

云南省文山市生态系统服务的权衡/协同关系¹

李益敏¹ 李驭豪¹ 赵筱青^{1*} 普军伟² 王茜¹ 谭琨¹ 苗培培¹ 杨一铭¹

(1. 云南大学地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 云南 昆明 650500)

【摘要】: 以云南文山市为研究对象, 基于千年生态系统评估理论框架, 选取食物供给、植被净初级生产力、土壤保持、产水量四项生态系统服务, 采用 CASA 模型、InVEST 模型、RUSLE 模型及相关分析方法, 分析土地利用变化下不同生态系统服务之间的权衡/协同关系。结果表明: 2000 ~ 2017 年, 文山市林地和未利用地面积减少, 其他土地利用类型增加, 其中建设用地增加幅度最大; 文山市生态系统服务的年均值在 17 年内整体呈增加趋势, 年际变化有增有减; 产水量、食物供给之间为协同关系, 二者与植被净初级生产力和土壤保持均呈权衡关系, 植被净初级生产力和土壤保持间为协同关系; 空间分布上, 各类生态系统服务之间以协同关系为主, 权衡/协同关系的空间格局有所差异, 表现为文山市中心区域呈显著协同或显著权衡关系, 研究区其他区域零散分布。该研究结果可为区域优化土地利用格局, 制定更为合理的生态保护修复政策提供科学参考。

【关键词】: 土地利用; 生态系统服务; 权衡/协同; 喀斯特山区

【中图分类号】: X52 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2022)11-2545-11

【DOI】: 10. 11870 /cjlyzyyhj202211019

生态系统服务指通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接得到的生命支持产品和服务^[1,2]。2005 年, 千年生态系统评估(the Millennium Ecosystem Assessment, MA) 报告明确评估的 24 项生态系统服务中 15 项在下降, 约占 60%^[3]。Costanza 等^[4]的研究结果表明: 近年来土地利用方式的改变造成全球生态系统服务降低。生态系统服务的退化或消失, 对区域乃至全球的生态环境都会带来不可逆转的损害^[5,6]。由于生态系统本身的复杂性和人类对生态系统利用和干扰方式的多样性, 使得不同生态系统服务间存在复杂多样的动态交互, 这种交互通常表现为相互促进的协同和此消彼长的权衡关系^[7,8,9,10]。学者们的研究表明: 生态系统服务关系存在区域差异性, 生态系统服务在不同的研究区域所表现的权衡和协同关系不同^[12,13,14,38]。高艳丽等^[11]对汉江流域的土壤保持、碳储量、食物供给服务进行空间制图, 分析了三者之间的权衡/协同关系, 结果表明: 食物供给与土壤保持、碳储量在空间上以权衡关系为主, 碳储量与土壤保持以协同关系为主, 但存在空间异质性。聂名萱等^[12]、Yang 等^[6]、Watanabe 等^[13]、傅伯杰等^[14]、Ribeiro 等^[15]、潘竟虎等^[16]的研究也得出相同的结果, 即相同的生态系统服务在不同地区权衡/协同模式存在差异。如土壤保持与产水服务, 在鄱阳湖地区和青藏高原高寒区、鄂尔多斯市等较为干旱和寒冷地区主要为协同关系^[10,17,18,19], 但在呼包鄂榆地区和汉江上游呈现明显的权衡关系^[12,18], 这种差异可能是由于区域资源禀赋及社会经济水平的不同, 造成生态系统服务的

¹ **【收稿日期】**: 2021-06-22; **【修回日期】**: 2021-11-18

【基金项目】: 云南省科技厅—云南大学联合基金重点项目(2018FY001(—017)); 云南大学研究生创新人才培养项目(C176230200); 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0030)

【作者简介】: 李益敏(1965 ~), 女, 研究员, 主要研究方向为 3S 技术在山地资源环境中的应用。E-mail: Liyimin1965@163.com

* **通讯作者** E-mail: xqzhao@ynu.edu.cn

供给需求能力与相互作用关系不同^[20]。

喀斯特是我国重点生态功能区和重点脆弱生态区^[21], 文山市作为第一批被划入桂黔滇喀斯特石漠化防治国家重点生态功能区, 生态功能极为重要。喀斯特山区脆弱的生态环境加之人类的不合理开发利用, 导致石漠化严重、生态系统服务退化、生态安全问题日益突出, 成为近年研究热点, 重点关注土地利用变化背景下的生态系统服务^[22, 28, 29]、生态系统服务价值量估算和各项生态系统服务的时空变化规律^[26], 近年喀斯特地区的权衡与协同关系得到重视^[23, 24, 26, 27, 28, 29, 30]。学者们在喀斯特地区的研究结果表明生态系统服务权衡/协同关系具有区域差异性。如 Han 等^[29, 30]、高敏等^[31]研究表明土壤保持与产水量存在较好的协同关系, 产水量与碳储量之间协同关系; 而 Lang 等^[27]研究表明, 喀斯特地区产水量与土壤保持、碳储量之间为权衡关系。

Tian 等^[26]研究表明净初级生产力与水土保持之间为协同关系, 与产水量之间存在权衡关系, Wang 等^[32]研究结果植被净初级生产力和水土保持为权衡关系, 植被净初级生产力和产水量为协同关系。Han 等^[30]研究了喀斯特和非喀斯特地区生态系统服务之间的权衡/协同关系, 结果表明, 喀斯特地区水分产量和土壤保持率的变化率高于非喀斯特地区。耕地、林地和气候变化特征是影响生态系统服务关系的主要因素。

生态系统服务协同与权衡研究方法中, 美国斯坦福大学开发的 InVEST 模型, 已在全球多个国家生态系统服务研究中得到广泛应用。InVEST^[35, 37]模型具有“精细化、量化、空间化”的特征, 且模型处于不断更新和完善阶段, 发展更为成熟^[19], 被广泛应用于自然资产和生态系统服务价值评估中, 并在美国的北卡罗莱纳州^[29]、乔治亚州^[30]、缅因州^[31]、印第安纳州^[32, 36]、英国^[33]以及国内^[28, 34]取得较好的评估结果。

定量评估喀斯特山区生态系统服务权衡/协同关系的时空演变特征和规律以及土地利用变化对不同服务的影响, 是制定更为合理的生态保护政策, 优化土地利用格局的基础, 对喀斯特地区进行石漠化综合治理以及提升区域生态系统服务具有重要意义。论文以云南省文山市为典型研究区, 评估 2000~2017 年生态服务功能, 分析土地利用/覆被变化以及各项生态服务功能的时空变化, 厘清各项生态服务功能之间的权衡/协同关系, 并利用逐像元统计分析探讨其空间分布模式, 为构建喀斯特山区生态安全屏障、区域生态文明建设提供参考。

1 研究数据与方法

1.1 研究区概况

文山市(103° 43' E~104° 27' E、23° 06' N~23° 44' N), 位于云南省东南部, 国土面积 2 977.19 km², 辖 17 个镇(乡、街道)、139 个行政村(社区), 2018 年总人口 50.46 万。文山市年均降雨量 992.7 mm, 年均气温 18.4℃, 年均日照 319 天, 地势西北高、东南低, 最高海拔 2 991.2 m, 最低海拔 618 m, 土壤类型主要为红壤、石灰岩土, 为典型喀斯特岩溶地貌地区。区域内主要石漠化面积为 1 189.09 km², 占全市国土面积的 39.94%。文山市被定位为国家级重点生态功能区, 具有重要的生态战略地位。

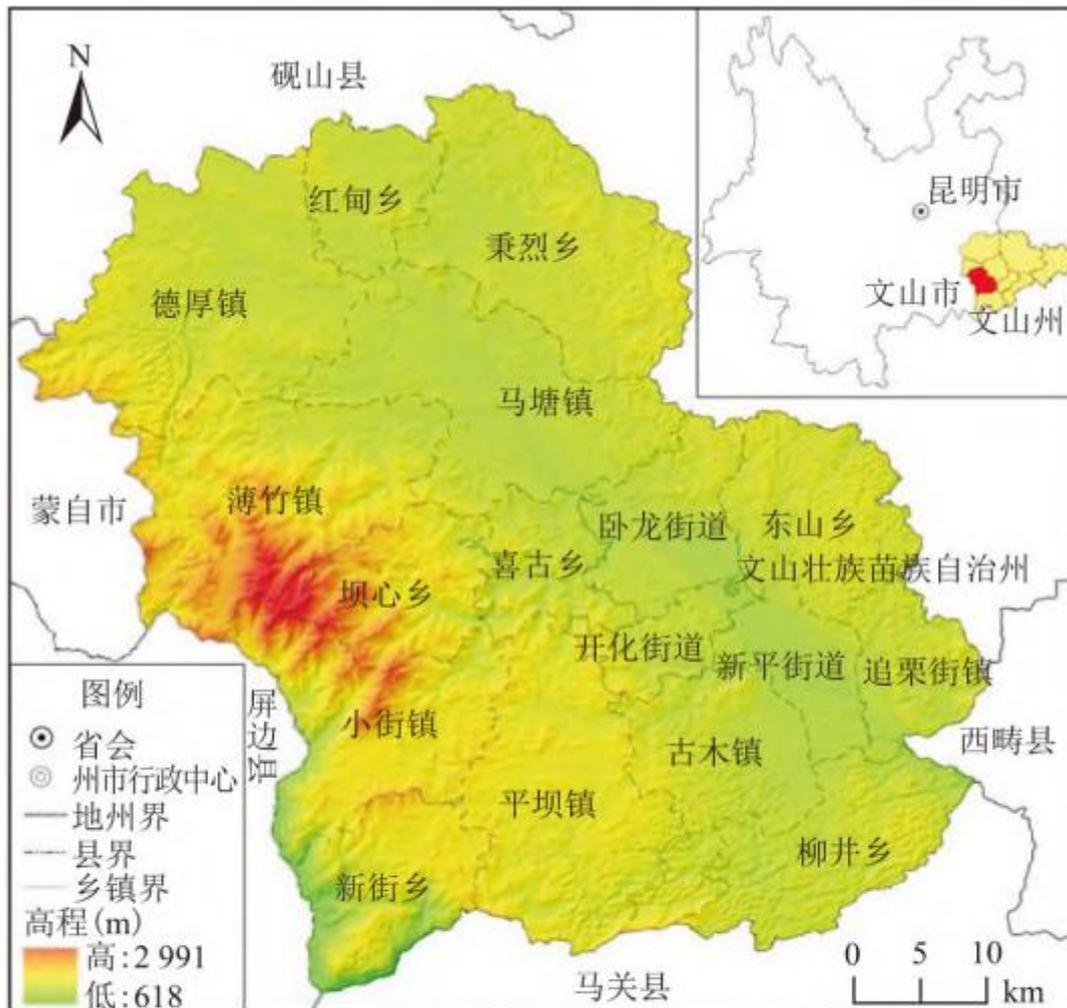


图 1 文山市区位图

Fig. 1 Location map of Wenshan City

1.2 数据来源

遥感数据 Landsat5 (2000、2010)、Sentinel-II (2017) 来源于美国地质勘探局网站 (<http://glovis.usgs.com/>); 2000~2017 年 MODIS13Q1 产品数据, 来源于美国国家航空航天局 (<https://earthdata.nasa.gov/>); DEM 高程数据, 来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>); 气象数据包括文山市内及周边 15 个气象站点的气温、降水、日照时数、太阳辐射等来源于文山市气象局及中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>); 土壤数据来源于世界土壤数据库 (HWSD) 的中国土壤数据集 (v1.1) (<http://westdc.westgis.ac.cn/>), 分辨率为 1 km; 食物产量等数据, 来源于《文山市统计年鉴》(2000-2017 年), 涉及粮食、大豆、油料、蔬菜等; 所有空间数据均统一转换为 WGS_1984_UTM_48N 坐标系。

1.3 遥感数据处理及方法

1.3.1 土地利用/覆被信息提取

以 Landsat5(2000、2010)、Sentinel-II (2017)遥感影像数据为数据源,通过大气校正、波段融合及影像裁剪等手段进行遥感数据预处理,在掌握遥感影像总体特征的基础上,通过建立解译标志,人机交互解译的方式提取研究区三期(2000、2010、2017)土地利用类型数据。参考《土地利用现状分类标准》(GB/T 21010-2017),并结合研究区实际,将研究区土地利用类型划分为耕地、草地、林地、水域、建设用地及未利用地6类。遥感解译结果经过野外验证 Kappa 系数为 88.18%。

1.3.2 NDVI 数据处理—最大值合成法

NDVI 数据来源于 2000~2017 年 MODIS13Q1 产品,空间分辨率为 250 m,时间分辨率为 16 天。对 NDVI 数据进行消除云、大气和太阳高度角等干扰的最大合成法处理。首先,通过 MRT(MODIS Reprojection Tools)软件对 MODIS NDVI 数据进行投影批处理;由于气溶胶、云层等因素会导致 NDVI 数据出现噪点,通过 Savitzky-Golay 滤波拟合合法对 NDVI 数据经过平滑处理后,进行月最大化合成,形成 1~12 月的 NDVI 时间序列及年 NDVI 数据集。NDVI 最大值合成按下式进行运算:

$$\begin{aligned} NDVI_i &= \max(NDVI_j) \\ ANDVI &= \max(NDVI_i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:NDVI_i(*i* = 1, 2, ..., 12)是第 *i* 个月最大值合成 NDVI 数据;NDVI_j(*j* = 1, 2)是两个 16 天的 NDVI 遥感影像数据;ANDVI 则是某年 12 个月的最大值合成 NDVI 数据,反映该年内每个像元植被最旺盛时期的 NDVI 值。

1.4 生态系统服务估算

本研究采用应用较为广泛的 MA 生态系统服务分类方法。基于喀斯特地区生态系统脆弱、岩石裸露、土层较薄以及蓄水能力差,以及当前喀斯特地区生态系统服务研究较少涉及文化服务等特点,考虑数据可获取性及评估方法的科学性,参考相关文献,选取食物供给(Food Production, FP)、植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)、土壤保持(Soil Conservation, SC)、产水量(Water Yield, WY)4 项生态系统服务以反映研究区生态系统服务间的权衡/协同关系,以揭示其时空分异特征,为喀斯特地区的生态系统保护及修复提供科学依据。

1.4.1 食物供给

食物供给是生态系统服务中重要的一项供给服务,对人类的生存和发展至关重要。研究区食物供给主要来源于耕地,因此主要分析耕地的食物供给服务,涉及粮食、大豆、油料、蔬菜等,各类食物能量根据《中国食物成分表(第二版)》[39]进行计算。计算公式如下:

$$c_k = \sum_{m=1}^m P_{mk} \cdot A_m \quad (2)$$

式中: c_k 为区域 *k* 内单位面积食物供给能量的平均值(kJ/km²); P_{mk} 为区域 *k* 内 *m* 作物的单位面积产量(t/km²); A_m 为 *m* 作物的能量(kJ/t)。

NDVI 已被证明与作物产量具有显著的线性关系[40],因此,同一行政区域内同一地类的食物产量由于 NDVI 的不同也有所差异。通过提取反映耕地图层每个栅格 6~9 月最佳生长状况的 NDVI 最大值,然后根据 NDVI 将食物供给服务进行空间化表达,计

算公式如下：

$$c_{ki} = \frac{NDVI_{ki}}{NDVI_{k, mean}} \cdot c_k \quad (3)$$

式中： c_{ki} 为区域 k 内像元 i 的单位面积食物供给能量 (kJ/km^2)； $NDVI_{ki}$ 为区域 k 内像元 i 的 NDVI 值； $NDVI_{k, mean}$ 为区域 k 内耕地 NDVI 的平均值。

1.4.2 植被净初级生产力

植被净初级生产力，是陆地碳循环、平衡 CO_2 和 O_2 及调节全球温度的重要驱动力。论文参考 Potter 等[41]建立的 CASA 模型对植被净初级生产力进行模拟估算，估算方法如下：

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t) \quad (4)$$

式中： $APAR(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的光合有效辐射 (MJ/m^2)； $\varepsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率 ($\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。

1.4.3 土壤保持

土壤保持是生态系统支持服务的重要组成部分，喀斯特地区的石漠化导致基岩大面积裸露，土壤生产力下降，因此评估土壤保持的大小及空间分布对研究区具有重要意义。土壤保持为潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之差，采用通用土壤流失方程 (RUSLE) 对研究区的土壤保持服务进行测算。

1.4.4 产水量

生态系统产水服务一般采用水量平衡原理进行估算，研究通过 InVEST 模型产水模块进行产水服务模拟估算。模型算法如下：

$$Y_{xj} = \left(1 - \frac{AET_{xj}}{P_x} \right) \times P_x \quad (5)$$

式中： Y_{xj} 为 j 类土地利用类型 x 像元上的年产水量 (mm)； AET_{xj} 为 j 类土地利用类型 x 像元上的年实际蒸散量 (mm)； P_x 是 x 像元上的年降雨量 (mm)； $PET(x)$ 是潜在蒸散量。

1.5 权衡/协同关系分析方法

生态系统服务权衡/协同关系采用皮尔逊 (Spearman) 相关系数法，用于度量两个变量 X 和 Y 之间的线性相关，其值 -1 与 1 之

间。R语言是一种可编程的统计分析语言，具有开放、灵活、数据处理量大等特点，被广泛运用于各学科领域的统计分析工作中。

本论文基于 R3.6.1 平台，运用 corr.test 函数计算各类生态系统服务间的 Spearman 系数，并进行显著性检验。当某两种生态系统服务的相关系数为负，且通过 0.05 置信水平的显著性检验，则认为存在显著的权衡关系；反之则存在显著的协同关系。通过 Spearman 相关系数能够掌握区域整体生态系统服务的权衡/协同关系，基于像元的统计分析能够对生态系统服务权衡/协同关系进行空间上的量化，论文基于 Matlab 软件平台，基于逐像元的时空统计方法分析文山市生态系统服务间的权衡/协同关系。

2 结果分析

2.1 土地利用/覆被时空变化

2000、2010 和 2017 年，文山市土地利用类型以林地和耕地为主，林地和耕地面积占比均达 87%以上，其次为未利用地，面积占比约 5%~6%，草地、水域和建设用地的面积较小(表 1)。由图 2 所示，林地多分布文山市西南部，以老君山自然保护区最为集中；耕地分布格局与地形关系密切，广泛分布于地势平坦区域及河谷地区；未利用地集中分布于文山市东部及东北部；建设用地集中在文山市中心城区部分。2000~2017 年间，面积增加幅度最大的土地利用类型为建设用地，增加 8 798.27 hm²(198.09%)，耕地和水域分别增加了 5 376.71 hm²(4.38%)和 481.72 hm²(37.19%)；而草地、林地和未利用地分别减少了 2 915.73、7 539.83 和 4 201.13 hm²。造成这种变化的主要原因是不断加快的城市化进程、对闲置土地的开发利用以及兴修水库设施。

表 1 2000~2017 年文山市土地利用类型面积及变化

土地利用类型	2000 年		2010 年		2017 年		2000~2010 年	2010~2017 年	2000~2017 年
	面积(hm ²)	占比(%)	面积(hm ²)	占比(%)	面积(hm ²)	占比(%)			
耕地	122 809.75	41.42	128 216.66	43.24	128 186.46	43.23	5 406.91	-30.20	5 376.71
草地	11 379.48	3.84	7 742.30	2.61	8 463.75	2.85	-3 637.18	721.45	-2 915.73
林地	138 158.51	46.59	133 286.98	44.95	130 618.68	44.05	-4 871.53	-2 668.30	-7 539.83
水域	1 295.23	0.44	1 314.11	0.44	1 776.95	0.60	18.88	462.84	481.72
建设用地	4 441.56	1.50	8 524.78	2.88	13 239.83	4.47	4 083.22	4 715.05	8 798.27
未利用地	18 433.87	6.21	17 433.57	5.88	14 232.73	4.80	-1 000.29	-3 200.84	-4 201.13

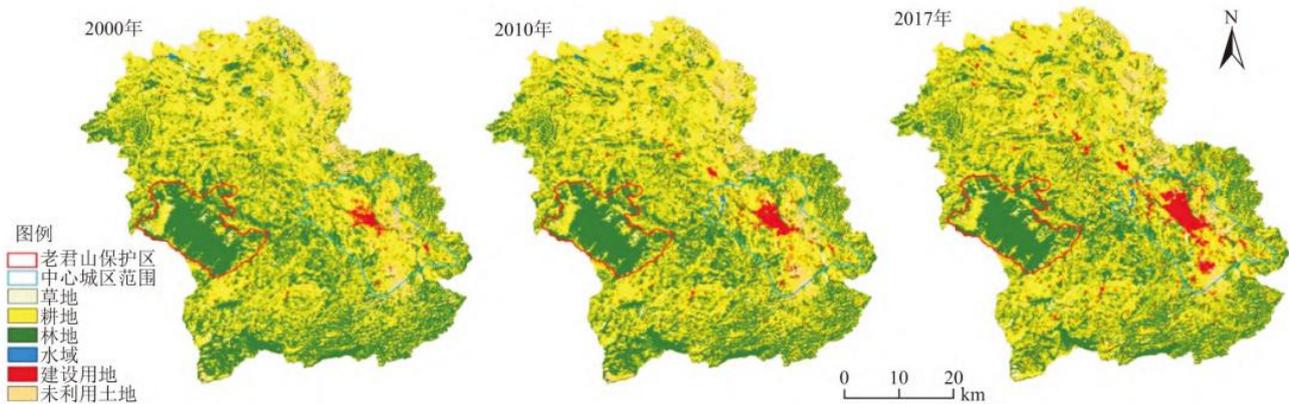


图 2 2000~2017 年文山市土地利用类型图

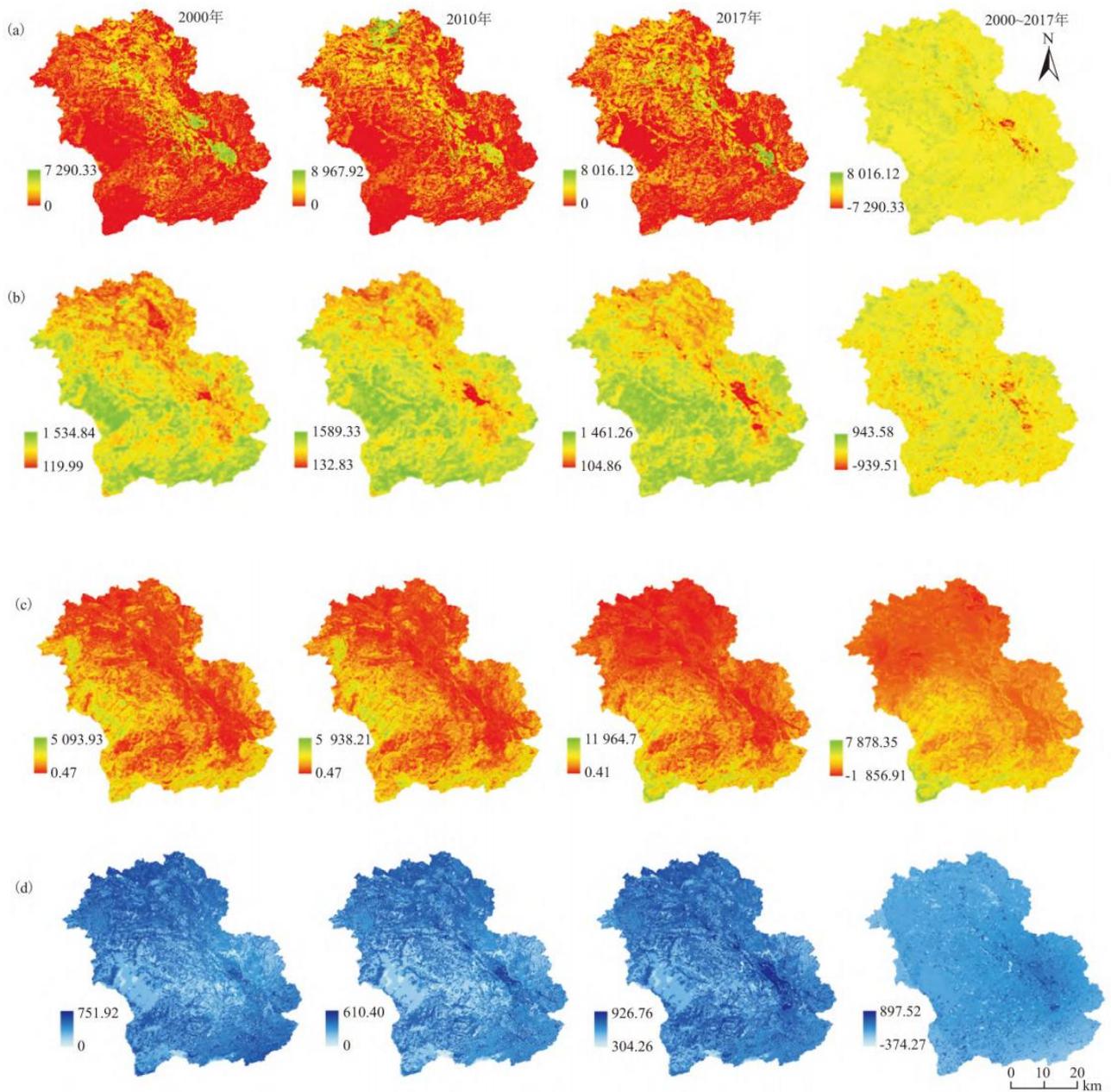
Fig. 2 Land use types map of Wenshan City from 2000 to 2017

2.2 生态系统服务时空变化

2000~2017 年文山市食物供给、植被净初级生产力、土壤保持和产水量四种生态系统服务见表 2、图 3, 4 种生态系统服务总体呈增长趋势。从年际变化看, 食物供给和土壤保持在 2000~2017 年间逐渐上升, 而植被净初级生产力和产水量则分别呈现先增加后减少和先减少后增加的趋势。食物供给服务的平均值在 17 年间增长了 468.01 MkJ/km^2 ; 植被净初级生产力年均值基本保持稳定, 变化量为 $48.62 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$; 土壤保持和产水量的年均值变化较明显, 分别增加了 $419.70 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 和 283.21 mm 。

表 2 2000~2017 文山市生态系统服务年均值

生态系统服务	FP ($\text{MkJ} \cdot \text{km}^2$)	NPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$)	SC ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-2}$)	WY (mm)
2000	1593.12	874.21	429.01	397.97
2010	2010.86	963.20	473.16	349.96
2017	2061.14	922.83	848.71	681.18



注: (a) 食物供给 ($\text{MkJ} \cdot \text{km}^2$); (b) NPP ($\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); (c) 土壤保持 ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); (d) 产水量 (mm) .

图3 2000~2017年文山市生态系统服务时空分布及变化

Fig. 3 Spatio-temporal distribution and changes of ecosystem services in Wenshan City from 2000 to 2017

从空间分布看, 食物供给服务的高值区域主要分布于文山市城区周边, 该地区为盘龙河河谷地区, 水土资源和耕作条件较好; 从时空变化看, 这一区域也是食物供给服务减少最为明显的地区, 主要原因为城区扩张导致土地利用类型由耕地向建设用地转移从而使得食物供给服务减少; 植被净初级生产力的高值区和研究区林地的空间分布呈现一致性, 研究区植被净初级生产力的变化在人类活动最为集中的建设用地周边最为明显, 其次是林地的外围地区以及未利用地大面积分布地区; 土壤保持高值区广泛分布于文山市西南部, 该地区土地利用类型主要为林地, 同时地形起伏相对较大, 低值区集中分布于北部及中部, 主要由于该地区位于平坝、河谷等地形平缓地区, 潜在土壤侵蚀量小, 土壤保持的时空变化与其空间分布格局基本保持一致; 研究区产水量较高的区域为建设用地, 在蒸发作用影响下林地、水域的产水量相对较小, 降雨量的增多也使研究区产水量在空间分布上总体呈上升趋势。

2.3 不同土地利用类型生态系统服务的时空差异

论文基于 R 语言,对 2000、2010 及 2017 年 3 年的各类生态系统服务进行平均值标准化,并绘制风玫瑰图(图 4)。结果表明,文山食物供给主要存在于耕地中,并呈现逐年上升的趋势;2000~2010 年草地中各类生态系统服务基本保持稳定,而 2017 年产水服务及土壤保持服务有明显提高;水域的各类生态系统服务最低,在 2000~2010 年其产水服务接近 0;在建设用地上,产水服务最强,土壤保持与其呈现较明显的协同关系。不同土地利用类型 NPP 的高低依次为:林地>草地>耕地>未利用地>水域>建设用地;土壤保持服务由高到低排序为:林地>草地>耕地>未利用地>建设用地>水域;产水服务能力排序为:建设用地>耕地>未利用地>草地>林地>水域。

2.4 生态系统服务权衡/协同关系

2.4.1 生态系统服务权衡/协同关系在数值上的体现

根据 R 语言计算得到的文山市 2000~2017 年各生态系统服务间的 Spearman 相关系数如表 3,所有相关系数均通过了 $P=0.01$ 的显著性检验。结果表明,FP 与 WY 的相关性最高,呈极显著的正相关(协同关系),即 FP 的增加会导致 WY 的增加,而 FP 与 NPP 和 SC 呈极显著负相关(权衡关系),即 FP 的增加会导致植被 NPP 和 SC 下降;NPP 与 SC 为极显著正相关,与 WY 为极显著负相关;SC 与 WY 之间为极显著的负相关关系。从年际变化来看,FP 与 NPP 的相关性逐渐减弱,与 SC 的相关性逐渐增强,与 WY 的相关性呈先增强后减弱的趋势;NPP 与 SC 的相关性持续增强,与 WY 的相关性也呈先增强后减弱的趋势;SC 与 WY 的相关性有较为明显的增强。

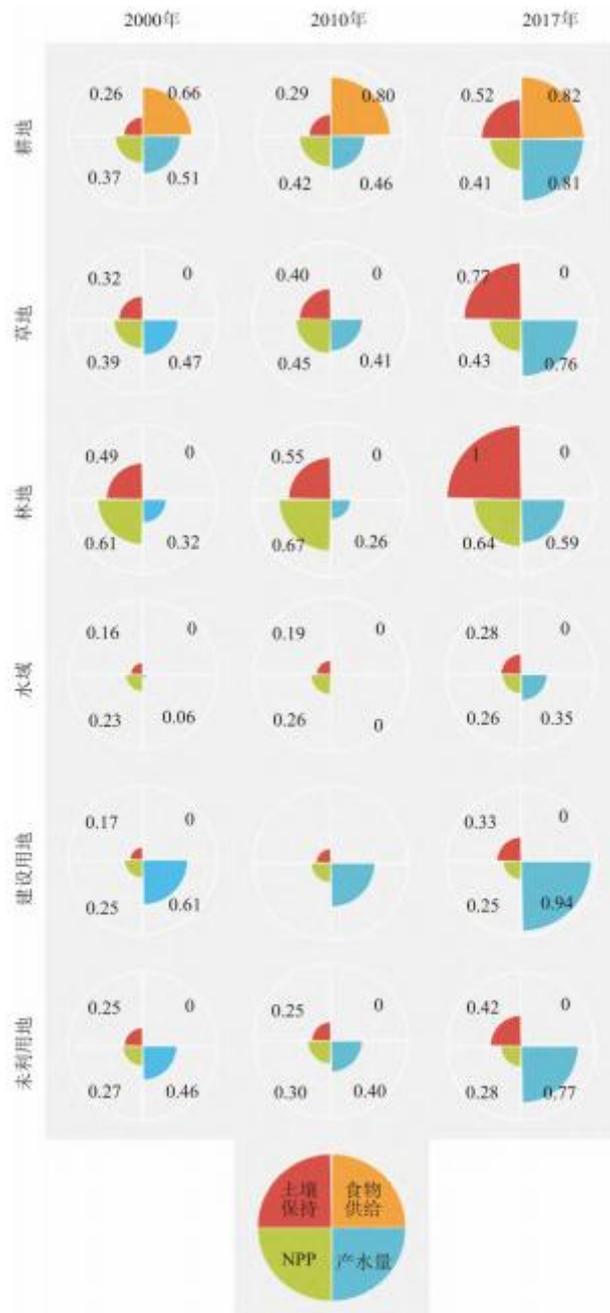


图 4 2000~2017 年文山市不同土地利用类型生态系统服务变化

Fig. 4 Changes in ecosystem services of different land use types in Wenshan City from 2000 to 2017

表 3 2000~2017 年文山市生态系统服务间的 Spearman 相关系数

生态系统	NPP	SC	WY
------	-----	----	----

服务	2000	2010	2017	2000	2010	2017	2000	2010	2017
FP	-0.52	-0.52	-0.48	-0.25	-0.26	-0.28	0.65	0.71	0.66
NPP				0.55	0.54	0.61	-0.61	-0.71	-0.66
SC							-0.17	-0.26	-0.30

2.4.2 生态系统服务权衡/协同关系空间分布格局

基于像元尺度对文山市生态系统服务间的相互关系进行空间制图，并对计算结果进行显著性检验，划分为6个等级[41]，即协同**($r>0, P<0.05$)、协同*($r>0, 0.05<P<0.1$)、协同($r>0, 0.1<P$)、权衡($r<0, 0.1<P$)、权衡*($r<0, 0.05<P<0.1$)、权衡**($r<0, P<0.05$)，以分析研究区不同服务之间权衡与协同关系的空间格局(图5)。2000~2017年间，研究区存在食物供给服务多年均为0的地区，需要在相关分析时将其视为常量进行剔除，因此在食物供给与其他三项生态系统服务相关关系空间分布格局中用空白区域表示。

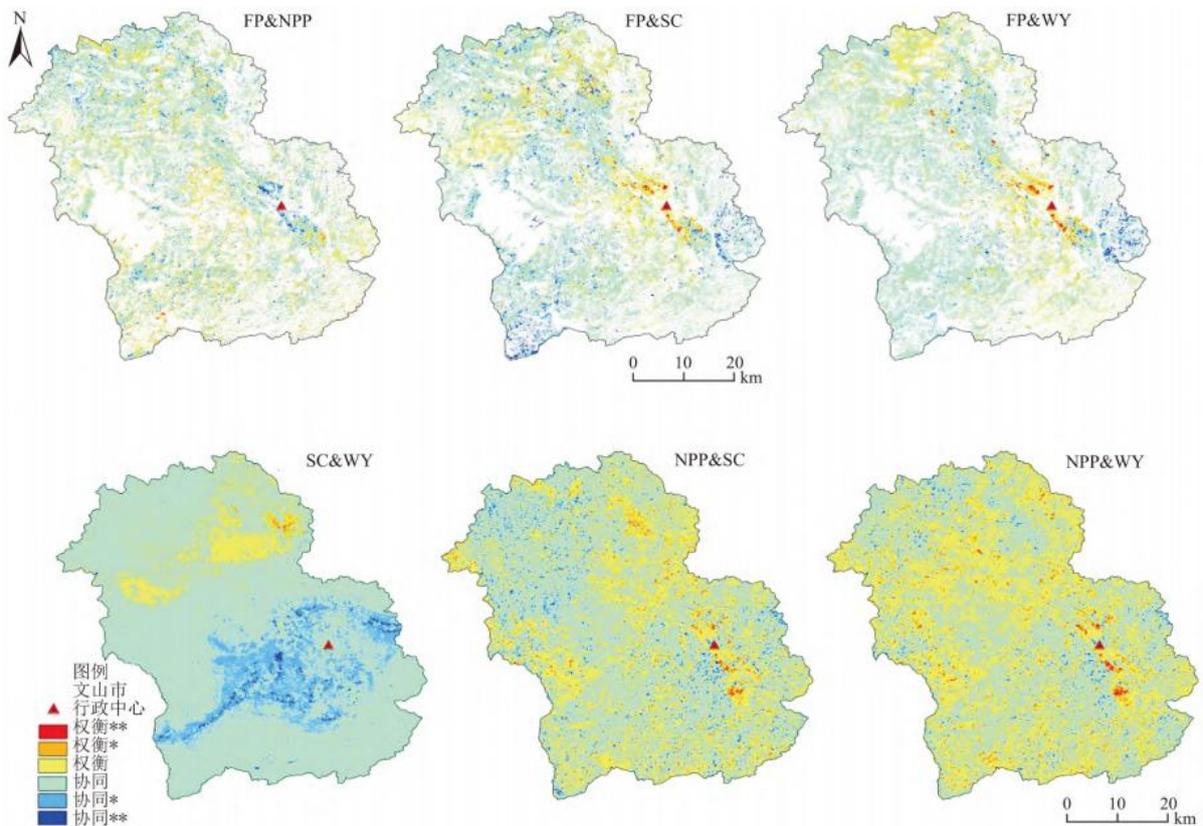


图5 2000~2017年文山市生态系统服务权衡与协同关系的空间格局

Fig. 5 Spatial pattern of ecosystem service trade-off/ synergy relationship in Wenshan City from 2000 to 2017

研究区食物供给(FP)、植被净初级生产力(NPP)、土壤保持(SC)与产水量(WY)之间的协同/权衡关系如表4、图5所示。具体，

FP 与 NPP 以协同关系为主，协同的像元个数占比 64.83%，从空间分布看，北部及中部以协同关系为主，市中心周围呈现极显著协同关系，而权衡关系在空间上多分布于南部地区；FP 与 SC 的协同关系的像元占 70.05%，但协同关系在空间上分布规律不明显，权衡关系在市中心周围的像元呈现极显著，原因，一方面由于城市扩张耕地向建设用地转移，导致食物供给服务下降，另一方面则是由于降雨量的增加，使得以人工地表覆盖为主的建设用地土壤保持有所增加；FP 与 WY 协同关系像元占比为 72.48%，极显著协同像元主要集中在研究区东南区域，权衡关系多分布于研究区北部及中部，原因，由于研究区 FP 总体呈逐年上涨趋势，而降雨量的增加也使得研究区产水量呈上升趋势。

表 4 2000~2017 年文山市生态系统服务权衡与协同关系分布像元占比 导出到 EXCEL

像元占比	协同 (%)	权衡 (%)
FP& NPP	64.83	35.17
FP& SC	70.05	29.95
FP& WY	72.48	27.52
SC& WY	90.60	9.40
NPP& SC	58.30	41.70
NPP& WY	46.76	53.24

研究区 SC 与 WY 协同关系像元占比为 90.60%，显著和极显著协同关系集中分布于研究区中部偏南地区，而权衡关系集中在研究区东北及西北成小范围，SC 与 WY 受降水的影响较大，导致了产水量与土壤保持的变化在时空分布上的不一致，不同土地利用类型之间植被覆盖度的差别，也使得部分地区产水量和土壤保持呈现此消彼长的权衡关系；NPP 与 SC 协同关系的像元占 58.30%，极显著协同像元在空间上分布广泛，无明显集聚，而极显著权衡像元在东南部集聚分布；NPP 与 WY 权衡关系为主，像元占比 53.24%，两者间的权衡关系在空间上分布广泛，显著与极显著权衡分布都较为分散，极显著协同关系主要分布于研究区西北部、东南部以及西部小部分区域，一般来说，植被覆盖度较高的区域会有更高的 NPP，而这些区域植物蒸腾作用较强，往往会有较低的产水量。

3 结论

论文以喀斯特石漠化防治国家重点生态功能区文山市为研究区，基于遥感、气象、土壤等多源数据，分析了 2000~2017 年 17 年间土地利用动态变化下食物供给 (FP)、植被净初级生产力 (NPP)、土壤保持 (SC) 和产水量 (WY) 四种生态系统服务间权衡协同关系并对其进行空间制图，主要结论如下：

(1) 17 年间，研究区林地、草地和未利用地面积均有所减少，其他土地利用类型相对增加，其中建设用地面积增加最为明显，增加了近两倍，耕地增加面积也相对较大，表明这一时期文山市人类活动对原始生态系统产生了较强的干扰作用。

(2) 从土地利用与生态系统服务的关系来看，本研究对于不同土地利用生态系统服务的分析结果与其他相关研究基本一致 [42, 43]，耕地、草地、林地三种土地利用类型对生态系统服务起到主导作用。FP 主要存在于耕地中，NPP 与 SC 在林地、草地及耕地中占比显著高于其他土地利用类型；建设用地和未利用地对 WY 的贡献较大，而对 SC、NPP 的贡献较小，主要由于建设用地多分布于地势平缓地区，其潜在土壤侵蚀量相对较小；水域提供的生态系统服务较小。研究区的 NDVI 年际变化来看，其与 NPP 保持着先增加后减少的一致变化趋势。

(3) 文山市生态系统服务在 2000~2017 年间整体呈增加趋势, 而 FP 和 NPP 在局部地区呈现显著下降趋势, 这些地区多为开发建设区域以及人类活动密集区。不同土地利用类型中, 林地对 NPP 及 SC 的贡献最大。

(4) 相关系数统计从区域整体看, 生态系统服务之间的权衡/协同关系在 2000~2017 年保持一致, 但权衡/协同关系的强弱程度有所波动。生态系统服务两两间关系为: FP 与 WY 为协同关系, FP 与 NPP、SC 为权衡关系; NPP 与 SC 为协同关系, NPP 与 WY 为权衡关系; SC 与 WY 为权衡关系。

(5) 从权衡/协同关系空间分布格局来看, 研究区各类生态系统服务之间以呈现协同关系的像元为主, 仅 NPP 与 WY 在空间上权衡关系的像元占比更高。同时, 不同生态系统服务之间, 权衡区与协同区的空间分布模式有所差异, FP 与 NPP 以共同降低的趋势在文山市中心周围地区呈显著协同关系; 而其他生态系统服务之间的权衡/协同关系在该地区则呈现显著权衡且分布集中, 显著协同区域在研究区内分布较为破碎。

4 讨论

目前对于喀斯特山区生态系统服务权衡/协同关系的研究多为全局的数据分析, 以及针对某一时点或多年均值对不同生态系统服务的冷热点进行叠加分析, 如果仅针对单一时间点进行研究, 就可能导致对生态系统服务的相互关系造成误判^[42], 也无法对相互关系的空间分布格局进行深入分析。本研究对云南喀斯特山区文山市的食物供给、植被净初级生产力、土壤保持、产水量进行了测算, 从像元尺度对其变化特征及分布差异进行分析, 并使用 R 语言和逐像元时空统计方法从数量和空间两个角度探究了生态系统服务权衡与协同的关系。但研究过程中在数据获取方面仍存在一定困难, 仅对生态系统服务中供给、调节和支持服务进行评估, 分析不够全面, 在下一步研究中需要完善, 同时需要对相互关系进行长时间序列高时空分辨率的研究, 以增强分析结果的科学性和可靠性。受限于一客观条件, 本文收集 2000、2010、2017 年度遥感、气象、土壤等多源数据表征文山市 17 年间各类生态系统服务之间的相互关系, 年份样本量少统计学意义略有不足, 准确反映时序变化结果存在一定不确定误差, 后续研究可逐年选取代表性年份予以分析。生态系统土地研究在生态系统服务的估算过程中, 所采用的模型参数主要参考文献资料以及相近地区的研究成果, 存在一定不合理性, 对模型改进以及对参数进行本土化调整等方面有待进一步研究。

参考文献

- [1] 谢高地, 张彩霞, 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. XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on perunit area[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8):1243-1254.
- [2] YANG G F, GE Y, XUE H, et al. Using ecosystem service bundles to detect trade-offs and synergies across urban-rural complexes[J]. Landscape and Urban Planning, 2015, 136:11-21.
- [3] 张永民, 赵士洞. 全球生态系统服务的状况与趋势[J]. 地球科学进展, 2007(5):515-520. ZHANG Y M, ZHAO S D. The condition and trends of the world's Ecosystem services[J]. Advances In Earth Science, 2007(5):515-520.
- [4] COSTANZA R, DE GROOT R, SUTTON P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environ Chang, 2014, 26(1):152-158.
- [5] 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. FU B J, ZHANG L W. Land-use change and ecosystem services: concepts, methods and progress[J]. Progress in Geography, 2014, 33(4):441-446.

-
- [6] YANG X,ZHOU Z,LI J,et al.Trade-offs between carbon sequestration,soil retention and water yield in the Guanzhong-Tianshui Economic region of China[J].Journal of Geographical Sciences,2016,26(10):1449-1462.
- [7] 仲俊涛,王蓓,米文宝,等.农牧交错带禁牧草地生态系统服务空间权衡与协同关系[J].农业工程学报,2020,36(12):268-275.ZHONG J T,WANG B,MI WB,et al.Spatial trade-offs and synergies of ecosystem services for grazing-prohibited grassland in agro-pasture ecotone[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(12):268-275.
- [8] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].地理学报,2020,75(5):975-988.ZHNAG J J,ZHU W B,ZHU L Q,et al.Multi-scale analysis of trade-off/synergy effects of forestecosystem services in the Funiu Mountain Region[J].Acta Geographica Sinica,2020,75(5):975-988.
- [9] 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.LAN Z C,JIA L,CHENG Y.The ecosystem services evaluation and trade-off synergy in Min River Basin[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(12):3909-3920.
- [10] 祝萍,刘鑫,郑瑜晗,等.北方重点生态功能区生态系统服务权衡与协同[J].生态学报,2020,40(23):8694-8706.ZHU P,LIU X,ZHENG Y H,et al.Tradeoffs and synergies of ecosystem services in key ecological function zones in northern China[J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(23):8694-8706.
- [11] 高艳丽,李红波,侯蕊.汉江流域生态系统服务权衡与协同关系演变[J].长江流域资源与环境,2020,29(7):1619-1630.GAO Y L,LI H B,HOU R.Evolution Analysis on Trade-offs and Synergies of Ecosystem Services in Hanjiang River Basin[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2020,29(7):1619-1630.
- [12] 聂名萱,黄思华,濮励杰,等.快速城镇化地区生态系统服务的时空动态及权衡与协同分析——以苏锡常地区为例[J].长江流域资源与环境,2021,30(5):1088-1099.NIE M X,HUANG S H,PU LJ,et al.Spatial and Temporal Dynamics and Trade-offs and Synergies Analysis of EcosystemServices in Rapidly Urbanizing Areas:A Case Study of the Su-Xi-Chang region[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2021,30(5):1088-1099.
- [13] WATANABE M D B,ORTEGA E.Dynamic energy accounting of water and carbon ecosystem services:A model to simulate the impacts of land-use change[J].Ecological Modelling,2014,271:113-131.
- [14] 傅伯杰,于丹丹,吕楠.中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系[J].生态学报,2017,37(2):341-348.FU B J,YU D D,LV N.An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(2):341-348.
- [15] RIBEIRO D,HRIBAR M S.Assessment of land-use changes and their impacts on ecosystem services in two slovenian rural landscapes[J].Acta Geographica Slovenica-Geografski Zbornik,2019,59(2):143-159.
- [16] 潘竟虎,李真.干旱内陆河流域生态系统服务空间权衡与协同作用分析[J].农业工程学报,2017,33(17):280-289.PAN J H,LI Z.Analysis on trade-offs and synergies of ecosystem services in arid inland River basin[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(17):280-289.

-
- [17] 武文欢, 彭建, 刘焱序, 等. 鄂尔多斯市生态系统服务权衡与协同分析[J]. 地理科学进展, 2017, 36(12):1571-1581. WU W H, PENG J, LIU Y X, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services in Ordos City[J]. Progress in Geography, 2017, 36(12):1571-1581.
- [18] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 等. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同[J]. 地理研究, 2019, 38(9):2162-2172. YIN L C, WANG X F, ZHANG K, et al. Trade-offs and synergy between ecosystem services in National Barrier 'Zone[J]. Geographical Research, 2019, 38(9):2162-2172.
- [19] 冉凤维, 罗志军, 吴佳平, 等. 鄱阳湖地区生态系统服务权衡与协同关系的时空格局[J]. 应用生态学报, 2019, 30(3):995-1004. RAN F W, LUO Z J, WU J P, et al. Spatiotemporal patterns of the trade-off and synergy relationship among ecosystem services in Poyang Lake Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(3):995-1004.
- [20] 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. DAI E F, WANG X L, ZHU J W, et al. Methods, tools and research framework of ecosystem service trade-offs[J]. Geographical Research, 2016, 35(6):1005-1016.
- [21] 王晓峰, 马雪, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20):7344-7355. WANG X F, MA X, FENG X M, et al. Spatial-temporal characteristics of trade-off and synergy of ecosystem services in key vulnerable ecological areas in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7344-7355.
- [22] 郝梦雅, 任志远, 孙艺杰, 等. 关中盆地生态系统服务的权衡与协同关系动态分析[J]. 地理研究, 2017, 36(3):592-602.
- [23] 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 H Q, SU Z H. Research progress and prospects of karst ecosystem services[J]. Carsologica Sinica, 2017, 36(3):352-358.
- [24] 高渐飞, 熊康宁. 喀斯特石漠化生态系统服务价值对生态治理的响应: 以贵州花江峡谷石漠化治理示范区为例[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(6):775-784. GAO J F, XIONG K N. Ecosystem service value responses to ecological control in Karst region: A case study of Huajiang Gorge Demonstration Area of Rocky Desertification Control in Guizhou[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(6):775-784.
- [25] 王霖娇, 李瑞, 盛茂银. 典型喀斯特石漠化生态系统土壤有机碳时空分布格局及其与环境的相关性[J]. 生态学报, 2017, 37(5):1367-1378. WANG L J, LI R, SHENG M Y. Distribution of soil organic carbon related to environmental factors in typical rocky desertification ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(5):1367-1378.
- [26] TIAN Y C, WANG S J, BAI X Y, et al. Trade-offs among ecosystem services in a typical karst watershed, SW China[J]. Science of the Total Environment, 2016, 566-567:1297-1308.
- [27] LANG Y Q, SONG W. Trade-off Analysis of Ecosystem Services in a Mountainous Karst Area, China[J]. Water, 2018, 10(3).
- [28] 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. GAO J B, ZUO L Y, WANG H. The spatial trade-offs and differentiation characteristics of ecosystem services in karst peak cluster depression[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21):7829-7839.

-
- [29] HAN H Q, YIN C Y, ZHANG C Q, et al. Response of trade-offs and synergies between ecosystem services and land use change in the Karst area[J]. *Tropical Ecology*, 2019, 60(2).
- [30] HAN H Q, LIU Y, GAO H J, et al. Tradeoffs and synergies between ecosystem services: A comparison of the karst and non-karst area[J]. *Journal of Mountain Science*, 2020, 17(4).
- [31] 高敏, 王勇, 高洁, 等. 喀斯特地区退耕还林工程下生态系统服务变化与关系分析[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(2):276-283. GAO M, WANG Y, GAO J, et al. Analysis on Changes and Relationship of Ecosystem Services in Karst Area Under the Project of Returning Farmland to Forest[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(2):276-283.
- [32] WANG X F, ZHANG X R, FENG X M, 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(14).
- [33] HAMEL P, CHAPLIN-KRAMER R, SIM S, et al. A new approach to modeling the sediment retention service (InVEST 3.0): case study of the Cape Fear catchment, North Carolina, USA[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 524/525:166-177.
- [34] DENNEDY-FRANK P J, MUENICH R L, CHAUBEY I, et al. Comparing two tools for ecosystem service assessments regarding water resources decisions[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 177:331-340.
- [35] GROFF S C, LOFTIN C S, DRUMMOND F, et al. Parameterization of the InVEST crop pollination model to spatially predict abundance of wild blueberry (*Vaccinium angustifolium* Aiton) native bee pollinators in Maine, USA[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2016, 79(C):1-9.
- [36] WANG Y Y, ATALLAH S, SHAO G F. Spatially explicit return on investment to private forest conservation for water purification in Indiana, USA[J]. *Ecosystem Services*, 2017, 26:45-57.
- [37] REDHEAD J W, STRATFORD C, SHARPS K, et al. Empirical validation of the InVEST water yield ecosystem service model at a national scale[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570:1418-1426.
- [38] 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 J, LIU D Q, GAO B L, 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.
- [39] 杨月欣, 王光亚. 中国食物成分表, 2002[M]. 2002. YANG Y X, WANG G Y. *Chinese food composition list, 2002*[M]. 2002.
- [40] GROTEN S. NDVI-crop monitoring and early yield assessment of Burkina Faso[J]. *Remote Sensing*. 1993, 14(8), 1495-1515.
- [41] POTTER C S. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochem Cycle*, 1993, 7(4):811-841.

[42] 孙艺杰, 任志远, 赵胜男, 等. 陕西河谷盆地生态系统服务协同与权衡时空差异分析[J]. 地理学报, 2017, 72(3):521-532. SUN Y J, REN Z Y, ZHAO S N, et al. Spatial and temporal changing analysis of synergy and trade-off between ecosystem services in valley basins of Shaanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(3):521-532.

[43] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 等. 流域生态系统服务热点与冷点时空格局特征[J]. 生态学报, 2019, 39(3):823-834. WANG Z Z, ZHANG L W, LI X P, et al. The spatial-temporal pattern of hotspots and coldspots of ecosystem services at the watershed scale[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3):823-834.