

寄主植物调控棉铃虫种群对气候变暖的不对称响应

崔洪莹¹ 门兴元¹ 赵紫华^{2*}

(1. 山东省农业科学院植物保护研究所, 济南 250100; 2. 中国农业大学植物保护学院植物生物安全系, 北京 100193)

摘要: 为明确全球气候变暖对不同寄主植物上棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 种群发生的影响, 通过收集2008—2019年全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区7种寄主植物(小麦、玉米、大豆、棉花、花生、蔬菜和其他粮食作物)上棉铃虫成灾面积及各地区平均温度数据, 采用单因素方差分析法及广义线性模型分析不同寄主植物上棉铃虫种群的发生程度。结果显示, 玉米、大豆、花生和蔬菜寄主植物上棉铃虫成灾面积显著增加, 棉花上棉铃虫成灾面积显著降低。玉米(全国范围、华北地区)、花生(全国范围、华中地区)及蔬菜(华东地区)上棉铃虫成灾面积随着温度距平的升高而显著增加; 但棉花上棉铃虫成灾面积随着温度距平的升高而显著降低。如全国范围内, 在玉米和花生上, 2014—2019年棉铃虫成灾面积均显著高于2008—2013年, 其增加比率分别为24.0%和34.3%; 在棉花上, 2014—2019年棉铃虫成灾面积显著低于2008—2013年, 其降低比率为62.0%。表明全球气候变暖显著增加了玉米、花生及蔬菜上棉铃虫成灾面积, 而棉花上棉铃虫成灾面积的降低主要受转Bt基因棉花种植的影响。

关键词: 气候变暖; 棉铃虫; 成灾面积; 寄主植物

The asymmetric responses of the cotton bollworm *Helicoverpa armigera* to global warming in different host crops

Cui Hongying¹ Men Xingyuan¹ Zhao Zihua^{2*}

(1. Institute of Plant Protection, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong Province, China;

2. Department of Plant Biosecurity, College of Plant Protection, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: To determine the effects of global warming on the population occurrence of the cotton bollworm, *Helicoverpa armigera*, in fields of different host plants, including wheat, corn, soybeans, cotton, peanuts, vegetables and other crops, the data of damage areas of *H. armigera* and average temperatures in the whole China, northern China, eastern China, northwestern China and central China were collected during 2008—2019. The damage areas of *H. armigera* in these areas were analyzed by using one-way ANOVA and generalized linear model to compare the population occurrence degrees of *H. armigera* in different host plants. The results showed that the damage areas of *H. armigera* on corn, soybean, peanut and vegetable host plants increased significantly, while the damage area of *H. armigera* in cotton fields decreased significantly. The temperature anomaly significantly increased the damage areas of *H. armigera* on corn (whole China, northern China), peanut (whole China, central China), and vegetable (eastern China). However, the damage area of *H. armigera* on cotton plants significantly decreased with increasing temperature anomaly. For example, in the whole China, the damage area of *H. armigera* in 2014—2019 was significantly higher than that in 2008—2013 on maize and peanut, and the increasing rates

基金项目: 国家自然科学基金(31770453)

* 通信作者 (Author for correspondence), E-mail: zhzhao@cau.edu.cn

收稿日期: 2021-07-04

were 24.0% and 34.3%, respectively. The damage area of *H. armigera* in 2014—2019 was significantly lower than that in 2008—2013 on cotton (reduced by 62.0%). It indicated that global warming significantly increased the damage area of *H. armigera* on corn, peanut and vegetable crops, while the decrease of *H. armigera* in cotton fields was mainly affected by transgenic Bt cotton planting.

Key words: global warming; *Helicoverpa armigera*; damage area; host plant

全球气候变化是当今社会讨论最为激烈的话题之一,关系到全世界乃至全人类的生存与发展。随着全球气候的变暖,环境温度随之升高,给人类的生活、生产和健康带来了许多负面影响,已成为国际上最关注的环境问题(Landman, 2010)。在过去的100年间,全球平均气温升高 $(0.6\pm 0.2)^{\circ}\text{C}$,根据有关报道,到21世纪末,全球平均气温将增加 $1.4\sim 5.8^{\circ}\text{C}$ (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014)。

农作物虫害的发生发展除了受其自身生物学特性的影响外,还受到农作物品种、耕作栽培制度、施肥和灌溉水平等条件的制约,尤其受气候变暖的影响较大(张强等, 2008; Lehmann et al., 2020)。气候变化对昆虫生长发育的直接影响主要体现在温度升高对昆虫的发育历期、越冬存活率、种群增长率、世代数、繁殖力、代谢速率等生命活动和行为活动方面的影响,且温度升高也是影响鳞翅目等昆虫生长发育、繁殖及诸多生物学特性的最主要因子之一(Yoshio & Ishii, 2004; Robinet & Roques, 2010)。如温度升高导致棉铃虫 *Helicoverpa armigera* 发育速度加快,存活率和繁殖力提高,同时影响了其滞育率、种群数量和越冬基数,导致棉铃虫越冬界限北移(周志香等, 2000; Akbar et al., 2016)。

棉铃虫属鳞翅目夜蛾科,是一种世界范围内的重大农业害虫,分布范围已涉及到至少145个国家和地区(非洲51个、亚洲42个、欧洲29个、大洋洲20个、南美洲3个),且其发生范围仍呈扩大趋势(Jones et al., 2019)。目前,棉铃虫在我国各省均有发生,是一种广食性害虫,取食植物达30多科200多种,不仅为害棉花、玉米、高粱、小麦及豆类等较常见的种植面积较大的农作物,甚至番茄及向日葵等非主要作物也在其取食范围之内,给我国农业生产造成了巨大的损失(洪晓月和丁锦华, 2017)。为了有效控制棉铃虫,我国于1997年开始推广种植转Bt基因棉花,截止到2018年转Bt基因棉花的种植面积达到 $2.80\times 10^6\text{ hm}^2$,尤其在北方棉区有95%以上的棉花为转Bt基因棉花(Wu et al., 2008; 崔洪莹和赵紫华, 2020)。但是,随着转Bt基因棉花的种植,在全球气候变暖的情况下,棉铃虫在不同寄主植物

上的发生分布产生了怎样的改变尚不清楚。因此,本研究收集2008—2019年全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区的7种寄主植物(小麦、玉米、大豆、棉花、花生、蔬菜和其他粮食作物)上棉铃虫成灾面积及各地区平均温度数据,采用单因素方差分析法及广义线性模型进行分析,明确全球气候变暖对不同寄主植物上棉铃虫种群发生的影响,以期对棉铃虫的预测预报及综合治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

棉铃虫成灾面积数据:收集2008—2019年全国范围、华北地区(北京市、天津市、河北省、山西省、内蒙古自治区)、华东地区(山东省、江苏省、江西省、浙江省、安徽省、福建省)、西北地区(陕西省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区、甘肃省)及华中地区(河南省、湖北省、湖南省)小麦、玉米、大豆、棉花、花生、蔬菜及其他粮食作物7种寄主植物上棉铃虫成灾面积数据,此数据来自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2008—2019年每月平均温度数据,在不同地区选择具有代表性的省份包括山东省、河南省、河北省及陕西省的数据,同时每个省选取多个不同站点。其中,山东省包括惠民县、成山头、济南市、潍坊市、菏泽市、定陶县及兖州区7个站点;河南省包括安阳市、郑州市、驻马店市及信阳市4个站点;河北省包括怀来县、承德市、乐亭县、沧州市及泊头市5个站点;陕西省包括榆林市、汉中市及泾河3个站点;全国地区的温度数据根据选择的4个代表性省份温度数据计算其平均值。

1.2 方法

1.2.1 棉铃虫成灾面积距平的计算方法

棉铃虫成灾面积距平是指连续时间内全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区的小麦、玉米、大豆、棉花、花生、蔬菜及其他粮食作物7种寄主植物上棉铃虫成灾面积与棉铃虫平均成灾面积

的差异。 $\Delta A_i = A - \bar{A}$, 其中, ΔA_i 表示棉铃虫成灾面积距平, A 表示不同地区不同寄主植物上每年的棉铃虫成灾面积, $\bar{A}$ 表示 2008—2019 年不同地区不同寄主植物上的棉铃虫平均成灾面积。并且将棉铃虫的成灾面积依据温度距平的差异划分为 2 个阶段, 即 2008—2013 年和 2014—2019 年。

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 (Deutsch et al., 2018)。首先对山东、河南、河北及陕西 4 个省多个站点的平均温度进行校正, 计算温度距平 $\Delta T_i = T - \bar{T}$, 其中, T 表示每年的平均温度, $\bar{T}$ 表示 2008—2019 年的平均温度, 依据计算得到的温度距平差异将 2008—2019 年划分为 2008—2013 年和 2014—2019 年 2 个阶段。

1.2.3 棉铃虫成灾面积距平与温度距平间关系的分析

本研究中以 2013 年为节点将研究周期分为 2008—2013 年和 2014—2019 年 2 个阶段, 分析温度对不同地区不同寄主植物上棉铃虫成灾面积的影响。采用单因素方差分析法比较 2008—2013 年和 2014—2019 年不同地区间和不同寄主作物上棉铃虫成灾面积的差异; 采用广义线性模型分析温度距平对不同地区间和不同寄主植物上棉铃虫成灾面积的影响, 以此阐明棉铃虫成灾面积与环境因子温度之间的关系。

1.3 数据分析

利用 SPSS 13.0 软件对棉铃虫成灾面积进行单因素方差分析并进行差异显著性检验; 采用广义线性模型分析温度距平对棉铃虫成灾面积的影响, 并进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同寄主植物上不同地区棉铃虫的成灾面积

2018—2019 年, 小麦上棉铃虫在华北地区发生较重。鉴于小麦是我国三大作物之一, 在此仅列出棉铃虫在其上的成灾面积, 但因只有 2 年的数据, 未对其进行统计分析 (图 1-A)。

2011—2019 年, 玉米上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区发生最重的年份分别为 2017 年、2017 年、2019 年、2017 年及 2013 年, 且各地区玉米上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2011 年分别显著增加了 65.6%、61.8%、118.8%、25.6% 及 45.7% (图 1-B)。

2011—2019 年, 大豆上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区发生最重的年份分别为 2019 年、2018 年、2019 年、2012 年及 2018 年。全国范围、华东地区及华中地区大豆上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2011 年分别显著增加了 1.5 倍、3.0 倍及 2.0 倍 (图 1-C)。

2008—2019 年, 棉花上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区呈现逐渐下降的趋势, 发生最重的年份均为 2008 年, 且各地区棉花上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2008 年分别显著降低了 81.8%、79.3%、86.8%、64.6% 及 90.7% (图 1-D)。

2008—2019 年, 花生上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区发生最重的年份分别为 2017 年、2010 年、2013 年、2012 年及 2017 年。全国范围、华北地区、华东地区及华中地区花生上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2008 年分别显著增加了 115.5%、51.5%、56.2% 及 162.5% (图 1-E)。

2008—2019 年, 蔬菜上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区发生最重的年份分别为 2014 年、2010 年、2017 年、2012 年及 2012 年。全国范围、华北地区、华东地区及西北地区蔬菜上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2008 年分别显著增加了 39.5%、23.8%、90.1% 及 65.7% (图 1-F)。

2011—2019 年, 其他粮食作物上棉铃虫成灾面积在全国范围、华北地区、华东地区、西北地区及华中地区发生最重的年份分别为 2012 年、2017 年、2012 年、2019 年及 2013 年。全国范围、华北地区、华东地区及西北地区其他粮食作物上棉铃虫成灾面积在 2019 年较 2011 年分别显著增加了 21.2%、30.9%、42.5% 及 175.0%。其中华中地区其他粮食作物上棉铃虫成灾面积在 2013 年达到高峰后呈现逐年下降的趋势 (图 1-G)。

2.2 温度距平对不同地区寄主上棉铃虫成灾面积的影响

在全国范围, 温度距平升高显著影响了玉米、棉花、花生及其他粮食作物上棉铃虫成灾面积。在玉米和花生上, 2014—2019 年棉铃虫成灾面积均显著高于 2008—2013 年, 其增加比率分别为 24.0% ($F=6.26, P<0.05$) 和 34.3% ($F=6.83, P<0.05$); 在棉花和其他粮食作物寄主植物上, 2014—2019 年棉铃虫成灾面积均显著低于 2008—2013 年, 其降低比率分

别为 62.0% ($F=51.29, P<0.001$) 和 33.0% ($F=8.77, P<0.05$, 图 2-A)。

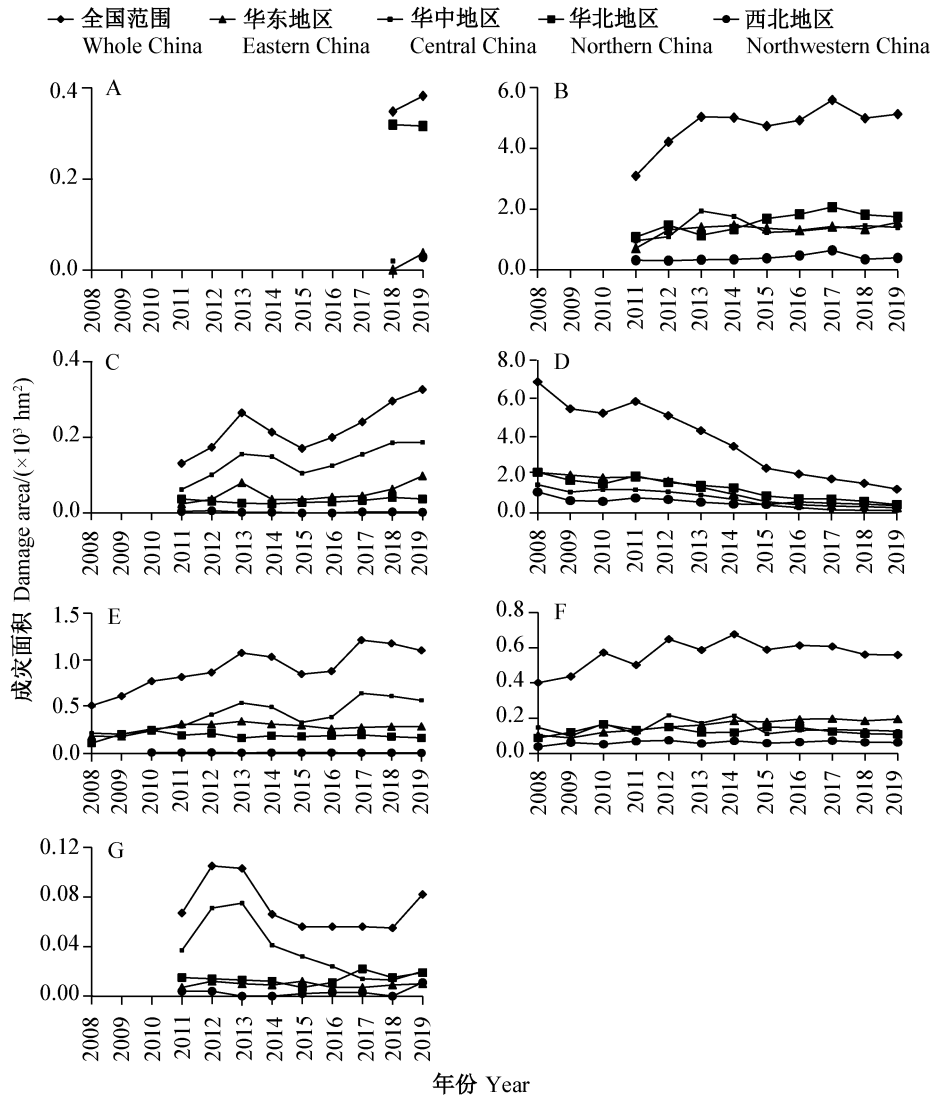


图1 2008—2019年间不同地区小麦(A)、玉米(B)、大豆(C)、棉花(D)、花生(E)、蔬菜(F)及其他粮食作物(G)上棉铃虫成灾面积

Fig. 1 Damage areas of *Helicoverpa armigera* in different regions on wheat (A), corn (B), soybean (C), cotton (D), peanut (E), vegetable (F) and other host plants (G) during 2008—2019

在华北地区,温度距平升高显著影响了玉米和棉花上棉铃虫成灾面积。在玉米上,2014—2019年棉铃虫成灾面积显著高于2008—2013年,其增加比率为42.4% ($F=10.32, P<0.05$);在棉花上,2014—2019年棉铃虫成灾面积显著低于2008—2013年,其降低比率为54.2% ($F=33.41, P<0.001$,图 2-B)。

在华东地区,温度距平升高显著影响了棉花和蔬菜上棉铃虫成灾面积。在蔬菜上,2014—2019年棉铃虫成灾面积显著高于2008—2013年,其增加比率为50.5% ($F=29.56, P<0.001$);在棉花上,2014—2019年棉铃虫成灾面积显著低于2008—2013年,其降低比率为72.5% ($F=72.80, P<0.001$,图 2-C)。

在西北地区,温度距平升高显著降低了棉花上棉铃虫成灾面积,其降低比率为35.3% ($F=9.80, P<0.05$,图 2-D)。

在华中地区,温度距平升高显著影响了棉花、花生及其他粮食作物上棉铃虫成灾面积。在花生上,2014—2019年棉铃虫成灾面积显著高于2008—2013年,其增加比率为57.9% ($F=6.28, P<0.05$);在棉花和其他粮食作物上,2014—2019年棉铃虫成灾面积均显著低于2008—2013年,其降低比率分别为73.8% ($F=54.49, P<0.001$)和60.5% ($F=12.59, P<0.01$,图 2-E)。

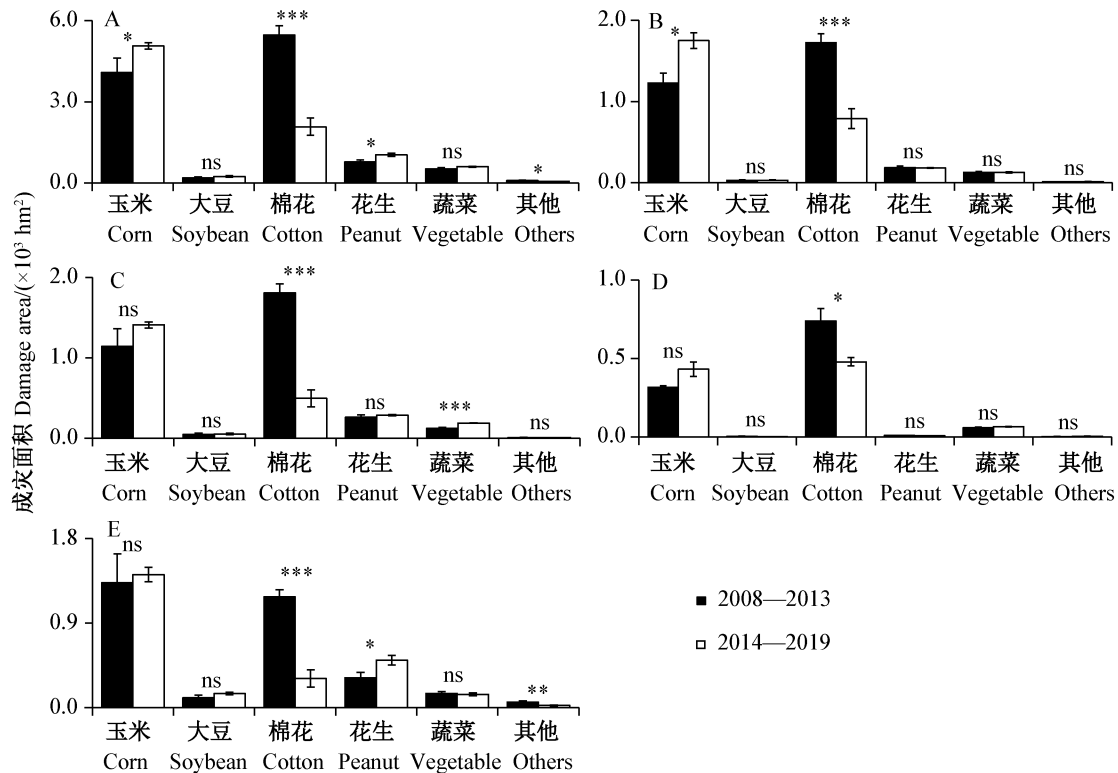


图2 温度距平在全国范围(A)、华北地区(B)、华东地区(C)、西北地区(D)及华中地区(E)对不同寄主植物上棉铃虫成灾面积的影响

Fig. 2 Effects of temperature anomaly on the damage areas of *Helicoverpa armigera* in the whole China (A), northern China (B), eastern China (C), northwestern China (D) and central China (E) on different host plants

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

2.3 温度距平与棉铃虫成灾面积距平的关系

棉铃虫成灾面积距平与温度距平的广义线性模型拟合结果表明,在全国范围内,玉米、大豆和花生上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著增加,其回归方程式分别为 $y=2\,000.60x-206.84$ ($r=0.877$, $P=0.002$)、 $y=125.82x-13.01$ ($r=0.621$, $P=0.047$) 及 $y=485.19x-0.21$ ($r=0.690$, $P=0.018$, 图3-A、B、D);而棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,其回归方程式为 $y=-5\,462.80x+2.39$ ($r=0.870$, $P=0.001$, 图3-C)。

在华北地区,玉米上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著增加,其回归方程式为 $y=529.14x-45.02$ ($r=0.589$, $P=0.049$, 图3-E);棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,其回归方程式为 $y=-953.42x+0.01$ ($r=0.729$, $P=0.034$, 图3-F)。

在华东地区,玉米和蔬菜上棉铃虫成灾面积距

平随着温度距平的逐渐升高而显著增加,其回归方程式为 $y=316.70x-47.01$ ($r=0.644$, $P=0.047$) 及 $y=61.82x-0.01$ ($r=0.727$, $P=0.007$, 图3-G、I);棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,其回归方程式为 $y=-1\,349.90x+0.01$ ($r=0.832$, $P=0.001$, 图3-H)。

在西北地区,棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,其回归方程式为 $y=-437.51x-0.01$ ($r=0.650$, $P=0.002$, 图3-J)。

在华中地区,玉米、大豆及花生上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著增加,其回归方程式分别为 $y=764.08x-78.03$ ($r=0.638$, $P=0.047$)、 $y=142.05x-14.51$ ($r=0.876$, $P<0.001$) 及 $y=520.41x+0.01$ ($r=0.838$, $P=0.001$, 图3-K、L、N);棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,其回归方程式为 $y=-1\,623.00x+0.01$ ($r=0.823$, $P=0.001$, 图3-M)。

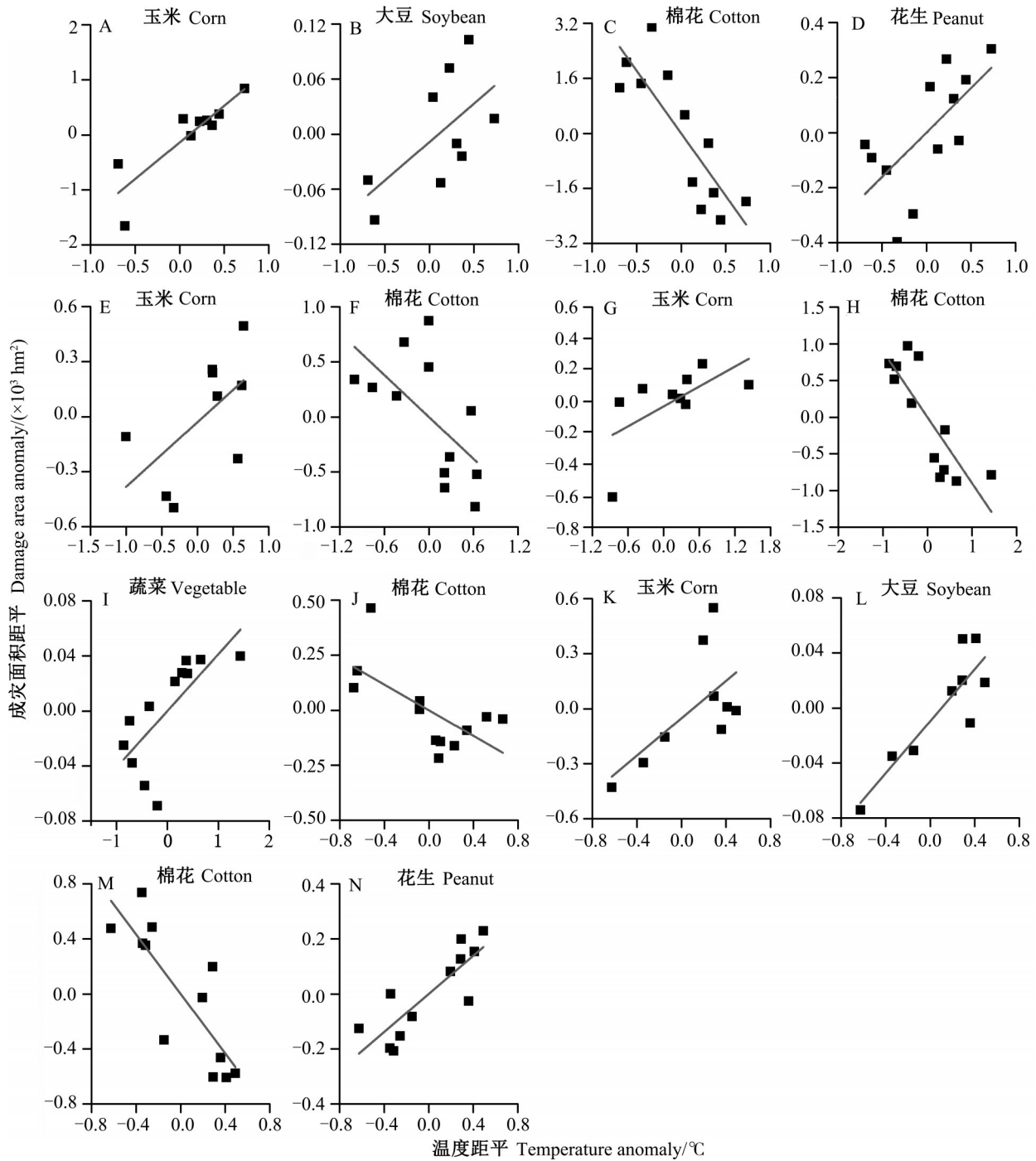


图3 全国范围(A~D)、华北地区(E~F)、华东地区(G~I)、西北地区(J)和华中地区(K~N)
棉铃虫成灾面积距平与温度距平之间的关系

Fig. 3 The relationships between the damage area anomaly of *Helicoverpa armigera* and the temperature anomaly in the whole China (A~D), northern China (E~F), eastern China (G~I), northwestern China (J), and central China (K~N)

3 讨论

温度被认为是影响昆虫分布、定殖、存活、丰度、行为、适应度和一般生活史的主要非生物因素(Bale et al., 2002)。温度升高会减少昆虫完成生命周期所需时间,导致昆虫的加速发育及世代增加,从而给作

物生产带来更大的损失(Mathukumalli et al., 2016)。例如,温度升高显著增加了棉铃虫雄性和雌性个体的存活率及种群数量(Mironidis & Savopoulou-Soultani, 2010)。较高的温度导致草地上鳞翅目幼虫丰度高峰发生期提前1个月,并且显著增加了幼虫的丰度(de Sassi et al., 2012)。本研究同样发现,

温度距平升高显著增加了玉米(全国范围、华北地区)、花生(全国范围、华中地区)及蔬菜(华东地区)上棉铃虫成灾面积。

本研究结果表明,玉米、大豆、花生及蔬菜等寄主植物上棉铃虫成灾面积呈现逐渐上升的趋势,而棉花上棉铃虫成灾面积呈现下降的趋势,并且棉花上棉铃虫成灾面积距平随着温度距平的逐渐升高而显著降低,这可能主要是由于转Bt基因棉花的种植导致棉花上棉铃虫为害程度降低,而非全球气候变暖所致。Bt基因具有能够表达产生杀死害虫的毒蛋白,可以有效控制棉铃虫在棉田猖獗为害(Li et al., 2004)。

综上所述,转Bt基因棉花的大面积推广种植显著降低了棉花上棉铃虫成灾面积;对于其他寄主植物如玉米、花生及蔬菜等,全球气候变暖显著增加了其上棉铃虫成灾面积。因此根据不同影响因素对不同寄主植物上棉铃虫采取不同的防治措施更加切实可行,从而实现棉铃虫的绿色、可持续防控。

参 考 文 献 (References)

- Akbar SM, Pavani T, Nagaraja T, Sharma HC. 2016. Influence of CO₂ and temperature on metabolism and development of *Helicoverpa armigera* (Noctuidae: Lepidoptera). *Environmental Entomology*, 45(1): 229–236
- Bale JS, Masters GJ, Hodkinson ID, Awmack C, Bezemer TM, Brown VK, Butterfield J, Buse A, Coulson JC, Farrar J, et al. 2002. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology*, 8(1): 1–16
- Cui HY, Zhao ZH. 2020. Asymmetrical responses of cotton bollworm *Helicoverpa armigera* to global warming and agricultural intensification in Bt cotton fields. *Journal of Plant Protection*, 47(4): 912–919 (in Chinese) [崔洪莹, 赵紫华. 2020. 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. *植物保护学报*, 47(4): 912–919]
- de Sassi C, Lewis OT, Tylianakis JM. 2012. Plant-mediated and nonadditive effects of two global change drivers on an insect herbivore community. *Ecology*, 93(8): 1892–1901
- Deutsch CA, Tewksbury JJ, Tigchelaar M, Battisti DS, Merrill SC, Huey RB, Naylor RL. 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361(6405): 916–919
- Hong XY, Ding JH. 2017. *Agricultural entomology*. 3rd edition. Beijing: China Agriculture Press (in Chinese) [洪晓月, 丁锦华. 2017. *农业昆虫学*. 第3版. 北京: 中国农业出版社]
- 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, New York: Cambridge University Press, pp. 151
- Jones CM, Parry H, Tay WT, Reynolds DR, Chapman JW. 2019. Movement ecology of pest *Helicoverpa*: implications for ongoing spread. *Annual Review of Entomology*, 64: 277–295
- Landman W. 2010. Climate change 2007: the physical science basis. *South African Geographical Journal*, 92(1): 86–87
- Lehmann P, Ammunét T, Barton M, Battisti A, Eigenbrode SD, Jepsen JU, Kalinkat G, Neuvonen S, Niemelä 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 YZ, 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
- Mathukumalli SR, Dammu M, Sengottaiyan V, Ongolu S, Biradar AK, Kondru VR, Karlapudi S, Bellapukonda MKR, Chitiprolu RRA, Cherukumalli SR. 2016. Prediction of *Helicoverpa armigera* Hübner on pigeonpea during future climate change periods using MarkSim multimodel data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228/229: 130–138
- Mironidis GK, Savopoulou-Soultani M. 2010. Effects of heat shock on survival and reproduction of *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) adults. *Journal of Thermal Biology*, 35(2): 59–69
- Robinet C, Roques A. 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5(2): 132–142
- 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
- Yoshio M, Ishii M. 2004. Photoperiod effects on pupal development in two tropical *Papilio* butterflies (Lepidoptera, Papilionidae). *Lepidoptera Science*, 55(4): 275–279
- Zhang Q, Deng ZY, Zhao YD, Qiao J. 2008. The impacts of global climatic change on the agriculture in Northwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 28(3): 1210–1218 (in Chinese) [张强, 邓振镭, 赵映东, 乔娟. 2008. 全球气候变化对我国西北地区农业的影响. *生态学报*, 28(3): 1210–1218]
- Zhou ZX, Wang ZW, Liu WP, Fan YL, Liu XY, Li YG, Guo ZX, Ma CJ. 2000. Study on synthetic factors of cotton bollworm outbreak and the forecast model. *Agricultural Meteorology*, 21(4): 38–43 (in Chinese) [周志香, 王志伟, 刘文平, 范永玲, 刘秀英, 李跃光, 郭转仙, 马苍江. 2000. 棉铃虫综合因素预报模型研究. *中国农业气象*, 21(4): 38–43]

(责任编辑:李美娟)