

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1787.2020.02.005

基于 CLIMEX 预测黑角负泥虫 在中国的潜在地理分布

刘孝贤^{1,2+}, 李 兰^{3,4+}, 王 婷^{1,4}, 张 苹^{1,2}, 张 鑫¹, 王振霖^{1,2}, 吕昭智^{1,5*}

¹中国科学院新疆生态与地理研究所/中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室, 新疆
乌鲁木齐 830011; ²中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; ³阿拉山口海关技术中心,
新疆 阿拉山口 833418; ⁴新疆农业大学农学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
⁵青岛农业大学植物医学学院, 山东 青岛 266109

摘要:【目的】研究黑角负泥虫在我国的潜在地理分布及其入侵风险程度。【方法】运用适生性分析软件 CLIMEX 4.0 对黑角负泥虫在我国的潜在地理分布进行模拟, 将模拟结果在地理信息系统软件 ArcGIS 10.2 下进行插值分析, 并绘制黑角负泥虫的潜在地理分布示意图。【结果】黑角负泥虫高度适生区主要集中在我国的华北平原、黄土高原南部及云贵高原北部; 中度适生区主要集中在华北平原北部、黄土高原北部及东北平原地区; 低度适生区则多分布在中高度适生区的过渡区域及我国新疆天山南北两侧地区。限制黑角负泥虫在我国分布的主要胁迫因素为干胁迫和冷胁迫, 且其影响的区域主要分布在我国的西北和东北地区。【结论】黑角负泥虫在我国潜在地理分布范围广, 适生程度高。目前, 黑角负泥虫已经传播到我国的新疆和内蒙古等省(自治区), 但由于地理隔离的存在和自身较弱的扩散条件, 并没有传入气候适宜度较高的东部地区。随着东西部经济交流的不断增多, 黑角负泥虫随人为因素进一步扩散的可能性将不断增加。因此, 建议检疫部门做好检疫工作, 严防黑角负泥虫的传播扩散。

关键词: 黑角负泥虫; 入侵害虫; CLIMEX 模型; 潜在地理分布



开放科学标识码
(OSID 码)

Predicting the potential geographical distribution of *Oulema melanopus* (Coleoptera: Chrysomelidae) in China based on CLIMEX

LIU Xiaoxian^{1,2+}, LI Lan^{3,4+}, WANG Ting^{1,4}, ZHANG Ping^{1,2},
ZHANG Xin¹, WANG Zhenlin^{1,2}, LÜ Zhaozhi^{1,5*}

¹Xinjiang Institute of Ecology and Geography/Key Laboratory of Biogeography and Bioresource in Arid Land, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011, China; ²College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Alashankou Customs Technology Center, Alashankou, Xinjiang 833418, China; ⁴College of Agronomy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; ⁵College of Plant Health and Medicine, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China

Abstract: 【Aim】To investigate the potential geographical distribution and invasion risk of *Oulema melanopus* in China. 【Method】The potential geographical distribution of *O. melanopus* in China was simulated using the adaptability analysis software CLIMEX 4.0. The simulation results were interpreted and analyzed in ArcGIS 10.2 to map its potential geographical distribution. 【Result】The highly invasibility areas of *O. melanopus* were mainly concentrated in the Huabei Plain, southern Loess Plateau and northern Yungui Plateau in China. The moderately invasibility areas were mainly in the northern North China Plain, northern Loess Plateau and Northeast China Plain. The lowly invasibility areas were located in the transitional area of the highly invasibility areas and in south and north slopes of Tianshan Mountain,

收稿日期(Received): 2019-11-11 接受日期(Accepted): 2020-02-15

基金项目: 塔吉克斯坦重要农林入侵物种系统调查及控制技术研究(2017E01019); 西北地区粮食口岸进境小麦有害生物风险评估及检疫防控技术研究(2018IK058)

作者简介: *为并列第一作者。刘孝贤, 男, 硕士研究生。研究方向: 动物生态。E-mail: liuxiaoxian18@mails.ucas.ac.cn。李兰, 女, 博士研究生。研究方向: 作物保护。E-mail: lilan85115@126.com

*通信作者(Author for correspondence), E-mail: zhaozhi_lv@sina.com

Xinjiang, China. Dry and cold temperature stresses were the main factors limiting the distribution of *O. melanopus* in China. The affected areas were mainly distributed in the northwest and northeast China. 【Conclusion】 *O. melanopus* has a wide potential geographical distribution in China, and its invasibility is high. At present, *O. melanopus* has spread to Xinjiang and Inner Mongolia of China. However, due to the existence of geographical isolation and its weak diffusion, it has not spread into the eastern region with high climate suitability. With the increasing economic exchanges between the east and the west, the possibility of further dispersal of *O. melanopus* is increasing with human factors. It is recommended that quarantine departments take stricter measures to prevent the spreading of the pest.

Key words: *Oulema melanopus*; invasive species; CLIMEX model; potential geographical distribution

黑角负泥虫 *Oulema melanopus* L. 又名谷叶甲虫、小麦负泥虫, 属鞘翅目 Coleoptera 叶甲科 Chrysomelidae 负泥虫属 *Oulema*。主要寄主植物为小麦 *Triticum aestivum* L.、大麦 *Hordeum vulgare* L.、燕麦 *Avena sativa* L. 和禾本科 Gramineae 杂草 (EPPO, 2002; Mason & Gillespie, 2013)。该虫是国外谷类作物上的一种常见害虫, 主要以成虫和幼虫在叶脉间纵向取食叶肉组织进行为害, 受害后的叶片出现白色条斑或全叶发白枯焦, 严重时甚至会造成植株枯萎, 导致谷类作物减产 (Hyman & Gage, 1981)。据统计, 1995 年黑角负泥虫在北美地区暴发, 致使春小麦减产 55%, 冬小麦减产 23%。在欧洲, 该害虫在谷物幼苗期严重危害旗叶, 导致谷物产量下降幅度从波兰的 3%~8% 到荷兰的 95% 不等 (Mason & Gillespie, 2013)。黑角负泥虫成虫一般在白天活动, 偶尔飞行, 具有群栖性特征, 其自然扩散相对缓慢, 可随谷物、秸秆及其制成的包装物、草皮、树木和其他可能的载体进行远距离传播, 风和流水也能促其扩散 (陈乃中, 1996)。

入侵物种在入侵地的适生性分析是入侵生物科学风险评估的基础。目前基于生态位理论, 应用相关的数学模型来进行适生区决策已经广泛应用于外来入侵物种的扩散、濒危物种的保护以及全球气候变化对物种分布区的影响等研究中 (王聪等, 2018)。生态位模型是根据物种特殊的生存环境, 从目标已知分布区出发, 利用数学模型归纳或模拟其生态位需求, 然后将其投射到目标地区得到物种适生区分布的模型 (蔡静芸等, 2014)。潜在地理分布模型和软件主要包括气候相似距模型及数据库系统、地点比较模型与 CLIMEX 软件、MAXENT 模型与软件、GARP 模型与软件以及有害生物实验模型与 GIS 软件等 (李志红和秦嘉誉, 2018)。

CLIMEX 是通过物种在已知地理分布区域的气候参数来预测物种潜在地理分布和相对丰度, 分析气候对物种生长发育的影响, 能够比较全面评估生

物在新的栖息地适生能力的动态模拟模型 (Kriticos *et al.*, 2015)。自 CLIMEX 出现以来, 国内外应用其开展了大量的有害生物潜在地理分布预测工作。在国外, 澳大利亚、新西兰等国家和地区的学者首先应用 CLIMEX 地点比较模型进行了有害生物的潜在地理分布进行研究 (李志红和秦嘉誉, 2018)。例如, 对乌柏 *Triadica sebifera* (L.) Roxb.、东方果实蝇 *Bactrocera dorsalis* (Hendel)、茶翅蜡 *Halyomorpha halys* Stål 等先后进行了潜在地理分布研究 (Kriticos *et al.*, 2017; Pattison & Mack, 2007; Stephens *et al.*, 2007)。我国于 20 世纪 90 年代引入 CLIMEX 模型, 并开展了大量农林业有害生物适生性的研究, 并对纳尔塔实蝇 *Ceratitis rosa* Karsch、卷叶毒蛾 *Epiphyas postvittana*、甜菜夜蛾 *Spodoptera exigua* Hübner 等多种有害昆虫的潜在地理分布进行了研究 (张哲等, 2011; He *et al.*, 2012; Zheng *et al.*, 2012)。此外, CLIMEX 还与未来气候模拟数据相结合, 特别预测了未来气候变化条件下西印度果实蝇 *Anastrepha obliqua* Macquart、埃及伊蚊 *Aedes aegypti* 和马缨丹 *Lantana camara* L. 等多种有害生物的潜在地理分布变化 (Fu *et al.*, 2014; Khormi & Kumar, 2014; Taylor & Kumar, 2013)。

预测黑角负泥虫在全球范围内的潜在地理分布, 对科学防控黑角负泥虫、保护小麦可持续生产及生态安全具有重要意义。本研究利用 CLIMEX 模型和 ArcGIS 软件, 基于黑角负泥虫的生物学特性, 建立黑角负泥虫的生态气候模型, 预测黑角负泥虫在全球及我国的潜在地理分布, 以期对该虫在我国不同地区的传播风险进行定量评估, 同时也为制定谷物生产的防控策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究软件

1.1.1 适生性分析软件 CLIMEX 模型 CLIMEX 是 1985 年由澳大利亚昆士兰大学 Sutherst 教授和 Maywald 博士所研发的商业化软件。本次研究使用

的是 Hearne software 开发的 CLIMEX 4.0 软件,使用的功能模块为单物种地区比较(Compare Location, 1 species)。CLIMEX 地点比较模型通过使用物种生长发育的生物学数据进行一系列运算得到生态气候指数(ecoclimatic index, EI)来表示某种特定昆虫在特定地理区域内潜在适宜性(王聪等, 2018)。生态气候指数变化范围为 0~100,当生态气候指数为 0 时,表示该物种不适宜长期在该地区生存定殖;生态气候指数越高,表示该物种在该地的气候适宜程度也就越高。

1.1.2 地理信息系统软件 ArcGIS 地理信息系统(geographic information system, GIS)是用于存储、管理和显示地理空间数据的计算机系统。主要包括地理空间数据获取、管理、显示、探查和分析等功能(张康聪,2016)。本研究使用的地理信息系统软件是由美国环境系统研究公司开发的 ArcGIS 10.2 软件,主要使用了其中的插值分析、重分类、制图综合等模块。

1.2 气象数据

本研究使用了 CliMond 气候数据共享网站以 1975 年为中心的 30 年的空间分辨率为 10' 的 CSIRO 气候数据集(Kriticos *et al.*, 2012),主要包括月平均降水量,日最高,最低气温,9:00 和 15:00 的空气相对湿度等要素。

1.3 生物学资料

黑角负泥虫一般一年发生一代,卵、幼虫、蛹的发育适宜温度分别为 12~32、8~32、8~32 ℃。若以 7 ℃ 为发育起点温度,卵、幼虫(4 个龄期)和蛹

的发育积温为 105、41、36、43、46 和 282 日度(陈乃中,1996)。越冬成虫最早出现于春天,取食交配,交配过一周后开始产卵,产卵位置多在植株中部叶子的中脉位置(杨静飞,2001)。卵上覆盖有胶状分泌物,暴露于空气中,迅速硬化后固着在叶子上。卵期 7~15 d,幼虫逐叶取食,背负分泌物,且只在每次蜕皮后和化蛹前的短时间内光裸。幼虫 4 龄,经历 12~20 d,多发生于 4 月下旬—6 月中旬(刘芳政等,1988)。在 4 cm 左右深的土室内化蛹,20~25 d 羽化出成虫。羽化出的成虫,当年不交配、不繁殖,秋末进入草地、林间、灌丛下和麦田 3~5 cm 深的土层等处越冬(Webster *et al.*, 1982)。

1.4 气象数据

黑角负泥虫分布数据来源于全球生物多样性信息网络(Global Biodiversity Information Facility, GBIF)中发生记录,以及欧洲和地中海保护组织(European and Mediterranean Plant Protection Organization, EPPO)中记载的分布国家和地区。此外,查询一些相关文献对黑角负泥虫在我国新疆、内蒙古等地的分布进行了补充(董淑芳,2016;吉别克等, 2012; 沙代提力·阿不都等,2018)。

黑角负泥虫主要分布在欧洲的奥地利、比利时、保加利亚、塞浦路斯、捷克、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、马耳他、荷兰、挪威、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、俄罗斯、塞尔维亚、西班牙、瑞典、瑞士、乌克兰、英国,亚洲的土耳其、以色列、伊朗、土库曼斯坦、乌兹别克斯坦,非洲的阿尔及利亚、摩洛哥、突尼斯,北美洲的美国、加拿大(图 1)。

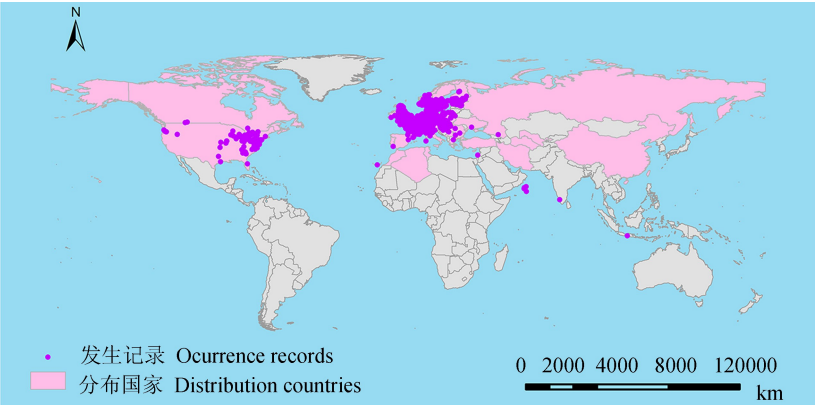


图 1 黑角负泥虫在全球的地理分布

Fig.1 *O. melanopus* geographical distribution across the globe

1.5 参数确定

CLIMEX 共预设了 42 个生物学参数,根据黑角

负泥虫的实际地理分布和生物学资料,选取其分布集中的西欧和北美作为参照地,反复进行调试,使

其分布范围的最大程度与实际相吻合。经过调试，本次研究选用其中的 24 个参数项,并最终确定黑角负泥虫的预测参数(表 1)。

1.5.1 生长指数 生长指数主要包括温度、湿度、光照、滞育等要素,本研究选择与黑角负泥虫分布相关的温度、湿度、滞育 3 个要素作为生长指数。昆虫的生理活动对温度的变化有直接的响应,温度指数能够反映出这种响应 (Shabani *et al.*, 2012)。根据 Olfert *et al.* (2004) 的模型数据与黑角负泥虫的实际分布记录,将 DV0、DV1、DV2、DV3 分别设置为 6.5、7、26 和 35 ℃。湿度指数指昆虫的寄主植物对土壤湿度变化的响应,它通过影响昆虫寄主植物的地理分布从而影响昆虫的地理分布 (Kriticos *et al.*, 2015)。本研究主要参照 Olfert *et al.* (2004) 的模拟对北美地区的湿度参数,分别将 SM2、SM3 设置为 1 和 1.5。为了模拟在中亚荒漠地区黑角负泥虫无法生存的情况,本研究将 SM0 和 SM1 提高到 0.1 和 0.15。根据黑角负泥虫的滞育发生情况及其相应的研究,本次研究继续沿用 Olfert *et al.* (2004) 的模型参数,分别将 DPD0、DPT0、DPT1、DPD 和

DPSW 设置为 14、11、6、120、0。

1.5.2 胁迫指数 冷胁迫中,TTCS 的值保持不变,由于 CLIMEX 模型版本调整的原因,将 THCS 的值更新为-0.0015。冷胁迫还有一个重要影响因素就是积温,最低积温阈值 DTCS 和低于此阈值情况下的冷胁迫的积累速率 DHCS,分别将其设置为 3 和 -0.0005。热胁迫和湿胁迫的参数因子则继续保持 Olfert *et al.* (2004) 的模型参数。在干胁迫中,本次研究将 SMDS 和 HDS 更新为 0.02 和-0.1,湿胁迫的 SMWS 和 HWS 分别设置为 1.5 和 0.0005。

1.5.3 有效积温 昆虫的在发育期间需要一定的热量积累,以完成昆虫基本的生长需要 (Kriticos *et al.*, 2015)。根据文献中的实验数据,将有效积温 PDD 的值设置为 550。

1.5.4 灌溉参数 灌溉参数值主要影响其在欧洲和亚洲中国新疆地区的分布,GBIF 记录其在欧洲地区有大规模的分布,相关文献也曾报道其在中国新疆的巴里坤、裕民等地发生严重危害,因此,灌溉参数值设为冬季 0 mm · d⁻¹、夏季 1.0 mm · d⁻¹ (Avila *et al.*, 2019)。

表 1 本研究所选取的各生物气候变量信息表
Table 1 Environment factors used in this study

参数因子 Parameters	原始值 Initial value	调整值 Adjusted value
发育所需的最低土壤湿度 Lower moisture threshold (SM0)	0.02	0.1
适宜发育所需的土壤湿度下限 Lower optimal moisture (SM1)	0.1	0.15
适宜发育所需的土壤湿度上限 Upper optimal moisture (SM2)	1	1
发育所需的最高土壤湿度 Upper moisture threshold (SM3)	1.5	1.5
发育起点温度 Lower temperature threshold/℃ (DV0)	6.5	6.5
适宜温度下限 Lower optimal temperature/℃ (DV1)	7	7
适宜温度上限 Upper optimal temperature/℃ (DV2)	26	26
发育最高温度 Upper temperature threshold/℃ (DV3)	35	35
滞育诱导日长 Diapause induction daylength/h (DPD0)	14	14
滞育诱导温度 Diapause induction temperature/℃ (DPT0)	11	11
滞育终止温度 Diapause termination temperature/℃ (DPT1)	6	6
滞育发展天数 Diapause development day/d (DPD)	120	120
夏季或冬季滞育指标 Summer or winter diapause indicator (DPSW)	0	0
冷胁迫开始积累的温度阈值 Cold stress temperature threshold/℃ (TTCS)	-20	-20
冷胁迫积累速率 Cold stress temperature rate (THCS)	0.0015	-0.0015
冷胁迫开始积累的积温阈值 Cold stress degree-day threshold (DTCS)	*	3
冷胁迫积温积累速率 Cold stress degree-day rate (DHCS)	*	-0.0005
热胁迫开始积累的温度阈值 Heat stress temperature threshold/℃ (TTHS)	35	35
热胁迫积累速率 Heat stress temperature rate (THHS)	0.005	0.005
干胁迫开始积累的阈值 Dry stress threshold (SMDS)	0.02	0.02
干胁迫积累速率 Dry stress rate (HDS)	0.1	-0.1
湿胁迫开始积累的阈值 Wet stress threshold (SMWS)	1.5	1.5
湿胁迫积累速率 Wet stress rate (HWS)	0.0005	0.0005
有效积温 Degree-days per generation (PDD)	*	550

* 表示之前未设置的参数。* Indicates parameters that have not been set before.

1.6 模拟流程

Olfert *et al.* (2004) 对加拿大西部的黑角负泥虫的潜在地理分布及其变化趋势进行了预测,本研究在其参数基础上,根据现有的黑角负泥虫的发生记录(GBIF, 2019)对参数进行了补充、更新和完善,使其在全球的适生区模拟与实际分布相吻合;后将调整好的参数输入模型,得到黑角负泥虫在中国不同地区的生态气候指数。将 CLIMEX 模型模拟出的生态气候指数导入 ArcGIS 进行插值,绘制黑角负泥虫在中国的潜在地理分布示意图,并通过 ArcGIS 综合制图模块进行成图。本次生态气候指数的分类以 Olfert 分类标准为基础,再结合 CLIMEX 的相关资料,设置如下分类标准:非适生区, $EI=0$;低度适生区, $0<EI\leq 10$;中度适生区, $10<EI\leq 20$;高度适生区 a, $20<EI\leq 30$;高度适生区 b, $EI>30$ 。

2 结果与分析

2.1 黑角负泥虫潜在地理分布范围

黑角负泥虫的潜在地理分布区域主要集中在北半球亚热带北部和温带地区。欧洲大部分地区均是黑角负泥虫的潜在地理分布,其高度适生区主要分布在法国的巴黎盆地和阿基坦盆地、亚平宁半岛、巴尔干半岛及黑海沿岸地区;中度适生区主要

分布在伊比利亚半岛、大不列颠和爱尔兰岛南部、西欧平原、东欧平原大部分地区;低度适生区主要分布在东欧平原北部和东部、斯堪的纳维亚半岛南部和英伦三岛北部地区。非洲黑角负泥虫的潜在适生区面积相对较小,主要集中在摩洛哥、阿尔及利亚北部、突尼斯和南非高原南部地区;此外,在埃塞俄比亚的高原和山脉也有零星分布。在亚洲,黑角负泥虫的高度适生区主要在高加索山脉及里海沿岸一带;中度适生区主要分布在西伯利亚平原南部和东亚的温带地区;低度适生区则主要分布在中亚地区、我国的西部地区、俄罗斯西伯利亚平原和蒙古高原南部。在北美洲,黑角负泥虫的适生区主要集中在美国东部的大西洋沿岸平原和大平原地区,适生程度由东南向西北递减;在落基山脉西侧的狭长地带和墨西哥高原地区也有小面积的分布。南美洲黑角负泥虫的适生区范围相对较小,主要集中在潘帕斯草原及其以南的地区,适生程度由北向南降低;除此之外,西部安第斯山地中也有零星分布。大洋洲的黑角负泥虫适生区主要集中在澳大利亚大陆东南部、新西兰和塔斯马尼亚岛(图 2)。

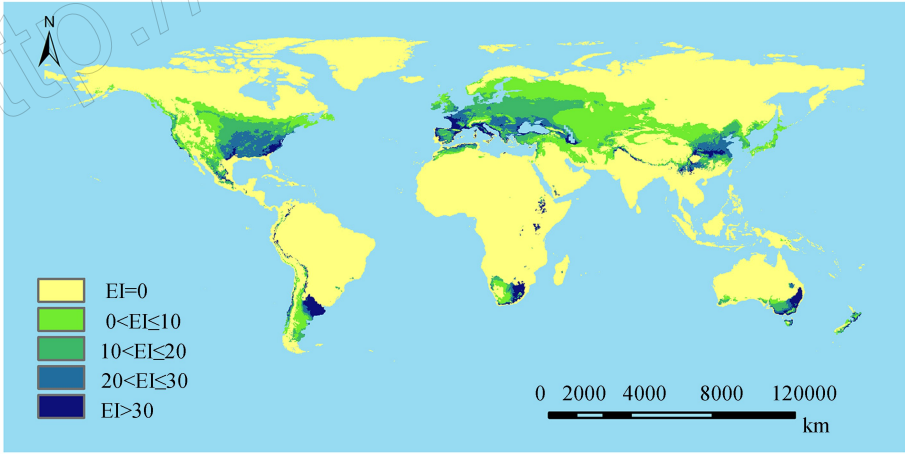


图 2 黑角负泥虫在全球的潜在地理分布

Fig.2 The potential geographical distribution *O. melanopus* across the world

黑角负泥虫在我国的适生区分布范围广阔,除海南、香港、澳门、广西、广东、台湾等少数几个省(自治区)之外,其他省级行政区内均有不同程度的潜在适生区域。其中,高度适生区主要集中黄土高原南部、华北平原南部、长江中下游平原及四川盆地周围山地和云贵高原北部地区;中度适生区主要

集中在华北平原北部、黄土高原北部、东北平原南部和南方丘陵的北部山区;低度适生区则多分布在中高度适生区的过渡区域、河西走廊、内蒙古西部地区 and 新疆北部及南部塔里木盆地周围的绿洲地区(图 2)。

生长指数描述了某种生物在特定的气候条件

下的增长速率,对生态气候指数的变化有着直接的影响 (Kriticos *et al.*, 2015)。我国南方地区有着更为良好的水热条件,黑角负泥虫的生长周期长,生长指数高,因此,其生态气候指数也比北方地区高。北方地区则由于温度较低,降水较少,黑角负

泥虫生长周期短,生态气候指数也相对较低。我国黑角负泥虫发育较快的时期主要集中在较为凉爽的春季和秋季,而夏季由于气温远远高于黑角负泥虫适宜的温度发育阈值,因此生长指数大幅度降低 (图 3)。

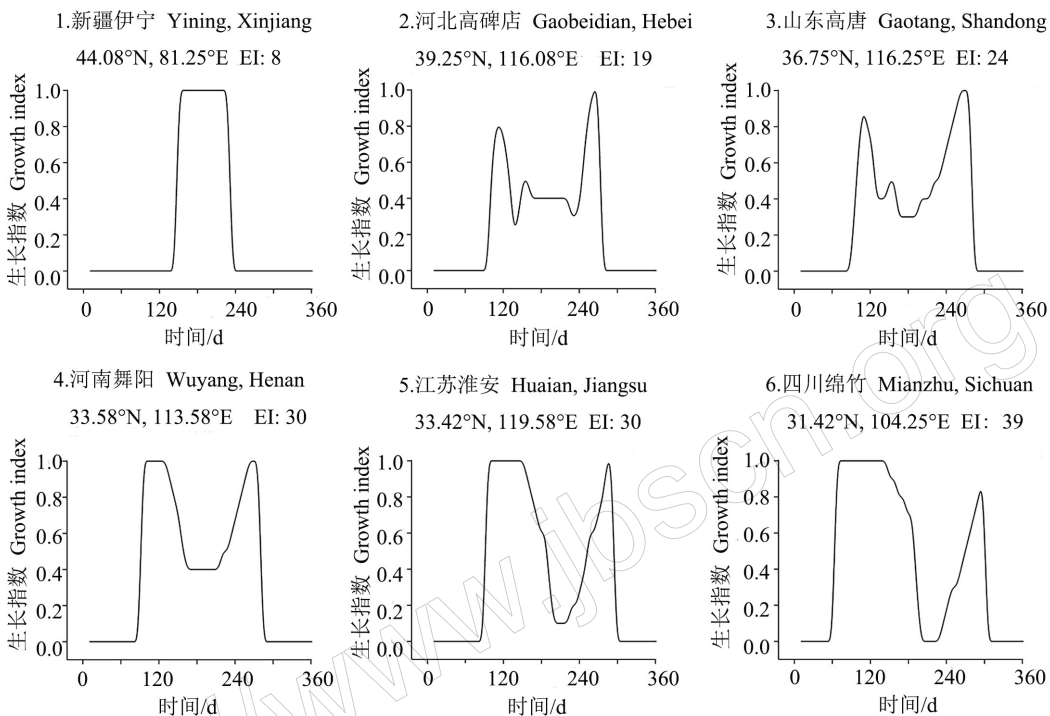


图 3 我国主要小麦产区黑角负泥虫生长指数变化
Fig.3 Change of growth index of *O. melanopus* in major wheat producing areas in China

2.2 不同胁迫因子对黑角负泥虫潜在地理分布的影响

CLIMEX 模型中设定限制潜在适生区分布的主要胁迫因子为干胁迫、湿胁迫、热胁迫和冷胁迫 (Kriticos *et al.*, 2015)。图 4 结果显示,对黑角负泥虫在我国潜在地理分布的主要因素是冷胁迫和干胁迫,而热胁迫和湿胁迫则对黑角负泥虫潜在地理分布影响较小。冷胁迫在我国的分布分布范围较广,中度、重度胁迫主要集中在我国的青藏高原、天山及天山以北的新疆地区和内蒙古东部及东北平原的北部地区;黑角负泥虫适生程度较高的东部季风区也受到轻度胁迫的影响;无胁迫的影响区域主要集中在我国南部的岭南地区及海南等。干胁迫主要为中度和轻度胁迫,主要集中在青藏高原南部、新疆天山以南地区、新疆东部、内蒙古和甘肃西部、青海的西北部地区。而热胁迫和湿胁迫则对黑角负泥虫潜在地理分布的胁迫面积小,胁迫的程度低。热胁迫主要分布在新疆吐鲁番盆地及塔克拉

玛干沙漠东部,湿胁迫则主要分布在我国岭南地区南部、武夷山区、西藏山南地区和台湾岛。

3 讨论

3.1 黑角负泥虫的潜在地理分布及主要限制因素

黑角负泥虫的潜在地理分布主要集中在 25°N -55°N 之间的温带亚热带地区,这些地区年均温度普遍在 0℃ 以上,有着良好的降水条件或灌溉条件,是全球小麦等谷类作物的主要种植区域。潜在适生区的南部具有更好的水热条件,适生程度由南向北递减。我国黑角负泥虫的适生区分布趋势与世界分布一致,主要分布在 25°N-48°N 之间,适生程度由南向北逐渐降低。从气候区划上看,黑角负泥虫的潜在地理分布范围主要集中在我国的东部温带季风气候区和亚热带季风气候的北部地区;从地形上看,黑角负泥虫的潜在分布区在我国南方主要是高原、山地等海拔较高、气候凉爽的地区,在我国北方则主要是平原、盆地等水热条件较好的地区;特别是在降水稀缺的新疆南部地区,黑角负泥

虫的适生区紧紧围绕沙漠周围的狭长绿洲带分布。

影响黑角负泥虫在我国潜在地理分布的主要因素为寒冷和干旱,寒冷主要集中在我国的西部和北部地区,干旱影响则集中在我国西部的荒漠地区。根据秦大河等(2005)的预测,未来气候将会向更温暖、更湿润的方向发展,这将使受到干胁迫和

冷胁迫地区的胁迫程度降低,生态气候指数增加,更适合黑角负泥虫的定殖、传播。在未来的气候条件下,黑角负泥虫的潜在地理分布会进一步向西和向北地区,同时也会向山脉、高原等海拔更高的地区扩展,如天山山脉、青藏高原等。

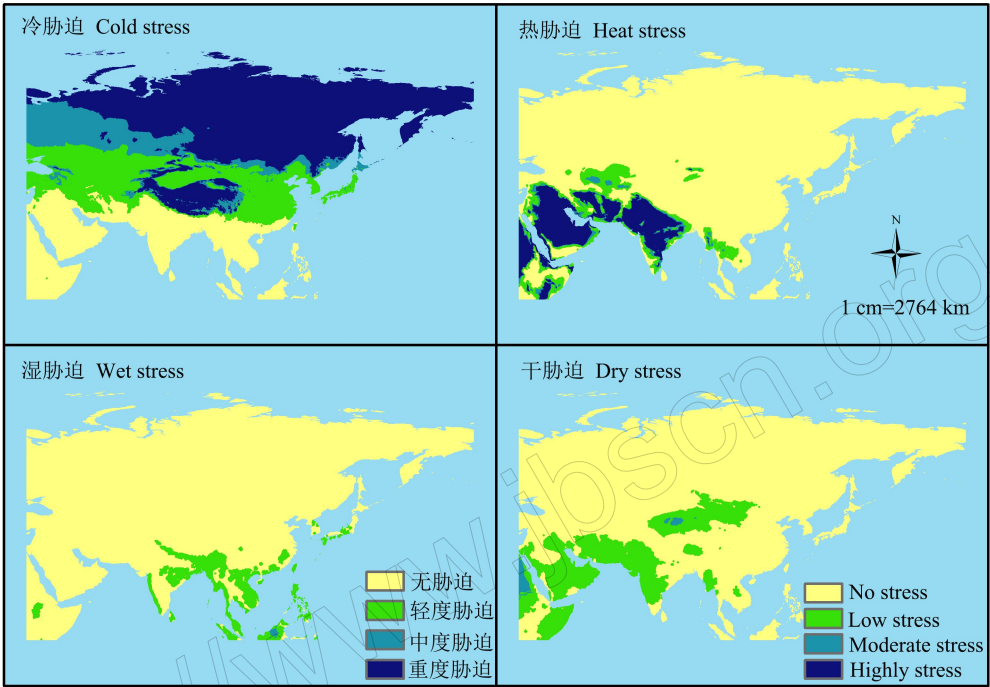


图 4 黑角负泥虫胁迫因子地理分布

Fig.4 The geographical distribution of stress factor of *O. melanopus*

3.2 潜在地理分布与实际地理分布的差异

Olfert & Weiss (2006) 对黑角负泥虫在北美地区的潜在地理分布进行了预测,但其实验模型仅使用了黑角负泥虫在北美地区的地理分布数据,样本数量较少。本次研究将黑角负泥虫的分布较多的东欧、北欧等地区也列入采样范围;依据其在北欧、蒙古等地的传播,对模型中的温度阈值和冷胁迫参数进行调整,更符合实际分布情况;依据黑角负泥虫寄主的小麦的种植情况,增添了灌溉参数。因此,本次研究对黑角负泥虫的潜在地理分布预测的准确性和参考价值更高。但 CLIMEX 模型是针对昆虫在气候上的生态适应性来预测其潜在地理分布,实际情况中影响一个物种分布的因素还要考虑自然地理隔离、竞争者、天敌等对物种扩散分布的限制(王聪等,2018);此外,人类对农业生态系统的改造,会改变当地的水热条件,促使黑角负泥虫向低度适生区和非适生区的农业区扩散,这些动态变化因素将会是影响黑角负泥虫分布的重要因素。

我国在 20 世纪 90 年代就已有黑角负泥虫分布在新疆地区的记录(陈乃中,1996),但与俄罗斯小麦双尾蚜 *Diuraphis noxia* M. 等许多新疆地区的入侵害虫一样,仅在新疆局部地区传播,并没有传入我国气候适宜度较高的东部小麦主要产区。主要由于自然条件下黑角负泥虫扩散能力较弱(Hy-anes & Gage, 1981),再加上我国边疆与内地存在着荒漠或高山的阻隔,致使其扩散的范围有限。黑角负泥虫进行远距离的传播主要依靠成虫隐藏在谷物的秸秆、杂草中随人类活动而进行传播(陈乃中,1996),而我国边疆与内地并无相应的大宗商品的贸易流,使其不能凭借贸易等进行远距离的传播。近年来东西部之间贸易流、交通流、货物流的不断增加,致使黑角负泥虫等各种入侵害虫随人为因素的扩散可能性不断增加。因此,相关检疫部门和科研机构应未雨绸缪,建立相应的检疫防控机制,合理规划农业活动,针对黑角负泥虫传播、生物学特性及危害特点采取相应的预防措施。

3.3 全球气候变暖对温带昆虫的影响

全球变暖已经是全世界科学家形成的一个共识,气候变暖将使大多数昆虫物种的地理分布向更高纬度地区扩展(Virkkala & Lehikoinen, 2014)。同样的,更加温暖的气候条件使黑角负泥虫逐渐向纬度较高的寒冷地区扩展,很多关于蝴蝶、甲虫、鸟类地理分布的研究也证实了这一点(Lehmann *et al.*, 2015; Parmesan *et al.*, 1999; Virkkala & Lehikoinen, 2014)。另一方面,全球出现的暖冬对黑角负泥虫的生活史也将产生重要的影响。滞育是许多温带昆虫度过寒冷冬天的关键机制,它在特定的温度和昼长条件诱发。对于黑角负泥虫这样的温带昆虫,滞育是生活史中的一个必要过程。没有滞育,黑角负泥虫将不能成功越冬。理论研究也表明,滞育在害虫的扩散过程中有着重要的推动作用(Mahdjoub & Menu, 2008)。全球变暖导致的温暖冬天将会无法满足黑角负泥虫的滞育条件,因此,未来气候条件下原先适宜程度较高的温带南部和亚热带北部地区适宜程度将会降低甚至不再适宜。

4 结论

黑角负泥虫在我国的潜在地理分布主要集中在 25°N–50°N 之间的亚热带北部和温带地区,其潜在地理范围面积大、气候适宜程度高。但黑角负泥虫自身扩散能力弱,我国分布的黑角负泥虫和我国小麦主产区又存在着天然的地理隔离,因此对我国小麦生产造成的影响有限。随着近些年西部地区逐渐开发,西部地区与东部地区的贸易流、交通流、货物流不断增多,黑角负泥虫随人为因素传入的可能性不断增加。在全球变暖的气候条件下,黑角负泥虫的潜在适生区未来将进一步向高纬度地区扩展;低纬度地区则由于滞育等因素的影响,其潜在地理分布将会进一步缩减。

致谢: 特别感谢中国科学院中亚与生态环境研究中心在黑角负泥虫分布数据与生物学资料等方面,澳大利亚学者 Myron 教授在模型使用及调整等方面提供的帮助与支持。

参考文献

蔡静芸, 张明明, 粟海军, 张海波, 2014. 生态位模型在物种生境选择中的应用研究. 经济动物学报, 18(1): 47–52, 58.

陈乃中, 1996. 黑角负泥虫. 植物检疫, 10(1): 42–44.

董淑芳, 2016. 裕民县山旱地小麦负泥虫危害与防治. 农村科技(6): 44.

吉别克, 阿斯亚木, 陈蓉, 2012. 2011 年伊犁河谷小麦负泥虫发生情况及防治措施. 新疆农业科技(1): 12–13.

李志红, 秦誉嘉, 2018. 有害生物风险分析定量评估模型及其比较. 植物保护, 44(5): 134–145.

刘芳政, 阿布拉, 托列西, 1988. 黑角负泥虫的研究. 中国草原与牧草, 3(4): 30–32.

秦大河, 陈宜瑜, 李学勇, 2005. 中国气候与环境演变: 上卷. 北京: 科学出版社.

沙代提力·阿不都, 艾合买提·斯马义, 乔力盘·阿不力米提, 帕提古力, 2018. 小麦负泥虫发生情况与防治措施. 农村科技(4): 34.

王聪, 蔡普默, 仪传冬, 陈家骅, 2018. 2007–2017 年外来入侵害虫风险评估的文献分析及常用风险评估模型介绍. 中国农业大学学报, 23(8): 225–238.

杨静飞, 2001. 黑角负泥虫的发生与防治. 中国农技推广(5): 39.

张康聪, 2016. 地理信息系统导论. 8 版. 北京: 科学出版社.

张哲, 李志红, 万方浩, 倪文龙, 曲伟伟, 2011. 利用 CLIMEX 预测纳塔尔实蝇在中国的潜在地理分布. 生物安全学报, 20(1): 43–49.

AVILA G, DAVIDSON M, VAN HELDEN M, FAGAN L, 2019. The potential distribution of the Russian wheat aphid (*Diuraphis noxia*): an updated distribution model including irrigation improves model fit for predicting potential spread. *Bulletin of Entomological Research*, 109(1): 90–101.

EPPO, 2002. *Oulema melanopus*. (2002-04-08) [2019-10-10]. <https://gd.eppo.int/taxon/LEMAME>.

FU L, LI Z, HUANG G, WU X, NI W, QU W, 2014. The current and future potential geographic range of West Indian fruit fly, *Anastrepha obliqua* (Diptera: Tephritidae). *Insect Science*, 21(2): 234–244.

GBIF, 2019. *Oulema melanopus*. (2019-09-15) [2019-10-10]. https://www.gbif.org/occurrence/search?taxon_key=1048319.

HE S, WERNER S P, IKEDA T, 2012. Modeling the potential global distribution of light brown apple moth *Epiphyas postvittana* (Lepidoptera: Tortricidae) using CLIMEX. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 15(3): 479–485.

HYANES D, GAGE S, 1981. The cereal leaf beetle in North America. *Annual Review of Entomology*, 26(1): 259–287.

KHORMI H M, KUMAR L, 2014. Climate change and the potential global distribution of *Aedes aegypti*: spatial modelling using geographical information system and CLIMEX. *Geospa-*

- tial Health*, 8(2): 405–415.
- KRITICOS D J, KEAN J M, PHILLIPS C B, SENAY S D, ACOSTA H, HAYE T, 2017. The potential global distribution of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, a critical threat to plant biosecurity. *Journal of Pest Science*, 90(4): 1033–1043.
- KRITICOS D J, MAYWALD G F, YONOW T, ZURCHER E J, HERRMANN N I, SUTHERST R W, 2015. *CLIMEX Version 4: exploring the effects of climate on plants, animals and diseases*. Canberra, Australia; Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization.
- KRITICOS D J, WEBBER B, LERICHE A, OTA N, MACADAM I, BATHOLS J, SCOTT J K, 2012. CliMond: global high-resolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling. *Methods in Ecology and Evolution*, 3(1): 53–64.
- LEHMANN P, LYYTINEN A, PIROINEN S, 2015. Latitudinal differences in diapause related photoperiodic responses of European Colorado potato beetles (*Leptinotarsa decemlineata*). *Evolutionary Ecology*, 29(2): 269–282.
- MAHDJOUB T, MENU F, 2008. Prolonged diapause: a trait increasing invasion speed? *Journal of Theoretical Biology*, 251(2): 317–330.
- MASON P G, GILLESPIE D R, 2013. *Biological control programmes in Canada 2001–2012*. Wallingford, UK; CABI.
- OLFERT O, WEISS R M, 2006. Impact of climate change on potential distributions and relative abundances of *Oulema melanopus*, *Meligethes viridescens* and *Ceutorhynchus obstrictus* in Canada. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 113: 295–301.
- OLFERT O, WEISS R, WOOD S, 2004. Potential distribution and relative abundance of an invasive cereal crop pest, *Oulema melanopus* (Coleoptera: Chrysomelidae), in Canada. *The Canadian Entomologist*, 136(2): 277–287.
- PATTISON R R, MACK R N, 2007. Potential distribution of the invasive tree *Triadica sebifera* (Euphorbiaceae) in the United States: evaluating CLIMEX predictions with field trials. *Global Change Biology*, 14(4): 813–826.
- PARMESAN C, RYRHOIM N, STEFANESCU C, HILL J K, Thomas C D, Descimon H, Warren M S, 1999. Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature*, 399: 579–583.
- SHABANI F, KUMAR L, TAYLOR S, 2012. Climate change impacts on the future distribution of date palms: a modeling exercise using CLIMEX. *PLoS ONE*, 7(10): e48021.
- STEPHENS A E, KRITICOS D J, LERICHE A, 2007. The current and future potential geographical distribution of the oriental fruit fly, *Bactrocera dorsalis* (Diptera: Tephritidae). *Bulletin of Entomological Research*, 97(4): 369–378.
- TAYLOR S, KUMAR L, 2013. Potential distribution of an invasive species under climate change scenarios using CLIMEX and soil drainage: a case study of *Lantana camara* L. in Queensland, Australia. *Journal of Environmental Management*, 114(1): 414–422.
- VIRKKALA R, LEHIKONEN A, 2014. Patterns of climate-induced density shifts of species: poleward shifts faster in northern boreal birds than in southern birds. *Global Change Biology*, 20(10): 2995–3003.
- WEBSTER J, SMITH D, HOXIE R, 1982. Effect of cereal leaf beetle on the yields of resistant and susceptible winter wheat. *Crop Science*, 22(4): 836–840.
- ZHENG X L, WANG P, CHENG W J, WANG X P, LEI C L, 2012. Projecting overwintering regions of the beet armyworm, *Spodoptera exigua* in China using the CLIMEX model. *Journal of Insect Science*, 12(1): 13.

(责任编辑:郑姗姗 郭莹)