

引用格式: 曹辉, 吴慧珍. 武夷山国家公园生态系统服务价值时空变化及权衡协同[J]. 山地学报, 2024, 42(5): 685-697.
CAO Hui, WU Huizhen. Spatial-temporal changes of ecosystem service value with trade-offs/synergy in Wuyishan National Park, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(5): 685-697.

武夷山国家公园生态系统服务价值 时空变化及权衡协同

曹辉, 吴慧珍

(福建农林大学 经济与管理学院, 福州 350002)

摘要: 国家公园是中国生态系统中独特的自然景观, 承载着丰富的自然遗产与生物多样性。生态系统服务功能是国家公园最基本的自然和社会属性。评估国家公园生态系统服务的价值有利于科学构建以国家公园为主体的中国自然保护体系及其可持续发展。目前相关研究缺乏对多个生态系统服务的功能价值、多种方法的综合评估和时空尺度上的动态分析。本文利用武夷山国家公园福建片区的 GIS 信息平台数据和实地调查结果, 采用市场价值法、选择实验法和当量因子法等方法, 结合 InVEST 模型工具对 1990—2020 年武夷山国家公园的生态系统服务价值和权衡协同关系进行估测。结果表明: (1) 武夷山国家公园生态系统服务价值总体上呈波折下降的趋势。1995 年和 2010 年的总价值较高, 分别为 114.18 亿元和 114.99 亿元, 2020 年的价值较低, 为 74.77 亿元。(2) 武夷山国家公园生态系统服务各功能占比动态与其他地区有所不同, 受土壤保持、碳存储、水源涵养等部分的产出量及价值变化影响较大。(3) 强协同、弱权衡是武夷山国家公园生态系统服务价值各功能关系的主要特征, 各个生态系统服务功能的物质质量和价值量变化受降水量下降(气候变化)、土地利用方式改变、游客增长等因素显著影响。(4) 九曲溪、玉女峰、朱熹故居区域文化价值功能高值聚类特征明显, 燕子窠、大王峰周边区域土壤保持功能价值出现低洼空间。研究结果可以为国家公园生态系统服务的科学管理和区域社会经济的可持续发展提供决策参考依据, 为生态系统服务权衡协同机理的进一步分析提供研究的基础。

关键词: 生态系统服务价值; 时空变化; 权衡; 协同; 武夷山国家公园

中图分类号: F301

文献标志码: A

生态系统服务(ecosystem services)是指生态系统通过其内在生态过程, 为人类社会的生命维系及经济发展提供所必需的产品与服务^[1-2]。这些服务涵盖供给服务、调节服务、文化服务以及支持服务等多个方面。自 2001 年联合国启动千年生态系统评估项目(The Millennium Ecosystem Assessment, MA)以来, 生态系统服务领域问题已成为世界各国政府和学界共同关心的话题。

在方法论层面, 生态系统服务评估有物质质量和价值量两个维度。物质质量评估通过结合遥感技术和

生态学参数, 量化生态系统服务的物质价值, 从而评估生态系统功能的水平^[3]。价值量评估可进一步细分为当量因子法和功能价值法两种方法^[4]。1997 年, Costanza^[5]首次运用当量因子法对全球生态系统的服务价值进行了评估。在此基础上, 谢高地^[6]结合中国实际情况, 在 2003 年首次构建中国陆地生态系统单位面积服务价值量表。其改进的当量因子测算法简便易操作且有一定的精度, 修正了生态服务供求曲线假定条件下的数据, 成为中国生态系统服务价值估算中应用最广泛的方法。与当量因

收稿日期(Received date): 2024-04-23; 改回日期(Accepted date): 2024-10-19

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金应急管理项目(72241410)。[National Natural Science Foundation Emergency Management Project of China(72241410)]

作者简介(Biography): 曹辉(1973-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 生态旅游。[CAO Hui (1973-), male, Ph. D., professor, research on ecotourism] E-mail: fjch2000@gmail.com

子法相比,功能价值法通过构建单一服务功能与局部生态环境变量之间的生产方程,能够更精细模拟小区域的生态系统服务功能并进行价值评估。其优势在于在小尺度空间中实现了更为细致的评价,使得服务价值在功能结构和空间分布上呈现得更加清晰^[7]。实际市场法、替代市场法、假想(虚拟)市场法等功能价值方法,在应用上弥补当量因子法精度不足的问题^[1-2]。

生态系统服务之间存在着复杂多样的相互作用,其中一种服务的增加可能会导致另一种服务的减少。因此,研究系统服务的权衡与协同关系,对区域生态、经济和社会发展的优化管理至关重要^[8]。在权衡协同关系分析中,模型如 InVEST、ARIES、ESVALUE、ECOAIM、ECOMETRIX、NAIS、SOLVES 等被广泛应用。然而,过去研究更多聚焦于识别权衡协同的规律,而对其背后驱动因子及机制的探讨则相对不足^[9]。

国家公园作为中国生态系统中独特的自然景观,承载着丰富的自然遗产与生物多样性,在维护国家生态安全方面发挥着不可替代的作用。科学地评估国家公园生态系统服务的价值,不仅有助于深入理解其对国家社会与经济发展的贡献,而且对于构建以国家公园为核心的自然保护体系、推动中国生态文明建设以及实现资源与环境经济的可持续发展,具有重要的理论意义和现实价值。然而,过去相关研究的范围相对较窄,缺乏对多个生态系统服务价值、多种方法的综合评估和时空尺度上的动态分析^[10]。特别是在社会经济驱动因子和社会文化服务价值方面,需要更多的案例积累,为关键生态区位的生态系统服务的因素识别及权衡协同机理分析提供进一步研究的基础。

武夷山国家公园是中国首批设立的国家公园之一。园内利益相关主体多元、价值构成关系复杂,是生态系统服务管理与区域经济发展情况较复杂的试点之一。本文以武夷山国家公园福建片区为研究对象,开展现场调查与座谈访问,采用市场价值法、选择实验法和当量因子法等组方法,基于 GIS 平台并结合 InVEST 模型工具,估算研究区的水源涵养、土壤保持、碳存储等生态系统服务价值;探究 1990—2020 年研究区生态系统服务的空间格局分布、动态变化规律以及在连续时空序列下的各种生态系统服务功能的权衡与协同关系。此外,本文还

探讨这种关系在特定功能区域(国家公园)是否具有普遍性或差异性,以及在空间和时间尺度上如何相互作用和影响。通过武夷山国家公园福建片区的案例研究积累,本文旨在为中国国家公园生态系统服务的科学管理和区域社会经济的可持续发展提供决策参考依据。

1 研究区概况

武夷山国家公园于 2021 年正式设立,是中国首批设立的国家公园之一,具有较高的生态保护、科学研究和游憩休闲价值。该国家公园总面积为 1280 km²,分为福建片区和江西片区。其中,福建片区是武夷山世界生物圈保护区和世界自然与文化遗址的主体,面积为 1001.41 km²,位于福建省南平市武夷山市(县级市)辖区内,福建省北部武夷山脉北段东南麓(图 1;117°24′13″~117°59′19″E、27°31′20″~27°55′49″N),由原武夷山国家级风景名胜区、原武夷山国家级自然保护区、武夷天池国家森林公园和九曲溪上游保护地带等构成。气候类型为中亚热带季风气候,年均气温为 12℃~13℃,年均降水量为 1684~1780 mm,四季分明、雨量丰沛。片区内森林覆盖率为 87.86%,国有土地面积 334.51 km²,集体土地面积 666.90 km²,分为特别保护区、生态修复区、严格控制区和传统利用区 4 个功能区。

2019 年(疫情影响前)武夷山市生态旅游总收入 363.66 亿元,旅游总接待量 1625.66 万人次。

2 研究方法与数据

2.1 数据来源

本文的测算数据基于 2021 年武夷山国家公园福建片区的边界范围,主要涉及以下 5 个方面。

(1)土地利用类型数据:1990—2020 年每 5 年的土地利用类型数据,来自中国科学院空天信息创新研究院刘良云研究组(<http://doi.org/10.5281/zenodo.4280923>),主要包括旱地、草皮覆盖、耕地、开阔常绿阔叶林、封闭常绿阔叶林、开阔的落叶阔叶林($0.15 < fc < 0.4$, fc 指林分郁闭度)、封闭的落叶阔叶林($fc > 0.4$)、开阔的常绿针叶林($0.15 < fc < 0.4$)、封闭的常绿针叶林($fc > 0.4$)、常绿灌木丛、草地、沼泽地、建设用地和水体 14 种土地利用类型,分

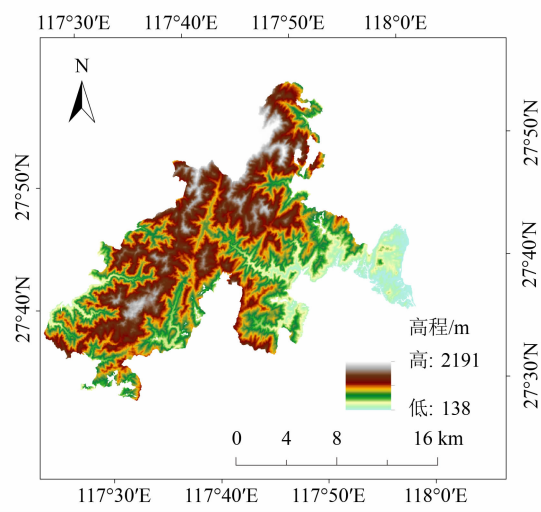


图1 武夷山国家公园福建片区地形与区位示意图
Fig. 1 Topography and location map of the Fujian section of Wuyishan National Park in China

分辨率为 30 m × 30 m,空间参考采用 Albers Conic Equal Area。

(2)气象数据:2000—2020 年每 5 年的降雨数据,源自中国地面气候资料日值数据集(V3.0)(国家气象科学数据共享服务平台, <https://m.data.cma.cn/>)。由于中国 1990 年、1995 年降水量历史数据空缺,故采用衡量尺度相同的 ERA5-Land 数据集(欧盟及欧洲中期天气预报中心等组织发布, <https://www.ecmwf.int/en/era5-land>)进行补充^[11-12],采用反距离权重法插值并剪裁的方法,形成基本的栅格数据。潜在蒸散量源自全球干旱及潜在蒸散数据库(国际农业研究磋商组织, <http://www.cgiar-csi.org/data/global-aridity-and-pet-database>)。

R 值(降雨侵蚀度)参考了郑潇^[13]提出的经验公式。

(3)土壤数据:来源于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database, <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/zh/>)。

(4)高程数据:来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

(5)模型测算所需的其他数据与参数:涉及 InVEST 模型水源涵养模块中的参数,其中土壤最大根茎深度参考了傅斌^[14]等的研究。不同地类中的植物蒸散系数参照联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)出版的《作物蒸散量——作物需水量计算指南》^[15]中的模型系数(www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm#Contents)。植被有效含水量(Potential average water consumption, PAWC)指存储在土壤中可供植物利用的水量,其值范围为[0,1],采用了周文佐^[16]提出的非线性拟合模型来估算土壤的 PAWC。在土壤保持模块中,土壤可蚀度 *K* 值参考安大略农业、食品和农村事务部情况说明书(<https://www.omafra.gov.on.ca/>)。植被覆盖和作物管理因子 *C*、水土保持工程措施因子 *P* 值参考渠斌^[17]的研究成果;在碳储量模块中,碳密度采用邹文涛^[18]等的研究结果,主要包含了地上生物量、地下生物量、土壤和死亡有机物 4 个方面。模型中采用的其他主要数据来源详见表 1,土壤保持价值中固土价值、保肥价值、减淤价值的相关参数可见表 2。

表 1 各模型中的数据来源
Tab. 1 Data source in the models

模块	模型图层	数据类型	主要指标	参考来源
产品价值模型	当量因子	表格	1 hm ² 全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值	文献[19]
土壤保持模型	DEM	栅格	数字高程数据	GDEM V2 30 m 分辨率数字高程数据
	<i>R</i> 值	栅格	降雨侵蚀指数	文献[13]中的经验公式
	<i>K</i> 值	栅格	土壤侵蚀度	文献[20]中的经验公式
	<i>C</i> 参数	表格	植被覆盖和作物管理因子	文献[17]
	<i>P</i> 参数	表格	水土保持工程措施因子	文献[17]
碳存储价值模型	碳库	表格	地上生物量的碳密度、地下生物量中的碳密度、土壤中的碳密度、死亡有机物中的碳密度	文献[18]

表 2 土壤保持价值测算参数

Tab. 2 Measurement parameters of soil conservation value

指标	参数值	参考值来源
土壤中 <i>N</i> 养分含量	0.09%	文献 [21]
土壤中 <i>P</i> 养分含量	0.04%	文献 [21]
土壤中 <i>K</i> 养分含量	0.98%	文献 [21]
磷酸二铵含氮率	14%	文献 [21]
磷酸二铵含磷率	15.01%	文献 [21]
氯化钾含钾率	50%	文献 [21]
磷酸二铵化肥价格	2840 元/t	中国农业信息网 (http://www.agri.cn/sj/)
氯化钾化肥价格	2930 元/t	
土壤容重 ρ	1.22 t/m ³	文献 [4]
土层平均厚度 <i>h</i>	0.60 m	文献 [4]
林业年均收益	3034.35 元/hm ²	武夷山市人民政府网 (https://www.wys.gov.cn/)
清除泥沙成本	7.89 元/m	文献 [22]

2.2 研究方法

2.2.1 方法框架

参照千年生态系统评估 MA 的分类,将公园生态系统服务价值分为供给系统价值、调节系统价值、文化系统价值、生物多样性系统价值 4 个一级分类(支持系统价值体现在生态系统服务的各个环节中,故不重复进行计算^[23]),产品供给(食物、原料)

价值(Product supply value, PS)、水源涵养价值(Water yield value, WY)、碳存储价值(Carbon storage value, CS)、土壤保持价值(Soil conservation value, SC)、文化系统价值(Cultural value, CV)、生物多样性系统价值(Biological diversity value, BD)6 个二级分类,其中 SC 又可分为固土价值(Soil consolidation value, SV)、保肥价值(Fertility preservation value, FP)和减淤价值(Dredging value, DV)3 个部分。本文选用 InVEST 模型 3.9.0 版本的陆地系统板块功能,遵循功能价值法与当量因子法的组合分析思路,采用物质质量法和市场价值法对 WY、CS、SC 进行测算,采用选择实验法(Choice experiment, CE)对 CV 进行测算^[24],采用当量因子法对 PS、BD 进行测算,以利于兼顾两种方法的优缺点,更加全面地、可靠地对比研究各生态系统服务功能价值。价值评估模型的思路详见图 2。

2.2.2 当量因子法

当量因子法是基于生态系统单位面积价值进行核算的典型方法。农产品的产品供给价值量表达式^[25]为:

$$E_a = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{m_i n_i}{S} \quad (1)$$

式中, E_a 为公园中每个标准单位生态系统服务价值当量因子的经济价值(元/hm²); i 表示该区域内不同农作物的类型; n_i 为 i 种农作物的产量(t); m_i 为

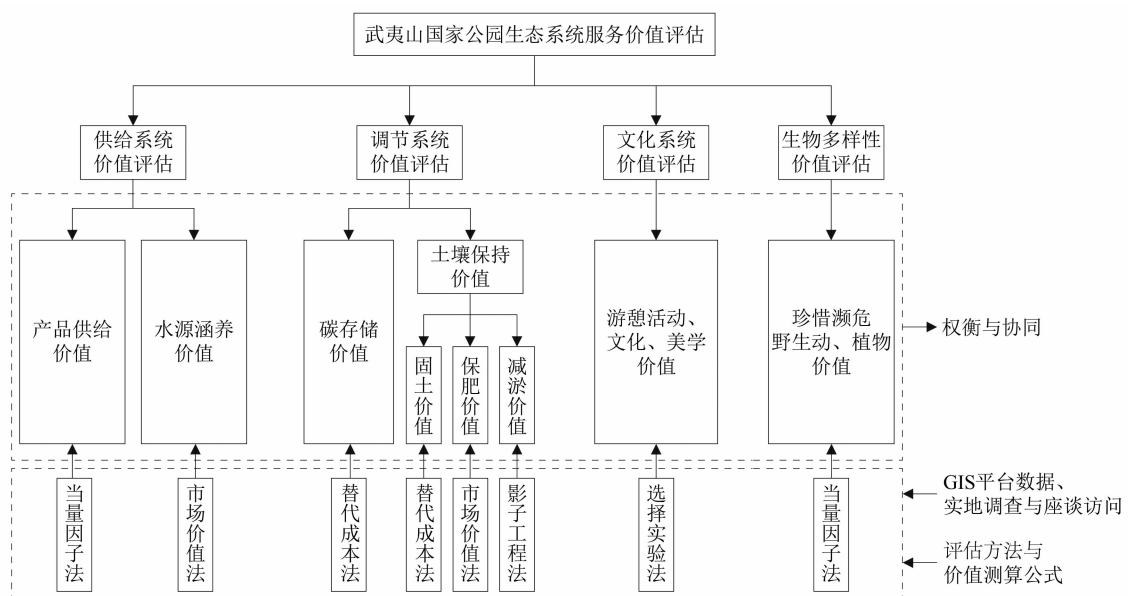


图 2 武夷山国家公园生态系统服务价值的评估思路与方法

Fig. 2 Assessment approach of ecosystem service value of Wuyishan National Park in China

i 种农作物的平均价格(元/t); S 为 n 种农作物的总体种植面积。

其他产品供给价值量采用谢高地^[25] 等的当量因子法进行评估,表达式为:

$$V_p = \sum_{p=1}^n (S_p \cdot \beta \cdot A_p) \quad (2)$$

式中, V_p 为产品供给价值; S_p 为单位面积各产品供给的价值当量; β 为当量因子价值; A_p 为各生态系统面积。

利用谢高地^[25] 等的当量因子法来评估武夷山国家公园生物多样性价值,表达式为:

$$V_i = \sum_{i=1}^n (S_i \cdot \beta \cdot A_i) \quad (3)$$

式中, V_i 为生物多样性价值; S_i 为单位面积各生物多元性的价值当量; A_i 为各生态系统面积。

2.2.3 市场价值法

市场价值法是直接利用公开市场的价格对某项生态系统服务进行价值测算的方法,较适用于在公开市场上有实际价格或交易行为的生态系统服务项目。水资源供给服务价值,表达式^[21] 为:

$$V_w = Q_w \cdot P_w \quad (4)$$

式中, V_w 为水资源供给价值; Q_w 为产水量; P_w 为武夷山市居民用水价格。

施肥服务价值是通过在土壤保持量估算氮磷钾的物质质量,再结合公开市场的磷酸二铵和氯化钾的价格进行测算,表达式^[21] 为:

$$V_f = Q \cdot \alpha_N \cdot \beta_N \cdot P_{21} + Q \cdot \alpha_P \cdot \beta_P \cdot P_{21} + Q \cdot \alpha_K \cdot \beta_K \cdot P_{22} \quad (5)$$

式中, V_f 为施肥服务价值; Q 为土壤保持量; α_N 为土壤含氮质量分数; β_N 为磷酸二铵含氮质量分数; P_{21} 为磷酸二铵化肥价格; α_P 为土壤含磷质量分数; β_P 为磷酸二铵含磷质量分数; α_K 为土壤含钾质量分数; β_K 为磷酸二铵含钾质量分数; P_{22} 氯化钾化肥价格。

2.2.4 替代成本法

替代成本法是当某项生态系统服务的公开市场价格无法或很难获得时,可通过计算提供相同服务的替代品的成本来间接估算其综合价值。碳储量价值的测算表达式^[14] 为:

$$V_c = Q_c \cdot P_c \quad (6)$$

式中, V_c 为碳储量价值; Q_c 为武夷山国家公园碳储量; P_c 为碳汇价值。

固土价值的替代成本法表达式^[23] 为:

$$V_s = \frac{Q}{\partial \cdot h} \cdot P_s \quad (7)$$

式中, V_s 为固土价值; ∂ 为土壤容重; h 为中国土壤平均厚度; P_s 为林业年均收益。

2.2.5 影子工程法

影子工程法是以人工建造一个替代生态服务功能的工程费用来衡量生态服务功能经济价值的方法。减少泥沙淤积价值的影子工程法表达式^[23] 为:

$$V_t = \frac{Q}{\partial} \cdot a \quad (8)$$

式中, V_t 为减少泥沙淤积价值; a 为清除泥沙成本。

3 结果与分析

3.1 供给系统价值评估

3.1.1 产品供给价值

公园涉及武夷山市、光泽县、建阳区及邵武市 4 个县(市、区)的 9 个乡镇(街道)、29 个行政区、2 个林场、1 个农场、1 个水库范围内人口约 3000 人。根据《南平市统计年鉴 2020》^[26],2019 年该地区的主要农作物包括稻谷、甘薯、玉米和大豆,播种面积分别为 148 943 hm²、8111 hm²、12 888 hm²、8243 hm²,产量分别为 1 001 672 t、48 320 t、54 650 t、25 351 t。参考《全国农产品成本收益资料汇编 2020》^[19] 计算,2019 年全国稻谷、甘薯、玉米以及大豆的平均价格分别为 2544 元/t、2940 元/t、1792 元/t、3751 元/t。根据公式(1)计算出当量因子价值(E_a)为 2311.67 元/hm²。参考谢高地^[25] 等的不同地类产品供给价值当量研究成果,可得 1990 年产品供给总价值为 2.13 亿元,1995 年为 2.10 亿元,2000—2020 年为 2.06 亿元,整体呈平稳趋势。

3.1.2 水源涵养价值

基于水热耦合平衡的研究假设,运行 InVEST 模型软件水源涵养模块,测得公园 1990—2020 年,每 5 年的年产水量分别 1.2985 × 10⁹ t、1.4292 × 10⁹ t、7.7643 × 10⁸ t、7.5092 × 10⁸ t、1.2291 × 10⁹ t、1.1484 × 10⁹ t 和 7.8508 × 10⁸ t。参考武夷山市平均用水价格 1.90 元/t(农业用水价格为 1.70 元/t、工业用水价格为 2.45 元/t、居民生活用水价格为 1.55 元/t),测得公园 1990—2020 年,每 5 年的水源涵养价值分别为 24.67 亿元、27.16 亿元、14.75 亿

元、14.27 亿元、23.35 亿元、21.82 亿元和 14.92 亿元。

3.2 调节系统价值评估

3.2.1 碳存储价值

碳储量代表陆地生态系统的固碳能力,碳存储价值是生态系统服务中碳存储功能的价值。运行 InVEST 模型软件碳储量模块,可得公园 1990—2020 年,每 5 年的碳储量分别为 $1.8765 \times 10^7 \text{t}$ 、 $1.8738 \times 10^7 \text{t}$ 、 $1.8725 \times 10^7 \text{t}$ 、 $1.8727 \times 10^7 \text{t}$ 、 $1.8732 \times 10^7 \text{t}$ 、 $1.8731 \times 10^7 \text{t}$ 和 $1.8736 \times 10^7 \text{t}$ 。结合邹文涛^[18]等的不同地类的碳密度参数,按照清洁发展机制(Clean development mechanism, CDM)的碳排放价格 24.2 美元/t 测算,1990 年武夷山国家公园碳存储价值为 4.54 亿美元(31.33 亿元,汇率按 6.8984 计),1995—2020 年为 4.53 亿美元(31.28 亿元)。

3.2.2 土壤保持价值

土壤保持量可通过潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量之间的差值确定,土壤保持的价值由保肥、固土及减淤三部分的价值组成。参照公式(5)~(7),单位保肥价值按 14.89 元/t 计、单位固土价值按 0.41 元/t 计、单位减淤价值按 6.47 元/t 计,运行 InVEST 模型土壤保持模块,可得公园 1990—2020 年,每 5 年的土壤保持价值分别为 38.61 亿元、47.93 亿元、40.24 亿元、37.03 亿元、50.25 亿元、36.69 亿元和 17.07 亿元,详见表 3。

3.3 文化系统价值

参照本课题组前期研究结果^[24, 27],研究采用 CE 法估测受访者获得属性状态的改善而愿意支付的边际价值,结合访客和社会公众对文化系统价值识别的核密度结果分析,测得公园 1990—2020 年

每 5 年的文化系统价值分别为 0.28 亿元、0.43 亿元、0.87 亿元、1.33 亿元、2.87 亿元、3.85 亿元、4.26 亿元。

3.4 生物多样性价值

参考谢高地^[25]等的研究结果,结合考虑武夷山国家公园不同地类的生物多样性价值当量因子,测得公园 1990 年生物多样性总价值为 5.37 亿元,1995 年为 5.29 亿元,2000—2015 年为 5.18 亿元,2020 年为 5.19 亿元。

3.5 生态系统服务价值时空分布格局分析

3.5.1 生态系统服务价值的时间变化

1990—2020 年,武夷山国家公园各项生态系统服务价值的变化趋势存在差异(图 3)。WY 低值部分(0~1300 元)占比在 2005 年达到峰值;中值区占比(1300~1500 元)在研究期间内先降后升再降;高值部分(1500 元以上)在 1995 年占比较高。WY 价值与降水量变化紧密相关。SC 低值部分(0~5000 元)占比波动,2020 年大幅升至 93.09%,与降水量、地形等因素相关,且与降水量变化趋势相反。CS 保持高度稳定,高值区(3000 元以上)占比持续在 99% 以上,得益于高森林覆盖率。在研究期间内,PS 低值区(0~1711 元)占比上升,中值区(1711~2335 元)占比下降,高值区(2335 元以上)占比极低。PS 价值与土地利用类型相关,价值由大到小依次为耕地、旱地和沼泽。BD 低值部分(0~485 元)占比极小,高值区近年来有下降趋势。CV 的中值部分(200~500 元)和高值部分(大于 500 元)占比显著增加,源于访客数量的稳步增长。

3.5.2 生态系统服务价值的空间变化

武夷山国家公园生态系统服务价值总体上呈

表 3 武夷山国家公园土壤保持的价值测算表

Tab. 3 Measurement of soil conservation value of Wuyishan National Park in China

年份	土壤保持量/t	保肥价值/亿元	固土价值/亿元	减淤价值/亿元	土壤保持总价值/亿元
1990	177 373 750.78	26.41	0.73	11.48	38.61
1995	220 155 548.74	32.78	0.90	14.24	47.93
2000	184 830 582.02	27.52	0.76	11.96	40.24
2005	170 118 090.61	25.33	0.70	11.01	37.03
2010	230 853 020.39	34.37	0.95	14.94	50.26
2015	168 525 112.20	25.09	0.69	10.90	36.69
2020	78 402 268.97	11.67	0.32	5.07	17.07

波折下降的趋势。具体来说, WY 值与降水量的变化趋势一致, 且总体上自东南向西北递增, 高值区集中在背岗和黄冈山等海拔较高地带; SC 受到降水量的影响也较大, 但空间分布较为分散, 高值区以细条状和点状形式分布在海拔较高区域, 如青龙大瀑布、五夫镇、大安源风景区等地, 形成明显聚类; 而燕子窠、大王峰周边则相对较低; CS 空间分布较为均匀, 高森林覆盖率使区域内变化不明显; 耕地和旱地的单位 PS 价值较高, 但面积相对较小且分布零散; BD 东南低西北高, 东南区域为细条状中值区 (485 ~ 5039 元), 西北则为块状高值区 (5039 元以上); CV 增长显著, 九曲溪、玉女峰、朱熹故居等地形成文化价值高值聚类, 而十八寨、遇林亭窑址等地则分布较散, 文化价值相对较

低。各项生态系统服务价值的空间分布特征详见图 4。

3.6 权衡协同相关性分析

运用 ArcGIS 软件的渔网功能, 对 CV、WY、BD、SC、PS、CS 的 2020 年栅格数据进行多值提取。在提取的 867 个空间点位上, 对生态系统服务的各项功能进行两两比对, 采用 Pearson 相关分析的方法判别和估算生态系统服务权衡协同关系, 可以得出 CV 同 WY 呈正相关, 同 BD、PS、CS 呈负相关, 同 SC 不相关; WY 同 BD、PS、CS 呈负相关, 同 SC 不相关; BD 同 PS、CS 存在显著正相关, 同 SC 不相关; SC 同 PS、CS 不相关; PS 同 CS 呈正相关。在国家公园内, 协同关系主要体现在 PS 与 CS、PS 与 BD、CS 与 BD、CV 与 WY 之间, 这些生态系统服务的功能是相互

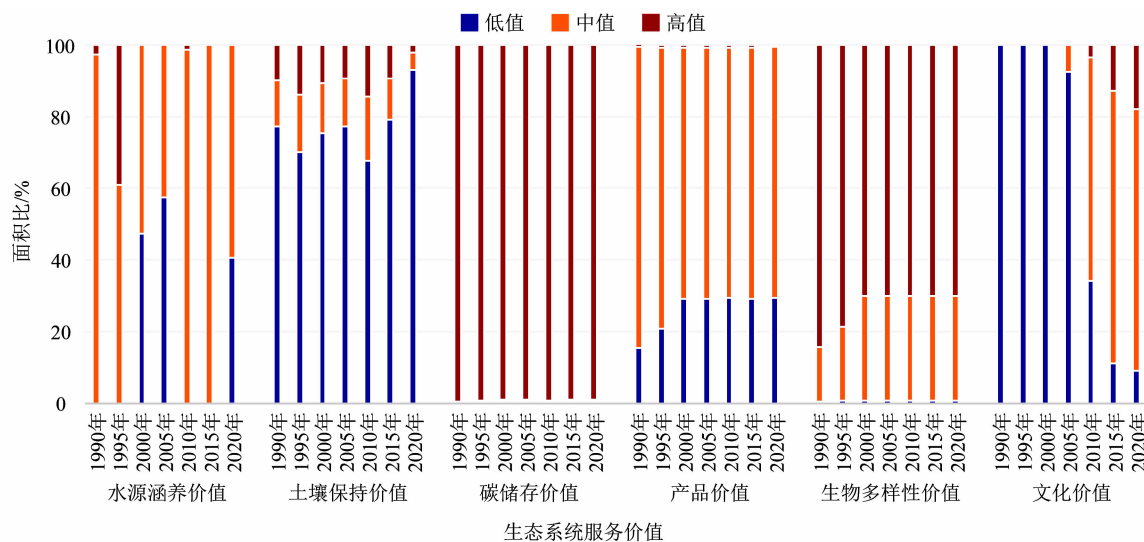
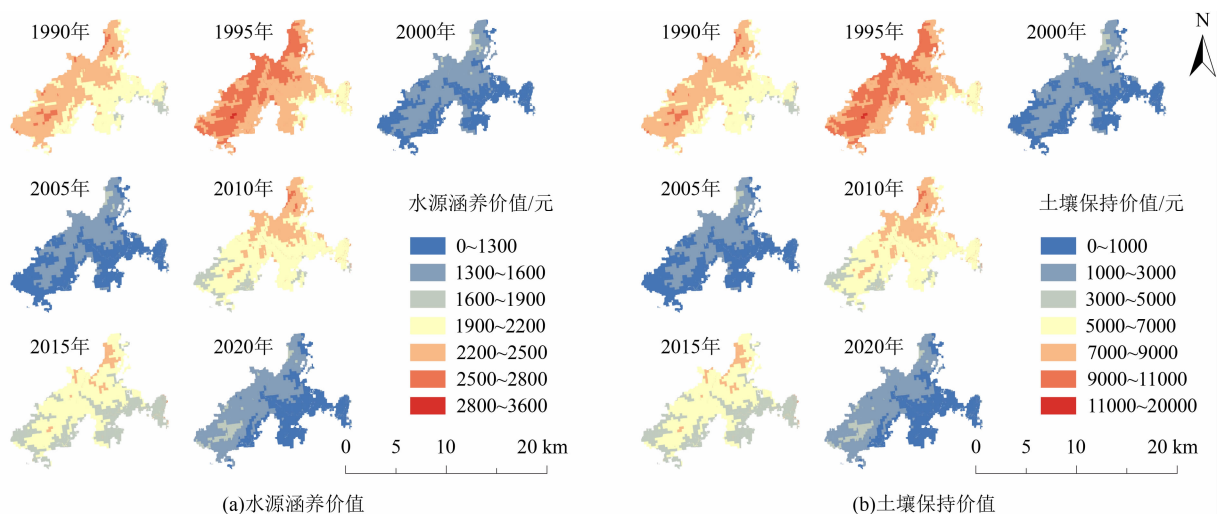


图3 30年间生态系统服务价值各等级面积比值

Fig. 3 Area ratio of ecosystem service value of each level over 30 years



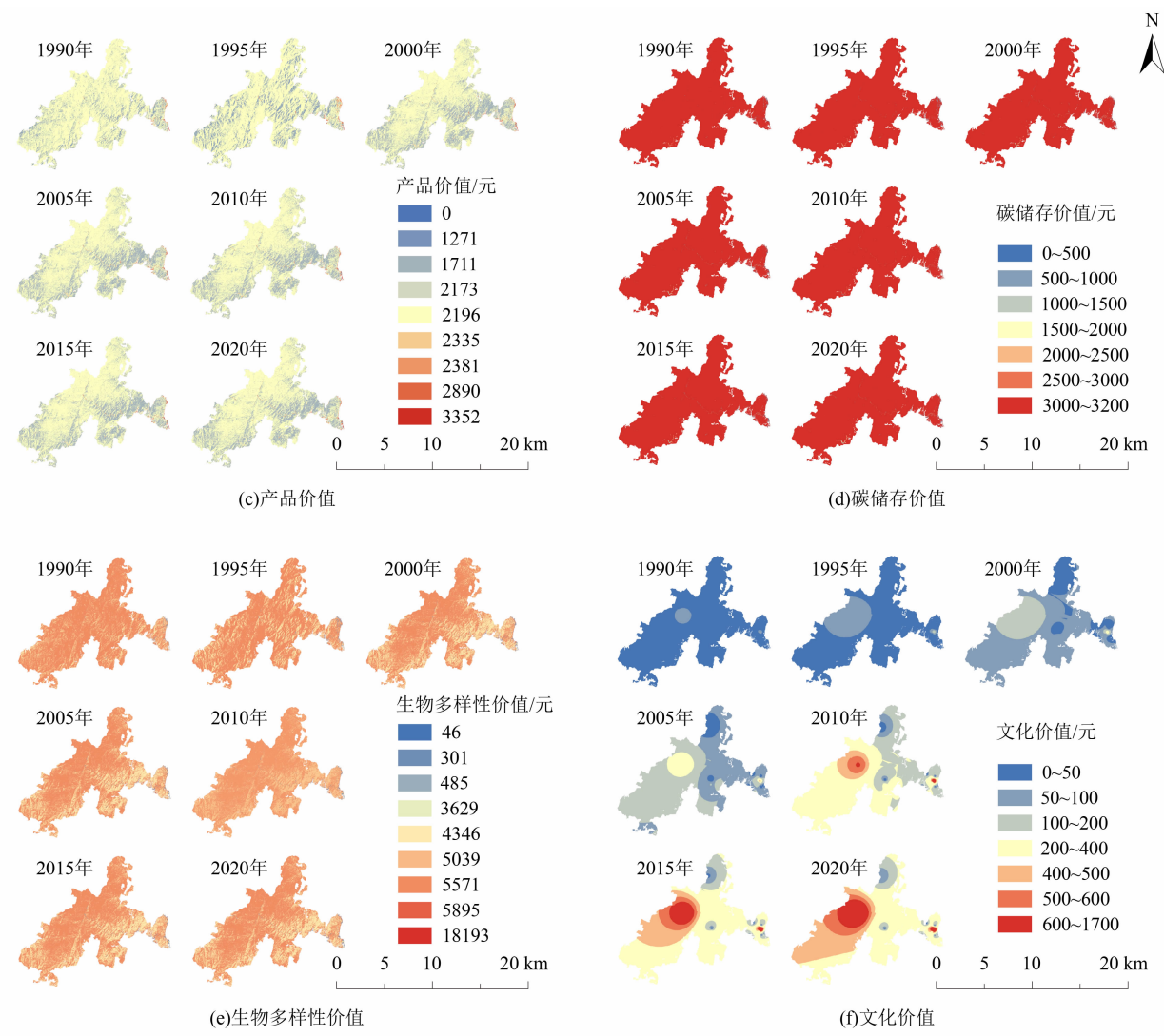


图4 生态系统服务价值的空间分布特征变化

Fig. 4 Changes in the spatial distribution characteristics of ecosystem service value

增强、共同促进的。权衡关系主要体现在 WY 与 BD、WY 与 PS、WY 与 CS(详见图 5)。

4 讨论

国家公园生态系统服务及功能关系的时空变化是综合的、复杂的和异质的。在过去的 30 年里,案例的生态系统服务价值总体上呈波折下降的趋势,这与中国国家公园和一般自然保护地,如三江源国家公园等区域的“趋好”态势有所不同^[28]。在 30 年的空间格局变化中,案例的异质性特征明显。特别是在各功能权衡协同关系中,PS 与 CS、BD 之间的正相关、强协同关系与其他案例研究有所不同,产品供给增高必然导致相关功能价值下降的规律在武夷

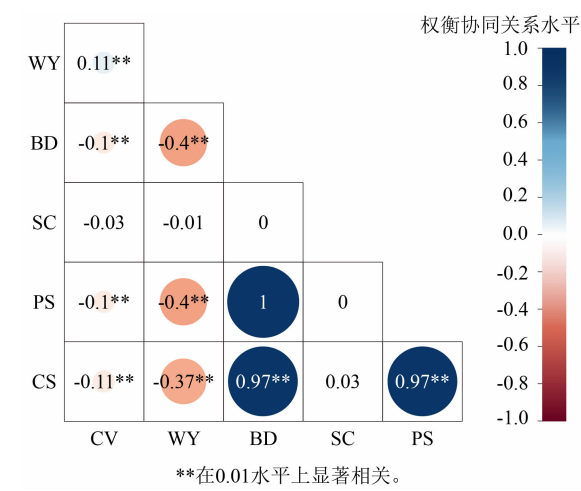


图5 各生态系统服务价值的权衡协同相关性关系

Fig. 5 Trade-offs/synergy correlation of ecosystem service value

山并不成立(图6)。CS与BD之间的正相关、强协同关系值得关注,其原因在于武夷山国家公园极高的森林覆盖率,严格保护的森林环境提供了巨大的碳存储价值和生物多样性价值。然而WY与BD、PS、CS之间的负相关、弱权衡关系表明各功能之间的竞争关系,这与延安^[23]、普达措^[3]研究结果有相似之处,但不同的是,武夷山国家公园的WY功能价值并未受到土地利用、截留量等因素的显著影响。此外,CV与WY、BD、PS、CS关系显著,九曲溪的水、大峡谷的森林、大红袍的茶叶等被武夷山旅游者所喜欢,这些文化价值的体现与生态系统服务的生物多样性、水源涵养、产品价值等功能息息相关。与普达措国家公园社会文化价值低、生态价值高的空间聚集特征不同^[3],武夷山国家公园的玉女峰、九曲溪、五夫镇等区域的生态价值与文化价值呈现出较强的一致性、协同性。

国家公园的产品供给功能价值与其他功能价值的关系并不一定呈反向变化的规律。以往的研究表明,产品供给价值越高,相关的功能价值将对应性的下降,如碳存储、生物多样性等功能,究其原因,多数研究案例的产品供给价值的增加主要来源于产品供给的土地利用面积增加,这在特定区域范围内必然导致其他功能面积的减少,进而引起其他功能价值的下降。而在本案例研究中,产品供给价值与固碳、生物多样性价值的强协同关系的主要原因有两点:(1)武夷山国家公园产品供给的价值虽有所增加,但整体区域保护严格,所占用的面积基本不变,提升了整体生物多样性价值,导致了案例结果与其他研究有所不同;(2)武夷山国家公园的产品供给价值在本文中实际上有所低估,一些经济作物(如茶叶)

的实际产量和质量都在不断提高,特别是随着武夷岩茶市场行情的向好,产品供给价值总量实际上有较大幅度的提升。但尽管被低估,也发现公园区域的环境好、固碳好、生物多样性好,对长期的产品供给服务价值有明显的正向促进作用,30年间呈现了显著的相关关系。“绿水青山就是金山银山”,武夷山国家公园的这种结论关系恰好是生态产品价值实现路径和作用机制的侧面佐证。

国家公园各功能价值之间的权衡协同关系是异质的、成因是多样化的。武夷山作为中国亚热带常绿阔叶林生态系统的典型代表,既是国家重点文物保护单位,又是世界自然与文化遗产和生物圈保护区,其国家公园生态系统的服务需求呈现出多样性与复杂性的特点,迫切需要进行系统的客观分析与科学管理,以应对这些交叉的服务需求并促进可持续发展。在国家公园中,产品供给、碳存储、生物多样性三者之间表现出显著的协同特征,一荣俱荣、一损俱损,这与黄土高原生态系统典型退耕区^[23]的情况相类似,得益于森林生态系统对生物多样性、碳存储、产品供给等功能,都有相类似的正向提升作用,无论是森林覆盖率较高的武夷山还是覆盖率较低的延安市,表现都是明显的。与上述关系不同的是,水源涵养价值(WY)与土壤保持价值(SC)之间的关系结论因地区而异,李雪敏^[29]等对大兴安岭山脉中段地区、范耘恺^[30]对青藏高原的分析证明了两者的协同关系,刘华妍^[31]等对北京市的研究结果则与本研究结果类似,两者之间表现为弱权衡关系,原因可能在于不同区域的土壤、气候及人为影响等要素之间存在较大差异。

气候变化正在显著影响着国家公园生态系统服

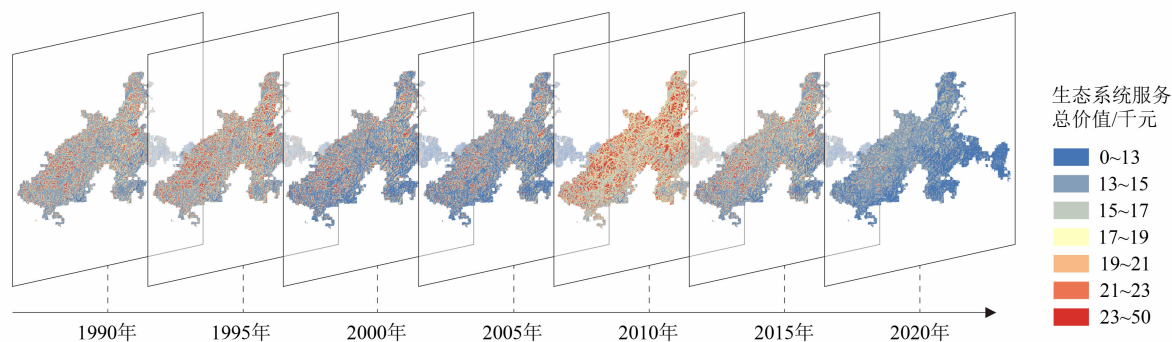


图6 武夷山国家公园生态系统服务价值时空变化

Fig. 6 Temporal and spatial changes of ecosystem service value in Wuyishan National Park in China

务的功能价值。从世界范围来看,全球气候变化背景下带来武夷山国家公园的区域降水量下降,显著地影响了整体生态系统服务的价值量,这也是2020年本案例系统服务价值最低的主要原因,30年间总量下降了23%。特别对水源涵养和土壤保持等功能,这种变化趋势的影响将是持续的、巨大的。气候变化也使美国冰川国家公园(Glacier National Park)持续处于低积雪状态,相对干旱的气候引起了频繁、大面积的严重火灾,导致了森林碳汇、生物栖息地等关键生态系统服务供给减少^[32]。这些全球气候变化引起的极端气象的频繁出现,将对全球国家公园的生态系统服务产生更持续、更强烈的冲击^[10, 32]。

生态系统服务功能价值的综合测算思路和方法上仍可以进一步探讨。在生态系统服务功能价值的综合测算中,会计成本的方法虽然易理解且理论误差小,但实际操作过程变量过多且计算繁琐,如各种参考物的市场价格波动、通货膨胀、成本贬值(功能性、技术性)、货币汇率等因素变化的影响,易导致精度下降和结果偏差。因此,研究采用了资产评估中的评估时点原则,以某一特定日期(2020年12月30日)为测算基准日,所有数据只算“基本量”而不考虑当时市场价格,最终的价值量以该基准日的价格为折算标准。这种方法可以避免通胀等要素的影响,保证结果的可比性和市场参考性。当然,评估时点原则需在公平交易假设和公开市场假设的前提下进行,本文假设这种前提条件是满足的。受数据来源的限制,研究在土地利用类型上未对武夷山国家公园所有的林地类型进行完全细分,这在一定程度上影响了公园土地分类测算结果的全面性和精度,特别是在产品供给价值测算中,当量因子法测算结果是较为保守的,对于武夷山而言明显偏小。此外,由于中国部分历史降水数据的空缺,研究采用了欧盟等组织发布的数据,这可能对武夷山案例的综合测算和不同时期的对比带来一定的理论误差,虽然两者之间的衡量尺度相同、经验数据已有所验证^[11-12]。生态系统服务变化的影响因素较多,包括土地利用变化、景观格局动态、经济发展水平、人类活动强度等。本研究虽然采用了InVEST模型进行测算,但在方法与思路仍存在一定的局限性,未能进一步探究连续时序下的生态系统服务关系变化的驱动机制。未来研究可更加深入地分析其内在机

理,特别是在社会经济要素变化对价值量变化、格局变化的敏感性变化机制方面,从而为优化生态系统服务、区域社会经济的协调发展提供更有有效的指导。

5 结论

(1)武夷山国家公园生态系统服务价值总体上呈波折下降的趋势。1995年和2010年的总价值较高,分别为114.18亿元和114.99亿元,2020年的价值较低,为74.77亿元。从较长的周期来看,国家公园生态系统服务价值的时空变化是复杂且异质的。

(2)武夷山国家公园生态系统服务各功能占比动态与其他地区有所不同,受土壤保持、碳存储、水源涵养等部分的产出量及价值变化影响较大。国家公园的产品供给功能价值与其他功能价值的关系并不一定呈反向变化规律。

(3)强协同、弱权衡是武夷山国家公园生态系统服务价值各功能关系的主要特征,各个生态系统服务功能的物质量和价值量变化受降水量下降(气候变化)、土地利用方式改变、游客增长等因素显著影响。与现有研究结果对比,国家公园这种关键区位的生态系统的各功能价值之间的权衡协同关系是异质的、成因是多样化的。

(4)九曲溪、玉女峰、朱熹故居区域文化价值功能高值聚类特征明显,燕子窠、大王峰周边区域土壤保持功能价值出现低洼空间。武夷山国家公园生态系统服务的价值关系恰好是生态产品价值实现路径和作用机制的侧面佐证。

参考文献(References)

- [1] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245. [LI Li, WANG Xinyua, LUO Lei, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1233-1245] DOI: 10.13292/j.1000-4890.201804.031
- [2] ROBERTSON G P, SWINTON S M. Reconciling agricultural productivity and environmental integrity: A grand challenge for agriculture [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, 3(1): 38-46. DOI: 10.1890/1540-9295(2005)0030038:RAPAE12.0.CO;2
- [3] 马月伟,潘健峰,蔡思青,等. 生态系统服务社会价值与生态

- 价值的权衡与协同关系——以普达措国家公园为例[J]. 地理科学, 2022, **42**(7): 1283 – 1294. [MA Yuewei, PAN Jianfeng, CAI Siqing, et al. Trade-offs and synergies between social value and ecological value of ecosystem services: A case study of the Potatso National Park [J]. Scientia Geographica Sinica, 2022, **42**(7): 1283 – 1294] DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2022.07.015
- [4] 龚溪, 曹铭昌, 孙孝平, 等. 武夷山市生态系统服务价值评估[J]. 生态与农村环境学报, 2017, **33**(12): 1094 – 1101. [GONG Xi, CAO Mingchang, SUN Xiaoping, et al. Valuation of ecosystem services in Wuyishan City [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2017, **33**(12): 1094 – 1101] DOI: 10.11934/j.issn.1673-4831.2017.12.005
- [5] COSTANZA R, D'ARCE R, DE GROOT R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics, 1997, **25**(1): 3 – 15. DOI: 10.1038/387253a0
- [6] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估[J]. 自然资源学报, 2003, **18**(2): 189 – 196. [XIE Gaodi, LU Chunxia, LENG Yunfa, et al. Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. Journal of Natural Resources, 2003, **18**(2): 189 – 196] DOI: 10.3321/j.issn:1000-3037.2003.02.010
- [7] 李广泳, 姜翠红, 程滔, 等. 基于地理国情监测地表覆盖数据的生态系统服务价值评估研究——以伊春市为例[J]. 生态经济, 2016, **32**(10): 126 – 129. [LI Guangyong, JIANG Cuihong, CHENG Tao, et al. Ecosystem services evaluation based on national geographical state monitoring land cover data: Taking Yichun as an example [J]. Ecological Economy, 2016, **32**(10): 126 – 129] DOI: 10.3969/j.issn.1671-4407.2016.10.027
- [8] 沈若兰, 肖桂荣. 武夷山国家公园生态系统服务价值评估[J]. 生态科学, 2023, **42**(2): 58 – 65. [SHEN Ruolan, XIAO Guirong. Evaluation of ecosystem service value of Wuyishan National Park [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, **42**(2): 58 – 65] DOI: 10.14108/j.cnki.1008-8873.2023.02.008
- [9] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 等. 生态系统服务权衡研究进展[J]. 生态学报, 2021, **41**(14): 5517 – 5532. [ZHANG Bitian, MIN Qingwen, JIAO Wenjun, et al. Research progress and perspective on ecosystem services trade-offs [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, **41**(14): 5517 – 5532] DOI: 10.5846/stxb202008182151
- [10] 谢嘉淇, 徐曼, 王薇茜, 等. 国家公园生态系统服务研究与展望[J]. 生态学杂志, 2023, **42**(1): 219 – 227. [XIE Jiaqi, XU Man, WANG Weihuan, et al. Research on ecosystem services in national parks: A review and outlook [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, **42**(1): 219 – 227] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202301.023
- [11] 李思源, 倪欢, 牛晓楠, 等. 闽三角城市群土地利用与生态系统服务价值时空演变及未来多情景模拟[J]. 地理与地理信息科学, 2024, **40**(5): 28 – 34. [LI Siyuan, NI Huan, NIU Xiaonan, et al. Spatio-temporal evolution and future multi-scenario simulation of land use and ecosystem service value in Fujian Delta urban agglomeration [J]. Geography and Geo-Information Science, 2024, **40**(5): 28 – 34] DOI: 10.3969/j.issn.1672-0504.2024.05.004
- [12] 许海英, 杨超, 李清泉. 三江源国家公园生态系统服务价值的时空演变[J]. 生态学杂志, 2024, **43**(6): 1881 – 1890. [XU Haiying, YANG Chao, LI Qingquan. Spatial-temporal variations of ecosystem service value in Sanjiangyuan National Park [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, **43**(6): 1881 – 1890] DOI: 10.13292/j.1000-4890.202406.008
- [13] 郑潇, 白淑英, 高吉喜. 1961—2019年江西省降雨侵蚀力时空变化分析[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2023, **15**(3): 357 – 366. [ZHENG Xiao, BAI Shuying, GAO Jixi. Spatial-temporal variation of rainfall erosivity in Jiangxi Province from 1961 to 2019 [J]. Journal of Nanjing University of Information (Science & Technology), 2023, **15**(3): 357 – 366] DOI: 10.13878/j.cnki.jnuist.20220309002
- [14] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 等. 都江堰市水源涵养功能空间格局[J]. 生态学报, 2013, **33**(3): 789 – 797. [FU Bin, XU Pei, WANG Yukuan, et al. Spatial pattern of water retention in Dujiangyan County [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, **33**(3): 789 – 797] DOI: 10.5846/stxb201203260410
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998: 65.
- [16] 周文佐. 基于GIS的我国主要土壤类型土壤有效含水量研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2003: 13 – 16. [ZHOU Wenzuo. A study on available water capacity of main soil types in China based on geographic information system [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2003: 13 – 16]
- [17] 渠斌, 李新通. 基于生态服务功能的海坛岛生态安全格局构建研究[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2019, **35**(1): 28 – 36. [QU Bin, LI Xintong. Study on ecological safety pattern of Haitan Island based on ecological service function [J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2019, **35**(1): 28 – 36] DOI: 10.12046/j.issn.1000-5277.2019.01.004
- [18] 邹文涛, 何友均, 叶兵, 等. 基于InVEST模型的钱江源国家公园生态系统碳储量研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, **41**(3): 120 – 128. [ZOU Wentao, HE Youjun, YE Bing, et al. Study on carbon storage of ecosystem in Qianjiangyuan National Park based on InVEST model [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, **41**(3): 120 – 128] DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.03.013
- [19] 国家发展和改革委员会价格司. 全国农产品成本收益资料汇编—2020 [M]. 北京: 中国市场出版社, 2021: 11 – 17. [Price Department of the National Development and Reform

- Commission of China. Data compilation of national agricultural product cost benefit (2002) [M]. Beijing: China Market Publishing House, 2021: 11–17]
- [20] 韩晶, 崔金芳, 杨威, 等. 基于 InVEST 模型的低山丘陵区土壤侵蚀变化与驱动因素分析[J]. 水土保持研究, 2022, **29**(5): 32–39. [HAN Jing, CUI Jinfang, YANG Wei, et al. Analysis of soil erosion change and driving factors in low hilly areas based on the InVEST model [J]. Research on Soil and Water Conservation, 2022, **29**(5): 32–39] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2022.05.024
- [21] 李姣, 李朗, 汪杰, 等. 水土保持生态补偿优先区域的空间识别: 以洞庭湖生态经济区为例[J]. 生态与农村环境学报, 2021, **37**(4): 474–483. [LI Jiao, LI Lang, WANG Jie, et al. Priority areas recognition of ecological compensation for soil and water conservation: Taking Dongting Lake eco-economic zone as an example [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, **37**(4): 474–483] DOI: 10.19741/j.issn.1673–4831.2020.0848
- [22] 汪杰, 李朗, 李姣, 等. 洞庭湖生态经济区生态系统服务价值评估[J]. 湖南林业科技, 2021, **48**(2): 40–48. [WANG Jie, LI Lang, LI Jiao, et al. Evaluation of ecosystem service value in the Dongting Lake eco-economic zone [J]. Hunan Forestry Science & Technology, 2021, **48**(2): 40–48] DOI: 10.3969/j.issn.1003–5710.2021.02.008
- [23] 孙艺杰, 任志远, 郝梦雅, 等. 黄土高原生态系统服务权衡与协同时空变化及影响因素——以延安市为例[J]. 生态学报, 2019, **39**(10): 3443–3454. [SUN Yijie, REN Zhiyuan, HAO Mengya, et al. Spatial and temporal changes in the synergy and trade-off between ecosystem service, and its influencing factors in Yan'an, Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, **39**(10): 3443–3454] DOI: 10.5846/stxb201808141730
- [24] 曹辉, 林施琦, 张静娴, 等. 福利值与异质性: 武夷山国家公园旅游者的选择实验分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, **38**(1): 126–135. [CAO Hui, LIN Shiqi, ZHANG Jingxian, et al. Welfare value and heterogeneity: An experimental analysis of tourists' choice in Wuyi Mountain National Park [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, **38**(1): 126–135] DOI: 10.19741/j.issn.1673–4831.2021.0109
- [25] 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. [XIE Gaodi, ZHANG Caixia, ZHANG Leiming, et al. Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. Journal of Natural Resources, 2015, **30**(8): 1243–1254] DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.08.001
- [26] 南平市统计局. 南平统计年鉴—2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021: 15–17. [Nanping Bureau of Statistics. Nanping statistical yearbook (2020) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 15–17]
- [27] 赵雨晴, 游巍斌, 林雪儿, 等. 游客和居民视角下武夷山市生态系统文化服务感知比较研究[J]. 生态学报, 2022, **42**(10): 4011–4022. [ZHAO Yuqing, YOU Weibin, LIN Xueer, et al. Perception of cultural ecosystem services in Wuyishan City from the perspective of tourists and residents [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(10): 4011–4022] DOI: 10.5846/stxb202105171286
- [28] 王兆峰, 许静. 土地利用演变对国家公园生态系统服务价值的影响——以三江源国家公园为例[J]. 生态学报, 2022, **42**(17): 6948–6958. [WANG Zhaofeng, XU Jing. Impacts of land use evolution on ecosystem service value of national parks: Take Sanjiangyuan National Park as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, **42**(17): 6948–6958] DOI: 10.5846/stxb202102230499
- [29] 李雪敏, 李道政, 李柏丞. 大兴安岭山脉中段地区生态系统服务多维度权衡协同关系研究——以兴安盟地区为例[J]. 生态经济, 2024, **40**(2): 164–172. [LI Xuemin, LI Daozheng, LI Bocheng. Study on multi-dimensional tradeoffs and synergies of ecosystem services in the middle section of Daxing'an Mountains: A case study of Xing'an League [J]. Ecological Economy, 2024, **40**(2): 164–172]
- [30] 范耘恺, 马书明. 多情景模拟土地利用变化下的生态系统服务评估及其权衡/协同研究——以辽宁省沈抚地区为例[J]. 环境科学学报, 2023, **43**(10): 419–434. [FAN Yunkai, MA Shuming. Ecosystem services and their trade-offs/synergies analysis under multi-scenario simulation of land use change: A case study of Shenyang and Fushun City, Liaoning Province [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, **43**(10): 419–434] DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0085
- [31] 刘华妍, 肖文发, 李奇, 等. 北京市生态系统服务时空变化与权衡分析[J]. 生态学杂志, 2021, **40**(1): 209–219. [LIU Huayan, XIAO Wenfa, LI Qi, et al. Spatiotemporal variations and trade-offs of ecosystem services in Beijing [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, **40**(1): 209–219] DOI: 10.13292/j.1000–4890.202101.033
- [32] PEDERSON G T, GRAY S T, FAGRE D B, et al. Long-duration drought variability and impacts on ecosystem services: A case study from Glacier National Park, Montana [J]. Earth Interactions, 2006, **10**(4): 101–111. DOI: 10.1175/EI153.1

Spatial-Temporal Changes of Ecosystem Service Value with Trade-offs/Synergy in Wuyishan National Park, China

CAO Hui, WU Huizhen

(College of Economics and Management, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: National parks are unique natural landscapes in China's ecosystem, bearing rich natural heritage and biodiversity. The function of ecosystem services is the most fundamental natural and social attribute of national parks. Assessing the value of ecosystem services in national parks is conducive to the scientific construction of China's natural conservation system with national parks as the main sustainable body. Unfortunately, there was a lack of comprehensive assessment of the functional value of multiple ecosystem services, multiple methods, and dynamic analysis on spatial-temporal scales, particularly in key ecological regions with few case studies.

In this paper, it targeted the Fujian section of Wuyishan National Park, China to estimate the ecosystem service values with associated trade-offs/synergy relationship over the period from 1990 to 2020. It utilized data of GIS information platform of Wuyishan National Park and field survey results, which were processed by market value method, choice experiment method and equivalent factor method, in combination with the InVEST model tool.

(1) The value of ecosystem services in Wuyishan National Park generally demonstrated a fluctuating downward trend. The total value in 1995 and 2010 was relatively high, at 11.418 billion yuan and 11.499 billion yuan, respectively, while the value in 2020 was lower, at 7.477 billion yuan.

(2) The proportion dynamics of each function of the ecosystem services in Wuyishan National Park were different from those in other regions, and were greatly affected by the output and value changes of soil conservation, carbon storage, and water conservation, and other parts.

(3) Strong synergy and weak trade-off were the main characteristics of the relationship among the functions of the ecosystem service values in Wuyishan National Park. The changes in the physical quality and value of each ecosystem service function were significantly affected by factors such as precipitation decline (climate change), change in land use, and tourist growth.

(4) High-value clustering of cultural value functions was evident in the areas around Jiuquxi Stream, Yunufeng Peak, and Zhu Xi's former residence, while low-value of soil conservation function appeared in the surrounding areas of Yanzike and Dawangfeng Peak.

The research provides decision-making reference for scientific management of national park ecosystem services and sustainable development of regional social economy.

Key words: ecosystem service value; temporal and spatial changes; trade-off; synergy; Wuyishan National Park

(责任编辑 钟雨倩)