

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.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.07.005

## 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

张 蛟<sup>1</sup>, 陈澎军<sup>2</sup>, 韩继军<sup>2</sup>, 翟彩娇<sup>1</sup>, 缪源卿<sup>2</sup>, 崔士友<sup>1</sup>

(1.江苏沿江地区农业科学研究所,江苏 南通 226012; 2.江苏省地质局/自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心,江苏 南京 210007)

**摘要:** 为探明盐逆境下缓释氮肥类型及其减氮处理对水稻生长、穗部性状、产量及稻米品质的影响,以南粳5055为材料进行盆栽试验,土壤含盐量1.5g/kg。共设置8个处理:不施氮肥对照(CK)、施常规尿素处理(CG)、施大颗粒尿素处理(HFA)、施大颗粒尿素减氮10%处理(HFA-10)、施大颗粒尿素减氮20%处理(HFA-20)、施硫包衣尿素处理(HFB)、施硫包衣尿素减氮10%处理(HFB-10)、施硫包衣尿素减氮20%处理(HFB-20)。研究表明,与CG处理相比,HFA-20处理茎蘖成穗率显著提高21.36% ( $P<0.05$ ),HFA-20处理水稻产量、有效穗数分别提高5.44%、7.41% ( $P>0.05$ ),HFA-20处理氮素农学利用率显著提高了34.01% ( $P<0.05$ )。同一缓释肥处理而言,与HFA、HFA-10处理相比,HFA-20处理水稻千粒质量显著提高( $P<0.05$ );与HFB、HFB-10处理相比,HFB-20处理水稻千粒质量显著提高( $P<0.05$ )。缓释肥及其减氮处理的糙米率、精米率与CG处理相比无显著差异。但是与CG处理相比,HFA、HFA-20、HFB-10、HFB-20处理稻米胶稠度显著提高( $P<0.05$ ),其中HFA-20处理胶稠度最高为80.00 mm。可见,本试验条件下,盐逆境下施加大颗粒尿素减氮20%处理可使水稻不减产并对提高水稻茎蘖成穗率、氮素利用率及食味品质有积极作用。

**关键词:** 滩涂; 缓/控释肥; 氮肥减量; 氮素利用率

**中图分类号:** S143.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)07-1483-09

## Effects of slow-release fertilizer and nitrogen reduction on the growth characteristics, panicle traits, yield and quality of rice under salt stress

ZHANG Jiao<sup>1</sup>, CHEN Peng-jun<sup>2</sup>, HAN Ji-jun<sup>2</sup>, ZHAI Cai-jiao<sup>1</sup>, MIAO Yuan-qing<sup>2</sup>, CUI Shi-you<sup>1</sup>

(1. Jiangsu Yanjiang Institute of Agricultural Sciences, Nantong 226012, China; 2. Jiangsu Geological Bureau/Coastal Saline-alkali Land Ecological Rehabilitation and Sustainable Utilization Technology Innovation Center, MNR, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of slow-release nitrogen fertilizer types and nitrogen reduction treatments on rice growth, panicle traits, yield and rice quality under salt stress, a pot experiment was conducted with Nanjing 5055 as experimental material. The soil salt content was 1.5 g/kg. There were eight treatments: no nitrogen fertilizer control (CK),

conventional urea (CG), large-grain urea (HFA), large-grain urea with 10% nitrogen reduction (HFA-10), large-grain urea with 20% nitrogen reduction (HFA-20), sulfur-coated urea (HFB), sulfur-coated urea with 10% nitrogen reduction (HFB-10), sulfur-coated urea with 20% nitrogen reduction (HFB-20). The results showed that compared with CG treatment, HFA-20 treatment significantly increased tiller ear formation rate by 21.36% ( $P<0.05$ ),

收稿日期: 2022-08-05

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(20)3118]; 南通市科技计划项目(MS22021040)

作者简介: 张 蛟(1987-),男,陕西渭南人,硕士,助理研究员,主要从事滩涂资源开发利用方面的研究工作。(E-mail) zhangjiao0609@126.com

通讯作者: 崔士友, (E-mail) cuisy198@163.com

the yield and effective panicle number in HFA-20 treatment were increased by 5.44% and 7.41%, respectively, and the agronomic use efficiency of nitrogen in HFA-20 treatment was significantly increased by 34.01% ( $P < 0.05$ ). Compared with HFA and HFA-10 treatments, the HFA-20 treatment significantly increased the 1 000-grain weight ( $P < 0.05$ ). Compared with HFB and HFB-10 treatments, the 1 000-grain weight of rice was significantly improved in HFB-20 treatment ( $P < 0.05$ ). There was no significant difference in brown rice rate and milled rice rate between CG treatment and slow release fertilizer and nitrogen reduction treatment. But compared with CG treatment, the gel consistency of rice under HFA, HFA-20, HFB-10 and HFB-20 treatments was significantly increased ( $P < 0.05$ ), and the highest gel consistency under HFA-20 treatment was 80.00 mm. So under the conditions of this experiment, application of large-grain urea with 20% nitrogen reduction under salt stress could not reduce the yield of rice and had positive effects on tiller yield, agronomic use efficiency of nitrogen and taste quality of rice.

**Key words:** tidal flats; slow or controlled release fertilizer; nitrogen reduction; nitrogen use efficiency

粮食安全是国家安全的重要基础,保证国家粮食安全具有重大的战略意义<sup>[1]</sup>。据报道,2050 年中国将出现较大的粮食缺口,自给率仅达到 87.56%,到 2050 年需要增加  $1.8 \times 10^7$  hm<sup>2</sup> 耕地才得以实现粮食完全自给<sup>[1]</sup>。在保障粮食安全的大背景下,边际农田的建设和利用成为人们关注的热点<sup>[2]</sup>。在盐碱地区种植水稻是盐碱地改良与利用的重要方式之一<sup>[3-5]</sup>。以往关于盐分胁迫对水稻产量影响的研究结果表明,随着盐分浓度的增加,产量越来越低<sup>[4,6-8]</sup>。如朱明霞等<sup>[7]</sup>在采用盆栽法,模拟不同程度盐碱胁迫对水稻生长发育及产量的影响,土壤含盐量为 0.11%~0.22%,盐逆境对水稻产量及其构成因素的影响不显著,当土壤含盐量大于 0.22% 时,产量构成因素千粒质量、有效穗数、穗粒数及结实率均受到显著影响,导致水稻产量下降明显。罗成科等<sup>[8]</sup>采用盆栽法研究不同盐分浓度胁迫对水稻产量的影响,结果表明,低浓度盐分(0.10%)处理能够轻微提高水稻产量(与对照差异不显著),主要表现在每穗粒数的增加;高浓度盐分(0.2%~0.4%)处理水稻产量明显下降,且主要表现在每穗粒数和千粒质量的减少。据报道,一般在盐渍化土壤中作物不能正常生长的重要原因高浓度 Na<sup>+</sup> 离子对植物的毒害作用<sup>[9]</sup>。然而,作物产量不仅受到盐分浓度的影响,也会受到盐碱类型、施肥量、肥料类型及施肥方式等影响<sup>[10-11]</sup>。

合理施用肥料在一定程度上可以减缓盐分对作物的胁迫,同时也减少肥料浪费及水体富营养化风险<sup>[12]</sup>。氮肥是水稻生产中最主要的肥料,是直接影响水稻生长发育最关键的因素之一,对提高水稻产量发挥重要作用<sup>[13]</sup>。盐胁迫下氮素吸收量降低可能是造成水稻生长迟缓的主要原因<sup>[14]</sup>。但是,过量

的氮肥投入并不能保证水稻进一步增产,还可能导致氮肥利用效率降低,造成成本增加和资源浪费,增加农业面源污染风险<sup>[15-16]</sup>。缓/控释肥作为一种新型肥料,可以为水稻生育后期持续提供充足氮素,提高叶片叶绿素含量和光合功能,延缓功能叶衰老,进而促进干物质生产能力<sup>[17-18]</sup>,减少 20%~30% 氮肥用量可以保障水稻不减产或甚至增产<sup>[19-20]</sup>。同时,施用缓/控释肥可以提高肥料利用率,减少施肥次数和降低劳动成本,对经济效益和环境生态效益均有积极意义。另外,施用缓/控释肥可以提高稻米的整精米率和碱消值,降低稻米的垩白粒率,有利于协调稻米加工品质、外观品质和淀粉 RVA 谱三者之间关系<sup>[21]</sup>。然而,目前在盐碱地生产中有关缓/控释肥对水稻生长发育、产量及穗部性状等影响报道不多。本研究采用盆栽试验模拟滩涂水稻种植,选用两种不同类型缓释肥和常规尿素进行试验,研究缓释肥及氮肥减量对盐逆境下水稻生长、穗部性状、产量及稻米品质的影响,并分析氮肥农学利用率,明确盐碱地水稻增产增效缓/控释肥施用方法,为沿海滩涂增粮增效栽培方式提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2020 年 6 月 11 月,于江苏沿江地区农业科学研究所盐池大棚内进行,试验采取盆栽模拟方式,试验土壤取自农场麦茬耕层土壤,除去秸秆杂物、晾干、粉碎、来回混匀、风干备用。试验前,供试土壤基本化学性质为:有机碳 9.20 g/kg、全氮 1.12 g/kg,碱解氮 146.87 mg/kg、速效磷 15.68 mg/kg、速效钾 83.01 mg/kg,电导率 0.26 dS/m、pH 值 8.26。供试肥料类型为中煤大颗粒尿素(氮含量 46%,缓释肥

料),汉枫硫包衣尿素(氮含量 37%,硫含量 10%,缓释肥料),常规尿素(氮含量 46%),磷肥为过磷酸钙( $P_2O_5$ 含量 12%),钾肥为氯化钾( $K_2O$ 含量 60%)。水稻品种为南粳 5055。

## 1.2 试验设计

试验所用塑料盆直径为 30.0 cm、高为 32.8 cm,每盆土质量 15 kg。根据前人研究结果在滩涂水稻生长过程中,在淡水或微咸水灌溉条件下较短年限内水稻生长期间稻田耕层土壤盐分动态监测的最大值为 0.138%~0.183%<sup>[2]</sup>,因此本试验设置土壤含盐量为 0.15%,即将 22.5 g 粗海盐(尊粤-大粒盐)均匀溶解到水中,然后均匀拌入土壤中,加水浸泡 3 次使土壤中的盐分均匀分布。试验设置 8 个施肥处理:不施氮肥对照(CK),施常规尿素处理(CG,施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>),施大颗粒尿素处理(HFA,施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>),施大颗粒尿素减氮 10%处理(HFA-10,施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup>),施大颗粒尿素减氮 20%处理(HFA-20,施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>),施硫包衣尿素处理(HFB,施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>),施硫包衣尿素减氮 10%处理(HFB-10,施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup>),施硫包衣尿素减氮 20%处理(HFB-20,施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>)。每个处理设置 10 盆重复,共 80 盆。CG 处理氮肥运筹为基肥、分蘖肥、穗肥比例为 4:2:4,分蘖肥分别在移栽后 7 d 和 14 d 等量施入,穗肥分别在倒 4 叶和倒 2 叶抽出时等量施入;HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理均采用基肥(缓释肥)+穗肥(普通尿素)模式,氮肥运筹为基肥:穗肥=6:4,穗肥施肥时间与 CG 处理一致。各处理的钾肥、磷肥施用量相同,1 hm<sup>2</sup>  $P_2O_5$ 施用 120 kg,  $K_2O$ 施用 80 kg。磷肥作为基肥一次性全量施入,钾肥分基肥和穗肥两次施入。水稻于 6 月 6 日播种,7 月 1 日移栽,每盆 3 穴,每穴 3 苗。实施精细化管理,并及时防治病虫害,10 月 25 日收获。

## 1.3 测定指标与方法

1.3.1 茎蘖、株高和 SPAD 值动态 每个处理选取长势均匀的 4 盆 12 穴作为调查对象,从移栽后,每隔 7 d 调查茎蘖数,直到分蘖停止发生,进而计算茎蘖成穗率。茎蘖成穗率=每穴有效穗数/每穴最高茎蘖数×100%。于水稻各关键生育期,调查株高动态变化;孕穗期开始,每隔 7~10 d 选择代表性植株测定剑叶 SPAD 值。

1.3.2 产量及其构成因素 成熟期选取代表性植株 3 盆,测定每穗粒数、瘪粒数、实粒数、有效穗数、结实率和千粒质量等产量构成因素,以及水稻穗长、穗质量、着粒密度、一次枝梗性状(枝梗数、实粒数、千粒质量、空瘪粒数、结实率)、二次枝梗性状(枝梗数、实粒数、千粒质量、空瘪粒数、结实率)等穗部性状。计算理论产量,按照标准含水量 14%换算千粒质量和稻谷产量。

1.3.3 氮素农学利用率 氮素农学利用率按如下公式计算:氮素农学利用率(kg/kg)<sup>[19]</sup>=(施氮区产量(kg/hm<sup>2</sup>)-不施氮区产量(kg/hm<sup>2</sup>))/施氮量(kg/hm<sup>2</sup>)。

1.3.4 土壤理化性质 水稻收获后,每个处理取 3 盆采集土壤样品,测定土壤基本理化性质,具体测定方法按照土壤农化分析常规方法进行。

1.3.5 稻米品质 水稻收获后,晾干并室内储藏 3 个月测定稻米品质。其中,糙米率、精米率、胶稠度测定方法参照 NY/T 83-2017 标准执行,粒长、长宽比和整精米率测定方法参照 NY/T 2334-2013 标准执行,直链淀粉和蛋白质含量测定采用分光光度法,方法分别参照 NY/T 2639-2014 标准和 GB 5009.5-2016 标准执行。

## 1.4 数据处理与统计分析

利用 Excel 2010 和 DPS 7.05 软件进行数据处理与分析,采用 LSD 多重比较法对不同施肥处理水稻产量及其构成因素进行显著性检验和相关性分析,显著水平设置为  $P<0.05$ 。

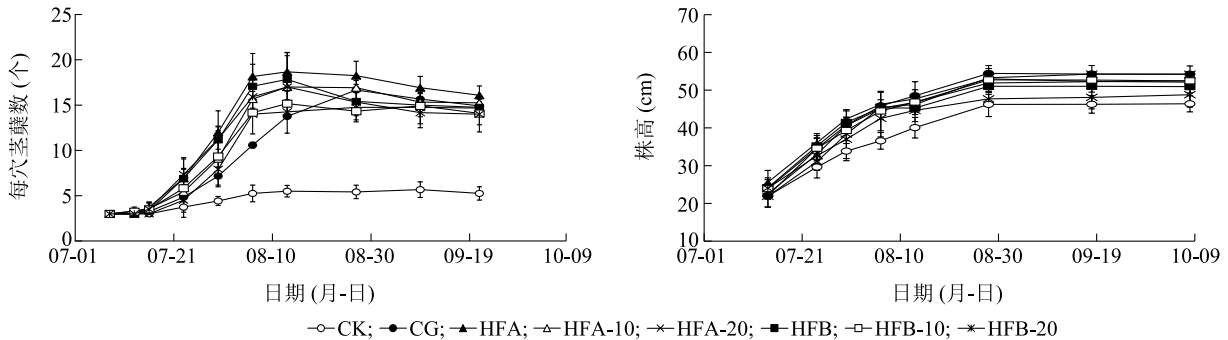
# 2 结果与分析

## 2.1 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻茎蘖、株高和叶片 SPAD 值动态的影响

盐逆境下,与 CK 相比,各施氮肥处理的水稻茎蘖数增幅较大(图 1)。各施氮肥处理的水稻茎蘖数在移栽后 22 d(2020-7-23)开始迅速增加,在移栽后 43~57 d(2020-8-13 至 2020-8-27)达到最大值。与 CK 最大茎蘖数(每穴 5.67 个)相比,CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 各处理最大茎蘖数分别增加了 194.12%、229.41%、200.00%、160.29%、214.70%、167.65%和 200.00% ( $P<0.05$ )。与 CG 处理相比,HFA 和 HFB 处理最大茎蘖数分别增加了 12.00%和 7.00%。同时,CK 和各施氮肥处理水稻株高具有相似的动态变化规

律。与 CK 相比,各施氮肥处理最高株高分别增加了 16.93%、12.33%、13.15%、16.85%、9.81%、13.05%和 5.15%。与 CG 处理相比,缓释肥等氮量

施肥处理和缓释肥减氮施肥处理水稻株高均有不同程度的降低。



CK:不施氮肥对照;CG:施常规尿素处理(施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>);HFA:施大颗粒尿素处理(施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>);HFA-10:施大颗粒尿素减氮 10%处理(施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup>);HFA-20:施大颗粒尿素减氮 20%处理(施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>);HFB:施硫包衣尿素处理(施氮量 300 kg/hm<sup>2</sup>);HFB-10:施硫包衣尿素减氮 10%处理(施氮量 270 kg/hm<sup>2</sup>);HFB-20:施硫包衣尿素减氮 20%处理(施氮量 240 kg/hm<sup>2</sup>)。

图 1 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻茎蘖和株高增长动态的影响

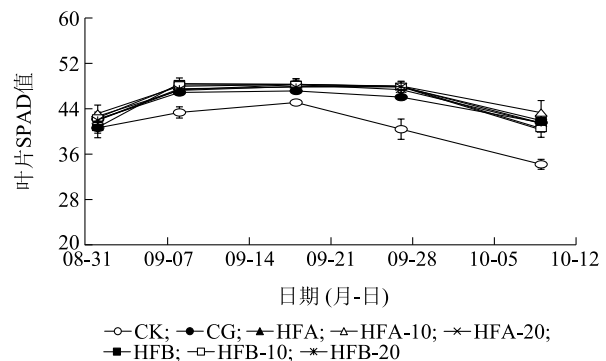
Fig.1 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on the growth dynamics of tiller and plant height of rice under salt stress

CK 和各施氮肥处理水稻抽穗期-成熟期叶片 SPAD 值动态变化表现出相似的规律:SPAD 值抽穗期-灌浆期逐渐增加,灌浆期-成熟期逐渐降低(图 2)。与 CK 相比,CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理叶片 SPAD 值水稻抽穗期(2020-09-01)分别增加了 3.77%、5.03%、6.24%、3.26%、0.16%、4.31%和 3.41%;灌浆期(2020-9-18)分别增加了 4.51%、6.30%、7.06%、6.97%、7.11%、7.02%和 6.04%;成熟期(2020-10-8)分别增加了 30.36%、25.06%、37.63%、29.85%、31.84%、26.06%和 30.02%;抽穗期-成熟期分别增加了 9.87%、10.96%、13.27%、11.12%、11.55%、11.61%和 11.32%。

## 2.2 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻产量及其构成因素的影响

与 CK 相比,各施氮肥处理水稻产量均显著提高( $P<0.05$ )(表 1)。同一缓释肥,减氮 20%处理相比于未减氮和减氮 10%处理水稻产量提高,但差异不显著( $P>0.05$ )。HFA-20 处理水稻产量比 HFA 和 HFA-10 处理分别增加了 3.79%和 6.02%,但差异不显著( $P>0.05$ );HFB-20 处理水稻产量比 HFB 和 HFB-10 处理分别增加了 8.47%和 8.34%,但差异不显著( $P>0.05$ )。

就产量构成因素而言,与 CG 处理相比,HFA 和 HFB 处理有效穗数分别增加了 11.08%和 4.67%,



CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。

图 2 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻叶片 SPAD 值动态变化的影响

Fig.2 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on dynamic changes of SPAD value of rice leaves under salt stress

HFA-10 和 HFA-20 处理有效穗数增加了 3.67%和 7.42%。HFA 和 HFB 处理每穗粒数与千粒质量均低于 CG 处理。同时,CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理水稻茎蘖成穗率分别为 72.00%、71.43%、73.20%、87.38%、70.40%、74.36%和 64.05%(表 1,图 1)。与 CG 处理相比,HFA-20 处理茎蘖成穗率显著提高了 21.36% ( $P<0.05$ )。因此,结合水稻产量及产量构成因素分析,HFA-20 处理水稻产量与 CG 处理相当,主要是由于



HFA-20 处理有效穗数、茎蘖成穗率较高。同一缓释肥, HFA-20 处理每穗粒数比 HFA 和 HFA-10 处理分别增加了 3.96% 和 3.67% ( $P>0.05$ ); HFB-20 处理每穗粒数比 HFB 和 HFB-10 处理分别增加了 16.69% 和 12.25% ( $P<0.05$ )。HFA-20 处理千粒质量比 HFA 和 HFA-10 处理分别增加了 2.37% 和 2.35% ( $P<0.05$ ), HFB-20 处理千粒质量比 HFB 和 HFB-10 处理分别增加了 2.52% 和 0.97% ( $P<0.05$ ); 有效穗数和结实率在同一缓释肥处理间均没有显著差异性。因此, 结合产量及产量构成因素分析, 同一缓释肥各处理下水稻产量差异主要是每穗粒数和千粒质量的差异引起的。

表 1 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻产量及其构成因素的影响  
Table 1 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on rice yield and its components under salt stress

处理	有效穗数 (个/穴)	每穗粒数 (粒)	千粒质量 (g)	结实率 (%)	水稻产量 (g, 1 穴)
CK	4.56c	66.39c	19.62f	81.22a	4.71d
CG	12.00ab	80.39a	23.61b	82.73a	19.19abc
HFA	13.33a	73.43abc	21.58e	80.89a	19.50ab
HFA-10	12.44ab	73.64abc	21.59e	80.93a	19.09abc
HFA-20	12.89ab	76.34ab	23.38bc	81.48a	20.24a
HFB	12.56ab	67.16c	21.97d	82.74a	16.64c
HFB-10	11.28b	69.82bc	23.19c	83.03a	16.66c
HFB-20	10.89b	78.37a	23.95a	78.74a	18.05bc

CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻穗部一次枝梗和二次枝梗性状的影响

就一次枝梗性状而言, 与 CK 相比, CG 处理一次枝梗的枝梗数、总粒数显著增加 ( $P<0.05$ ); HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理一次枝梗的枝梗数、总粒数与 CK 无显著差异 ( $P>0.05$ ) (表 2)。与 CK 相比, 各施氮肥处理 (CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20) 一次枝梗的千粒质量均显著提高 ( $P<0.05$ )。同时, 与 CG 处理相比, HFA 处理一次枝梗的千粒质量显著降低 ( $P<0.05$ ), HFA 处理一次枝梗的枝梗数、总粒数、结实率与 CG 处理无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 CG 处理相比, HFB 处理一次枝梗的枝梗数、千粒质量均显著降低 ( $P<0.05$ ), HFB 处理一次枝梗的总粒数、结实率与 CG 处理无显著差异 ( $P>0.05$ )。另外, 同

一种缓释肥, 与 HFA 处理相比, HFA-20 处理一次枝梗的千粒质量显著提高 ( $P<0.05$ ), HFA-10 处理一次枝梗的枝梗数、总粒数、结实率和贡献率与 HFA 处理均无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 HFB 处理相比, HFB-20 处理一次枝梗的千粒质量显著提高 ( $P<0.05$ ), HFB-10 处理一次枝梗的枝梗数、总粒数、结实率和贡献率与 HFB 处理均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

就二次枝梗性状而言, 与 CK 相比, 各施氮肥处理 (CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20) 二次枝梗的总粒数、千粒质量和贡献率均显著增加 ( $P<0.05$ ), CG 和 HFB-20 处理二次枝梗的枝梗数显著增加 ( $P<0.05$ )。同时, 与 CG 处理相比, 缓释肥 HFA 和 HFB 处理二次枝梗的总粒数、千粒质量均显著降低 ( $P<0.05$ ), HFA 和 HFB 处理二次枝梗结实率、贡献率与 CG 处理无显著差异 ( $P>0.05$ )。另外, 同一缓释肥, HFA-10 处理二次枝梗的枝梗数、总粒数、千粒质量、结实率和贡献率均与 HFA 处理无显著差异 ( $P>0.05$ ); 与 HFA 处理相比, HFA-20 处理二次枝梗的千粒质量显著增加 ( $P<0.05$ ), HFA-20 处理二次枝梗的枝梗数、总粒数、结实率和贡献率均与 HFA 处理无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 HFB 处理相比, HFB-10 处理二次枝梗的千粒质量显著增加 ( $P<0.05$ ), HFB-10 处理二次枝梗的枝梗数、总粒数、结实率和贡献率均与 HFB 处理无显著差异 ( $P>0.05$ ); 与 HFB 处理相比, HFB-20 处理二次枝梗的总粒数和千粒质量均显著增加 ( $P<0.05$ ), 而 HFB-20 处理二次枝梗的枝梗数、结实率和贡献率均与 HFB 处理无显著差异 ( $P>0.05$ )。

### 2.4 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对氮素农学利用率的影响

与 CG 处理相比, HFA、HFA-10 和 HFA-20 处理氮素农学利用率分别提高了 2.15%、10.30% 和 34.01% (图 3)。与 CG 处理相比, HFB-20 处理提高了 15.18%。HFA、HFA-10 和 HFA-20 处理氮素农学利用率分别为 21.13 kg/kg、22.82 kg/kg 和 27.73 kg/kg, HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理氮素农学利用率分别为 18.09 kg/kg、20.02 kg/kg 和 23.83 kg/kg。可见, 同一缓释肥, 氮素农学利用率随施氮量减少均呈增加趋势。HFA-20 处理氮素农学利用率比 HFA 处理提高 23.78% ( $P<0.05$ ), 比 HFA-10 处理提高 17.69% ( $P<0.05$ ); HFB-20 处理氮素农学利用率比

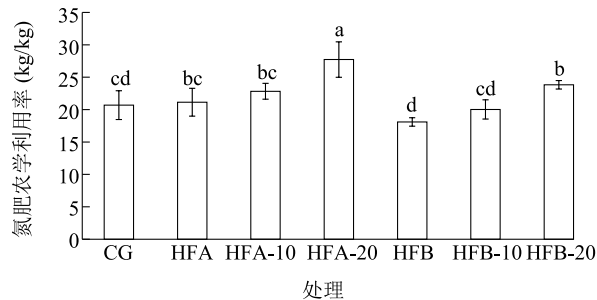
HFB 处理提高 24.10% ( $P<0.05$ ), 比 HBA-10 处理 提高 15.98% ( $P<0.05$ )。

表 2 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻一次枝梗和二次枝梗性状的影响

Table 2 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on characters of primary and secondary branches in rice under salt stress

处理	一次枝梗					二次枝梗				
	枝梗数 (个)	总粒数 (粒)	千粒质量 (g)	结实率 (%)	贡献率 (%)	枝梗数 (个)	总粒数 (粒)	千粒质量 (g)	结实率 (%)	贡献率 (%)
CK	7.04bcd	45.08bc	19.84f	86.67a	67.89a	10.00c	21.31c	18.58d	71.29a	32.11c
CG	7.86a	50.40a	24.41b	90.87a	62.74bc	12.58a	29.99a	21.83ab	68.85a	37.26ab
HFA	7.38abc	47.04abc	22.12d	89.86a	64.05bc	11.33abc	26.38b	19.99c	67.31a	35.95ab
HFA-10	7.31abcd	47.66abc	22.55c	89.87a	64.72abc	10.96bc	25.98b	20.26c	63.88a	35.28ab
HFA-20	7.62abcd	50.22ab	24.46ab	90.76a	65.77ab	10.88bc	26.12b	21.63b	63.52a	34.23bc
HFB	6.78cd	45.51abc	22.41cd	90.42a	64.67abc	10.62bc	24.78b	19.98c	68.89a	35.33ab
HFB-10	6.69d	43.23c	24.28b	91.03a	61.87c	11.05bc	26.59b	22.11a	69.88a	38.13a
HFB-20	7.40abc	48.42abc	24.85a	89.39a	61.74c	11.91ab	29.95a	21.94a	62.72a	38.26a

CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。



CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 3 盐逆境下不同氮肥处理对氮素农学利用率的影响

Fig.3 Effects of different nitrogen treatments on agronomic use efficiency of nitrogen under salt stress

## 2.5 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对稻米主要品质性状的影响

与 CK 相比,各施氮肥处理 (CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20) 稻米糙米率、精米率、整精米率、蛋白质含量均显著增加 ( $P<0.05$ ) (表 3)。各施氮肥处理 (CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20) 稻米长宽比与 CK 相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理稻米糙米率和精米率与 CG 处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 CG 处理相比, HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理稻米蛋白质含量均显著增加 ( $P<0.05$ )。与 CG 处理相比, HFB、HFB-10 处理稻米直链淀粉含量显著增加 ( $P<0.05$ ), HFA 处理稻米直链淀粉含量显著降低 ( $P<0.05$ )。与 CG 处理相比,

HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理稻米胶稠度分别增加了 3.29%、2.63%、5.26%、2.63%、4.82% 和 3.07%。可见缓释肥及其减氮处理使稻米胶稠度提高,其中 HFA-20 处理稻米胶稠度最高。

## 2.6 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻土壤理化性质的影响

与 CK 相比, HFB-10 和 HFB-20 处理土壤电导率增加 ( $P<0.05$ ) (表 4)。与 CK 相比, CG 处理土壤 pH 值显著升高 ( $P<0.05$ ), 缓释肥及其减氮处理 (HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20) 与 CK 相比无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 CK 相比, HFB-20 处理土壤有机碳和全氮含量均显著提高 ( $P<0.05$ ), HFB-10 处理土壤速效磷含量显著提高 ( $P<0.05$ )。与 CK 相比, 且 HFA-10、HFA-20 和 HFB-10 处理土壤速效钾含量显著降低 ( $P<0.05$ )。各处理碱解氮含量无显著差异。HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理土壤电导率、有机碳、碱解氮和速效钾含量与 CG 处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。与 CG 相比, HFB-20 处理土壤全氮含量显著提高, HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 处理土壤 pH 值均显著降低 ( $P<0.05$ )。另外, 同一缓释肥处理, HFA-10 和 HFA-20 处理土壤电导率、有机碳含量、全氮含量、碱解氮含量、速效磷含量和速效钾含量与 HFA 处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ ); HFB-10 和 HFB-20 处理土壤电导率、pH 值、有机碳含量、碱解氮含量和速效磷含量与 HFB 处理相比均无显著差异 ( $P>0.05$ )。

表 3 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对稻米主要品质性状的影响

Table 3 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on main quality traits of rice under salt stress

处理	糙米率 (%)	精米率 (%)	整精米率 (%)	长宽比	胶稠度 (mm)	直链淀粉含量 (%)	蛋白质含量 (%)
CK	80.50b	69.90c	69.30c	1.65abc	79.33a	9.43a	8.15e
CG	83.10a	73.80ab	72.27a	1.68ab	76.00b	8.82de	8.88c
HFA	83.00a	74.00ab	71.10b	1.72a	78.50a	8.53f	9.48ab
HFA-10	82.90a	73.70b	71.23b	1.63bc	78.50ab	9.05cd	8.69d
HFA-20	83.00a	73.50b	71.40b	1.58c	80.00a	8.82de	8.68d
HFB	83.13a	74.30a	72.20a	1.72a	78.00ab	9.13bc	9.47ab
HFB-10	82.83a	73.57b	70.70b	1.70ab	79.67a	9.32ab	9.58a
HFB-20	82.93a	73.50b	71.13b	1.63bc	78.33a	8.62ef	9.36b

CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

表 4 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对土壤基本性质的影响

Table 4 Effects of slow release fertilizer and nitrogen reduction on soil properties under salt stress

处理	电导率 (dS/m)	pH	有机碳 (SOC) 含量 (g/kg)	全氮 (TN) 含量 (g/kg)	碱解氮 (AN) 含量 (mg/kg)	速效磷 (AP) 含量 (mg/kg)	速效钾 (AK) 含量 (mg/kg)
CK	0.95b	7.97bc	9.67b	1.13b	101.51a	15.85b	65.87a
CG	1.05ab	8.13a	10.38ab	1.18b	113.00a	16.64b	60.79ab
HFA	1.01ab	7.90c	10.33b	1.19b	105.66a	16.83b	61.70ab
HFA-10	1.05ab	7.98bc	10.95ab	1.19b	112.80a	20.58ab	57.62b
HFA-20	1.13ab	8.03b	9.97b	1.20b	104.47a	20.15ab	58.16b
HFB	1.12ab	8.00b	10.74ab	1.18b	107.85a	21.55ab	64.79a
HFB-10	1.18a	7.99bc	11.11ab	1.23ab	115.72a	22.77a	62.25b
HFB-20	1.18a	7.97bc	11.78a	1.34a	118.70a	21.95ab	65.02a

CK、CG、HFA、HFA-10、HFA-20、HFB、HFB-10 和 HFB-20 见图 1 注。同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对水稻穗部性状、产量及其构成因素的影响

合理施用肥料在一定程度上可以减缓盐分对作物的胁迫,同时也减少肥料浪费及水体富营养化风险<sup>[12]</sup>,施用缓释肥是缓解中国水稻生产中施氮量高、氮肥利用率低等问题的有效措施,但缓释肥施用量、施肥方式及组配均会对水稻产量造成诸多影响<sup>[20,22-24]</sup>。黄思怡等<sup>[25]</sup>在双季稻种植试验中发现,与常规施肥相比,减氮 10%~20%仍可保证水稻产量不减少甚至增产。金丹丹等<sup>[22]</sup>在滨海盐碱地上的研究结果表明,与常规处理的水稻相比,等氮量施用 2 种新型肥料处理的水稻产量没有明显差异,但产量构成因素却有一定的差异。本研究结果表明,与 CG 处理相比,HFA-20 处理水稻产量增加 5.47% ( $P>0.05$ )。并且就同一缓释肥而言,HFA-20 处理水稻产量高于 HFA,HFB-20 处理水稻产量高于

HFB ( $P>0.05$ ),这与前人的研究结果<sup>[22,25]</sup>类似。结合穗部性状及产量构成因素发现,HFA-20 处理水稻产量与 CG 处理相当的原因主要是在保证一次枝梗穗部性状没有明显不利影响的基础上,水稻茎蘖成穗率显著增加;而相比 HFA 处理,HFA-20 处理水稻不减产主要是由于一次枝梗的千粒质量显著增加,进而表现为千粒质量显著增加。造成这些结果的原因可能是(1)缓释肥在基肥施用后,水稻穗期补充尿素作为穗肥,能够促进抽穗至灌浆成熟期功能叶片的生长和很好地提高干物质积累量<sup>[24,26]</sup>。(2)不同肥料类型在本试验盐逆境(盐分 0.15%)条件下具有不同的盐-肥互作效应,进而造成了水稻产量及产量构成因素的差异性<sup>[12]</sup>;(3)相比等氮量缓/控释肥,氮素农学利用率提高是缓/控释肥减量 20%处理水稻不减产的主要原因之一<sup>[27]</sup>,但同时应该注意到施肥会导致土壤盐分积累,缓/控释肥等氮肥量处理在水稻生长期间土壤盐分积累比减氮处理更为明显,影响了水稻对土壤养分的吸收<sup>[28]</sup>。



另外,考虑到施用缓释肥采用“基肥+穗肥”一基一追的模式,相比常规施肥“基肥+蘖肥(2次)+穗肥(2次)”的多次施肥模式,在保证水稻产量基础上减少缓释肥用量可以兼顾节氮省工省力的多重效益。因此,今后在滩涂盐碱地种植水稻时,选择适宜缓/控释肥合理施用或缓/控施肥结合速效肥既可以促进水稻分蘖的早生快发,又可控制无效分蘖现象,有利于提高水稻的茎蘖成穗率,可为滩涂水稻的高产稳产奠定基础。

### 3.2 盐逆境下缓释肥和氮肥减量对稻米品质和土壤性质的影响

大量研究结果表明,盐逆境下稻米品质对盐分浓度、水稻品种及氮肥施用量均会产生不同的响应效果<sup>[18,29-30]</sup>。周根友等<sup>[30]</sup>研究发现,盐逆境下稻米加工品质和直链淀粉含量显著下降,蛋白质含量显著增加。王洋等<sup>[18]</sup>研究发现,低盐浓度对相对耐盐的水稻品种的品质影响较小或品质还有所提升,但对耐盐性差或盐敏感水稻品种的品质有明显的不良影响,而且随着盐分浓度的增加水稻品质普遍表现为逐渐降低的规律。本研究结果表明,相比 CK,盐逆境下各施氮肥处理的稻米糙米率、整米率和整精米率均显著增加( $P<0.05$ ),说明在盐胁迫下氮肥施用均可以改善稻米的加工品质。本研究发现,缓释肥及其减氮处理使稻米胶稠度提高,与 CG 处理相比,HFA、HFA-20、HFB-10、HFB-20 处理稻米胶稠度显著提高( $P<0.05$ ),其中 HFA-20 胶稠度最高为 80.00 mm。说明与施用常规肥料相比,施用缓释肥可以在保障水稻加工品质的前提下改善稻米的食味品质,特别是大颗粒尿素缓释肥减氮 20% 处理,这与董晓亮等<sup>[29]</sup>在滨海盐碱地上的研究结果相似。董晓亮等<sup>[29]</sup>研究发现,缓/控释肥配合无机肥施用,氮肥施用量减少 20% 时,水稻各阶段的生长指标、稻米食味值显著提高<sup>[29]</sup>。这是由于缓/控释肥中的营养元素缓慢释放使养分淋失降低<sup>[31-32]</sup>,从而增加了水稻生长发育当季的土壤养分,有助于沿海滩涂水稻的根系生长发育,营养物质进一步从根系更好地吸收,从而促使了水稻产量的增加和优质食味米的产生<sup>[18,24,29]</sup>。

## 4 结 论

在本试验条件下,与 HFA 和 HFA-10 处理相比,施大颗粒尿素减氮 20% 处理(HFA-20)水稻千粒

质量显著增加( $P<0.05$ ),与 HFB 和 HFB-10 相比,施硫包衣尿素减氮 20% 处理(HFB-20)水稻千粒质量显著增加( $P<0.05$ )。从穗部性状及产量构成因素来看,与施常规尿素处理相比,施缓释肥减氮处理水稻不减产的原因主要是在保障穗粒数、千粒质量以及一次枝梗、二次枝梗主要性状的基础上,增加了有效穗数及茎蘖成穗率。同时,大颗粒尿素减氮 20% 处理(HFA-20)氮素农学利用率显著高于 CG、HFA 和 HFA-10 处理,硫包衣尿素减氮 20% 处理(HFB-20)氮素农学利用率显著高于 CG、HFB 和 HFB-10 处理,缓释肥减氮 20% 提高了氮素农学利用率,减少了水稻生长前期因施肥导致盐分积累进而阻碍盐逆境中水稻的营养吸收,这也可能是缓释肥减氮 20% 水稻不减产的重要原因。

本试验条件下,盐逆境下施用适量缓释肥对提高水稻有效穗数、茎蘖成穗率、千粒质量、产量、氮素利用率及食味品质有一定积极作用。然而,本试验结果为 1 年盆栽模拟结果,今后还需在滩涂实地水稻种植过程开展进一步验证研究。

### 参考文献:

- [1] 向栋良. 基于供需平衡的 2050 年中国粮食安全研究[J]. 农业科学, 2020, 10(8): 590-601.
- [2] 陈 君,张长宽,林 康,等. 江苏沿海滩涂资源围垦开发利用研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2011, 39(2): 213-219.
- [3] 王相平,杨劲松,姚荣江,等. 苏北滩涂水稻微咸水灌溉模式及土壤盐分动态变化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 54-63.
- [4] 张 蛟,翟彩娇,崔士友. 微咸水灌溉滩涂稻田盐分动态及其水稻产量表现[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(4): 799-803.
- [5] 张 蛟,崔士友,胡帅栋,等. 水稻种植对沿海滩涂土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 107-112.
- [6] 许 轲,唐 磊,张洪程,等. 不同机械直播方式对水稻分蘖特性及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13): 43-52.
- [7] 朱明霞,高显颖,邵玺文,等. 不同浓度盐碱胁迫对水稻生长发育及产量的影响[J]. 吉林农业科学, 2014, 39(6): 12-16.
- [8] 罗成科,肖国举,张峰举,等. 不同浓度复合盐胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(1): 137-141.
- [9] 陈淑芳,朱月林,胡春梅. NaCl 胁迫对嫁接番茄生长和光合特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2006, 22(2): 145-149.
- [10] 严 凯,蒋玉兰,唐纪元,等. 盐碱地条件下施氮量和栽植密度对水稻产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2): 67-74.
- [11] LI M, YANG L, SHEN M, et al. Study on crop yield stability in a



- typical region of rice-wheat rotation based on long-term fertilization experiment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 117-124.
- [12] 单晶晶. 肥盐交互作用对滨海盐渍土与冬小麦生长的影响及肥料效应研究[D]. 烟台:中国科学院烟台海岸带研究所, 2017.
- [13] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 778-783.
- [14] 吕艳超. 施氮量对盐胁迫下寒地梗稻生长发育籽粒淀粉积累及产质量的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2016.
- [15] 张福锁,王激清,张卫峰,等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- [16] 杨 丞,汪 洋,张万洋,等. 灌溉模式与施氮量互作对水稻茎蘖产量形成的影响[J]. 中国水稻科学, 2021, 35(2): 155-165.
- [17] 侯均昊,张晨晖,许 轲,等. 优化控释尿素施用方式提高沙质低肥力土壤水稻产量和品质[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(4): 630-642.
- [18] 王 洋,张 瑞,刘永昊,等. 水稻对盐胁迫的响应及耐盐机理研究进展[J]. 中国水稻科学, 2022, 36(2): 105-117.
- [19] 田 昌,周 旋,谢桂先,等. 控释尿素减施对双季稻田氨挥发损失和氮肥利用率的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(4): 387-397.
- [20] 陈 贵,鲁晨妮,石艳平,等. 不同缓控释肥搭配脲铵对水稻产量、氮素利用效率和土壤养分的影响[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(1): 122-130.
- [21] 李 武,邓 飞,胡 慧,等. 缓控释氮肥对机插杂交籼稻稻米品质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(4): 779-787.
- [22] 金丹丹,宫 亮,李 波,等. 2 种缓/控释肥对滨海盐碱地区水稻产量及氮代谢的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(4): 334-339.
- [23] 徐辰峰. 不同类型缓控释肥对水稻南粳 9108 氮素利用的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(3): 156-159.
- [24] 高 捷,李思宇,成大宇,等. 缓控释肥对水稻产量与品质影响的研究进展[J]. 作物杂志, 2022(3): 20-26.
- [25] 黄思怡,周 旋,田 昌,等. 控释尿素减施对双季稻光合特性和经济效益的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 736-742.
- [26] 张洪程,吴桂成,戴其根,等. 粳型杂交水稻超高产形成规律与栽培途径的探讨[J]. 杂交水稻, 2010, 25(S1): 346-353.
- [27] 程 爽,车 阳,田晋钰,等. 水稻缓控释氮肥应用研究现状与展望[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2020, 41(2): 1-8.
- [28] 王瑞萍,白巧燕,王 鹏,等. 咸水淡水轮灌模式及施肥量对玉米生长和土壤盐分的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(1): 69-73.
- [29] 董晓亮,侯红燕,张金凤,等. 缓释肥和无机肥配施对滨海盐碱地水稻生长和食味品质的影响[J]. 中国农学通报, 2021, 37(4): 1-7.
- [30] 周根友,翟彩娇,邓先亮,等. 盐逆境对水稻产量、光合特性及品质的影响[J]. 中国水稻科学, 2018, 32(2): 146-154.
- [31] 张招娟,黄家伟,黄泷健,等. 施用不同种类肥料对紫色马铃薯生长、产量品质及花青素的影响[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(21): 94-99.
- [32] 顾颖慧,刘虹丹,刘文成,等. 硫包衣缓释肥施用方式调控红皮强筋小麦产量、品质及氮效率的特征分析[J]. 南方农业学报, 2021, 52(9): 2382-2390.

(责任编辑:成纾寒)