

引用格式: 苗培培, 赵筱青, 普军伟, 李思楠, 王茜, 谭琨. 喀斯特山区生态系统服务权衡/协同时空分异研究——以云南广南县为例[J]. 山地学报, 2023, 41(1): 103-114.

MIAO Peipei, ZHAO Xiaqing, PU Junwei, LI Sinan, WANG Qian, TAN Kun. Spatiotemporal differentiation of ecosystem service synergy/trade-offs in the mountainous karst areas: A case study of Guangnan county, Yunnan, China [J]. Mountain Research, 2023, 41(1): 103-114.

# 喀斯特山区生态系统服务权衡/协同时空分异研究 ——以云南广南县为例

苗培培, 赵筱青\*, 普军伟, 李思楠, 王茜, 谭琨

(云南大学 地球科学学院, 昆明 650000)

**摘要:** 人类活动影响喀斯特山区生态系统服务功能。喀斯特山区生态系统服务权衡/协同作用及时空差异特征分析,是指导山区生态恢复及保护的重要依据。当前针对中国喀斯特山区的相关研究多以生态系统服务权衡/协同关系的时间变化为主,较少对权衡/协同关系变化的空间异质性及空间可视化进行研究,难以全面揭示各类服务间的复杂关系。本研究以云南喀斯特山区广南县为例,采用模型评估及相关分析等方法对六种生态系统服务进行评估,分析其时空变化、空间异质性和权衡/协同变化关系。结果表明:(1)2000—2018年,年均食物供给量和文化价值量呈逐年增加趋势,年均产水量、土壤保持量和固碳价值量呈先减少后增加趋势,年均生境质量呈逐年下降趋势。(2)空间上,食物供给量、文化价值量和产水量呈中部和中南部增加较多的特征,而土壤保持量与其呈大致相反的趋势,固碳价值量和生境质量空间上呈东部增加较多的趋势。(3)自相关关系上,各生态系统服务全局 Moran's I 指数大小为:固碳>食物供给>土壤保持>产水>文化>生境支持服务,生境支持服务在空间上呈离散化状态,而其他服务均呈集聚分布特征,且空间分异以不显著区和低-低区集群分布为主。(4)权衡/协同关系的时间变化格局上,生境支持服务-固碳释氧相关性为高度正相关,协同性系数最高,而产水-土壤保持相关性为中度负相关,权衡性系数最低;空间变化格局上,食物供给-产水、文化-固碳间空间分布均为协同关系,产水-土壤保持、固碳-产水均为权衡关系。空间格局整体以协同关系为主,权衡区与协同区空间分布有所差异。生态系统服务相关性及其权衡/协同分析,有助于对研究区自然资源进行宏观调控,缓解经济发展与生态保护的矛盾。研究结果丰富了喀斯特山区生态系统恢复这一领域研究内容,有利于促进广南县资源环境的协调发展。

**关键词:** 生态系统服务;权衡/协同;时空分异;空间异质性;中国喀斯特山区

**中图分类号:** K901

**文献标志码:** A

生态系统服务功能之间存在着物质、能量和信息  
的流动与转化,形成了多种形式的交互作用,通常

表现为同增同减的协同和一增一减的权衡关  
系<sup>[1-2]</sup>。生态系统服务权衡/协同关系与人类在自

**收稿日期** (Received date): 2021-11-12; **改回日期** (Accepted date): 2023-02-01

**基金项目** (Foundation item): 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目(2018FY001-017);国家自然科学基金(42061052、41361020);云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200);云南省教育厅科学研究基金(2018Y001)。[Yunnan Provincial Department of Science and Technology-Yunnan University Joint Fund Key Project (2018FY001-017); National Natural Science Foundation of China (42061052, 41361020); Yunnan University Graduate Innovative Talents Training Project (C176230200); Yunnan Provincial Department of Education Scientific Research Fund Project (2018Y001)]

**作者简介** (Biography): 苗培培(1991-),男,河南永城人,硕士研究生,主要研究方向:土地利用/覆被变化的生态环境效应与景观生态安全格局。[MIAO Peipei (1991-), male, born in Yongcheng, Henan province, M. Sc. candidate, research on ecological environment effect of land use/cover change and landscape ecological security pattern] E-mail:1029907902@qq.com

**\*通讯作者** (Corresponding author): 赵筱青(1969-),女,博士,教授,主要研究方向:土地利用变化及生态环境效应。[ZHAO Xiaqing (1969-), female, Ph. D., professor, research on ecological environment effect and landscape ecological security pattern of land use/cover change] E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

然环境中的活动方式密切相关。人类活动影响并改变生态系统服务功能的变化趋势与存在形式,而生态系统服务功能的变化又会对人类的生产和生活产生影响<sup>[3]</sup>。基于此,对生态系统服务功能的权衡/协同作用及时空差异特征分析、探析各类服务间复杂关系、深入研究生态系统服务变化机制,是强化区域自然资源宏观调控、有效指导生态恢复及保护的重要举措<sup>[4]</sup>。

国内外学者对生态系统服务权衡/协同开展了一系列研究<sup>[5-6]</sup>。研究内容主要包括研究进展、生态系统服务时空分异及其驱动因素等<sup>[7-9]</sup>。研究方法主要为相关性分析、R 软件函数计算分析和模型(ESTD)分析方法<sup>[10-11]</sup>。目前对生态系统服务权衡/协同关系的研究以时间变化为主,较少对权衡/协同关系空间变化、空间异质性及空间可视化的研究<sup>[12-15]</sup>。中国喀斯特山区资源禀赋差,人类活动影响喀斯特山区生态系统服务功能,在一定程度上影响了喀斯特山区生态系统服务权衡/协同作用<sup>[16]</sup>。针对云南喀斯特山区的研究表明,该地区产水服务和土壤保持服务为协同作用,产水服务和 NPP 为权衡作用<sup>[17-18]</sup>。然而,上述研究仅分析了生态系统服务权衡/协同的时间变化,对空间上的分异研究涉及较少<sup>[19-20]</sup>,在方法上主要以定性或简单线性分析为主,缺少对权衡/协同关系变化的空间制图模拟,局限于宏观层面相关关系的整体把握,难以揭示各类服务间的复杂关系。

云南省文山州广南县<sup>[21]</sup>喀斯特岩溶地貌突出、地形复杂、沟谷纵横以及石漠化较为严重,是国家级重点生态功能区,具有重要的生态战略地位<sup>[22-23]</sup>。在有限区域资源条件下,科学把握多重生态服务类型间的相互影响关系是喀斯特山区面临难题<sup>[24-25]</sup>。本研究选取典型喀斯特山区广南县,采用模型评估及相关分析等方法对六种生态系统服务进行评估,从时间和空间两个角度探究其权衡/协同关系,突破了目前研究多基于单一时间点的局限,进一步探索了喀斯特山区生态系统服务权衡/协同关系,对其空间分异进行了可视化表达,可以为喀斯特山区生态系统恢复提供理论支撑。

## 1 研究区概况及研究方法

### 1.1 研究区概况

云南省文山州广南县(104°31'~105°39'E, 23°29'~24°28'N)位于中国云南省东南部低纬高原,处于滇南及桂西过渡地带(图 1)。地势西北高、东南低,喀斯特地貌分布较广。区域内主要为红壤和石灰岩土。植被种类较为丰富,栎类所占比重较大,占林木面积的 55.4%;其次是松科,云南松占 33.3%,还有杉、樟、桉、思茅松、柏、渠栗、竹等。石漠化面积为 1840.53 km<sup>2</sup>,占全县总面积的 23.81%,是中国 200 个主要石漠化县之一。属于中亚热带高原季风气候,年平均日照 1875.7 h,年平均

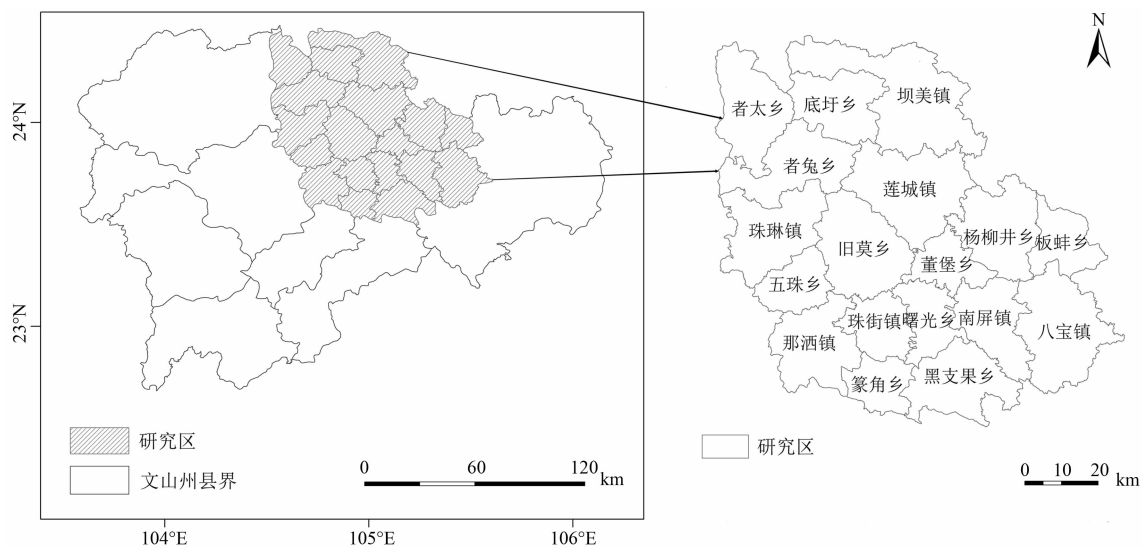


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location of research area

气温 16.7 ℃, 年均降水量 1056.5 mm。2020 年全县总人口 84.56 万人。2020 年广南县经济三产比重为 29.4:28.1:42.5, 旅游综合收入多年平均增加 42.8%<sup>[21]</sup>。区域内生态环境脆弱, 面临着水土流失、水资源短缺和生境质量降低等问题, 极大减弱了生态系统服务功能。

1.2 研究方法

针对当前对喀斯特地区生态系统文化服务研究较少的特点, 本研究采用模型评估及相关分析方法对六种生态系统服务进行评估<sup>[26-29]</sup>, 分析其时空变化、空间异质性和权衡/协同变化关系。

1.2.1 生态系统服务空间自相关

衡量全局自相关指标一般为 Moran's I 指数, 当 Moran's I 大于 0 时, 表明存在正的空间自相关, 即生态系统服务空间趋于集聚, 且越接近 1, 正相关性就越强, 即空间聚集性越强; 当 Moran's I 小于 0 时, 表明存在负的空间自相关, 即生态系统服务空间趋于分散, 且越接近 -1, 负相关性就越明显, 即越趋于空间分散<sup>[30]</sup>。利用 GeoDa 软件, 得出研究区三期各生态系统服务 Moran's I 散点图。衡量局部空间自相关指标一般为 LISA。其中, LISA 聚集图中不显著区表示局部区域生态系统服务属性值和相邻区域的生态系统服务属性值无关联<sup>[31]</sup>。

1.2.2 相关性分析

选取 200 m × 200 m、100 m × 100 m、50 m × 50 m 和 30 m × 30 m 栅格大小进行分析, 发现 100 m × 100 m 栅格大小既能保证较好的输出效果, 也能其保证运行速度, 其空间信息表达结果较为合理。在 Spss20.0 软件中, 利用 Spearman 分析区域整体生态系统服务的权衡/协同关系。当这几种服务同增同减为正相关, 则为协同<sup>[32]</sup>; 当某种类型的生态系统服务减少而导致的另一种生态系统服务增加

为负相关, 则为权衡<sup>[33]</sup>。

1.2.3 空间可视化

利用 ArcGIS 软件计算生态系统服务变化指数, 进而计算变化指数的比值, 根据比值识别权衡/协同类型及区域分布<sup>[9]</sup>, 公式如下:

$$W = \frac{ESCI_x}{ESCI_y} \tag{1}$$

$$ESCI_x = (ES_{CURx} - ES_{HISx}) / ES_{HISx} \tag{2}$$

$$ESCI_y = (ES_{CURy} - ES_{HISy}) / ES_{HISy} \tag{3}$$

式中,  $W$  为两种生态系统服务变化指数的比值;  $ESCI_x$  和  $ESCI_y$  分别为  $X$  和  $Y$  种生态系统服务变化指数;  $ES_{CURx}$  和  $ES_{CURy}$  分别为  $X$  和  $Y$  种初始状态的生态系统服务评估值;  $ES_{HISx}$  和  $ES_{HISy}$  分别为  $X$  和  $Y$  最后状态生态系统服务评估值。

2 数据来源与处理

论文数据具体信息详见表 1, 主要包括土地利用数据、Landsat5 影像(2000、2010)、Sentinel-II 影像(2018)、DEM 高程数据、2000—2018 年广南县气象数据、MODIS13Q1 产品数据、土壤数据和统计年鉴等。

3 结果分析

3.1 生态系统服务时空分布格局及空间自相关分析

3.1.1 生态系统服务时间变化特征

2000—2018 年, 年均土壤保持服务增加量最多, 年均固碳价值服务减少量最多, 年均生境支持服务变化最小。年均土壤保持量值呈现先减少后增加的趋势, 增加 129.67 t/hm<sup>2</sup>; 年均固碳价值量呈现先减少后增加的趋势, 减少 84.33 元/(hm<sup>2</sup> · a);

表 1 数据来源及预处理  
Tab. 1 Data sources and pre-processing

数据类型	使用目的	数据来源	处理方法
气象监测数据	提取温度等数据	广南县气象局	IDW 插值法
广南县 Landsat5 影像(2000、2010)、Sentinel-II 影像(2018)	解译地类图等数据	地理空间数据云	大气校正、预处理及遥感解译目视解译
NDVI 数据	提取坡度等数据	美国国家航空航天局	ArcGIS 软件处理
广南县旅游数据	景点旅游收入	广南县统计局和旅游局	ArcGIS 软件处理

年均生境质量指数呈现逐年减少的趋势,减少 0.07;文化服务价值量呈现逐渐增加的趋势,增加 4.61 元/cell;食物供给量呈现逐年增加的趋势,增加 1.59 t/hm<sup>2</sup>;产水量呈现出整体稳定基础上略有增加的趋势,增加 17.03 mm (表 2)。

3.1.2 生态系统服务空间变化特征

2000—2018 年,土壤保持量空间上整体呈增加趋势,而减少区域分布在东南部,主要为板蚌乡和八宝镇;固碳价值量空间上增加区域分布在东部和西南部,主要为那洒镇、篆角乡和八宝镇。减少区域分布在西北部、中部和中南部,主要为者兔乡、底圩乡、莲城镇和珠街镇;生境质量空间上增加区域分布在东部和东南部,主要为杨柳井乡北部、八宝镇和南屏镇。减少区域分布在西部和西北部,主要为珠琳镇、者太乡和者兔乡;文化服务价值量空间上整体为增加趋势,增加区域分布在中部,主要为莲城镇、珠街镇、坝美镇和八宝镇,减少区域分布在西部和西北部,主要为珠琳镇和者太乡;食物供给量空间上整体为升高趋势,中部、中南部和东南部增加较多,主要为莲城镇、珠街镇、曙光乡和八宝镇;减少区域分布

在西部和东部,主要为珠琳镇、杨柳井乡和板蚌乡;产水量空间上增加较多的区域分布北部、中部和中南部,主要为者太乡东部、莲城镇和珠街镇,减少区域分布在西北部、南部及东南部,主要为者兔乡西南部、黑支果乡、篆角乡、南屏镇南部和八宝镇南部。

3.1.3 生态系统服务空间分异特征

(1)食物供给服务空间分异特征

全局自相关中,三期食物供给服务 Moran's I 指数值分别为 0.540、0.511 和 0.629,表明食物供给在空间分布上呈集聚分布特征。从局部自相关看,三期食物供给空间分异特征以不显著区集群分布为主。其中,2010 年较 2000 年低-低区域范围减少,减少范围主要分布在东北部;2018 年较 2010 年低-低区域范围不断减少,减少区域主要分布在中部和南部(图 2)。

(2)产水量服务空间分异特征

全局自相关中,三期产水量服务 Moran's I 指数值分别为 0.267、0.218 和 0.262,表明产水量服务在空间分布上呈集聚分布特征。从局部自相关看,

表 2 各生态系统服务时间变化特征  
Tab. 2 Temporal characteristics of ecosystem services

时间	生态系统服务类型					
	食物供给服务/ (t · hm <sup>-2</sup> )	产水量服务/ mm	土壤保持服务/ (t · hm <sup>-2</sup> )	固碳价值服务/ (元/(hm <sup>2</sup> · a))	生境支持 服务	文化价值服务/ (元/cell)
2000 年	1.79	763.68	821.92	1578.71	0.77	4.88
2010 年	2.62	685.94	764.31	1398.62	0.72	5.84
2018 年	3.38	780.71	951.59	1494.38	0.70	9.49
2000—2010 年	0.83	-77.74	-57.61	-180.09	-0.05	0.94
2010—2018 年	0.76	94.77	187.28	95.76	-0.02	3.65
年均变化量	1.59	17.03	129.67	-84.33	-0.07	4.61

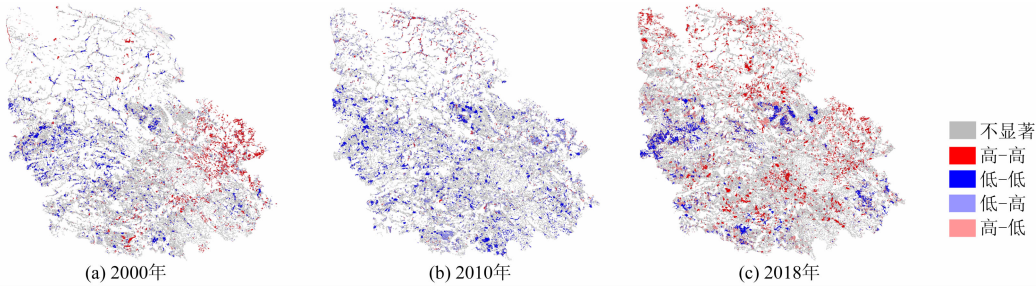


图 2 食物供给服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 2 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of food supply services



三期产水量空间分异特征主要以不显著区集群分布为主(图3)。其中,2010年较2000年的高-高区域范围增加,增加范围主要分布在北部;2018年较2010年的高-高区域范围增加,增加范围主要分布在北部。

### (3) 土壤保持服务空间分异特征

全局自相关中,三期土壤保持服务 Moran's I 指数值分别为 0.367、0.378 和 0.379,表明土壤保持服务在空间分布上呈集聚分布现象。从局部自相关看,三期土壤保持空间分异特征以低-低区集群分布为主(图4)。其中,2010年较2000年的低-低区域范围增加,增加范围主要分布在东南部;2018年较2010年的高-高区域范围增加,增加范围主要分布在西南部。

### (4) 固碳服务空间分异特征

全局自相关中,三期固碳服务 Moran's I 指数值分别为 0.733、0.710 和 0.603,表明固碳服务在空间分布上呈集群分布现象。从局部自相关看,三期固碳服务空间分异特征以低-低区和高-高区集群分布为主(图5)。其中,2010年较2000年低-低区域范围有所增加,增加范围主要分布在中部和中南部;2018年较2010年低-低区域范围减少,减少范围主要分布在中南部。

### (5) 生境支持服务空间分异特征

全局自相关中,三期生境支持服务 Moran's I 指数值分别为 -0.108、-0.085 和 -0.040,表明生境支持服务空间分布上呈离散化状态。从局部自相关看,三期生境支持服务空间分异特征以高-低区

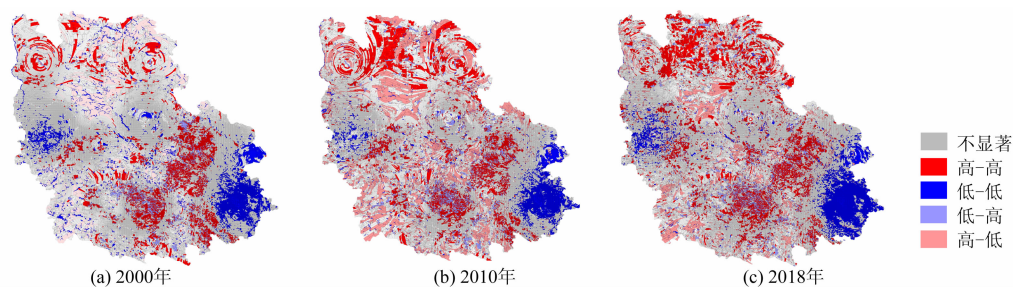


图3 产水服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 3 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of water production services

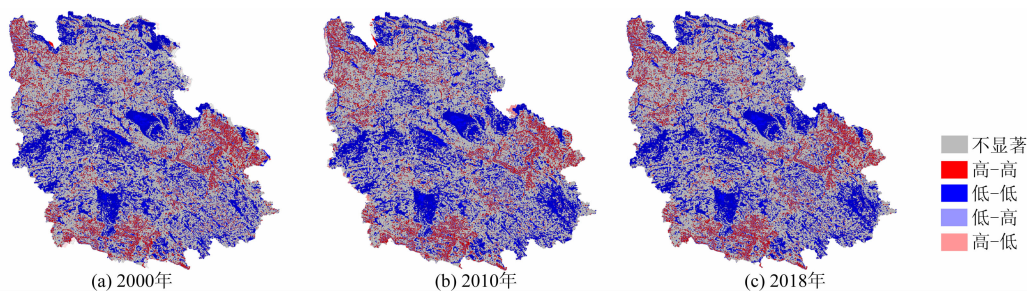


图4 土壤保持服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 4 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of soil conservation services

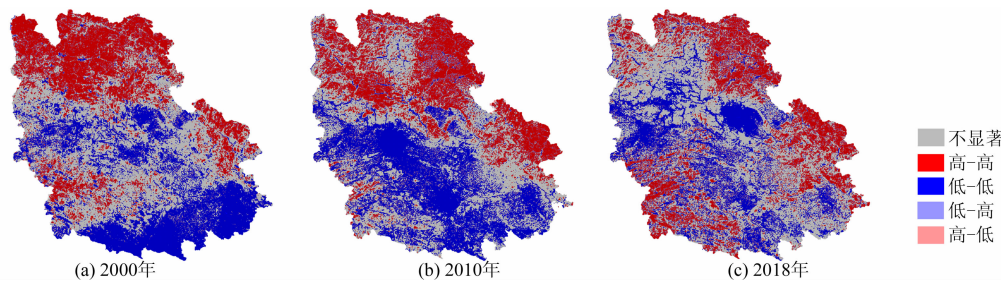


图5 固碳服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 5 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of carbon sequestration services

集群分布为主(图 6)。2010 年较 2000 年高-低区域范围减少,减少范围主要分布在研究区中部;2018 年较 2010 年高-低区域范围减少,减少范围主要分布在研究区西部和北部。

#### (6) 文化服务空间分异特征

全局自相关中,三期文化服务 Moran's I 指数值分别为 0.188、0.249 和 0.260,表明文化服务在空间分布上呈集群分布现象。从局部自相关看,三期文化服务空间分异特征以低-低区集群分布为主(图 7)。其中,2010 年较 2000 年的低-低区域范围有所减少,减少区域主要分布在研究区中部和中南部;2018 年较 2010 年的低-低区域范围有所增加,主要分布在研究区中部区域。

### 3.2 各生态系统服务变化的权衡/协同特征

#### 3.2.1 生态系统服务时间变化的权衡/协同分析

当两项生态系统服务呈现绝对的同向增长和同向减少时,二者的相关系数为 1,即绝对的协同关系;当变化趋势始终保持相反时,二者相关系数为 -1,即绝对的权衡关系,而数据自身的波动则是影响相关性强弱的主要因素。根据各生态系统服务间相关性,且所有相关系数均通过  $P = 0.01$  或  $P = 0.05$  的显著性检验,得出 2000—2018 年生境支持服务与文化服务、产水量与生境支持服务、

产水量与土壤保持服务等生态系统服务间呈负相关性,为权衡关系;而食物供给与产水量、固碳服务与土壤保持服务、生境支持服务与固碳服务等生态系统服务间呈正相关性,为协同关系。其中生境支持服务与固碳服务相关性系数为 0.819,为高度正相关,生境支持服务与固碳释氧的相关性最高,即生境支持服务的增加会导致固碳释氧的增加,这主要是由于林地、草地等植被覆盖率较高的区域生境支持服务与固碳释氧量一般较高,在一定程度上加强了生境支持服务与固碳释氧的正向关系。产水量与土壤保持服务相关性系数为 -0.619,为中度负相关,权衡性系数最低,即产水量与土壤保持呈较强的权衡关系,这主要是由于产水量低的林地土壤保持量高,产水量高的建设用地土壤保持量低。因此,产水量与土壤保持呈较强的负向关系(表 3)。

#### 3.2.2 生态系统服务空间变化的权衡/协同分析

2000—2018 年研究区生境支持服务与固碳服务、土壤保持服务与文化服务、固碳服务与文化服务分布以协同关系为主,仅旧莫乡生境支持服务与固碳服务之间为权衡关系;莲城镇土壤保持服务与文化之间为权衡关系;珠琳镇固碳服务与文化服务为权衡关系(图 8)。研究区产水量与土壤保持服务、

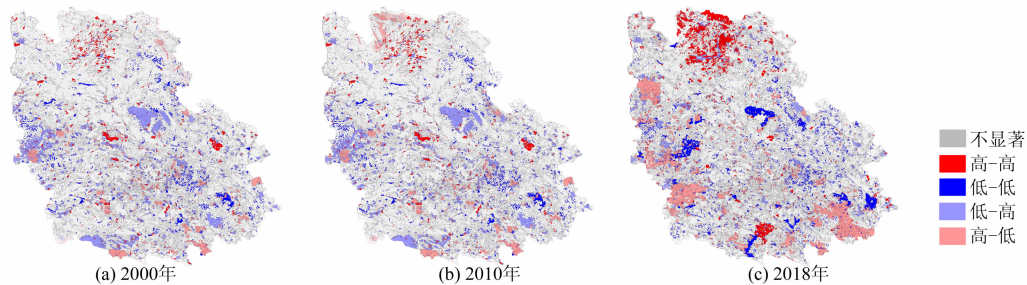


图 6 生境支持服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 6 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of habitat support services

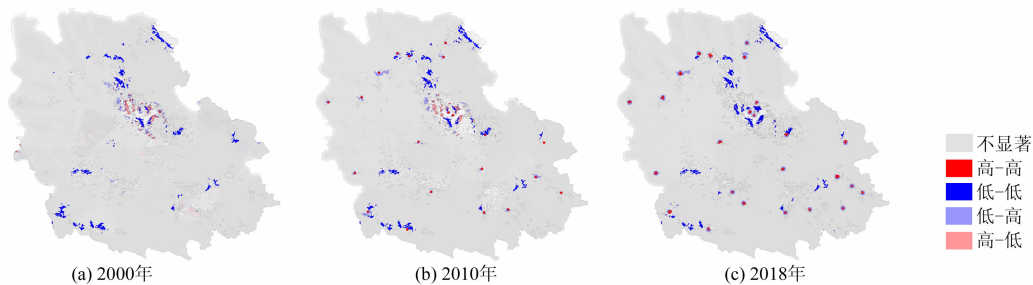


图 7 文化服务局部空间自相关聚集特征图

Fig. 7 Local spatial autocorrelation aggregation characteristics of cultural services

表 3 广南县 2000—2018 年生态系统服务间的权衡协同关系

Tab. 3 Trade-off synergistic relationships among ecosystem services in Guangnan county from 2000 to 2018

服务类型	食物供给	固碳释氧	土壤保持	产水	生境支持服务	文化服务
食物供给	1					
固碳释氧	-0.056 **	1				
土壤保持	-0.064 **	0.683 **	1			
产水	0.185 **	-0.006 **	-0.619 **	1		
生境支持服务	-0.083 **	0.819 **	0.003 **	-0.583 **	1	
文化服务	-0.084 **	0.025 **	-0.013	-0.308 *	-0.374 **	1

注：\* 表示置信度(双测)为 0.05 时显著相关；\*\* 表示置信度(双测)为 0.01 时显著相关。

固碳服务与产水量、生境支持服务与文化、产水量与生境支持服务、产水量与文化和食物供给与文化等空间分布以权衡关系为主,仅莲城镇、旧莫乡北部、珠琳镇、五珠乡和八宝镇南部产水量与土壤保持服务之间为协同关系;坝美镇、底圩乡和者太乡固碳服务与产水量之间为协同关系;珠琳镇和八宝镇生境支持服务与文化支持之间为协同关系;坝美镇、者太乡和八宝镇产水量与生境支持服务之间为协同关系;八宝镇和珠琳镇产水量与文化为协同关系;珠琳镇和莲城镇食物供给与文化为协同关系(图 8)。

从权衡/协同关系空间分布格局来看,各生态系统服务间以协同关系为主,不同生态系统服务间权衡/协同区存在空间分异特征,固碳服务、文化服务和食物供给服务与其他服务主要呈显著协同关系,主要分布在西南部,研究区内权衡区域分布较为破碎。产水量与其他类型服务主要呈显著权衡关系,主要分布在北部,研究区内协同区域分布较为分散。

4 讨论

4.1 各生态系统服务核算

本研究综合考虑喀斯特山区自然环境和社会经济的特殊性,明确主要的生态系统服务,将供给、调节、支持和文化服务纳入研究中,对喀斯特生态系统服务之间的权衡/协同关系进行了探讨。在研究时序及核算方法上,研究对三期六种生态系统服务进行评估,时间上具有纵向可比性,并对结果予以空间可视化表达,分析三期生态系统服务权衡/协同关

系。如仅针对单一时间点进行研究,会导致无法对相互关系的空间分布格局进行深入分析;各生态系统服务核算中,三期年平均食物供给量保持着逐年增加的趋势,与广南县统计年鉴中相对应年份较为吻合,主要由于科技以及管理水平的进步,西南地区食物供给服务减少较为集中,该区主要为喀斯特石漠化生态治理区;三期年平均土壤保持量与已有研究<sup>[5]</sup>在贵州、广西两省的喀斯特山区核算结果略有差异,同样都是喀斯特区域,因自然环境的空间异质性,总体上结果有一定的差异,全区土壤保持量基本呈升高趋势,主要为退耕还林、坡改梯等生态修复工程起到一定作用;三期年平均产水量较前人研究<sup>[5]</sup>在贵州、广西两省喀斯特山区研究中的平均产水量微减少,原因是产水量与区域内降水、温度、蒸散发量等密切相关。从研究区产水量变化的空间分布来看,西北区域为产水量升高较为明显的地区,主要原因为其他用地类型向建设用地转移从而使得产水量显著升高。本研究生境质量值空间分布较高的区域,研究区实际为林地大面积分布,生态环境较好,研究结果与实际情况较为符合,18 年间区域人类活动对生境质量造成了较大的影响。西北部建设用地的增多,西部耕地面积的增加、地类破碎化,为该区域生境质量下降的重要因素。因此,认为研究区采用模型评估其生态系统服务是合理的。

4.2 各生态系统服务权衡/协同研究

在生态系统服务权衡/协同关系研究上,区域整体上食物供给与生境支持服务呈权衡关系,与产水量呈协同关系,这是由于食物供给服务仅存在于耕地中,而耕地的土壤保持量较林地低,从而使得整体



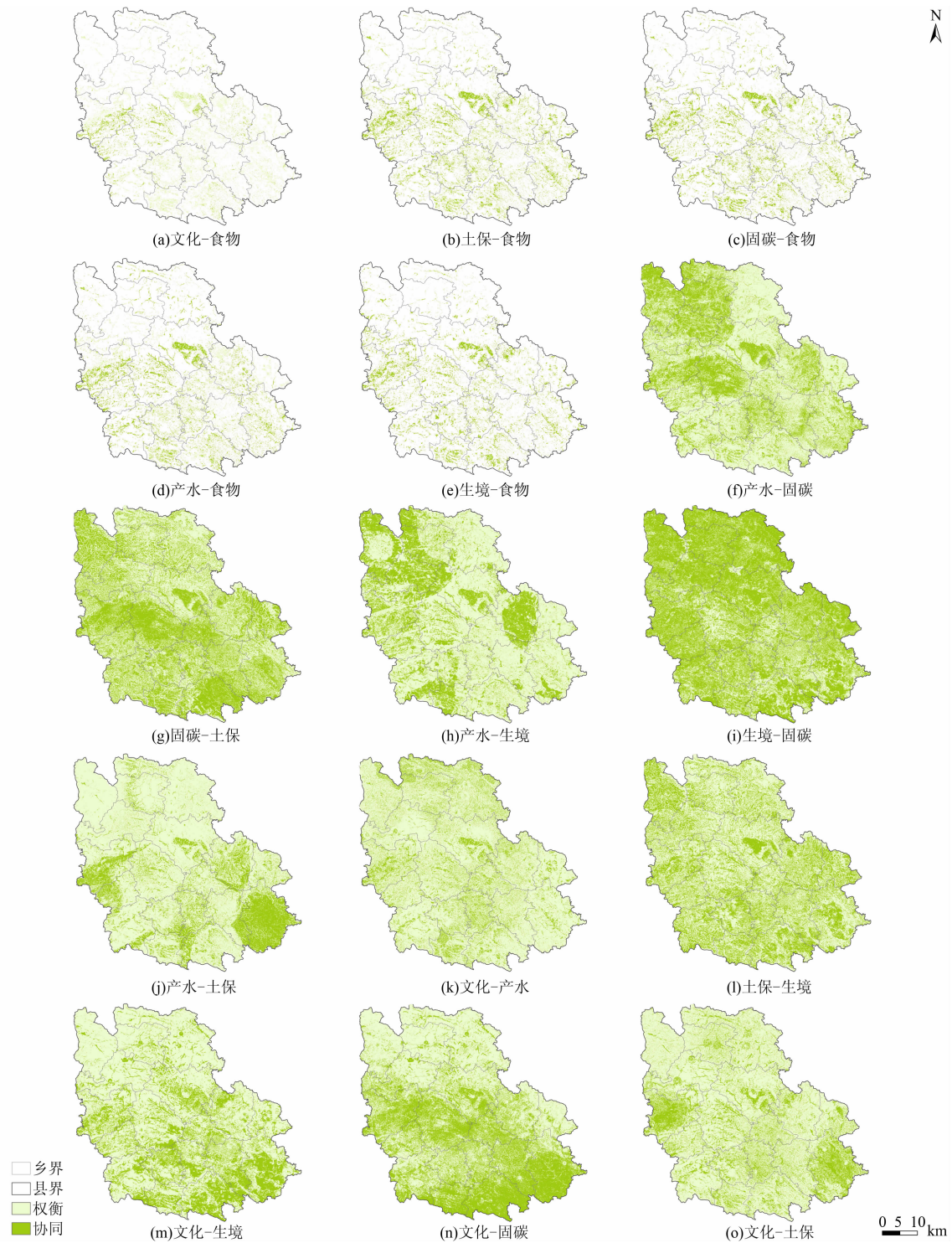


图 8 2000—2018 年生态系统服务权衡/协同空间特征

Fig. 8 Spatial characteristics of ecosystem service trade-offs/synergies from 2000 to 2018

上食物供给与土壤保持呈权衡关系,这与三江并流区<sup>[29]</sup>和喀斯特山区<sup>[31]</sup>的研究结论相吻合。因此,空间分析法可以有效进行各生态系统服务权衡/协同的空间可视化。本研究从像元尺度分析了生态系统服务变化及其权衡和协同关系的空间分异特征,

但对其分异特征的尺度效应和转化机制没有进行进一步分析。因此,今后的研究需注重对不同尺度下权衡协同关系的形成机制进行分析,应注重探讨不同区域的生态系统服务在权衡/协同模式存在差异性研究。



## 5 结论

研究对广南县三期六种生态系统服务进行评估,分析其时空变化特征、空间异质性及空间权衡/协同关系。主要结论如下:

(1)时间上年均土壤保持量、固碳价值量和产水量呈现先减少后增加趋势年均生境质量呈现逐年减少趋势;年均食物供给量和文化服务价值量呈现逐年增加趋势。

(2)空间上,食物供给量和文化服务价值量空间上呈现中部、中南部和东南部增加较多的趋势;产水量呈现北部、中部和中南部增加较多而土壤保持量与产水量呈现大致相反的趋势;固碳价值量和生境质量空间上呈现东部增加较多的趋势。

(3)自相关关系上,各生态系统服务全局 Moran's I 指数大小依次为:固碳 > 食物供给 > 土壤保持 > 产水 > 文化 > 生境支持服务。各生态系统服务空间分异特征主要以不显著和低-低区集群分布为主,空间上主要分布在西部、南部和东南部地区。

(4)权衡/协同关系时空变化格局上,2000—2018年广南县食物供给-产水、生境支持服务-土壤保持和文化-固碳等空间分布为协同关系,产水-土壤保持、固碳-产水和食物供给-文化之间为权衡关系;各生态系统服务间以协同关系为主,权衡区与协同区的空间分布有所差异,食物供给、文化、固碳、土保和生境与其他类型服务主要呈显著协同关系,分布在西南部,权衡区域分布较为破碎。而产水与其他类型服务主要呈显著权衡关系,分布在北部,协同区域分布较为分散。明确生态系统服务权衡/协同关系的空间分布形式,是深入研究喀斯特地区生态系统服务变化机制的基础,有助于研究区对自然资源进行宏观调控,对广南县资源环境协调发展战略的制定具有一定的参考价值。

## 参考文献 (References)

- [1] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Nature*, 1997, **387**: 253–260.
- [2] FU Bojie, WANG Shuai, SU Changhong, et al. Linking ecosystem processes and ecosystem services [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, **5**(1): 4–10. DOI: 10.1016/j.cosust.2012.12.002
- [3] 齐菲, 李彦鑫, 高会, 等. “三生”用地结构变化对生态系统服务和农户生计的影响——以太行山区洞阳坡小流域为例[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, **30**(7): 1101–1112. [QI Fei, LI Yanxin, GAO Hui, et al. The impact of “Production-Living-Ecological” land structure change on ecosystem services and farmers' livelihood: A case study of the Dongyangpo watershed in Taihang Mountain area [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(7): 1101–1112] DOI: 10.12357/cjea.20220055.
- [4] ZHANG Biao, SHI Yunting, WANG Shuang. A review on the driving mechanisms of ecosystem services [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, **13**(1): 68–79. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2022.01.008
- [5] LANG Yanqing, SONG Wei. Trade-off analysis of ecosystem services in a mountainous karst area, China [J]. *Water*, 2018, **10**: 300. DOI: 10.3390/w10030300
- [6] FANG Lin, LIU Yanxiao, LI Canfeng, et al. Spatiotemporal characteristics and future scenario simulation of the trade-offs and synergies of mountain ecosystem services: A case study of the Dabie Mountains area, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2023, **33**(1): 144–160. DOI: 10.1007/s11769-023-1330-8
- [7] 胡秀芳, 赵军, 王蓓, 等. 黑河流域生态系统服务空间协同与权衡变化[J]. *生态学杂志*, 2022, **41**(3): 580–588. [HU Xiufang, ZHAO Jun, WANG Bei, et al. Changes of spatial synergies or trade-offs of ecosystem services in Heihe River Basin [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2022, **41**(3): 580–588] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202201.001
- [8] 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. [HAN Huiqing, SU Zhihua. Research progress and prospects of karst ecosystem services [J]. *Carsologica Sinica*, 2017, **36**(3): 352–358] DOI: 10.11932/karst20170309
- [9] 韩会庆. 贵州省生态系统服务变化及驱动机理研究[D]. 广州: 中山大学, 2016. [HAN Huiqing. Variation of ecosystem services and its driving mechanism in Guizhou province [D]. Chuangzhou: Sun Yat-sen University, 2016]
- [10] 王晓萌, 潘佩佩, 王晓旭, 等. 基于土地利用的河北省生态系统服务权衡/协同关系研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2021, **37**(1): 80–88. [WANG Xiaomeng, PAN Peipei, WANG Xiaoxu, et al. Research on ecosystem service trade-off/synergy relationship in Hebei province based on land use [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2021, **37**(1): 80–88] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2021.01.013
- [11] 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. [FU Bojie, YU Dandan. Trade-off analyses and synthetic integrated method of multiple ecosystem services [J]. *Resource Science*, 2016, **38**(1): 1–9] DOI: 10.18402/resci.2016.01.01
- [12] NIU Teng, YU Jiaxin, YUE Depeng, et al. The temporal and spatial evolution of ecosystem service synergy/trade-offs based on

- ecological units [J]. *Forests*, 2021, **12**: 992. DOI: 10.3390/f12080992
- [13] 张苗, 杨国庆, 王军邦, 等. 秦巴山区生态系统服务权衡-协同关系[J]. *山地学报*, 2022, **40**(1): 1–13. [ZHANG Miao, YANG Guoqing, WANG Junbang, et al. Trade-off synergy of ecosystem services in the Qinba mountainous area of China [J]. *Mountain Research*, 2022, **40**(1): 1–13] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000651
- [14] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构-功能-生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2016, **35**(3): 320–330. [HOU Wenjuan, GAO Jiangbo, PENG Tao, et al. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of southwest China based on a structure-function-habitat framework [J]. *Progress in Geography*, 2016, **35**(3): 320–330] DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.03.006
- [15] LANG Yanqing, SONG Wei. Trade-off analysis of ecosystem services in a mountainous karst area, China [J]. *Water*, 2018, **10**(3): 300.
- [16] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. *生态经济*, 2015, **31**(1): 23–30. [XIONG Kangning, CHI Yongkuan. The problems in southern China karst ecosystem and its countermeasures [J]. *Ecological Economy*, 2015, **31**(1): 23–30]
- [17] 李驭豪. 喀斯特地区土地利用变化下生态系统服务权衡/协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020. [LI Yuhao. Study on trade-off/synergy of ecosystem services respond to land use change in karst region [D]. Kunming: Yunnan University, 2020] DOI: 10.27456/d.cnki.gyndu.2020.001385
- [18] 李益敏, 李驭豪, 赵筱青, 等. 云南省文山市生态系统服务的权衡/协同关系[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, **31**(11): 2545–2555. [LI Yimin, LI Yuhao, ZHAO Xiaoqing, et al. Spatial and temporal patterns and interrelationships of ecosystem services in Wenshan city, Yunnan province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, **31**(11): 2545–2555] DOI: 10.11870/cjlyzyhj202211019
- [19] 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. [QIN Yao, XIONG Kangning, CHEN Qiwei, et al. Ecosystem service changes and trade-off synergistic relationships in karst areas [J]. *Environmental Science and Technology*, 2021, **44**(9): 228–236] DOI: 10.19672/j.cnki.1003–6504.0938.21.338
- [20] 赵筱青, 石小倩, 李驭豪, 等. 滇东南喀斯特山区生态系统服务时空格局及功能分区[J]. *地理学报*, 2022, **77**(3): 736–756. [ZHAO Xiaoqing, SHI Xiaoqian, LI Yuhao, et al. Spatial-temporal pattern and functional zoning of ecosystem services in the karst mountainous areas of southeastern Yunnan [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, **77**(3): 736–756] DOI: 10.11821/dlxb202203016
- [21] 广南县统计局. 广南县统计公报[N]. 广南县统计年鉴, 2017. [Guannan county Bureau of Statistics. Statistical bulletin of Guannan county [N]. *Guannan County Statistical Yearbook*, 2017]
- [22] 苗培培. 云南省喀斯特山区生态系统服务演变及人文驱动力研究[D]. 昆明: 云南大学, 2020. [MIAO Peipei. A study on ecosystem service evolution and human driving force in karst mountainous areas of Yunnan province [D]. Kunming: Yunnan University, 2020] DOI: 10.27456/d.cnki.gyndu.2020.001474
- [23] 苗培培, 赵祖军, 赵筱青, 等. 云南典型石漠化区生态系统服务权衡与协同研究[J]. *水土保持研究*, 2021, **28**(4): 366–374. [MIAO Peipei, ZHAO Zujun, ZHAO Xiaoqing, et al. Study on trade-off and cooperation of ecosystem service space in rocky desertification area of Yunnan province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, **28**(4): 366–374] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.04.039
- [24] 陈田田, 黄强, 王强. 基于地理探测器的喀斯特山区生态系统服务关系分异特征及驱动力解析——以贵州省为例[J]. *生态学报*, 2022, **42**(17): 6959–6972. [CHEN Tiantian, HUANG Qiang, WANG Qiang. Differentiation characteristics and driving factors of ecosystem services relationships in karst mountainous area based on geographic detector modeling: A case study of Guizhou province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, **42**(17): 6959–6972] DOI: 10.5846/stxb202109012470
- [25] MIAO Peipei, ZHAO Xiaoqing, PU Junwei, et al. Study on the evolution mechanism of ecosystem services in karst mountainous areas from the perspective of humanities [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, **19**: 13628. DOI: 10.3390/ijerph192013628
- [26] GROTE S M E. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso [J]. *Remote Sensing*, 1993, **14**(8): 1495–1515.
- [27] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例[J]. *应用生态学报*, 2020, **31**(4): 1278–1288. [GONG Jie, LIU Dongqing, GAO Bingli, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1278–1288] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202004.019
- [28] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(3): 413–424. [ZHU Wenquan, PAN Yaozhong, ZHANG Jinshui. Estimation of net primary productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2007, **31**(3): 413–424]
- [29] 林世伟. “三江并流”区生态系统服务空间权衡与协同关系研究[D]. 昆明: 云南大学, 2016. [LIN Shiwei. Spatial trade-offs and synergies among ecosystem services in the Three Parallel Rivers

- region [D]. Kunming: Yunnan University, 2016]
- [30] 王蓓. 基于 InVEST 模型的石羊河流域生态系统服务功能时空变化研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2017. [WANG Bei. Spatio-temporal changes of ecosystem services in Shiyang River Basin based on invest model [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2017]
- [31] 郎焱卿. 喀斯特山区生态服务功能的权衡研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017. [LANG Yanqing. Tradeoff analysis of ecosystem services in the karst mountainous area [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017]
- [32] 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-协同关系的空间粒度效应 [J]. 济南大学学报 (自然科学版), 2022, **36**(1): 45–55. [HAN Huiqing, YANG Jianqiang, CHEN Siying, et al. Spatial grain size effect of trade-off-synergy relationship between freshwater ecosystem services in karst mountains areas [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2022, **36**(1): 45–55] DOI: 10.13349/j.cnki.jdxbn.20210924.002
- [33] 汪仕美, 靳甜甜, 燕玲玲, 等. 子午岭区生态系统服务权衡与协同变化及其影响因素 [J]. 应用生态学报, 2022, **33**(11): 3087–3096. [WANG Shimei, JIN Tiantian, YAN Lingling, et al. Trade-off and synergy among ecosystem services and the influencing factors in the Ziwu ling region, northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(11): 3087–3096] DOI: 10.13287/j.1001–9332.202211.027

## Spatiotemporal Differentiation of Ecosystem Service Synergy/Trade-Offs in the Mountainous Karst Areas: A Case Study of Guangnan County, Yunnan, China

MIAO Peipei, ZHAO Xiaoqing<sup>\*</sup>, PU Junwei, LI Sinan, WANG Qian, TAN Kun

(School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650000, China)

**Abstract:** The disturbance of human activities in fragile ecosystems in karst mountainous areas affects and changes the local ecological service functions. The trade-offs/synergies of ecosystem services and their spatiotemporal differentiation can be used to guide ecological restoration and conservation in the mountainous karst areas. Most research on the mountainous karst areas focused on the temporal changes of the trade-off/synergistic relationships of ecosystem services, but less on the spatial heterogeneity and spatial visualization, making it difficult to fully reveal the complex relationships among various services. In this study, model assessment and correlation analysis were used to assess six ecosystem services in Guangnan county, a mountainous karst region in Yunnan of China, and then to analyze their spatiotemporal changes, spatial heterogeneity and trade-off/synergistic relationships. Results: (1) From 2000 to 2018, there had been a yearly increase in the average annual food supply and cultural value; the average annual water yield, soil conservation and carbon sequestration value decreased first and then increased; the average annual habitat quality decreased year by year. (2) Spatially, the food supply, cultural value and water yield increased more in the central and south-central parts of the county, whereas soil conservation had an opposite trend, and carbon sequestration value and habitat quality increased more in the east. (3) As to autocorrelation, the global Moran's I index of each ecosystem service was carbon sequestration > food supply > soil conservation > water yield > culture > habitat support services. The habitat support services were spatially discrete, whereas all other services were clustered, whose spatial differentiation were dominated by “insignificant” zones and “low-low” aggregation distribution. (4) In the temporal pattern of trade-off/synergistic relationships, the correlation between habitat support services and carbon sequestration and oxygen release was highly positive with the highest synergistic coefficient, while the correlation between water production and soil conservation was moderately negative with the



lowest trade-off coefficient; as to the spatial pattern, the spatial distribution of food supply-water production and culture-carbon sequestration were all synergistic relationships, while water yield-soil conservation and carbon sequestration-water yield were all trade-off relationships. The overall spatial pattern was governed by synergistic relationships, with differences in the spatial distribution of trade-off and synergistic areas. Our research achievement of ecosystem service correlation and trade-off/synergy can help to macro-regulate natural resources in the study area and eliminate the dilemma of economic development and ecological conservation. This research provides new insights into the discipline of karst mountain ecosystem restoration, and particularly help to directly manage the coordinated development of resources and environment in Guangnan county.

**Key words:** ecosystem services; trade-offs/synergies; spatial and temporal differentiation; spatial heterogeneity; the mountainous karst areas, China

(责任编辑 李嵘)