

基于模糊评价的喀斯特山区文山市资源环境承载力评价

谭 琨¹, 严直慧², 赵祖军³, 普军伟¹, 李思楠¹, 苗培培¹, 赵筱青¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 昆明 650500; 2. 云南省文山州气象局,
云南 文山 663000; 3. 云南省生态环境监测中心, 昆明 650034)

摘 要:喀斯特山区文山市资源匮乏、生态环境脆弱和社会经济发展落后,亟需了解资源环境承载力状况,为资源合理开发利用、生态环境保护和社会经济可持续发展等提供参考。因此,从资源、环境和社会经济 3 个方面,共选取了 31 个指标构建资源环境承载力评价指标体系,并运用模糊综合评价法结合 GIS 技术实现对喀斯特山区文山市资源环境承载力空间栅格尺度的评价和分析。结果表明:(1) 文山市资源环境综合承载力特征均值为 3.098 7,整体属于中等承载水平,但承载能力有较大的提升空间。中承载面积分布最大,占市域总面积的 89.38%,高承载和低承载次之,分别只占到 10.23%和 0.39%。市中心及其周围资源环境综合承载力较高,西北部和东北部的贫困和石漠化区域较低。(2) 资源承载力以中等承载为主,占全市总面积的 75.87%,其次为低承载和高承载,分别仅占 19.55%和 4.57%。东南部、中部、西南部和西北部的资源承载力较高,西部、东北部和南部较低;环境承载力以高等承载为主,占市域总面积的 81.20%,其次是中承载和理想承载,分别占 18.17%和 0.63%。北部、西南部和中部的环境承载力较高,东部、东南部和西中部较弱;社会经济承载力以低承载为主,占全市总面积的 51.22%,其次是中承载和高承载,分别占 37.62%和 11.16%。市区社会经济承载力最高,北部、西南部和南部较弱。(3) 文山市环境承载力最大,其次为资源承载力,社会经济承载力最小,表明区域总体上环境承载较好,资源条件趋弱,社会经济发展落后。

关键词:承载力; 资源环境承载力; 模糊综合评价; 喀斯特山区; 文山市

中图分类号:TV213

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)01-0218-10

Evaluation of Resource and Environmental Carrying Capacity of Wenshan City in Karst Area Based on Fuzzy Model

TAN Kun¹, YAN Zhihui², ZHAO Zujun³, PU Junwei¹, LI Sinan¹, MIAO Peipei¹, ZHAO Xiaoqing¹

(1. School of Geosciences, Yunnan University, Kunming 650500, China; 2. Wenshan Prefecture Meteorological Bureau of Yunnan Province, Wenshan, Yunnan 663000, China; 3. Yunnan Environmental Monitoring Center, Kunming 650034, China)

Abstract: The lack of resources, the fragile ecological environment and backward socio-economic development of Wenshan City in karst mountain areas are found. It is urgent to understand the status of regional resources and environmental carrying capacity, and provide references for the rational development and utilization of resources, ecological environmental protection and sustainable development of socioeconomic. Therefore, a total of 31 indicators were selected to construct a resource and environmental carrying capacity evaluation index system from three aspects of resources, environment and socio-economics, and the fuzzy comprehensive evaluation method combined with GIS technology was used to evaluate and analyze the resources and environment carrying capacity of Wenshan City in karst mountain area on the spatial grid scale. The results show that: (1) the average value of the comprehensive carrying capacity of resources and environment is 3.098 7, which belongs to a medium carrying level as a whole, but there is a lot of rooms for improvement; The area distribution of medium carrying capacity is the largest, accounting for 89.38% of the total area, followed by high carrying capacity and low carrying, accounting for only 10.23% and 0.39%, respectively; the comprehensive carrying capacity of resources and environment in the city center and its surroundings is high, and the poverty and rocky desertification areas in the northwest and northeast are low; (2) the

收稿日期: 2020-02-28

修回日期: 2020-03-21

资助项目: 云南省科技厅—云南大学“双一流”联合基金重点项目(2018FY001-017); 云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200); 云南大学一流学科—地理学学科建设项目(C176210103, C176210215)

第一作者: 谭琨(1993—), 男, 湖南省耒阳市人, 硕士研究生, 主要从事水土资源优化调控、生态安全及景观格局研究。E-mail: 534701304@qq.com

通信作者: 赵筱青(1969—), 女, 云南省大理市人, 教授, 博士生导师, 主要从事土地生态安全、土地利用覆被变化环境效应、国土空间规划研究。E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

resource carrying capacity is mainly medium, accounting for 75.87% of the total area, followed by low carrying and high carrying, accounting for only 19.55% and 4.57%, respectively; the higher carrying capacity mainly distributes in the southeast, central, southwest, and northwest, and the carrying capacity is lower in the west, northeast, and south; the environmental carrying capacity is mainly high carrying capacity, accounting for 81.20% of the total area, followed by the medium carrying capacity and the ideal carrying capacity, accounting for 18.17% and 0.63%, respectively; the carrying capacity is higher in the north, southwest, and central, while the carrying capacity is relatively weak in the east, southeast, and west central areas; socio-economic carrying capacity is mainly low carrying capacity, accounting for 51.22% of the total area, followed by medium carrying and high carrying capacity, accounting for 37.62% and 11.16%, respectively; the socio-economic carrying capacity of the urban area is the highest, while that of the north, southwest and south is weak; (3) the environmental carrying capacity is the largest, followed by the resource carrying capacity, and the socio-economic carrying capacity is the smallest, indicating that the regional environmental carrying capacity is better, the resource conditions are weak, and the social and economic development is backward in general.

Keywords: carrying capacity; resource and environmental carrying capacity; fuzzy comprehensive evaluation; karst mountain areas; Wenshan City

承载力原本为一个力学概念,最早可追溯到马尔萨斯时代,1798 年马尔萨斯发表著作《人口原理》,给承载力概念赋予了现代内涵,对承载力概念、生物学、生态学和人口学等的研究产生了重大而深远的影响^[1]。之后不少学者都从不同角度对资源环境承载力概念进行了不同程度的研究^[2-7],但目前还没有形成统一的认识。因此,研究在借鉴前人研究成果的基础上,将资源环境承载力定义为:“在一定的时空范围内和技术条件下,在保证区域资源合理开发利用和生态系统良性循环的基础上,可承载人类活动和社会经济规模的能力”。

资源环境承载力作为一个新的研究分支,经过上百年的发展已取得了比较丰富的研究成果,为资源环境承载力研究、区域资源合理开发利用、空间规划和社会经济可持续发展等做出了突出贡献。研究区主要包括国家、省、市县、开发区、流域、海湾海岛和跨行政区域^[8-10];研究领域主要涉及对人口、生态、水资源、土地资源、旅游资源和环境等单要素的承载力评价分析和多要素多系统的资源环境综合承载力研究^[11-13]。评价系统主要从资源、环境、生态、生物、经济、社会和政策等方面构建多层次综合的评价指标体系^[14-17]。研究方法主要包括层次分析法、主成分分析、综合评价法、状态空间法、生态足迹法、模糊评价法、系统动力学、压力—状态—响应模型和加权 TOPSIS 模型等及多种方法的集成运用^[18-23]。其中,模糊综合评价法能从多个方面建立综合的评价系统及模型,可操作性和应用性较强,既可以分析区域资源环境综合承载力的状况,又可以分析各子系统和单一要素的承载力情况。

国内外专家学者对资源环境承载力概念、方法和

领域等做了大量研究,但对喀斯特山区的资源环境承载力研究还较少,且目前部分研究主要集中在贵州省,对云南省尤其是滇东南喀斯特山区的资源环境承载力研究较为罕见,而喀斯特地区生态环境脆弱和水土资源条件较差,承载人类活动的能力相对较差,亟需对喀斯特山区进行资源环境承载力的研究,摸清区域承载力状况,为喀斯特山区资源合理利用、水土资源优化调控、国土空间规划、生态环境保护战略制定和社会经济可持续发展等提供科学依据和参考。

因此,论文以滇东南典型喀斯特山区文山市为研究区,从资源承载力、环境承载力和社会经济承载力 3 个子系统角度出发,构建适用于喀斯特山区的资源环境综合承载力评价指标体系,并运用模糊综合评价法结合 GIS 技术实现对喀斯特山区文山市资源环境承载力空间栅格尺度的评价和分析,以期对喀斯特山区资源环境承载力空间尺度的评价提供参考。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

文山市位于中国西南云南省东南部的典型高原喀斯特山区,地处 $103^{\circ}43'—104^{\circ}27'E$, $23^{\circ}05'32"—23^{\circ}42'59"N$ 。全市土地总面积为 $2\,965.18\text{ km}^2$,海拔高差 $2\,373\text{ m}$,地形复杂,地势西北高、东南低。土地石漠化严重,石漠化面积占土地总面积的 19.24% ,是中国生态环境最脆弱的地区之一。2017 年年均降水量为 $1\,163.97\text{ mm}$,水资源总量为 12.8 亿 m^3 ,水资源开发利用率仅为 6.42% ;具有陡峰、溶洞、峡谷、曲流、瀑布、古树、天生桥等自然景观和丰富多彩的少数民族文化等人文旅游资源;主要矿产有煤、铁、锰、铜、铅、锌、铝土矿、钨、银、镓、砷、硫铁矿和硅灰石;生物资源十分丰

富,独特的地形气候和丰富多样的植被分布,有利于动物种群的繁衍生长;文山市 2017 年大气连续自动监测指标结果显示,空气质量优良率达到 99.2%,表明区域大气环境良好;2017 年全市总人口为 50.46 万人,城镇化率为 58.6%,人均 GDP 45 723 元,人均可支配收入为 1.017 8 万元。随着资源的大量消耗和不合理的开发利用,喀斯特山区文山市土地退化、水土资源短缺、生态环境恶化和社会经济发展落后等诸多问题不断出现,给区域资源环境造成了巨大的压力。

1.2 数据来源及处理

遥感影像数据采用欧洲太空局开放存取中心 (<https://scihub.copernicus.eu/>) 10 m 空间分辨率的 Sentinel-2 A 数据,基于 ENVI5.1 和 ArcGIS 10.2 软件,对 2017 年遥感影像进行人机交互式土地利用类型(耕地、建设用地、林地和水域等)和石漠化程度(轻度、中度、重度)的解译,并选取了 195 个样本点到实地验证解译结果,解译精度达到 88.18%,满足研究需要。水资源数据来源于《文山市水资源综合规划(2014—2030)》和《2017 年文山州水资源公报》;旅游资源数据来源于《文山市旅游“十三五”发展规划(2016—2020)》;区位资源的水源地来源于水域的解译结果,道路数据来源于文山市住建局;矿产资源数据来源于《文山市矿产资源总体规划(2016—2020)》;生态环境数据来源于土地利用类型解译结果和文山市气象局监测数据;水环境数据来源于地表水环境质量监测结果;大气环境数据来源于文山市生态环境局大气连续自动监测资料;地质环境数据来源于《文山市地质灾害防治规划(2011—2020)》;社会经济数据来源于文山市统计局统计年鉴。

水资源各指标通过统计数据赋值插值得到;耕地和建设用地资源通过 ArcGIS 10.2 软件从解译结果中提取,然后对各地类分别赋值,并将其生成为 100 m×100 m 的渔网,以渔网栅格中心点值插值得到;旅游资源吸引力根据旅游资源空间分布及等级,通过空间核密度赋权插值得到;区位资源的水源从水域的解译结果中提取,道路为矢量数据,然后采用欧氏距离分析法得到;矿产资源价值根据各主要矿产种类的矿产资源价值计算结果和各矿产的矿区数量,对矿区点进行平均赋值插值得到;NPP 根据太阳辐射数据和 NDVI 时间序列数据采用 CASA 模型计算得到;生境质量基于土地利用类型数据,分地类提取栅格,确定威胁源和距离以及各地类的生态适宜性等,通过 InVEST 模型计算得到;产水量采用降雨量、蒸散发量、土地利用类型和土壤数据等,通过 InVEST 模型计算得到;土壤保持量采用降雨量插值、GIS 的 Hydrology 模

块、NDVI 和 RUSLE 模型等计算得到;石漠化程度从解译结果中提取;地表水环境质量通过地表水环境质量监测站点数据插值得到;人均污水排放量通过统计数据空间插值得到;大气环境指标通过大气监测站点数据插值得到;地质灾害易发率基于地质灾害易发区空间分布,以 100 m×100 m 的渔网栅格中心点值插值得到;社会经济指标通过统计数据赋值空间插值得到。所有空间数据都统一转换为 WGS84-UTM48N 投影坐标系,根据研究区实际情况、图斑大小和多次试验结果,上图单元空间尺度确定为 30 m×30 m。

1.3 研究方法

1.3.1 评价指标体系及权重确定 依据喀斯特山区文山市资源环境禀赋特点,从资源承载力系统、环境承载力系统和社会经济承载力系统 3 个子系统角度,考虑水土资源、旅游资源、区位资源、矿产资源、生态环境、水环境、大气环境和社会经济等 8 个因素,共选取了 31 个指标,构建资源环境承载力评价指标体系(表 1)。通过最小—最大(min—max)极值标准化法对评价指标进行归一化处理,运用客观权重确定方法熵值法计算各指标权重^[24-25]。

1.3.2 模糊综合评价模型构建 模糊综合评价法从多个层次对资源环境承载力进行综合评价,能够考虑众多影响因素,且有助于避免与客观真实的偏离问题^[26]。因此,以空间尺度作为资源环境承载力测算的基本尺度,利用模糊综合评价法计算级别特征值(T),将资源环境承载力分等定级,通过降半梯形分布函数计算空间地块在各个等级的隶属度^[27],整合隶属结果得到资源环境承载力综合评价结果。模型具体运算过程如下:

(1) 根据资源环境承载力评价指标体系及各指标的分级阈值,设置评价指标集合 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$,评价集合 $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_m\}$:

$$j=1 \text{ 时, } y_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \leq s_{ij} \\ \frac{x_i - s_{i(j+1)}}{s_{ij} - s_{i(j+1)}} & s_{ij} < x_i \leq s_{i(j+1)} \\ 0 & x_i > s_{i(j+1)} \end{cases}$$

$j=2, 3, \dots, m-1$ 时,

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i \leq s_{i(j-1)} \\ \frac{x_i - s_{i(j-1)}}{s_{ij} - s_{i(j-1)}} & s_{i(j-1)} < x_i \leq s_{ij} \\ 1 & x_i = s_{ij} \\ \frac{x_i - s_{i(j+1)}}{s_{ij} - s_{i(j+1)}} & s_{ij} < x_i \leq s_{i(j+1)} \\ 0 & x_i > s_{i(j+1)} \end{cases}$$

$$j=m \text{ 时}, y_{ij} = \begin{cases} 1 & x_i > s_{ij} \\ \frac{x_i - s_{i(j-1)}}{s_{ij} - s_{i(j-1)}} & s_{i(j-1)} < x_i \leq s_{ij} \\ 0 & x_i \leq s_{i(j-1)} \end{cases}$$

式中: y_{ij} 为第 i 指标第 j 等级的隶属度; x_i 为指标实际值; s_{ij} 为第 i 个指标第 j 等级的分级阈值。

(2) 运用模糊矩阵加权计算承载力各子系统和综

合承载力在各等级下的总隶属度。为了确保信息完整、准确,通过加权评价模糊综合算子法计算总隶属度:

$$D_j = (d_i)_{1 \times 5} = \sum_1^n (w_i \times y_{ij})_{1 \times 5}$$

式中: D_j 为第 j 承载力等级的总隶属度; n 为评价指标数量; w_i 为第 i 指标的权重; y_{ij} 为第 i 指标第 j 等级的隶属度。

表 1 喀斯特山区文山市资源环境承载力评价指标体系

子系统	一级指标	二级指标	单位	权重	属性
资源承载力系统	水资源	地均水资源量	m ³ /hm ²	0.06527143	+
		人均水资源量	m ³ /人	0.02253766	+
		供水比例	%	0.02363852	+
		万元 GDP 用水量	m ³ /万元	0.05762356	—
	土地资源	耕地资源	%	0.03733568	+
		建设用地资源	%	0.03824822	+
	旅游资源	旅游资源吸引力	—	0.03727475	+
	区位资源	距道路距离	m	0.03958875	—
		距水源距离	m	0.03911021	—
	矿产资源	矿产资源价值	万元	0.05847725	+
环境承载力系统	生态环境	植被净初级生产力(NPP)	gC/(m ² ·a)	0.04201851	—
		生境质量	—	0.05191437	—
		产水量	mm	0.03327900	+
	水土流失环境	土壤保持量	t/(hm ² ·a)	0.01865052	+
		石漠化程度	—	0.02821896	—
	水环境	地表水环境质量	—	0.01985961	+
		人均污水排放量	m ³ /人	0.00515664	—
		二氧化硫(SO ₂)	μg/m ³	0.01902957	—
		二氧化氮(NO ₂)	μg/m ³	0.01954035	—
	大气环境	PM10	μg/m ³	0.01933976	—
		一氧化碳(CO)	μg/m ³	0.01947984	—
		O ₃ -8 h	μg/m ³	0.01929095	—
		PM _{2.5}	μg/m ³	0.01873378	—
	地质环境	地质灾害易发率	%	0.01884832	—
社会经济承载力系统	社会情况	城镇化率	%	0.08656283	+
		人均粮食占有量	kg/人	0.01868901	+
		劳动力比例	%	0.01964409	+
		人口密度	人/km ²	0.01864468	—
	经济情况	GDP 增长率	%	0.02286500	+
		第三产业占 GDP 比重	%	0.04670991	+
		居民可支配收入	万元	0.03441826	+

(3) 计算承载力各子系统和综合承载力的级别特征值。等级隶属度为各样本对各等级模糊子集的隶属度,其为模糊向量而非点值,尽管提供的信息比较完整,但不易于表达样本的综合等级。通过加权平均求和计算总级别特征值(T),运用“1,2,3,4,5”分别表示不可承载、低承载、中承载、高承载和理想承载等级:

$$T = \frac{\sum_{j=1}^5 (d_i \times j)_{1 \times 5}}{\sum_{j=1}^5 D_j}$$

式中: T 为总级别特征值。

(4) 基于级别特征值(T)计算结果,对各子系统承载力和综合承载力进行分等定级。级别特征值处于1~5之间,数值越大,表示承载力水平越高,数值越小,表示承载力水平越低。参考已有研究成果,将级别特征值分为5级,分别对应各承载力等级水平(表2)。

2 结果与分析

2.1 子系统承载力结果与分析

2.1.1 资源承载力结果与分析 文山市 2017 年资源

承载力特征值在 1.736 4~4.042 4,特征均值为 2.816 8,整体属于中等承载水平,但还具有较大的提升空间。从各承载等级面积比例看,中等承载面积最大,达到 224 972.82 hm²,占到全市总面积的 75.87%,是最主要的承载水平;其次为低承载,面积为 57 980.70 hm²,占全市总面积的 19.55%;高承载面积最小,为 13 563.99

表 2 资源环境承载力等级划分

T	等级	含义
1.0~1.5	不可承载	承载力水平极低,无法支持人类活动,需加大保护力度和加强生态环境修复
1.5~2.5	低承载	承载力水平较低,支持人类活动能力较差,需注意保护资源和改善生态环境
2.5~3.5	中承载	承载力水平中等,支持人类活动能力一般,需在一定程度上提高开发利用效率
3.5~4.5	高承载	承载力水平较高,支持人类活动能力较强,需注意开发与保护相结合
4.5~5.0	理想承载	承载力水平极高,支持人类活动的能力非常强

从空间分布来看,承载力较高区域主要集中在市域东南部、中部、西南部和西北部,这些区域坝区面积较大、水土资源条件较好、旅游资源较丰富、区位优势明显,支撑人类活动的能力较强,能较好的满足社会经济发展的需要;市域西部、东北部和南部资源承载力较低,

仅占到总面积的 4.57%(图 1)。文山市资源承载力以中等承载水平为主,但高承载面积很小,低承载等级占较大比重,表明文山市资源状况属于中等承载偏下水平,应加快社会经济和技术发展,充分利用好有限的资源,提高资源潜在价值和利用效益,增强区域资源承载人类活动的能力。

这些区域矿产资源缺乏,石漠化严重,土地资源质量低,应加大石漠化治理力度和生态环境保护力度,改善水土资源状况,提高承载力水平;其余大部分区域处于中等承载状态,应提高对有限资源的利用效率,进行产业结构调整及优化,扩大承载社会经济规模的能力(图 2)。

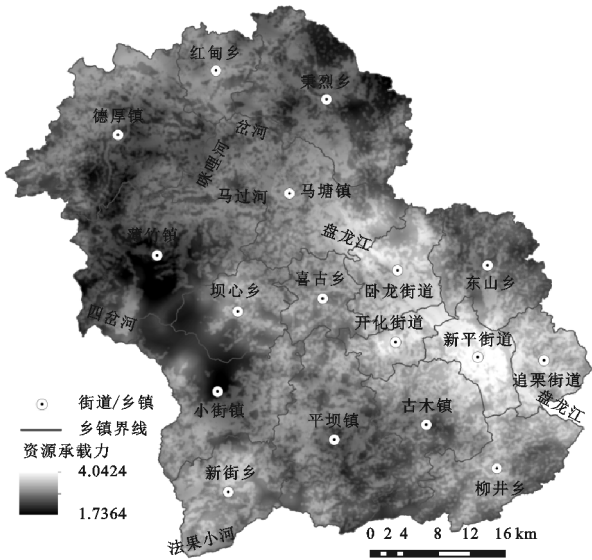


图 1 资源承载力评价

从各街道乡镇承载力特征均值看,文山市仅新平街道处于高等承载状态,其特征均值为 3.596 6;其次为开化街道、追栗街镇和卧龙街道,特征均值分别为 3.338 0, 3.330 8, 3.283 6,属于中等承载偏上水平;新街乡、喜古乡、柳井乡、古木镇、马塘镇和红甸乡的特征均值分别为 2.998 1, 2.982 8, 2.971 4, 2.924 7, 2.890 7, 2.831 6;薄竹镇处于低承载状态,其特征均值为 2.428 8;其他乡镇均属于中等承载的一般水平,其特征均值为 2.5~2.8。从各街道乡镇承载力等级面积比例看,新平街道以高承载等级为主,开化街道、追栗街镇和卧龙街道虽以中承载等级为主,但是高承载等级占较大比例;薄竹镇以低承载等级为主,秉烈乡、德厚镇、小街镇和坝心乡虽以中承载

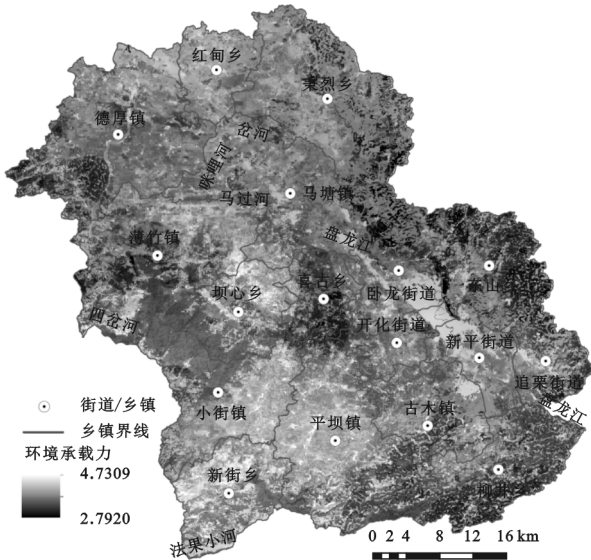


图 2 环境承载力评价

等级为主,但是低承载面积占较大比例;其余大部分乡镇都以中等承载等级为主(图 3)。总的来说,新平街道资源承载力水平最高,其次是开化街道、追栗街镇和卧龙街道,其余乡镇资源承载力都一般,应充分挖掘其地下水资源、喀斯特地貌景观旅游资源和矿产资源等潜力,尤其是要注重提高水土资源利用效率,促进区域资源承载力水平的提升。
2.1.2 环境承载力结果与分析 文山市 2017 年环境承载力特征值在 2.792 0~4.730 9,特征均值为 3.769 0,整体属于高等承载水平,表明文山市目前环境状况良好,具有较强的支撑人类活动和社会经济发展的能力。从各承载等级面积比例来看,高承载面积

最大,达到 240 761.40 hm²,占到全市总面积的 81.20%,是目前最主要的承载状态;其次是中承载,面积为 53 876.40 hm²,占全市总面积的 18.17%;理想承载面积最小,为 1 879.71 hm²,仅占到全市总面积的 0.63%(图 3—4)。文山市环境承载力总体上处于高

承载状态,无低等承载,但理想承载面积非常小,这与区域双层的地质结构、严重的石漠化和水土流失等有较大关系,应在继续保护生态环境的前提下,加大对石漠化的治理力度,并不断提高资源开发利用技术水平,进一步提升区域环境承载能力。

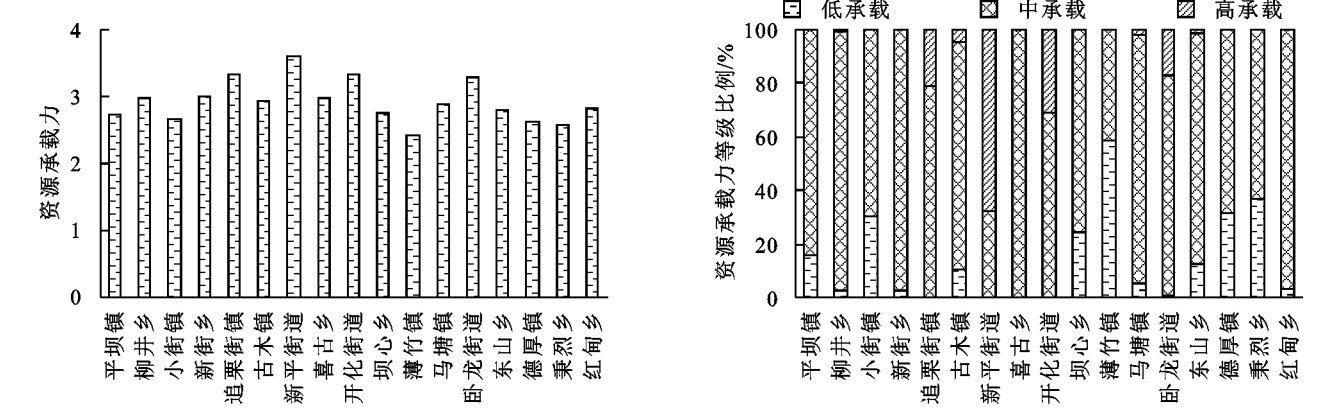


图 3 街道乡镇资源承载力

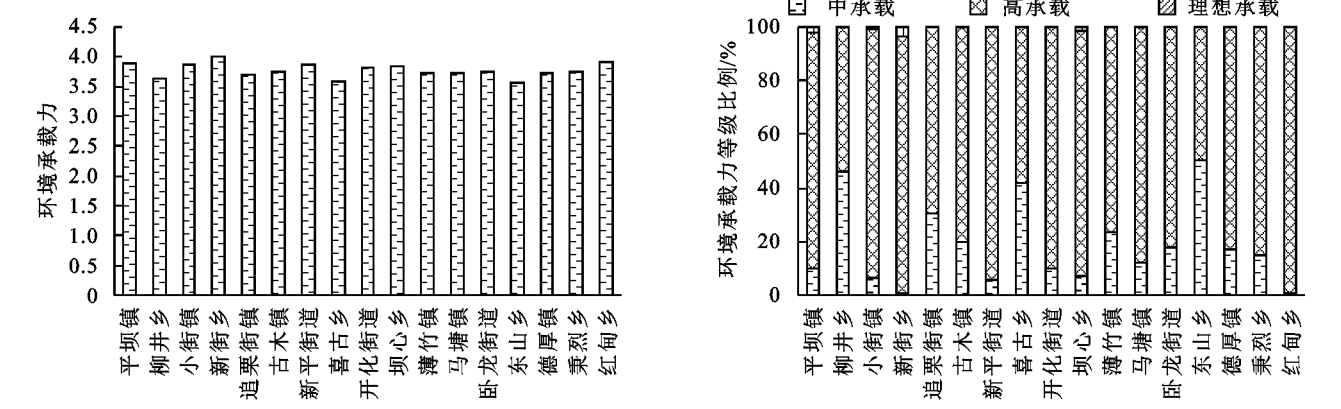


图 4 街道乡镇环境承载力

从空间分布来看,环境承载力较高区域主要分布在市域北部、西南部和中部的城市建成区或乡镇社会经济较发达处,这些区域地形地貌条件、地质环境和水土资源条件较好,尤其是无石漠化,水土流失强度较小,生态环境状况良好,是支撑喀斯特山区社会发展的重要区域;市域东部、东南部和西中部的环境承载力能力较弱,对比石漠化分布图发现,这些区域基本上都处于石漠化区域,说明石漠化对环境承载力的大小具有很大影响,应通过退耕还林、退耕还草和生态修复等措施加大对石漠化的治理力度,减轻土地退化和土壤侵蚀带来的生态环境压力,同时,需要一个既能保护生态环境和缓解石漠化,又能提高水土资源利用效率的产业发展模式,促进区域环境承载能力的提升。

从各街道乡镇承载力特征均值看,新街乡的环境承载力最强,其特征均值为 4.014 3,属高等承载中上水平;其次是红甸乡、平坝镇、新平街道、小街镇、坝心

乡和开化街道,其特征均值分别为 3.912 2,3.895 1,3.872 9,3.865 3,3.841 7,3.812 3,特征均值都大于 3.8,属于高承载中承载力相对较高的区域;东山乡和喜古乡的环境承载力较低,其特征均值为 3.551 4,3.586 8,属高等承载偏下水平;其余乡镇都处于高承载水平,特征均值都在 3.7 左右。从各街道乡镇承载力等级面积比例看,新街乡和红甸乡高承载状态占绝对主导地位,其中新街乡的理想承载占据一定比例,说明其环境承载能力较强;平坝镇、坝心乡和小街镇有一定的理想承载面积分布;东山乡高承载和中承载面积大约各占一半;其余乡镇都以高承载为主。总之,文山市虽然环境承载力较强,但应注意石漠化、水土流失和生态环境脆弱等问题,合理进行人类开发利用活动,促进社会—经济—生态协调可持续发展。

2.1.3 社会经济承载力结果与分析 文山市 2017 年社会经济承载力特征值在 1.768 7~4.312 5,特征均值为 2.672 2,整体属于中等承载水平,刚大于中承

载区间值的下限值,表明文山市社会经济发展水平较低,社会经济承载人类活动的的能力较差。从各承载等级面积比例来看,低承载面积最大,为 151 879.08 hm^2 ,占全市总面积的 51.22%,超过市域面积的一半;其次是中承载,面积为 111 554.76 hm^2 ,占全市总面积的 37.62%;高承载面积最小,为 33 083.67 hm^2 ,仅占全市总面积的 11.16%(图 5)。文山市社会经济承载力较低,贫富差距较大,这与滇东南喀斯特山区的地理位置偏僻、交通便利度通达度差、可供利用的资源尤其是水土资源很少和产业发展及技术水平落后等具有较大关系,应加大招商引资力度,大力引进高新技术产业,推进新兴创新型产业发展,提高技术水平,增强对喀斯特山区水土资源利用的能力,但需注意在促进承载力较高的城区发展的同时,加大对广大农村地区的扶持力度,提高农业现代化水平,实现乡村振兴,缩小贫富差距,从而提升区域整体的社会经济承载能力,满足人类发展的需要。

从空间分布来看,社会经济承载力较高区域主要分布在市域中部和东部,其中市区社会经济承载力最高,这些区域资源环境条件较好、交通发达、产业集聚,社会经济发达,是区域发展的中心,承载人类活动的的能力较强;市域北部、西南部和南部承载能力较弱,这些区域山多平地少,以传统农业为主,水土资源利用效率低下,种植水平和农业产值较低,农户收入来源非常有限,社会经济发展滞后,但资源与环境条件较好,应充分利用区域优势资源,大力发展现代高原特色农业和生态旅游,提高经济效益,促进社会发展;其余部分区域社会经济承载力处于一般水平,这部分区域承载力提升的可能性最大,应加快对交通、水利、商业服务和文化教育等基础设施建设的步伐,为产业发展创造良好的基础条件,增强对企业和人才的吸引力,促进区域社会经济发展水平的提升(图 6)。

从各街道乡镇承载力特征均值看,开化街道、卧龙街道和新平街道社会经济承载力较强,其特征均值分别为 2.953 9、2.938 2、2.727 5,处于中承载状态,是文山市的市区所在地;其次是东山乡、坝心乡、追栗街镇、喜古乡、古木镇、薄竹镇和小街镇,其特征均值为 1.5~2.5,处于低承载状态;其他乡镇的特征均值均低于 1.5,处于不可承载状态。从各街道乡镇承载力等级面积比例看,开化街道、卧龙街道和新平街道以高等承载为主;坝心乡、追栗街镇、东山乡、薄竹镇、喜古乡和小街镇以中等承载为主;其余乡镇都以低承载为主,其中新街乡和红甸乡两个乡镇完全处于低承载

状态(图 7—8)。总之,文山市所辖的 3 个街道社会经济承载能力较强,其他区域承载力较低,应在继续提高市区社会经济发展水平的同时,加强对周边区域和全市的引导,增强其辐射和示范带动作用,促进整个区域协同发展。

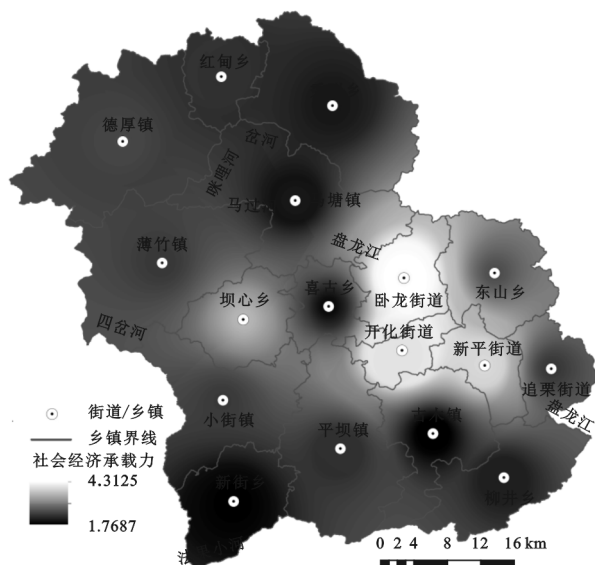


图5 社会经济承载力评价结果

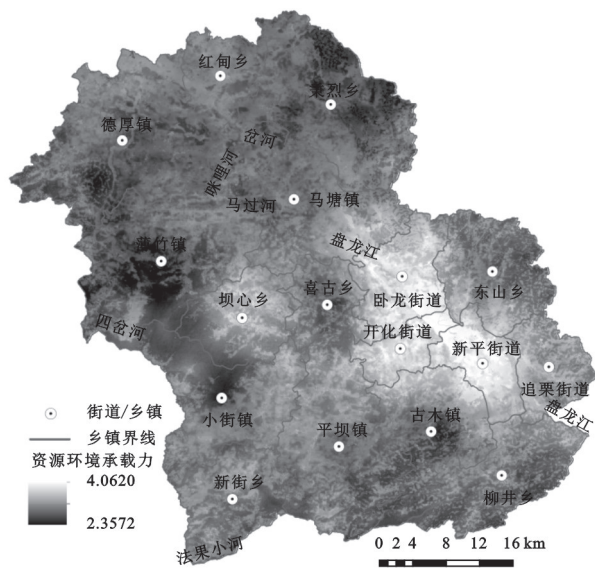


图6 资源环境承载力评价结果

2.2 资源环境综合承载力结果与分析

文山市 2017 年资源环境综合承载力特征值在 2.357 2~4.062 0,特征均值为 3.098 7,整体属于中等承载水平。随着社会经济发展、科学技术进步和生态环境保护及治理,资源环境承载力水平具有较大的提升空间。从面积比例来看,中承载面积分布最大,面积为 265 015.62 hm^2 ,占土地总面积的 89.38%,是文山市最主要的资源环境承载力等级,其次是高承载,面积为 30 348.18 hm^2 ,占 10.23%,低承载面积最小,为 1 153.71 hm^2 ,仅占到 0.39%。

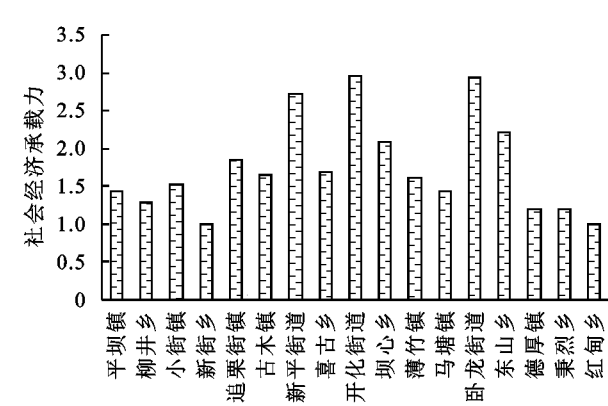


图 7 街道乡镇社会经济承载力

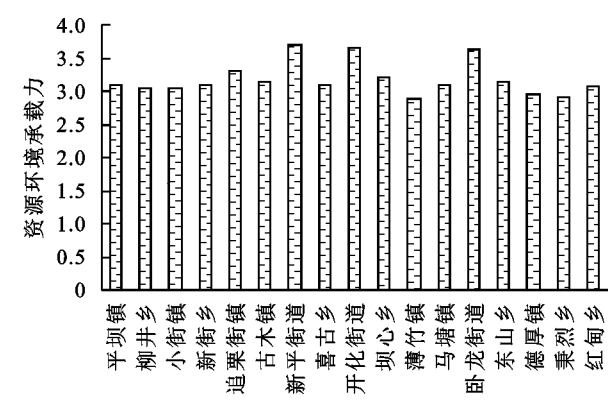
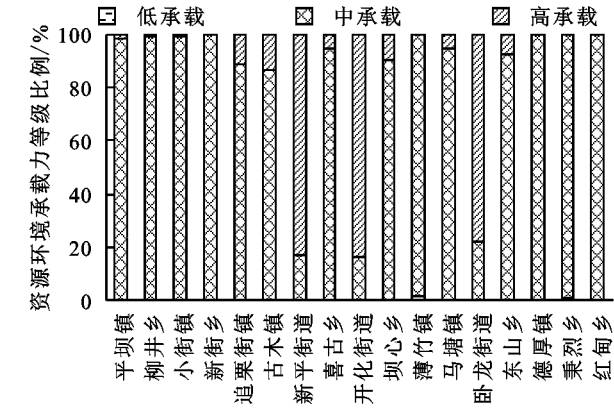
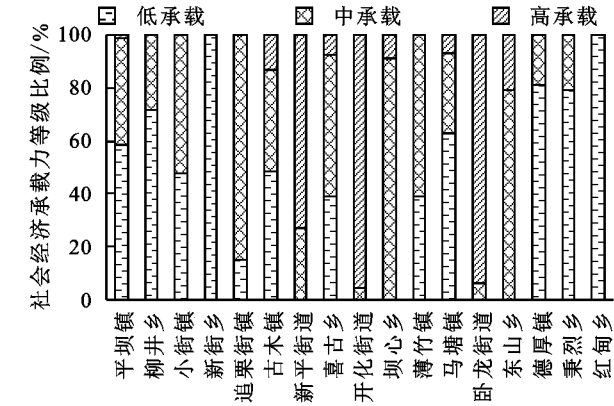


图 8 街道乡镇资源环境承载力

从空间分布来看,高承载主要分布在社会经济发达、环境良好和资源丰富的市中心,能很好的支撑喀斯特山区人类活动,是社会经济发展的重点区域,同时,市区周围部分区域条件较好的地方和西部坝心乡的中部处于高承载状态,这些区域在资源、环境或社会经济等一两个方面优于其他地方,是未来重点的发展方向;承载力较差的主要分布于西北部、东北部和东南部的社会经济发展较落后、石漠化明显、坝区面积小和地形地貌复杂的区域,应加大土地石漠化治理、水土保持和生态修复等工作力度,改善其生态环境状况;中等承载水平占主导地位,广泛分布于市域中部、西南部和东部资源、环境或社会经济条件一般的地区,受到部分因素的限制,资源环境综合承载力一般,应在保护生态环境的前提下,适度开发,充分挖掘潜力,合理进行产业布局,促进社会经济发展,提高区域承载人类活动的能力。

从各街道乡镇承载力特征均值看,新平街道、开化街道和卧龙街道承载力最高,其特征均值分别达到 3.705 6,3.657 1,3.631 1,都处于高承载状态,其中新平街道承载力水平最好;其次为追栗街镇、坝心乡、东山乡、古木镇、喜古乡、马塘镇、新街乡和平坝镇,特征均值分别为 3.311 8,3.209 3,3.138 9,3.131 0,3.101 5,



3.089 4,3.086 0,3.083 5,处于中等承载偏上水平;柳井乡、小街镇、红甸乡、德厚镇、秉烈乡和薄竹镇综合承载力较低,其特征均值分别为 3.083 5,3.036 4,3.063 9,2.951 8,2.899 7,2.894 0,处于中承载偏下状态。从各街道乡镇承载等级面积比例看,新平街道、开化街道和卧龙街道以高承载等级为主,其余乡镇均以中承载等级为主,其中,新街乡和红甸乡全为中等承载水平,无高承载和低承载区域,薄竹镇、秉烈乡、小街镇、德厚镇和古木镇部分区域有小面积低承载等级,其他乡镇均无低承载。总之,新平街道、开化街道和卧龙街道承载力水平最高,这些区域具有良好的社会经济和资源环境条件,是文山市最主要的人类活动区域,应以国土空间规划为引领,将其打造为都市综合功能发展区,带动整个市域的发展,提高文山市整体承载人类活动的的能力。其余乡镇都以中等承载水平为主,应提高资源利用效率,促进社会经济发展。部分区域有低承载,应通过退耕还林、退耕还草和封山育林等进行生态修复,提高其承载水平。

3 讨论与结论

3.1 讨论

(1) 评价指标体系的探讨。在资源承载力系统方

面,大部分研究主要选取了水资源、土地资源、林业资源和矿产资源等^[28-30],本文主要考虑了水土资源、旅游资源、区位资源和矿产资源等。喀斯特山区旅游资源的开发利用不仅能保护生态环境,还能促进社会经济发展,所以旅游资源承载力扮演着重要的角色;喀斯特山区很多农村离主要交通干线和水源都较远,距道路和距水源的距离是影响区域发展的关键因素之一;林业资源在喀斯特山区主要体现出生态保护、调节水土资源和生态修复等功能,而对社会经济的促进作用不是很明显,应尽可能的避免人类活动,所以没有选取该指标。在环境承载力系统方面,人们主要考虑了水环境、大气环境和生态环境等^[31-33],喀斯特山区水土流失严重,地质灾害频发,必须考虑水土流失环境和地质环境对区域资源环境承载力的影响。在社会经济系统方面,一般都是从社会和经济两个方面选取相关指标,比较统一。然而,评价指标体系还有完善的空间,在未来的研究中需要继续改进与完善。

(2) 资源环境承载力的综合探讨。人们主要开展了对资源环境承载力的概念、评价指标体系、评价方法和实际应用等方面的研究^[34-35]。研究方法主要有系统动力学、状态空间法、模糊评价法、综合评价法和生态足迹模型等以及多方法的集成运用^[36-37],但至今没有形成统一的资源环境承载力评价体系,喀斯特山区在资源、环境和社会经济等方面与其他区域均具有较大的差异,研究选择模糊综合评价法主要是因为其推广及实际应用性较强,能同时考虑众多影响因素从资源、环境和社会经济等多个层面对资源环境承载力进行评价;在研究尺度方面,大部分研究主要集中在大中尺度,且多数以行政单元作为评价尺度,对小尺度的喀斯特山区资源环境承载力空间栅格尺度的评价较少,评价精度得到了提高,小尺度作为一个基础的评价单元,对区域资源合理利用、国土空间规划、生态环境保护和社会经济可持续发展等具有重要的参考作用;在研究领域方面,对水资源或土地资源等单一要素的承载力研究较多,但对资源环境综合承载力的研究仍然较少,尤其是对喀斯特山区云南省的研究就更少了。

3.2 结论

(1) 各子系统承载力。文山市资源承载力整体属于中等承载水平。中等承载面积最大,其次为低承载和高承载。东南部、中部、西南部和西北部资源承载力较高,西部、东北部和南部较低,应利用好有限的资源,提高资源利用价值和效益;环境承载力整体属于高等承载水平。高承载面积最大,其次是中承载和

理想承载。北部、西南部和中部的环境承载力较高,东部、东南部和西中部较低;社会经济承载力整体属于中等承载水平。低承载面积最大,其次是中承载和高承载。市域中部和东部社会经济承载力较高,北部、西南部和南部较低。

(2) 资源环境综合承载力。文山市资源环境承载力特征均值为 3.098 7,整体属于中等承载水平,但还有较大的提升空间。中承载面积分布最大,占土地总面积的 89.38%,其次是高承载,低承载面积最小,仅占到 0.39%;从空间分布来看,高承载主要分布在市中心及其周围;低承载主要分布于市域西北部、东北部和东南部的社会经济发展落后和石漠化区域,应加强土地石漠化治理,促进社会经济发展;中等承载广泛分布于市域中部、西南部和东部,应提高资源利用效率,促进社会经济与生态环境协调发展,增强区域承载人类活动的的能力。

(3) 文山市环境承载力最强,其次为资源承载力,社会经济承载力最低,表明区域总体上环境承载状况良好,资源条件趋弱,社会经济发展落后。应充分挖掘资源潜在价值,提高资源开发利用水平,同时加大对广大农村地区的扶持力度,缩小贫富差距,促进区域资源—环境—社会经济协调发展,增强区域整体的资源环境承载能力。

参考文献:

- [1] Maltus T R. An essay on the principle of population [M]. London: St Paul's Church-Yard, 1798.
- [2] 毛汉英,余丹林.区域承载力定量研究方法探讨[J].地球科学进展,2001,16(4):549-555.
- [3] 余丹林,毛汉英,高群.状态空间衡量区域承载状况初探:以环渤海地区为例[J].地理研究,2003,22(2):201-210.
- [4] 樊杰,王亚飞,汤青,等.全国资源环境承载能力监测预警(2014版)学术思路与总体技术流程[J].地理科学,2015,35(1):1-10.
- [5] 牛方曲,封志明,刘慧.资源环境承载力评价方法回顾与展望[J].资源科学,2018,40(4):655-663.
- [6] Qian G, Wang J, Yin H, et al. Comprehensive evaluation of the regional Atmospheric Environment Carrying Capacity: Model development and a case study in China [J]. Ecological Indicators, 2018,91:259-267.
- [7] 梁宇哲,谢晓瑜,郭泰圣,等.基于资源环境承载力的国土空间管制分区研究[J].农业资源与环境学报,2019,36(4):412-418.
- [8] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等.百年来的资源环境承载力研究:从理论到实践[J].资源科学,2017,39(3):379-395.
- [9] 翁翎燕.基于突变级数法的江苏省资源环境承载力评价及

- 障碍因素诊断[J].水土保持研究,2018,25(3):354-359.
- [10] Diao S, Yuan J, Wu Y. Performance evaluation of urban comprehensive carrying capacity of Harbin, Heilongjiang Province in China[J]. Chinese Geographical Science, 2019,29(4):579-590.
- [11] 吴大放,胡悦,刘艳艳,等.城市开发强度与资源环境承载力协调分析:以珠三角为例[J].自然资源学报,2020,35(1):82-94.
- [12] 马宇翔,彭立,苏春江,等.成都市水资源承载力评价及差异分析[J].水土保持研究,2015,22(6):159-166.
- [13] Liu R, Pu L, Zhu M, et al. Coastal resource-environmental carrying capacity assessment: A comprehensive and trade-off analysis of the case study in Jiangsu coastal zone, eastern China[J]. Ocean & Coastal Management, 2020,186:105092.
- [14] 杨亮洁,杨永春.甘肃省资源环境承载力时空分异[J].生态学报,2017,37(20):7000-7017.
- [15] 卢亚丽,徐帅,沈镭.河南省资源环境承载力的时空差异研究[J].干旱区资源与环境,2019,33(2):16-21.
- [16] Zhang M, Liu Y M, Wu J, et al. Index system of urban resource and environment carrying capacity based on ecological civilization [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018,68:90-97.
- [17] 许明军,冯淑怡,苏敏,等.基于要素供需视角的江苏省资源环境承载力评价[J].资源科学,2018,40(10):1991-2001.
- [18] 王睿,周立华,陈勇,等.基于模糊综合评判的杭锦旗水资源承载力评价[J].水土保持研究,2017,24(2):320-329.
- [19] 陈先鹏.基于PCA和SD模型的区域国土资源环境承载力评价:以浙江省义乌市为例[D].杭州:浙江大学,2015.
- [20] 王亮,刘慧.基于PS-DR-DP理论模型的区域资源环境承载力综合评价[J].地理学报,2019,74(2):340-352.
- [21] 周亮广,梁虹.基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究:以贵阳市为例[J].自然资源学报,2006,21(5):827-833.
- [22] Yang Q, Zhang F, Jiang Z, et al. Assessment of water resource carrying capacity in karst area of Southwest China [J]. Environmental Earth Sciences, 2016,75(1):1-8.
- [23] Shen L, Shu T, Liao X, et al. A new method to evaluate urban resources environment carrying capacity from the load-and-carrier perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020,154:104616.
- [24] 赵筱青,谭琨,易琦,等.杞麓湖流域生态安全性及在各因子中的变化特征[J].水土保持研究,2019,26(3):285-292.
- [25] 赵筱青,谭琨,易琦,等.典型高原湖泊流域生态安全格局构建:以杞麓湖流域为例[J].中国环境科学,2019,39(2):768-777.
- [26] 普军伟.基于资源环境承载力的喀斯特山区土地利用优化[D].昆明:云南大学,2019.
- [27] 皮庆,王小林,成金华,等.基于PSR模型的环境承载力评价指标体系与应用研究:以武汉城市圈为例[J].科技管理研究,2016,36(6):238-244.
- [28] 谭术魁,韩思雨,周敏.土地城市化背景下武汉市资源环境承载力仿真研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(11):1824-1830.
- [29] Sun M, Wang J, He K. Analysis on the urban land resources carrying capacity during urbanization: A case study of Chinese YRD[J]. Applied Geography, 2020,116:102170.
- [30] Wu C, Zhou L, Jin J, et al. Regional water resource carrying capacity evaluation based on multi-dimensional precondition cloud and risk matrix coupling model[J]. Science of the Total Environment, 2020,710:136324.
- [31] Wang L, Liu H. Erratum to: Quantitative evaluation of Tibet's resource and environmental carrying capacity [J]. Journal of Mountain Science, 2019,1986(6), <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5339-x>.
- [32] Świąder M, Lin D, Szebrański S, et al. The application of ecological footprint and biocapacity for environmental carrying capacity assessment: A new approach for European cities [J]. Environmental Science and Policy, 2020,105:56-74.
- [33] Zhu M, Shen L, Tam V W Y, et al. A load-carrier perspective examination on the change of ecological environment carrying capacity during urbanization process in China[J]. Science of the Total Environment, 2020,714:136843.
- [34] 刘金花,李向,郑新奇.多尺度视角下资源环境承载力评价及其空间特征分析:以济南市为例[J].地域研究与开发,2019,38(4):115-121.
- [35] Wei X, Shen L, Liu Z, et al. Comparative analysis on the evolution of ecological carrying capacity between provinces during urbanization process in China[J]. Ecological Indicators, 2020,112:106179.
- [36] 刘金花,郑璐,董光龙,等.平原地区资源环境承载力评价与短板要素分析:以山东省平原县为例[J].中国农业资源与区划,2019,40(2):79-88.
- [37] Li X, Cundy A B, Chen W, et al. Dynamic capacity modelling of soil environment carrying capacity, and developing a soil quality early warning framework for development land in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020,257:120450.