

亚洲玉米螟的交配行为与繁殖生物学特性研究

周 旭, 陈日翌*

(吉林农业大学植物保护学院, 长春 130118)

摘 要: 本试验对亚洲玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)的交配行为及玉米螟繁殖相关生物学特性进行研究。结果表明: 玉米螟雌蛾交配次数较高, 平均 4.25 次; 雄蛾交配次数较低, 平均 1.91 次。玉米螟交配次数影响其雌、雄蛾寿命, 雌蛾寿命随交配次数增加而缩短, 存在显著负相关关系; 雄蛾寿命随交配次数增加而延长, 存在显著正相关关系。玉米螟日龄影响其雌、雄蛾的交配率, 随雌蛾日龄增加, 交配率先上升后降低, 存在二次曲线相关关系; 随雄蛾日龄增加, 交配率升高, 存在正相关关系。在防治玉米螟应用上, 一方面可通过推迟雌、雄蛾的交配日龄, 使其错过最适交配时间从而降低交配率; 另一方面可通过影响雌雄蛾间的交配地及交配时间, 影响雌蛾正常产卵, 减少种群基数, 起到有效防治效果。

关键词: 交配延迟; 寿命; 交配日龄; 交配地; 产卵地

中图分类号: S435.132

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2022)06-0089-05

Studies on Mating Behavior and Reproductive Biological Characteristics of *Ostrinia furnacalis*

ZHOU Xu, CHEN Rizhao*

(College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In this experiment, the mating behavior of *Ostrinia furnacalis* and biological characteristics related to its reproduction were studied. Results showed that the mating times of female *O. furnacalis* were relatively high, with an average of 4.25 times. The mating times of male moths were relatively low, with an average of 1.91 times. The mating times of *O. furnacalis* affected the longevity of its female and male moths. The life span of female moths shortened with the increase of mating times, and there was a significant negative correlation. The longevity of male moths prolonged with the increase of mating times, and there was a significant positive correlation. The age of *O. furnacalis* affected the mating rate of its female and male moths. With the increase of female moth age, mating rate first increased and then decreased, with quadratic curve correlation. When the age of male moth increased, the mating rate increased too and there was a positive correlation. In the application of controlling *O. furnacalis*, on the one hand, the mating age of female and male moths can be delayed to make them miss the optimal mating time so as to reduce the mating rate. On the other hand, through interference of the mating place and mating time between male and female moths, affecting the normal spawning of female moths, the population base can be reduced, thus achieving effective control.

Key words: Mating delay; Age; Mating age; Mating place; Spawning place

亚洲玉米螟(*Ostrinia furnacalis*)是我国玉米第一大害虫, 分布范围广, 发生面积大, 危害严重。近年来, 随玉米扩大种植和产业化推进, 玉米品种和耕作制度改进, 全球气候变暖等因素, 玉米螟生存环境获得极大改善, 种群数量显著上升^[1-2]。据报道, 玉米螟为害一般年份造成减产 10%~30%, 严

重时受害株率高达 90% 以上^[3-5]。东北地区是我国玉米主产区, 受玉米螟为害严重。一直以来东北地区使用化学方法防治玉米螟, 但因玉米螟幼虫钻蛀性和长久以来化学防治产生的耐药性, 亚洲玉米螟防治愈发困难^[5]。为减轻化学农药所造成的“3R”问题, 实现农业可持续发展、开展绿色农业, 使用赤眼蜂寄生玉米螟卵和性信息素诱杀玉米螟雄蛾的防治方法已成为当前绿色、安全、高效防治玉米螟的优选方式^[6-10]。在防治过程中, 了解玉米螟成虫交配过程、掌握成虫交配过程的

收稿日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201804-5)

作者简介: 周 旭(1992-), 男, 在读硕士, 从事昆虫生态学研究。

通讯作者: 陈日翌, 男, 博士, 教授, E-mail: rizhaochen@jlau.edu.cn

影响因子及交配过程对成虫生殖力的影响是采用上述方式防控害虫的基础^[11]。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试虫源:将吉林省中部地区玉米田内剖秆获得的玉米螟幼虫放在培养箱内,通过饲喂人工饲料进行室内饲养(28℃,光照L:D=16:8)。待幼虫化蛹后,将虫蛹单头放入直径为6 cm,底部铺有浸湿滤纸保湿的一次性塑料培养皿内,避免成虫羽化交配。每天定时观察玉米螟羽化状态,收集成虫备用。

1.2 试验方法

1.2.1 亚洲玉米螟交配行为的观察

将未交配的1日龄玉米螟雌、雄成蛾各一头,放入底部铺有浸湿滤纸,倒扣的透明塑料碗内,碗内放入装有浸湿脱脂棉球的一次性培养皿作为水源。设置10次重复。通过拍照记录方式观察记录玉米螟的交配行为。

1.2.2 亚洲玉米螟交配次数的测定

亚洲玉米螟雌蛾交配次数测定:将刚羽化未交配雌蛾放入倒扣透明塑料碗内,碗内放有水源。在预试验中,发现当日羽化1日龄雄蛾不具备交配能力,且为避免多头雄成虫竞争对雌雄间交配行为的干扰,取一头2日龄处女雄蛾放入碗中,每天定时更换一只新2日龄处女雄蛾。设置30次重复。直至雌蛾死亡,解剖雌蛾,观察雌蛾卵巢精包个数,确定雌蛾交配次数,同时记录雌蛾寿命。亚洲玉米螟雄蛾交配次数的测定方法同上。

1.2.3 亚洲玉米螟交配受日龄关系的影响

视当日羽化成蛾为1日龄,以此类推,设置1日龄、2日龄、3日龄、5日龄、7日龄共5组,每组30次重复。将雌蛾放入碗内,碗内放入有水源。为避免多头雄成虫竞争对雌雄间交配行为的干扰,每组放入处女雄蛾一头。24 h后解剖雌蛾,观察记录雌蛾卵巢精包个数,确定雌蛾交配与否及交配次数。雄蛾测定方法同上。

1.2.4 亚洲玉米螟交配地偏好性的测定

在温室大棚内(避免下雨对交配的干扰)放置2 m×2 m×2 m网罩,网罩内按五点法放置玉米5株。网罩内放入当日羽化雌、雄成虫各20头,及将要羽化雌、雄蛹各20头。网罩内放置水源。设置3次重复。记录24、48、72 h内叶面上、叶面下、玉米秆、网罩上的交配对数。

1.2.5 亚洲玉米螟雌蛾产卵地偏好性的测定

每日定时进行网罩内雌虫的产卵调查,自产卵日开始,调整调查时间。每日调查6次:8:00、12:00、16:00、20:00、24:00、4:00,按时拍照,整理记录产卵地、产卵量。

1.2.6 数据分析

采用Excel 2003、DPS 7.05进行数据分析,采用Duncan's法进行多重比较,采用一元非线性回归模型拟合法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 亚洲玉米螟的交配行为

交配行为一般由雌虫发起,雌虫趴伏原地,雄虫收到气味信号后主动寻找雌虫。因设置的交配碗空间较小,雄虫一般爬行寻找雌虫。雄虫找到雌虫后,开始交配行为。玉米螟交配时雌蛾倒伏于碗上壁,腹部自然垂下腹部末端与雄蛾腹部末端相连接交配。雄蛾自然垂直倒下,三对足自然收回弯曲贴近胸部,雌雄蛾整体呈T字形。交配完成后雄蛾离开,雌蛾原地产卵。产卵顺序自上而下,卵块呈长条形鱼鳞状。交配时间一般为30 min。此外,还发现处女雌蛾产卵一般为散产,没有具体规则性。

2.2 亚洲玉米螟交配次数对其寿命的影响

玉米螟雌蛾具有多次交配能力,平均4.25次。雄蛾交配次数较低,平均1.91次。雌、雄蛾交配次数对其寿命的影响见表1。随雄蛾交配次数增加,雄蛾寿命显著延长。未交配的雄成虫寿命与交配后的雄成虫寿命有明显差异,3次交配后达最高水平,雄蛾寿命与雄蛾交配次数存在显著正相关(符合逻辑斯蒂模型 $Y_1=8.9989/[1+\exp(0.275460-1.2563X_1)]$, $F=16.43$, $P=0.0574$, $R=0.9709$)。亚洲玉米螟雌蛾的交配次数对寿命的影响与雄蛾相反,随雌蛾交配次数增加,雌蛾寿命明显降低,4次交配后达显著水平,雌蛾寿命与雌蛾交配次数存在显著负相关(符合逻辑斯蒂模型 $Y_2=7.7652/[1+\exp(-7.8773+1.4248X_2)]$, $F=20.6272$, $P=0.0177$, $R=0.9655$)。

2.3 亚洲玉米螟成虫日龄对其交配的影响

雌、雄蛾日龄对其交配的影响见表2。随雄蛾日龄增加,雄蛾交配对数增加。雄蛾交配对数与交配日龄存在正相关(符合逻辑斯蒂模型 $Y_3=3.9485/[1+\exp(9.6961-5.2903X_3)]$, $F=25.3742$, $P=0.0379$, $R=0.9809$)。随雌蛾日龄增加,雌蛾交配对数呈先上升后降低的变化趋势。雌蛾交配对数

表 1 玉米螟交配次数对其寿命的影响 (n=30)

性别	交配次数	寿命(d)	性别	交配次数	寿命(d)
♂	0	3.67±0.33c	♀	0	7.58±0.43ab
♂	1	7.13±0.57b	♀	1	7.67±0.33ab
♂	2	7.33±0.67b	♀	2	7.74±0.27ab
♂	3	8.93±0.43a	♀	3	8.03±0.57a
♂	4	9.13±0.23a	♀	4	6.71±0.34b
			♀	5	5.33±0.33c

注:表中数据为“平均数±标准误”。不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同

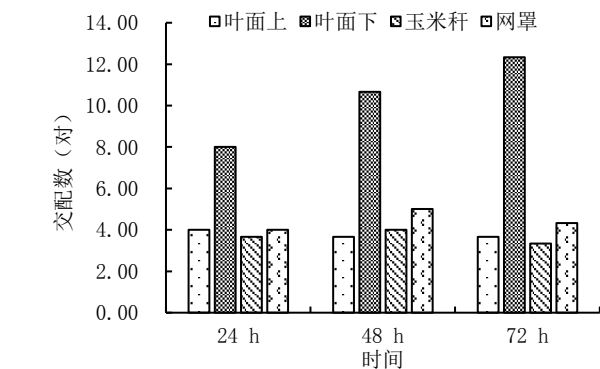
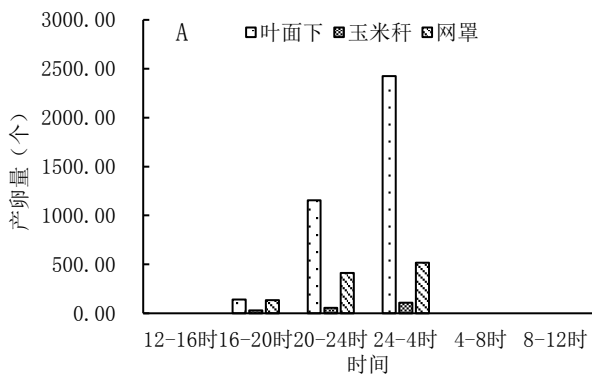
表 2 玉米螟日龄对其交配的影响 (n=30)

性别	交配日龄	交配对数	性别	交配日龄	交配对数
♂	1	0.00±0.00b	♀	1	0.00±0.00b
♂	2	2.80±1.47ab	♀	2	4.47±0.53a
♂	3	3.67±1.33ab	♀	3	5.03±0.95a
♂	5	3.67±1.33ab	♀	5	4.50±1.10a
♂	7	4.50±1.10a	♀	7	2.27±1.13ab

与交配日龄存在相关性(二次曲线模型 $Y_4=-2.7481+3.9755X_4-0.472175X_4^2$, $F=5.5887$, $P=0.1518$, $R=0.9210$)。

2.4 亚洲玉米螟交配地的偏好性

记录并整理试验开始后 24 h~72 h 雌、雄成蛾交配对数来确定玉米螟在玉米植株上的交配偏好区域。将试验中 72 h 内的几处玉米螟交配地点的交配对数以 24 h 为一组进行方差分析,根据差异显著性获得玉米螟交配地的偏好性(图 1)。主要交配偏好地有:叶面上、叶面下、玉米秆、网罩。叶面下交配对数明显高于其他位置,叶面上、叶秆与网罩处的交配对数相差不明显。

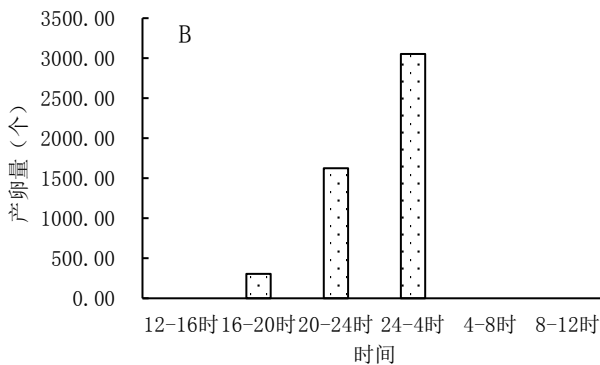


注:图中数据为“平均数±标准误”,不同小写字母表示差异显著(P<0.05),下同

图 1 玉米螟交配地的偏好性

2.5 亚洲玉米螟雌蛾产卵地的偏好性

将试验中的几处玉米螟产卵地点的产卵量进行方差分析,根据差异显著性对比获得玉米螟在玉米植株上产卵区域的偏好性(图 2A)。玉米螟在叶面下的产卵量明显高于其他位置。将玉米螟产卵量按时间汇总后进行方差分析,以 4 h 为一组,根据差异显著性对比获得玉米螟总产卵量与时间的关系(图 2B)。16 时开始产卵,24 时至次日 4 时产卵量最高。



注:A. 玉米螟在不同区域的产卵量随时间的变化,B. 玉米螟的总产卵量随时间的变化

图 2 玉米螟雌蛾产卵地的偏好性

3 讨 论

鳞翅目昆虫雌雄成虫交配时,雄虫将含有精

液的精包射入雌虫交配囊内,因此可以依据雌虫体内的精包数来判定成虫有效的交配次数^[12]。研究表明,雌虫具有连续多次交配产卵性,与刘瑞

林^[13]试验结果一致,本试验得到进一步验证,最高交配次数达4.25次,且随交配次数增加,雌虫寿命明显降低。处女雌蛾寿命最长,这可能与雌蛾的存在意义有关。雌蛾的存在就是为了保证种群的繁衍,多数鳞翅目昆虫雌性成虫在交配后寿命明显降低^[14]。雄蛾不具备连续多次交配性,最高交配次数达1.91次,且随交配次数增加,雄蛾寿命明显增加。这可能与雄蛾体内营养物质调节有关,这与大多数蛾类相似^[14]。

玉米螟雌蛾交配率随日龄增加先上升后降低,可能与雌虫卵巢发育或萎缩程度有关。雌蛾孵化后8~24 h卵巢达到成熟,即可开始正常交配行为,交配率随之逐渐升高,随日龄增加雌蛾卵巢活性逐渐降低,雌蛾生命力也逐渐降低,交配率随之逐渐降低。在其他蛾类中,交配率随日龄增加而下降的现象很常见^[15-17]。由此可以看出玉米螟的交配是由雌蛾主导,受雌蛾的交配活性影响,这与水稻二化螟相近^[18]。相反,也有一些文献报道其他鳞翅目雄蛾交配日龄对雌蛾生殖力和寿命影响显著^[15,19]。因此,雄蛾的日龄对雌蛾生殖力和寿命的影响可能因不同蛾类种类而异。

成虫在试验设置的玉米植株交配区域更偏好于叶下。可能由于叶下位置隐蔽,降低了捕食性天敌捕食的风险,有利于种群繁衍等原因。产卵地同样偏好于叶下,这可能与雌蛾交配地的选择有关。交配后直接将受精卵产于叶下,加快后代的繁殖,同时位置隐蔽,降低寄生性天敌寄生的风险,有利于种群繁衍。但在室内试验时,在透明塑料碗中雌蛾同样选择倒伏于碗上壁。这样选择的因素可能与雌雄蛾交配方式有关。交尾时雌蛾倒伏于碗上壁,雄蛾自然垂下,雌雄蛾腹部近似与水平垂直,可能更利于雄蛾精包进入雌蛾体内,提高雌蛾生殖力。在自然条件下,亚洲玉米螟交配和栖息地点更偏好杂草地、大豆地等^[20-22]。

已交配雌虫所产卵块为聚集的规则鱼鳞状,处女雌蛾产卵为不规则散产且数量较少,这种现象在其他蛾类中也有出现^[18]。处女雌蛾出现少量散产卵粒的原因可能与玉米螟卵巢发育速度较快有关,玉米螟雌蛾羽化后28~45 h内进入卵巢成熟待产期,羽化后3 d进入产卵盛期^[23],处女雌蛾卵巢内待产卵粒数量过多导致未受精卵粒溢出。

研究表明,雌蛾产卵高峰期在20~4时,与谢为民等^[24]研究结果一致,可能与螟蛾类的生殖习性有关,这种现象在其他蛾类上较为常见^[25-27]。相较白天而言,可能夜间的温、湿度更适合卵的

附着,也更适合卵的生长发育。

本试验的研究结果可对今后的亚洲玉米螟田间防治起到指导意义:(1)通过推迟雌、雄蛾的交配日龄,使其错过最适交配时间从而降低交配率,例如使用性诱剂等推迟雌、雄蛾交配;(2)通过影响雌雄蛾间的交配地及交配时间,影响雌蛾正常产卵,减少种群基数,起到有效的防治效果,例如使用黑光灯诱捕在夜间干扰影响雌雄蛾正常交配。

参考文献:

- [1] 姜玉英,刘万才,黄冲,等.2019全国农作物重大病虫害发生趋势预报[J].中国植保导刊,2019,39(2):36-39.
- [2] 全国农技推广中心.2020年我国农作物重大病虫害发生将重于2019年[J].农药,2020,59(1):5.
- [3] 赵秀梅,张树权,李青超,等.黑龙江省玉米穗期主要害虫发生概况及防治对策[J].中国植保导刊,2014,34(11):37-39.
- [4] 毛增华,阎惠,李兆芬.吉林省玉米螟天敌种类调查研究初报[J].吉林农业大学学报,1989(4):6-8.
- [5] 谢为民,王蕴生.玉米螟危害玉米产量损失估测方法的讨论[J].吉林农业科学,1990(3):41.
- [6] 孟宪佐.我国昆虫信息素研究与应用的进展[J].昆虫知识,2000(2):75-84.
- [7] 汪洋洲,王振营,盛如,等.亚洲玉米螟新型性诱芯的诱蛾性能研究[J].植物保护,2013,39(4):173-174.
- [8] 张俊杰,阮长春,臧连生,等.我国赤眼蜂工厂化繁育技术改进及防治农业害虫应用现状[J].中国生物防治学报,2015,31(5):638-646.
- [9] 吴畏,迟畅,沙洪林,等.玉米螟性信息素诱芯田间防治玉米螟效果研究[J].吉林农业科学,2014,39(6):31-33.
- [10] 李丽娟,鲁新,张国红,等.赤眼蜂对不同基质的玉米螟卵的寄生选择性[J].东北农业科学,2016,41(4):75-78.
- [11] Unnithan G C, Paye S O. Mating, Longevity, Fecundity, and Egg Fertility of *Chilo partellus* (Lepidoptera: Pyralidae): Effects of Delayed or Successive Matings and Their Relevance to Pheromonal Control Methods[J]. 1991, 20(1): 150-155.
- [12] Burns J M. Mating frequency in natural population of skippers and butterflies as determined by spermatophore counts[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1968, 61(3): 852-859.
- [13] 刘瑞林.不同性比交配对比玉米螟雌蛾生殖力的影响[J].山西大学学报(自然科学版),1983(2):93-96.
- [14] 张诗语,李冬,曾菊平,等.蛾类雄虫交配史对雌虫生殖适合度的影响:Meta分析[J].生态学杂志,2016,35(2):551-558.
- [15] Torres-Vila L M, Rodríguez-Molina M C, Stockel J. Delayed mating reduces reproductive output of female European grapevine moth, *Lobesia botrana* (Lepidoptera: Tortricidae)[J]. 2002, 92(3): 241-249.
- [16] Huang F, Subramanyam B. Effects of delayed mating on reproductive performance of *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidop-

- tera: Pyralidae[J]. Journal of Stored Products Research, 2003, 39(1): 53-63.
- [17] Fadamiro H Y, Baker T C. Reproductive performance and longevity of female European corn borer, *Ostrinia nubilalis*: effects of multiple mating, delay in mating, and adult feeding[J]. Journal of Insect Physiology, 1999, 45(4): 385-392.
- [18] 焦晓国, 宣维健, 盛承发. 水稻二化螟的交配行为[J]. 生态学报, 2006(4): 1110-1115.
- [19] Alfredo Jiménez-Pérez, Qiao Wang. Male Remating Behavior and Its Effect on Female Reproductive Fitness in *Cnephasia jactatana* Walker (Lepidoptera: Tortricidae)[J]. Journal of Insect Behavior, 2004, 17(5): 685-694.
- [20] 李文德, 陈素馨, 李璧铄, 等. 亚洲玉米螟 1 代和 2 代成虫行为生物学研究—I 栖息与交尾场所及夜间行为动态[J]. 张家口农专学报, 2002(1): 1-8.
- [21] 曲洛伯, 周 旭, 陈日璽. 不同干式性诱捕器及性诱芯诱捕亚洲玉米螟雄蛾效果研究[J]. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 94-99.
- [22] 魏 鑫. 长春地区亚洲玉米螟雄蛾的种群发生动态及其保护酶活性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019.
- [23] 钱仁贵. 玉米螟卵巢解剖及应用初报[J]. 昆虫知识, 1982(5): 15-17.
- [24] 谢为民, 王蕴生. 玉米螟成虫习性观察[J]. 植物保护, 1993(5): 17-18.
- [25] 程志加, 孙 崑, 高月波, 等. 东北地区三代黏虫玉米田为害行为研究[J]. 应用昆虫学报, 2018, 55(5): 849-856.
- [26] 舒金平, 滕 莹, 张爱良, 等. 竹笋基夜蛾的求偶及交配行为[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3421-3428.
- [27] 罗礼智, 曹卫菊, 钱 坤, 等. 甜菜夜蛾交配行为和能力[J]. 昆虫学报, 2003(4): 494-499.

(责任编辑: 王 昱)

- (上接第 38 页) of an Alfisol[J]. Geoderma, 2008, 148(2): 173-179.
- [9] 易 琼, 唐拴虎, 黄巧义, 等. 有机、无机添加剂改良反酸田水稻生长效果研究[J]. 中国土壤与肥料, 2013, 50(3): 31-36.
- [10] 奉启云, 李红涛, 奉向东, 等. 森美思土壤调理剂对 Cd 污染稻田修复效果研究[J]. 有色冶金设计与研究, 2018, 39(5): 15-19.
- [11] De Souza R F, Faquin V, Andrade A T, et al. Phosphorus forms in soils under influence of liming and organic fertilization[J]. Revista Brasileira De Ciencia Do Solo, 2007, 31(6): 1535-1544.
- [12] 孙建华. 玉米施锌吸收积累及有效化调控机理的研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2013.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 56-132.
- [14] 魏 静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. 土壤, 2018, 50(5): 874-880.
- [15] 张雪凌, 姜慧敏, 刘 晓, 等. 优化氮肥用量和基追比例提高红壤性水稻土肥力和双季稻氮素的农学效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2): 351-359.
- [16] 冯绪猛, 郭九信, 王玉雯, 等. 锌肥品种与施用方法对水稻产量和锌含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5): 1329-1338.
- [17] Jaksomsak P, Tuiwong P, Rerkasem B, et al. The impact of foliar applied zinc fertilizer on zinc and phytate accumulation in dorsal and ventral grain sections of four thai rice varieties with different grain zinc[J]. Journal of Cereal Science, 2018, 79: 6-12.
- [18] 刘 铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30-37.
- [19] 郑甲成, 刘 婷, 张百忍, 等. 几种微量元素作用及对水稻发育的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2010, 32(S1): 5-8.
- [20] 国家水稻产业技术体系. 中国现代农业产业可持续发展战略研究(水稻分册)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2017: 85-96.
- [21] Fageria N K, Baligar V C. Growth and nutrient concentrations of common bean, lowland rice, corn, soybean, and wheat at different soil pH on an inception [J]. Journal of Plant Nutrition, 1999, 22(9): 1495-1507.
- [22] 方克明, 钟国民, 周丽芳, 等. 石灰在酸性稻田的施用效果[J]. 中国土壤与肥料, 2017, 54(5): 105-109.
- [23] 尹彩侠, 孔丽丽, 李 前, 等. 优化施肥条件下有机肥部分替代化肥对水稻产量、养分吸收及转运的影响[J]. 东北农业科学, 2020, 45(6): 59-63.
- [24] 方畅宇, 屠乃美, 张清壮, 等. 不同施肥模式对稻田土壤速效养分含量及水稻产量的影响[J]. 土壤, 2018, 50(3): 462-468.
- [25] 董一漩, 屠乃美, 魏 征, 等. 施肥模式对不同基础地力稻田培肥和水稻产量的动态影响[J]. 东北农业科学, 2019, 44(2): 13-18, 33.
- [26] 魏义长, 白由路, 杨俐苹, 等. 测土推荐施锌对水稻产量结构及土壤有效养分的影响[J]. 中国水稻科学, 2007, 21(2): 197-202.
- [27] 何电源. 关于稻田施用石灰的研究[J]. 土壤学报, 1992, 46(1): 87-93.
- [28] 蔡 东, 肖文芳, 李国怀. 施用石灰改良酸性土壤的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(9): 206-213.
- [29] 周 坤, 刘 俊, 徐卫红, 等. 外源锌对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(6): 1592-1599.
- [30] 董如茵, 郑应明, 王 林, 等. 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2589-2596.
- [31] 王秋菊. 黑龙江地区土壤肥力和积温对水稻产量、品质影响研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.

(责任编辑: 王丝语)