

“转基因稻谷储藏适宜性及机理” 特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.06.011

储藏期内转 Bt 基因稻谷对印度谷螟生长发育的影响

吴学友, 陈二虎, 王康旭, 唐培安✉

(南京财经大学 食品科学与工程学院, 粮食储运国家工程实验室,
江苏高校粮油质量安全控制及深加工重点实验室, 江苏 南京 210023)

摘要: 对转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷 (华恢 1 号) 及其非转基因亲本明恢 63 在储藏期内对害虫印度谷螟生长发育的影响开展研究。结果表明, 转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷对印度谷螟低龄幼虫 (1 至 3 龄幼虫) 具有较强的致死作用。温度显著影响印度谷螟各虫态的发育历期和发育速度, 以 2% 转基因稻谷糙米粉饲喂印度谷螟后发育历期显著延长。种群生长发育速率与温度关系的非线性拟合结果显示, 印度谷螟发育起点温度为 7.40~15.94 °C, 以 2% 转基因稻谷糙米粉饲喂印度谷螟发育起点温度为 4.90~17.36 °C。以上研究结果在理论上加深对转 Bt 基因稻谷生态安全的认识, 在实践上为科学开发利用转 Bt 基因水稻提供理论支持。

关键词: 转基因稻谷; 印度谷螟; 温度; 生长发育; 生态安全

中图分类号: TS201.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2020)06-0097-07

网络首发时间: 2020-10-27 10:03:38

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20201027.0933.001.html>

Effect of Bt Transgenic Rice on the Growth and Development of Indian Meal Moth, *Plodia interpunctella* during Storage (Hübner)

WU Xue-you, CHEN Er-hu, WANG Kang-xu, TANG Pei-an✉

(College of Food Science and Engineering/ National Engineering Laboratory for Grain Storage and Transportation/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing University of Finance and Economics, Nanjing Jiangsu 210023, China)

Abstract: The effects of transgenic *CryIAb/CryIAc* rice (Huahui 1) and its original parent (Minghui 63) on the growth and development of indian meal moth during storage were studied. The results showed that, transgenic rice with *CryIAb/CryIAc* gene has a strong lethal effect on the youth larvae (1st to 3rd instars). Temperature has a significant effect on the development duration and speed of each stage of indian meal moth, and the development period was significantly prolonged after being fed with 2% transgenic brown rice meal. The nonlinear model of temperature-dependent developmental rate showed that the developmental

收稿日期: 2020-07-19

基金项目: 粮食公益性行业科研专项 (201413007-02, 201513002-05-03); 国家重点研发计划 (2019YFC1605303, 2016YFD0401004-4); 江苏省六大人才高峰高层次人才项目 (NY-057); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 吴学友, 男, 1986 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为储粮储藏。E-mail: wxy_0808@163.com.

通讯作者: 唐培安, 男, 1981 年出生, 博士, 教授, 研究方向为粮食储藏新技术、储粮害虫防治以及转基因稻谷的储藏安全性评估。E-mail: tangpeian@163.com.

threshold temperature of indian meal moth was 7.40 °C to 15.94 °C, while those fed with 2% transgenic brown rice meal was 4.90 °C to 17.36 °C. Our research can deepen the understanding of ecological safety of Bt transgenic rice in theory, and provide theoretical support for scientific development and utilization of Bt transgenic rice in practice.

Key words: transgenic rice; *Plodia interpunctella*; temperature; development; ecological safety

害虫为害是制约稻谷粮食安全的主要威胁之一，与传统农业中的化学药剂防治相比，转 Bt 基因水稻抗虫杀虫受到研究者的青睐^[1-3]。转 Bt 基因水稻的靶标害虫主要是农田害虫，然而籽粒中存在 Bt 蛋白，转基因稻谷的杀虫特性在储藏期间也会对储粮害虫产生影响，将导致粮仓生态系统发生变化，进而影响储藏期的稻谷品质^[4-5]。印度谷螟 *Plodia interpunctella* (Hübner)，隶属于鳞翅目卷蛾科，是世界性的仓储害虫之一，其幼虫喜剥蚀粮食子粒的胚部和表皮，吐丝结网造成粮食结块变质，其成虫善飞，易造成储粮的重复感染^[6-8]。因此，开展储藏期内转基因稻谷对储粮害虫印度谷螟生长发育的影响对加深稻谷安全储藏认知具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 供试稻谷

转基因稻谷华恢 1 号:以 pBluescript II KS(+/-) phagemid 为载体，通过基因枪法介导，将抗虫基因 *CryIAb/CryIAc* 导入水稻明恢 63 获得转 Bt 基因抗虫水稻，标记为 HH/Bt (图 1-1)。非转基因稻谷明恢 63: 转 *CryIAb/CryIAc* 基因水稻华恢 1 号的非转基因亲本对照，标记为 MH/CK (图 1-2)。上述两种稻谷由华中农业大学作物遗传改良国家重点实验室提供。



图 1-1 转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷 (HH/Bt)

图 1-2 非转基因亲本 (MH/CK)

1.2 供试虫源

印度谷螟采自南京财经大学储粮害虫防控实

验室的模拟粮仓中，后在养虫室内人工饲养数代。将印度谷螟配对成虫接种于含有 100 g 人工饲料的玻璃瓶中 (经 160 °C 干热灭菌)，产卵 24 h 后移出成虫，挑取新鲜卵粒置于培养小室 (Φ30 mm×15 mm)，添加适量人工饲料 (大豆粉和酵母粉按质量比 20 : 1 混合而成)。饲养条件为 (27±1) °C、75%±5% RH、24 h 无光照。

1.3 主要仪器设备

JLGJ4.5 型检验砬谷机: 浙江台州市粮仪厂; FW80 型高速粉碎机: 天津泰斯特仪器有限公司; SL1202N 型分析天平: Denver 公司; PQX-300D 型人工气候箱: 宁波东南仪器有限公司; SZM45 型体式显微镜: 宁波舜宇仪器设备有限公司。

1.4 稻谷饲料样品配制

稻谷 HH/Bt 和 MH/CK 样品分别经除杂，砬谷、再除杂，粉碎等处理后获得 MH/CK、HH/Bt 糙米粉，随后向 HH/Bt 糙米粉中添加 MH/CK 以制备 HH/Bt 含量分别为 80%、50%、20%、10%、5% 和 2% 的混合糙米粉，以 MH/CK (0%)、HH/Bt (100%) 糙米粉分别作为阴性对照和阳性对照。

1.5 试虫处理

取新羽化的印度谷螟成虫 30 只 (雌雄比为 1 : 1)，产卵后在卵粒周围添加适量配制好的稻谷饲料，置于养虫室 (75% RH，24 h 无光照)。每 24 h 观察一次，记录卵的孵化数、虫龄、死亡数和羽化数等信息。待试虫成虫羽化后，立即进行雌雄配对，单对观察并统计产卵数及成虫寿命。模拟温度为: 21、24、30、33、36 和 39 °C，每个处理 200 头重复，对照组饲料为 MH/CK 糙米粉。

1.6 发育速率与温度关系模拟

印度谷螟各虫态生长发育速率与温度的关系曲线模拟依据 Briere 等^[9]推导的非线性模型进行，并利用 SPSS19.0 统计软件进行回归方程拟合，计算印度谷螟生长发育各虫态发育参数 (a、 T_0 、 T_L)，

并确定印度谷螟各虫态的发育速率与温度关系的非线性模型。

Briere 等^[9]推导的昆虫种群生长发育速率与温度关系的非线性模型为:

$$R(T) = 0, T \leq T_0,$$

$$R(T) = aT(T - T_0)\sqrt{T_L - T}, T_0 \leq T \leq T_L,$$

$$R(T) = 0, T \geq T_L,$$

其中, $R(T)$ 表示平均发育速率, 是昆虫某一虫态发育所需时间的倒数, 单位为 d^{-1} ; T 表示温度, T_0 表示最低发育温度, T_L 表示最高发育温度, 单位均为 $^{\circ}C$, 在计算之初, 可以根据实验观察予以推测大概范围; a 表示经验常数, 某一昆虫种群各虫态的 a 值在一定范围内。依据上述非线性模型方程。

1.7 数据处理

所有实验均设置 3 个生物学重复, 数据采用 SPSS19.0 软件进行方差分析, 通过独立样本 t 测验比较分析转基因稻谷对印度谷螟发育的影响, 实验数据均为平均值 \pm 标准误表示, 显著差异水平设置为 $\alpha=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 转基因稻谷对印度谷螟的致死效应

以不同含量转基因稻谷糙米粉饲喂印度谷螟初孵幼虫, 观察记录 1 至 3 龄幼虫生物学特性以及存活情况。研究发现, 印度谷螟初孵幼虫即开始取食, 对含 HH/Bt 的饲料并无明显的趋避行为表现, 这一发现与已有报道相一致^[10-11]。幼虫在取食含转基因稻谷的饲料后中毒表现为: 首先离开饲料, 随之其运动能力减弱, 粪便含水状物, 其腹部有明显凹陷, 皱缩, 身体蜷缩, 干瘪发黄, 最后死亡。由此可见, 转 Bt 基因稻谷对印度谷螟的致死效果, 这一研究结果与此前报道类似^[10-11]。

致死率统计结果显示, 转 *Cry1Ab/Cry1Ac* 基

因稻谷对印度谷螟低龄幼虫 (1 至 3 龄幼虫) 具有较强的致死效应^[10-11], 在 HH/Bt 含量高于 20% 时, 初孵 1 龄幼虫在尚未进入 2 龄期就已经全部死亡。在 2% 和 5% HH/Bt 含量时, 幼虫在 3 龄结束进入 4 龄时的死亡率分别为 60.0% 和 68.3% (详见表 1)。因此, 本研究选取 2% HH/Bt 作为实验组饲料来探讨转 *Cry1Ab/Cry1Ac* 基因稻谷对印度谷螟生长发育的影响。

2.2 转基因稻谷对印度谷螟发育历期的影响

在模拟 21~36 $^{\circ}C$ 试验温范围内, 转 *Cry1Ab/Cry1Ac* 基因稻谷对印度谷螟的生长发育均有显著影响, 且整体上呈现发育历期延长的趋势, 这一结果与先前研究报道一致^[10-11]。在 27 $^{\circ}C$ 条件下, 对照组 (MH/CK) 试虫卵至成虫的发育历期为 63.20 d, 2% HH/Bt 糙米粉饲喂的实验组试虫延长为 75.60 d。各发育阶段试虫的发育历期为: 对照组一龄、二龄、三龄和四龄幼虫发育历期均约为 5 d 左右, 而实验组则均延长为 8 d 左右; 对照组五龄幼虫发育历期为 7.55 d, 实验组则延长为 10.22 d; 研究还发现, 六龄幼虫发育历期缩短, 对照组为 16.47 d, 实验组则缩短为 12.83 d; 化蛹后, 对照组蛹期和成虫期的发育历期分别为 8.21 和 7.06 d, 实验组蛹期和成虫期的发育历期则分别延长为 9.06 和 8.50 d (表 2)。

根据 C. de A. E. Gasparin 提出的有效积温法则, 作为变温动物的昆虫, 其生长发育须从外界 (食物和环境) 获取一定的热量, 且存在发育阈温度和最适发育温度。不同模拟温度条件下, 取食 MH/CK 和 2% HH/Bt 糙米粉的印度谷螟卵发育至成虫所需总时间见图 2。在 21~36 $^{\circ}C$ 条件下, 对照组和实验组试虫均能完成生长发育, 对照组和实验组均在 30 $^{\circ}C$ 条件下发育历期达到最小值 (分别为 53.00 d 和 67.73 d)。统计分析结果表明, 以 2% HH/Bt 和 MH/CK 糙米为饲料的印度谷螟在

表 1 不同含量的转基因稻谷对印度谷螟的致死率统计

%

发育阶段	HH/Bt 含量							
	0	2	5	10	20	50	80	100
卵期	12 \pm 2	16 \pm 4	10 \pm 2	15 \pm 3	6 \pm 1	7 \pm 2	10 \pm 2	3 \pm 1
一龄幼虫	26 \pm 2	42 \pm 2	44 \pm 2	72 \pm 2	100 \pm 0	100 \pm 0	100 \pm 0	100 \pm 0
二龄幼虫	32 \pm 1	60 \pm 1	56 \pm 1	79 \pm 2	-	-	-	-
三龄幼虫	32 \pm 3	60 \pm 1	68 \pm 3	88 \pm 2	-	-	-	-

表 2 不同温度下转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷对印度谷螟生长发育的影响

温度/°C	食物	卵期	一龄期	二龄期	三龄期	四龄期	五龄期	六龄期	蛹期	成虫期	卵至成虫
21	MH/CK	7.31±0.10 ^a	15.38±0.52 ^a	9.31±0.66 ^a	8.44±0.34 ^a	9.69±0.48 ^a	14.06±0.50 ^a	20.06±0.17 ^a	12.20±0.28 ^a	15.47±0.55 ^a	111.80±0.17 ^a
	2% HH/Bt	7.75±0.16 ^b	16.50±1.43 ^a	17.50±0.19 ^b	16.50±1.46 ^b	15.50±1.35 ^b	18.00±0.33 ^b	19.13±0.30 ^b	14.13±0.23 ^b	16.25±0.70 ^a	141.20±0.17 ^b
24	MH/CK	6.50±0.03 ^a	8.35±0.14 ^a	6.83±0.15 ^a	6.27±0.07 ^a	8.67±0.14 ^a	9.87±0.11 ^a	18.13±0.55 ^a	11.18±0.16 ^a	11.23±0.24 ^a	87.00±0.17 ^c
	2% HH/Bt	6.37±0.09 ^a	15.67±0.40 ^b	15.27±0.40 ^b	11.53±0.36 ^b	15.07±0.12 ^b	14.13±0.09 ^b	16.00±0.10 ^b	11.93±0.12 ^b	15.07±0.33 ^b	121.00±0.22 ^b
27	MH/CK	3.56±0.03 ^a	5.50±0.13 ^a	4.50±0.10 ^a	4.89±0.08 ^a	5.53±0.12 ^a	7.55±0.13 ^a	16.47±0.10 ^a	8.21±0.09 ^a	7.06±0.19 ^a	63.20±0.14 ^a
	2% HH/Bt	3.50±0.00 ^b	8.06±0.31 ^b	7.28±0.55 ^b	7.94±0.10 ^b	8.22±0.38 ^b	10.22±0.34 ^b	12.83±0.34 ^b	9.06±0.10 ^b	8.50±0.37 ^b	75.60±0.19 ^b
30	MH/CK	3.50±0.00 ^a	5.45±0.13 ^a	4.43±0.13 ^a	4.27±0.10 ^a	4.75±0.09 ^a	5.96±0.14 ^a	10.80±0.43 ^a	6.76±0.09 ^a	7.10±0.19 ^a	53.00±0.17 ^a
	2% HH/Bt	3.60±0.10 ^a	5.90±0.35 ^a	5.80±0.36 ^b	7.10±0.10 ^b	8.50±0.43 ^b	8.30±0.34 ^b	11.90±0.10 ^b	9.00±0.33 ^b	7.70±0.37 ^a	67.73±0.15 ^b
33	MH/CK	2.95±0.05 ^a	5.22±0.08 ^a	3.91±0.06 ^a	4.72±0.08 ^a	5.11±0.09 ^a	7.42±0.10 ^a	11.10±0.17 ^a	6.52±0.07 ^a	7.32±0.12 ^a	54.27±0.15 ^a
	2% HH/Bt	3.12±0.14 ^a	7.23±0.12 ^b	6.46±0.14 ^b	7.08±0.42 ^b	8.69±0.60 ^b	8.85±0.42 ^b	10.08±0.21 ^b	8.38±0.65 ^b	9.00±0.42 ^b	68.80±0.17 ^b
36	MH/CK	3.57±0.07 ^a	6.29±0.13 ^a	4.93±0.37 ^a	5.86±0.29 ^a	6.14±0.29 ^a	6.93±0.27 ^a	12.57±0.34 ^a	6.14±0.21 ^a	6.86±0.23 ^a	59.27±0.18 ^a
	2% HH/Bt	3.36±0.10 ^a	8.07±0.38 ^b	6.93±0.41 ^b	8.07±0.29 ^b	9.50±0.17 ^b	10.86±0.21 ^b	12.36±0.23 ^a	9.00±0.21 ^b	7.36±0.36 ^a	75.40±0.16 ^b
39		不能孵化	-	-	-	-	-	-	-	-	-

注：表中数据为平均值±标准误，字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

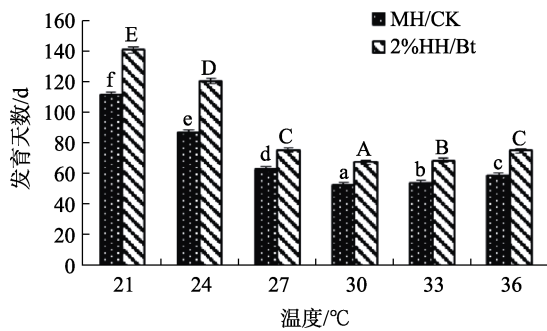


图 2 转 Bt 基因稻谷对印度谷螟生长发育 (卵至成虫) 的影响

各温度下发育历期差异均极显著 ($P<0.05$)。

2.3 各虫态发育速率与温度关系的模拟

昆虫的生长发育不但需要在一定的温度范围内,且在这个适宜昆虫生长发育的温度阈值内,昆虫的生长发育速度同样受到温度的影响。印度谷螟各虫态生长发育速率表明,其生长发育速率与温度的关系是非线性的,在 21~30 °C 其趋势为类似对数增长,在高于 30 °C 之后,该曲线迅速下降,在最高发育速度的两侧曲线并不对称。依据 Briere 等^[9]非线性模型进行回归方程拟合,印度谷螟生长发育速率与温度关系模型参数如表 3 所示:印度谷螟的发育起点温度 (T_0) 为 7.40~15.94 °C,其中,卵、六龄期、蛹的起始温度分别为 15.15、9.92 和 7.40 °C,表明印度谷螟六龄幼虫和蛹对低温的耐受能力很强;印度谷螟发育最高温度 (T_L) 在 37.60~44.11 °C,其中,卵孵化的温度上限为 38.71 °C,本研究在 39 °C 下的印度谷螟卵未能发育也证实了这一推断结果。各虫

态的发育速率 $R(T)$ 与温度 T 间的拟合非线性曲线模型见图 3。

表 3 印度谷螟生长发育速率与温度关系模型参数

发育阶段	参数值			R^2
	$a (\times 10^{-4})$	T_0	T_L	
卵期	2.309 3±0.577 1	15.15±2.34	38.71±1.18	0.920
一龄期	1.659 9±0.222 9	15.94±1.26	37.60±0.43	0.962
二龄期	1.784 2±0.279 0	14.25±1.65	38.13±0.58	0.957
三龄期	1.490 0±0.176 9	11.50±1.58	37.76±0.34	0.970
四龄期	1.421 9±0.290 9	13.36±2.35	37.94±0.68	0.921
五龄期	0.911 2±0.338 9	11.82±4.51	39.05±1.70	0.850
六龄期	0.439 5±0.210 3	9.92±6.37	39.89±2.54	0.816
蛹期	0.554 9±0.195 4	7.40±4.73	44.11±3.61	0.969
卵至六龄期	0.165 7±0.018 7	13.18±1.27	38.49±0.46	0.980
卵至成虫	0.117 8±0.015 0	12.78±1.44	38.90±0.58	0.978

2.4 转 Bt 基因稻谷对印度谷螟发育速率的影响

印度谷螟各虫态发育速率与温度关系的非线性方程各参数见表 4。以 2% HH/Bt 糙米粉为食的印度谷螟发育起点温度 (T_0) 为 4.90~17.36 °C,其中卵孵化的起始温度为 15.13 °C,六龄幼虫和蛹对低温的耐受能力最强;发育最高温度 (T_L) 上限为 37.72~40.33 °C,其中卵孵化的温度上限为 38.96 °C。据此推断,印度谷螟在转 Bt 基因稻谷为饲料的生长环境中的适应性要高于对照组,与先前转基因稻谷对鳞翅目仓储害虫生长发育影响结果相同^[12-14]。2% HH/Bt 糙米粉饲喂印度谷螟各虫态发育速率 $R(T)$ 与温度 T 间的拟合非线性曲线模型见图 4。

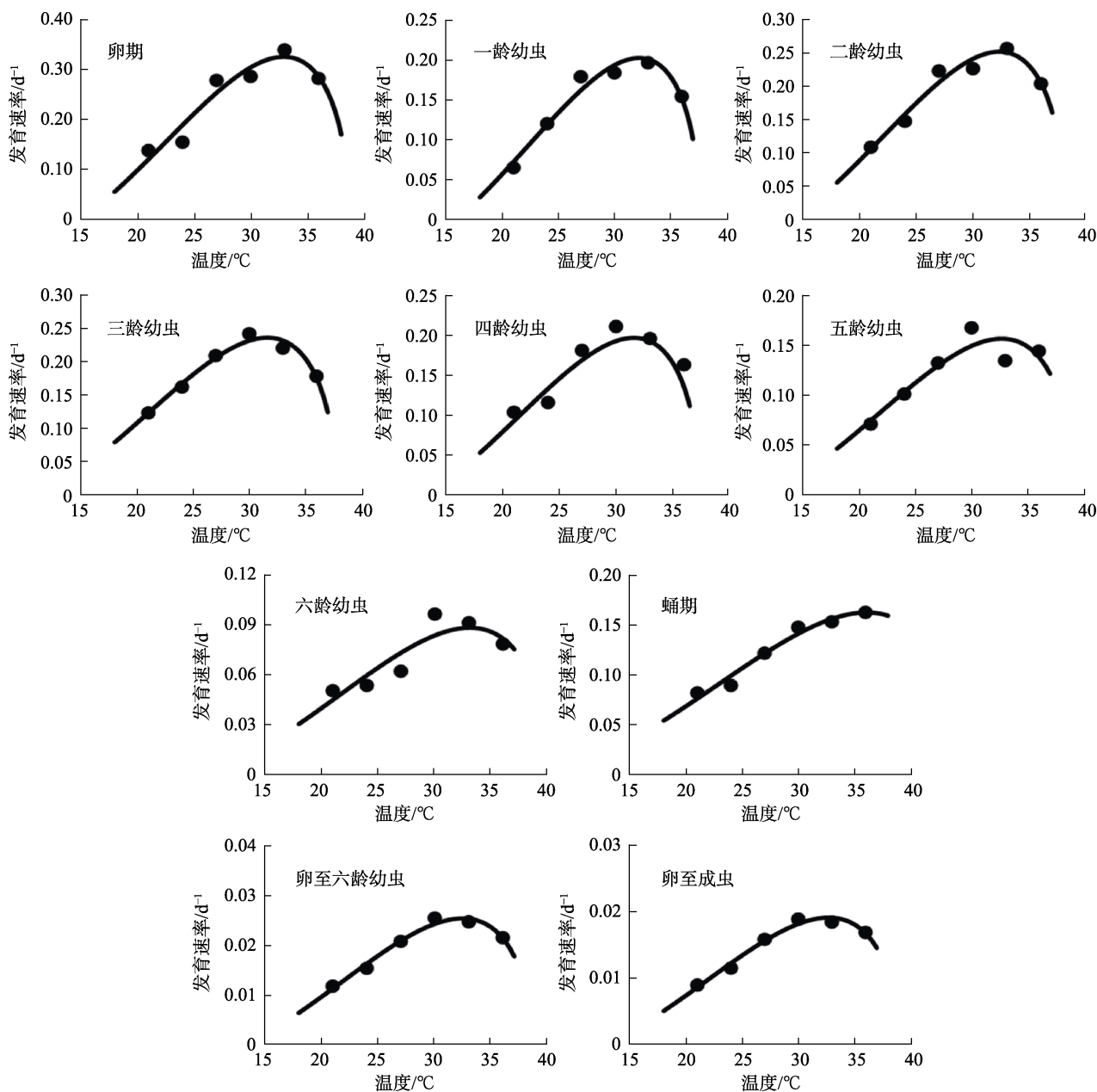


图 3 印度谷螟各虫态发育速率与温度关系模拟

表 4 印度谷螟生长发育速率与温度关系模型参数 (2% HH/Bt)

发育阶段	参数值			R ²
	a (×10 ⁻⁴)	T ₀	T _L	
卵期	2.285 0±0.565 2	15.13±2.29	38.96±1.25	0.929
一龄期	1.313 8±0.403 5	16.55±2.70	37.72±1.07	0.838
二龄期	1.502 6±0.343 9	17.36±1.85	37.74±0.84	0.906
三龄期	1.027 6±0.107 1	14.25±1.08	38.35±0.42	0.982
四龄期	0.884 8±0.262 3	13.75±3.26	38.10±1.07	0.859
五龄期	0.836 5±0.100 7	13.72±1.35	37.81±0.39	0.970
六龄期	0.434 7±0.119 9	8.46±4.03	39.94±1.41	0.931
蛹期	0.475 1±0.121 0	4.89±4.49	40.33±1.29	0.948
卵至六龄期	0.140 0±0.025 4	14.27±1.88	38.35±0.73	0.948
卵至成虫	0.096 6±0.019 9	13.23±2.28	38.72±0.90	0.942

通过以上表 3 与表 4 数据以及印度谷螟各虫

态 3 个参数对比研究发现,取食转 *Cry1Ab/Cry1Ac* 基因稻谷并没有显著改变印度谷螟最高发育温度,但印度谷螟各虫态发育最低温度有所增加,这可能是低温和 Bt 蛋白双重作用的结果。

转 Bt 基因稻谷的开发是抵抗田间害虫的有效手段^[15-18],同时转基因稻谷的产后面临的仓储环节引起诸多粮食储藏研究人员的诸多关注。赵文娟^[10]用转 *Cry1Ac*+*SCK* 稻谷饲喂印度谷螟的研究表明实验组印度谷螟存活率、发育历期分别为 40.8%、62.2 d,而对照组分别为 75.2%、53.0 d,两者存在显著差异。蒋海燕等^[11]通过配制不同比例转 Bt 基因稻谷人工饲料测定其对 1~3 龄幼虫在

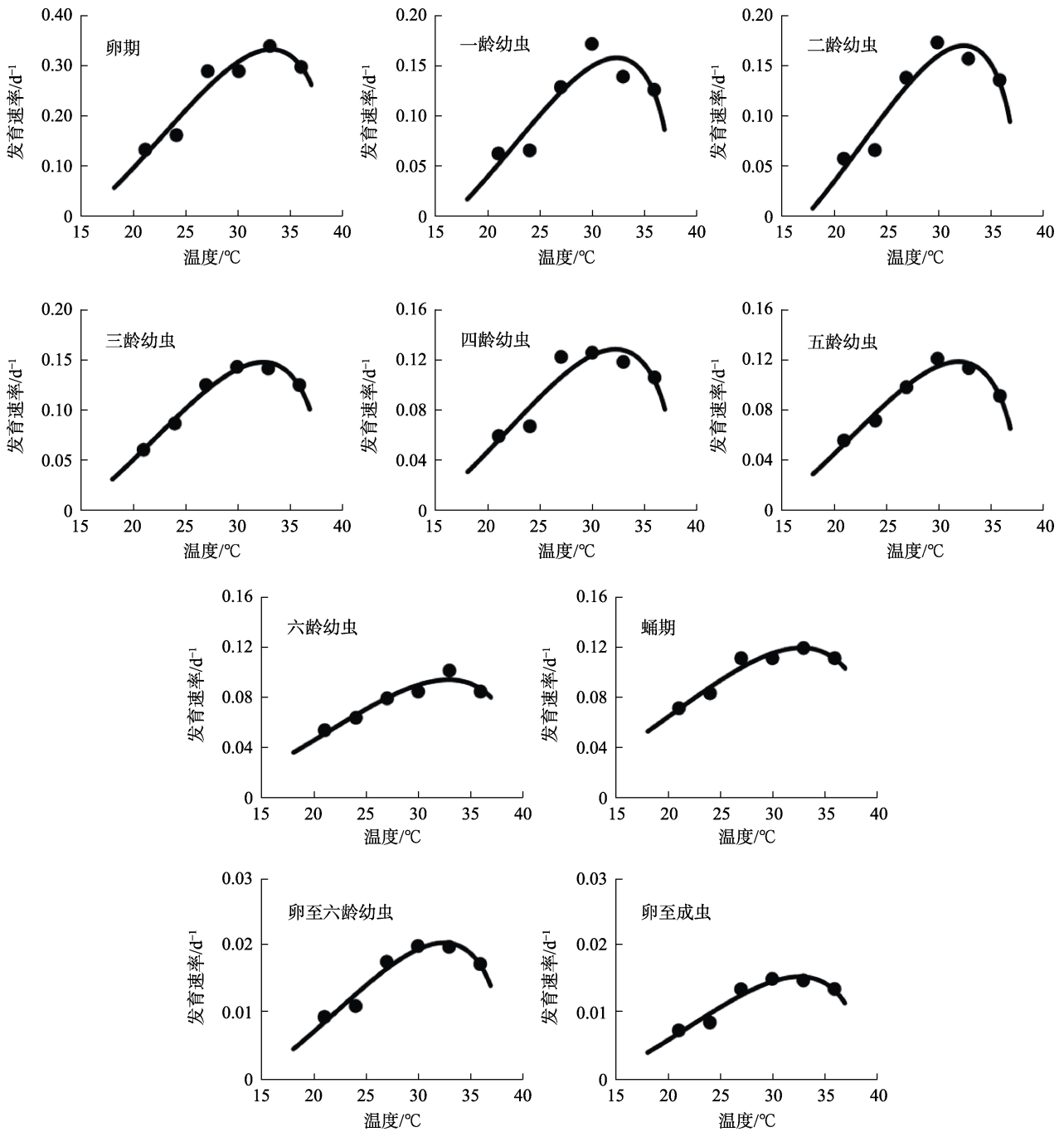


图 4 印度谷螟各虫态发育速率与温度关系模拟 (2% HH/Bt)

72 h 内的急性毒力实验表明, 取食含 10%、30%、50%和 70%转基因稻谷粉饲料 72 h 后的印度谷螟初孵化幼虫的死亡率分别为 29.30%、48.50%、54.75%和 71.61%。转基因稻谷开发时, 尽管选取的 Bt 基因有所不同, 但获得的转基因稻谷对鳞翅目昆虫据均有良好杀灭作用, 本文以及类似研究均表明, 转基因稻谷对鳞翅目储粮害虫仍表现出良好的抗虫性。

目前关于转 Bt 基因稻谷对储粮害虫生长发育的研究表明, 转 Bt 基因抗虫稻谷对印度谷螟、麦

蛾和米蛾等鳞翅目害虫显示出较高的抗虫性, 在存活率、发育历期等生物学指标上与对照组都存在差异性。Mcgaughey^[19]首次报道了印度谷螟在实验室条件下对 Bt 产生抗性。稻谷的储藏是一个长期持续的过程, 在 Bt 蛋白的长期胁迫下, 将导致害虫种群中抗性基因及个体的出现或增加, 严重的甚至会出现“超级害虫”, 这是一个重要的生态安全问题, 粮库害虫管理将面临新的挑战。为此, 我们还对喂食转基因稻谷后的印度谷螟差异表达基因以及抗氧化酶活性进行研究^[20-21], 这

对于加强储粮害虫抗性管理及抗性风险预测,为转基因稻谷的安全储藏提供指导,是十分必要且有意义的。

3 结论

利用转 Bt 基因稻谷糙米粉 (HH/Bt) 饲养印度谷螟,统计不同温度条件下各虫态的发育历期和发育速度,并与非转基因稻谷糙米粉 (MH/CK) 饲养的对照组进行比较分析,得到如下结论:

(1) 温度能够显著影响印度谷螟各虫态的发育历期和发育速度,印度谷螟各虫态生长发育速率 $R(T)$ 与温度 T 的非线性模型拟合曲线显示,该虫发育起点温度 (T_0) 为 7.40~15.94 °C,其中,卵孵化的起始温度和最高温度分别为 15.15 °C、38.71 °C。

(2) 将印度谷螟卵接入到完全转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷的饲料中,孵化的幼虫全部死亡,这表明储藏期内转 Bt 基因稻谷对粮仓印度谷螟具有一定的致死作用。

(3) 以转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷 (2% HH/Bt) 饲喂的印度谷螟幼虫生长发育所需时间比对照稻谷 (MH/CK) 显著增加,说明在亚致死剂量以下时, Bt 蛋白可以减缓印度谷螟生长发育速率。

(4) 取食含转 *CryIAb/CryIAc* 基因稻谷饲料的印度谷螟发育起点温度 (T_0) 为 4.90~17.36 °C,温度范围较对照组有所扩大,而卵孵化的起始温度和最高温度则分别为 15.13 °C、38.96 °C,无明显变化。

参考文献:

[1] MOHAN B R, SAJEENA A, SEETHARAMAN K, et al. Advances in genetically engineered (transgenic) plants in pest management- an over view[J]. Crop Protection, 2003, 22 (9): 1071-1086.

[2] 中国科学院学部“我国转基因作物研究和产业化发展策略”咨询组. 对我国转基因作物研究和产业化发展策略的建议[J]. 中国科学院院刊, 2004, 19(5): 330-331.

[3] LI Y, ZHANG Q, LIU Q, et al. Bt rice in China — focusing the nontarget risk assessment[J]. Plant Biotechnology Journal, 2017, 15: 1340-1345.

[4] 吴学友, 唐培安, 宋伟. 储藏期内转 Bt 基因稻谷品质及抗性研究进展[J]. 粮食储藏, 2012, 41(5): 3-6.

[5] WAGAN T A, CAI W L, HUA H X, et al. The effects of transgenic Bt rice on arthropod community structure during storage[J]. African Entomology, 2017, 25(2), 328-334.

[6] SUBRAMANYAM B. Characteristics of Indian meal moth[J]. Milling Journal, 2011: 38-41.

[7] 张清纯, 候兴伟, 李光灿, 等. 印度谷螟生物学习性的初步研究[J]. 粮食储藏, 1989, 18 (4): 33-39.

[8] 简富明. 印度谷螟生物学特性初步研究[J]. 西南农业学报, 1993, 6(3): 80-84.

[9] BRIERE J F, PRACROS P, LE R, et al. A novel rate model of temperature- dependent development for arthropods[J]. Environmental Entomology, 1999, 28 (1): 22-29.

[10] 赵文娟. 转 Bt 基因稻谷储藏期对四种储粮害虫的影响[D]. 西南大学, 2009.

[11] 蒋海燕, 王振华, 华红霞, 等. 转 Bt 基因稻谷对印度谷螟生长发育的影响[J]. 应用昆虫学报, 2011, 48(6): 1722-1727.

[12] 李光涛, 曹阳, 叶恭银, 等. 转 Bt 基因抗虫稻谷对麦蛾的抗性评价[J]. 植物保护学报, 2008, 35(3): 205-208.

[13] 刘旭. 转 SCK/CryIAc 基因稻谷对米蛾生长发育及解毒功能的影响[D]. 西南大学, 2010.

[14] 杨妮娜. 转 Bt 基因水稻对仓储害虫的影响及其毒理分析[D]. 华中农业大学, 2009.

[15] 王平. 转 Bt 基因水稻稻谷对储藏特性及仓储节肢动物群落的影响[D]. 华中农业大学, 2007.


[16] TU J M, DATTA K, ALAM M F, et al. Expression and function of a hybrid Bt toxin gene in transgenic rice conferring resistance to insect pest[J]. Plant Biotechnology, 1998, 15 (4): 195-203.

[17] TU J M, ZHANG G A, DATTA K, et al. Field performance of transgenic elite commercial hybrid rice expressing *Bacillus thuringiensis* δ -endotoxin[J]. Nature Biotechnology, 2000, 18 (10): 1101-1104.

[18] XU C, CHENG J, LIN H. et al. Characterization of transgenic rice expressing fusion protein *CryIAb/Vip3A* for insect resistance[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 1-8.

[19] MCGAUGHEY W H. Insect resistance to the biological insecticide *Bacillus thuringiensis*[J]. Science, 1985, 229 (4709): 193-195.

[20] 唐培安, 陶冶心, 王康旭, 等. 转 *CryIAb/CryIAc* 基因大米粉饲喂印度谷螟后的比较转录组分析[J/OL]. 粮油食品科技: 1-7. <https://doi.org/10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.06.012>.

[21] 王康旭, 吴学友, 陶冶心, 等. 转基因稻谷 Bt 蛋白降解及长期取食对印度谷螟体内 3 种抗氧化酶活性的影响[J/OL]. 粮油食品科技: 1-8. <https://doi.org/10.16210/j.cnki.1007-7561.2020.06.013> 

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。