

秦巴山区中部生态敏感性时空演变及影响因素*

姜雨璇, 查小春, 纪惠文

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 陕西 西安 710119

摘要: 秦巴山区因其独特的地理位置, 人口、资源与环境问题日益突出, 生态环境脆弱敏感。本文选取秦巴山区中部的汉中、安康、商洛 3 市为研究对象, 基于 2000、2005、2010、2015 和 2018 年 5 个年份的 DEM 数据、土地利用数据、人口密度数据等, 应用 PSR (压力-状态-响应) 模型、熵值法、地理探测器等方法, 对比分析了秦巴山区中部生态敏感性时空演变及其影响因素。研究结果表明: 1) 秦巴山区中部生态敏感程度较高的区域主要集中在汉台区、洛南县和镇坪县, 其中镇坪县在研究时段内均为极度敏感区; 2) 秦巴山区中部的生态敏感程度整体呈下降趋势, 极度敏感区的变化更为显著, 从 2000 年的 12.35% 下降至 2018 年的 2.91%; 3) 基于地理探测器对秦巴山区中部生态敏感性的影响因素分析表明, 汉中市压力指标人口密度、状态指标高程、响应指标林地最大斑块指数 q 值较大, 对生态敏感性影响较为显著。安康市的距水源距离为生态敏感性压力指标的主导因素, 状态指标的主要驱动因子为高程, 耕地破碎化程度 q 值较大, 成为安康市生态敏感性响应指标的主要影响因素。商洛市的压力指标人口密度、状态指标高程、响应指标林地最大斑块指数的 q 值较大, 占据主导地位。该研究结果对于秦巴山区中部生态规划和可持续发展具有重要的意义。

关键词: 秦巴山区中部; 生态敏感性; 时空演变; 影响因素; 地理探测器

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137 (2022) 02-0048-09

Spatio-temporal evolution of ecological sensitivity and its influencing factors in the central Qinling-Daba Mountain area

JIANG Yuxuan, ZHA Xiaochun, JI Huiwen

School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: With unique geographical location, Qinling-Daba Mountain area has a fragile and sensitive ecological environment, and the population, resources, and environmental problems in the area have become increasingly prominent. The central Qinling-Daba Mountain area (Hanzhong, Ankang, and Shangluo) is studied to reveal the spatio-temporal evolution characteristics of ecological sensitivity and its influencing factors in the central Qinling-Daba Mountain area by using the data of DEM, land use, and population density of 2000, 2005, 2010, 2015, and 2018, and methods of PSR (pressure-state-response) model, entropy method, and geographical detector. The results show that: 1) the areas with high ecological sensitivity were mainly located in Hantai District, Luonan County, and Zhenping County, among them, Zhenping County was the most sensitive area in the study period. 2) The ecological sensitivity of the central Qinling-Daba Mountain area was in a downward trend, and the change of the most sensitive area was more significant, from 12.35% in 2000 to 2.91% in 2018. 3) By comparing the three cities, we found that in Hanzhong, the q value of the population density of pressure in-

* 收稿日期: 2020-11-10

录用日期: 2021-03-01

网络首发日期: 2021-07-15

基金项目: 科技基础资源调查专项 (2017FY100905)

作者简介: 姜雨璇 (1997年生), 女; 研究方向: 资源开发与环境演变; E-mail: 1026378516@qq.com

通信作者: 查小春 (1972年生), 男; 研究方向: 资源开发与环境演变; E-mail: zhaxch@snnu.edu.cn

dex, the elevation of state index, and the maximum patch index of forest land of response index were large, forming the main effects on ecological sensitivity; in Ankang, the distance from the water was the dominant factor of the pressure index, the main driving factor of the state index was elevation, and the main influencing factor of response index was the degree of fragmentation of cultivated land; in Shangluo, the q value of the population density of pressure index, the elevation of state index and the maximum patch index of forest land of response index were large and predominant. The results have significance for ecological planning and sustainable development in the central Qinling-Daba Mountain area.

Key words: the central Qinling-Daba Mountain area; ecological sensitivity; spatio-temporal evolution; influencing factors; geographical detector

随着社会经济的发展, 生态环境在人类的影响下, 发生着巨大的变化, 因此客观评价生态环境质量的敏感程度, 对于生态环境保护和合理开发利用具有重要的科学意义。我国生态环境质量评价始于20世纪80年代末, 评价工作最初侧重于大气、土壤等的污染以及灾害方面^[1-3]。随着评价理论、评价方法不断的涌现, 生态环境质量评价逐渐涉及到区域生态环境、流域生态环境^[4]、社会环境等更多领域, 同时评价内容也涉及到生态系统服务价值^[5]、生态安全指数^[6]、生态适宜性^[7]、生态敏感性^[8]、生态脆弱性^[9]等方面。其中, 生态敏感性评价不仅具有很强的可操作性, 可以实现定性与定量相结合, 评价结果也更为客观、准确。特别是随着全球定位系统、地理信息系统以及遥感科学与技术的飞速发展, 在短时间内快速、大量地提取影响生态敏感性的因素成为可能。已有的研究常采用的层次分析法、压力-状态-响应模型(PSR)^[10]等方法, 选择合适的参与敏感性评价因素, 然后依据熵值法、神经网络评价法^[11]、生态系统服务价值系数法^[12]等确定评价因素的权重并对评价指标分级, 最后利用地理探测器^[13]对所选指标的影响程度进行定量分析, 进而建立综合评价指标体系。

作为我国南北地理分界线的秦巴山区, 具有高度的环境复杂性、生物多样性和气候敏感性, 生态环境非常脆弱。刘迪等^[14]结合重力模型, 从地貌分区的视角, 对陕南秦巴山区生态风险的时空迁移进行研究; 王丽霞等^[15]采用层次分析法, 对陕南秦巴山区各地市的生态环境质量进行了评价; 杨楠等^[16]还选用生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地退化和环境质量指数5个指标, 在专家打分的基础上, 采用层次分析法对陕南秦巴山区单一年份的生态环境状况进行了综合评价等。这些研究成果对于认识秦巴山区的生态建设与管理

决策具有重要的指导作用, 但是这些研究在研究区域上具有一定的局限性, 研究方法上以专家打分来设置权重, 人为主观性较强, 时间尺度上缺乏长时间序列的评价, 而且选择评价的因素主要集中在自然条件方面, 缺乏考虑人类活动的因素。为此, 本文选取秦巴山区中部的汉中、安康、商洛3市, 以2000、2005、2010、2015和2018年5个年份的DEM数据、土地利用数据、人口密度数据, 依据PSR模型选取指标、熵值法确定权重来评价秦巴山区中部生态敏感性的时空演变特征, 并结合地理探测器对其影响因素进行分析, 以了解秦巴山区中部生态敏感性的变化趋势和规律, 为秦巴山区资源开发利用、社会经济可持续发展及生态环境保护提供科学依据。

1 研究区域概况

秦巴山区包括秦岭、大巴山及其毗邻地区, 地跨陕西、河南、湖北、重庆、四川、甘肃5省市。因其独特的地理位置, 秦巴山区不仅是我国重要的生态功能区, 也是我国目前经济发展的重要区域, 但随着社会经济的发展, 秦巴山区人口、资源与环境问题日益加剧, 生态环境问题突出, 已影响和阻碍了该山区经济社会的持续发展。位于秦巴山区中部的汉中、安康、商洛3市, 北靠秦岭、南依巴山, 西侧有嘉陵江水系, 中为汉江盆地, 东部有丹江水系, 这里山地众多, 终南山、蟒岭、光雾山、化龙山等森林覆盖率较高, 丰富的森林资源养育着无数的动植物资源。而且水资源极为丰富, 96%的区域属于长江流域, 其中汉江和嘉陵江均为长江的一级支流, 成为了我国南水北调中线工程的重要水源涵养地以及生态功能的限制开发区(图1)。但由于区域资源开发和城镇化发展等因素的影响, 导致秦巴山区中部生态环境和社会发展的矛盾比较突出。因此, 选择秦

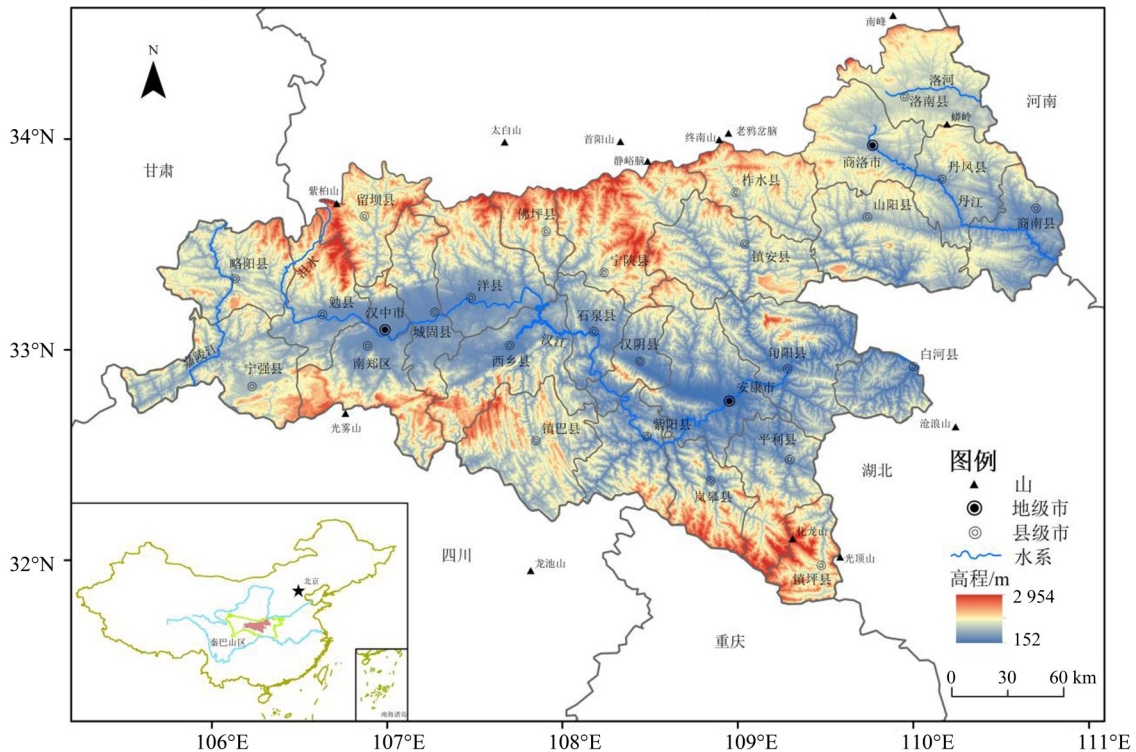


图1 研究区位置

Fig. 1 Location of study area

巴山区中部的汉中、安康、商洛3市,来探讨秦巴山区中部生态敏感性时空演变及其影响因素,了解其生态敏感性的变化趋势和规律,具有重要的科学和现实意义。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

研究区域的基础地理数据,包括行政边界、道路、河流等矢量数据,来源于国家基础地理信息中心(<http://www.ngcc.cn/>)提供的1:400万基础地理信息数据。研究区的DEM为ASTER GDEM V3数据(分辨率为30 m),下载自NASA EARTH DATA(<http://earthdata.nasa.gov/>),经投影转换、镶嵌融合、重采样、裁剪获得。研究区2000、2005、2010、2015和2018年的土地利用数据、归一化植被指数数据(NDVI),是在中国科学院资源环境科学与数据中心(<http://www.resdc.cn/>)下载,经投影转换、裁剪获得,分辨率为1 000 m。研究区2000、2005、2010、2015和2018年的人口密度数据下载自全球高分辨率人口计划项目(<http://www.worldpop.org>),分辨率为3弧度,单位为每个像素的人数。

2.2 研究方法

2.2.1 PSR(压力-状态-响应)模型 PSR模型(pressure-state-response模型)是20世纪80年代由国际经济合作与发展组织、联合国环境规划署共同提出的,广泛应用于生态环境质量评价中的多因素综合评价模型。该模型突出了对生态环境质量评价的综合性、层次性、客观性和可比性,是目前最为常用的评价方法^[17]。

在生态环境敏感性评价中,由于生态敏感性是由压力、状态和响应3个子系统共同作用的结果,因此 P 代表生态系统受到的外部压力, S 代表自然资源的变化状况, R 代表为改善生态敏感性程度人类所采取的措施。生态状态良好、生态修复投入大就有益于降低其生态敏感程度;而人为或天然力量造成的破坏,即生态压力越大,生态敏感程度就会增加。因此,可将PSR模型表示为^[18]

$$E = \alpha P + \beta S + \gamma R, \quad (1)$$

式中 E 为生态敏感性指数, P 为生态系统压力指数, S 为生态系统状态指数, R 为生态系统响应指数, α 、 β 、 γ 为权重。

2.2.2 熵值法 熵值法从整体出发来综合考虑模型各指标提供的信息熵,以合理分配权重。如果某个指标信息熵的值越小,说明其指标值的变异

范围越大, 提供的信息量越丰富, 在生态敏感性评价中起的作用越大, 其权重应该越大, 否则相反。因此, 可根据信息熵值大小, 计算出指标相应的权重, 其计算公式为^[19]

$$W_{ij} = \frac{1 - H_j}{k - \sum_{j=1}^k H_j}, \quad (2)$$

式中 H_j 为第 j 个指标的信息熵 ($j=1, 2, 3, \dots, k$; 其中 k 为指标数); W_{ij} 为第 j 个指标第 i 个监测数据所占的比重 ($i=1, 2, 3, \dots, n$; 其中 n 为监测数据的个数)。

3.2.3 地理探测器 地理探测器是通过空间分层异质性来探测各要素对因变量的驱动力。本文主要用来分析不同时空状态下各要素对因变量的驱动情况, 用 q 值度量, 其计算公式为^[12]

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST},$$

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

式中 q 统计量用来探测空间分异性。 q 值越大, 自变量对因变量的驱动力越大; $h=1, 2, 3, \dots, L$ (L 为指标的类别数); N_h 和 N 分别为指标类型 h 和全区的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是指标类型 h 和全区的方差。SSW和SST分别为指标的方差之和以及全区的总方差。

3 结果与分析

3.1 秦巴山区中部生态敏感性评价指标的选取

基于PSR模型, 结合秦巴山区中部汉中、安康、商洛3市的实际情况, 选取的生态敏感性的评价指标如表1所示。压力指标P主要考虑人类对生态环境所造成的影响, 选取了人口密度、距水源距离和距道路距离3个指标; 状态指标S主要从地形状态、植被状态出发, 选取坡度、曲率、高程和地势起伏度4个指标; 响应指标是指生态受到环境压力时所产生的反应, 选取了归一化植被指数、林地最大斑块指数和耕地破碎化程度3个指标。

表1 秦巴山区中部生态敏感性评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of ecological sensitivity in the central Qinling-Daba Mountain area

生态敏感性的度量	评价指标	数据提取方式
压力指标P	人口密度/(人·km ⁻²)	人口密度数据及分区统计
	距水源距离/m	基础地理信息数据及缓冲区分析
	距道路距离/m	基础地理信息数据及缓冲区分析
状态指标S	坡度/(°)	DEM数据及坡度提取
	坡向	DEM数据及坡向提取
	曲率/(m ⁻¹)	DEM数据及曲率提取
	高程/m	DEM数据
	地势起伏度/m	DEM数据及均值变点法分析
	归一化植被指数(NDVI)	NDVI数据及分区统计
响应指标R	林地最大斑块指数(林地LPI)	景观格局指数计算
	耕地破碎化程度(耕地PARA_MN)	景观格局指数计算

3.2 秦巴山区中部生态敏感性评价

根据熵值法计算公式(2), 计算得到11个评价指标的权重值(见表2)。

由表2可知, 基于PSR模型选取的指标在不同的年份其权值大小不同。其中, 人口密度所占的比重有所下降, 2000年为0.252, 2018年为0.229; 距道路距离所占的比重也有所下降, 2000年为0.171, 2018年为0.155; NDVI权重值则随年份的变化有所增加, 2000年为0.059, 2018年为0.143; 而其他指标的权重则变化幅度较小。

根据秦巴山区中部的实际情况, 采用公式

(4), 对各评价指标线性加权求和, 并结合国内生态敏感性等级的划分方法^[20-21], 确定了秦巴山区中部生态敏感性的等级评价标准, 其分级标准见表3。秦巴山区中部以县为统计单元的生态敏感性综合指数为

$$Z_i = \sum_{j=1}^k (y_j \times w_j), \quad (4)$$

其中 $t=1, 2, 3, \dots, u$; u 为县的个数; y_j 为第 j 个评价指标的标准化值; w_j 为第 j 个评价指标的权重。

将各指标规范化处理后的监测值进行加权叠

表2 秦巴山区中部生态敏感性评价指标权重值

Table 2 The weight value of ecological sensitivity evaluation index in the central Qinling-Daba Mountain area

指标	年份				
	2000	2005	2010	2015	2018
人口密度	0.252	0.240	0.242	0.233	0.229
距水源距离	0.100	0.096	0.097	0.093	0.091
距道路距离	0.171	0.163	0.164	0.158	0.155
坡度	0.031	0.030	0.030	0.029	0.028
坡向	0.034	0.032	0.032	0.031	0.031
曲率	0.062	0.059	0.059	0.057	0.056
高程	0.149	0.143	0.144	0.138	0.136
地势起伏度	0.042	0.040	0.040	0.039	0.038
NDVI	0.059	0.073	0.071	0.109	0.143
林地LPI	0.033	0.031	0.031	0.030	0.030
耕地 PARA_MN	0.068	0.091	0.090	0.083	0.062

表3 秦巴山区中部生态敏感性综合指数分级标准

Table 3 Classification standard of comprehensive index of ecological sensitivity in the central Qinling-Daba Mountain area

敏感度分级	Z_i 取值范围	山区环境状态
不敏感区	[0, 0.30)	基本未受到破坏, 系统结构完整
轻度敏感区	[0.30, 0.35)	略微受到损坏, 其结构和功能总体完整
中度敏感区	[0.35, 0.40)	受到破坏程度较低, 系统可维持其功能
高度敏感区	[0.40, 0.45)	功能严重退化, 环境系统受到较大损坏
极度敏感区	[0.45, 1]	遭受严重破坏, 系统结构严重残缺

加, 按照秦巴山区中部生态环境敏感性分级标准(表3), 即可得到秦巴山区中部生态敏感性等级变化分区图(图2)。

由图2可知, 在空间上位于秦巴山区中部的汉中市, 除汉台区在2015和2018年生态敏感性等级为极度敏感区之外, 其余县区的敏感性等级大部分处于轻度敏感区及其以下。如勉县仅在2000年生态敏感性等级为轻度敏感区, 敏感性指数为0.32, 其他研究年份的生态敏感性等级均为不敏感区; 留坝县2000~2015年的生态敏感性等级为轻度敏感区, 在2018年生态敏感性等级降为不敏感区, 说明汉中市生态环境质量逐渐改善。

对于秦巴山区中部的安康市, 在研究的5年中镇坪县生态敏感性等级均为极度敏感区, 但是其生态敏感性指数呈现下降趋势, 敏感性指数分别为0.52、0.49、0.49、0.47、0.46。而岚皋县, 仅2000年的生态敏感性等级为极度敏感区, 其余研究年份的生态敏感性等级从2005年的高度敏感区, 下降至2018年的中度敏感区。白河县在研究

年份内生态敏感性等级为不敏感区, 总体表明安康市的环境质量呈现逐渐改善趋势。

秦巴山区中部的商洛市, 生态敏感性指数变化较大。其中, 洛南县除2000年、2010年生态敏感性等级为极度敏感区之外, 其余3年均为高度敏感区; 而柞水县在2000年生态敏感性等级为极度敏感区, 其余4年生态敏感性等级降为高度敏感区; 丹凤县在研究年份内生态敏感性等级由轻度敏感区转变为不敏感区; 而商南县的敏感性指数较小, 在这5年均为不敏感区, 说明商洛市的生态环境也呈现逐渐改善趋势。

为进一步分析秦巴山区中部各个敏感区的变化规律, 图3中计算了不同敏感区面积所占的比例。由图3可见, 在时间变化上, 秦巴山区中部的极度敏感区、高度敏感区和中度敏感区的占比, 总体上呈下降趋势, 2000年分别为12.35%、14.88%和30.45%, 2018年分别为2.91%、7.47%和25.90%, 其中极度敏感区的占比下降较多, 在研究年份内下降了近10个百分点; 而且, 至2018

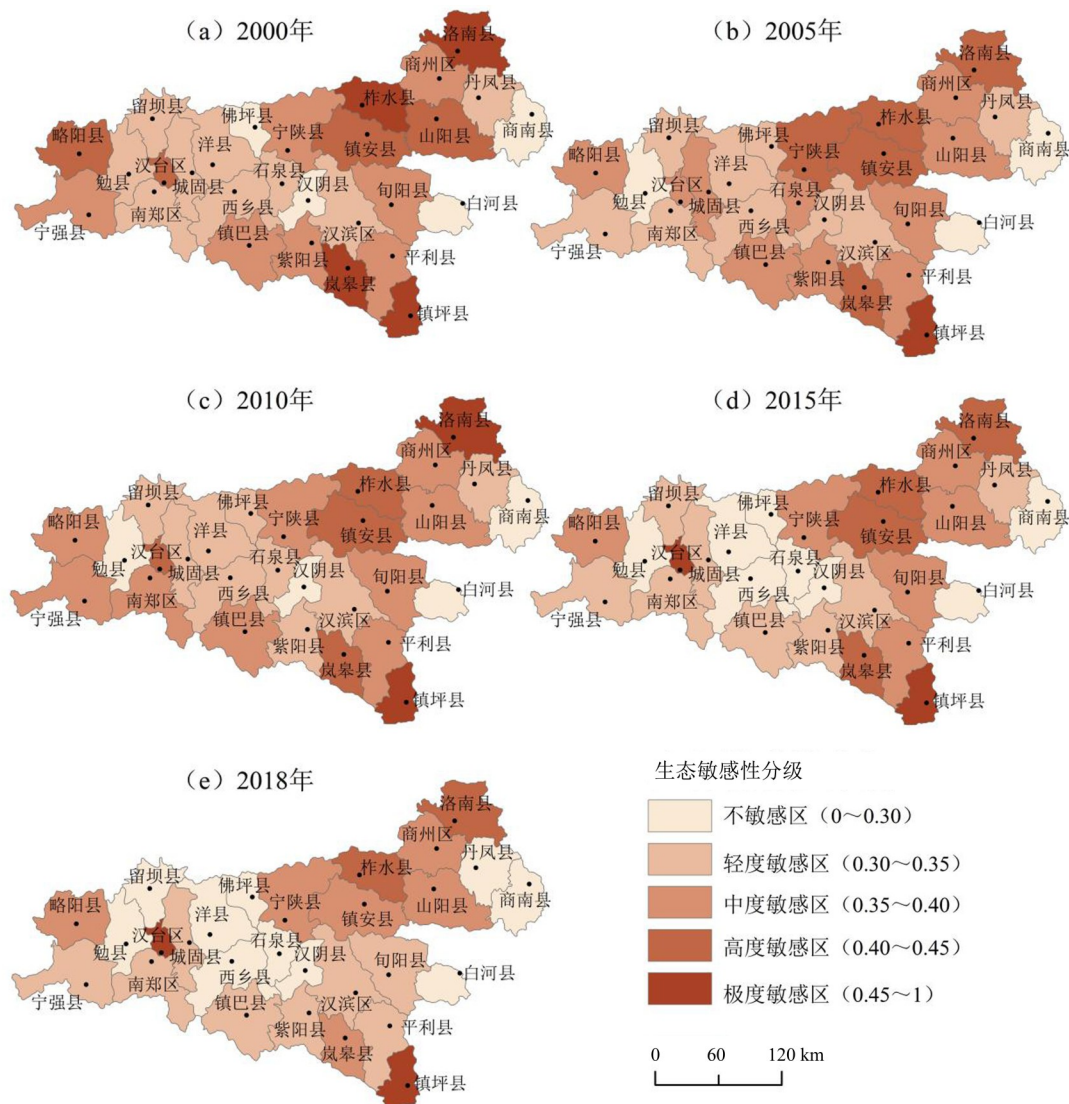


图2 秦巴山区中部生态敏感性等级变化分区图

Fig. 2 Zonation map of ecological sensitivity level change in the central Qinling-Daba Mountain area

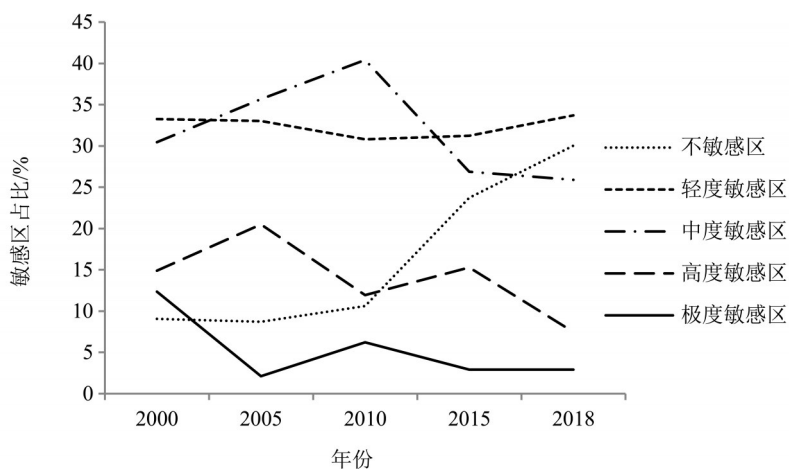


图3 秦巴山区中部不同等级敏感区面积变化趋势图

Fig. 3 Area change trend map of different grade sensitive areas in the central Qinling-Daba Mountain area

年的极度敏感区和高度敏感区面积总占比总和已下降为 10.38%。

同时,秦巴山区中部的中度敏感区占比有小幅下降,2000年为30.45%,2018年为25.90%;而轻度敏感区面积变化较小,在33%左右变动。但是秦巴山区中部的不敏感区面积占比则有大幅度增加,2000年为9.06%,2018年为30.03%,说明近年来相关环境保护政策的实施以及治理污染的措施,切实改善了秦巴山区中部的生态环境。

3.3 秦巴山区中部生态敏感性驱动因子分析

基于公式(3),利用地理探测器的因子探测计算得到不同年份的各评价指标对生态敏感性的驱动程度 q 值(见图4),其显著性通过地理探测器的检验。

从图4(a)可见,汉中市压力指标中人口密度的 q 值较大,自2000年的0.86增大到2018年的0.94,这是由于汉中盆地面积大,人口高度集中所致。特别是汉台区,2017年人口密度高达996人/ km^2 ^[22],因此其生态敏感性等级明显高于周边区域(图2)。状态指标中,高程、地势起伏度在这几年的 q 值均较大(图4(a)),说明高程小、起

伏平缓的区域,人类改造环境的能力较强,生态环境质量较差,尤其是位于汉中盆地中心的汉台区。但是,在响应指标中,林地最大斑块指数 q 值在这5年呈增加趋势,与状态指标NDVI的 q 值变化趋势一致,说明虽然汉中市人口密度大、高程小、地势平缓对汉中市生态敏感性会产生负面的影响,但是由NDVI和林地最大斑块指数的驱动作用,汉中市生态环境改善明显,其生态敏感性等级呈下降趋势。

图4(b)中,安康市的距水源距离在这5年中 q 值较大,为生态敏感性压力指标的主导因素,说明安康地区水力资源丰富,尤其是山谷型地区岚皋县,岚河、大道河、洞河等河流流经,居民大多生活在河谷区域,对水资源依赖较强,生态环境受到的外部压力较大,因此其在研究年份的敏感性等级较高。状态指标中,高程 q 值也较大,说明该指标的变化是影响安康市生态敏感性状态指标的主要驱动因子,分析发现镇坪县在这5年中,生态敏感性等级均为极度敏感区,这与刘迪等^[14]研究的秦巴山区生态风险重心跃向东南,即安康地区的结果一致。近年来,安康市结合防灾和扶

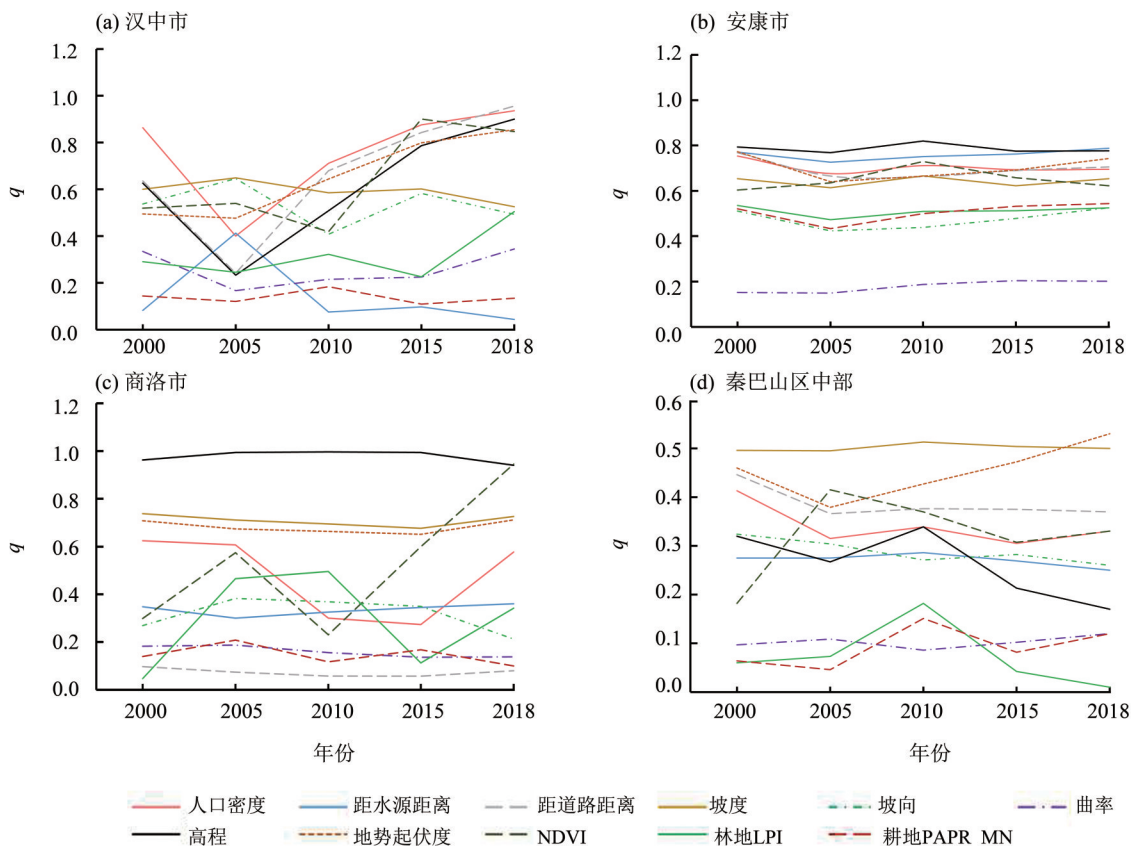


图4 秦巴山区中部生态敏感性指标的驱动程度 q 值变化图

Fig. 4 q value of driving degree of ecological sensitivity index in the central Qinling-Daba Mountain area

贫两个因素, 当地人民大量搬迁, 造成耕地破碎化程度的 q 值有小幅变化(2000年为0.52, 2018年为0.54)。由于安康市重视生态环境保护, 使得NDVI的 q 值有小幅增长, 环境质量呈现逐渐改善趋势, 其生态敏感性等级也在下降。

图4(c)中, 商洛市的压力指标人口密度 q 值较大, 2000和2005年的 q 值分别为0.62和0.61。人口数量增多, 会加大资源环境的负担, 对生态敏感性的影响程度较大, 但是从图4(c)中, 商洛市的人口密度 q 值有小幅下降, 在2018年降至0.58, 说明商洛市的人口压力对生态环境的影响降低。状态指标高程的 q 值较大, 但变化较小, 这与商洛市盆地面积小、山区占据面积大的地理环境相对应, 但NDVI的 q 值逐渐增大, 由2000年的0.30增加到2018年0.95, 说明商洛市植被覆盖度的不断增大, 生态敏感性等级下降; 特别是柞水县在2000、2005和2010年生态敏感性等级为极度敏感区, 但在2015和2018年降为高度敏感区。响应指标林地最大斑块指数 q 值较大, 作用显著, 这与NDVI的 q 值变化一致。

对于秦巴山区中部总的生态敏感性驱动因子, 从图4(d)可见, 压力指标中距道路距离的 q 值较大, 为主要的驱动因子, 表明秦巴山区中部进行了一项大规模的避险移民工程, 道路交通随之发展, 同时也对生态环境带来了影响, 使得压力指标距道路距离、人口密度成为影响秦巴山区中部生态敏感性的重要因素^[23], 但是 q 值在研究年份中呈减少趋势, 说明交通条件的改善, 有利于减轻生态环境压力。状态指标中坡度、地势起伏度的 q 值较大, 为状态指标中的驱动因子, 但变化较小, 这与秦巴山区中部山地众多的地理环境相一致, 是造成生态敏感程度变化的重要因素。而对于响应指标, 林地最大斑块指数以及耕地破碎化程度的 q 值很小, 变化幅度也较小, 二者对生态环境的响应程度不明显。但是从状态指标NDVI的变化情况来看, 在研究年份里, 秦巴山区中部的NDVI的 q 值逐渐增大, 2000年为0.18, 2018年为0.33, 说明秦巴山区中部植被覆盖面积呈增加趋势, 这与前人的研究相符^[24], 表明秦巴山区中部生态环

境质量逐渐改善, 敏感性等级呈下降趋势, 这与前文的研究结果一致。

4 结 论

本文综合利用ArcGIS的空间分析工具, 应用PSR模型, 对秦巴山区中部汉中、安康、商洛3市的DEM数据、土地利用数据以及人口密度数据等进行提取, 根据熵值法计算了各个评价指标在2000、2005、2010、2015和2018年所占的权重值, 然后加权叠加得到秦巴山区中部这5年的生态敏感性, 并基于地理探测器分析了不同年份生态环境影响的驱动因子 q 值的变化情况, 得到如下结论:

1) 整体上秦巴山区中部生态敏感程度呈下降趋势。在空间上, 秦巴山区中部的汉中市, 除汉台区在2015和2018年生态敏感性等级为极度敏感区之外, 汉中市其余县区的敏感性等级大部分处于轻度敏感区及其以下; 而安康市、商洛市的生态环境质量则呈现逐渐改善的趋势。在时间上, 秦巴山区中部的极度敏感区、高度敏感区和中度敏感区的占比, 总体上呈下降趋势, 而不敏感区的面积占比则有大幅度增加, 说明秦巴山区中部的生态环境质量随时间持续向好发展。

2) 基于地理探测器分析不同年份秦巴山区中部PSR模型各指标对生态敏感性驱动程度的变化情况, 结果表明汉中市压力指标人口密度、状态指标高程、响应指标林地最大斑块指数 q 值较大, 对生态敏感性影响较为显著。安康市的距水源距离为生态敏感性压力指标的主导因素, 状态指标的主要驱动因子为高程, 耕地破碎化程度 q 值较大, 成为安康市生态敏感性响应指标的主要影响因素。商洛市的压力指标人口密度、状态指标高程、响应指标林地最大斑块指数的 q 值较大, 占据主导地位。秦巴山区中部的压力指标距道路距离、状态指标中坡度、地势起伏度、NDVI的 q 值较大, 为主要的驱动因子, 而林地最大斑块指数以及耕地破碎化程度的响应程度不明显, 说明秦巴山区中部及各县市生态敏感性驱动因子在不同的时空上, 起主导驱动作用的因子差异较大, 但是压力、状态和响应指标之间相互制约、相互影响, 共同驱动和影响秦巴山区中部生态环境质量变化。

参考文献:

- [1] 李森,胡蒙蒙,夏北成. 珠江三角洲城市群生态安全空间分异与聚集特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2020, 59(1):96-104.
- [2] 刘军会,高吉喜,马苏,等. 中国生态环境敏感区评价[J]. 自然资源学报, 2015, 30(10):1607-1616.
- [3] 傅伯杰. 中国各省区生态环境质量评价与排序[J]. 中国人口·资源与环境, 1992, 2(2):48-54.
- [4] 孙鹏,张强,邓晓宇,等. 塔里木河流域干旱风险评估与区划[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(3):121-127.
- [5] 管青春,郝晋珉,石雪洁,等. 中国生态用地及生态系统服务价值变化研究[J]. 自然资源学报, 2018, 33(2):195-207.
- [6] 龚建周,夏北成,郭烁. 城市生态安全评价与预测模型研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2006, 45(1):107-111.
- [7] 舒帮荣,黄琪,刘友兆,等. 基于变权的城镇用地扩展生态适宜性空间模糊评价——以江苏省太仓市为例[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3):402-412.
- [8] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报, 2000, 20(1):9-12.
- [9] 郭兵,孔维华,姜琳. 西北干旱荒漠生态区脆弱性动态监测及驱动因子定量分析[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3):412-424.
- [10] 周博,杜晓霞,马林兵,等. 基于PSR模型的土地利用系统健康动态评价[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2018, 57(4):9-15.
- [11] 涂洁. 江西退化红壤区湿地松树干液流BP神经网络模型研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(1):24-29.
- [12] 李颖,冯玉,彭飞,等. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变[J]. 经济地理, 2017, 37(12):180-189.
- [13] 杨雪荻,白永平,车磊,等. 甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J]. 生态学报, 2020, 40(14):4785-4793.
- [14] 刘迪,陈海,耿甜伟,等. 基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变[J]. 地理科学进展, 2020, 39(2):243-254.
- [15] 王丽霞,任志远. 陕西省各地市生态环境质量评价与差异分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2):210-214.
- [16] 杨楠,王小文,卓悦. 陕南地区生态环境状况综合评价及对策[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2):190-194.
- [17] 蔡霄,杨洋,李鹏山,等. 基于PSR-NES耦合模型的土地生态状况综合评估——以大邑县为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(4):685-694.
- [18] 潘慧,刘学录,潘韬. 民勤县景观组分的生态敏感性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12):146-152.
- [19] 范峻恺,徐建刚. 基于神经网络综合建模的区域城市群发展脆弱性评价——以滇中城市群为例[J]. 自然资源学报, 2020, 35(12):2875-2887.
- [20] 李永格,李宗省,冯起,等. 基于生态红线划定的祁连山生态保护性开发研究[J]. 生态学报, 2019, 39(7):2343-2352.
- [21] 王紫薇,黄文哲,周阳阳,等. 泥河沟流域生态敏感性分析评价[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(6):210-215.
- [22] 张珊,查小春,刘恺云. 地形起伏特征对汉中市人口与经济的空间分布格局影响研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(8):138-148.
- [23] MARANS R W,徐滢. 秦巴山区人居生活质量研究:关注城市发展建设对相关人群的影响[J]. 中国工程科学, 2016, 18(5):92-99.
- [24] 罗新蕊,杨武年,陈桃. 川中丘陵区植被遥感动态监测及其驱动力分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(1):103-111.

(责任编辑 秦社彩)