

DOI: 10.5846/stxb202007191890

卢应爽, 韩蕊, 石宇, 郭烁. 黔东南苗族侗族自治州生态系统健康的时空变化. 生态学报, 2021, 41(14): 5557-5569.

Lu Y S, Han R, Shi Y, Guo L. Ecosystem health assessment of Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(14): 5557-5569.

黔东南苗族侗族自治州生态系统健康的时空变化

卢应爽^{1,2}, 韩蕊¹, 石宇¹, 郭烁^{1,*}

1 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081

2 天津大学环境科学与工程学院, 天津 300350

摘要:黔东南苗族侗族自治州位于贵州东南部,是我国重点林区,也是长江、珠江上游地区的重要生态屏障区。以空间网格为基准单元,利用 1990—2015 年研究区的土地利用数据,结合社会经济、野外调查数据,基于“压力-状态-响应”模型、“活力-组织-弹性-功能”理论框架和空间分析模型,对黔东南州的生态系统健康时空变化进行分析,并选取城市化和地形位指数进行空间相关性分析,探讨影响黔东南州生态健康的关键因素。研究表明:时间分布上,1990—2015 年期间,黔东南州生态系统健康指数呈现下降趋势,表现为从“亚健康”状态向“临界”状态的转变,呈现先增后减的波动式变化。研究期间生态系统健康水平的区域面积占比大小依次为亚健康(42%—45%)、临界健康(30%—35%)、健康(15%—22%)、不健康(0.1%—0.4%)、病态(<0.1%),且 25 年间研究区生态系统各种健康水平的占地面积有显著变化。在空间分布上,黔东南州中部的台江县、剑河县和东北部的三穗县、锦屏县等地区生态系统健康水平较高,多处于亚健康和健康状态;而南部的榕江县、东部的黎平县和北部的镇远县、岑巩县等区域生态系统健康状况多处于临界状态;西北部的凯里市等区域生态系统健康水平最低,且整体上呈现下降的趋势。空间相关性研究表明:在 1990—2015 年期间,黔东南州的地形位指数与生态系统健康之间呈显著的空间正相关关系,“低-低”集聚区和“高-高”集聚区的面积均呈现“减-增-减”的波动趋势,而城市化与生态系统健康只在州府凯里市具有显著的空间负相关关系,说明在城市化水平较高的地方,人口密度、人均生产总值、建设用地比例等城市化因素是影响生态系统健康的主要原因,但在城市化进程较低的区域,生态系统健康受到地形梯度等自然因素的影响较大。本研究为黔东南州生态系统的管理与可持续发展提供理论基础。

关键词:生态系统健康;PSR 模型;空间相关性;喀斯特地区;地形梯度;城市化

Ecosystem health assessment of Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture

LU Yingshuang^{1,2}, HAN Rui¹, SHI Yu¹, GUO Luo^{1,*}

1 College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China

2 School of Environmental Science&Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

Abstract: The Qiandongnan Miao and Dong Autonomous Prefecture is located in the southeast of Guizhou Province. It is a crucial forest area in China and a significant ecological barrier area in the upper reaches of the Yangtze River and the Pearl River. Based on land use/land cover (LULC) data and socioeconomic and field survey data from 1990 to 2015, the study analyzes the spatiotemporal changes of ecosystem health (ESH) in Qiandongnan Prefecture by using the “Pressure-State-Response” model, “Vigor-Organization-Resilience-Services” theory frame and spatial analysis model. In this study, we selected urbanization and terrain index to detect the impacts of different factors on its ecosystem health. In terms of time distribution, ecosystem health index of Qiandongnan prefecture changed from a “sub-healthy” level to a “threshold” level

基金项目:科技部重点研发计划课题(2017YFC0505601)

收稿日期:2020-07-19; 网络出版日期:2021-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guoluo@muc.edu.cn

from 1990 to 2015, with a slight increasing from 1990 to 2005 before plunging at 2005. The highest area in ecosystem health level occupied by “sub-healthy” (42%—45%), with the level of “critically healthy” accounting for 30%—35%, “healthy” 15%—22%, “unhealthy” 0.1%—0.4% and “sick” <0.1% in decrease order. In terms of spatial distribution, Taijiang County and Jianhe County, located in the center area, as well as Sansui County and Jinping County, located in the northeast, were at relatively health levels. The counties located in southern, eastern and northern regions were mostly in a “threshold” healthy state, such as Rongjiang County, Liping County, Zhenyuan County, and Cengong County. However, the lowest healthy area belonged to the northwest area like Kaili City, and its health index decreased from 1990 to 2015. Studies on spatial correlation showed that there was a significant positive spatial correlation between the terrain index and ecosystem health during the period of 1990—2015, and the areas, featured by “low-low” agglomeration and “high-high” agglomeration, presented a fluctuating trend of “decrease-increase-decrease”. While there was a significant negative spatial correlation between urbanization and ecosystem health only in Kaili, capital of study area. And the results indicated that urbanization factors such as population density, per capita GDP, and the proportion of construction land were the main reasons affecting the ecosystem health in places with high levels of urbanization. However, the ecosystem health was greatly affected by natural factors in areas with a low urbanization process, for example, the terrain gradients. The research provides a theoretical basis for the management and the sustainable development strategy of the ecosystem of Qiandongnan Prefecture.

Key Words: ecosystem health; PSR Model; spatial correlation; Karst area; terrain gradient; urbanization

生态系统是人类生存和发展不可或缺的基础,生态系统只有保持其结构和功能的完整性,才能为人类提供服务。生态系统健康体现了生态系统的综合特性^[1],是人类可持续发展的基本保障,被认为是环境管理的终极目标^[2]。对生态系统健康进行评价是我们了解生态系统所处状况的重要途径之一,已经成为社会关注的热点问题,区域生态系统健康是综合评价生态系统健康的核心,也是规范区域开发、环境保护和可持续发展的重要基础^[3-4]。近 30 年来,由于中国经济的快速增长,土地退化、污染加剧、生物多样性减少等一系列的环境问题出现^[5],干扰和破坏了生态系统健康,自然系统对人类提供的服务功能逐渐减弱,继而使人们的生产生活和身体健康受到一定威胁^[6-7]。而区域生态系统健康是一个庞大的体系,任何因子的变化都可能影响其生态系统健康的状况,这为生态系统健康的评估和生态系统的保护带来了困难。

目前,生态系统健康评价常用的研究方法有综合指数评价法、聚类分析法、模糊数学法、层次分析法、景观空间格局分析法、生态足迹法、质量指数法和韦伯—费希纳评价法等,并将遥感技术、地理信息系统等技术生态监测相结合以获取更加全面、准确的数据已成为生态系统健康评价的热点^[8-9]。生态系统健康评价的研究主要集中在湿地^[10]、草原^[11]、河流^[12]、农田^[13]、沙漠^[14]、流域^[15]、湖泊^[16]、煤矿区^[17]、交错区^[18]、水库^[19]和城市^[20]等方面,但有关喀斯特地区生态系统健康评价的研究相对较少。喀斯特地貌具有植被易受破坏、土壤侵蚀强、渗漏强烈、成土速度慢和恢复难度大等特点,其直接或间接地影响喀斯特区域中人与生态系统之间的关系,形成了喀斯特区域的自然资源开发、生态建设和经济可持续发展之间的独特要求^[21]。在国际上,LeGrand 首次指出喀斯特地区易出现地面塌陷、森林退化、旱涝灾害等生态环境问题^[22],此后关于喀斯特地貌的研究受到学者的广泛关注^[23]。国内近年来对喀斯特地貌的研究主要探讨喀斯特生态系统的脆弱性、人类影响和喀斯特地区生态系统的退化方向,而对喀斯特地貌生态系统健康的研究目前有限,例如曹欢等^[24]运用模糊数学评价法对贵州省毕节市生态系统健康进行评价,并对喀斯特地区生态系统健康评价方法进行了比较^[25]。周文龙等^[26]基于子系统对施秉县云台生态系统健康进行评价。李远艳等^[27]基于 PSR 模型评价贵州省喀斯特地区生态系统健康。姚岚等^[28]基于三角模型评价了喀斯特地区土地利用系统健康,但大多数研究缺乏对生态系统健康的影响因素进行探究。

贵州省黔东南苗族侗族自治州位于长江与珠江的分水岭地区,是长江、珠江上游地区的重要生态屏障和西部大开发生态建设的重点区域^[29]。黔东南州大部分县市属于连片特殊困难地区内的国家扶贫开发工作重

点县,存在较大的人地矛盾,生态环境十分脆弱^[30]。因此,本研究以黔东南州为例,对 1990—2015 年黔东南州的生态系统健康进行评价,并分析其影响因素,为区域可持续发展提供理论依据。

1 研究区概况

黔东南苗族侗族自治州(黔东南州)地处贵州高原东南部,位于西南喀斯特地貌分布区,地跨 107°17'20" E—109°35'24" N,总面积为 30337 km²,共 16 个市县(图 1)。全州海拔高度在 137—2178 m 之间,该州西北地区属于典型的喀斯特地貌,东南一侧为不同形态的剥蚀、侵蚀地貌。据 2005 年统计,黔东南州喀斯特地貌地区有 25% 发生石漠化^[31]。年均气温约为 14—18℃,年均降水量为 1003.8—1366.7 mm,属于亚热带季风湿润气候。该州河网稠密水资源丰富,年径流量 225 亿 m³,分别汇入长江、珠江两大水系,是长江、珠江上游地区的重要生态屏障,国家实施对其实施“天保”工程,属长江、珠江防护林保护区范围^[32]。森林覆盖率达 67.67%,具有丰富的水资源和森林资源,但该地农业生产条件较差,经济水平较为落后。

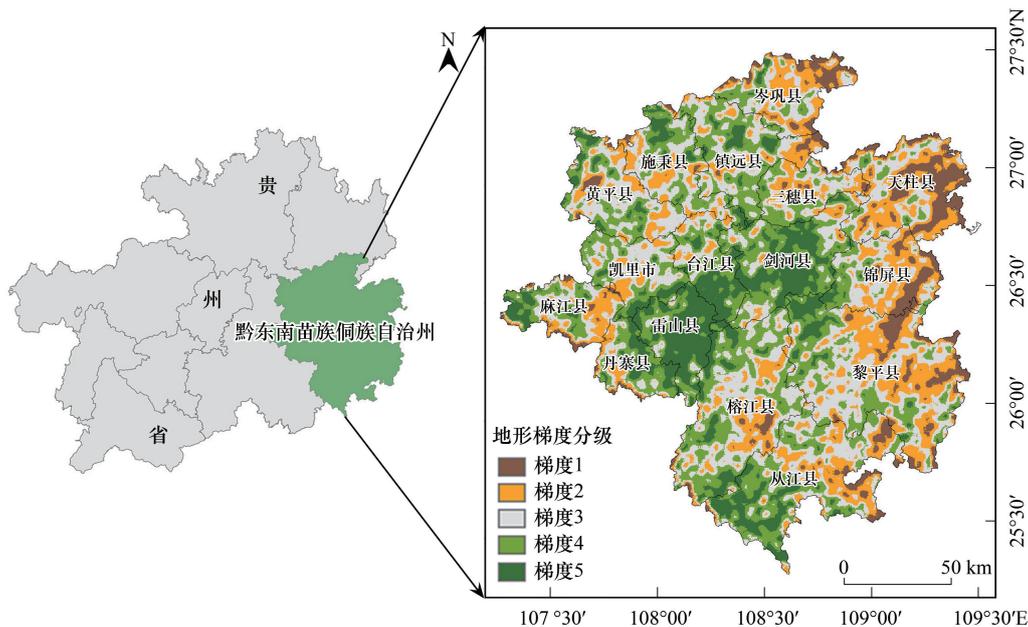


图 1 黔东南州地理位置

Fig.1 Location of Qiandongnan Prefecture

2 研究方法

2.1 数据来源及处理

1990—2015 年是黔东南州在生态环境和社会经济发展上经历的比较有代表性的一个时段,在此期间,黔东南州历了较大范围的城市化,并实施了完整的一轮退耕还林保护工程。本研究基于 2 km × 2 km 的网格评价单元进行数据计算,利用 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年及 2015 年 6 期的 Landsat TM/ETM 遥感影像,结合研究区域 1:25 万地形图、土壤和植被专题图进行分析。根据土地利用覆盖变化(LUCC)分类体系与黔东南州土地利用现状,将研究区的土地利用类型划分成耕地、林地、草地、水域、建筑用地及未利用地 6 种一级类型;黔东南州相关社会经济数据均来源于贵州省统计年鉴等。

2.2 PSR 模型的构建

“压力-状态-响应”模型(Pressure-State-Response,简称 PSR 模型)用于分析各个环境指标变化和生态系统响应措施之间的关系^[33-34],并且能够反映区域各个环境因子相互关系与外界人为因素的干扰,用于评估区域

生态系统健康状况^[35]。压力指人类为满足粮食生产、经济生产、生态保护等需求而对土地生态系统的胁迫,即人类对土地资源的利用强度。生态系统健康面临的压力包括生态系统内部自然因素和外部人类活动因素的干扰,绝大部分是由于受到人类活动的影响。因此选取人口密度和人为压力指数两个指标来构建黔东南州生态系统健康评价的压力指标。状态指标反映了环境要素的变化和环境政策的终极目标,其中主要包括自然环境状况和生态系统状况^[36]。结合“活力-组织-弹性-功能”理论框架,主要从生态系统的生物、物理化学及生态功能等多个角度选取植被覆盖度指数、香农多样性指数、蔓延度、斑块凝聚度指数、生态弹性度和生态系统服务价值来评估生态系统的状态^[37-38];由于本研究主要从土地利用视角对生态系统健康进行评价,因此选取基于土地利用类型的植被覆盖指数,从土地利用视角反应生态系统活力;根据指标的可获取原则和可比性原则,本研究从自然以及人类活动两个方面选取响应指标对生态系统的响应进行描述。

本文基于 PSR 模型并结合研究区生态系统的组成、功能、生态特征、经济社会等方面的特征,选取 11 个评价指标构建黔东南生态系统健康评价指标体系,见表 1,并采用熵权法确定各指标权重^[39]。

生态系统健康指数(Health Index,简称 HI)计算公式如下^[40]:

$$HI = PI \times WP + SI \times WS + RI \times WR \quad (1)$$

式中,PI、SI 和 RI 分别代表压力指数(Pressure Index)、状态指数(State Index)和响应指数(Response Index);WP、WS 和 WR 分别代表 PI、SI 和 RI 的权重系数。

表 1 生态系统健康评价指标及权重

Table 1 Indicators and weights in ecosystem health assessment

准则层 Criteria layer	子准则层 Sub-criteria layer	指标层 Index layer	权重 Weights
压力 Pressure	城市化	人口密度	0.0764
		人为压力	0.1195
状态 State	活力	植被覆盖	0.0986
		香农多样性	0.0661
		蔓延度	0.0661
	弹性	斑块凝聚度	0.0567
		生态弹性度	0.0941
		生态系统服务价值	0.0992
响应 Response	自然活动	景观破碎化	0.1630
	人类活动	人均 GDP	0.0887
		建设用地比例	0.0715

压力层指标为人口密度和人为压力指数。人为压力指数的计算公式为:

$$H = \sum_{i=1}^n \frac{a_i \times q_i}{A} \quad (2)$$

式中, n 为土地利用类型的数量, a_i 为第 i 种土地利用类型的面积, q_i 为第 i 种土地利用类型的人为压力强度参数^[41], A 为评价单元总面积。

状态层指标中,香农多样性指数、蔓延度、斑块凝聚度由 Fragstats 4.2 计算得到。植被覆盖指数(V)计算公式为^[42]:

$$V = A_{veg} \times \sum_{i=1}^n \frac{a_i \times h_i}{A} \quad (3)$$

式中, A_{veg} 为植被覆盖指数的归一化系数, a_i 为第 i 种土地利用类型的面积, h_i 为植被覆盖指数分权重, A 为评价单元总面积。

生态系统弹性度(R)^[43]的计算公式如下:

$$S = - \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{A} \ln \frac{a_i}{A} \quad (4)$$

$$R = S \sum_{i=1}^n \frac{a_i \times q_i}{A} \quad (5)$$

式中, n 为土地利用类型的数量, a_i 为第 i 种土地利用类型面积, q_i 为第 i 种土地利用类型的弹性分值^[34], A 为评价单元总面积, S 为景观多样性。

生态系统服务价值采取的计算方法如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n A_i \times P_i \quad (6)$$

式中, ESV 表示单位生态系统服务价值总量; A_i 表示土地利用类型 i 的面积; P_i 表示土地利用类型 i 的单位面积生态系统服务价值^[44]

响应层由景观破碎化指数、人均 GDP 和建设用地比例 3 个指标进行表示。

2.3 城市化分级

本研究通过人口密度、人均 GDP 以及建设用地比例 3 个指标, 分别衡量黔东南州的人口城市化水平、经济城市化水平以及土地城市化水平, 进而衡量黔东南州的综合城市化水平。将 3 个指标归一化后, 依据自然间断点分级法将城市化评估结果分为 5 个水平, 即低水平、较低水平、中等水平、较高水平及高水平, 计算公式如下^[45]:

$$UL = \frac{1}{3} \times (PD' + GDPD' + ULP') \quad (7)$$

式中, UL 是指城市化水平指数; PD' 为标准化后的人口密度; $GDPD'$ 为标准化后的 GDP 密度; ULP' 为标准化后的建筑用地面积占比。

2.4 地形梯度分级

选取地形位指数对黔东南州地形梯度进行描述。地形位指数综合了海拔因子和坡度因子, 是一个可以全面反映某点地形状况的地形因子。地形位指数与海拔和坡度呈正相关关系, 若海拔越高而坡度越小, 则地形位居中。为更清晰地了解黔东南州地形梯度分布情况, 采用自然间断点分级法把地形位指数分为 5 个等级: 0.6119—1.0035、1.0035—1.2498、1.2498—1.4413、1.4413—1.6603、1.6603—2.3262。

本研究采取的地形位指数 (T) 计算公式如下^[46]:

$$T = \ln \left[\left(\frac{E}{E_0} + 1 \right) \times \left(\frac{S}{S_0} + 1 \right) \right] \quad (8)$$

式中, E 为某点海拔 (m), E_0 为某点所在区域海拔的平均值 (m), S 为某点的坡度 ($^{\circ}$), S_0 为某点所在区域的平均坡度 ($^{\circ}$)。

2.5 空间相关性研究

本文结合黔东南州社会经济发展状况和自然地理特征选取人均生产总值 (GDP)、人口密度 (POP)、建设用地比例 (CLP) 和地形位指数 4 个指标, 利用 GeoDa 软件分析每个指标与生态系统健康的空间相关性, 并采用蒙特卡洛模拟法检验 Moran 指数显著性, 若 Moran's $I > 0$ 则表示两者存在正相关关系, 反之则存在负相关关系^[47]。针对地形位指数与 HI 空间关系绘制空间聚集图, 聚集类型包括: 不显著、高-高、高-低、低-低及低-高 5 种类型。

3 结果与分析

3.1 生态系统健康指标层的变化

研究区 1990 年、1995 年、2000 年、2005 年、2010 年、2015 年生态系统健康的指标分析结果见表 2。1990—2015 年黔东南州生态系统健康指数总体处于下降趋势, 对应生态系统健康状况由亚健康状态转为临

界状态。压力指数和状态指数在研究时段内亦呈现相似的变化趋势,而响应指数整体呈现上升的趋势。1990—2000年期间,生态系统健康指数和状态指数都呈现缓慢下降的趋势,年均下降率分别为0.41%和0.59%;2000—2005年期间,生态系统健康指数和状态指数都有所上升,年均增长率分别为0.57%和0.63%;2005—2015年期间,生态系统健康和状态指数重新呈现下降趋势且下降程度加剧,年均下降率分别为2.22%和36.36%。在整个研究时段内,压力指数持续下降,年均下降率最大为6.15%,响应指数持续上升,年增长率最大为4.29%。

表2 黔东南州生态系统各指标变化情况

Table 2 The change of ecosystem health indicators in Qiandongnan Prefecture

年份 Years	1990	1995	2000	2005	2010	2015
压力指数 Pressure index	0.16	0.15	0.14	0.14	0.13	0.09
状态指数 State index	0.34	0.33	0.32	0.33	0.24	0.13
响应指数 Response index	0.23	0.23	0.24	0.25	0.28	0.34
综合指数 Health index	0.73	0.71	0.70	0.72	0.68	0.56

3.2 生态系统健康时空变化

1990—2015年不同生态系统健康水平的面积占比见图2。研究期间生态系统健康水平的区域面积占比大小依次为亚健康(42%—45%)、临界健康(30%—35%)、健康(15%—22%)、不健康(0.1%—0.4%)、病态(<0.1%),且25年间研究区生态系统各种健康水平的占地面积有显著变化。1990—2000年期间,生态系统健康处于临界、病态的面积占比分别上升了1.44%和0.02%,说明处于生态系统健康低水平状态区域环境条件趋于恶劣,但处于健康的区域面积所占比例从20.31%上升至21.26%,这说明2000—2005年期间的生态系统健康状况有所好转。而后,2005—2015年期间处于病态、不健康、临界状态区域面积所占比例分别又上升了0.25%、2.85%和3.81%,且处于亚健康健康的区域面积所占比例分别下降了2.16%和4.74%。以上结果表明黔东南州生态系统健康受到一定程度的威胁。

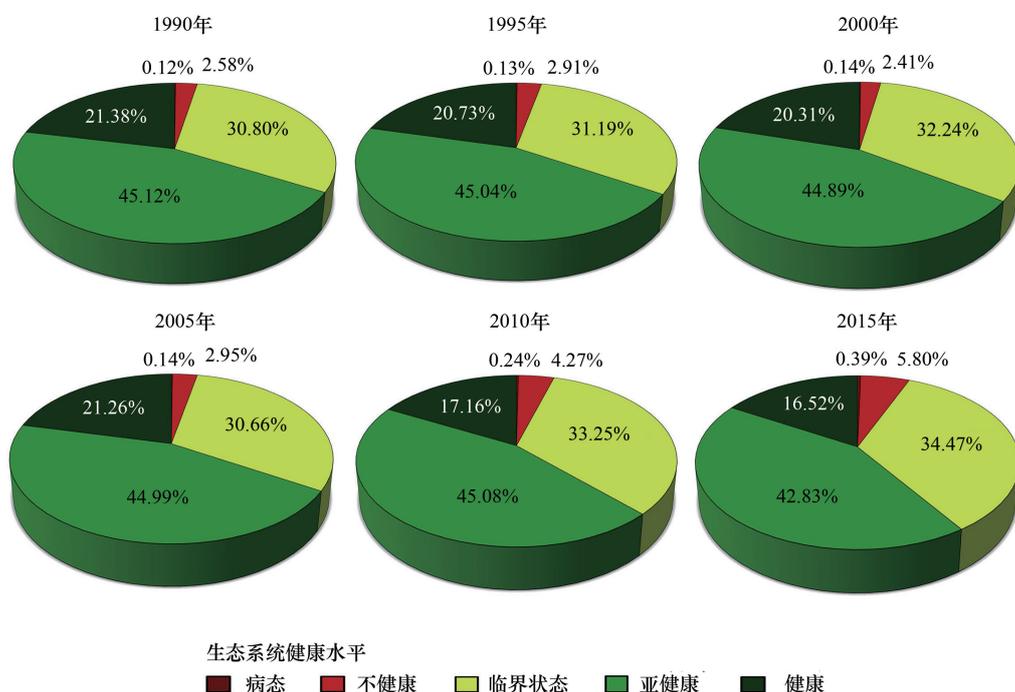


图2 1990—2015年不同生态系统健康水平区域比例

Fig.2 Proportion of regions with different ecosystem health levels from 1990 to 2015

黔东南州 1990—2015 年生态系统健康水平空间分布见图 3。总体来说,黔东南州中部的台江县、剑河县和东北部的三穗县、锦屏县等地区生态系统健康水平较高,多处于亚健康和健康状态;而南部的榕江县、东部的黎平县和北部的镇远县、岑巩县等区域生态系统健康状况多处于临界状态;西北部的凯里市等区域生态系统健康水平最低,且整体上呈现下降的趋势。1990—2000 年期间,生态系统健康处于临界状态和病态的区域增加;2000—2005 年期间生态系统健康状况有所好转,如西北部凯里市及其周围的麻江县、黄平县生态系统健康水平处于不健康状态的区域有所减少,南部榕江县、从江县、黎平县以及北部的施秉县、岑巩县处于临界状态的区域部分转为亚健康状态;而在 2010—2015 年期间,生态系统健康水平再次下降且恶化程度加剧。

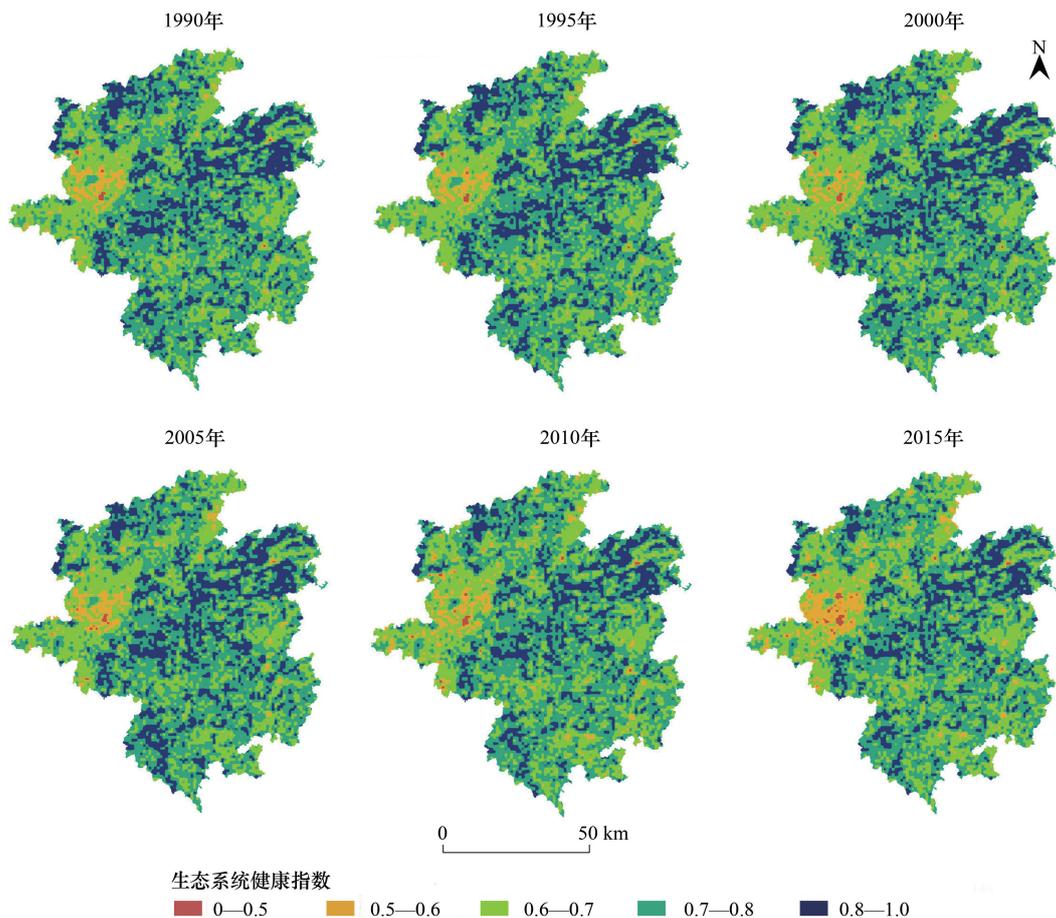


图 3 黔东南州生态系统健康综合评价结果

Fig.3 The disturbance of ecosystem health in Qiandongnan Prefecture

3.3 基于地形位指数梯度的生态系统健康变化

1990—2015 年期间黔东南州生态系统健康水平在地形梯度上表现为随梯度增大而增大的趋势(图 4)。梯度 1—3 之间生态系统健康指数增加的趋势较平均,梯度 3—5 之间增加的幅度变大。即山地特征越明显,生态系统健康指数整体越高。1990—2015 年,在各地形位指数上生态系统健康水平整体呈现下降的趋势,2005 年生态系统健康指数有所上升。梯度 1—5 上生态系统健康指数减小的程度依次减小,分别减小了 16.89%、16.37%、16.10%、15.94%和 14.94%。黔东南州生态系统健康水平下降程度最大的地区均出现在低地形位区域上,而海拔高坡度大的地区人类活动影响较小,生态系统健康水平下降相对缓慢。

3.4 基于地形梯度的城市化时空动态分析

1990—2015 年黔东南的城市化指数依次为 0.3589、0.3598、0.3145、0.3159、0.3618、0.6068,可以看出城市化水平呈“凹”字波动趋势。黔东南州 5 个地形梯度上的城市化水平面积变化见图 5。1990 年至 2015 年间,

虽然 2000—2005 年城市化水平在下降,但 1990—1995 年以及 2010—2015 年期间,城市化进程一直处于加快的趋势,黔东南州处于低城市化水平的区域占比最大,且该区域面积在梯度 5 上占比最大;而高城市化水平区域主要聚集于城市密集分布的地形梯度 1、地形梯度 2 和海拔高坡度小的地形梯度 3 上,研究时段内,地形梯度 1—3 区域上的高城市化水平区域面积占整体高城市化水平区域面积比例分别为 80.91%、76.13%、94.47%、100.00%、74.96%、68.14%,可见地形梯度 1—3 区域的城市化程度最高,表明该区域适合人类开发与居住,地形梯度对城市化的空间分布具有显著的影响。

3.5 城市化与生态系统健康的空间相关性分析

黔东南州的人均生产总值 (GDP)、人口密度 (POP)、建设用地比例 (CLP) 与生态系统健康之间的空间相关性分析结果表明,这三个指标与生态系统健康指标之间无显著的空间相关关系。但是,在各个县市的分析中发现,凯里市人均生产总值、人口密度、建设用地比 3 个指标与生态系统健康之间在空间上呈现显著的负相关关系(表 3),说明凯里市生态系统健康受到人为因素的干扰较大,凯里市作为黔东南州的州府,城市化相对于其他地区也更加明显。因此,在黔东南州以凯里市为例进行了城市化与生态系统健康之间的空间相关性分析。从表 3 可以看出,1990—2015 年期间,人均生产总值、建设用地比例与生态健康的 Moran's *I* 指数在不断增大;而人口密度与生态系统健康指数之间 Moran's *I* 指数则变化较小。

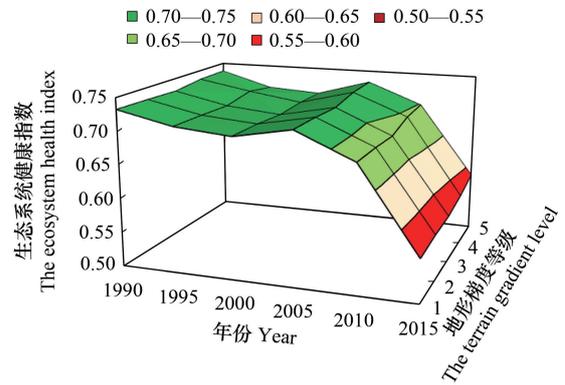


图 4 黔东南州生态系统健康随地形梯度等级的变化 (level1—5 指地形梯度 1—5)

Fig.4 Changes of ecosystem health in Qiandongnan Prefecture with different terrain gradient level (level1—5 means the terrain gradient from 1—5)

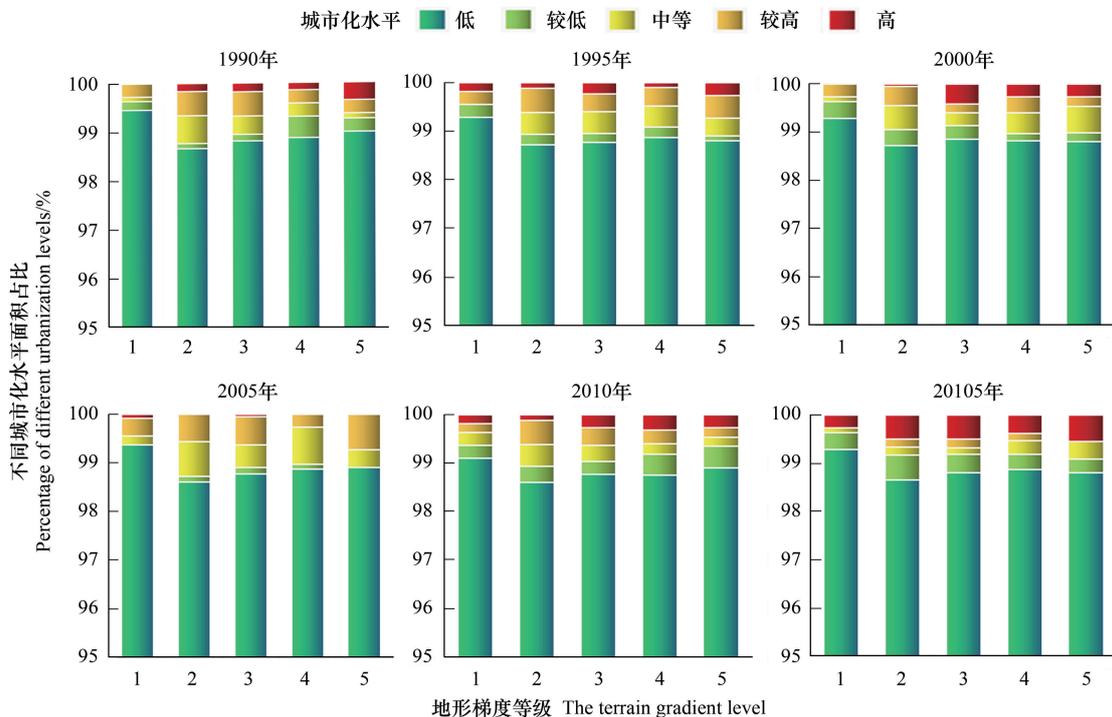


图 5 1990—2015 年黔东南州城市化水平在不同地形梯度等级的分布情况

Fig.5 The distribution of urbanization level in different terrain gradient levels in Qiandongnan Prefecture from 1990 to 2015

表 3 凯里市城市化与生态系统健康的双变量 Moran's *I* 指数Table 3 Results of Bivariate Moran's *I* Index of Kaili City

因素 Factor		年份 Years					
		1990	1995	2000	2005	2010	2015
GDP	Moran's <i>I</i>	-0.1890	-0.1170	-0.0680	-0.2840	0.0630	-0.2740
	<i>Z</i>	-6.8830	-4.3559	-2.5144	-9.6402	2.2526	-9.8025
	<i>P</i>	0.0010	0.0010	0.0070	0.0010	0.0140	0.0010
POP	Moran's <i>I</i>	-0.3940	-0.3930	-0.3920	-0.4460	-0.3630	-0.4360
	<i>Z</i>	-12.7157	-12.7518	-12.7935	-13.8912	-12.2402	-14.4635
	<i>P</i>	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
CLP	Moran's <i>I</i>	-0.2300	-0.2480	-0.2640	0.0330	0.0490	0.0270
	<i>Z</i>	-8.2282	-8.7284	-9.3021	1.1200	1.7763	1.0466
	<i>P</i>	0.0010	0.0010	0.0010	0.1400	0.0320	0.1530

GDP: 人均生产总值 Per capita gross domestic product; POP: 人口密度 Population density; CLP: 建设用地比例 Proportion of construction land

3.6 地形梯度与生态系统健康空间相关性分析

1990—2015 年黔东南州地形梯度与生态系统健康的全局相关性的 Moran's *I* 指数见表 4, 分别为 0.0908、0.0555、0.0579、0.0675、0.0597、0.0747。由此可知地形梯度与生态系统健康之间呈现显著的正相关关系, 而 Moran's *I* 指数在研究期间先下降后上升, 说明地形梯度与生态系统健康的空间正相关效应有所减弱。数据的显著性检验结果中每一年的 *P* 值都为 0.001, 说明地形梯度与生态系统健康之间的正相关性具有显著的统计学差异。

表 4 地形梯度与生态系统健康的双变量 Moran's *I* 指数Table 4 Bivariate Moran's *I* Index of Terrain Gradient and Ecosystem Health

因素 Factor		年份 Years					
		1990	1995	2000	2005	2010	2015
地形位指数	Moran's <i>I</i>	0.0908	0.0555	0.0579	0.0675	0.0597	0.0747
Terrain Index	<i>Z</i>	11.5260	7.1377	7.4023	8.6564	7.6432	9.4957
	<i>P</i>	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010

地形位指数与生态系统健康之间呈现显著的空间正相关关系, 因此对局部集聚情况进行分析(图 6)。可看出, “低-低”集聚区主要分布在黔东南州西北部地区, 如麻江县、丹寨县、凯里市、雷山县和台江县、东北部的镇远县以及东南部的黎平县等海拔低、坡度小的区域。“高-高”集聚区主要分布在中部的剑河县、西北部的天柱县、锦屏县、中南部的榕江县以及榕江县的西南部等海拔高、坡度大的区域。1990—1995 年期间, “低-低”集聚区和“高-高”集聚区面积变化情况相同, 年均增长率分别为 5.11% 和 5.94%, 2015 年与 1990 年相比, “低-低”集聚区和“高-高”集聚区面积年均下降率分别为 0.93% 和 1.19%。

4 讨论

4.1 黔东南州生态系统健康变化原因分析

本研究通过 PSR 模型和“活力—组织—弹性—功能”理论框架对黔东南州进行生态系统健康评估。研究表明, 从时间上看, 研究期间的黔东南州生态系统健康综合指数整体呈现持续下降的趋势, 其生态健康水平从亚健康状态变为临界状态。在 1990—2015 年期间, 生态系统健康指数总体呈现下降趋势, 2000 年—2005 年期间, 生态系统健康状况变好, 而 2005—2015 年期间, 生态系统状况继而变差。在熊娅等^[48]学者的黔东南州生态环境质量变化趋势及未来发展探讨研究中指出, 2008 年以来, 黔东南州生态环境质量指数表现出总体较平稳的趋势, 2009、2011 年有所下降。与 2008 年相比 2009 年、2011 年分别下降了 0.1%、0.2%, 2010、2012 分别小幅上升了 0.08%、0.04%, 增长幅度可忽略, 这表明了在 2008—2012 年期间, 总体上黔东南州生态环境质

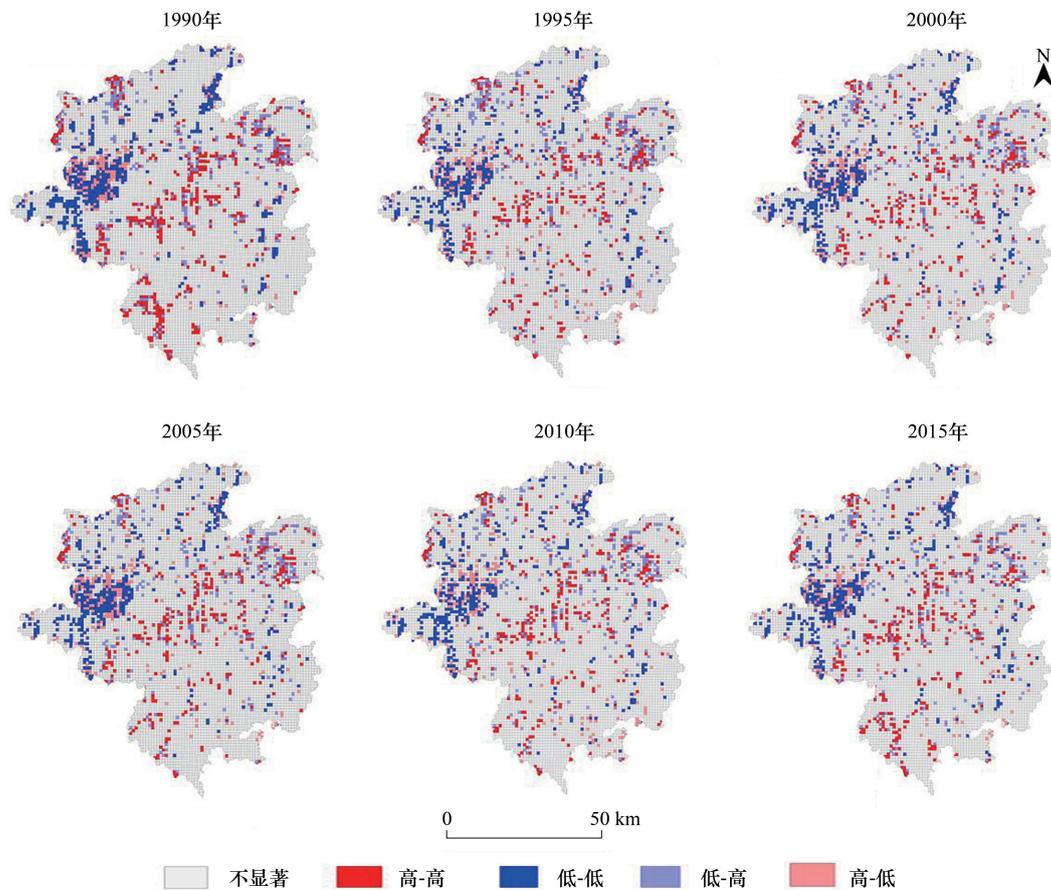


图6 地形位指数与生态系统健康之间的局部 Moran's *I* LISA 图

Fig.6 Local Moran's *I* LISA map between terrain index and ecosystem health

量处于下降趋势。贺祥等^[49]学者的黔东南州生态系统服务价值及影响因素演变动态中,指出黔东南州2010—2015年生态系统服务价值处于下降的趋势,黔东南州生态系统服务价值与功能整体均呈下降趋势,表明土地利用变化对其生态系统结构与格式造成一定负面影响,生态系统整体效益与功能处于下降态势。这与本研究中所得到的2010—2015年期间生态系统健康指数下降的结果相呼应。

分析其下降原因主要是人口持续增长、大量林地的破坏和建设用地的增加。1990年黔东南州年末人口数为371.51万人,而2015年增长至473.50万人,年均增长率为40.80%^[50]。在2005年—2015年间,耕地和建设用地的呈现明显增加的趋势,而林地、草地呈下降趋势,1999年黔东南耕地面积和建设用地的面积分别为11276.37、54.69 km²,2013年时耕地面积和建设用地的面积已分别增加至13142.19、284.21 km²,年均增长率为分别达到了1.18%、29.98%,而1999—2013年期间林地面积共减少了1625.84 km²,草地面积减少了5525.50 km²^[50],说明黔东南州开发加剧,在快速发展经济的同时更应注意生态环境的保护。同时,黔东南州大力开展旅游业,旅游人数每年呈现上升的趋势,2010年旅游人数为1475.53万人次,2015年旅游人次达到了4550.00万人^[51],年均增长率为41.67%,对生态系统健康造成了一定的负面影响。

此外,从黔东南州局部县市研究结果来看,在贺祥等^[52]学者脆弱生态环境区生态系统服务功能与价值时空演变的研究中表明了:在2005—2015年期间,剑河县、雷山县、黎平县、天柱县、镇远县和榕江县的生态系统服务价值变化幅度高于全州,呈现增加的趋势;岑巩县、从江县、丹寨县、锦屏县、施秉县生态系统服务价值变化幅度低于全州,呈现减少的趋势;黄平县和凯里市生态系统服务价值变化幅度低于全州,呈现增加的趋势。这与本研究得到的生态系统健康状况分布情况相吻合。

在空间尺度上,处于不健康和病态的区域集中于西北部的凯里市及其周围等城市化进程较快的区域,因为凯里市是黔东南州的经济中心,建设用地面积从2010年的33.44 km²到2015年的54.53 km²,年增长率达到12.61%,且人口增速快,年末人口数从1990年的38.04万人增长至2015年的56.95万人^[51],给生态系统造成了很大压力;中部台江县和剑河县等地区生态系统健康水平较好,大部分处于亚健康状态,台江县植被保护较好,森林覆盖率达到60%。剑河县内水系众多,县内工业发展缓慢,生态环境情况良好;南部榕江县和黎平等地区生态系统健康处于临界状态,且区域面积增加,榕江县和黎平县经济相对中部地区发达,人口数众多,近年来大力发展旅游业、建设工业园区、机场和高速铁路等,对生态系统健康造成一定的不利影响^[53]。按照目前的生态系统健康水平的下降趋势,若不采取相应的措施,该部分地区生态系统健康水平极可能加快恶化,由临界状态转变为不健康状态。2000—2005年期间,整体的生态系统健康水平有所好转,究其原因黔东南州先后在部分区域和全州范围内实行人工造林和封山与育林的结果^[51],说明退耕还林政策对保护和改善当地的生态系统健康具有可实现的作用。

通过从城市化因素和地形因素两个方面探究影响黔东南州生态系统健康的原因,结果表明,黔东南州的人均生产总值、人口密度、和建设用地比例对整体的生态系统健康无显著影响,但对于部分经济相对发达、城市化进程较快的区域,如凯里市等区域,生态系统健康受城市化因素的不利影响较为明显。而黔东南州地形位指数与生态系统健康的空间相关性显著。生态系统健康分布情况主要受苗岭山脉的影响,处于地形位指数低的区域生态系统健康水平也较低。在人类活动和特殊的地形地貌的综合影响下,黔东南州这个喀斯特地区形成独特的土地利用结构,使得建设用地、耕地和水域在地形位指数低的区域占主导地位,该研究结果也与陈铸等^[54]对地形梯度与土地利用研究结果相一致。海拔低、坡度小以及苗岭以北地区生态系统健康水平相比苗岭以南地区整体来说较低,且有恶化的趋势,这种趋势如果持续,生态系统的活力和恢复力将受到破坏,生态系统服务价值也将随着降低,继而生态系统退化,同时人们的生活和身体健康也将受到不利影响。因此,在土地利用规划及管理应注重区域生态系统健康评价和监测,并将地形因素充分考虑在内,因地制宜以促进区域可持续发展。

4.2 生态系统健康的管理对策

“绿水青山和金山银山决不是对立的,关键在人,关键在思路”。这是2014年习近平主席在参加贵州代表团审议时给建设者们的叮嘱。根据黔东南州生态系统健康评估结果,对其生态系统健康管理提出以下几点建议,以期对黔东南州人与自然协调发展提供可行性措施:首先,由黔东南州生态系统健康评估结果可知,2000—2005年期间,生态系统健康水平出现改善的情况,说明黔东南州实行的退耕还林政策对缓解生态系统健康水平下降有益,因此,建议黔东南州继续实行退耕还林政策,特别是在喀斯特地貌显著的北部和西北部如施秉县、凯里市、黄平县和麻江县等、南部和东部生态系统健康处于临界状态的榕江县、从江县、黎平县以及其他处于临界状态转为亚健康状态的区域等,对已经实行过退耕还林工程的地区如凯里市、黄平县和黎平县等区域继续进行保护,发展绿色农业等来增加当地居民收入并最大程度减少对森林和草地的破坏,减缓喀斯特地貌的蔓延。其次,虽然黔东南州城市化对生态系统健康的影响整体上没有地形的影响显著,但人为因素对生态环境的破坏不可忽略,如凯里市城市化进程对生态系统健康的负面影响。生态系统服务价值也在一定程度上体现了城市化和生态系统健康之间的关系,因此建议将生态系统服务价值纳入黔东南州GDP核算,便于管理者和决策者更好分析生态系统服务价值对GDP整体的影响程度,进而制定更为合适的经济发展计划。最后,根据黔东南州地形梯度分布情况,应该在即将建设的区域因地制宜地做好景观生态规划、区域生态规划和生物圈保护区规划,将生态系统健康的保护和监测考虑至规划中去,实现民族聚居区的可持续发展,使绿水青山充分发挥经济社会效益。

5 结论

本研究基于PSR模型和“活力-组织-弹性-功能”框架理论,利用土地利用遥感数据、经济、人口遥感数据

和年鉴数据,采用空间网格对黔东南州 1990—2015 年生态系统健康进行评价和空间格局分析,结论如下:

(1)1990—2015 年,黔东南州生态系统健康水平整体由“亚健康”状态转为“临界”状态,生态系统健康指数从 1990 年的 0.73 下降至 2015 年的 0.56,呈现较明显的下降趋势,且 2010—2015 年下降速度最快。

(2)空间分布上,西北部凯里市及其周围区县生态系统健康水平相对较低,中部的台江县、剑河县和东北部的三穗县、锦屏县等区县生态系统健康状况较好。1990—2000 年期间,生态系统健康处于临界状态和病态的区域状况轻微加剧,在 2000—2005 年期间情况有所好转,西北部凯里市及其周围的麻江县、黄平县处于不健康状态的区域有所减少,南部榕江县、从江县、黎平县以及北部的施秉县、岑巩县处于临界状态的区域部分转为亚健康状态。而 2010—2015 年期间,生态系统健康再次下降且程度加剧。

(3)黔东南州人口城市化、经济城市化、土地城市化与生态系统健康之间的空间相关性不显著。黔东南州的州府凯里市城市化与生态系统健康之间呈现较为显著的空间相关性,说明在黔东南城市化水平较高的地方,城市化是影响生态系统健康的主要因素,而在城市化水平较低的地方,地形是影响生态系统健康的主要因素。

(4)地形梯度与黔东南州生态系统健康之间呈现显著的空间正相关关系,说明地形梯度对黔东南州生态系统健康影响较大。生态系统健康随着地形梯度的升高而升高,较高和高城市化水平的区域集中在地形梯度为 1—3 的区域上,这些区域生态系统健康水平较低。在 1990—2015 年期间,地形位指数与生态系统健康之间的“低-低”集聚区面积呈现先减少后增加再减少的趋势,“高-高”集聚区面积变化趋势与“低-低”集聚区面积情况基本相同。

参考文献 (References):

- [1] Rapport D J, Böhm G, Buckingham D, Cairns Jr J, Costanza R, Karr J R, De Kruijf H A M, Levins R, McMichael A J, Nielsen N O, Whitford W G. Ecosystem health: The concept, the ISEH, and the important tasks ahead. *Ecosystem Health*, 1999, 5(2): 82-90.
- [2] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. *Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management*. Washington, DC: Island Press, 1992.
- [3] Zhang F, Zhang J Q, Wu R N, Ma Q Y, Yang J. Ecosystem health assessment based on DPSIRM framework and health distance model in Nansi Lake, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 30(4): 1235-1247.
- [4] 徐洲洋. 基于 PSR 模型的四川生态系统健康时空动态研究. *国土资源遥感*, 2020, 32(2): 251-258.
- [5] Wu J G. Urban sustainability: an inevitable goal of landscape research. *Landscape Ecology*, 2010, 25(1): 1-4.
- [6] Cheng X, Chen L D, Sun R B, Kong P R. Land use changes and socio-economic development strongly deteriorate river ecosystem health in one of the largest basins in China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 376-385.
- [7] Chi Y, Zheng W, Shi H, Sun J K, Fu Z Y. Spatial heterogeneity of estuarine wetland ecosystem health influenced by complex natural and anthropogenic factors. *Science of the Total Environment*, 2018, 634: 1445-1462.
- [8] 赵志刚, 余德, 韩成云, 王凯荣. 鄱阳湖生态经济区生态系统服务价值预测与驱动力. *生态学报*, 2017, 37(24): 8411-8421.
- [9] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. *生态学报*, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [10] 徐焯, 杨帆, 颜昌宙. 基于景观格局分析的雄安新区湿地生态健康评价. *生态学报*, 2020, 40(20): 7132-7142.
- [11] 尹燕亭, 运向军, 郭明英, 伟军, 侯向阳. 基于牧户感知和野外调查相结合的内蒙东部草甸草原健康评价. *生态学报*, 2019, 39(02): 709-716.
- [12] 粟一帆, 李卫明, 艾志强, 刘德富, 朱澄浩, 李金京, 孙徐阳. 汉江中下游生态系统健康评价指标体系构建及其应用. *生态学报*, 2019, 39(11): 3895-3907.
- [13] 李美荣. 重庆市农田生态系统健康评价研究[D]. 西南大学, 2012.
- [14] Cheng W J, Xi H Y, Sindikubwabo C, Si J H, Zhao C G, Yu T F, Li A L, Wu T R. Ecosystem health assessment of desert nature reserve with entropy weight and fuzzy mathematics methods: A case study of Badain Jaran Desert. *Ecological Indicators*, 2020, 119(11): 1-12.
- [15] 朱锦, 朱卫红, 金日, 张达, 于瑶. 中国图们江流域湿地生态系统健康评价研究. *湿地科学*, 2019, 17(03): 344-351.
- [16] 张淑倩, 孔令阳, 邓绪伟, 汪正祥, 李海波, 李中强. 江汉湖群典型湖泊生态系统健康评价——以梁子湖、洪湖、长湖、斧头湖、武湖为例. *环境科学学报*, 2017, 37(09): 3613-3620.
- [17] 李海龙. 基于物元分析法的矿区生态健康评价[D]. 山东: 山东农业大学, 2010.
- [18] 白雪莲, 王理想, 季树新, 陈正新, 常学礼. 鄂尔多斯草原沙漠交错区生态系统健康评价——以十大孔兑为例. *中国沙漠*, 2020, 40(01):

- 187-194.
- [19] 熊梅君,李秋华,陈倩,何应,马欣洋,韩孟书,唐重丽,张华俊.基于 GIS 应用 P-IBI 评价贵州高原百花水库水生态系统健康.生态学杂志, 2019,38(10):3093-3101.
- [20] 刘扬.基于 DPSIR 模型的昆明市域城市生态系统健康评价[D].云南:云南大学,2018.
- [21] Barratt G W, Rosenberg R. Stress Effects on Natural Ecosystems. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1981: 3-12, 269-289.
- [22] Legrand HE. Hydrological and ecological problems of Karst regions. Science,1973, 179: 859 -864.
- [23] John G, Smith D. Human Impact on the Cuilcagh Karst Areas. Italy: Universita Dipadova, 1991.
- [24] 曹欢,苏维词.基于模糊数学综合评价法的喀斯特生态系统健康评价.水土保持研究, 2009, 16(3): 148-154.
- [25] 曹欢.喀斯特地区生态系统健康评价与管理研究——以毕节试验区为例[D].贵阳:贵州大学,2009.
- [26] 周文龙,赵卫权,苏维词,张凡.基于子系统的云台山喀斯特生态系统健康评价指标体系初探.贵州科学, 2013, 31(5): 93-97.
- [27] 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.水土保持研究, 2015, 22(6): 279-286.
- [28] 姚岚,吴次芳,吕添贵,张舟.基于三角模型的喀斯特地区土地利用系统健康评价.农业工程学报, 2015, 31(14): 246-254.
- [29] 邹梓颖,肖焱,欧阳志云,宋昌素,王克林.黔东南苗族侗族自治州生态保护成效评估.生态学报, 2019, 39(4): 1407-1415.
- [30] 吴谋高.黔东南年鉴.云南:云南教育出版社,2011:54-57.
- [31] 黔东南苗族侗族自治州地方志编纂委员会编.黔东南苗族侗族自治州志-税务志.贵阳:贵州人民出版社,1993: 2-2.
- [32] 黔东南州人民政府办公室.自然环境. [2020-11-26]. http://www.qdn.gov.cn/zq/zrdl/201907/120190730_5355291.html.
- [33] 牛明香,王俊,徐宾铎.基于 PSR 的黄河河口区生态系统健康评价.生态学报, 2017, 37(3): 943-952.
- [34] 徐浩田,周林飞,成遣.基于 PSR 模型的凌河口湿地生态系统健康评价与预警研究.生态学报, 2017, 37(24): 8264-8274.
- [35] 顾晓响,徐宗学,刘麟菲,殷旭旺,王汨.北京北运河河流生态系统健康评价.环境科学, 2018, 39(6): 2576-2587.
- [36] Sun R, Yao P P, Wang W, Yue B, Liu G. Assessment of Wetland Ecosystem Health in the Yangtze and Amazon River Basins. International Journal of Geo-Information, 2017, 6(3): 81.
- [37] 朱建刚,余新晓,甘敬,张振明.生态系统健康研究的一些基本问题探讨.生态学杂志, 2010, 29(1): 98-105.
- [38] 袁毛宁,刘焱序,王曼,田璐,彭建.基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估.生态学杂志,2019,38(04): 1249-1257.
- [39] 徐菲,王永刚,张楠,王旭,范清.北京市白河和潮河流域生态健康评价.生态学报, 2017, 37(3): 932-942.
- [40] Liu D L, Hao S L. Ecosystem Health Assessment at County-Scale Using the Pressure-State-Response Framework on the Loess Plateau, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2017,14(1).
- [41] 何新,姜广辉,张瑞娟,马雯秋,周涛.基于 PSR 模型的土地生态系统健康时空变化分析——以北京市平谷区为例.自然资源学报, 2015, 30(12): 2057-2068.
- [42] 国家环境保护部. HJ/T 192-2006 生态环境状况评价技术规范(试行).北京:中国环境科学出版社,2006.
- [43] 徐明德,李静,彭静,钮键,曹露.基于 RS 和 GIS 的生态系统健康评价.生态环境学报, 2010, 19(8): 1809-1814.
- [44] 姜广辉,张凤荣,谭雪晶,霍荟阁,赵婷婷.北京市平谷区农村居民点用地生态服务功能分析.农业工程学报, 2009, 25(5): 210-216.
- [45] Zhang Y, Liu Y F, Zhang Y, Liu Y, Zhang G X, Chen Y Y. On the spatial relationship between ecosystem services and urbanization: a case study in Wuhan, China. Science of the Total Environment, 2018, 637-638: 780-790.
- [46] 陈奕竹,肖轶,孙思琦,郭冻.基于地形梯度的湘西地区生态系统服务价值时空变化.中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(4): 623-631.
- [47] 徐媛银,孙思琦,薛达元,郭冻.基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应.生态学报, 2019, 39(1): 97-107.
- [48] 熊娅,封珩.黔东南州生态环境质量变化趋势及未来发展探讨.环境与发展, 2014, 26(7): 1-4.
- [49] 贺祥,陈玉梅.生态系统服务价值及影响因素演变动态:以黔东南州为例.贵州农业科学, 2019, 47(4): 150-156.
- [50] 王丹.黔东南地区退耕还林工程实施前后景观动态变化研究[D].北京:中央民族大学,2015.
- [51] 吴寿昌.黔东南年鉴.北京:开明出版社,2015:48-54.
- [52] 贺祥.脆弱生态环境区生态系统服务功能与价值时空演变的研究.江苏农业科学, 2019, 47(4): 209-215.
- [53] 赵松婷,郭冻,杜世宏,吕靓.黔东南苗族侗族自治州土地利用时空变化与驱动因素.北京大学学报:自然科学版, 2012, 48(5): 785-791.
- [54] 陈铸,黄雅冰,朱志鹏,郑祈全,阙晨曦,董建文.基于地形梯度特征的福州市景观格局演变.应用生态学报, 2018, 29(12): 4135-4144.