doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.03.022

基于无人机航拍和生态位模型的草原毛虫宜生区研究

于红妍[1,2]　张世荣[1,3]　赵兴群[1,3]　宜树华[1,3]　孟宝平[1,3]　吕燕燕[1,3]

(1.南通大学地理科学学院,南通 226007;2.祁连山国家公园青海服务保障中心,西宁 810001;
3.南通大学脆弱生态环境研究所,南通 226007)

摘要:受观测手段限制,目前对区域尺度草原毛虫(*Gynaephora alpherakii*)空间分异特征和宜生区分布尚不清楚,本研究基于无人机航拍分析系统获取祁连山国家公园青海片区高寒草原毛虫空间分异特征,结合 BIOMOD 生态位模型和观测样地所对应草地植被、土壤、气候和地形等环境因子,获取祁连山国家公园青海片区历年草原毛虫生态位,划分草原虫害宜生区。结果表明:所有野外观测样点中,草原毛虫空间分布异质性较大,其出现的观测样点占所有观测的 5.77%,不同监测点总数为 1~2 046 头,同一监测点内为 0~136 头。所有生态位模型中,RF 模型对草原毛虫生态位模拟精度最高,Kappa 系数、TSS 和 AUC 分别为 0.6、0.75 和 0.93。草原毛虫一级到三级宜生区面积较小(占总面积的 14.68%),主要分布于研究区中东部,四级和五级宜生区面积较大(占总面积的 85.32%),主要分布在研究区西部。无人机航拍技术高效地提供了草原毛虫空间分布研究的基础数据,可为进一步定量认识草原毛虫的生态学地位及虫害预警、防控措施的制定提供理论和实践基础。

关键词:草原毛虫;无人机;生态位模型;宜生区

中图分类号:S8　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)03-0224-10　　**OSID**:

Mapping Inhabitable Area of *Gynaephora alpherakii* Based on UAV Observation and Ecological Niche Model

YU Hongyan[1,2]　ZHANG Shirong[1,3]　ZHAO Xingqun[1,3]　YI Shuhua[1,3]　MENG Baoping[1,3]　LÜ Yanyan[1,3]

(1. *School of Geographic Science*, *Nantong University*, *Nantong* 226007, *China*
2. *Qinghai Service and Guarantee Center of Qilian Mountain National Park*, *Xining* 810001, *China*
3. *Institute of Fragile Eco-environment*, *Nantong University*, *Nantong* 226007, *China*)

Abstract: *Gynaephora alpherakii* (GA) is mainly distributed in the Qinghai-Tibet Plateau of China. As one of the most important insect pests, the occurrence of the GA seriously affects the growth of grass, reducing the grassland production and preventing the development of the animal husbandry. It is vital for monitoring its biological characteristics, occurrence regularity, quantitative changes and main effect factors. However, limited by the field observation, the spatial distribution and inhabitable area were still unclear. The regional distribution (Qilian Mountain National Park in Qinghai Province) was investigated based on UAV aerial photographing technology. The ecological niche was constructed based on the environmental factors (grassland vegetation, soil, climate and topography), combined with field observation and BIOMOD. Based on the above mentioned, the inhabitable area of GA was divided. The results showed that among the all field observation sites, the spatial distribution of prairie caterpillars was heterogeneous, with the number of variations from 1 to 2046 in different observation sites and 0 to 136 in different aerial photographs; the random forest model exhibited the best performance with Kappa, TSS and AUC were 0.6, 0.75 and 0.93, respectively; the inhabitable area of the first-grade to the third-grade was small with 14.68% of study area, and located in mid-eastern of study area, the inhabitable area of the fourth-grade and the fifth-grade was large with 85.32% of study area, mainly located in western of study area. The research result showed that UAV can be potentially used to obtain the basic data for GA distribution modeling, which provided a theoretical and practical basis for further quantitative

收稿日期:2022-06-14　修回日期:2022-08-04

基金项目:青海省自然科学基金项目(2019-ZJ-7054)和祁连山国家公园草地害虫调查监测项目(青林保[2021]485 号)

作者简介:于红妍(1978—),女,高级草原师,主要从事草原生态保护研究,E-mail:25904055@qq.com

通信作者:吕燕燕(1989—),女,讲师,博士,主要从事草地生态研究,E-mail:lvyy18@ntu.edu.cn

understanding of the ecological status and help for the early warning and management practices of GA outbreak.

Key words: *Gynaephora alpherakii*; unmanned aerial vehicles; ecological niche model; inhabitable area

0　引言

草原毛虫(*Gynaephora alpherakii*)别名红头黑毛虫、草原毒蛾,隶属鳞翅目(Lepidoptera)毒蛾科(Lymantriidae)草原毛虫属(*Gynaephora*)。我国青藏高原高寒草地是其主要分布地区之一。草原毛虫对小嵩草、矮嵩草、紫羊茅、垂穗披碱草等莎草和禾草植物表现出很强的取食偏好[1-2],由叶片顶尖向基部取食,优先采食植被嫩枝绿叶[3]。草原毛虫灾害爆发后,每平方米可达 500 头以上,严重毁坏的草地植被在两年内难以恢复,单位面积草地生产能力和载畜量大幅度下降[4]。此外,草原毛虫还富含毒素,家畜采食后可导致中毒,牧民接触后若不采用防护措施或清洗不及时,会引起中毒[3,5]。

草原毛虫对我国青藏高原高寒草地造成了巨大的危害。自 20 世纪 60 年代以来,国家每年都要投入大量的人力、物力和财力防治草原毛虫,特别是对杀虫剂药效和生物杀虫剂新药的开发进行了大量的研究[6-7]。但是仍然未能从根本上有效地控制该害虫的危害。近年来,在全球气候变化和人类活动干扰的双重影响下,青藏高原草原毛虫发生频繁,爆发成灾。目前草原毛虫的调查与研究仍然在站点尺度基于传统的样方调查为主[3,8],例如对草原毛虫食性特征[1-2]、生长发育[8-11]和空间分布格局影响因素[12]等研究。草原毛虫幼虫虫体较小,卫星遥感受分辨率限制而无法对其进行识别和测定。样方调查法在大尺度的调查中通常要求大量时间、人力和资金投入,难以在有限的时间内大面积开展调查工作[13]。此外,传统方法的调查位点和观测人员不固定、测定标准不统一[14],导致获取样本的时空代表性和可比性受限。

虫害的发生有其适应的环境,了解其生物学特性、发生规律、数量变化以及影响其发生的主导因素,是监测预报和防治的重要理论基础和依据[3-4]。然而,受限于有限的观测手段,目前对区域尺度草原毛虫空间分异特征和宜生区分布等信息尚不清楚。近年来,小型无人机技术发展十分迅速,已在各行各业得到了广泛应用,为生态学研究提供了新的视角和方法[15-16]。一方面,无人机可以提供大范围高分辨率的地表影像,因而在样地尺度能够更准确地获取植被群、草原毛虫信息[4,17];另一方面,无人机便于携带,高效机动、易操作,从而为天然草地野外调查提供大量样本数据[18-19]。同时,YI[20]还针对我国脆弱生态带气候环境特点,开发了一套无人机航拍系统(Fragmentation monitoring and analysis with aerial photography, FragMAP),能够实现大量监测点定位重复观测,可为草地资源监测提供海量定点监测数据。

综上所述,本研究拟采用 FragMAP 无人机航拍系统观测祁连山国家公园青海片区草原毛虫的空间分异特征,结合 BIOMOD 生态位模型和观测样地所对应的草地植被、土壤、气候和地形等因子,获取祁连山国家公园青海片区历年草原毛虫生态位,并以此为依据划分草原虫害宜生区。为草原毛虫习性等基础研究及高寒草原虫害预测提供高效、准确的方法,同时为定量认识草原毛虫的生态学地位及虫害防控策略和措施的制定提供理论和实践基础。

1　数据与方法

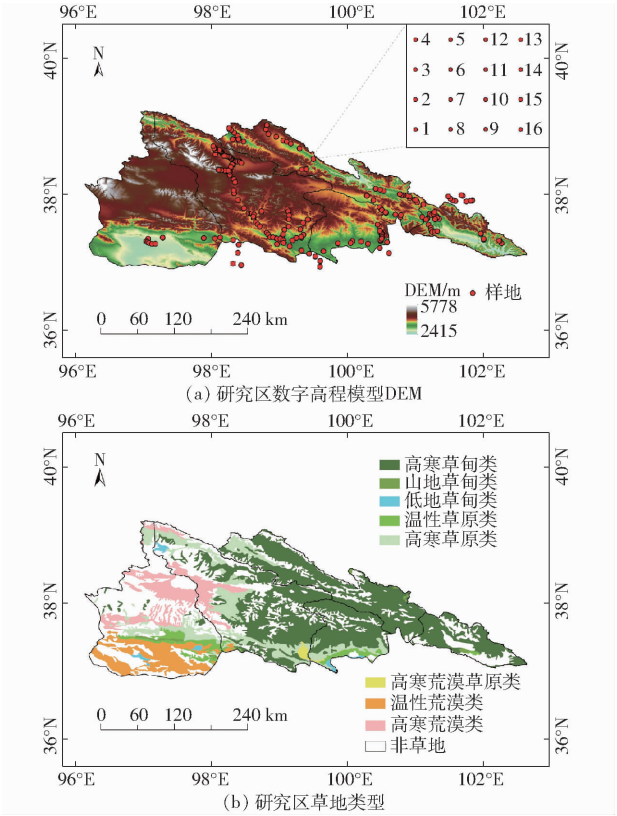
1.1　研究区概况

祁连山国家公园地处青海省东北部,是甘肃、青海两省交界,总面积 5.02×10^4 km^2。本研究以祁连山国家公园青海片区草地为研究对象(主要包括青海省德令哈市、天峻县、祁连县、刚察县和门源县 5 个市县)。研究区年平均降水量为 232.4 mm,年降水量自西北向东南逐渐增加,中部和东部地区降水量较大[21]。年平均气温较低(4℃),空间分布较为稳定,年际变化小,气温等值线与地形廓线基本一致[22]。平均海拔 4 000 m(图 1a),草地是研究区最主要的土地利用类型,占整个研究区总面积的 67.19%。主要包括高寒草甸、山地草甸、低地草甸、温性草原、高寒草原、高寒荒漠草原、温性荒漠和高寒荒漠等草地类型(图 1b)。该区域也是中国西部重要的生态安全屏障,黄河重要的水源地和生物多样性保护的优先区域。

1.2　草原毛虫数据获取

1.2.1　野外观测

利用团队自主研发的无人机航拍分析系统 FragMAP[20,23],依据草地植被类型和空间代表性,在研究区内设置大量 250 m × 250 m 的野外样地。每个样地设置如图 2 所示,设置 4 条航线来代表 250 m × 250 m 范围内草地植被信息,包括 1 个 200 m × 200 m 的Grid 飞行航线和 3 个 40 m × 40 m 的 Belt 飞



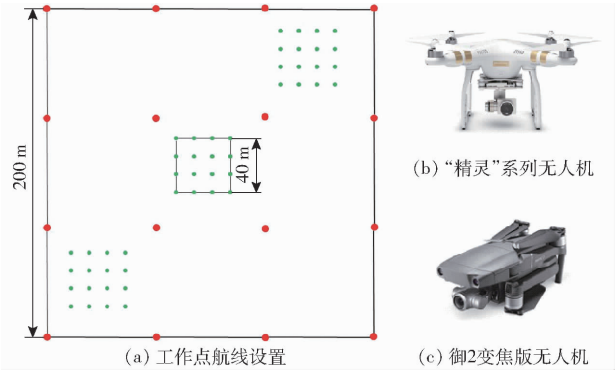
(a) 研究区数字高程模型DEM

(b) 研究区草地类型

图 1 研究区概况

Fig. 1 Study area

行航线(图 2a,图中红色点代表 Grid 航点,绿色点代表 Belt 航点)。每种飞行模式在其观测范围内均匀布设 16 个航拍点,每个航点镜头垂直向下对草地航拍一幅图像。每条航线设定后储存在 FragMAP setter 中,以便后期调用进行定点重复观测。Grid 飞行模式使用大疆“精灵”系列无人机(图 2b),飞行高度 20 m(图像分辨率小于 1 cm,覆盖范围 26 m × 35 m);Belt 飞行模式使用大疆御 2 变焦版无人机,飞行高度 2 m(分辨率 0.09 cm,覆盖范围 3.43 m × 2.57 m)(图 2c)。大疆“精灵”系列无人机用来选取草地生长状况相对均一,具有代表性的 MODIS 像元尺度观测样地。草原毛虫数据通过大疆御 2 变焦版无人机 Mavic 2 Zoom 四轴旋翼无人机野外观测航拍图像获取。野外观测在 2021 年草原毛虫蛹期前(7 月底—8 月初)开展,观测样地的布设一方面考虑草原毛虫发生、分布规律;另一方面为了尽可能全面地获取草原毛虫空间分布,设置野外观测样地时,沿主要交通道路和人类可到达的区域每隔 10 km 左右尽可能多地设置观测样地。在国家公园内共设置固定监测点 229 个,观测样地近 10 000 个(图 1a);获取航拍图像 10 000 余幅,用于后期草原毛虫的定性和定量检测工作。



(a) 工作点航线设置

(b) “精灵”系列无人机

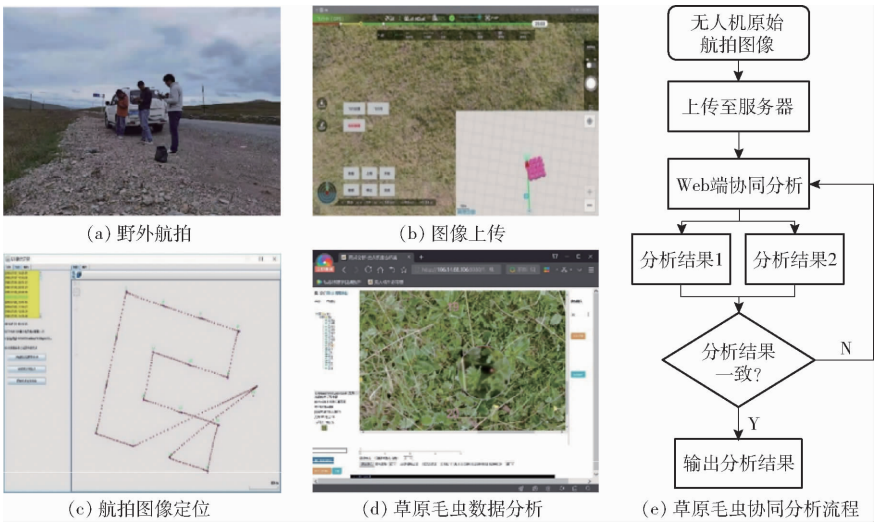
(c) 御2变焦版无人机

图 2 野外工作点设置示意图

Fig. 2 Setter of field work point

1.2.2 航拍图像预处理和毛虫数量分析

本研究采用 Belt 飞行模式获取的数据进行草原毛虫数量的分析。外业人员在野外完成 Belt 航拍观测后,将每次飞行的航拍图像、航点和航线等信息通过 FragMAP 上传至服务器端(图 3)。由室内分析人员基于协同分析平台及时定位和分析草原毛虫数据。首先,根据航拍图像属性文件记录的经纬度位置信息和 FragMAP 航拍软件中记录的航点信



(a) 野外航拍

(b) 图像上传

(c) 航拍图像定位

(d) 草原毛虫数据分析

(e) 草原毛虫协同分析流程

图 3 草原毛虫数据协同分析

Fig. 3 Collaborative data analysis of *Gynaephora alpherakii*

息(图 3b、3c),利用团队自主研发的 DJI Locator 软件使航拍图像与航点位置一一对应,并将定位后的航拍图像按航点顺序依次命名为 1 ~ 16。然后将定位好的航拍图像在 Web 端发布两个重复分析任务,由不同的分析人员利用草原毛虫分析系统(网页版)同时进行毛虫数量提取工作(图 3d),并对比不同人员草原毛虫分析结果。若分析结果相同,则输出该航拍图像草原毛虫数据,若分析结果有差异,则进入下一轮循环分析,直至所有分析结果一致(图 3e)。基于 Mavic 2 Zoom 无人机 2 倍变焦可以精确地获取样地内草原毛虫密度,无人机观测值与地面观测数据之间的决定系数 R^2 为 0.99($p < 0.001$),均方根误差(RMSE)为 1.76 头/m^2[4]。

1.3　遥感植被指数、气象、土壤等资料获取与预处理

本研究涉及的其他环境资料包括:草地类型、气象(气温、降水量、辐射)、土壤(土壤类型、土壤砂粒含量、粘粒含量)和地形等。其中草地盖度和生物量与遥感植被指数 NDVI 有较好的相关关系,因此本研究使用 NDVI 遥感植被指数替代。NDVI 数据选取 MODIS 16 d 最大值合成植被指数产品 MOD13Q1,数据下载自美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS。https://e4ftl01.cr.usgs.gov/),选取 2011—2021 年 5—9 月,空间分辨率为 250 m,轨道号为 h25v05 和 h26v05,共计 216 景影像。利用重投影工具(MODIS reprojection tools, MRT)对 MODIS 数据进行格式和投影转换等预处理。利用 ArcGIS Raster calculator 工具,计算 2011—2021 年每年生长季(5—9 月)MODIS NDVI 植被指数最大值(NDVImax)、最小值(NDVImin)、中值(NDVImedian)、均值(NDVImean)、范围(NDVIrange)、标准差(NDVIstd)、总和(NDVIsum)等特征变量。

气象数据来自于国家气象信息中心师春香研究员团队,主要包括 2011—2021 年气温、降水量和辐射等日值数据集,空间分辨率为 5 km。利用 ArcGIS Raster calculator 工具,计算 2011—2021 年每年生长季(5—9 月)气温、降水量和辐射的最大值(TMPmax, PREmax, SRAmax)、最小值(TMPmin, PREmin, SRAmin)、均值(TMPmean, PREmean, SRAmean)和累计值(TMPsum, PREsum, SRAsum)。土壤类型(soil)数据下载自中国科学院地理科学与资源研究所(https://www.resdc.cn/data.aspx?DATAID=145),为全国土壤普查办公室 1995 年编制并出版的《1∶100 万中华人民共和国土壤图》矢量化数据集[24]。草地类型(grassland)数据采用《1∶100 万中国草地资源图集》[25]。土壤表层和深层粘粒含量(clay1, clay2)、表层和深层砂粒含量(sand1, sand2)数据下载自中国科学院西北生态环境资源研究院寒区旱区科学数据中心(http://westdc.westgis.ac.cn/data/)。地形数据(DEM)可通过国际农业研究磋商小组空间信息联盟网站(http://srtm.csi.cgiar.org/)获取。

以上数据在 ArcGIS 软件中统一转投影为 Albers,重采样为分辨率 250 m 的栅格影像(保持每类栅格数据具有相同的行列数),以便后期构建和预测草原毛虫生态位时作为输入使用。

1.4　草原毛虫宜生区划分

基于 2021 年草原毛虫空间分布数据和环境因子数据(1.2.2 节和 1.3 节),结合 BIOMOD 模拟软件构建研究区草原毛虫生态位模拟模型。并结合 2011—2021 年气象、土壤、遥感植被指数和地形等环境因子,预估近 11 年来祁连山国家公园草原毛虫虫害发生概率空间分异情况。并以此为依据,划分祁连山国家公园草原毛虫宜生区。

1.4.1　草原毛虫生态位模拟

(1)环境因子筛选

在使用上述生态环境因子构建模型前,为减小因子间自相关和信息冗余对模型的运行速度和模拟精度的影响,本研究结合 Pearson 相关系数和因子重要性指标 Importance,对所有因子进行筛选。首先,使用留一法交叉验证的思想和重要性计算函数

$$Importance = 1 - \mathrm{cor}(pred_ref, pred_shuffled) \quad (1)$$

式中　cor——求 Pearson 系数函数

pred_ref——全部环境因子预测结果

pred_shuffled——剔除某一因子后模型预测结果

测试每种因子对检测目标的重要性。其次,对所有重要性值大于 0.1 的因子进行 Pearson 相关性分析,对相关系数 $|r| > 0.7$ 的只保留其中 1 个因子[26]。

(2)BIOMOD 生态位模型构建

BIOMOD 中共提供了广义线性模型(Generalized linear model, GLM)和广义增强回归模型(Generalized boosted regression models, GBM)等数 10 种物种分布模型可供选择[27-28]。为筛选出最优生态位模型,本研究将草原毛虫观测数据随机分为两部分,其中 70% 的样本用来训练生态位模型,剩余 30% 的样本用来验证模型精度[29]。利用 Kappa 系数、TSS (True skill statistics)和 AUC (Area under curve)3 种指标来筛选最优物种分布模型[30]。其中,Kappa 系数是用来评价预测结果的一致性[31]。TSS 计算公式为

$$TSS = Sensitivity + Specificity - 1 = TPR - FPR \quad (2)$$

式中 *Sensitivity*——敏感性

Specificity——特异性

TPR——真阳性率(True positive rate)

FPR——假阳性率(False positive rate)

TSS 取值范围在(0,1)之间,其值越接近 1,表示真阳性率与假阳性率差值越大,模型效果越好。

AUC 来源于受试者工作特征曲线(Receiver operating characteristic curve, ROC),被定义为 ROC 曲线下与坐标轴围成的面积。ROC 曲线是反映敏感性和特异性连续变量的综合指数,曲线上每个点反映对信号刺激的感受性。AUC 取值范围为(0.5,1),越接近 1 表示模型预测效果越好,反之越接近 0.5 表示模型越接近随机猜测,模型越没有预测价值。

1.4.2 草原毛虫宜生区划分

基于 Kappa 系数、TSS 和 AUC 筛选最优草原毛虫生态位模拟模型,并利用最优生态位模拟模型,预测 2011—2021 年祁连山国家公园青海片区草原毛虫潜在空间分布概率。当每年潜在分布概率大于 50% 时,认为草原害虫能够形成为害,赋值宜生指数(IH)为 1;反之认为不能形成为害,赋值为 0。将 2011—2021 年的 IH 进行空间叠加运算,参考蝗虫宜生区划分标准[32],草原毛虫宜生区划分规则如表 1 所示。对近 11 年来累计 IH 进行分级得到草原毛虫宜生区分布图。

表 1 草原虫害宜生区分级

Tab.1 Classification of suitable areas for grassland pests

名称	宜生指数	特征说明
一级宜生区	(5,11]	非常适合害虫生长发育,是害虫经常为害的区域
二级宜生区	(3,5]	比较适合害虫生长发育,是害虫较常为害的区域
三级宜生区	(1,3]	适合害虫生长发育,是时有害虫为害的区域
四级宜生区	(0,1]	具备害虫生长发育的主要条件,是害虫潜在为害的区域
五级宜生区	0	几乎没有害虫分布,不会形成为害

2 结果与分析

2.1 草原毛虫空间分异特征

野外观测结果表明,研究区草原毛虫空间分布异质较大,在所有观测样点中,出现草原毛虫的样点有 24 个,占所有监测样点 5.77%,零散分布于门源县、祁连县和刚察县内;不同监测点中,草原毛虫数量差异较大,最小仅有 1 头,最多则可以达到 2 046 头(图 4a)。同一监测样点内的 16 个航拍样地草原毛虫数量差异也较大,最多达 136 头,最少为 0 头(图 4b、4c)。就 2021 年草原毛虫无人机调查结果而言,草原毛虫主要分布在祁连县野牛沟乡和默勒镇,门源县皇城蒙古族乡、朱固乡等地区。

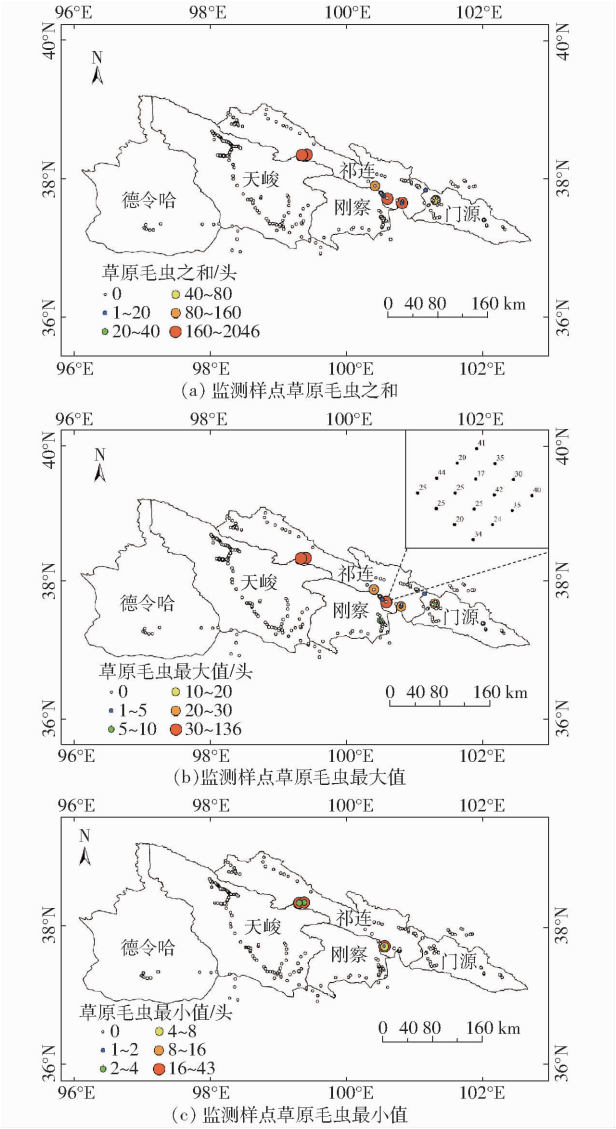


图 4 祁连山国家公园青海片区草原毛虫检测结果空间分异

Fig.4 Spatial differentiation of *Gynaephora alpherakii* in Qinghai area of Qilian Mountain National Park

2.2 环境因子及其重要性值

变量自相关检验结果如图 5 所示,草地类型、土壤类型、海拔、辐射平均值、辐射最大值、表层土壤砂粒含量、降水量平均值、降水量最大值、表层粘粒含量、深层粘粒含量、NDVI 平均值以及标准差等 12 个变量通过 Pearson 相关性分析。12 个环境变量重要性值和相对贡献率如图 6 所示。在所有筛选出的环境变量中,辐射平均值的重要性值最高,为 0.282,相对贡献率为 28.89%;降水量最大值、平均值以及表层砂粒含量重要性值介于 0.10~0.20 之间,其他变量的重要性值均低于 0.10;土壤类型重要性值最

低，仅 0.002，相对贡献率为 0.20%（图 6）。

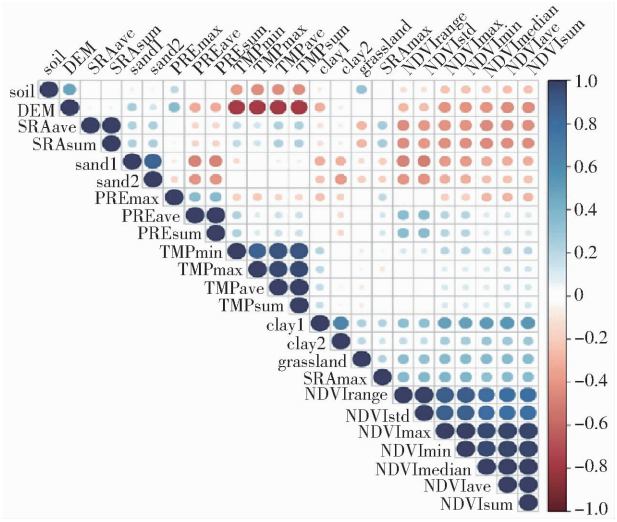


图 5　环境变量自相关分析结果

Fig. 5　Autocorrelation analysis of environmental variables

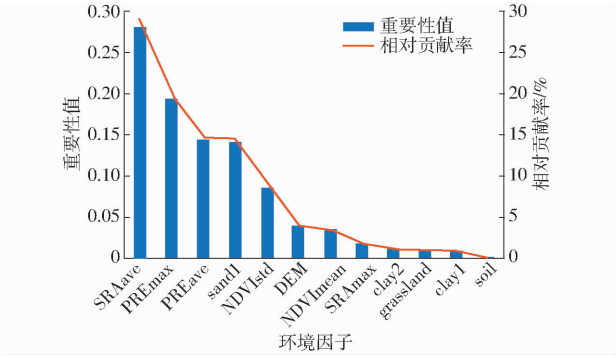


图 6　环境变量重要性值和相对贡献率

Fig. 6　Importance value and relative contribution rate of environmental variables

2.3　2011—2021 年草原毛虫空间分布概率及其为害空间分异

2.3.1　生态位模型及其精度验证

基于无人机航拍观测草原毛虫数据（2.1 节）和毛虫空间分布影响因子（2.2 节），结合 BIOMOD 生态位模型软件构建草原毛虫生态位模型，利用测试集数据评价模型精度，结果如表 2 所示。由表 2 可知，所有生态位模型中，Kappa 系数大于等于 0.5 的模型为 GLM、GBM 和 RF，Kappa 系数分别为 0.50、0.54 和 0.60；TSS 大于 0.6 的模型分别为 GLM、GBM、ANN 和 RF，TSS 依次为 0.76、0.69、0.68 和 0.75；AUC 大于 0.7 的模型分别为 GLM、GBM、ANN、FDA、MARS 和 RF。综合 3 类评价指标，RF 模型对草原毛虫生态位模拟精度最高，为最优预测模型。其 Kappa 系数、TSS 和 AUC 分别为 0.60、0.75 和 0.93。

表 2　草原毛虫生态位模型精度检验结果

Tab. 2　Accuracy test for ecological niche model of *Gynaephora alpherakii*

模型	Kappa 系数			TSS			AUC		
	平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%	平均值	标准差	变异系数/%
GLM	0.50	0.16	32.13	0.76	0.16	20.84	0.86	0.09	10.75
GBM	0.54	0.14	24.86	0.69	0.10	14.45	0.91	0.05	5.36
CTA	0.27	0.09	33.95	0.47	0.24	51.14	0.65	0.23	35.53
ANN	0.29	0.03	11.71	0.68	0.18	26.50	0.85	0.05	6.40
SRE	0.25	0.10	39.05	0.27	0.14	51.51	0.63	0.07	10.96
FDA	0.38	0.09	22.65	0.54	0.20	36.99	0.77	0.11	13.98
MARS	0.34	0.23	66.99	0.44	0.26	58.73	0.74	0.10	13.53
RF	0.60	0.14	23.77	0.75	0.14	19.30	0.93	0.03	3.66

2.3.2　草原毛虫空间分布概率时空动态变化

基于 2.3.1 节中最优预测模型和 2011—2021 年环境因子数据集，分别预测 2011—2021 年草原毛虫空间分布概率，结果如图 7、8 所示。2011—2021 年草原毛虫出现概率较高的区域主要分布在研究区的中部和东南部，多出现在门源县、祁连县、刚察县和天峻县。所有年份中，草原毛虫出现概率在 0～20% 之间的区域面积最大，占整个研究区总面积的 69.28%～87.45%；其次为出现概率为 20%～30% 的区域，占整个研究总面积的 7.21%～13.24%；草原毛虫出现概率在 30%～40% 之间和 50% 以上区域占整个研究区总面积的比例相近，介于 1.66%～10.96% 之间。所有概率类型中，草原毛虫出现概率介于 40%～50% 的区域面积比例最小，占整个研究区总面积的 0.97%～3.72%。就草原毛虫出现概率大于 50% 的区域而言，11 年来，其面积呈现逐渐增加的变化趋势，其中 2011 年面积最小，仅占研究区总面积的 1.91%，2017 年面积最大，占整个研究区面积的 10.96%。2015—2021 年后的面积大于整个研究区总面积的 5%。

2.3.3　2011—2021 年草原毛虫为害空间分异

2011—2021 年研究区草原毛虫为害区域时空变化如图 9 所示，草原毛虫为害区域面积比例较小时，主要分布在研究区东南部的门源县境内（2011—2013 年）。草原毛虫为害区域较大时，呈现由东南向西北逐渐增加的变化趋势。由门源县向西

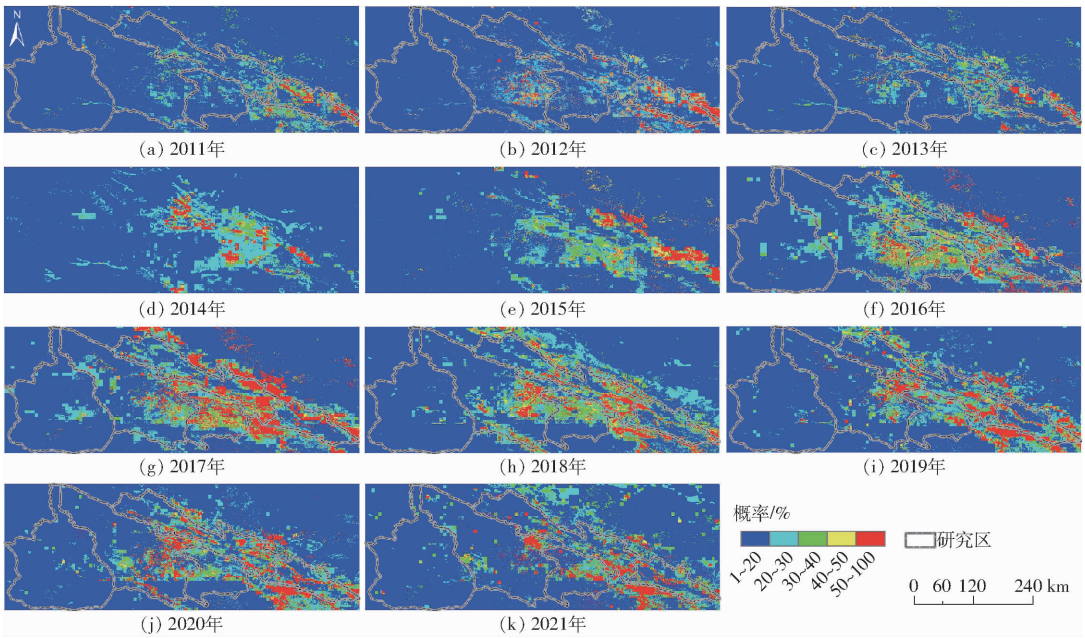


图 7 研究区草原毛虫出现概率时空动态变化

Fig. 7 Temporal and spatial dynamics of occurrence probability of *Gynaephora alpherakii* in study area

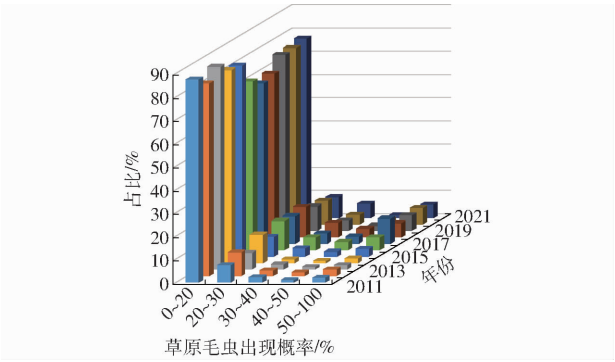


图 8 研究区草原毛虫出现概率时空动态变化统计结果

Fig. 8 Spatio-temporal dynamic changes of occurrence probability of *Gynaephora alpherakii* in study area

北方向的祁连县、刚察县和天峻县逐渐增加。将 11 年内草原毛虫为害区域进行空间叠加运算，结果如图 10 所示。11 年来，研究区大多数区域未出现草原毛虫为害的现象（出现概率为 0），其面积占整个研究总面积的 78.31%；草原毛虫为害年份在 1~4 年之间的区域面积占研究区总面积的 19.24%。而草原毛虫为害年份大于 5 年所占比例较小，占整个研究区总面积的 2.45%，主要分布在门源县、祁连县、刚察县和天峻县东部地区。

2.4 草原毛虫宜生区划分

研究区草原毛虫宜生区划分如图 11 所示，其中一

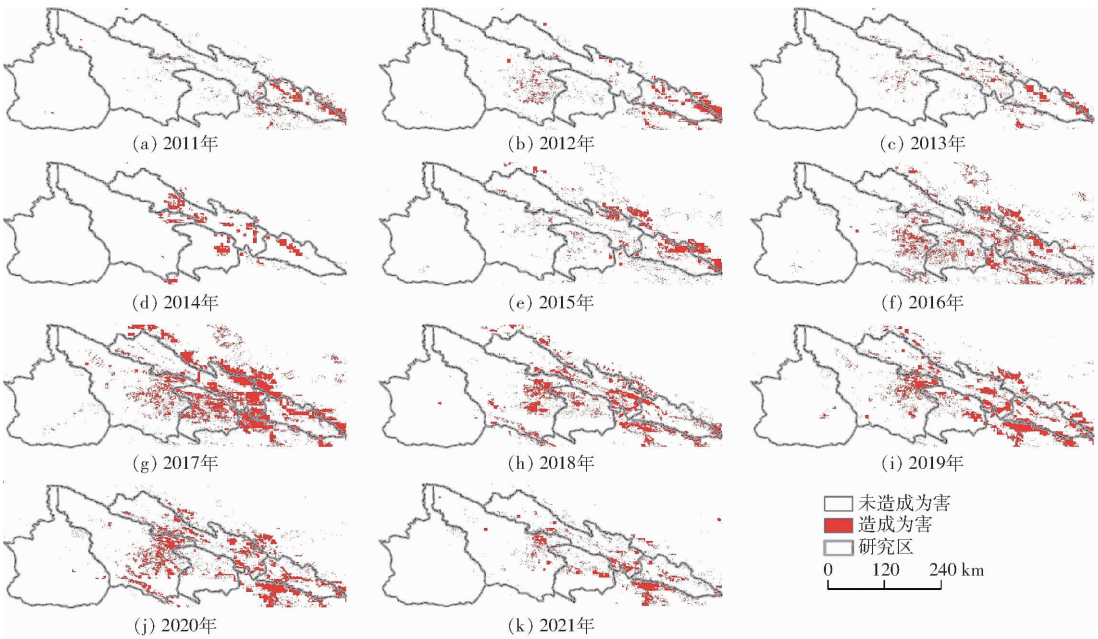


图 9 研究区草原毛虫为害区域时空动态变化

Fig. 9 Spatial and temporal dynamics of damage area of *Gynaephora alpherakii* in study area

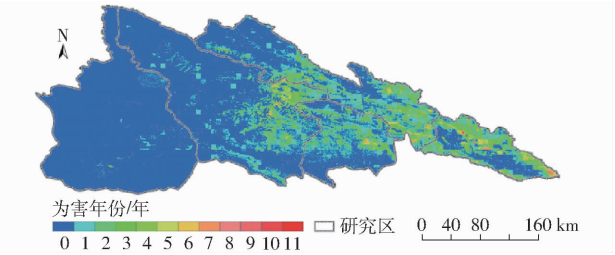


图 10　研究区草原毛虫为害区域空间累计

Fig. 10　Spatial accumulation of *Gynaephora alpherakii* damage area in study area

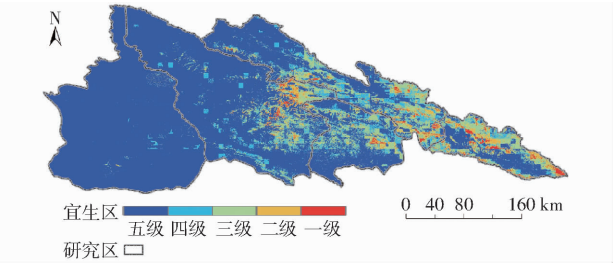


图 11　草原毛虫宜生区

Fig. 11　Suitable habitat for *Gynaephora alpherakii*

级、二级和三级宜生区面积较小，占整个研究区面积的 14.68%。主要分布在研究区中东部地区，包括门源县大部分区域、祁连县的中部和东南部、刚察县的中部以及天峻县的东部地区。四级和五级宜生区面积较大，占整个研究区总面积的 85.32%。主要分布在研究区的西部地区，包括德令哈市、天峻县的大部分区域、祁连县北部、刚察县南部以及门源县的西南部。

3　讨论

本研究野外草原毛虫观测采用无人机航拍图像获取，无人机效率高，操作方便，图像分辨率高，从而克服了传统样方调查的诸多困难[19-20,23,33]。节省了大量人力、物力的同时，增加了草原毛虫调查的范围和样点数量。为草原毛虫宜生区研究提供大量真实可靠的野外观测数据。相较于传统宜生区划分方法，本研究利用生态位模型预估草原毛虫为害区域，进而定量分析各生态因子宜生指数，减少了传统区划分析中因样方选择随机性导致的系统误差。精确获取了研究区草原毛虫宜生区区划图，从而为草原毛虫习性等基础研究及高寒草原虫害预测提供高效、准确的方法，为进一步定量认识草原毛虫的生态学地位及虫害防控策略和措施的制定提供理论和实践基础。

然而本研究还存在一定的不足和不确定性，还需要进一步完善。首先本研究草原毛虫数据是通过人工识别的方式逐幅图像分析得到，图像分析速度较为缓慢[19]，因此将来研究应基于无人机航拍图像和深度学习算法进行草原毛虫识别工作[19]，可以大幅度提高图像数据分析的速度，减少人为主观判断中的误差[34-35]。其次，受限于无人机调查数据年限较少（仅为 2021 年的观测数据），草原毛虫生态位模拟模型还存在一定的误差，研究结果还存在一定的不确定性。因此，基于本研究中设置的大量航拍样地，开展长时间序列，定点、重复的草原毛虫无人机航拍监测非常必要[20,23,36-38]。此外，在进行无人机调查数据的过程中调查路线设计要合理，路线应穿过草原毛虫的所有可能发生的区域，既要有水平方向的变化，还要求有垂直高度的变化[39]，将来草原毛虫的监测工作还需要在现有监测点的基础上补充和新增观测样地，以便更加详尽地掌握国家公园草原毛虫的时空动态变化信息。

4　结束语

基于无人机航拍观测草原毛虫数据和其所对应的植被、土壤、气候等环境因子，获取了研究区草原毛虫最优生态位模拟模型。在此基础上模拟分析了 2011—2021 年草原毛虫生态位时空动态变化，从而获取了研究区草原毛虫宜生区区划图。研究表明，RF 模型对草原毛虫生态位的估测能力最优，其 Kappa 系数、TSS 和 AUC 平均值分别为 0.60、0.75 和 0.93。整体而言，草原毛虫为害区域面积较小，占研究区总面积的 1.91% ~ 10.96%，但近年来其为害区域呈现增加趋势，2015 年以来面积维持在研究区总面积 5% 以上。草原毛虫宜生程度呈现自东南向西北依次递减的变化趋势，其中一级、二级和三级宜生区所占比例较小，四级和五级宜生区面积较大，约占整个研究区总面积的 85.32%。

参　考　文　献

[1]　严林，刘振魁，梅洁人，等. 野外扣笼条件下草原毛虫对食物的选择[J]. 草地学报，1995，3(4)：257 - 268.
YAN Lin，LIU Zhenkui，MEI Jieren，et al. Food choices of prairie caterpillars in captivity[J]. Acta Agrestia Sinica，1995，3(4)：257 - 268. (in Chinese)

[2]　郑莉莉，宋明华，尹谭凤，等. 青藏高原高寒草甸门源草原毛虫取食偏好及其与植物 C、N 含量的关系[J]. 生态学报，2016，36(8)：2319 - 2326.
ZHENG Lili，SONG Minghua，YIN Tanfeng，et al. Feeding preference of *Gynaephora menyuanensis* and its relationships with plant carbon and nitrogen contents in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica，2016，36(8)：2319 - 2326. (in Chinese)

[3] 周华坤,王晓辉,温军,等.果洛州玛沁县草原毛虫虫害发生与气候因子的相互关系[J].草业科学,2012,29(1):128 - 134.
ZHOU Huakun, WANG Xiaohui, WEN Jun, et al. The relationship between damage of grassland caterpillar and climate factors in the Maqin County of Guoluo Prefecture[J]. Pratacultural Science, 2012, 29(1): 128 - 134. (in Chinese)

[4] 高姻燕,马青山,张欣雨,等. 基于无人机的草原毛虫监测初探[J].草业科学, 2020, 37(10): 2106 - 2114.
GAO Yinyan, MA Qingshan, ZHANG Xinyu, et al. Preliminary exploration of monitoring *Gynaephora alpherakii* using unmanned aerial vehicles (UAV)[J]. Pratacultural Science, 2020, 37(10): 2106 - 2114. (in Chinese)

[5] 张棋麟,袁明龙.草原毛虫研究现状与展望[J].草业科学,2013,30(4):156 - 164.
ZHANG Qilin, YUAN Minglong. Research status and prospect of grassland caterpillars (*Lepidoptera*: *Lymantriidae*)[J]. Pratacultural Science, 2013, 30(4): 156 - 164. (in Chinese)

[6] 刘世贵,杨荣志,伍铁桥,等.草原毛虫病毒杀虫剂的研制及其大面积应用[J].草业学报,1993,2(4):47 - 50.
LIU Shigui, YANG Rongzhi, WU Tieqiao, et al. Development and application of insecticide for grassland caterpillar virus[J]. Acta Prataculturae Sinica, 1993, 2(4): 47 - 50. (in Chinese)

[7] 张建军,周成刚,郭光智,等.杆状病毒杀虫剂增效途径研究进展[J].山东农业大学学报(自然科学版),2004,35(1):154 - 158.
ZHANG Jianjun, ZHOU Chenggang, GUO Guangzhi, et al. Research progress in the synergy of the baculovirus insecticides[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science), 2004, 35(1): 154 - 158. (in Chinese)

[8] VAN NOUHUYS S, SINGER M C, NIEMINEN M. Spatial and temporal patterns of caterpillar performance and the suitability of two host plant species[J]. Ecological Entomology, 2003, 28(2): 193 - 202.

[9] 严林,江小蕾,王刚.门源草原毛虫幼虫发育特性的研究[J].草业学报,2005,14(2):116 - 120.
YAN Lin, JIANG Xiaolei, WANG Gang. Characterization of larvae development in *Gynaephora menyuanensis* (*Lepidoptera*: *Lymantriidae*)[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(2): 116 - 120. (in Chinese)

[10] 曹慧,朱文琰,赵新全.试验增温和放牧对门源草原毛虫生长发育的影响[J].草业学报,2016,25(1):268 - 272.
CAO Hui, ZHU Wenyan, ZHAO Xinquan. Effects of warming and grazing on growth and development of the grassland caterpillar (*Gynaephora menyuanensis*)[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(1): 268 - 272. (in Chinese)

[11] 余欣超,陈珂璐,姚步青,等.模拟增温下门源草原毛虫幼虫生长发育特征[J]. 生态学报,2016,36(24):8002 - 8007.
YU Xinchao, CHEN Kelu, YAO Buqing, et al. Effects of simulated warming on the growth and development of *Gynaephora menyuanensis* Larvae[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(24): 8002 - 8007. (in Chinese)

[12] 万秀莲,张卫国.草原毛虫幼虫的食性及其空间格局[J].草地学报,2006,14(1): 84 - 88.
WAN Xiulian, ZHANG Weiguo. Feeding habit and spatial pattern of *Gynaephora alpherakii* Larvae[J]. Acta Agrestia Sinica, 2006, 14(1): 84 - 88. (in Chinese)

[13] ROMINGER K, MEYER S. Application of UAV-based methodology for census of an endangered plant species in a fragile habitat [J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 719.

[14] 施大钊,贠旭疆.改进草原鼠虫害预警系统的管理[J].草地学报,2005,13(1): 71 - 74.
SHI Dazhao, YUN Xujiang. Improvement of the grassland early pest warning system[J]. Acta Agrestia Sinica, 2005, 13(1): 71 - 74. (in Chinese)

[15] 郭庆华,吴芳芳,胡天宇,等. 无人机在生物多样性遥感监测中的应用现状与展望[J].生物多样性,2016,24(11):1267 - 1278.
GUO Qinghua, WU Fangfang, HU Tianyu, et al. Perspectives and prospects of unmanned aerial vehicle in remote sensing monitoring of biodiversity[J]. Biodiversity, 2016, 24(11): 1267 - 1278. (in Chinese)

[16] MARRIS E. Drones in science: fly, and bring me data[J]. Nature, 2013, 498(7453): 156 - 158.

[17] SUN Y, YI S H, HOU F J. Unmanned aerial vehicle methods makes species composition monitoring easier in grasslands[J]. Ecological Indicators, 2018, 95: 825 - 830.

[18] MENG B, GAO J, LIANG T, et al. Modeling of alpine grassland cover based on unmanned aerial vehicle technology and multi-factor methods: a case study in the east of Tibetan Plateau, China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(34): 320.

[19] MENG B, YANG Z, YU H, et al. Mapping of *Kobresia pygmaea* community based on umanned aerial vehicle technology and gaofen remote sensing data in alpine meadow grassland: a case study in eastern of Qinghai - Tibetan Plateau[J]. Remote Sensing, 2021, 13: 2483.

[20] YI S H. FragMAP: a tool for long-term and cooperative monitoring and analysis of small-scale habitat fragmentation using an unmanned aerial vehicle[J]. International Journal of Remote Sensing, 2017, 38(8 - 10): 2686 - 2697.

[21] 黄颖,毛文茜,王潇雅,等.近 39 a 祁连山及其周边地区降水量时空分布特征[J].干旱气象,2020,38(4):527 - 534.
HUANG Ying, MAO Wenqian, WANG Xiaoya, et al. Temporal and spatial distribution of precipitation in the Qilian Mountain and its surrounding areas in recent 39 years[J]. Drought Meteorology, 2020, 38(4): 527 - 534. (in Chinese)

[22] 张存杰,郭妮.祁连山区近 40 年气候变化特征[J].气象,2002,28(12):33 - 39.
ZHANG Cunjie, GUO Ni. Climatic variation characteristics over Qilian Mountain area during the last 40 years[J], Meteorology, 2002, 28(12): 33 - 39. (in Chinese)

[23] YI S H, CHEN J J, QIN Y, et al. The burying and grazing effects of plateau pika on alpine grassland are small: a pilot study in a semiarid basin on the Qinghai - Tibet Plateau[J]. Biogeosciences, 2016, 13: 6273.

[24] 全国土壤普查办公室. 1∶100 万中华人民共和国土壤图[M]. 西安:西安地质出版社,1995.
[25] 100 万中国草地资源图编制委员会. 1∶100 万中国草地资源图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 1993.
[26] 杜嘉星,孙义,向波,等. 基于 BIOMOD 的黄河源区高原鼠兔潜在分布及其影响因子[J]. 草业科学,2019,36(4):1074 – 1083,917.
DU Jiaxing,SUN Yi,XIANG Bo,et al. Potential distribution of plateau pika and its influence factors in the source region of the Yellow River Basin using BIOMOD[J]. Pratacultural Science,2019,36(4):1074 – 1083,917. (in Chinese)
[27] HUILLER W T. BIOMOD-optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change[J]. Global Change Biology, 2003, 9(10):1353 – 1362.
[28] THUILLER W, RICHARDSON D M, ROUGET M, et al. Interactions between environment, species traits, and human uses describe patterns of plant invasions[J]. Ecology, 2006, 87:1755 – 1769.
[29] FIELDING A,BELL J. A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models [J]. Environment Conservation, 1997, 24:38 – 49.
[30] FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. Pattern Recognit. Lett. ,2006, 27:861 – 874,539.
[31] COHEN J. A coefficient of agreement for nominal scales[J]. Educ. Psychol. Meas. , 1960,20:37 – 46.
[32] 杜桂林, 赵海龙, 涂雄兵,等. 亚洲小车蝗在内蒙古草原宜生区划分研究[J]. 植物保护, 2018, 44(6):24 – 31.
[33] GUO D,SONG X,HU R,et al. Grassland type-dependent spatiotemporal characteristics of productivity in Inner Mongolia and its response to climate factors[J]. Science of the Total Environment, 2021,775:145644.
[34] CÁCERES M D, WISER S K. Towards consistency in vegetation classification[J]. Journal of Vegetation Science, 2012, 23(2):387 – 393.
[35] TIERNEY D A, FLETCHER A T, ERSKINE P D. Standard survey designs drive bias in the mapping of upland swamp communities[J]. Austral Ecology,2015,40(7):782 – 793.
[36] LV Y,SHEN M,MENG B,et al. The similarity between species composition of vegetation and soil seed bank of grasslands in Inner Mongolia,China:implications for the asymmetric response to precipitation[J]. Plants,2021, 10(9):1890.
[37] ZHANG J,LIU D,MENG B,et al. Using UAVs to assess the relationship between alpine meadow bare patches and disturbance by pikas in the source region of Yellow River on the Qinghai – Tibetan Plateau[J]. Global Ecology and Conservation,2021, 26(6):e01517.
[38] 杨红艳, 杜健民, 阮培英, 等. 基于无人机遥感与随机森林的荒漠草原植被分类方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6):186 – 194.
YANG Hongyan, DU Jianmin, RUAN Peiying,et al. Vegetation classification of desert steppe based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 186 – 194. (in Chinese)
[39] 许章华,李聪慧,刘健,等. 马尾松毛虫害等级的 Fisher 判别分析[J]. 农业机械学报,2014,45(6):275 – 283.
XU Zhanghua, LI Conghui, LIU Jian,et al. Fisher discriminant analysis of *Dendrolimus punctatus* Walker pest levels[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(6): 275 – 283. (in Chinese)