

◆地球科学◆

近20年桂西南生态系统健康时空变化及其驱动因素分析^{*}黄丽芳^{1,2,3},覃星铭^{1,2,4**},胡宝清^{1,2},黄思敏^{1,2,3},韦雯雯^{1,2},陈思琦^{1,2,3}

(1. 南宁师范大学,北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,广西南宁 530001;2. 南宁师范大学,广西地表过程与智能模拟重点实验室,广西南宁 530001;3. 南宁师范大学地理科学与规划学院,广西南宁 530001;4. 自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室,广西桂林 541004)

摘要:探究桂西南生态系统健康状况,可为区域可持续发展提供理论依据。本文通过构建“活力(Vigor)-组织力(Organization)-恢复力(Resilience)-服务力(Services)”(VORS)模型分析区域生态健康,借助地理探测器探讨影响生态系统健康的驱动因素。结果表明:①20年间桂西南生态系统健康指数均值由2000年的0.446增加至2020年的0.478,整体上呈改善趋势,这得益于退耕还林、水土保持、石漠化治理等一系列生态修复工程的实施。②在空间分布格局上,桂西南生态系统健康总体上西北部及中部地区优于东南部地区,西北部及中部区域以亚健康状况为主,而病态和不健康状况则分布在东南部南宁市主城区。③土地垦殖率、平均海拔、夜间灯光强度、人口密度、坡度是影响区域生态系统健康的主要因子,其解释力均大于或等于0.45;与单因子相比,自然因子和人文因子的交互作用对区域生态系统健康的解释力更强。在今后发展中应加强协调区域生态环境保护与经济高质量发展,提高区域生态系统健康水平。

关键词:生态系统健康;VORS模型;地理探测器;驱动因素;桂西南

中图分类号:X826 文献标识码:A 文章编号:1002-7378(2023)03-0268-12

DOI:10.13657/j.cnki.gxkxyxb.20230822.002

自然生态系统能为人类社会提供粮食生产、气候调节等各种社会发展能力,健康的自然生态系统是人类可持续发展的基础保证,对推动人与自然和谐共生有着重要意义^[1]。随着社会经济的发展,自然生态空

间减少,生态环境问题凸显,影响了生态系统的格局和功能^[2,3]。在此背景下,生态系统健康已经成为当前国际生态领域研究的重点^[4]。对生态系统健康进行定量评价可以客观地了解生态环境的状况,识别生

收稿日期:2023-04-26

修回日期:2023-07-25

^{*}国家自然科学基金面上项目“喀斯特峰丛洼地土壤养分过程及其生态系统服务权衡”(42071135),广西自然科学基金面上项目(2023GXNSFAA026440),广西高校中青年教師科研基础能力提升项目(2021KY0388),自然资源部岩溶生态系统与石漠化治理重点实验室开放基金(KDL202104),大学生创新训练项目(202210603070)和自然资源数字产业学院建设项目资助。

【第一作者简介】

黄丽芳(1998-),女,在读硕士研究生,主要从事生态系统与生态环境评价研究。

【**通信作者】

覃星铭(1983-),男,高级工程师,硕士生导师,主要从事岩溶水土研究,E-mail:qxm212@nnnu.edu.cn。

【引用本文】

黄丽芳,覃星铭,胡宝清,等.近20年桂西南生态系统健康时空变化及其驱动因素分析[J].广西科学院学报,2023,39(3):268-279.

HUANG L F, QIN X M, HU B Q, et al. Analysis of Spatial and Temporal Changes in Ecosystem Health and Its Drivers in Southwest Guangxi in the Last 20 Years [J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2023, 39(3): 268-279.

态环境问题突出的区域,为区域生态环境管理提供依据。

西南喀斯特地区是我国五大生态环境脆弱区之一,由于喀斯特地区独特的地表-地下双层地质结构以及人类活动的双重影响,该地区具有生态敏感性高、抗干扰能力弱和恢复难度大等特点^[5-7]。在大力推进生态环境保护和高质量发展的背景下,如何量化喀斯特地区的生态系统健康水平,厘清区域生态系统健康的驱动机制,是一项亟待解决的科学问题。由于喀斯特生态系统宽广而复杂,当前主要通过模型来评估喀斯特生态系统健康,包括“压力-状态-响应”(PSR)模型^[8,9]、“驱动-压力-状态-冲击-响应”(DPSIR)模型^[10]、“活力-组织力-恢复力”(VOR)模型^[11]等。PSR 和 DPSIR 模型主要强调人与环境的相互作用,并不能完全揭示生态系统的复杂性和健康状况^[12]。VOR 模型可用于生态系统健康诊断,该模型考虑了土地利用和景观格局的影响,但它只关注生态系统的内部属性,忽略了生态系统服务能力的评估,未能很好地将生态系统与社会系统联系起来^[13]。整体来说,针对喀斯特地区的生态系统健康评价相对较少,目前还没有一套适用于喀斯特生态系统健康评价的标准体系,影响喀斯特生态系统健康的驱动因子尚不清楚^[14]。

作为生态系统可持续发展的基础,生态系统健康反映了生态系统满足人类发展合理需求的能力,其健康状况直接或间接影响人类福祉。而生态系统服务则体现了自然为人类提供福祉的能力,反映了人类社会与生态系统之间的直接联系,是对各种生态因素和社会环境变化的响应,因而将生态系统服务纳入生态系统健康评估具有重要的意义^[15]。Costanza 等^[16]在 VOR 模型的基础上考虑了生态系统服务对生态系统健康的影响,提出“活力(Vigor)-组织力(Organization)-恢复力(Resilience)-服务力(Services)”(VORS)模型。该模型既考虑了生态系统服务功能的重要性又考虑了生态系统的健康状况,加强了自然因素与人文因素的联系,充分体现了区域生态系统的内在性和复杂性特征,弥补了前述评估方法的不足,度量了空间实体的可持续状态和生态系统服务的供给能力,有效实现了生态系统功能与状态属性的结

合^[17,18]。桂西南地区是我国西南喀斯特地区的重要组成部分,是我国西部重要的生态廊道。随着经济社会的发展,人地矛盾突出,石漠化问题加剧,影响着区域的可持续发展。为促进桂西南地区生态系统的恢复与保护,有必要对区域生态系统健康进行评价。基于此,本文通过 VORS 模型构建桂西南喀斯特地区生态系统健康评估框架,并借助地理检测器探讨影响生态系统健康的驱动因素,以期为区域生态环境保护与修复及其可持续发展等提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

桂西南地区位于广西西南部,地理坐标为 105°32' - 108°36'E、21°36' - 24°18'N,包括南宁市、百色市、崇左市所辖地区(图 1),总面积约 75 635 km²。北与贵州省接壤,西与云南省、越南接壤,区域内喀斯特地貌发育,地势由西北向东南降低,左、右江等江河贯穿其中。气候为亚热带季风气候,夏季高温多雨,冬季温和少雨^[19]。年平均气温为 20 - 23 °C,年平均降水量为 1 200 - 1 800 mm。据《广西统计年鉴》,截至 2020 年,年末常住人口约 1 441.98 万人,地区生产总值达 6 870.02 亿元。受岩溶地表-地下双层地质结构以及人类活动的影响,区域普遍存在水土流失、旱涝灾害和石漠化等生态环境问题,人地矛盾严峻,自然生态环境本底脆弱。

1.2 数据来源及预处理

本研究涉及的数据主要包括 2000、2010、2020 年的多源遥感数据以及社会统计数据(表 1)。多源遥感数据包括数字高程模型(DEM)、归一化植被指数(NDVI)、土地利用数据、夜间灯光数据、气温降水数据,均通过 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.8 对数据进行投影、图像镶嵌和裁剪等预处理。通过 DEM 提取坡度、坡向、平均海拔等数据;按中国科学院资源环境科学与数据中心的分类标准将地表覆被类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地 6 类,同时基于土地利用数据在 ArcGIS 10.8 和 Fragstats 4.2 平台提取景观格局指数;其他数据均通过 ArcGIS 10.8 的空间分析方法提取。

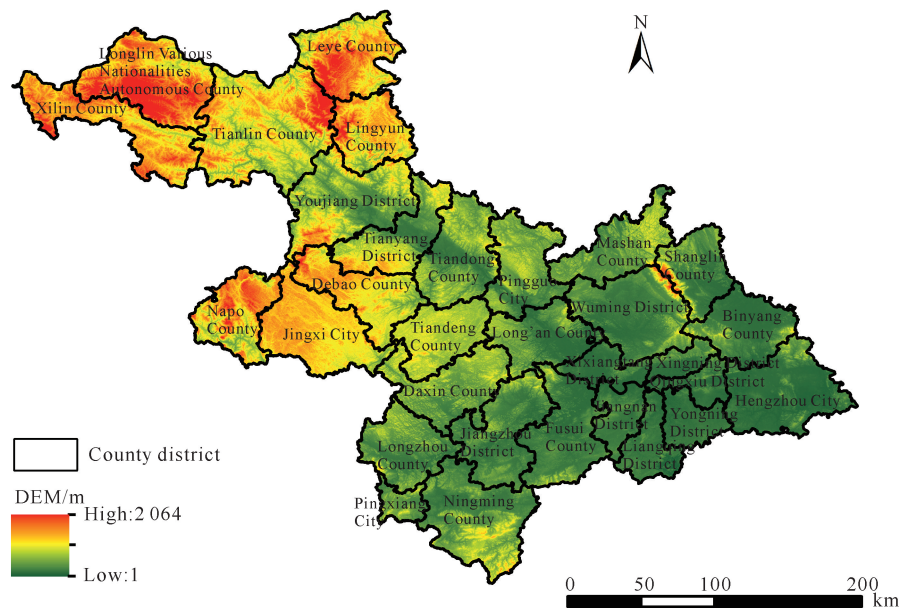


图 1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location diagram of the study area

社会统计数据包括粮食播种面积、粮食产量、全国平均粮食价格、人均 GDP、经济密度、人口密度、土地垦殖率等,通过插值法弥补个别数据缺失的情况。其中,经济密度 = 国内生产总值/区域面积^[19],人口密度 = 区域人口数量/区域面积^[20],土地垦殖率 = 区

域耕地面积/区域面积^[21]。为保证数据的准确性与可计算性,客观地评价桂西南生态系统健康,通过无量纲化模型对数据进行归一化处理,使得各项指标在 0 与 1 之间。

表 1 数据来源与描述

Table 1 Data sources and descriptions

数据类型 Data types	来源与描述 Source and description
Digital Elevation Model (DEM)	GDEM V3 30 M resolution digital elevation data from Geospatial Data Cloud (https://www.gscloud.cn/)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	Spatial distribution dataset of China's annual vegetation index with a spatial resolution of 1 km from the Centre for Resource and Environmental Science and Data, Chinese Academy of Sciences (https://www.resdc.cn/)
Land use data	30-metre land cover dataset for China from 1985 to 2022 (http://doi.org/10.5281/zenodo.4417809)
Night light data	Annual dataset on night lighting in China from Resource and Environmental Science and Data Centre of the Chinese Academy of Sciences (https://www.resdc.cn/)
Temperatures	Annual mean temperature data at 1 km resolution for China from National Earth System Science Data Centre (http://www.geodata.cn/)
Precipitation	Annual precipitation data at 1 km resolution for China from National Earth System Science Data Centre (http://www.geodata.cn/)
Statistics on food sown area, food production, national average food prices, GDP per capita, etc.	Guangxi Statistical Yearbook, China Statistical Yearbook (Township), China Yearbook of Agricultural Price Survey (https://www.cnki.net/)

1.3 方法

1.3.1 生态系统健康评估体系的构建

一个健康的区域生态系统应具备一定的生产力和代谢能力,保持自身结构和功能的完整性,具备一定的自我调节能力,以及为人类提供稳定、可持续的

生态系统服务的能力^[22]。在总结已有研究成果的基础上^[23,24],通过 VORS 模型构建桂西南生态系统健康评估框架,并借助地理检测器探讨影响生态系统健康的驱动机制,如图 2 所示。

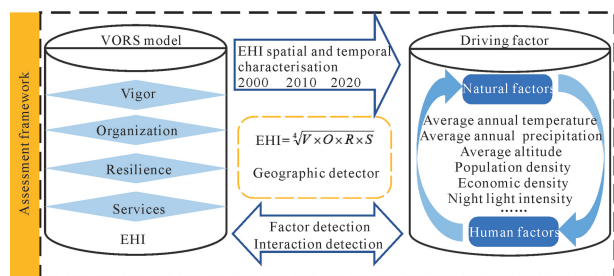


图 2 桂西南生态系统健康评估框架

Fig. 2 Ecosystem health assessment framework of Southwest Guangxi

1.3.2 VORS 模型

生态系统健康指数计算公式如下：

$$EHI = \sqrt[4]{V \times O \times R \times S}, \quad (1)$$

式中, EHI 为生态系统健康指数, V 为活力, O 为组织力, R 为恢复力, S 为服务力。V、O、R、S 的选取及计算方式如后续所述。参考已有研究成果^[25,26], 将 EHI 的取值范围按照等值法划分为 5 类等级, 如表 2 所示。

表 2 桂西南生态系统健康评价分级标准

Table 2 Grading standard of ecosystem health assessment in Southwest Guangxi

分值区间 Score interval	健康状况 State of health
<0.2	Sickness
0.2-0.4	Unhealthy
0.4-0.6	Sub-health
0.6-0.8	Health
0.8-1.0	Pretty healthy

①活力评估。生态系统活力是重要的生态系统功能之一, 是系统新陈代谢或初级生产力能力的重要体现。归一化植被指数 (NDVI) 反映了植被的生产能力, 参考周玲燕等^[27]的研究, 选用 NDVI 来表征生态系统活力。

②组织力评估。生态系统组织力是系统各组成结构间的相互作用, 反映了系统结构的稳定性、复杂性, 其结构越复杂生态系统越健康, 该指标层通常受景观异质性和景观连通性影响^[28]。参考曾晨等^[29]的研究, 选用香浓多样性指数 (SHDI)、香浓均匀度指数 (SHEI)、景观连通性指数 (CONTAG)、景观分割度指数 (DIVISION) 来衡量生态系统组织力。其中, SHDI、SHEI 是景观异质性的集中表征, 异质性越高景观越稳定, 景观组织力愈强; CONTAG、DIVISION 表示景观的连通性, 景观连通性愈高愈有利于

物种间的迁徙、不同斑块之间的交流, 则景观组织力愈强。根据刘一鸣等^[30]的研究, 在权重设定上, 考虑景观异质性和连通性对生态系统组织力同等重要, 赋予同等权重, 公式如下：

$$O = 0.25 \times SHDI + 0.25 \times SHEI + 0.25 \times CONTAG + 0.25 \times DIVISION. \quad (2)$$

③恢复力评估。生态系统恢复力是在遇到外部干扰情况时生态系统仍保持原有结构和功能的能力, 如未利用土地具有较高的恢复力, 在受到外界干扰后可以快速恢复原状。大体上来说, 不同土地利用类型的属性越接近自然生态系统, 受到外界干扰后其恢复能力愈强。参考周启刚等^[31]对不同土地利用类型的恢复力系数进行赋值, 耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地分别为 0.40、0.80、0.65、0.80、0.20、1.00。生态系统恢复力计算公式如下：

$$R = \sum_{i=1}^n A_i \cdot T_i, \quad (3)$$

式中, n 表示土地利用类型数量, A_i 表示第 i 种土地利用类型所占的面积比例, T_i 为第 i 种土地利用类型的生态系统恢复力系数。

④服务力评估。生态系统服务是指自然生态环境为人类社会所提供的生产、发展的各种产品和惠益, 通过生态系统服务的货币化价值来表征生态系统服务力。本研究以谢高地等^[32]改进后的中国生态系统单位面积生态服务当量表为基础, 结合桂西南土地利用类型进行修正和计算。查阅《广西统计年鉴》《中国县域统计年鉴》《中国农产品价格调查年鉴》可知, 2000-2020 年桂西南平均粮食产量为 4 355.2 kg/hm², 2020 年全国粮食平均收购价格为 2.54 元/kg。采用因子当量法, 即按照“一个标准生态系统服务价值当量因子是单位面积农田食物生产经济价值的 1/7”, 计算得出桂西南地区生态系统服务价值当量因子为 1 767.8 元/(hm² · a)。按照公式 (5) 计算出桂西南各土地利用类型生态系统服务价值系数 (表 3), 最后按公式 (6) (7) 计算出桂西南生态系统服务价值。

$$E = \frac{1}{7} \times G \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m R, \quad (4)$$

$$VC_i = \sum_{k=1}^n EC_{ik} \times E, \quad (5)$$

$$ESV_k = \sum_{i=1}^n (VC_{ik} \times W_i), \quad (6)$$

$$ESV = \sum_{i=1}^n (VC_i \times W_i), \quad (7)$$

式中, E 是一个标准生态系统服务价值当量因子 [元/

($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), G 为全国粮食平均收购价格(元/kg), R 为研究区粮食产量, m 为年份数; VC_i 为第 i 种土地利用类型的单位生态系统服务价值系数[元/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)], EC_{ik} 为第 i 种土地利用类型的 k 项生态系统服务价值当量, n 为项数; ESV_k 为第 k 项生态系统服务价值, VC_{ik} 为第 i 种土地利用类型第 k 项生态系统服务价值系数(元/ hm^2), W_i 表示第 i 种土地利用类型面积(hm^2); ESV 为生态系统服务价值(元)。

表 3 桂西南各土地利用类型生态系统服务价值系数

Table 3 Coefficient of ecosystem service value for each land use type in Southwest Guangxi							Unit: Yuan/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)
一级类型 First level type	二级类型 Second level type	耕地 Farm land	林地 Forest land	草地 Grass land	水域 Water area	建设用地 Construction land	未利用土地 Unused land
Supply services	Food production	1 953.42	424.27	671.76	1414.24	0.00	0.00
	Raw material production	433.11	963.45	989.97	406.59	0.00	0.00
	Water resources supply	-2 306.98	494.98	548.02	14 655.06	0.00	0.00
Regulating services	Gas regulation	1 573.34	3 164.36	3 482.57	1 361.21	0.00	35.36
	Climate regulation	822.03	9 484.25	9 210.24	4 048.26	0.00	0.00
	Clean the environment	238.65	2 837.32	3 040.62	9 811.29	0.00	176.78
	Hydrologic regulation	2 642.86	7 150.75	6 753.00	180 739.87	0.00	53.03
Support services	Soil conservation	919.26	3 862.64	4 242.72	1 644.05	0.00	35.36
	Maintain nutrient cycle	274.01	291.69	318.20	123.75	0.00	0.00
	Food diversity	300.53	3 517.92	3 853.80	4 507.89	0.00	35.36
Cultural services	Aesthetic landscape	132.59	1 546.83	1 697.09	3 341.14	0.00	17.68
Total		6 982.81	33 738.46	34 807.98	222 053.36	0.00	353.56

1.3.3 地理探测器

通过地理探测器对区域空间分异性的探测能够反映同一区域地理现象的相似性及不同区域的差异性,进而揭示其背后的驱动力^[33]。参考陈红莲等^[34]和李魁明等^[35]的研究,选取年均气温(X_1)、年均降水(X_2)、平均海拔(X_3)、坡度(X_4)、坡向(X_5)、人均GDP(X_6)、经济密度(X_7)、人口密度(X_8)、夜间灯光强度(X_9)、土地垦殖率(X_{10})共 10 个驱动因素对桂西南生态系统健康变化的影响程度进行量化研究。

因子探测:用于探测生态系统健康 Y 的空间分异性,以及探测因子 X 对生态系统健康 Y 的空间分

异的解释力,公式如下:

$$Q = 1 - \frac{1}{N\delta^2} \sum_{i=1}^L N_i \delta_i^2, \tag{8}$$

式中, $i = 1, 2, \dots, L$ 为生态系统健康 Y 或因子 X 的分层, N_i 和 N 分别为 i 层和全区的单元数, δ_i 和 δ 分别为 i 层的方差和全区方差。 Q 值越大,表明因子 X 对生态系统健康 Y 的变化解释越强,反之则越弱。

交互探测器:判断不同影响因子 X_n 之间的交互作用,即评价因子 X_1 和 X_2 共同作用时是否会改变其对生态系统健康 Y 的解释力,判断依据如表 4 所示。

表 4 因子交互类型及判断依据

判断依据 Basis of judgment	交互作用 Interaction
$Q(X_1 \cap X_2) < \min(Q(X_1), Q(X_2))$	Nonlinearity weakening
$\min(Q(X_1), Q(X_2)) < Q(X_1 \cap X_2) < \max(Q(X_1), Q(X_2))$	Single-factor nonlinear attenuation
$Q(X_1 \cap X_2) > \max(Q(X_1), Q(X_2))$	Bi-factor enhancement
$Q(X_1 \cap X_2) = Q(X_1) + Q(X_2)$	Independent
$Q(X_1 \cap X_2) > Q(X_1) + Q(X_2)$	Nonlinear enhancement

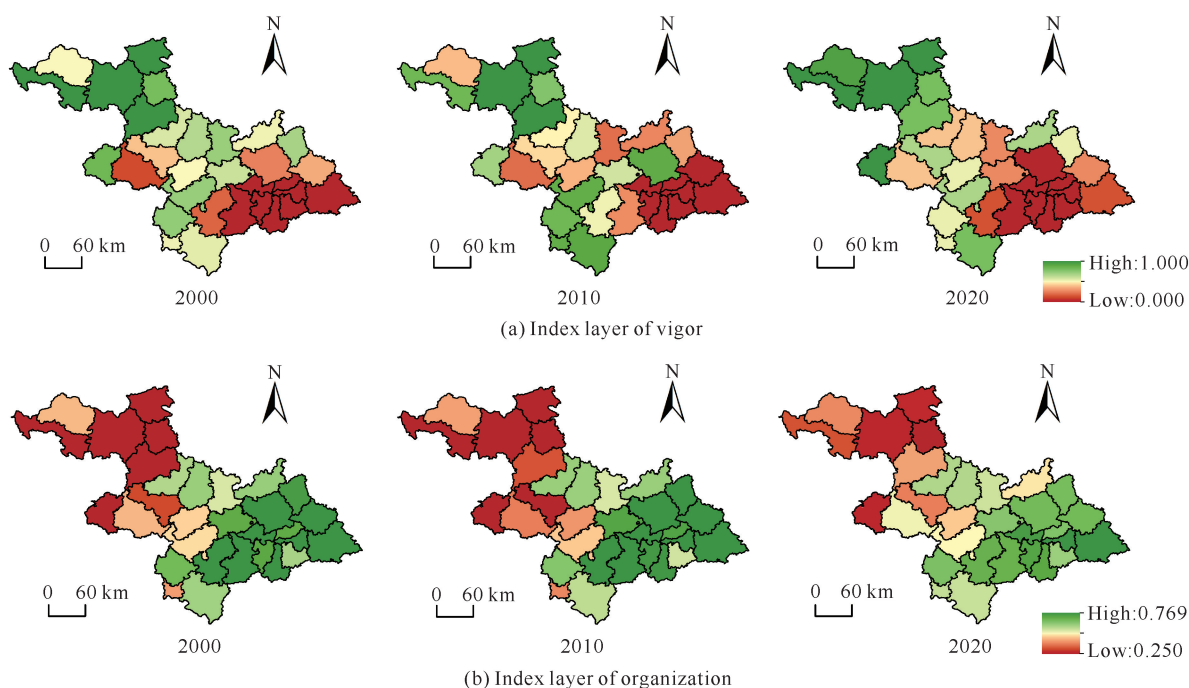
2 结果与分析

2.1 生态系统健康时空变化

2.1.1 评价指标的时空变化

2000、2010、2020 年桂西南生态系统活力、组织力、恢复力和服务力发生了不同程度的变化(图 3)。2000、2010、2020 年生态系统活力指数平均值分别为 0.520、0.618、0.686, 呈上升趋势。从空间上看, 西北部生态系统活力普遍高于东南部地区[图 3(a)], 西北部由于林草植被覆盖率高, 人类活动密度小, 具有较高的生态系统活力; 而东南部植被覆盖程度较西北部低, 经济社会发展速度较快, 人类活动易破坏生态系统, 生态系统活力相对较低。生态系统组织力指数平均值由 2000 年的 0.549 下降到 2020 年的 0.527, 随着时间的推移呈递减趋势。石漠化治理等生态修复工程的实施加强了区域景观的连通性, 但城市化发展在一定程度上抑制了区域景观的连通性, 从而抵消了研究区整体的生态系统组织力的增加。组织力侧面反映了景观格局的优化程度, 从空间格局上看西北部区域的生态系统组织力较低, 而东南部的生态系统组织力较高[图 3(b)], 可以推测西北部区域景观格

局的优化程度未有效提高, 后续应加强景观格局的合理优化。2000、2010、2020 年生态系统恢复力指数平均值分别为 0.691、0.722、0.641, 整体上较高, 同时也较其他指标层高, 表明生态系统恢复力在生态系统健康中起主要作用, 系统自身有较强的对外抵抗力和自我修复能力。西北部生态恢复力水平较东南部高[图 3(c)], 表现为“西北高、东南低”的分布格局, 由于东南部人口众多、人类活动强度较高, 人类活动对环境产生了巨大的压力, 生态系统弹性小; 西北部以山地为主, 分布着较大面积的林地、草地, 植被覆盖度高, 拥有更完善的生态系统, 抗人类干扰能力强, 生境质量高, 生态系统弹性大。生态系统服务力指数平均值由 2000 年的 0.319 增长至 2020 年的 0.330, 呈缓慢增长态势, 表明服务力推动生态系统健康的改善和提升。生态系统服务力水平低值区主要分布在中部及东南部区域, 该区域人口密集, 人类活动频繁; 高值区零散分布在西北部区域及个别县(区), 这些区域林地面积占比大, 植被覆盖率高, 物种丰富, 优越的自然环境促进了生态系统服务价值的形成[图 3(d)]。整体上, 生态系统活力、恢复力、服务力呈现出相似的空间分布模式。



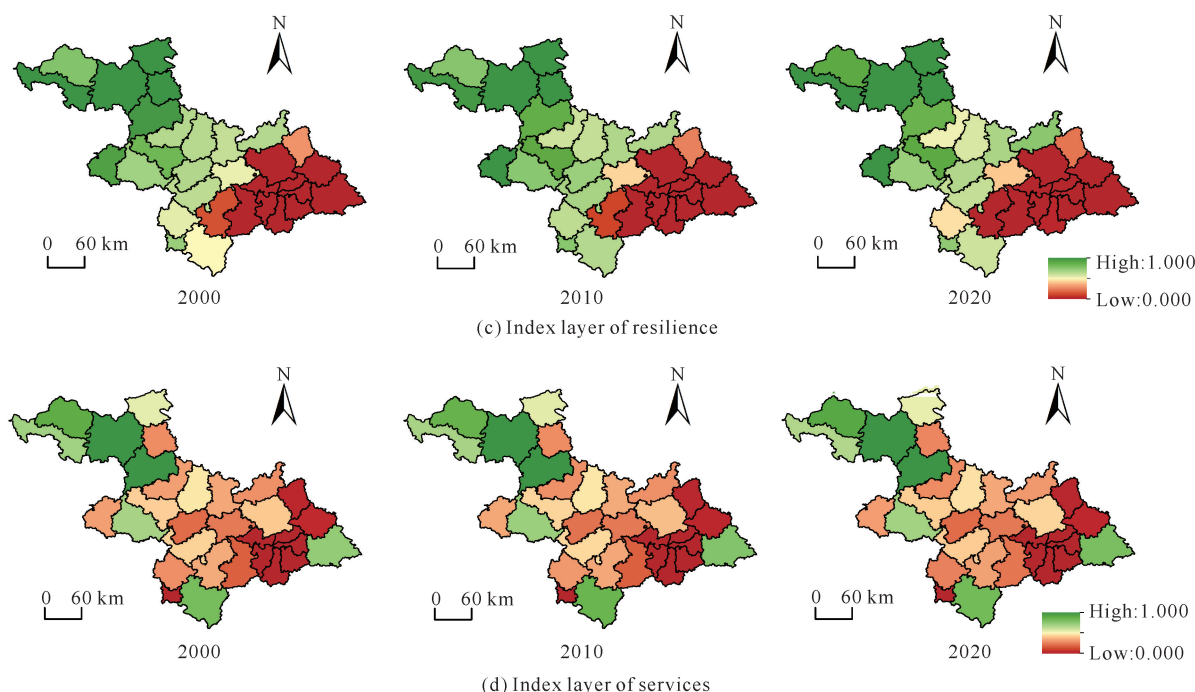


图3 2000-2020年桂西南生态系统健康评价指标空间格局

Fig. 3 Spatial pattern of ecosystem health assessment indexes in Southwest Guangxi from 2000 to 2020

2.1.2 生态系统健康变化趋势

20年间桂西南生态系统健康呈上升的变化趋势(图4),其健康指数平均值由2000年的0.446增加至2020年的0.478,表明生态环境状况向好发展,这可能与国家在“十五”工作报告中提出的“加快推进黔桂滇岩溶石漠化的综合治理”^[36]有关。2000-2010年生态系统健康指数平均值由0.446提升至0.477,提升速度较快,这可能是经过退耕还林、石漠化综合治理等一系列生态修复工程的实施,植被覆盖率得以提升、生态环境逐渐好转所致。2010-2020年生态系统健康指数均值由0.477提升至0.478,提升速度有所放缓,表明经过先前一系列的生态修复工程,生态环境稳定向好发展。

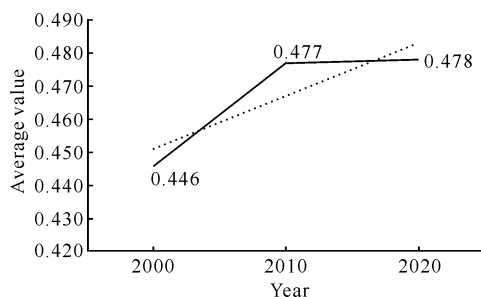


图4 2000-2020年桂西南生态系统健康变化趋势

Fig. 4 Change trend of ecosystem health in Southwest Guangxi from 2000 to 2020

在空间分异格局上(图5),桂西南生态系统健康水平呈现西北-东南逐渐变差的趋势,从西北向东南呈健康、亚健康、不健康、病态的空间分布格局,分异特征显著。总体上以亚健康状态为主,主要分布在西北部、中部地区,表明当前区域生态系统尚稳定,景观结构比较合理。东南部少部分县区为病态、不健康状态,不健康状态县区大多环绕在病态状态县区周围,表明其生态系统遭到一定程度的破坏,自然景观严重破碎化。2000年各县区生态系统健康指数为0.020-0.704,健康状态分布在百色市的隆林各族自治县、右江区、西林县及崇左市的宁明县4个县(区),病态状态主要分布东南部的西乡塘区、兴宁区、江南区、邕宁区,东南部生态系统健康状况明显较差,这可能是由于城市化进程的推进,激化了地区环境和土地利用发展间的矛盾,景观日趋碎片化,导致区域生态问题突出。2010年各县(区)生态系统健康指数为0.003-0.729,处于健康状态的县(区)有所增加,田东县、大新县、龙州县由亚健康状态向健康状态转变,生态环境得到改善,这可能是由于在石漠化综合治理下,多种生态综合治理举措并行,生态环境得到改善,人地关系基本和谐。2020年各县(区)生态系统健康指数为0.004-0.713,生态系统健康变化较大,局部变化明显,处于病态状态的县(区)有所减少,如江南

区、邕宁区的生态系统健康状况由病态转为不健康状态;处于健康状态的县(区)较 2000 年增加了 2 个,江南区、邕宁区的生态环境得以改善,这可能与城市经

济发展重心的转移有关。20 年间病态、不健康和健康等级相互转换最为激烈,生态系统健康整体上向好发展。

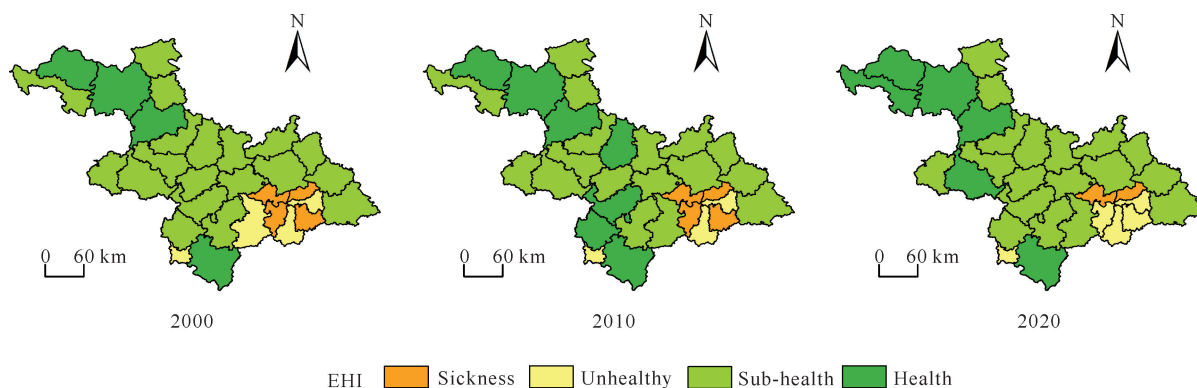


图 5 2000—2020 年桂西南生态系统健康等级空间格局

Fig. 5 Spatial patterns of ecosystem health grade in Southwest Guangxi from 2000 to 2020

总体上来说,西北部及中部地区生态系统健康明显优于东南部,主要得益于优越的自然本底条件以及国家在石漠化防治和环境保护等生态修复工程上的支持,同时由于人口经济密度小,自然生态结构相对完整,生态状况较好,区域系统的活力、恢复力及服务力相对较高,应作为区域自然景观维护的重点区域,继续加强国家生态建设战略,贯彻落实“绿水青山就是金山银山”的发展理念。东南部地区生态系统健康较差,由于经济快速发展、工业化程度高、人口增长和城镇扩张,人类干扰作用明显,建设用地面积增多,自然景观向人为景观转变,生态系统的基本结构被破坏,整体环境形势不容乐观。因此,应把东南部作为区域景观布局优化调整与生态恢复建设的关键区域,在建设开发的同时统筹生态环境保护,合理控制建设用地的扩展,提高建设用地的用地效率,重点开展生态建设工作,优化低植被覆盖率地区的生态布局,利用生态建设手段改善生态环境状况,提高地区生态系统健康状况。

2.2 生态系统健康变化的驱动因素

2.2.1 因子探测

对影响桂西南生态系统健康变化的因子进行定量化表示, Q 值越大说明该因子对生态系统健康空间分异影响越大(图 6)。因子探测结果表明,生态系统健康空间分异的驱动因子解释力排序为土地垦殖率(X_{10})>平均海拔(X_3)>夜间灯光强度(X_9)>人口密度(X_8)>坡度(X_4)>经济密度(X_7)>年均降水(X_2)>人均 GDP(X_6)>年均气温(X_1)>坡向(X_5)。其中土地垦殖率(0.760)、平均海拔(0.603)、

夜间灯光强度(0.499)、人口密度(0.455)、坡度(0.450)、经济密度(0.442)、年均降水(0.434)7 个自然/人文因子对生态系统健康变化的影响较大,对生态系统健康的贡献力均大于 0.4,表明桂西南生态系统健康变化主要受自然环境变化和人类活动的影响。自然因子中平均海拔、坡度、年均降水的贡献力最高,解释力均在 40% 以上。人文因子中土地垦殖率、夜间灯光强度、人口密度的解释力均在 45% 以上,对生态系统健康的影响最为重要。

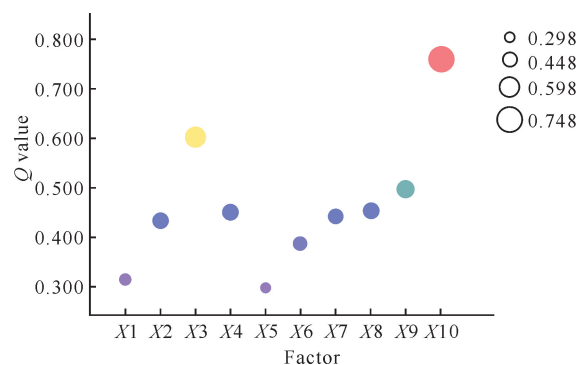


图 6 桂西南生态系统健康变化因子探测结果

Fig. 6 Detection results of ecosystem health change factors in Southwest Guangxi

2.2.2 交互探测

在交互探测结果(图 7)中,不同因子的交互作用解释力均不同。年均降水与土地垦殖率(0.967)、人口密度与土地垦殖率(0.951)、坡向与土地垦殖率(0.944)、年均气温与土地垦殖率(0.941)、年均降水与人均 GDP(0.930)、年均降水与夜间灯光强度(0.926)、夜间灯光强度与土地垦殖率(0.905)交互作

用值均在 0.9 以上,其中自然因子与人文因子交互作用强烈,表明桂西南生态系统变化是自然因子与人文因子协同作用的结果。年均降水、土地垦殖率与其他因子的交互作用值普遍较高。喀斯特地区基岩裸露,土层浅薄,降雨易导致土层的松动,引发水土流失。由于地形地貌等限制,喀斯特地区水热空间分布不均、土壤贫瘠、土地产量低。为寻求更大的生存空间,人们过度开垦土地,导致生态环境被破坏。单一自然因子、人文因子对桂西南生态系统健康的解释力较弱,但两者交互作用后的解释力均高于单一自然因子或人文因子的解释力,且任意两个因子交互结果呈现出显著的双因子增强或非线性增强的特点,说明桂西南生态系统健康变化是各因子综合作用的结果,并非受单一因子控制。

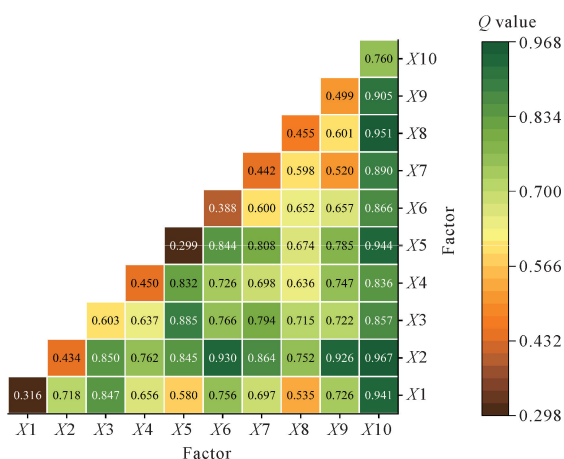


图7 桂西南生态系统健康变化因子交互探测结果

Fig. 7 Interactive detection results of ecosystem health change factors in Southwest Guangxi

3 讨论

3.1 生态系统健康的时空分异特征

过去 20 年桂西南生态系统健康呈良好发展态势,这与张楠等^[37]针对广西生态系统健康的研究结果相似。由于退耕还林、水土保持、石漠化治理等一系列生态修复工程的实施,桂西南地区的生态环境得以改善,生态系统健康水平显著提升,说明退耕还林、石漠化治理等措施对改善生态系统健康具有重要的现实意义。从空间分布来看,桂西南西北部及中部区域生态系统健康优于东南部。李佳豪等^[11]研究表明广西西北部地区生态系统健康水平比南宁地区好。西北部及中部区域以山地为主,分布着较大面积的林地、草地及灌木丛,植被覆盖率高,同时地形起伏大,不利于大规模的人类活动,加上人口外流,人类活动

干扰度小,伴随着较好的生境状况,生态系统健康状况良好。东南部经济发展快、工业化程度高、人口增长和城镇扩张速度快,建设用地面积增多,自然景观向人为景观转变,人类干扰作用显著,生态系统健康状况相对较差。

3.2 生态系统健康变化的驱动因素

Zou 等^[38]研究结果表明生态系统健康变化是自然环境因素和人类活动因素等相互作用的结果。本研究利用地理探测器对桂西南生态系统健康的驱动因素进行分析,结果表明土地垦殖率、平均海拔、夜间灯光强度、人口密度、坡度、经济密度、年均降水 7 个因素具有较强的单因子解释力。冉晨^[39]研究表明,年均降水是影响喀斯特生态系统健康变化的主要因子。由于喀斯特地区基岩大面积裸露,土层浅薄,在降水条件下会加速地表水土流失,影响土层的稳定性,破坏当地的生态环境结构。加之成土速率慢,不合理的耕作方式会破坏地表植被的生长且恢复难度较大。海拔不同其水热条件也不同,进而影响植被生长,而植被对地表土壤有一定稳固作用,能有效阻挡降水对地表的冲刷,因而植被覆盖度较高的地方其生态系统健康状况较好。喀斯特地区生境本底较为脆弱,人类活动密集区域人类干扰作用明显,土地利用类型转换较为迅速,自然景观向人为景观转变;同时经济社会的快速发展导致土壤污染、水污染等环境问题的产生,进而对生态系统产生破坏,影响其健康水平。

Xu 等^[25]研究发现,不同因子之间的交互作用大于单一因子对生态系统健康的影响。交互探测结果表明,单一自然因子、人文因子对桂西南生态系统健康的解释力较弱,但两者交互作用后的解释力均高于单一自然因子或人文因子的解释力。年均降水与土地垦殖率、人口密度与土地垦殖率的解释力均大于其他因子交互作用的解释力。喀斯特地区由于独特的地表-地下双层地质结构以及人类活动的双重影响,具有生态敏感性高、抗干扰能力弱和恢复难度大等特点^[5-7],其土层浅薄,土壤肥力低,土壤与碳酸盐岩之间的黏着力差,在遇到暴雨天气时极易发生山洪或泥石流等自然灾害。此外,喀斯特土地承载能力较低,对人类干扰的响应更为敏感,人口增长加重土地的承载能力,进而影响生态系统健康水平。总体而言,桂西南生态系统健康变化是自然环境因素和人类活动综合作用的结果。

4 结论

①20 年间桂西南生态系统健康整体上呈改善态势,其生态系统健康指数由 2000 年的 0.446 增加至 2020 年的 0.478,这可能是经过退耕还林、石漠化综合治理等一系列生态修复工程的实施,植被覆盖率得以提升、生态环境逐渐好转,表明生态修复工程对改善生态系统健康具有重要的现实意义。

②从空间分布来看,近 20 年来桂西南生态系统健康总体上西北部及中部地区优于东南部地区,分异特征显著。西北部及中部区域以亚健康状态为主,而病态和不健康状态则分布在东南部南宁市主城区。病态、不健康和健康状态等级相互转换最为激烈。

③在单一因子探测中,土地垦殖率、平均海拔、夜间灯光强度、人口密度、坡度的解释力均大于或等于 0.45。因子之间的交互作用均高于单因子的影响,年均降水与土地垦殖率、人口密度与土地垦殖率、坡向与土地垦殖率、年均气温与土地垦殖率、年均降水与人均 GDP、年均降水与夜间灯光强度、夜间灯光强度与土地垦殖率交互作用值均在 0.9 以上,自然因子与人文因子交互作用强烈,表明桂西南生态系统健康变化是自然因子与人文因子综合作用的结果。

参考文献

- [1] 燕守广,李辉,李海东,等.基于土地利用与景观格局的生态保护红线生态系统健康评价方法:以南京市为例[J].自然资源学报,2020,35(5):1109-1118.
- [2] BAO Z C, SHIFAW E, DENG C B, et al. Remote sensing-based assessment of ecosystem health by optimizing vigor-organization-resilience model: a case study in Fuzhou City, China [J]. Ecological Informatics, 2022, 72:101889.
- [3] 喻志强,曹浩,王正勇,等.长江经济带生态系统健康评估及时空变化特征[J].水利水运工程学报,2022(4):28-36.
- [4] 申丹,焦琳琳,常禹,等.黄海和渤海沿海地区生态系统健康评价[J].生态学杂志,2015,34(8):2362-2372.
- [5] 白晓永,冉晨,陈敬安,等.中国喀斯特生态系统健康诊断的方法、进展与展望[J].科学通报,2023,68(19):2550-2568.
- [6] 曹欢,苏维词.喀斯特生态系统健康评价方法比较研究[J].环境科学与技术,2010,33(1):183-187.
- [7] 陈圣子,周忠发,闫利会.人为干预对石漠化治理过程中生态系统健康的影响[J].水土保持研究,2016,23(2):213-219.
- [8] 李远艳,安裕伦,杨广斌.基于 PSR 模型的喀斯特地区生态系统健康动态评价:以贵州省为例[J].水土保持研究,2015,22(6):279-286.
- [9] 卢应爽,韩蕊,石宇,等.黔东南苗族侗族自治州生态系统健康的时空变化[J].生态学报,2021,41(14):5557-5569.
- [10] 俞亮源.基于 DPSIR 模型的重庆市岩溶生态环境安全评价研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [11] 李佳豪,罗洁,徐勇,等.基于 VOR 模型的广西 2014 与 2019 年生态健康时空变化特征研究[J].无线电工程,2021,51(10):1134-1141.
- [12] SHEN W, LI Y, QIN Y C, et al. Influencing mechanism of climate and human activities on ecosystem health in the middle reaches of the Yellow River of China [J]. Ecological Indicators, 2023, 150:110191.
- [13] SHEN W, LI Y, QIN Y C. Research on the influencing factors and multi-scale regulatory pathway of ecosystem health: a case study in the Middle Reaches of the Yellow River, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 406:137038.
- [14] RAN C, BAI X Y, TAN Q, et al. Threat of soil formation rate to health of karst ecosystem [J]. Science of the Total Environment, 2023, 887:163911.
- [15] CHEN Y, MA Y W, PAN J F, et al. Integrating ecosystem health diagnosis into the construction of ecological security network: a case study in Qujing City, China [J]. Ecological Indicators, 2023, 146:109780.
- [16] COSTANZA R, MAGEAU M. What is a healthy ecosystem? [J]. Aquatic Ecology, 1999, 33(1):105-115.
- [17] HE R, HUANG X T, YE X Y, et al. County ecosystem health assessment based on the VORS model: a case study of 183 counties in Sichuan Province, China [J]. Sustainability, 2022, 14(18):11565.
- [18] MA J W, DING X, SHU Y Q, et al. Spatio-temporal variations of ecosystem health in the Liuxi River Basin, Guangzhou, China [J]. Ecological Informatics, 2022, 72:101842.
- [19] 张泽,胡宝清,丘海红,等.桂西南喀斯特-北部湾海岸带生态环境脆弱性时空分异与驱动机制研究[J].地球信息科学学报,2021,23(3):456-466.
- [20] 张泽,胡宝清,丘海红,等.基于山江海视角与 SRP 模型的桂西南-北部湾生态环境脆弱性评价[J].地球与环境,2021,49(3):297-306.
- [21] 李雅楠.基于碳效应的华北平原区土地整治生态效益评价研究:以河北省景县为例[D].石家庄:河北地质大学,2022.
- [22] 谷瑞丽,多玲花,邹自力,等.黄河下游城市群生态系统

- 健康时空演变特征[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 285-292.
- [23] 窦世卿, 张楠, 靖娟利, 等. 基于耦合模型的广东省生态系统健康时空动态变化[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12223-12232.
- [24] 汪左, 王萌, 王畅畅, 等. 安徽省 1980-2015 年生态系统健康时空演变[J/OL]. 自然资源遥感, 2023: 1-10 [2023-07-23]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.p.20230531.1105.029.html>.
- [25] XU W B, HE M X, MENG W Q, et al. Temporal-spatial change of China's coastal ecosystems health and driving factors analysis [J]. Science of the Total Environment, 2022, 845: 157319.
- [26] 徐烨, 杨帆, 颜昌宙. 基于景观格局分析的雄安城市湿地生态健康评价[J]. 生态学报, 2020, 40(20): 7132-7142.
- [27] 周玲燕, 李维杰, 王勇, 等. 重庆市城镇化与生态系统健康的时空交互耦合特征[J/OL]. 水土保持通报, 2023: 1-12 [2023-06-28]. <https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20230419.001>.
- [28] 陈万旭, 赵雪莲, 钟明星, 等. 长江中游城市群生态系统健康时空演变特征分析[J]. 生态学报, 2022, 42(1): 138-149.
- [29] 曾晨, 程轶皎, 吕天宇. 基于生态系统健康的国土空间生态修复分区: 以长江中游城市群为例[J]. 自然资源学报, 2022, 37(12): 3118-3135.
- [30] 刘一鸣, 徐媛银, 曾辉. 中国东海岸带地区生态系统健康评估及其尺度依赖性[J]. 生态学报, 2022, 42(24): 9913-9926.
- [31] 周启刚, 彭春花, 刘栩位, 等. 基于 VOR 模型的三峡库区消落带 2010-2020 年生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2022, 29(5): 310-318.
- [32] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 等. 基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [33] 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.
- [34] 陈红莲, 李瑞, 张玉珊, 等. 赤水河流域不同地貌区生态系统健康对比[J/OL]. 应用生态学报: 1-13 [2023-06-28]. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202307.024>.
- [35] 李魁明, 王晓燕, 姚罗兰. 京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素[J/OL]. 环境科学, 2023: 1-17 [2023-06-28]. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202301077>.
- [36] 王克林, 岳跃民, 陈洪松, 等. 喀斯特石漠化综合治理及其区域恢复效应[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7432-7440.
- [37] 张楠, 窦世卿, 徐勇, 等. 近 14 年广西生态系统健康时空变化特征[J]. 桂林理工大学学报, 2021, 41(2): 370-378.
- [38] ZOU S B, QIAN J K, XU B R, et al. Spatiotemporal changes of ecosystem health and their driving mechanisms in alpine regions on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Ecological Indicators, 2022, 143: 109396.
- [39] 冉晨. 喀斯特生态系统健康诊断及其模拟预测[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021.

Analysis of Spatial and Temporal Changes in Ecosystem Health and Its Drivers in Southwest Guangxi in the Last 20 Years

HUANG Lifang^{1,2,3}, QIN Xingming^{1,2,4*}, HU Baoqing^{1,2}, HUANG Simin^{1,2,3}, WEI Wenwen^{1,2}, CHEN Siqi^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Environment Change and Resources Use in Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Intelligent Simulation, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 3. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi, 530001, China; 4. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification of Ministry of Natural Resources, Guilin, Guangxi, 541004, China)

Abstract: Exploring the health of ecosystems in Southwest Guangxi can provide a theoretical basis for region-

al sustainable development. This article analyzed the regional ecological health by constructing a "Vigor-Organization-Resilience-Services" (VORS) model, and explored the driving factors affecting ecosystem health with the help of geographical detectors. The results showed that: ① During the past 20 years, the average value of ecosystem health index in Southwest Guangxi increased from 0.446 in 2000 to 0.478 in 2020, showing an overall improvement trend, which benefited from the implementation of a series of ecological restoration projects such as returning farmland to forest, soil and water conservation, and rocky desertification control. ② In terms of spatial distribution pattern, the ecosystem health in the northwest and central regions of Southwest Guangxi was generally better than that in the southeast region. The northwest and central regions were dominated by sub-health conditions, while morbid and unhealthy conditions distributed in the main urban area of Nanning City in the southeast. ③ Land reclamation rate, average altitude, nighttime light intensity, population density and slope were the main factors affecting the health of regional ecosystem, and their explanatory power was all greater than or equal to 0.45. Compared with the single factor, the interaction between natural factors and human factors had a stronger explanatory power for the health of regional ecosystem. In the future development, the coordination between regional ecological environment protection and high-quality economic development should be strengthened, and the health level of regional ecosystem should be improved.

Key words: ecosystem health; VORS model; geographic detector; driving factor; Southwest Guangxi

责任编辑: 米慧芝



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxxkxyxb@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxxkx.ijournal.cn/gxxkxyxb/ch>