湖南省湘西州重点生态功能区贫困县生态脆弱性评价

张家其[1]，钟 倩[2]，朱烜伯[3]，李 强[1]，欧江南[1]，王 翼[1]

(1. 衡阳师范学院 城市与旅游学院，湖南 衡阳 421002；2. 湖南师范大学 资源与环境科学学院，湖南 长沙 410081；3. 华中师范大学 城市与环境科学学院，湖北 武汉 430070)

摘 要：[目的] 开展湖南省湘西州生态脆弱性评价，在此基础上规划适宜开发区、限制开发区，为实现研究区绿色可持续发展提供参考。[方法] 依据湘西州生态环境特点，利用 2015—2018 年社会经济统计数据，采用遥感影像、数字高程模型(DEM)等基础数据，运用 GIS 空间分析法，综合分析了湘西州各县生态脆弱性的时空演变特征。[结果] ①生态脆弱性空间格局呈现出西高东低的分布特征，微度和轻度脆弱区主要分布在湘西东部永顺县和古丈县，重度和极度脆弱区成片分布在西部龙山县、保靖县和吉首市；②生态脆弱性总体表现出向高脆弱等级方向发展的趋势，微度脆弱区面积急速减少，重度脆弱区面积急速上升，生态环境逐年恶化。[结论] 应注重人类活动对生态系统的积极影响，在加大扶贫力度的同时，因地制宜地开展生态环境保护工作。

关键词：重点生态功能区；贫困县；生态脆弱性；湖南省

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2020)01-0198-06 **中图分类号**：X826

文献参数：张家其，钟倩，朱烜伯，等. 湖南省湘西州重点生态功能区贫困县生态脆弱性评价[J]. 水土保持通报，2020，40(1)：198-203. DOI：10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 01. 029；Zhang Jiaqi，Zhong Qian，Zhu Xuanbo，et al. Ecological vulnerability assessment of impoverished counties in key ecological functional areas of Xiangxi Prefecture in Hu'nan Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2020，40(1)：198-203.

Ecological Vulnerability Assessment of Impoverished Counties in Key Ecological Functional Areas of Xiangxi Prefecture in Hu'nan Province

Zhang Jiaqi[1]，Zhong Qian[2]，Zhu Xuanbo[3]，Li Qiang[1]，Ou Jiangnan[1]，Wang Yi[1]

(1. *College of City and Tourism，Hengyang Normal University，Hengyang，Hu'nan* 421002，*China*；2. *College of Resources and Environmental Sciences，Hu'nan Normal University，Changsha，Hu'nan* 410081，*China*；3. *College of Urban and Environmental Science，Central China Normal University，Wuhan，Hubei* 430079，*China*)

Abstract：[Objective] An ecological vulnerability assessment in Xiangxi Prefecture of Hu'nan Province was assessed to serve as a reference for upcoming "green" and sustainable development，and the research areas were classified into "suitable" or "restricted" for development zones. [Methods] Spatial-temporal characteristics of the evolution of ecological vulnerability in all counties were comprehensively analyzed using GIS and ecological environmental characteristics were considered using socioeconomic statistical data from 2015 to 2018，remote sensing imagery，and digital elevation models. [Results] ① The spatial patterns of ecological vulnerability indicated high vulnerability in the west and low vulnerability in the east. Moderately low and low vulnerability zones were mainly distributed in Yongshun and Guzhang counties in Western Hu'nan，and high and extremely high vulnerability zones were distributed in portions of western Longshan and Baojing counties and Jishou City. ② Overall ecological vulnerability trended toward high vulnerability，while the area of moderately-low vulnerability zones decreased sharply and that of extremely high vulnerability zones increased dramatically，indicating that the ecological environment has deteriorated over the study period. [Conclusion]

收稿日期：2019-08-02 **修回日期**：2019-09-07

资助项目：教育部人文社会科学研究青年基金项目"重点生态功能区贫困县扶贫开发成效及响应机制研究：以湘西州为例"(17YJC630211)；湖南省社会科学成果评审委员会项目(XSP19YBC180，XSP18YBZ048)；湖南省人居环境学研究基地开放基金(RJ16K02)

第一作者：张家其(1986—)，男(汉族)，湖南省醴陵市人，博士，副教授，硕士生导师，主要从事贫困地区生态安全研究。Email：594089143@qq. com。

通讯作者：朱烜伯(1985—)，男(汉族)，江西省南昌市人，博士研究生，主要从事贫困地区生态安全研究。Email：330442900@qq. com。

Attention should be focused on the positive impact of human activities on the ecological system and on ensuring that environmental protection work is carried out according to actual ecological conditions while poverty alleviation work is strengthened.

Keywords: key ecological functional area; impoverished counties; ecological vulnerability; Hu'nan Province

"十三五"规划明确指出,2020 年要实现在现行标准下农村贫困人口的全面脱贫[1]。随着扶贫工作进入收官阶段,深度贫困区成为扶贫工作最难啃的一块骨头。中国生态敏感地区有约 76%的贫困县,深度贫困地区往往是生态环境较为脆弱的地区,其面临着生态保护与经济发展的双重压力,但迫于脱贫压力,生态环境问题往往被作为边缘议题搁置。2018 年 4 月 26 日,习近平在深入推动长江经济带发展座谈会上强调"要坚持生态优先,把修复长江生态环境摆在压倒性位置,继续推进绿色发展,建设生态文明"[2]。湘西州地区作为长江经济带重点生态功能保护区中的贫困地区,肩负了维护国家生态安全的重大使命,还是国家西部经济开发、武陵山区区域发展与精准扶贫攻坚先行先试地区和中心地带。在国家"精准扶贫"战略实施下,湘西州已进入脱贫攻坚冲刺年,在重点生态功能保护区限制开发的情势下,其脱贫难度更大,极易陷入发展与保护无法协调的两难境地。因此,通过研究该区域的生态脆弱性,继而划分生态红线,可以此作为协调区内经济发展与环境保护的重要依据。

作为一个生态经济复合系统,自然地理环境本身的劣势和长期不合理的生产、生活方式给该区域的生态系统带来了双重压力和影响,特别是湘西州地区山地、丘陵广布,降雨充沛,暴雨频繁,加之坡耕地众多,极易发生水土流失,不仅会对该区生态安全造成不利影响,还会增大长江中下游环境治理的难度,因此无论从微观还是宏观角度来看,为了协调研究区经济发展与环境保护关系,研究湘西州生态脆弱性意义重大。本研究利用空间分析软件提取坡度、土地利用类型等数据因子,综合考虑湘西自治州经济贫困、人地矛盾突出的现状,以压力—状态—响应模型为基础,构建湘西州生态脆弱性评价指标体系,继而开展综合性评价,在此基础上规划适宜开发区域、限制开发区,以期为实现该地区绿色可持续发展提供参考。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

湘西自治州地处湖南省西北部,地形以山地、丘陵为主,地势东南低,西北高,起伏较大;气候属中亚热带季风湿润性气候,热量丰富,降水充沛,时空分配不均,空间上北多南少,时间上集中在夏秋两季;土壤以抗侵蚀能力较弱的红黄壤为主。湘西州经济贫困,其所辖的 8 个市县有 7 个县均为国家级贫困县,长期粗放的生产模式和不利的气候、土壤条件,导致水土流失和石漠化现象严重,环境承载能力低。

1.2　数据来源

本研究采用的数据包括:①湘西州 2015—2018 年分辨率为 30 m 的 Landsat 8 遥感影像数据;②湘西州分辨率为 30 m 的数字高程模型(DEM)数据;③湘西州 2015—2018 年统计年鉴;④湘西州国民经济与社会发展统计公报。由于研究中的基础数据既有 SHP 格式的矢量数据和 TIF 格式的栅格数据,又有以县域为单位的统计数据,为了方便后续的制图,需对数据进行预处理,包括社会统计数据的矢量化,影像数据的校正和裁剪,以及统一为 WGS1984-UTM49N 的坐标系等。

2　研究方法

2.1　生态脆弱性评价指标体系构建

已有研究在构建评价指标体系时大多考虑自然地理环境所表现出的显性因子[3-10],如坡度、高程、降雨侵蚀力等,对于人类活动这种隐性因子考虑较少。事实证明,随着人地矛盾越来越突出,人类活动对生态环境的影响更加剧烈[11]。虽然生态系统的自我调节能力能在一定程度上修正人类活动对环境所产生的消极影响以维持生态平衡,但一旦超出这个生态平衡阈值,这种消极影响就会表现出爆发性和不可逆性。此外,人们越来越重视生态环境和人居环境建设,人类活动对自然环境的积极影响也愈加显著[11]。叶文虎等[12]认为人与自然环境所组成的人地系统,是由人的生产子系统、物资生产子系统与环境生产子系统所组成。借鉴该分类方法,根据"压力—状态—响应"模型思路[13-17],本文从自然生态与人类活动两个角度构建了生态脆弱性评价指标体系(见表 1)。

其中,压力系统下分为生产压力、资源利用压力和人居环境压力。生产压力来自湘西的农业生产和旅游商贸等经济活动,选取人均粮食产量和人均 GDP 为代表性指标;资源利用压力主要是土地资源和不可再生资源的利用带来的压力,故选取人均耕地面积和工业能源消耗量为代表性指标;人居环境压力则来自改善居住环境的诉求,故选取道路网密度和房屋工程建设面积为代表性指标。

表 1 湘西州生态脆弱性评价指标体系组合权重

分目标层	准则层	指标层	AHP 权重	熵权	AHP-熵权
压力 B_1	资源利用压力 C_1	人均耕地面积 D_1	0.07	0.03	0.05
		工业能源消耗量 D_2	0.04	0.05	0.05
	人居环境压力 C_2	道路网密度 D_3	0.05	0.01	0.02
		房屋工程建设面积 D_4	0.01	0.01	0.01
	经济生产压力 C_3	人均 GDP D_5	0.13	0.04	0.08
		人均粮食产量 D_6	0.01	0.03	0.02
状态 B_2	地形状态 C_4	坡度 D_7	0.16	0.07	0.12
		高程 D_8	0.05	0.03	0.04
	地表状态 C_5	降雨侵蚀 D_9	0.11	0.08	0.10
		土壤可蚀性 D_{10}	0.06	0.04	0.06
	生物状态 C_6	生物丰度 D_{11}	0.03	0.05	0.04
		植被覆盖度 D_{12}	0.08	0.19	0.14
响应 B_3	生态响应 C_7	污水处理率 D_{13}	0.02	0.07	0.04
		人工造林面积比例 D_{14}	0.03	0.01	0.02
	政策响应 C_8	环保支出占财政总支出比重 D_{15}	0.05	0.07	0.06
		生态功能保护区面积比例 D_{16}	0.10	0.21	0.15

状态指标反映生态系统在人类活动影响下所呈现出来的状态，据最新的湖南省水土流失遥感调查结果显示，湘西州仍是中度和强烈水土流失集中分布的区域[18]，因此该地区生态环境状况更多的表现在自然环境（地形、地表状况、生物）方面。基于此，地形以坡度和高程为代表性指标；地表以降雨侵蚀力和土壤可蚀性为代表性指标来指示土壤的水土流失情况[19]；生物指标以生物丰度指数和森林覆盖率作为代表性指标。

响应指标是人类对于生态系统的破坏而采取的对策与措施，按照响应途径可分为生态响应和政策响应，考虑到数据的可获得性和计算的简便性，采用人工造林面积占比指标、污水处理率、生态功能保护区面积占比和环境保护支出占总财政支出的比重来反映人类活动对生态系统的积极影响。

2.2 指标数据标准化

由于原始数据量纲和数量级各异，无法直接进行计算处理，并且数值过大在计算时会造成精度的损失，所以需对评价指标进行标准化处理以保证结果的可靠性。基于本研究的数据特点，选择更适用于离散型数据的 Max-Min 标准化方法〔公式(1)—(2)〕进行归一化处理，使其值域统一为[0,1]。在 16 个指标中，负向指标包括生物丰度，植被覆盖度，污水处理率，人工造林面积，环保支出占财政比重，生态功能保护区面积占比。

正向评价指标：
$$Z_{ij}=\frac{10(X_{ij}-X_{i\min})}{X_{i\max}-X_{i\min}} \tag{1}$$

负向评价指标：
$$Z_{ij}=\frac{10(X_{i\max}-X_{ij})}{X_{i\max}-X_{i\min}} \tag{2}$$

式中：Z_{ij} 为 i 指标下第 j 个值的标准化值；X_{ij} 为 i 指标下第 j 个值；$X_{i\max}$ 为第 i 个指标中最大值；$X_{i\min}$ 为第 i 个指标中最小值。

2.3 AHP-熵权法定权重

本研究采用 AHP-熵权组合法确定生态脆弱性评价指标权重，既能考虑到专家经验和区域特点，又能去除主观随意性。具体计算步骤如下：

(1) 层次分析法。按照“目标层—系统层—指标层”形式构建层次结构模型，采用传统 9 标度法，对系统层各元素和指标层各元素重要程度进行两两比较，构造判断矩阵、进行归一化处理、求出最大特征值 $\lambda_{\max}$，经过一致性检验求得各指标权重 $A_{wi}=(a_{w1},a_{w2},\cdots,a_{wm})$[20]。

(2) 熵权法。依据信息熵原理，对矩阵中各项指标标准化后数值 Z_{ij} 进行归一化处理得到 p_{ij}[21]。

$$p_{ij}=\frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}Z_{ij}} \quad (\text{当 } p_{ij}=0,\text{则定义 } \lim_{p_{ij}\to 0} p_{ij}\ln p_{ij}=0) \tag{3}$$

式中：p_{ij} 为 i 指标下第 j 个值的归一化值；Z_{ij} 为熵权矩阵中 i 指标下第 j 个值的标准化值，n 为评价对象的个数。

根据数据混乱程度计算 i 指标信息熵 E_i，求得各指标熵权 $S_{W_i}=(s_{w_1},s_{w_2},\cdots,s_{w_m})$

$$E_i=-\ln(n)^{-1}\sum_{i=1}^{n}p_{ij}\ln p_{ij} \tag{4}$$

$$S_{W_i}=(1-E_i)/\sum_{m=1}^{m}(1-E_i) \tag{5}$$

式中：E_i 为第 i 个指标为信息熵；S_{W_i} 为第 i 个指标的熵权；m 为指标个数。

(3) AHP-熵权组合法。利用拉格朗日乘法计数法确定各指标 AHP-熵权组合权重,最后进行归一化处理得到各指标最终组合权重 $W_i=(u_1,u_2,\cdots,u_i)$(表 1)。

$$u_i=\frac{(a_{w_i}s_{w_i})^{0.5}}{(\sum_{i=1}^{m}a_{w_i}s_{w_i})^{0.5}} \tag{6}$$

$$W_i=\frac{u_i}{\sum_{i=1}^{m}u_i} \tag{7}$$

式中:u_i 为未归一化前的组合权重;W_i 为指归一化后的组合权重。

3　结果与分析

采用 ArcGIS 计算可得到各县域的生态脆弱性综合指数(如表 2 所示),并用标准差表示各个县域 4 a的生态脆弱性综合指数的变化剧烈程度。

表 2　2015—2018 年湘西州生态脆弱性综合指数

项 目	年份	吉首市	泸溪县	凤凰县	花垣县	保靖县	古丈县	永顺县	龙山县
生态脆弱性综合指数	2015	4.74	3.33	2.49	4.26	3.19	2.61	2.37	3.45
	2016	4.67	3.33	2.86	3.82	3.39	2.79	2.46	3.58
	2017	4.65	3.14	2.88	3.41	3.52	3.00	2.24	3.69
	2018	4.88	3.33	3.21	3.43	4.12	2.94	2.51	3.97
变化剧烈程度		0.09	0.08	0.25	0.35	0.35	0.15	0.10	0.19

3.1　生态脆弱性空间差异分析

近年来,国家越来越重视生态建设,在“绿色增长”、“生态扶贫”等政策背景下,湘西州作为重点生态功能区当中的贫困县,其生态环境是否脆弱的评价标准应与其他地域有所不同。对该地区展开生态脆弱性评价是为了深入了解当地的生态环境状态,探究其生态环境保护与经济发展的相互关系,并为政府部门制定相应决策提供参考建议。考虑到政府决策实施过程中具有严格的行政区划特性,即决策的执行力和影响力在各自行政区内具有均质性,为了使评价结果与政策实施保持空间一致性,在参考现有的生态脆弱性评价分类标准基础上[22-25],依据湘西州生态环境具体特点,将生态脆弱综合指数划分成微度、轻度、中度、重度和极度脆弱 5 个等级(见表 3),进而分析生态脆弱性的空间分布特征(见封 2 附图 10)。

生态脆弱性的空间分布格局历年没有太大变化,整体呈现出西高东低的特征(见封 2 附图 10)。2018 年重度和极度脆弱区成片分布在龙山县、保靖县和吉首市。微度和轻度脆弱区主要分布在湘西东部的永顺县和古丈县。

表 3　2015—2018 年湘西州生态脆弱性等级标准及面积比例

生态脆弱性等级	生态脆弱性综合指数	面积比例/%			
		2015 年	2016 年	2017 年	2018 年
轻度脆弱	2.3～3.1	37.46	24.84	26.47%	19.86
微度脆弱	3.1～3.6	17.79	24.88	26.74	26.65
中度脆弱	3.6～4.1	26.23	30.82	25.11	15.24
重度脆弱	4.1～4.7	10.77	12.58	14.76	26.77
极度脆弱	4.7～6.4	7.75	6.88	6.91	11.48

永顺县和古丈县在坡度和高程指标上处于劣势,但由于人为干扰程度低、物种丰富度高,在一定程度上缓解了地形因子所造成的负面影响。吉首市经济活动密集,人均 GDP 是其他县市的 5 倍,其中工业生产总值对 GDP 贡献率达 35.8%,支柱产业是非金属矿物制品业此“三高”产业,且吉首市是工业产出和能源消耗量最高的地区,却是环境保护和治理投入最少的地区,环保支出占总财政支出 0.79%,是其他市县的 1/10,此外吉首市的城镇化水平高,交通建设和房屋工程建设面积是其它市县的 6 倍,植被覆盖率相比其他市县低,最终导致吉首表现出极度脆弱。与此相反,凤凰县工农业产业比例很低,文化旅游业占主导地位,凭借自身独特的自然风光和浓厚的古城风貌发展旅游业,因而生态系统表现出轻度脆弱。相比人类活动占主导影响因素的吉首市,龙山县和保靖县生态脆弱更多地受到自身自然地理环境的限制,两县分布在湘西西北边陲,地势高,山地多,平地少,地形起伏大,降水集中季节降雨侵蚀力高,且土壤主要为土层薄、有机质含量低、抗侵蚀能力弱的红色石灰土,土壤孔隙度较大,水土流失和石漠化现象严重,加之龙山县和保靖县农业比重较大,受地形因素限制,为了满足温饱需要,不得不开垦产量较低的坡耕地,进一步加剧了水土流失问题,此外保靖县工业产品以电解锌、硫酸、电解锰和陶瓷为主,“三废排放量”大。

3.2　生态脆弱性时间变化特征分析

随着时间的推移,微度脆弱区面积急速减少而重度脆弱区面积急速上升,生态系统总体表现出向高脆弱等级方向发展(见图 1)。

其中微度脆弱的面积比例从 2015 年的 37.46% 下降到 2018 年 19.86%,降幅达 46.99%,重度和极度脆弱总面积较 2015 年增幅达到 106.51%,分别增加了 26.77%,11.78%。8 市县中变化幅度最大的是花垣县和保靖县,标准差系数分别达到 0.346 和 0.345。

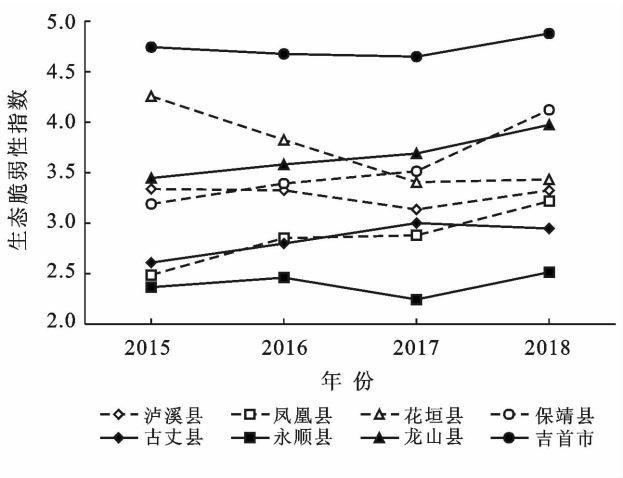


图 1 2015—2018 年湘西州生态脆弱性综合指数变化

保靖县生态脆弱性升高的原因已在上文列出，在此不作赘述。值得注意的是，花垣县的生态脆弱性有所好转，从 2015 年的重度脆弱下降到中度脆弱，主要缘于花垣县矿产资源丰富，工业密集，矿业产值一度占据该县生产总值的 60%以上，但不规范开采和管理不当造成的尾矿污染曾使得该区土壤污染和水污染严重，并引发了地面塌陷、山崩等地质灾害，粗放型的工业经营模式使得该区生产效益低下，生态环境和人居环境问题日益严重，2010 年花垣县开始深入开展矿区污染整治工作，规范矿山开采秩序，关闭或者永久性封闭不合格尾矿库，投入大量资金整治尾矿污染，建设矿区电子视频监控系统，实施采空区移民搬迁，2016 年该县森林覆盖率和污染源达标排放率分别达到 58.19%，97.37%。从花垣县矿区治理和生态建设发展趋势来看，生态脆弱大多缘于不合理的人类活动，而生态环境的改善又依赖于人类合理的规划自己的行为活动。

4 结论与建议

为实现生态环境持续发展，避免出现不考虑生产力发展和人居环境改善导致“返贫”，进而增重生态系统负担，陷入生态环境建设的恶性循环。在生态环境的治理工作中需遵循“三生共赢”理念，将环境效益外部化为生产效益，以良好的生态环境驱动高效生产，形成良性互动。基于此，本研究综合湘西州实际情况和研究结果，将湘西州划分为西北生态涵养区，城市发展核心区，东部适宜开发区三大功能区，并对其生态和生产发展提出规划建议(见图 2)。

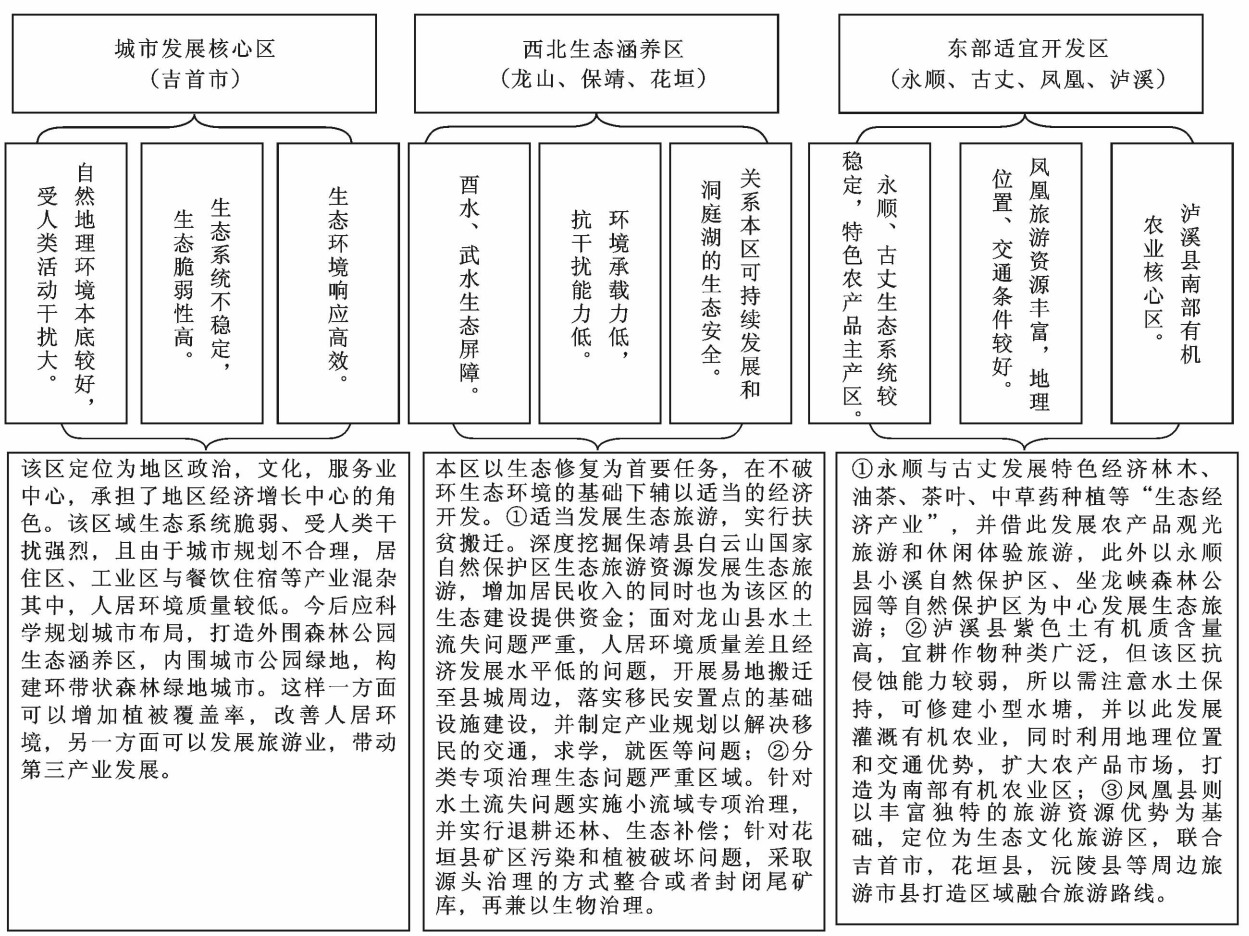


图 2 湘西州分区状况及其生态生产发展规划

无论是从生态脆弱性的正向发展还是负向发展来看,人类活动都是生态脆弱性变化的主导因素。2015—2018 年湘西州生态脆弱性变化显著,总体上生态脆弱性向高等级方向发展,空间格局呈西高东低的分布特征,这与湘西州生态脆弱性的实际情况基本一致。在时间上,生态脆弱性总体呈逐年恶化趋势,各县域变化幅度存在差异,其中湘西州西部的龙山县和保靖县的生态脆弱性显著增加。按照这种发展趋势,生态环境持续恶化将会限制经济发展,增大后续扶贫工作的难度和任务量,甚至出现"返贫"现象。所以本区域要注重人类活动对生态系统的积极影响,在加大扶贫力度的同时还需因地制宜地开展生态保护工作。由于评价指标体系具有区域性和综合性,本研究生态脆弱性评价指标体系主要依据湘西州的生态环境状况确定,缺乏横向对比性。权重赋值环节易受主观因素影响,很难界定社会经济指标对生态脆弱性的贡献度,该类型指标与生态脆弱性的相关模型分析有待深入研究。

[参 考 文 献]

[1] 中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要[N]. 人民日报,2016-03-18(1).

[2] 在深入推动长江经济带发展座谈会上的讲话[N]. 人民日报,2019-09-01(1).

[3] 郭婧,魏珍,任君,等. 基于熵权灰色关联法的高寒贫困山区生态脆弱性分析:以青海省海东市为例[J]. 水土保持通报,2019,39(3):191-199.

[4] 郭泽呈,魏伟,庞素菲,等. 基于 SPCA 和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析:以石羊河流域为例[J]. 生态学报,2019,39(7):2558-2572.

[5] 吴春生,黄翀,刘高焕,等. 基于模糊层次分析法的黄河三角洲生态脆弱性评价[J]. 生态学报,2018,38(13):4584-4595.

[6] 田超,杨夏捷,鞠园华,等. 吉林省西部地区生态脆弱性的动态评价[J]. 水土保持研究,2018,25(4):298-303.

[7] 杨美玲,李同昇,米文宝,等. 宁夏限制开发区生态脆弱性评价及分类发展模式[J]. 水土保持通报,2014,34(4):236-242.

[8] 徐君,李贵芳,王育红. 生态脆弱性国内外研究综述与展望[J]. 华东经济管理,2016,30(4):149-162.

[9] 李平星,樊杰. 基于 VSD 模型的区域生态系统脆弱性评价:以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报,2014,29(5):779-788.

[10] 裴欢,房世峰,覃志豪,等. 干旱区绿洲生态脆弱性评价方法及应用研究:以吐鲁番绿洲为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2013,38(5):528-532.

[11] 魏建兵,肖笃宁,解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则[J]. 地理科学进展,2006,25(2):36-45.

[12] 叶文虎,陈国谦. 三种生产论:可持续发展的基本理论[J]. 中国人口·资源与环境,1997,7(2):14-18.

[13] 齐姗姗,巩杰,钱彩云,等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报,2017,37(1):224-228.

[14] 付刚,白加德,齐月,等. 基于 GIS 的北京市生态脆弱性评价[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(9):830-839.

[15] 张金茜,李红瑛,曹二佳,等. 多尺度流域生态脆弱性评价及其空间关联性:以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报,2018,29(9):2897-2906.

[16] 姚雄,余坤勇,刘健,等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报,2016,27(3):735-745.

[17] 马骏,李昌晓,魏虹,等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报,2015,35(21):7117-7129.

[18] 湖南省水利厅. 关于湖南省第三次水土流失遥感调查结果的公告[N]. 湖南日报,2015-12-31(11).

[19] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland and east of the Rocky Mountains [M]. Washington: United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook(282). 1965.

[20] 乔青,高吉喜,王维,等. 生态脆弱性综合评价方法与应用[J]. 环境科学研究,2008,21(5):117-123.

[21] 李帅,魏虹,倪细炉,等. 基于层次分析法和熵权法的宁夏城市人居环境质量评价[J]. 应用生态学报,2014,25(9):2700-2708.

[22] 朱东国,谢炳庚,陈永林. 基于生态敏感性评价的山地旅游城市旅游用地策略:以张家界市为例[J]. 经济地理,2015,35(6):184-189.

[23] 曹诗颂,王艳慧,段福洲,等. 中国贫困地区生态环境脆弱性与经济贫困的耦合关系:基于连片特困区 714 个贫困县的实证分析[J]. 应用生态学报,2016,27(8):2614-2622.

[24] 张学玲,余文波,蔡海生,等. 区域生态环境脆弱性评价方法研究综述[J]. 生态学报,2018,38(16):5970-5981.

[25] 林明水,林金煌,王开泳,等. 基于 RM 的福建省旅游扶贫重点村生态脆弱性风险评价[J]. 地理研究,2018,37(12):2517-2527.