论 文

夏玉米和亚洲玉米螟物候同步性研究

王姝心^{1†}, 郭亚会^{1†}, 付永硕^{1*}, 刘玉梅^{2*}

1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 菏泽学院农业与生物工程学院, 菏泽 274015

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: yfu@bnu.edu.cn; liuyumei02@caas.cn

收稿日期: 2020-11-08; 接受日期: 2021-03-06; 网络版发表日期: 2021-04-06

国家杰出青年基金(批准号: 42025101)、国家自然科学基金(批准号: 31770516)、高等学校学科创新引智计划(批准号: B18006)和中央高校基础研究经费(2018EYT05)资助

摘要 玉米是我国主要粮食作物之一, 其生长和产量受到气候变化及病虫害的重要影响. 物候同步性指不同物候事件的匹配程度, 其作为表征物种间相互作用的一个重要指标, 对于指导农业生产具有非常重要的意义. 在自然生态系统中, 物种间物候同步性的变化可以由两个机制共同解释. 一方面, 不同物种的生长发育速率对环境因素的响应具有差异; 另一方面, 物种为更好地适应同步性变化后的环境而产生进化. 夏玉米生长发育物候事件与亚洲玉米螟间的物候同步性关系, 尤其物候同步性对气候变化的响应, 目前研究较少. 基于1995~2012年间菏泽市三站点的夏玉米物候期、亚洲玉米螟成虫高峰期以及气象数据, 本文系统研究了玉米物候和玉米螟物候的同步性关系. 结果发现, 夏玉米物候具有遗留效应, 夏玉米播种期影响了拔节期、抽雄期, 进而导致夏玉米拔节期、抽雄期和亚洲玉米螟成虫高峰期间的物候同步性呈现出非线性的变化. 这些结果表明, 人为控制的播种期变化很大程度上改变了夏玉米生长发育过程, 进而影响玉米螟发生时间和种群数量, 最终影响夏玉米的产量. 本研究结果对于理解夏玉米物候的变化机制及其与玉米螟物候的同步性关系, 防治玉米虫害, 提高玉米产量, 积极应对气候变化具有非常重要的意义.

关键词 物候同步性, 人为因素, 气候变化, 夏玉米, 亚洲玉米螟

以全球变暖为特征的气候变化正逐渐对人类赖以生存的农业生态系统产生严重的影响. 玉米是世界三大粮食作物之一^[1], 在1980~2008年间, 气候变暖及降雨量的变化使得全球的玉米产量减少了3.8%^[2]. 另外, 全球变暖也通过加快害虫的生长发育速率和增加种群数量, 造成玉米产量损失^[3]. 深入了解气候变化对玉米生长、害虫发生规律以及两者之间的相互作用产生的

影响, 对于理解和预测气候变化对玉米产量的影响, 积极应对气候变化, 减少气候变化带来的负面影响具有重要意义.

植物物候是植物具有明显变化的发育现象的日期^[4], 被广泛用于研究气候变化对植物生长发育的影响. 控制实验发现, 玉米的物候受水分^[5,6]、光周期^[7,8]、温度^[9]等因素的影响, 另外, 中国和巴基斯坦

引用格式: 王姝心, 郭亚会, 付永硕, 等. 夏玉米和亚洲玉米螟物候同步性研究. 中国科学: 生命科学, 2021, 51: 462–471
Wang S X, Guo Y H, Fu Y S, et al. Phenological synchrony between summer maize and the Asian corn borer (in Chinese). Sci Sin Vitae, 2021, 51: 462–471, doi: 10.1360/SSV-2020-0378

的观测数据表明,自1980年以来,玉米物候主要受温度、人为控制的播种期、品种更替的影响^[10-12].在中国各气候区的站点中,温度与玉米的抽穗期、成熟期多数具有显著的负相关关系,气候变暖使得玉米物候期提前^[10].控温实验也发现了类似的结论,在最低温阈值至最适生长温度区间内,出苗后达到某一物候期的时间会随着温度的升高而缩短^[9],这是由于玉米各个生长发育阶段都需要一定量的积温,在最适温度之前,温度升高对积温贡献变大,使得玉米可以在更短的时间内获得足够的积温完成生长发育^[13],从而导致物候期提前.品种更替和人为控制的播种期对玉米物候也产生极大影响,Tao等人^[10]在全国各玉米带中利用积温需求特征代表不同玉米品种,发现积温需求更高的品种多数会使得抽穗期和成熟期延迟.但也有研究表明,温度升高也会使得同一玉米品种所需积温增大,从而难以区分品种变化和增温对物候影响的相对贡献大小,进而使品种变化的影响被高估^[14].1981~2010年间中国北部五个站点的数据表明,人为提前玉米播种期使得开花期和成熟期也提前^[11].

亚洲玉米螟是玉米的主要害虫之一,可在玉米植株上生存两代.玉米螟幼虫可以取食全生育期的玉米植株,初孵幼虫主要取食玉米的心叶、雄穗、花丝,而高龄幼虫则可钻入茎或穗轴中取食危害玉米^[15].目前,昆虫受增温的影响新陈代谢速度更快,从而导致其发育期缩短^[16,17]、世代数增加^[18],并因此改变了昆虫所处寄主植物生长阶段和食物的质量^[19].玉米和玉米螟间存在紧密的联系,玉米物候可以影响玉米螟的生长发育和繁殖行为,比如,当玉米螟幼虫食用玉米生长发育过程中的不同组织器官时,幼虫的发育速率和存活率都有差异^[20],而成虫则会倾向于选择特定物候期的玉米产卵^[21].同时,玉米螟的发生时间反过来也会影响玉米的产量,幼虫在心叶末期、心叶中期危害玉米比在灌浆期所导致的减产更严重^[22].

本文中物候同步性利用具有相互作用的夏玉米和亚洲玉米螟间的物候时间间隔表示^[23].植食昆虫和植物间物候同步性越高,两者的物候事件发生间隔越小.在自然生态系统中,物候同步性的改变,可以由表型可塑性以及进化两方面共同解释.一方面,动物及植物都具有针对环境的变化而改变自身表型的能力^[24],但两个不同物种的物候可能对不同的气象因素有响应^[25],

即使两者响应相同的气象因素,所处时段和对该气象因素的敏感性也可能具有差异^[26,27].另一方面,对于某物种来说,其根本目的是生存,如果当前所处的不是其生长发育最适宜的环境,则其物候可能通过自然选择作用向适合度更高的时间区间进化^[28].比如,由于英国大山雀产卵期的适合度在食物高峰之前的某一时间达到最大,其后代的产卵期可能向最适宜的时间逐渐进化^[29].在加利福尼亚中部的海湾跳棋斑蝴蝶和一年生植物的相互关系中,虽然植物的各个发育阶段对昆虫来说都是可食用的,但蝴蝶对植物生长旺盛的季节预测失败,使得后代面临食物匮乏的危险,这就需要其在繁殖率和存活率之间进行取舍,而趋向于选择对存活最有利的物候同步性^[28].在森林生态系统中,物候同步性的研究已较为丰富^[23,30],农业生态系统具有其自身的特点,不仅受到自然环境的作用,而且在很大程度上受到人为管理的影响^[30],关于夏玉米和亚洲玉米螟间的物候同步性变化及驱动因素的研究仍然不足.

本文使用1995~2012年间菏泽市三个站点的夏玉米物候期、亚洲玉米螟成虫高峰期和气象数据,以期对夏玉米物候、亚洲玉米螟成虫高峰期以及两者间物候同步性的变化趋势进行分析,并利用气候变化、人为管理措施、物候的遗留效应和夏玉米与亚洲玉米螟间相互作用对变化趋势进行综合解释.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究站点位于山东省菏泽市,包括成武(34°57'N, 115°53'E)、定陶(35°05'N, 115°31'E)、菏泽(35°15'N, 115°25'E)三个站点(图1).三站点最远相距54.0 km,最近相距20.6 km.菏泽市处于华北平原地区,属温带季风性气候,年均温14.1℃,年降雨量659.8 mm,年日照时数2381 h,海拔37~68 m.作为中国的玉米主产区,该地区采用了冬小麦-夏玉米轮作的种植方式^[10],冬小麦的生长季一般为第一年10月至次年6月,夏玉米的生长季为6~9月,夏玉米生育期间受到亚洲玉米螟的严重危害,可观测到一代和二代亚洲玉米螟成虫.

1.2 数据源

研究数据包括1995~2012年站点的气象数据、夏

图1 华北平原夏玉米分布区域以及3个研究站点位置

Figure 1 Distribution area of summer maize in North China Plain and locations of the three study sites

玉米物候数据和亚洲玉米螟成虫量观测数据。其中, 定陶站的气象数据和菏泽站的夏玉米物候数据均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。气象数据包括逐日的平均温度、日照时数、降雨量、相对湿度。夏玉米物候数据包括播种期、出苗期、拔节期、抽雄期和乳熟期, 这些物候期的观测由站点专业人员严格按照统一的规范进行^[31]。亚洲玉米螟成虫逐日黑光灯诱捕量数据由成武站观测并提供。一代和二代成虫高峰期的定义为一、二代成虫黑光灯诱捕量最多的日期。如图2所示, 亚洲玉米螟的一代成虫高峰大多发生在夏玉米拔节期和抽雄期之间, 二代成虫高峰大多发生在抽雄期和乳熟期之间。

1.3 分析方法

利用最小二乘一元线性和二元非线性回归对1995~2012年夏玉米物候期和亚洲玉米螟成虫高峰期的变化趋势进行拟合。另外, 计算夏玉米出苗期至拔节

期、出苗期至抽雄期、出苗期至乳熟期、拔节期至抽雄期、拔节期至乳熟期、抽雄期至乳熟期间的平均温度、平均降雨量、平均日照时数, 以及亚洲玉米螟成虫高峰期发生前20, 40, 60天内的平均温度、平均降雨量、平均日照时数、平均相对湿度, 计算出各时段气象因素的线性变化趋势以及多年平均值。

利用皮尔森偏相关分析分别得到夏玉米各生育期内气象因素、相关物候期和夏玉米物候期的偏相关系数, 以及成虫高峰期前固定时长内的气象因素、最接近的夏玉米物候期和一、二代成虫高峰期的偏相关系数。

本文中夏玉米和亚洲玉米螟间的物候同步性以一、二代成虫高峰期和夏玉米物候期之间的天数差表示, 天数差的绝对值越大, 表示两者间物候同步性越低^[23]。由此拟合出1995~2012年间一代成虫高峰期-拔节期(成虫高峰期和拔节期间天数差)、一代成虫高峰期-抽雄期、二代成虫高峰期-抽雄期、二代成虫高峰

图 2 1995~2012年夏玉米出苗期、拔节期、抽雄期、乳熟期和亚洲玉米螟一、二代成虫高峰期的年积日. 箱形图中部的实线表示年积日中位数, 箱形顶部和底部分别表示75和25百分位数, 上下两虚线顶端表示最大、最小值, 加号表示超过1.5倍四分位距的异常值

Figure 2 Day of year (DOY) of the seedling date, jointing date, tasseling date, and milking date of summer maize and the first- and second-generation adult peaks of the Asian corn borer from 1995 to 2012. The solid line in the middle of the boxplot is the median of DOY. The top and bottom of the box are the 25th and 75th percentiles, respectively. The top of the upper and lower dashed lines represent the maximum and minimum values, and the plus signs are outliers exceeding 1.5 times the interquartile range

期-乳熟期的线性和非线性变化趋势.

2 结果

2.1 夏玉米物候和亚洲玉米螟成虫高峰期变化趋势

如图3所示, 1995~2012年间夏玉米拔节期、抽雄期、乳熟期线性变化趋势不显著($P>0.05$), 但拔节期和抽雄期具有显著的二次非线性变化趋势($y=0.128x^2-513x+5.14\times10^5$, $r^2=0.52$, $P<0.01$; $y=0.106x^2-423x+4.24\times10^5$, $r^2=0.31$, $P<0.05$), 物候期呈现出先提前后延迟的变化. 亚洲玉米螟的一代成虫高峰显著延迟($r^2=0.27$, $P<0.05$), 变化率为0.28 天/年, 但二代成虫高峰的提前趋势不显著($P=0.30$).

2.2 气候变化等因素与夏玉米物候期、亚洲玉米螟成虫高峰期的偏相关关系

夏玉米各个物候期之间大多呈显著正相关关系.

其中, 夏玉米出苗期与拔节期呈显著正相关($r=0.95$, $P<0.05$), 拔节期与抽雄期呈显著正相关($r=0.93$, $P<0.05$), 抽雄期与乳熟期呈显著正相关($r=0.87$, $P<0.05$)(图4). 拔节期、抽雄期和气象因素的偏相关关系并不显著($P>0.05$), 各夏玉米物候期和平均温度都具有负相关关系, 但只有乳熟期和抽雄期至乳熟期内的平均温度的负相关关系显著($r=-0.68$, $P<0.05$). 在夏玉米的各个生育期内, 温度和日照时数大多呈现减少的变化趋势, 降雨量的变化趋势不一致, 且总体上这些气象因素变化并不显著(图5).

亚洲玉米螟一代成虫高峰期和夏玉米拔节期、抽雄期相关性不显著, 二代成虫高峰期和抽雄期、乳熟期有较高相关性但并不显著(图6). 一代成虫高峰期和降雨量有较大负相关关系, 和相对湿度有较大正相关关系, 但并不显著. 二代成虫高峰期和高峰前20天的平均相对湿度、平均日照时数均呈显著正相关关系(图6). 成虫高峰期前相对湿度呈现增大的变化趋势, 日照时数呈现减小的变化趋势, 但四个气象因素的变

图3 1995~2012年间夏玉米拔节期、抽雄期、乳熟期和亚洲玉米螟一、二代成虫高峰期变化趋势

Figure 3 Trend of the jointing dates, tasseling dates, milking dates of summer maize, and the first- and second-generation adult peaks of the Asian corn borer from 1995 to 2012

化趋势均不显著(图7).

2.3 夏玉米和亚洲玉米螟间物候同步性的变化趋势

在1995~2012年间一代成虫高峰与夏玉米拔节期、一代成虫高峰与抽雄期间的物候同步性均呈二次非线性变化趋势(图8). 一代成虫高峰大多发生在拔节期之后抽雄期之前, 一代成虫高峰期和拔节期间的物候同步性先减小后增大($y = -0.153x^2 + 612x - 6.13 \times 10^5$, $r^2 = 0.53$, $P < 0.01$), 一代成虫高峰期和抽雄期间的物候同步性先增大后减小($y = -0.146x^2 + 584x - 5.85 \times 10^5$, $r^2 = 0.43$, $P < 0.05$), 即一代成虫高峰滞后于拔节期的时间先增多后减少, 提前于抽雄期的时间先减少后增多. 二代成虫高峰和抽雄期间的物候同步性也具有先减小后增大的趋势($y = -0.136x^2 + 543x - 5.44 \times 10^5$, $r^2 = 0.36$, $P < 0.05$), 二代成虫高峰滞后于抽雄期的时间先增大后减小. 二代成虫高峰和乳熟期间的物候同步性却没有显著变化(图8).

3 讨论

1995~2012年间夏玉米的拔节期主要受出苗期的影响, 抽雄期主要受拔节期的影响, 乳熟期主要受抽雄期的影响(图4), 这可能是因为夏玉米物候的遗留效应, 在关于水稻物候期的影响因素研究中也具有类似的结果, 成熟期和移栽期显著正相关^[32]. 夏玉米物候期之间的相关关系解释了出苗期、拔节期和抽雄期均具有的先提前后延迟的变化趋势($r^2 = 0.83$, $P < 0.01$; $r^2 = 0.52$, $P < 0.05$; $r^2 = 0.31$, $P < 0.05$)(图3). 夏玉米的出苗期又受到人为控制的播种期的显著影响($r = 0.91$, $P < 0.01$), 由此可以推测, 人为控制因素对后期的拔节期和抽雄期的变化产生了间接影响. 虽然夏玉米乳熟期受到抽雄期的显著正影响, 但抽雄期至乳熟期间的平均温度对乳熟期的负影响也较大(图4), 该生育期内平均温度的变化趋势并不显著(图5), 因此在两因素作用下乳熟期的变化趋势不显著(图3). 在分布于中国和巴基斯坦的多个站点, 研究也发现玉米物候期和温度呈负相关关

图 4 两个玉米物候之间的气象因素(温度、降雨量、日照时数)与夏玉米物候期的皮尔森偏相关关系. 例如, 左上方的四个方格分别代表平均出苗期至平均拔节期间的平均温度、平均降雨量、平均日照时数和出苗期与拔节期之间的皮尔森偏相关系数矩阵. *, $P < 0.05$

Figure 4 Pearson's partial correlation between the climatic variables between two maize phenological stages (temperature, rainfall, and sunshine hours) and summer maize phenology. For example, the four squares on the upper left represent the Pearson's partial correlation coefficients matrix between the average temperature, average rainfall, average sunshine hours calculated from average seedling date to average jointing date, seedling date, and the jointing date of summer maize. *, $P < 0.05$

图 5 1995~2012年间两玉米物候期之间的温度、降雨量、日照时数的线性变化趋势. 例如, 左上方的三个方格分别代表平均出苗期至平均拔节期间的平均温度、平均降雨量、平均日照时数的变化趋势, 括号内为该生育期内气象因素均值. *, $P < 0.05$

Figure 5 Linear trend of temperature, rainfall, and sunshine hours between two maize phenological stages from 1995 to 2012. For example, the three squares on the upper left represent the trend of the average temperature, average rainfall, average sunshine hours calculated from average seedling date to average jointing date, and the mean values of meteorological factors during this growth period of summer maize are in the brackets. *, $P < 0.05$

图 6 亚洲玉米螟一代和二代成虫高峰期前20, 40, 60天内的气象因素(平均温度、平均降雨量、平均日照时数、平均相对湿度), 以及最邻近前后两个夏玉米物候期和成虫高峰期的皮尔森偏相关关系. 与一代成虫高峰进行偏相关分析的两个夏玉米物候期分别是拔节期和抽雄期, 与二代成虫高峰进行偏相关分析的两个夏玉米物候期分别是抽雄期和乳熟期. *, $P < 0.05$

Figure 6 Pearson's partial correlation between the climatic factors in 20, 40, 60 days before the adult peaks of the Asian corn borer (average temperature, average rainfall, average sunshine hours, and average humidity), two nearest summer maize phenological dates before and after the adult peaks of the Asian corn borer. The two summer maize phenological dates for partial correlation analysis with the first-generation adult peak are the jointing date and tasseling date, and those with the second-generation adult peak are the tasseling date and milking date. *, $P < 0.05$

系^[10,12], 这是由于在研究时段中, 平均温度小于最适温度, 生长发育速率随温度升高而加快从而导致物候期

提前^[9]. 但是当温度处于最适生长温度和最高温阈值之间时, 温度升高使得玉米生长发育速率减慢, 达到

图7 1995~2012年间亚洲玉米螟一代和二代成虫高峰期前20, 40, 60天内温度、降雨量、日照时数、相对湿度的线性变化趋势, 括号内为对应时段内气象因素均值

Figure 7 Linear trend of temperature, rainfall, sunshine hours, and relative humidity in 20, 40, 60 days before the first- and second-generation adult peaks of the Asian corn borer from 1995 to 2012, and the mean values of meteorological factors in corresponding periods are in the brackets

图8 1995~2012年间夏玉米和亚洲玉米螟间物候同步性的变化趋势。左图展示了一代成虫高峰和拔节期、抽雄期的物候差异随时间变化趋势。右图展示了二代成虫高峰和抽雄期、乳熟期的物候差异随时间变化趋势

Figure 8 Trend of phenological synchrony between summer maize and the Asian corn borer from 1995 to 2012. The left plot represents the phenological difference between the first-generation adult peak of the Asian corn borer and the jointing date and tasseling date. The right plot represents the trend of phenological difference between the second-generation adult peak of the Asian corn borer and the tasseling date and milking date

某一物候期的时间延迟^[9]。随着未来气候持续变暖, 夏玉米生育期均温可能更频繁地超过玉米最适生长温度, 从而使得该负相关关系减弱, 甚至转为正相关最终造成物候期的延迟。

虽然玉米不同生育期为玉米螟提供的食物质量可

能影响其发育速率, 但本研究发现, 夏玉米物候没有显著影响一代、二代玉米螟成虫高峰期(图6)。一代成虫高峰不受气象因素的显著影响, 其主要影响因素仍然不明确。二代成虫高峰受高峰期前平均相对湿度、平均日照时数的显著影响, 这之前研究得出的昆虫生长发育速率主要受温度影响的结论不同^[19]。相对湿度、日照时数不显著的变化趋势也使得二代成虫高峰不具显著变化趋势。

研究影响两物种间物候同步性变化的因素时, 需要综合考虑物种的生活史^[28]、当地气候变化^[23,25]和人为管理措施^[10]等。玉米螟需要与玉米的物候保持同步以获得适宜的生存环境, 大部分生育期的玉米都可供玉米螟幼虫取食, 但在不同的物候同步性下玉米螟的适合度可能不同, 因此导致玉米螟高峰期向适合度更高的时间进化。本研究发现, 夏玉米和亚洲玉米螟间的物候同步性变化大部分可由人为控制的播种期、物候遗留效应和各气象因素的影响解释。导致物候同步性非线性变化的最直接因素是拔节期、抽雄期的先提前后延迟的变化趋势, 但玉米物候的变化又受到物候遗留效应、温度、人为因素的影响, 这三个因素间接影响着玉米和玉米螟间的物候同步性。在农业生态系统中, 玉米物候期不可避免地受到人为管理措施的影响, 人为控制的播种期对夏玉米和亚洲玉米螟间同步性非线性变化的影响非常大。由于拔节期和抽雄期受到人为控制的播种期变化的影响, 而具有非线性变化趋势, 同时一代成虫高峰具有相对小的延迟趋势(图3), 因此一代成虫高峰和拔节期、抽雄期间同步性具有非线性变化趋势(图8)。由于玉米乳熟期受温度和物候遗留效应的双重影响而变化不显著(图3~5), 二代成虫高峰主要受气象因素影响而变化趋势不显著(图3), 二代成虫高峰和抽雄期间同步性呈非线性变化, 和乳熟期间同步性变化不显著(图8)。另外, 在考虑气象因素是否直接影响玉米和玉米螟间物候同步性时发现, 物候同步性的非线性变化并没有显著受到气象因素的直接影响, 温度和日照时长虽然对二代成虫高峰和乳熟期间同步性有影响, 但在1995~2012年间气候变化的趋势均不显著, 因此该物候同步性并没有发生显著变化(网络版附图1和2)。

虽然菏泽地区1995~2012年玉米和玉米螟的生育期内温度没有显著变化, 但据预测在未来近100年内华北平原地区温度仍将升高^[33], 玉米和玉米螟间的物候

同步性将如何变化也是令人感兴趣的问题. 在RCP 4.5和RCP 8.5排放情景下预测华北平原地区未来玉米物候变化趋势, 大部分模型预测玉米吐丝期和成熟期会随温度升高而提前, 但Beta模型预测玉米物候会延后^[34]. 目前还未有研究预测华北平原的亚洲玉米螟物候未来变化趋势, 根据先前温度对玉米螟影响研究推理, 玉米螟物候也将随温度升高而提前^[35], 因此玉米和玉米螟对温度变化的响应程度影响着两者间的物候同步性变化方向.

不同的玉米品种完成某一生长阶段所需积温具有差异^[36,37], 由此导致的玉米生育期长度的变化会使得玉米各物候期出现提前或延迟, 从而可能影响玉米和玉米螟的物候同步性. 基于站点数据的研究发现, 品种变化可以部分抵消气候变暖造成的玉米物候期提前^[11], 但由于不同气候状况下同一玉米品种积温需求具有较大差异^[14,36], 因此品种对玉米物候期和玉米螟虫害的影响可能具有一定偏差^[38]. 然而, 目前品种对玉米和玉米螟间物候同步性影响的研究仍然缺乏, 未来有必要进一步研究玉米品种如何影响玉米和玉米螟间的相互作用.

虽然玉米物候还可能受品种更替等因素的影响, 但本文主要探讨人为控制的播种期、气象因素和物候的遗留效应对夏玉米物候期的影响, 而影响一代玉米

螟成虫的因素仍然不明确. 另外, 由于夏玉米物候、亚洲玉米螟成虫量及气象数据来自三个不同站点, 虽然站点空间距离不远, 气象数据可以近似代替, 但不同站点之间的气象差异可能在某种程度上影响实验分析结果. 夏玉米物候和一、二代成虫高峰间物候同步性的非线性变化, 使得亚洲玉米螟幼虫取食不同生育期的玉米组织, 并可能使玉米螟的种群数量受玉米各物候期营养成分不同的影响而产生变化^[20,39], 从而可能造成玉米不同程度的减产.

4 结论

夏玉米的拔节期、抽雄期主要受播种期的遗留效应影响, 呈现出先提前后延迟的变化趋势, 而乳熟期受到夏玉米播种期遗留效应和平均温度共同作用, 变化趋势不明显. 亚洲玉米螟一代成虫高峰呈现延迟的变化趋势, 二代成虫高峰呈不显著的提前趋势, 玉米螟成虫物候的变化主要受空气湿度和日照等环境因子的影响, 但夏玉米物候也影响了玉米螟成虫爆发的时间. 由于夏玉米物候期的改变, 亚洲玉米螟一代成虫高峰与拔节期及抽雄期间物候同步性呈现非线性变化. 二代成虫高峰与抽雄期间同步性也呈现非线性变化, 与乳熟期间的同步性没有发生变化.

参考文献

- 1 Mbow C, Rosenzweig C, Barioni L G, et al. 2019: Food security. In: Shukla P R, Skea J, Calvo Buendia E, eds. *Climate Change and Land: an IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. 2019
- 2 Lobell D B, Schlenker W, Costa-Roberts J. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 2011, 333: 616–620
- 3 Deutsch C A, Tewksbury J J, Tigchelaar M, et al. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 2018, 361: 916–919
- 4 Schnelle F. *Plant phenology* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1965 [施奈勒 F. 植物物候学. 北京: 科学出版社, 1965]
- 5 Liu Z G, Liu Z D, Xiao J F, et al. Waterlogging at seedling and jointing stages inhibits growth and development, reduces yield in summer maize (in Chinese). *Transact Chin Soc Agric Eng*, 2013, 29: 44–52 [刘祖贵, 刘战东, 肖俊夫, 等. 苗期与拔节期淹涝抑制夏玉米生长发育、降低产量. 农业工程学报, 2013, 29: 44–52]
- 6 Hu M X, Zhou G S. Phenological change and its ecophysiological mechanism of spring maize responding to drought at jointing stage and rewetting (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2020, 40: 274–283 [胡明新, 周广胜. 拔节期干旱和复水对春玉米物候的影响及其生理生态机制. 生态学报, 2020, 40: 274–283]
- 7 Kiniry J R, Ritchie J T, Musser R L, et al. The photoperiod sensitive interval in maize. *Agron J*, 1983, 75: 687–690
- 8 Ellis R H, Summerfield R J, Edmeades G O, et al. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Sci*, 1992, 32: 1225–1232
- 9 Warrington I J, Kanemasu E T. Corn growth response to temperature and photoperiod I. Seedling emergence, tassel initiation, and anthesis. *Agron J*, 1983, 75: 749–754

- 10 Tao F, Zhang S, Zhang Z, et al. Maize growing duration was prolonged across China in the past three decades under the combined effects of temperature, agronomic management, and cultivar shift. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 3686–3699
- 11 Xiao D, Zhao Y, Bai H, et al. Impacts of climate warming and crop management on maize phenology in northern China. *J Arid Land*, 2019, 11: 892–903
- 12 Abbas G, Ahmad S, Ahmad A, et al. Quantification the impacts of climate change and crop management on phenology of maize-based cropping system in Punjab, Pakistan. *Agric For Meteor*, 2017, 247: 42–55
- 13 Wang J Y. A critique of the heat unit approach to plant response studies. *Ecology*, 1960, 41: 785–790
- 14 Wu D, Wang P, Jiang C, et al. Measured phenology response of unchanged crop varieties to long-term historical climate change. *Int J Plant Prod*, 2019, 13: 47–58
- 15 Chow D R. Occurrence, control and research progress of corn borer in my country (in Chinese). *Plant Protect Technol Extens*, 1996, 16: 38–40 [周大荣. 我国玉米螟的发生、防治与研究进展. 植保技术与推广, 1996, 16: 38–40]
- 16 Strathdee A T, Bale J S, Block W C, et al. Effects of temperature elevation on a field population of *Acyrtosiphon svalbardicum* (Hemiptera: Aphididae) on Spitsbergen. *Oecologia*, 1993, 96: 457–465
- 17 Hill J K, Hodkinson I D. Effects of temperature on phenological synchrony and altitudinal distribution of jumping plant lice (Hemiptera: Psyllodea) on dwarf willow (*Salix lapponum*) in Norway. *Ecol Entomol*, 1995, 20: 237–244
- 18 Gagnon A È, Bourgeois G, Bourdages L, et al. Impact of climate change on *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae) phenology and its implications on pest management. *Agr For Entomol*, 2019, 21: 253–264
- 19 Bale J S, Masters G J, Hodkinson I D, et al. Herbivory in global climate change research: Direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Glob Change Biol*, 2002, 8: 1–16
- 20 Wang Z Y, He K L, Xing Z J, et al. Impacts of plant tissues of different type corn on growth and survival of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 2004, 20: 217–221+224 [王振营, 何康来, 邢珍娟, 等. 不同类型玉米组织对亚洲玉米螟幼虫存活和生长发育的影响. 中国农学通报, 2004, 20: 217–221+224]
- 21 Li T, Lian M L, Chang L W, et al. Study on occurrence and damage characteristics of Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* in the field of waxy corn (in Chinese). *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26: 235–242 [李唐, 连梅力, 常六旺, 等. 糯玉米田亚洲玉米螟发生危害特点调查研究. 中国农学通报, 2010, 26: 235–242]
- 22 Cheu S P, Chow D R, Tung H F, et al. Yield reduction of corn caused by the European corn borer at different developmental stages (in Chinese). *Acta Phytophylac Sin*, 1964, 3: 307–312 [邱式邦, 周大荣, 董慧芳, 等. 玉米不同生育期遭受螟害对产量损失的影响. 植物保护学报, 1964, 3: 307–312]
- 23 Visser M E, Holleman L J M. Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology. *Proc R Soc Lond B*, 2001, 268: 289–294
- 24 Pigliucci M. Phenotypic Plasticity: Beyond Nature and Nurture. Baltimore: JHU Press, 2001
- 25 Ovaskainen O, Skorokhodova S, Yakovleva M, et al. Community-level phenological response to climate change. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2013, 110: 13434–13439
- 26 Renner S S, Zohner C M. Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2018, 49: 165–182
- 27 Kharouba H M, Ehrlén J, Gelman A, et al. Global shifts in the phenological synchrony of species interactions over recent decades. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2018, 115: 5211–5216
- 28 Singer M C, Parmesan C. Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: Signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Phil Trans R Soc B*, 2010, 365: 3161–3176
- 29 Charmantier A, McCreery R H, Cole L R, et al. Adaptive phenotypic plasticity in response to climate change in a wild bird population. *Science*, 2008, 320: 800–803
- 30 Donnelly A, Caffarra A, O'Neill B F. A review of climate-driven mismatches between interdependent phenophases in terrestrial and aquatic ecosystems. *Int J Biometeorol*, 2011, 55: 805–817
- 31 China Meteorological Administration. Agro-meteorological Observation Standard (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993 [国家气象局. 农业气象观测规范. 北京: 气象出版社, 1993]
- 32 Zhao H, Fu Y H, Wang X, et al. Timing of rice maturity in China is affected more by transplanting date than by climate change. *Agric For Meteor*, 2016, 216: 215–220

- 33 Xiao D, Liu D L, Wang B, et al. Climate change impact on yields and water use of wheat and maize in the North China Plain under future climate change scenarios. *Agric Water Manage*, 2020, 238: 106238
- 34 Wang N, Wang J, Wang E, et al. Increased uncertainty in simulated maize phenology with more frequent supra-optimal temperature under climate warming. *Eur J Agron*, 2015, 71: 19–33
- 35 Luo M, Chen J X, Zheng L X, et al. Effects of temperatures on the development, reproduction and calling behavior of *Ostrinia furnacalis* (Guenée) (in Chinese). *J Environ Entomol*, 2018, 40: 579–586 [罗妹, 陈俊贤, 郑丽霞, 等. 温度对亚洲玉米螟生长发育、繁殖和求偶行为的影响. *环境昆虫学报*, 2018, 40: 579–586]
- 36 Amgain L P. Accumulated heat unit and phenology of diverse maize varieties as affected by planting dates under Rampur condition, Nepal. *Agron J Nepal*, 2013, 2: 111–120
- 37 Wang D, Li G, Zhou B, et al. Innovation of the double-maize cropping system based on cultivar growing degree days for adapting to changing weather conditions in the North China Plain. *J Integr Agric*, 2020, 19: 2997–3012
- 38 Liu Z, Hubbard K G, Lin X, et al. Negative effects of climate warming on maize yield are reversed by the changing of sowing date and cultivar selection in Northeast China. *Glob Change Biol*, 2013, 19: 3481–3492
- 39 Xie W M, Wang Y S, Yang G H. The effect of feeding on different positions of corn plants on the survival and development of corn borer larvae (in Chinese). *Plant Protect*, 1989, 15: 16–18 [谢为民, 王蕴生, 杨桂华. 取食玉米植株不同部位对玉米螟幼虫成活和发育的影响. *植物保护*, 1989, 15: 16–18]

Phenological synchrony between summer maize and the Asian corn borer

WANG ShuXin¹, GUO YaHui¹, FU YongShuo¹ & LIU YuMei²

¹ College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

² College of Agricultural and Biological Engineering, Heze University, Heze 274015, China

Maize is one of China's main food crops, and its growth and yield are significantly influenced by climate change, diseases, and insect pests. Phenological synchrony describes the matching extent of different phenological events. As an important indicator representing species interaction, phenological synchrony plays a vital role in directing agricultural production. In natural ecosystems, two mechanisms can be applied to explain the phenological mismatch between interacting species. On the one hand, there are differences in the rate of development for different species responding to a change of environmental factors; on the other hand, species evolve to better adapt to the changed environment after the asynchrony. The phenological synchrony between summer maize and the Asian corn borer has currently received less attention. Using the data of summer maize phenology, the adult peak of the Asian corn borer, and meteorological records at three stations in Heze city over the past 18 years (1995–2012), the results show that summer maize phenology has a legacy effect. The controlled sowing date indirectly changes the jointing date and tasseling date, which ultimately causes the nonlinear trend of the synchrony between jointing and tasseling dates and the adult peak of the Asian corn borer. There is no significant synchrony change between the milking date and the second adult peak over the study period. The controlled sowing date largely changes the occurrence of the Asian corn borer during summer maize development, which may affect the corn borer's population, and finally changes maize yield. To control pests, increase maize yield and actively deal with climate change, it is vital to deeply study the mechanism of the change of phenological synchrony between maize and the Asian corn borer under the effect of human-controlled sowing date and climate change.

phenological synchrony, anthropogenic factor, climate change, summer maize, Asian corn borer

doi: 10.1360/SSV-2020-0378