

# 转Bt基因棉田棉铃虫对气候变暖与集约化种植的不对称响应

崔洪莹\* 赵紫华

(中国农业大学植物保护学院昆虫学系, 北京 100193)

**摘要:** 为明确全球气候变暖及农业集约化对转Bt基因棉田棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 种群发生的影响, 通过收集1987—2017年我国山东、河南及河北3省的棉花种植面积、棉铃虫发生面积及年平均温度, 采用单因素方差分析法及广义线性模型分析比较转Bt基因棉花推广前后棉田棉铃虫种群的发生程度, 分析棉铃虫的为害指数。结果显示, 转Bt基因棉花推广前, 山东、河南和河北3省的棉铃虫在严重发生年份的为害指数较轻微发生年份均显著增加, 分别增加了1.01倍、2.03倍和69.33%; 温度距平具有同样的趋势, 严重发生年份的温度距平较轻微发生年份分别显著增加了1.91倍、2.33倍和2.29倍。转Bt基因棉花推广后, 山东、河南和河北3省的棉铃虫在严重发生年份的为害指数较轻微发生年份仍显著增加, 分别增加了1.47倍、1.92倍和1.25倍; 温度距平表现出相反的趋势, 轻微发生年份的温度距平较严重发生年份分别增加了2.00倍、1.94倍和2.01倍; 而河南省和河北省在棉铃虫严重发生年份的棉花种植面积较轻微发生年份分别显著增加了75.94%及38.92%。表明转Bt基因棉花种植后显著改变了棉铃虫对全球气候变暖的响应, 气候变暖降低了棉铃虫的为害指数, 而棉花集约化种植增加了棉铃虫的为害指数。非转基因棉田的棉铃虫受自然因素的影响, 转Bt基因棉田的棉铃虫受自然及人为因素的双重影响。

**关键词:** 气候变暖; 棉铃虫; 为害指数; 转Bt基因棉花

## Asymmetrical responses of cotton bollworm *Helicoverpa armigera* to global warming and agricultural intensification in Bt cotton fields

CUI Hongying\* ZHAO Zihua

(Department of Entomology, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** To determine the effects of global warming and agricultural intensification on the population occurrence of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, in fields of transgenic Bt cotton, the data of cotton planting area, occurrence area of *H. armigera* and annual average temperature in Shandong, Henan and Hebei provinces of northern China were collected during 1987—2017. The pest attack index of *H. armigera* in these three provinces was analyzed by using one-way ANOVA and generalized linear model to compare the population occurrence degrees of *H. armigera* in cotton fields before and after transgenic Bt cotton planting. Before transgenic Bt cotton planting, the results showed that the pest attack index of *H. armigera* significantly increased in the years of heavy occurrence compared with that in the years of light occurrence for cotton bollworm in Shandong, Henan and Hebei provinces, which were 1.01-fold, 2.03-fold and 69.33%, respectively. The temperature anomaly had the same trend, which increased 1.91-, 2.33- and 2.29-fold in Shandong, Henan and Hebei provinces, respectively. After

transgenic Bt cotton planting, the pest attack index of *H. armigera* significantly increased in heavy years compared with that in light years for cotton bollworm occurrence in Shandong, Henan and Hebei provinces, which was 1.47-, 1.92- and 1.25-fold, respectively. The temperature anomaly had the opposite trend, the pest attack index of *H. armigera* significantly increased in light years compared with that in heavy years for cotton bollworm occurrence in Shandong, Henan and Hebei provinces, which was 2.00-, 1.94- and 2.01-fold, respectively. Cotton planting area had the same trend, which increased 75.94% and 38.92% in Henan and Hebei provinces, respectively. It indicated that global warming significantly reduced the pest attack index of *H. armigera*, while agricultural intensification significantly increased the pest attack index of *H. armigera* after transgenic Bt cotton planting. Intensification of transgenic Bt cotton significantly changed the response of *H. armigera* to global warming. These results indicated that cotton bollworm in non-transgenic cotton fields was affected by natural factors, while cotton bollworm in transgenic Bt cotton fields was significantly affected by both natural and human factors.

**Key words:** global warming; *Helicoverpa armigera*; pest attack index; transgenic Bt cotton

全球气候变化是人类迄今面临的最大的环境问题,也是21世纪人类面临的最复杂的挑战之一(Jamieson et al., 2017)。近年来,气候变化已经对全球生态系统及社会经济系统产生明显影响,主要表现为3方面:全球气候变暖、臭氧层破坏及酸雨,其中全球气候变暖是最为关注的热点(Young, 2002)。联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)(2014)报告指出,近100年来(1909—2011年)地表平均气温升高了0.9~1.5℃,并且将以更快的速度继续升高,预计到2100年温度将升高1.1~6.4℃(IPCC, 2014)。全球气候变暖直接影响昆虫的发育繁殖、种群密度、地理分布、物候发生期、寄主植物-植食性昆虫的相互作用关系等(Robinet & Roques, 2010)。

近几十年来,随着农业集约化的不断发展,对生境中的生物多样性构成了很大的威胁,如农业生态系统中昆虫和植物的多样性都受到显著影响(Gabriel & Tscharntke, 2007; Batary et al., 2010)。农业集约化对昆虫的种群密度及种群动态波动具有不同影响,如Habel et al.(2019)研究发现农业集约化显著降低了草地生境中的蝴蝶种群数量;而Thies et al.(2011)研究发现在高度农业集约化水平的景观中,麦长管蚜 *Sitobion avenae* 和禾谷缢管蚜 *Rhopalosiphum padi* 的种群密度较高,而且在农业集约化程度高的景观中,蚜虫种群的增长速度更快。

棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 隶属鳞翅目 Lepidoptera 夜蛾科 Noctuidae, 食性较杂,是我国棉花生产中的主要害虫(赵奎军等, 2000; Zhang et al., 2019)。自20世纪90年代以来,我国北方棉区棉铃虫连年大暴发(张锐等, 2007)。为了控制棉铃虫,我国自1997年开始推广转Bt基因棉花的商品化种植,种植

面积迅猛增加,至2000年,我国黄河流域和长江流域棉区的转Bt基因棉花已经基本替代了传统的非转基因棉花(Wu & Guo, 2005);到2018年,全国棉花种植面积为  $3.354 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> (<http://data.stats.gov.cn/easy-query.htm?cn=C01>),其中转基因棉花的种植面积达到  $2.800 \times 10^6$  hm<sup>2</sup> (吴孔明和肖玉涛, 2018)。随着转基因棉花在我国种植比例的逐年加大,这对棉铃虫的可持续控制起到了重要作用,但是棉铃虫仍然是转Bt基因棉花最重要的靶标害虫(Wu et al., 2008)。近年来,棉田中的棉铃虫种群数量持续波动,甚至在玉米、小麦等粮食作物上亦有所上升,因此,探索棉铃虫种群在转Bt基因棉花种植后的发生规律已成为当前的热点问题(Lu et al., 2013)。

棉铃虫在我国各省均有发生,以黄河流域、长江流域及西北棉区三大棉区受害最严重,其中山东、河南、河北3省为我国北方棉区的主要发生地,尤其是20世纪90年代,棉铃虫在北方棉区的大规模暴发造成上百亿元的经济损失(徐荣旗等, 2001)。棉铃虫自然种群动态受到诸多因子的影响,如气候变化、农业集约化、昆虫天敌、寄主类型及杀虫剂等,其中温度(Dhillon & Sharma, 2008; Huang & Li, 2015)及农业集约化(Gao et al., 2010; Ouyang et al., 2014)是影响棉铃虫生长发育的关键因素。随着转Bt基因棉花的推广种植,其是否会影响全球气候变暖及农业集约化对棉铃虫在棉花上的为害指数目前尚不清楚。因此,本研究选取1987—2017年的山东、河南和河北3省棉花种植面积数据、温度距平和棉铃虫发生面积,采用单因素方差分析及广义线性模型进行分析,明确全球气候变暖及农业集约化对棉田棉铃虫种群的影响,以为棉铃虫的预测预报和区域性综合治理提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

棉铃虫发生面积数据:收集1987—2017年山东、河南和河北3省的棉田棉铃虫发生面积数据,其中1987—1999年的数据来自于植物保护统计年鉴(陈生斗和胡伯海,2003),2000—2017年的数据来自于中国农业农村部农业技术推广服务中心。

温度数据:从中国气象数据共享服务系统(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)中获取1987—2017年的每月平均温度数据,同时选取多个不同站点。其中,山东省包括惠民县、成山头、济南市、潍坊市、菏泽市、定陶县和兖州区7个站点;河南省包括安阳市、郑州市、驻马店市和信阳市4个站点;河北省包括怀来县、承德市、乐亭县、沧州市和泊头市5个站点。

棉花种植面积数据:从中国农业农村部种植业管理司(<http://www.zzys.moa.gov.cn/>)获取1987—2017年山东、河南和河北3省的棉花种植面积数据。种植面积是反映集约化程度的重要指标(Zhao et al., 2015),本研究采用种植面积来表示棉花集约化种植程度。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 棉铃虫为害指数的计算方法

为害指数(pest attack index,  $P_i$ )是一种评价农业虫害严重性的方法,将常规调查的害虫发生面积简化成为单一的概念性数值形式,是反映虫害发生程度的重要指标(Zhao et al., 2016)。本研究用为害指数来定义棉铃虫的发生程度,计算公式为 $P_i = X_i^*/A_i^*$ ,其中, $X_i^*$ 表示校正后的棉铃虫发生面积, $A_i^*$ 表示校正后的棉花种植面积。由于山东、河南和河北3省的土地面积差异较大,导致棉铃虫发生面积不同,为了将棉铃虫种群的发生程度转化为可比较和统一分析的模式,需要对棉铃虫在这3个省的发生面积进行校正。通过公式 $X_i^* = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}$ 进行校正,其中,

$X_i$ 表示棉铃虫的原始发生面积, $X_{\max}$ 与 $X_{\min}$ 分别表示棉铃虫的最大发生面积和最小发生面积。依据计算得到的为害指数分别获得1987—1996年及1997—2017年的平均为害指数,并基于此划分棉铃虫严重发生年份和轻微发生年份。严重发生年份指该年棉铃虫的为害指数大于相应年间平均为害指数,轻微发生年份指该年棉铃虫的为害指数小于相应年间平均为害指数。

#### 1.2.2 温度距平的计算方法

温度距平是指连续时间内温度与平均温度的差

异,本研究运用温度距平来表征气候变化指数。首先对山东、河南和河北3省多个站点的平均温度采用公式 $\Delta T_i = T_i^* - \bar{T}$ 进行校正,其中, $\Delta T_i$ 表示温度距平, $T_i$ 表示每年的平均温度, $\bar{T}$ 表示1987—1996年或1997—2017年的平均温度。依据计算的温度距平将1987—2017年逐年划分为暖年( $>0^\circ\text{C}$ )或冷年( $<0^\circ\text{C}$ )。

#### 1.2.3 棉花集约化种植程度的确定

农业集约化程度是指在单位面积的土地上投入大量的资本和劳动力并最大限度地加以利用以便增加单位面积的受益。本研究采用棉花种植面积距平来表征农业集约化程度(Egli et al., 2018)。利用公式 $\Delta A_i = A_i^* - \bar{A}$ 进行计算,其中, $\Delta A_i$ 表示棉花种植面积距平, $A_i^*$ 表示校正后的棉花种植面积, $\bar{A}$ 表示校正后的棉花种植面积的均值。由于山东、河南和河北3省间的棉花种植面积存在较大差异,为了将数据转换为均一化的可比较的标准数据,需要对棉花种植面积进行校正。利用公式 $A_i^* = \frac{A_i - A_{\min}}{A_{\max} - A_{\min}}$ 进行校

正,其中, $A_i$ 表示棉花的原始种植面积, $A_{\max}$ 与 $A_{\min}$ 分别表示棉花的最大种植面积和最小种植面积。

#### 1.2.4 棉铃虫种群发生与环境因子的关系分析

在我国棉花种植过程中,1997年开始在全国各地大规模推广种植转Bt基因棉花,本研究以1997年为节点将研究周期分为1987—1996年期间和1997—2017年期间,分析转Bt基因棉花种植前后棉铃虫对气候变化和农业集约化的响应。采用单因素方差分析法比较严重发生年份和轻微发生年份之间的棉铃虫为害指数、温度距平和棉花种植面积间的差异;采用广义线性模型分析温度距平和种植面积距平对棉铃虫为害指数的影响,以此阐明棉铃虫种群发生与环境因子之间的关系。

### 1.3 数据分析

利用SPSS 13.0软件,采用单因素方差分析法对棉铃虫严重发生年份和轻微发生年份间的温度和棉花集约化程度进行差异显著性检验;采用广义线性模型对转Bt基因棉花种植前后温度和棉花集约化程度对棉铃虫为害指数的影响进行显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 棉铃虫为害指数、温度距平和棉花种植面积

转Bt基因棉花推广之前,棉铃虫在山东省、河南省和河北省发生最重的年份分别为1995、1993和1994年;转Bt基因棉花推广之后,山东省和河南省的棉铃虫为害指数在1997年达到最高,分别为

1.431和0.722,在2002年又发生1个小高峰,之后逐渐下降,而河北省的棉铃虫为害指数呈无规则波动,于1997年达最高,为1.183(图1-A)。

山东省、河南省和河北省在1987—2017年间为暖年的分别有15、16和12年,其中温度距平最高的年份分别为2017、2017和1994年,分别达到1.09、

0.75和0.94℃;温度距平最低的年份分别为1996、2003和2010年,分别为-0.83、-1.03和-1.09℃(图1-B)。山东、河南和河北3省的棉花种植面积呈逐渐波动下降的趋势,其中在2004年3个省都出现1个种植小高峰,分别为 $1\,059.2\times 10^3$ 、 $951.8\times 10^3$ 和 $669.1\times 10^3\text{ hm}^2$ ,2004年之后种植面积逐渐降低(图1-C)。

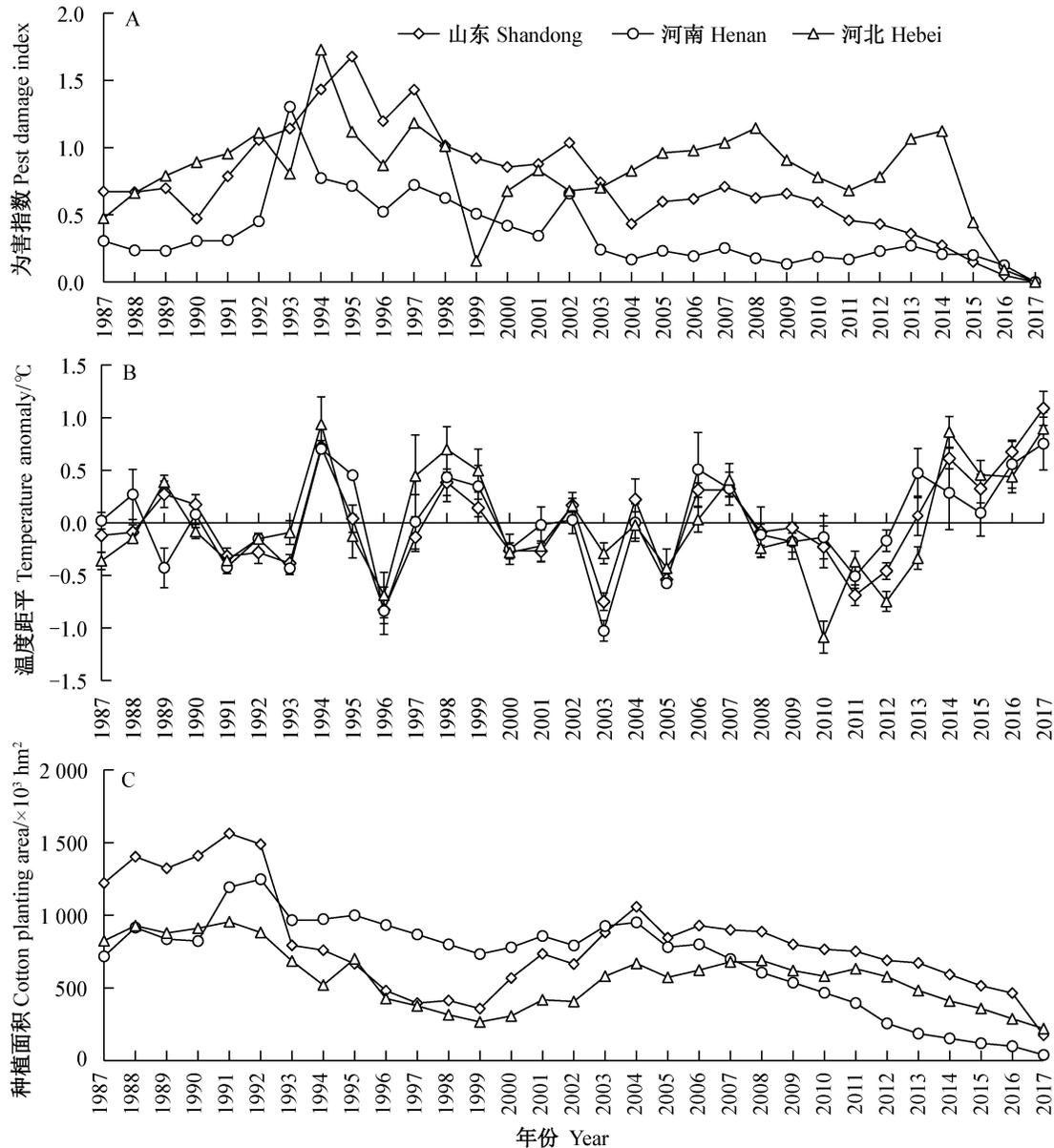


图1 1987—2017年间山东、河南和河北3省的棉铃虫为害指数(A)、温度距平(B)和棉花种植面积(C)

Fig. 1 Pest attack index of *Helicoverpa armigera* (A), temperature anomaly (B) and cotton planting area (C) in Shandong, Henan and Hebei provinces during 1987 to 2017

## 2.2 棉铃虫种群发生与环境因子的关系

### 2.2.1 不同年份的为害指数、温度距平和棉花种植面积

转Bt基因棉花推广前,山东、河南和河北3省棉铃虫的为害指数在严重发生年份较轻微发生年份显著增加,分别显著增加了1.01倍( $F=23.49, P<0.001$ )、2.03倍( $F=22.48, P<0.01$ )和69.33%( $F=8.61, P<0.05$ );

转Bt基因棉花推广后,这3省的棉铃虫为害指数在严重发生年份同样较轻微发生年份显著增加,分别显著增加了1.47倍( $F=32.96, P<0.001$ )、1.92倍( $F=71.64, P<0.001$ )和1.25倍( $F=33.41, P<0.001$ )(图2-A~C)。

转Bt基因棉花推广前,山东、河南和河北3省的

温度距平在棉铃虫严重发生年份较轻微发生年份显著增加,分别显著增加了1.91倍( $F=6.35, P<0.05$ )、2.33倍( $F=15.67, P<0.01$ )和2.29倍( $F=5.27, P<0.05$ );转Bt基因棉花推广后,3省的温度距平在棉铃虫轻微发生年份较严重发生年份显著增加,分别显著增加了2.00倍( $F=6.22, P<0.05$ )、1.94倍( $F=5.33, P<0.05$ )和2.01倍( $F=5.67, P<0.05$ )(图2-D~F)。表明转Bt基因棉花种植前后,气候变暖对棉铃虫为害指数的影响相反,即转Bt基因棉花种植前,气候变暖显著增加了棉铃虫的为害指数;转Bt基因棉花种植后显著改变了棉铃虫对全球气候变暖的响应,气候变暖显著降低了棉铃虫的为害指数。

转Bt基因棉花推广前,山东、河南和河北3省的棉花种植面积在棉铃虫发生严重和轻微年份之间均无显著差异(图2-G~I);转Bt基因棉花推广后,山东省的棉花种植面积在棉铃虫发生严重和轻微年份之间无显著差异(图2-G),河南省和河北省的棉花种植面积在棉铃虫严重发生年份较轻微发生年份显著增加,分别显著增加了75.94%( $F=8.47, P<0.01$ )和38.92%( $F=6.34, P<0.05$ )(图2-H、I)。表明转Bt基因棉花种植前,棉花集约化种植对棉铃虫的为害指数无显著影响;转Bt基因棉花种植后,棉花集约化种植显著增加了棉铃虫的为害指数。

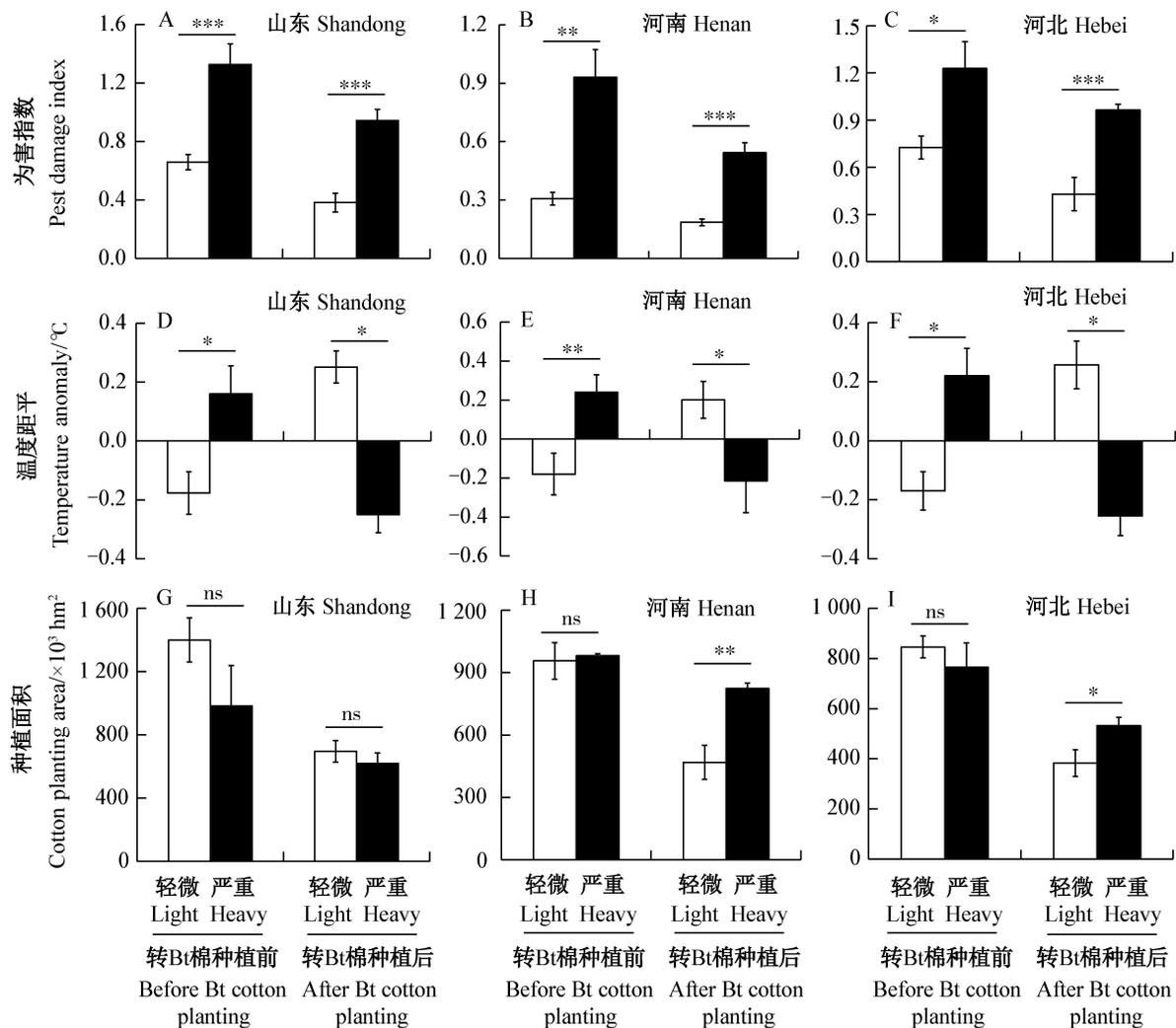


图2 山东、河南和河北3省棉铃虫种群在转Bt基因棉花种植前后发生严重年份与轻微年份的为害指数(A~C)、温度距平(D~F)和棉花种植面积(G~I)

Fig. 2 Pest attack index of *Helicoverpa armigera* (A~C), temperature anomaly (D~F) and agricultural intensification (G~I) in Shandong, Henan and Hebei provinces before and after transgenic Bt cotton planting in light and heavy years of cotton bollworm occurrence

图中数据为平均数±标准误。\*、\*\*、\*\*\*分别表示经单因素方差分析法检验在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 水平差异显著;ns表示无显著差异。Data are mean±SE. \*, \*\* and \*\*\* indicate significant difference at  $P<0.05$ ,  $P<0.01$  or  $P<0.001$  level by one-way ANOVA; ns indicates no significant difference.

### 2.2.2 棉铃虫为害指数与温度距平和棉花集约化的关系

棉铃虫为害指数与温度距平之间的广义线性模型表明, 转 Bt 基因棉花推广前, 棉铃虫的为害指数随着温度距平的逐渐升高而显著增加(图 3-A), 其回归方程式为  $y=2.3613x+0.1625$  ( $r=0.5472$ ); 转 Bt 基因棉花推广后, 随着温度距平的逐渐升高, 棉铃虫的为害指数显著降低(图 3-B), 其回归方程式为

$y=-0.1937x+0.0001$  ( $r=0.3135$ )。棉铃虫为害指数与棉花集约化种植之间的广义线性模型表明, 转 Bt 基因棉花推广前, 棉花集约化种植对棉铃虫为害指数无显著影响; 转 Bt 基因棉花推广后, 棉铃虫为害指数随着棉花集约化逐渐增加而显著升高(图 3-C), 其回归方程式为  $y=314.73x+8.064$  ( $r=0.38$ )。

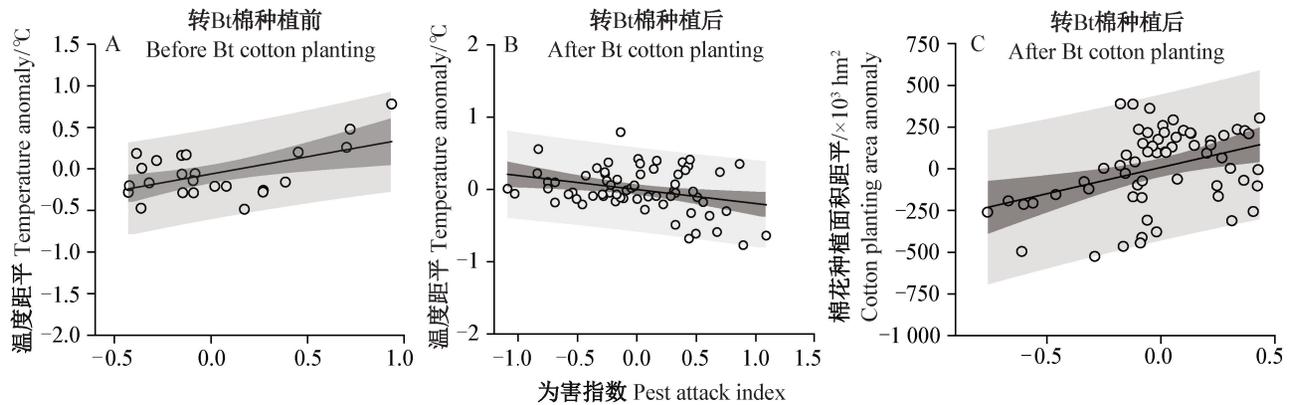


图3 转 Bt 基因棉花种植前后棉铃虫为害指数与温度距平之间(A、B)和棉花种植面积距平之间(C)的关系

Fig. 3 The relationships between the pest attack index of *Helicoverpa armigera* and temperature anomaly (A, B), agricultural intensification (C) described by a generalized linear model before and after transgenic Bt cotton planting

## 3 讨论

本研究结果表明, 河南省、河北省和山东省棉田中的棉铃虫在 1993、1994 和 1995 年发生最严重, 这与郭予元(1998)研究结果一致。自 1992 年开始, 棉铃虫开始在我国主要的棉花产区持续性大暴发, 造成重大经济损失(郭予元, 1998)。从 1997 年开始, 随着转 Bt 基因棉花的大面积推广种植, 棉铃虫的发生得到有效控制, 转 Bt 基因棉花对棉铃虫幼虫不仅有毒杀作用, 而且能抑制其生长发育(张永军等, 2001; 芮昌辉等, 2002)。

前期研究表明, 气候变化特别是气候变暖会影响昆虫的生理、行为和发育, 表现为昆虫世代数量增加及发生为害期延长, 导致农作物受害严重(Poyry et al., 2011; 孙玉诚等, 2017)。例如, 气候变暖显著提高了松树上松异舟蛾 *Thaumetopoea pityocampa* 的发生参数, 表现为存活率增加, 发育历期降低, 其侵害活性及为害指数显著升高, 对当地的松树造成了严重影响(Hodar et al., 2003)。Zhao et al. (2016) 研究发现稻纵卷叶螟 *Cnaphalocrocis medinalis* 的为害指数与温度呈现显著正相关, 其为害程度随着气候变暖而增加。但是 Lehmann et al. (2020) 研究发现气候变暖显著降低了昆虫种群的发生动态, 表现

在幼虫发育历期延长及存活率降低等方面。例如气候变暖不利于蛱蝶科昆虫森林红眼蝶 *Erebia medusa* 的发育, 气候变暖导致其幼虫死亡率升高, 蛹重及成虫重量显著降低, 发育参数显著降低(Stuhldreher et al., 2014)。本研究结果显示, 转 Bt 基因棉花种植前, 山东省、河南省和河北省棉铃虫的为害指数随着温度升高而增加; 但是转 Bt 基因棉花种植后, 这 3 省棉铃虫的为害指数随着温度的升高而降低。表明随着转 Bt 基因棉花的种植, 棉铃虫的发生为害程度随着气候变暖而显著降低, 也就是说转 Bt 基因棉花的集约化种植显著改变了气候变暖对棉铃虫种群的影响。

本研究结果表明, 转 Bt 基因棉花种植前, 棉花的集约化种植和棉铃虫的为害指数并无相关性, 其原因可能与棉铃虫是多寄主作物害虫有关, 除了棉花, 其它多种作物如玉米、花生、大豆和蔬菜作物等也是棉铃虫的寄主, 可能使得棉花的集约化种植对棉铃虫发生并无显著影响。农业集约化种植可以直接为棉铃虫提供更多的粮食资源, 提高其承载能力, 削弱其密度依赖性的强度, 显著增加了棉铃虫的种群数量(Ouyang et al., 2014)。这与本研究结果一致, 即转 Bt 基因棉花种植后, 随着棉花集约化种植程度的提高, 棉铃虫的为害指数显著升高。原因可

能有以下2方面:首先,随着转Bt基因棉花的连年种植,棉铃虫对转Bt基因棉花的抗性逐年增加,对其表达的杀虫蛋白产生了较高的抗性,使得棉铃虫种群数量仍不断增加(Li et al., 2004)。其次,棉铃虫存在很多的捕食性和寄生性天敌,转Bt基因棉花可能会通过影响棉铃虫进而影响其天敌,导致天敌数量减少(郭建英等, 2008; 闫亮珍等, 2011),而且随着整个华北地区杀虫剂使用量持续增加,导致棉田天敌出现空白区,进而引起棉铃虫种群数量持续增加(苏丽等, 2003; 邓欣等, 2006)。

综上所述,影响棉铃虫消长的因素非常复杂,除气候变暖等自然因素影响外,人为因素也影响了棉铃虫的发生。转Bt基因棉花种植前,气候变暖显著影响棉铃虫的为害指数;转Bt基因棉花种植后,气候变暖以及人为因素的双重因子显著影响棉铃虫的为害指数,因此充分利用自然因素及人为因素对害虫的控制作用,以实现绿色可持续的虫害管理,保护人类的生存环境,是植物保护的总体战略目标。

### 参 考 文 献 (References)

- BATARY P, BALDI A, SAROSPATAKI M, KOHLER F, VERHULST J, KNOP E, HERZOG F, KLEIJN D. 2010. Effect of conservation management on bees and insect-pollinated grassland plant communities in three European countries. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 136(1/2): 35–39
- CHEN SD, HU BH. 2003. The plant protection of past fifty years in China. Beijing: China Agriculture Press, pp. 50–100 (in Chinese) [陈生斗, 胡伯海. 2003. 中国植物保护五十年. 北京: 中国农业出版社, pp. 50–100]
- DENG X, ZHAO TC, GAO BD, ZHANG YJ, SUN FZ. 2006. Advance on the biosafety assessment of insect-resistant transgenic cotton. *Acta Ecologica Sinica*, 26(12): 4244–4249 (in Chinese) [邓欣, 赵廷昌, 高必达, 张永军, 孙福在. 2006. 转基因抗虫棉生物安全评价研究进展. *生态学报*, 26(12): 4244–4249]
- DHILLON MK, SHARMA HC. 2008. Influence of temperature and *Helicoverpa armigera* food on survival and development of the parasitoid, *Camponotus chlorideae*. *Indian Journal of Plant Protection*, 36(2): 240–244
- EGLI L, MEYER C, SCHERBER C, KREFT H, TSCHARNTKE T. 2018. Winners and losers of national and global efforts to reconcile agricultural intensification and biodiversity conservation. *Global Change Biology*, 24(5): 2212–2228
- GABRIEL D, TSCHARNTKE T. 2007. Insect pollinated plants benefit from organic farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118(1/4): 43–48
- GAO YL, FENG HQ, WU KM. 2010. Regulation of the seasonal population patterns of *Helicoverpa armigera* moths by Bt cotton planting. *Transgenic Research*, 19(4): 557–562
- GUO JY, ZHOU HX, WAN FH, FAN ZN, DONG L. 2008. Impacts of transgenic Bt cotton planting history and cropping patterns on development and oviposition of *Propylaea japonica* Thunberg (Coleoptera: Coccinellidae). *Journal of Plant Protection*, 35(2): 137–142 (in Chinese) [郭建英, 周洪旭, 万方浩, 范中南, 董亮. 2008. Bt棉种植时期和作物布局方式对龟纹瓢虫生长发育和繁殖的影响. *植物保护学报*, 35(2): 137–142]
- GUO YY. 1998. Study on cotton bollworm. Beijing: China Agriculture Press, pp. 279–286 (in Chinese) [郭予元. 1998. 棉铃虫的研究. 北京: 中国农业出版社, pp. 279–286]
- HABEL JC, ULRICH W, BIBURGER N, SEIBOLD S, SCHMITT T. 2019. Agricultural intensification drives butterfly decline. *Insect Conservation and Diversity*, 12(4): 289–295
- HODAR JA, CASTTRO J, ZAMORA R. 2003. Pine processionary caterpillar *Thaumetopoea pityocampa* as a new threat for relict Mediterranean Scots pine forests under climatic warming. *Biological Conservation*, 110(1): 123–129
- HUANG J, LI J. 2015. Effects of climate change on overwintering pupae of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *International Journal of Biometeorology*, 59(7): 863–876
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Climate change 2014: synthesis report.//PACHAURI R, MEYER L. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK & New York, USA: Cambridge University Press, pp. 151
- JAMIESON MA, BURKLE LA, MANSON JS, RUNYON JB, TROWBRIDGE AM, ZIENTEK J. 2017. Global change effects on plant-insect interactions: the role of phytochemistry. *Current Opinion in Insect Science*, 23: 70–80
- LEHMANN P, AMMUNET T, BARTON M, BATTISTI A, EIGENBRODE SD, JEPSEN JU, KALINKAT G, NEUVONEN S, NIEMELA P, TERBLANCHE JS, et al. 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18(3): 141–150
- LI GP, WU KM, GOULD F, FENG HQ, HE Y, GUO YY. 2004. Frequency of Bt resistance genes in *Helicoverpa armigera* populations from the Yellow River cotton-farming region of China. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 112(2): 135–143
- LU ZZ, ZALUCKI MP, PERKINS LE, WANG DY, WU LL. 2013. Towards a resistance management strategy for *Helicoverpa armigera* in Bt-cotton in northwestern China: an assessment of potential refuge crops. *Journal of Pest Science*, 86(4): 695–703
- OUYANG F, HUI C, GE S, MEN XY, ZHAO ZH, SHI PJ, ZHANG YS, LI BL. 2014. Weakening density dependence from climate change and agricultural intensification triggers pest outbreaks: a 37-year observation of cotton bollworms. *Ecology and Evolution*, 4: 3362–3374
- POYRY J, LEINONEN R, SODERMAN G, NEMINEN M, HEIKKINEN RK, CARTER TR. 2011. Climate-induced increase of moth multivoltinism in boreal regions. *Global Ecology and Biogeography*

- phy, 20(2): 289–298
- ROBINET C, ROQUES A. 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5(2): 132–142
- RUI CH, FAN XL, DONG FS, GUO SD. 2002. Temporal and spatial dynamics of the resistance of transgenic cotton cultivars to *Helicoverpa armigera* (Hübner). *Acta Entomologica Sinica*, 45(5): 567–570 (in Chinese) [芮昌辉, 范贤林, 董丰收, 郭三堆. 2002. 不同转基因抗虫棉对棉铃虫抗虫性的时空动态. *昆虫学报*, 45(5): 567–570]
- STUHL DREHER G, HERMANN G, FARTMANN T. 2014. Cold-adapted species in a warming world: an explorative study on the impact of high winter temperatures on a continental butterfly. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 151(3): 270–279
- SU L, GE F, LIU XH. 2003. Effects of chemical insecticides on populations of insect pests and natural enemies in different cotton fields. *Acta Ecologica Sinica*, 23(12): 2631–2641 (in Chinese) [苏丽, 戈峰, 刘向辉. 2003. 化学杀虫剂对不同类棉田害虫7天敌种群的影响. *生态学报*, 23(12): 2631–2641]
- SUN YC, GUO HJ, GE F. 2017. Progress in research on the responses of insects to global climate change. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 54(4): 539–552 (in Chinese) [孙玉诚, 郭慧娟, 戈峰. 2017. 昆虫对全球气候变化的响应与适应性. *应用昆虫学报*, 54(4): 539–552]
- THIES C, HAENKE S, SCHERBER C, BENGTSSON J, BOMMARCO R, CLEMENT LW, CERYNGIER P, DENNIS C, EMMERSON M, GAGIC V, et al. 2011. The relationship between agricultural intensification and biological control: experimental tests across Europe. *Ecological Applications*, 21(6): 2187–2196
- WU KM, GUO, YY. 2005. The evolution of cotton pest management practices in China. *Annual Review of Entomology*, 50: 31–52
- WU KM, LU YH, FENG HQ, JIANG YY, ZHAO JZ. 2008. Suppression of cotton bollworm in multiple crops in China in areas with Bt toxin-containing cotton. *Science*, 321(5896): 1676–1678
- WU KM, XIAO YT. 2008. Transformation into insect-resistant genes for reduction of pesticides: environmental safety and risk management of transgenic insect-resistant cotton. *Human and Biosphere*, (6): 44–46 (in Chinese) [吴孔明, 肖玉涛. 2018. 转入抗虫基因减少农药使用: 转基因抗虫棉的环境安全和风险管控. *人与生物圈*, (6): 44–46]
- XU RQ, XU J, CHENG DX. 2001. Advances of transgenic insect-resistant cotton breeding in China. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 17(4): 53–56 (in Chinese) [徐荣旗, 徐俊, 程大新. 2001. 中国转基因抗虫棉育种进展. *中国农学通报*, 17(4): 53–56]
- YAN LZ, ZHAO CY, LIU XY, LÜ FC, GUAN X, LIU MH, LI JS. 2011. Influence and mechanism of transgenic crops on the food chain: plant-pest-predator. *Plant Protection*, 37(6): 27–31 (in Chinese) [闫亮珍, 赵彩云, 柳晓燕, 吕凤春, 关潇, 刘茂华, 李俊生. 2011. 转Bt基因作物对植物-害虫-天敌食物链的影响. *植物保护*, 37(6): 27–31]
- YOUNG OR. 2002. Can new institutions solve atmospheric problems: confronting acid rain, ozone depletion and climate change.// STEFFEN W, JÄGER J, CARSON DJ, BRADSHAW C. Challenges of a changing earth. Berlin, Heidelberg: Springer, pp. 87–91
- ZHANG DD, XIAO YT, CHEN WB, LU YH, WU KM. 2019. Field monitoring of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) Cry1Ac insecticidal protein resistance in China (2005–2017). *Pest Management Science*, 75(3): 753–759
- ZHANG R, WANG Y, MENG ZG, SUN GQ, GUO SD. 2007. Retrospect and prospect of research on Chinese transgenic insecticidal cotton. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 9(4): 32–42 (in Chinese) [张锐, 王远, 孟志刚, 孙国清, 郭三堆. 2007. 国产转基因抗虫棉研究回顾与展望. *中国农业科技导报*, 9(4): 32–42]
- ZHANG YJ, WU KM, GUO YY. 2001. On the spatio-temporal expression of the contents of Bt insecticidal protein and the resistance of Bt transgenic cotton to cotton bollworm. *Journal of Plant Protection*, 28(1): 1–6 (in Chinese) [张永军, 吴孔明, 郭予元. 2001. 转Bt基因棉花杀虫蛋白含的时空表达及对棉铃虫的毒杀效果. *植物保护学报*, 28(1): 1–6]
- ZHAO KJ, ZHAO JZ, LU MG, FAN XL. 2000. A systematic evaluation of the effects of Bt transgenic cotton on the growth and development of cotton bollworm. *Journal of Plant Protection*, 27(3): 205–209 (in Chinese) [赵奎军, 赵建周, 卢美光, 范贤林. 2000. 转基因抗虫棉花对棉铃虫生长发育影响的系统评价. *植物保护学报*, 27(3): 205–209]
- ZHAO ZH, CANG H, HE DH, LI BL. 2015. Effects of agricultural intensification on ability of natural enemies to control aphids. *Scientific Reports*, 5: 8024
- ZHAO ZH, SANDHU HS, OUYANG F, GE F. 2016. Landscape changes have greater effects than climate changes on six insect pests in China. *Science China Life Sciences*, 59(6): 627–633

(责任编辑:李美娟)