

DOI: 10.20103/j.stxb.202405181137

潘丹, 陈佳, 孔凡斌. 山水林田湖草保护修复工程对生态系统服务价值及权衡协同关系时空演变的影响——以赣州市为例. 生态学报, 2025, 45(10): 4758-4773.

Pan D, Chen J, Kong F B. Impact of mountain-river-forest-cropland-lake-grassland system project on the spatial-temporal evolution of ecosystem service values and trade-off synergistic relationships: a case study of Ganzhou city. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4758-4773.

山水林田湖草保护修复工程对生态系统服务价值及权衡协同关系时空演变的影响 ——以赣州市为例

潘 丹¹, 陈 佳², 孔凡斌^{3,*}

1 江西财经大学经济学院, 南昌 330013

2 上海海洋大学经济管理学院, 上海 201306

3 南京林业大学数字林业与绿色发展研究院/经济管理学院, 南京 210037

摘要:山水林田湖草生态保护修复工程(简称“山水工程”)是国家为提升生态系统服务功能、促进生态系统良性循环和永续利用的一项重大生态工程。然而,山水工程的实施能否提升生态系统服务价值(ESV),一直缺乏应有的系统证据。以全国首批山水工程试点地区江西省赣州市为例,基于 2010—2022 年的 7 期土地利用数据,运用当量因子、相关系数及地理加权回归等方法,分析了山水工程实施前后赣州市 ESV 及其权衡协同关系的时空变化规律,并进一步探讨了不同土地利用类型转化对 ESV 时空演化影响的差异程度。研究结果表明:(1)山水工程的实施能有效扭转赣州市 ESV 下降的趋势。13 年间赣州市 ESV 共下降了 47.72 亿元,但是 ESV 在工程实施后比实施前少下降了 4.8 亿元。下降减缓主要源于山水工程减少了林地和草地流失面积,但是耕地、建设用地的持续扩张与水域遭到破坏仍然阻碍了赣州市 ESV 的提升。(2)山水工程的实施对赣州市不同区域 ESV 的影响具有差异性。受山水工程的影响,工程实施前的 ESV 低值区域赣东和赣南地区的 ESV 扭降为升,但是工程实施前的 ESV 中值区域赣西和赣中地区的 ESV 出现了小幅下降态势。(3)协同关系是赣州市各单项生态系统服务间的主要关系,山水工程的实施进一步增强了赣州市大部分单项生态系统服务之间的协同关系,尤其是水文调节、原料生产与其他服务之间的协同关系增益明显,但是由于山水工程对水域保护不足而降低了水资源供给与其他服务之间的协同关系。研究从 ESV 的角度量化了山水工程的实施绩效,为国家优化山水工程实施方案提供科学依据,有助于提高山水工程后续工作的科学性和空间针对性。

关键词:山水林田湖草生态保护修复工程;生态系统服务价值;权衡协同

Impact of mountain-river-forest-cropland-lake-grassland system project on the spatial-temporal evolution of ecosystem service values and trade-off synergistic relationships: a case study of Ganzhou City

PAN Dan¹, CHEN Jia², KONG Fanbin^{3,*}

1 School of Economics, Jiangxi University of Finance and Economics, Nanchang 330013, China

2 School of Economics and Management, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China

3 Institute of Digital Forestry & Green Development/College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

Abstract: The mountain-river-forest-cropland-lake-grassland system project (hereafter referred to as the “shanshui

基金项目:国家自然科学基金项目(72363012);国家社会科学基金重大项目(23ZDA105);国家社会科学基金后期资助项目(23FGLB006)

收稿日期:2024-05-18; **网络出版日期:**2025-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: kongfanbin@aliyun.com

project”) is an important ecological project aimed at enhancing ecosystem service functions and promoting the sustainable and virtuous utilization of ecosystems in China. However, systematic evidence remains sparse regarding the impact of the shanshui project on the enhancement of ecosystem service value (ESV). Taking Ganzhou City in Jiangxi Province, the first pilot area of the national shanshui project, as an example and based on seven periods of China Land Cover Dataset spanning from 2010 to 2022, we analyze the spatial-temporal changes in ESV and its trade-off synergistic relationships before and after the implementation of the shanshui project and further explore the contributions of different land use type transformations to the spatial-temporal evolution of ESV. The methods used include the equivalent factor approach, correlation coefficients analysis, geographically weighted regressions, and so on. The results show that: (1) The implementation of the shanshui project effectively reverses the deterioration trend of ESV in Ganzhou city. Specifically, the ESV in Ganzhou city decreased by 4.772 billion yuan in the 13 years, but ESV declined by 480 million yuan less after the project than before it was implemented. This reduction effect is mainly due to the project’s impact in reducing the loss of forest and grassland areas. However, the ongoing expansion of cultivated and construction land and watershed degradation continue to impede the enhancement of ESV in Ganzhou city. (2) The impact of the shanshui project on ESV varies across different regions. Specifically, due to the influence of the shanshui project, the ESV of Gan Dong and Gan Nan, which were regions with low ESV before the implementation of the project, changed from decline to increase, but the ESV of Gan Xi and Gan Zhong, which were regions with medium ESV before the implementation of the project, showed a slight decline. (3) Synergistic relationships are the main relationships of each ecosystem service in Ganzhou city, and the implementation of the shanshui project enhanced the synergistic relationships between most individual ecosystem services, especially between hydrological regulation, raw material production, and other services. However, the synergy relationship between water supply and other services has weakened due to inadequate watershed protection by the project. The study quantified the performance of the shanshui project from the perspective of ESV, which provides a scientific basis to optimize the implementation plan of the shanshui project and helps to improve the scientific and spatial relevance of the follow-up work of the shanshui project.

Key Words: mountain-river-forest-cropland-lake-grassland system project; ecosystem service value; trade-offs and synergies

生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)是生态系统所形成和维持的人类赖以生存和发展的环境条件与效用,是人类从生态系统中直接或间接获取的所有收益,是生态环境保护、生态功能区划、环境经济核算和生态补偿决策的重要依据和基础^[1-4]。随着人类活动的范围和强度不断增大,对自然资源需求持续增长和过度开发,中国多地 ESV 呈现下降趋势,例如陕西省^[5]、常州市^[6]、武汉市^[7]、咸宁市^[8]等。为提高生态系统服务价值,中国针对石漠化^[9]、湿地^[10]、森林^[11]、高原^[12]等多个生态系统实施了诸多生态保护修复工程,取得了显著成效。然而,这些生态保护修复工程多以单一类型的生态系统为保护修复目标,缺乏区域整体性、系统性考虑。2016 年在“山水田林湖草沙生命共同体”理念的指导下,中国开始从完整流域的视角出发,实施山水林田湖草生态保护修复工程(简称“山水工程”)。山水工程将山水林田湖草作为一个生命共同体,以生态系统服务功能提升为主要导向^[13-14]。党和国家高度重视山水工程在生态保护和生态系统修复中的作用,党的二十大报告指出要“坚持山水林田湖草沙一体化保护和系统治理,全方位、全地域、全过程加强生态环境保护”,2024 年 1 月颁布的《关于全面推进美丽中国建设的意见》也将“继续实施山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”作为推进美丽中国建设的一个重要举措。

现有关于山水工程的研究多以定性为主,集中于探讨山水工程的内涵意义^[15]、技术策略^[16]、战略路径^[17]、生态问题识别^[18]和成效评估技术^[19]等方面。部分研究虽然涉及定量评估山水工程成效,但主要关注于山水工程对生物量变化的影响,难以准确反映出山水工程在 ESV 提升上的整体效应^[20-22]。因为山水工程

以提升 ESV 为主要导向^[14],所以本研究利用工程实施前后的数据来量化山水工程对 ESV 的影响,可以有效地为工程修复成效提供科学的理论依据。

赣州市地处南岭山脉北麓,是中国生态安全战略格局中“两屏三带”的重要组成部分,2016 年被纳入全国首批 4 个山水林田湖草生态保护修复试点地,其山水工程经验做法入选国家生态文明试验区改革举措和经验做法推广清单。以赣州市为典型代表分析山水工程对 ESV 及权衡协同关系时空演变的影响具有典型代表性示范意义和现实迫切性。基于此,本文以赣州市山水工程为例,基于 2010—2022 年的 7 期土地利用数据,首先通过对比山水工程实施前(2010—2016 年)和实施后(2016—2022 年)的总体和分项 ESV 值,定量揭示山水工程对 ESV 时间变化的影响,并探讨土地利用类型变化对 ESV 时间变化影响的差异性;其次,采用空间分析方法定量评估山水工程对 ESV 空间分布和演化的影响,探讨工程实施对不同区域 ESV 空间变化影响的差异性;最后遵循生态系统可持续管理中“注重多种生态系统服务的协同提升”的理念,采用相关性分析法和地理加权回归定量揭示山水工程对 ESV 权衡协同关系的时间和空间影响,以期能客观、全面、科学地反映赣州市山水工程的 ESV 成效。研究不仅可为赣州市巩固山水工程生态修复成果,进一步推进美丽中国建设提供重要依据,也可为中国其他地区优化山水工程成效、推动生态文明建设提供参考和借鉴。

与已有成果相比,本文可能的边际贡献有以下两点:第一,不同于已有研究集中于评估山水工程对生物量变化的影响,难以准确反映出山水工程在 ESV 提升上的整体效应。本文以赣州市山水工程为典型代表,首次定量揭示山水工程的实施对赣州市 ESV 的时空影响,并探究不同土地利用类型转化对 ESV 影响的差异性,从而可以反映出山水工程的生态价值,推进山水工程成效评估在自然生态系统的进展。第二,不同种类生态系统服务之间存在此消彼长的权衡关系与相互增益的协同关系,除了评估山水工程对 ESV 总量的影响之外,揭示山水工程是否拥有促进协同弱化权衡、最大化 ESV 综合效益的作用可以更准确反映山水工程绩效^[23],因此本文首次将多种生态系统服务的权衡协同关系纳入山水工程的成效评估中,为调整相应决策平衡各 ESV 关系提出理论建议。

1 研究区概况

赣州市位于江西省南部,赣江上游,地理坐标为北纬 24°29′—27°09′、东经 113°54′—116°38′。全市共辖 3 个市辖区,13 个县和 2 个县级市,土地总面积约为 37379.64km²,占江西省面积的 23.6%,是江西省面积最大且人口最多的地级市。赣州市地处中亚热带南缘,属亚热带季风气候区,年平均气温 18.9℃,年降水量 1584mm。地貌以丘陵、山地为主,兼有盆地,地处南岭山脉北麓,是我国生态安全战略格局中“两屏三带”的重要组成部分,生态区位十分重要(图 1)。

2016 年赣州市被纳入全国首批 4 个山水林田湖草生态保护修复试点地之一。该工程根据赣州市面临的主要生态环境问题,构建以流域为导向的生态保护与修复工程布局,重点推进流域水环境保护与整治、矿山环境修复、水土流失治理、生态系统与生物多样性保护、土地整治与土壤改良等生态建设工程,全域范围内合计 13 个重大工程,共 63 个具体项目,项目总投资 192.45 亿。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文的数据来源具体有以下几类:(1)土地利用数据:来源于中国土地覆盖数据集(CLCD, <https://zenodo.org/records/8176941>),空间分辨率为 30m。本文提取了 2008 年、2010 年、2012 年、2014 年、2016 年、2018 年、2020 年、2022 年的 8 期赣州市土地利用数据,同时根据其土地利用分类和研究区实际情况提取耕地、林地、草地、水域、裸地、建设用地 6 类地类的分类结果。(2)其他矢量数据:植被净初级生产力(NPP)和多种卫星遥感数据反演植被指数(NDVI)数据均来源于 Google Earth Engine(GEE)数据平台(<https://code.earthengine.google.com/>),空间分辨率分别为 500m 和 1000m。研究区行政边界数据和 DEM 高程图数据来自

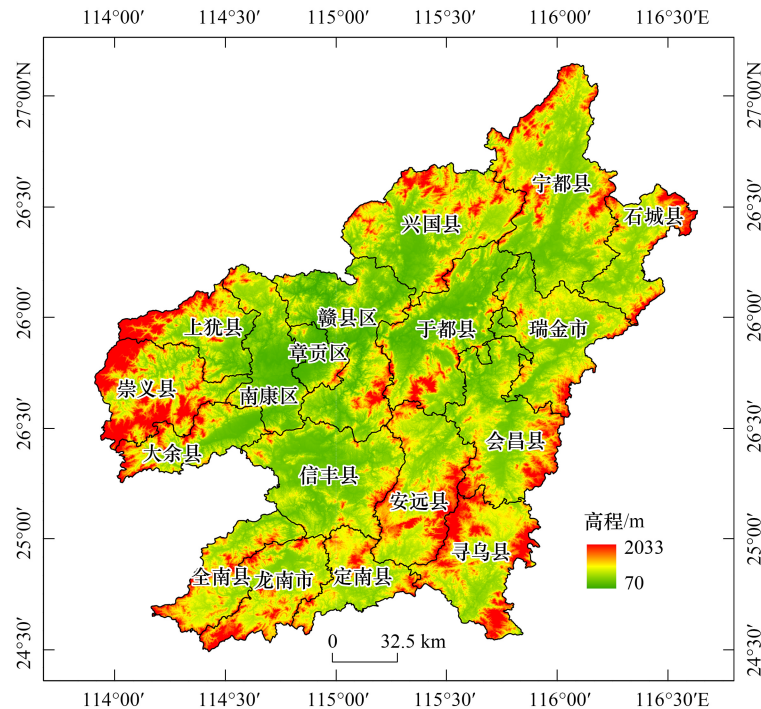


图1 赣州市地理位置示意图

Fig.1 Location map of Ganzhou City

于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>) 和江西省地理信息公共服务平台 (<http://www.jx3s.com/>)。(3)统计类数据:粮食种植面积与总产量数据来自于赣州市统计年鉴与江西省统计年鉴,江西省粮食平均出售价格及江西省居民消费价格指数分别来源于《全国农产品成本收益资料汇编(2008—2022)》和《江西统计年鉴》(2009—2022),赣州市生态情况相关数据来自于赣州市第三次全国国土调查主要公报数据 (<https://www.ganzhou.gov.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 ESV 测算:当量因子法

首先,基于谢高地等的当量因子表^[24],考虑赣州市实际生产能力,采用粮食产量修正方法,将当量基准由全国农田平均粮食产量调整为研究区的农田平均粮食产量^[25]。根据赣州市 2008—2021 年主要粮食作物产量、播种面积以及江西省主要粮食收购价格计算得到赣州市 1 个单位 ESV 当量因子的经济价值量为 1945.73 元 $\text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。其次,在确定 1 个单位 ESV 当量因子基础上,根据谢高地编订的各 ESV 当量系数,将土地利用类型中的耕地、林地、草地、水域、裸地分别与农田、森林加灌木、草地、水体及裸地类生态系统一一对应,并结合赣州市的生态环境情况进行修正,将土地利用类型中的建设用地对应非渗透地,建设用地 ESV 当量系数参考李晓赛等^[26]、高振斌等^[27]和邓元杰等^[28]的研究得到,最终得到赣州市单位面积 ESV 系数表(表 1)。

根据表 1 与各县不同土地利用类型面积计算得各县 ESV 值,如下式。

$$\text{ESV}_i = \sum_{j=1}^{18} \sum_{k=1}^6 L_{ijk} \times E_{ijk} \quad (1)$$

式中, ESV_i 代表 i 县的 ESV 值, L_{ijk} 表示 i 县的 j 土地类型, i 共有 18 个, E_{ijk} 表示 i 县的 j 种土地利用类型对应的生态系统服务价值系数。

然而,由于 ESV 与植被覆盖度高度相关,同一土地类型的 ESV 会随着植被覆盖程度和植被初级生产力情况不同而变化。为反映植被覆盖质量的影响,基于 NPP 和 NDVI 数据对各县市 ESV 进行修正。修正后的 ESV 较好地反映生态质量的时空动态变化,同时既保证了在空间宏观尺度上的可比性,也体现了区域内的差异性^[29]。系数修正公式为:

表 1 赣州市单位面积 ESV 系数 (ESV)/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Ecosystem service value coefficients of each land use type in Ganzhou City

生态服务功能 Ecosystem service		土地利用类型 Type of land use					
		耕地 Cropland	林地 Forest	草地 Grass	水域 Water	建设用地 Built-up land	裸地 Barren
供给服务 Provisioning service	食物生产	2546.96	582.26	579.83	1556.59	544.81	9.73
	原料生产	235.43	1335.84	859.92	447.52	583.72	29.19
	水资源供给	-4601.66	695.31	473.49	16130.13	-7218.67	19.46
调节服务 Regulating service	气体调节	2074.15	4415.16	3005.28	1498.21	0.00	126.47
	气候调节	1068.21	13206.47	7952.70	4455.73	0.00	97.29
	净化环境	317.15	3763.34	2628.30	10798.82	-4786.50	398.88
	水文调节	4815.69	6988.00	5826.79	198931.75	-10409.67	233.49
支持服务 Support service	土壤保持	217.92	5373.14	3662.36	1809.53	38.91	145.93
	维持养分循环	356.07	412.98	280.28	136.20	0.00	9.73
	生物多样性	393.04	4886.22	3333.72	4961.62	661.55	136.20
文化服务 Cultural service	美学景观	169.28	2142.15	1468.83	3677.44	2334.88	58.37

$$FVC_i = (NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \tag{2}$$

$$F_i = (FVC_i / FVC_{mean}) \tag{3}$$

$$N_i = (NPP_i / NPP_{mean}) \tag{4}$$

$$ESV_{ni} = ESV_i \times F_i \times N_i \tag{5}$$

式中, FVC_i 为 i 县的植被覆盖度; $NDVI$ 、 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 分别为归一化植被指数及其最大值、最小值; F_i 为 i 县的植被覆盖度修正系数; FVC_{mean} 为区域的平均植被覆盖度; N_i 为 i 县的生物量修正系数, NPP_i 和 NPP_{mean} 分别为 i 县植被净初级生产力及其平均值; ESV_{ni} 为 i 县经植被覆盖度和生物量修正后的 ESV。由于建设用地不属于自然生态地类, 因此建设用地 ESV 没有用 NPP 和 NVDI 修正。

2.2.2 ESV 价值变化贡献率

参考陈美锦等^[30]的研究, 建立土地利用变化对 ESV 贡献率指标, 即每一种土地利用类型转变导致的 ESV 变化在该时段总体 ESV 变化中的比率。如下式:

$$Z = \frac{(AESV_b - AESV_a) S}{\Delta ESV} \tag{6}$$

式中, Z 为 ESV 贡献率, $AESV_b$ 、 $AESV_a$ 分别表示每一种土地利用类型转换在研究期末和期初对应的单位面积 ESV; S 为该种土地利用类型转换的面积; ΔESV 表示研究期间所有土地利用类型转变所导致的 ESV 的总变化量。

2.2.3 ESV 权衡协同关系评价

参考李冬花等^[31]的研究, 采用相关分析法来衡量赣州市 2010—2022 年食物生产、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、生物多样性和美学景观 11 种生态系统服务之间的权衡与协同关系。若数值为正, 则表明两类生态系统服务之间具有协同关系, 反之则为权衡关系, 公式如下:

$$R_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})(q_i - \bar{q})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}} \tag{7}$$

式中, R_{pq} 为相关系数; p_i 、 q_i 为 p 、 q 的第 i 类生态系统服务价值; $\bar{p}$ 、 $\bar{q}$ 为 p 、 q 的平均值。

同时, 为了彰显不同生态系统服务权衡协同关系的空间分异特征, 根据丁亚鹏等^[32]的方法, 利用地理加权回归 (GWR) 模型对不同生态系统服务进行分析, 能较好地考虑权衡协同关系的空间异质性, 结果更精准和

细致。公式如下:

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^K \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (8)$$

式中, (u_i, v_i) 表示点 i 的空间位置; $\beta_0(u_i, v_i)$ 表示在 i 的截距; X_{ik} 为独立变量; ε_i 为残差; $\beta_k(u_i, v_i)$ 为回归系数, 数值大小表示强度的强弱, 正值表示生态系统服务在空间上为协同关系, 负值则为权衡关系。

3 山水工程对赣州市 ESV 时空演变特征的影响

3.1 山水工程对 ESV 时间变化的影响

图 2 展示了 2010—2022 年赣州市的 ESV 总体变化情况以及山水工程实施前 (2010—2016 年) 和实施后 (2016—2022 年) 赣州市 ESV 的变化量和幅度。从中可以看出, 2010—2022 年赣州市 ESV 总体呈下降的趋势, 但山水工程实施后, 赣州市 ESV 持续下降的情况得以改变, 其中 2020—2022 年 ESV 甚至有所回升, 说明实施山水工程能有效扭转赣州市 ESV 恶化趋势, 改善其区域生态系统服务质量。具体来说: 山水工程实施前赣州市 ESV 总量下降了 26.27 亿元, 下降幅度为 1.72%, 而山水工程实施后赣州市 ESV 总量下降了 21.46 亿元, 降幅仅为 1.41%。同时, 2020—2022 年间赣州市 ESV 总量出现上涨的势头, 从 1466.70 亿元增加到 1473.45 亿元, 上升了近 7 亿元, 增幅约为 0.005%。

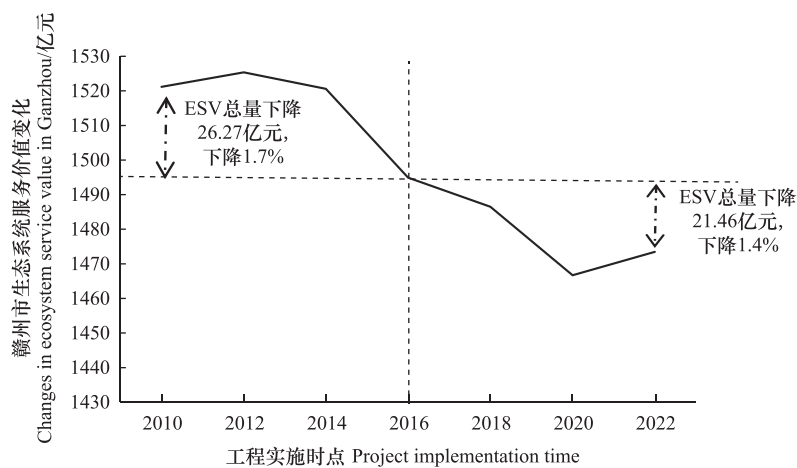


图 2 2010—2022 年赣州市生态系统服务价值 (ESV) 变化情况

Fig.2 Ecosystem service value changes of Ganzhou City from 2008 to 2022

从 11 个单项 ESV 变化来看 (图 3), 除了食物生产和水文调节服务外, 赣州市山水工程的实施能够有效遏制原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等其他 9 类 ESV 的下降趋势, 生态改善效果提升明显。具体来说: 气候调节服务在山水工程实施前后的均值增加最多 (4.84 亿元), 增幅 66.89%; 土壤保持服务增加量第二 (2.04 亿元), 增幅 51.93%; 生物多样性服务增加量第三 (1.65 亿元), 增幅 50.09%。其余各项增量大小依次为气体调节 (1.16 亿元)、净化环境 (0.94 亿元)、水资源供给 (0.78 亿元)。从增长率来看, 增长最快的是维持养分循环 (158.23%) 和气体调节 (66.34%)。然而, 水文调节服务和食物生产服务在山水工程实施前后的变化量分别下降了 7.10、0.53 亿元, 降幅分别为 10785.77% 和 33.22%。水文调节的大幅下降极大地阻碍了赣州市 ESV 的提升, 赣州市政府应加强对水域生态系统的保护, 改善生态系统水文调节服务状况。同时, 食物生产服务也有小幅度的下降, 政府应关注耕地系统的改变, 鼓励退耕还湖还林还草等更合理、更绿色的土地空间利用, 同时审慎占用耕地建设, 协同食物供给和生态修复目标。

3.2 山水工程对 ESV 时间变化影响的因果关系识别

上述山水工程实施前后的统计描述分析得出: 山水工程实施后赣州市 ESV 恶化的趋势得到了扭转。但

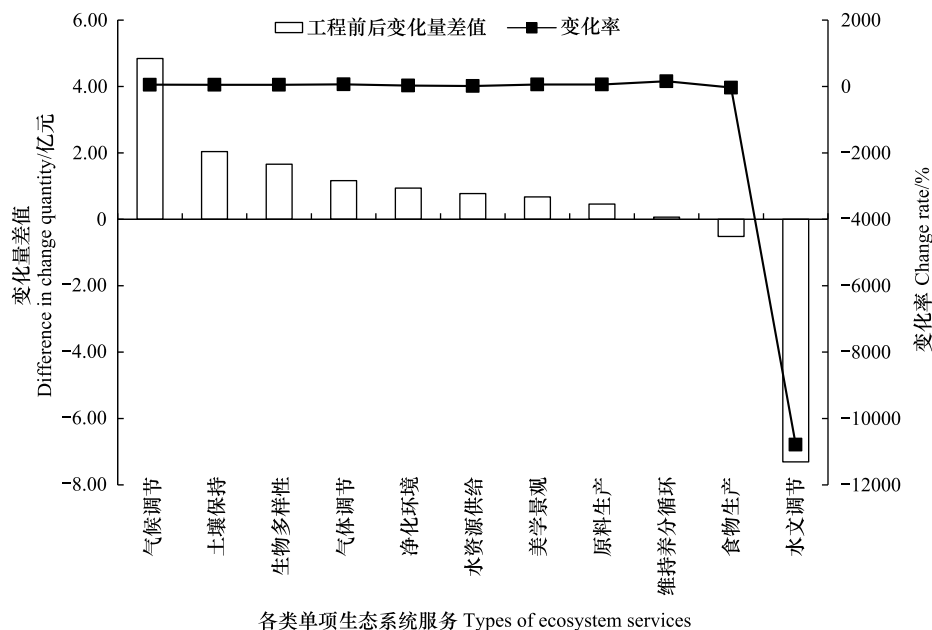


图3 山水工程实施前后各单项生态系统服务变化量差值以及变化率

Fig.3 Change amount and change rate of ecosystem service value before and after the implementation of the shanshui project

是 ESV 变化的影响因素包括自然环境、人文干预等多种因素,简单的工程实施前后数据的直接比较无法排除其他因素对 ESV 的影响,需要进一步识别山水工程对赣州市 ESV 的因果关系,从而确定山水工程到底对赣州市 ESV 能产生多大的提升作用。为此,本文进行了如下两项工作。

使用文本分析方法,基于国家、江西省和赣州市各级政府官网以及北大法宝网,检索了山水工程实施期间(2010—2022 年间)国家和地方实施的可能对赣州市 ESV 有影响的土地管理、生态保护和环境保护政策,以排除其他政策对赣州市 ESV 的影响。归纳得出相比于山水工程实施前(2010—2016 年),山水工程实施后(2016—2022 年)对 ESV 可能产生影响的有新政策有:①2015 年国务院颁布的关于水污染防治的通知,2018 年国家正式提出的蓝天保卫战、碧水保卫战和净土保卫战等生态环境保护三大战役,2019 年实施的生态环境保护督察制度以及河长制政策。但是这些政策主要影响的是空气、水和土壤保护,对以林地和草地为主的赣州市 ESV 变化贡献较小。②2017 年 12 月赣州市颁布的《赣州农村农民住房管理条例》。但该条例仅涉及农村宅基地扩张限制,对赣州市 ESV 变化影响较小。③2017 年开始的赣州市山水工程首批 28 个建设项目,2021 年颁布的赣州市统筹山水工程继续推进方案等政策。这两个政策都是在山水工程的推动下形成的新政策,内容主要是低效林改造项目、森林提升项目以及国土绿化,有力地促使林地和草地地类的生态恢复,从而扭转了赣州市 ESV 下降的趋势。以上政策文本的分析可以一定程度上反映出山水工程对赣州市 ESV 的直接影响。

借鉴经济学中的经典因果推断方法——双重差分方法(Difference-in-differences,简称 DID)^[33-34],实证检验赣州市山水工程对其 ESV 的影响。具体而言,将赣州市所有县域定义为处理组,具体包括安远县、崇义县、大余县、定南县、赣县区、会昌县、龙南市、南康区、宁都县、全南县、瑞金市、上犹县、石城县、信丰县、兴国县、寻乌县、于都县、章贡区等 18 个县域单元,而将江西省其他 81 个县域设为对照组(剔除了红谷滩区)。通过处理组和对照组县域的对比来评估赣州市山水工程对 ESV 的“净效应”。模型具体设定如下:

$$ESV_{it} = \beta_0 + \beta_1 shanshui_t \times T + \beta_2 control_{it} + \eta_t + \mu_i + \varepsilon_{it} \quad (9)$$

式中, ESV_{it} 为被解释变量,表示各县 i 在 t 年的 ESV; $shanshui_t$ 为是否属于处理组,即山水工程的试点县,试点县=1,非试点县=0。 T 表示政策实施年份的虚拟变量,即 2016 年之前为 0,2016 年及以后为 1。 β_1 表示山水

工程对 ESV 的净效应,若 β_1 为正,表示山水工程能够提升 ESV,反之则不能。 $control_{it}$ 为控制变量; η_i 和 μ_t 分别为控制县级固定效应和时间效应的虚拟变量,分别控制县级不随时间变化的影响因素以及特定年份的宏观影响因素; ε_{it} 为随机扰动项。

表 2 展示了赣州市山水工程的实施对 ESV 的影响效应。可以发现无论是否加入影响 ESV 的其他控制变量,核心解释变量山水工程的估计系数均显著为正,这说明山水工程确实能够显著提高赣州市的 ESV。在进行平行趋势检验、安慰剂检验、倾向得分匹配(PSM-DID)方法、反事实检验以及排除极端值等稳健性检验后,该结论仍然依然成立,说明山水工程确实是促进赣州市 ESV 的主要因素。

表 2 基于 DID 模型的山水工程对 ESV 的影响估计

Table 2 Regression results of shanshui projects on ESV based on DID model

变量 Variables	平均效应 Average effect		动态效应 Dynamic effect
	(1)	(2)	(3)
山水工程 Shanshui project	0.035 *** (0.010)	0.041 ** (0.020)	
山水工程实施前 4 期 4 th term before shanshui project			-0.009(0.020)
山水工程实施前 3 期 3 rd term before shanshui project			-0.010(0.012)
山水工程实施前 2 期 2 nd term before shanshui project			-0.015(0.013)
山水工程实施当期 Current term of shanshui project			-0.010(0.009)
山水工程实施后第 1 期 1 st term after shanshui project			0.046(0.038)
山水工程实施后第 2 期 2 nd term after shanshui project			0.083 *(0.048)
山水工程实施后第 3 期 3 rd term after shanshui project			0.035 *** (0.013)
经济发展水平 Economic development level		0.071 (0.072)	0.062(0.076)
农业发展水平 Agricultural development level		0.070 ** (0.029)	0.070 ** (0.029)
工业发展水平 Industrial development level		-0.044(0.049)	-0.043(0.047)
政府财政收入 Government revenue		-0.015(0.014)	-0.022(0.016)
政府财政支出 Government expenditure		0.017(0.017)	0.017(0.017)
消费能力 Consumption capacity		0.063(0.261)	0.066(0.055)
县级固定效应 County fixed effect	是	是	是
时间固定效应 Time fixed effect	是	是	是
R^2	0.997	0.996	0.996
样本量 Observations	792	792	770

*** 表示在 1%水平显著, ** 表示在 5%水平上显著, * 表示在 10%水平上显著;DID: 双重差分模型 Difference-in-differences

3.3 山水工程导致 ESV 时间变化的原因:不同土地利用类型的变化

上一节已证明山水工程的实施有利于缓解赣州市整体 ESV 和 9 类单项 ESV 的恶化趋势,这一节从土地利用类型转换的角度来计算土地利用类型变化对这种缓解作用的贡献程度。

图 4 展示了山水工程实施前后赣州市不同类型土地 ESV 的变化量和变化率情况。可以发现:山水工程对不同土地类型 ESV 变化的影响差异较大,其能够显著提升林地、草地与裸地的 ESV,但是会显著降低水域、耕地和建设用地的 ESV。具体而言,山水工程实施后(2016—2022 年),林地 ESV 变化量比工程前上涨了约 17 亿元,涨幅为 53.43%,其中,仅 2020—2022 年间,林地 ESV 就大幅上涨了 11 亿元;草地和裸地 ESV 变化量在工程实施后比工程前分别上涨了 0.81 亿元和 0.001 亿元,涨幅分别为 54.62%和 75.70%;而水域、耕地和建设用地 ESV 变化量在工程实施后则比工程前分别下降了 10.82 亿元、2.06 亿元和 0.01 亿元,降幅分别为 281.62%、35.73%和 3.72%。

造成上述山水工程对不同土地类型 ESV 变化影响差异较大的主要原因在于山水工程实施前后土地利用类型发生了显著改变。如表 3 所示:山水工程的实施大幅度减少了林地和草地的流失程度,从而使林地和草地的 ESV 增加。具体而言,山水工程的实施促使林地和草地净损失面积分别下降了 231.57km²和 31.31km²,减少了林地和草地的流失程度。

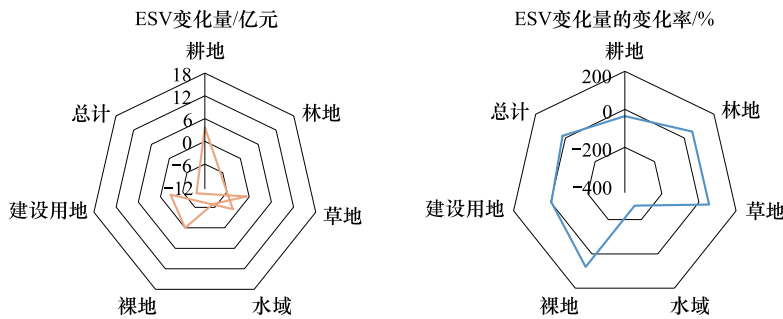


图 4 山水工程实施前后赣州市各土地类型 ESV 变化量和变化率

Fig.4 Change amount and change rate of ESV for different land types in Ganzhou before and after the implementation of the shanshui project

表 3 山水工程实施前后不同土地类型变化面积/km²

Table 3 Changes in area of different land types before and after the implementation of shanshui project

变量 Variables	山水工程实施前的净变化量 The net change before the implementation of the shanshui project	山水工程实施后的净变化量 The net change after the implementation of the shanshui project	实施前后的差值 Difference before and after implementation
林地 Forest	-773.62	-542.06	231.57
草地 Grass	-53.61	-22.30	31.31
建设用地 Built-up land	143.40	148.79	5.39
耕地 Cropland	671.50	445.51	-225.99
水域 Water	13.19	-29.78	-42.97
裸地 Barren	-0.86	-0.18	0.68

进一步计算不同土地利用类型之间的转化对 ESV 时间变化的贡献率,如表 4 所示。可以发现:

(1) 林地的转入是赣州市 ESV 增加的主要原因。山水工程实施后,赣州市积极推动林地的转入耕地、草地、建设用地、裸地持续转化为林地,导致林地转入总和对赣州市 ESV 增加的贡献率达到 56.92%,占比高达 76.05%;同时山水工程实施以来,林地在赣州市生态保护中的生态效应与生态地位不断提升,通过实施退耕还林工程及采取补植补造、抚育改造、封育改造、更新改造等方式,改善了赣州市的林地系统生态^[35]。

(2) 耕地、建设用地的持续扩张与水域的持续转出是阻碍山水工程后赣州市 ESV 提高的主要原因。具体而言,耕地的持续扩张是赣州市 ESV 增加的首要阻碍因素:山水工程实施后,林地、草地、水域持续转化为耕地,导致耕地转入总和对赣州市 ESV 减少的贡献率达到-152.02%,占比高达 81.54%;水域系统遭到破坏性开发是赣州市 ESV 增加的第三阻碍因素:山水工程实施后,水域持续转化为耕地、建设用地、林地、草地、裸地,导致水域转入总和对赣州市 ESV 减少的贡献率之和为-23.45%,占比达 13.41%,水域的总转出比转入对 ESV 的变化贡献率多了 5.97%。说明,水域遭到破坏性开发不仅遮掩了水域生态改善的效果,还对赣州市生态环境改善造成了一定阻碍。建设用地的持续扩张是赣州市 ESV 增加的第三阻碍因素:山水工程实施后,林地、耕地、水域、草地、林地、裸地持续转化为建设用地,导致建设用地转入总和对赣州市 ESV 减少的贡献率达到-21.26%,占比高达 12.16%。造成这种现象的主要原因在于:赣州市在推进山水工程的同时也面临着“城镇化”和粮食“保供”双重目标的约束。为了推进城镇化进程,需要扩张建设用地规模,而为了保障粮食供应安全,落实 18 亿亩耕地红线保护责任,需要不断增加新的耕地面积^[36],这种形式导致赣州市生态空间被不断挤占,尤其是大量湿地、湖泊被转化为耕地和建设用地,ESV 出现一定程度的下降。

3.4 山水工程对赣州市 ESV 空间格局变化的影响

为揭示山水工程对 ESV 空间格局变化的影响,本文以渔网生成的 5km×5km 栅格单位为尺度,获得赣州

市 1818 个单元的 ESV 数据,然后运用自然邻域法插值得到赣州市 2010、2016、2022 年三个年度各单元的 ESV,计算山水工程实施前后两个阶段 ESV 变化量,最后运用自然断点法将两个阶段 ESV 的变化量划分为 5 个等级,如图 5 所示,从中可以发现:

表 4 山水工程实施前后土地利用转型的生态系统服务价值贡献率

Table 4 The contribution rate of land use transformation in ESV before and after the implementation of shanshui project						
各土地转移类型 Types of land use transformation	导致 ESV 增加的土地利用转移类型 Types of land use transfers leading to an increase in ESV			导致 ESV 减少的土地利用转移类型 Types of land use transfers leading to a decrease in ESV		
	贡献率/%	占比/%		贡献率/%	占比/%	
各土地转移类型 Types of land use transformation	耕地-林地	56.31	75.23	林地-耕地	-133.50	76.35
	草地-林地	0.61	0.82	水域-耕地	-16.60	9.49
	建设用地-林地	0.00	0.00	草地-耕地	-1.92	1.10
	裸地-林地	0.00	0.00	林地-建设用地	-4.62	2.64
	耕地-水域	5.59	7.47	耕地-建设用地	-10.62	6.07
	建设用地-水域	9.97	13.31	水域-建设用地	-5.39	3.08
	草地-水域	1.72	2.30	草地-建设用地	-0.61	0.35
	林地-水域	0.09	0.12	裸地-建设用地	-0.01	0.01
	裸地-水域	0.12	0.15	水域-林地	-1.05	0.60
	耕地-草地	0.39	0.52	水域-裸地	-0.39	0.23
	裸地-草地	0.03	0.04	林地-裸地	-0.09	0.05
	建设用地-草地	0.00	0.00	草地-裸地	-0.03	0.01
	建设用地-耕地	0.02	0.02	水域-裸地	-0.02	0.01
	裸地-耕地	0.01	0.01	耕地-裸地	0.00	0.00
	建设用地-裸地	0.00	0.00	林地-落地	0.00	0.00
	总和	74.85	100.00	总和	-174.85	100.00
	林地转入贡献之和	56.92	76.05	耕地扩张贡献之和	-152.02	81.54
	水域转入贡献之和	17.48	23.35	建设用地扩张贡献之和	-21.26	12.16
	草地转入贡献之和	0.42	0.56	水域转出贡献之和	-23.45	13.41

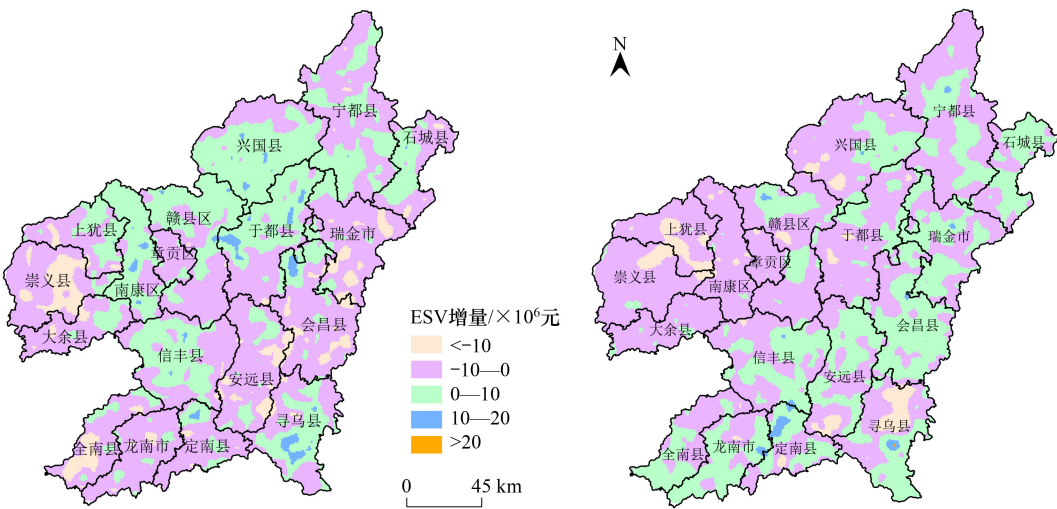


图 5 山水工程实施前后赣州市 ESV 空间格局变化情况

Fig.5 Spatial pattern changes of Ganzhou's ESV before and after the implementation of shanshui project

(1) 山水工程的实施导致实施前的低值区域——赣东区域的会昌县、瑞金市和安远县,赣南的信丰、龙

南、全南和定南县,ESV 扭降为升。原因在于:这些地区较好地实施了山水工程,尤其是矿山的整治和森林的改造培育,从而推动了林地的保护性转化,ESV 得到显著提升。例如,会昌县创新矿山治理项目,采用“政府+高校+央企”模式,成功招投标并实施了 60 个矿山生态修复项目,修复面积达 1.04km^2 ,显著推动了 ESV 的提升。瑞金市通过开展林业重点工程和荒山荒地造林,完成造林绿化 34km^2 。安远县通过成立生态保护基金会和实施 12 个生态保护项目,建立了有效的生态保护治理机制,加大了水资源保护力度,显著改善了生态环境。信丰县投资 8.29 亿元实施山水工程,涵盖了土壤改良、矿山修复、水土保持、珍稀植物资源保护等多个项目,有效提升了土壤质量、减少水土流失、改善水环境并减少地质灾害,完成了 29.85km^2 的废弃稀土矿山治理,种植大量绿化植被,大幅增加了植被面积,从而促进了林地的增加和生态系统服务价值的提升。龙南县则专注于国土绿化试点示范项目,近三年完成造林面积 16km^2 ,超额完成计划任务的 154.64%,实施了赣江源区综合治理生态修复项目,完成了 147.13km^2 的低质低效林改造工作,还深入开展全民义务植树活动,三年内参与人数达 51.77 万人次,植树 234.18 万株,义务植树尽职率达到 87.28%。这些举措不仅增加了林地面积,也为 ESV 的增长做出了重要贡献。定南县则重点着力于水环境保护,推动洋前坝水库工程开工建设,全面推进城乡污水处理设施管网一体化建设,不断提升城乡污水收集、处理能力,在城区完成污水管网改造升级项目建设,实现日处理污水 2.5 万 t,污水处理率达 98%,处理后的污水排放水质达到一级 A 标准。作为国家重点生态功能区域县,全南将山水林田湖草作为生命共同体,筑牢生态安全屏障。划定生态、耕地、水资源保护“三条红线”,对 506km^2 生态保护红线范围空间实行严格管控。执行严格耕地保护制度,连续 21 年实现耕地占补平衡有余,超 1km^2 露天废弃矿山重披绿装,森林覆盖率稳定在 83.39% 以上。跻身省级生态文明示范县。

(2) 山水工程的实施也使得实施前的中值区域——赣西区域的上饶县、大余县、赣中区域的南康区、章贡区、赣县区 ESV 出现了小幅下降态势。可能的原因在于:赣西的上饶、大余是赣州市的农业大县,为了保持粮食的供给,这些区域大幅开垦耕地(例如仅 2022 年上饶县耕地面积就增加 1.16km^2),从而使得这些区域的其他生态保护用地被转化为耕地,ESV 下降。而赣中的南康区、章贡区、赣县区等区域处于城市建设中心及临近区域,属于赣州市中心城区,经济发展与城市化高速扩张的双重压力致使这些区域的各地生态用地被大规模占用建设,ESV 下降。

4 山水工程对 ESV 权衡协同关系的影响

4.1 山水工程对 ESV 权衡协同关系的时间影响

山水工程实施的目标不仅在于提升 ESV 总量,还需要弱化各单项生态系统服务之间的权衡并促进其协同增益,以保持区域内 ESV 综合效益最大化。为此,本文基于赣州市 1818 个 $5\text{km}\times 5\text{km}$ 的基本栅格单元,以工程实施时间为间隔点,对 2010—2016 年、2016—2022 年两个时间段各单项生态系统服务的权衡协同关系进行测算,结果如图 6 所示。从中可以发现:

(1) 不论是山水工程实施前还是后,赣州市各单项生态系统服务几乎都呈现为正相关的协同关系,仅食物生产服务与其他服务间的关系多表现为负相关的权衡关系。生态系统服务的权衡产生于人类对特定生态系统服务的消费极大化^[31]。在粮食安全的刚性约束下,赣州地区在进行食物生产时由于不合理的耕作方式等因素,对水资源供给、土壤保护、生物多样性、美学景观等生态系统服务造成影响,从而造成了两者的权衡关系。不合理的耕作方式包括:将山地丘陵地带的一些陡坡被开垦为耕地进行农业开发和耕作,从而容易导致水土流失,影响土壤的肥力和水资源的保持^[37];将湿地和草地等生态地类开垦为耕地,从而导致土壤肥力下降,生物多样性减少,同时也增加了水资源的需求和土壤侵蚀的风险;农业生产中过量或不当地使用化肥和农药,对土壤和水资源生态系统服务功能产生影响^[38]。以上诸多行为均会加重食物生产的权衡关系,未来应注重协同推进粮食安全和生态系统保护。

(2) 山水工程的实施进一步增强了大部分单项生态系统服务之间的正相关协同关系。其中,水文调节和气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性及美学景观的正相关协同关系都有所增

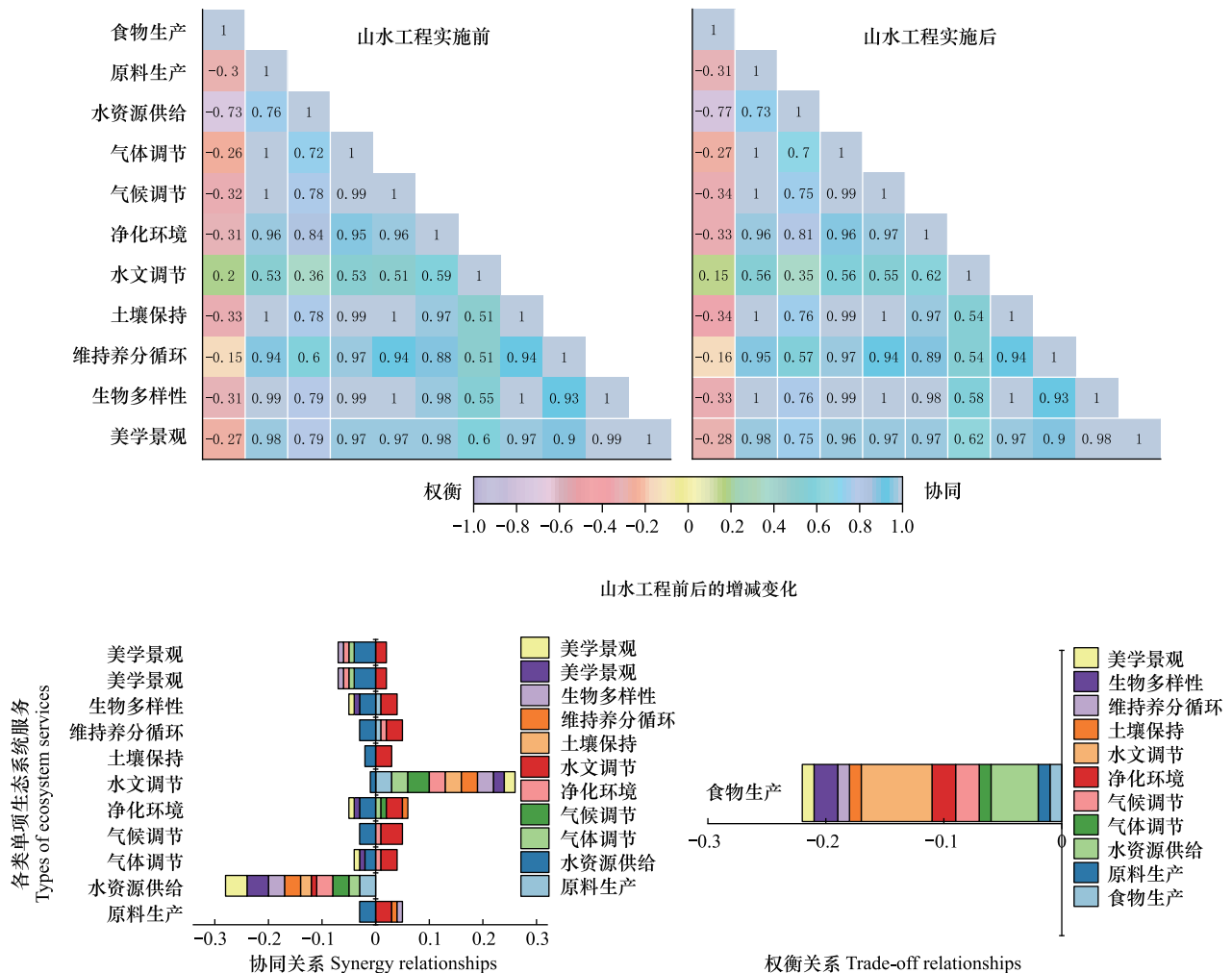


图6 山水工程实施前后各生态系统服务权衡协同关系与增减变化图

Fig.6 Changes in trade-offs and synergies of different ecosystem services before and after the shanshui-project

加,原料生产与水文调节、维持养分循环及生物多样性的正相关协同关系也有所增加。可能的原因在于:赣州市在山水工程实施过程中积极在全域大范围实施低质低效林改造工程、开展水土保持综合整治工程,在东江水源、章江水源和桃江水源等地设立水源涵养保护区等措施。这些措施有助于提高生态系统对水文调节、气体调节、气候调节等服务的提供能力,有助于改善水土流失状况、促进原料供给,从而促进了这些服务之间的协同。

(3) 山水工程的实施降低了水资源供给与其他服务之间的正相关协同关系。可能的原因在于:赣州市山水工程的实施中对湿地、湖泊等水域的重视程度不足。尽管赣州市多地开展了河道整治和水源治理工程,但这些措施未能充分考虑到湿地和湖泊在生态系统服务中的重要作用,缺乏对湿地、湖泊的有效保护,致使湿地和水域系统转化为耕地和建设用地,影响了水资源供给能力,造成其与其他系统协同关系降低。

4.2 山水工程对 ESV 权衡协同关系的空间影响

上节已证明从总体上而言,山水工程的实施能够显著促进水文调节和气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性及美学景观,原料生产与水文调节、维持养分循环及生物多样性的正相关协同关系,并降低水资源供给与其他服务之间的正相关协同关系。这一部分拟进一步找出山水工程对 ESV 权衡协同关系的这种影响在不同地区空间层面的变化情况。结果如图 7 所示,从中可以发现:

(1) 山水工程的实施提高了赣南的全南、龙南、信丰、安远、定南、寻乌等县和赣北的宁都县、赣西的崇义

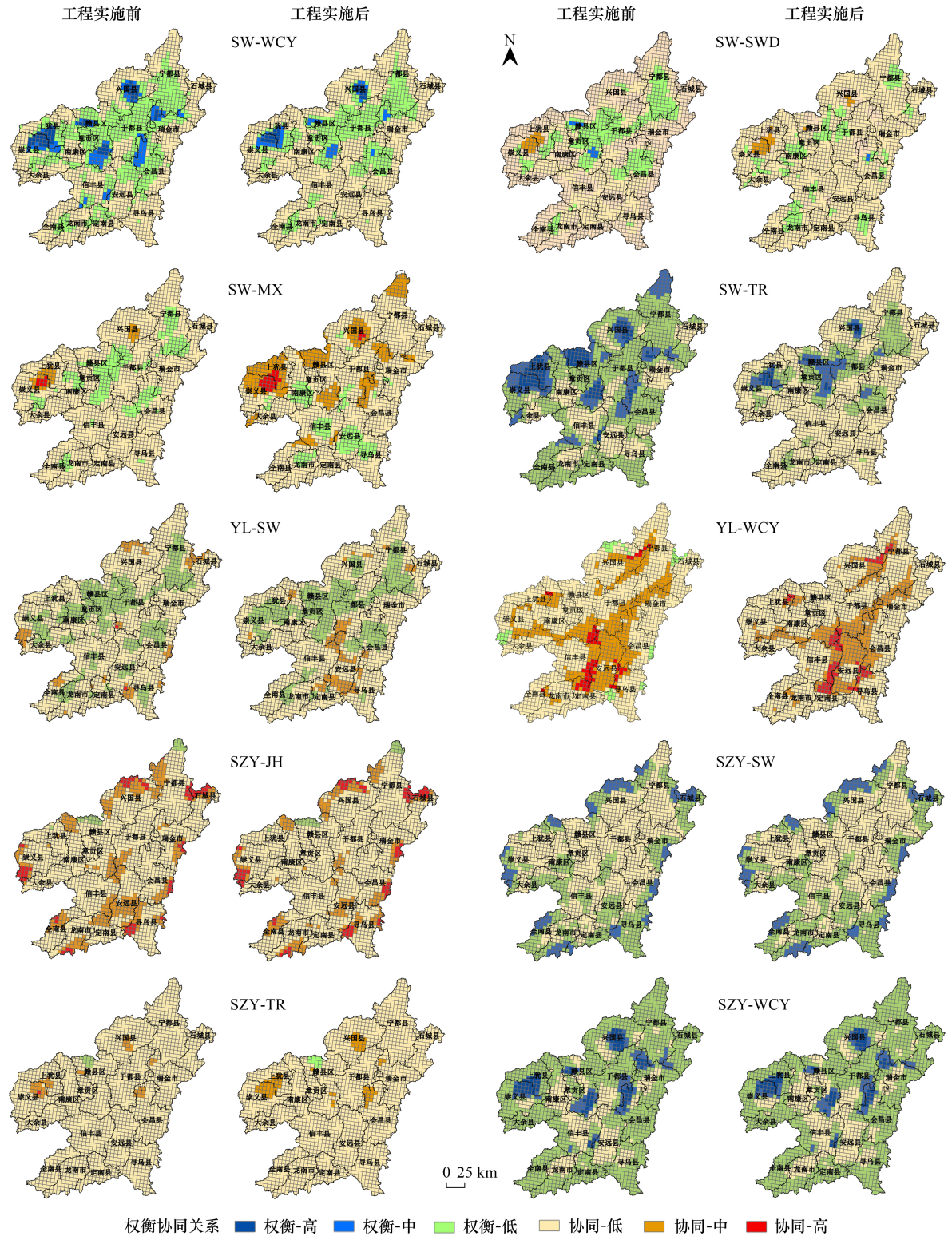


图 7 山水工程实施前后各生态系统服务协同权衡关系的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of trade-offs and synergies among different services before and after the implementation of shanshui project
YL-SW:原料生产与水文调节;Raw material production-Hydrologic regulation;SWD:生物多样性 Biodiversity;MX:美学景观 Aesthetic landscape;
TR:土壤保持 Soil conservation;WCY:维持养分循环 Maintaining nutrient cycling;JH:净化环境 Purify the environment

县等地区水文调节与维持养分循环、土壤保持、生物多样性的协同关系,提高了赣中、赣北以及赣东的会昌县、瑞金市和于都县的水文调节与美学景观的协同关系。可能的原因在于:赣南地区、兴国、崇义等地区在山水工程过程中实施了水土流失综合治理工程,例如水生态保护与修复工程、赣州市国家水土保持重点工程、生物多样性保护工程等,这些措施极大地改善了这些地区的地表水土涵养情况和植被情况,从而增进了水文调节与土壤保持、维持养分循环等功能的协同增益。而会昌县、瑞金市、安远县等地则实施了大量矿山整治工程、国土绿化试点工程、森林公园项目这些工程增加了土地景观美化,促进了水文调节与美学景观的协同增益。

(2) 山水工程的实施提高了赣南的寻乌、安远、信丰等县,赣北的兴国、崇义等县的原料生产与维持养分循环、水文调节之间的协同关系。可能的原因在于赣北这些区域是赣州市的农业重点区域,通过实施全域土地整治以及高标准农田推进工程,极大地增强了原料生产能力,而赣南等县山水工程实施良好,生态恢复情况较好,促进了原料生产与水文调节功能、维持养分循环功能的协同增益。

(3) 山水工程的实施降低了安远、上饶、赣县、兴国、于都等县的水资源供给与其他服务之间的协同关系。可能的原因在于:上述地区在开展山水工程时,对于湿地、湖泊的水域系统的保护力度不够,并且上述地区多为人口稠密地区,水资源消耗力度大,从而导致水域系统水供给能力不足,造成了水资源供给服务与其他服务协同关系的降低。

5 结论与建议

5.1 结论

(1) 山水工程的实施能有效扭转赣州市 ESV 总量下降的趋势。13 年间赣州市 ESV 共下降了 47.72 亿元,但是 ESV 在工程实施后比实施前少下降了 4.80 亿元。在单项 ESV 变化方面,除了食物生产和水文调节服务外,赣州市山水工程的实施能够有效遏制原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等其他 9 类 ESV 的下降趋势,生态改善效果提升明显。

(2) 山水工程的实施能促使赣州市 ESV 下降减缓的主要原因在于山水工程的实施减少了林地和草地的流失程度,林地和草地净损失面积在工程实施后分别下降了 231.57km² 和 31.31km²。但是耕地、建设用地的持续扩张与水域遭到破坏仍然阻碍了赣州市 ESV 的提升。

(3) 山水工程的实施对不同区域 ESV 的影响具有差异性,其导致实施前的低值区域——赣东区域的会昌县、瑞金市和安远县,赣南的信丰、龙南和定南县,ESV 扭降为升,但是也使得实施前的中值区域——赣西区域的上饶县、大余县、赣中区域的南康区、章贡区、赣县区的 ESV 出现了小幅下降态势。

(4) 赣州市各单项生态系统服务之间以协同关系为主,山水工程的实施进一步增强了大部分单项生态系统服务之间的协同关系,尤其是水文调节、原料生产与其他服务之间的协同关系增益明显,但水资源供给与其他服务之间协同关系在工程实施后出现了降低趋势。

(5) 山水工程实施后,水文调节与其他服务之间协同关系增益相对较多的地区分布在赣南的寻乌、信丰、定南等县、赣西的崇义县、赣北的兴国市以及赣东的会昌县、瑞金市和安远县,原料生产与维持养分循环的协同关系增益相对较多的地区分布在赣北地区,水资源供给与其他服务间的协同关系降低较多的地区分布在安远、上饶、赣县、兴国、于都等县。

(6) 本文基于山水工程实施前和实施后的数据,定量揭示了山水工程对 ESV 时空变化和权衡协同关系的影响,得到了一些有价值的结论,但仍存在以下局限性:首先,由于数据资料的缺乏以及山水工程实施年限较短的限制,本文仅评估了山水工程对 11 项生态系统服务价值的影响,未考虑到因山水工程实施而带来的人类休闲娱乐服务等文化服务价值以及物质产品价值的提升,因此,赣州市山水工程的 ESV 提升效果应高于本研究结果。其次,本文仅采取当量因子法和土地利用类型变化来评估山水工程的成效,可能存在指标选取相对主观,难以反映山水工程实施对同一土地利用类型生态功能的影响等缺陷。此外,本文未能采取点位实测数据进一步支撑研究结论。未来的研究可以基于更丰富的测量技术对数据进行进一步收集与测算,以更深入地

探讨山水工程对生态系统服务在量和质两个方面的综合影响。

5.2 建议

提高山水工程的生态保护和修复成效是我国生态文明建设的一项重要举措。基于上述研究结论,提出如下建议:(1)进一步加强对水域系统的保护。本文的分析结果表明赣州市山水工程的实施没有遏制水文调节服务的 ESV 下降趋势,同时也降低了水资源供给与其他服务之间的协同关系。这说明赣州市水域生态系统下行压力仍较大,需加强对水域系统的保护。可以采取实施水域生态保护建设工程,加大对湿地与湖泊的相关保护工作的宣传力度,提升民众对湿地与草地的保护意识,增强水域系统的抗干扰能力等措施。(2)在耕地系统方面,协调好生态系统保护和粮食安全两大目标的推进。本文结果发现,山水工程的实施没有遏制食物生产服务的 ESV 下降趋势,且耕地的持续扩张对赣州市 ESV 减少的占比高达 80%。因此,未来的山水工程建设过程中,地方政府应在确保粮食安全底线的同时,重视其他生态系统服务的生态恢复和重建工作,形成统一的政策框架和行动计划,以协同推动粮食安全和生态系统保护的共同发展。应进一步协调生态保护与粮食供给目标,推动农业向绿色、高效、现代化方面发展,破解当前生态环境与经济发展和食物供给之间的难题。(3)不同地区采取因地制宜的山水工程实施方案。例如,赣中地区由于经济发展与城市化高速扩张的双重压力致使生态用地被大规模占用,ESV 在山水工程实施后反而出现了下降态势,该地区需要加强城市化和生态保护的协调;而赣西地区大部分为农业大县,为了保持粮食供给而大幅开垦耕地,从而导致 ESV 在山水工程实施后出现了下降态势,该地区需要加强粮食安全和生态保护的统筹推进。

参考文献(References):

- [1] Postel S, Bawa K, Kaufman L, Peterson C H, Carpenter S, Tillman D, Dayton P, Alexander S, Lagerquist K, Goulder L. *Nature's services: societal dependence on natural ecosystems*. Island Press: Washington, DC, USA, 2012.
- [2] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 1997, 387(1): 253-260.
- [3] Ouyang Z Y, Song C S, Zheng H, Polasky S, Xiao Y, Bateman I J, Liu J G, Ruckelshaus M, Shi F Q, Xiao Y, Xu W H, Zou Z Y, Daily G C. Using gross ecosystem product (GEP) to value nature in decision making. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(25): 14593-14601.
- [4] 魏之首, 关燕宁, 蔡丹路, 张春燕, 姚武韬, 廖周伟, 邓锐, 钱佳琪, 夏亦寒, 郭杉. 基于改进型遥感生态指数的生态系统服务价值评估方法. *地球信息科学学报*, 2024, 26(7): 1763-1778.
- [5] Li J, Ren Z Y. Changes in ecosystem service values on the Loess Plateau in northern Shaanxi Province, China. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(5): 606-614.
- [6] Li F, Ye Y P, Song B W, Wang R S, Tao Y. Assessing the changes in land use and ecosystem services in Changzhou municipality, Peoples' Republic of China, 1991—2006. *Ecological Indicators*, 2014, 42(1): 95-103.
- [7] Chen R, Huang C B. Landscape evolution and its impact of ecosystem service value of the Wuhan City, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(24): 13015.
- [8] Fu H W, Yan Y D. Ecosystem service value assessment in downtown for implementing the "Mountain-River-Forest-Cropland-Lake-Grassland system project". *Ecological Indicators*, 2023, 154(10): 110751.
- [9] 白晓永, 张思蕊, 冉晨, 吴路华, 杜朝超, 代磊, 杨兴艺, 李姿霖, 薛盈盈, 龙明康, 李明会, 杨姝, 罗青, 张小芸, 沈晓倩, 陈飞, 李琴, 邓元红, 胡泽银, 李朝君. 我国西南喀斯特生态修复的十大问题与对策. *中国科学院院刊*, 2023, 38(12): 1903-1914.
- [10] 温玉玲, 张小林, 魏佳豪, 王晓龙, 蔡永久. 鄱阳湖环湖区生态系统服务价值时空变化及权衡协同关系. *地理科学*, 2022, 42(7): 1229-1238.
- [11] 杨帆, 张丽雪, 石琳. 沿海防护林体系建设工程区生态系统服务权衡/协同及驱动力. *生态学报*, 2023, 43(23): 9952-9966.
- [12] 韩磊, 杨梅丽, 刘钊, 赵永华, 赵子林, 张永锋. 黄土高原典型退耕区生态系统服务权衡与协同关系研究——以延安市为例. *生态学报*, 2022, 42(20): 8115-8125.
- [13] 刘世梁, 董玉红, 王方方, 刘华, 赵奕菲. 生态系统服务价值评估在生态修复中的应用. *中国生态农业学报(中英文)*, 2023, 31(8): 1343-1354.
- [14] 王军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用. *生态学报*, 2019, 39(23): 8702-8708.

- [15] 成金华, 尤喆. “山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(2): 1-6.
- [16] 罗明, 于恩逸, 周妍, 应凌霄, 王军, 吴钢. 山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略. 生态学报, 2019, 39(23): 8692-8701.
- [17] 王波, 何军, 王夏晖. 山水林田湖草生态保护修复试点战略路径研究. 环境保护, 2020, 48(22): 50-54.
- [18] 林圣玉, 莫明浩, 王凌云. 赣州市山水林田湖草生态保护修复问题识别和技术探析. 中国水土保持, 2021, 11(1): 28-31.
- [19] 陈妍, 周妍, 包岩峰, 周旭, 苏香燕. 山水林田湖草沙一体化保护和修复工程综合成效评估技术框架. 生态学报, 2023, 43(21): 8894-8902.
- [20] 王力, 黄妮, 牛铮, 罗明, 陈元鹏, 郭义强, 雷雅会, 扶卿华, 应凌霄. 山水林田湖草生态保护修复项目遥感监测及辅助绩效评价. 遥感学报, 2022, 26(8): 1547-1561.
- [21] 沈钰仟, 杜傲, 林子雁, 欧阳志云, 肖赓. 赣州市山水林田湖草修复工程生态保护效益. 生态学报, 2023, 43(2): 650-659.
- [22] 孙峰, 肖卫平, 姚健庭. 生态保护修复工程生态效益综合评价研究——以江西赣州为例. 环境教育, 2023(5): 58-61.
- [23] 冯琳, 雷国平. 东北地区生态系统服务及权衡/协同关系时空演变特征与功能分区研究. 中国土地科学, 2023, 37(7): 100-113.
- [24] 谢高地, 张彩霞, 张雷明, 陈文辉, 李士美. 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. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [25] 徐丽芬, 许学工, 罗涛, 朱高儒, 马宗文. 基于土地利用的生态系统服务价值当量修订方法——以渤海湾沿岸为例. 地理研究, 2012, 31(10): 1775-1784.
- [26] 李晓赛, 朱永明, 赵丽, 田京京, 李静. 基于价值系数动态调整的青龙县生态系统服务价值变化研究. 中国生态农业学报(中英文), 2015, 23(3): 373-381.
- [27] 高振斌, 王小莉, 苏婧, 陈志凡, 郑明霞, 孙源媛, 纪丹凤. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(6): 563-570.
- [28] 邓元杰, 侯孟阳, 谢怡凡, 高晴, 姚顺波, 龚直文, 鲁亚楠, 贾磊, 李园园. 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. 生态学报, 2020, 40(18): 6597-6612.
- [29] 朱相君, 薛亮. 陕甘宁革命老区生态系统服务价值时空分异及影响因素研究. 浙江大学学报: 理学版, 2022, 49(4): 498-507.
- [30] 陈美景, 王庆日, 白中科, 谢立军, 张冰松, 郝森. 黄河流域资源型城市土地利用转型及其对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2023, 43(22): 9459-9470.
- [31] 李冬花, 张晓瑶, 王咏, 张潇, 李磊, 陆林. 新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系. 生态学报, 2021, 41(17): 6981-6993.
- [32] 丁亚鹏, 张俊华, 刘玉寒, 卢翠玲, 王烁骞, 秦静婷, 丁圣彦. 基于 GWR 模型的伊河流域土壤有机碳空间分布特征及影响因素分析. 生态学报, 2021, 41(12): 4876-4885.
- [33] 黄炜, 张子尧, 刘安然. 从双重差分法到事件研究法. 产业经济评论, 2022, 32(2): 17-36.
- [34] 张征宇, 林丽花, 曹思力, 周亚虹. 双重差分设计下固定效应估计量何时可信?——若干有用的建议. 管理世界, 2024, 40(1): 196-211.
- [35] 吴运连, 谢国华. 赣州山水林田湖草生态保护修复试点的实践与创新. 环境保护, 2018, 46(13): 80-83.
- [36] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响——以湖北省为例. 生态学报, 2019, 39(2): 672-683.
- [37] 徐媛银, 孙思琦, 薛达元, 郭冻. 基于地形梯度的赣南地区生态系统服务价值对人为干扰的空间响应. 生态学报, 2019, 39(1): 97-107.
- [38] 徐媛银, 郭冻, 薛达元, 孙思琦. 赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变. 生态学报, 2019, 39(6): 1969-1978.