doi:10.3969/j.issn.1672-1292.2026.03.004

四川省森林扰动时空演变及其与林鸟丰富度的空间关系

项天羽,戴晓爱

(成都理工大学地理与规划学院,四川 成都 610059)

[摘要] 森林扰动引发的生境退化是森林鸟类面临的核心威胁,探究森林扰动对鸟类栖息地的空间作用对区域生物多样性保护具有重要意义. 本研究基于长时序遥感影像与全球鸟类物种分布数据,利用 LandTrendr 算法提取四川省近 30 年森林扰动的时空演变特征,结合物种栖息地分析方法评估全省 141 种专性林鸟的物种丰富度空间格局,并采用双变量空间自相关模型探究森林扰动与物种多样性的空间关系. 结果表明:(1)四川省森林扰动呈现显著的时空分异,未扰动森林集中于川西高原,显著扰动区集聚于四川盆地西南缘;扰动类型可能由早期广泛且细碎的人类活动影响逐渐转变为近期局地集中的森林火灾与地质灾害影响. (2)林鸟物种丰富度呈现中西部高、东部低的总体格局,林鸟潜在栖息地高度聚集于若尔盖湿地至岷山、邛崃山、大雪山一线及攀西地区. (3)森林扰动强度与林鸟物种丰富度存在极显著的正向空间耦合效应(全局莫兰指数为 0.124),局部空间表现出盆周西南缘等"高-高"严峻冲突区与大小凉山腹地等"低-高"优质核心生境的地域分异特征. 本研究揭示了四川省部分高生态保护价值的林鸟栖息地正面临森林扰动的威胁,一定程度上证实了自然保护地体系对维持区域生物多样性具有关键作用.

[关键词] 森林扰动,生物多样性,专性林鸟,空间自相关,四川省
[中图分类号]X36 [文献标志码]A [文章编号]1672-1292(2026)03-0031-09

Spatiotemporal Evolution of Forest Disturbances and Its Spatial Association with Species Richness of Forest-Specialist Birds in Sichuan Province

Xiang Tianyu, Dai Xiaoai

(College of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Habitat degradation triggered by forest disturbances poses a major threat to forest birds. Understanding the spatial impacts of forest disturbances on bird habitats is of great significance for regional biodiversity conservation. Based on long-term remote sensing imagery and global bird species distribution data, this study utilizes the LandTrendr algorithm to characterize the spatiotemporal dynamics of forest disturbances in Sichuan Province over the past 30 years. Combined with the Area of Habitat (AOH) method, the spatial pattern of species richness for 141 forest-specialist bird species across the province is evaluated. Furthermore, a bivariate spatial autocorrelation model is employed to explore the spatial relationship between forest disturbances and species diversity. The results indicate that: (1) Forest disturbances in Sichuan Province exhibits significant spatiotemporal heterogeneity. Undisturbed forests are primarily concentrated in the Western Sichuan Plateau, while significantly disturbed areas are clustered along the southwestern margin of the Sichuan Basin. The disturbance patterns have potentially shifted from widespread and fragmented human activities in the early period to more localized forest fires and geological disasters in recent years. (2) The species richness of forest-specialist birds exhibits an overall spatial pattern of "higher in the central-western region and lower in the eastern region." The potential habitats of forest-specialist birds are highly concentrated along the Zoige Wetland-Minshan Mountains-Qionglai Mountains-Daxue Mountains corridor, as well as in the Panxi region. (3) Forest disturbance intensity and forest-specialist bird species richness exhibits a highly significant positive spatial coupling effect (Global Moran's $I = 0.124$). Local spatial analysis reveals distinct regional differentiation patterns, characterizes by "High-High" conflict zones along the southwestern margin of the Sichuan Basin and "Low-High" high-quality core habitats in the hinterland of the

收稿日期:2026-04-11.
基金项目:国家社会科学基金资助项目(24XGL026)、教育部基础学科拔尖学生培养计划 2.0 研究课题(20251001).
通讯作者:戴晓爱,博士,教授,研究方向:资源环境遥感、GIS 空间分析与建模. E-mail:daixiaoa@cdut.edu.cn

Liangshan Mountains. This study demonstrates that some forest bird habitats with high ecological conservation value in Sichuan Province are currently threatened by forest disturbances, and further highlights the important role of protected area systems in maintaining regional biodiversity.

Key words: forest disturbances, biodiversity, forest-specialist birds, spatial autocorrelation, Sichuan Province

森林在维系陆地生态安全与生物多样性方面发挥着不可替代的关键作用[1-4]. 森林扰动是指森林冠层面积及树木生物量减少甚至完全消失的事件[4-6]. 在气候变化与人类开发活动的双重驱动下,全球森林正面临越来越严重的扰动危机[6-8]. 森林扰动不仅直接造成林冠层与生物量的损失,更引发了深层次的栖息地丧失与景观破碎化,已成为区域乃至全球生物多样性下降的核心诱因[9-11]. 鸟类作为对生态系统变化反应极为敏锐的指示类群,其种群动态是衡量生境质量的重要标尺[12]. 特别是专性林鸟,因其生存与繁衍高度依赖原始或结构完整的森林生境,对扰动引发的土地利用变更尤为敏感,栖息地退化已构成其面临的最主要生存威胁. 四川省地处中国西南腹地,凭借极其复杂的地形地貌与多样化的气候条件,孕育了极具全球保护价值的丰富林鸟资源,是世界公认的生物多样性热点区域[13]. 四川省林鸟的生存空间正面临着森林扰动的胁迫. 因此,精准刻画森林扰动的时空演变,并评估其对林鸟栖息地的空间影响,已成为当前区域生物多样性保护亟待解决的关键科学问题.

当前,国内外学者在森林扰动定量监测与物种生境评估领域已取得诸多实质性进展. 得益于以 Landsat 为典型代表的长时序遥感数据的普及[14]与 Google Earth Engine(GEE)等云计算平台的发展[15-16],大尺度、长时间序列的精细化扰动监测成为可能. 其中,LandTrendr 算法因其能精准捕捉森林覆盖的短期突变与长期渐变轨迹,已被广泛应用于森林扰动的估计[17-21]. 在物种栖息地分布评估方面,栖息地面积(area of habitat, AOH)通过匹配物种的分布范围(extent of occurrence, EOO)、适生的土地利用/覆盖类型和高程[22],已被广泛应用于物种栖息地的分布制图与丰富度估计[23-25].

基于此,本研究以四川省为研究对象,探究长时序森林扰动对林鸟栖息地的空间影响机制. 研究基于 1990—2020 年的 Landsat 长时序影像集合,利用 LandTrendr 算法提取四川省近 30 年森林扰动的时空演变格局;选取在四川省分布的专性林鸟,结合 EOO、土地覆盖数据与数字高程模型(digital elevation model, DEM),提取每种林鸟的 AOH 以衡量其潜在栖息地分布,并计算林鸟的物种丰富度;在此基础上,引入双变量空间自相关,分析森林扰动与林鸟物种多样性之间的空间关系. 本研究旨在明晰四川省林鸟的栖息地森林扰动现状,为揭示区域生态系统的脆弱性机制提供理论依据,并为国家生物多样性保护及生态修复工程的科学布局提供坚实的空间数据支撑.

1　研究方法与数据来源

1.1　研究区概况

四川省地处中国西南地区腹地,地理位置介于 26°03′N~34°19′N,97°21′E~108°31′E. 四川省地势整体呈现西高东低的特征,西部主要为川西北高原与川西南山地组成的川西高原;东部则为四川盆地及盆缘山地[26]. 作为我国第二大林区西南林区的主体,四川省森林资源极为丰富,森林总面积达 1 839.77 万 hm^2,森林覆盖率为 38.03%. 省内森林资源以天然林(72.70%)和防护林为主,优势树种多为冷杉、柏木和栎树,且龄组结构较为合理[27]. 四川省的生物多样性丰富,为全球生物多样性热点地区之一[13].

1.2　数据来源与预处理

本研究选用美国地质调查局(USGS)提供的 1990—2020 年 Landsat Collection 2 Surface Reflectance Level 2 Tier 1 地表反射率产品. 该数据集涵盖了 Landsat 5 TM、Landsat 7 ETM+及 Landsat 8 OLI 传感器的长时序连续观测影像. 数据获取与预处理均基于 GEE 云计算平台完成. 在预处理阶段,所有影像均已进行大气校正,并使用 CFMask(C Function of Mask)算法对云、阴影、积雪和烟雾等噪声进行了掩膜处理. 提取各年度生长季的归一化燃烧率(normalized burn ratio, NBR)时间序列,将其作为 LandTrendr 算法监测森林变化的输入参数. 相关研究表明,NBR 指数对植被覆盖度变化及森林扰动与恢复过程具有极高的敏感性[28-29]. 其计算公式为:

$$\mathrm{NBR}=\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{SWIR}}{\mathrm{NIR}+\mathrm{SWIR}}. \tag{1}$$

式中,NIR(near-infrared)为近红外波段,SWIR(short-wave infrared)为短波红外波段. 通过 GEE 平台年度合成,构建了支持历史扰动监测的无云 NBR 时序数据集.

鸟类分布数据采用世界自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature,IUCN)和国际鸟类联盟(BirdLife International)发布的全球鸟类物种分布地图(2025.1 版)矢量多边形数据. 为了更客观、精准地反映森林环境变化的真实生态成效,研究排除了适应多种生境的泛化种,即按照 IUCN 鸟类数据库筛选出栖息地类型只有森林生态系统的鸟类作为研究对象[30]. 其次,剔除已灭绝或存活状况不明的物种. 最后,将同一候鸟在不同迁徙状态下的重叠多边形要素进行合并处理,以确保后续计算林鸟物种丰富度时每种鸟类仅被计数一次,保证空间统计结果的科学性.

土地覆盖数据采用 1990—2020 年中国年度土地覆盖数据集(CLCD)[31],提取其中的森林类别并以最近邻法重采样至 1 km×1 km 空间分辨率,得到四川省历史森林本底图,用于后续的森林掩膜处理. 高程数据采用欧洲航天局生产的 Copernicus DEM,用双线性法重采样至 1 km×1 km 空间分辨率. 所有空间数据均在 Albers 等面积圆锥投影下进行处理.

1.3 研究方法

1.3.1 基于 LandTrendr 的森林扰动分布提取

LandTrendr 是一种基于时序轨迹分割的变化检测算法,能够有效捕获陆地表面光谱在长时间序列中的剧烈突变(如森林火灾、砍伐)以及长期渐变特征(如森林退化与缓慢恢复). 该算法的核心在于将每个像元的光谱时间序列建模为若干首尾相连的线段集合,从而在保留关键变化细节的同时滤除短暂的噪声. LandTrendr 算法的执行流程主要包含 5 个步骤:首先,去除由非真实地物变化引起的异常光谱尖峰;其次,通过回归残差和角度阈值识别潜在的光谱变化顶点;第三,采用点对点和回归相结合的方式拟合各个顶点间的轨迹;第四,通过逐步剔除恢复率最低的顶点来简化拟合模型;最后,使用 F 统计量的 p 值(p-of-f)在众多迭代模型中选择最佳模型[32].

本研究借助 GEE 云平台的 LT-GEE API 实现该算法[33],输入数据为 1990—2020 年植被生长季的归一化燃烧率(NBR)年度合成序列. 结合四川省植被生长特征与 LandTrendr 开发者推荐的参数配置,通过在四川省内多个已知扰动样区进行反复预实验调试,确定了本研究 LandTrendr 算法的运行参数组合,如表 1 所示.

表 1 LandTrendr 算法输入参数设置

Table 1 Input parameter settings for LandTrendr algorithm

参数	类型	描述	数值
maxSegments	Integer	分割线段数量上限	8
spikeThreshold	Float	识别潜在顶点的阈值	0.9
vertexCountOvershoot	Integer	在初始阶段的回归中可以超过的节点数	3
preventOneYearRecovery	Bool	是否排除一年的恢复	True
recoveryThreshold	Float	识别异常恢复率的阈值	0.5
pvalThreshold	Float	回归分析中 F 检验的 p 值	0.05
bestModelProportion	Float	选择最佳模型时的标准	0.75
minObservationsNeeded	Integer	进行输出拟合所需的最小观测值	6

为剔除非林地变化的扰动,本研究利用 1990—2020 年 CLCD 产品提取的森林历史本底图作为掩膜,对算法输出的扰动结果进行提取,获得四川省 1990—2020 年森林扰动的分布图.

1.3.2 专性林鸟的 AOH 提取和物种丰富度计算

本研究使用 AOH 作为评估森林鸟类空间分布的核心指标,旨在通过精细刻画物种的潜在栖息地范围,来推断四川省林鸟生物多样性的空间格局. 在计算陆生物种 AOH 的众多方法中,目前应用最广泛且科学性较强的方法是基于遥感产品与地理信息系统(GIS)的 AOH 提取方法,选取同时满足以下 3 个核心条件的区域:(1)处于该物种已知的发生范围(EOO)内;(2)介于该物种适宜生存的海拔界限之中;(3)符合该物种的栖息地偏好,即处于其严格适宜的土地利用类型内[22]. 计算过程可以用以下公式表示:

$$\mathrm{AOH}_i(x,y)=\mathrm{EOO}_i(x,y)\times L_i(x,y)\times E_i(x,y), \tag{2}$$

$$E_i(x,y)=\begin{cases}1, & E_{\min,i}\leqslant H(x,y)\leqslant E_{\max,i};\\ 0, & \text{others.}\end{cases} \tag{3}$$

式中,$EOO_i(x,y)$是物种 i 的分布范围;$L_i(x,y)$为土地利用适宜性约束,对于专性森林鸟类而言,即为森林分布范围;$E_i(x,y)$为海拔分布适宜性,基于高程判断该点海拔是否处于物种 i 的适生海拔界限之间.

本研究使用 arcpy 自动化批处理获取林鸟 AOH,对应的 ArcGIS Pro 版本为 3.5.2,python 版本为 3.11. 具体步骤为:首先将鸟类多边形数据作为 EOO,使用土地利用中的森林分布作为林鸟的生境偏好,并将这两个数据进行交集运算,获取林地内的初步分布范围;从 DEM 数据中提取各物种适宜海拔界限生成高程掩膜,与初步分布范围进行交集运算,剔除海拔不符的范围,最终输出专性林鸟的 AOH 数据.

将四川省林鸟的 AOH 的进行空间叠加,即可计算得到林鸟物种丰富度:

$$\mathrm{Richness}(x,y)=\sum_{i=1}^{n}\mathrm{AOH}_i(x,y). \tag{4}$$

式中,n 表示研究区域内专性林鸟的总物种数. 该公式表示每个像元内不同林鸟物种适宜生境的重叠数量,即该地理位置潜在的林鸟物种丰富度,可用于直观识别林鸟物种丰富度较高的热点区域.

1.3.3　双变量空间自相关

为了深入探究四川省森林扰动强度与专性林鸟物种丰富度之间的潜在相互作用,本研究引入双变量空间自相关分析以有效探析两个地理变量的空间分布特征与相互作用关系.

首先,双变量全局莫兰指数能够清晰地辨析四川省森林扰动与林鸟丰富度的整体空间依赖性及聚集态势. 其次,双变量局部莫兰指数可以精确刻画上述两要素在特定地理网格单元内的相互影响和局部空间聚集特性,以此评估其地域异质性表现. 双变量全局莫兰指数和双变量局部莫兰指数的计算公式为:

$$I_{eu}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}z_i^e z_j^u}{(n-1)\sum_{i=1}^{n}\sum_{j\neq i}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}}, \tag{5}$$

$$I_{eu}^{i}=z_i^e\sum_{j=1}^{n}\boldsymbol{W}_{ij}z_j^u. \tag{6}$$

式中,I_{eu}为双变量全局莫兰指数;I_{eu}^{i}为双变量局部莫兰指数;n 为要素总数;$\boldsymbol{W}_{ij}$是一个 $n\times n$ 空间权重矩阵,以县级行政单元为分析单元,采用一阶 Queen 邻接规则构建空间权重矩阵[34],用于衡量第 i 行和第 j 列要素之间的空间相关性. 为了避免小样本偏差,本研究剔除了森林总面积低于 100 km^2 的单元(占总森林面积 0.64%),以确保结果的稳健性与生态学意义. 本研究使用 GeoDa 1.22 软件进行双变量全局莫兰指数和双变量局部莫兰指数的计算.

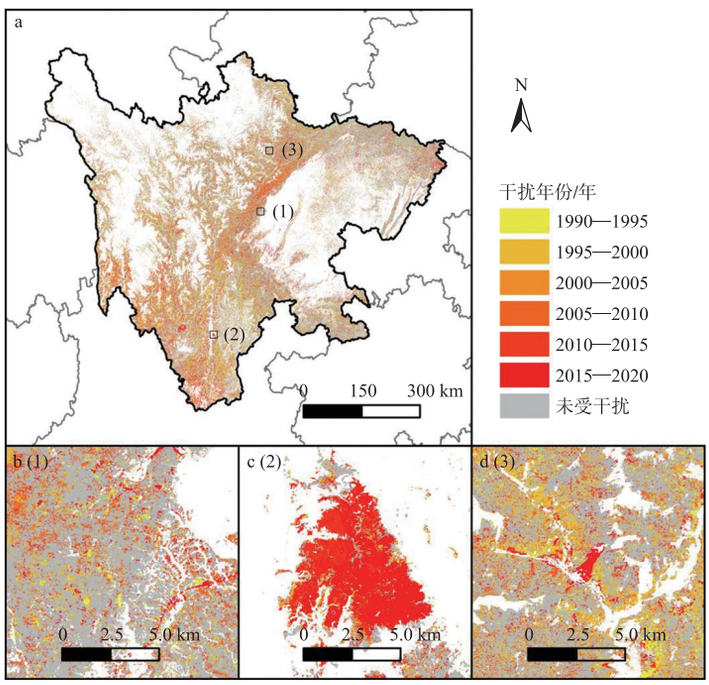
2　结果与分析

2.1　1990—2020 年森林扰动的时空演变特征

如图 1(a)显示,近 30 年来四川省全省森林受扰动情况存在较显著的空间异质性. 总体而言,未受扰动的森林(灰色区域)主要集中在川西高原腹地以及盆周高海拔深山区域,这些地区的人类活动强度较小. 相比之下,发生过显著扰动的森林(暖色调区域)则呈现出一定的空间集聚特征,主要沿四川盆地西缘、南缘的低山丘陵地带以及西南部的横断山区分布.

从时间演变维度看,扰动年份的色带渐变(黄—橙—红)直观反映了驱动力的历史变迁. 图中的黄色至浅橙色斑块(代表 1990—2005 年的早期扰动)多呈广泛且细碎的散布状态,这可能与 20 世纪末期天然林保护工程全面实施前的传统林业采伐及农林交错带的开荒活动有关. 而深橙色至红色斑块(代表 2010—2020 年的近期扰动)则在局部呈现出高度集中的态势,表明在严格禁伐政策背景下,森林扰动的主导因素已逐渐向局部人类活动、森林火灾、地质灾害转移.

本研究选取了 3 个典型区域进行局部特征分析. (1)都江堰市西南方青城山周边区域(图 1(b))地处向川西高原过渡的低山地带,紧邻人口稠密的成都平原. 图谱显示出各时间段交织的细碎斑块,森林扰动呈现典型的高频率、高度破碎化特征. 这反映了旅游开发、基础设施建设等长期、持续的人类活动对盆周边缘森林生境造成的渐进式蚕食与切割. (2)凉山州西昌市泸山区域(图 1(c))出现了极为醒目的大面积、连续分布的鲜红色斑块,推断为 2020 年发生的“3·30 西昌森林火灾”所致. 该地区干湿季分明,在全球气候变化背景下极



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图边界无修改.

图 1　1990—2020 年四川省森林扰动分布

Fig. 1　Spatiotemporal distribution of forest disturbances in Sichuan Province,1990-2020

端高温干旱频发. 近年来该区域发生特大森林火灾事件明显变多,火灾已成为威胁四川森林生态安全的重要扰动源. (3)茂县叠溪镇新磨村周边区域(图 1(d))可以观察到 2017 年滑坡留下的集中红色扰动印记,该案例体现了滑坡、泥石流等极端地质灾害可以在极短时间内造成局部森林植被的毁灭性丧失.

如图 2 所示,四川省各地级市(州)的森林扰动情况均在较大的空间分异. 从绝对面积来看,受扰动森林主要集中于甘孜州、凉山州和阿坝州,三地受扰动面积合计占全省受扰动面积的 59.02%. 在排除行政区划与森林基数差异后,当以受扰动森林频率衡量时,攀枝花市和德阳市的森林受扰动程度最为剧烈,受扰动森林面积占总森林面积比分别高达 53.35%和 50.35%. 在扰动时间特征方面,各市州的中位扰动年份同样呈现出明显的时序差异. 遂宁、南充、达州、巴中等地的中位扰动年份相对较早,而攀枝花、自贡、眉山等地的中位扰动年份则显著偏晚.

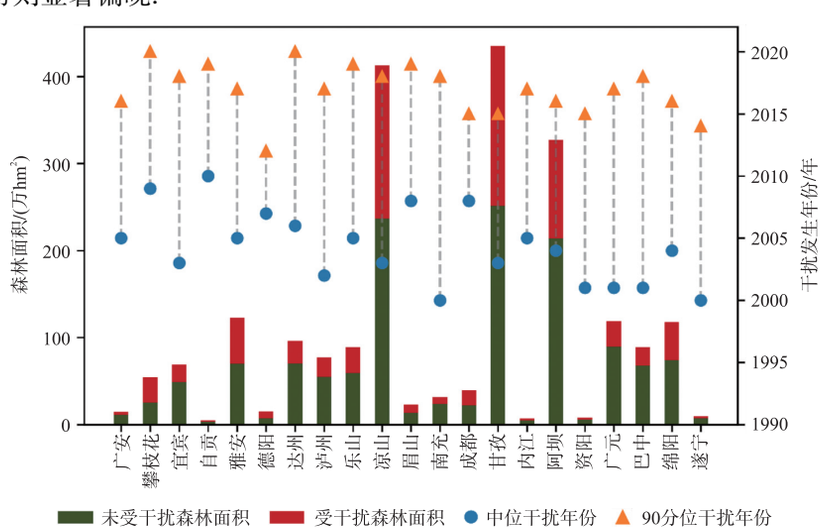


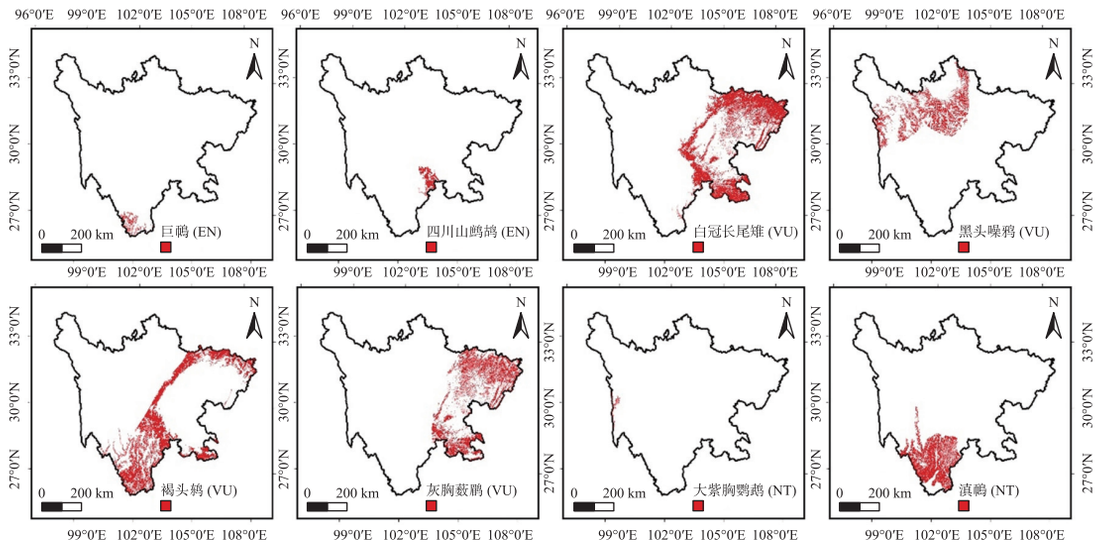
图 2　四川省各地级市(州)森林扰动情况

Fig. 2　Forest disturbance characteristics across various prefectures in Sichuan Province

2.2　林鸟物种丰富度的空间格局

本研究通过构建基于 ArcPy 的空间分析自动化工作流,根据原始多边形 EOO 数据,提取出四川省林

鸟的 AOH 共计 141 种. 根据 IUCN 濒危物种红色名录的受威胁等级分类如下:濒危(EN)物种 2 种,为巨鸸与四川山鹧鸪;易危(VU)物种 4 种,为白冠长尾雉、黑头噪鸦、褐头鸫与灰胸薮鹛;近危(NT)物种 2 种,为滇鸸和大紫胸鹦鹉;其余 133 种皆为无危(LC)物种. 8 种受威胁的物种 AOH 如图 3 所示.

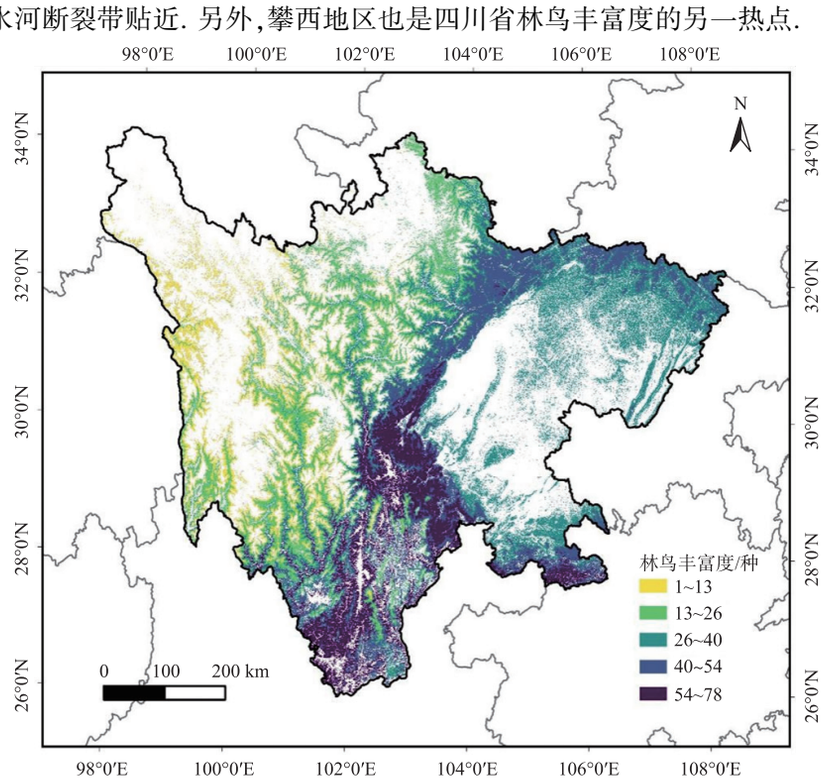


注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图边界无修改.

图 3　8 种受威胁的物种 AOH 分布

Fig. 3　AOH distribution of 8 threatened species

通过叠加所有物种的 AOH 栅格,可以得到四川省全省林鸟总体物种丰富度,如图 4 所示. 四川省林鸟丰富度呈现出显著的空间异质性,总体上表现为“中西部高、东部低”的分布特征. 林鸟丰富度的高值区与王灿等[35]基于实地调查位点揭示的保护鸟类分布热点以及梁敏仪等[36]记录的四川省猛禽迁徙路线在空间上有一定的相关性,林鸟主要聚集于若尔盖湿地-岷山、邛崃山、大雪山一线,与四川省的地形分界线龙门山断裂带和鲜水河断裂带贴近. 另外,攀西地区也是四川省林鸟丰富度的另一热点.



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图边界无修改.

图 4　四川省专性林鸟的物种丰富度分布

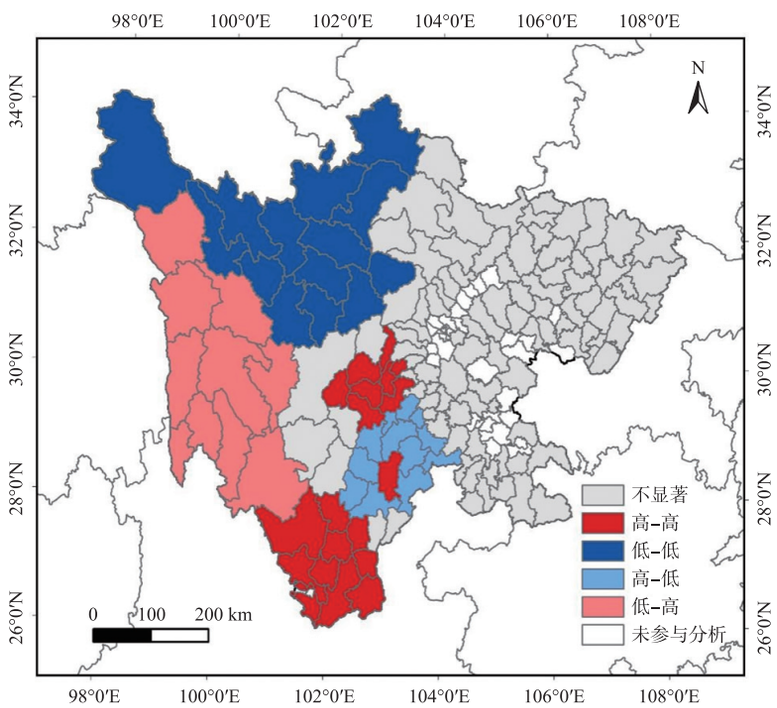
Fig. 4　Spatial distribution of species richness for forest-specialist birds in Sichuan Province

3 森林扰动和林鸟物种丰富度的相关性分析

3.1 双变量空间自相关结果

利用全局自相关分析林鸟物种丰富度(每 km^2 森林的平均物种丰富度)与森林扰动(受扰动森林占总森林比例)之间的关系. 结果显示,双变量全局莫兰指数为 0.124(P=0.001,Z=3.109 8),表明四川省森林扰动强度与林鸟物种丰富度之间存在较为显著的空间正相关,

仅依靠全局自相关不足以对区域进行分析,故进一步利用双变量局部空间自相关探讨二者的空间耦合关系,并提取置信度水平大于 95%的区域进行可视化(图 5). 结果表明,研究区内森林扰动与林鸟丰富度的空间集聚模式可分为 4 类,反映了不同地理单元上森林扰动与鸟类物种丰富度的异质性特征.



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号 GS(2024)0650 号的标准地图制作,底图边界无修改.

图 5 森林扰动与林鸟物种丰富度双变量 LISA 聚类图

Fig. 5 Bivariate LISA cluster map of forest disturbance and species richness

3.2 双变量空间耦合分析

从图 5 可知,四川省森林扰动与林鸟丰富度的空间分布呈现出较为明显的地域分异. “高-高”集聚区主要分布于四川西南部的凉山彝族自治州大部与四川盆地向川西高原过渡的西南边缘. 该区域单位面积森林承载了较高的林鸟物种丰富度,同时森林受扰动比例也处于全省相对高位. 这表明该区域高保护价值的鸟类栖息地正面临高强度的外部扰动,为生物多样性保护与人类活动矛盾较为突出的区域. “低-低”集聚区集中分布于川西北高原的阿坝州大部及甘孜州北部. 该区域受高海拔与高寒气候影响,森林群落结构相对单一,林鸟物种丰富度较低;同时由于其森林火灾、病虫害的可能性与人类活动水平均较低,大规模森林扰动较少,二者维持在双低的稳定水平. “高-低”集聚区主要分布于甘孜州中南部以及凉山州木里县. 该区域地处青藏高原东南缘,气候干燥且处于针叶林带,火灾易发性较高. 该区域粗放的经济发展方式导致人类活动对生态环境的破坏较严重. 长期的森林火灾与人为的局部破坏导致森林经历了高强度的扰动. 但受限于高海拔和高寒气候,其本身林鸟多样性基数相对偏低,因此在相对较低的物种丰富度的情况下扰动较高. “低-高”集聚区主要位于凉山州东北部及乐山市西南部,地处大小凉山腹地. 值得注意的是,该区域在具备较高的林鸟物种丰富度的同时,森林扰动较低,较好地维持了原始森林生态系统的完整性. 这在很大程度上得益于区域内大风顶、麻咪泽等自然保护地的有效覆盖与保护. 生态保护政策成功限制了大规模的人为扰动,使其成为四川省重要的林鸟生境保留地. 特别的,美姑县呈现为被“低-高”集聚区包围的“高-高”孤岛,揭示其遭遇了局部高强度的干扰. 整个大小凉山腹地依托自然保护地体系,整体

维持了较高的生物多样性. 周边县域有效控制了人为破坏,形成了连片的优质生境(低扰动-高丰富度);而美姑县虽同具极高的生态保护价值,森林扰动的情况却相对较高,表明当地高生态保护价值的森林栖息地正面临一定的生境破碎化风险,亟需加强管控,遏制森林扰动的进一步加剧.

3.3 针对性保护管理建议

基于上述空间相关性分析结果,本研究针对不同区域特征提出差异化的森林保护与管理建议. 针对“高-高”集聚区,建议将其列为优先重点管控区域,在生物多样性较高的区域应限制高强度的人为开发,并严格禁止商业性采伐活动;在城镇探索建立自然保护小区以维持关键生境斑块的连通性,并进一步完善林区火灾防范与生态补偿机制. 对于“低-高”集聚区,应以保护为主导,防范基础设施建设与旅游开发可能引发的生境破碎化,并建立长效生态监测网络以遏制人类活动强度. 对于“高-低”集聚区,管理重心应侧重于受损森林生态系统的结构恢复与功能提升,提升栖息地质量. 对于“低-低”集聚区,保护工作应充分顺应自然规律,维持现有生态基线,开展适宜的人工造林以提供更高效的碳汇[37],同时避免过度干预.

4 结论

森林在维系陆地生态安全与生物多样性方面发挥着不可替代的关键作用,明确森林扰动对栖息地的影响对区域生态保护至关重要. 本文基于 1990—2020 年 Landsat 长时序影像与物种分布多边形数据,利用 LandTrendr 算法和 AOH 提取方法,结合双变量空间自相关模型,探究了四川省森林扰动时空演变格局及其与专性林鸟物种丰富度的空间耦合关系,得到以下结论:

(1)近 30 年来,四川省森林扰动的时空演变呈现显著的分异特征. 在空间尺度上,未受扰动的森林主要集中于川西高原腹地及盆周高海拔区域,而显著扰动区多沿四川盆地西缘、南缘低山丘陵带及西南横断山区集聚. 在时间尺度上,随着严格禁伐政策的实施,森林扰动驱动力发生转移,由早期广泛且细碎的人类活动,逐渐演变为近期因森林火灾、地质灾害等导致的高度局部集中的扰动事件.

(2)四川省专性林鸟物种丰富度存在较强的空间异质性,总体表现出“中西部高、东部低”的分布格局. 全省 141 种专性林鸟的潜在栖息地高度聚集于若尔盖湿地-岷山、邛崃山、大雪山一线及攀西地区. 这一分布趋势与四川省龙门山、鲜水河断裂带等地貌分界线及猛禽迁徙路线吻合.

(3)四川省森林扰动强度与林鸟物种丰富度在空间上呈现正向空间关联(全局莫兰指数为 0.124). 局部空间集聚模式揭示了 4 类典型地域分异特征:“高-高”集聚区主要分布于四川盆地西南缘及凉山部分区域,表现为高保护价值林鸟生境与高强度森林扰动并存的生态冲突区;“低-低”集聚区主要位于川西北高原及甘孜北部,森林扰动程度和林鸟丰富度均较低,生态系统整体维持相对稳定状态;"高-低"集聚区集中于甘孜州中南部及木里县等区域,表现为森林扰动较高但林鸟丰富度相对较低,反映出高寒干旱环境与扰动压力共同作用下的生态脆弱性;"低-高"集聚区主要分布于大小凉山腹地等区域,为低扰动、高丰富度的优质林鸟核心生境.

[参考文献](References)

[1] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, et al. Forest management in Southern China generates short term extensive carbon sequestration[J]. Nature Communications, 2020, 11: 129.

[2] Gamfeldt L, Snäll T, Bagchi R, et al. Higher levels of multiple ecosystem services are found in forests with more tree species [J]. Nature Communications, 2013, 4: 1340.

[3] Paquette A, Messier C. The effect of biodiversity on tree productivity: From temperate to boreal forests[J]. Global Ecology and Biogeography, 2011, 20(1): 170-180.

[4] 陈利顶,傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义[J]. 生态学报,2000(4):581-586.

[5] Wiegand T, Wang X G, Fischer S M, et al. Latitudinal scaling of aggregation with abundance and coexistence in forests[J]. Nature, 2025, 640: 967-973.

[6] Seidl R, Thom D, Kautz M, et al. Forest disturbances under climate change[J]. Nature Climate Change, 2017, 7: 395-402.

[7] Sommerfeld A, Senf C, Buma B, et al. Patterns and drivers of recent disturbances across the temperate forest biome[J]. Nature Communications, 2018, 9: 4355.

[8] 朱教君,刘足根. 森林干扰生态研究[J]. 应用生态学报,2004(10):1703-1710.

[9] Newbold T,Hudson L N,Arnell A P,et al. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment[J]. Science,2016,353(6296):288-291.
[10] Phillips H R P,Newbold T,Purvis A. Land-use effects on local biodiversity in tropical forests vary between continents[J]. Biodiversity and Conservation,2017,26:2251-2270.
[11] Wang B,Wen Z X,Que P J,et al. Biodiversity benefits of China's 20-year efforts in forest restoration[J]. Nature Communications,2025,16:10724.
[12] Lees A C,Haskell L,Allinson T,et al. State of the World's Birds[J]. Annual Review of Environment and Resources,2022,47:231-260.
[13] Myers N,Mittermeier R A,Mittermeier C G,et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities[J]. Nature,2000,403:853-858.
[14] Banskota A,Kayastha N,Falkowski M J,et al. Forest monitoring using landsat time series data:A review[JL]. Canadian Journal of Remote Sensing,2014,40(5):362-384.
[15] Gorelick N,Hancher M,Dixon M,et al. Google Earth Engine:Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment,2017,202:18-27.
[16] Velastegui-Montoya A,Montalván-Burbano N,Carrión-Mero P,et al. Google Earth Engine:A global analysis and future trends[J]. Remote Sensing,2023,15(14):3675.
[17] 尹雄,陈帮乾,古晓威,等. 基于GEE平台LandTrendr算法的海南岛森林扰动快速监测方法及分析[J]. 地球信息科学学报,2023,25(10):2093-2106.
[18] 于森,贾明明,陈高,等. 基于LandTrendr算法海南东寨港红树林扰动研究[J]. 自然资源遥感,2023,35(2):42-49.
[19] Yang Y J,Erskine P D,Lechner A M,et al. Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm[J]. Journal of Cleaner Production,2018,178:353-362.
[20] 王晨,庞勇,袁智文,等. 基于LandTrendr算法和森林资源清查数据的海南岛森林扰动监测与分析[J]. 生态学报,2025,45(16):8054-8070.
[21] Cao P L,Zang Z,Zhang M,et al. Using LandTrendr to analyze forest disturbance,recovery,and attribution in Hunan Province from 2001 to 2024[J]. Ecological Indicators,2025,176:113712.
[22] Brooks T M,Pimm S L,Akçakaya H R,et al. Measuring terrestrial area of habitat(AOH)and its utility for the IUCN red list[J]. Trends in Ecology & Evolution,2019,34(11):977-986.
[23] Lumbierres M,Dahal P R,Soria C D,et al. Area of habitat maps for the world's terrestrial birds and mammals[J]. Scientific Data,2022,9:749.
[24] Warudkar A,Goyal N,Kher V,et al. Using the area of habitat to assess the extent of protection of India's birds[J]. Biotropica,2022,54(6):1466-1479.
[25] Suárez-Castro A F,Acevedo-Charry O,Romero Jiménez L H,et al. Integrating multiple data sources to develop range and area of habitat maps tailored for local contexts[J]. Diversity and Distributions,2024,30(10):e13917.
[26] 四川省地方志编纂委员会. 四川省志·地理志(上册)[M]. 成都:成都地图出版社,1996.
[27] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014-2018)[M]. 北京:中国林业出版社,2019.
[28] Schneibel A,Stellmes M,Röder A,et al. Assessment of spatio-temporal changes of smallholder cultivation patterns in the Angolan Miombo belt using segmentation of Landsat time series[J]. Remote Sensing of Environment,2017,195:118-129.
[29] Guo J,Gong P. The potential of spectral indices in detecting various stages of afforestation over the Loess Plateau Region of China[J]. Remote Sensing,2018,10(9):1492.
[30] BirdLife International,IUCN. The IUCN red list of threatened species:Species distribution maps(spatial data)[DS/OL]. Version 2025-1[2026-02-13]. https://www.iucnredlist.org.
[31] Yang J,Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data,2021,13:3907-3925.
[32] Kennedy R E,Yang Z Q,Cohen W B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series:1. LandTrendr—Temporal segmentation algorithms[J]. Remote Sensing of Environment,2010,114(12):2897-2910.
[33] Kennedy R E,Yang Z Q,Gorelick N,et al. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine[J]. Remote Sensing,2018,10(5):691.
[34] Cliff A D,Ord J K. Spatial Autocorrelation[M]. London:Pion,1973.
[35] 王灿,胡烨,李明明,等. 四川省国家重点保护野生鸟类的空间分布格局[J]. 四川动物,2022,41(6):601-610.
[36] 梁敏仪,冉江洪,梁思琪,等. 四川省猛禽多样性及迁徙路线[J]. 生物多样性,2016,24(12):1408-1413.
[37] 邓诗宇,张明芳,侯怡萍,等. 气候变化下川西地区森林碳储量对森林管理措施和干扰的长期响应[J]. 生态学报,2025,45(1):210-226.

[责任编辑:严海琳]