

# 基于生态系统服务供需对喀斯特山区生态风险分析

贺祥<sup>1</sup>, 姚尧<sup>2</sup>

(1. 贵州财经大学 管理科学与工程学院, 贵阳 550025; 2. 贵州财经大学 公共管理学院, 贵阳 550025)

**摘 要:**通过构建生态系统服务供需评价指标,运用生态风险指数等模型方法,分析了贵州省生态系统服务供需结构特征与空间分异,探讨了其生态系统风险程度。结果表明:(1) 全省建设用地面积增加较显著,生态系统供给服务总价值量增加 21.45%,年均增长率 3.96%;水资源服务总供给量为负值,是因其地形陡峭、地表与地下二元空间水文结构特征等,导致地表蓄水水力弱,农业生产水资源供给严重不足;支持与调节服务价值量约占总价值量的 85%,表明对长江与珠江下游具有显著生态屏障功能。(2) 2015 年生态系统服务总需求量为总供给量的 61.46%,生态系统服务供给盈余;生态系统服务需求量年均增长率的 10.15%,其增长速度高于供给量。(3) 遵义市与毕节市生态系统服务供需格局属高供给高需求,贵阳市属低供给高需求,黔东南州属高供给低需求,安顺市、黔西南州和铜仁市属低供给低需求。(4) 各地市食物、原料与水资源等生态系统服务供需存在严重赤字,生态系统风险度较高;美学、食物和原料供给服务的生态风险指数分别增加 419.42%,50.24%和 11.87%,生态系统风险程度呈加剧;支持与调节服务功能承受生态风险压力较低,与贵州省长期生态治理与修复,石漠化等生态问题缓解相一致。研究揭示,贵州省近年生态系统服务供需总体为盈余状态,但需求量增速较快,生态系统服务供需与生态风险存在结构性差异与空间不均衡,极易诱发严重生态风险与安全问题。

**关键词:**生态系统服务;供给与需求;生态风险;贵州省;喀斯特山区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0202-11

## Analysis of Ecological Risk Based on Supply and Demand of Ecosystem Services in Karst Mountains

HE Xiang<sup>1</sup>, YAO Yao<sup>2</sup>

(1. College of Management Science and Engineering, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China; 2. College of Public Management, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** In this paper, by constructing the evaluation index of ecosystem service supply and demand, using the method of ecological risk index model, we analyzed the structural characteristics and spatial differentiation of ecosystem service supply and demand in Guizhou Province, and discussed the degree of ecosystem risk. The results showed that: (1) from 2010 to 2015, the area of construction land increased significantly, the total value of ecosystem supply increased by 21.45%, and the annual average growth rate was 3.96%; the total supply of water resources services was negative due to the steep terrain, high area rate of cultivated land in mountainous areas and the dual hydrological characteristics of surface and underground space in Guizhou Province, resulting in weak water storage and conservation, and serious shortage of water resources supply in agricultural production; the value of support and regulation services accounted for about 85% of the total value, indicating that its ecosystem had an important ecological barrier function for the middle and lower reaches of the Yangtze River and the Pearl River; (2) the average annual growth rate of demand for ecosystem services was 10.15%; in 2015, the total demand for ecosystem services was 61.46%; the supply of ecosystem services was surplus, but the growth rate of demand was much higher than that of supply; (3) Guiyang City and Anshun City belonged to the pattern of low supply and high demand, Bijie City, Qiannan Prefecture, Qiongnan Prefecture and Zunyi City belonged to the pattern of high supply and low

收稿日期:2019-11-20

修回日期:2019-12-25

资助项目:脆弱生态环境区生态系统服务价值协同与权衡的研究;以贵州省为例(黔科合平台人才[2017]5723-04);贵州省科技厅联合基金(黔科合 LH 字[2014]7237);2019 年度贵州财经大学引进人才科研启动项目(2019YJ014)

第一作者:贺祥(1978—),男,贵州水城人,博士,副教授,研究方向:环境演变与生态保护建设。E-mail:hexiang1997403@163.com

demand, Liupanshui City, Southwest Guizhou Prefecture and Tongren City belonged to the pattern of low supply and low demand; (4) there were serious deficits in the supply and demand of food, raw materials and water resources services in the ecosystems of all cities, and the risk of ecosystems was high; the ecological risk index of aesthetics, food and raw material supply services increased by 419.42%, 50.24% and 11.87%, respectively, and the ecological risk was aggravated; there was no ecological risk in support and regulation ecosystem services, and the pressure of ecological risk was low; there was no ecological risk in support and regulation services, and the pressure of ecological risk was low, which was the result of long-term ecological control and restoration of rocky desertification. These research results can reveal that the growth rate of demand for ecosystem services in Guizhou Province is greater than that of supply. There are serious structural and ecological risk differentiation and spatial imbalance between supply and demand of ecosystem services, and serious ecological risk in ecosystem.

**Keywords:** ecosystem services; supply and demand; ecological risk; Guizhou Province; Karst mountainous area

自生态系统服务概念与理论的<sup>[1-2]</sup>提出,其评价方法等得到快速发展与完善<sup>[3-5]</sup>。生态系统服务作为连接自然生态系统和社会经济系统的桥梁<sup>[6]</sup>,学者们非常重视人类从自然中获得惠益的生态系统服务需求及其供给能力。自然生态系统因人类活动的干扰和破坏,极易造成其自我调节和恢复能力承受更加巨大压力和生态风险<sup>[7]</sup>。生态系统承受风险压力与风险程度的加剧演变,必然对生态系统服务供给及人类从生态系统中获得产品与服务造成显著影响。

在对生态系统服务供给分类<sup>[8]</sup>、评价模型<sup>[9]</sup>及权衡与协调等<sup>[10-12]</sup>展开大量研究基础上,学者们对生态系统服务需求理论内涵、评价指标与模型方法也展开大量研究。Burkhard等<sup>[13]</sup>提出生态系统服务需求是在给定时间段内、在特定区域消费所有生态系统产品和服务的总和;张彪等<sup>[14]</sup>从人类需求角度建立生态系统服务需求分类体系,并对生态系统服务需求量初步探索;Kroll等<sup>[15]</sup>采用城市梯度法,基于能源、食品和水资源服务的供需,对德国东部生态系统服务供需比进行定量研究;王文美等<sup>[16]</sup>从物质文化、生态安全和环境质量3个层次构建人类需求指标体系。生态系统服务供给不仅受限于自然资源与环境系统,其供给能力还受区域开发、土地利用及污染物排放等因素的显著影响。人类对生态系统服务需求具有高度社会性特征,构建与生态系统服务供给相对应的需求评价指标体系,还处于不断深入研究与完善的过程。其中,部分学者研究中主要采用土地利用程度、人均GDP等总体指标对生态系统服务需求进行分析;武爱彬等<sup>[17]</sup>基于土地覆被数据,采用生态系统服务评分矩阵方法,对生态系统服务供需格局时空演变特征进行分析;王萌辉等<sup>[18]</sup>依据生态系统服务供需匹配类型对土地整治分区进行研究;Wang等<sup>[19]</sup>采用生态系统服务供给指数和土地开发指数代表供需状况,对

中国生态系统服务的空间失衡与供求变化进行研究。也有学者们从城市社会经济、结构及土地利用变化等对生态系统服务供需影响等方面展开研究:人类生产生活是生态系统服务需求的重要渠道、场所和过程<sup>[20-21]</sup>,Larondelle等<sup>[22]</sup>利用环境、城市结构和社会经济数据对德国柏林的城市生态系统服务需求和供应进行分析;Bryan等<sup>[23]</sup>从供需动态稀缺性效应,分析广州—佛山城市带土地利用变化对生态系统服务价值的影响。人类以城市为中心的社会经济活动与土地利用方式改变,是导致生态系统服务供需失衡的重要形式<sup>[24]</sup>,生态系统服务需求与生态供给之间不均衡,可能导致一系列生态环境问题,并可能诱发生态系统风险程度加剧,最终威胁到区域生态安全。李俊翰等<sup>[25]</sup>运用灰色综合关联度法对生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性进行研究,认为生态系统服务价值和生态风险指数具有较强的正向等级相关性;陈丹等<sup>[26]</sup>研究认为土地利用变化会对生态服务价值产生重要影响,进而对沱江流域的生态风险产生影响。陈峰等<sup>[27]</sup>将生态系统服务纳入生态风险评价体系,运用生态风险分析模型给出了基于生态系统服务的中国陆地生态风险格局的定量描述和空间分布。因而,将生态系统服务纳入生态风险评价框架<sup>[28]</sup>,基于生态系统服务对生态风险评估<sup>[29-30]</sup>等方面的研究,逐渐成为当前对生态安全研究的热点问题。

贵州位于长江和珠江两大水系上游交错地带,是“两江”上游和西南地区的重要生态屏障,还是重要的水土保持和石漠化防治区。随着贵州省喀斯特山区人类活动程度更深、更广,其生态系统也受到人类干扰日益严重,对其生态系统服务供给能力也造成显著影响。贵州省各地市社会经济的快速发展与城市化规模扩大,对生态系统服务需求也快速增加,如果其生态系统服务供给与需求在价值总量、结构与空间等存在不均衡,极易

导致区域严重生态风险与生态安全问题。因此,在构建生态系统服务供需评价指标基础上,运用生态风险指数等模型方法,对贵州省各地市生态系统服务供需均衡度、生态系统风险度及供需格局等方面展开分析与探讨,以期为生态系统风险管控,提高生态系统服务效益等方面提供一定理论与方法的支撑。

## 1 研究区概况

贵州省地处云贵高原东北部,界于  $24^{\circ}37'—29^{\circ}13'N$ ,  $103^{\circ}36'—109^{\circ}35'E$ 。国土面积  $17.62 \text{ 万 km}^2$ ,共辖 9 个地级市和自治州。境内山地和丘陵广布,地形崎岖、陡峭,山地面积达  $92.5\%$ ;喀斯特地貌发育程度高,形态类型齐全,分布广泛。境内长江和珠江两大水系上游及支流交错分布,是长江与珠江的重要生态屏障区。至 2018 年末,常住人口约 3 600 万,人均地区生产总值 41 244 元,农村贫困问题严重。森林覆盖率达  $55\%$ 左右,石漠化生态问题突出,是我国集中连片贫困分布区与生态环境极度脆弱区之一。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源

贵州省 2010 年土地利用数据来源于国家基础地理信息中心 (DOI: 10.117 69/GlobeLand30.2010.db),2015 年土地利用类型来源于清华大学 ([http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc2015\\_v1.html](http://data.ess.tsinghua.edu.cn/fromglc2015_v1.html)),数据分辨率为  $30 \text{ m}$ 。2010 年与 2015 年各地级市主要粮食作物产量、粮食价格、人口与社会经济生产、污染物排放量、水土流失面积和旅游收入等数据来源于 2011 年、2016 年贵州省统计年鉴、各地级市统计年鉴,以及 2010 年、2015 年贵州省和各地级市国民经济与社会发展统计公报、环境公报、水土流失公告和水土保持公告等。

### 2.2 生态系统服务价值供给核算

依据 Costanza<sup>[2]</sup>、谢高地<sup>[31]</sup> 等对生态系统服务功能分类及其核算方法的研究成果,将生态系统服务划分为原料生产、食物生产等 11 类服务功能,对各地土地利用类型单位面积生态系统功能服务价值进行核算,其计算过程如下:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{P_i G_i}{A_i} \quad (1)$$

$$ESV_j = \sum E_a \times e_{ij} \times M_i \quad (2)$$

式中: $E_a$ 是单位面积农田生态系统提供食物生产服务功能的经济价值(元/ $\text{hm}^2$ ); $i$ 是作物种类; $P_i$ 是研究区  $i$  种粮食作物平均价格(元/kg); $G_i$ 是  $i$  种粮食作物总产量(kg); $A$ 是粮食作物种植面积( $\text{hm}^2$ )。通

常认为在无人力投入自然生态系统的经济价值约为单位面积农田提供粮食作物生产服务经济价值的  $1/7$ ;  $ESV_j$ 是生态系统第  $j$  项服务功能的总价值(元/a); $e_{ij}$ 是第  $i$  土地利用类型生态系统的第  $j$  项服务功能相对于农田生态系统提供生态服务单位的当量系数; $M_i$ 是第  $i$  类土地利用类型的面积( $\text{hm}^2/\text{a}$ )。通对不同生态系统的各项生态系统服务功能价值求和,可得到研究区生态系统服务的总价值。

公式(2)中,当量系数( $e_{ij}$ )是谢高地等<sup>[8]</sup>采用全国参数计算得到,在对研究区进行分析时,需对其当量系数进行修正。农、林、牧和渔业生产反映区域生态系统的原材料生产与食物产品供给等服务功能价值,森林生态系统是生态系统调节服务和支持服务功能的基础,旅游活动反映生态系统文化服务功能价值;建设用地和未利用地的生态系统服务供给功能价值较低,可不对其进行修正。因此,以研究区与全国单位面积农、林、牧、渔产值的比值,分别修正耕地、林地、草地和水域的供给服务当量系数,以森林覆盖率比值对区域调节服务和支持服务的当量系数进行修正,以旅游总收入比值修正生态系统文化服务的当量系数。

对 2010 年、2015 年全国与贵州省以上数据计算得到:2010 年耕地、林地、草地、水域的生态系统供给服务修正系数分别为 0.98,0.88,0.94,0.16;调节、支持和文化服务的修正系数分别为 2.04,2.04,3.68;2015 年耕地、林地、草地、水域的生态系统供给服务修正系数分别为 1.01,1.21,0.8,0.22;调节、支持和文化服务的修正系数分别为 2.31,2.31,5.6。分析可知,2010 年贵州省耕地、林地的供给服务能力均略低于全国平均值;2015 年耕地、林地的供给服务能力略高于全国平均水平,草地与水域生态系统服务供给能力均低于全国平均水平。贵州省林地面积较大,生态系统服务的调节、支持能力以及美学景观服务价值高于全国平均水平;境内坡度陡坡,草地与水域面积小且产值低。通过对 2010 年、2015 年贵州省水稻、小麦、玉米和豆类等粮食作物的价格进行平均,得到其粮食作物平均价格为 2.51 元/kg,4.06 元/kg。同时,为了消除货币贬值对价格波动的影响,以 2010—2015 年的货币年贬值率为  $6\%$ ,计算得到 2010 年粮食作物平均价格为 3.35 元/kg。将修正系数代入,计算得到贵州省 2010 年、2015 年不同土地利用类型单位面积生态系统服务的当量系数(表 1)。

### 2.3 生态系统服务需求指标构建与核算

生态系统服务是自然系统和人类系统的共同生产者,不仅受到生态系统构成的影响,还受到社会经济系统的影响<sup>[32]</sup>。人口、经济、政府政策、文化活动

和治理措施等均对生态系统服务需求产生影响<sup>[33]</sup>。因而,自然环境与资源状况、政府政策、人口动态、经济因素、文化需求等均显著影响人类对生态系统服务的需求。因此,生态系统服务需求评价指标的构建,须考虑生态系统服务供给类型,并结合人类社会经济活动及土地利用等方面。因此,以粮食消费量对应食物供给服务需求,以林牧渔消费量对应原料供给服务需求,以工业、农业、城镇、生态及生活等水费对应水资源供给服务需求;以废气中二氧化硫排放量治理费

表征气体净化调节服务需求;气候调节具有空间范围不确定性,故选择生态系统气候调节服务值;以工业污染设施投入与老工业治理费、生活废弃物处理费代表对净化环境服务需求;以工业污水处理费与生活污水处理费表征水文调节服务需求;以每年水土保持投入费代表土壤保持支持服务需求;以水土流失造成土壤 N,P,K 营养元素流失损失代表维持养分循环支持服务需求;以旅游总收入表征对自然保护区、植物园及旅游景区等美学景观的文化服务需求(表 2)。

表 1 2010 与 2015 年贵州省单位面积生态系统服务价值当量 元/(hm<sup>2</sup>·a)

年份	土地利用类型	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务 美学景观
		食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	
2010	农田	2401.83	532.53	—2836.55	4026.93	2103.96	610.83	6764.33	2352.81	701.32	769.19	612.16
	森林	492.83	1132.05	585.54	8630.75	25824.37	7567.46	16899.52	10508.47	803.12	9569.61	7570.34
	草地	486.47	715.81	396.13	5459.73	14433.6	4765.95	10572.57	6651.22	512.79	6047.93	4815.63
	水域	283.9	81.62	2941.9	3483.97	10361.42	25111.74	462599.03	4207.91	316.72	11537.83	15426.36
	建设用地	0	0	0	44.36	0	221.8	66.54	44.36	0	44.36	22.18
	未利用地	22.18	66.54	44.36	243.98	221.8	687.57	465.77	288.33	22.18	266.16	110.9
2015 年	农田	2637.36	584.75	—3114.71	4858.34	2538.35	736.94	8160.92	2838.58	846.12	928	992.51
	森林	721.99	1658.44	857.81	10412.67	31156.14	9129.86	20388.64	12678.08	968.94	11545.38	12274.05
	草地	441.12	649.07	359.19	441.12	17413.59	5749.94	12755.41	8024.45	618.66	7296.61	7807.75
	水域	415.91	119.57	4309.86	415.91	12500.67	30296.38	558108.45	5076.69	382.12	13919.96	25011.26
	建设用地	0	0	0	47.26	0	236.31	70.89	47.26	0	47.26	23.63
	未利用地	23.63	70.89	47.26	259.94	236.31	732.57	496.26	307.21	23.63	283.57	118.16

表 2 贵州省 2010 与 2015 年各地市生态系统服务需求量 亿元

年份	城市	供给服务需求			调节服务需求				支持服务需求		文化服务需求 旅游总收入
		粮食消费量	林牧渔消费量	水消费总费用	二氧化硫废气排放量处理费	气候调节	污染设施与生活废弃物处理	工业与生活污水处理费	水土保持投入费	水土流失造成土壤营养元素损失	
2010 年	贵阳市	15.83	27.10	21.23	11.73	128.68	5.93	1.30	0.1121	0.1122	425.96
	六盘水市	19.52	20.40	23.05	26.24	153.32	13.20	1.11	0.2127	0.2129	10.61
	遵义市	83.83	77.71	26.90	17.09	556.46	9.60	1.27	0.4863	0.4868	140.83
	安顺市	19.17	28.54	8.13	11.24	152.23	3.52	0.50	0.1342	0.1344	112.84
	毕节市	63.98	73.40	24.12	24.20	405.55	12.72	1.30	0.5835	0.5840	101.10
	铜仁市	38.29	55.02	8.02	11.73	311.02	4.60	0.46	0.3413	0.3416	60.19
	黔西南州	25.20	39.94	12.31	13.14	289.44	4.05	0.50	0.2872	0.2875	30.03
	黔东南州	37.10	47.68	11.23	10.28	561.95	2.09	0.53	0.2699	0.2701	109.72
	黔南州	38.37	49.76	11.97	5.15	470.41	8.13	0.71	0.3272	0.3275	101.37
	贵阳市	18.43	34.54	20.02	12.43	152.71	6.46	2.48	0.095	0.095	1040.00
2015 年	六盘水市	32.83	37.66	16.61	18.33	184.27	28.12	1.00	0.186	0.186	73.00
	遵义市	122.81	118.54	22.03	16.33	669.13	7.87	1.56	0.424	0.424	547.00
	安顺市	27.09	41.29	11.07	4.86	182.84	2.03	0.58	0.123	0.123	378.00
	毕节市	104.56	100.92	21.21	17.08	487.82	5.45	2.24	0.517	0.518	312.00
	铜仁市	54.77	63.21	11.06	9.29	373.94	1.41	0.60	0.302	0.302	240.00
	黔西南州	42.03	57.96	10.60	6.10	348.21	2.64	0.49	0.254	0.254	140.00
	黔东南州	48.80	75.47	14.12	7.62	676.41	6.79	0.82	0.241	0.241	387.00
	黔南州	51.71	50.08	12.64	10.31	471.85	4.18	1.28	0.297	0.298	422.00



## 2.4 生态系统服务供需格局

通过研究生态系统服务供给量与需求量在空间上盈亏格局关系,可探讨各地市生态系统服务供需在结构与空间格局的时空分异。由于各指标具有数值具有显著变异率,采用对数法消除指标波动性,获得生态系统服务需求的综合指数。具体公式如下:

$$SDI = \lg F \times \lg T \times \lg W \times \lg S \times \lg C \times \lg L \times \lg I \times \lg P \times \lg N \times \lg Ta \quad (3)$$

式中:SDI 代表生态系统服务需求综合指数; $F$  代表粮食消费量; $T$  代表林牧渔消费量; $W$  代表水消费总费用; $S$  代表二氧化硫废气排放量处理费; $C$  代表气候调节; $L$  代表污染设施与生活废弃物处理; $I$  代表工业与生活污水处理费; $P$  代表污染设施与生活废弃物处理; $N$  代表水土流失造成土壤营养元素损失; $Ta$  代表旅游总收入。

运用  $z$ -score 标准化方法对贵州省各地市生态系统服务供给量与需求量综合指数进行标准化,得到各地市生态系统服务供给量与需求量的标准化数值。以标准化值代表  $X, Y$  轴,划分 4 个象限进行生态系统服务供给与需求的空间格局分析。其中,划分出的 I, II, III, IV 象限依次代表高供给高需求、低供给高需求、低供给低需求和高供给低需求 4 种供需格局类型。具体方法:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

$$y = \frac{y_i - \bar{y}}{s} \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2} \quad (6)$$

式中: $x$  为评价单元标准化后的生态系统服务供给量、需求量; $x_i$  为第  $i$  个评价单元的生态系统服务供给量、需求量; $\bar{x}$  为全省平均值; $s$  为全省标准差; $n$  为评价单元的总数。

## 2.5 供需平衡度与生态风险分析

2.5.1 供需平衡度分析 生态系统服务供需均衡或盈余,是生态系统持续发展与区域生态安全的基础。因而,量化分析与评价生态系统服务供需赤字或盈余状态,对生态系统管理、区域生态安全与人类社会经济可持续发展等具有重要理论与现实意义。依据供需比率对贵州省各地市生态系统服务供需平衡度进行分析:

$$R = \frac{S}{D} \times 100\% \quad (7)$$

$$r = R - 100\% \quad (8)$$

式中: $R$  表示总供需比率; $r$  表示总供需差率; $S$  表示生态系统供给的所有服务价值; $D$  表示生态系统服

务需求价值。当  $R > 1$ , 即  $r > 0$  时,生态系统服务处于供给大于需求 ( $S > D$ ),生态系统服务处于供给盈余状态;当  $R = 1$ , 即  $r = 0$  时,生态系统服务处于供需平衡态 ( $S = D$ );当  $R < 1$ , 即  $r < 0$  时,市场处于生态系统服务供给小于需求状态 ( $S < D$ ),即生态系统服务处于赤字不足,无法满足需求状态。当总供需比率 ( $R$ ) 和总供需差率 ( $r$ ) 与 1 的偏离程度越大,则区域生态系统服务供需平衡程度越低,生态系统服务供需赤字或盈余度越高,反之亦然。通过生态系统服务供需比率计算分析,可量化分析人口及社会经济活动对生态系统服务供需状态的影响,可评价生态系统服务供需是否均衡,是否威胁到区域生态安全。

2.5.2 生态风险分析 生态风险分析是对生态系统不确定性风险及其可能遭受损失的定量化分析,是评估区域生态安全程度的重要指标<sup>[30]</sup>。当人类在生产与生活中,消耗生态服务产品超过生态系统供给服务产品阈值时,生态系统服务供给无法满足需求量时,生态系统即暴露于风险之中。

宋科等<sup>[34]</sup>在金融风险分析 VAR 方法<sup>[35-36]</sup>的基础上建立生态风险分析 EVR 模型。对各类生态系统服务供给与需求,进行定量计算与分析,可研究生态系统服务需求量大于供给量时,区域生态系统面临的生态风险程度。其计算公式为:

$$E_r = D - S \quad (E_r > 0) \quad (9)$$

式中: $E_r$  是生态风险值,即无法从生态系统中获得供给而暴露于风险的这部分生态系统服务产品; $D$  与  $S$  与公式(7)相同。当  $E_r > 0$  时,其值越大,表明人类和社会经济活动对生态系统需求价值量越大,生态系统服务供给无法满足于需求部分越大,生态系统风险越高。运用生态风险指数,以评价生态系统所承受生态风险压力。其计算公式为:

$$I = \frac{E_r}{S} \quad (10)$$

式中: $I$  为生态风险指数; $E_r$  为生态风险值; $S$  为生态系统供给所有服务价值。当  $E_r > 0$  时,生态风险指数 ( $I$ ) 值越大,表明生态系统承受风险压力越大,生态系统风险程度越高。

## 3 结果与分析

### 3.1 贵州省土地利用面积变化

依据研究需要,将水田、旱地合并为耕地,将有林地、疏林地、灌木林地和其他林地合并为林地,将高覆盖度、中覆盖度和低覆盖度草地合并为草地,将河渠、湖泊、水库坑塘和滩地合并为水域,将城镇用地、农村居民点和其他建设用地合并为建设用地,将裸土地、裸岩石

质地合并为未利用地,最后计算得到贵州省 2010 年与 2015 年这 6 类土地类型面积及动态变化(图 1)。

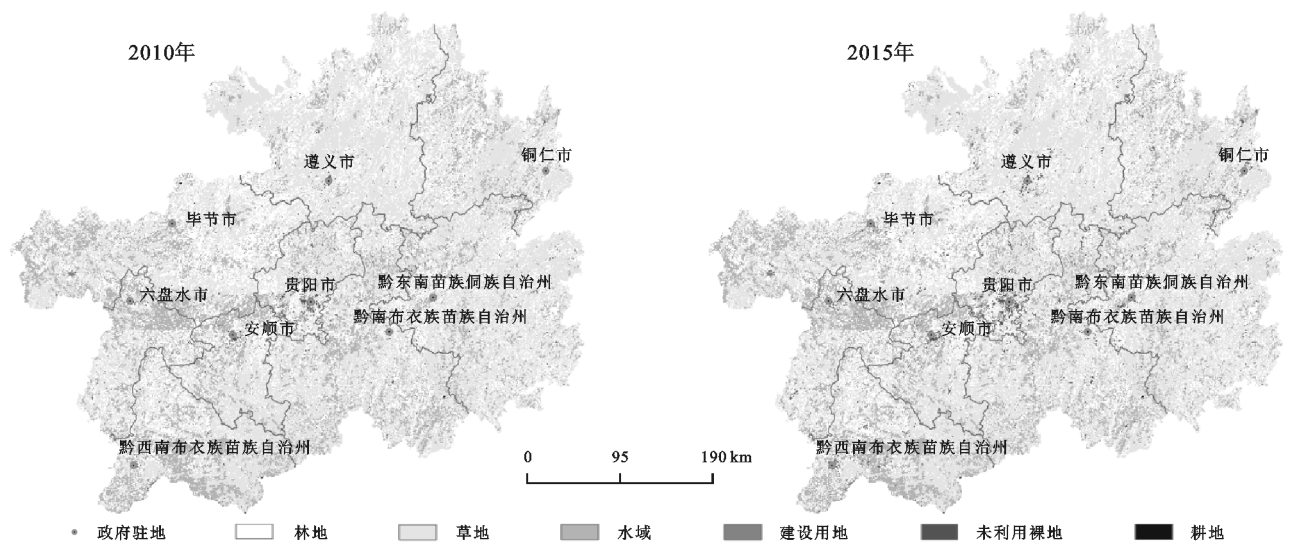


图 1 贵州省土地利用类型分布

分析可知,从 2010—2015 年,贵州省建设用地面积增加幅度最大,增加 94 195 hm<sup>2</sup>,增加率 150.92%;其次是水域面积,增加 3 702 hm<sup>2</sup>,增加率 8.44%;裸地等未利用地变化量较小,农田、林地、草地的变化均呈减少变化;耕地减少了 53 109 hm<sup>2</sup>,林地减少了 33 525 hm<sup>2</sup>,草地减少了 11 263 hm<sup>2</sup>。全省各地市建设用地面积增加幅度均较大,其中毕节市与铜仁市的城镇建设用地面积增加约 385%,271.31%,而黔东南州与贵阳市城镇建设用地面积增加幅度相对最小;黔南州林地面积减少较多,耕地面积、水域及建设用地面积均呈增加变化。

### 3.2 生态系统服务供给价值量时空演变

将贵州省各地市土地利用类型面积及单位面积土地利用类型生态系统服务的当量系数代入公式(2),计算得到贵州省各地市 2010 年与 2015 年各类生态系统服务功能的价值量及其分布图(图 2)。

分析可知,2010 年贵州省生态系统服务总价值 11 375.783 7 亿元,2015 年生态系统服务总价值 13 816.262 1 亿元,生态系统服务总价值增加了 21.45%,年均增长率 3.96%。从各地市土地利用类型面积变化可知,虽然部分生态系统服务价值贡献较大的耕地、林地和草地等土地利用类型,向生态系统服务价值较低的建设用地和水域转变,但贵州省生态系统服务总价值量仍然呈增长变化,表明长期石漠化生态治理恢复对生态系统服务价值影响显著;虽然贵州省属湿润季风气候区,但各地市水资源供给服务均为负值,且增加最少(仅 0.97%),这与贵州省属于高海拔山区,坡度陡峭、土层浅薄、山地耕地面积比率大,以及喀斯特地貌独特地表与地下二元空间水文特征,导致地表蓄水保水能力非常弱,水资源快速流失汇入深切河谷,与其农业生产中频繁出

现水资源不足现实相吻合。2010 年毕节市水资源供给服务价值全省最低(−16.84 亿元),2015 年则是黔南州水资源供给服务价值最低(−16.549 亿元),毕节市次之(−16.18 亿元);水资源供给最高的贵阳市(2015 年—2.708 亿元)与黔西南州(2015 年—2.121 亿元)。所有生态系统服务价值中,美学景观为服务价值增加幅度最大(57.57%),其次是原料生产,增加幅度为 29.83%;虽然贵州省耕地总面积略微降低,但其食物生产供给服务价值增加较显著(20.73%);黔南州生态系统服务价值增加幅度最低(7.11%),这与其林地面积减少较多、耕地面积增加大密切相关;其余地市增加幅度较大(22.13%~24.49%)。

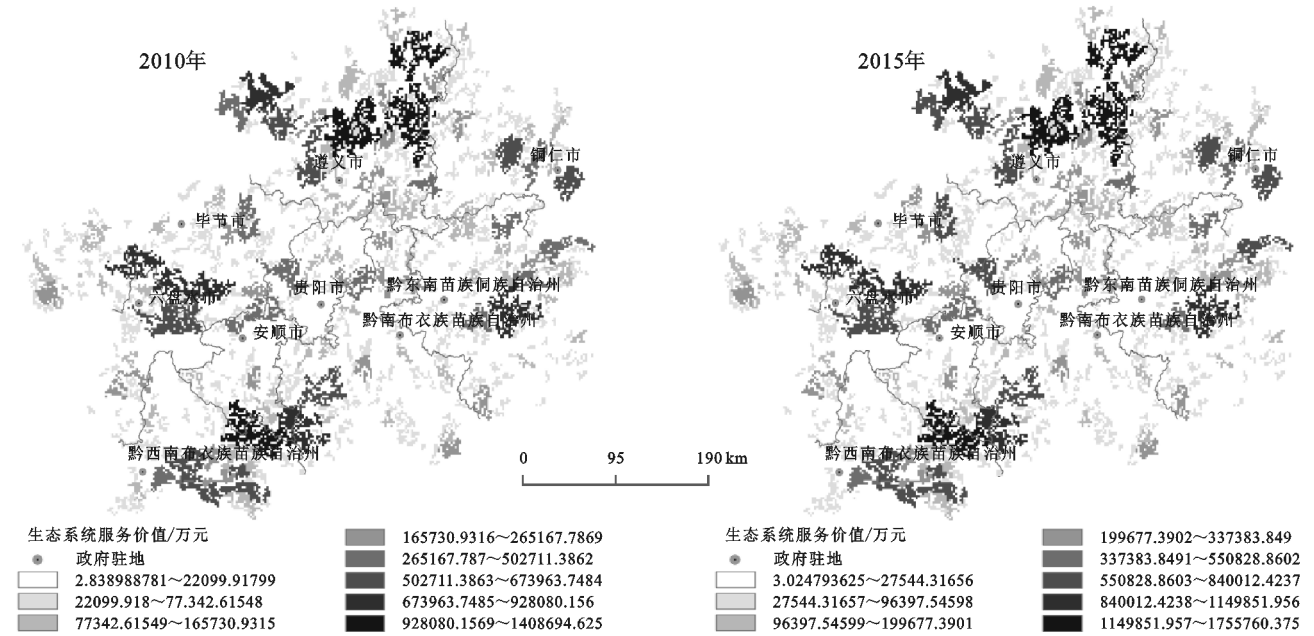
贵州省生态系统调节服务的 4 种亚类服务功能价值平均增加 18.09%;支持服务的 3 种亚类服务功能价值平均增加 18.22%;调节功能服务价值占总价值比重最高(66.78%,64.93%),其次是支持功能服务价值(占比 22.86%,22.14%),结果表明贵州省生态系统服务价值以支持服务和调节服务等为主,这与贵州省属于长江与珠江上游山区,多年石漠化生态治理与恢复,有效改善生态环境,使其生态系统支持与调节功能服务价值较高,也表明贵州省是长江与珠江流域的重要生态屏障区。

### 3.3 生态系统服务需求时空演变

结合表 2,运用 ArcGIS 采用克里金法获得各地市 2010 年与 2015 年生态系统服务需求量空间分布趋势图(图 3)。分析表明,从 2010—2015 年,贵州省生态系统服务总需求价值从 5 237.32 亿元,增至 8 491.48 亿元,增长 62.13%,年均增长率 10.15%;生态系统服务需求中,粮食消费需求(2010 年,6.52%;2015 年,5.92%)、林牧渔消费需求(2010 年,8.01%;2015 年,6.83%)及生物

多样支持服务与文化服务需求量(2010 年、20.86%;2015 年,41.68%)的占比较大,气候调节服务需求量(2010 年, 57.84%;2015 年,41.77%)占比最大。其中,2010—2015

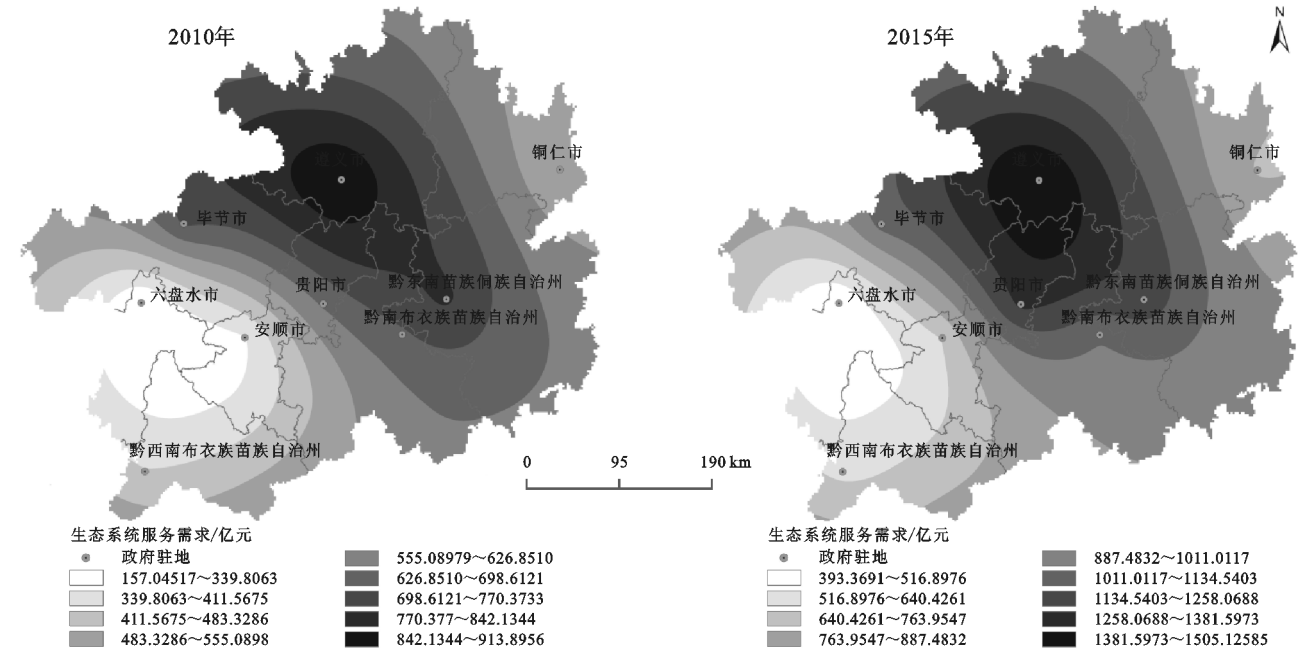
年,生物多样支持服务与文化服务需求增长 223.89%,粮 食消费需求增长 47.39%,林牧渔消费需求增长了 38.16%,水文调节需求增长了 44.14%。



从空间分析可知(图 3),2010—2015 年,各地市 粮食消费需求、林牧渔消费需求、水文调节需求 量,以及对生物多样性与文化服务的需求量,均呈显 著增长变化;对气体调节、土壤保持及维持养分循环 的服务需求量呈降低变化。安顺市、铜仁市、黔东南 州和黔南州对水资源需求量呈增加变化,其余地市需 求量略微减少;贵阳市与黔南州对气体调节服务需求 量呈增长变化,其余城市呈降低变化;贵阳市、六盘 水市及黔东南州对净化环境服务需求呈增长变化,其余

城市呈降低变化;除黔南州与六盘水市对水文调节服 务需求降低,其余城市对水文调节服务需求均呈增加 变化。同时,遵义市生态系统服务总需求量最高,其 次是毕节市、黔东南州、贵阳市与黔南州,六盘水市的 生态系统服务总需求量最少。

结果表明,由于贵州省各地市的地形地貌、自然 资源分布、生态系统组成及人口数量、城市化程度与 规模、经济发展程度等方面分异,导致各地市间对生 态系统服务需求量的时空分异。





### 3.4 生态系统服务供需格局空间特征

将贵州省各地市生态系统服务供给量与需求量代入公式(3),获得 2010 年和 2015 年贵州省各地市生态系统服务需求量的综合评价指数,将生态系统服务供给量与需求量综合指数运用公式(4),(5),(6)进行标准化,依据计算结果绘制各地市生态系统服务供需空间格局图谱(图 4)。分析可知,2010 年,贵州省各地市生态系统服务供需格局中,遵义市与毕节市均属高供给高需求,贵阳市与六盘水市属低供给高需求,安顺市、黔西南州与铜仁市低供给低需求,黔西南州与黔东南州属高供给低需求;2015 年,六盘水市由低生态供给高生态需求演变为低供给低需求格局,其他城市生态系统服务供需格局没有发生显著变化。贵阳市是贵州省的行政、经济、文化中心,具有城市规模大、高密度人口和高经济发展水平,是全省生态系

统服务需求量最高区域,但其生态系统服务供给能力受国土面积小、林地与耕地面积少等生态系统构成因素影响,其供给量最低。六盘水市属矿产资源型开发城市,随着矿产资源的匮乏,近年逐渐转变产业结构,生态建设与保护得到快速发展,因而其生态系统服务需求量呈现降低演变。遵义市与黔东南州是贵州省石漠化面积最少的地区,林地面积广大,森林覆盖率高,故其生态系统相对较好,生态系统服务供给能力最高,其次是毕节市与黔南州;遵义市与毕节市的人口密度高,经济发展度高,因而其生态系统服务需求量较高。安顺市、铜仁市与黔西南州的国土面积小,森林覆盖率、人口密度及经济发展度均较低,其生态系统服务供给与需求量均较低。研究表明,自然资源、人口、土地利用、生态保护与修复及经济发展等对生态系统服务供需格局特征及其演变具有显著影响。

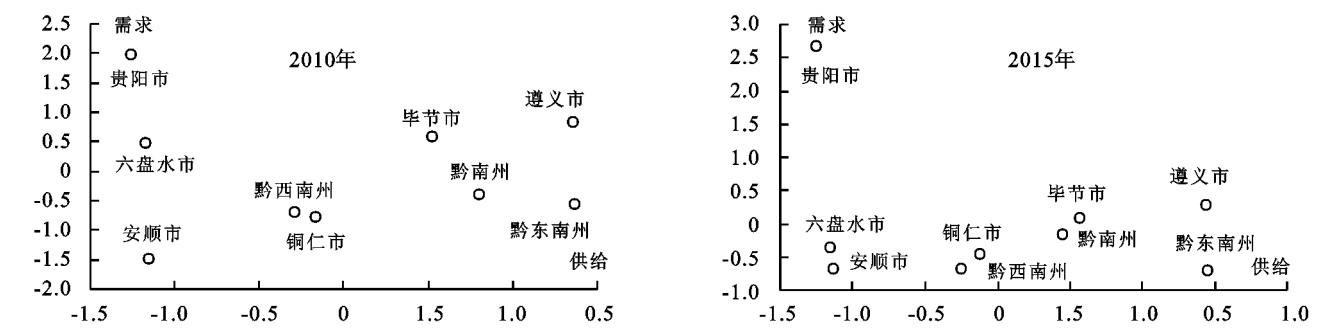


图 4 贵州省生态系统服务供需格局

### 3.5 生态系统服务供需均衡度及生态风险分析

3.5.1 供需均衡度时空分异 从贵州省生态系统服务供给价值与需求价值核算结果可知,2010 年与 2015 年生态系统服务总需求量低于生态系统服务总供给量(供需比 2.17,1.63),供需盈余显著。由于贵州省各地市人口分布、城市化水平及社会经济活动的差异,各类生态系统服务的供给与需求存在结构与空间分异。因此,将 2010 年与 2015 年生态系统服务供给价值量与需求价值量代入公式(7),(8),得到各地市生态系统服务总供需比率与总供需差率。

分析可知,2010 年贵州省各地市生态系统服务的食物供给、原料供给与水资源供给的总供需比率小于 1,且总供需差率小于 0,表明各地市以上 3 类生态系统服务供给小于需求,供给赤字严重;食物生产、原料供给与水资源供给总供需比率均值分别为 0.54,0.37 和 -0.48(水资源供给为负)、总供需差率为 -0.46,-0.63,0.52,与供需均衡偏离度较高,表明各地市对食物生产、原料供给和水资源供给远不能够满足对其需求,其中水资源供给赤字最为突出,供需不均衡最为突出。贵阳市与安顺市的生物多样性与文化服务总供需比率为 0.21,0.93,表明它们对自然保护区、

动植物园区等的生物多样性与景观美学服务需求,已经超其生态系统服务供给能力。其中,贵阳市对其生态系统服务需求大于供给能力,供需不均衡度最为显著。各地市的气体调节、气候调节、环境净化、水文调节、土壤支持及维持养分循环等支持与调节功能服务的供给价值均大于对其需求,生态系统服务供需处于盈余状态。

至 2015 年,贵州省各地市生态系统服务的食物生产供给、原料供给与水资源,其总供需比率分别为 0.45,0.34 和 -0.47,总供需差率为 -0.55,-0.66,0.53,其供需均衡偏离度较 2010 年更显著,表明这 3 类生态系统服务需求量赤字加剧,生态系统服务的供需不平衡程度更加严重。生物多样性与文化服务的总供需比率小于 1 的城市由贵阳市、安顺市扩展到贵阳市(0.12)、遵义市(0.94)、安顺市(0.38)和黔南州(0.88),表明它们对生物多样性与文化服务的需求超过生态系统服务的供给,并可能威胁其生态系统的生态安全。

3.5.2 生态风险分析 对贵州省各类生态系统服务的供给与需求进行定量计算,当生态系统服务需求大于生态系统服务供给时,生态系统面临严重生态风



险。将2010年与2015年各地市生态系统服务供给价值与需求价值代入公式(9)、(10),得到全省及各地市生态系统的生态风险价值与生态风险指数。

分析可知,2010年贵州省各地市生态系统的食物生产供给服务、原料供给服务与水资源供给服务的平均生态风险值为18.28,29.27,23.59,以及贵阳市、安顺市的生物多样性与景观美学服务的生态风险值还分别为376.50,54.64,表明对其生态系统产品与服务需求高于供给价值越多,其生态系统风险程度高;其余生态系统服务类型,在全省各地市承受风险压力较小,其生态系统面临生态风险程度较低。2015年,食物生产供给服务、原料供给服务与水资源供给服务的生态风险值分别为32.18,41.88,22.68,其中食物生产供给服务、原料供给服务比2010年增加76.04%和43.10%,表明各地市这2类生态系统服务生态风险程度呈加剧变化趋势;水资源供给服务的生态风险价值比2010年降低3.88%,表明至2015年水资源供给能力增强,这是由于贵州省长期开展石漠化生态治理与恢复,增强水土保持能力,增加生态系统水资源供给服务能力。生物多样性与景观美学服务的生态风险值大于0的地区,由贵阳市、安顺市扩展为全省所有地市,并且其值也增加1倍以上,表明以旅游开发活动为主的文化服务需求,在各地市增长迅速,并造成对文化服务需求显著高于服务供给,生态系统在全省范围内均承受高风险压力。

对各地市生态系统服务存在生态风险的食物生产供给、原料供给、水资源供给及生物多样性与景观美学服务进行生态风险指数分析,运用ArcGIS软件获得其空间变化趋势图(图5)。分析可知,从2010—2015年,以上4类生态系统服务风险指数均大于0,生态系统存在显著生态风险压力,生态风险程度较高;其中,生物多样性与景观美学服务、食物生产供给服务与原料供给服务的生态风险指数分别增加了419.42%,50.24%和11.87%,生态风险压力增加显著、生态风险程度加剧;水资源供给服务生态风险指数降低11.34%,表明生态治理与恢复有助于水资源供给能力提升,从而降低区域生态系统服务的生态风险压力与程度。各地市气体调节、气候调节、环境净化、水文调节、土壤支持及维持养分循环等支持与调节服务功能,承受生态风险压力较低,这与贵州省开展多年的生态治理与保护,植被覆盖率逐渐增高、生态环境逐渐转好的基本情况相吻合。

从空间分析可知,2010年,遵义市食物供给服务生态风险指数最大(1.617);2015年,遵义市(2.203)、六盘水市(1.889)和毕节市(1.974)和黔西南州

(1.406)的生态风险指数显著增加,生态风险程度在空间与数值上均显著加剧。2010年,贵阳市(3.014)、安顺市(2.586)、毕节市(2.291)和铜仁市(2.429)等地区原料供给服务生态风险指数较大;2015年,安顺市(3.022)、六盘水市(2.686)、黔西南州(2.087)和毕节市(2.550)增加非常明显,生态系统风险程度加剧;各地市水资源生态风险指数变化不大,生态风险程度略微降低。

## 4 结论与讨论

通过构建生态系统服务供需测评指标,运用供需均衡度、生态风险指数等模型方法,探讨贵州省各地市生态系统风险状况。研究表明,全省生态系统服务功能总供给价值量与需求量增速均较快,生态系统服务供给总体盈余;生态系统服务供需格局中贵阳市属低供给高需求、遵义市与毕节市属高供给高需求,供需结构性存在明显分异;各地市生态系统生态风险也存在结构性与空间分异,其中食物、原料与水资源等生态系统服务供需严重赤字,生态系统风险度较高;遵义市、六盘水市和毕节市和黔西南州、铜仁市的生态风险程度显著加剧。生态系统服务供需与生态风险的结构性差异与空间不均衡,极易诱发生态风险与安全问题。

(1) 2010—2015年,贵州省各地市建设用地面积呈增加趋势,林地与耕地面积略微减少;生态系统服务供给总价值量增加21.45%,年均增长率3.96%;生态系统供给服务总价值增加,表明长期石漠化生态治理对提高生态系统供给服务价值影响显著。各地市水资源供给均为负值,表明在喀斯特山区独特地表与地下二元空间水文特征、陡峭山地、浅薄土层、山地耕地面积比率大等因素影响下,地表蓄水保水能力低,导致其农业生产出现水资源供给严重不足等现象。全省各地市调节服务与支持服务的价值量约占总价值量85%,结果与贵州省多年石漠化生态治理与恢复、森林覆盖率提升,促使生态环境有效改善结果相吻合。

(2) 对生态系统粮食、原料、水资源和文化等供给服务的消费,以及对大气、水体、土壤及水土保持等生态环境净化与维持等方面构建服务需求量指标,较好地表征对生态系统产品和服务的消费需求。2010—2015年,全省生态系统服务总需求价值量低于生态系统服务总供给量,生态系统服务供给盈余;各地社会经济发展迅速,对生态系统服务需求量增加较快,年均增长率10.15%,其中对生物多样支持服务与文化服务、粮食消费、林牧渔消费和水文调节的需求量增速较高。

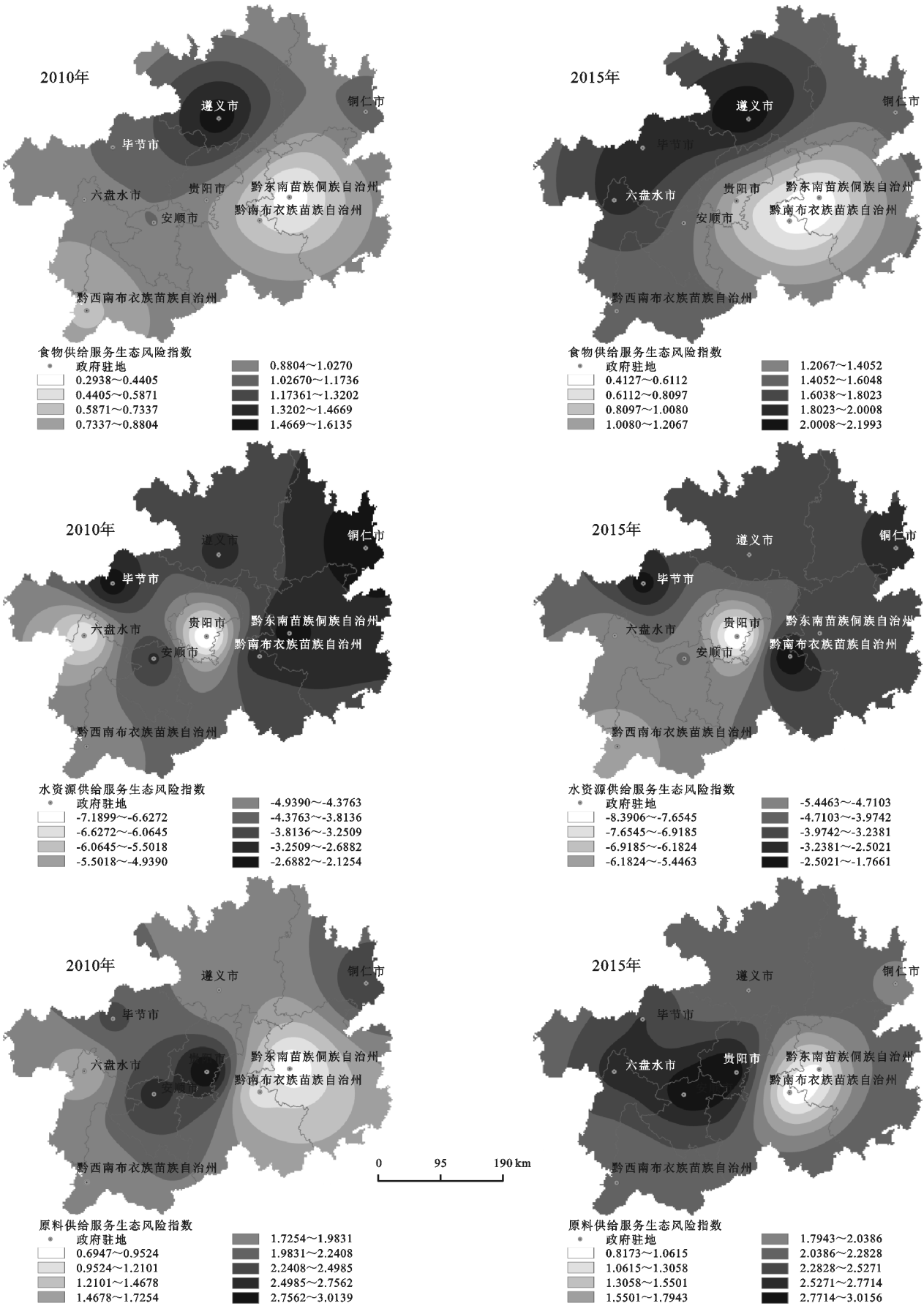


图 5 贵州省生态系统生态风险度空间分布

(3) 2010 年,遵义市与毕节市生态系统服务均属高 供给高需求格局,贵阳市与六盘水市属低供给高需求格

局,安顺市、黔西南州与铜仁市低供给低需求格局,黔西南州与黔东南州属高供给低需求格局;至2015年,仅六盘水市由低生态供给高生态需求演变为低供给低需求格局。结果较好地体现了贵州省各地市在资源分布、土地利用类型、社会经济发展及人口密度等方面差异,导致对生态系统服务供给能力与需求量的分异。

(4) 贵州省生态系统服务供需存在结构差异与空间不均衡,极易对区域生态安全与可持续发展造成危害。贵州省各地市食物供给、原料供给与水资源供给的供需与均衡度偏离较高,且呈加剧演变趋势,供需服务出现严重赤字;生物多样性与文化服务的供需与均衡度偏离较高的城市,由贵阳市、安顺市扩展到遵义市和黔南州。生物多样性与文化服务、食物供给服务和原料供给服务的生态风险指数均显著增加,其生态系统风险压力大、风险程度高,且呈加剧趋势演化;其中遵义市、六盘水市和毕节市和黔西南州、铜仁市的生态风险程度显著加剧;支持与调节服务功能承受生态风险压力较低,这与贵州省石漠化生态问题得到初步遏制情况相吻合。

从生态系统服务供需价值结构性与空间均衡的角度,探讨贵州省各地市生态系统的风险程度,研究结论对喀斯特山区生态系统风险管控研究、探究生态服务供需均衡方法等方面具有较好理论支持作用。同时,生态系统服务需求测评指标与社会经济、生产生活密切相关,还需要进一步探究与完善;生态系统服务供给与需求在结构与空间上的相互综合作用机制,也还需要深入研究;喀斯特山区生态环境极为脆弱,生态系统服务功能价值对自然环境演变与人类活动影响反馈极为敏感,极易诱发严重生态风险与生态安全问题,因而准确评价其生态风险与安全较为困难,还需要不断探究。

#### 参考文献:

- [1] Daily G C. Nature's services; Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington DC: Island Press, 1997.
- [2] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387(6630):253-260.
- [3] Costanza R. Ecosystem services; multiple classification systems are needed[J]. *Biol Conservat*, 2008,141(2):350-352.
- [4] 谢高地,鲁春霞,成升魁.全球生态系统服务价值评估研究进展[J].*资源科学*,2001,23(6):5-9.
- [5] 欧阳志云,王如松.生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J].*世界科技研究与发展*,2000,22(5):45-50.
- [6] Boerema A, Rebelo A J, Bodi M B, et al. Are ecosystem services adequately quantified? [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2017,54(2):358-370.
- [7] Turner B L, Kasperson R E, Matson P A, et al. A framework for vulnerability analysis in sustainability

- science[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2003,100(14):8074-8079.
- [8] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].*自然资源学报*,2008,23(5):911-919.
- [9] Hu H, Fu B, Lü Y, et al. SAORES:a spatially explicit assessment and optimization tool for regional ecosystem services[J]. *Landscape Ecology*, 2015,30(3):547-560.
- [10] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡/协同研究进展与趋势展望[J].*地球科学进展*,2015,30(11):1250-1259.
- [11] 李双成,张才玉,刘金龙,等.生态系统服务权衡与协同研究进展及地理学研究议题[J].*地理研究*,2013,32(8):1379-1390.
- [12] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J].*资源科学*,2016,38(1):1-9.
- [13] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. *Ecological Indicators*, 2012,21(10):17-29.
- [14] 张彪,谢高地,肖玉.基于人类需求的生态系统服务分类[J].*中国人口·资源与环境*,2010,20(6):64-67.
- [15] Kroll F, Müller F, Haase D, et al. Rural-urban gradient analysis of ecosystem services supply and demand dynamics[J]. *Land Use Policy*, 2012,29(3):521-535.
- [16] 王文美,吴璇,李洪远.滨海新区生态系统服务功能供需量化研究[J].*生态科学*,2013,32(3):379-385.
- [17] 武爱彬,赵艳霞,沈会涛,等.京津冀区域生态系统服务供需格局时空演变研究[J].*生态与农村环境学报*,2018,34(11):968-975.
- [18] 王萌辉,白中科,董潇楠.基于生态系统服务供需的陕西省土地整治空间分区[J].*中国土地科学*,2018,32(11):73-80.
- [19] Wang J, Zhai T, Lin Y, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019,657(3):781-791.
- [20] Bai, X. Integrating global environmental concerns into urban management[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2007,11(2):15-29.
- [21] Jenerette G D, Wu W, Goldsmith S, et al. Contrasting water footprints of cities in China and the United States [J]. *Ecological Economics*, 2006,57(3):346-358.
- [22] Larondelle N, Lauf S. Balancing demand and supply of multiple urban ecosystem services on different spatial scales[J]. *Ecosystem Services*, 2016,22(12):18-31.
- [23] Bryan B A, Ye Y, Connor J D. Land-use change impacts on ecosystem services value: Incorporating the scarcity effects of supply and demand dynamics[J]. *Ecosystem Services*, 2018,32(8):144-157.
- [24] 景永才,陈利顶,孙然好.基于生态系统服务供需的城市群生态安全格局构建框架[J].*生态学报*,2018,38(12):4121-4131.



- 的应用[J].高原气象,2011,30(1):133-141.
- [13] Vicente-serrano S M, Beguería S, López-moreno, J I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010,23(7):1696-1718.
- [14] McKee T B, Doesken N J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[C]//Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society. Boston, USA,1993:179-184.
- [15] 邹旭恺,任国玉,张强.基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J].气候与环境研究,2010,15(4):371-378.
- [16] 张永,陈发虎,勾晓华,等.中国西北地区季节间干湿变化的时空分布:基于 PDSI 数据[J].地理学报,2007,62(11):1142-1152.
- [17] 袁文平,周广胜.标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析[J].植物生态学报,2004,28(4):523-529.
- [18] 叶殿秀,张强,邹旭恺,等.近几十年三峡库区主要气象灾害变化趋势[J].长江流域资源与环境,2009,18(3):296-300.
- [19] 何永坤,王裕文.重庆市三峡库区干旱特征及其变化分析[J].山区开发,2001,12(12):24-26.
- [20] 张强,罗勇,廖要明,等.2006 三峡库区夏季高温干旱及成因分析[J].中国三峡建设,2007,2007(2):89-91.
- [21] 刘晓冉,程炳岩,李国平.三峡库区夏季旱涝变化特征及成因[J].应用气象学报,2010,21(5):590-597.
- [22] 陈鲜艳,宋连春,郭占峰,等.长江三峡库区和上游气候变化特点及其影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(11):1466-1471.
- [23] 杨庆,李明星,郑子彦,等.7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J].中国科学:地球科学,2017,47(3):81-97.
- [24] 方国华,涂玉虹,闻听,等.1961—2015 年淮河流域气象干旱发展过程和演变特征研究[J].水利学报,2019,50(5):598-611.
- [25] 陶新娥,陈华,许崇育.基于 SPI/SPEI 指数的汉江流域 1961—2014 年干旱变化特征分析[J].水资源研究,2015,4(5):404-415.
- [26] Yevjevich V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic drought [M]. Fort Collins: Colorado State University, 1967.
- [27] 王晓峰,张园,冯晓明,等.基于游程理论和 Copula 函数的干旱特征分析及应用[J].农业工程学报,2017,33(10):214-222.
- [28] 赵铭,张雪洋,包玉龙,等.基于 2 种标准化干旱指数分析秦皇岛近 50 年干旱状况[J].水土保持研究,2016,116(3):252-257.
- [29] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等.基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J].农业工程学报,2010,26(7):60-69.
- [30] 何兵,高凡,唐小雨,等.基于滑动 Copula 函数的新疆干旱内陆河流水文气象要素变异关系诊断[J].水土保持研究,2019,26(1):161-167.
- [31] 李红英,张晓煜,王静,等.基于 CI 指数的宁夏干旱致灾因子特征指标分析[J].高原气象,2014,33(4):995-1001.
- [32] 王晓利,张春艳,侯西勇.1961—2017 年环渤海地区气象干旱时空特征及致灾危险性评估[J].生态学报,2019,39(13):4647-4659.

(上接第 212 页)

- [25] 李俊翰,高明秀.滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J].生态学报,2019,39(21):7815-7828.
- [26] 陈丹,蒋贵国,张妍.基于生态服务价值的沱江流域土地景观生态风险时空分异研究[J].水土保持通报,2019,39(3):223-232.
- [27] 陈峰,李红波,张安录.基于生态系统服务的中国陆地生态风险评价[J].地理学报,2019,74(3):423-445.
- [28] Galic N, Schmolke A, Forbes V, et al. The role of ecological models in linking ecological risk assessment to ecosystem services in agroecosystems[J]. Science of the Total Environment, 2012,415(2):93-100.
- [29] Kang P, Chen W P, Wang M E. Advances in ecosystem service-based ecological risk assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(5):1192-1203.
- [30] 刘世梁,侯笑云,张月秋,等.基于生态系统服务的土地整治生态风险评价与管控建议[J].生态与农村环境学报,2017,33(3):193-200.
- [31] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资源的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
- [32] Jones L, Norton L, Austin Z, et al. Stocks and flows of natural and human-derived capital in ecosystem services[J]. Land Use Policy, 2016,52(3):151-162.
- [33] Curran S R, de Sherbinin A. Completing the picture: the challenges of bringing“consumption”into the population-environment equation[J]. Population and Environment, 2004,26(2):107-131.
- [34] Song K, Zhao S, Gui F, et al. Ecological risk analysis methods and their application based on the emergy value of ecosystem services[J]. Advances in Environmental Protection, 2011,1(2):13-19.
- [35] Fama, E F. The behavior of stock-market prices[J]. Journal of Business, 1965,38(1):34-105.
- [36] Martin R, Thompson K, Browne C. VaR: Who contributes and how much[J]. Risk, 2001,14(8):99-102.