

天津市大港水库东亚飞蝗生境遥感动态监测

耿 芸^{1,2} 董莹莹^{1,2} 黄文江^{1,2*} 赵龙龙³ 涂雄兵⁴ 李红梅^{4,5}

(1. 中国科学院空天信息创新研究院, 数字地球重点实验室, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院深圳先进技术研究院, 先进计算与数字工程研究所, 广东 深圳 518055; 4. 中国农业科学院
植物保护研究所, 植物病虫害生物学国家重点实验室, 农业农村部-CABI生物安全联合实验室,
北京 100193; 5. CABI东亚中心, 北京 100081)

摘要: 为实现多尺度东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis* 生境动态监测并分析其生境变化驱动因素, 本研究结合遥感与地理信息系统技术, 采用多时相遥感卫星影像提取天津市大港水库 2002、2006 及 2013 年东亚飞蝗生境空间分布信息, 从整体景观尺度(面积变化)、像元尺度(多时相信息二进制编码)以及斑块尺度(景观指数)定量分析东亚飞蝗生境的时空变异特征。结果显示, 2002—2013 年适宜东亚飞蝗孳生的区域面积呈下降趋势, 由 2002 年的 329.98 km² 降至 2013 年的 146.34 km²; 2002—2013 年东亚飞蝗生境斑块数呈现降低趋势, 斑块形状指数和平均斑块面积先减少后增加, 而景观破碎度指数先增加后下降, 说明 2002—2006 年东亚飞蝗生境景观破碎化程度较高, 2006—2013 年东亚飞蝗生境景观破碎化程度较低。表明基于多时相遥感影像能快速获取东亚飞蝗生境的时空变异特征, 有助于东亚飞蝗监测预警及科学防控。

关键词: 东亚飞蝗; 遥感; 动态监测; 时空变化; 生境

Dynamic remote sensing monitoring of oriental migratory locust habitats in Dagang reservoir, Tianjin

Geng Yun^{1,2} Dong Yingying^{1,2} Huang Wenjiang^{1,2*} Zhao Longlong³ Tu Xiongbing⁴ Li Hongmei^{4,5}

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Advanced Computing and Digital Engineering, Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China; 4. State Key Laboratory for Biology of Plant Diseases and Insect Pests, MARA-CABI Joint Laboratory for Bio-safety, Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 5. CABI East Asia, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to realize multi-scale dynamic monitoring of oriental migratory locust habitats and analysis of the factors driving the changes of locust habitats, our study combined remote sensing and geographic information system techniques to extract the spatial distribution data of locust habitats in Dagang reservoir, Tianjin in 2002, 2006 and 2013 by using multi-temporal remote sensing images. The temporal and spatial variations in locust habitats were quantitatively analyzed at the scales of landscape (area change), pixel (multi-temporal binary coding method) and patch (landscape indices). The results showed that the area of locust habitat tended to increase from 329.98 km² in 2002 to 146.34 km² in 2013. During 2002—2013, the patch number of locust habitat declined; the patch shape index and mean patch area decreased firstly and then increased, and the landscape fragmentation index first increased

and then decreased, which indicated that the degree of landscape fragmentation was relatively high from 2002 to 2006 and relatively low from 2006 to 2013. The temporal and spatial variation in locust habitats could be quickly acquired with multi-temporal remote sensing images, which is conducive to the monitoring, early warning and scientific prevention and control of migratory locusts.

Key words: migratory locust; remote sensing; dynamic monitoring; temporal and spatial variation; habitat

蝗灾暴发会对农牧业生产造成毁灭性破坏(于红妍和石旺鹏, 2020; 赵紫华等, 2020)。其中, 造成我国农业损失最严重的飞蝗为东亚飞蝗 *Locusta migratoria manilensis*, 每年都会投入大量的人力、物力和财力对其进行防治(Uvarov, 1936; 朱恩林, 1999; McBeath & McBeath, 2010)。近年来, 我国治蝗成效显著, 但由于飞蝗具有暴发性、迁飞性和发生不确定性等特征, 加之全球气候变暖及人类活动的影响, 飞蝗生境分布范围不断变化。飞蝗生境的准确监测是蝗灾监测预警的关键(Veran et al., 2015; Löw et al., 2016; 黄文江等, 2020)。因此, 从多尺度对东亚飞蝗生境时空分布进行变化检测和分析, 明确其变化规律和影响因素有助于东亚飞蝗的监测预警和科学防控(Everts & Ba, 1997; Scanlan et al., 2001; 李钢等, 2017)。

目前, 变化检测方法被广泛应用于土地覆盖类型的研究中。如Martínez & Gilabert(2009)基于小波变换方法分析了植被覆盖的多尺度动态变化; Marpu et al.(2011)使用迭代重加权多元变化检测(iteratively reweighted multivariate alteration detection, IR-MAD)方法分析了农业区域时空分布; 王俊杰等(2016)根据遥感影像提取了1990—2015年红树林分布区域, 利用多时相信息二进制编码方法及景观指数分析了广西壮族自治区廉州湾红树林在1990、1998、2004、2008和2015年5个时期内的空间变异; Moreira et al.(2019)利用小波变换方法分析由中分辨率卫星影像(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)获取的增强型植被指数(enhanced vegetation index, EVI)时间序列, 描述了巴西南部地区不同类型草地的多年分布情况。

相关学者也将变化检测方法应用到蝗虫生境的时空分布研究中(Latchininsky et al., 2007; Stige et al., 2007; Yu et al., 2009)。Propastin(2013)基于遥感数据分析了1998—2007年巴尔喀什湖地区蝗虫的分布时空变化, 认为蝗虫发生面积与气温、水位关系密切, 气温较高时水位较低, 潜在蝗区面积大; 陈健等(2014)应用Landsat专题成像仪(thematic mapper, TM)数据对渤海新区1992、2000和2010年的蝗

虫生境进行分类, 在像素尺度上对这3个时期的蝗虫生境分布变化进行了分析并确定其影响因素; Shi et al.(2018)应用MODIS和Landsat时间序列卫星数据提取了天津市大港东亚飞蝗分布区域并采用轮廓角方法分析了15年间该蝗区的变化, 认为景观结构和土地覆盖分类是影响其变化的主要原因; Zhao et al.(2020)在提取东亚飞蝗分布区域的基础上利用多时相信息二进制编码方法分析了全国东亚飞蝗分布区域在1995、2005和2017年3个时期内的空间消长状况, 在像元尺度上获取了我国东亚飞蝗分布区域的时空变异信息。现有的这些研究多是基于像素对东亚飞蝗生境时空变化进行分析(马建文和韩秀珍, 2004; Tian et al., 2008), 同时结合整体景观、像元和斑块尺度对东亚飞蝗生境时空变异状况进行定量分析的较少。

天津市大港水库是东亚飞蝗典型的宜生区, 近十几年来, 水库周边湿地环境的变化导致当地东亚飞蝗生境不断变化(Shi et al., 2018; Geng et al., 2020)。本研究结合遥感与地理信息系统技术, 采用多时相遥感影像提取天津市大港水库蝗虫生境空间多年的分布信息, 从整体景观尺度(面积变化)、像元尺度(多时相信息二进制编码)以及斑块尺度(景观指数)定量分析东亚飞蝗生境的时空变异特征, 以期当地东亚飞蝗防控和管理提供数据和信息支撑。

1 材料与方法

1.1 材料

研究区域: 研究区域位于天津市滨海新区(图1), 地处华北平原北部, 濒临渤海, 面积约822.23 km², 包括北大港水库、李尔湾和独流减河。该区域属于暖温带大陆性季风气候, 并具有海洋性气候特点: 冬季寒冷、少雪, 春季干旱多风, 夏季气温高、湿度大、降水集中, 秋季天高气爽、风和日丽; 全年平均气温13.0℃, 年平均降水量566.0 mm, 降水随季节变化显著, 冬、春季少, 夏季集中。该区域是天津市最大的湿地自然保护区, 充足的水资源为当地的湿地植被提供了适宜环境, 其中包括香蒲 *Typha orientalis*、千屈菜 *Lythrum salicaria* 等芦苇, 以及一些散落在周围

的杂草。研究区具有适宜东亚飞蝗生长的生态环境,较少的人为干预也有助于蝗虫的生长和繁殖,从而更有利于蝗灾暴发(韩秀珍,2003;Latchininsky,2013)。

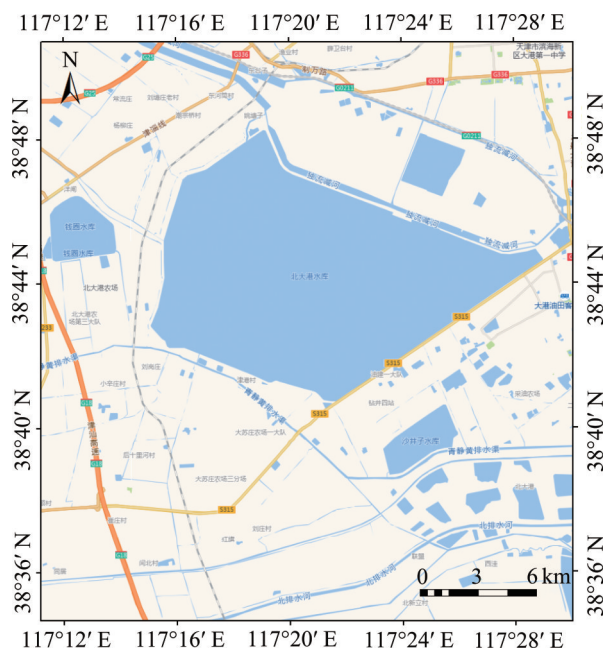


图1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

数据来源:综合考虑研究区域的范围和不同遥感影像的空间分辨率,本研究使用 Landsat 和 MODIS 数据实现研究区东亚飞蝗生境监测,包括 2000—2012 年每年 5 月 15 日至 6 月 30 日(蝗蛹发育期)的 Landsat TM 和 2013—2015 年每年 5 月 15 日至 6 月 30 日(蝗蛹发育期)的 Landsat OLI(Path:122, Row:33)。同时,选取 2000—2015 年每年 4 月 15 日至 5 月 22 日(虫卵孵化期)研究区域的无云 MODIS (MOD11A2) 图像获取地表温度。蝗虫生境提取之前,需要使用 ENVI 5.3 软件的 FLAASH 模块对 Landsat 图像进行大气校正,消除大气散射、吸收、反射引起的误差。该模块增强了图像亮度,便于信息提取。

软件来源:ENVI 5.3 软件自 <https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI> 下载;Fragstats 4.2 软件自 https://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/downloads/fragstats_downloads.html 下载。

1.2 方法

1.2.1 东亚飞蝗生境提取方法

基于斑块尺度的层次分析法模型(patch based-analytic hierarchy process, PB-AHP)是结合多生境因

子和景观结构的东亚飞蝗生境适宜性分析方法(Despland et al., 2004; Geng et al., 2020),本研究采用此方法基于遥感图像绘制 2002、2006 及 2013 年本研究区域的东亚飞蝗生境分布图。首先,利用 ENVI 5.3 软件对 Landsat 图像进行大气校正,在此基础上提取归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、温度植被干旱指数(temperature vegetation dryness index, TVDI)和盐分指数(salinity index, SI) (Deveson, 2013; 朱猛蒙等, 2016; Peng & Loew, 2017),并对这些指数进行归一化处理,分别表征植被覆盖度、土壤湿度和土壤盐分。同时,利用 Landsat 数据绘制 EVI 曲线,基于季节特征构建随机森林模型(seasonal characteristics random forest, SCRF) (Gislason et al., 2006; Loosvelt et al., 2015),对当地土地覆盖进行分类,结合 MODIS 地表温度产品构建东亚飞蝗生境适宜性分析指标体系;然后,采用移动窗口计算斑块尺度生境指标的适宜性;最终通过层次分析法得到研究区域东亚飞蝗生境适宜性指数(habitat suitability index, HSI)。HSI 为 1~4 时分别代表不适宜、比较不适宜、一般适宜以及非常适宜 4 个适宜度等级。本研究将前 2 个等级(HSI=2 和 HSI=1)合并划分为非东亚飞蝗生境,后 2 个等级(HSI=4 和 HSI=3)合并确定为东亚飞蝗生境。

1.2.2 像元尺度生境变化检测方法

本研究采用多时相信息的字节编码方法(李天宏等, 2002; 王俊杰等, 2016)来描述 2002、2006 和 2013 年 3 个时期东亚飞蝗生境的空间消长变化。1 个字节(Byte)有 8 位 Bit, 指定 Bit0、Bit1 和 Bit2 依次代表 2002、2006 和 2013 年东亚飞蝗生境的分布, Bit3、Bit4、Bit5、Bit6 和 Bit7 为空。对于上述 3 个时相的生境空间分布图(空间分辨率均为 30 m), 设定属于东亚飞蝗生境的像元灰度值 $V_{year,i}$ 为 1, 非东亚飞蝗生境的像元灰度值 $V_{year,i}$ 为 0, 其中 i 表示时相, 当 $i=0, 1, 2$, 分别表示 2002、2006 和 2013 年。如灰度值为 1 (二进制编码为 001) 表明该像元只在 2002 年为东亚飞蝗生境; 灰度值为 2 (二进制编码为 010) 表明该像元只在 2006 年为东亚飞蝗生境; 灰度值为 3 (二进制编码为 011) 表明该像元在 2002 年和 2006 年为东亚飞蝗生境, 在 2013 年为非东亚飞蝗生境; 灰度值为 4 (二进制编码为 100) 表明该像元仅在 2013 年为东亚飞蝗生境; 灰度值为 5 (二进制编码为 101) 表明该像元在 2002 年和 2013 年为东亚飞蝗生境, 在 2006 年为非东亚飞蝗生境; 灰度值为 6 (二进制编码为 110) 表明该像元在 2006 年和 2013 年为东亚飞蝗

生境,在2002年为非东亚飞蝗生境;灰度值为7(二进制编码为111)表明该像元在2002、2006和2013年均均为东亚飞蝗生境。应用公式 $V_{\text{dyna}} = \sum_{i=1}^3 2^i V_{\text{year},i}$ 进行多时相东亚飞蝗生境变化信息的二进制编码,计算后得到一幅字节型的飞蝗生境时空动态变化图,其中 V_{dyna} 表示3个时相生境时空动态变化图的灰度值。

本研究对生境分别进行二进制编码分析,通过对生境时空动态变化图进行统计,可以快速得到生境空间变化的编码数值,这些数值完整地记录了研究区东亚飞蝗生境在2002、2006和2013年3个时相上的消长状况。只要对像元从左到右进行二进制解读,就能够清楚地知道生境在每个像元上随年份的变化情况。因此,统计生境时空动态变化图的灰度值直方图分布,即可快速准确地获得不同时期、像元级别上东亚飞蝗生境的空间动态变化信息。

1.2.3 景观尺度生境变化分析方法

反映景观结构变化的特征指数非常多,本研究选取常用的斑块数、平均斑块面积、斑块形状指数和景观破碎度指数对2002—2013年东亚飞蝗生境景观格局变化进行分析。其中,斑块数(number of patch, NP)表示东亚飞蝗生境斑块的数量;平均斑块面积(mean patch area, MPA)表示东亚飞蝗生境斑块

的平均面积;斑块形状指数(patch shape index, PSI)常用于分析景观中斑块的形状特征,采用斑块周长除以相同面积圆的周长来计算;景观破碎度(landscape fragmentation, LF)表示由于自然或人文因素的干扰所导致的景观由简单趋向于复杂或者由复杂趋向于简单的指数,通过景观斑块数除以其总面积来计算(丁圣彦和梁国付,2004;邬建国,2007)。

1.3 数据分析

在ENVI 5.3遥感图像处理软件中,通过波段计算功能(Band Math)在像元尺度上对东亚飞蝗生境进行时空变化分析;采用Fragstats 4.2软件在景观尺度上对东亚飞蝗生境进行变化分析。

2 结果与分析

2.1 在整体景观尺度上东亚飞蝗生境的时空变化分析

通过PB-AHP模型得到研究区域2002、2006、2013年3个时期的东亚飞蝗生境空间分布信息,东亚飞蝗生境面积分别为329.98、246.56和146.34 km²,呈现下降的特征(图2)。2002年是蝗虫大暴发年份,该年气候较干旱,导致适宜蝗虫孳生区域范围扩大。之后,为了避免蝗灾再次暴发,人为提高水库蓄水量,并扩大耕地范围,结合气候的变化致使其生境面积减少。

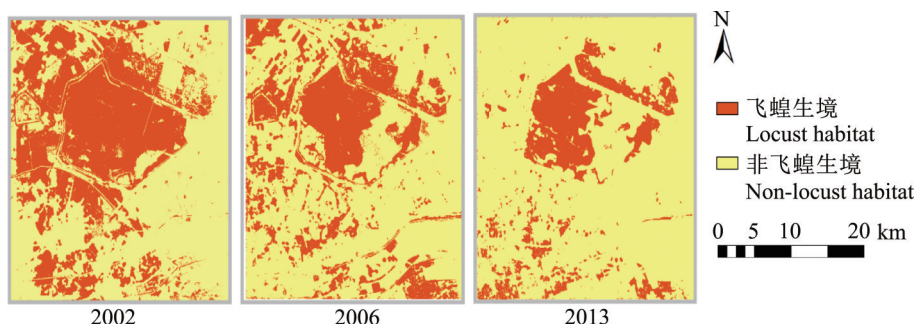


图2 利用PB-AHP模型对天津市大港水库东亚飞蝗生境的提取结果

Fig. 2 Extraction results of migratory locust habitats in Dagang reservoir, Tianjin by using PB-AHP model

2.2 在像元尺度上东亚飞蝗生境的时空变化分析

将2002、2006和2013年研究区域东亚飞蝗生境分布图进行多时相信息二进制编码,得到其时空动态变化图(图3),并对其灰度值进行统计,得到各灰度值的像元个数和对应面积(表1)。东亚飞蝗生境灰度值像元个数存在一定变化波动,但是灰度值为1~3的像元个数较灰度值为4~6的像元个数多,说明东亚飞蝗生境在这3个时期内呈消长分布,时空变异程度大,且2002年时空变异程度高于2006年和2013年。同时,灰度值为1和5的区域是2002—

2006年东亚飞蝗生境消亡的区域,这些区域在2002年为东亚飞蝗生境,而在2006年为非东亚飞蝗生境;灰度值为2和3的区域是2006—2013年东亚飞蝗生境消亡的区域,这些区域在2006年为东亚飞蝗生境,而在2013年为非东亚飞蝗生境。

2.3 在斑块尺度上东亚飞蝗生境的时空变化分析

2002—2013年,东亚飞蝗生境斑块数和平均斑块面积不断减少,斑块形状呈现出先下降后增加的趋势,说明2002—2006年斑块趋于分散,形状趋于简单,整体结构处于不稳定期,2006—2013年景观

稳定度高于2002—2006年;而景观破碎度指数呈现先增加后减少的趋势,说明研究区域东亚飞蝗生境在2006—2013年的斑块破碎度轻于2002—2006年(表2)。12年间东亚飞蝗生境的减少主要与气候和

人为提高水库蓄水量及扩大耕地区域有关。同时,在人为和自然因素的双重影响下,土壤条件和土地覆盖类型的变化导致东亚飞蝗生境景观破碎化程度加剧。

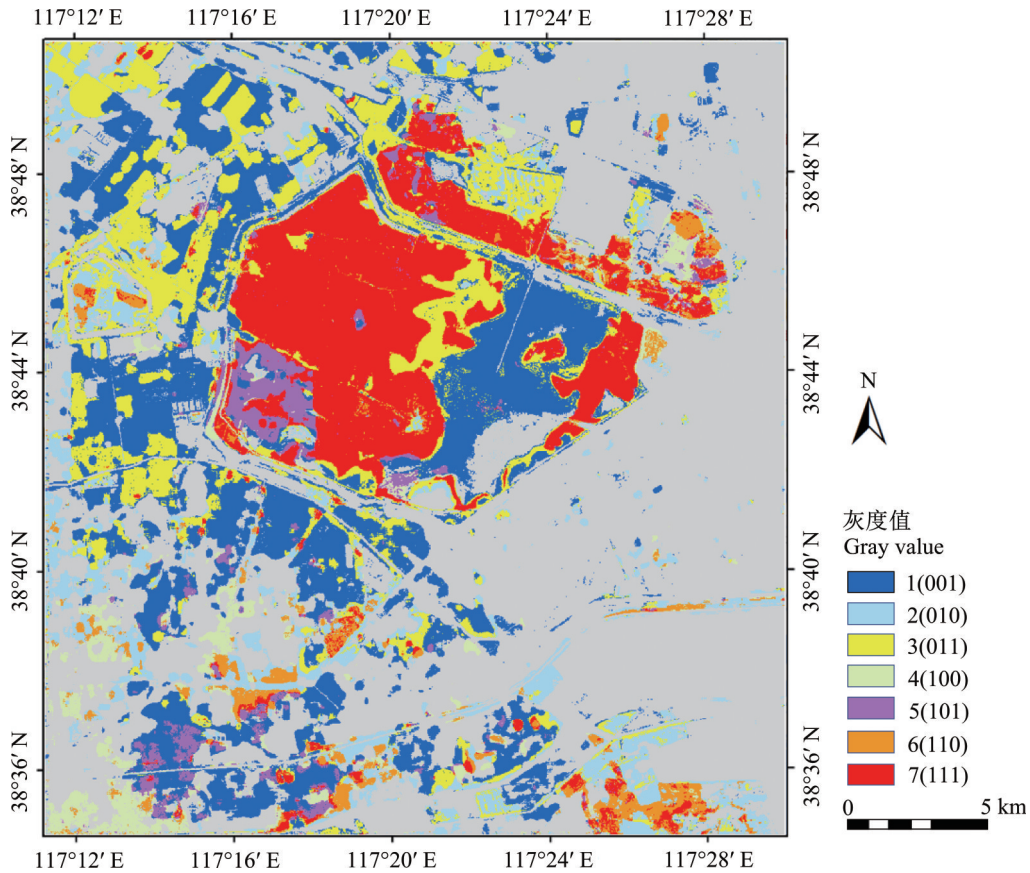


图3 2002—2013年天津市大港水库东亚飞蝗生境时空动态变化图

Fig. 3 Temporal and spatial variations in locust habitats from 2002 to 2013 in Dagang reservoir, Tianjin

表1 2002—2013年东亚飞蝗生境变化各灰度值的像元个数及面积

Table 1 Pixel numbers and areas of gray values of locust habitat changes from 2002 to 2013

灰度值 Gray value	二进制编码 Binary coding	像元个数 No. of pixels	不同时期生境变化面积 Area change of habitat in different periods/km ²
1	001	154 794	139.31
2	010	61 534	55.38
3	011	92 454	83.21
4	100	21 885	19.70
5	101	20 749	18.67
6	110	21 331	19.20
7	111	98 638	88.77

表2 2002—2013年东亚飞蝗生境分布景观指数

Table 2 Landscape indices of locust habitats from 2002 to 2013

年份 Year	斑块数 No. of patches	平均斑块面积 Mean patch area/km ²	斑块形状指数 Patch shape index	景观破碎度 Landscape fragmentation
2002	1 276	0.25	1.30	0.003 8
2006	1 098	0.22	1.29	0.004 5
2013	643	0.23	1.31	0.004 3

3 讨论

在整体景观尺度上,2002—2013年天津市大港水库东亚飞蝗生境面积呈下降趋势,由329.98 km²降至146.34 km²,这与Shi et al.(2018)和Geng et al.(2020)研究结果相似。蝗虫喜欢在相对湿润的区域比如河流、湖泊、水库沿岸的区域产卵,当这些区域水位下降,蝗虫便会破土而出。本研究通过分析2002—2013年研究区域内降雨量及气温发现,2002年总降雨量为12年间的最低值,而平均温度处于较高值,符合其孵化规律,降雨量的减少导致大港水库水位下降,结合温度升高所导致的蝗蛹发育加速,造成了2002年蝗虫暴发式的出土。2002年后降雨量的增加结合人为防控使蝗虫生境面积减少,说明在本研究区内蝗虫生境动态变化主要受到自然气候和人为管控2方面的影响。

在像元尺度上,2002—2013年天津市大港水库东亚飞蝗生境空间分布呈消长分布,飞蝗生境在2002—2006年间的变化程度较大,在2006—2013年间的变化程度变小,这种空间演变与土地覆盖方式的改变有关,通过加大水库蓄水量及扩张耕地面积降低适宜东亚飞蝗生长发育的植被类型分布。同时,通过灰度值分布也可以看出,灰度值为7(2002、2006及2013年都属于东亚飞蝗生境)的区域稳定分布于大港水库沿岸,反映了东亚飞蝗“水缘性”的特点(李钢等,2017)。

在斑块尺度上,近12年天津市大港水库东亚飞蝗生境斑块数持续减少,斑块形状指数和平均斑块面积先减少后增加,景观破碎度指数先增加后减少,景观破碎化程度先加重后减轻;结合区域情况分析其主要驱动因子是人为干扰,通过增加耕地和水体面积,使得适宜东亚飞蝗孵化成长的芦苇和杂草区域破碎化程度加剧;其次,降雨量的增加提高了水库水位,说明自然状态下该区域的生态环境较为稳定且适宜东亚飞蝗生存,因此加强研究区域的人为监测和防控是今后工作的重点。

本研究通过多时相遥感卫星影像的整体景观、像元和斑块尺度的动态分析,得到了不同时期东亚飞蝗生境空间分布和面积的演变规律。尽管目前研究区域内东亚飞蝗发生程度较往年低,但是也不可忽视,建议在先涝后旱的气候条件下应加强对研究区域内东亚飞蝗的监测和人工防控,有效防范其大范围暴发。东亚飞蝗生境的空间演变机理及变异的驱动因子分析是后续研究的重点。

参 考 文 献 (References)

- Chen J, Sheng SJ, Wang WJ, Zhang XH. 2014. Study on effect of type of locust habitats on locust plague based on multi-temporal landsat TM data. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 30(4): 444–449 (in Chinese) [陈健, 盛世杰, 王文君, 张雪红. 2014. 基于多时相遥感的蝗虫生境类型对蝗虫发生的影响. *生态与农村环境学报*, 30(4): 444–449]
- Despland E, Rosenberg J, Simpson SJ. 2004. Landscape structure and locust swarming: a satellite's eye view. *Ecography*, 27: 381–391
- Deveson ED. 2013. Satellite normalized difference vegetation index data used in managing Australian plague locusts. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 075096
- Ding SY, Liang GF. 2004. Landscape pattern change of regional wetland along the Yellow River in Henan Province in the last two decades. *Acta Geographica Sinica*, 59(5): 653–661 (in Chinese) [丁圣彦, 梁国付. 2004. 近20年来河南沿黄湿地景观格局演化. *地理学报*, 59(5): 653–661]
- Everts JW, Ba L. 1997. Environmental effects of locust control: state of the art and perspectives.//Krall S, Peveling R, Diallo DB. *New strategies in locust control*. Verlag Basel: Birkhauser, pp. 331–336
- Geng Y, Zhao LL, Dong YY, Huang WJ, Shi Y, Ren Y, Ren BY. 2020. Migratory locust habitat analysis with PB-AHP model using time-series satellite images. *IEEE-Access*, 8: 166813–166823
- Gislason PO, Benediktsson JA, Sveinsson JR. 2006. Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27(4): 294–300
- Han XZ. 2003. Study on remote sensing mechanism and methods for East Asian migratory locust hazard monitoring. Ph. D thesis. Beijing: Chinese Academy of Sciences, pp. 68–82 (in Chinese) [韩秀珍. 2003. 东亚飞蝗灾害的遥感监测机理与方法研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院, pp. 68–82]
- Huang WJ, Dong YY, Zhao LL, Geng Y, Ruan C, Zhang BY, Sun ZX, Zhang HS, Ye HC, Wang K. 2020. Review of locust remote sensing monitoring and early warning. *Journal of Remote Sensing*, 24(10): 1270–1279 (in Chinese) [黄文江, 董莹莹, 赵龙龙, 耿芸, 阮超, 张弼尧, 孙忠祥, 张寒苏, 叶回春, 王昆. 2020. 蝗虫遥感监测预警研究现状与展望. *遥感学报*, 24(10): 1270–1279]
- Latchininsky AV. 2013. Locusts and remote sensing: a review. *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 075099
- Latchininsky AV, Sivanpillai R, Driese KL, Wilps H. 2007. Can early season landsat image improve locust habitat monitoring in the Amudarya River Delta of Uzbekistan. *Journal of Orthoptera Research*, 16(2): 167–173
- Li G, Kong DY, Li FQ, Liu Q, Wang HJ. 2017. Reviews and prospects on studies of locust breeding area evolution and drainage network change in China during the historical period. *Tropical Geography*, 37(2): 226–237 (in Chinese) [李钢, 孔冬艳, 李丰庆, 刘倩, 王会娟. 2017. 中国历史蝗区演化与水系变迁研究回顾与展望. *热带地理*, 37(2): 226–237]
- Li TH, Zhao ZJ, Han P. 2002. Detection and analysis of mangrove

- changes with multi-temporal remotely sensed imagery in the Shenzhen River Estuary. *Journal of Remote Sensing*, 6(5): 364–369 (in Chinese) [李天宏, 赵智杰, 韩鹏. 2002. 深圳河河口红树林变化的多时相遥感分析. *遥感学报*, 6(5): 364–369]
- Loosvelt L, Peters J, Skriver H, Lievens H, van Coillie FMB, de Baets B, Verhoest NEC. 2012. Random forests as a tool for estimating uncertainty at pixel-level in SAR image classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 173–184
- Löw F, Waldner F, Latchinsky A, Biradar C, Bolkart M, Colditz RR. 2016. Timely monitoring of Asian migratory locust habitats in the Amudarya Delta, Uzbekistan using time series of satellite remote sensing vegetation index. *Journal of Environmental Management*, 183: 562–575
- Ma JW, Han XZ. 2004. Mechanism and methods of remote sensing monitoring for oriental migratory locust plague: a case in Bohai gulf area. Beijing: Science Press (in Chinese) [马建文, 韩秀珍. 2004. 东亚飞蝗灾害遥感监测机理与方法: 以环渤海湾地区为例. 北京: 科学出版社]
- Marpu PR, Gamba P, Canty MJ. 2011. Improving change detection results of IR-MAD by eliminating strong changes. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(4): 799–803
- Martínez B, Gilabert MA. 2009. Vegetation dynamics from NDVI time series analysis using the wavelet transform. *Remote Sensing of Environment*, 113(9): 1823–1842
- McBeath JH, McBeath J. 2010. Plant diseases, pests and food security.// *Environmental change and food security in China*. Heidelberg, Germany: Springer Netherlands, pp. 118–124
- Moreira A, Fontana DC, Kuplich TM. 2019. Wavelet approach applied to EVI/MODIS time series and meteorological data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 147: 335–344
- Peng J, Loew A. 2017. Recent advances in soil moisture estimation from remote sensing. *Water*, 9(7): 530
- Propastin P. 2013. Satellite-based monitoring system for assessment of vegetation vulnerability to locust hazard in the River Ili Delta (Lake Balkhash, Kazakhstan). *Journal of Applied Remote Sensing*, 7(1): 075094
- Scanlan JC, Grant WE, Hunter DM, Milner RJ. 2001. Habitat and environmental factors influencing the control of migratory locusts (*Locusta migratoria*) with an entomopathogenic fungus (*Metarhizium anisopliae*). *Ecological Modelling*, 136(2/3): 223–236
- Shi Y, Huang WJ, Dong YY, Peng DL, Zheng Q, Yang PY. 2018. The influence of landscape's dynamics on the oriental migratory locust habitat change based on the time-series satellite data. *Journal of Environmental Management*, 218: 280–290
- Stige LC, Chan KS, Zhang ZB, Frank D, Stenseth NC. 2007. Thousand-year-long Chinese time series reveals climatic forcing of decadal locust dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(41): 16188–16193
- Tian HD, Ji R, Xie BY, Li XH, Li DM. 2008. Using multi-temporal Landsat ETM+ data to monitor the plague of oriental migratory locust. *International Journal of Remote Sensing*, 29(6): 1685–1692
- Uvarov BP. 1936. The oriental migratory locust (*Locusta migratoria manilensis*, Meyen 1835). *Bulletin of Entomological Research*, 27(1): 91–104
- Veran S, Simpson SJ, Sword GA, Deveson E, Piry S, Hines JE, Berthier K. 2015. Modeling spatiotemporal dynamics of outbreaking species: influence of environment and migration in a locust. *Ecology*, 96(3): 737–748
- Wang JJ, Liu J, Shi TZ, Wu GF. 2016. Remotely dynamic monitoring of mangrove in Lianzhou Gulf, Guangxi during between 1990 and 2015. *Journal of Forest and Environment*, 36(4): 455–460 (in Chinese) [王俊杰, 刘珏, 石铁柱, 郭国锋. 2016. 1990—2015年广西廉州湾红树林遥感动态监测. *森林与环境学报*, 36(4): 455–460]
- Wu JG. 2007. Landscape ecology: pattern, process, scale and hierarchy. 2nd edition. Beijing: Higher Education Press, pp. 107–116 (in Chinese) [邬建国. 2007. 景观生态学: 格局、过程、尺度与等级. 第2版. 北京: 高等教育出版社, pp. 107–116]
- Yu G, Shen HD, Liu J. 2009. Impacts of climate change on historical locust outbreaks in China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114: D18104
- Yu HY, Shi WP. 2020. Outbreak, monitoring and control technology of desert locust *Schistocerca gregaria*. *Journal of Plant Protection*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020801> (in Chinese) [于红妍, 石旺鹏. 2020. 沙漠蝗灾发生、监测及防控技术进展. *植物保护学报*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020801>]
- Zhao LL, Huang WJ, Chen JS, Dong YY, Ren BY, Geng Y. 2020. Land use/cover changes in the oriental migratory locust area of China: implications for ecological control and monitoring of locust area. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 303: 107110
- Zhao ZH, Tu XB, Zhang ZH, Li ZH. 2020. The alert of population expansion of the desert locust *Schistocerca gregaria* and its risk to enter China. *Journal of Plant Protection*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020802> (in Chinese) [赵紫华, 涂雄兵, 张泽华, 李志红. 2020. 警惕沙漠蝗种群持续增加和入侵我国边境地区的风险. *植物保护学报*, <https://doi.org/10.13802/j.cnki.zwbhxb.2020.2020802>]
- Zhu EL. 1999. The management of the oriental migratory locust in China. Beijing: China Agriculture Press, pp. 3–6 (in Chinese) [朱恩林. 1999. 中国东亚飞蝗发生与治理. 北京: 中国农业出版社, pp. 3–6]
- Zhu MM, Zhang R, Zhang ZH, Zhao ZH. 2016. The responses of grasshoppers and their natural enemies to soil humidity and slope in Mahuang Mountain, Ningxia. *Journal of Plant Protection*, 43(3): 369–376 (in Chinese) [朱猛蒙, 张蓉, 张泽华, 赵紫华. 2016. 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. *植物保护学报*, 43(3): 369–376]

(责任编辑:李美娟)