

高原鼠兔干扰与高寒草甸退化的时空耦合关系

赵健赞^{1,2}, 姜传礼¹, 李国荣^{1,2}, 高崇越¹, 王志超¹, 温兰冲¹

(1.青海大学 地质工程系, 青海 西宁 810016; 2.青藏高原北缘新生代资源环境重点实验室, 青海 西宁 810016)

摘要: [目的] 高原鼠兔是青藏高原高寒草甸生态系统的关键物种。分析鼠兔活动与草甸退化之间的耦合关系, 为进一步完善高原鼠兔干扰强度观测体系, 提供更加全面、科学的鼠兔活动调查数据。[方法] 本研究利用无人机对地观测与深度学习构建了一种鼠兔干扰强度观测与分级方法, 并利用景观指数和耦合度模型开展了时空变化分析。[结果] ① ResNet-101 残差网络模型提取鼠丘秃斑的精度可达 92.7%。2019 年研究区鼠兔干扰微度和轻度面积占总面积的 82.0%, 2021 年中度及以上干扰强度占 62.5%。2019—2021 年鼠兔干扰明显、显著和极度增强的面积占 43.0%。② 2019, 2021 年高寒草甸植被均以中度退化为重, 2019—2021 年中度退化转变为重度退化的面积占 30.2%, 植被覆盖度出现显著降低的面积占 7.7%。③ 研究区景观以单一方向变化为秃斑, 景观类型向更加聚集、规则、单一化的方向转变, 秃斑景观的优势度显著上升。④ 2019—2021 年研究区大部分区域的耦合度增加, 鼠兔干扰与高寒草甸间的相互作用增强。[结论] 研究区高原鼠兔干扰强度显著变大, 植被覆盖度降低, 景观逐步向秃斑类型转变, 高寒草甸在高原鼠兔干扰下退化趋势明显, 二者的耦合作用逐步增强, 有必要采取更加积极的防治、恢复措施。

关键词: 高原鼠兔; 干扰强度; 深度学习; 耦合关系; 黄河源

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)05-0212-08

中图分类号: S812.6

文献参数: 赵健赞, 姜传礼, 李国荣, 等. 高原鼠兔干扰与高寒草甸退化的时空耦合关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(5): 212-219. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.05.025; Zhao Jianyun, Jiang Chuanli, Li Guorong, et al. Spatiotemporal coupling relationship between plateau pika disturbance and alpine meadow degradation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(5): 212-219.

Spatiotemporal Coupling Relationship Between Plateau Pika Disturbance and Alpine Meadow Degradation

Zhao Jianyun^{1,2}, Jiang Chuanli¹, Li Guorong^{1,2}, Gao Chongyue¹, Wang Zhichao¹, Wen Lanchong¹

(1. Geological Engineering Department, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;

2. Key Lab of Cenozoic Resource & Environment in North Margin of the Tibetan Plateau, Xining, Qinghai 810016, China)

Abstract: [Objective] Plateau pika (*Ochotona curzoniae*) is a key species in the alpine meadow ecosystem of the Qinghai-Xizang Plateau. The coupling relationship between pika activity and meadow degradation was analyzed in order to further improve the observation system of plateau pika interference intensity and to provide more comprehensive and scientific investigation data of plateau pika activity. [Methods] An observation and grading system for alpine pika disturbance intensity (PDI) was constructed using observational data from an unmanned aerial vehicle (UAV) and deep learning methods. Spatial-temporal variation analysis was conducted using a landscape index and a coupling degree model to clarify the coupling relationship between pika and meadow degradation. [Results] ① The accuracy of the ResNet-101 model for extracting bald patches on pika mounds reached 92.7%. Slight and light pika disturbance areas accounted for 82.0% of the total area in 2019, and the moderate and high disturbance intensity areas accounted for 62.5% of the total area in 2021. The area with significantly increased PDI from 2019 to 2021 accounted for 43.0% of the total area. ② Alpine meadow vegetation was predominantly classified as moderately degraded in 2019 and 2021. From 2019 to

收稿日期: 2023-02-17

修回日期: 2023-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“多维立体观测下黄河源鼠兔干扰与高寒草甸退化的耦合关系研究”(42161068); 青海省科技厅项目“黄河源区极端气候变化对高寒草地生态系统的影响机制研究”(2021-ZJ-743)

第一作者: 赵健赞(1981—), 男(汉族), 甘肃省民乐县人, 博士, 副教授, 主要从事人工智能与资源环境评价研究。Email: zhaojianyun1981@163.com.

2021, 30.2% of the area shifted to moderately degraded to severely degraded, and 7.7% of the area experienced a significant decrease in vegetation cover. ③The landscape of the study area transformed to bald patches in a single direction, and the landscape type became more aggregated, regular, and homogenized. The dominance of bald patches in the landscape increased significantly. ④The coupling degree was increased in most regions increased from 2019 to 2021, and the interaction between plateau pika disturbance and alpine meadow degradation was enhanced from 2019 to 2021. [Conclusion] The intensity of plateau pika disturbance in the study area increased from 2019 to 2020, vegetation coverage decreased, and the landscape gradually transformed to bald patches. The alpine meadow degraded under plateau pika disturbance. The coupling effect between plateau pika disturbance and alpine meadow degradation has gradually increased, and it is therefore necessary to take more active prevention and restoration measures.

Keywords: alpine pika; disturbance intensity; deep learning; coupling relationship; source region of the Yellow River

黄河源区是黄河上游重要的产流区和水源涵养区,生态系统极其脆弱。自 20 世纪 70 年代开始,受全球气候变暖以及人类活动等因素的影响,先后出现了植被退化,土地沙漠化,生物多样性丧失,水土流失严重,持水能力衰减等问题^[1]。21 世纪初中国启动了三江源自然保护区生态保护与建设工程,一期工程已于 2016 年竣工验收,黄河源区生态有所好转但仍未达到预期效果^[2]。高寒草甸是黄河源分布最为广泛的植被类型,处于生物极限水平的水热条件使得高寒草甸生态系统极为敏感,退化态势一直没有得到显著遏制,部分地区还在扩展^[3-4]。高原鼠兔广泛分布于黄河源高寒草甸地区,鼠兔活动使得原本就复杂的高寒草甸退化过程变得更加复杂^[5],明确不同鼠兔干扰强度下高寒草甸退化特征与规律,定量分析鼠兔活动与草甸退化之间的时空耦合关系,是揭示高寒草地退化机制和实现科学恢复治理的关键问题之一,对黄河流域生态安全与高质量发展具有重要意义。

高原鼠兔一般选择植被高度较低、视野开阔、土质疏松的环境作为栖息地,食谱包括高寒草甸的大部分植物^[5];地下洞穴是高原鼠兔栖居、繁殖、规避捕食风险和应对恶劣天气等所依赖的基本设施,长度约为 5~15 m,每一洞穴洞口数约为 5~25 个^[6]。高寒草甸植被主要影响高原鼠兔的繁殖期长度与幼崽存活率,高原鼠兔主要通过采食、挖掘活动对高寒草甸产生影响^[7],在样方尺度的研究认为高原鼠兔的挖掘活动对牧草的危害要远远大于啃食,而在样地尺度的研究发现高原鼠兔挖掘形成的鼠丘仅占下垫面面积的 2%左右,对高寒草地植被产生的直接影响较小^[7-8]。高原鼠兔遗弃的洞道坍塌被认为是高寒草地秃斑化逐渐扩大和水土流失加剧的重要推动力,有研究指出高寒草甸秃斑的面积、生物量与高原鼠兔密度存在显著的正相关关系,秃斑块易引起土壤养分的流失,植被更加难以恢复,且秃斑化是样地尺度上草甸退化最

主要的因素^[9]。高原鼠兔的挖掘活动为种子萌发提供了适宜的条件,但采食活动也会带来可食牧草比例下降、毒杂草比例上升等问题^[10-11]。作为高寒草地生态系统的重要组成部分,高原鼠兔在植物群落结构和物种多样性方面的生物学作用,目前尚未有明确的结论^[12]。高原鼠兔活动与高寒草甸生态系统存在着密切而又复杂的关系,已经开展的工作大都是基于某一研究区域在样方、鼠洞等小尺度上,分析高原鼠兔洞口或密度与草地植被覆盖度、多样性以及土壤物理特性之间的关系。本研究利用无人机对地观测技术,在 2019,2021 年野外定位观测的基础上,通过深度学习和聚类分析构建一种高原鼠兔活动强度观测与分级方法,并利用空间统计方法分析鼠兔干扰强度与高寒草甸植被覆盖、景观格局的时空变化特征,进一步明确黄河源高原鼠兔与高寒草甸之间耦合协调关系。

1 研究区概况

研究区位于黄河源东部的青海省河南蒙古族自治县(100° 53' 28"—102° 15' 23" E, 34° 04' 00"—34° 54' 24" N)境内,平均海拔 3 600 m,属典型的浅切割高寒山区,高原大陆性亚寒带温湿气候特征明显,年均气温约为 1.04 °C。境内有天然草地约 6 533.3 km²,草地类型主要为高寒草甸,并以矮生嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*Kobresia capillifolia*)、小嵩草(*Kobresia pygmaea*)、扇穗茅(*Littledalea racemosa*)、早熟禾(*Poa annua*)、碱茅(*Puccinella distans*)等为主要建群种,是青藏高原东部著名的天然优质草场之一^[13]。河南县高原鼠兔活动频繁,近 10 a 影响了境内大部分的高寒草甸,其活动集中于坡度小于 20°,地势相对平坦的区域。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

分别于 2019,2021 年 8 月底,利用大疆 Phantom

4 RTK, Multispectral 无人机对研究区进行摄影测量,设置飞行高度为 25 m,航向重叠与旁向重叠为 80%,云台相机倾角 90 度。利用 Pix 4D 软件对拍摄获得的照片进行拼接、制作,对 Phantom4 Multispectral 获得的多光谱数据进行辐射校正,并利用 SIFT 算法对所有影像数据进行配准^[14],配准精度在 0.5 个像元内,最终获得研究区两期 390 m×390 m,空间分辨率优于 1 cm 的数字正射影像(digital orthophoto map, DOM)数据和归一化植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index)数据。

2.2 研究方法

2.2.1 基于深度卷积神经网络的鼠兔干扰信息提取

选用 Deeplab V3 深度卷积神经网络提取研究区高原鼠兔活动形成的鼠丘秃斑,该方法运用 ResNet-101 残差网络学习、空洞卷积运算和多尺度空间金字塔池化模块实现信息的提取^[15]。空洞卷积实现卷积层在不降低空间维度,不增加计算参数的情况下增大卷积的感受野,解决无人机影像由于覆盖范围大引起的计算效率等问题。金字塔池化模块使用 1 个 1×1 的卷积和 3 个 3×3 的空洞卷积并行计算,通过增加不同尺度范围内信息的区分度以实现多尺度目标物体的提取^[16]。

利用目视解译法在研究区两期数据上提取 1 317 个鼠丘秃斑样本,以大小 128×128,步长 64,旋转 180°为基本参数进行切片和增强,形成 12 358 个影像标签数据集。选用 NVIDIA Quadro RTX8 000 显卡,Intel Xeon Gold 6 226 R 处理器的计算终端,在 ArcGIS Pro 2.8 平台上利用 Deeplab V3 分别进行模型训练、检验与鼠兔干扰信息提取。在训练过程中将标签数据集按 8:2 分为训练样本和检验样本,并设置训练数据的批量大小为 256,学习率为 0.000 01,训练次数为 800 次,鼠丘秃斑提取精度稳定在 0.90 以上停止训练。用训练好的模型对研究区两期数据进行分类,利用人机交互方式对分类结果进行检查处理,删除背景信息后分别获得研究区 2019,2021 年的鼠丘秃斑分布数据。

2.2.2 鼠兔干扰强度指数计算与分级 在研究区建立 30 m×30 m 的格网,统计 2019,2021 年 169 个格网内的鼠丘秃斑数量(pika number, PN)、面积(pika area, PA)、周长(pika perimeter, PP)因子,对各因子进行归一化处理利用主成分分析方法获取权重值,建立研究区高原鼠兔干扰指数(pika disturbance index, PDI)模型:

$$PDI = f(PN, PA, PP, wet) \quad (1)$$

式中: wet 为各因子的权重; PN, PA 和 PP 的单位分别为个、m² 和 m。该模型利用主成分变换集成 PN, PA, PP 因子,根据各因子对主成分的贡献度进行加权求和确定权重^[17]。

对获得的 PDI 利用 K-means 法分别聚类为微度、轻度、中度、重度、极度干扰 5 种鼠兔干扰强度等级, K-means 聚类法以距离作为 PDI 数据对象间相似性度量的标准,从数据集中随机选取初始聚类中心,计算剩余数据与聚类中心间的距离,找出离目标数据最近的聚类中心,并将数据对象分配到聚类中心所对应的类型中;然后将各个类型的数据均值作为新的中心,进行下一次迭代计算,直到聚类中心不再变化为止^[18],计算公式如下:

$$d(X, G_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (X_j - G_{ij})^2} \quad (2)$$

式中: X 为聚类数据对象; G_i 为第 i 个聚类中心; m 为数据对象的维度; X_j, G_{ij} 为 X, G_i 的第 j 个属性值。

2.2.3 植被覆盖度与景观格局指数 基于研究区两期 NDVI 数据,利用像元二分模型计算植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)^[19]。依据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190-2007),并结合研究区实际植被覆盖情况,以 0~0.30, 0.30~0.60, 0.60~0.75, 0.75~0.90, 0.90~1.00 为阈值,将计算获得的两期 FVC 数据分为重度退化、中度退化、轻度退化、微度退化和未退化 5 个等级。

根据研究区鼠兔与植被分布的实际情况,在类型尺度上选择斑块密度(PD)、景观形状指数(LSI)、和集聚指数(AD),在景观尺度上增选分离度(DIVISION)和香农多样性(SHDI)来刻画研究区景观斑块破碎化、异质性和相关性等特征^[20]。PD 表征景观格局的破碎化程度,值越大表示破碎度越高; LSI 值越大,表示斑块的形状越复杂; AI 值越大,同种景观斑块越聚集; DIVISION 越高表示景观离散程度越高, SHDI 值越大表示异质斑块越多。

2.2.4 时空变化与耦合度分析方法 利用转移矩阵描述研究区鼠兔干扰强度与植被变化特征与转换方向,依据鼠兔干扰和植被覆盖分级结果计算变化系数^[19],表征其变化的显著性特征。变化系数为-2 代表显著降低, -1 代表降低趋势, 0 代表无变化, 1 代表增加趋势, 2 代表显著增加趋势。耦合度是反映鼠兔与高寒草甸植被协同作用的度量指标,构建鼠兔干扰-一植被系统耦合度模型如下^[21]:

$$C_i = \sqrt{\frac{PDI_i \times FVC_i}{(PDI_i + FVC_i)^2}} \quad (3)$$

式中: C_i 为研究区第 i 格网的耦合度; PDI_i 为第 i 格网的鼠兔干扰强度; FVC_i 为第 i 格网的植被覆盖度。 C_i 趋于 1 时,鼠兔干扰与高寒草甸植被之间呈良性耦合状态; C_i 值趋于 0 时,两者之间呈无关状态。

3 结果与分析

3.1 PDI 模型构建与鼠兔干扰强度变化

基于建立的鼠丘秃斑切片数据集,通过深度卷积神经网络训练,秃斑提取精度达到 0.927,将 2019 年、2021 年研究区 DOM 数据输入训练好的网络,获得鼠丘秃斑见图 1。

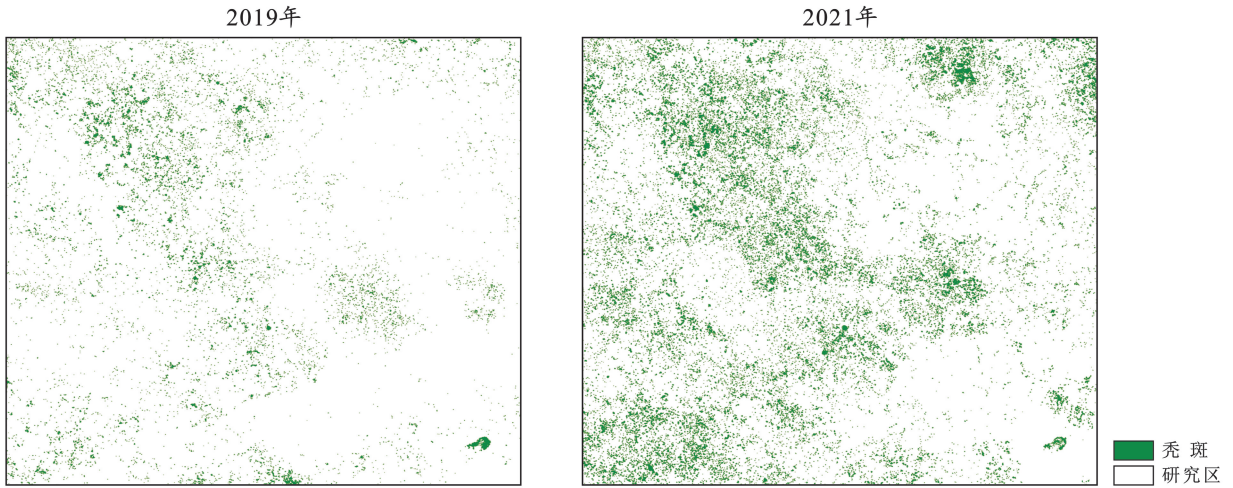


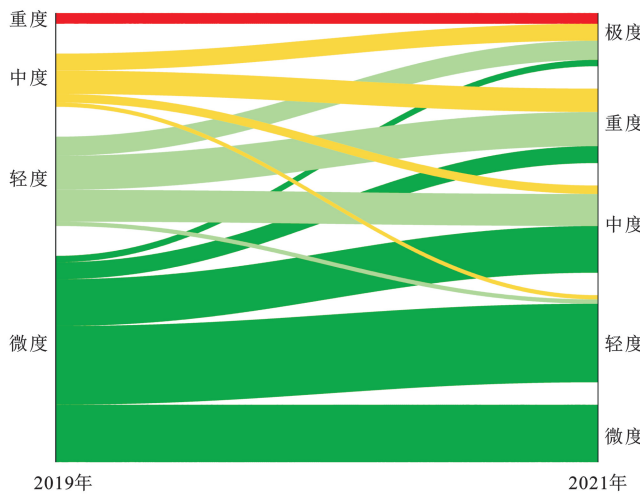
图 1 2019 年,2021 年研究区鼠丘秃斑空间分布

Fig.1 Spatial distribution of mound bald spots in study area in 2019 and 2021

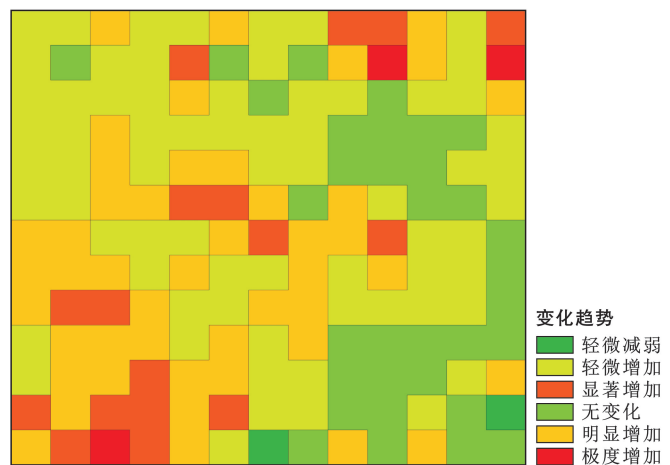
由图 1 可知,研究区 2019—2021 年鼠丘秃斑的数量和面积均有增加,进一步获取 2019,2021 年研究区 30 m×30 m 格网内的 PN,PA,PP 值,依据公式(1)构建研究区 PDI 模型如下:

$$PDI = 0.329 \times PN + 0.332 \times PA + 0.339 \times PP \quad (4)$$

利用公式(2)计算获得各聚类中心与特征值,进而计算获得研究区 2019—2021 年鼠兔干扰强度转移矩阵和时空变化分布(图 2)。



a 干扰强度转移矩阵



b 干扰强度时空变化

图 2 2019—2021 年研究区鼠兔干扰强度转移矩阵与时空变化分布

Fig.2 The transfer matrix and spatiotemporal distribution of pika interference intensity in study area from 2019 to 2021

2019 年研究区鼠兔干扰强度以微度和轻度为主,约占总面积的 82.0%;2021 年中度及以上干扰强度占 62.5%,鼠兔干扰存在显著增强的趋势。2019—2021 年研究区鼠兔干扰轻微增强的区域占总面积的

44.3%,明显、显著和极度增强的面积占 43.0%。研究区西南大部分地区鼠丘干扰强度存在增强趋势,且分布趋于集中,东南大部分地区鼠丘干扰强度未发生显著变化,约占总面积的 21.5%。

3.2 植被覆盖与景观格局时空变化

基于研究区两期 NDVI 数据,反演植被覆盖度

FVC 并进行分级,获得 2019—2021 年植被覆盖转移矩阵和时空变化分布(图 3)。

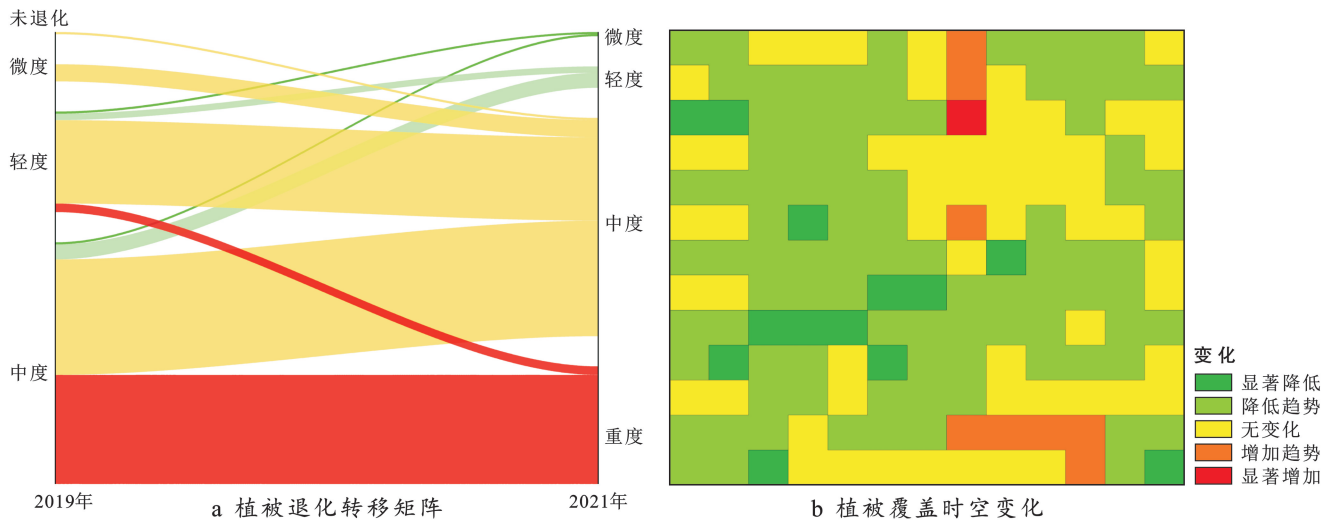


图 3 2019—2021 年研究区植被覆盖时空变化分布

Fig.3 Spatial-temporal distribution of vegetation cover in study area from 2019 to 2021

研究区 2019,2021 年高寒草甸植被均以中度退化为重,而在 2019—2021 年期间,中度退化转移为重度退化的面积占 30.2%,轻度退化转移为重度退化的面积占 2.3%,微、轻度退化转移为中度退化的面积占 27.8%。研究区大部分地区的植被覆盖存在降低趋势,其中显著降低的区域占 7.7%,仅有 5.3%的区域有增加趋势。因此,研究区高寒草甸植被存在明显的退化。依据研究区植被覆盖度退化分级与秃斑分布数据,计算类型尺度和景观尺度上对应的 PD,LSI, AI 和 DIVISION, SHDI 指数,结果如表 1 和表 2 所示。

2019—2021 年,类型尺度上的 PD,LSI 指数,除了秃斑类型出现增大外,其余均减少,说明研究区斑块以单一方向变化为秃斑,其余类型均出现退化,且秃斑类型的边缘长度增加,变得更加不规则,而其余景观边缘长度减少,且更加规则; AI 指数均增加,说明各类型间的连通性更好,类型景观更加聚集;景观尺度上 PD,LSI 减少,说明整体斑块密度和形状指数减少,景观类型向更加聚集、规则的方向变化; DIVISION 减少,表明研究区景观逐步单一化; SHDI 增大,说明秃斑和各覆盖类型在景观中呈均衡化趋势分布,中高覆盖类型的优势度在降低,秃斑类型的优势度在升高。

3.3 鼠兔干扰强度与植被退化的耦合关系

基于 2019,2021 年研究区 FVC 与 PDI 数据,利用公式(3)计算获得鼠兔活动与草甸变化的耦合度 C 值(图 4)。

表 1 研究区类型尺度上的景观指数统计结果

Table 1 Statistical results of landscape index on type scale of area study

年份	类型	斑块密度/ 10^6	景观形状指数	聚集指数
2019	未退化	1.24	511.42	82.68
	微度退化	2.41	880.88	87.73
	轻度退化	2.84	939.28	84.36
	中度退化	1.93	576.88	61.47
	重度退化	0.22	184.26	49.14
	秃斑	0.11	141.08	78.95
2021	未退化	0.82	441.44	90.23
	微度退化	0.75	444.96	94.17
	轻度退化	1.00	434.44	89.74
	中度退化	0.18	172.08	80.25
	重度退化	0.08	36.75	65.00
	秃斑	0.26	210.57	84.91
2019—2021	未退化	-0.42	-69.98	7.55
	微度退化	-1.65	-435.92	6.44
	轻度退化	-1.84	-504.84	5.38
	中度退化	-1.75	-404.80	18.78
	重度退化	-0.14	-147.51	15.86
	秃斑	0.15	69.49	5.96

表 2 研究区景观尺度上的指数统计结果

Table 2 Statistical results of index on landscape scale in study area

年份	斑块密度/ 10^6	景观形状指数	分离度	香农多样性
2019	8.75	728.63	0.87	1.04
2021	3.03	385.68	0.71	1.06
2019—2021	-5.72	-342.94	-0.17	0.02

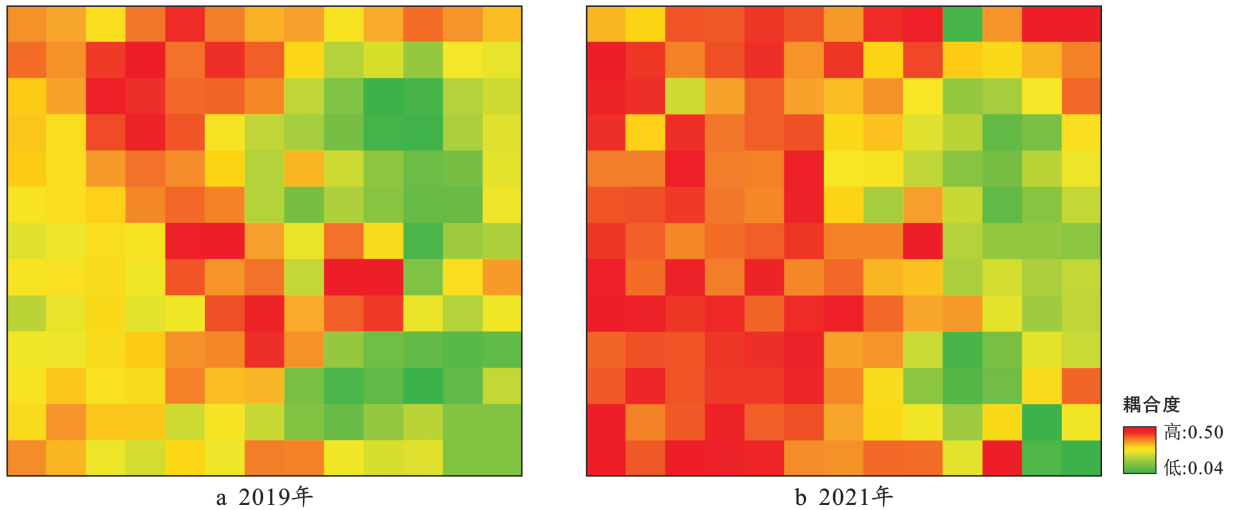


图 4 研究区鼠兔活动与草甸变化的耦合度

Fig.4 Coupling degree between pika activity and meadow change in study area

耦合度大部分区域呈现增加趋势,表明 2019—2021 年研究区鼠兔活动与草甸间的关系由无关变为相关,鼠兔干扰逐步开始影响草甸生态系统,且二者的相互影响作用增强。

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 高原鼠兔活动强度的观测。在国内外学者对高原鼠兔活动适宜环境、空间分布,以及与生物量、植物群落等关系的研究基础上^[22],本研究基于无人机对地观测技术构建高原鼠兔干扰强度指数,利用连续定位观测获得的植被、景观等多尺度因子,从鼠兔与高寒生态系统协调发展的角度,综合应用了深度学习、聚类分析等方法开展鼠兔活动与高寒草甸退化的耦合关系研究。表征高原鼠兔活动强度的因子一般包括鼠兔密度、鼠兔洞口密度、鼠丘密度、鼠洞总面积等^[23],鼠兔的挖掘活动在地表形成鼠丘,新鼠丘表面无物理结皮和植物生长,而旧鼠丘表面会逐步形成结皮,且有少量植物生长,并最终演替为高度与周围草甸无显著差异的杂草斑^[24]。随着鼠兔活动强度的增加,植被盖度、植被高度、可食牧草比例和地上生物量会持续减少,秃斑面积、杂草斑面积、毒杂草比例会持续增加^[25-26],也即是鼠兔活动强度与鼠丘秃斑之间存在较强的线性关系。因此,本研究利用由新鼠丘和旧鼠丘组成的秃斑来构建鼠兔干扰强度指数,具有一定的合理性,且充分利用了现代低空无人机对地观测技术在数据采集和处理方面的优势,在观测效率、尺度和精度上比传统的鼠兔活动强度观测法有一定的改善。

(2) 鼠兔干扰与植被特征的时空变化。鼠兔活

动及其空间分布受区域植被、土壤、海拔、气候、放牧、光照等多种因素的影响^[22],植被生物量影响鼠兔繁殖期的长度与幼崽的存活率^[27];鼠兔栖居地的土壤湿度一般较小、土质较疏松、坡度平缓,其活动的区域土壤全钾含量较高,速效氮含量较低^[13];气温和降水又是影响高寒草地植被的两个主要因素^[8];放牧强度增加,植被高度和密度会相应的降低,形成高原鼠兔更加理想的栖息环境^[28];光照条件决定着植被的类型和植被的分布数量,光照条件越好,鼠兔密度分布越广^[29]。本研究区平均海拔 3 544.20 m,地势平坦,光照充足,放牧强度高,高原鼠兔具有扩展的有利条件,而研究结果也发现该地区鼠兔干扰存在增强、集中的趋势,与杜嘉星等^[30]在青海省河南蒙古族自治县境内发现的 2016—2017 年鼠洞密度变化趋势一致。这充分说明该地区高寒草甸处于退化阶段,应该采取积极的防治、恢复措施。

高原鼠兔在高寒草甸生态系统中具有双重作用,益与害的转化主要取决于鼠兔干扰强度的高低^[10],而植被覆盖度、多样性和生产力是植物群落结构与功能的主要特征,也是高寒草甸生态系统健康诊断的重要指标和主要依据^[1,31]。吴倩倩等^[32]在西藏拉萨市墨竹工卡县日多乡、当雄县、山南市浪卡子县等地的调查研究发现,高原鼠兔洞穴数与植被覆盖度间没有相关性,而其他大部分学者的研究表明,高原鼠兔干扰会显著降低高寒草甸植被覆盖度和高度,不同鼠洞密度与植被覆盖度满足一定的函数关系^[26,33]。本研究显示,随着鼠兔干扰强度的增加,植被从高覆盖逐步向低覆盖类型转化,植被覆盖度存在明显的降低趋势,与大部分学者的研究结果一致。在鼠兔活动对高寒草甸景观的影响方面,学者们研究发现,随着鼠洞

密度的增加,植物丰富度、多样性、均匀度等指数均呈先上升后下降的趋势,拐点为鼠兔有效洞口密度 12 个/625 m²,也即是适度的高原鼠兔活动可以增加高寒草甸物种多样性,而高强度的鼠兔干扰会降低物种多样性^[34]。本研究利用斑块密度、形状、集聚性、分离度和多样性等多个景观因子,对高寒草甸鼠兔干扰区的景观变化进行研究,发现研究区景观逐步向秃斑类型转移,各类型间的连通性更好,且更加聚集,秃斑和其他各景观类型逐步均衡化,秃斑类型的优势度上升,这可能与本研究所选用的 2 个时间节点有关。2019,2021 年研究区鼠兔干扰整体均处于高强度期,没有捕捉到多样性变化的拐点。

(3) 鼠兔活动与高寒草甸的相互作用。高原鼠兔与高寒草甸环境互相影响和制约,高原鼠兔与放牧作用相互交替,共同作用于高寒草甸生态系统^[35]。低密度的鼠兔活动对草甸植被产生积极效应,超强度的鼠兔活动会造成鼠丘秃斑比例不断增加,草甸植被竞争能力减弱,土壤营养成分降低,进而导致草地逐步退化和“黑土滩”的出现^[3,13,36]。另一方面,高寒草甸植被退化和土壤退化互为因果,随着植被覆盖度和生物量的降低,土壤逐渐失去了植被的保护,水土流失加剧,土壤物理性质发生改变,持水能力、含水量、营养逐渐降低^[13];土壤性质的改变使植物生态位分化,植物群落组成和优势种发生演替,覆盖度、生产力进一步下降,导致高寒草甸持续退化^[37-38]。因此,在高寒草甸演替过程中,植被和土壤之间相互制约和影响,退化是植被与土壤协同作用的结果。尽管本研究开展了高原鼠兔与高寒草甸耦合协调关系的研究,也发现了研究区鼠兔与草甸间出现了恶性循环的迹象,但并没有揭示出二者协调发展的量化指标,也没有明确鼠兔干扰、植被和土壤之间的时空耦合关系。下一步将在高寒草甸鼠兔干扰区开展大范围的低空无人机对地观测,明确在鼠丘秃斑为核心干扰指标下,高原鼠兔与高寒草甸植被、土壤之间的耦合协调关系。同时,本研究并没有实现鼠洞信息的精确提取,未来将收集高原鼠洞高清影像数据,建立鼠洞深度学习样本库,进一步完善高原鼠兔干扰强度观测体系,提供更加全面、科学的鼠兔活动调查数据。

4.2 结论

低空无人机对地观测技术结合深度卷积残差网络可以高效采集和提取鼠丘秃斑信息,由秃斑数量、面积和周长建立的 PDI 模型能够有效反映高原鼠兔干扰强度。2019 年鼠兔干扰以微度和轻度为主,高寒草甸植被以中度退化为主;2021 年鼠兔干扰以中等及以上强度为主,植被重度退化面积比例高;

2019—2021 年,研究区西南大部分地区鼠丘干扰强度明显增强,且以明显、显著和极度增强为主,分布趋于集中;植被覆盖降低趋势明显,并逐步向中、重度退化级别转移。2019—2021 年,研究区各类型景观的连通性增强,且更加聚集,秃斑和其他各景观类型逐步均衡化,秃斑优势度增强;高原鼠兔与高寒草甸的耦合作用增强,逐步呈现出协调的发展关系。

[参 考 文 献]

- [1] 王莺,李耀辉,孙旭映.气候变化对黄河源区生态环境的影响[J].草业科学,2015,32(4):539-551.
- [2] Shao Quanqin, Cao Wei, Fan Jiangwen, et al. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, 27(2):183-204.
- [3] 尚占环,董全民,施建军,等.青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展:兼论三江源生态恢复问题[J].草地学报,2018,26(1):1-21.
- [4] Yao Tandong, Wu Fuyan, Ding Lin, et al. Multispherical interactions and their effects on the Tibetan Plateau's earth system: a review of the recent researches [J]. National Science Review, 2015, 2(4):468-488.
- [5] Pech R P, Arthur A D, Zhang Yanming, et al. Population dynamics and responses to management of plateau pikas *Ochotona curzoniae* [J]. Journal of Applied Ecology, 2007, 44(3):615-624.
- [6] Wangdwei M, Steele B, Harris R B. Demographic responses of plateau pikas to vegetation cover and land use in the Tibet Autonomous Region, China [J]. Journal of Mammalogy, 2013, 94(5):1077-1086.
- [7] Yi Shuhua, Chen Jianjun, Qin Yu, 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(22): 6273-6284.
- [8] Yi Shuhua, Cao Wenda, Zhang Jianguo, et al. Research progress on plateau pika dynamic distribution in the context of climate change and human activities [J]. Journal of Nantong University (Natural Science Edition), 2020, 19(4):16-30.
- [9] Sun Feida, Chen Wenye, Liu Lin, et al. The density of active burrows of plateau pika in relation to biomass allocation in the alpine meadow ecosystems of the Tibetan Plateau [J]. Biochemical Systematics and Ecology, 2015, 58:257-264.
- [10] 刘菊梅,司万童.高原鼠兔种群密度与草场植被群落结构的相关性[J].南方农业学报,2012,43(12):2083-2086.
- [11] 刘碧颖,王毅,刘苗,等.三江源草地植被群落与土壤性

- 质对不同鼠兔密度的响应[J].草业科学,2019,36(4):1105-1116.
- [12] Liu Yanshu, Fan Jiangwen, Shi Zhongjie, et al. Relationships between plateau pika (*Ochotona curzoniae*) densities and biomass and biodiversity indices of alpine meadow steppe on the Qinghai-Tibet Plateau China [J]. Ecological Engineering, 2017,102:509-518.
- [13] 张海娟,谢久祥,李希来.青海河南县高原鼠兔的分布及其与土壤特性的相关性分析[J].青海大学学报(自然科学版),2016,34(1):14-21.
- [14] 索效荣,齐苑辰.基于 SIFT 算法的无人机航空遥感影像匹配[J].测绘科学,2012,37(1):89-91.
- [15] He Kaiming, Zhang Xiangyu, Ren Shaoqing, et al. Deep residual learning for image recognition[C]//2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). June 27-30,2016, Las Vegas, NV, USA. IEEE, 2016:770-778.
- [16] Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. DeepLab: semantic image segmentation with deep convolutional nets, atrous convolution, and fully connected CRFs [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2018,40(4):834-848.
- [17] Gong Mengyi, Miller C, Scott M, et al. State space functional principal component analysis to identify spatiotemporal patterns in remote sensing lake water quality [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2021,35(12):2521-2536.
- [18] Hung C H, Chiou Huamin, Yang Weining. Candidate groups search for K-harmonic means data clustering [J]. Applied Mathematical Modelling, 2013,37(24):10123-10128.
- [19] 赵健赞,张晓华,张波,等.基于 Landsat 的三江源区植被覆盖时空变化分析[J].人民黄河,2018,40(7):68-72.
- [20] 邬建国.景观生态学:格局、过程、尺度与等级[M].2版.北京:高等教育出版社,2007.
- [21] Sun Yifang, Wang Ninglian. Development and correlations of the industrial ecology in China's Loess Plateau: a study based on the coupling coordination model and spatial network effect [J]. Ecological Indicators, 2021,132:108332.
- [22] 宜树华,曹文达,张建国,等.气候变化和人类活动背景下高原鼠兔动态分布预估研究进展[J].南通大学学报(自然科学版),2020,19(4):16-30.
- [23] Zhao Jianyun, Jiang Chuanli, Liu Wenhui, et al. Pika disturbance intensity observation system via multidimensional stereoscopic surveying for monitoring alpine meadow [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2022,16(4):044524.
- [24] 刘文玲,马育军,吴艺楠,等.青海湖流域高原鼠兔扰动对土壤养分及微生物量碳氮的影响[J].北京师范大学学报(自然科学版),2018,54(2):254-260.
- [25] 陈莹莹,李捷,周俗,等.高原鼠兔影响高寒草甸生态系统服务价值的评价方法[J].草业科学,2022,39(1):187-201.
- [26] 根呷羊批,周俗,杨孔,等.高原鼠兔干扰对川西北高寒草甸植物群落及土壤物理性状的影响[J].草原与草坪,2022,42(1):38-48.
- [27] 卫万荣.高原鼠兔种群密度及植被群落结构与捕食风险的关系[J].草地学报,2019,27(2) 350-355.
- [28] He Qianyun, Wang Xiaoyi, Luo Gai, et al. Spatial pattern of plateau pika burrows under different grazing modes [J]. Acta Theriologica Sinica, 2021,41(1):431-440.
- [29] Li Kai, Migmar W. Analysis on the influence of environmental factors on the distribution of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) [J]. Plateau Scientific Research, 2019,8(3):15-20.
- [30] 杜嘉星,宜树华,秦彧,等.青海省河南蒙古族自治县高原鼠兔洞口空间分布格局及其成因研究[J].安徽农业大学学报,2019,46(3):415-419.
- [31] 赵健赞,彭军还.基于 MODIS NDVI 的青海高原植被覆盖时空变化特征分析[J].干旱区资源与环境,2016,30(4):67-73.
- [32] 吴倩倩,米玛旺堆.高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)占域与高山植物物种多样性之间的相关性[J].高原科学研究,2020,4(2):48-53.
- [33] 孙飞达,龙瑞军,路承香.高原鼠兔不同洞穴密度对高寒草地植物群落组成及多样性的影响[J].干旱区资源与环境,2010,24(7):181-186.
- [34] 徐海鹏,于成,舒朝成,等.高原鼠兔干扰对高寒草甸植物群落多样性和稳定性的影响[J].草业学报,2019,28(5):90-99.
- [35] 潘璇,米玛旺堆.高原鼠兔生态学研究进展[J].生态学杂志,2016,35(9):2537-2543.
- [36] 宋梓涵,李希来,李杰霞,等.高原鼠兔跑道对高寒草甸退化斑块扩大与连通的影响[J].生态学杂志,2020,39(10):3276-3284.
- [37] 曾鹏,赵燕兰,彭云煦,等.高原鼠兔扰动作用下高寒沙化草地土壤特性变化特征[J].草原与草业,2018,30(1):50-53.
- [38] 才文代吉,谢先福,张静,等.高原鼠兔鼠丘覆压对鼠丘上植被重建的影响研究[J].草地学报,2019,27(6):1615-1621.