

不同饲料对稻纵卷叶螟取食代谢及消化酶活性影响*

李传明^{1,2**} 祁建杭¹ 韩光杰^{1,2} 刘 琴¹
杨亚军³ 吕仲贤³ 徐 健^{1***}

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 扬州 225007; 2. 扬州大学园艺与植物保护学院, 扬州 225009;
3. 浙江省农业科学院植物保护与微生物研究所, 杭州 310021)

摘 要 【目的】研究稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medialis* 对水稻、玉米和人工饲料的取食代谢效应以及取食后幼虫生长发育、物质积累和中肠消化酶活性变化。【方法】在实验室条件下以水稻叶片、玉米叶片及人工饲料饲养稻纵卷叶螟, 观察生长发育状况, 取特定龄期幼虫测定消化代谢、营养物质积累及中肠消化酶活性。【结果】取食水稻的稻纵卷叶螟蛹重最高、历期最短, 与玉米和人工饲料差异显著, 取食人工饲料幼虫历期最长。取食不同饲料后单雌产卵量、产卵历期以及成虫寿命之间无显著差异; 取食水稻的食物转化率显著高于玉米和人工饲料, 取食人工饲料近似消化率最高; 取食水稻和玉米的幼虫体内脂肪积累量显著高于人工饲料, 取食人工饲料幼虫体内蛋白质和可溶性糖含量明显增加, 显著高于水稻和玉米。人工饲料的幼虫体内总蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶三种消化酶活性显著高于水稻和玉米。【结论】不同饲料饲养对稻纵卷叶螟生长发育及营养物质累积均有影响, 而稻纵卷叶螟幼虫可能通过调节取食量及消化酶活性的方式保证对食料中营养物质摄取。

关键词 稻纵卷叶螟; 取食代谢; 消化酶

Effects of different diets on the feeding and digestive enzyme activity of *Cnaphalocrocis medialis*

LI Chuan-Ming^{1,2**} QI Jian-Hang¹ HAN Guang-Jie^{1,2} LIU Qin¹
YANG Ya-Jun³ LV Zhong-Xian³ XU Jian^{1***}

(1. Jiangsu Lixiahe Institute of Agricultural Science, Yangzhou 225007, China;

2. School of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China;

3. Institute of Plant Protection and Microbiology, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract [Objectives] To study the effect of different diets on the digestive efficiency, nutritional content, larval development and digestive enzyme activity of *Cnaphalocrocis medialis*. [Methods] The digestive efficiency, nutritional content, developmental duration and digestive enzyme activity of *C. medialis* larvae reared on either an artificial diet, rice leaves or maize leaves, was measured and compared. [Results] *C. medialis* was able to complete its life cycle on all three diets but had different developmental durations and pupal weights on each diet. *C. medialis* reared on rice leaves had the shortest developmental duration and the heaviest pupae. There was, however, no significant difference in the fecundity, oviposition period or adult longevity, of *C. medialis* reared on different diets. *C. medialis* reared on rice leaves were significantly more efficient at converting digested food (ECD) than those reared on maize leaves or the artificial diet. The approximate digestibility (AD) of larvae reared on the artificial diet was 52.32%, significantly higher than that of larvae reared

*资助项目 Supported projects: 江苏省自然科学基金 (BK20181215); 江苏省农科院探索性颠覆性创新计划项目 (ZX(17)2002); 扬州市重点研发计划 (YZ2017092); 扬州市自然科学基金 (YZ2016119)

**第一作者 First author, E-mail: liming0595@163.com

***通讯作者 Corresponding author, E-mail: bio-xj@163.com

收稿日期 Received: 2018-02-14; 接受日期 Accepted: 2018-03-15

on rice or maize leaves. *C. medialis* larvae reared on the artificial diet had higher soluble protein and sugar content than that of those reared on rice or maize, but lower fat content. Protease, amylase and lipase activity in the midguts of larvae fed on the artificial diet was significantly higher than that of larvae fed on rice or maize. [Conclusion] Diet affected the development and nutritional composition of *C. medialis*. This species appears able to ensure adequate nutritional uptake on different diets by adjusting its feeding behavior and the activity of midgut digestive enzymes.

Key words *Cnaphalocrocis medialis*; digestion response; digestive enzyme

稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medialis* Guenée 原为水稻种植区一种偶发、区域性害虫, 20 世纪 60 年代随着农业生产“绿色革命”的兴起, 水稻种植品种改变以及氮肥的大量施用使得稻纵卷叶螟逐渐暴发为害, 成为水稻上一种常发性害虫 (Heong *et al.*, 1995)。2003、2007 和 2008 年该虫在我国均特大暴发, 大发生年份可造成稻田产量损失高达 80% (刘宇等, 2008)。稻纵卷叶螟为迁飞性害虫, 每年发生时间相对固定 (张孝羲和吴进才, 1981), 由于缺乏成熟的人工饲养技术, 大多数实验仍以田间采虫或室内短期饲养后供试为主 (Ge *et al.*, 2013; 冯波等, 2017; Yang *et al.*, 2018)。稻纵卷叶螟人工饲料的研究国外开始较早, 并取得一定的进展 (Khan, 1987; Ohmura *et al.*, 2000; Tsuda *et al.*, 2005), 近年来我国也开展了较多研究, 徐杨洋等 (2013) 基于水稻叶片全营养成分分析提出了营养因子在饲料中的比例范围, 郭文卿等 (2012, 2013) 研究了饲料中氮、糖营养对稻纵卷叶螟幼虫营养消化和取食选择的影响。目前利用人工饲料已能够继代饲养稻纵卷叶螟, 但总体上仍存在死亡率高、历期延长、蛹重下降、化蛹率低等问题 (柯名娟等, 2011; 李传明等, 2011; 王业成等, 2013), 饲料配方还需进一步优化。

人工饲料之外, 许多研究也尝试以替代寄主饲养稻纵卷叶螟。朱阿秀等 (2015) 利用小麦苗饲养稻纵卷叶螟取得较好效果。玉米苗由于育苗周期短, 对光照、温度要求低等优点, 已经先后被许多研究者开发用于饲养稻纵卷叶螟 (Shono and Hirano, 1989; Park *et al.*, 2006; 廖怀建等, 2012), 以玉米苗饲养稻纵卷叶螟的单雌卵量、孵化率和羽化率与水稻上无差异, 幼虫存活率显著高于水稻 (廖怀建等, 2012), 不少研究对玉米和水稻上饲养的稻纵卷叶螟进行了比较, 发现

玉米苗饲养的稻纵卷叶螟对高温的耐受性降低 (廖怀建等, 2013), 产卵后雌虫寿命缩短, 飞行能力减弱 (黄加诚, 2014), 幼虫取食偏好性发生改变 (李传明等, 2017), 但对水稻的适应性无差异 (方源松, 2013)。然而目前的研究均是从生态学角度进行比较, 有关玉米苗饲养对稻纵卷叶螟生理生化的影响还未见报道, 本研究测定水稻、玉米和人工饲料饲养的稻纵卷叶螟取食代谢效应、营养累积及相关消化酶活性, 从生理生化角度解析玉米与水稻饲养稻纵卷叶螟的差异, 研究结果也可为稻纵卷叶螟人工饲料配方的优化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

稻纵卷叶螟成虫采自江苏里下河地区农科所实验稻田, 带回室内产卵并用水稻苗饲养 3 代, 取同日孵化的初孵幼虫供试。

水稻 (扬辐粳 8 号) 育苗移栽至盆钵中, 取分蘖期稻叶供试。水稻生长期以纱网隔离害虫, 不施用任何农药。玉米 (苏玉 24) 种植参考廖怀建等 (2012) 方法并略作改进, 先将玉米种子催芽, 然后播种于底部垫有双层湿纸的塑料盒 (24 cm × 24 cm × 5 cm) 中, 初期以保鲜膜覆盖塑料盒保湿, 待幼苗长高后撤去保鲜膜并每日浇水, 于 (28±1) °C 温室内培养 7-8 d 后取子叶供试。人工饲料参考刘琴等 (2009) 的配方, 待配制好的饲料凝成固体状后放入冰箱 (3-5 °C) 冷藏待用。

1.2 试验方法

1.2.1 生长发育测定 分别以水稻叶片、玉米子叶及人工饲料饲养繁殖稻纵卷叶螟, 观察不同饲料对稻纵卷叶螟生长发育的影响。分别截取长度

约 5 cm 的水稻叶片和玉米子叶 20 段,置于 9 cm 塑料培养皿中,培养皿底部垫湿滤纸,叶片两端以湿棉花包裹保湿,接入 20 头初孵幼虫,隔日更换新鲜叶片并记录幼虫生长发育情况直至化蛹。人工饲料切成 2-3 mm 厚的薄片,置于同样大小的培养皿中并接入 20 头初孵幼虫,3-5 d 更换 1 次人工饲料,隔日记录幼虫发育情况,饲养幼虫老熟时将蜡纸折成细褶盖在饲料上供老熟幼虫化蛹(刘琴等,2009)。上述每处理重复 15 次,总虫数均为 300 头,置于生化培养箱中饲养,温度(25 ± 1),相对湿度 50%-70%左右。各处理化蛹 3 d 后称量蛹重(精确到 0.001 g)并记录蛹历期。成虫羽化后,按雌:雄=1:1 放入市售的一次性塑料杯中(杯口直径 8.5 cm,杯底直径 5.5 cm,高 10 cm),用保鲜膜覆盖封口,塑料杯侧壁上方开直径 0.5 cm 左右小孔,将脱脂棉裁成 3-4 cm 长条并以 10%蜂蜜水浸湿,经小孔塞入并悬挂在杯壁上供成虫补充营养,每日补充蜂蜜水。成虫交配后产卵于杯壁上,逐日记录成虫存活数和卵粒数,若雄虫死亡及时补充。直至全部成虫死亡后计算成虫寿命及产卵量。

1.2.2 消化代谢测定 取不同处理的稻纵卷叶螟 4 龄幼虫各 10 头,预饥饿 6 h 后单头称重并转移至无食物的指形管内,置于 55℃ 烘箱烘干至恒重后称量干重,计算幼虫含水量;另取 20 头幼虫预饥饿 6 h 后称量虫体鲜重,根据上面测得含水量推算试前幼虫干重(C);试虫单头接入已称重人工饲料、水稻叶片和玉米子叶的离心管喂供试幼虫 48 h,取出剩余食物并称重,根据预先测定的饲料含水量计算幼虫取食前饲料干重(A)和取食后干重(B);饲养幼虫饥饿 6 h 后将试虫和粪便在 55℃ 下烘干至恒重,得到试虫后幼虫干重(D)及粪便干重(E)。根据下列公式计算消化代谢效应(王琛柱,1997)。

$$\text{食物利用率}(\%) = \frac{D-C}{A-B} \times 100,$$

$$\text{近似消化率}(\%) = \frac{A-B-E}{A-B} \times 100,$$

$$\text{食物转化率}(\%) = \frac{D-C}{A-B-E} \times 100,$$

$$\text{幼虫相对生长率}(\%) = \frac{D-C}{(C+D)/2 \times T} \times 100。$$

1.2.3 营养物质积累量测定 不同处理干虫研磨粉碎后,取部分包于已称重的除脂滤纸内烘焙 2 h 后称重并置于索氏提取器内,55℃ 下用乙醚提取 6 h,回收乙醚后,烘至恒重(55℃ 下)得脂肪含量(张韵梅,1994)。另称量部分烘干的虫粉,加 10%TCA 匀浆离心,倾出上清液,重复提取一次,合并上清液,倒入 3 倍体积的 95%乙醇中,加 2-3 滴饱和 Na_2SO_4 ,于 4℃ 冰箱中静置 3 d 离心获得沉淀物。取部分沉淀物加定量水溶解,用蒽酮法比色(波长 620 nm,标准液为葡萄糖 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$)测定糖原含量(张韵梅,1994)。上述加一定的 1 mol/L NaOH 在 37℃ 下水解 10 h,使水解液呈均匀液体(碱水解液)后离心,取上清液定容至 50 mL。用 Folin-phenal 法测定蛋白质含量(姜玉梅等,1998)。以上提取和测定均重复 3 次。

1.2.4 消化酶活性测定 饲养稻纵卷叶螟 4 龄幼虫在 0-4℃ 下迅速解剖,用预冷的 0.15 mol/L 的 NaCl 溶液冲洗,截取中肠及其内含物,每处理解剖幼虫 5 头,重复 3 次。以 0.15 mol/L 的 NaCl 溶液在冰浴中匀浆,冷冻离心机(11 200 g, 4℃)离心 15 min,取上清液作为测试用酶液。参照王琛柱等(1995)以偶氮苯磺胺偶氮酪蛋白为底物测定总蛋白酶活性,反应缓冲液为 0.2 mol/L 的甘氨酸-NaOH 缓冲液(pH=10.50)。偶氮酪蛋白以 20 mg/mL 的浓度溶于 0.15 mol/L 的 NaCl 溶液。取该液 0.3 mL 加入含中肠酶液的 0.3 mL 反应缓冲液中。在 30℃ 反应 2 h,加入 0.6 mL 20%的三氯乙酸终止反应,反应混合物在 4℃, 11 200 g 离心 15 min,取上清液在 366 nm 下测定 OD 值。反应混合物 1 个吸收单位的变化定义为 1 个偶氮酪蛋白单位。淀粉酶活性的测定主要按照 3,5-二硝基水杨酸法(张桂芬等,2008)进行,取 0.5 mL 浓度为 1%的淀粉溶液移入 2 mL 离心管中,加入 0.5 mL 待测样本酶液,混合均匀,于 25℃ 温浴 3 min 后加 1 mL 显色剂(3'5-二硝基水杨酸试剂)终止反应,于 490 nm 处读取 OD 值。此时所测得的麦芽糖量为淀粉在

淀粉酶的作用下所形成的麦芽糖。淀粉酶活性以 μg (麦芽糖) / $\text{mg pro} \cdot \text{min}$ 表示。脂肪酶活性的测定采用比色法 (冯国忠等, 2006), 取 A、B 两支试管, 各依次加入橄榄油乳剂 2.5 mL, Tris-HCL 缓冲液 (pH 8.8) 1.5 mL, 酶液 0.5 mL, 立即盖上盖子, 颠倒摇匀 5 次。对 A 管立即在 420 nm 处测 OD 值; B 管在 30 °C 水浴中反应 30 min 后在 420 nm 处测 OD 值, 根据 A、B 管 OD 值之差, 计算比活力 (以 $\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 表示)。蛋白含量测定参照考马斯亮蓝 G-250 方法, 采用 3 mL 的反应体系, 对照缓冲液 (pH 7.4) 500 μL , 考马斯亮蓝 2.5 mL, 以牛血清白蛋白作标准曲线。

1.3 数据分析

利用 EXCEL 2016 进行数据处理及绘图, 利用 IBM SPSS Statistics 18.0 对统计结果进行方差分析, 差异显著性分析采用 Duncan's 多重比较 ($P>0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同食料对稻纵卷叶螟生长发育的影响

试验表明取食 3 种不同食料的稻纵卷叶螟幼虫都能完成生长发育并化蛹、羽化和产卵, 取食不同食料的发育情况见表 1。食料对稻纵卷叶螟生长发育的影响主要在幼虫及蛹期, 表现为幼虫历期、蛹重及蛹历期有一定差异。取食水稻的

稻纵卷叶螟蛹重最高、历期最短, 与玉米和人工饲料差异显著; 取食玉米和水稻幼虫历期无显著差异, 取食人工饲料幼虫历期最长, 与另两种饲料差异显著。取食不同饲料的稻纵卷叶螟单雌产卵量、产卵历期以及成虫寿命之间无显著差异, 单雌平均卵量 38.2-52.4 粒, 平均产卵历期 3.2-3.7 d, 成虫寿命 7.2-8.0 d。

2.2 不同饲料对稻纵卷叶螟取食代谢效率的影响

不同食料条件下稻纵卷叶螟幼虫的取食代谢效应不同 (图 1)。从图 1 中可以看出, 稻纵卷叶螟幼虫取食水稻的食物转化率达 29.19%, 显著高于取食玉米和人工饲料。取食水稻叶片同样具有较高的食物利用率和相对生长率, 与取食玉米差异显著。近似消化率以取食人工饲料处理最高, 达 52.32%, 显著高于稻和玉米; 取食人工饲料和玉米的食物利用率、食物转化率、相对生长率无明显差别。

2.3 不同食料对稻纵卷叶螟体内物质积累的影响

稻纵卷叶螟幼虫取食不同食料直接影响了体内营养物质的积累 (图 2)。取食水稻、玉米的幼虫体内脂肪积累量较高, 含量分别为 27.08% 和 25.87%, 显著高于取食人工饲料幼虫。取食人工饲料的幼虫体内蛋白质和可溶性糖含量明显增加, 显著高于水稻和玉米。而取食水稻和玉米的幼虫体内蛋白质、脂肪和可溶性糖含量无显著差异。

表 1 稻纵卷叶螟取食不同食料的发育情况

Table 1 The growth and development of *Cnaphalocrocis medialis* reared on different food resources

虫源 Population source	幼虫历期 Larval duration (d)	蛹历期 Pupal duration(d)	蛹重 Pupal weight (g)	成虫寿命 Adult longevity (d)	产卵历期 Oviposition period (d)	单雌产卵量 Eggs per female
水稻 <i>Oryza sativa</i>	17.9±1.80a	7.3±0.87b	0.021±0.003a	7.8±0.67a	3.7±0.70a	38.2±12.06a
玉米 <i>Zea mays</i>	17.7±3.01a	8.8±0.67a	0.012±0.002b	8.0±1.22a	3.5±0.76a	52.4±10.63a
人工饲料 Artificial diet	21.3±2.03b	9.0±0.87a	0.011±0.004b	7.2±1.48a	3.2±0.83a	46.6±7.74a

表中数据为平均值±标准差, 纵列具有相同字母表示差异未达 5% 显著水平 ($P>0.05$)。下表同。

The data are means ± SD, and followed by the same lowercase letters in the same column indicate no significant difference at 0.05 level. The same below.

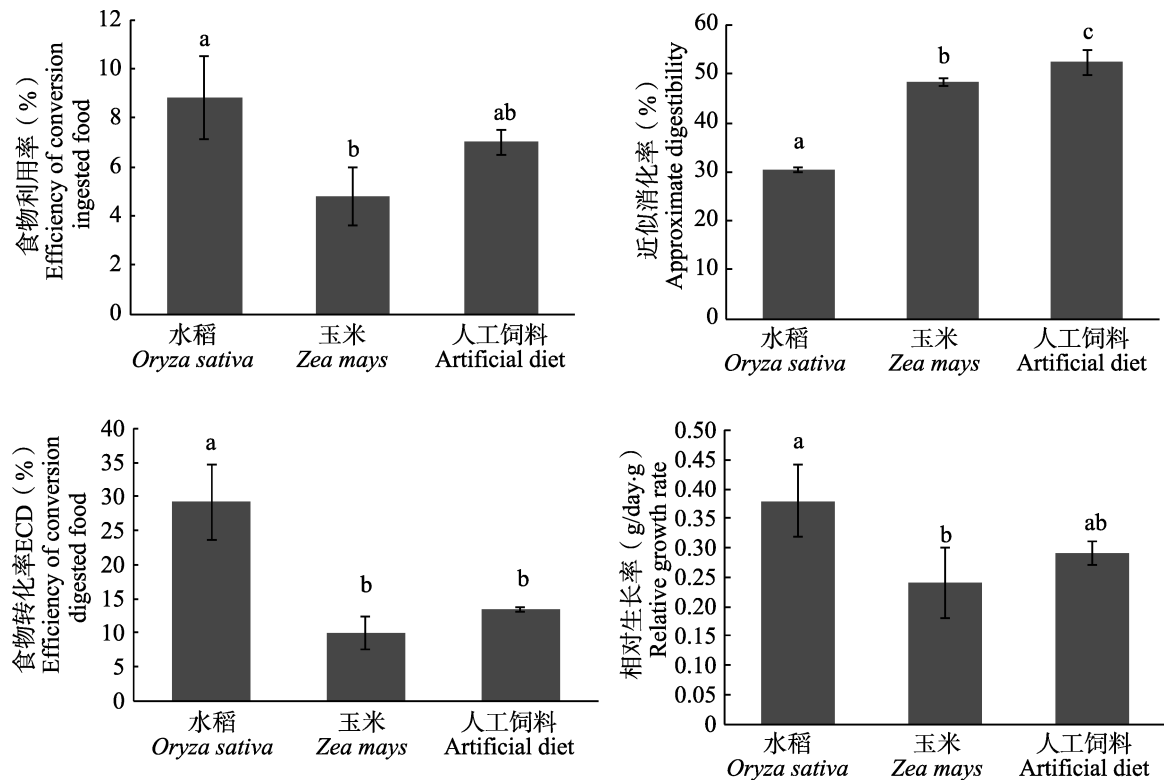


图 1 稻纵卷叶螟取食不同食料的营养指标

Fig. 1 The main nutrient indexes of *Cnaphalocrocis medialis* reared on different food resources

图上标有相同小写字母表示处理间无显著差异 ($P>0.05$)。下图同。

Histograms with the same lowercase letters indicate no significant different ($P>0.05$). The same below.

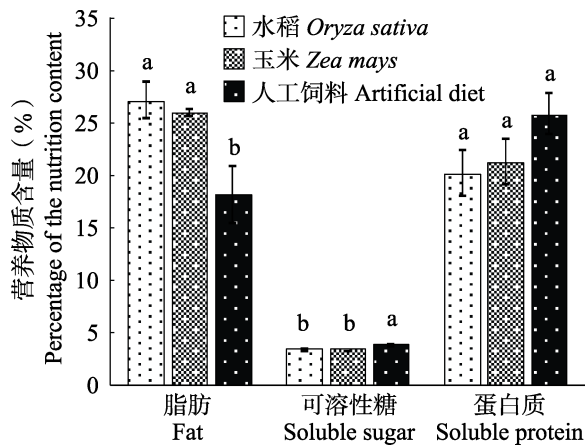


图 2 稻纵卷叶螟取食不同食料后体内的营养物质含量

Fig. 2 The nutrition content of *Cnaphalocrocis medialis* reared on different food resources

2.4 不同食料对稻纵卷叶螟中肠消化酶活性的影响

取食人工饲料的幼虫体内总蛋白酶、淀粉酶、脂肪酶活性显著高于水稻和玉米 (表 2)。取食水稻后稻纵卷叶螟幼虫中肠总蛋白酶和淀

粉酶活性与取食玉米无差异,但脂肪酶活性显著高于玉米。

3 讨论

不同植物甚至同种植物不同品种的营养结构和无机物组分、含量等都有所不同,会导致昆虫取食后生长发育产生差异 (Boggs and Freeman, 2005)。取食不同水稻品种能够影响稻纵卷叶螟幼虫发育历期、存活率和繁殖力 (李霞等, 2013)。本研究发现玉米和水稻饲养的稻纵卷叶螟幼虫历期、成虫寿命、产卵历期及产卵量无显著差异,与前人报道结果一致 (廖怀建等, 2012), 蛹历期及蛹重有显著差异,这可能是由于本试验中玉米以无土方式栽培,玉米叶片营养成分与营养土栽培不同,但幼虫营养物质测定结果表明取食玉米和水稻的幼虫体内脂肪、可溶性糖和蛋白质的积累并无差异。此外,黄加诚 (2014) 发现以玉米饲养稻纵卷叶螟卵孵化率和雌虫产卵后寿命

表 2 稻纵卷叶螟取食不同食料后体内的消化酶活性
Table 2 The digestive enzyme activities of *Cnaphalocrocis medialis* reared on different food resources

虫源 Population source	总蛋白酶 Protease (U/mg·min)	淀粉酶 Amylase (μg/mg·pro/mg)	脂肪酶 Lipase (μmol/mg·min)
水稻 <i>Oryza sativa</i>	0.473 5±0.005 6b	0.162 3±0.004 8b	0.052 3±0.005 1b
玉米 <i>Zea mays</i>	0.472 5±0.002 1b	0.154 1±0.003 4b	0.033 9±0.002 6c
人工饲料 Artificial diet	0.792 1±0.004 3a	0.191 5±0.001 7a	0.082 6±0.003 1a

与水稻相比均显著降低,这表明玉米饲养对稻纵卷叶螟生长及繁殖的影响仍需进一步探讨。

植物的营养状况极易受外界环境影响而发生质或量的变化,这些变化会对植食性昆虫产生不同的营养效应,而植食性昆虫则可以依靠可变的取食行为和营养利用来适应食料营养的差异,获取自身所需的营养物质 (Slansky and Scriber, 1982)。稻纵卷叶螟幼虫可以通过调节取食利用率 (Efficiency of the conversion of digested food, ECD) 来维持一定的摄食食物转化率 (Efficiency of the conversion of ingested food, ECI) 以适应水稻品种间营养的变化,维持幼虫和蛹的发育历期 (但建国和陈常铭, 1990), 本文研究也发现幼虫取食玉米叶片的利用率 (ECD) 和转化率 (ECI) 都较水稻叶片低,推测是由于玉米叶片含水量较高导致可摄取的营养物质相对较少,幼虫通过增加取食的方式保证营养物质摄取。

棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 中肠蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶在消化不同营养成分的食料时活性变化明显,消化酶活性的变化反映了生长发育的需要 (Sarate *et al.*, 2012)。本研究发现取食人工饲料的稻纵卷叶螟中肠蛋白酶、淀粉酶和脂肪酶活性均显著高于取食水稻和玉米。脂肪酶活性变化直接影响到储存脂肪的转化和利用 (Zhang and Feng, 1966), 取食人工饲料的稻纵卷叶螟幼虫体内脂肪含量显著低于取食水稻和玉米,但脂肪酶含量显著提高。可能幼虫通过调节中肠消化酶活性水平来适应取食食料的营养构成,以避免营养失衡而获得更好的营养需求 (Kotkar *et al.*, 2009), 而以消化酶活性为指标,或许可以作为人工饲料配方改良的依据。此外,近期一些研究表明食料中微量元素及其他物质

的含量对稻纵卷叶螟生长繁殖同样有显著影响,水稻叶片中镁元素含量较高时,幼虫发育较快,死亡率降低 (Ge *et al.*, 2013)。含硅量增大时,幼虫发育减缓,存活率下降,蛹重降低 (Han *et al.*, 2015)。人工饲料中添加抗生素、抗氧化剂、维生素及胆固醇均能够促进幼虫发育和存活 (Su *et al.*, 2014)。这些微量元素及物质与稻纵卷叶螟消化代谢的关系及影响种群生长发育的生理机制仍需进一步研究。

参考文献 (References)

- Boggs CL, Freeman KD, 2005. Larval food limitation in butterflies: effects on adult resource allocation and fitness. *Oecologia*, 144(3): 353–361.
- Dan JG, Chen CM, 1990. The effect of feeding condition on the growth, development, and reproduction of rice leaf roller. *Journal of Plant Protection*, 17(3): 193–199. [但建国, 陈常铭, 1990. 食料条件对稻纵卷叶螟生长发育和繁殖的影响. 植物保护学报, 17(3): 193–199.]
- Fang YS, 2013. Adaptability of rice leaf folder reared on maize seedlings to rice and the effects of temperature and humidity on the eggs and larvae. [方源松, 2013. 玉米苗饲养的稻纵卷叶螟对水稻的适应力及温湿度对卵和初孵幼虫的影响. 硕士学位论文. 南京: 南京农业大学.]
- Feng B, Guo QS, Zhu F, Wang X, Liu WC, Jiang YY, Zhong L, Du YJ, 2017. Ovarian development and synthetic sex pheromone lure trapping of adults of the rice leaf folder, *Cnaphalocrocis medialis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Acta Entomologica Sinica*, 60(2): 211–221. [冯波, 郭前爽, 朱凤, 王笑, 刘万才, 姜玉英, 钟玲, 杜永均, 2017. 稻纵卷叶螟成虫的卵巢发育与性诱剂诱捕. 昆虫学报, 60(2): 211–221.]
- Ge LQ, Wan DJ, Xu J, Jiang LB, Wu JC, 2013. Effects of nitrogen fertilizer and magnesium manipulation on the *Cnaphalocrocis medialis* (Lepidoptera: Pyralidae). *Journal of Economic Entomology*, 106(1): 196–205.

- Guo WQ, Yang YJ, Xu HX, Zheng XS, Lu ZX, 2012. Feeding preference of *Cnaphalocrocis medinalis* larvae on artificial diets with different nitrogen and sugar contents. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 24(6): 1069–1073. [郭文卿, 杨亚军, 徐红星, 郑许松, 吕仲贤, 2012. 稻纵卷叶螟幼虫对不同含氮糖人工饲料的取食选择行为. 浙江农业学报, 24(6): 1069–1073.]
- Guo WQ, Yang YJ, Xu J, Xu HX, Zheng XS, Lu ZX, 2013. Nutritional consumption and utilization by *Cnaphalocrocis medinalis* larvae of artificial diets with different nitrogen or sugar contents. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 629–634. [郭文卿, 杨亚军, 徐健, 徐红星, 郑许松, 吕仲贤, 2013. 稻纵卷叶螟幼虫对不同氮、糖含量人工饲料的营养消耗和利用. 应用昆虫学报, 50(3): 629–634.]
- Han YQ, Lei WB, Wen LZ, Hou ML, 2015. Silicon-mediated resistance in a susceptible rice variety to the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* Guénée (Lepidoptera: Pyralidae). *PLoS ONE*, 10(4): e0120557.
- Heong KL, Teng PS, Moody K, 1995. Managing rice pests with less chemicals. *GeoJournal*, 35(3): 337–349.
- Huang JC, 2014. Physiological ecology of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* in reproduction and flight. Master thesis. Wuhan: Huazhong Agricultural University. [黄加诚, 2014. 稻纵卷叶螟生殖和飞行的生理生态研究. 硕士学位论文文. 武汉: 华中农业大学.]
- Jiang YM, Yang GD, Fan YP, 1998. The configuration of two reagents used in the Folin-phenol reagent method. *Journal of Harbin Medical University*, 32(2): 155–156. [姜玉梅, 杨歌德, 范业鹏, 1998. Folin-酚试剂法测定蛋白质含量中两种试剂的配制. 哈尔滨医科大学学报, 32(2): 155–156.]
- Ke MJ, Xu B, Li GH, Wang FH, 2011. Research on artificial diet for *Cnaphalocrocis medinalis* Guénée. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 50(5): 100–103. [柯名娟, 徐博, 李广宏, 王方海, 2011. 稻纵卷叶螟人工饲料的研究. 中山大学学报(自然科学版), 50(5): 100–103.]
- Khan ZR, 1987. Artificial diet for rearing rice leaffolder (LF). *International Rice Research Newsletter (Philippines)*, 12(6): 30–31.
- Kotkar HM, Sarate PJ, Tamhane VA, Gupta VS, Giri AP, 2009. Responses of midgut amylases of *Helicoverpa armigera* to feeding on various host plants. *Journal of Insect Physiology*, 55(8): 663–670.
- Li CM, Han GJ, Yang YJ, Qi JH, Liu Q, Xu J, Lu ZX, 2017. Oviposition and feeding preference of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) for four different plants. *Chinese Journal of Rice Science*, 31(3): 315–319. [李传明, 韩光杰, 杨亚军, 祁建杭, 刘琴, 徐健, 吕仲贤, 2017. 稻纵卷叶螟对不同植物的产卵趋性与取食选择. 中国水稻科学, 31(3): 315–319.]
- Li CM, Xu J, Yang YJ, Qi JH, Zheng XS, Wang Y, Liu Q, Lu ZX, 2011. Growth and reproduction of *Cnaphalocrocis medialis* fed on improved artificial diet. *Chinese Journal of Rice Science* 25(3): 321–325. [李传明, 徐健, 杨亚军, 祁建杭, 郑许松, 王艳, 刘琴, 吕仲贤, 2011. 人工饲料饲养稻纵卷叶螟的生长发育与繁殖. 中国水稻科学, 25(3): 321–325.]
- Li X, Xu XX, Han LZ, Wang M, Hou ML, 2013. Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée). *Acta Ecologica Sinica*, 33(14): 4370–4376. [李霞, 徐秀秀, 韩兰芝, 王沫, 侯茂林, 2013. 不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响. 生态学报, 33(14): 4370–4376.]
- Liao HJ, Huang JR, Fang YS, Liu XD, 2013. Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature. *Acta Ecologica Sinica*, 33(2): 409–415. [廖怀建, 黄建荣, 方源松, 刘向东, 2013. 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应. 生态学报, 33(2): 409–415.]
- Liao HJ, Huang JR, Liu XD, 2012. The method for mass rearing of rice leaf folder *Cnaphalocrocis medinalis* using maize seedlings. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 49(4): 1078–1082. [廖怀建, 黄建荣, 刘向东, 2012. 利用玉米苗饲养稻纵卷叶螟的方法. 应用昆虫学报, 49(4): 1078–1082.]
- Liu Q, Xu J, Shi JD, Zhu JL, Qi JH, Cai YS, 2009. A method of preparation artificial feed and use of artificial raising *Cnaphalocrocis medinalis*. State Intellectual Property Office of the People's Republic of China. CN200910025180.8. 2011-07-20. [刘琴, 徐健, 施建德, 朱锦磊, 祁建杭, 蔡扬生, 2009. 水稻纵卷叶螟人工饲料及制备和应用用于水稻纵卷叶螟的人工饲养方法. 中华人民共和国. 发明专利. CN200910025180.8. 2011-07-20.]
- Liu Y, Wang JQ, Feng XD, 2008. Analysis on the occurrence of *Cnaphalocrocis medinalis* in 2007 and forecasting its occurring trends in 2008. *China Plant Protection*, 28(7): 33–35. [刘宇, 王建强, 冯晓东, 2008. 2007 年全国稻纵卷叶螟发生实况分析与 2008 年发生趋势预测. 中国植保导刊, 28(7): 33–35.]
- Ohmura H, Tsuda K, Kamiwada H, Kusigemati K, 2000. Rearing of rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) on artificial diets. *Japanese Journal of Applied Entomology and Zoology*, 44(2): 119–123.
- Park HH, Park CG, Park HM, Uhm KB, 2006. Rearing system for rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Lepidoptera: Crambidae) using corn seedlings. *Korean Journal of Applied Entomology*,

- 45(1): 91–95.
- Sarate PJ, Tamhane VA, Kotkar HM, Ratnakaran N, Susan N, Gupta VS, Giri AP, 2012. Developmental and digestive flexibilities in the midgut of a polyphagous pest, the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*. *Journal of Insect Science*, 12(42): 1–16.
- Shono Y, Hirano M, 1989. Improved mass-rearing of the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) using corn seedlings. *Applied Entomology and Zoology*, 24(3): 258–263.
- Slansky F, Scriber JM, 1982. Selected bibliography and summary of quantitative food utilization by immature insects. *Bulletin of the ESA*, 28(1): 43–56.
- Su J, Wang YC, Zhang SK, Ren XB, 2014. Antifungal agents against *aspergillus niger* for rearing rice leaffolder larvae (Lepidoptera: Pyralidae) on artificial diet. *Journal of Economic Entomology*, 107(3): 1092–1100.
- Tsuda K, Ohmura H, Sakamaki Y, Kamiwada H, Kusigemati K, 2005. Mass rearing of the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae) on an artificial diet. *Japanese Society of Applied Entomology and Zoology*, 49(4): 215–221.
- Wang CZ, 1997. Effects of gossypol and tannic acid on the growth and digestion physiology of cotton bollworm larvae. *Journal of Plant Protection*, 24(1): 13–18. [王琛柱, 1997. 棉酚和单宁酸对棉铃虫幼虫生长和消化生理的影响. *植物保护学报*, 24(1): 13–18.]
- Wang CZ, Xiang XF, Zhang SF, 1995. Effect of soybean trypsin inhibitor on the growth and digestive physiology of *Helicoverpa armigera* larvae. *Acta Entomologica Sinica*, 38(3): 272–277. [王琛柱, 项秀芬, 张书芳, 1995. 大豆胰蛋白酶抑制剂对棉铃虫幼虫消化生理和生长发育的影响. *昆虫学报*, 38(3): 272–277.]
- Wang YC, Zhang SK, Ren XB, Su JY, 2013. Optimization an artificial diet for the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 635–640. [王业成, 张树坤, 任秀贝, 苏建亚, 2013. 稻纵卷叶螟人工饲料配方的优化研究. *应用昆虫学报*, 50(3): 635–640.]
- Xu YY, Li X, Chen FJ, Zhai BP, Hou ML, Han LZ, 2013. Analysis of nutritional components of rice leaves and its application in the development of an artificial diet for *Cnaphalocrocis medinalis*. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 50(3): 641–650. [徐杨洋, 李霞, 陈法军, 翟保平, 侯茂林, 韩兰芝, 2013. 水稻叶片全营养成分分析及在稻纵卷叶螟人工饲料研制中的应用. *应用昆虫学报*, 50(3): 641–650.]
- Yang YJ, Wang CY, Xu HX, Lu ZX, 2018. Sublethal effects of four insecticides on folding and spinning behavior in the rice leaffolder, *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) (Lepidoptera: Pyralidae). *Pest Management Science*, 74(3): 658–664.
- Zhang GF, Lei F, Wan FH, Ma J, Yang YG, 2008. Effects of plant species switching on dynamics of amylase and proteinase activity of *Bemisia tabaci* biotype B and *Trialeurodes vaporariorum*. *Biodiversity Science*, 16(4): 313–320. [张桂芬, 雷芳, 万方浩, 马俊, 杨玉国, 2008. 寄主植物转换对 B 型烟粉虱和温室粉虱淀粉酶及蛋白酶活性的影响. *生物多样性*, 16(4): 313–320.]
- Zhang QG, Feng H, 1966. The lipase activity and lipid contents in the armyworm, *Leucania separata* walker. *Science Bulletin*, (5): 8.
- Zhang XX, Wu JC, 1988. A comparative study on geographical populations of the rice leaf roller *Cnaphalocrocis Medinalis* Guenee. *Acta Entomologica Sinica*, 31(3): 259–267. [张孝羲, 吴进才, 1988. 稻纵卷叶螟地理种群的比较研究. *昆虫学报*, 31(3): 259–267.]
- Zhang YM, 1994. Study on changes of main biochemical composition fat, glycogen and so on in diapause pupa of *Heliothis armigera* Hübner. *Journal of Shandong Agricultural University*, 25(2): 147–150. [张韵梅, 1994. 棉铃虫蛹在滞育中脂肪、糖原等生化成分含量变化的研究. *山东农业大学学报*, 25(2): 147–150.]
- Zhu AX, Qian D, Liu XD, 2015. A method for rearing the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* using wheat seedlings. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 52(4): 883–889. [朱阿秀, 钱秋, 刘向东, 2015. 利用小麦苗饲养稻纵卷叶螟的方法. *应用昆虫学报*, 52(4): 883–889.]