

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.043.

陈相标, 丁文荣. 石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及权衡协同关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 285-293.

CHEN Xiangbiao, DING Wenrong. Spatial-temporal Evolution and Trade-off Synergy Relationships of Ecosystem Services in Karst Area of Shilin [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 285-293.

石林喀斯特岩溶区生态系统服务时空演变及 权衡协同关系

陈相标, 丁文荣

(云南师范大学 地理学部, 昆明 650500)

摘 要:喀斯特岩溶区是地球上最脆弱的自然生态系统之一, 探明生态系统服务时空变化及权衡与协同关系, 对区域生态治理决策和增进民生福祉具有重要意义。基于当量因子法、相关系数及空间自相关等方法, 定量分析了 2000—2020 年石林生态系统服务的时空演变及权衡与协同关系。结果表明: (1) 石林生态系统服务价值由 2000 年的 20.47 亿元持续增长至 2020 年的 21.82 亿元, 增幅为 6.60%, 生态系统服务空间分布格局较为稳定, 高等级区主要分布在水域地区以及植被覆盖较高的丘陵山区, 低等级区集中分布在建设用地相对集中和岩溶石漠化严重的区域; (2) 各土地利用类型生态系统服务价值敏感性指数均小于 1, 表明石林生态系统服务价值对修订后的生态服务价值系数缺乏弹性, 研究结果可信; (3) 研究期内, 协同关系是石林生态系统服务的主导关系, 协同率为 68.60%, 权衡关系主要存在于食物生产、维持养分循环与其他子系统关系中, 权衡率达 29.75%; (4) 数量上, 4 种生态系统服务类型均存在显著的空间正向自相关, 空间上, 不同生态系统服务对权衡与协同关系异质性显著。研究结果可为石林优化国土空间格局及生态保护与修复提供参考依据。

关键词:生态系统服务; 时空演变; 权衡与协同; 空间自相关; 石林喀斯特岩溶区

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0285-09

Spatial-temporal Evolution and Trade-off Synergy Relationships of Ecosystem Services in Karst Area of Shilin

CHEN Xiangbiao, DING Wenrong

(Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: The karst area is one of the most fragile natural ecosystems on the earth. To clarify the temporal and spatial changes of ecosystem services and the trade-offs synergy is of great significance to the decision-making of ecological governance in this area and the improvement of people's livelihood and well-being. Based on the equivalent factor method, correlation coefficient and spatial autocorrelation, the spatial and temporal evolution of stone forest ecosystem services from 2000 to 2020 and the trade-off synergy relationship were quantitatively analyzed. The results showed that: (1) the value of ecosystem services continued to increase from 2.047 billion in 2000 to 2.182 billion in 2020, with an increase rate of 6.60%; the spatial distribution pattern of ecosystem services was relatively stable; the high-grade areas mainly distributed in water areas and hilly and mountainous areas with high vegetation coverage, and the low-grade areas concentrated in areas with relatively concentrated construction land and serious karst rocky desertification; (2) the ecosystem service value sensitivity index of each land use type was less than 1, indicating that the stone forest ecosystem service value was inelastic to the revised ecological service value coefficient, and the research results were credible; (3) during the study period, the synergy relationship was the dominant relationship between stone

收稿日期: 2021-12-14

修回日期: 2021-12-31

资助项目: 国家自然科学基金项目“亚热带高原岩溶区陆地植被—湖泊湿地间的水文协同效应观测研究”(41761105)

第一作者: 陈相标(1997—), 男, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事生态系统服务功能研究。E-mail: cxb6271@163.com

通信作者: 丁文荣(1979—), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究工作。E-mail: dingwenrong@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

forest ecosystem services, with a synergy rate of 68.60%; the trade-off relationship mainly existed in the relationships between food production, maintenance of nutrient circulation and other subsystems, with a trade-off rate of 29.75%; (4) quantitatively, the four types of ecosystem services all had significant spatial positive autocorrelation, and spatially, the trade-offs and synergy between different ecosystem service pairs were significantly heterogeneous. These research results can provide a reference for Shilin to optimize the spatial pattern of the land and provide a reference for ecological protection and restoration.

Keywords: ecosystem services; temporal and spatial evolution; trade-off and synergy; spatial autocorrelation; Shilin karst areas

生态系统服务(Ecosystem Services, ES)是人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益^[1-2],包括有形或无形的物质产品^[3],主要分为供给服务、调节服务、文化服务和支持服务4种类型^[4]。不同生态系统服务在动态变化过程中存在着密切且复杂的相互关系^[5],表现为此消彼长的权衡(tradeoffs)关系或相互增益的协同(synergies)关系^[6-7]。正确认知生态系统服务权衡与协同关系的表现类型、尺度效应、时空演变特征^[8],对促进区域多种生态系统服务总体效益最优、实现区域社会经济协调发展与生态环境保护的“双赢”具有重要意义^[9-10]。喀斯特岩溶环境是具有特殊地貌和水文地质特征的系统,被认为是地球上最脆弱的自然生态系统之一^[11]。喀斯特岩溶区约占全球陆地面积的15%^[12],全球近16.5%的人口生活在喀斯特地区^[13],随着人口数量的增长以及社会经济的快速发展,人类对生态系统服务的需求日益加剧,致使全球许多地区面临严重的生态失衡^[14]。因此,探明喀斯特岩溶区生态系统服务的时空演变特征,厘清多种服务功能的相互关系,对统筹区域“经济—社会—生态—民生”全面、协调和可持续发展具有重要意义。

近年来,不同空间尺度的生态系统服务及其权衡—协同关系研究已经成为地理学、生态学以及生态经济学等多学科的研究热点^[15],喀斯特岩溶区生态系统服务的研究也逐渐受到学术界的广泛关注,并深入开展了系列研究^[16-17]。如Chen Ran等^[18]利用InVEST模型,分析了西南喀斯特地区水土保持、产水量和净初级生产力(NPP)的时空变化特征,并探讨了生态系统服务及其影响因素的权衡与协同关系;WANG Xiaofeng等^[19]运用InVEST, RUSLE和CASA模型,探究了中国西南喀斯特地区退耕还林工程对产水量、土壤保持和NPP这3种生态系统服务权衡与协同关系的影响;Yichao Tian等^[20]使用SWAT和CASA模型,探讨了贵州典型喀斯特地区石板塘流域NPP、产水量和产沙量的权衡与协同关系;韩会庆等^[21]利用GIS和相关分析法,从空间粒度分析了贵州喀斯特山区淡水生态系统服务权衡与协

同关系的粒度效应;高江波等^[22]运用均方根偏差法与地理探测器,分析了三岔河流域喀斯特地区的水源涵养、植被固碳与土壤侵蚀的权衡关系。可见,目前对于喀斯特岩溶区生态系统服务的研究大多选用生态模型(InVEST, RUSLE, CASA模型等)评估方法,所选择的生态服务指标有限,对局地小尺度的研究不足,多种生态系统服务功能相互关系的空间可视化表达相对薄弱。

石林喀斯特岩溶区作为中国喀斯特的标型景观,是多种驱动因素耦合作用的结果^[23]。由于山区人类活动的干扰和自然环境的双重驱动,该区面临着石漠化加剧、水资源利用率低、土层薄、贫困等诸多难题,严重限制喀斯特山区的经济发展与生态文明建设。目前,对于该区生态系统服务时空分异特征及权衡协同关系鲜有研究,这在一定程度上阻碍该区的生态治理和经济发展的全面转型。因此,本文以石林喀斯特岩溶区为研究对象,基于修正后的当量因子和土地利用遥感解译数据,应用生态系统服务价值估算模型测算石林生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)及时空变化特征,并使用生态敏感性分析法检验生态系统服务价值的可靠性,然后使用相关性分析探讨该区生态系统服务权衡与协同关系,最后通过空间自相关模型探讨生态系统服务权衡与协同关系的空间特征,以期为该区生态系统服务管理优化、增进民生福祉提供决策参考。

1 研究区概况

石林彝族自治县位于昆明市东南部(24°30′—25°03′N, 103°10′—104°40′E),县域面积1 719 km²,为滇中高原典型的喀斯特岩溶地貌区,全县2/3的面积属喀斯特地貌区,也是滇中石漠化最为严重的区域,中度以上石漠化面积占总面积的28.75%^[24]。该区属北亚热带低纬高原山地季风气候,多年平均气温16.3℃,年均降雨量939.5 mm,地带性植被为半湿润常绿阔叶林。石林境内居住着汉族、彝族、苗族等20多个民族,2020年11月,全县常住人口为240 827人,生产

总值 117.07 亿元。由于受特殊的地质、地貌、气候、水文和土壤等多要素的综合影响,加之人类活动的助推,导致该区的生态系统结构遭到了较大破坏,生态系统服务功能失衡,石漠化日趋严重。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

本文所选用的 3 期(2000-02-12, 2010-02-07, 2020-01-18)Landsat TM/OLI 土地利用遥感影像数据均来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/home>),空间分辨率为 30 m×30 m,云量分别为 0.02%,0.02%和 0.03%。借助 ENVI 5.3 软件对遥感影像进行辐射定标、大气校正和裁剪等预处理,并依据国家标准《土地利用现状分类》(GB/T2010—2017)及研究区土地利用解译的可操作性,采用支持向量机(Support Vector Machine,SVM)法将研究区的土地利用划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类,结合野外考察样点和 Google Earth 高分辨率历史影像随机选取验证样本进行混淆矩阵验证,结果显示 3 期遥感影像分类的 Kappa 系数分别为 0.953 1,0.934 2,0.908 4,分类精度能满足研究需要。粮食播种面积和产量数据来源于《云南统计年鉴》和《中国统计年鉴》,全国粮食平均出售价格及居民消费价格指数(Consumer Price Index,CPI)数据分别来源于《全国农产品成本收益资料汇编》和《昆明市统计年鉴》。

2.2.1 生态系统服务价值评估模型 本文基于 Costanza 等^[2]提出的全球生态系统服务价值估算模型,以谢高地等^[25]修订的全国陆地生态系统服务价值单量因子表为基础,由于生态系统服务具有空间异质性和时间动态性^[7],因此以研究区农田为基准^[26]对生态系统服务价值单量进行修正,使其测算结果更具区域特征。2000—2020 年石林彝族自治县与全国

的单位面积粮食平均产量分别为 4 644.71 kg/hm², 5 043.12 kg/hm²,得到研究区粮食平均产量当量因子修订系数为 0.921。从《全国农产品成本收益资料汇编(2000—2020)》中获取研究区平均粮食出售价格为 1.81 元/kg。参考已有研究^[27],1 个标准单量因子的生态系统服务价值量为单位面积上农田每年所产粮食市场价值的 1/7。计算公式为:

$$VC=\frac{1}{7}\times P\times \frac{1}{n}\sum_{i=1}^n w_i \tag{1}$$

式中:VC 表示 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(元/hm²);P 为粮食平均价格(元/kg);w 为研究区粮食平均产量(kg/hm²);n 为年份数。

为消除物价变动及通货膨胀对粮食价格的影响,进一步提高测算精度,引入居民消费指数^[28-29]对基于粮食的平均产量和平均价格所求得的 1 个标准单量因子的生态系统服务价值量进行修正。修正公式为:

$$a_i=CPI/100 \tag{2}$$

$$\frac{a_1}{a_0}\times \frac{a_2}{a_1}\times \frac{a_3}{a_2}\times \cdots \times \frac{a_n}{a_{n-1}}=\frac{a_n}{a_0} \tag{3}$$

$$VC'=VC\times \frac{a_n}{a_0}\times f \tag{4}$$

式中:CPI 为居民消费指数;a_i 为去除单位 CPI, $\frac{a_1}{a_0}$ 为

第一期环比 CPI, $\frac{a_n}{a_0}$ 为现期同比定基 CPI;f 代表研究区粮食平均产量当量因子修订系数。

通过上述分析,计算得出石林 1 个标准当量因子的经济价值量为 1 126.01 元/hm²。建设用地的单位面积生态服务价值单量参考邓元杰等^[30]和高振斌等^[29]的研究确定。结合谢高地等修订的“中国陆地生态系统单位面积生态系统服务价值当量表”计算得出石林喀斯特岩溶区各土地利用类型的生态系统服务价值系数(表 1)。

表 1 石林岩溶区各类土地生态系统服务价值系数

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1249.87	326.54	427.88	900.81	315.28	0.00
	原材料生产	281.50	743.17	630.57	258.98	337.80	0.00
	水资源供给	−1475.07	382.84	349.06	9334.62	−4177.50	0.00
调节服务	气体调节	1002.15	2443.44	2218.24	867.03	0.00	22.52
	气候调节	529.22	7319.07	5866.51	2578.56	0.00	0.00
	净化环境	157.64	2173.20	1430.03	6249.36	−2769.98	112.60
	水文调节	1689.02	5337.29	4301.36	115123.26	−6024.15	33.78
支持服务	土壤保持	585.53	2983.93	2702.42	1047.19	22.52	22.52
	维持养分循环	180.16	225.20	202.68	78.82	0.00	0.00
	食物多样性	191.42	2713.68	2454.70	2871.33	382.84	22.52
文化服务	美学景观	90.08	1193.57	1080.97	2128.16	1351.21	11.26
总计		4481.52	25841.93	21664.43	141438.12	−10561.97	225.20

石林喀斯特岩溶区生态系统服务价值的计算方法^[10]:

$$ESV = \sum (S_k \times VC'_{ik}) \quad (5)$$

式中:ESV 为生态系统服务价值(元); S_k 为 k 类土地利用类型的面积(hm^2); VC'_{ik} 为修正后 k 种地类生态系统服务价值系数(元/ hm^2)。

2.2.2 生态敏感性分析 为确定生态系统服务价值测算是否准确,引入经济学中弹性系数进行敏感性指数(Coefficient of Sensitivity, CS)分析,验证生态系统服务价值系数是否符合研究区。计算公式如下^[26]:

$$CS = \left| \frac{(ESV_b - ESV_a) / ESV_a}{(VC_{bl} - VC_{al}) / VC_{al}} \right| \quad (6)$$

式中:CS 代表敏感性指数; ESV_a 和 ESV_b 分别表示初始的及调整后的生态系统服务价值; VC_{al} 和 VC_{bl} 表示初始的和调整后($VC'_i \pm 50\%$)的生态系统服务价值系数; l 为土地利用类型。当 $CS > 1$ 时,表示 ESV 对 VC 富有弹性;当 $CS < 1$ 时,表示 ESV 对 VC'_i 缺乏弹性,研究结果可信。

2.2.3 相关分析 该方法可以定量研究两个变量的线性相关关系,其数字的大小表征变量相关性的强弱。若计算结果为正值,则表明两类生态系统服务功能具有协同关系,反之则为权衡关系。计算公式如下^[31]:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (7)$$

式中: R_{xy} 为相关系数; x_i, y_i 为 x, y 的第 i 类生态系统服务价值; \bar{x}, \bar{y} 分别为 x, y 的平均值; n 为样本数。

2.2.4 双变量空间自相关模型 空间相关分析可对空间相关联的模式进行度量 and 检验,能够检测空间数据的异质性或趋同性,包括全局空间自相关(Global Moran's I)和局部空间自相关(Local Moran's I)。

(1) 全局空间自相关。该方法可以用来分析研究区内所有研究单元中各生态系统服务功能的整体关联水平、显著性及空间分布特征。Moran's I 的取值范围为 $[-1, 1]$,若 $I > 0$,表明各生态系统服务功能在空间分布上具有正相关性,且存在“高高”或“低低”的聚集现象;若 $I = 0$,表示空间不相关,格网单元空间随机分布;若 $I < 0$,表明各生态服务功能存在空间负相关,表现为“高低”或“低高”的邻近现象。计算公式为^[32]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (y_i - \bar{y}) \cdot (y_j - \bar{y})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij}) \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

式中: I 为全局自相关莫兰指数; y_i, y_j 分别表示第 i 和第 j 个空间格网单元的 ESV 值; \bar{y} 为评价格网单元 ESV 的平均值; w_{ij} 是基于空间格网邻接关系建立的权重矩阵; n 是空间单元的格网数。

(2) 局部空间自相关。此方法可以检验局部区域各生态系统服务功能的空间关联性和空间异质性,结合双变量 LISA(Local Indicators of Spatial Association)分布图来表征研究区各生态服务功能的相关关系。计算公式如下^[33]:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} \times (x_j - \bar{x})}{\sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / n} \quad (9)$$

式中: I_i 表示局部空间自相关莫兰指数; x_i, x_j 分别为第 i, j 个空间单元的 ESV 值; \bar{x} 表示格网 ESV 的平均值; w_{ij}, n 的含义同公式(8)相同。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务价值时空变化

3.1.1 生态系统服务时间变化 根据公式(5)求得石林 2000—2020 年各土地利用类型生态服务价值和单项生态系统服务价值(图 1 和表 2)。2000 年、2010 年、2020 年石林生态系统服务总价值分别为 20.47 亿元、20.58 亿元和 21.82 亿元,呈持续增加的趋势,20 年间共增长了 1.35 亿元,增幅为 6.60%,表明石林生态环境整体趋于改善。从各类用地的生态系统服务价值看,林地是研究区 ESV 的主要贡献者,3 个时期的生态服务价值均占总价值的 61%以上,其次为耕地,未利用地对 ESV 的贡献最低,均不足 1%。近 20 年以来,林地、草地和未利用地的 ESV 呈持续增长态势,整个研究时段内共增长了 2.05 亿元,表明石林退耕还林还草政策的施行以及石漠化的治理对生态系统服务功能的改善具有重要的促进作用;耕地、建设用地面积的变化则导致 ESV 呈持续减少趋势,20 年间共减少了 1.22 亿元,主要是由于新型城镇化的深入推进,加速了耕地的占用,建设用地的增加又进一步加剧了生态系统服务功能的退化,地方应该科学划定永久基本农田红线和城镇开发边界,确保耕地保有量和城镇的有序发展;水域对 ESV 的贡献呈先减少后增加的态势。

从单项生态系统服务类型看,水文调节、气候调节、气体调节和土壤保持功能在 3 个时期均占到了石林生态系统服务总价值的 75%以上,食物生产功能的 ESV 随耕地的减少呈持续减少的趋势,减幅为 7.88%;原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、生物多

样性和美学景观均呈稳步增加的态势,其中美学景观价值增幅最大(20.78%),其次是气候调节(11.92%),净化环境的价值增幅最小(1.53%);水资源供给和水文调节所提供的ESV在2000—2010年,呈减少趋势,减幅分别为0.68%和7.65%,2010—2020年有所增加,增幅分别为4.08%和12.66%,石林是典型的喀斯特面积广布区,独特的喀斯特二元空间水文特征,导致地表蓄水保水能力弱,加之石林山区耕地面积广,农业生产需水量大,导致水资源供给和水文调节功能较弱,但随着退耕还林还草政策的实施以及水库的修建,后期生态系统服务功能有所增加。

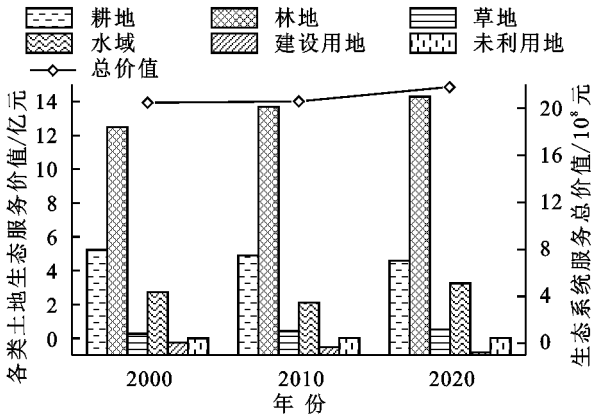


图1 2000—2020年各土地利用类型生态系统服务价值

表2 2000—2020年石林喀斯特岩溶区单项生态系统服务价值

生态系统 服务价值	2000年		2010年		2020年		平均变化率/%		
	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	ESV/亿元	比例/%	2000—2010年	2010—2020年	2000—2020年
食物生产	1.65	8.06	1.57	7.63	1.52	6.97	−4.85	−3.18	−7.88
原材料生产	0.71	3.47	0.73	3.55	0.75	3.44	2.82	2.74	5.63
水资源供给	−1.46	−7.13	−1.47	−7.14	−1.41	−6.46	0.68	−4.08	−3.42
气体调节	2.40	11.72	2.44	11.86	2.45	11.23	1.67	0.41	2.08
气候调节	4.28	20.91	4.61	22.40	4.79	21.95	7.71	3.90	11.92
净化环境	1.31	6.40	1.32	6.41	1.33	6.10	0.76	0.76	1.53
水文调节	6.67	32.58	6.16	29.93	6.94	31.81	−7.65	12.66	4.05
土壤保持	2.18	10.65	2.29	11.13	2.35	10.77	5.05	2.62	7.80
维持养分循环	0.33	1.61	0.32	1.55	0.32	1.47	−3.03	−0.31	−3.03
生物多样性	1.63	7.96	1.76	8.55	1.85	8.48	7.98	5.11	13.50
美学景观	0.77	3.76	0.85	4.13	0.93	4.26	10.39	9.41	20.78

3.1.2 生态系统服务价值空间变化 为了从精细化和可视化的角度测算石林喀斯特岩溶区ESV的空间演化特征,选择格网尺度作为本文的研究单元。综合考虑研究区面积,以及最小可塑性格网单元对测算结果的尺度效应,参考相关格网构建研究^[34],拟定以500 m×500 m的格网将研究区划分成7 030个基本单元。应用ArcGIS 10.2对3期格网数据进行处理计算,并结合自然断点法(Natural Jeks)和ESV的高低值将其划分为:低、较低、中、较高和高5个等级^[30],最终得到2000年、2010

年、2020年石林喀斯特岩溶区ESV空间分布格局(图2)。由图2可知,石林ESV等级的空间分布基本格局较为稳定,高等级区主要分布在湖泊和水库区;较高等级区主要集中分布在九蟠山、老圭山和牛肩头山等植被覆盖较高的丘陵山地以及长湖和月湖等湖泊水库周围;较低等级区与耕地分布较为一致,分布范围最广;低等级区主要集中分布在各县城镇和乡村聚集区,随着城镇化的深入推进,低等级区的空间分布范围与城镇扩展趋于一致。

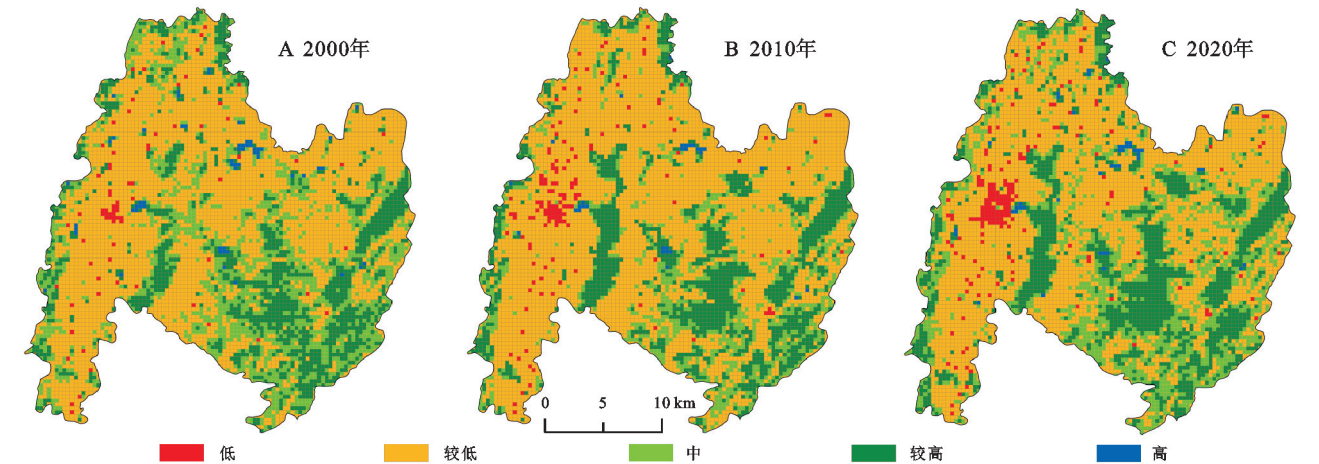


图2 2000—2020年石林喀斯特岩溶区生态系统服务价值空间分布格局

3.2 生态服务价值敏感性分析

根据公式(6),通过上下调整各土地利用的生态系统服务价值系数,计算出石林 ESV 敏感性指数(表 3)。各时期不同土地利用类型的 ESV 敏感性指数均小于 1,由高到低分别为林地、耕地、水域、建设用地、草地、未利用地。研究时段内林地的敏感性指数最高,其范围为 0.611 0~0.666 1,即当林地的价值系数增加 10%时,总 ESV 增加 6.110%~6.661%,建设用地、草地和未利用地的敏感性指数均小于 0.1。因此本研究采用的当量因子修正的价值系数比较可靠,符合研究区的实际情况,研究结果比较可信。

表 3 生态系统服务价值敏感性指数

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
2000 年	0.2554	0.6110	0.0132	0.1332	0.0129	0.0001
2010 年	0.2372	0.6661	0.0198	0.1024	0.0257	0.0002
2020 年	0.2102	0.6563	0.0234	0.1485	0.0386	0.0002

3.3 生态系统服务权衡协同关系

3.3.1 生态系统服务相关性分析 根据公式(7),利用 IBM SPSS Statistics 24 软件对各项子系统的

ESV 进行相关性分析,得到石林单项生态系统服务功能的相关系数(表 4)。研究区 11 种生态系统服务类型组成 121 组值,其中 38 组值为负相关,83 组值为正相关,在 0.01,0.05 水平上显著相关的各有 4 组。权衡关系占 31.40%,协同关系占 68.60%,表明协同关系是研究期间石林生态系统服务的主导关系。各子系统中食物生产和维持养分循环贡献了研究区总权衡关系的 94.74%。在供给服务中,食物生产与原材料、水资源供给均呈负相关,原材料生产与水资源供给正相关性较弱;调节服务中,除气体调节与水文调节功能呈较弱的负相关外,其余子系统均呈正相关,气体调节与气候调节的相关性高达 0.975;支持服务中,各子系统的相关性较强,维持养分循环与土壤保持和食物多样性负相关关系较强;文化服务中,美学景观除与食物生产和维持养分循环为权衡关系外,与其他单项服务功能均表现为相互增益的协同关系,其中,除与水文调节和水资源供给的协同关系相对较弱外,与其他子系统服务均有较强的协同关系。

表 4 2000—2020 年石林喀斯特岩溶区生态系统服务相关关系

生态系统 服务类型	供给服务			调节服务				支持服务			文化服务
	食物生产	原材料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	进化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	食物多样性	美学景观
食物生产	1.000	-0.997	-0.699	-0.954	-0.997	-0.917	-0.264	-0.994	0.963	-0.999 **	-0.996
原材料生产	-0.997	1.000	0.640	0.975	0.999 * *	0.882	0.187	0.999 *	-0.938	0.996	0.985
水资源供给	-0.699	0.640	1.000	0.452	0.640	0.927	0.874	0.613	-0.867	0.704	0.762
气体调节	-0.954	0.975	0.452	1.000	0.975	0.754	-0.038	0.982	-0.837	0.952	0.922
气候调节	-0.997	0.999 * *	0.640	0.975	1.000	0.882	0.187	0.999 *	-0.938	0.996	0.985
净化环境	-0.917	0.882	0.927	0.754	0.882	1.000	0.628	0.865	-0.991	0.919	0.949
水文调节	-0.264	0.187	0.874	-0.038	0.187	0.628	1.000	0.153	-0.516	0.271	0.351
土壤保持	-0.994	0.999 *	0.613	0.982	0.999 *	0.865	0.153	1.000	-0.925	0.993	0.979
维持养分循环	0.963	-0.938	-0.867	-0.837	-0.938	-0.991	-0.516	-0.925	1.000	-0.964	-0.983
食物多样性	-0.999 * *	0.996	0.704	0.952	0.996	0.919	0.271	0.993	-0.964	1.000	0.966
美学景观	-0.996	0.985	0.762	0.922	0.985	0.949	0.351	0.979	-0.983	0.996	1.000

注:(1) ** 表示两种生态服务在 0.01 水平上显著相关;(2) * 表示两种生态服务在 0.05 水平上显著相关。

3.3.2 生态系统服务权衡协同关系的空间表达 为进一步明晰石林不同生态系统服务功能在空间上的权衡协同关系及空间分布特征,在 500 m×500 m 的格网尺度单元基础上,结合公式(8,9)利用 GeoDa1.14 软件对单项生态系统服务进行空间自相关分析(表 5,表 6)。

由表 5 可知,2000—2020 年石林生态系统服务总值及各项生态系统服务功能的全局 Moran's I 指数均大于 0,*p* 值均小于 0.001,表明其在空间分布上存在明显的高低值聚集特征,且具有显著的空间正相关性,支持服务和文化服务功能的相关性呈持续增加趋势。在各生态系统服务对中(表 6),全局自相关指

数均为正,且通过了显著性检验,说明各生态系统服务对均存在显著的空间协同关系,在整个研究时段内,除支持—文化服务对的空间相关性呈持续增加外,其余 5 对均表现为先增加后降低的趋势。

引入局部自相关分析法进一步细化了石林不同生态系统服务在内部空间上权衡协同关系的分异特征。由图 3 可以看出,双变量空间自相关分析中,高高聚集、低低聚集表示协同关系,高低聚集、低高聚集表示权衡关系。结果显示,6 对生态系统服务的协同关系空间分布较为显著,高高聚集区主要分布在九蟠山、老圭山和牛肩头山等海拔相对较高的丘陵

山区,这些地区森林面积广,生态本底质量高;低低聚集区主要分布在耕地和建设用地区,供给—调节、供给—支持、供给—文化、调节—支持、调节—文化和支持—文化服务对的协同关系占总格网数的比例分别为39.39%,51.49%,48.89%,53.44%,51.02%和

53.87%。权衡关系中,高低聚集和低高聚集的空间分布较为分散,供给—支持和供给—文化服务存在权衡关系的地区数量最多,占总格网数的 7.27%,其次是调节—支持服务(5.32%),支持—文化服务最低仅占 2.29%。

表 5 石林喀斯特岩溶区 4 种生态系统服务双变量全局空间自相关

生态系统 服务类型	2000 年			2010 年			2020 年		
	Moran's I	Z	p	Moran's I	Z	p	Moran's I	Z	p
ESV 总值	0.4736	79.2058	<0.001	0.5843	94.9761	<0.001	0.5026	85.3385	<0.001
供给服务	0.4652	78.3402	<0.001	0.5823	92.6889	<0.001	0.4066	68.2987	<0.001
调节服务	0.4267	70.7383	<0.001	0.5356	86.7962	<0.001	0.4461	75.2368	<0.001
支持服务	0.6747	112.4701	<0.001	0.6904	112.9623	<0.001	0.7043	119.6559	<0.001
文化服务	0.6273	104.1273	<0.001	0.6503	107.5690	<0.001	0.6748	115.3058	<0.001

表 6 石林喀斯特岩溶区生态系统服务对双变量全局自相关

年份	供给—调节	供给—支持	供给—文化	调节—支持	调节—文化	支持—文化
2000 年	0.4371***	0.4176***	0.4453***	0.3551***	0.4018***	0.6328***
2010 年	0.5313***	0.5367***	0.4864***	0.5343***	0.5221***	0.6477***
2020 年	0.4001***	0.3404***	0.3206***	0.4284***	0.4317***	0.6719***

注:*** 表示通过 $p<0.001$ 的显著性水平检验。

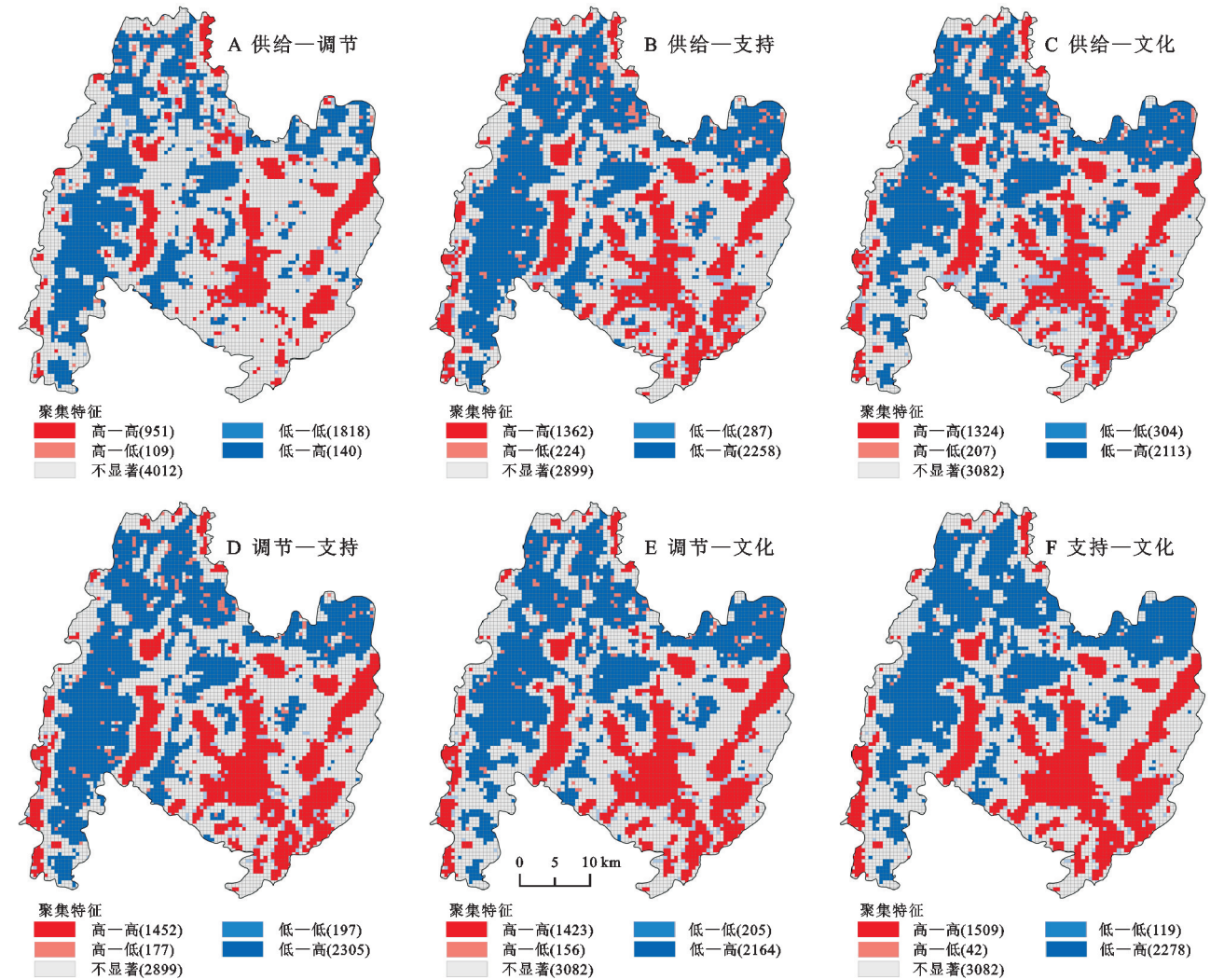


图 3 石林喀斯特岩溶区生态系统服务双变量局部空间自相关聚集分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究中,近20年以来,石林喀斯特岩溶区的生态系统服务价值整体呈上升的态势,此结果与秦瑶等^[17]对典型喀斯特区撒拉溪示范的研究基本一致,这主要得益于退耕还林还草工程的实施以及石漠化的综合治理^[35],林地、草地的面积分别增长了5 852.94 hm²,1 088.58 hm²,所对应的生态系统服务价值增长率分别为14.49%和89.53%。随着新型工业化和城镇化的深入推进,建设用地对耕地的占用日益加剧,整个研究时段内,耕地面积减少导致所提供的生态服务价值减少率达12.29%。因此,地方应该统筹优化生态空间、农业空间和城镇空间,科学划定生态保护红线、永久基本农田红线和城镇开发边界,加强石漠化治理和生态保护与修复。单项生态系统服务中,水资源供给服务为负值,主要是因为石林山区耕地面积广,农业生产需水量大,加之喀斯特地貌独特的二元空间水文特征,导致地表蓄水保水能力弱,但随着生态修复的开展以及水库的修建,水资源供给服务功能有所改善,这与贺祥^[36]、冯兆^[37]、韩增林^[38]等的研究结果基本一致,其他10项生态系统服务价值的变化情况与易武英等^[39]对贵州平塘县的研究结果相似,说明本文对石林生态系统服务的价值评估具有一定准确性。

权衡协同关系上,本文运用相关分析定量揭示石林生态系统服务的权衡协同关系,使用双变量空间自相关分析方法从空间上表征生态系统服务的权衡与协同关系,这两种方法虽然能够从数量和空间两个维度来表达生态系统服务的权衡与协同关系,但对于生态系统服务内部相互作用的机理和驱动机制仍无法探究,未来还需借助其他技术手段进行深入探讨。此外,本研究中所选用的生态系统服务功能主要是参考国内外大尺度的分类研究成果并结合石林的实际情况进行了修正,但由于生态系统服务复杂的时空异质性,其准确性仍需更加深入研究。

4.2 结论

本文以典型喀斯特岩溶区石林为研究对象,基于修订后的当量因子表和土地利用解译数据,从格网尺度分析了2000—2020年石林生态系统服务的时空演变特征,并结合相关系数和双变量空间自相关等方法从数量和空间两个维度探明了石林生态系统服务功能的权衡与协调关系。结果表明:

(1) 2000年、2010年和2020年石林喀斯特岩溶

区生态系统服务价值分别为20.47亿元、20.58亿元和21.82亿元,整体呈增加的趋势,增幅为6.60%,林地、草地的增加导致ESV增加了2.05亿元,耕地面积的较少和建设用地的增加,导致ESV减少了1.22亿元。调节服务对ESV的贡献最大,空间分布上,受土地覆被影响,ESV的空间分布格局较为稳定,高等级区主要分布在水域地区以及植被覆盖较高的丘陵山区,低等级区集中分布在建设用地相对集中和岩溶石漠化严重的区域。

(2) 2000—2020年石林不同土地利用类型的ESV敏感性指数范围为0.000 1~0.666 1,均小于1,表明ESV对修订后的价值系数缺乏弹性,所修正的价值系数符合研究区的实际情况,研究结果可信。

(3) 近20年以来,石林单项生态系统服务功能以协同关系为主导,协同关系占68.60%。子系统中食物生产和维持养分循环与其他单项服务功能多表现为权衡关系,占总权衡关系的94.74%,在调节服务和文化服务子系统中,协同关系为主导关系,供给服务中权衡关系占比最大。

(4) 4种生态系统服务类型在空间分布上具有较强的空间正相关性,支持服务和文化服务的空间集聚程度呈增加的趋势。空间上,不同生态系统服务对权衡与协同关系异质性显著,高高聚集区主要分布在水域区和森林覆盖度较高的丘陵山区,低低聚集区主要分布在耕地和建设用相对集中的地区。

参考文献:

- [1] Daily G. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems[M]. Washington D C: 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] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [4] Millennium ecosystem assessment (MA). Ecosystems and human well-being [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [5] 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.
- [6] 王鹏涛,张立伟,李英杰,等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].地理学报,2017,72(11):2064-2078.
- [7] 彭建,胡晓旭,赵明月,等.生态系统服务权衡研究进展:从认知到决策[J].地理学报,2017,72(6):960-973.

- [8] 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.
- [9] 戴尔阜,王晓莉,朱建佳,等.生态系统服务权衡:方法、模型与研究框架[J].地理研究,2016,35(6):1005-1016.
- [10] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等.三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡—协同关系[J].地理研究,2020,39(1):64-78.
- [11] Brinkmann R, Parise M. Karst environments; problems, management, human impacts, and sustainability. An introduction to the special issue [J]. J. Cave Karst Stud., 2012,74(2):135-136.
- [12] 宋贤威,高扬,温学发,等.中国喀斯特关键带岩石风化碳汇评估及其生态服务功能[J].地理学报,2016,71(11):1926-1938.
- [13] Canedoli C, Ficetola G F, Corengia D, et al. Integrating landscape ecology and the assessment of ecosystem services in the study of karst areas[J]. Landscape Ecology, 2021:1-19.
- [14] Goldscheider N, Chen Z, Auler A S, et al. Global distribution of carbonate rocks and karst water resources [J]. Hydrogeology Journal, 2020,28(5):1661-1677.
- [15] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].地理学报,2018,73(5):868-879.
- [16] 韩会庆,苏志华.喀斯特生态系统服务研究进展与展望[J].中国岩溶,2017,36(3):352-358.
- [17] 秦瑶,熊康宁,陈起伟,等.喀斯特地区生态系统服务变化及权衡协同关系[J].环境科学与技术,2021,44(9):228-236.
- [18] Chen Ran, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Trade-offs and synergies of ecosystem services in southwestern China [J]. Environmental Engineering Science, 2020,37(10):669-678.
- [19] Wang Xiaofeng, Zhang Xinrong, Feng Xiaoming, et al. Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in Karst Area of China Driven by Grain-for-Green Program [J]. Chinese Geographical Science, 2020,30(1):101-114.
- [20] Tian Yichao, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical Karst watershed, SW China [J]. Science of the Total Environment, 2016,566:1297-1308.
- [21] 韩会庆,杨建强,陈思盈,等.喀斯特山区淡水生态系统服务权衡—协同关系的粒度效应[J].济南大学学报:自然科学版,2022(1):1-11
- [22] 高江波,左丽媛,王欢.喀斯特峰丛洼地生态系统服务空间权衡度及其分异特征[J].生态学报,2019,39(21):7829-7839.
- [23] 李玉辉,丁智强,吴晓月.基于 Strahler 面积—高程分析的云南石林县域喀斯特地貌演化的量化研究[J].地理学报,2018,73(5):973-985.
- [24] 丁文荣,李玉辉.岩溶区植被覆盖变化与气候波动的相关性:以云南石林为例[J].水资源与水工程学报,2019,30(5):40-45,51.
- [25] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
- [26] 杨强强,徐光来,李爱娟,等.青弋江流域生态系统服务评估与权衡研究[J].生态学报,2021,41(23):9315-9327.
- [27] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
- [28] 王航,秦奋,朱筠,等.土地利用及景观格局演变对生态系统服务价值的影响[J].生态学报,2017,37(4):1286-1296.
- [29] 高振斌,王小莉,苏婧,等.基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J].生态与农村环境学报,2018,34(6):563-570.
- [30] 邓元杰,侯孟阳,谢怡凡,等.退耕还林还草工程对陕北地区生态系统服务价值时空演变的影响[J].生态学报,2020,40(18):6597-6612.
- [31] 兰紫橙,贾岚,程煜.闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系[J].生态学报,2020,40(12):3909-3920.
- [32] 马勇,凌旋,童昀.格网尺度下典型旅游城市生态服务价值估算和时空分异特征:以三亚为例[J].生态学报,2021,41(19):7542-7554.
- [33] 李龙,吴大放,王芳,等.中国快速城市化区域生态系统服务价值预测及权衡研究:以佛山市为例[J].生态学报,2020,40(24):9023-9036.
- [34] 郭椿阳,高尚,周伯燕,等.基于格网的伏牛山区土地利用变化对生态服务价值影响研究[J].生态学报,2019,39(10):3482-3493.
- [35] 李坤,邢小艺,李逸伦,等.石林风景区不同石漠化人工修复方式对木本植物群落组成及种群生态位的影响[J].生态学报,2020,40(13):4641-4650.
- [36] 贺祥,姚尧.基于生态系统服务供需对喀斯特山区生态风险分析[J].水土保持研究,2020,27(5):202-212,220.
- [37] 冯兆,彭建,吴健生.基于生态系统服务簇的深圳市生态系统服务时空演变轨迹研究[J].生态学报,2020,40(8):2545-2554.
- [38] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近 30 年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].生态学报,2020,40(8):2555-2566.
- [39] 易武英,张建利,代丽华,等.典型喀斯特峰丛洼地生态系统生态服务功能价值评估:以贵州平塘县为例[J].湖南农业科学,2017(5):56-59.