我国草地贪夜蛾年发生世代区划分

谢殿杰[1#]， 唐继洪[2#]， 张 蕾[1]， 程云霞[1]， 江幸福[1*]

(1. 植物病虫害生物学国家重点实验室，中国农业科学院植物保护研究所，北京 100193；
2. 中国热带农业科学院环境与植物保护研究所，海口 571101)

摘要 为明确草地贪夜蛾在我国不同地区的年发生世代数，为提高其预测预报和综合防治水平提供科学依据，本研究采用不同恒温(20、24、28、32、36℃)条件，以玉米苗为幼虫食物测定了草地贪夜蛾不同发育阶段及全世代的发育历期，计算出草地贪夜蛾不同发育阶段、全世代发育起点温度和有效积温。在此基础上，结合1985年－2014年30年全国605个气象站点的气象数据预测了草地贪夜蛾在我国不同地区的年发生世代数，并利用地理信息系统对其年发生世代区进行了划分。结果表明：草地贪夜蛾卵、1～6龄幼虫、蛹、雌成虫和雄成虫的发育起点温度分别为11.20、9.63、13.03、12.88、11.09、13.04、10.73、13.90、13.98℃和16.68℃，有效积温分别为41.32、41.32、18.71、28.23、45.87、60.33、55.90、90.97、166.86日·度和121.90日·度；全世代发育起点温度为12.6℃，有效积温为584.0日·度。根据全国不同地区气象数据推测草地贪夜蛾在我国的理论年平均发生世代数在0～7.41代之间，总体上发生世代数随纬度和海拔的升高而减少。我国1月份12.6℃等温线以南地区全年最低温度高于草地贪夜蛾发育起点温度，为周年繁殖区域，主要位于云南南部(全年发生世代数最高可超过5代)、广西南部、广东中部以南、福建东南部(全年世代数最高可超过6代)、台湾大部(全年世代数最高可超过7代)以及海南省全境(全年可发生7代以上)。江南和江淮迁飞过渡区主要为4～5代区和3～4代区。黄淮海及北方重点防范区主要为2～3代区和1～2代区，部分为3～4代区。

关键词 草地贪夜蛾； 发生世代； 有效积温； 发育起点温度

中图分类号： S 435.132 **文献标识码**： A **DOI**： 10.16688/j.zwbh.2020213

Annual generation numbers prediction and division of fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in China

XIE Dianjie[1#], TANG Jihong[2#], ZHANG Lei[1], CHENG Yunxia[1], JIANG Xingfu[1*]

(1. *State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100193, *China*; 2. *Institute of Environment and Plant Protection, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou* 571101, *China*)

Abstract In order to investigate the annual generation numbers of fall armyworm in different regions of China, and provide scientific basis for fall armyworm forecast and integrated control, the developmental durations of each developmental stage and whole generation of fall armyworm were determined at constant temperatures (20, 24, 28, 32, 36℃), and the effective accumulated temperature and the developmental threshold temperature were calculated. And then the annual generation numbers of fall armyworm in different regions of China were predicted based on the 30 years (1985－2014) meteorological data of 605 meteorological stations. Then the whole country was divided into eight regions according to the annual generation numbers of fall armyworm using geographic information system. The developmental threshold temperatures of eggs, 1st-6th instar larvae, pupae, female and male adults were 11.20, 9.63, 13.03, 12.88, 11.09, 13.04, 10.73, 13.90, 13.98 and 16.68℃, respectively, and the effective accumulated temperatures were 41.32, 41.32, 18.71, 28.23, 45.87, 60.33, 55.90, 90.97, 166.86 d·℃ and 121.90 d·℃, respectively. The developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of the whole generation were 12.6℃ and 584.0 d·℃,

收稿日期： 2020－04－24 **修订日期**： 2020－05－25
基金项目： 国家重点研发计划(2019YFD0300101, 2017YFD0201701, 2017YFD0201802)；中国农业科学院重大科技任务(CAAS-ZDRW202007)；国家自然科学基金(31672019, 31871951)；国家绿肥产业技术体系(CARS-22)；北京市自然科学基金(6172030)
* 通信作者 E-mail：xfjiang@ippcaas.cn
# 为并列第一作者

respectively. The theoretical average annual generation numbers of fall armyworm ranged from 0 to 7.41. The theoretical average annual generation numbers decreased with the increase of latitude and altitude. In January, the annual minimum temperature in the south of 12.6℃ isotherm was above 12.6℃, which was higher than the developmental threshold temperature of fall armyworm, and the fall armyworm could develop normally all year round. These areas include southern of Yunnan (annual generation numbers can exceed five generations at most), southern of Guangxi, south of Guangdong, southeast of Fujian (annual generation numbers can exceed six generations at most), most of Taiwan (annual generation numbers can exceed seven generations at most) and all of Hainan province (more than seven generation numbers throughout the year). The fall armyworm could occur four to five generations and three to four generations in migration transition zones of Jiangnan and Jianghuai areas. In Huang-huai-hai and the key prevention areas (northern China), the fall armyworm could occur two to three or one to two generations in most areas, and three to four generations in some areas.

Key words *Spodoptera frugiperda*; generation number; effective accumulated temperature; developmental threshold temperature

草地贪夜蛾 *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) 属鳞翅目 Lepidoptera,夜蛾科 Noctuidae,灰翅夜蛾属 *Spodoptera*,原产于美洲热带和亚热带地区[1]。草地贪夜蛾寄主范围广,在美洲可为害 76 科 227 属的 353 种自然寄主植物[2];为害严重时可造成玉米减产 20%～40%[3];其繁殖能力强,单雌平均产卵量可达 1 449 粒[4];对温度适应性强,在中、南美洲热带和亚热带地区可周年发生[5-6];成虫具有迁飞习性,在中、南美洲可向南迁飞至阿根廷,向北迁飞至加拿大,气象条件适宜的情况下,草地贪夜蛾从美国南部密西西比州迁飞至加拿大南部,共 1 600 km 的距离仅需 30 h[7-10]。2016 年 1 月,草地贪夜蛾首次入侵非洲,并迅速蔓延到非洲大部分地区[11]以及亚洲部分国家[12],成为一种世界性农业害虫。2019 年 1 月,草地贪夜蛾入侵我国云南,随后迅速蔓延,到 2019 年 10 月,有 26 个省(市、区)监测到草地贪夜蛾成虫,有 22 个省(市、区)查见幼虫为害[13-15]。

温度、湿度、光周期等影响着昆虫的生长发育及分布范围,其中,温度是最主要的环境因素[16]。昆虫完成某一发育阶段必须积累一定量的有效温度,即有效积温(effective accumulated temperature)。当环境温度高于昆虫的发育起点温度(developmental threshold temperature)时,昆虫才开始发育。昆虫的发育起点温度及有效积温决定了它是否能在某一地区完成生活史[17-19]。因此,研究昆虫的发育起点温度和有效积温有助于预测其在某一地区的发生期和发生世代数,为害虫的预测预报及综合治理提供依据。

有关草地贪夜蛾发育起点温度、有效积温和发生世代的研究国内已有少量报道,如何莉梅等研究了草地贪夜蛾的发育起点温度和有效积温[20];张红梅等根据试验测定的草地贪夜蛾发育起点温度和有效积温推测了其在云南各地区的年发生世代数[21]。秦誉嘉等、卢辉等预测了草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布[22-23]。这些结果对于阐明草地贪夜蛾在我国的发生规律及提高预测预报水平有重要的作用,但由于不同作者采用的饲养条件等不同,得到的草地贪夜蛾发育起点温度和有效积温数据差异较大,而且目前关于草地贪夜蛾在我国不同地区发生世代数的研究尚未见报道。

鉴于草地贪夜蛾入侵后在我国迅速蔓延,已经对我国粮食安全产生了巨大威胁[24-25],为摸清其在我国的发生规律,提高其预测预报和综合防治水平。本研究在室内 5 种恒温条件下以玉米苗为幼虫食物,系统测定草地贪夜蛾不同发育阶段的发育历期,计算出不同发育阶段及全世代发育起点温度,在此基础上,利用 1985 年－2014 年我国不同地区 605 个气象站的气象数据,并结合地理信息系统按照预测的草地贪夜蛾在各地区年发生世代数对其发生区进行了划分,从而为提高草地贪夜蛾的预测预报和综合治理水平提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试虫源及种群饲养技术

试验用草地贪夜蛾幼虫于 2019 年 4 月采自广西壮族自治区南宁市(108.37°E,22.82°N),带回室内人工饲养繁殖,建立种群。种群饲养技术同谢殿杰等的方法[4]。

1.2 草地贪夜蛾不同温度下饲养与发育历期观察

试验在恒温培养箱中进行,设置 20、24、28、32、

36℃共 5 个温度梯度,相对湿度为(60±5)%、光周期 L//D=16 h//8 h、光照强度为 18 000 lx。幼虫用新鲜玉米苗饲喂,每天更换,直至幼虫化蛹,记录幼虫历期及蛹历期。成虫羽化后记录其存活历期,直至成虫全部死亡。

1.3　发育起点温度及有效积温的计算

试验中不同温度下草地贪夜蛾世代周期的平均数和标准误用 SPSS 20 软件计算,并进行方差分析,使用 Tukey's HSD 法进行差异显著性检验。根据有效积温法则,采用最小二乘法计算草地贪夜蛾整个世代的发育起点温度(C)和有效积温(K)。

$$C=\frac{\sum V^2\sum T-\sum V\sum VT}{n\sum V^2-\left(\sum V\right)^2} \tag{1}$$

$$K=\frac{n\sum VT-\sum V\sum T}{n\sum V^2-\left(\sum V\right)^2} \tag{2}$$

$$S_c=\sqrt{\frac{\sum (T-T')^2}{n-2}\left(\frac{1}{n}+\frac{\overline{V}^2}{\sum (V-\overline{V})^2}\right)} \tag{3}$$

$$S_k=\sqrt{\frac{\sum (T-T')^2}{(n-2)\sum (V-\overline{V})^2}} \tag{4}$$

其中,V 为发育速率(发育历期的倒数),T 为处理试验温度,T'为理论温度,$T'=C+KV$,$\overline{V}$为发育速率的平均值,n 为试验温度处理数($n=5$),C 为发育起点温度,K 为有效积温,S_c 和 S_k 分别是 C 和 K 的标准差。

1.4　气象数据来源与处理

本文所用 1985 年—2014 年气象数据均下载于国家气象科学数据中心网站(http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html);所用气象数据集为中国地面气候资料日值数据集(V3.0)。在去除数据不完整的站点后,得到 605 个气象站点数据。

1.5　草地贪夜蛾理论年发生世代数计算

根据计算出的草地贪夜蛾发育起点温度和有效积温,按照公式(5)计算 1.4 所述 605 个气象站点 1985 年—2014 年每年草地贪夜蛾理论年发生世代数,并计算每个站点这 30 年理论年发生世代数平均值,将其作为对应气象站点草地贪夜蛾理论年发生世代数。从代表性省市随机抽出 1 个气象站点,将该站点草地贪夜蛾理论年发生世代数作为验证数据(理论计算值)不参与模型构建(共抽取 29 个气象站点),其余气象站点数据输入地理信息系统软件 ArcGIS 10.6,利用地统计分析模块对草地贪夜蛾年发生世代数进行 Kriging 插值分析,得到全国草地贪夜蛾年发生世代数分布图;并利用数值提取工具(GA Layer to Points)将验证数据所对应的拟合年发生世代数(拟合值)从该图中提取出来,利用公式 6 所示卡方检验分析比较两者的差异,从而判断所得年发生世代数分布图的优劣。

$$G=\frac{\sum_{i=0}^{n}(T_i-C)}{K} \tag{5}$$

其中 $T_i>C$;当 $T_i\leqslant C$ 时,$T_i-C=0$;式中,G 为年发生世代数,n 为全年的天数,T_i 为全年中第 i 日平均气温,C 为发育起点温度,K 为世代有效积温。

$$\chi^2=\sum_{i=1}^{k}\frac{(O_i-E_i)^2}{E_i} \tag{6}$$

其中,O_i 为第 i 个观测值(也即是本文中的理论计算值);E_i 为拟合值。如果卡方值χ^2小于自由度为 $k-1$、$\alpha=0.05$ 显著水平的临界值$\chi^2_{(df=k-1,\alpha=0.05)}$,则表示拟合值和理论计算值无显著差异,拟合值能较好地代表理论计算值。

1.6　1 月份 12.6℃等温线提取

由 1.5 所述 605 个气象站点气候资料日值数据计算得出 1985 年—2014 年 1 月份平均气温平均值,将该数据输入地理信息系统软件 ArcGIS 10.6,经过 Kriging 插值分析后得到全国 1 月份平均气温分布图,再利用等值线提取工具(GA Layer to Contour)提取 12.6℃全世代发育起点温度等温线。

2　结果与分析

2.1　草地贪夜蛾的世代周期及有效积温、发育起点温度

利用有效积温和发育起点温度的计算公式得到草地贪夜蛾卵、1～6 龄幼虫、蛹、雌成虫和雄成虫的发育起点温度分别为 11.20、9.63、13.03、12.88、11.09、13.04、10.73、13.90、13.98℃和 16.68℃,有效积温分别为 41.32、41.32、18.71、28.23、45.87、60.33、55.90、90.97、166.86 日·度和121.90 日·度;整个世代的发育起点温度为 12.6℃,有效积温为 584.0 日·度(表 1)。

表 1 草地贪夜蛾世代发育起点温度及有效积温

Table 1 Generational developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Spodoptera frugiperda*

发育阶段 Developmental stage	发育起点温度 ($C\pm S_c$)/℃ Developmental threshold temperature	有效积温 ($K\pm S_k$)/日·度 Effective accumulated temperature
卵 Egg	11.20±3.19	41.32±5.23
1 龄幼虫 1st instar larva	9.63±2.20	41.32±4.89
2 龄幼虫 2nd instar larva	13.03±3.23	18.71±2.64
3 龄幼虫 3rdinstar larva	12.88±2.23	28.23±1.16
4 龄幼虫 4th instar larva	11.09±2.61	45.87±5.33
5 龄幼虫 5th instar larva	13.04±0.82	60.33±6.52
6 龄幼虫 6th instar larva	10.73±1.25	55.90±4.91
蛹 Pupa	13.90±1.14	90.97±8.38
雌成虫 Female adult	13.98±1.99	166.86±16.11
雄成虫 Male adult	16.68±2.24	121.90±11.76
全世代 Generation time	12.60±0.75	584.00±26.91

2.2 草地贪夜蛾理论年发生世代数

通过对 605 个气象站点 1985 年－2014 年的气象数据及草地贪夜蛾的发育起点温度和有效积温计算得到各站点草地贪夜蛾理论年发生世代数。表 2 为 31 个代表性站点 1985 年－2014 年草地贪夜蛾理论平均年发生世代数，范围在 0～7.41 代，理论平均年发生世代数随纬度的升高有减小的趋势，然而如西藏拉萨、青海西宁等地由于海拔较高，气温相对同纬度其他地区低，理论平均年发生世代数也相对较少。如表 3 所示，随机选取的作为验证数据的 29 个气象站点草地贪夜蛾理论年平均发生世代数（理论计算值）和拟合值无显著差异（$\chi^2=2.956\ 0<\chi^2_{(df=28,\alpha=0.05)}=41.337\ 1$），表明插值分析所得的全国草地贪夜蛾年发生世代数分布图具有较高的参考价值，能在一定程度上模拟实际发生情况。

表 2 代表性站点 1985 年－2014 年草地贪夜蛾理论年平均发生世代数

Table 2 Theoretical average annual generation numbers of *Spodoptera frugiperda* from 1985 to 2014 at the representative sites

序号 No.	省份 Province	气象台站 Meteorological station	经度 Longitude	纬度 Latitude	平均年发生世代数/代 Average annual generation number	最低年发生世代数/代 Minimum annual generation number	最高年发生世代数/代 Maximum annual generation number
1	海南 Hainan	海口	110.25°E	20.00°N	7.41±0.07	5.85±0.06	9.76±0.08
2	广西 Guangxi	南宁	108.22°E	22.63°N	5.95±0.05	4.29±0.05	8.71±0.06
3	广东 Guangdong	广州	113.33°E	23.17°N	6.25±0.06	4.58±0.05	8.90±0.07
4	云南 Yunnan	昆明	102.65°E	25.00°N	2.51±0.05	1.11±0.03	5.59±0.08
5	福建 Fujian	福州	119.28°E	26.08°N	5.13±0.04	3.65±0.03	7.79±0.06
6	贵州 Guizhou	贵阳	106.73°E	26.58°N	2.89±0.04	1.72±0.03	5.04±0.05
7	湖南 Hunan	长沙	113.08°E	28.20°N	4.46±0.09	3.07±0.07	6.70±0.13
8	江西 Jiangxi	南昌	115.92°E	28.60°N	4.55±0.05	3.30±0.04	6.51±0.06
9	重庆 Chongqing	重庆	106.48°E	29.52°N	3.86±0.13	2.85±0.08	5.57±0.15
10	西藏 Tibet	拉萨	91.13°E	29.67°N	0.73±0.03	0.04±0.01	3.15±0.06
11	浙江 Zhejiang	杭州	120.17°E	30.23°N	4.11±0.06	2.79±0.05	6.25±0.07
12	湖北 Hubei	武汉	114.13°E	30.62°N	4.24±0.06	2.95±0.06	6.31±0.07
13	四川 Sichuan	成都	104.02°E	30.67°N	3.44±0.06	2.24±0.04	5.42±0.07
14	上海 Shanghai	宝山	121.45°E	31.40°N	4.05±0.06	2.97±0.04	5.68±0.08
15	安徽 Anhui	合肥	117.30°E	31.78°N	3.95±0.05	2.63±0.04	5.95±0.07
16	江苏 Jiangsu	南京	118.80°E	32.00°N	3.81±0.05	2.52±0.04	5.86±0.06
17	陕西 Shaanxi	西安	108.93°E	34.30°N	3.29±0.06	1.83±0.05	5.60±0.08
18	河南 Henan	郑州	113.65°E	34.72°N	3.58±0.05	2.00±0.05	5.92±0.05
19	甘肃 Gansu	兰州	103.88°E	36.05°N	2.06±0.04	0.66±0.03	4.52±0.07
20	山东 Shandong	济南	117.05°E	36.60°N	3.68±0.03	2.23±0.03	5.73±0.04
21	青海 Qinghai	西宁	101.75°E	36.72°N	0.72±0.02	0.07±0.01	3.00±0.04
22	河北 Hebei	石家庄	114.42°E	38.03°N	3.47±0.04	1.95±0.04	5.69±0.05
23	宁夏 Ningxia	银川	106.22°E	38.48°N	2.24±0.04	0.78±0.03	4.56±0.06
24	天津 Tianjin	天津	117.07°E	39.08°N	3.23±0.03	1.85±0.03	5.29±0.05
25	北京 Beijing	北京	116.47°E	39.80°N	3.21±0.03	1.74±0.03	5.25±0.04
26	山西 Shanxi	大同	113.33°E	40.10°N	1.82±0.03	0.52±0.02	3.98±0.05
27	内蒙古 Inner Mongolia	呼和浩特	111.68°E	40.82°N	1.92±0.04	0.59±0.03	3.93±0.05
28	辽宁 Liaoning	沈阳	123.52°E	41.73°N	2.35±0.03	1.15±0.03	4.18±0.05
29	新疆 Xinjiang	乌鲁木齐	87.65°E	43.78°N	2.25±0.04	0.99±0.04	4.16±0.05
30	吉林 Jilin	长春	125.22°E	43.90°N	1.98±0.03	0.94±0.02	3.57±0.04
31	黑龙江 Heilongjiang	哈尔滨	126.77°E	45.75°N	1.88±0.03	0.81±0.03	3.48±0.04

表 3　随机选择气象站点草地贪夜蛾年发生世代数理论计算值和拟合值

Table 3　Fitted values and theoretical values of annual generation numbers of *Spodoptera frugiperda* at random selected meteorological stations

序号 No.	省份 Province	气象台站 Meteorological station	理论计算值 Theoretical value	拟合值 Fitted value	(理论计算值−拟合值)^2/拟合值 (Theoretical value−fitted value)^2/fitted value
1	海南 Hainan	琼海	7.55	7.48	0.000 7
2	广东 Guangdong	湛江	6.80	6.74	0.000 5
3	广西 Guangxi	桂平	6.01	5.79	0.008 4
4	福建 Fujian	上杭	5.21	5.13	0.001 2
5	湖南 Hunan	郴州	4.69	4.59	0.002 2
6	江西 Jiangxi	修水	3.96	4.19	0.012 6
7	浙江 Zhejiang	平湖	3.83	3.83	0.000 0
8	重庆 Chongqing	梁平	3.70	3.77	0.001 3
9	安徽 Anhui	亳州	3.64	3.51	0.004 8
10	山西 Shanxi	运城	3.50	2.66	0.265 3
11	湖北 Hubei	来凤	3.45	3.49	0.000 5
12	河南 Henan	西峡	3.44	3.11	0.035 0
13	天津 Tianjin	塘沽	3.26	3.03	0.017 5
14	江苏 Jiangsu	赣榆	3.17	3.09	0.002 1
15	山东 Shandong	惠民	3.16	3.22	0.001 1
16	河北 Hebei	唐山	2.90	2.79	0.004 3
17	新疆 Xinjiang	乌苏	2.89	2.14	0.262 9
18	宁夏 Ningxia	银川	2.24	2.15	0.003 8
19	云南 Yunnan	沾益	2.23	2.59	0.050 0
20	辽宁 Liaoning	彰武	2.21	2.25	0.000 7
21	陕西 Shaanxi	榆林	2.08	2.02	0.001 8
22	吉林 Jilin	前郭尔罗斯	2.03	1.93	0.005 2
23	内蒙古 Inner Mongolia	呼和浩特	1.92	1.50	0.117 6
24	黑龙江 Heilongjiang	绥化	1.69	1.61	0.004 0
25	青海 Qinghai	民和	1.39	0.84	0.360 1
26	贵州 Guizhou	威宁	1.16	2.36	0.610 2
27	甘肃 Gansu	华家岭	0.36	1.46	0.828 8
28	西藏 Tibet	江孜	0.11	0.28	0.103 2
29	四川 Sichuan	色达	0.01	0.27	0.250 4
		χ^2			2.956 0

图 1 为根据我国各地区草地贪夜蛾理论年发生世代数进行的区域划分。

不足 1 代区:包括黑龙江西北部及内蒙古东北部,青藏高原西藏和青海大部,四川西北部等区域。

1～2 代区:包括黑龙江、吉林大部分区域,内蒙古中东部,河北西北部,新疆东北部,甘肃、宁夏大部分区域,西藏、青海北部,四川中西部,云南北部等区域。

2～3 代区:包括内蒙古、吉林和辽宁三省交界处(包括辽宁大部分区域),河北大部,北京,天津,山东中部及胶州半岛,山西、陕西大部,内蒙古中西部,新疆大部,云南、四川及贵州三省交界处等区域。

3～4 代区:包括新疆中部,河北东南部,山东西南部,河南大部,安徽,江苏,浙江西北部,湖北大部,重庆,四川东部,湖南西北部,贵州大部,云南中部等区域。

4～5 代区:包括湖北东南部,湖南大部,江西大部,浙江大部,福建大部,台湾北部,云南中南部,广西北部等区域。

5～6 代区:包括云南南部,广西中部,广东中北部,福建东南部,台湾大部等区域。

6～7 代区:包括广西南部,广东南部及台湾南部等区域。

7 代以上区:海南省。

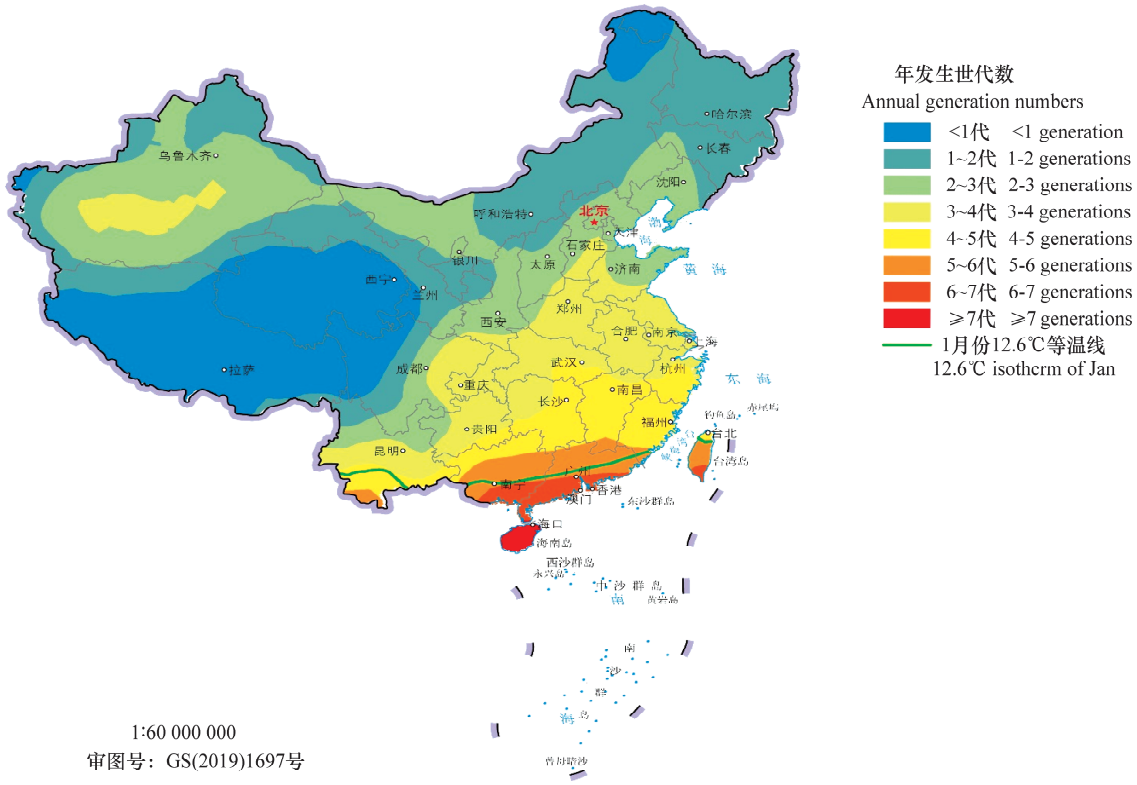


图 1 草地贪夜蛾理论年发生世代数分布图

Fig. 1 Map of the theoretical annual generation numbers of *Spodoptera frugiperda*

2.3 1 月份 12.6℃等温线

如图 1 所示，1 月份 12.6℃等温线位于云南省中南部、广西南部、广东中部、福建东南部及台湾北部。该等温线在云南省处于 4～5 代区内，在广西、广东及福建三省位于 5～6 代区内，而在台湾则位于 4～5 代区及 5～6 代区内。该等温线以南的区域 1 月份平均气温均在 12.6℃以上，高于草地贪夜蛾的全世代发育起点温度，草地贪夜蛾可以正常发育，可能成为草地贪夜蛾的周年繁殖区域。

3 讨论

在昆虫的生长发育过程中，当温度高于其发育起点温度时昆虫才开始发育，并且完成某一发育阶段所需的有效积温是固定的，因此，外界环境温度的高低决定了昆虫是否能够完成世代发育以及生长发育的快慢[26-27]。已有研究表明，草地贪夜蛾的发育历期随温度降低而显著延长[4]。本研究测定了不同温度下草地贪夜蛾的发育历期，并计算得出其整个世代的发育起点温度为 12.6℃，有效积温为 584.0 日·度。Schlemmer[28] 曾报道草地贪夜蛾的发育起点温度为 12.57℃，有效积温为 391.01 日·度；何莉梅等[20]研究表明，草地贪夜蛾的世代发育起点温度为 9.16℃，有效积温为 680.02 日·度。也有研究表明草地贪夜蛾发育起点温度为 10.9℃，有效积温需 559 日·度[29]。这些研究结果存在一定的差异，可能是由于试验所设置的温度、湿度、光照及食料不完全一致，所使用的仪器、数据采集和统计分析方法等也有所不同造成的。例如，Schlemmer 利用幼嫩甜玉米棒饲喂幼虫，所设置的光周期为 L//D=14 h//10 h；何莉梅等利用人工饲料饲喂幼虫。而本试验考虑到玉米苗期阶段受害较重，心叶和叶片都有被害，所以利用新鲜玉米苗饲喂幼虫，更接近实际情况。另外，由于全球气候的变化，可能使不同地理种群的草地贪夜蛾生物学特性不同，也会对试验结果产生影响。

张红梅等利用发育起点温度和有效积温对草地贪夜蛾在云南的年发生世代数进行了预测[21]，但是没有涉及草地贪夜蛾发生的其他地区。姜玉英等[30]根据何莉梅等[20]的研究结果进行分析，发现草地贪夜蛾全世代有效积温与黏虫接近，并用黏虫在我国不同纬度的发生世代数对草地贪夜蛾可能的年发生世代数进行了推测。本研究表明，理论上草地贪夜蛾在我国年平均发生世代数为 0～7.41 代。不

足 1 代区主要是黑龙江西北部及内蒙古东北部、青藏高原西藏和青海大部、四川西北部等区域,主要原因是这些地区纬度或海拔较高,一年中大部分时间气温都在草地贪夜蛾的世代发育起点温度以下;1 月份 12.6℃等温线位于云南省中南部、广西南部、广东中部、福建东南部及台湾北部。该等温线以南的区域 1 月份平均气温均在 12.6℃以上,全年均高于草地贪夜蛾的世代发育起点温度,在这些地区草地贪夜蛾可以正常发育,为草地贪夜蛾的周年繁殖区域。黏虫的发育起点温度为 9.6℃,全世代有效积温为 685.2 日·度[31],在我国各区域的发生代次为:华南(27°N 以南) 6～8 代,中南(27°N～33°N)5～6 代,江淮(33°N～36°N)4～5 代,华北(36°N～39°N) 3～4 代和东北(39°N 以北) 2～3 代[33]。与黏虫相比,草地贪夜蛾在各区域的发生代数相对较低,这可能由于草地贪夜蛾的全世代发育起点温度(12.6℃)高于黏虫的全世代发育起点温度,其需要较高的环境温度才能开始生长发育,因此全年发生总世代数相对减少。

2019 年草地贪夜蛾已经侵入我国除青海、新疆、辽宁、吉林、黑龙江等 5 省以外的所有区域,专家预测 2020 年其为害范围还将进一步扩大。云南、广东、广西、海南、福建等地为草地贪夜蛾的周年繁殖区[30],这与本研究预测的分布范围及周年繁殖区域的划分基本一致。云南、广西、广东、海南等地玉米周年种植,特别是该区域冬玉米的种植,为该虫的周年发生提供了充足的食物来源,也为该虫向长江及淮河流域的迁飞提供了大量虫源。同时,我国玉米等作物的种植布局随季节和纬度变化从南至北递次推移,时间和空间上互补的食物资源可促使草地贪夜蛾种群区域性迁移为害[33-34]。随着草地贪夜蛾在我国的定殖,该虫可能会形成与黏虫类似的季节性往返迁飞规律,将会严重威胁我国的粮食安全;并且草地贪夜蛾大龄幼虫具有捕食习性,可攻击取食其他害虫和部分天敌,在生态位竞争中占据较大的优势[35],会对农田生态系统造成严重的破坏。

值得一提的是,本研究中草地贪夜蛾全国发生世代数的计算与划分是基于分布在全国的 605 个区域级气象站点的历史气象数据,并利用 ArcGIS 软件的插值功能对气象站点以外的区域进行插值而得到的。由于这 605 个气象站点的分布并不均匀,中东部区域分布较多,而西部如西藏、新疆等地分布相对较少,这样计算出来的数值可能和实际情况存在一些差异,气象站点较为密集的地域精度相对较高,而站点少的地域精度相对偏低。本研究中年发生世代数是根据 30 年的气象数据计算得到的平均值,受全球气候变化的影响,气温年际间存在差异,可能会与将来田间实际调查观测到的世代发生情况产生一定的出入。此外,插值模型本身局限性等因素也可能会对田间实际发生情况一致性产生影响。尽管如此,本研究结果将会为摸清草地贪夜蛾田间发生规律以及提高其预测预报及田间防治水平提供重要依据。

最后,本研究虫源饲养在恒温条件下,而自然环境中的温度是时刻发生改变的,今后有必要进一步研究自然变温条件下草地贪夜蛾世代的发育起点温度和有效积温;寄主植物在不同区域的分布情况也会对草地贪夜蛾的发生世代数产生影响;同时还应综合考虑降水、湿度、光周期等其他环境因子的影响。因此,下一步应加强田间草地贪夜蛾发生世代数的调查工作,结合理论预测结果,为草地贪夜蛾的精准预测预报及田间防治提供科学依据。

参考文献

[1] TODD E L, POOLE R W. Keys and illustrations for the armyworm moths of the noctuid genus *Spodoptera* Guenée from the Western Hemisphere [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1980, 73(6): 722-738.

[2] MONTEZANO D G, SPECHT A, BORTOLIN T M, et al. Immature stages of *Spodoptera albula* (Walker) (Lepidoptera: Noctuidae): Developmental parameters and host plants [J]. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 2013, 85(1): 271-284.

[3] WYCKHUYS K A G, O'NEIL R J. Population dynamics of *Spodoptera frugiperda* Smith (Lepidoptera: Noctuidae) and associated arthropod natural enemies in Honduran subsistence maize [J]. Crop Protection, 2006, 25(11): 1180-1190.

[4] 谢殿杰, 张蕾, 程云霞, 等. 不同温度下草地贪夜蛾年龄-阶段实验种群两性生命表的构建[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 20-27.

[5] MURÚA G, MOLINA-OCHOA J, COVIELLA C. Population dynamics of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) and its parasitoids in northwestern Argentina [J]. Florida Entomologist, 2006, 89(2): 175-183.

[6] LUGINBILL P. The fall armyworm [R]. USDA Technology Bulletin, 1928, 34: 91.

[7] ROSE A H, SILVERSIDES R H, LINDQUIST O H. Migration flight by an aphid, *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae), and a noctuid, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [J]. The Canadian Entomologist, 1975, 107(6): 567-576.

[8] SPARKS A N. A review of the biology of the fall armyworm [J]. Florida Entomologist, 1979, 62(2): 82-87.

(下转 116 页)

[11] 王金信,鲁梅.除草剂助剂的研究进展[J]. 世界农药,2008,30(1):34-39.
[12] 马晓峰.提高农药利用率的技术[J]. 植物医生,2018,31(4):49-51.
[13] 肖晓华. 农药利用率的影响因子及其应对措施[J]. 南方农业,2017,11(7):5-7.
[14] 邵振润,张帅. 提高我国农药利用率的主要措施与对策[J].农药,2014,53(5):382-385.
[15] 王奕,杜凤沛. 提高农药利用率是农药减量的核心技术[J].营销界(农资与市场),2016(6):57-59.
[16] 何玲, 王国宾, 胡韬, 等. 喷雾助剂及施液量对植保无人机喷雾雾滴在水稻冠层沉积分布的影响[J]. 植物保护学报, 2017,44(6):1046-1052.
[17] 兰玉彬,陈盛德,邓继忠, 等. 中国植保无人机发展形势及问题分析[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(5): 217-225.
[18] ASAE. Spray tip classification by droplet size: S-572[S]. American Society of Agricultural Engineers,2004:64-68.
[19] HE Xiongkui, BONDS J, HERBST A, et al. Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2017, 10(3):18-30.
[20] 程应德,郑在武,张超,等.植保无人机结合飞防助剂施药防治水稻纹枯病的效果[J].中国植保导刊,2019,39(6):74-75.
[21] 彭志清,柏超,宁国云.基于农药减量下植保无人机施药对水稻病虫害防效的影响[J].中国稻米,2019,25(2):106-107.
[22] 张淑玲,李朝辉,孙金旺,等."迈飞""迈丝"助剂应用农药减量对小麦蚜虫的田间防治效果[J].农业科技通讯,2018(12):79-80.
[23] 岳德成,姜延军,李青梅,等.植保无人机喷施对玉米田土壤处理除草剂的减量效应[J].植物保护,2019,45(2):193-198.
[24] 陶波,孔令伟.无人机喷雾雾滴分布研究[J].东北农业大学学报,2018,49(8):64-72.

(责任编辑:田 喆)

(上接67页)

[9] JOHNSON C G. Migration and dispersal of insects by flight [M]. London: Methuen, 1969: 745-763.
[10] JOHNSON S J. Migration and the life history strategy of the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* in the Western Hemisphere [J]. International Journal of Tropical Insect Science, 1987, 8(4/5/6): 543-549.
[11] DAY R, ABRAHAMS P, BATEMAN M, et al. Fall armyworm: impacts and implications for Africa [J]. Outlooks on Pest Management, 2017, 28(5): 196-201.
[12] 刘刚. 全国农技中心通报 我国及周边国家草地贪夜蛾发生为害情况[J]. 农药市场信息, 2019(9): 59.
[13] 杨学礼, 刘永昌, 罗茗钟, 等. 云南省江城县首次发现迁入我国西南地区的草地贪夜蛾[J]. 云南农业, 2019(1): 72.
[14] 吴秋琳, 姜玉英, 吴孔明. 草地贪夜蛾缅甸虫源迁入中国的路径分析[J]. 植物保护, 2019, 45(2): 1-6.
[15] 郭井菲, 赵建周, 何康来, 等. 警惕危险性害虫草地贪夜蛾入侵中国[J]. 植物保护, 2018, 44(6): 1-10.
[16] BROUFAS G D, PAPPAS M L, KOVEOS D S. Effect of relative humidity on longevity, ovarian maturation, and egg production in the olive fruit fly (Diptera: Tephritidae) [J]. Annals of the Entomological Society of America, 2009, 102(1): 70-75.
[17] RIDGWAY R L, GYRISCO GG. Effect of temperature on the rate of development of *Lygus lineolaris* (Hemiptera: Miridae) [J]. Annals of the Entomological Society of America, 1960, 53(5): 691-694.
[18] 仵均祥. 农业昆虫学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 23.
[19] BARTEKOVA A, PRASLICKA J. The effect of ambient temperature on the development of cotton bollworm (*Helicoverpa armigera* Hübner, 1808) [J]. Plant Protection Science, 2016, 42: 135-138.
[20] 何莉梅, 葛世帅, 陈玉超, 等. 草地贪夜蛾的发育起点温度、有效积温和发育历期预测模型[J]. 植物保护, 2019, 45(5): 18-26.
[21] 张红梅, 尹艳琼, 赵雪晴, 等. 草地贪夜蛾在不同温度条件下的生长发育特性[J]. 环境昆虫学报, 2020, 42(1): 52-59.
[22] 秦誉嘉, 蓝帅, 赵紫华, 等. 迁飞性害虫草地贪夜蛾在我国的潜在地理分布[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 43-47.
[23] 卢辉, 唐继洪, 吕宝乾, 等. 草地贪夜蛾的生物防治及潜在入侵风险[J]. 热带作物学报, 2019, 40(6): 1237-1244.
[24] 葛世帅, 何莉梅, 和伟, 等. 草地贪夜蛾的飞行能力测定[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 28-33.
[25] 郭井菲, 何康来, 王振营. 草地贪夜蛾的生物学特性、发展趋势及防控对策[J]. 应用昆虫学报, 2019, 56(3): 361-369.
[26] HOFFMANNA A, SØRENSEN J G, LOESCHCKE V. Adaptation of Drosophila to temperature extremes: bringing together quantitative and molecular approaches [J]. Journal of Thermal Biology, 2003, 28(3): 175-216.
[27] CUI Xuhong, WAN Fanghao, XIE Ming, et al. Effects of heat shock on survival and reproduction of two whitefly species, *Trialeurodes vaporariorum* and *Bemisia tabaci* biotype B [J]. Journal of Insect Science, 2008, 8(24): 1-10.
[28] SCHLEMMER M. Effect of temperature on development and reproduction of *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae) [D]. Evanston: North-West University, 2018.
[29] RAMIREZ G, BRAVO M, LLANDERAL C. Development of *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) under different conditions of temperature and humidity [J]. Agrociencia, 1987(67): 161-171.
[30] 姜玉英, 刘杰, 谢茂昌, 等. 2019年我国草地贪夜蛾扩散为害规律观测[J]. 植物保护, 2019, 45(6): 10-19.
[31] 林昌善. 粘虫生理生态学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1990: 518-526.
[32] 李光博, 王恒祥, 胡文绣. 粘虫季节性迁飞为害假说及标记回收试验[J]. 植物保护学报, 1964, 3(2): 101-110.
[33] 杨普云, 朱晓明, 郭井菲, 等. 我国草地贪夜蛾的防控对策与建议[J]. 植物保护, 2019, 45(4): 1-6.
[34] 吴秋琳, 姜玉英, 胡高, 等. 中国热带和南亚热带地区草地贪夜蛾春夏两季迁飞轨迹的分析[J]. 植物保护, 2019, 45(3): 1-9.
[35] 吴孔明. 中国草地贪夜蛾的防控策略[J]. 植物保护, 2020, 46(2): 1-5.

(责任编辑:田 喆)