

黄富春,周乾顺,朱建强,等.不同田面水深与氮素运筹处理对水稻产量及生理特性的影响[J].江苏农业学报,2025,41(9):1740-1750.

doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.09.009

# 不同田面水深与氮素运筹处理对水稻产量及生理特性的影响

黄富春<sup>1</sup>, 周乾顺<sup>1,2</sup>, 朱建强<sup>1</sup>, 邹宇傲<sup>1,3</sup>, 鲁旭鹏<sup>1</sup>, 朱正涛<sup>1</sup>, 吴启侠<sup>1</sup>

(1.农业农村部长江中游作物绿色高效生产重点实验室(部省共建)/涝渍灾害与湿地农业湖北省重点实验室/长江大学农学院,湖北荆州434025; 2.湖北省荆州市江陵县资市镇农业农村服务中心,湖北江陵434100; 3.湖北省松滋市农村社会事业发展中心,湖北松滋434200)

**摘要:** 合理进行田面水深管理对水稻正常生长具有重要意义,为揭示田面水深与氮素运筹处理对水稻生长特性、生理代谢及产量的影响,本研究设置了不同的氮肥运筹模式和田面水深处理。2种氮肥运筹模式为:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,记为FFP;基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,记为CRBF。水稻分蘖期田面水深按5~7 cm(W1)、9~11 cm(W2)管理,孕穗期按9~11 cm(W3)、14~16 cm(W4)管理。结果表明,水稻叶片的过氧化物酶(POD)活性、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性以及丙二醛(MDA)含量整体随田面水深增加而升高,水稻的分蘖数和叶片叶绿素相对含量(SPAD值)整体随田面水深增加而降低,株高则随田面水深的增加而增加;最终导致有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重及实际产量总体下降。在相同田面水深、水位控制时间下,与FFP氮素运筹模式相比,CRBF氮素运筹模式可抑制分蘖期水稻叶片CAT和SOD的过度激活并增强POD活性,在孕穗期则通过降低CAT、SOD、POD的活性,优化活性氧清除机制从而降低MDA含量,提高了分蘖数和叶片SPAD值。在产量方面,CRBF氮素运筹模式则通过提高千粒重显著提高产量。综上,CRBF氮素运筹模式能有效缓解淹水胁迫的负面效应,减轻水稻涝害。

**关键词:** 水稻; 田面水深管理; 氮素运筹; 生理指标; 产量

中图分类号: S511 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2025)09-1740-11

## Effects of field water levels and nitrogen management regimes on rice yield and physiological characteristics

HUANG Fuchun<sup>1</sup>, ZHOU Qianshun<sup>1,2</sup>, ZHU Jianqiang<sup>1</sup>, ZOU Yu'ao<sup>1,3</sup>, LU Xupeng<sup>1</sup>, ZHU Zhengtao<sup>1</sup>, WU Qixia<sup>1</sup>

(1.MARA Key Laboratory of Sustainable Crop Production in the Middle Reaches of the Yangtze River (Co-construction by Ministry and Province)/Hubei Key Laboratory of Waterlogging Disaster and Agricultural Use of Wetland/College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China; 2.Zishi Town Agricultural and Rural Service Center, Jiangling County, Jingzhou City, Hubei Province, Jiangling 434100, China; 3.Hubei Songzi Rural Social Development Center, Songzi 434200, China)

收稿日期:2025-07-24

基金项目:国家自然科学基金项目(U21A2039)

作者简介:黄富春(2001-),男,广西防城港人,硕士研究生,主要从事河网湖区水土环境与农业研究。(E-mail)2023710807

@ yangtzeu.edu.cn

通讯作者:吴启侠,(E-mail)qixiawu@ yangtzeu.edu.cn

**Abstract:** Appropriate management of paddy water depth is critical for ensuring normal rice growth. This study investigated the effects of field water levels and nitrogen management regimes on rice growth traits, physiological metabolism, and yield by implementing different nitrogen application regimes and water depth treatments. Two nitrogen management strategies were applied: a conventional

fertilization pattern (FFP), with basal fertilizer (urea) : tillering fertilizer (urea) = 7 : 3; and a controlled-release basal fertilization pattern (CRBF), with basal fertilizer (controlled-release urea) : tillering fertilizer (urea) = 7 : 3. During the tillering stage, water depths were maintained at 5–7 cm (W1) and 9–11 cm (W2). During the booting stage, depths were maintained at 9–11 cm (W3) and 14–16 cm (W4). The results indicated that the activities of peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT), as well as malondialdehyde (MDA) content in rice leaves, generally increased with increasing water depth. In contrast, tiller number and relative chlorophyll content (SPAD value) decreased, while plant height increased. These physiological and morphological changes ultimately led to overall reductions in the number of effective panicles, grains per panicle, seed-setting rate, 1 000-grain weight, and actual grain yield. Under the same water depth and management duration, compared with FFP, the CRBF regime suppressed the excessive activation of CAT and SOD and enhanced POD activity during the tillering stage. At the booting stage, CRBF reduced the activities of CAT, SOD, and POD, thus optimizing the reactive oxygen species (ROS) scavenging mechanism, lowering MDA content, and consequently increasing tiller number and SPAD value. In terms of yield, CRBF significantly enhanced grain production by increasing the 1 000-grain weight. In conclusion, the CRBF nitrogen management mode effectively mitigates the adverse effects of waterlogging stress and alleviates flood damage in rice.

**Key words:** rice; field water level management; nitrogen management; physiological indicators; yield

水稻在中国的粮食生产中占据核心位置,其种植技术一直处于世界领先地位,并在高产、提效、优质等方面取得了显著成就<sup>[1-2]</sup>。在整个生育期,水稻对水分的响应较为敏感,尤其是在分蘖期和孕穗期等关键生育期<sup>[3]</sup>。前人的研究表明,保持较高的田面水深会导致水稻严重减产,其主要原因是单株分蘖数锐减,进而导致穗数下降,穗数的下降幅度随田面水深的上升而增加<sup>[4]</sup>。因此,田面水深是否合理直接影响水稻生长发育及最终的产量。江汉平原作为湖北省的核心农业区,是中国重要的商品粮生产基地,水稻常年种植面积达 $9 \times 10^5$  hm<sup>2</sup>,对该区域粮食安全具有战略支撑作用<sup>[5]</sup>。然而,中稻与油菜/小麦轮作的模式是江汉平原的重要种植模式,该地6~8月暴雨频发,此时正值水稻生长的中后期,暴雨提高了水稻分蘖期和孕穗期的田面水深,造成水稻减产<sup>[6-8]</sup>。因此,探索适应江汉平原气候特点的合理田面水深管理策略,对于减轻涝害损失、稳定水稻生产至关重要。控释尿素是指能够延长养分释放的时间,并且养分释放速率小于速效肥的一种肥料,通过减少高浓度速效肥对稻田造成的胁迫,提高水稻的产量<sup>[9-10]</sup>。在胁迫环境下,适量施用控释尿素可以有效提高水稻有效穗数、茎蘖成穗率、千粒重、产量、氮素利用率及稻米食味品质<sup>[11-12]</sup>。郭金金<sup>[13]</sup>研究发现,普通尿素与控释尿素配施能显著提高冠层叶片活力,促进叶片生长发育,进而提高作物的产量。特别是在可能遭遇水分胁迫的环境中,控释尿素因其持续、稳定的氮素供应特性,被认为具有缓解高水位造成的养分吸收、运转障

碍的潜力,可减轻涝害对水稻生理功能造成的负面影响。前人的研究表明,氮素运筹以及不同的水分管理方式与氮素的积累、运转、分配有着紧密联系并且存在显著的互作效应<sup>[14-16]</sup>。然而,关于在水田环境下如何协调氮素运筹与水分之间的关系,以及在分蘖期和孕穗期遭遇水分胁迫对水稻生理特性和产量影响的研究较少。为此,本研究拟通过不同的田面水深和氮素运筹处理,探究水肥耦合对水稻生理特性以及产量的影响,旨在为江汉平原协调水分管理与氮素高效利用提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点与材料

试验于2024年在长江大学试验基地(30°21'N, 112°09'E)进行,该试验基地具有典型的亚热带季风气候特征。试验在可控制灌排条件的有底测坑中进行,所用测坑的有效种植面积为4 m<sup>2</sup> (2 m×2 m),测坑深度为1 m。测坑内土层厚度为100 cm,土壤类型为中壤土,取自旱地,回填时按等土壤密度分层回填。土壤的基本特性如下:pH值7.05,有机质含量27.02 g/kg,全氮含量2.13 g/kg,全磷含量0.58 g/kg,全钾含量11.62 g/kg,碱解氮含量104.23 mg/kg,速效磷含量11.73 mg/kg,速效钾含量162.15 mg/kg。控释尿素由北京市缓控释肥料工程技术研究中心研制,其氮素含量为43.00%,包膜率为2.69%,静水释放期为90~120 d;普通尿素的有效养分占比为46%。磷肥采用过磷酸钙,钾肥采用

氯化钾,有效养分占比分别为 12% 和 60%。供试水稻品种为神 9 优 28,于 2024 年 5 月 18 日播种育秧,6 月 13 日移栽到测坑中,栽种行距为 25 cm,株距为 20 cm,每穴栽插 3 棵基本苗。

## 1.2 试验设计

在进行水肥耦合试验的 2 个生育期设置不同的田面水深处理:水稻分蘖期为 5~7 cm (W1)、9~11 cm (W2),孕穗期为 9~11 cm (W3)、14~16 cm (W4)。其余生育期依据当地栽培习惯进行水位管理,以整个生育期保持常规水位作为对照(W0),不同生育期的水分管理见表 1。除晒田期外,每天对各处理水位进行监测,早晨灌一次清水,使田面水深维持处理所需的高度,收获前自然落干。

表 1 不同生育期的水分管理

Table 1 Water management at different growth stages

处理	各生育期田面水深 (cm)			
	苗期	分蘖期	孕穗期	成熟期
W0	1~2	2~4	4~6	2~4
W1	1~2	5~7	4~6	2~4
W2	1~2	9~11	4~6	2~4
W3	1~2	2~4	9~11	2~4
W4	1~2	2~4	14~16	2~4

设置 2 种氮素运筹处理:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3(FFP);基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3(CRBF)。2 种氮素运筹处理的基肥于移栽前 1 d 一次性施入,移栽 7 d 后施入分蘖肥。所有处理基肥按纯氮用量 180 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 75 kg/hm<sup>2</sup>和钾肥(K<sub>2</sub>O) 100 kg/hm<sup>2</sup>折算施用,均于移栽前 1 d 一次性作底肥施用。水肥处理每个处理 3 次重复,共 30 个测坑,种植前按照当地耕作习惯进行翻耕,6 月 13 日移栽,9 月 15 日收获,按照当地种植习惯进行田间管理。

## 1.3 测定项目及方法

本试验在田面水深处理开始后的第 7 d、14 d 和 21 d,对以下指标进行周期性测定:(1)水稻形态指标:调查记录各处理的水稻分蘖数和株高;(2)叶片抗性生理指标:于各测坑选取 3 张长势一致的水稻叶片,用液氮速冻处理后置于-80 °C 超低温冰箱进行保存,随后参照前人的方法<sup>[17-18]</sup>测定水稻叶片丙二醛(MDA)含量以及过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶

(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)的活性;(3)叶片叶绿素相对含量(SPAD)值:使用 SPAD-502 叶绿素仪,在各处理选取 9 株代表性水稻植株,测定其最新的完全展开叶上下三分之一处以及中部的 SPAD 值,并避开叶脉,取 3 点的平均值作为该叶片的 SPAD 值。

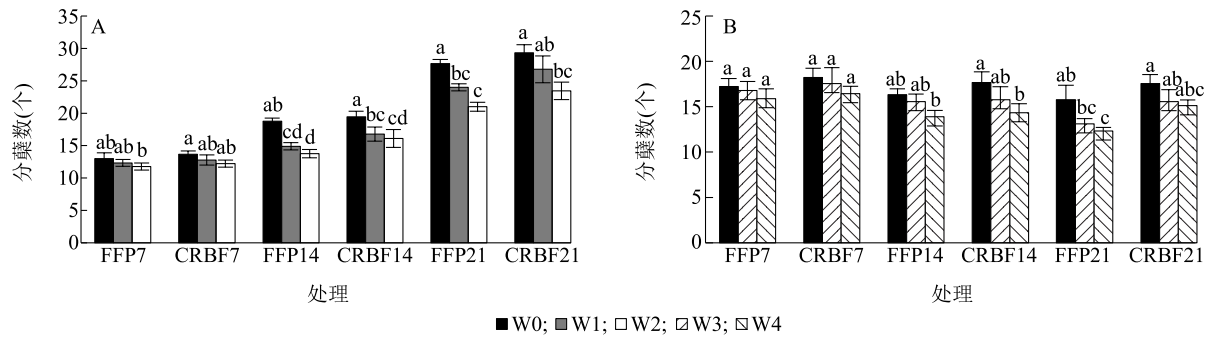
于成熟期每个测坑选定约 3 穴水稻,收获后晾晒干进行考种,计算水稻成熟后的有效穗数、每穗粒数、结实率和千粒重等产量构成因素。每个测坑单独收获,晒干除杂后称量重量,作为每个测坑的水稻实际产量。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同田面水深和氮素运筹处理对水稻分蘖数、株高的影响

如图 1 所示,分蘖期、孕穗期水稻的分蘖数整体随田面水深增加而减少。在分蘖期 FFP 氮素运筹模式下,当水位控制时间为 14 d 和 21 d 时,W1、W2 处理的水稻分蘖数与 W0 处理相比显著降低;对于 CRBF 氮素运筹模式,当水位控制时间为 14 d 时,W1、W2 处理的水稻分蘖数较 W0 处理显著减少了 13.71%、17.14%;当水位控制时间为 21 d 时,W2 处理的分蘖数较 W0 处理显著减少了 20.08%。在孕穗期 FFP 氮素运筹模式下,当水位控制时间为 21 d 时,W4 处理的水稻分蘖数较 W0 处理显著降低了 21.83%,CRBF 氮素运筹模式、水位控制时间为 14 d 时,W4 处理的水稻分蘖数较 W0 处理显著降低了 18.88%。在水稻分蘖期、孕穗期,相同的田面水深、水位控制时间条件下,CRBF 氮素运筹模式下的水稻分蘖数整体高于 FFP 氮素运筹模式,但差异不显著。

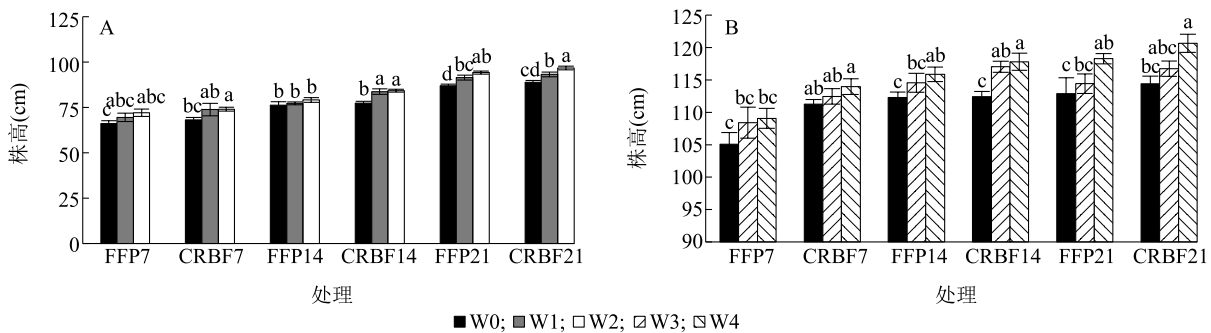
如图 2 所示,在分蘖期和孕穗期,水稻的株高整体随田面水深的增加而增加。在分蘖期(图 2A),水位控制时间为 14 d 时,在 CRBF 氮素运筹模式下 W1、W2 处理的水稻株高较 W0 处理均显著提高;水位控制时间为 21 d 时,在 FFP 氮素运筹模式下 W1、W2 处理的水稻株高分别比 W0 处理显著提高了 5.10%、8.90%,在 CRBF 氮素运筹模式下 W1、W2 处理的水稻株高分别比 W0 处理显著提高了 4.89%、8.86%。在孕穗期(图 2B),水位控制时间为 14 d 和 21 d 时,在 2 种氮素运筹模式下 W4 处理的水稻株高与 W0 处理相比均具有显著差异,而在相同的田面水深、水位控制时间下,CRBF 氮素运筹模式的水稻株高整体高于 FFP 氮素运筹模式,但差异不显著。



A:分蘖期水稻分蘖数;B:孕穗期水稻分蘖数。FFP7:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;CRBF7:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;FFP14:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;CRBF14:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;FFP21:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d;CRBF21:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d。W0、W1、W2、W3、W4见表1。图中不同小写字母表示相同水位控制时间下,不同氮素运筹模式与田面水深处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图1 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻的分蘖数

Fig.1 Rice tiller number under different field water levels and nitrogen management regimes



A:分蘖期水稻株高;B:孕穗期水稻株高。FFP7:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;CRBF7:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;FFP14:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;CRBF14:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;FFP21:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d;CRBF21:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d。W0、W1、W2、W3、W4见表1。图中不同小写字母表示相同水位控制时间下,不同氮素运筹模式与田面水深处理间差异显著( $P<0.05$ )。

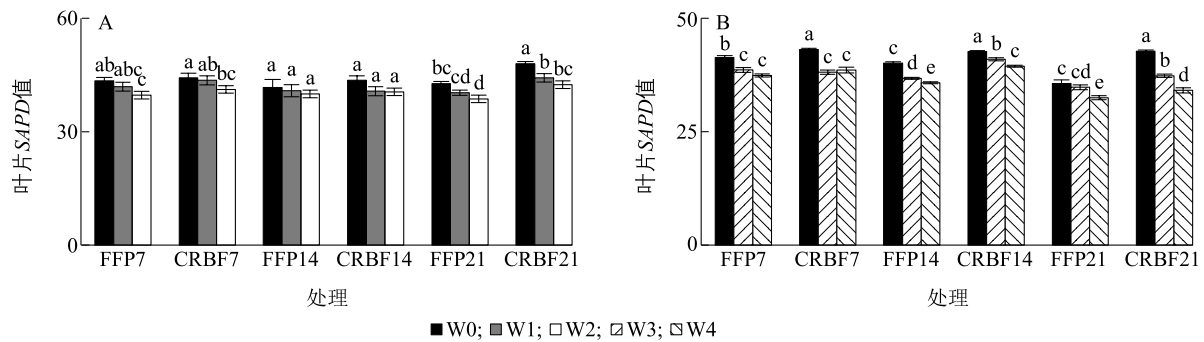
图2 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻的株高

Fig.2 Rice plant height under different field water levels and nitrogen management regimes

## 2.2 不同田面水深与氮素运筹处理对水稻叶片SPAD值的影响

图3显示,在分蘖期和孕穗期,水稻叶片SPAD值整体随着田面水深的增加而降低。在分蘖期(图3A),水位控制时间为7 d时,在FFP、CRBF氮素运筹模式下W2处理的水稻叶片SPAD值分别比W0处理显著降低了8.72%、6.93%;水位控制时间为21 d时,在FFP、CRBF氮素运筹模式下W2处理的水稻叶片SPAD值分别比W0处理显著降低了9.40%、11.54%。在相同的田面水深、水位控制时间下,CRBF氮素运筹模式的水稻叶片SPAD值整体

高于FFP氮素运筹模式,水位控制时间为7 d和14 d时提升不显著,但是水位控制时间为21 d时,与FFP氮素运筹模式相比,在CRBF氮素运筹模式下W0、W1、W2处理的水稻叶片SPAD值分别显著提高了10.98%、8.97%和8.43%。在孕穗期(图3B),水位控制时间为7 d、14 d时,在2种氮素运筹模式下W3、W4处理的水稻叶片SPAD值较W0处理均显著降低;而在相同的田面水深下,水位控制时间为14 d和21 d时,在CRBF氮素运筹模式下3个田面水深处理的水稻叶片SPAD值均较FFP氮素运筹模式显著升高。



A:分蘖期水稻叶片叶绿素相对含量(SPAD 值);B:孕穗期水稻叶片 SPAD 值。FFP7:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;CRBF7:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;FFP14:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;CRBF14:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;FFP21:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d;CRBF21:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d。W0、W1、W2、W3、W4 见表1。图中不同小写字母表示相同水位控制时间下,不同氮素运筹模式与田面水深处理间差异显著( $P<0.05$ )。

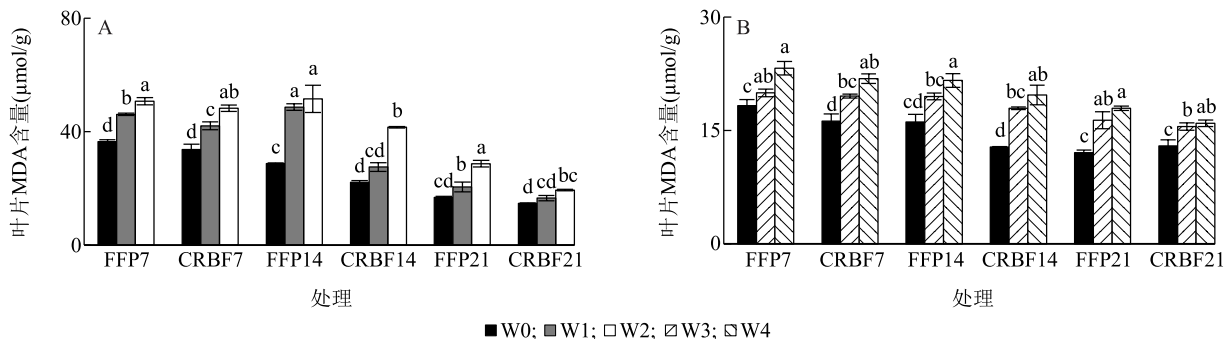
图3 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻叶片的 SPAD 值

Fig.3 Relative chlorophyll content (SPAD value) in rice leaves under different field water levels and nitrogen management regimes

### 2.3 不同田面水深与氮素运筹处理对水稻叶片 MDA 含量的影响

在分蘖期(图4A),在相同氮素运筹模式下水稻叶片中的MDA含量整体随着田面水深的增加而不断增加。在FFP氮素运筹模式下W2、W1处理以及在CRBF氮素运筹模式下W2处理的水稻叶片MDA含量均较W0处理显著提高。水位控制时间为7 d、14 d、21 d时在CRBF氮素运筹模式下W1处理的水稻叶片MDA含量较W0处理分别提高了24.7% ( $P<0.05$ )、24.4% ( $P>0.05$ )、12.4% ( $P>0.05$ )。而在相同田面水深、水位控制时间下,CRBF氮素运筹模式的水稻叶片MDA含量普遍低于FFP

氮素运筹模式。在水稻孕穗期(图4B),在FFP氮素运筹模式下W4处理以及在CRBF氮素运筹模式下W3处理和W4处理的水稻叶片MDA含量均较W0处理显著提高。水位控制时间为7 d、14 d、21 d时在FFP氮素运筹模式下W3处理的水稻叶片MDA含量较W0处理分别提高了9.22% ( $P<0.05$ )、20.96% ( $P>0.05$ )、35.39% ( $P<0.05$ )。而在相同的田面水深、水位控制时间下,CRBF氮素运筹模式下的叶片MDA含量均低于FFP氮素运筹模式(水位控制时间为21 d的W0处理除外),其中水位控制时间为7 d时W0处理的2种氮素运筹模式下的水稻叶片MDA含量差异达到显著水平。



A:分蘖期水稻叶片丙二醛(MDA)含量;B:孕穗期水稻叶片丙二醛(MDA)含量。FFP7:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;CRBF7:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;FFP14:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;CRBF14:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;FFP21:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d;CRBF21:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d。W0、W1、W2、W3、W4 见表1。图中不同小写字母表示相同水位控制时间下,不同氮素运筹模式与田面水深处理间差异显著( $P<0.05$ )。

图4 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻叶片 MDA 含量

Fig.4 Malondialdehyde (MDA) content in the leaves of rice under different field water levels and nitrogen management regimes

## 2.4 不同田面水深与氮素运筹处理对水稻叶片酶活性的影响

图 5A 显示,在相同的氮素运筹模式、水位控制时间下,分蘖期水稻叶片 *POD* 的活性表现为 W1(除水位控制时间为 21 d、FFP 氮素运筹模式下的 W1 处理外)、W2 处理显著高于 W0 处理。在相同的田面水深、水位控制时间下,CRBF 氮素运筹模式下的 *POD* 活性整体高于 FFP 氮素运筹模式。水位控制时间为 7 d 时,W0 处理 CRBF 氮素运筹模式下的水稻叶片 *POD* 活性较 FFP 氮素运筹模式显著提高了 17.06%。水位控制时间为 21 d 时,W1 处理 CRBF 氮素运筹模式下的水稻叶片 *POD* 活性较 FFP 氮素运筹模式显著提高了 16.28%。水位控制时间为 21 d 时,W2 处理 CRBF 氮素运筹模式下的水稻叶片 *POD* 活性较 FFP 氮素运筹模式显著提高了 15.43%。图 5B 显示,在水稻孕穗期,水位控制时间为 14 d 时的 2 种氮素运筹模式下以及和水位控制时间为 21 d 时的 FFP 氮素运筹模式下,W0 处理的水稻叶片 *POD* 活性显著低于 W3 处理和 W4 处理。在相同的水位控制时间、田面水深处理(除水位控制时间为 14 d 时的 W0、W3 处理以及水位控制时间为 21 d 时的 W0 处理外)下,CRBF 氮素运筹模式下的叶片 *POD* 活性均低于 FFP 氮素运筹模式。

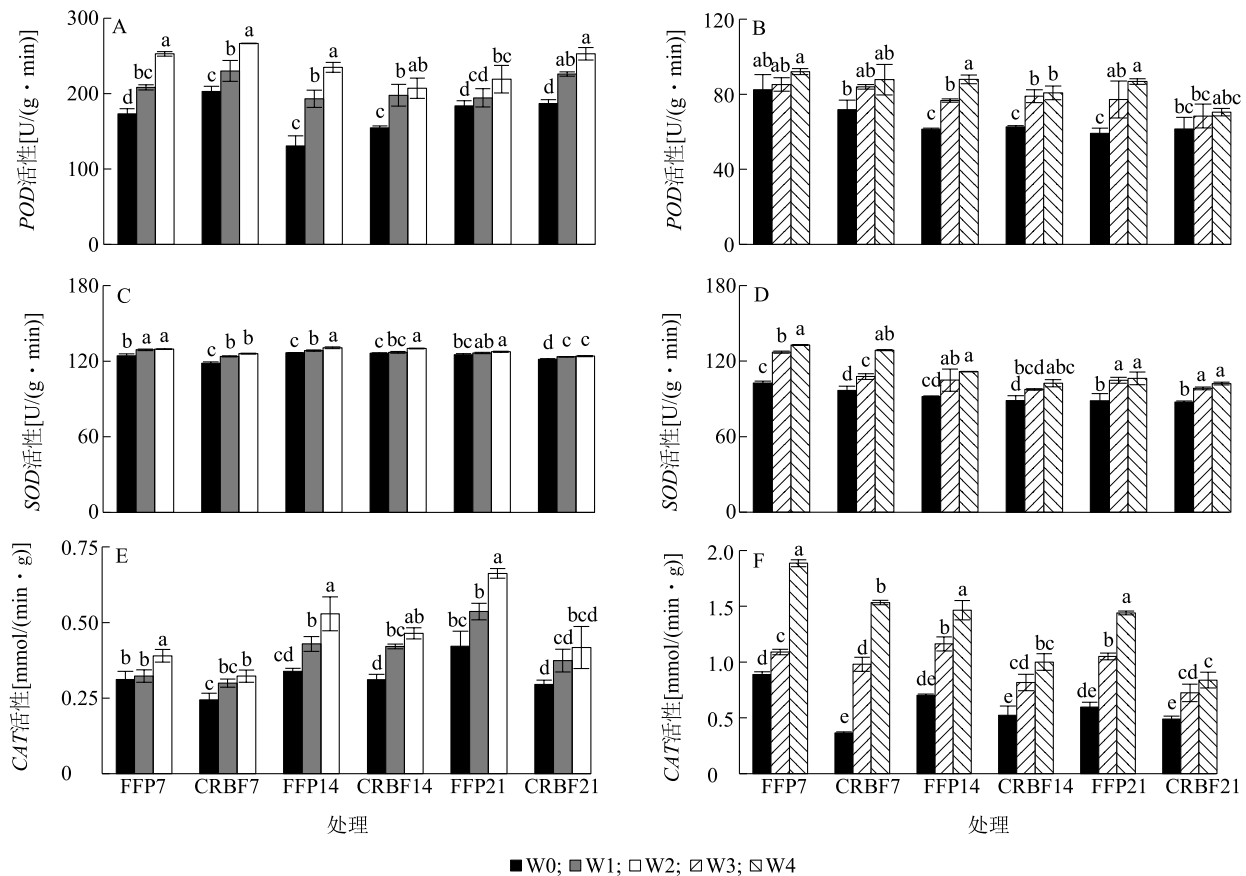
图 5C 显示,在水稻分蘖期,FFP 氮素运筹模式、水位控制时间为 7 d 和 14 d 时,W2 处理和 W1 处理的水稻叶片 *SOD* 活性较 W0 处理显著提高;在 CRBF 氮素运筹模式、水位控制时间为 7 d 时,W1 处理和 W2 处理的水稻叶片 *SOD* 活性与 W0 处理相比显著提高了 4.62% 和 6.46%;在 CRBF 氮素运筹模式、水位控制时间为 21 d 时,W1 处理和 W2 处理的水稻叶片 *SOD* 活性与 W0 处理相比显著提高了 1.64% 和 2.10%;在 CRBF 氮素运筹模式、水位控制时间为 14 d 时,W2 处理的水稻叶片 *SOD* 活性较 W0 处理显著提高了 2.91%。水位控制时间为 7 d 和 21 d 时,CRBF 氮素运筹模式下 3 个田面水深处理的水稻叶片 *SOD* 活性与 FFP 氮素运筹模式下 3 个田面水深处理相比均显著降低。图 5D 显示,在水稻孕穗期,水位控制时间为 7 d 和 21 d 时,在相同的氮素运筹模式下,W3 处理和 W4 处理的水稻叶片 *SOD* 活性与 W0 处理相比显著提高。在相同的田面水深、水位控制时间下,CRBF 处理的叶片 *SOD* 活性总体低于 FFP 处理,其中水位控制时间为 7 d、CRBF 氮素运筹模式下 W0 处理

和 W3 处理的 *SOD* 活性较 FFP 氮素运筹模式下 W0 处理和 W3 处理分别显著降低了 5.75%、15.20%,其他处理间则差异不显著。

图 5E 显示,在水稻分蘖期,除水位控制时间为 21 d、CRBF 氮素运筹模式外,2 种氮素运筹模式下的叶片 *CAT* 活性均表现为 W2 处理显著高于 W0 处理。在相同的田面水深下,水位控制时间为 7 d 时 CRBF 氮素运筹模式下 W0 处理和 W2 处理的 *CAT* 活性较 FFP 氮素运筹模式显著降低了 21.55% 和 17.22%。水位控制时间为 21 d 时,在 CRBF 氮素运筹模式下 W0、W1、W2 处理的 *CAT* 活性较 FFP 氮素运筹模式分别显著降低了 29.91%、30.22%、36.98%。图 5F 显示,在水稻孕穗期,水位控制时间为 7 d 时,2 种氮素运筹模式下 W3、W4 处理的水稻叶片 *CAT* 活性均显著高于 W0 处理。水位控制时间为 7 d 时,在 CRBF 氮素运筹模式下 3 个田面水深处理的水稻叶片 *CAT* 活性与 FFP 氮素运筹模式相比均显著降低;水位控制时间为 14 d 时,在 CRBF 氮素运筹模式下 W3、W4 处理的水稻叶片 *CAT* 活性与 FFP 氮素运筹模式相比分别显著降低了 29.72%、31.67%;水位控制时间为 21 d 时,在 CRBF 氮素运筹模式下 W3、W4 处理的水稻叶片 *CAT* 活性与 FFP 氮素运筹模式相比分别显著降低了 31.11%、41.81%。

## 2.5 不同田面水深与氮素运筹处理对水稻产量及其构成因素的影响

表 2 显示,分蘖期 2 种氮素运筹模式下 W1 处理和 W2 处理的有效穗数、每穗粒数、千粒重、结实率、产量整体低于 W0 处理。在 FFP 氮素运筹模式下 W2 处理的有效穗数显著低于 CRBF 氮素运筹模式下 W0 处理和 W1 处理。在 FFP 氮素运筹模式下,W2 处理的每穗粒数和千粒重比 W0 处理显著降低了 18.14% 和 2.87%,W1、W2 处理的产量分别比 W0 处理显著降低了 9.17% 和 15.60%。在 CRBF 氮素运筹模式下,W1、W2 处理的千粒重及产量分别比 W0 处理显著降低了 3.44%、4.20% 和 6.67%、12.50%;W2 处理的每穗粒数比 W0 处理显著降低了 17.36%。而在相同的田面水深下,除结实率外,CRBF 氮素运筹模式下水稻的有效穗数、每穗粒数、千粒重以及产量均高于 FFP 氮素运筹模式,其中 CRBF 氮素运筹模式的千粒重在 3 个田面水深(W0、W1、W2)处理下分别比 FFP 氮素运筹模式显



A:分蘖期水稻叶片 *POD* 活性;B:孕穗期水稻叶片 *POD* 活性;C:分蘖期水稻叶片 *SOD* 活性;D:孕穗期水稻叶片 *SOD* 活性;E:分蘖期水稻叶片 *CAT* 活性;F:孕穗期水稻叶片 *CAT* 活性。*POD*:过氧化物酶;*CAT*:过氧化氢酶;*SOD*:超氧化物歧化酶。FFP7:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;CRBF7:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为7 d;FFP14:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;CRBF14:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为14 d;FFP21:基肥(尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d;CRBF21:基肥(控释尿素):分蘖肥(尿素)=7:3,水位控制时间为21 d。W0、W1、W2、W3、W4见表1。图中不同小写字母表示相同水位控制时间下,不同氮素运筹模式与田面水深处理间差异显著( $P < 0.05$ )。

图5 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻叶片抗氧化酶活性

Fig.5 Antioxidant enzyme activities in rice leaves under different field water levels and nitrogen management regimes

著提高了7.38%、5.86%、5.91%,产量分别显著提高了10.09%、13.13%、14.13%。在孕穗期,相同田面水深处理不同氮素运筹模式间的有效穗数、每穗粒数表现为CRBF氮素运筹模式整体高于FFP氮素运筹模式,但差异不显著;千粒重和产量表现为CRBF氮素运筹模式显著高于FFP氮素运筹模式。

表3显示,在分蘖期,田面水深对水稻的每穗粒数、结实率、千粒重和产量存在显著或极显著影响;施肥方式对有效穗数存在显著影响,对千粒重、产量存在极显著影响。在孕穗期,施肥方式对结实率、千粒重、产量存在显著或极显著影响;田面水深对每穗粒数、千粒重、产量存在极显著影响。

对产量构成因素和各生理指标进行相关性分

析,由图6A可知,在分蘖期,除有效穗数外,其他产量构成因素与叶片 *SPAD* 值呈显著或极显著正相关。叶片 *POD* 活性与每穗粒数和结实率呈负相关,与有效穗数和千粒重呈正相关,但相关性不显著。叶片 *SOD*、*CAT* 活性、MDA 含量与每穗粒数、千粒重呈显著或极显著负相关,与有效穗数和结实率呈负相关,但相关性并不显著。由图6B可知,水稻的产量、每穗粒数、千粒重与叶片 *SPAD* 值呈极显著正相关;叶片 MDA 含量和 *POD* 活性与每穗粒数、产量呈显著或极显著负相关;叶片 *CAT* 活性与水稻产量以及产量构成因素(除有效穗数外)呈显著或极显著负相关;叶片 *SOD* 活性与每穗粒数和产量呈显著或极显著负相关。

表 2 不同田面水深与氮素运筹处理下水稻产量及其构成因素

Table 2 Rice yield and its components under different field water levels and nitrogen management regimes

生育期	氮素运筹	水处理	有效穗数 ( $\times 10^4$ , 1 hm <sup>2</sup> )	每穗粒数 (粒)	结实率 (%)	千粒重 (g)	产量 (t/hm <sup>2</sup> )
分蘖期	FFP	W0	307.8±11.9ab	240.4±9.6a	84.0±1.3a	24.4±0.1c	10.9±0.1b
		W1	303.8±11.1ab	218.6±7.5abc	81.6±1.3ab	23.9±0.1cd	9.9±0.7cd
		W2	291.6±8.1b	196.8±18.4cde	80.8±1.7ab	23.7±0.1d	9.2±0.1d
	CRBF	W0	328.1±7.6a	246.6±6.4a	85.8±0.8a	26.2±0.2a	12.0±0.3a
		W1	324.0±6.4a	235.8±3.7ab	82.0±0.4ab	25.3±0.1b	11.2±0.3b
		W2	320.0±13.4ab	203.8±8.4bcd	80.3±2.7ab	25.1±0.3b	10.5±0.3bc
孕穗期	FFP	W0	307.8±11.9a	240.4±9.6ab	84.0±1.2a	24.4±0.2c	10.9±0.1b
		W3	303.8±6.4a	202.0±8.6c	83.0±0.4ab	23.9±0.1cd	10.2±0.4c
		W4	315.9±16.5a	201.2±6.7c	80.6±1.0b	23.7±0.1d	9.8±0.1c
	CRBF	W0	328.1±7.6a	246.6±6.3a	85.8±0.8a	26.2±0.2a	12.1±0.3a
		W3	332.1±15.2a	227.2±6.4abc	82.8±1.0ab	25.8±0.2ab	11.0±0.1b
		W4	315.9±12.2a	215.4±15.8bc	84.4±1.5a	25.5±0.1b	10.8±0.2b

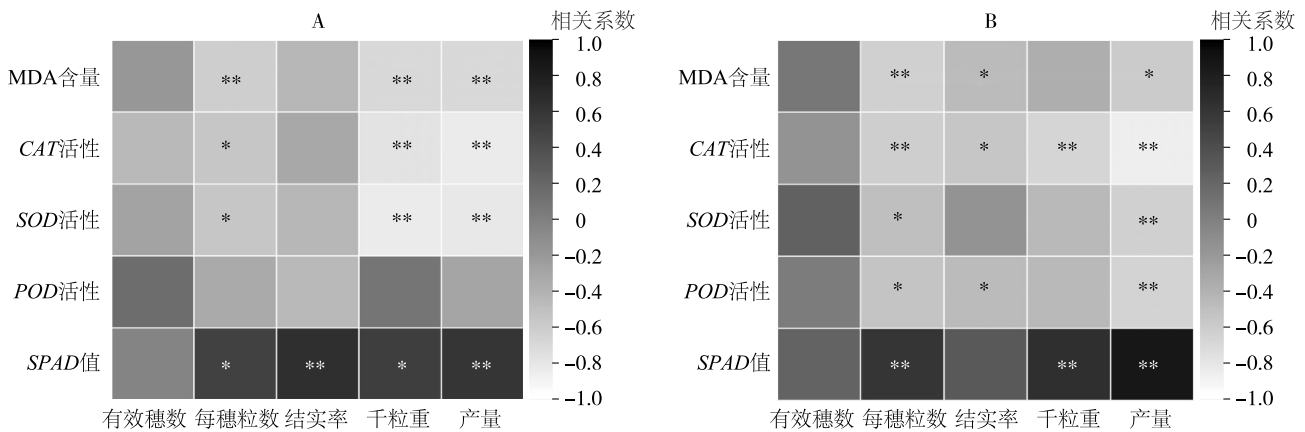
同列数据后不同小写字母表示相同生育期不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。FFP: 基肥(尿素): 分蘖肥(尿素) = 7:3; CRBF: 基肥(控释尿素): 分蘖肥(尿素) = 7:3; W0、W1、W2、W3、W4 见表 1。

表 3 田面水深、氮素运筹处理对水稻产量及其构成因素的影响

Table 3 Effects of different field water levels and nitrogen management regimes on rice yield and its components

生育期	项目	有效穗数	每穗粒数	结实率	千粒重	产量
分蘖期	施肥方式(N)	*	ns	ns	**	**
	田面水深(W)	ns	*	*	**	*
	N×W	ns	ns	ns	ns	ns
孕穗期	施肥方式(N)	ns	ns	*	**	**
	田面水深(W)	ns	**	ns	**	**
	N×W	ns	ns	ns	ns	ns

\* 表示存在显著影响 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示存在极显著影响 ( $P < 0.01$ ), ns 表示影响不显著。



A: 分蘖期; B: 孕穗期。POD: 过氧化物酶; CAT: 过氧化氢酶; SOD: 超氧化物歧化酶; MDA: 丙二醛; SPAD 值: 叶绿素相对含量。\* 表示显著相关 ( $P < 0.05$ ), \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

图 6 水稻产量构成因素与生理指标之间的相关性

Fig.6 Correlation between rice yield components and physiological indicators

### 3 讨论

#### 3.1 不同田面水深处理对水稻生长发育以及产量的影响

水稻体内存在活性氧(ROS)的清除保护酶系统,主要包括 *POD*、*SOD*、*CAT* 等<sup>[19]</sup>。前人研究结果表明,当水稻被淹时,体内 *POD*、*SOD*、*CAT* 的活性显著增加,有利于提高水稻的抗涝能力,减轻胁迫<sup>[20]</sup>。本研究中,随着田面水深的提高,叶片 *SOD*、*CAT*、*POD* 活性整体呈增高趋势。为了适应外界胁迫,水稻体内抗氧化酶活性的增强会同步诱导自身产生响应胁迫的抗氧化物质,清除过量的 ROS,维持机体物质动态平衡,其表现为叶片 MDA 含量的提高,从而增强其在逆境胁迫下的耐受能力<sup>[21-22]</sup>。前人研究发现,随着田面水深增加和水位控制时间的延长,水稻叶片 MDA 含量呈现上升趋势,对生物膜的完整性产生不利影响,以致于水稻的细胞膜遭到破坏,造成内部代谢紊乱<sup>[23]</sup>。而植物体内 MDA 含量的提高会导致叶绿体结构的变形,进而导致叶片 *SPAD* 值的下降<sup>[24]</sup>。本研究结果表明,水稻的叶片 MDA 含量在分蘖期表现为 W2 处理>W1 处理>W0 处理,在孕穗期表现为 W4 处理>W3 处理>W0 处理;在分蘖期 *SPAD* 值表现为 W0 处理>W1 处理>W2 处理,在孕穗期 *SPAD* 值表现为 W0 处理>W3 处理>W4 处理,这与前人研究结果一致。前人研究结果表明,在水稻关键生育期,过高的田面水深会影响水稻的分蘖数、株高和 *SPAD* 值<sup>[25]</sup>。为了保证自身生长发育需要的空气环境、维持正常的生命活动,水稻植株在遭受淹涝胁迫时会调节自身伸长生长,从而获取新鲜的空气,减少缺氧所带来的伤害,这也是水稻通过自身调节应对淹涝胁迫的途径<sup>[26-27]</sup>。在淹涝胁迫下,水稻分蘖数与 *SPAD* 值的下降,是植株为维持生存而进行资源重新分配的结果。为驱动节间快速伸长以露出水面,植株消耗了大量养分,同时叶片光合产物的合成减少。这两方面共同导致用于分蘖形成和叶片生长的养分、能量供应不足,从而抑制了分蘖并降低了 *SPAD* 值<sup>[28]</sup>。在本研究中,水稻的分蘖数和 *SPAD* 值均整体随田面水深增加而减少,株高随田面水深的增加而增加,这与前人的研究结果相似。在各个关键生育期遭遇水分胁迫时,水稻的有效穗数、每穗粒数、结实率以及千粒重都会受到不同程度的影响,最终导致产量的降低,其原因是当水稻的关

键生育期遭遇水分胁迫时会导致分蘖所需的养分流失,分蘖数减少,进而导致水稻有效穗数大幅度降低,影响产量<sup>[29]</sup>。任桢<sup>[28]</sup>的研究结果表明,水稻分蘖初期遭遇淹水胁迫产量下降的幅度大于幼穗分化期和抽穗期遭遇淹水胁迫。本研究发现,在分蘖期和孕穗期,相同氮素运筹模式下,水稻的产量构成因素整体随田面水深的增加而下降。在分蘖期,田面水深对千粒重存在极显著影响,对每穗粒数、结实率存在显著影响;在孕穗期,田面水深对每穗粒数、千粒重存在极显著影响。产量构成因素的下降最终导致减产,本研究中 2 种氮素运筹模式下的水稻产量均表现为 W0 处理显著高于 W1、W2、W3、W4 处理。其原因可能是由于田面水深的增加,叶片中抗氧化活性酶以及抗氧化物质的增加,影响叶片光合产物的形成和养分竞争,导致有效穗数、每穗粒数、千粒重等产量构成因素下降,最终导致产量下降。

#### 3.2 不同田面水深处理下控释尿素与普通尿素配施对水稻生长发育以及产量的影响

前人研究发现,在相同的施氮量下,随着控释尿素比例的增加,水稻叶片 *POD* 活性与 *CAT* 活性增加,可以相对改善细胞内活性氧产生与清除之间的平衡关系<sup>[30]</sup>。本研究中,在水稻分蘖期,在相同的田面水深下,水稻叶片 *POD* 活性整体表现为 CRBF 氮素运筹模式高于 FFP 氮素运筹模式,与前人研究结果吻合。而在相同的水位管理条件下,水稻分蘖期叶片的 *CAT*、*SOD* 活性整体表现为 FFP 氮素运筹模式高于 CRBF 氮素运筹模式,说明 FFP 氮素运筹模式下速效氮释放集中,造成局部氮素浓度过高,诱发早期氧化应激,激活 *SOD* 和 *CAT* 的响应,而控释尿素与传统尿素配施氮素释放较为缓和,减少短期内氮素浓度的激增,避免生成过量 ROS。同时,持续的低水平 ROS 可能通过信号传导途径优先诱导 *POD* 活性升高。当植物处于逆境时,细胞内 ROS 产生和清除的平衡系统受到破坏,植物体内存在清除 ROS 的多种途径,其中最主要的就是抗氧化酶系统,植物通过 *POD*、*SOD* 以及 *CAT* 三者动态协同作用,可以在一定程度上减缓胁迫<sup>[31]</sup>。在水稻孕穗期,除水位控制时间为 14 d 时的 W4 处理外,相同的田面水深下 2 种氮素运筹模式之间的水稻叶片 *POD* 活性并无显著差异;CRBF 氮素运筹模式的 *SOD*、*CAT* 活性整体低于 FFP 氮素运筹模式,可能是控释肥在水稻生长发育的中后期通过持续的养分供

应,减少了 ROS 的生成,减轻了因田面水深增加而造成的水稻涝害。前人的研究表明,施用控释尿素能够降低水稻叶片中的 MDA 含量,减轻水稻叶片中的膜脂过氧化作用,使功能叶细胞中的原生质膜系统受到的伤害减少<sup>[32]</sup>。本研究结果表明,在相同的田面水深下,CRBF 氮素运筹模式下叶片的 MDA 含量整体低于 FFP 氮素运筹模式。在分蘖期 W0 处理下,CRBF 氮素运筹模式的叶片 MDA 含量与 FFP 氮素运筹模式的叶片 MDA 含量差距整体较小,表明田面水深较低、不致受涝的情形下,控释尿素优势有限,而在 W1、W2 处理下,CRBF 氮素运筹模式下的叶片 MDA 含量整体明显低于 FFP 氮素运筹模式下的叶片 MDA 含量,水位控制时间为 14 d、21 d 时差异达到显著水平,说明控释尿素在逆境中具有增效作用。在水稻孕穗期,除水位控制时间为 7 d 的处理外,其他相同水位控制时间、田面水深条件下不同氮素运筹模式间的叶片 MDA 含量并无显著差异,说明随着淹水时间的延长,水稻植株启动了一系列生理生化适应机制(增强抗氧化酶活性、积累渗透调节物质、形成通气组织),有效清除了部分 ROS,减轻了膜脂过氧化程度,使得 MDA 含量从胁迫初期的峰值逐渐回落,这反映了水稻从遭受胁迫冲击到启动防御与适应修复的动态过程。施波等<sup>[33]</sup>的研究结果表明,施用控释尿素的水稻在全生育期的生长性状优于施用传统肥料的水稻。而控释尿素和普通尿素合理配施,在保证前期养分供给的同时可避免养分释放过快,保证水稻生长<sup>[34]</sup>。在本研究中,CRBF 氮素运筹模式下水稻的分蘖数、株高和 SPAD 值在相同田面水深、水位控制时间下整体高于 FFP 氮素运筹模式,说明控释尿素和普通尿素配施能够减轻田面水深较大对水稻生长的影响。这可能是由于膜损伤减轻,从而减少了叶绿素的降解,维持了较高的光合速率,为分蘖和籽粒发育提供更多能量。控释尿素的养分释放较为缓和,受水分影响较小,可减轻淹涝胁迫对水稻的影响。控释肥的养分释放特性契合水稻生长规律,从而提高水稻的产量<sup>[12]</sup>。本研究结果表明,在相同的田面水深下,CRBF 氮素运筹模式下的水稻产量及产量构成因素整体优于 FFP 氮素运筹模式,说明控释尿素与普通尿素配施的方式受淹水胁迫影响较小。本研究中水稻产量以及产量构成因素(除有效穗数外)均与叶片 SOD、CAT 活性以及 MDA 含量呈负相关,与叶片

SPAD 值呈正相关,与前人研究结果<sup>[35]</sup>一致。本研究结果表明,在田面水深较大的受涝状况下,CRBF 氮素运筹模式能够在一定程度上降低叶片的 SOD、CAT 活性和 MDA 含量,提高叶片的 SPAD 值,避免水稻因淹水胁迫造成严重减产。

## 4 结论

在水稻分蘖期和孕穗期进行不同田面水深和氮素运筹耦合试验,水稻的分蘖数和叶片 SPAD 值均整体随田面水深增加而降低,株高则随田面水深增加而增加,叶片丙二醛(MDA)含量及过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性也随田面水深增加而提高,最终导致有效穗数、每穗粒数、结实率、千粒重及实际产量总体下降。与 FFP 氮素运筹模式相比,CRBF 氮素运筹模式能在相同水深下改善水稻的生长发育,分蘖期可抑制 CAT 和 SOD 的过度激活并增强 POD 活性,孕穗期则通过降低 3 种酶活性优化活性氧清除机制从而降低了 MDA 含量,提高了分蘖数和叶片 SPAD 值。在产量方面,CRBF 氮素运筹模式通过增加千粒重使产量显著增加。

## 参考文献:

- [1] 唐承翰,陈惠哲,张玉屏,等. 群体均匀度同时提升水稻产量和品质的研究进展[J]. 江苏农业学报,2025,41(1):184-191.
- [2] 刘宇炎,李后建,林 斌,等. 水稻种植技术培训对农户化肥施用量的影响:基于 70 个县的控制方程模型实证分析[J]. 农业技术经济,2022(10):114-131.
- [3] KOTERA A, NAWATA E. Role of plant height in the submergence tolerance of rice: a simulation analysis using an empirical model[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1/2): 49-58.
- [4] KATO Y, COLLARD B C Y, SEPTININGSIH E M, et al. Physiological analyses of traits associated with tolerance of long-term partial submergence in rice[J]. AoB PLANTS, 2014, 6: plu058.
- [5] 叶 佩,宋春燕,刘凯文,等. 江汉平原不同稻作模式下温室气体排放特征[J]. 应用气象学报,2022,33(6):748-758.
- [6] 张 林. 水稻涝害的危害症状及防治措施[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(2):54-55, 65.
- [7] 玄文成,马兴春. 水稻涝害的防止和补救[J]. 吉林农业, 2010(12):118.
- [8] 杨龙树,张从合,严 志,等. 长江流域水稻涝害的发生及应对措施[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(4):58-59, 78.
- [9] 程 爽,车 阳,田晋钰,等. 水稻缓控释氮肥应用研究现状及展望[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(2):1-8.

- [10] 刘梦竹,王 锐,冯 源,等. 控释尿素释放周期对水稻产量和氮肥利用的影响[J]. 江苏农业学报,2024,40(5):827-834.
- [11] 张 蛟,陈澎军,韩继军,等. 盐逆境下施用缓释肥及其减氮处理对水稻生长、穗部性状、产量及品质的影响[J]. 江苏农业学报,2023,39(7):1483-1491.
- [12] 彭 玉,马 均,蒋明金,等. 缓/控释肥对杂交水稻根系形态、生理特性和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2013,19(5):1048-1057.
- [13] 郭金金. 水氮调控与缓释氮肥-尿素配施对冬小麦/夏玉米生长和水氮利用的影响研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [14] 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.
- [15] 孙永健,孙园园,刘树金,等. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响[J]. 作物学报,2011,37(12):2221-2232.
- [16] 彭 玉,孙永健,蒋明金,等. 不同水分条件下缓/控释氮肥对水稻干物质质量和氮素吸收、运转及分配的影响[J]. 作物学报,2014,40(5):859-870.
- [17] PAN S G, WEN X C, WANG Z M, et al. Benefits of mechanized deep placement of nitrogen fertilizer in direct-seeded rice in South China[J]. Field Crops Research,2017,203:139-149.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000:167-169,184-185,258-260.
- [19] 王玮棋,李婧怡,张宇婧,等. 基于幼苗生理生化指标和矿质元素含量的不同水稻品种综合评价[J]. 江苏农业科学,2024,52(24):86-92.
- [20] 晏 军,吴启侠,朱建强,等. 拔节期杂交中稻对淹水胁迫的响应及指示性指标探讨[J]. 中国稻米,2017,23(1):17-25.
- [21] 曹 昉,郑 祥,杨 阳,等. 淹水对灰化苔草幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学杂志,2016,35(12):3273-3278.
- [22] 王晓忠,苏 锐,邹梦思,等. 水稻耐淹性研究进展[J]. 杂交水稻,2024,39(3):12-19.
- [23] 徐 涛,才 硕,时 红,等. 拔节期淹水胁迫对水稻叶片酶活性及产量的影响[J]. 中国农村水利水电,2020(11):89-93,100.
- [24] 回 嵘,赵锐明,李 刚,等. UV-B 辐射及光修复对真藓生理特性和细胞超微结构的影响[J]. 生态学报,2016,36(11):3450-3458.
- [25] 王 琛. 分蘖期淹涝胁迫对水稻形态、生理、产量和米质影响的研究[D]. 扬州:扬州大学,2019.
- [26] 龙泓锦,王 辉,欧阳赞,等. 水稻品质及产量对灌浆期旱涝急转的响应[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(9):938-947.
- [27] UPHOFF N. Rethinking the concept of yield ceiling for rice: implications of the system of rice intensification (SRI) for agricultural science and practice[J]. Journal of Crop & Weed,2013,9(1):1-19.
- [28] 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.
- [29] FU J, JIAN Y W, WANG X H, et al. Extreme rainfall reduces one-twelfth of China's rice yield over the last two decades[J]. Nature Food,2023,4:416-426.
- [30] 李晓敏,李英琪,何珍珍,等. 尿素和缓释肥混配深施对水稻产量和生理特性的影响[J]. 中国稻米,2023,29(5):85-88.
- [31] 项洪涛,李 琬,何 宁,等. 外源脱落酸缓解小豆幼苗水分胁迫效应研究[J]. 西南农业学报,2022,35(1):74-80.
- [32] 聂 军,郑圣先,戴平安,等. 控释氮肥调控水稻光合功能和叶片衰老的生理基础[J]. 中国水稻科学,2005,19(3):255-261.
- [33] 施 波,周华萍,应金耀. 水稻缓释肥对水稻嘉 58 生长和产量的影响[J]. 浙江农业科学,2017,58(12):2143-2145.
- [34] 佟欣宇. 缓释氮肥与尿素配施对水稻产量和品质的影响[D]. 长春:吉林农业大学,2024.
- [35] 邹宇傲,吴启侠,周乾顺,等. 孕穗期杂交中稻对淹涝胁迫的响应[J]. 中国水稻科学,2023,37(6):642-656.

(责任编辑:王 妮)