

DOI: 10.5846/stxb202203080553

杜晶晶, 张越, 潘彦平, 周晓然, 张学武, 石娟. 北京地区美国白蛾时空分布变化及其影响因素. 生态学报, 2023, 43(13): 5480-5490.

Du J J, Zhang Y, Pan Y P, Zhou X R, Zhang X W, Shi J. Spatiotemporal distribution of *Hyphantria cunea* (Drury) in Beijing and its influencing factors. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(13): 5480-5490.

北京地区美国白蛾时空分布变化及其影响因素

杜晶晶¹, 张越², 潘彦平³, 周晓然⁴, 张学武⁴, 石娟^{1,*}

1 北京林业大学 林学院, 北京 100083

2 北京市海淀区圆明园管理处, 北京 100084

3 北京市林业保护站, 北京 100029

4 北京市房山区园林绿化局 林果科技服务中心, 北京 102488

摘要: 美国白蛾是我国农林对外重大检疫对象之一, 已经对我国的生态和经济造成了巨大损失, 且十分难以防治。基于地统计学和地理信息系统原理, 通过半变异函数分析, 选取最优拟合模型, 利用克里金插值法对 2008—2016 年北京地区美国白蛾的种群时空分布特征进行制图, 并结合气象数据, 运用冗余分析探究了美国白蛾种群动态变化与气候因子的关系。结果表明: (1) 空间特征上, 美国白蛾种群呈现聚集分布, 分布趋势为东部、南部高, 西部、北部少, 主要集中在海拔 400m 以下的地区; (2) 时间特征上, 北京地区的美国白蛾种群一年 3 代, 单年内越冬代数远大于第一代和第二代, 第一代和第二代种群数量相近, 到次年越冬代种群数量回升, 依此呈现周期性变化; (3) 冗余分析结果显示影响北京地区美国白蛾种群变化与 3 月份平均相对湿度、7 月份平均气温、上一年 8 月份最高温度呈正相关关系, 与 2 月份日照时数、4 月份最高温度、上一年 9 月份最低温度呈负相关关系; (4) 插值结果表明在北京东部和南部边界与河北省交界处分布有一个较大的美国白蛾种群, 能够影响该地区的美国白蛾种群数量。

关键词: 美国白蛾; 空间分布; 地统计学; 地理信息系统; 冗余分析

Spatiotemporal distribution of *Hyphantria cunea* (Drury) in Beijing and its influencing factors

DU Jingjing¹, ZHANG Yue², PAN Yanping³, ZHOU Xiaoran⁴, ZHANG Xuewu⁴, SHI Juan^{1,*}

1 College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 The Administrative Office of Yuanmingyuan, Beijing 100084, China

3 Beijing Forestry Protection Station, Beijing 100029, China

4 Forest Fruit Technology Service Center, Fangshan District Landscaping Bureau, Beijing 102488, China

Abstract: *Hyphantria cunea* (*H. cunea*) is one of the major quarantine objects in China, which has caused great losses to the ecology and economy, and it is very difficult to control. Based on the principles of geostatistics and geographic information system, this study selected the best fitting model through semi variogram analysis, and mapped the spatial and temporal distribution characteristics of the population of American white moth in Beijing from 2008 to 2016 by Kriging interpolation method, exploring the relationship between the *H. cunea* population dynamics and climate factors by redundancy analysis (RDA). The results showed that: (1) in terms of spatial characteristics, the populations of the *H. cunea* presented a clustering distribution trend, which was higher in the east and south, less in the west and north, and mainly concentrated in the areas below 400 meters above sea level. (2) In terms of time characteristics, the populations of

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021YFC2600400)

收稿日期: 2022-03-08; 网络出版日期: 2023-03-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: BJshijuan@bjfu.edu.cn

H. cunea in Beijing had three generations a year, showing periodic changes. The number of overwintering generations was much larger than that of the first and second generations, and the populations of the first and second generations were similar. (3) The results of RDA showed that the population of *H. cunea* in Beijing was positively correlated with the averagely relative humidity in March, the average temperature in July and the maximum temperature in August of the previous year, and negatively correlated with the sunshine hours in February, the maximum temperature in April and the minimum temperature in September of the previous year. (4) The interpolation results showed that there was a large population of *H. cunea* at the junction of the eastern and southern borders of Beijing and Hebei Province, which can affect the population of *H. cunea* in this area.

Key Words: *Hyphantria cunea*; spatial distribution; Geostatistics; Geographic Information System; redundancy analysis

我国农林业受到有害生物危害造成的生态和经济损失巨大,掌握其空间分布格局及动态变化规律是进行防治的前提。随着地统计学(Geostatistics, GS)和地理信息系统(Geographic Information System, GIS)的发展和应用,有害生物种群的时空动态变化研究有了新的思路 and 工具^[1]。地统计学与传统统计学不同,不仅关注样本的数字特征以外,还关注样本数据的空间分布特征,侧重于区域化变量的空间结构分析、模拟、空间插值^[2]。地理信息系统具有强大的空间分析功能,在查询、编辑、显示、以及海量数据处理方面具有优势,可用于空间数据的管理、模拟与预测,以及可视化展示等^[3-4]。将二者相结合应用于害虫种群的时空动态研究十分广泛,比如,季荣^[5]、娄国强^[3]、潘宏阳^[6]等人将 GS 和 GIS 分别应用于东亚飞蝗卵块、春尺蠖及松材线虫的时空分布研究中。

美国白蛾 *Hyphantria cunea* (Drury) 是世界性的检疫害虫,不仅寄主广泛,食性杂,会危害林木、花卉、农作物、蔬菜等,而且繁殖量大,在我国有的地方一年 2 代,有的地方甚至 3 代,因此经常暴发成灾,种群数量大时甚至会入户扰民,影响人们的正常生活^[7]。自 2003 年在北京市平谷区首次监测到美国白蛾幼虫后,美国白蛾在北京地区逐渐扩散,对社会环境、经济、生态等各方面造成了极大的损失^[8]。本文利用 GS 和 GIS,对北京地区美国白蛾种群的时空分布特点及动态变化规律进行了分析,明确了北京地区美国白蛾种群的分布情况,并结合气候数据、地形数据、人口统计数据探究影响美国白蛾种群时空分布变化的因素。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究地点为北京市,位于东经 115.7°—117.4°,北纬 39.4°—41.6°,东部和南部是平原,而西部和北部是山区。平原地区的年平均气温在 12℃ 左右,7 月份温度最高,平均气温 26℃;1 月份温度最低,平均气温在 -5℃ 左右。而海拔高的山区温度普遍比平原低,年平均气温 10℃ 左右,最热月份和最冷月份均比平原地区低 2—5℃,属于暖温带半湿润半干旱季风气候。美国白蛾在北京地区一年有 3 代^[9],危害极其严重。

1.2 数据来源

本研究中使用的美国白蛾监测数据从北京市林业保护站测报处获得,主要利用性诱捕器(Trap)和诱虫灯(moth-killing lamp)在北京市 16 个区县的 3000 多个采样点诱捕美国白蛾。研究选取自 2008—2016 年的监测数据,原始监测记录共 38371 条,经过整合之后,用于插值与分析的样本点共有 14372 个。气候数据来源于国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn>),包括各月份的最高最低温度、平均温度、日照时数、平均相对湿度,以及降水量。地形数据主要使用的是地理空间数据云网站(<http://www.gscloud.cn>)的数字高程模型数据。北京市常住人口数据来源于 2014 年北京统计年鉴。

1.3 研究方法

1.3.1 数据预处理

利用 Geostatistical Analyst 工具条中探索数据的 Voronoi 图^[10]功能,对整理后美国白蛾的监测数据进行预

处理,去除观测中的局部异常值,提高插值精度。异常值主要是由于在诱捕过程中,诱捕器悬挂位置可能存在过密的情况,导致相邻诱捕器的虫口差异较大;其次在人工统计过程中可能出现个别差错。处理异常值的方法是将 Voronoi 统计量选择“聚类”,聚类结果通过不同的色带显示,根据地理学第一定理可知,空间上越相近的事务,相关性越大^[11-12],若局部值异常高或异常低,则 Voronoi 图中该异常点所在的多边形颜色与周围不同,该点则需要删除。

1.3.2 半变异函数分析

半变异函数分析是为了揭示区域化变量的空间依赖关系,从而推测一定范围内该区域化变量的变化规律^[13-14]。半变异函数可以检验所采集的样本数据中是否存在空间自相关^[15],若空间自相关弱或没有空间自相关则不能用克里金进行插值。其计算公式^[16]如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

式中, $\gamma(h)$ 是样点间距的半方差,该值随着 h 的增加而增加, $Z(x_i)$ 和 $Z(x_i + h)$ 表示在 x_i 和 $x_i + h$ 位置上的美国白蛾诱捕的虫口数量, $N(h)$ 是间距为 h 的成对样本点总数^[17-18]。

半变异函数曲线如图 1 所示:块金常数(C_0)能够反映半变异函数的空间异质性^[19-20];基台值(Sill)是随着样本点的间距不断增大而趋于稳定的常数^[21];变程(a)表示在一定观测尺度下,空间相关性的作用范围,在变程范围内,样本点距离越近,其相似性越大,当距离大于变程,样本点则可以看作是完全独立的^[22-23]。常见的半变异函数模型有:指数模型、高斯模型、球状模型、线性有基台值模型、线性无基台值模型、对数模型等^[24-25]。通常,残差平方和(RSS)越小,决定系数(R^2)越大,模型精度越高^[26],最佳模型的平均值标准化误差和平均误差接近于 0。

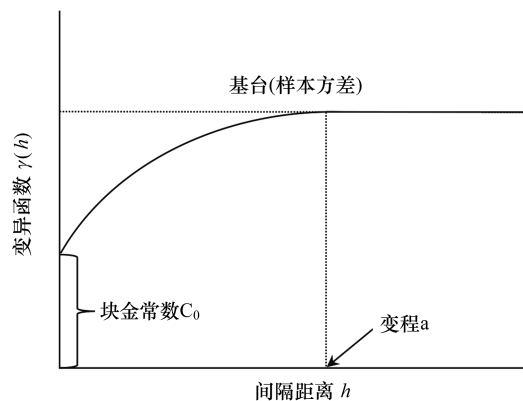


图 1 半变异函数曲线图

Fig.1 Semivariogram graph

1.3.3 空间模拟插值

克里金(Kriging)插值法是基于半变异函数理论分析的结果^[27],无偏的估算一定范围内未知点取值的一种方法^[28]。该方法利用周围样本点的值确定待估计点的权重,以估计未测量点的值,充分考虑了样本点的大小和样本点与待估计点之间的空间自相关关系^[29]。克里金插值的结果准确度与样本量有关,样本量越多,结果越精确。本研究利用普通克里金插值法对北京地区美国白蛾种群的空间分布特征进行定量分析,制作 2008—2016 年不同世代美国白蛾的空间分布地图,直观地展示其分布情况,进而为防治提供理论依据。

1.4 统计及分析软件

昆虫的发育受气候因素影响是综合性的,且在不同年份之间表现出的差异较大。为了明确北京地区美国白蛾的成虫数量与气象因子之间的关系,本研究使用 R 软件进行不同世代成虫数量与气象因子的 Pearson 相关性分析;然后利用 Vegan 包^[30]进行美国白蛾的成虫数量去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA),因为 DCA 最大梯度长度值小于 3,所以最终选用限制性排序法——冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)^[31-33]。最后基于 999 个随机排列进行蒙特卡罗置换检验以确定每个气候因子在解释成虫数量变化中的相对重要性和显著性^[34-35]。

本研究使用 SPSS 18.0 对数据进行批量处理,使用百度地图 API 获取美国白蛾诱捕点的坐标,半变异函数分析与半变异理论模型拟合是在 GS+ 7.0 软件中完成,数据预处理、地统计分析结果制图在 ArcGIS 10.2 软件中完成。

2 结果与分析

2.1 北京地区美国白蛾种群的半变异函数分析

根据北京市 2008—2016 年各代美国白蛾成虫数量的半变异函数分析和理论模型拟合结果(表 1)可以看出,各代美国白蛾成虫的种群分布均存在空间相关性。模型拟合程度较高,块金值相较于基台值都比较小,平均占比为 35%,最低为 3.6%,说明随机因素引起的空间变异小于空间相关性的影响。一般情况下,球型和指数型半变异函数说明所研究的空间分布对象属聚集分布^[36],表 1 中理论模型结果显示,球形模型和指数模型共有 18 个,占比 66.67%,说明北京地区美国白蛾种群在多数情况下呈聚集分布。其他的理论模型有高斯模型、线性有基台值模型,表明种群在一定程度上呈现中等程度聚集分布。

表 1 北京地区美国白蛾种群半变异函数模型拟合结果

Table 1 The fitting result of semivariogram models of the Fall webworm population in Beijing area

年份 Year	世代 Generation	理论模型 Model	块金常数 Nugget C_0	基台值 Sill	变程 Range a	决定系数 R^2	残差平方和 Residual sum of squares (RSS)
2008	越冬代	指数模型	0.134	1.171	0.184	0.7	0.17
2008	第一代	指数模型	0.388	0.888	1.74	0.688	0.17
2008	第二代	高斯模型	0.702	2.451	0.802	0.842	0.903
2009	越冬代	指数模型	0.118	0.806	0.075	0.631	0.018
2009	第一代	线性有基台值模型	0.542	0.942	0.809	0.738	0.111
2009	第二代	指数模型	0.705	2.016	5.103	0.804	0.087
2010	越冬代	线性有基台值模型	0.877	1.277	0.928	0.581	0.132
2010	第一代	指数模型	0.243	1.882	0.251	0.613	0.194
2010	第二代	指数模型	0.171	1.438	0.147	0.573	0.216
2011	越冬代	线性有基台值模型	0.937	1.485	0.869	0.753	0.125
2011	第一代	指数模型	0.104	0.8	0.557	0.623	0.059
2011	第二代	线性有基台值模型	0.613	0.842	0.659	0.574	0.498
2012	越冬代	线性有基台值模型	0.563	0.677	0.869	0.58	0.1
2012	第一代	指数模型	0.173	1.014	0.063	0.64	0.358
2012	第二代	球形模型	0.318	0.637	0.253	0.723	0.29
2013	越冬代	指数模型	0.21	1.459	0.166	0.591	0.156
2013	第一代	线性有基台值模型	1.003	1.454	0.618	0.693	0.542
2013	第二代	指数模型	0.205	1.403	0.087	0.583	0.416
2014	越冬代	球形模型	0.523	1.166	0.226	0.558	0.586
2014	第一代	指数模型	0.157	1.239	0.439	0.601	0.545
2014	第二代	球形模型	0.106	1.701	0.259	0.613	0.243
2015	越冬代	球形模型	0.227	0.979	0.198	0.791	0.366
2015	第一代	指数模型	0.306	0.982	0.254	0.672	0.087
2015	第二代	高斯模型	0.421	1.146	0.48	0.801	0.033
2016	越冬代	球形模型	0.746	1.033	0.099	0.632	0.546
2016	第一代	高斯模型	0.352	1.013	0.081	0.589	0.761
2016	第二代	指数模型	0.056	1.557	0.48	0.658	0.952

2.2 北京地区美国白蛾种群的空间模拟插值

利用普通克里金插值法,结合变异函数结构拟合结果,对 2008—2016 年北京地区美国白蛾种群的空间分布进行插值分析,结果显示(表 2),各世代的平均误差和平均标准化误差基本接近 0,说明测量值和预测值之间误差较低;均方根误差与平均值标准误差之间的差值用来衡量模型预测测量值的接近程度,不同年份各世代的差值不同,但都基本达到了要求的精度,北京地区美国白蛾种群分布插值地图(图 2)与实际分布情况拟合度较好。

表 2 北京地区美国白蛾种群分布克里金插值精度评价表

Table 2 The accuracy of Kriging interpolation for population distribution of the Fall webworm in Beijing area

份 Year	世代 Generation	移除趋势 Trend removal	平均误差 Mean error	平均值标准化误差 Mean standardized error	均方根误差-平均标准误差 Root mean square error- average standard error
2008	越冬代	二阶	0.010	0.005	7.852
2008	第一代	一阶	0.081	0.006	0.482
2008	第二代	一阶	0.013	0.001	-0.231
2009	越冬代	无	0.016	0.005	11.449
2009	第一代	一阶	0.012	0.003	-0.122
2009	第二代	无	0.170	0.002	8.235
2010	越冬代	无	0.035	0.001	18.696
2010	第一代	无	0.124	0.019	4.479
2010	第二代	无	0.023	0.008	23.855
2011	越冬代	无	0.053	0.018	-3.070
2011	第一代	二阶	0.013	0.013	-0.240
2011	第二代	无	0.077	0.024	-1.066
2012	越冬代	二阶	0.039	0.039	1.750
2012	第一代	二阶	0.039	0.025	-3.113
2012	第二代	二阶	0.099	0.034	2.809
2013	越冬代	无	0.021	0.071	5.556
2013	第一代	二阶	0.113	0.004	-5.457
2013	第二代	一阶	0.019	0.026	-12.100
2014	越冬代	一阶	0.019	0.098	-7.979
2014	第一代	一阶	0.045	0.004	-0.030
2014	第二代	一阶	0.049	0.030	-13.234
2015	越冬代	一阶	0.009	0.043	1.894
2015	第一代	二阶	0.079	0.231	5.933
2015	第二代	无	0.054	0.003	1.701
2016	越冬代	无	0.013	0.063	1.636
2016	第一代	一阶	0.883	0.106	-0.563
2016	第二代	二阶	0.006	0.110	4.064

2.3 北京地区美国白蛾种群动态分析

克里金插值结果显示,2008—2016年北京地区单年内美国白蛾种群动态的变化情况基本类似。各世代成虫的分布有多个聚集中心,基本上都位于北京中心城区:东城区、西城区、朝阳区、海淀区、丰台区、顺义区等区县。其次,美国白蛾种群的聚集中心数量越多的年份,最大虫口密度越大,尤其是2010年和2013年,并且聚集中心的虫口密度与其它区域的虫口密度差值也较大,反之,聚集中心的数量减少,与周边的种群密度差值变小,说明美国白蛾的聚集程度与种群数量密切相关,基本上呈正相关关系。

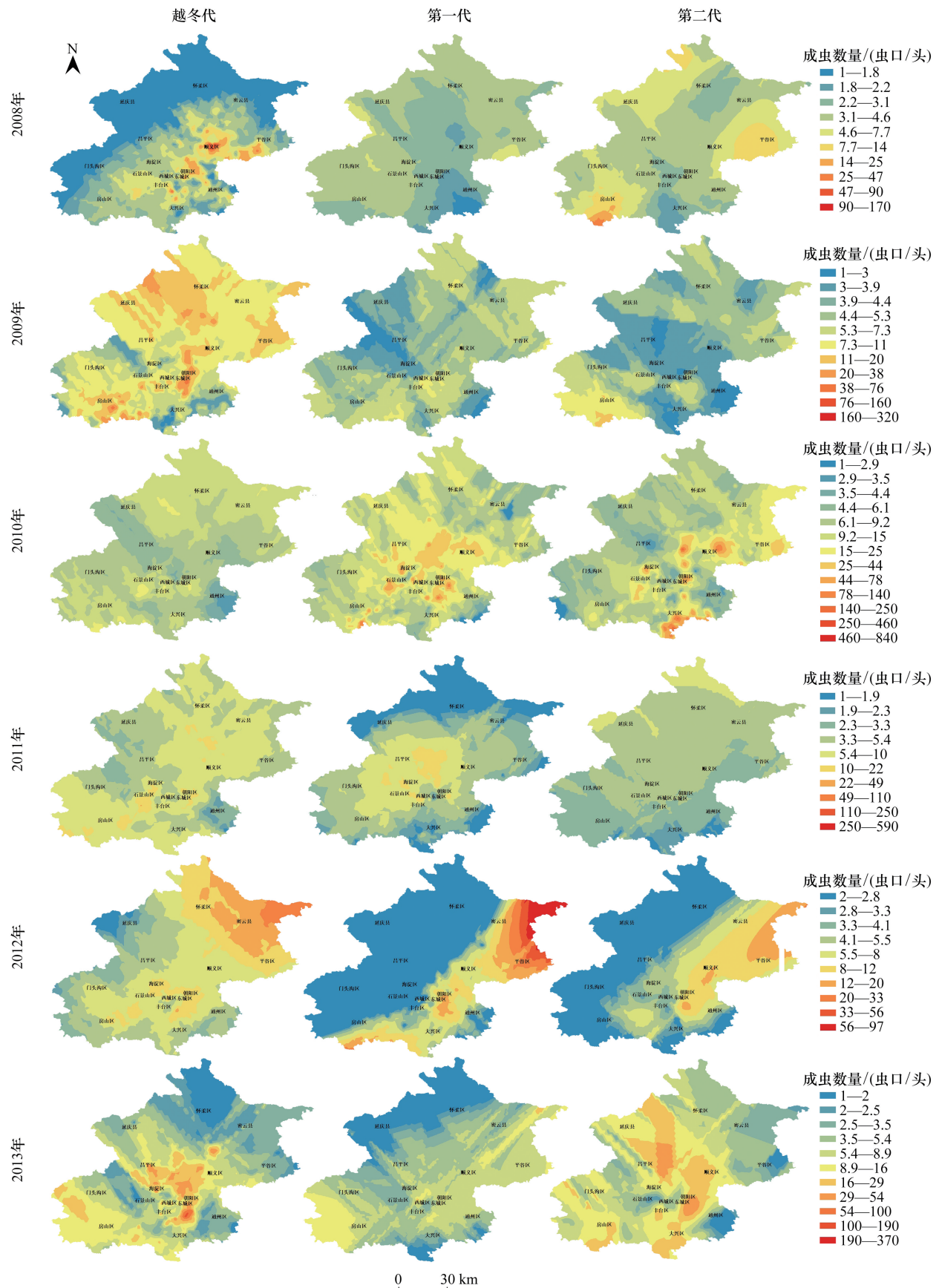
另外,统计各世代种群数量发现,北京地区美国白蛾的种群数量呈现有规律的波动变化(图3),单年内种群数量表现出下降的趋势,第一代成虫与第二代成虫的种群接近,但都低于当年越冬代成虫的数量,到第二年越冬代成虫数量回升,依此呈现周期性变化。由此可知,今后的防治重点应在越冬代蛹羽化成虫之前就开始防治,以控制美国白蛾越冬代成虫数量。

2.4 北京地区美国白蛾时空分布影响因素分析

2.4.1 气候因素

蒙特卡洛置换检验结果(表3)表明,气象因子对北京地区美国白蛾成虫数量的影响是显著的($P=0.017<0.05$)。从RDA排序图(图4)中可以看出,前两个轴共解释了94.28%的数据,Tavg7、Tmax8S、RHU3与RDA1

呈正相关关系,SSD2、Tmax4 则与 RDA1 呈负相关关系。美国白蛾以滞育蛹越冬,但温度升高会加快昆虫滞育期间的新陈代谢率,所以 2 月份长时间的日照增加了美国白蛾越冬期间的能量消耗,进而降低其越冬代的成



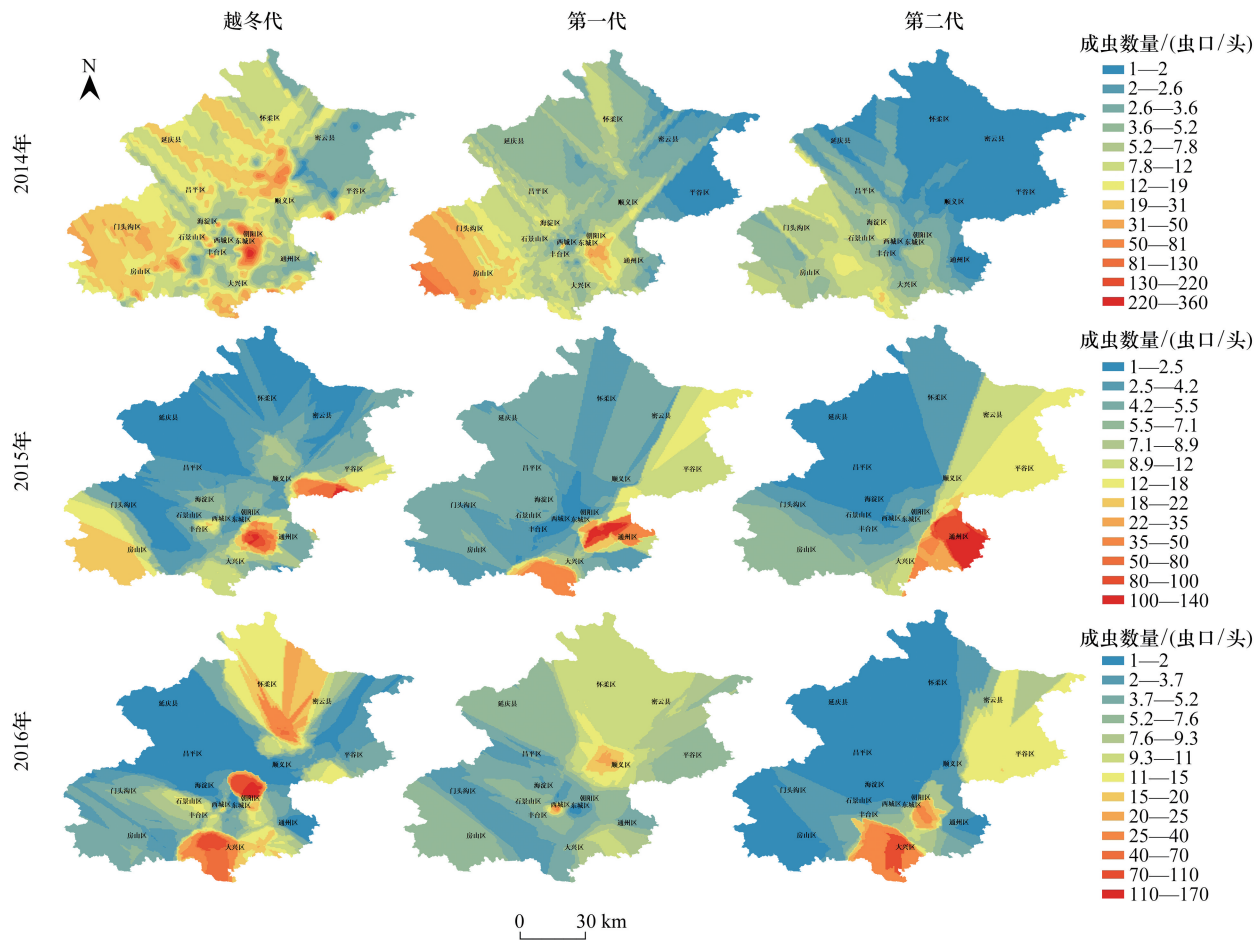


图2 2008—2016年北京地区美国白蛾种群分布

Fig.2 The population distribution of the Fall webworm in Beijing area from 2008 to 2016

活率^[37—38];而美国白蛾解除滞育需经过一段较长时间的低温才能完成^[39—40],并且喜欢潮湿的环境,北京地区美国白蛾越冬代在4月初逐渐开始羽化成虫^[41],4月份气温越高,则相对湿度越低,因此不利于解除滞育,甚至会导致蛹干瘪死亡。7月份是第一代成虫羽化高峰期,成虫羽化2d后即可产卵^[41],由于北京地区夏季雨热同期,所以高温潮湿的环境十分适合美国白蛾生长发育。

8月上旬为第二代幼虫野外网幕高峰期,下旬越冬代幼虫开始出现^[41],次年的越冬代种群数量与前一年第二代成虫的数量密切相关($r=0.785$),8月份最高温度与当年第二代成虫数量正相关,进而影响次年美国白蛾种群数量。虽然 T_{min9S} 的检验结果并不显著($P=0.118>0.05$),但其与 $RDA2$ 的相关性极强($r=0.956$)。对美国白蛾而言,滞育诱导的敏感虫态是在幼虫期1—3龄,诱导其越冬滞育的主要诱因之一就是低温^[42],9月份的温度越低,则幼虫会更敏感,更早进行能量储备,成功越冬的机率更大,导致次年越冬代成虫数量上升。

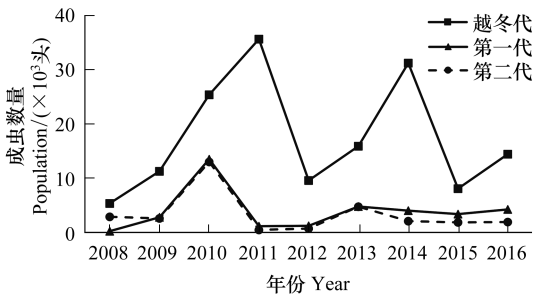


图3 2008—2016年北京地区美国白蛾各代数量动态变化

Fig.3 The population dynamic of generations of the Fall webworm in Beijing area from 2008 to 2016

表 3 气象因子与第一轴、第二轴的相关系数及模型的显著性检验结果

气象因子 Meteorological factors	第一轴 RDA1	第二轴 RDA2	R^2	P
2 月份日照时数 SSD2	-0.6571	0.7538	0.6843	0.017 *
7 月份平均温度 Tav7	0.9425	-0.3344	0.7735	0.024 *
3 月份平均相对湿度 RHU3	0.6654	0.7465	0.6073	0.057.
上一年 8 月份最高温度 Tmax8S	0.8528	-0.5222	0.6360	0.057.
4 月份最高温度 Tmax4	-0.9898	-0.1427	0.5969	0.076.
上一年 9 月份最低温度 Tmin9S	0.2933	0.9560	0.5172	0.118
Model	—	—	—	0.017 *

SSD2:2 月份日照时数 Sunshine hours in February;Tav7:7 月份平均温度 Average temperature in July;RHU3:3 月份平均相对湿度 Average relative humidity in March;Tmax8S:上一年 8 月份最高温度 Maximum temperature in August of the previous year;Tmax4:4 月份最高温度 Maximum temperature in April;Tmin9S:上一年 9 月份最低温度 Minimum temperature in September of the previous year; ‘ * ’ 表示 $P<0.05$, ‘ . ’ 表示 $P<0.1$

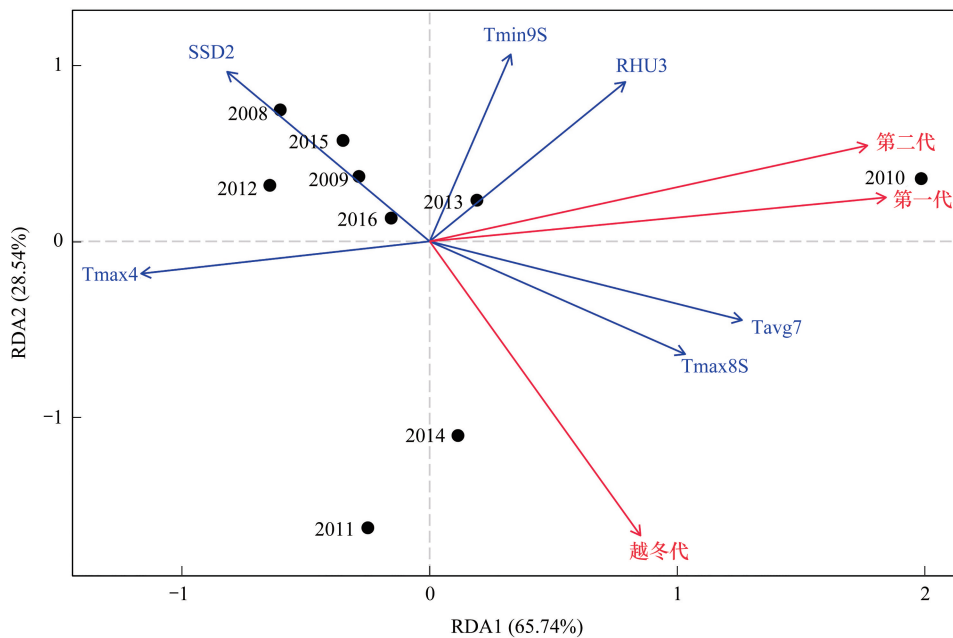


图 4 北京地区不同世代美国白蛾的成虫数量与气象因子 RDA 排序图

Fig.4 RDA ordination diagram of Fall webworm population and meteorological factors in Beijing area

RDA:冗余分析 Redundancy analysis;RDA1 和 RDA2 分别表示第一排序轴、第二排序轴;SSD2:2 月份日照时数;Tav7:7 月份平均温度;RHU3:3 月份平均相对湿度;Tmax8S:上一年 8 月份最高温度;Tmax4:4 月份最高温度;Tmin9S:上一年 9 月份最低温度

2.4.2 地形

从图 5 可以看出,北京地区美国白蛾的诱捕记录主要分布在城区中部和东南部的低海拔平原地区,而在北部和西部的高海拔地区诱捕点比较少,可以看出美国白蛾种群的空间分布受海拔高度的影响十分显著。有研究表明,随着海拔的升高,美国白蛾生存概率下降^[43],并且,美国白蛾的飞行能力弱,成虫飞行距离一般为 100m 左右^[44]。因此,在北京地区高海拔的山区美国白蛾种群数量很小。

2.4.3 人为干扰

北京地区美国白蛾的诱捕记录分布与常住人口密度高度一致。从图 6 可以看出,北京中心城区的常住人口显著高于周围郊区,诱捕到美国白蛾的分布点则刚好集中在东城区、西城区、海淀区、朝阳区、丰台区,而人口较少的郊区只零星分布着少量美国白蛾的诱捕记录,如门头沟区、延庆区、怀柔区等区县。结合各年的插值

结果地图可以看出,人口密集的区域往往是美国白蛾种群密度最大的聚集中心,虫口密度高出远郊区县几十倍,说明人为干扰因素也会显著影响美国白蛾种群的分布。

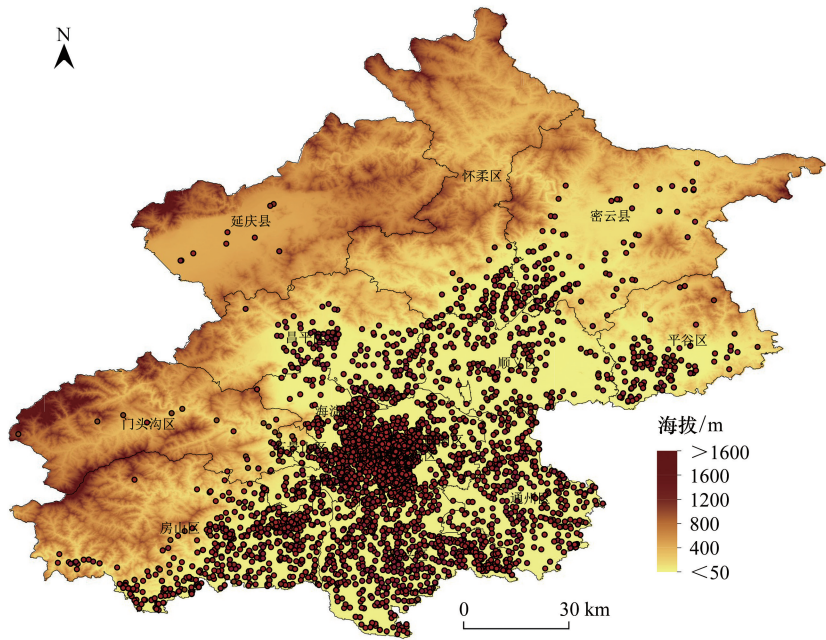


图 5 北京地区美国白蛾诱捕记录分布与高程叠加图

Fig.5 The trapping record and elevation superposition map of the Fall webworm in Beijing area

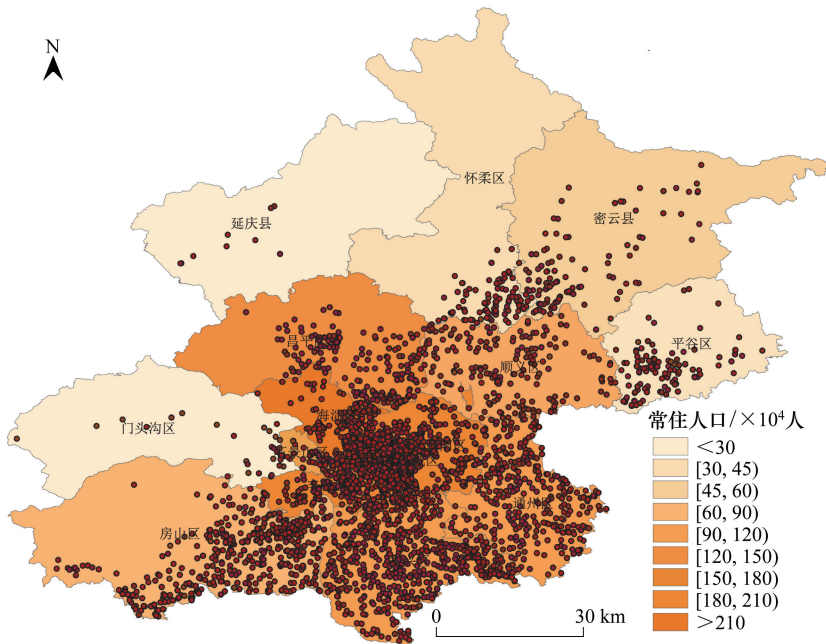


图 6 北京地区美国白蛾诱捕记录分布与常住人口分布叠加图

Fig.6 The trapping record and resident population superposition map of the Fall webworm in Beijing area

3 讨论

相对于最早入侵的平谷区,2008—2016 年期间,美国白蛾的聚集中心主要在人口密集的核心城区。克里

金插值结果显示,聚集中心区县的虫口密度远高于周围其他区县,说明这些区域是美国白蛾的高度适生区^[9]。平谷区及其附近地区的美国白蛾虫口密度,虽然低于聚集中心区县,但仍高于其他非聚集中心的区县。作为美国白蛾在北京地区的首次入侵地,平谷区可能一直受北京市以外其他地区美国白蛾种群的影响,不断有美国白蛾传入,从 2012 年的三张插值地图可以看出,平谷区的美国白蛾种群密度显著高于其他地区。与平谷区交界的是河北省承德市兴隆县,据报道该县经过连续九年的监控防治,至 2014 年全县的美国白蛾发生面积和有害株率显著下降^[45],从图 2 的插值地图可以看出,2013 和 2014 年平谷区的虫口密度明显低于 2012 年,因此推测该地区附近分布有一个较大的美国白蛾种群,能够影响平谷区的美国白蛾种群数量,进而影响着北京其他区县的美国白蛾种群数量。另外,通州区和大兴区的美国白蛾种群也不可忽视,在 2015 和 2016 年的插值地图中,这两个区的美国白蛾种群密度较高,同样地,这两个地区也是河北省交界。因此,在防治美国白蛾的过程中,不仅要关注当地的危害情况,也应加强与周边地区的联防联控。

本文运用地统计学方法(GS)和地理信息系统(GIS)对 2008—2016 年北京地区美国白蛾时空分布变化进行了分析,研究结果与利用频次分布比较法^[46]、聚集度指标法^[47]等传统统计分析方法的研究结果一致,均表明美国白蛾在空间上呈聚集分布的特征,并且聚集程度随种群密度增大而增大。地统计学作为一种空间分析工具,并不是独立存在的^[5,48],将其与 GIS 结合应用于研究有害生物的空间分布动态格局,为掌握有害生物扩散机制提供了有力支撑。本研究由于未获取到最近几年北京地区美国白蛾的诱捕数据,无法与最新的时空分布比较,同时,收集的诱捕数据受人为经验影响,加上统计美国白蛾数量时可能遗漏或重复,导致插值结果存在一定误差,未来的研究可以从这几方面加以改进。

RDA 分析结果显示,有 6 年美国白蛾成虫数量变化与气象因子的关系变化是相似的,而 2010、2011、2014 年则与其他几年的差异较大。根据各世代数量动态变化(图 3)显示,2010 年第一代和第二代成虫数量明显高于其他年份,分析发现当年 7 月份平均温度和 8 月份最高温度比研究期间平均值高 1.1℃、1℃,充分说明了高温对美国白蛾第一代和第二代是十分有利的。2011 年和 2014 年越冬代成虫数量显著高于其他年份,这是由于前一年 9 月份最低温度比研究期间平均值低 2℃左右,可能增强了越冬代蛹滞育强度^[49-50],并且前一年第二代成虫数量比相邻年份成虫数量高,一定程度上增加了越冬代蛹的数量。

本文对北京地区美国白蛾成虫数量与气象因子的分析,未加入降水量因素,是因为降水量与相对湿度高度相关,避免数据冗余。美国白蛾喜潮湿环境,所以在防治过程中,除了温度、湿度、日照时数,也应当观测降水变化,适当的调整防治措施。另外,7 月中旬至 9 月下旬,世代重叠现象比较严重^[41],应采取多种措施防治各龄期的美国白蛾。

4 结论

空间特征上,美国白蛾种群呈现聚集分布,在北京地区不同区县之间的分布存在较大的差异,虫害发生较轻的区县虫口密度只有严重区县的几十分之一;整体上,美国白蛾集中分布在海拔 400m 以下的地区,东部和南部的平原地区较多,西部和北部的山区少。

时间特征上,北京地区的美国白蛾种群,越冬代数量远大于第一代和第二代,而第一代和第二代种群数量相近,次年亦是如此,呈周期性变化。

通过 RDA 分析气候因素对北京地区美国白蛾种群变化的影响,结果表明:北京地区美国白蛾种群动态与 3 月份平均相对湿度、7 月份平均气温、上一年 8 月份最高温度呈正相关关系;与 2 月份日照时数、4 月份最高温度、上一年 9 月份最低温度呈负相关关系。

参考文献(References):

- [1] Foster J R, Townsend P A, Mladenoff D J. Spatial dynamics of a gypsy moth defoliation outbreak and dependence on habitat characteristics. *Landscape Ecology*, 2013, 28(7): 1307-1320.
- [2] 胡碧峰. 基于地统计学与 GIS 的区域土壤重金属污染评价与不确定性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

- [3] 娄国强, 吕文彦, 余昊, 王登元, 王运兵. 基于 GS 和 GIS 的春尺蠖种群分布动态研究. 昆虫学报, 2006, 49(4): 613-618.
- [4] 陈述彭. 地理信息系统导论. 北京: 科学出版社, 1999: 10-15.
- [5] 季荣, 谢宝瑜, 李哲, 李典谟, 孟冬丽. 基于 GIS 和 GS 的东亚飞蝗卵块空间格局的研究. 昆虫学报, 2006, 49(3): 410-415.
- [6] 潘宏阳, 叶建仁, 吴小芹. 中国松材线虫病空间分布格局. 生态学报, 2009, 29(8): 4325-4331.
- [7] 张乃芹, 耿建芬, 王金梅. 鲁西北地区美国白蛾的发生规律及综合治理. 河南农业科学, 2011, 40(4): 109-112.
- [8] 杨忠岐, 张永安. 重大外来入侵害虫——美国白蛾生物防治技术研究. 昆虫知识, 2007, 44(4): 465-471.
- [9] 杨越. 基于 GS 和 GIS 的北京地区美国白蛾时空分布研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [10] Skare Ø, Møller J, Jensen E B V. Bayesian analysis of spatial point processes in the neighbourhood of Voronoi networks. Statistics and Computing, 2007, 17(4): 369-379.
- [11] Tobler W R. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. Economic Geography, 1970, 46(2): 234-240.
- [12] 李小文, 曹春香, 常超一. 地理学第一定律与时空邻近度的提出. 自然杂志, 2007, 29(2): 69-71.
- [13] 张大治, 陈小蔚, 贺达汉, 范玉婷. 基于地统计学的柠条豆象种群空间格局研究. 安徽农业科学, 2011, 39(07): 3988-3990, 4017.
- [14] 舒彦军. 地统计学半变异函数球状模型优化算法研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2012.
- [15] Matheron G. Principles of geostatistics. Economic Geology, 1963, 58(8): 1246-1266.
- [16] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用. 北京: 科学出版社, 1999: 40-40.
- [17] 刘迁迁, 苏里坦, 刘广明, 沙吾兰·哈斯木, 张音. 伊犁河谷察南灌区土壤盐分空间变异研究. 干旱区研究, 2017, 34(5): 980-985.
- [18] 尚白军, 郑博文, 周智彬, 王利界. 克拉玛依市玛依湖区土壤有机质空间异质性分析. 华南农业大学学报, 2021, 42(1): 72-81.
- [19] 郭旭东, 傅伯杰, 马克明, 陈利顶, 杨福林. 基于 GIS 和地统计学的土壤养分空间变异特征研究——以河北省遵化市为例. 应用生态学报, 2000, 11(4): 557-563.
- [20] 王苏颖. 云杉林生物量空间异质性研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2010.
- [21] 赵军, 张久明, 孟凯, 隋跃宇. 地统计学及 GIS 在黑土区域土壤养分空间异质性分析中的应用——以海伦市为例. 水土保持通报, 2004, 24(6): 53-57.
- [22] 廖桂堂, 李廷轩, 王永东, 张锡洲, 冯娜娜. 基于 GIS 和地统计学的低山茶园土壤肥力质量评价. 生态学报, 2007, 27(5): 1978-1986.
- [23] 张乐辰, 陈喜, 张志才. 西南喀斯特流域水化学空间变异性分析. 地球与环境, 2019, 47(5): 594-600.
- [24] 葛剑平, 郭海燕, 仲莉娜. 地统计学在生态学中的应用(I)——基本理论和方法. 东北林业大学学报, 1995, 23(2): 88-94.
- [25] 李恒. 基于地统计学和形态学的海底地形地貌分类研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2013.
- [26] 杨铭霞. 基于地统计学的西北太平洋柔鱼资源丰度空间变异研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.
- [27] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究. 高原气象, 2005, 24(6): 974-980.
- [28] 林秀渠, 刘晓龙, 李玉环. 山东省文登市耕层土壤有机质的空间分异特征研究. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2012, 43(3): 457-461.
- [29] 张慧文, 马剑英, 张自文, 孙涛, 吕光辉. 地统计学在土壤科学中的应用. 兰州大学学报: 自然科学版, 2009, 45(6): 14-20, 27-27.
- [30] 赖江山, 米湘成. 基于 Vegan 软件包的生态学数据排序分析//第九届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 厦门: 国际生物多样性计划中国委员会, 中国科学院生命科学与生物技术局, 2010.
- [31] 孙厚云, 卫晓锋, 贾凤超, 李多杰, 陈自然, 李健, 李霞. 冀北承德地区土壤生源要素生态化学计量与空间分异特征. 生态学报, 2022, 42(5): 1750-1765.
- [32] 高瑞贺, 冀卫荣, 李宏, 石娟. 松材线虫病疫情指数与气候因素之间的关系. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2019, 39(5): 32-40.
- [33] 洪承昊, 陈京元, 赵勇, 宋德文, 陈桂芳, 张星耀. 三峡库区松材线虫病扩张速度对人为活动的响应. 生态学报, 2017, 37(20): 6800-6808.
- [34] 王强, 梁玉, 范小莉, 张文馨, 何欢, 戴九兰. 微生物生态研究中 BIOLOG 方法数据分析及 R 语言实现. 生态学报, 2021, 41(4): 1514-1527.
- [35] Tsui C C, Chen Z S, Hsieh C F. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan. Geoderma, 2004, 123(1/2): 131-142, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.031>.
- [36] 黄保宏, 邹运鼎, 毕守东, 朱宏伟, 高正良. 朝鲜球坚蚱及黑缘红瓢虫空间格局的地统计学研究. 应用生态学报, 2003, 14(3): 413-417.
- [37] Gomi T. Effects of timing of diapause induction on winter survival and reproductive success in *Hyphantria cunea* in a transition area of voltinism. Entomological Science, 2000, 3(3): 433-438.
- [38] Irwin J T, Lee Jr R E. Cold winter microenvironments conserve energy and improve overwintering survival and potential fecundity of the goldenrod gall fly, *Eurosta solidaginis*. Oikos, 2003, 100(1): 71-78.
- [39] 武亚敬, 于祎飞. 美国白蛾生物学特性及病原真菌防治研究进展. 河北林业科技, 2022(2): 45-49.
- [40] 王玮. 美国白蛾滞育蛹越冬前的能量贮备与越冬期温度变化对其能量消耗的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2020.
- [41] 陶万强, 薛洋, 陈凤旺, 王合, 郭一妹, 赵洪林. 北京地区美国白蛾生物学特性研究初报. 中国森林病虫, 2008, 27(2): 9-11.
- [42] Gomi T, Takeda M. Geographic variation in photoperiodic responses in an introduced insect, *Hyphantria cunea* Drury (Lepidoptera: Arctiidae) in Japan. Applied Entomology and Zoology, 1991, 26(3): 357-363.
- [43] 申卫星, 郭慧玲, 迟元凯, 谭亚军, 刘会香, 黄大卫. 美国白蛾在泰山的适生性分析. 林业科学, 2012, 48(6): 165-169.
- [44] 曹利军. 基于微卫星标记的美国白蛾中国种群入侵遗传学研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [45] 崔红莉. 美国白蛾在兴隆县得到有效控制. 河北林业, 2015(4): 28-29.
- [46] 魏建荣, 王传珍, 杨隽, 邵凌松, 张同友. 美国白蛾卵块及幼虫网幕空间格局研究. 林业科学研究, 2004, 17(4): 500-504.
- [47] 郭小军, 赵志新, 刘英胜, 靳爱荣, 武志波. 美国白蛾幼虫网幕的空间格局及抽样技术. 福建林业科技, 2016, 43(3): 23-26.
- [48] 姜霓雯, 童根平, 叶正钱, 程樟峰, 吕永强, 傅伟军. 浙江清凉峰自然保护区土壤肥力指标空间变异及其影响因素. 生态学报, 2022, 42(6): 2430-2441.
- [49] Hodek I. Controversial aspects of diapause development. European Journal of Entomology, 2002, 99(2): 163-173.
- [50] Masaki S. Seasonal adaptations of insects as revealed by latitudinal diapause clines. Entomological Science, 1999, 2(4): 539-549.