

土壤施用生物质炭对取食水稻的灰飞虱生活史特征的影响

傅强 李保平 孟玲*

(南京农业大学 植物保护学院/农作物生物灾害综合治理教育部重点实验室, 南京 210095; *通讯联系人, E-mail: ml@njau.edu.cn)

Effects of Biochar Amendment to Soil on Life History Traits of *Laodelphax striatellus* (Hemiptera: Delphacidae) on Rice Plants

FU Qiang, LI Baoping, MENG Ling*

(College of Plant Protection, Nanjing Agricultural University/Key Laboratory of Integrated Management of crop Diseases and Pests, Ministry of Education, Nanjing 210095, China; *Corresponding author, E-mail: ml@njau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】To investigate the potential of biochar application in the control of crop pests, we evaluated the effect of biochar amendment to soil on the small brown rice planthopper (*Laodelphax striatellus*) on rice. 【Method】Laboratory experiments were conducted using a 2 × 3 factorial design to explore the effect of the two independent variables (biochar type and application level) on developmental and reproductive performances of the insect on potted rice plants. 【Result】1) Biochar type and application level had an interactive effect on the nymphal duration, which though did not vary with application levels when corn or rice biochar was applied, yet significantly prolonged by 1.54 days when wheat biochar was applied at 30 g/kg compared to 18.70±0.30 d in the control. 2) Biochar type and application level did not have interactive effects on longevity of female adults. Biochar application level did not influence female adult longevity, but corn biochar significantly increased the longevity by 2.13 d compared to 23.70 ± 0.48 d with addition of rice biochar, for wheat biochar, by 3.10 d. 3) There was a biochar type × application level interaction effect on fecundity. Biochar amendment decreased lifetime fecundity of *L. striatellus* but the effect varied with biochar type and application level. At 30 g/kg biochar level, the fecundity increased for corn biochar by 22.80 and 18.95 eggs compared to those, for rice and wheat biochar respectively. At 50 g/kg biochar level, the fecundity decreased for corn biochar by 16.90 and 21.60 eggs compared to those for rice biochar and wheat biochar. 【Conclusion】Biochar amendment to soil can have a negative impact on fecundity of *L. striatellus*, yet the impact varies with biochar type and application level.

Key words: biochar; rice planthopper; development; reproduction; soil amendment

摘要: 【目的】为评价土壤施用生物质炭在防治农作物害虫中的潜力, 观察了土壤施用生物质炭对取食水稻的灰飞虱(*Laodelphax striatellus*)发育和生殖的影响。【方法】开展室内盆栽试验, 采用生物质炭种类(玉米、水稻和小麦秸秆)与添加量(0、30和50 g/kg)的2因素×3水平组合处理土壤, 种植水稻苗、接种灰飞虱, 观察灰飞虱的发育和生殖表现。【结果】1)生物质炭种类与添加量互作影响灰飞虱若虫历期, 当施用玉米或水稻生物质炭时, 不同添加量之间的若虫历期无显著差异; 当施用小麦生物质炭时, 添加30 g/kg生物质炭处理下的若虫历期比对照(18.70±0.30 d)延长1.54 d。2)生物质炭种类与添加量没有显著互作影响雌成虫寿命。添加量不影响, 但生物质炭种类具有显著影响, 施用玉米或小麦生物质炭处理雌成虫寿命比水稻生物质炭处理雌成虫寿命(23.70±0.48 d)分别延长2.13 d或3.10 d。3)生物质炭种类与添加量互作影响灰飞虱雌虫终身产卵量, 施用生物质炭使生殖力下降, 但下降幅度随生物质炭处理不同而异, 当添加30 g/kg生物质炭时, 施用玉米生物质炭处理下的雌虫终身产卵量(176.40±6.84粒)比施用水稻或小麦生物质炭处理分别多22.80粒或18.95粒; 当添加50 g/kg生物质炭时, 施用玉米生物质炭处理的雌虫终身产卵量(140.30±3.26粒)比施用水稻或小麦生物质炭处理分别少16.90粒或21.60粒。【结论】施用生物质炭可减弱灰飞虱的生殖力, 减幅随生物质炭种类与添加量的不同而异。

关键词: 生物质炭; 稻飞虱; 发育; 生殖; 土壤改良

中图分类号: S435.112+.3; S511.06

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)02-0200-07

我国每年作物秸秆产量约为8亿t^[1], 合理开发利用秸秆等农业废弃物资源仍然是亟需解决的现实问题。生物质炭(biochar)是秸秆等有机物质在缺

氧条件下高温处理的产物^[2], 因其丰富的孔隙结构、高度芳香化和偏碱性, 不仅可以改善土壤的肥力, 减少CO₂等气体的产生, 而且具有持续的碳封存能

收稿日期: 2017-09-15; 修改稿收到日期: 2017-11-29。

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFD0201000)。

力^[3]。因此, 将秸秆等农业废弃物碳化为生物质炭施用, 被认为可能是未来有效的秸秆处理方式和改良酸性土壤质量的重要途径之一^[4]。生物质炭很多潜在积极作用已引起全世界关注^[5-6]。在全球面临环境污染、气候变暖、能源紧张、粮食危机和土壤肥力退化等严重挑战面前, 生物质炭可能为解决上述问题提供一个潜在的综合解决方案。

有关农用生物质炭的研究主要集中在提高作物产量、增汇减排以及对土壤的改良等方面^[7], 生物质炭是否影响植食性害虫近年来引起关注。首先, 在以色列 Elad 等^[8]研究生物质炭对蔬菜病害影响时, 无意中观察到一种植食性的侧多食跗线螨 (*Polyphagotarsonemus latus*) 对辣椒的危害减轻; 随后, Hou 等^[9]专门研究施用生物质炭对水稻害虫褐飞虱 (*Nilaparvata lugens*) 生活史的影响发现, 在土壤中生物质炭添加量很大 (200 g/kg) 时, 褐飞虱出现若虫发育历期延长、若虫存活率降低、雌虫终身产卵量减小和卵孵化率降低等不良表现。但迄今仍不清楚土壤施用生物质炭对害虫的负面影响是否具有普遍性。

灰飞虱 (*Laodelphax striatellus*) 是我国水稻种植区的主要害虫, 全国各地均有分布, 但以长江中下游流域及华北稻区较多^[10]。该虫除了直接取食水稻汁液造成水稻减产, 还是传播水稻条纹叶枯病等多种水稻病毒病的媒介, 传毒造成的危害常较直接取食更为严重^[11]。生物质炭可能随原料以及制备工艺的变化而存在差异; 另一方面, 土壤条件、作物种类也影响生物质炭的作用^[12-13]。为确认生物质炭是否影响灰飞虱以及原料不同的生物质炭是否具有不同的影响, 本研究选用原料不同的3种生物质炭, 参照大田生产推荐用量设置不同添加量处理, 种植盆栽水稻观察灰飞虱的生活史特征表现, 从而为评价生物质炭提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料来源

生物质炭分别以玉米、水稻和小麦秸秆为原料, 由南京勤丰秸秆研发有限责任公司生产, 其全氮含量分别为 1.11、0.61 和 0.46 g/kg; 全钾含量分别为 14.46、27.15 和 1.85 g/kg; 有机碳含量分别为 518.11、537.79 和 567.41 g/kg。

土壤为红棕壤, 采自南京市东郊一闲置农田 (采样深度 0~15 cm), 土壤 pH 值为 7.3, 全氮含量为 0.09%, 有机碳含量为 1.17%。将土壤自然风干, 过

2 mm 网状筛备用。

供试水稻品种为准香粳 15 (由淮阴农业科学研究所提供)。将备用土壤和添加不同生物质炭种类与添加量的各处理土壤分别置于小盆钵 (高 5 cm、直径 5 cm) 中, 每盆播种已催芽的水稻种子 2 粒, 适量浇水 (3 次/d), 待其生长 30 d (约 25 cm 高) 后供试。

灰飞虱为室内饲养的健康种群 (由南京农业大学昆虫生态与预测预报实验室提供)。在养虫室内 (温度 25±1℃, 相对湿度 60%~80%) 用盆栽水稻苗饲养一代 (25~30 d) 后供试。

1.2 试验方法

设置 3 种生物质炭 (以玉米、水稻和小麦秸秆为原料的生物质炭) 与各生物质炭添加量 (0、30 和 50 g/kg) 的 2 因素×3 水平的析因设计。于每盆稻株上接 24 h 内初孵若虫 10 头, 然后用纱网封顶的透明圆柱形塑料罩 (高 30 cm、直径 4 cm) 罩住花盆, 以防昆虫逃逸。每天观察、记录若虫发育进度, 直至所有若虫羽化为成虫为止, 统计若虫历期及存活、成虫性比及翅型。将当日羽化的雌、雄成虫配对, 接于对应处理的稻株上, 然后罩上塑料罩。每 7 d 更换 1 次稻株, 发现雄虫死亡时及时补充。每天观察、记录雌虫存活情况, 并记录若虫孵化数且将若虫移出, 直到连续 3 d 未见新若虫孵化为止, 然后镜检剖查稻株中未孵化的卵量, 统计雌虫终身产卵量和卵孵化率。每处理重复 20 次。

1.3 数据分析

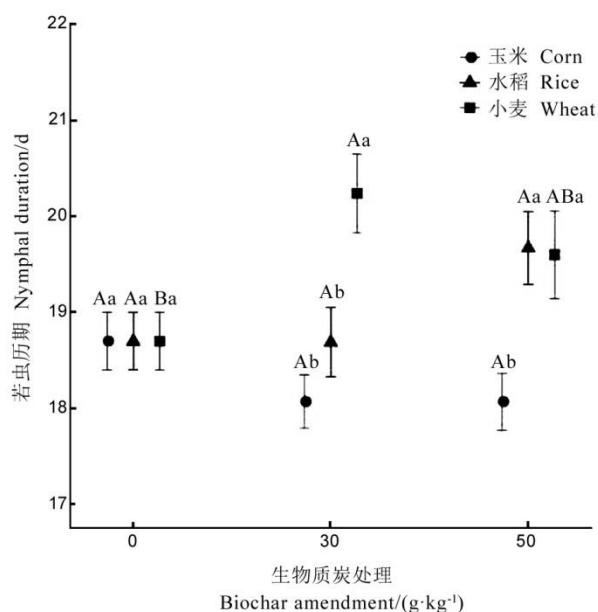
用 Poisson 模型 (自然对数链接函数) 分析若虫历期及存活率、雌成虫寿命和雌虫终身产卵量及卵孵化率数据, 用一般线性模型分析若虫存活和孵化的概率, 用 Logistic 模型 (logit 链接函数) 分析成虫雌性比例和短翅比例; 以生物质炭种类和添加量为自变量因素, 采用似然比卡方测验检验自变量的影响是否显著; 首先, 确定两自变量因素是否有显著互作影响, 如有, 分别比较某一因素各处理下另一因素处理间的差异; 如无, 则分别分析两因素的各处理间边际均值的差异; 用 TukeyHSD 测验比较不同处理水平之间的差异; 用 R 统计软件^[14] 进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 施用生物质炭对灰飞虱生长发育的影响

2.1.1 对灰飞虱若虫历期及存活率的影响

灰飞虱若虫历期受生物质炭种类与添加量互作的显著影响 (似然比测验, 下同, $\chi^2=15.37$, $P<$



图中短柄表示均值±标准误;不同大写字母表示同种生物质炭种类下不同添加量之间在5%水平上差异显著;不同小写字母表示同种添加量下不同生物质炭种类之间在5%水平上差异显著。下同。

Error bar represent mean ± standard error; Different capital letters represent significant differences between application levels of the same biochar; different lowercase letters represent significant differences between biochar types at the same application level at $\alpha = 0.05$ (two-tailed) level. The annotation applies to the following figures.

图1 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱若虫历期的影响

Fig. 1. Effects of biochar type and application level on nymphal duration of *L. striatellus*.

0.01)。当施用玉米或水稻生物质炭时,不同添加量之间的若虫历期无显著差异;当施用小麦生物质炭时,添加30 g/kg 生物质炭处理下的若虫历期(20.24±0.41 d)比不施生物质炭对照下的若虫历期(18.70±0.30 d)显著延长1.54 d($Z=-3.20$, $P<0.01$)。当添加30 g/kg 生物质炭时,施用小麦生物质炭处理下的若虫历期比施用玉米或水稻生物质炭处理下的若虫历期(18.07±0.28 d 和 18.68±0.36 d)分别显著延长2.17 d($Z=-4.47$, $P<0.01$)和1.56 d($Z=-3.12$, $P<0.01$);当添加50 g/kg 生物质炭时,施用小麦生物质炭处理下的若虫历期(19.60±0.46 d)与施用水稻生物质炭处理下的若虫历期(19.67±0.38 d)无显著差异($Z=0.13$, $P=0.99$)(图1)。

灰飞虱若虫存活率在生物质炭种类与添加量之间没有显著互作($F=0.43$, $P=0.79$)。在不同生物质炭种类处理下灰飞虱若虫存活率无显著差异($F=1.05$, $P=0.35$),但在不同生物质炭添加量处理下差异显著($F=12.24$, $P<0.01$)。添加30 g/kg 或50 g/kg 生物质炭处理下的若虫存活率(79.83±1.53% 和

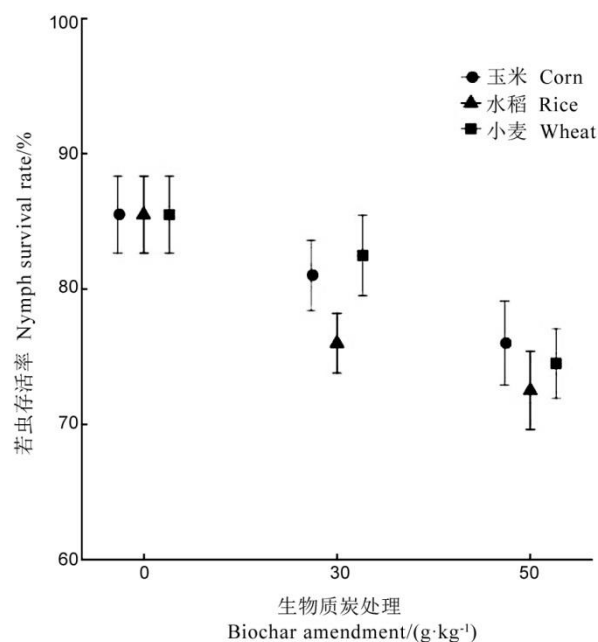


图2 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱若虫存活率的影响

Fig. 2. Effects of biochar type and application level on nymphal survival of *L. striatellus*.

74.33±1.64%)比不施生物质炭对照(85.50±1.62%)分别显著减少5.67%($t=-2.51$, $P=0.03$)和11.17%($t=-4.95$, $P<0.01$)(图2)。

2.1.2 对灰飞虱雌虫比例及短翅率的影响

灰飞虱雌虫比例在生物质炭种类与添加量之间没有显著互作($\chi^2=0.82$, $P=0.93$),而且在不同生物质炭种类($\chi^2=0.78$, $P=0.67$)与不同生物质炭添加量($\chi^2=2.67$, $P=0.26$)处理下均无显著差异(图3-A)。

灰飞虱短翅率在生物质炭种类与添加量之间没有显著互作($\chi^2=7.94$, $P=0.09$),而且在不同生物质炭种类($\chi^2=1.30$, $P=0.52$)与不同生物质炭添加量($\chi^2=5.79$, $P=0.05$)处理下均无显著差异(图3-B)。

2.1.3 对灰飞虱雌成虫寿命的影响

灰飞虱雌成虫寿命在生物质炭种类与添加量之间没有显著互作($\chi^2=6.21$, $P=0.18$)。灰飞虱雌成虫寿命在不同生物质炭添加量处理下无显著差异($\chi^2=2.03$, $P=0.36$),但在不同生物质炭种类处理下差异显著($\chi^2=11.95$, $P<0.01$)。施用玉米或小麦生物质炭处理下的雌成虫寿命(25.83±0.39 d 和 26.80±0.45 d)比施用水稻生物质炭处理(23.70±0.48 d)分别显著延长2.13 d($Z=-2.34$, $P=0.04$)和3.10 d($Z=3.37$, $P<0.01$)(图4)。

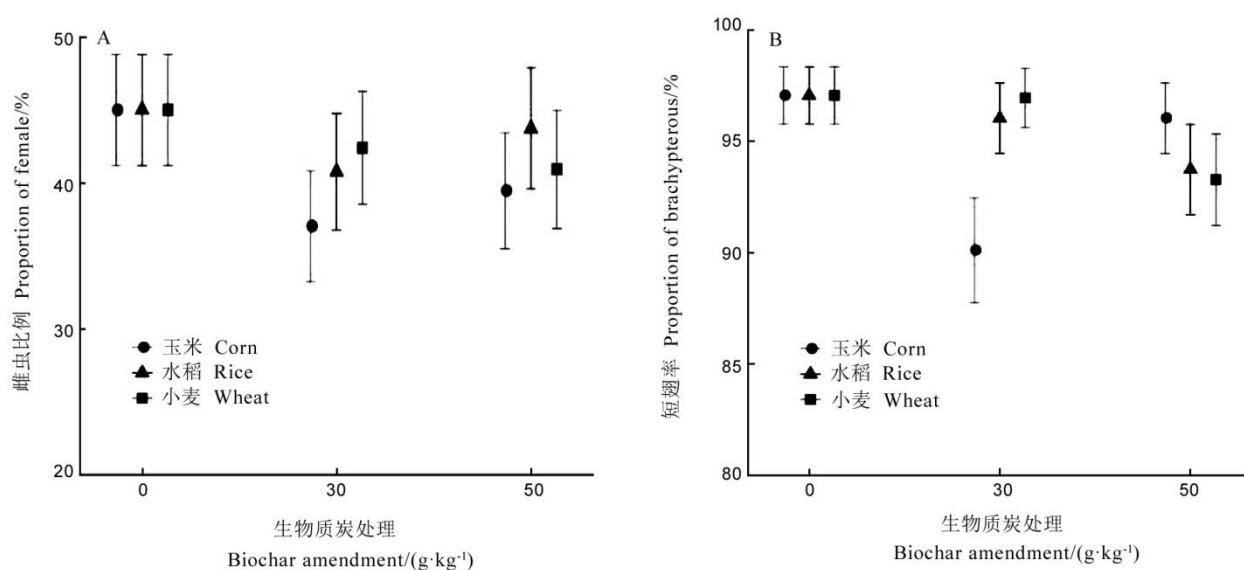


图 3 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱雌虫比例(A)和短翅率(B)的影响

Fig. 3. Effects of biochar type and application level on proportion of females(A) and brachypterous forms(B) in *L. striatellus*.

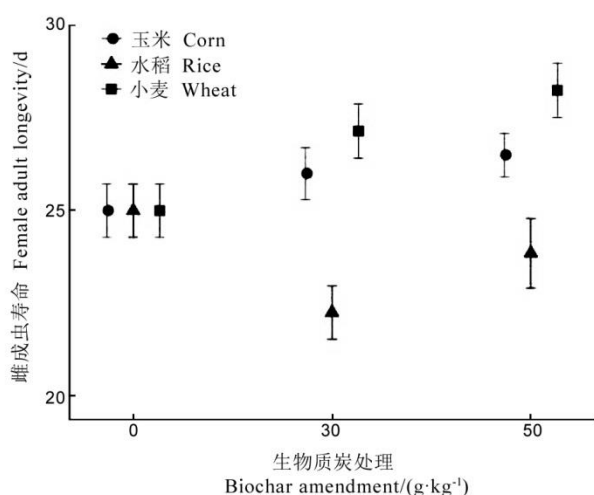


图 4 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱雌成虫寿命的影响

Fig. 4. Effects of biochar type and application level on female adult longevity of *L. striatellus*.

2.2 施用生物质炭对灰飞虱生殖力的影响

2.2.1 对灰飞虱雌虫终身产卵量及卵孵化率的影响

灰飞虱雌虫终身产卵量受生物质炭种类与添加量互作的显著影响($\chi^2=68.90$, $P<0.01$)。当添加 30 g/kg 生物质炭时,施用玉米生物质炭处理下的雌虫终身产卵量(176.40 ± 6.84 粒)比施用水稻或小麦生物质炭处理(153.60 ± 4.74 粒和 157.45 ± 4.34 粒)分别显著增加 22.80 粒($Z=5.60$, $P<0.01$)和 18.95 粒($Z=4.63$, $P<0.01$);当添加 50 g/kg 生物质炭时,施用玉米生

物质炭处理下的雌虫终身产卵量(140.30 ± 3.26 粒)比施用水稻或小麦生物质炭处理(157.20 ± 7.11 粒和 161.90 ± 5.14 粒)分别显著减少 16.90 粒($Z=-4.37$, $P<0.01$)和 21.60 粒($Z=-5.55$, $P<0.01$),比不施生物质炭对照下的雌虫终身产卵量(207.10 ± 7.99 粒)显著减少 66.80 粒($Z=15.92$, $P<0.01$)(图 5)。

灰飞虱卵孵化率在生物质炭种类与添加量之间没有显著互作($F=0.36$, $P=0.84$)。灰飞虱卵孵化率在不同生物质炭种类处理下无显著差异($F=1.29$, $P=0.28$),但在不同生物质炭添加量处理下差异显著($F=4.53$, $P=0.01$)。添加 50 g/kg 生物质炭处理下的卵孵化率($95.38\%\pm0.34\%$)比不施生物质炭对照($96.75\%\pm0.31\%$)显著减少 1.37%($t=-2.92$, $P=0.01$)(图 6)。

3 讨论

本研究结果说明,土壤中施用生物质炭可减弱灰飞虱的生殖力,这与 Hou 等^[9]研究的施用生物质炭对褐飞虱生活史的影响结论一致。但本研究进一步发现,不利影响的程度随生物质炭种类与添加量的不同而异。

生物质炭对灰飞虱产生不利影响的原因,很可能是土壤添加生物质炭后改变了水稻对一些关键养分的吸收,比如氮、硅元素。生物质炭本身碳含量极高,施用后会大幅度提高土壤中的 C/N 值。郭伟等^[15]研究表明,施用生物质炭虽然能够提高土壤

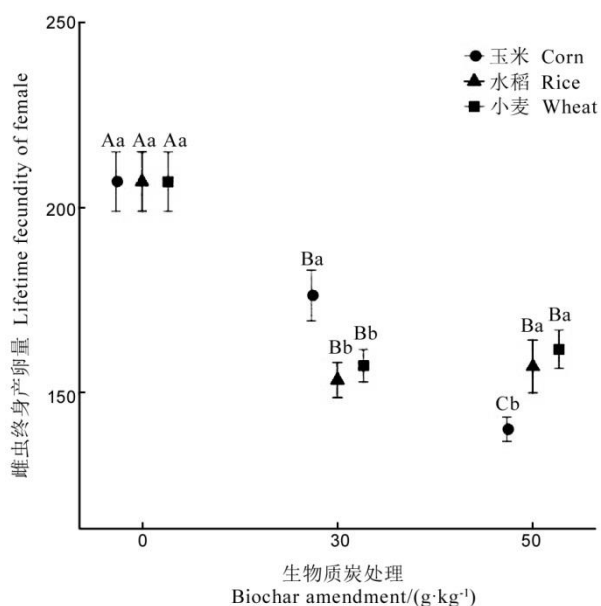


图5 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱雌虫终身产卵量的影响

Fig. 5. Effects of biochar type and application level on lifetime fecundity of *L. striatellus*.

中全氮的含量,但是由于碳强烈的固持作用使得土壤中的有效氮含量降低,减少植物对有效氮的吸收,从而使得植物叶片的营养价值降低。Xie 等^[16]也认为,生物质炭的利用在短期看来会降低植物对土壤中氮素的利用率。Liu 等^[17]研究表明,土壤中施用生物质炭能够提高水稻对硅元素以及硅酸盐的吸收量。水稻摄取硅后表皮细胞细胞壁会发生部分木质化或硅质化,使表皮细胞强度进一步提高,从而增加其对害虫的抗性^[18]。

除此之外,水稻中氮、硅元素也是影响刺吸式口器昆虫取食行为的关键因素^[19]。氮元素是稻飞虱主动进行探测并吮吸韧皮部的刺激物,能够促使稻飞虱减少刺探行为而增加蜜露分泌^[20]。硅元素形成的硅酸盐对于刺吸式口器昆虫来说是一种吮吸抑制剂,当稻飞虱对韧皮部取食时,硅酸盐会起到抑制作用^[21]。因此,我们认为,施用生物质炭对水稻中氮、硅元素的改变会影响灰飞虱对水稻的取食行为,从而影响灰飞虱的生殖表现。

另一个原因可能是土壤施用生物质炭后会影响到土壤中菌根真菌的种群丰富度和功能,从而诱导植物产生防御反应。大量研究表明,生物质炭会促进土壤中菌根真菌的生长^[22],常见的菌根真菌(丛生根、外生根)对生物质炭产生积极响应^[23]。这两种菌根真菌会引起寄主植物形态、生理和生化方面的改变^[24]。例如,丛生根能够触发寄主植物

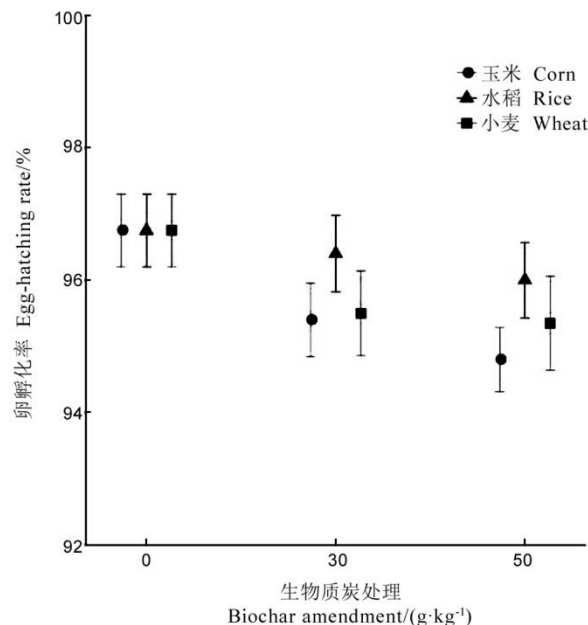


图6 施用生物质炭种类及其添加量对灰飞虱卵孵化率的影响

Fig. 6. Effects of biochar type and application level on egg-hatching rate of *L. striatellus*.

分子和生理方面的改变,从而影响植物防御基因的表达量以及改变植物一些化感物质的产生^[25]。Harel 等^[26]研究发现,以杨木为原料制作的生物质炭可以提高草莓对三种真菌——灰葡萄孢菌(*Botrytis cinerea*)、植物炭疽病菌(*Colletotrichum acutatum*)和白粉菌(*Podosphaera aphanis*)感染引起的疾病抗性,而且观察到其中两种真菌感染的初始阶段,伴随防御相关的基因表达量上升。生物质炭还可以诱导辣椒和番茄产生对灰葡萄孢菌和靶靶内丝白粉菌(*Leveillula taurica*)的抗性,并减轻螨虫对辣椒的危害^[8]。这些研究结果表明,生物质炭可能会刺激植物体内产生一系列的防御反应。对于生物质炭的诱导防御反应,未来的研究方向应集中在生物化学机制的描述和信号通道的验证^[27]。

至于不同生物质炭种类所带来的不同效果,可能是由于作物秸秆等生物质转化为生物质炭过程中,制备生物质炭原料本身的性质和热解过程中的环境条件(如温度、空气、湿度等)不同造成的。不同生物质种类或炭化条件所制备的生物质炭,在结构、pH 值、挥发物含量、灰分含量、持水性、表观密度、比表面积和阳离子交换量等理化性质上表现出不同的性能^[28],这些差异或许导致其对植株上植食性害虫产生不同的影响。

本研究为生物质炭在农业生产中的推广应用提供了新的支持依据,但仍需要进一步的大田试验,

评估生物质炭对灰飞虱发生的影响, 并探究如何把土壤添加生物质炭融入稻飞虱综合防治体系中。

谢辞: 南京农业大学资源与环境学院潘根兴和南京勤丰秸秆研发有限责任公司李茹提供生物质炭及其生产应用信息, 植物保护学院本科生汤钰莹参加部分实验研究, 特此致谢。

参考文献:

- [1] Wang Y J, Bi Y Y, Gao C Y. The assessment and utilization of straw resources in China. *Agric Sci China*, 2010, 9(12): 1807-1815.
- [2] Hayes M H B. Biochar and biofuels for a brighter future. *Nature*, 2006, 443(7108): 144.
- [3] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 郑聚锋, 池忠志, 李恋卿, 张旭辉, 郑金伟. 施用生物质炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化. *中国农业科学*, 2012, 45(23): 4844-4853.
Zhang B, Liu X Y, Pan G X, Zheng J F, Chi Z Z, Li L Q, Zhang X H, Zheng J W. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar amendment in two consecutive rice growing cycles. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(23): 4844-4853. (in Chinese with English abstract)
- [4] 陈温福, 张伟明, 孟军. 农用生物质炭研究进展与前景. *中国农业科学*, 2013, 46(16): 3324-3333.
Chen W F, Zhang W M, Meng J. Advances and prospects in research of biochar utilization in agriculture. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(16): 3324-3333. (in Chinese with English abstract)
- [5] Lehmann J, Gaunt J, Rondon M. Biochar sequestration in terrestrial ecosystems-a review. *Mitigation&Adaptat Strat Glob Chan*, 2006, 11: 403-427.
- [6] Atkinson C J, Fitzgerald J D, Hipps N A. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. *Plant Soil*, 2010, 37(3): 1-18.
- [7] Oguntunde P G, Fosu M, Ajayi A E, Giesen N V D. Effects of charcoal production on maize yield, chemical properties and texture of soil. *Biol Fertil Soils*, 2004, 39: 295-299.
- [8] Elad Y, David D R, Harel Y M, Borenshtein M, Kalifa H B, Silber A, Graber E R. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology*, 2010, 100: 913-921.
- [9] Hou X Q, Meng L, Li L, Pan G X, Li B P. Biochar amendment to soils impairs developmental and reproductive performances of a major rice pest *Nilaparvata lugens* (Homoptera:Delphacidae). *J Appl Entomol*, 2016, 139(10): 727-733.
- [10] 张爱民, 刘向东, 翟保平, 顾晓莹. 温度对灰飞虱生物学特性的影响. *昆虫学报*, 2008, 51(6): 640-645.
Zhang A M, Liu X D, Zhai B P, Gu X Y. Influences of temperature on biological characteristics of the small brown planthopper, *Laodelphax striatellus* (Fallén) (Hemiptera: Delphacidae). *Entomol Sin*, 2008, 51(6): 640-645. (in Chinese with English abstract)
- [11] 荆裴, 白素芬, 刘芳. 灰飞虱取食行为刺吸电位波形的初步研究. *应用昆虫学报*, 2013, 50(3): 758-763.
Jing P, Bai S F, Liu F. Preliminary research on electrical penetration graph (EPG) waveforms in relation to feeding behavior of *Laodelphax striatellus*. *Chin J Appl Entomol*, 2013, 50(3): 758-763. (in Chinese with English abstract)
- [12] Gaskin J W, Steiner C, Harris K, Das K C, Bibens B. Effects of low-temperature pyrolysis conditions on biochar for agricultural use. *Transac Asabe*, 2008, 51(6): 2061-2069. (in Chinese with English abstract)
- [13] 何绪生, 张树清, 余雕, 耿增超, 高海英. 生物质炭对土壤肥料的作用及未来研究. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 16-25.
He X S, Zhang S Q, She D, Geng Z C, Gao H Y. Effects of biochar on soil and fertilizer and future research, *Chin Agric Sci Bull*, 2011, 27(15):16-25 (in Chinese with English abstract)
- [14] R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2014[2017-11-28]. <http://www.R-project.org/>.
- [15] 郭伟, 陈红霞, 张庆忠, 王一丁. 华北高产农田施用生物质炭对耕层土壤总氮和碱解氮含量的影响. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 425-428.
Guo W, Chen H X, Zhang Q Z, Wang Y D. Effects of biochar application on total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen content in the topsoil of the high-yield cropland in north China Plain. *Ecol Environ Sci*, 2011, 20(3): 425-428. (in Chinese with English abstract)
- [16] Xie Z B, Xu Y P, Liu G, Liu Q, Zhu J G, Tu C, James A, Georg C, Jean Y, Hu S J. Impact of biochar application on nitrogen nutrition of rice, greenhouse-gas emissions and soil organic carbon dynamics in two paddy soils of China. *Plant Soil*, 2013, 370: 527-540.
- [17] Liu X Y, Li L Q, Bian R J, Chen D, Qu J J, Pan G X, Zhang X H, Zheng J W, Zheng J F. Effect of biochar amendment on soil-silicon availability and rice uptake. *Plant Nutr Soil Sci*, 2014, 177: 91-96.
- [18] 张晶, 石扬娟, 任洁, 刘周, 石英尧. 硅肥用量对水稻茎秆抗折力的影响研究. *中国农学通报*, 2014, 30(3): 49-55.
Zhang J, Shi Y J, Ren J, Liu Z, Shi Y Y. The effect of silicon fertilizer on flexural strength of rice culm. *Chin*

- Agric Sci Bull*, 2014, 30(3): 49-55. (in Chinese with English abstract)
- [19] Sogawa K. The rice brown planthopper: feeding physiology and host plant interactions. *Ann Rev Entomol*, 1982, 27: 49-73.
- [20] Sogawa K. Studies on feeding habits of the brown planthopper. Effects of nitrogen-deficiency of host plant on insect feeding. *Jpn Appl Entomol Zool*, 1970, 14: 101-106.
- [21] Yoshihara T, Sogawa K, Pathak M D, Juliano B O, Sakamura S. Soluble silicic acid as a sucking inhibitory substance in rice against the brown planthopper (Delphacidae, Homoptera). *Entomol Exp Appl*, 1979, 26: 314-322.
- [22] Lehmann J, Rillig M C, Thies J, Masiello C A, Hockaday W C, Crowley D. Biochar effects on soil biota-A review. *Soil Biol & Biochem*, 2011, 43: 1812-1836.
- [23] Warnock D D, Lehmann J, Kuyper T W, Rilling M C. Mycorrhizal responses to biochar in soil-concepts and mechanisms. *Plant Soil*, 2007, 300: 9-20.
- [24] Koricheva J, Gange A C, Jones T. Effects of mycorrhizal fungi on insect herbivores: A meta-analysis. *Ecology*, 2009, 90(8): 2088-2097.
- [25] Bi H H, Song Y Y, Zeng R S. Biochemical and molecular responses of host plants to mycorrhizal infection and their role in plant defence. *Allelop J*, 2007, 20(1): 15-28.
- [26] Harel Y M, Elad Y, David D R, Shulchani R, Lew R, Graber E R. Biochar mediates systemic response of strawberry to foliar fungal pathogens. *Plant Soil*, 2012, 357: 245-257.
- [27] Walling L L. The myriad plant responses to herbivores. *J Plant Growth Regul*, 2000, 19: 195-216.
- [28] 张文玲, 李桂花, 高卫东. 生物质炭对土壤性状和作物产量的影响. *中国农学通报*, 2009, 25(17): 153-157.
- Zhang W L, Li G H, Gao W D. Effect of biomass charcoal on soil character and crop yield. *Chin Agric Sci Bull*, 2009, 25(17): 153-157. (in Chinese with English abstract)