



罗迪, 刘孝贤, 季荣. 气候变暖背景下新疆和中哈边境亚洲飞蝗适生区预测及变化 [J]. 环境昆虫学报, 2022, 44 (4): 880–890.

气候变暖背景下新疆和中哈边境 亚洲飞蝗适生区预测及变化

罗迪¹, 刘孝贤², 季荣^{1*}

(1. 新疆师范大学生命科学学院, 新疆特殊环境物种保护与调控生物学实验室, 中亚区域跨境有害生物联合控制国际研究中心, 乌鲁木齐 830054;
2. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 中国科学院荒漠与绿洲国家生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011)

摘要: 亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* 是中国新疆与哈萨克斯坦边境区域重要害虫之一, 具迁飞性且繁殖能力强, 对农牧业经济造成巨大伤害。本文以亚洲飞蝗为研究对象, 根据其发生区和相关生物学特性, 利用 CLIMEX 4.0.2 和 ArcGIS 10.2 相结合, 预测其在新疆和中哈边境区域亚洲飞蝗的潜在地理分布。亚洲飞蝗的适生区在新疆境内集中分布在北疆 (42.69~48.29°N), 包括伊犁、博尔塔拉中部、塔城西北部及南部、阿勒泰西部、昌吉和乌鲁木齐南部地区; 哈萨克斯坦境内主要分布在北纬 47.03~51.65°N 区域, 包括东哈萨克斯坦州北部、阿拉木图州东南部境内的湖泊及河流沿岸地区, 这与亚洲飞蝗的现有分布点和历史发生记录吻合。未来气候变暖情景下, 亚洲飞蝗在中哈边境新疆境内的适生区逐渐扩大, 其中在阿勒泰、伊犁、昌吉及乌鲁木齐的高度适生区面积增加, 哈密开始出现高度适生区; 在哈萨克斯坦边境区域的适生区略有增加, 其中东哈萨克斯坦州地区高度适生区面积减少明显。研究结果对区域内亚洲飞蝗的预测预报和综合防控具有重要意义。

关键词: 气候变暖; 亚洲飞蝗; CLIMEX; ArcGIS; 适生区

中图分类号: Q968.1; S433

文献标识码: A

文章编号: 1674-0858 (2022) 04-0880-11

Prediction breeding areas of *Locusta migratoria migratoria* (Orthoptera: Acridoidea) in Xinjiang and China-Kazakhstan border under the background of climate warming

LUO Di¹, LIU Xiao-Xian², JI Rong^{1*} (1. College of Life Sciences, Key Laboratory of Conservation and Management of Species Diversity in Xinjiang, International Research Center of Cross-border Pest Management in Central Asia, Urumqi 830054, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China)

Abstract: *Locusta migratoria migratoria* is one of the most important pests in the Xinjiang Uygur, Autonomous Region of China, and Kazakhstan border. It has the ability of migration and reproduction, which causes great harm to agriculture and animal husbandry economy. This article takes the *L. migratoria migratoria* as the research object, and uses CLIMEX 4.0.2 (adaptability analysis software) and ArcGIS 10.2 (geographic information system) to predict the potential geographic distribution of the *L. migratoria migratoria* in Xinjiang and the China-Kazakhstan region based on its disaster areas and related biological characteristics. Breeding areas for *L. migratoria migratoria* are concentrated in northern

基金项目 “一带一路”国际科学组织联盟联合研究合作专项 (ANSO-CR-KP-2020-04); 国家重点研发计划子课题 (2016YFE0203100); 自治区区域协同创新专项 (2020E01003)

作者简介: 罗迪, 女, 1995年生, 辽宁辽阳人, 硕士研究生, 研究方向为动物生态学, E-mail: 1617974332@qq.com

* 通讯作者 Author for correspondence: 季荣, 女, 博士, 教授, 研究方向为动物生态学, E-mail: jirong@xjnu.edu.cn

收稿日期 Received: 2021-05-16; 接受日期 Accepted: 2021-07-01

Xinjiang (42.69 ~ 48.29°N), including Yili, central Bortala, northwest and south Tacheng, western Altay, Changji and southern Urumqi. The territory of Kazakhstan is mainly distributed in the 47.03 ~ 51.65°N area of north latitude, including lakes and riverside areas in the northern part of East Kazakhstan and the southeastern part of Almaty, which is consistent with the existing distribution points and historical occurrence records of *L. migratoria migratoria*. Under future climate warming scenarios, the suitable areas of *L. migratoria migratoria* in Xinjiang on the China-Kazakhstan border will gradually expand. Among them, the areas of highly suitable areas in Altay, Yili, Changji and Urumqi will increase, and Hami will begin to appear highly suitable areas; The suitable areas in the border areas of Kazakhstan increased slightly, and the area of highly suitable areas in the East Kazakhstan region decreased significantly. The results of this study are of great significance to the prediction and integrated control of *L. migratoria migratoria* in the region.

Key words: Climate warming; *Locusta migratoria migratoria*; CLIMEX; ArcGIS; breeding area

新疆是我国受蝗虫灾害最严重区域之一,其中以亚洲飞蝗 *Locusta migratoria migratoria* 灾害最为严重(乔永民等,1999;于冰洁等,2019)。亚洲飞蝗属直翅目 Orthoptera 斑翅蝗科 Oedipodidae 飞蝗属 *Locusta*,主要分布在天山、阿勒泰山和昆仑山前冲积扇边缘的低洼地带,喜食芦苇、水稻、小麦、玉米、高粱等植物或作物。与新疆毗邻的哈萨克斯坦的东哈萨克斯坦州和阿拉木图州(后文简称为两州)在自然地理、生态环境及生物资源等方面与我国新疆都极为相似,是我国新疆地区亚洲飞蝗的主要境外虫源地(范福来,2011)。由于亚洲飞蝗具有远距离迁飞特性,频繁跨境迁飞或扩散至相邻国家进行危害(季荣,2020),通过往返迁飞,在种群内亦起到自行淘汰的作用,这亦是许多大害虫持续猖獗的主要原因之一(马世骏,1982)。自1980年以来,共发生20余次大规模的蝗虫迁飞事件,平均每次迁飞事件造成经济损失约1400万元,对我国当地的农牧业生产造成了巨大影响(郭宏,2011;李焕,2011)。

过去1000a的年际时间序列结果表明蝗灾严重暴发多发生在气候温暖且干旱的年份(Stige *et al.*,2007)。随气候变暖湖水下退、荒滩暴露,飞蝗适生区将进一步扩大(兰仲雄和马世骏,1981)。气候是影响昆虫适生区分布的决定性因素之一(Lesley *et al.*,2016;Xiong *et al.*,2019),生态位模型基于气候因素对昆虫适生区分布进行预测,如CLIMEX和MaxEnt等生态位模型已在蝗虫适生区分布预测研究中得到广泛应用(董兆克和戈峰,2011;Ya *et al.*,2019)。王晗等(2014)利用线性回归和趋势分析方法得出近53a随气候变化意大利蝗 *Calliptamus italicus* 适生区呈现从暖

干向暖湿变化的趋势;李培先等(2017)和杨会枫等(2016)利用MaxEnt和ArcGIS分别预测了意大利蝗、西伯利亚蝗 *Gomphoceris sibiricus* 在新疆的适生区;张杰等(2019)利用MaxEnt和ArcGIS预测了飞蝗 *L. migratoria* 在中国的适生区,分析了影响其危害发生的主导因子;王茹琳等(2017)利用MaxEnt模型对西藏飞蝗 *L. migratoria tibetensis* 在中国的适生区进行预测,结果表明海拔、温度和降雨是影响适生区变化的主要因素。Yu等(2020)根据亚洲飞蝗主要发生地新疆塔城和阿勒泰,利用HYSPLIT-4轨迹分析得出中哈边境亚洲飞蝗的境外虫源地主要分布在哈萨克斯坦境内阿拉湖、斋桑泊、巴尔喀什湖东部、额尔齐斯河沿岸和阿亚古兹河地区,并分别经由16条不同路径迁飞至中国新疆境内进行危害。

在全球气候变暖的背景下,新疆和中哈边界地区增温速率始终高于全球平均水平(张萌,2019)。该区域气候变暖有可能导致亚洲飞蝗的生境和分布范围的变化,本文利用CLIMEX模型对当前和未来气候情景下亚洲飞蝗的适生区进行模拟,对当前和气候变化对亚洲飞蝗地理分布范围和迁飞活动区域的变化进行预测,从而为我国新疆和中哈边境地区亚洲飞蝗的综合防控和小麦、玉米等粮食作物的安全生产提供借鉴和指导。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 研究区域亚洲飞蝗地理分布及调查

根据历史上亚洲飞蝗蝗灾发生地理记录,结合2016-2019年对中哈边境区域实地调查数据以

及全球生物多样性信息网络 (Global biodiversity information facility, GBIF) (<https://www.gbif.org/>) 数据库, 绘制分布图 (图 1)。本研究所用的电子

地图来源于国家标准地图服务系统网站 (<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn/>)。

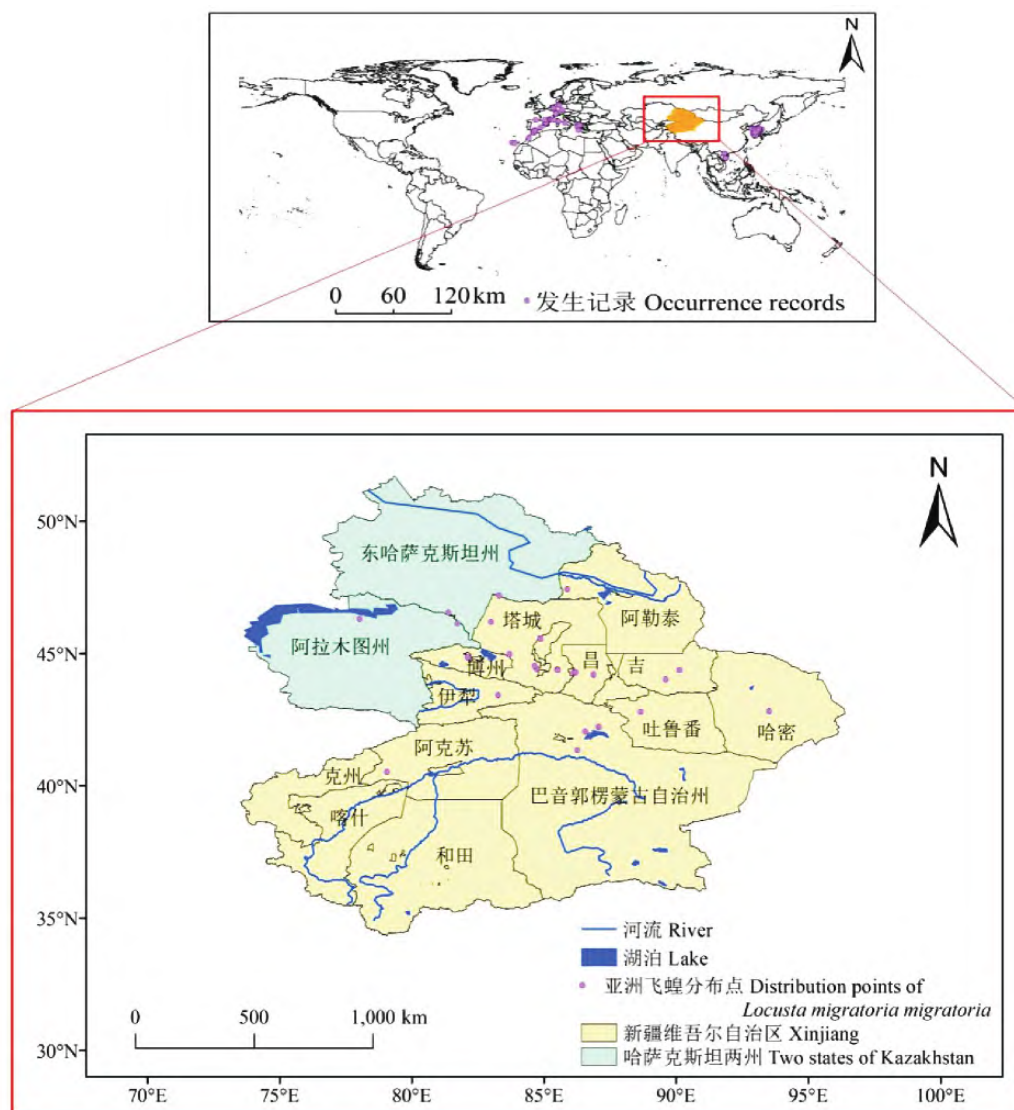


图 1 亚洲飞蝗在新疆和中哈边境的已知分布点

Fig. 1 Known distribution of *Locusta migratoria migratoria* in Xinjiang and China-Kazakhstan border region

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4403 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: The map was based on the standard map No. GS (2020) 4403 downloaded from the standard map service website of the State Bureau of surveying, mapping and geographic information, and the base map was not modified.

1.1.2 气候数据

生物气候数据来源于 CliMond (Global climatologies for bioclimatic modelling, <http://www.climond.org>) 10' 的数据集, 该数据集主要包括 1961 - 1990 年的历史气候数据, 涵盖月平均降水量、日最高和最低气温以及相对湿度等要素。本研究使用未来气候数据基于 (SRES A1B) 气候

背景对 2050 年的模拟的未来气候数据进行预测, 该气候情景基于人类排放情景为中等排放、各能源之间达到平衡 (SRES A1B) 情景对未来气候进行模拟, 具有较高的参考价值 (赵宗慈等, 2018)。

1.1.3 参数设置

本研究根据实验室测算的亚洲飞蝗生活史数

据设置 CLIMEX 模型参数 (Sutherst *et al.*, 2004; Kriticos *et al.*, 2012), 并根据其野外调查结果和地理分布记录对模型参数反复进行调整, 使预测结果最大程度上与实际分布相吻合 (表 1)。

生长指数: 主要描述物种适宜环境下的生长发育情况, 是生态气候指数的重要影响因素 (Kriticos *et al.*, 2015)。本研究根据亚洲飞蝗的生物学特性, 利用温度和湿度对其生长指数进行预测。温度指数直接反映了昆虫生理活动对温度变化的响应 (Farzin *et al.*, 2018)。当温度低于 4℃ 时亚洲飞蝗蝗蚬仍能存活一段时间, 适宜的温度发育区间为 18 ~ 30℃; 当温度超过 44℃ 时其无法正常发育 (陈永林等, 1979; 王元信, 1990; 范福来, 2011)。因此, 将温度临界阈值 (Lower threshold temperature, DV0) 设定为 4℃, 最适温度下限 (Lower optimum temperature, DV1) 和最适温

度上限 (Upper optimum temperature, DV2) 值分别调整为 22℃ 和 30℃, 温度临界上限 (Upper threshold temperature, DV3) 值设定在 44℃。湿度指数是指昆虫对土壤湿度变化的响应 (Kriticos *et al.*, 2018), 相对湿度介于 60% ~ 80% 之间蝗蚬均可正常生长发育 (范福来, 2011)。鉴于新疆和中哈边境区域位于全球最大的内陆干旱区 (陈曦等, 2013), 为符合其实际地理分布情况模拟其在中国北部地区 (尤其是新疆北疆地区) 分布情况, 将土壤湿度临界下限 (Lower threshold of soil moisture, SM0)、最适土壤湿度下限 (Lower limit of optimum soil moisture, SM1)、最适土壤湿度上限 (Upper limit of optimum soil moisture, SM2)、土壤湿度临界上限 (Upper threshold of soil moisture, SM3) 分别设置为 0.07、0.1、0.2 和 0.7。

表 1 亚洲飞蝗 CLIMEX 地点比较模型参数

Table 1 Comparative location model parameter values for *Locusta migratoria migratoria*

参数 Parameter	亚洲飞蝗参数值 Values for <i>Locusta migratoria migratoria</i>
温度临界下限 Lower threshold temperature (DV0)	4℃
最适温度下限 Lower optimum temperature (DV1)	22℃
最适温度上限 Upper optimum temperature (DV2)	30℃
温度临界上限 Upper threshold temperature (DV3)	44℃
土壤湿度临界下限 Lower threshold of soil moisture (SM0)	0.07
最适土壤湿度下限 Lower limit of optimum soil moisture (SM1)	0.1
最适土壤湿度上限 Upper limit of optimum soil moisture (SM2)	0.2
土壤湿度临界上限 Upper threshold of soil moisture (SM3)	0.7
冷胁迫日度临界 Cold stress temperature threshold (TTCS)	4℃
冷胁迫积累速率 Cold stress accumulation rate (THCS)	-0.00001/week
热胁迫临界温度 Heat stress temperature threshold (TTHS)	44℃
热胁迫积累速率 Heat stress accumulation rate (THHS)	0.001/week
干旱胁迫临界 Dry stress soil moisture threshold (SMDS)	0.07
干旱胁迫速率 Dry stress accumulation rate (HDS)	-0.03/week
湿胁迫临界 Wet stress soil moisture threshold (SMWS)	0.7
湿胁迫速率 Wet stress accumulation rate (HWS)	0.0005/week
有效积温 Degree-days to complete one generation (PDD)	1 115℃ · d

胁迫指数: 根据 DV0、DV3、SM0、SM3 数值, 将冷胁迫日度临界 (Cold stress temperature

threshold, TTCS)、热胁迫临界温度 (Heat stress temperature threshold, TTHS)、干旱胁迫临界 (Dry

stress soil moisture threshold, SMDS)、湿胁迫临界 (Wet stress soil moisture threshold, SMWS) 分别设置为 4℃、44℃、0.07、0.7。根据亚洲飞蝗在野外的实际分布情况将冷胁迫积累速率 (Cold stress accumulation rate, THCS)、热胁迫积累速率 (Heat stress accumulation rate, THHS)、干旱胁迫速率 (Dry stress accumulation rate, HDS)、湿胁迫速率 (Wet stress accumulation rate, HWS) 分别设置为 -0.00001、0.001、0.003、0.0005/周。

有效积温 (Degree-days to complete one generation, PDD): 昆虫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)。亚洲飞蝗平均每年发生 1~2 代, 发育周期较长, 依据王元信 (1990) 的研究结果, 并结合亚洲飞蝗在新疆的分布, 将 PDD 设置为 1 115 日度。

1.2 研究方法

选择 CLIMEX 模型中的温带参数模块 (Temperate-Template), 根据亚洲飞蝗相关生物学数据对参数进行调整, 将调整好的参数输入模型计算其生态气候指数 (Ecoclimatic Index, *EI*), 输出结果利用 ArcGIS 10.2 反距离权重法 (Inverse Distance Weighted, IDW) 进行空间插值、重分类和专题制图, 绘制亚洲飞蝗在我国历史气候条件下及未来气候条件下适生区面积的变化 (秦嘉誉等, 2019)。

EI 值范围为 0~100, 该值越小表示该地区越不适合物种生存, *EI* = 100 表示该地区极其适合物种生存, 只有在实验室环境中才能出现。该研究基于亚洲飞蝗实际地理分布情况, 将 $2 < EI \leq 10$ 定

义为低度适生; $10 < EI \leq 20$ 为中度适生; $EI > 20$ 为高度适生。

2 结果与分析

2.1 基于历史气候条件下亚洲飞蝗适生区分布

CLIMEX 模型结果表明亚洲飞蝗在新疆的气候适生区约为 35.61 万 km² (表 2), 占新疆陆地面积的 21.45%, 主要分布在 42.69~48.29°N 区域, 其中高度适生区面积约为 4.07 万 km², 占新疆陆地面积的 2.45%, 包括伊犁、博尔塔拉中部、塔城西北部及南部、阿勒泰西部、昌吉和乌鲁木齐南部地区, 在吐鲁番和阿克苏有零星分布; 中度适生区面积约为 11.04 万 km², 占新疆陆地面积的 6.65%, 包括伊犁、博尔塔拉、塔城西北部及南部、阿勒泰北部及东南部、昌吉和乌鲁木齐北部、哈密中部、吐鲁番西北部、巴音郭楞北部、阿克苏和克州西北部地区; 低度适生区面积约为 22.51 万 km², 占新疆陆地面积的 12.35%, 主要围绕中度适生区周围分布。

哈萨克斯坦两州境内亚洲飞蝗的适生区范围约为 48.88 万 km², 占两州陆地面积的 96.39%, 集中在 47.03~51.65°N 区域, 其中高度适生区面积约为 18.76 万 km², 占两州陆地面积的 36.99%, 包括东哈萨克斯坦州北部和阿拉木图州东南部地区。中度适生区面积约为 22.90 万 km², 占两州陆地面积的 45.15%, 包括两州的大部分地区。低度适生区面积约为 7.22 万 km², 占两州陆地面积的 14.24%, 包括东哈萨克斯坦州东北部、阿拉木图州西北部以及两州交界地区 (图 2)。

表 2 A1B 气候情景下亚洲飞蝗适生区面积及百分比

Table 2 Areas and percentages of suitable areas for *Locusta migratoria migratoria* under A1B climate scenarios

地区 Area	A1B 气候情景 A1B climate scenario	0 < EI ≤ 2		2 < EI ≤ 10		10 < EI ≤ 20		EI > 20	
		面积 (×10 ⁴ km ²) Area	比例 (%) Ratio	面积 (×10 ⁴ km ²) Area	比例 (%) Ratio	面积 (×10 ⁴ km ²) Area	比例 (%) Ratio	面积 (×10 ⁴ km ²) Area	比例 (%) Ratio
新疆 Xinjiang	Current	130.39	78.55	20.51	12.35	11.04	6.65	4.07	2.45
	2050	129.91	73.44	25.13	15.14	13.30	8.01	5.67	3.41
哈萨克斯坦两州 Two states of Kazakhstan	Current	1.83	3.61	7.22	14.24	22.90	45.15	18.76	36.99
	2050	0.52	1.04	16.72	32.97	24.23	47.79	9.23	18.21

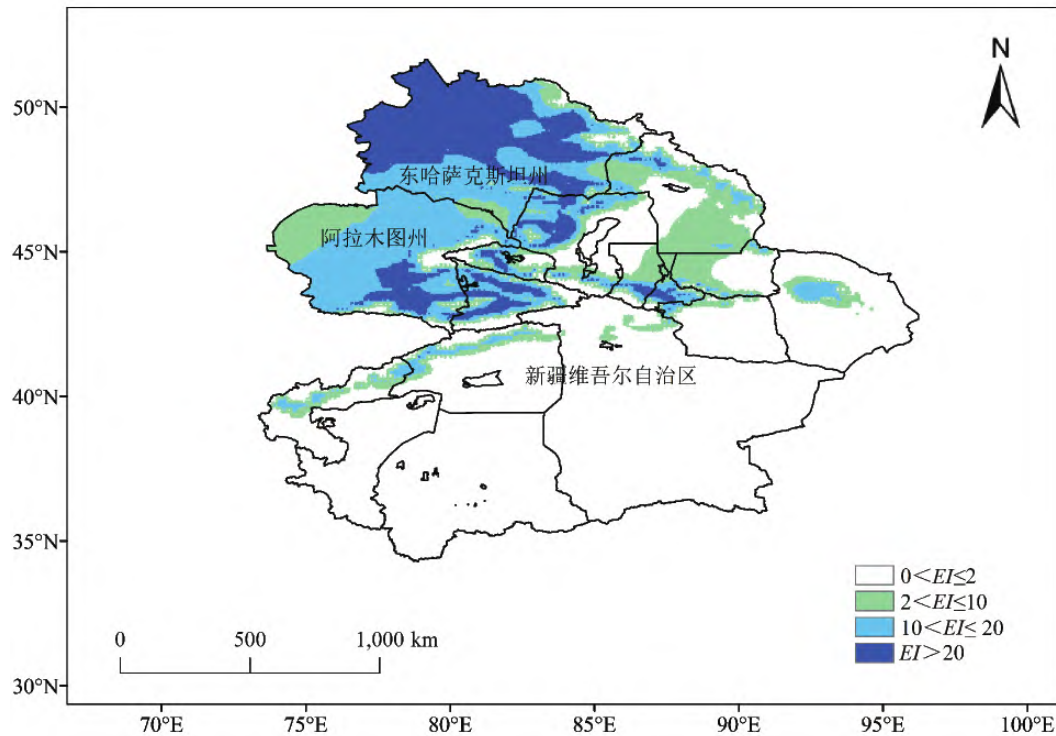


图2 历史气候条件下亚洲飞蝗在新疆和中哈边境的适生区

Fig. 2 Potential distribution areas for *Locusta migratoria migratoria* in Xinjiang and China-Kazakhstan border region under historical climate scenario

注: 该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4403 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: The map was based on the standard map No. GS (2020) 4403 downloaded from the standard map service website of the State Bureau of surveying, mapping and geographic information, and the base map was not modified.

2.2 基于未来气候条件下研究区域亚洲飞蝗适生区分布

未来气候条件下 (2050 年) 亚洲飞蝗在新疆的高度适生区主要分布于 $42.68 \sim 48.63^{\circ}\text{N}$, 总体适生面积分别增加了 5.10 万 km^2 。其中低度、中度、高度适生区面积分别增加了 2.78 、 1.36 、 0.96 万 km^2 。亚洲飞蝗在北疆阿勒泰、伊犁、昌吉及乌鲁木齐的高度适生区面积增加较多, 分别增加了 0.15 、 0.69 、 0.20 、 0.28 万 km^2 ;

2.3 不同指数及胁迫因子对亚洲飞蝗适生区分布的影响

影响亚洲飞蝗在研究区域分布的主要指数和胁迫因子, 分别为温度指数 (Temperature index, TI)、湿度指数 (Moisture index, MI)、冷胁迫 (Cold stress, CS) 及干胁迫 (Dry stress, DS)。TI 是限制亚洲飞蝗在研究区域分布的主要因素, 随着时间推移, TI 值在逐渐增大, 不受 TI 影响的地区主要分布在阿勒泰东北部、哈密中部、巴音郭楞北部、新疆南疆边缘地区、东哈萨克斯州东北

密适生程度明显升高。而在哈萨克斯坦两州的高度适生区主要分布于 $48.51 \sim 51.34^{\circ}\text{N}$, 总体适生面积增加了 2.57 万 km^2 。其中低度、中度适生区面积分别增加了 18.73 、 2.63 万 km^2 , 高度适生面积减少了 18.69 万 km^2 (图 3)。未来气候条件下亚洲飞蝗适生区向高纬度地区扩散趋势明显, 总体适生区面积增加, 亚洲飞蝗在新疆的增幅更大。两州地区高度适生区减少明显, 但仍存在大面积高度适生区。

部及阿拉木图州东部地区。未来气候条件下, 东哈萨克斯坦州西北部地区的适生区 MI 值降低幅度最大, 中哈边境区域 MI 值整体也呈下降趋势, 塔城中部、昌吉东部及西部、南疆及东疆的绝大部分地区 MI 值下降为零 (图 4)。研究区域内受冷胁迫影响的面积在逐步减小。干胁迫影响的区域主要分布在塔城中部、新疆南疆及东疆绝大部分地区, 东哈萨克斯坦州不受影响, 未来气候条件下, 阿拉木图州的 DS 值有所增加 (图 5)。

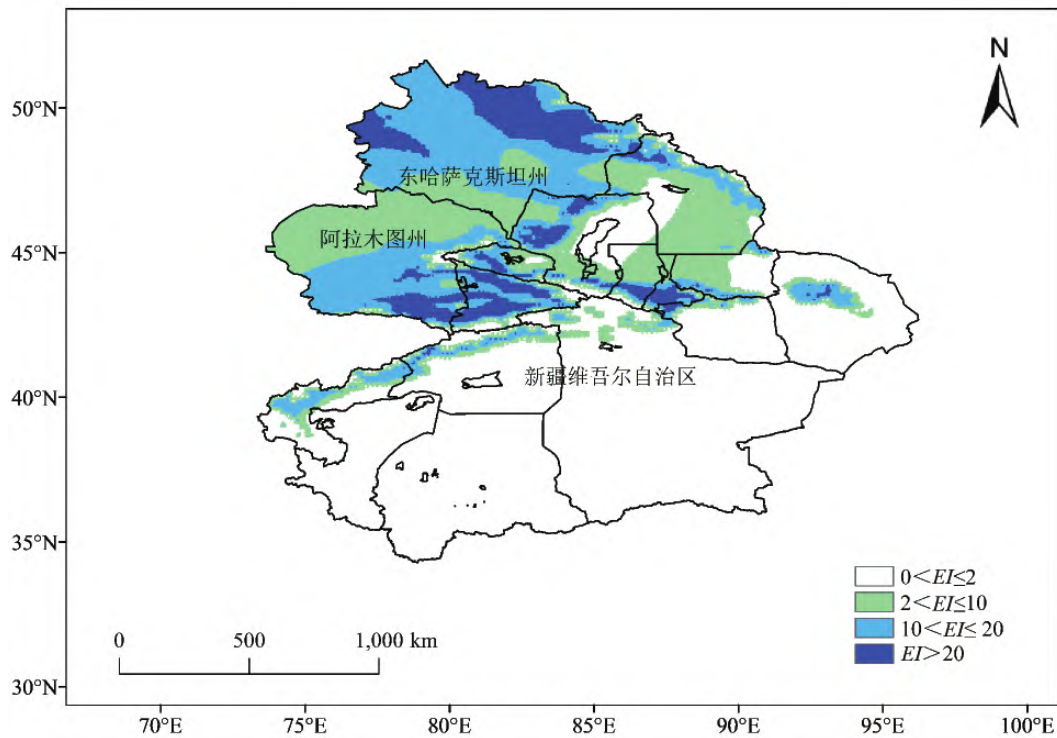


图3 2050年A1B情景下亚洲飞蝗在新疆和中哈边境的潜在地理分布

Fig. 3 Potential distribution areas for *Locusta migratoria migratoria* in Xinjiang and China-Kazakhstan border region under the A1B scenario in 2050

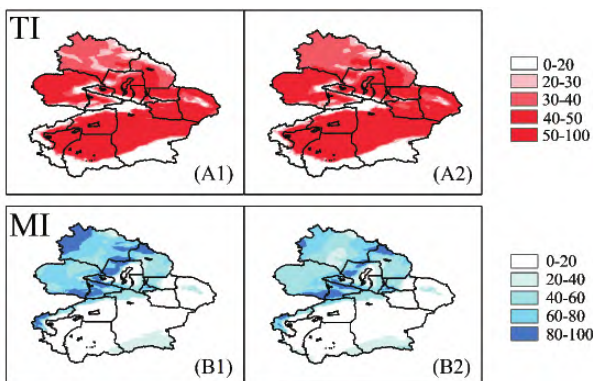


图4 研究区域亚洲飞蝗适生区的温度和湿度指数分布

Fig. 4 Distribution of TI and MI in suitable areas of

Locusta migratoria migratoria in the study area

注: A, 温度指数; B, 湿度指数。下标 1、2 分别表示历史、2050 年的气候条件。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4403 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: A, Temperature index; B, Moisture index. Subscripts 1 and 2 indicated the historical and 2050 climatic conditions respectively. The map was based on the standard map No. GS (2020) 4403 downloaded from the standard map service website of National Bureau of surveying, mapping and geographic information, and the base map was not modified.

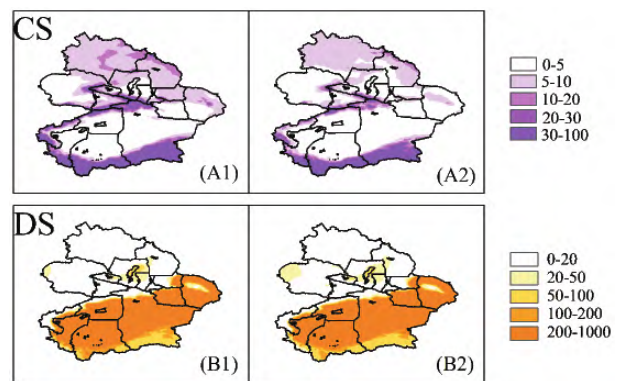


图5 研究区域亚洲飞蝗适生区的冷胁迫和干胁迫因子分布

Fig. 5 Distribution of CS and DS in suitable areas of

Locusta migratoria migratoria in the study area

注: A, 冷胁迫因子; B, 干胁迫因子。下标 1、2 分别表示历史、2050 年的气候条件。该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS (2020) 4403 号的标准地图制作, 底图无修改。Note: A, Cold stress; B, Dry stress. Subscripts 1 and 2 indicated the historical and 2050 climatic conditions respectively. The map was based on the standard map No. GS (2020) 4403 downloaded from the standard map service website of National Bureau of surveying, mapping and geographic information, and the base map was not modified.

2.4 历史及未来气候下亚洲飞蝗种群动态分析

温度是影响亚洲飞蝗迁飞活动的主要因素(毕建春等, 2017)。因此, 选取亚洲飞蝗迁飞路径上的4个重要节点(Yu *et al.*, 2020), 提取出模型中历史及未来气候条件下温度和GI值年内变化情况, 从而并对不同气候条件下的种群动态进行分析。2050年月平均温度升高2℃左右, 因此GI值整体提高。从GI值上看, 历史及未来气候条

件中, 亚洲飞蝗在额尔齐斯河沿岸、阿勒泰和塔城地区GI值均呈单峰型, 高峰期出现在5月中旬到8月之间; 在巴尔喀什湖地区GI值呈双峰型, 峰值分别出现在5月、6月和10月附近。在气候变暖的条件下, 额尔齐斯河沿岸和巴尔喀什湖地区GI峰值提前, 阿勒泰和塔城地区峰值不变。除了巴尔喀什湖地区春季峰值降低外, 其他3个地区峰值均增大(图6)。

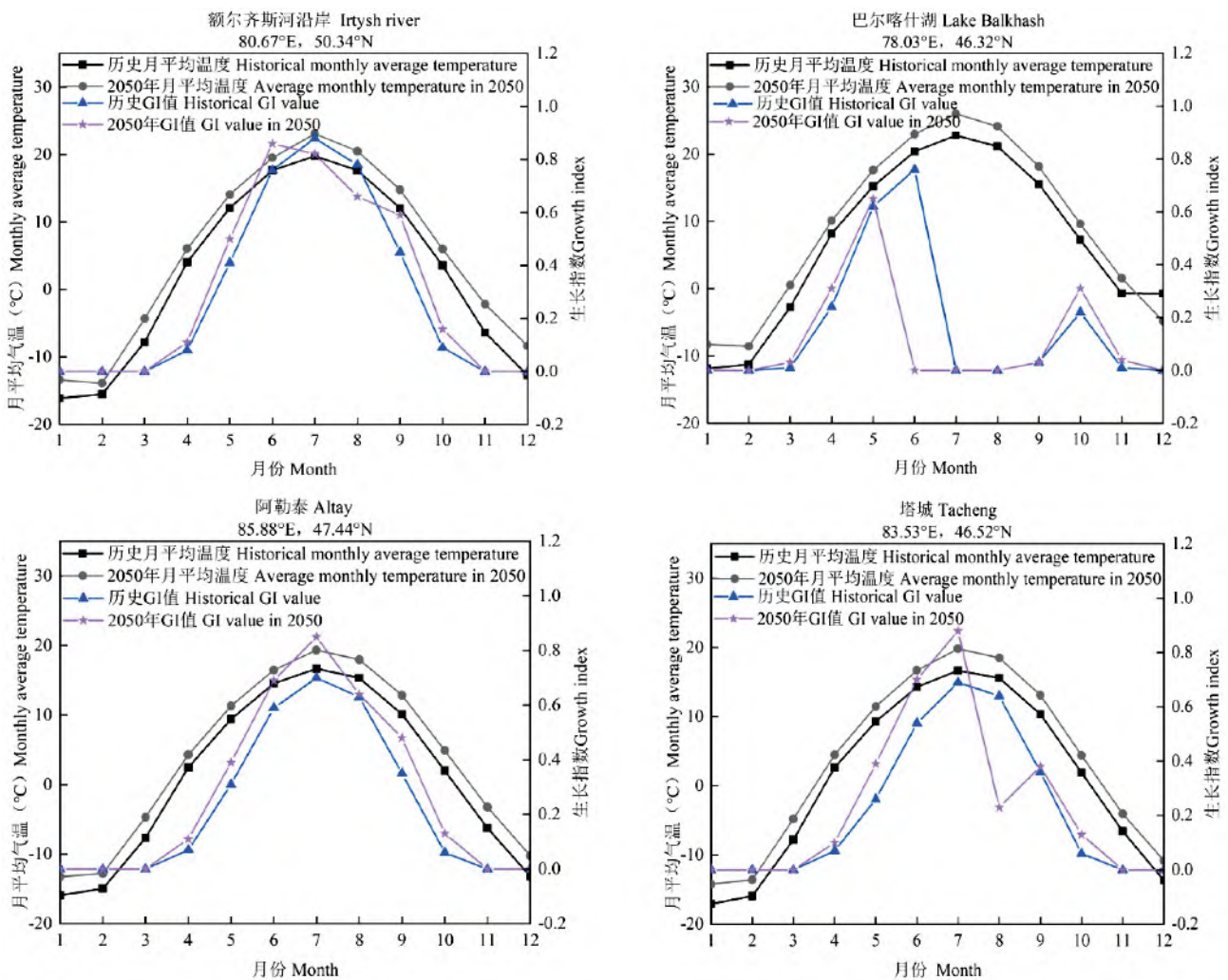


图6 历史及未来气候条件下亚洲飞蝗在部分适生区的温度和生长指数变化

Fig. 6 Changes of temperature and growth index of *Locusta migratoria migratoria* in some suitable areas under historical and future climatic conditions

3 结论与讨论

亚洲飞蝗在研究区域适生区边界整体向高纬度地区扩展, 未来气候条件下, 两州地区高度适生区面积减少, 但东哈萨克斯坦仍存在大面积高度适生区, 新疆不同适生区面积均增加。张杰等

(2019) 利用 MaxEnt 模型分析发现毗邻国家哈萨克斯坦亚洲飞蝗灾暴发区与我国暴发区具有相同气候环境特征。本文基于 CLIMEX 模型对亚洲飞蝗在当前和未来气候条件下的适生区变化进行预测, 分析其迁飞关键节点的全年生长指数, 对新疆和中哈边境这一亚洲飞蝗灾害时间和空间分布特征进行了更为详尽的预测, 为其综合防控提出

了借鉴和依据。CLIMEX 模型仅仅考虑到常规的气候因素对亚洲飞蝗的影响,而其实际地理分布是受多种因素综合作用的结果(崔亚琴等,2019),如亚洲飞蝗迁飞能力、寄主植物的分布及长势状况、生境迁移程度,都是影响其分布的重要因素,应综合考虑这些因素的影响,以提高预测的准确度(李敏,2012; Guo *et al.*, 2015; 贾栋等,2020)。

准噶尔盆地西部边缘蝗区、阿勒泰蝗区、天山北麓西段山前冲积扇缘蝗区、吐鲁番盆地蝗区和博斯腾湖蝗区是新疆的主要蝗区,前三者水源和食料较为充足,未来气候条件下新疆亚洲飞蝗总体适生面积增加(范福来和王元信,1995; 范福来,2011)。从不同指数和胁迫因子角度分析,随着气候变暖 TI 值将不断增大,CS 值不断减小,表明将来的温度条件将更适于亚洲飞蝗的繁衍和扩散。其中准噶尔盆地西部边缘蝗区的塔城南湖和阿勒泰吉木乃县距离哈萨克斯坦的阿拉湖和斋桑泊亚洲飞蝗虫源地较近,成为近些年该蝗区亚洲飞蝗频繁发生的主要原因之一(范福来和王元信,1995; 范福来,2011; 黄辉和朱恩林,2001)。除温度外,以水源为代表的湿度条件也是影响亚洲飞蝗生存和迁飞的重要影响因素。亚洲飞蝗多分布在湖泊周围、河流沿岸沼泽地带(范福来,2011),新疆地区的气候变暖已对区域水文循环产生重要影响,气候变化引起了新疆大部分河流的径流量增加,但人类活动对地表水的过度耗用导致下游径流的减少,湖泊干涸(安志清,2016),进而影响亚洲飞蝗的适生区。阿勒泰蝗区地处阿尔泰山前平原,额尔齐斯河北岸,额尔齐斯河与克兰河、阿拉哈克河等交汇处,地势低洼的支流与干流汇合处出现连片沼泽,适生面积不断增加。天山北麓西段山前冲积扇缘蝗区也因其东西连片的沼泽带成为亚洲飞蝗灾害的发生区。吐鲁番盆地蝗区属于极端干旱的暖温带内陆荒漠气候,但艾丁湖周围生长着芦苇等亚洲飞蝗喜食植物,适宜其生长发育繁殖,具有较高的定殖风险。博斯腾湖蝗区在 20 世纪 50 年代到 80 年代数次暴发成灾,主要与人类活动、大量开垦荒地、苇湖区水位下降等密切相关(黄慰军等,2005; 范福来,2011)。新疆南疆地区和准噶尔盆地分布着世界上第二大沙漠塔克拉玛干沙漠和第三大沙漠古尔班通古特沙漠,这里气候极端干旱不适宜亚洲飞蝗的生存,DS 值过高是限制其分布最主要

的原因。哈萨克斯坦两州地区高度适生区面积缩减主要和 TI 值的变大和 MI 值的变小有关,极度的高温和干旱成为了限制亚洲飞蝗发育和分布的主要因素。

有害生物跨境危害逐渐成为国际性的生态问题,由于亚洲飞蝗具有的远距离迁飞特性使其扩散更加容易,可以不依靠人类活动、物流运输进行传播。于冰洁等(2020)对中哈边境亚洲飞蝗的迁飞路径和气象条件进行分析,文中推测的境外虫源地哈萨克斯坦境内的斋桑泊和额尔齐斯河在本研究的高度适生区内;其次,温度介于 15 ~ 31℃ 之间时亚洲飞蝗会迁出。根据亚洲飞蝗适宜迁飞的温度和 CLIMEX 中 GI 在一年中的变化可以看到,亚洲飞蝗在额尔齐斯河沿岸和巴尔喀什湖地区的发育时间延长,可能导致其迁飞活动提前、延长或加剧。主要降落地阿勒泰和塔城地区 GI 值增大,7 月份达到最大值,仍是未来监测的重点区域。亚洲飞蝗在巴尔喀什湖地区 GI 值成双峰型,且巴尔喀什湖和塔城地区 2050 年的 GI 值在 6 月或 7 月急剧下降,可能由于夏季高温严重超过了亚洲飞蝗适宜温度发育阈值,因此 GI 值大幅度降低。

总之,针对中哈边境蝗虫跨境迁飞为害的长期性,应对亚洲飞蝗主要适生区应采取进行长期定点监测,建立昆虫雷达等监测技术平台网络,与虫源国专家联合攻关方是解决中国西北边境境外蝗虫跨境入侵危害的根本途径(季荣,2020)。

参考文献 (References)

- An ZQ. Response of Xinjiang hydrology and water resources to global climate change [J]. *Energy and Energy Conservation*, 2016, 8: 177 - 178. [安志清. 新疆水文水资源对全球气候变化的响应 [J]. 能源与节能, 2016, 8: 177 - 178]
- Bi JC, Chen XL, Jiang CX, *et al.* Origins and migration pathways of white-backed planthopper *Sogatella furcifera* (Horváth) in Sichuan [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (6): 1832 - 1843. [毕建春, 陈星燎, 蒋春先, 等. 四川地区白背飞虱虫源地分析及迁入路径 [J]. 生态学报, 2017, 37 (6): 1832 - 1843]
- Chen YL, Liu JP, Hang CM, *et al.* Locust and its Control in Xinjiang [M]. Urmqi: Xinjiang People's Press, 1979: 1 - 106. [陈永林, 刘举鹏, 黄春梅, 等. 新疆的蝗虫及其防治 [M]. 乌鲁木齐: 新疆人民出版社, 1979: 1 - 106]
- Cui YQ, Guo SW, Ge XZ, *et al.* Prediction of potential geographical distributions of *Corythucha ciliate* (Hemiptera: Tingidae) in China under climate change condition [J]. *Plant Protection*, 2019, 45 (5): 171 - 177. [崔亚琴, 郭思维, 葛雪贞, 等. 气候变化条件下悬铃木方翅网蝽在中国的适生性分析 [J]. 植物保护, 2019, 45 (5): 171 - 177]

- Dong ZK, Ge F. The fitness of insects in response to climate warming [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2011, 48 (5): 1141–1148. [董兆克, 戈峰. 温度升高对昆虫发生发展的影响 [J]. 应用昆虫学报, 2011, 48 (5): 1141–1148]
- Fan FL, Wang YX. Occurrence and control of *Locusta migratoria migratoria* in Xinjiang, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15 (2): 134–141. [范福来, 王元信. 亚洲飞蝗在中国新疆维吾尔自治区的发生与防治 [J]. 生态学报, 1995, 15 (2): 134–141]
- Fan FL. Control of Locust Disaster in Xinjiang [M]. Urmqi: Xinjiang Science and Technology Press, 2011: 51–204. [范福来. 新疆蝗虫灾害治理 [M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2011: 51–204]
- Farzin S, Lalit K, Subhashni T. Climate change impacts on the future distribution of date palms: A modeling exercise using CLIMEX [J]. *PLoS ONE*, 2018, 7 (10): 1–12.
- Guo H, Wu L, Zhao L. Talking about locust harm and control policy in border area of Tacheng [J]. *Xinjiang Animal Husbandry*, 2011, 12: 60–61. [郭宏, 乌兰, 赵磊. 浅谈塔城边境地区蝗虫危害与防控政策 [J]. 新疆畜牧业, 2011, 12: 60–61]
- Guo SW, Ge XZ, Zou Y, et al. Projecting the potential global distribution of *Carpomya vesuviana* (Diptera: Tephritidae), considering climate change and irrigation patterns [J]. *Forests*, 2019, 10 (4): 355–374.
- Huang H, Zhu EL. A serious outbreak of locusts in Kazakhstan [J]. *World Agriculture*, 2001, 6: 46–47. [黄辉, 朱恩林. 哈萨克斯坦蝗灾严重发生 [J]. 世界农业, 2001, 6: 46–47]
- Huang WJ, Huang Z, Li C. Climatic analysis of the outbreak of *Locusta migratoria migratoria* in Bosten Lake, Xinjiang [J]. *Journal of Catastrophology*, 2005, 20 (3): 84–87. [黄慰军, 黄镇, 李聪. 新疆博斯腾湖亚洲飞蝗大暴发气候成因分析 [J]. 灾害学, 2005, 20 (3): 84–87]
- Ji R. Mechanism of Locust Outbreak and Application of Insect Radar Monitoring Technology in Xinjiang [M]. Beijing: Science Press, 2020: 80–86. [季荣. 新疆蝗虫暴发机理及昆虫雷达监测技术应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2020: 80–86]
- Jia D, Xu ZQ, Liu YH, et al. Potential distribution prediction of apple-grass aphid *Rhopalosiphum oxyacanthae* in China based on MaxEnt model [J]. *Journal of Plant Protection*, 2020, 47 (3): 528–536. [贾栋, 徐朝茜, 刘艳红, 等. 基于 MaxEnt 模型预测苹红缢管蚜在中国的适生区 [J]. 植物保护学报, 2020, 47 (3): 528–536]
- Kriticos DJ, Maywald GF, Yonow T, et al. CLIMEX Version 4: Exploring the Effects of Climate on Plants, Animals and Diseases [M]. Canberra: CSIRO, 2015.
- Kriticos DJ, Webber BL, Leriche A, et al. Global highresolution historical and future scenario climate surfaces for bioclimatic modelling [J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3 (1): 53–64.
- Lan ZX, Ma SJ. The Systems ecology basis of locust eradication by combining treatment with rehabilitation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1981, 1: 34–40. [兰仲雄, 马世骏. 改治结合根除蝗害的系
- 统生态学基础 [J]. 生态学报, 1981, 1: 34–40]
- Lesley TL, Rachael YD, Pallavi C, et al. Gene expression under thermal stress varies across a geographical range expansion front [J]. *Molecular Ecology*, 2016, 25 (5): 1141–1156.
- Li H, Zhu HT, Tong Z, et al. Analysis of the features on locust outbreak in the west of Aletai in Xinjiang [J]. *Desert and Oasis Meteorology*, 2011, 5 (4): 58–62. [李焕, 朱海棠, 童忠, 等. 新疆阿勒泰地区西部蝗虫发生特征分析 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2011, 5 (4): 58–62]
- Li PX, Lin J, Maidi KEM, et al. Effects of future climate change on potential geographic distribution of *Calliptamus italicus* (L.) in Xinjiang [J]. *Plant Protection*, 2017, 43 (3): 90–96. [李培先, 林峻, 麦迪·库尔曼, 等. 气候变化对新疆意大利蝗潜在分布的影响 [J]. 植物保护, 2017, 43 (3): 90–96]
- Ma SJ. Ecological adaptation of insect population [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1982, 3: 27–29. [马世骏. 昆虫种群的生态适应 [J]. 生态学报, 1982, 3: 27–29]
- Qiao YM, Lian ZM, Hu YQ. A survey of acridological research works on grasshoppers in Xinjiang [J]. *Journal of Xi'an University*, 1999, 2 (2): 3–5. [乔永民, 廉振民, 胡玉琴. 新疆蝗虫学研究概况 [J]. 西安联合大学学报, 1999, 2 (2): 3–5]
- Qin YJ, Lan S, Lu GC, et al. Prediction on potential geographical distribution of European cherry fruit fly *Rhagoletis cerasi* in China under climate change [J]. *Journal of Plant Protection*, 2019, 46 (1): 63–70. [秦誉嘉, 蓝帅, 卢国彩, 等. 气候变化条件下櫻桃绕实蝇在中国的潜在地理分布预测 [J]. 植物保护学报, 2019, 46 (1): 63–70]
- Stige LC, Chan KS, Zhang ZB, et al. Thousand-year-long Chinese time series reveals climatic forcing of decadal locust dynamics [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104 (41): 16188–16193.
- Sutherst R, Maywald G, Bottomly W, et al. CLIMEX V2. User's Guide [M]. Melbourne: Hearne Scientific Software, 2004.
- Wang H, Yu F, Hu HX, et al. Climatic changes in suitable distribution areas of *Calliptamus italicus* L. [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2014, 35 (6): 611–621. [王晗, 于非, 扈鸿霞, 等. 新疆意大利蝗适生区的气候变化特征分析 [J]. 中国农业气象, 2014, 35 (6): 611–621]
- Wang RL, Li Q, Feng CH, et al. Predicting potential ecological distribution of *Locusta migratoria tibetensis* in China using MaxEnt ecological niche modeling [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (24): 8556–8566. [王茹琳, 李庆, 封传红, 等. 基于 MaxEnt 的西藏飞蝗在中国的适生区预测 [J]. 生态学报, 2017, 37 (24): 8556–8566]
- Wang YX. Determination of developmental threshold temperature and effective accumulated temperature of *Locusta migratoria migratoria* and its application in forecasting [J]. *China Plant Protection*, 1990, 2: 9–13. [王元信. 亚洲飞蝗发育起点温度和有效积温测定及在测报中的应用 [J]. 病虫测报, 1990, 2: 9–13]
- Xiong Y, Liu XQ, Xiao PA, et al. Comparative transcriptome analysis reveals differentially expressed genes in the Asian citrus psyllid (*Diaphorina citri*) upon heat shock [J]. *Comparative Biochemistry*

- and Physiology – Part D: Genomics and Proteomics, 2019, 30: 256 – 261.
- Ya Z, Ge X, Guo S, et al. Impacts of climate change and host plant availability on the global distribution of *Brontispa longissima* (Coleoptera: Chrysomelidae) [J]. *Pest Management Science*, 2019, 76 (1): 244 – 256.
- Yang HF, Zheng JH, Wu XL, et al. Prediction of potential distribution area of *Gomphocerus sibiric* in China based on the MaxEnt Model [J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2016, 53 (1): 43 – 50. [杨会枫, 郑江华, 吴秀兰, 等. 基于 MaxEnt 模型的西伯利亚蝗虫在新疆潜在分布预测研究 [J]. *新疆农业科学*, 2016, 53 (1): 43 – 50]
- Yu BJ, Chen JJ, Ji R. Advances in research on locusts and locust monitoring technology in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Applied Entomology*, 2019, 56 (5): 927 – 933. [于冰洁, 陈吉军, 季荣. 新疆蝗虫及其监控技术研究进展 [J]. *应用昆虫学报*, 2019, 56 (5): 927 – 933]
- Yu BJ, Mai JW, Chen X, et al. Source areas and migratory trajectories of *Locusta migratoria migratoria* (Orthoptera: Acrididae) in the border region of Tacheng, Xinjiang, China and adjacent regions [J]. *Journal of Entomological Science*, 2020, 55 (1): 46 – 57.
- Yu BJ. Study on the Migration Trajectories, Source Areas and Meteorological Conditions of *Locusta migratoria migratoria* in Sino – Kazakhstan Border Areas [D]. Urumqi: Xinjiang Normal University, 2020. [于冰洁. 中哈边境亚洲飞蝗跨境迁飞路径与虫源地及迁飞气象条件研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆师范大学, 2020]
- Zhang J, Zhang Y, Zhao ZY, et al. Potential geographic distribution modeling and bioclimatic analysis of outbreak risk for the migratory locust plague in China [J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42 (3): 590 – 598. [张杰, 张旻, 赵振勇, 等. 中国飞蝗 *Locusta migratoria* 灾害地理分布模拟及其生物气候因子分析 [J]. *干旱区地理*, 2019, 42 (3): 590 – 598]
- Zhang M. Climate Change Over East – Central Asia Under the Global Warming Limits of 1.5°C and 2°C [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019. [张萌. 全球 1.5°C 和 2°C 升温目标下东亚 – 中亚地区的气候变化 [D]. 兰州: 兰州大学, 2019]
- Zhao ZC, Luo Y, Huang JB. Review IPCC 30 years (1988 – 2018) [J]. *Climate Change Research*, 2018, 14 (5): 540 – 546. [赵宗慈, 罗勇, 黄建斌. 回顾 IPCC 30 年 (1988 – 2018 年) [J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14 (5): 540 – 546]