质性状及生理特性的影响[D].南昌:江西农业大学,2013:30-33.
- [6]吴晓然.超级杂交籼稻抗倒能力比较及其对氮素的响应[D].南京:南京农业大学,2015:1-5.
- [7]张巫军.氮素对梗稻抗倒伏性的影响及其生理机制[D].南京:南京农业大学,2015:1-4.
- [8]宁金花,霍治国,陆魁东,等.不同生育期淹涝胁迫对杂交稻形态特征和产量的影响[J].中国农业气象,2013,34(6):678-684.
- [9]吴海兵,刘道红,钟鸣,等.水分管理和钾肥施用对水稻产量和抗倒伏性的影响[J].作物杂志,2019(1):127-133.
- [10]龙瑞平,张朝钟,戈芹英,等.施氮量对高海拔机插梗稻产量及群体生长特性的影响[J].中国土壤与肥料,2018(2):89-95.
- [11]姜洁锋,杨欧,江冰,等.利用水稻茎秆充实突变体创建新材料的抗倒伏评价[J].农业与技术,2021,41(17):24-27.
- [12]Zhang W J, Li G H, Yang Y M, et al. Effects of nitrogen application rate and ratio on lodging resistance of super rice with different genotypes[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2014, 13(1): 63-72.
- [13]陈林荣.半深水灌溉对杂交籼稻茎秆抗倒性的影响及其生理机制研究[D].扬州:扬州大学,2022:1-3.
- [14]李阳生,李绍清,李达模,等.杂交稻与常规稻对涝渍环境适应能力的比较研究[J].中国水稻科学,2002,16(1):45-51.

李雅飞,冯 琰,祁利潘,等. 减施化肥配施不同生物有机肥对马铃薯的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(9):65-71.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.09.009

减施化肥配施不同生物有机肥对马铃薯的影响

李雅飞,冯 琰,祁利潘,王 磊,王 宽,罗亚婷,尹 江,盛雅媛

(河北北方学院,河北张家口 075000)

摘要:以马铃薯冀张薯 12 号为试验材料,设置 10 个处理进行随机区组试验,其中 T1、T2、T3、T4、T5 处理为化肥用量递减的单一施肥处理,其肥料用量分别为 1 950、1 650、1 350、1 050、750 kg/hm²,T6、T7、T8、T9、T10 处理则是在施用 750 kg/hm² 化肥的基础上配施生物有机肥海聚收海藻复混肥、多葆复合微生物肥料、仟金方微生物复合肥、归璞微生物菌剂、发酵鸡粪肥。研究在减施化肥的同时配施一定量的生物有机肥对马铃薯品质和产量的影响,探索化肥和生物有机肥与马铃薯产量和品质的相关性,可为马铃薯高产优质栽培提供理论依据与实际生产指导。结果显示,生物有机肥的配施可在一定程度上提高马铃薯的产量。其中,T10 处理的产量最高,达到 51.75 t/hm²,与单施化肥处理相比,增幅在 3.5%~15.7% 之间;T9 处理次之,为 50.19 t/hm²,较单施化肥处理增加 0.4%~12.2%。生物有机肥的配施还可以提升马铃薯块茎的品质,其中 T10 处理效果最好,其淀粉、粗蛋白、干物质含量较 T1~T5 单施化肥处理分别增加了 6.8%、9.8%、3.0%、2.9%、5.1%、14.4%、35.8%、50.3%、0.8%、16.6% 和 2.7%、3.2%、2.4%、2.1%、3.4%。综上所述,减施化肥配施生物有机肥可在一定程度上增加马铃薯产量并提高马铃薯品质。

关键词:马铃薯;产量;品质;化学肥料;生物有机肥

中图分类号:S532.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)09-0065-07

马铃薯作为四大主粮作物之一^[1],对保证人类粮食安全十分重要,其食用部分为地下块茎,产量受生长环境、栽培模式、管理方式、化学肥料与农药等的调控。肥料主要作用于土壤,能够及时补充植

株缺乏的元素,在调节作物生长发育的同时促进作物高产^[2-7]。近年来,人们为了获得高产,生产中逐渐增大化肥用量。随着化学肥料的过度施用,有害物质残留不断增加,土质变差,使得植物生长发育受限,进而影响产量^[8]。谢志良等在棉花种植中发现,过量施肥会使棉花的根系发育缓慢、品质下降^[9-11]。同时也有研究表明,氮肥过量施用会引起马铃薯产量下降^[12]。

因此,精确化肥用量,优化施肥方案,是提高马铃薯产量与品质的关键之一。在科学减施化肥的同时配施一定的生物有机肥有助于作物的增产^[13-15]。生物有机肥不但能够抑制土壤病菌的繁

收稿日期:2023-08-10

基金项目:国家现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-09);
河北省重点研发计划(编号:21326320D);河北省农业科技成果转化资金(编号:21626316D)。

作者简介:李雅飞(2000—),女,河北承德人,硕士研究生,主要从事马铃薯栽培生理研究。E-mail:Li-yafei868@163.com。

通信作者:冯 琰,硕士,副研究员,主要从事马铃薯新品种选育及高产栽培技术研究。E-mail:fengyanm@sina.com。

[15]武孟祥. 渍涝胁迫对水稻生长发育及产量结构的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2015:10-19.

[16]胡明明,龚 静,兰 艳,等. 不同生育时期水分胁迫对水稻产量及品质的影响[J]. 江西农业大学学报,2021,43(5):971-982.

[17]姬静华,霍治国,唐力生,等. 早稻灌浆期淹水对剑叶理化特性及产量和品质的影响[J]. 中国水稻科学,2016,30(2):181-192.

[18]陈 旭. CO₂ 浓度、施氮量和密度对杂交稻稻米品质的影响:FACE 研究[D]. 扬州:扬州大学,2016:19-25.

[19]吕艳梅. 两个优质水稻品种孕穗至灌浆期高温干旱对品质和产量性状的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2015:56-58.

[20]Zhang J,Li G H,Song Y P,et al. Lodging resistance characteristics of high-yielding rice populations[J]. Field Crops Research,

2014,161:64-74.

[21]郭相平,黄双双,王振昌,等. 不同灌溉模式对水稻抗倒伏能力影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报,2017,36(5):1-5.

[22]Sauter M,Kende H. Gibberellin-induced growth and regulation of the cell division cycle in deepwater rice[J]. Planta,1992,188(3):362-368.

[23]Hattori Y,Nagai K,Furukawa S,et al. The ethylene response factors *SNORKEL1* and *SNORKEL2* allow rice to adapt to deep water[J]. Nature,2009,460:1026-1030.

[24]Singh S,MacKill D J,Ismail A M. Responses of SUB1 rice introgression lines to submergence in the field: yield and grain quality[J]. Field Crops Research,2009,113(1):12-23.