

DOI: 10.20103/j.stxb.202301300146

樊千涛, 马姜明, 于名召, 贺桂珍. 漓江流域喀斯特综合干扰评价及其空间特征. 生态学报, 2024, 44(4): 1404-1417.

Fan Q T, Ma J M, Yu M Z, He G Z. Comprehensive disturbance evaluation of karst and its spatial characteristics in the Lijiang River Basin, Guilin, China. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1404-1417.

漓江流域喀斯特综合干扰评价及其空间特征

樊千涛^{1,2,3,4}, 马姜明^{1,2,3}, 于名召⁴, 贺桂珍^{4,5,*}

1 广西师范大学广西漓江流域景观资源保育与可持续利用重点实验室, 桂林 541006

2 广西师范大学可持续发展创新研究院, 桂林 541006

3 广西师范大学生命科学学院, 桂林 541006

4 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085

5 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:喀斯特地区具有特殊的地质结构, 生态环境脆弱性较高, 辨识和量化人为、自然多重干扰是减少人类干扰影响及制定喀斯特景观管理政策的重要依据。基于漓江流域喀斯特发育地貌特征, 旨在建立包括地貌、水文、气候、生物、社会 5 类因素以及 15 个具体干扰指标的喀斯特综合干扰指数, 并通过空间相关分析探究地理因子对综合干扰解释力以及因子与指标间交互作用力的特征。结果显示: (1) 漓江流域中游综合干扰指数高于上下游, 自然地形地貌本底以及不同类型喀斯特景观分布的地带性是分异的主要原因; (2) 干扰等级为显著干扰, 综合干扰指数为 0.336, 空间上呈现出东部与北部低、西部与南部高的分布特征, 具有明显的空间异质性; (3) 地理环境和社会经济因素对综合干扰具有较强解释力, 采石采矿、各类灾害、生产活动等多项干扰指标以及海拔高度具有较强空间关联关系。评估了漓江流域喀斯特综合干扰并分析其空间特征, 研究结果对喀斯特生态环境保护及景观资源可持续发展政策制定具有重要参考价值。

关键词:漓江流域; 喀斯特; 干扰评价体系; 空间交互作用

Comprehensive disturbance evaluation of karst and its spatial characteristics in the Lijiang River Basin, Guilin, China

FAN Qiantao^{1,2,3,4}, MA Jiangming^{1,2,3}, YU Mingzhao⁴, HE Guizhen^{4,5,*}

1 Guangxi Key Laboratory of Landscape Resources Conservation and Sustainable Utilization in Lijiang River Basin, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

2 Institute for Sustainable Development and Innovation, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

3 College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin 541006, China

4 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

5 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Karst area has specifically geological structure. The process of dissolution leads to notable surface features and typical karst landscape. Ecosystems in the karst environment are quite vulnerable to climate change and human activities. Identifying and quantifying the disturbance by a karst disturbance index could help resource managers formulate approaches and policies to reduce these anthropogenic impacts. As a world natural heritage site, the unique karst landscape in the Lijiang River Basin, Guilin City, China is of great values for tourism, ecology, and scientific research. However, in the

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFC0507501); 国家自然科学基金项目(U21A2041); 广西重点研发计划项目(桂科 AB21220057); 广西创新驱动发展专项资金项目(桂科 AA20161004-4)

收稿日期:2023-01-30; **网络出版日期:**2023-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gzhe@rcees.ac.cn

coupling system of human activities and natural environment, multi-dimensional interferences threatened the Lijiang River Basin. In terms of the characteristics of the Lijiang River Basin and previous studies, a comprehensive evaluation system comprising geomorphic, hydrological, climatic, biological, and social factors, as well as 15 specific disturbance indexes was designed. The karst comprehensive disturbance index was calculated. The spatial correlation analysis was used to explore the explanatory power of geographic factors to comprehensive disturbance and the characteristics of the interaction force between factors and indicators. The results showed that: (1) the comprehensive disturbance index in the middle reaches of Lijiang River Basin was higher than that in the upper and lower reaches. The natural landform background and the zonal distribution of different types of karst landscape were main reasons for the difference. (2) The disturbance level was significant disturbance, and the value of comprehensive disturbance index was 0.336. The spatial distribution features were low in the east and north, and high in the west and south, with obviously spatial heterogeneity. (3) The geographical environment and socio-economic factors had strong explanatory power to the comprehensive disturbance, and some indicators such as quarries and mining, various disasters, production activities, and altitude had strongly spatial correlation. The karst disturbance index model was used to construct an evaluation system, and the feasibility of the model was verified, the degree and scope of the influence of multiple human and natural disturbances in the Lijiang River Basin were described, which could highlight the areas in urgent need of protection and the leading disturbance factors. The study evaluates the comprehensive disturbance of karst in the Lijiang River Basin and analyzes its spatial characteristics. The results can provide important reference value for the policy making of karst ecological environment protection and landscape resources sustainable development.

Key Words: Lijiang River Basin; karst; disturbance evaluation system; interaction in space

喀斯特(karst),是水对可溶性岩石进行以化学溶蚀作用为主,机械作用为辅的地质作用,形成沟槽、裂隙和空洞等特殊组合地貌景观的作用现象^[1]。喀斯特具有地表-地下二元立体空间结构,其中岩-土-水-气-生各界面具有独特的、紧密的作用过程及其反馈机制,形成了具有显著脆弱性的喀斯特生态系统^[2-3]。中国西南喀斯特地区是全球三大喀斯特集中区(欧洲地中海沿岸、美国东部、东南亚)中连片裸露碳酸盐岩面积最大的地区^[4],分布在以贵州、广西、云南为主要区域的8个省份,岩石-土壤的脆弱本底^[5]、水文情势时空分布不均^[6]、生物量及生产力较低^[7],以及人类活动与气候变化等干扰胁迫下^[8],喀斯特生态系统趋于逆向演替,脆弱程度日益加剧^[9]。并且这些地区为少数民族聚居地,整体社会经济处于欠发达阶段,资源开发与生态保护的矛盾更加凸显。

鉴于喀斯特地区的特殊地质结构和生态环境脆弱性,如何识别各类干扰并量化干扰强度及规模,是减少生态破坏、缓解资源开发矛盾以及进行有效生态恢复的前提和关键^[10]。在西南喀斯特地区,人为活动干扰与系统本身脆弱性相叠加是喀斯特生态系统退化的根本原因,其中人为因素是主导和根本驱动力^[11]。自1990年代起,国外学者就对喀斯特地区干扰进行研究,Drew等^[12]对爱尔兰局部喀斯特建立了地下水污染指数,Watson等^[13]针对人类对喀斯特洞穴的开发,制定了喀斯特保护指南。2005年,van Beynen等^[14]首次提出建立了喀斯特干扰指数(Karst Disturbance Index),从喀斯特整体性、系统性特征出发,分解为地貌、水文、气候、生物、文化5个干扰维度以及30个指标,该指数首次在佛罗里达州应用,以标准化和分级的方式全面评估了干扰程度并突出亟需制定保护措施喀斯特要素。随着地理信息空间技术、资料数据获取途径以及人类-自然耦合系统研究的蓬勃发展,指数在空间量化、指标设计、权重设置等方面得以改进,现已广泛应用于美国、奥地利、墨西哥等多个国家的典型喀斯特地区干扰评价,为喀斯特地区环境管理提供依据^[15-18]。

漓江流域喀斯特是桂林山水的精髓,代表了热带、亚热带喀斯特演化末期的地貌过程。2014年6月23日,广西桂林作为“中国南方喀斯特二期”项目之一,在第38届世界遗产大会上入选世界自然遗产。2018年2月,国务院批复桂林市以“景观资源可持续利用”为主题,建设国家可持续发展议程创新示范区。实现喀斯特

地区生态环境保护及景观资源保育,是桂林可持续发展亟待解决的瓶颈问题。早在 1976 年,自然资源部在桂林设置中国地质科学院岩溶地质研究所,对喀斯特动力学^[19]、喀斯特碳汇^[20]与石漠化治理^[21]等领域展开了深入研究。从漓江流域的已有相关研究来看,很多都考虑了人类活动的影响,如任远等^[22]以研究样地人为痕迹为人为干扰度指标,探讨了漓江流域水陆交错带不同植被配置类型及生态特征;邓晓军等^[23]从自然生态-社会经济-景观环境三个方面构建河流健康评价指标体系识别漓江河流健康状态;赵海娟等^[24]针对漓江流域水体,探讨了人类活动对喀斯特地表水体水-岩作用的影响;向芸芸等^[25]选取漓江流域居民点、景点及道路为人为干扰源,识别分析旅游开发对景观结构的影响程度;胡金龙等^[26]利用多时序土地利用数据,以人类活动对土地覆被改造为主导作用分析漓江流域生态风险时空演化特征。现有研究多是集中在群落植被、水体状态、景观结构及土地利用变化等单一方面,并且在人类-自然耦合的视角下干扰指标设置不够全面,无法对喀斯特整体特征进行评价。因此,本文旨在建立起自然干扰和人为干扰相结合的漓江流域喀斯特综合干扰评价体系,进而进行量化评估,并应用地理信息平台对干扰进行空间表达,对促进景观资源的可持续利用提供技术支撑,为全球喀斯特脆弱区综合干扰评价建立中国样板。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

漓江流域位于广西东北部的桂林市,属于珠江流域西江水系支流——桂江的上游,地处东经 110°4′—110°45′ 北纬 24°38′—24°54′,流域总面积为 5815.91 km²(图 1),且大部分在喀斯特区域内,连续碳酸盐岩面积占流域总面积 93.38%。漓江流域发源于华南第一高峰猫儿山,整体地势特点是东部北部高而南部低,中间低四周高的谷地地势呈狭长带状分布,海拔范围为 62—2116 m,平均海拔为 1083 m,地形较为复杂。漓江干流由北至南依次流经桂林市兴安县、灵川县、桂林市区、阳朔县和平乐县等区县,干流总长约 210 km。漓江流域属中亚热带季风气候区,气候温和,雨量充沛,且雨热基本同季,植被覆盖度高,类型丰富多样。2021 年,桂林市年末全市常住人口 494.59 万人,全年全市生产总值(GDP)为 2311.06 亿元,第一、第二、第三产业产值占比分别为 23.8%、21.9%、54.3%。漓江流域根据地形、降水等自然因素可以划分为上游、中游和下游,其中,上游为猫儿山源头至榕江镇,长约 64 km,地貌类型以中山山岳、冲积平原与阶地为主。榕江镇至大圩镇河段为中游,长约 70 km,以缓丘平原、典型峰林地貌为主。下游为大圩镇至阳朔县与平乐县相交处河段,长约 76 km,为世界自然遗产南方喀斯特核心保护区所在地,分布有葡萄峰林平原地貌区及漓江河谷典型峰丛洼地地貌区。

1.2 数据来源

研究使用的数据主要包括遥感影像、土地利用、自然灾害和社会经济等多源数据。遥感影像采用桂林市 2021 年 12 月的 Landsat-8 OLI 遥感图像为主要数据源,来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/search>),行列号为 124/42 和 124/43,含云量小于 2%,基于 ENVI 5.3 软件平台,经过辐射定标、大气校正、图像裁剪等预处理,通过人机交互解译得到采石采矿、石漠化数据集,结合高精度在线地图及野外实地勘察验证,确保精度满足研究需要。地质灾害数据、土地利用数据、数字高程数据、气象数据来源于中国科学院资源科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>);土壤侵蚀数据来源于全球变化科学研究数据出版系统(<https://www.geodoi.ac.cn/>);岩层含水量数据来源于全国地质资料馆(<https://www.ngac.cn/>);不透水表面数据来源于地球系统科学数据(<https://essd.copernicus.org/>);洪涝、干旱灾害数据来源于《桂林漓江志》;NDVI 数据来源于中国科学数据(<http://csdata.org/>);工业污染涉及企业名单数据来源于广西桂林市生态环境局(<http://sthjj.guilin.gov.cn/>);旅游景点相关数据来自携程旅行(<https://www.ctrip.com/>);各级道路数据来自全国地理信息资源目录服务系统(<https://www.webmap.cn/>);人口密度数据来自全球人口动态统计分数数据集(<https://landscan.ornl.gov/>);公里网格生产总值数据来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。

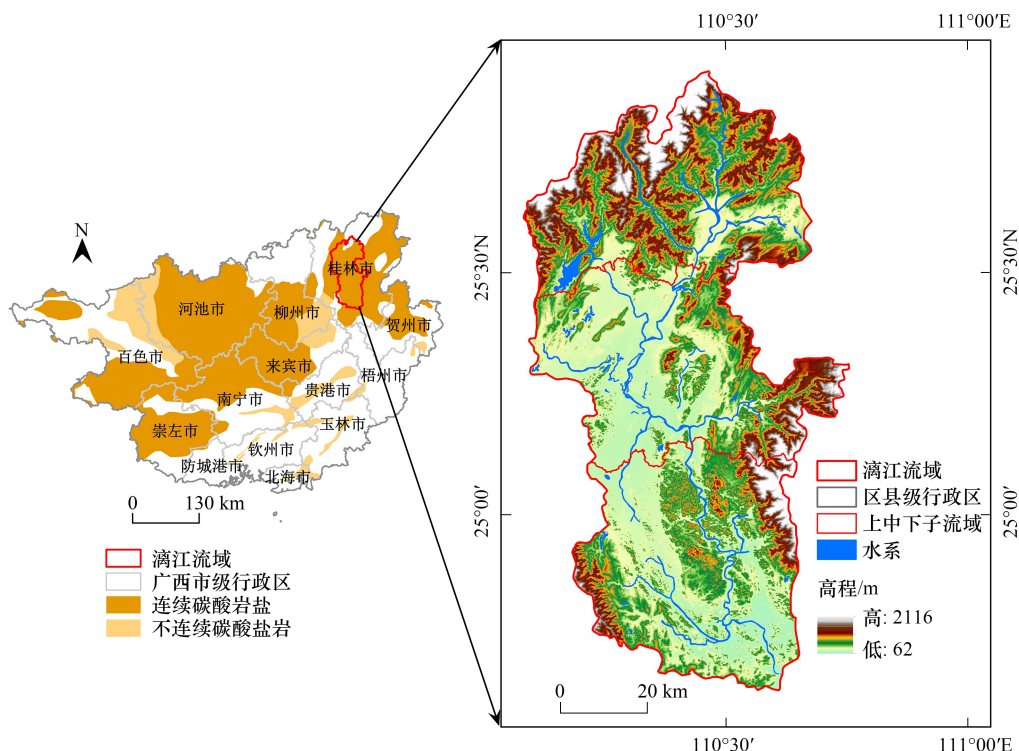


图1 漓江流域概况图

Fig.1 Map of Lijiang River Basin, Guilin

1.3 喀斯特景观干扰评价指标体系构建

1.3.1 评价体系构建及指标含义

根据漓江流域特征,参考国内外喀斯特干扰相关研究应用^[14-18]以及喀斯特系统要素相关研究,遵循科学性、系统性、层次性、普适性和可操作性的原则,以喀斯特生态系统功能及景观资源演变过程的综合、整体的角度选取干扰指标,建立喀斯特干扰指数评价体系,其中目标层为喀斯特干扰,准则层包含地质地貌、水文条件、极端气候、生物群落、社会发展5类因素和15个具体指标(表1)。

1.3.2 评价体系指标权重的确定方法

权重是以一个数值大小来表示众多因素相对重要程度的量值,在对多个指标进行评估时,各项指标的权重确定是重要的也是困难的。层次分析法(AHP)作为一种定性与定量分析方法相结合的综合性评价方法,在安全和环境多个领域得到广泛应用^[27],层次分析法操作相对简单但主观性较强,随意性大。熵反映系统的混乱程度,现已广泛应用于可持续发展评价及社会经济等研究领域^[28]。熵权法考虑了指标实际信息对评估结果的影响,更贴合客观实际。为提高科学性,本文采用层次分析法和熵权法两种方法分别计算权重,进而通过主客观赋值法得到综合权重值。利用乘法组合权重法对层次分析法和熵权法得到的各权重进行集化,从而得到最终的评价指标权重,公式为

$$W_i = \frac{\prod_{k=1}^m W_i^k}{\sum_{j=1}^m \prod_{k=1}^m W_i^k} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, W_i 为第 i 项干扰指标的综合权重值, m 为使用的计算权重方法的数量。

1.3.3 干扰评价体系评分与评分标准

应用漓江流域喀斯特干扰评价体系,在 ArcGIS 地理信息处理平台建立起指标层、准则层、目标层空间栅

格数据库,形成漓江流域喀斯特干扰评价标准。具体方法是将各指标层干扰栅格数据所有像元的值从小到大按照自然断点法重分类为 5 个干扰程度评价等级,并赋分值为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0。根据综合权重公式计算出准则层干扰评价指数以及目标层综合干扰指数,按照自然断点法将评价体系目标层综合干扰指数划分为 5 个等级。

综合干扰指数计算公式:

$$S_i = \sum_{i=1}^n W_i \times X_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中, S_i 为栅格像元准则层、目标层干扰评价指数, W_i 为指标层指标综合权重值, X_i 为指标层干扰程度评价分值。

1.3.4 地理分析方法

为了将各项干扰指标在空间上得以处理分析以及制图表达,基于地理信息系统的地理统计学以及空间分析功能,在 ArcGIS 平台应用多种工具将各层次的要素指标数据空间化并进行同层次之间的、各层次与目标层之间的空间分析。

核密度分析法通过光滑连续的密度曲线直观地反映点要素的空间特征,是研究要素空间分布,表达空间上距离衰减效应的重要方法^[29],应用于采石采矿、地质灾害、极端气候、社会经济活动等指标干扰程度定量空间化。克里金插值法,指以变异函数理论和结构分析为基础,在有限区域内对空间变量进行无偏最优估计的一种方法^[30],在生物丰富度、植被覆盖度下降程度等空间数据较为粗糙时,可以模拟创建出更高分辨率的空间数据。应用渔网采样法对漓江流域边界外接矩形创建行列为 200×100 的采样点,以流域掩膜提取 12029 个样点,并将值提取至点,得到喀斯特干扰评价体系中各层次点数据集。地理探测器是能够探测空间分异性和揭示层次间作用力的重要工具,已被广泛用于分析地理因子及各类空间要素的影响^[31]。在本研究中,选取海拔、坡度、降水、气温、国内生产总值作为地理因子(表 2),通过地理探测器来检测地理环境、气候条件、经济发展因素对综合干扰指数的解释力以及地理因子、干扰指标之间两两交互作用的强度。

表 1 漓江流域喀斯特干扰评价体系

Table 1 Evaluation system of karst disturbance index in the Lijiang River Basin

目标层 Target level	准则层 Criterion level	指标层 Indicator level	指标含义 Indicator interpretation	处理方法 Processing methods
喀斯特干扰 A1 Karst disturbance	地质地貌 B1	采石采矿 C11	人类采石采矿行为对喀斯特地貌表面特征的直接破坏,使喀斯特山体裸露缺失,极大破坏喀斯特景观的美学价值,同时对山体生态以及喀斯特自然演变过程造成毁灭性的破坏	解译遥感影像,结合目视判别高精度在线地图及实地调查,对采石采矿空间点位、以破坏强度及规模为权重进行核密度方法处理
		地质灾害 C12	自然发生以及人为诱导的崩塌、滑坡、塌陷、泥石流等地质灾害,对喀斯特景观以及生态环境造成破坏,同时使人类生命财产受到极大威胁	对地质灾害空间点位进行核密度方法处理
		土壤侵蚀 C13	包含自然作用的侵蚀过程或人类不合理的生产、建设活动导致的土壤侵蚀,将导致土壤质地恶化,土层瘠薄,在喀斯特地区进一步可发展为石漠化	提取研究区 2015 年每公顷土壤侵蚀量(吨)栅格数据
		石漠化 C14	碳酸盐岩大面积出露,土地生产力下降,地表呈现岩石大面积裸露,类似荒漠化景观的土地退化过程	解译遥感影像,结合目视判别高精度在线地图及实地调查,提取石漠化空间位置、形状以及程度的矢量数据
	水文条件 B2	岩层含水量 C21	含水量强弱直接影响水资源调蓄能力,含水量越小则不利于喀斯特系统水文过程,干扰程度越大	将广西壮族自治区水文地质图空间配准处理,然后提取研究区岩层含水量数据

续表

目标层 Target level	准则层 Criterion level	指标层 Indicator level	指标含义 Indicator interpretation	处理方法 Processing methods
	极端气候 B3	不透水表面 C22	在地表-地下界面,不透水表面对于水体流动具有阻隔作用,水文效应将增加洪涝发生的频率与水体的污染负荷	提取研究区 2020 年地表不透水面栅格数据
		洪涝灾害 C31	洪水过程中,易发生滑坡、泥石流等地质灾害;同时,暴发的水体快速渗入喀斯特地下水层,剧烈改变喀斯特系统的水力状况,在极端情况下,洪水通过增加基岩内的水压来破坏斜坡的稳定性,从而对喀斯特系统造成干扰	对研究区内自公元起历史上记载发生洪涝灾害的空间点位拾取坐标、以洪水次数及灾害破坏强度为标准确定权重,进行核密度方法处理
		干旱灾害 C32	干旱使农作物生产减质减量,森林易发生火灾,喀斯特地上水面萎缩,地下水位下降,自然景观退化以及生态环境恶化	对研究区内自公元起历史上记载发生干旱灾害的空间点位拾取坐标、以干旱次数及灾害破坏强度为标准确定权重,进行核密度方法处理
	生物群落 B4	生物丰富度 C41	生物丰富度越高,生态系统越复杂,群落结构越稳定,更加耐受不利环境的干扰;反之,生物丰富度降低,则导致生态系统抵抗力稳定性越弱,同时喀斯特系统独特的物种受到损失	依据土地覆被类型及权重与生物丰富度映射关系 ^[32] ,通过 1980 年和 2020 年土地利用数据计算 40 年间生物丰富度下降程度,并以克里金法插值处理
		植被覆盖度 C42	植被对调节气候、涵养水源和保持水土功能具有重要作用,喀斯特地区森林生态系统遭破坏后很难恢复原貌,丧失生态功能与喀斯特美学价值	提取 1982、2020 年具有最大归一化植被指数的波段栅格数据,计算 1982 年至 2020 年植被覆盖度下降程度,并以克里金法插值处理
	社会经济 B5	农林种植 C51	过量施用化肥和农药会导致喀斯特地上岩-土-地下水系统受到污染;不合理的作物种植模式可能导致土层瘠薄,地下水位降低,加快土壤侵蚀与石漠化作用	提取 2020 年耕地及其他林地,并以克里金法插值处理
		工业污染 C52	工业生产排放气态、固态、液态化学污染物,污染大气会导致酸雨发生,污染土壤并向下渗透进入喀斯特地下水系统,造成水源污染,强烈干扰了喀斯特地区的居住环境,使喀斯特景观丧失美学品质,严重恶化水生态环境	对 2009 年至 2020 年国家重点监控企业名录中记录废气、废金属、污水废水企业空间点位拾取坐标,以被记录次数为权重进行核密度分析
		旅游活动 C53	对喀斯特景观资源的开发、相关设施的建设及游客数量的增多对喀斯特原始状态及演变过程造成破坏	对携程网旅游景点空间点位拾取坐标,以被评论热度分级确定权重,进行核密度分析,数据获取时间为 2022 年 8 月
		道路设施 C54	道路的建设作业及车辆的通行将形成机械振动,诱发碳酸盐岩塌陷	对各级交通道路以道路级别为权重进行核密度方法处理
		人口密度 C55	人口密度增加将利用更多水资源、土地资源等,对原始状态的喀斯特地表进行改造,改变了地质构造,直接威胁到喀斯特生态系统及景观资源的演替进程	提取研究区 2020 年每平方公里人口数量栅格数据

表 2 地理探测器所用主要地理因子

Table 2 The main geographical factors used in Geodetector

地理因子 Geographical factors	因子释义 Interpretation of factor	数据来源 Data sources
海拔 Altitude	平均海拔高度/m	ASTER GDEM 数字高程模型数据
坡度 Slope	平均坡度/(°)	以数字高程模型数据进行坡度分析
降水 Precipitation	1960—2021 年平均降水量/mm	数据来自中国气象要素年度空间插值数据集
气温 Temperature	1960—2021 年平均气温/℃	数据来自中国气象要素年度空间插值数据集
国内生产总值 Gross domestic product	2010 年公里网格生产总值/(万元/km ²)	数据来自中国公里网格 GDP 分布数据集

2 结果与分析

2.1 漓江流域喀斯特干扰评价体系指标权重及干扰评价等级

根据层次分析法和熵权法,在 yaahp 10.1 和 Excel 中得到两种方法计算出的各指标的权重值,再进行综合权重的计算。结果显示,准则层中的地质地貌、水文条件、极端气候、生物群落、社会发展的综合权重值分别为 0.433、0.039、0.106、0.096 和 0.336,指标层指标的权重范围为 0.013—0.180,其中,旅游活动、采石采矿、地质灾害及石漠化的干扰权重值较大,道路设施及水文条件相关指标干扰权重值较小(表 3)。

表 3 漓江流域喀斯特干扰指数指标权重

Table 3 The weight of karst disturbance index in the Lijiang River Basin

指标权重 Indicator weight	C11	C12	C13	C14	C21	C22	C31	C32	C41	C42	C51	C52	C53	C54	C55
AHP 权重 Weight obtained by AHP	0.182	0.118	0.052	0.056	0.026	0.052	0.081	0.040	0.045	0.045	0.041	0.067	0.114	0.027	0.054
熵权法权重 Weight obtained by entropy method	0.056	0.080	0.098	0.022	0.046	0.036	0.072	0.059	0.078	0.069	0.076	0.048	0.133	0.038	0.088
综合权重 Comprehensive weight	0.132	0.121	0.081	0.098	0.015	0.024	0.075	0.031	0.045	0.041	0.040	0.041	0.180	0.013	0.062

AHP:层次分析法 Analytic Hierarchy Process

通过空间分析、叠加运算方法,并依据自然断点法的阈值划分标准将干扰等级分为 5 类,由指标评价体系 5 个准则层 15 个指标要素计算得到的漓江流域喀斯特干扰评价体系目标层等级标准(表 4),结果表明干扰评价指数范围为 0.2—0.726,干扰等级按程度分为极轻微、轻微、显著、严重、极严重干扰。

表 4 漓江流域喀斯特干扰等级划分

Table 4 Classification of karst disturbance degree in the Lijiang River Basin

干扰等级 Disturbance level	I.极轻微 Extremely slightly	II.轻微 Slightly	III.显著 Significantly	IV.严重 Seriously	V.极严重 Extremely seriously
干扰评价指数 Disturbance evaluation index	0.200—0.253	0.253—0.321	0.321—0.407	0.407—0.527	0.527—0.726

2.2 漓江流域喀斯特干扰特征分析

2.2.1 漓江流域喀斯特指标层干扰特征

图 2 显示了归一化处理之后 15 个指标层干扰的空间分布特征,其中采石采矿、地质灾害、水文条件、极端气候灾害、社会经济等干扰的空间分布及干扰程度均有明显的地带性,表现为在流域中具有多中心及聚集性,而土壤侵蚀、石漠化、生物丰富度等干扰的分布状况较为离散并呈现簇状分布特点。结合各流域各指标层样点数据均值形成的雷达示意图(图 3)来看,指标层干扰在上中下游具有较大差异性。作为漓江源头以及漓江流域海拔最高处,上游西北部分是以猫儿山为主峰的山岳地貌区,具有典型的原生亚热带山地植被特征,保持了较为完整、健康的森林生态系统,整个区域受到人为活动扰动极小,在采石采矿、地质灾害、石漠化、不透水表面及社会经济等指标中都处于极轻微干扰状态。上游东部为兴安县城所在阶地地貌区,城区有水泥产业集群分布,工矿用地及受采挖的残破山体分布较为密集,采石采矿干扰极为严重,城区西部种植生产活动以及兴安至桂林市的高铁、公路交通干线也产生一定干扰。从整个上游来看,除兴安县城外的大部分区域岩层富水程度弱,岩层含水量指标干扰表现为较强,而在地质灾害、干旱灾害、生物丰富度、农林种植、旅游活动等指标层干扰明显弱于中游和下游。中游区域分为西部具有典型峰林地貌的桂林主城区以及东部为缓丘、阶地广泛分布的灵川县,主城区作为桂林市政府、经济、文化及社会公共服务职能中心,高强度、长时期的人类工程建设及社会经济活动,造成了多个维度受到强烈干扰,人口聚集导致各类资源开发的需求上升。因工程建设需求进行大规模山体开采以及道路设施密布,更易诱发喀斯特地质灾害,国家重点监控企业集中分布于此

加重工业污染,同时集中分布有两江四湖、靖江王府等多个高等级旅游区,高度发育的喀斯特峰林地质结构使主城区更易于受到洪水侵袭,使其采石采矿、地质灾害、不透水表面、极端气候灾害、工业污染、道路设施、人口密度指标呈现出较强的干扰程度。中游东部地势较高,大部分指标干扰程度处于极轻微等级。下游区域广泛分布着峰丛洼地及峰林平原地貌,是漓江流域喀斯特景观的精华部分,中国南方喀斯特自然遗产地核心区及缓冲区分布于此,极具美学价值的自然景观被作为旅游资源开发,配套观光设施的建设及游客数量不断增加威胁到动植物资源及其生境;平坦的地势对于农业活动有天然优势,农药化肥施用以及不合理的利用模式对景观资源及自然生态带来负面影响,同时易与极端气候共同造成严重的干旱灾害,二者形成恶性循环持续形成干扰;下游干扰指标表现为生物丰富度、植被覆盖度减少程度、农林种植及旅游活动的干扰程度强于上游和中游。

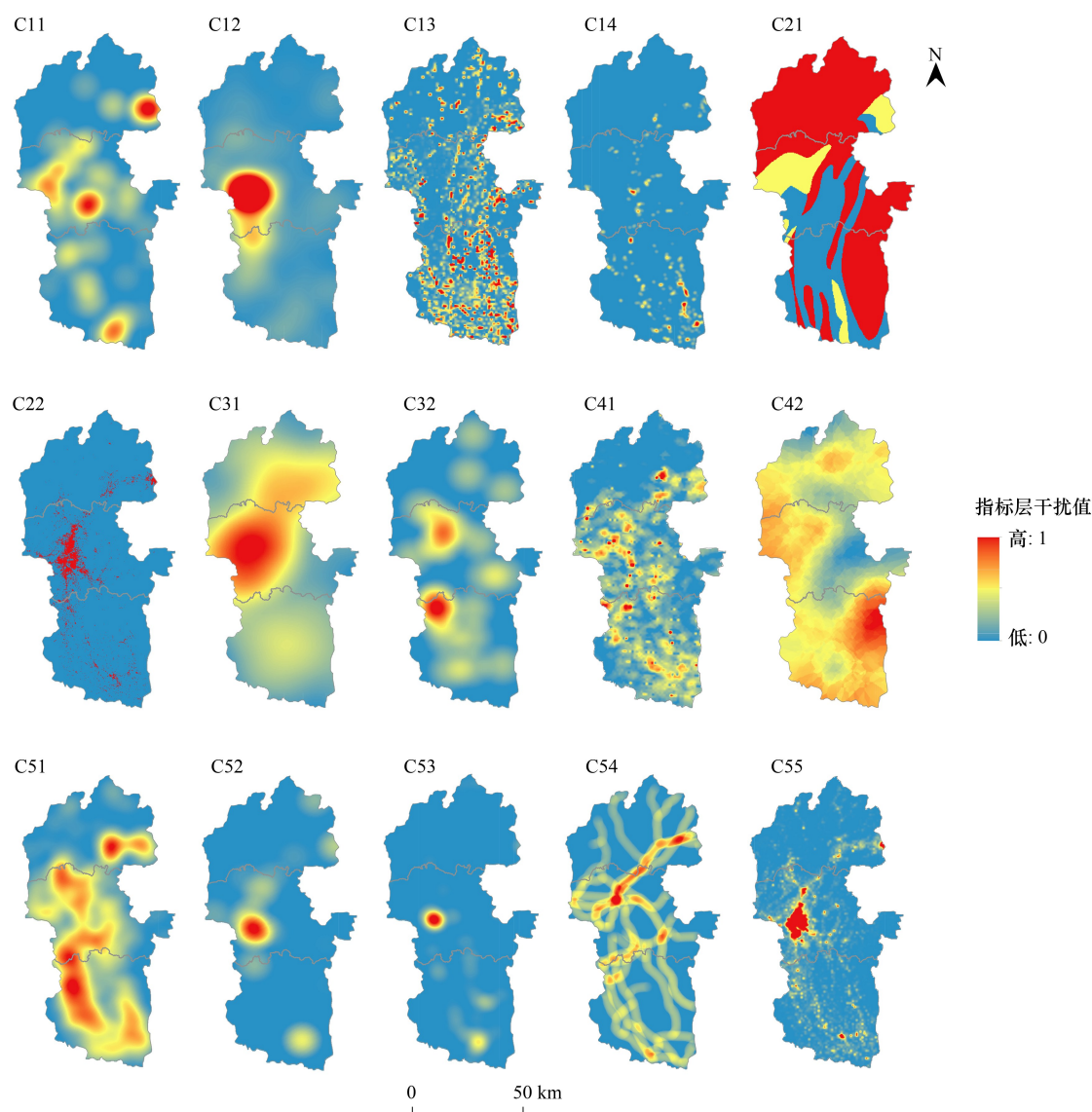


图2 漓江流域喀斯特指标层干扰的空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution of disturbance in karst indicator layer in the Lijiang River Basin

C11:采石采矿;C12:地质灾害;C13:土壤侵蚀;C14:石漠化;C21:岩层含水量;C22:不透水表面;C31:洪涝灾害;C32:干旱灾害;C41:生物丰富度;C42:植被覆盖度;C51:农林种植;C52:工业污染;C53:旅游活动;C54:道路设施;C55:人口密度

2.2.2 漓江流域喀斯特综合干扰特征

将指标层干扰数据通过栅格叠加运算得到准则层、目标层干扰数据,并将目标层数据即综合干扰按照自然断点法进行分类,从极轻微至极严重干扰分为五级。漓江流域喀斯特综合干扰指数即评价体系目标层(图4)在空间上显示出较强的地带性与差异性,其中上游东部、中游西部、下游中部呈现为高干扰聚集区域,而上游西北部、中游东部、下游东西两侧为低干扰区域。漓江流域各干扰等级中,极轻微和轻微干扰面积占流域总面积的58%,显著及更严重的干扰面积占总面积的42%,其中极严重面积干扰占3%,在西北部、中东部、西南部区域喀斯特综合干扰程度为极轻微、轻微干扰,在兴安县东部、桂林市城区、阳朔县分布着极严重干扰的高密度核心,并呈现向周围扩散的空间分布特征。综合干扰格局是指标层干扰及其权重共同作用的结果,兴安县东部的干扰高值主要形成原因是广泛的采石采矿活动与它的高权重值;桂林市城区是各类资源需求中心,同时人类对自然改造程度最高,多项指标均在较高干扰等级,形成了大规模高强度的干扰核心;“景观资源可持续利用”的主题显现出阳朔县喀斯特自然遗产地的价值,精品旅游观光区的主要属性职能以及旅游活动的最高权重值,使得阳朔县呈现出极严重干扰核心。

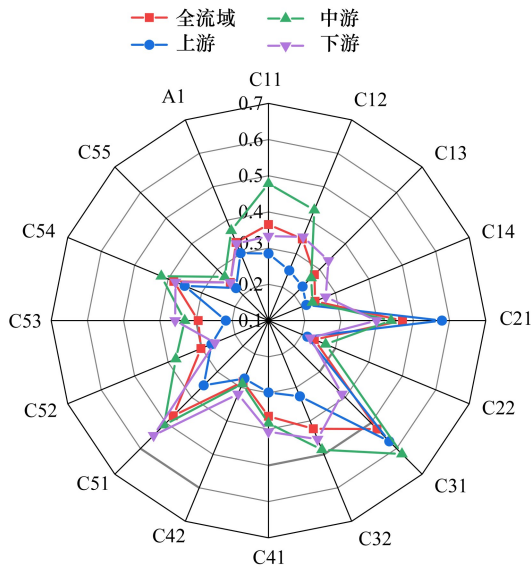


图3 漓江流域喀斯特指标层干扰均值示意图

Fig.3 Diagram of disturbance mean value of karst indicator layer in the Lijiang River Basin

A1:综合干扰指数

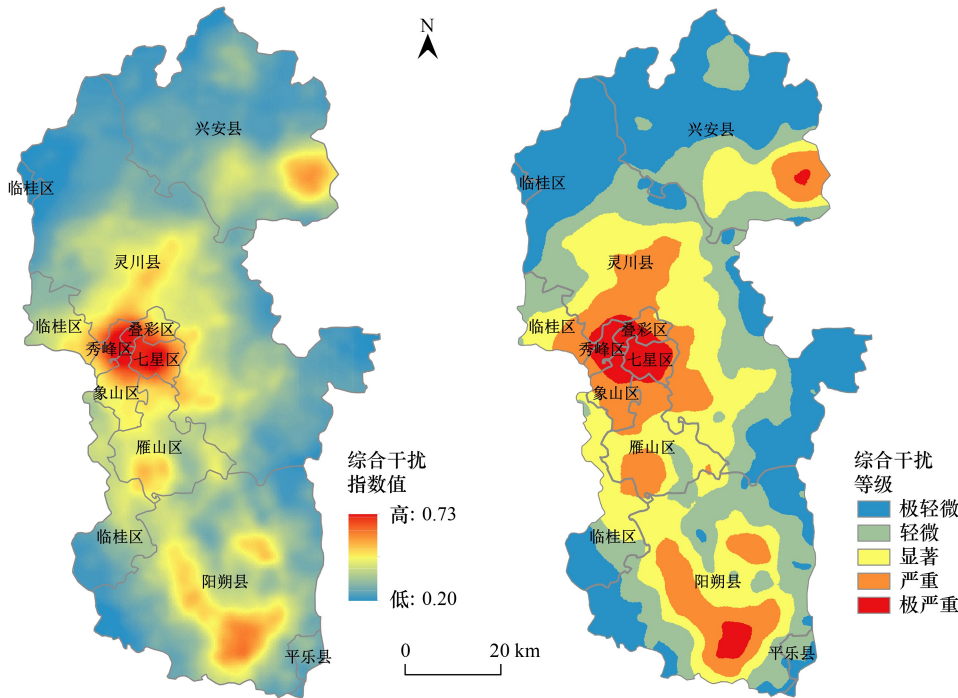


图4 漓江流域喀斯特综合干扰评价结果空间分布图

Fig.4 Spatial distribution of karst comprehensive disturbance assessment in the Lijiang River Basin

小提琴图 (Violin Plot) 能够展示多组数据的分布状态及概率密度, 图 5 中琴体轮廓越宽则表明数据越集中分布于该处, 概率密度越大; 反之, 琴体轮廓越窄, 数据越在该处分散, 具有越小的概率密度。同时图 5 集成显示了数据 25%—75% 箱体、中位数、均值以及具体数据分布。分析表明, 漓江流域喀斯特干扰评价体系目标层指数即综合干扰指数, 在全流域为 0.336, 干扰等级为显著干扰; 其中, 准则层中极端气候维度导致的干扰程度最强, 干扰指数均值为 0.497, 且在 0.2—1.0 范围内皆有分布, 说明极端气候所导致的洪涝与干旱灾害同时对喀斯特生态系统及景观资源形成显著的干扰, 而地质地貌、水文条件、生物群落、社会发展维度干扰指数范围为 0.315—0.329, 干扰等级为轻微干扰。从各子流域来看, 上游综合干扰指数为 0.281, 干扰等级分别为轻微干扰, 其准则层中地质地貌、生物群落、社会发展维度的干扰程度皆弱于中游与下游。中游指数为 0.383, 是综合干扰指数最高的区域, 其中地质地貌、极端气候维度干扰程度均值皆明显强于中、下游。下游指数则为 0.344, 干扰等级皆为显著干扰, 其社会经济维度干扰均值略高于中游, 而水文条件、极端气候维度干扰程度处于较低水平。

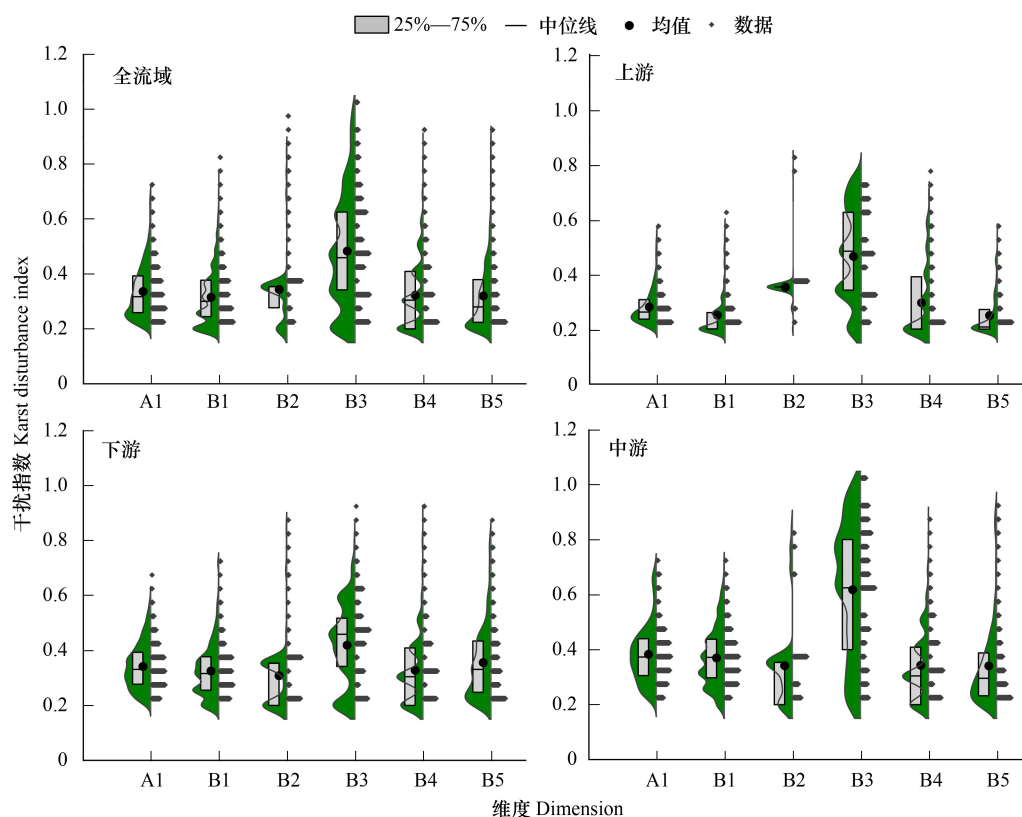


图 5 漓江流域喀斯特干扰指数小提琴图

Fig.5 Violin plot of karst disturbance index in the Lijiang River Basin

A1: 综合干扰指数; B1: 地质地貌; B2: 水文条件; B3: 极端气候; B4: 生物群落; B5: 社会经济

2.3 喀斯特干扰指数空间相关性分析

应用地理探测器计算作为自变量的海拔、坡度、降水、气温、生产总值对作为因变量的综合干扰指数的解释力, 对漓江流域喀斯特干扰指数空间分异进行分析, 结果显示综合干扰指数受到地理环境、气候条件、经济发展地理因子的共同影响 (表 5)。其中, 海拔对综合干扰指数解释力最高, q 值为 0.436, 坡度与国内生产总值解释力较为显著且数值相近, q 值为 0.228 与 0.231, 表明海拔高度及地形地貌的地理环境与社会经济因素对喀斯特综合干扰具有显著的关联性。在海拔较低并且地势较平的区域, 易于人类利用自然资源开展生产生活活动以及以各类建设工程改造地表, 影响自然生态环境以及喀斯特演变过程, 造成显著干扰。而在海拔较

高且地势较陡的地区,不适宜人类居住生活,但易于发生自然干扰,如喀斯特地区坡面陡、土层薄的生境使生物生存受到更大的胁迫,植被覆盖率较低,且受重力作用易发生土壤侵蚀及崩塌滑坡灾害。国内生产总值是社会经济发展的体现,人类开发自然资源获取发展将对生态环境造成影响,与综合干扰形成显著的关联性。而气候条件对综合干扰指数解释力较小,降水与气温 q 值分别为 0.072 与 0.031,对喀斯特综合干扰具有稍弱的关联性。

表 5 地理因子对综合干扰指数解释力

Table 5 Explanatory power of geographic factors to the comprehensive disturbance index

地理因子 Geographical factors	坡度 Slope	海拔 Altitude	降水 Precipitation	气温 Temperature	国内生产总值 Gross domestic product
q	0.228	0.436	0.072	0.031	0.231

交互探测模型旨在探测各自变量在解释因变量时是独立产生影响,还是相互作用后产生增强或者减弱解释能力,将坡度、海拔等因子及指标层指标通过交互探测模型运算,两两交互作用探测结果显示(图 6),任意因子两两交互的作用值范围为 0.11—0.82,说明漓江流域喀斯特综合干扰指数分异是影响因子及各指标共同作用的结果。其中,采石采矿与旅游活动,以及农林种植与工业污染等交互作用最大,表明交互因子即干扰指标在漓江流域的空间分布和干扰强度具有一致性。采石采矿几乎不可逆地对喀斯特景观及生态环境造成灾难性破坏,空间上与旅游活动相一致,严重破坏了景观资源完整性、美学观赏价值。采石采矿也与地质灾害、工业污染、农林种植、生物丰富度下降程度也具有较强空间关联,采石采矿一定程度上诱导了地质灾害的发生,与工业生产活动的空间一致性减少了运输成本,生物丰富度的下降表明采石采矿直接破坏了生物生境,胁迫生物生存。而生物丰富度下降程度与农林种植及旅游活动的较高探测值显示出人类活动对生物的不利影响。农林种植与工业污染的强交互作用表明漓江流域第一、第二产业在空间位置上较为紧密,农药化肥施用及工业污染物排放共同增强喀斯特干扰程度,同时,旅游活动也与农林种植和工业污染共同形成强关联关系,一定程度上表现产业发展的集聚模式,也表现出山地城市中可利用土地的稀缺性。一般情况下,较好的水热条件利于植物生长。结果显示降水与植被覆盖度减少程度的交互作用值为 0.11,交互作用较小,一方面是因为喀斯特地区水文时空情势不均并且喀斯特具有漏失结构而平均降水量对于植物生长的作用存在限制,另一方面原因是近 40 年人类对土地覆被的重度改造以及当地森林管理政策。洪涝灾害、人口密度等干扰指标以及地理因子中海拔高度,与其他指标或因子的两两交互作用中,均呈现出较强一致性。出现这种交互作用结果一方面是由于在指标体系中,如果指标具有相对较高的综合权重,将导致指标在综合干扰指数中贡献力较大从而增强探测交互作用;另一方面,综合干扰是一个包含“岩-土-水-气-生-人”要素的整体系统,各项干扰不是各自独立发生、存在,而是具有直接或间接的作用过程及反馈机制,共同对喀斯特生态系统及景观资源造成干扰。

3 讨论与结论

通过空间量化多维度生态干扰对喀斯特地区的影响,能够直观表达干扰状况并凸显严重干扰区域,为后续重点区域生态治理提供依据。在喀斯特干扰评价体系的发展及应用中,Bauer 等^[15]根据评价区域的特征增加了洞穴磷酸盐开采程度以及军事活动干扰;Kovarík 等^[16]利用高分辨率遥感数据,通过地理信息系统模型增强评价结果的准确性;Porter 等^[17]增加了岛屿特征的评价指标,并对指标类型赋予权重值;He 等^[18]通过问卷调查以公众对景观变化感知为视角,测度了干扰等级。本文在继承原始评价体系^[14]地貌、水文、气候、生物、文化维度框架的基础上进行创新,考虑了漓江流域喀斯特特征,强调人类—自然耦合系统性以及喀斯特地质结构特殊性,在构建评价指标体系时设置了采石采矿、开发建设、生产生活等直接人类活动干扰,同时综合考虑了土壤侵蚀、石漠化、极端气候、生物群落等自然因素干扰,将各指标赋予主客观综合权重,从各层次模拟真实的喀斯特干扰空间特征,在辨识主要影响因素方面跟其他报道没有冲突^[18]。

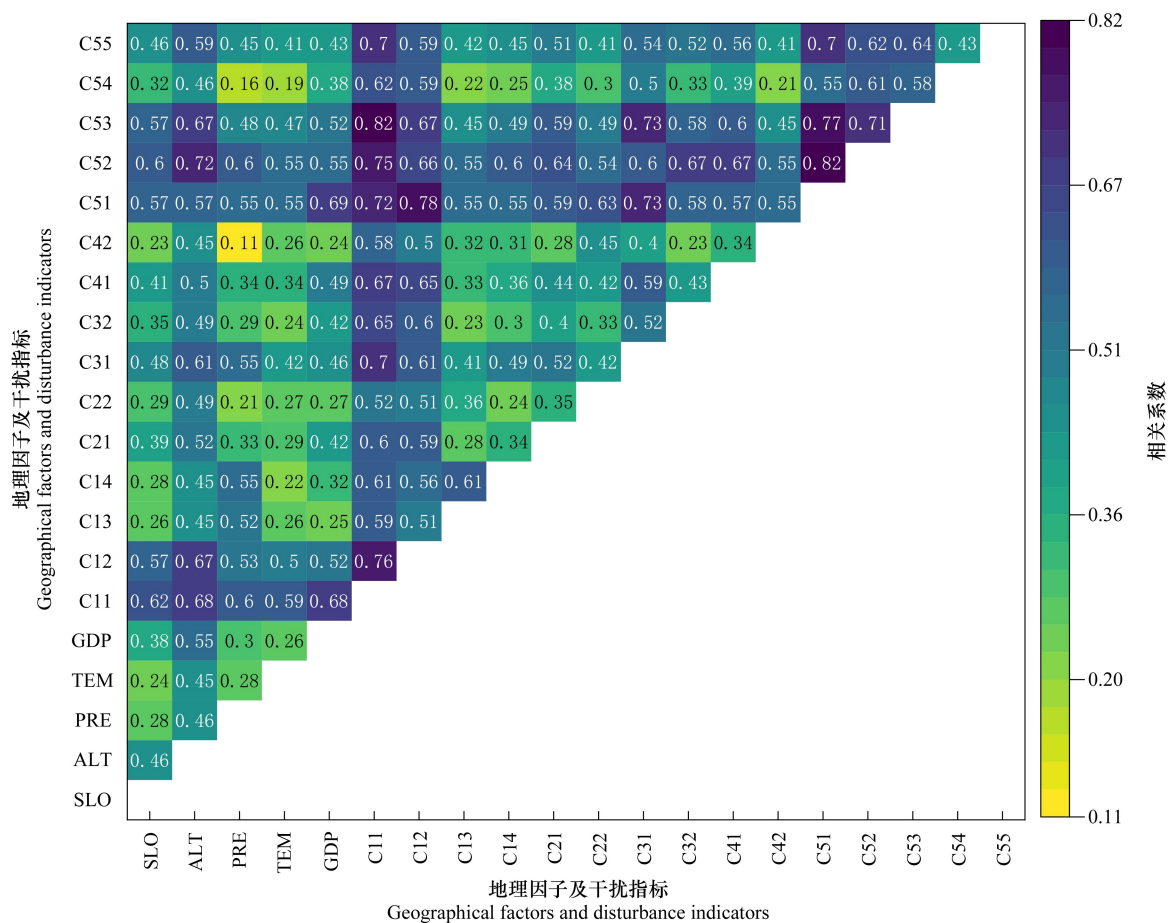


图6 地理因子及干扰指标交互作用探测结果

Fig.6 Detection results of interaction between geographical factors and disturbance indicators

SLO:坡度;ALT:海拔;PRE:降水;TEM:气温;GDP:国内生产总值

喀斯特地区资源开发利用规范化是我国西南喀斯特地区生态文明建设的重点,也是平衡人类社会经济发展与喀斯特生态系统健康完整的关键,综合干扰空间量化评估对开展精细化监测管控具有较大指导意义与应用潜力。在喀斯特相关研究中,舒英格等^[33]选择人口密度、人均耕地面积、人均造林面积等评价指标,对农业生态脆弱性进行评价,划分脆弱等级并提出相应管控措施促进喀斯特农业生态系统的生产力、稳定性、持续性;王茜等^[34]设置了自然与人为两个维度的评价体系,以多时期评价展现脆弱性动态过程;蔡振饶等^[35]利用协调发展度模型揭示城市化—生态环境耦合协调性演化进程,结果表明两大系统综合水平与耦合协调性呈现为较强互相依赖性。从本研究的干扰构成来看,子流域各维度具体干扰的强度及规模具有较大差异,然而在耦合干扰系统,某种程度上人类活动加剧了自然干扰,相当于自然干扰也是人类干扰的间接体现,同时自然干扰对人类活动具有反馈作用。在实际应用中,可探究更深层次的干扰机制,制定更加精细化的生态系统管理策略,另外可进行时空数据更新并建立多时序干扰数据库,针对突现的干扰能够快速诊断,实施具有针对性与时效性的措施。

本研究所构建的评价体系模型与空间信息量化方法易于理解、操作简单。喀斯特干扰研究面临的一个主要挑战是缺乏有关人类影响的长期和定量数据,此处作为探索性应用研究,在多维干扰指标完整性、时空数据匹配性以及指标叠加关系等方面仍具有较大的改进空间:(1)尚有指标未纳入评价体系,例如,地下喀斯特所受干扰包括矿物、沉积物以及石笋石钟乳受到的影响,以及地下水位的变化、洞穴生物群落状况等,进一步完善干扰指标的类别,获取更多空间数据对评估结果的准确性和完整性非常关键;(2)由于可获取数据有限,本

研究采用的空间数据来源不一,导致在时间尺度及空间分辨率上存在差异,一定程度上会造成综合评价与现实状况的误差,在未来数据充足的情况下可提升数据准确性,并开展多时序干扰研究加深时空关联性,实现动态化评价;(3)干扰是具有耦合性质的复杂系统,不同干扰指标之间可能存在协同、拮抗以及非线性复合效应,当前研究采用的仍是基于不同权重的线性累加计算形式,对于喀斯特多维干扰反馈作用关系、耦合协调机制有待深入研究,增强评价的科学性。在未来对数据、模型及方法的更新和改进,对我国喀斯特地区生态系统脆弱性研究以及生态管理具有重要意义。

本文基于评价体系、多源数据以及空间量化模型,探究了自然—人为干扰对漓江流域喀斯特的影响,验证了喀斯特干扰指数评价这一方法的可行性,评价结果表明:单个喀斯特干扰指标表现出聚集性及分散性的不同分布特征,综合干扰评价指数总体上呈现出东部与北部低、西部与南部高的分布特征。漓江流域喀斯特综合干扰指数为 0.336,干扰等级为显著干扰,其中中游作为桂林市主城区所在地,广泛的开发建设活动改变了原始地形地貌及生态服务功能使综合干扰指数高于上、下游。地理探测器运算显示,对综合干扰指数的解释力较强的地理因子为海拔、坡度及国内生产总值,极端气候灾害、各项生产建设活动等干扰指标以及海拔高度具有较强交互作用。喀斯特地区受到自然、人为因素影响时易损程度高,各因素各指标的干扰不仅对喀斯特景观特征造成直接破坏,而且对自然生态过程和喀斯特发育演变过程产生负面影响,可以说保持景观资源健全美观的同时就是在保护自然生态系统健康完整,未来应结合干扰等级、干扰构成的空间分布特征提出针对性的生态环境保护、景观资源保育策略措施。

参考文献(References):

- [1] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132: 1-12.
- [2] 何霄嘉,王磊,柯兵,岳跃民,王克林,曹建华,熊康宁. 中国喀斯特生态保护与修复研究进展. *生态学报*, 2019, 39(18): 6577-6585.
- [3] 袁道先,蒋勇军,沈立成. 现代岩溶学. 北京: 科学出版社, 2016.
- [4] Sweeting M. Karst in China: its geomorphology and environment. Springer-Verlag, 1995.
- [5] 王巨,谢世友,戴国富. 西南岩溶区土壤生态系统退化研究. *中国农学通报*, 2011, 27(32): 181-185.
- [6] 汪疆玮,蒙古军. 漓江流域干旱与洪涝灾害生态风险评价与管理. *热带地理*, 2014, 34(3): 366-373.
- [7] 于维莲,董丹,倪健. 中国西南山地喀斯特与非喀斯特森林的生物量与生产力比较. *亚热带资源与环境学报*, 2010, 5(2): 25-30.
- [8] 侯文娟,高江波,彭韬,吴绍洪,戴尔阜. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展. *地理科学进展*, 2016, 35(3): 320-330.
- [9] Yu M Z, Song S A, He G Z, Shi Y J. Vegetation landscape changes and driving factors of typical Karst region in the anthropocene. *Remote Sensing*, 2022, 14(21): 5391.
- [10] 高吉喜,蔡明勇,张新胜,申文明,史雪威,肖如林. 大尺度生态干扰风险评估技术方法及应用研究. *中国环境科学*, 2021, 41(11): 5274-5281.
- [11] 王荣,蔡运龙. 西南喀斯特地区退化生态系统整治模式. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 1070-1080.
- [12] Drew D. Agriculturally induced environmental changes in the Burren Karst, Western Ireland. *Environmental Geology*, 1996, 28(3): 137-144.
- [13] Watson J, Hailton-Smith E, Gillison D, Kiernan K. Guidelines for cave and Karst protection. International Union for the Conservation of Nature, Gland, Switzerland., 1997.
- [14] Van Beynen P, Townsend K. A disturbance index for Karst environments. *Environmental Management*, 2005, 36(1): 101-116.
- [15] Bauer C, Kellerer-Pirklbauer A. Human Impacts on Karst Environment: a case study from Central Styria. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 2010, 54(2): 1-26.
- [16] Kovarik J L, van Beynen P E. Application of the Karst Disturbance Index as a raster-based model in a developing country. *Applied Geography*, 2015, 63: 396-407.
- [17] Porter B L, North L A, Polk J S. Comparing and refining Karst disturbance index methods through application in an Island Karst setting. *Environmental Management*, 2016, 58(6): 1027-1045.
- [18] He G Z, Zhao X, Yu M Z. Exploring the multiple disturbances of Karst landscape in Guilin World Heritage Site, China. *CATENA*, 2021, 203: 105349.

- [19] 袁道先, 章程. 岩溶动力学的理论探索与实践. 地球学报, 2008, 29(3): 355-365.
- [20] 蒋忠诚, 袁道先, 曹建华, 覃小群, 何师意, 章程. 中国岩溶碳汇潜力研究. 地球学报, 2012, 33(2): 129-134.
- [21] 袁道先. 岩溶石漠化问题的全球视野和我国的治理对策与经验. 草业科学, 2008, 25(9): 19-25.
- [22] 任远, 王冬梅, 信忠保. 漓江流域水陆交错带植被配置型式分类及生态特征. 生态学报, 2014, 34(15): 4423-4434.
- [23] 邓晓军, 许有鹏, 翟禄新, 刘娅, 李艺. 城市河流健康评价指标体系构建及其应用. 生态学报, 2014, 34(4): 993-1001.
- [24] 赵海娟, 肖琼, 吴夏, 刘凡, 苗迎, 蒋勇军. 人类活动对漓江地表水体水-岩作用的影响. 环境科学, 2017, 38(10): 4108-4119.
- [25] 向芸芸, 蒙吉军. 漓江流域旅游开发对景观格局干扰的时空分异. 山地学报, 2014, 32(1): 11-20.
- [26] 胡金龙, 周志翔, 滕明君, 罗楠. 基于土地利用变化的典型喀斯特流域生态风险评估——以漓江流域为例. 应用生态学报, 2017, 28(6): 2003-2012.
- [27] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [28] 王富喜, 毛爱华, 李赫龙, 贾明璐. 基于熵值法的山东省城镇化质量测度及空间差异分析. 地理科学, 2013, 33(11): 1323-1329.
- [29] 禹文豪, 艾廷华. 核密度估计法支持下的网络空间 POI 点可视化与分析. 测绘学报, 2015, 44(1): 82-90.
- [30] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程. 北京: 科学出版社, 2006.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] 郭春霞, 诸云强, 孙伟, 宋佳. 中国 1km 生物丰度指数数据集. 全球变化数据学报: 中英文, 2017, 1(1): 60-65, 183.
- [33] 舒英格, 彭文君, 周鹏鹏. 基于灰色三角白化权集对分析模型的喀斯特山区农业生态环境脆弱性评价. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2680-2686.
- [34] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 岳启发, 陈星宇, 石小倩. 滇东南喀斯特区域生态脆弱性的时空演变及其影响因素. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2180-2190.
- [35] 蔡振饶, 李玉红, 李旭东. 贵阳市城市化与生态环境耦合研究. 生态科学, 2017, 36(5): 196-203.