

2013—2020年额济纳绿洲核心区景观稳定性动态及其驱动力

李洪飞^{1,2}, 望元庆^{1,3}, 王杰^{1,3}, 宋书愉^{1,3}, 许端阳¹

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2.辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁大连 116029; 3.中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: [目的] 探究 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观稳定性动态及其驱动机制, 为荒漠绿洲的生态恢复与可持续发展提供科学依据。[方法] 基于高分一号遥感影像, 借助景观格局指数、景观稳定性模型与地理探测器, 研究额济纳绿洲核心区景观稳定性动态及影响因素。[结果] ①额济纳绿洲核心区景观类型以未利用地、林地和草地为主, 2020 年 3 者占总面积的 90.98%; 2013—2020 年, 研究区景观连通性、均匀度降低, 聚集度、优势度增加, 多样性、异质性增强, 景观形状趋于简单化、规则化。②研究区景观稳定性呈“总体不稳, 局部较稳”状态; 2013—2020 年景观稳定性变化呈“大部分不显著, 局部有变动, 冷点多于热点”趋势。③地下水埋深、供水量和植被变化对研究区景观稳定性变化的影响较大; 气候变化、人类活动(城镇建设、耕地扩张、旅游活动干扰等)和人口增长是地下水埋深、供水量和植被变化的诱因, 间接引起景观稳定性的变化; 各驱动因子之间存在交互增强效应。[结论] 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观稳定性整体较低且呈下降趋势, 干旱的气候条件、耕种、旅游和城镇建设等因素及其交互作用是导致研究区景观稳定性降低的重要因素。

关键词: 额济纳绿洲; 景观稳定性; 地理探测器; 高分影像

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0268-09

中图分类号: Q149, X171

文献参数: 李洪飞, 望元庆, 王杰, 等. 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观稳定性动态及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 268-276. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20221026.001; LI Hongfei, Wang Yuanqing, Wang Jie, et al. Landscape stability dynamics and their driving forces in core area of Ejina Oasis from 2013 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 268-276.

Landscape Stability Dynamics and Their Driving Forces in Core Area of Ejina Oasis from 2013 to 2020

Li Hongfei^{1,2}, Wang Yuanqing^{1,3}, Wang Jie^{1,3}, Song Shuyu^{1,3}, Xu Duanyang¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research,

Beijing 100101, China; 2. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian,

Liaoning 116029, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] The landscape stability dynamics in the core area of Ejina Oasis from 2013 to 2020 and their driving mechanisms were determined in order to provide a basis for ecological restoration and sustainable development of the desert-oasis region. [Methods] Based on remote sensing images of Geosensor 1, a landscape pattern index, a landscape stability model, and GeoDetector, landscape stability dynamics of the core area of Ejina Oasis and its driving factors were investigated. [Results] ① The landscape type in the core area of Ejina Oasis was dominated by unused land, woodland, and grassland, accounting for 90.98% of the total area in 2020. Landscape connectivity and homogeneity of the study area decreased; aggregation, dominance, diversity, and heterogeneity increased; and landscape shapes tended to be simpler and regular

收稿日期: 2022-08-09

修回日期: 2022-09-18

资助项目: 中国科学院“西部之光”交叉团队项目—重点实验室合作研究专项“荒漠河岸林水分利用策略及其对水分条件的适应机制”; 国家自然科学基金项目(41971253)

第一作者: 李洪飞(1998—), 女(汉族), 辽宁省葫芦岛市人, 硕士研究生, 研究方向为区域生态与环境。Email: 13236791083@163.com。

通讯作者: 许端阳(1983—), 男(汉族), 河南省洛阳市人, 博士, 副研究员, 主要从事气候变化与土地沙漠化方面的研究工作。Email: xudy@igsnr.ac.cn。

from 2013 to 2020. ② Landscape stability of the study region was classified as “generally unstable, locally stable”, and the dynamics of landscape stability were classified as “mostly insignificant, locally variable, and more cold spots than hot spots” from 2013 to 2020. ③ Changes of groundwater depth, water supply, and vegetation cover had a great influence on the landscape stability dynamics of the study region. Climate change, human activities (urban construction, arable land expansion, tourism, etc.), and population growth were the causal factors for the above factors that indirectly caused changes in landscape stability. The driving factors had an interactive enhancement effect. [Conclusion] From 2013 to 2020, landscape stability for the entire study region was low and showed a downward trend. Factors such as arid climate condition, farming, tourism, and urban construction, and their interactions were the dominant factors that explained the reduction in landscape stability in the core area of Ejina Oasis.

Keywords: Ejina Oasis; landscape stability; GeoDetector; high resolution images

额济纳绿洲是中国典型干旱区绿洲之一,对维持西北地区生态环境安全具有重要意义,其核心区域是绿洲中植被分布较集中、人为经济活动(如耕作、建筑、旅游等)较频繁的区域,生态环境极为脆弱和敏感^[1-2]。20 世纪 90 年代以来,在气候变化、人口增长、农业和旅游业发展、水利工程修建等多种因素的综合影响下,黑河下游额济纳绿洲核心区景观格局发生剧烈变化,植被退化、湖泊干涸等问题较严重,绿洲稳定性较低^[3-6]。2000 年,国务院实施黑河干流水量调度政策,在方案实施后的十几年内有效缓解下游水资源问题,绿洲核心区景观格局有所改善,绿洲稳定性提高^[7-9],但是耕地、城镇道路用地扩张、旅游活动干扰强度加大使林地面积减少,对额济纳绿洲核心区景观恢复和稳定性维持提出了新挑战^[9-11]。科学测度额济纳绿洲核心区景观稳定性时空特征以及驱动机制,对理解额济纳绿洲区域生态演变过程、保护区域生态安全具有现实意义。景观稳定性源自生态系统稳定性^[12-13],是景观对抗干扰及自我修复的能力^[14-15]。国内外学者均对景观稳定性动态及其驱动机制进行相关研究,如 Hermosilla 等^[16]和 Sharma 等^[17]借助景观破碎化程度对森林景观稳定性动态进行分析;Gobattoni 等^[18]通过构建数学模型对景观稳定性进行定量分析;张欣等^[19]、周根苗等^[20]和徐秋阳等^[21]选取斑块密度、蔓延度和总边缘对比度指数对景观稳定性模型进行构建;常学礼等^[22]和董敬儒等^[7]分别采用相关分析法和定性分析法探究了黑河绿洲景观稳定性动态的影响因素。就额济纳绿洲而言,近年来相关研究多聚焦于黑河生态调水引起的额济纳绿洲水文和生态问题,将河流径流量、湖泊面积和地下水埋深作为影响植被变化的主要原因^[23-24],而关于绿洲景观稳定性动态以及人为活动干扰(旅游、农业发展和社会经济活动等)影响的研究相对较少^[10]。受遥感数据限制,以往研究多选取 30 m 分辨

率 Landsat 系列影像制成土地利用分类图^[10-11]来分析景观动态,对景观的细微变化及其对稳定性的影响刻画不足;另外,在对于景观动态及稳定性的驱动机制研究方面,以往研究多借助相关分析等方法来分析驱动因素的趋势变化并在此基础进行定性或半定量的解释^[8-9],对不同自然、人文驱动因素的相对贡献及交互作用的定量研究较少。上述问题的存在,限制了对额济纳绿洲核心区景观稳定性及驱动机制的科学认知。基于此,本文选取 2013 和 2020 年两期高分一号 PMS 遥感影像数据绘制 2m 分辨率的景观类型图,借助景观格局指数、景观稳定性模型与地理探测器,探究 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观格局演变、景观稳定性动态以及自然环境变化和人为活动干扰等驱动因子对景观稳定性及其动态的影响机制,旨在为黑河下游额济纳绿洲生态保护与恢复以及区域可持续发展提供科学依据。

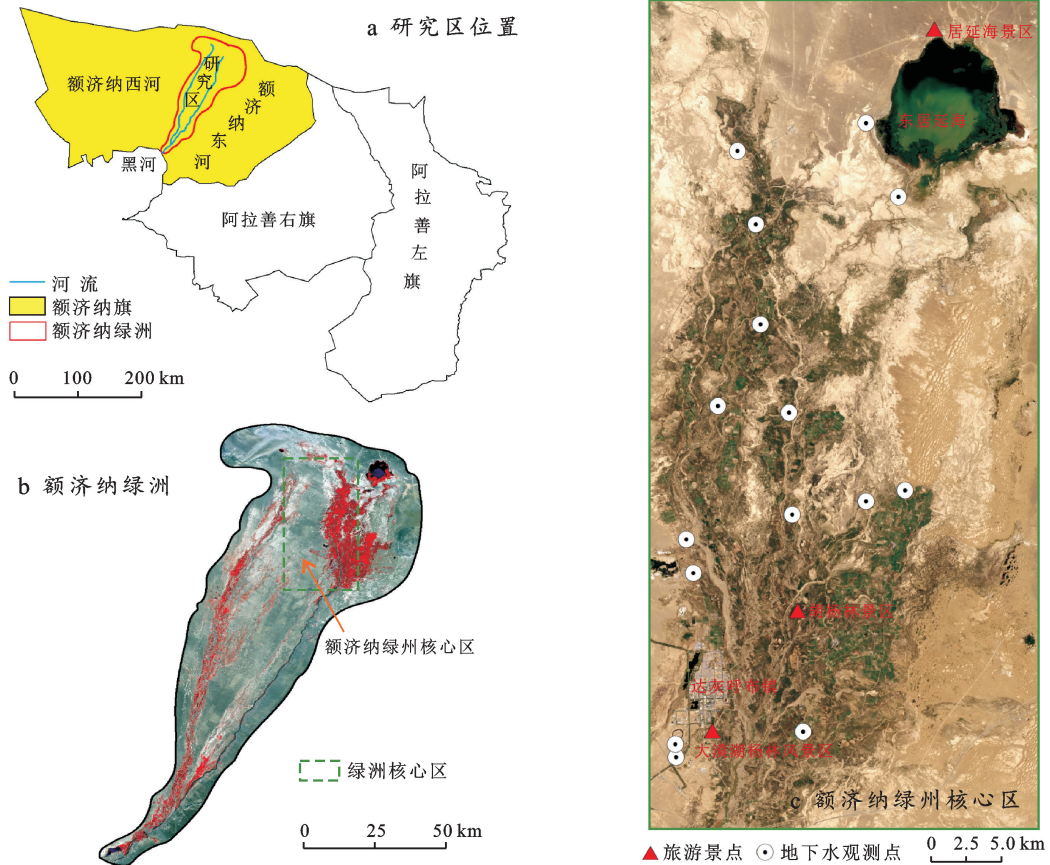
1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

额济纳绿洲位于黑河流域下游,行政隶属于内蒙古自治区阿拉善盟额济纳旗(图 1)。目前关于额济纳绿洲核心区的范围尚未有明确的边界划分,所以本文参考前人^[9]的相关研究,结合额济纳绿洲中的植被分布、旅游活动、地下水埋深情况,综合选取植被生长相对聚集、人类活动相对集中的区域作为额济纳绿洲核心区(41°52′—42°21′N, 101°00′—101°20′E, 面积约 1495.37 km²)。额济纳绿洲核心区处于温带大陆性干旱气候区,年均温 9.54 ℃,年均降水量 38.28 mm,蒸发强且风沙大。区域内水资源以黑河下游支流(额济纳东河)、东居延海和地下水为主。植被主要分布在额济纳东河两岸及东居延海湖积平原地区,以胡杨(*Populus euphratica*)为主。土壤以灰棕漠土、盐化潮土和草甸盐土为主,土壤肥力较低。

额济纳绿洲核心区内常住人口近年来稳定增加,2020 年约为 1.5 万人。旅游业是额济纳旗的支柱产业,2013—2020 年额济纳绿洲核心区内旅游人数迅速增加,2020 年旅游人数虽因受到新冠肺炎疫情

的冲击有所下降,但仍然突破百万人次。在此背景下,人为活动干扰强度的加大,加重了额济纳绿洲核心区生态修护和水资源利用的压力,为维持景观稳定性带来了严峻的挑战。



注:图 b 为标准假彩色波段合成图像,红色部分表示植被;图 c 为真彩色波段合成图像。

图 1 研究区地理位置示意图

1.2 数据来源及处理

本研究使用的数据资料主要包括 2013 和 2020 年两期高分一号 PMS 遥感影像,2013—2020 年气象(气温和降水)、归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、地下水埋深、人口密度、供水总量和旅游人次等数据。其中,2 m 分辨率高分一号 PMS 遥感影像数据来源于陆地观测卫星数据服务平台(<http://36.112.130.153:7777/DSSPlatform/index.html>),2013 和 2020 年研究区影像共采用 10 景高分一号影像,影像的成像时间范围为 7—10 月,云量在 5% 以下,是额济纳旗植被生长旺盛时期,也是旅游活动旺季。100 m 分辨率 7—10 月气象数据来源于国家地球系统科学数据中心共享服务平台(<http://www.geodata.cn/data/>),由 1 km 分辨率气象数据基于 ArcGIS 10.2 软件重采样获得。30 m 分辨率 7—10 月 NDVI 均值数据来源于 Landsat_8 遥感影像,在 GEE(Google Earth Engine)平台上,采

用最大值合成法计算 7—10 月逐月 NDVI 最大值,进而计算 NDVI 均值。100 m 分辨率 7—10 月地下水埋深均值数据由观测点数据基于 ArcGIS 10.2 软件插值获得,地下水埋深观测点数据来源于额济纳旗水务局和国家青藏高原科学数据中心(<http://data.tpdc.ac.cn/>)。100 m 分辨率人口密度数据来源于 WorldPop(<https://www.worldpop.org/>),通过计算研究区栅格数据总和获得年末总人口数据。旅游总人次数据来源于额济纳旗旅游统计年鉴,游客密度数据依据研究区内 3 个主要景区(居延海景区、胡杨林景区和大漠胡杨风景区)的游客数据进行反距离权重插值获得。供水总量数据来源于阿拉善水资源公报和阿拉善统计年鉴,借助研究区人口密度数据和游客密度数据进行空间化,获得供水密度数据。所有空间数据地理坐标系统一为 GCS_WGS_1984。

1.3 研究方法

1.3.1 景观格局变化分析 借助 ENVI 5.3 软件,以

Google Earth 高分影像及公开的土地利用数据产品为基础建立研究区解译样本库和验证库,依据中国科学院 2020 年中国土地利用遥感监测数据的土地利用分类体系,确定一级和二级景观类型的分类标准^[10],对高分一号 PMS 遥感影像进行人机交互解译,获得额济纳旗绿洲核心区 2013 和 2020 年景观类型数据,kappa 系数分别为 91.59% 和 90.31%。借助 ArcGIS 10.2 软件的空间叠加分析功能计算土地利用转移矩阵,从景观类型数量特征变化和景观类型间转化两方面分析 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观格局动态变化,并计算景观类型动态度^[10],计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: K 为景观类型动态度; U_a 为 2013 年某种景观类型的总面积; U_b 为 2020 年某种景观类型的总面积; T 为研究阶段的时间差,本文中 T 为 8。

在此基础上,借助 Fragstats 4.2 软件,分析斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI)、聚集度指数(AI)、蔓延度指数(CONTAG)、景观形状指数(LSI)、总边缘对比度(TECI)、香浓多样性指数(SHDI)和香浓均匀度指数(SHED)等景观格局指数的变化,分析尺度为 100 m。

1.3.2 景观稳定性分析 根据生态系统的等级斑块动态范式理论,景观斑块的动态变化会引起景观格局的变动,进而影响景观稳定性^[25],因此可以用景观斑块的稳定性变化来表示景观整体稳定性动态。景观斑块的蔓延度越高,斑块密度、总边缘对比度越小,景观稳定性越高^[19-21]。因此,本文选取蔓延度指数(CONTAG)、斑块密度(PD)和总边缘对比度指数(TECI)构建景观稳定性模型,基于 Fragstats 4.2 软件的移动窗口法计算获得,分析尺度选择 100 m,景观稳定性计算公式为:

$$S = \frac{C}{P \cdot T} \quad (2)$$

式中: S 为景观稳定性; C 为蔓延度指数; P 为斑块密度; T 为总边缘对比度指数。采用自然断点法,将景观稳定性划分为不稳定(0~0.10)、较不稳定(0.10~0.21)、较稳定(0.21~0.35)、稳定(0.35~0.56)和极稳定(0.56~0.88)共 5 个等级^[19]。

借助 ArcGIS 10.2 软件的热点分析(Getis-Ord G_i^*)工具,识别景观稳定性变化的冷热点区域,热点区和冷点区分别代表稳定性升高和稳定性降低的区域在空间上发生聚类的位置^[26]。

1.2.3 景观稳定性动态驱动力分析 地理探测器是

揭示地理现象空间分布格局及其驱动因素的统计学模型,因其对数据良好的兼容性和强大的因子分析功能,已在景观破碎化、景观生态安全、景观生态风险及景观生态脆弱性等研究方面得到广泛应用。本研究选取与额济纳绿洲核心区景观稳定性动态关系较密切的 7 个指标作为驱动因子(表 1),依据自然断点法划分为 5 类,将 2013 和 2020 年额济纳绿洲核心区景观稳定性及其变化量作为因变量,随机选取 200 个采样点,借助地理探测器进行地理因子探测及交互探测分析。因子探测可用于探测各驱动因素对地理现象空间分异的贡献率大小,各因子的贡献率计算公式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (3)$$

式中: q 为驱动因素对景观稳定性的贡献率; $h=1, 2, 3, \dots, L$ 为驱动因素的分类数; N 为样本点个数; N_h 表示分类为 h 的样本个数; σ^2 为稳定性指数的方差; σ_h^2 为分类为 h 的稳定性指数方差。 q 值大于 0 且小于 1,值越大说明该驱动因素对景观稳定性的影响程度越大, $q=0$ 说明不受到该因素的影响。

因子交互探测可用于识别驱动因子共同作用对景观稳定性的解释力呈增强、减弱或彼此独立的作用,各因子交互作用类型参见王劲峰^[27]的相关研究,本文中涉及两种交互作用类型:当两种驱动因子交互作用贡献率大于两种驱动因子单个贡献率的最大值时,表现为双因子增强;当两种驱动因子交互作用贡献率大于两种驱动因子单个贡献率之和时,表现为非线性增强。

表 1 驱动因子指标

驱动因子	指标	单位
Tmp	7—10 月平均气温	℃
Pre	7—10 月降水量	cm
NDVI	7—10 月归一化植被指数均值	—
Depth	7—10 月平均地下水埋深	m
Vd	游客密度	10 ⁶ 人/hm ²
Popd	人口密度	万人/hm ²
Wsd	供水密度	10 ⁷ m ³ /hm ²

2 结果与分析

2.1 额济纳绿洲核心区景观类型变化与景观指数分析

2.1.1 景观类型变化分析 额济纳绿洲核心区一级景观类型以未利用地、林地和草地为主,2020 年这 3 类景观比例共计 90.98%。其中,未利用地比例 43.46%,以沙地、盐碱地和戈壁为主,除植被覆盖区

及东居延海以外,基本均属于未利用地区;林地比例24.81%,以灌木林地为主,主要沿额济纳东河河渠分布;草地比例22.70%,以中、低覆盖度草地为主,主要分布于林地及东居延海外围。2013—2020年,额济纳绿洲核心区各一级景观类型面积变化为:林地、水域面积减少,动态度分别为0.65%/a,0.79%/a;耕

地、草地、建设用地、未利用地面积增加,动态度分别为0.15%/a,0.42%/a,6.43%/a,0.09%/a(表2)。由于达来呼布镇西北部水库的修建、城镇生活用水量和耕地需水量、游客用水量的增多,导致自然水域(河渠、湖泊和滩地)面积均减少,林地和草地等自然景观转化为城镇、道路及耕地等人为活动用地(图2)。

表2 额济纳绿洲核心区2013—2020年土地利用转移矩阵

项目	2020年						总计
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	
2013年 耕地	58.97	0.00	3.57	0.00	0.36	0.09	62.99
林地	0.87	338.79	30.57	0.78	2.35	18.12	391.48
草地	3.00	23.74	271.26	2.86	3.38	24.15	328.38
水域	0.23	1.65	4.12	44.61	0.18	2.50	53.29
建设用地	0.05	0.28	1.84	0.03	11.74	0.08	14.03
未利用地	0.63	6.59	28.08	1.64	3.25	605.01	645.20
总计	63.75	371.05	339.45	49.93	21.25	649.94	1 495.37

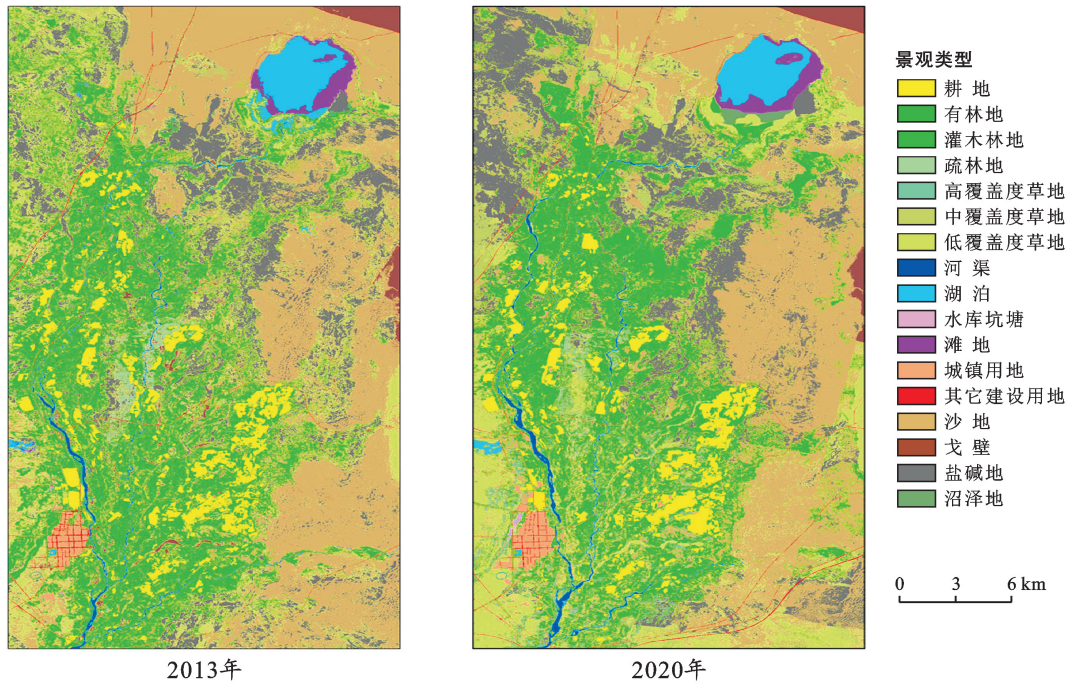


图2 额济纳绿洲核心区景观类型图

2.1.2 景观格局指数变化分析 由表3可知,2013—2020年额济纳绿洲核心区景观斑块密度(PD)变化不显著,总边缘对比度(TECI)增加0.79%,主要原因是具有相对整齐边界、对比度较高的人工斑块(例如耕地、城镇和交通用地)增加。景观蔓延度指数(CONTAG)减少0.68%,表明景观连通性降低,破碎化程度增加。聚集度指数(AI)增加4.17%,香浓均匀度指数(SHEI)减少0.05,最大斑块指数(LPI)增加4.50%,表明沙地和低覆盖度草地等优势斑块的优势度增加,对整体景观的控制作用增强。景观形状指数

(LSI)减少0.06,这一时期景观变化主要为林地和草地等自然景观转化为城镇、道路及耕地等人为活动用地,表明由于人为活动干扰的加强,使原本比较自然的景观形状整体上朝着规整、简单的方向发展。香浓多样性指数(SHDI)增加0.01,表明景观类型增加,景观要素趋于多元化,使景观多样性增强。

2.2 额济纳绿洲核心区景观稳定性及其动态

2.2.1 景观稳定性 由2013年、2020年额济纳绿洲核心区景观稳定性分布图(图3)可知,植被(耕地、林地和草地)、水域(湖泊和滩地)与未利用地(沙地、戈壁

壁、盐碱地和沼泽地)等景观类型交错分布区的景观类型易改变,景观稳定性较弱,详见图中不稳定和较不稳定的区域;而达来呼布镇城镇中心、耕地、沙地、戈壁和盐碱地等单一景观类型集中分布区的景观类型不易改变,景观稳定性较强,详见图中稳定和极稳定区域。2013 和 2020 年绿洲核心区景观稳定性呈

不稳定和较不稳定状态的区域分别占 75.02% 和 85.22%,表明绿洲核心区景观稳定性虽局部因单一景观类型集中分布而呈较高的状态,但总体因多种景观类型交错分布呈较低的状态。2013—2020 年呈不稳定和较不稳定状态的区域增加 10.20%,表明近 8 a 间,额济纳绿洲核心区整体景观稳定性下降。

表 3 额济纳绿洲核心区 2013—2020 年景观水平指数

年份	斑块密度 PD/km ²	最大斑块指数 LPI/%	聚集度 AI/%	蔓延度 CONTAG/%	景观形状 指数 LSI	总边缘对比度 TECI/%	香浓多样性 SHDI	香浓均匀度 SHEI
2013	35.69	65.13	68.69	20.92	1.45	8.15	0.76	0.66
2020	35.69	69.63	72.86	20.23	1.39	8.94	0.77	0.61

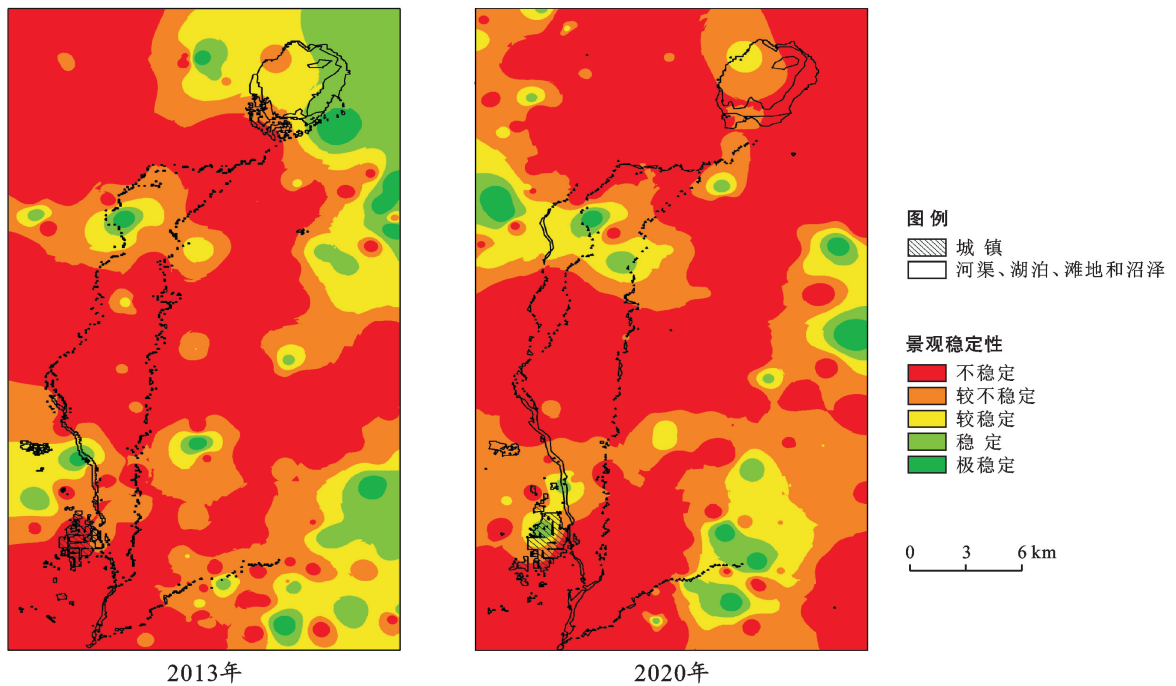


图 3 额济纳绿洲核心区 2013 和 2020 年景观稳定性分布图

2.2.2 景观稳定性动态及冷热点分析 2013—2020 年额济纳绿洲核心区景观稳定性变化的冷点区(90%以上置信度)约占 14.16%,主要集中在距东河河渠较远的湖泊、沼泽与滩地交错分布区以及低覆盖度草地与沙地交错分布区(图 4)。结合景观类型动态分析(表 2,图 2),东居延海东南部湖泊退化为沼泽和滩地,研究区东南部草地退化为沙地和盐碱地,表明湖泊和植被退化导致景观稳定性显著下降。景观稳定性变化的热点区(90%以上置信度)约占 8.46%,主要集中在距东河河渠较近的盐碱地、沙地等单一景观集中分布区域,稳定性变化不显著的区域约占 77.38%,主要集中在沿东河河渠分布的植被覆盖区域,表明景观稳定性变化与距水源的远近有关。达来呼布镇中心景观稳定性增加,周边景观稳定性降低,但稳定性变化均不显著,表明城镇扩张对整体景观稳定性变化

有一定的影响,但其直接影响力度较小。

2.3 额济纳绿洲核心区景观稳定性驱动力分析

2.3.1 景观稳定性驱动因子变化趋势 2013—2020 年额济纳绿洲核心区驱动因子的变化情况如图 5 所示。2013—2020 年,平均气温升高 0.04 °C,降水量减少 0.81 cm,地下水埋深增加 1.03 m,表明气候变化趋向于干旱,地下水水位呈下降趋势;NDVI 增加 0.01,但变化不显著,其原因与农田增加,水体减少(NDVI 值一般为负)而岩石裸地、建筑用地增多(NDVI 值一般为 0),以及河渠湖泊面积缩小后周边生长荒漠短命植物有关;年末总人口数增加 0.30 万人,旅游总人次虽然在 2020 年受新冠肺炎疫情影响而下降,但是相较于 2013 年增加了 3.74×10^6 人次,供水总量增加 4.30×10^6 m³,表明人口增长的压力和人类活动的强度均加大。

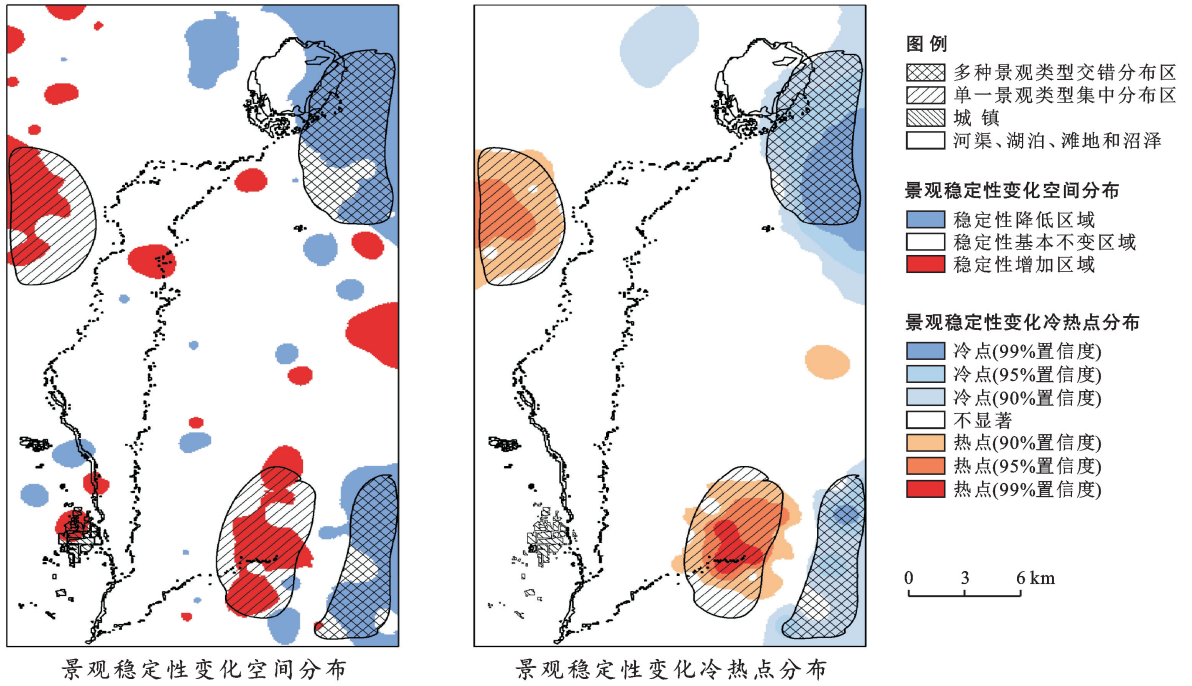
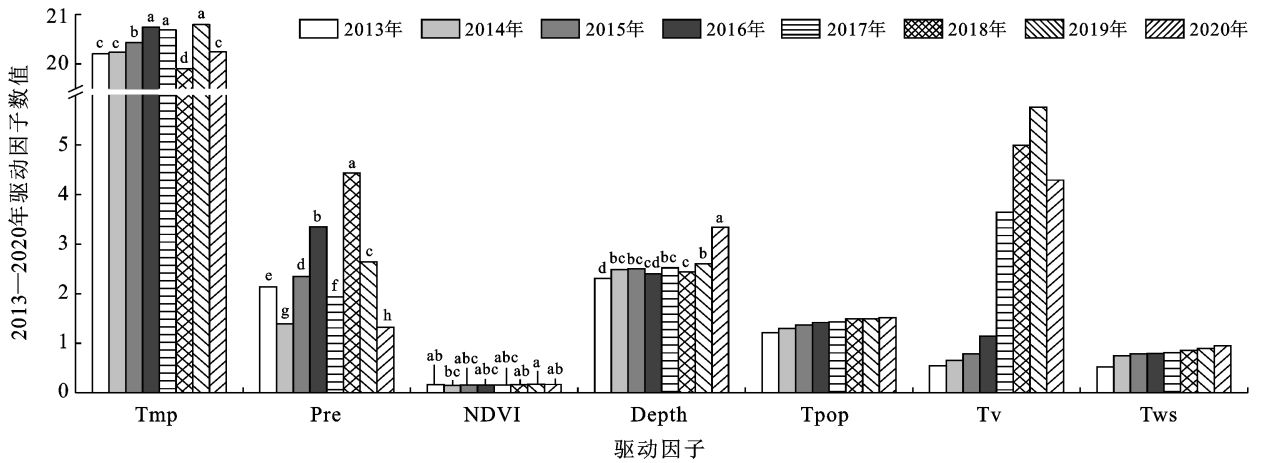


图 4 额济纳绿洲核心区 2013—2020 年景观稳定性变化及冷热点分布图

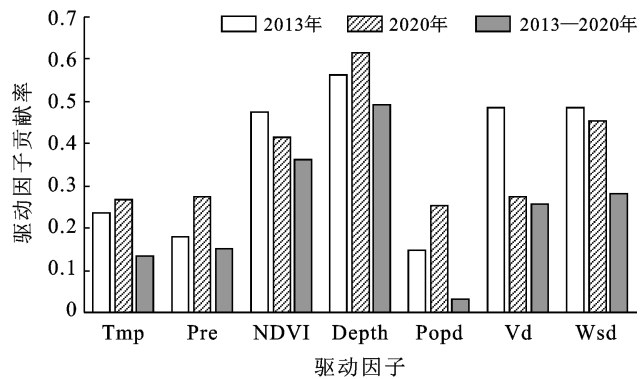


注: Tmp, Pre, NDVI, Depth 具体解释详见表 1; Tpop 表示年末总人口(万人), Tv 表示旅游总人次(10^6 人次), Tws 表示供水总量(10^7 m^3)。

图 5 额济纳绿洲核心区 2013—2020 年景观稳定性驱动因子变化趋势图

2.3.2 景观稳定性地理因子探测及交互探测分析

通过对景观稳定性及其变化量进行因子探测分析, 得到各驱动因子及其变化量对景观稳定性及其动态值的影响结果(图 6)。2013 和 2020 年地下水埋深、供水密度、归一化植被指数的贡献率均高于 0.4, 近 8 a 来, 3 者的变化量贡献率排在前 3 位, 表明地下水埋深、供水密度和归一化植被指数及其变化量对景观稳定性及其动态值的影响相对较强; 游客密度、平均气温和降水量及其变化量的贡献率排在第 4~6 之间, 虽然影响力度不及前 3 位, 但是游客密度、平均气温和降水量及其变化量对景观稳定性及其动态值也有一定影响; 人口密度及其变化量的贡献率均排在末位, 影响力度相对最弱。



注: Tmp, Pre, NDVI, Depth, Vd, Popd, Wsd 具体解释详见表 1。

图 6 额济纳绿洲核心区 2013—2020 年驱动因子贡献率

地理因子交互探测结果表明, 交互作用使驱动因子及其变化量对景观稳定性变化的解释力增强

(表 4)。其中,2013 和 2020 年,各因子间的交互作用均表现为双因子增强。2013—2020 年,非线性增强主要发生在地下水埋深变化量与其他因子变化量之

间、归一化植被指数变化量与其他因子变化量之间的交互作用中,其他因子变化量间的交互作用表现为双因子增强。

表 4 额济纳绿洲核心区 2013—2020 年驱动因子交互作用结果

年份	项目	Tmp	Pre	NDVI	Depth	Popd	Vd	Wsd
2013	Tmp							
	Pre	0.31*						
	NDVI	0.54*	0.56*					
	Depth	0.67*	0.65*	0.80*				
	Popd	0.28*	0.21*	0.50*	0.61*			
	Vd	0.56*	0.52*	0.72*	0.79*	0.51*		
	Wsd	0.60*	0.58*	0.74*	0.83*	0.53*	0.74*	
2020	Tmp							
	Pre	0.41*						
	NDVI	0.54*	0.58*					
	Depth	0.76*	0.68*	0.82*				
	Popd	0.38*	0.32*	0.59*	0.63*			
	Vd	0.39*	0.35*	0.62*	0.68*	0.32*		
	Wsd	0.61*	0.60*	0.71*	0.84*	0.60*	0.64*	
2013—2020	Tmp							
	Pre	0.19*						
	NDVI	0.53**	0.57**					
	Depth	0.65**	0.69**	0.89**				
	Popd	0.14*	0.16*	0.51**	0.62**			
	Vd	0.27*	0.28*	0.68**	0.80**	0.27*		
	Wsd	0.30*	0.31*	0.72**	0.84**	0.29*	0.58*	

注:Tmp,Pre,NDVI,Depth,Vd,Popd,Wsd 具体解释详见表 1; * 表示双因子增强, ** 表示非线性增强。

3 讨论与结论

3.1 讨论

额济纳绿洲核心区生态环境本底十分脆弱,在自然和人为因素的双重影响下,其景观格局和景观稳定性均发生变化。黑河流域调水政策实施 13 a 后,由于耕地、城镇道路用地扩张和旅游等人类活动干扰强度加大,对黑河下游生态环境恢复产生负面影响,自然水域和部分区域植被面积减少,黑河下游生态环境的恢复力度不足,额济纳绿洲核心区景观稳定性整体较低^[7]且仍在不断下降,这与前人研究结果相一致^[10]。

作为典型的干旱区绿洲,额济纳绿洲景观格局及稳定性动态易受自然条件变化(气温、降水、蒸散发、植被等)、人类活动干扰(人口增长、人类活动用地扩张、社会经济发展、旅游活动等)^[9-11]以及黑河流域水利建设和调水政策的影响^[3-4,7]。已有研究^[9-11]表明,近年来人类活动干扰对额济纳绿洲景观稳定性动态的影响力度不断增强,这也与本研究对驱动因子趋势分析的结果一致。对驱动因子的贡献率与交互作用的研究发现,近 8a 来,地下水埋深、供水密度、归一

化植被指数对景观稳定性的影响相对较强,这是因为额济纳绿洲处于西北干旱荒漠区,其上植被发育、人类生产生活等均依赖于地下水及黑河下游的东河河水。游客密度、平均气温和降水量对景观稳定性也有一定影响,在干旱的气候条件下,旅游活动干扰植被生长、增加水资源需求量,三者均引起地表水资源减少,部分区域植被退化,加重人们对地下水的开采,加剧景观稳定性的降低。由于在绿洲核心区中,人口集中分布于达来呼布镇^[10],所以人口数量变化对整体景观稳定性变化的影响较小,但人为活动(生产生活用水和旅游活动)会影响地下水埋深的变化^[22],进而影响整体景观稳定性。综合而言,对于以旅游业为支柱产业的干旱绿洲区域——额济纳绿洲核心区,在干旱的气候背景下,正确处理好植被保护、水资源利用和人为活动干扰(旅游活动、人口增长等)3 者之间的关系,是维持绿洲核心区景观稳定性、促进区域生态恢复与可持续发展的现实基础。

本研究仍存在一定局限性:①高分一号卫星可提供数据的最早年份为 2013 年,导致无法基于这一单一影像数据源开展长时间序列的研究,后续将继续

收集其他高分辨率遥感影像数据,对黑河流域分水前后的区域景观格局及稳定性动态进行长时间序列分析。②由于驱动因子数据来源多样,数据分辨率不完全一致,这会对分析结果产生一定影响,但是对文中主要结论的影响很小,后续会继续寻找分辨率更一致的数据源,丰富指标体系,对额济纳绿洲核心区进行更为细致和全面的研究。

3.2 结论

(1) 2013—2020年,额济纳绿洲核心区景观类型变化表现为林地、草地等自然景观类型转化为建设用地、耕地等人为景观类型。绿洲核心区景观连通性和均匀度降低,聚集度和优势度增加,多样性和异质性增强,景观形状趋于简单和规整。

(2) 2013—2020年,额济纳绿洲核心区景观稳定性整体较低且呈下降趋势。2013和2020年绿洲核心区景观稳定性呈“总体不稳、局部较稳”状态,单一景观类型集中分布区稳定性高于多种景观类型交错分布区;2013—2020年绿洲核心区景观稳定性变化呈“大部分不显著、局部有变动、冷点多于热点”趋势,稳定性变化冷点区多为景观类型交错分布区中湖泊和植被显著退化的区域。

(3) 2013—2020年,额济纳绿洲核心区景观稳定性及其动态的驱动因子中,地下水埋深、供水密度和归一化植被指数及其变化量的影响力度相对较强;游客密度、平均气温和降水量及其变化量的影响力度低于前3者,但高于人口密度及其变化量。各驱动因子之间相互关联且存在交互增强效应。

[参 考 文 献]

- [1] 孟阳阳,何志斌,刘冰,等.干旱区绿洲湿地空间分布及生态系统服务价值变化:以三大典型内陆河流域为例[J].资源科学,2020,42(10):2022-2034.
- [2] 曹宇,欧阳华,肖笃宁,等.额济纳天然绿洲景观变化及其生态环境效应[J].地理研究,2005,24(1):130-139,164.
- [3] 甘肃省张掖市志编修委员会.张掖市志[M].甘肃兰州:甘肃人民出版社,1993:224-225.
- [4] 金塔县地方志编纂委员会.金塔县志[M].甘肃兰州:甘肃人民出版社,1992:220-222.
- [5] 王耀斌.基于可持续发展的额济纳绿洲生态环境变化研究[J].甘肃联合大学学报(自然科学版),2010,24(1):58-63,66.
- [6] 曹宇,肖笃宁,欧阳华,等.额济纳天然绿洲景观演化驱动因子分析[J].生态学报,2004,24(9):1895-1902.
- [7] 董敬儒,颀耀文,段含明,等.黑河流域绿洲变化的模式与稳定性分析[J].干旱区研究,2020,37(4):1048-1056.
- [8] 宋章建.流域分水后额济纳绿洲景观—服务时空变化研究[D].浙江杭州:浙江大学,2015.
- [9] 包海梅,王健铭,赵红军,等.黑河配水后额济纳绿洲核心区景观格局动态变化[J].林业调查规划,2015,40(5):36-41.
- [10] 库珂珂.黑河下游景观格局变化及其驱动力研究[D].陕西西安:西北大学,2018.
- [11] 陈维强.额济纳绿洲景观格局、动态变化及其驱动力研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [12] Macarthur R. Fluctuations of animal populations and a measure of community stability [J]. Ecology, 1955,36(3):533-536.
- [13] Turner M G, Romme W H, Gardner R H, et al. A revised concept of landscape equilibrium: Disturbance and stability on scaled landscapes [J]. Landscape Ecology, 1993,8(3):213-227.
- [14] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology [M]. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [15] 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,2000,20(4):581-586.
- [16] Hermosilla T, Wulder M A, White J C, et al. Impact of time on interpretations of forest fragmentation: three-decades of fragmentation dynamics over Canada [J]. Remote Sensing of Environment, 2019,222:65-77.
- [17] Sharma K, Robeson S M, Thapa P, et al. Land-use/land-cover change and forest fragmentation in the Jigme Dorji National Park, Bhutan [J]. Physical Geography, 2017,38(1):18-35.
- [18] Gobattoni F, Lauro G, Monaco R, et al. Mathematical models in landscape ecology: Stability analysis and numerical tests [J]. Acta Applicandae Mathematicae, 2013,125(1):173-192.
- [19] 张欣,王志杰.黔中喀斯特山地城市景观稳定性评价与特征分析[J].生态学报,2022,42(13):5243-5254.
- [20] 周根苗,李新建,王志强,等.东洞庭湖湿地景观格局演变及稳定性研究[J].湖南林业科技,2021,48(4):79-86.
- [21] 徐秋阳,王巍巍,莫罹.京津冀地区景观稳定性评价[J].生态学报,2018,38(12):4226-4233.
- [22] 常学礼,李秀梅,白雪莲,等.荒漠绿洲交错区景观稳定性与维持机制[J].中国沙漠,2020,40(3):43-50.
- [23] 董国涛,廉耀康,范正军,等.黑河生态调水后额济纳绿洲植被变化规律研究[J].人民黄河,2019,41(7):5-9.
- [24] 张震域,赵沛,畅祥生,等.额济纳绿洲1992—2015年地下水埋深变化分析[J].人民黄河,2019,41(7):33-37.
- [25] 张绘芳,地力夏提·包尔汉,朱雅丽,等.阿尔泰山森林景观格局的稳定性[J].水土保持通报,2018,38(5):189-194,353.
- [26] 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.
- [27] 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.