

内蒙古草原蝗虫越冬期适生区提取研究

张惠杰

内蒙古师范大学地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2024年4月23日; 录用日期: 2024年6月5日; 发布日期: 2024年6月14日

摘 要

内蒙古自治区生态环境复杂多变, 草原蝗虫的周期性暴发对农业生产和生态平衡构成严重威胁。越冬期作为蝗虫发育周期的重要阶段, 对于蝗虫适生区监测具有不可忽视的重要性。本研究以内蒙古草原蝗虫优势种为研究对象, 选取最低地表温度、降水量、土壤盐度、海拔高度、植被类型等蝗虫越冬相关生境因子的遥感数据, 通过层次分析法计算各生境因子权重, 划分蝗虫越冬适宜性阈值, 通过生境适宜性模型构建越冬适宜指数, 提取蝗虫越冬期适生区, 探讨内蒙古蝗虫越冬期适生区时空变化及生境因子对其解释程度。结果表明: 越冬期适生区适宜性分布由东北向西南递减, 在内蒙古中东地区表现为显著上升趋势。最低地表温度是影响越冬期适生区演变的主要原因, 并且最低地表温度与植被类型的交互作用也对越冬期适生区的研究具有显著作用。

关键词

蝗虫, 生境适宜性模型, 越冬期, 适生区

Extraction of Over-Wintering Suitable Areas for *Locusts* in Inner Mongolia Grassland

Huijie Zhang

College of Geographic Sciences, Inner Mongolia Normal University, Huhhot Inner Mongolia

Received: Apr. 23rd, 2024; accepted: Jun. 5th, 2024; published: Jun. 14th, 2024

Abstract

The ecological environment of the Inner Mongolia Autonomous Region is complex and variable, and the periodic outbreaks of grassland locusts pose a serious threat to agricultural production and ecological balance. The over-wintering period, as an important stage in the development cycle of locusts, is of non-negligible importance for the monitoring of locust habitat. In this study, we took the dominant locust species in Inner Mongolia grassland as the research object, selected the

remote sensing data of the lowest surface temperature, precipitation, soil salinity, altitude, vegetation type and other habitat factors related to locust over-wintering, calculated the weights of the habitat factors through hierarchical analysis, divided the thresholds of locust over-wintering suitability, and constructed the overwintering suitability index through the habitat suitability model, extracted the suitability zones of locust over-wintering, and explored the spatio-temporal and temporal suitability zones of locust over-wintering in Inner Mongolia. We investigated the spatial and temporal changes of locust over-wintering suitable areas and the degree of explanation by habitat factors. The results showed that the distribution of suitable over-wintering areas decreased from northeast to southwest, and showed a significant upward trend in the east-central part of Inner Mongolia. Minimum surface temperature (MST) was the main factor influencing the evolution of the overwintering suitable areas, and the interaction between MST and vegetation types also played a significant role in the study of over-wintering suitable areas.

Keywords

Locust, Habitat Suitability Modeling, Over-Wintering, Suitable Areas

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

蝗灾是世界性和历史性的农牧业灾害,全球暴发面积有 $4680 \times 10^4 \text{ km}^2$,全球八分之一的人口受灾[1]。近年来全球气候变化导致异常天气多发,春季气温回升早,夏季炎热,冬季气温偏暖,为蝗虫繁殖和越冬提供了有利条件。自 2000 年以来,内蒙古蝗虫灾害连续 7 年大暴发,危害草地面积达 $8 \times 10^4 \text{ km}^2$,对草地生态环境破坏极其严重[2]。

内蒙古草原蝗虫发育过程主要可以分为蝗卵孵化成若虫,若虫羽化发育为成虫,成虫交尾产卵,蝗卵越冬到来年进行孵化等四个阶段[3]。内蒙古草原蝗虫种类大约有 149 种,其中优势种包括亚洲小车蝗(*Oedaleus decorus asiaticus*)、毛足棒角蝗(*Dasyhippus barbipes*)、红翅皱膝蝗(*Angaracris rhodopa*)、鼓翅皱膝蝗(*Angaracris barabensis*)、白边痠蝗(*Bryodemus luctuosum*)、宽须蚁蝗(*Myrmeleotettix palpalis*)等 20 余种蝗虫[4]。内蒙古草原地区虽然有多种蝗虫种类,发生时间也各不相同,但总体上多为一年发生一代[5]。其中蝗卵越冬所处时期被称为越冬期,时间范围大致为上年 11 月到当年 3 月[6]。越冬期的蝗虫以蝗卵形态在土壤中存活,受到相关生境因子作用。

随着我国遥感技术的发展与卫星数量增加,通过卫星数据监测蝗灾的发生成为新的趋势,利用卫星遥感和地理信息技术监测与治理蝗灾成为现实。吴彤等[7]应用 Landsat 数据反演 LAI,发现 LAI 与飞蝗发生面积呈负相关,并在此基础上构建了基于 LAI 的东亚飞蝗发生面积预警模型。陈健,黄健熙等[8] [9]使用 RS 技术对蝗虫栖息地进行监测,并以此反演蝗虫的发生情况;主要通过对蝗虫生境因子的反演,如分析归一化植被指数、叶面积指数、地表温度、土壤湿度与蝗虫虫口密度之间的关系,建立多元回归方程以及虫口密度模型,实现对蝗虫的监测和预警。张显峰等[10]利用中分辨率成像光谱数据对影响蝗虫发育的关键生境因子进行量化,提出一种基于卫星遥感的渐进式草原蝗灾风险评估模型,较好地反映了温度、植被、土壤、水分等关键生态因子对蝗虫的影响。由此可见,根据生境因子的变化情况联系蝗虫生存发育特性,可以判断蝗卵越冬的存活率。

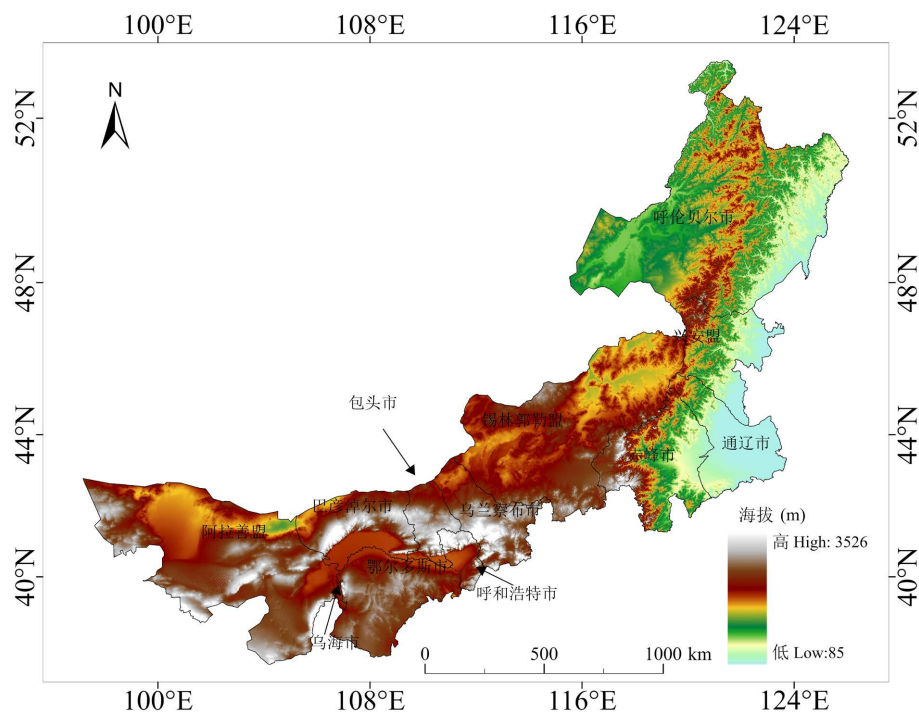
在适生区提取方面,研究者多用生境适宜性模型评价动物的栖息区域,通过构建生境适宜指数提取适生区具有良好的应用前景[11]。倪绍祥等[12]使用草地蝗虫生境的遥感图像计算机分类方法,建立了草地蝗虫潜在生境适宜评价体系,揭示草地蝗虫生境的分布及规律。张艳等[13]将内蒙古草原蝗虫的产卵期、越冬期和孵化期相关气象因子作为构建蝗虫适宜度指数的主要生境因子,对2010年的镶黄旗草原蝗虫适生区进行气象适宜性评价。李尧等[14]以亚洲小车蝗为研究对象基于不同空间尺度上的生境因子动态情况,构建蝗虫生境适宜性模型,进行多尺度空间下蝗虫生境适宜性评价。综上所述,在蝗虫适生区提取方面,生境适宜性模型同样表现出良好的潜力。

目前,蝗虫发生的研究多集中于蝗虫孵化、发育、等阶段,对于越冬期的研究较少。越冬期的蝗卵存活率直接决定了蝗虫孵化的最大基数,也在一定程度上决定了蝗虫种群数量,这一时期对于完善蝗虫发生繁育周期至关重要。现有研究对于越冬期蝗虫适生区分布缺乏定量描述,同时也缺少关于蝗虫适生区时空变化方面的分析研究。因此,本研究以内蒙古草原蝗虫优势种为对象,选取蝗虫越冬期相关生境因子,结合蝗虫越冬习性对蝗虫越冬适宜性等级进行划分,使用层次分析法赋予权重,构建越冬适宜指数,提取蝗虫适生区。对蝗虫越冬期适生区进行时空变化分析,探讨其生境因子对适生区演变的解释程度,以期为内蒙古草原保护提供蝗虫防治监测及数据信息支撑。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

本研究区为内蒙古自治区,地处我国北部边疆蒙古高原的南部,位置介于 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'N$, $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'E$ 之间。气候为大陆性气候,气候带呈带状分布,从东向西由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。全区年均气温为 $5.3^{\circ}C$,全区年均降水量为305 mm,四季降水量冬、夏季偏多,春、



本图基于标准地图服务网站下载的标准地图制作,审图号为GS(2020)4619,底图界无修改。

Figure 1. Overview of the study area

图 1. 研究区概况

秋季偏少。内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分，天然草原面积 13.2 亿亩，草原面积占全国草原总面积的 22%，自东向西依次分布着草甸草原、典型草原、荒漠草原等草原类型[15]，占全区草原总面积的 89%。研究区较高的纬度、植被类型相对单一，为草原蝗虫发育提供了适宜的生存环境(如图 1 所示)。

2.2. 数据来源

本研究使用 MODIS 数据、降水量、土壤类型、土地利用类型、地形等数据进行分析，包括 2000~2020 年每月的 MOD11A2(LST)，2001~2020 年每月的降水量数据，以及土壤类型、海拔高度和土地利用等数据。将 MOD11A2(LST) 8 天数据合成为月尺度并对其进行高程修正，取最小值平均获得 2000~2020 年每月的最低地表温度。降水量数据集单位为 0.1 mm，在计算前对降水量进行单位修正为 mm。各数据集统一选用空间分辨率为 1 km，数据来源如表 1 所示。

Table 1. Sources of study data

表 1. 研究数据来源

数据名称 Data name	空间分辨率 Spatial Resolution	时间分辨率 Time Resolution	数据来源 Data sources
最低地表温度(LST _{min})	1 km	2001~2020 年	美国 NASA 地球数据官网 (https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/)
地表高程(DEM)	1 km	2020 年	美国 NASA 地球数据官网 (https://appears.earthdatacloud.nasa.gov/)
植被类型(VT)	1 km	2000~2020 年	中国科学院环境资源与数据中心 (http://www.resdc.cn)
土壤盐度(SS)	1 km	2009 年	国家冰川冻土沙漠科学数据中心 (http://www.ncdc.ac.cn)
降水量数据(PRE)	1 km	2001~2020 年	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/)

2.3. 研究方法

2.3.1. 适生区适宜指数

结合蝗卵越冬习性对各生境因子赋予权重并进行适宜性划分(表 2)，进而构建越冬期适宜指数。使用 AHP 方法计算越冬期生境因子适宜性权重，考虑到蝗卵越冬主要受降雪和低温的影响，过低的温度会冻伤蝗卵，导致蝗卵存活率大幅下降，降雪层可以在一定程度上保护蝗卵安全越冬，所以越冬期选择最低地表温度和降水量月尺度数据作为动态评价因子参与判断。而静态生境因子则是植被类型、土壤盐度和海拔高度等时空变化较小的生境因子，这些生境因子选用年尺度数据参与评价。使用上年 11 月~当年 3 月数据计算越冬期适宜指数(WSI)，提取得到越冬期蝗虫适生区多年平均空间分布。

$$WSI = \sum_{i=1}^n w_i f_i \tag{1}$$

式中：WSI 表示越冬期蝗虫适宜指数；n 代表生境因子个数；w_i 表示第 i 个生境因子权重值，f_i 表示第 i 个生境因子得分值；i=1,2,3,...,n。

对适生区分布验证主要通过各年份的蝗虫发生点结合蝗虫适宜发生等级进行验证。用适宜等级中的最适宜、较适宜和一般等级表示蝗虫适宜发生的真值区域，不适宜和次适宜等级表示蝗虫适宜发生的无效区域，对蝗虫发生点进行逐个像元上的统计，验证蝗虫发生点的落点范围，进行越冬期蝗虫适生区的精度评价。

Table 2. Habitat factor suitability evaluation grades
表 2. 生境因子适宜性等级及权重

评价类型 Evaluation type	不适宜 Unsuitable	次适宜 Suboptimal	一般适宜 Generally suitable	较适宜 More suitable	最适宜 Optimal	适宜指数权重 Appropriate index weights
Pre (mm)	>20	0~3, 15~20	3~5, 12~15	5~8	8~10	0.30
LST _{min} (°C)	>5, <-30	-5~5	-10~-5, -30~-25	-15~-10, -25~-20	-20~-15	0.40
VT	沙地、裸地	林地、耕地	低覆盖草地	高覆盖草地	中覆盖草地	0.14
DEM (m)	<800, >1300	1200~1300	800~900	1100~1200	900~1100	0.06
SS (dSm ⁻¹)	8~42	<8	<3	<2	<1	0.10

注：Pre 表示降水量、LST_{min} 表示最低地表温度、DEM 表示海拔高度、SS 表示土壤盐度、VT 表示植被类型。

2.3.2. 地理探测器

地理探测器可以利用地理现象空间异质性揭示其驱动因子[16]。本研究使用 R 语言中的 GD 包进行分析，使用因子探测分析蝗虫适生区的生境因子对其影响力程度，包括降水量、海拔高程、最低地表温度、土壤盐度、植被类型等 5 个生境因子。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{2}$$

式中， q 表示 5 个生境因子对适生区的影响解释力， $q \in [0,1]$ ， $h=1,\dots,L$ 表示自变量分层序号； N_h 和 N 表示 h 层和全区的单元数量； δ_h 和 δ^2 表示 h 层和区域内 Y 值的方差；SSW 表示层内方差之和；SST 表示全区总方差。

3. 结果分析

3.1. 蝗虫适生区时空分布特征与验证

3.1.1. 适生区空间分布特征

利用生境适宜性模型构建越冬期适宜指数，得到 2001 年到 2020 年的多年平均越冬期适生区空间分布(图 2)。在其中最适宜和较适宜的蝗虫发生区集中在锡林郭勒盟东部和西部、乌兰察布市北部和南部、兴安盟西部、赤峰市和通辽市北部、呼伦贝尔市东部、呼和浩特市和包头市北部、巴彦淖尔市东部等小部分地区。不适宜和次适宜的蝗虫发生的区域主要集中在阿拉善盟西部地区和呼伦贝尔市北部地区，地貌特征在一定程度上影响了蝗虫越冬区域的分布[17] [18]。越冬期蝗虫适生区的空间分布呈现中部向东北和西南递减的渐变，主要高值集中在中部至南部区域，西南区域的适宜指数要低于东北地区，这可能是由西部地区多为荒漠戈壁，冬季的温度变化更为极端，小于山脉地区[19]。昼夜温差变化较大，不利于蝗卵保存越冬，东北部地区大部分为大兴安岭山脉地区，对西伯利亚冷空气具有阻挡作用，昼夜温差变化要小于荒漠草原地区[20]。中部地区颜色深浅呈现斑块状分布，表明这些区域的微气候条件复杂多变，可能是锡林郭勒盟地区是低山丘陵地区、高平原和宽谷平原地形交错所致，而且由于内蒙古的冬季温度普遍较低，蝗虫会选择地势较低或者平坦的地区进行越冬。

3.1.2. 适生区分布验证

根据野外调查以及已有文献资料记载，整理了 20 年来内蒙古草原蝗虫发生情况以及各盟市林业局和草原局公示资料对蝗虫发生时间点进行提取，得到 20 年间内蒙古对应旗县区域的蝗虫发生点。结合蝗虫发生点的落点区域进行逐像元统计，真值区域落点为 68 个，无效区域落点为 15 个，总计 83 个点。由此

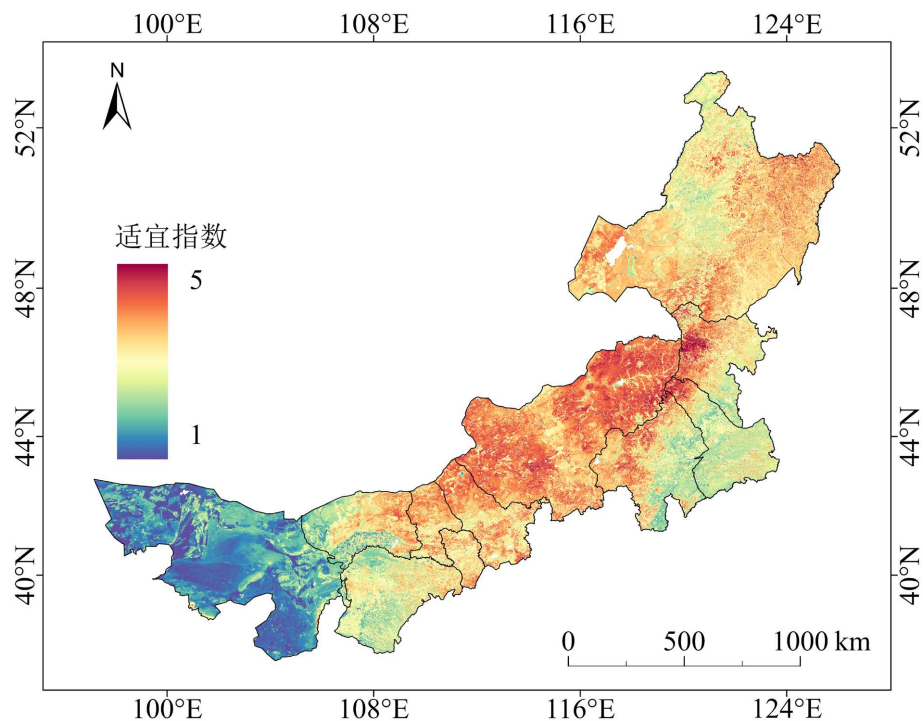


Figure 2. Multi-year average spatial distribution of overwintering locust habitat areas
图 2. 越冬期蝗虫适生区多年平均空间分布

可得蝗虫适生区分布情况与蝗虫发生点相对应，评价精度达到 81.93% (表 3)。这表明越冬期适生区可以在一定程度上有效说明蝗卵越冬的分布情况。由于蝗虫适生区变化是一个动态变化过程，在这个过程中也存在一些不足之处。在部分适生区依然有蝗虫发生点落在不敏感的区域，未来有必要针对这类地区进行更细致的景观结构变化识别以及增加高分辨影像数据源等方面的补充研究[21]。

Table 3. Validation point statistics
表 3. 验证点统计

验证区域 validation area	验证点数量 Number of validation sites	占比(%) Percentage (%)
真值区域	68	81.93
无效区域	15	18.07
总计	83	100.00

3.2. 蝗虫适生区时空变化特征

为了确定草原蝗虫越冬适宜性指数的时间变化趋势，对越冬期进行 slope 分析和 MK 检验，得到适宜性指数变化趋势和显著性(图 3)。越冬期中东部大部分地区显示出极显著的上升趋势，越冬期显著下降趋势显示在北部地区，数值范围为-0.005 到-0.015。越冬期在北部及中西部地区出现显著下降趋势。越冬期呈现出长速率的面积为 712,790 km²，总体面积占比为 68.77%，其中大于 0.015 速率的面积为 53,772 km²，总体面积占比为 5.19%，主要集中在呼伦贝尔市和通辽市东部地区。小于-0.005 速率的面积为 169,356 km²，总体占比为 16.34%，主要集中在呼伦贝尔市草原与森林渐变交错地带，以及阿拉善盟北部和南部小部分地区。呈现显著上升趋势地区的面积为 653,615 km²，总体面积占比为 63.06%，主要在锡林郭勒盟

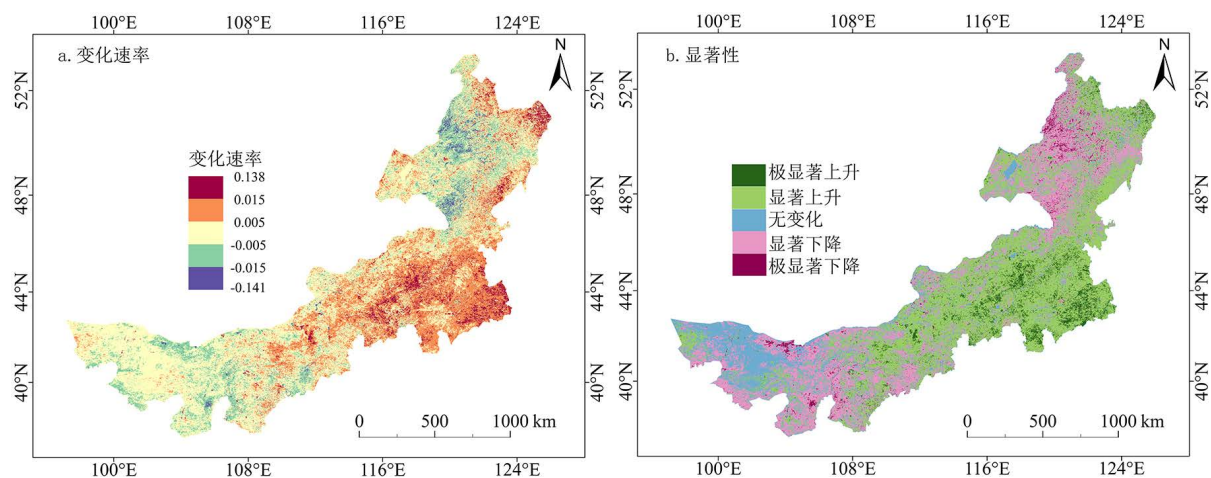
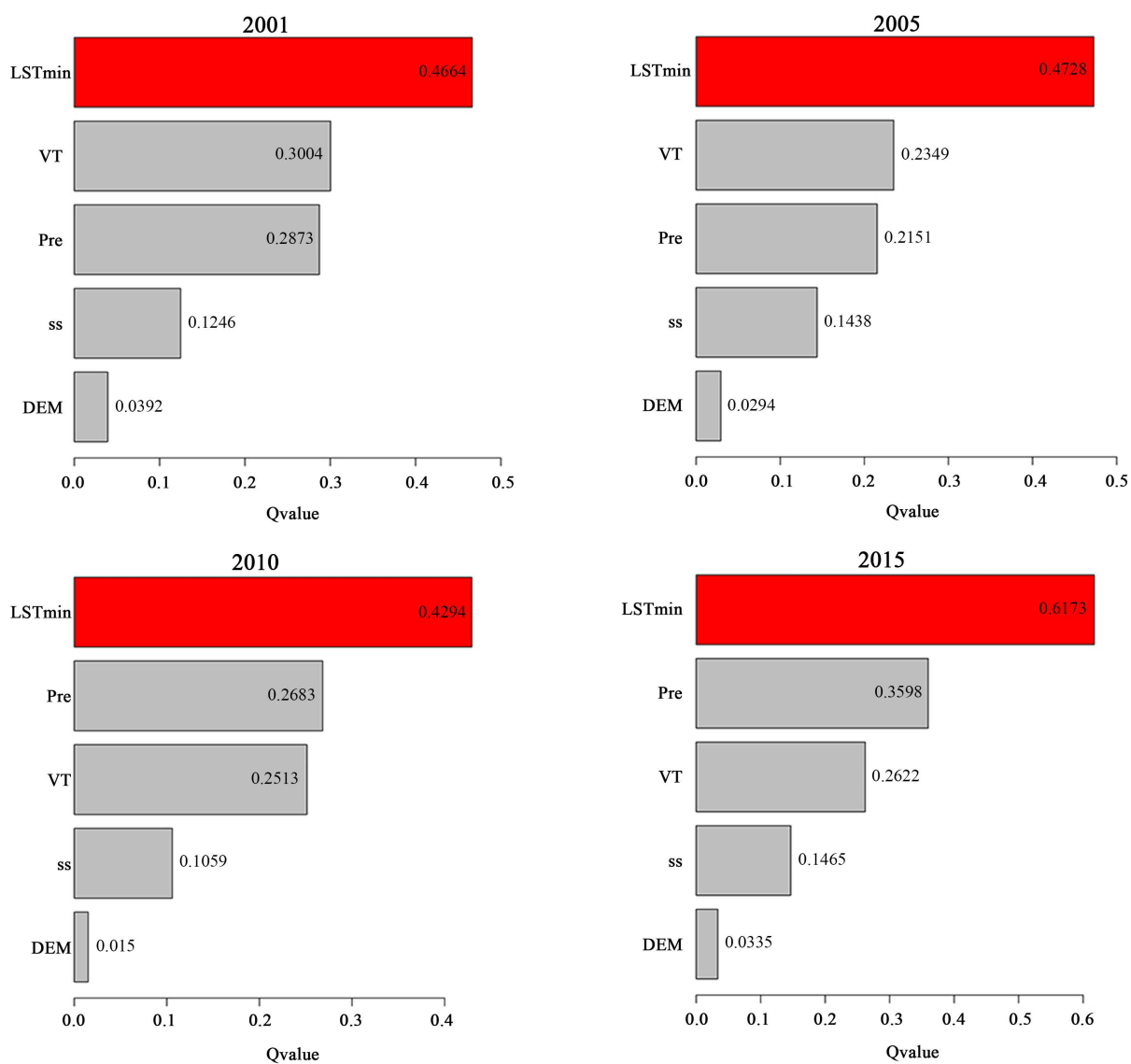


Figure 3. Trends and significance of locust suitability changes
图 3. 蝗虫适宜性变化趋势及显著性



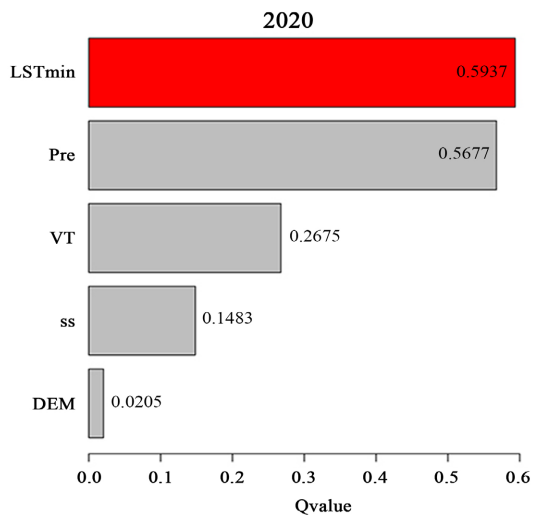
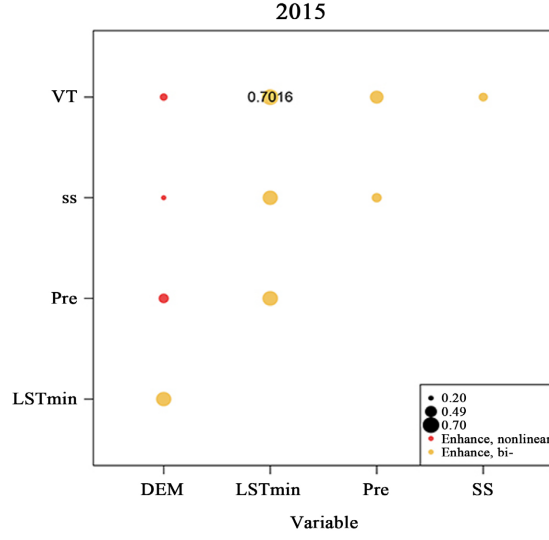
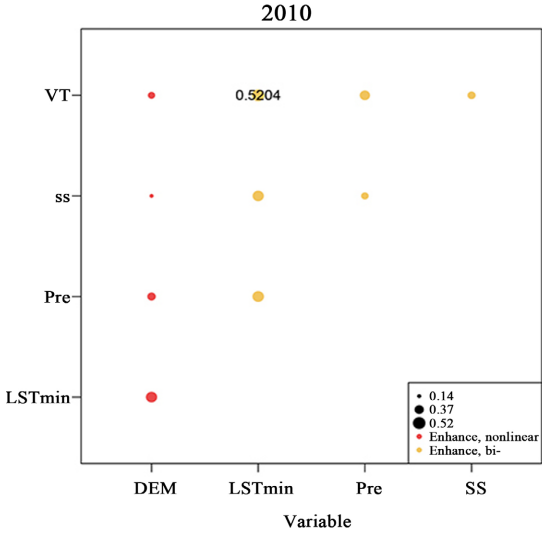
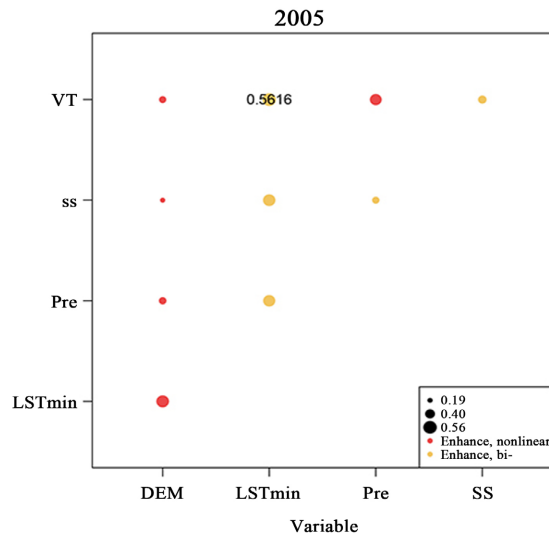
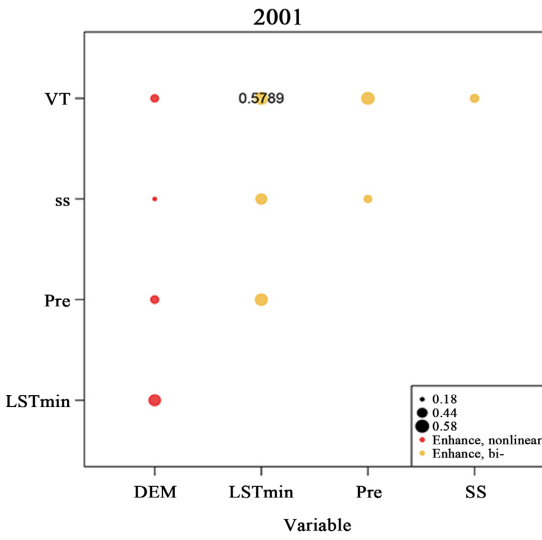


Figure 4. Habitat factor detection results in suitable areas
图 4. 适生区生境因子探测结果



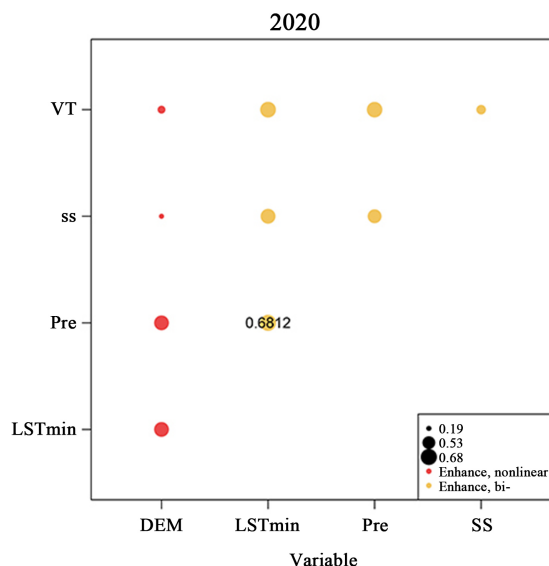


Figure 5. Detection results of two-factor interaction in the habitable zones

图 5. 适生区双因子交互作用探测结果

均匀分布, 以及赤峰市中部及东部部分地区, 通辽市和兴安盟小部分地区分布。极显著下降的地区面积为 21,588 km², 总体面积占比为 2.08%, 主要分布在阿拉善盟和呼伦贝尔市北部等小部分地区。

3.3. 适生区变化归因分析

利用地理探测器对越冬期适生区进行因子探测分析(图 4)。2001 年和 2005 年生境因子对蝗虫总适生区的影响程度排序为 $LST_{min} > VT > Pre > SS > DEM$; 2010 年、2015 年以及 2020 年生境因子对蝗虫总适生区的影响程度排序为 $LST_{min} > Pre > VT > SS > DEM$ 。根据生境因子影响力排序显示, 最低地表温度(LST_{min})对越冬期适生区的解释力最大, q 值约为 0.47, 表明最低温度影响是越冬期适生区演变的主要原因。在 2001 年到 2005 年间植被类型(VT)对越冬期适生区的解释力仅次于最低地表温度(LST_{min}), q 值最大约为 0.30, 表明在这个时间段的植被类型也是蝗虫适生区演变的重要影响因子。在 2010 年到 2020 年间降水量(Pre)的 q 值排序超过植被类型(VT)居于第二位。这可能是由于全球气温整体上升, 导致更有利于蝗卵越冬的暖冬天气多发。而土壤盐度(SS)和海拔高度(ALT)在生境因子解释力排序中位序较低, 对蝗虫适生区的影响力小于其他生境因子。

对越冬期适生区的 5 种生境因子进行双因子交互作用探测分析(图 5)。结果显示, 2001 年到 2015 年间最低地表温度(LST_{min})与植被类型(VT)表现为最为显著的交互作用, q 值分别约为 0.58, 0.56, 0.52, 0.70; 2015 年到 2020 年最低地表温度(LST_{min})与降水量(Pre)的交互作用最为显著, q 值约为 0.68。这些因素之间的交互作用表现为双因子增强(Enhance, bi-)和非线性增强(Enhance, nonlinear)。其中 DEM 与其他生境因子的交互作用多为非线性增强。冬季的内蒙古草原区域, 对于温度变化的响应较为明显, 最低地表温度(LST_{min})与植被类型(VT)的交互作用对越冬期蝗虫适生区更容易产生影响。而随着时间推移, 降水量(Pre)与最低地表温度(LST_{min})的交互作用影响超过了植被类型, 降水量变化导致适宜蝗卵越冬的积雪层增加, 进而影响越冬期适生区的演变, 与单因子探测结果相对应。

4. 结论与讨论

本研究结合多源遥感数据与越冬蝗虫习性调查, 基于层次分析法评价生境因子权重, 并对蝗虫越冬

生境适宜性阈值进行划分,使用生境适宜性模型构建越冬期适宜指数,进而提取 2001~2020 年越冬期适生区,结合 Sen's 斜率和 MK 检验以及地理探测器方法,分别分析越冬期适生区时空变化以及生境因子对其解释程度。主要研究结论如下:1) 越冬期蝗虫适生区的空间分布呈现中部向东北和西南递减的渐变,主要高值集中在中部区域。2) 越冬期适生区在内蒙古东南部呈现显著上升趋势,这可能是由于该地区冬季温度回暖程度相比于其他地区较为明显[22] [23]。3) 生境因子的影响力排序显示,最低地表温度是影响越冬期适生区形成的主要原因。植被类型和降水量对适生区的演变也有显著影响。海拔高度、土壤盐度对适生区的影响相对较小。4) 双因子交互作用分析表明,最低地表温度与植被类型的交互作用在某些时期对越冬期适生区的影响较大。

本研究在关于越冬期适宜性阈值确定方面涉及到内蒙古草地蝗虫主要的几类优势种,未来需要更加细致考虑多种类草地蝗虫的越冬条件,丰富相关研究,对适宜性阈值进行多尺度考量,增加蝗虫适生区判断的包容程度和精准程度[24]。越冬期适生区的研究可以作为监测蝗虫发育周期的重要依据,帮助制定更加有效的生态保护和荒漠化治理策略,提供关于蝗虫分布、行为和对环境变化的响应的关键信息,从而促进更加精准和高效的环境管理。

基金项目

内蒙古自治区重点研发和成果转化计划项目(2022YFDZ0061)。

参考文献

- [1] 陈永林. 蝗虫灾害的特点、成因和生态学治理[J]. 生物学通报, 2000(7): 1-5.
- [2] 潘建梅. 内蒙古草原蝗虫发生原因及防治对策[J]. 中国草地, 2002(6): 67-70.
- [3] 冉祥玉. 内蒙古阿鲁科尔沁旗草原蝗灾与植被光谱的关系研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2019.
- [4] 马崇勇, 杜桂林, 张卓然, 等. 内蒙古草原蝗虫区划及其绿色防控配套技术研究[J]. 草地学报, 2018, 26(4): 804-810.
- [5] 刘笑冰, 王树涛, 高程达. “草原牧鸡治蝗”的生态和经济效应[J]. 中国畜牧杂志, 2014, 50(14): 23-28.
- [6] 郭安红, 王建林, 王纯枝, 等. 内蒙古草原蝗虫发生发展气象适宜度指数构建方法[J]. 气象科技, 2009, 37(1): 42-47.
- [7] 吴彤, 倪绍祥, 李云梅. 基于 LAI 的东亚飞蝗发生面积的预测模型[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 862-869.
- [8] 陈健, 盛世杰, 王文君, 等. 基于多时相遥感的蝗虫生境类型对蝗虫发生的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(4): 444-449.
- [9] 黄健熙, 卓文, 杨春喜, 等. 基于 Landsat8 卫星数据的蝗虫遥感监测方法研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 258-264.
- [10] 张显峰, 饶俊峰, 潘一凡. 基于遥感的新疆蝗虫灾害渐进式修正预测方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 202-208.
- [11] 金龙如, 孙克萍, 贺红士, 等. 生境适宜度指数模型研究进展[J]. 生态学杂志, 2008, 27(5): 841-846.
- [12] 倪绍祥, 蒋建军, 王杰臣, 等. 青海湖地区草地蝗虫发生的生态环境条件浅析[J]. 草业学报, 2000, 9(1): 43-47.
- [13] 张红艳, 张娜, 陈晓燕. 内蒙古镶黄旗草地蝗虫潜在发生可能性评价[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 222-234.
- [14] 李尧, 张娜. 亚洲小车蝗的多尺度分布格局[J]. 中国科学院大学学报, 2017, 34(3): 329-341.
- [15] 邱晓, 肖焱, 石磊, 等. 基于生态资产的内蒙古生态保护效益评估[J]. 生态学报, 2022, 42(13): 5255-5263.
- [16] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [17] 朱猛蒙, 张蓉, 张泽华, 等. 宁夏麻黄山草原蝗虫及天敌对土壤含水量及坡度的响应特征[J]. 植物保护学报, 2016, 43(3): 369-376.
- [18] 曹成全. 峨眉山蝗虫的垂直分布及区系分析[J]. 四川动物, 2015, 34(3): 444-446.

-
- [19] 李占俊, 李占辉. 山东省沾化区东亚飞蝗发生动态及蝗区演变[J]. 中国植保导刊, 2023, 43(10): 44-47, 74.
- [20] 周长明, 齐海超, 魏帅, 等. 基于 GIS 与 AHP 的黑龙江大兴安岭森林雷击火危险性划分[J]. 黑龙江气象, 2021, 38(3): 33-35.
- [21] Du, B., Wei, J., Lin, K., *et al.* (2022) Spatial and Temporal Variability of Grassland Grasshopper Habitat Suitability and Its Main Influencing Factors. *Remote Sensing*, **14**, Article 3910. <https://doi.org/10.3390/rs14163910>
- [22] 白月明, 刘玲, 乌兰巴特尔, 等. 内蒙古地区蝗虫发生与大气环流特征的关系[J]. 生态学杂志, 2007(7): 1054-1057.
- [23] 陈素华, 乌兰巴特尔, 曹艳芳. 气候变化对内蒙古草原蝗虫消长的影响[J]. 草业科学, 2006(8): 78-82.
- [24] Rhodes, K. and Sagan, V. (2022) Integrating Remote Sensing and Machine Learning for Regional-Scale Habitat Mapping: Advances and Future Challenges for Desert Locust Monitoring. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, **10**, 289-319. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2021.3097280>