

DOI: 10.20103/j.stxb.202406241469

向洪莉,曹茜,眭海刚,曹威,史玮玥,杨敬元,葛亮.神农架国家公园生态系统服务权衡/协同及供需关系.生态学报,2025,45(10):4774-4788.

Xiang H L, Cao Q, Sui H G, Cao W, Shi W Y, Yang J Y, Ge L. Ecosystem services tradeoff-synergy and supply-demand relationships in the Shennongjia National Park. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4774-4788.

神农架国家公园生态系统服务权衡/协同及供需关系

向洪莉¹, 曹茜^{1,*}, 眭海刚², 曹威³, 史玮玥², 杨敬元^{4,5}, 葛亮⁶

1 中国地质大学(武汉)地理与信息工程学院, 武汉 430074

2 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

3 湖北地信科技集团股份有限公司, 武汉 430205

4 神农架国家公园管理局, 神农架 442421

5 神农架国家公园管理局神农架金丝猴保育生物学湖北省重点实验室, 神农架 442421

6 天津市测绘院有限公司, 天津 300381

摘要:神农架国家公园是我国十个国家公园试点之一,具有独特的生态价值和极高的生态地位。然而,对于新划定的神农架国家公园生态系统服务的权衡/协同关系和供需平衡关系研究较为缺乏,不利于神农架国家公园生态管理和价值实现。在评估神农架国家公园 2010—2020 年产水服务、土壤保持服务、固碳服务、水质净化服务和生境质量的基础上,采用相关性分析、热点分析、权衡协同度研究生态系统服务权衡/协同关系,通过计算供需比探究生态系统服务供需关系,基于市场价值法和替代成本法计算剩余生态系统服务价值量。研究表明:(1)神农架国家公园的生态系统服务总量整体上呈增长趋势,产水服务、土壤保持服务先下降后大幅上升,固碳服务先上升后有所下降,水质净化、固碳服务和生境质量的空间格局较为稳定,影响生态系统服务的主要因素为降雨、海拔、植被类型等;(2)除产水服务与生境质量之间具有较强的协同关系外,其他生态系统服务之间主要以权衡为主,尤以西北部的湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖北堵河源国家级自然保护区的权衡关系最强;(3)2 类、3 类生态系统服务热点区的面积最大且呈逐年增加趋势,4 类、5 类热点区的面积有所减少;(4)产水服务、土壤保持服务、固碳服务整体上为供大于求,综合供需比逐年增加;(5)在满足当地生态系统服务需求的基础上,神农架国家公园的剩余生态系统服务价值量由 144.06 亿元增加到 216.62 亿元。为更好地实现新划定的神农架国家公园全域管理,促进国家公园试点落地,亟需重视神农架国家公园的生态系统服务价值,积极探索生态产品价值实现机制,将生态效益转换为经济价值,提高当地和周边居民福祉。未来应将国家公园西北部(即原湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖北堵河源国家级自然保护区)作为管理和效益调控的重点对象,积极探索生态产品价值实现机制。

关键词:生态系统服务;权衡协同;供需平衡;价值量;神农架国家公园

Ecosystem services tradeoff-synergy and supply-demand relationships in the Shennongjia National Park

XIANG Hongli¹, CAO Qian^{1,*}, SUI Haigang², CAO Wei³, SHI Weiyue², YANG Jingyuan^{4,5}, GE Liang⁶

1 School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Geomatics Technology Group Stock Co., Ltd, Wuhan 430205, China

4 Shennongjia National Park Administration, Shennongjia 442421, China

5 Shennongjia National Park Administration, Hubei Key Laboratory of Conservation Biology of Snub-nosed Monkeys in Shennongjia, Shennongjia 442421, China

基金项目:神农架国家公园本底资源综合调查研究项目(SNJNP2023015);神农架金丝猴保育生物学湖北省重点实验室开放课题基金(SNJGKL2023015)

收稿日期:2024-06-24; **网络出版日期:**2025-03-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoqian@cug.edu.cn

6 *Tianjin Institute of Surveying and Mapping, Tianjin 300381, China*

Abstract: Among the ten pilot national parks in China, the Shennongjia National Park possess distinct ecological values and a significant ecological position. However, scant research exists on the trade-off/synergy relationship and supply-demand balance of ecosystem services (ESs) in the newly designated Shennongjia National Park, hindering effective ecological management and value realization. Drawing on assessments of water yield, soil conservation, carbon sequestration, water purification, and habitat quality in Shennongjia National Park from 2010 to 2020, this study employed correlation analysis, hotspot analysis, and a trade-off/synergy model to investigate the interplay of ESs, utilized the supply-demand ratio to assess the balance of ESs, and ultimately determined the value of residual ESs employing market value and alternative cost methodologies. Results show that: (1) the aggregate quantity of ESs in Shennongjia National Park showed an upward trend. Water yield and soil conservation decreased first and then increased significantly, while carbon sequestration increased first and then decreased. The spatial pattern of water purification, carbon sequestration and habitat quality was relatively stable, with key factors including rainfall, altitude, vegetation type, among others.; (2) with the exception of the robust synergistic link between water yield and habitat quality, the interactions between paired ESs were predominantly trade-offs, particularly in the northwestern sector of the Hubei Shibali Changxia National Nature Reserve and Hubei Duheyuan National Nature Reserve; (3) the hotspot zones of categories 2 and 3 were the largest and showed an increasing trend, while the hotspot zones of categories 4 and 5 decreased over time; (4) the provision of water yield, soil conservation and carbon sequestration services consistently surpassed their demand, and the overall supply-demand ratio escalated annually; (5) after meeting the local demand for ESs, the residual ESs values of the Shennongjia National Park increased from 14.406 billion yuan to 21.662 billion yuan. In order to better realize the global management of the newly designated Shennongjia National Park and promote the pilot implementation of the national park. It's necessary to pay attention to the value of ESs in the Shennongjia National Park, actively explore the realization mechanism of ecological product value, transform ecological benefits into economic value, and improve the local human well-being of. In the future, the northwestern part of the Shennongjia national park (i.e., the Hubei Shibali Changxia National Nature Reserve and Hubei Duheyuan National Nature Reserve) should be the key target place for ecological management and benefit regulation, and actively explore the value realization mechanism of ecological products.

Key Words: ecosystem services; trade-offs and synergies; supply-demand balance; ecosystem services values; the Shennongjia National Park

生态系统服务是指人类直接或间接从生态系统中获取的各种惠益,包含供给、调节、文化和支持服务^[1-2]。由于自然条件和人类需求差异,生态系统服务之间往往存在无关、此增彼减(权衡)、同增同减(协同)等复杂关系^[3-4]。生态系统服务之间的权衡/协同关系一直是生态系统服务研究的热点。目前,生态系统权衡/协同关系分析方法主要有统计分析法、空间分析法等。例如,戚琦等使用相关性系数分析了武汉市 2000—2020 年生态系统服务价值和权衡/协同关系^[5];赵文鹏等利用热点分析对祁连山 2000—2020 年 6 项生态系统服务的热点区进行识别^[6];朱丹丹等利用动态权衡度对湖北省 2010 年和 2020 年 4 项生态系统服务进行权衡/协同关系分析^[7]。相关性分析可以从整体上判定两两生态系统服务之间的关系,热点分析用于评估生态系统服务的聚集程度,权衡协同度分析在空间上对生态系统服务的组合进行分类。以上方法各有其侧重点,多方法的综合可以更为全面的分析区域生态系统服务的权衡/协同关系。为使区域生态系统服务对人类的效益达到最大化,需要揭示区域生态系统服务权衡/协同关系的时空变化特征,以此作为依据来调整相关生态管理措施,从而实现区域可持续发展^[8]。

生态系统服务供给是一个区域提供生态系统产品和服务的能力,即能够被实际利用的自然资源和服务^[9]。目前对于生态系统服务供给的研究较为成熟,评估体系相对完善。用于生态系统服务供给评估的模

型和方法众多。InVEST 模型操作简便、运行速度快,可适应不同的数据条件并输出生态系统服务的空间分布,在国内外研究中得到了广泛应用^[10]。人类对生态系统服务的需求日益增长,为了将生态系统服务与人类福祉建立关联,科学、客观的评估生态系统服务需求成为相关研究领域的热点。由于生态系统服务需求面向人类社会,其量化过程具有较大的主观性和人群针对性,因此尚未形成较为统一和公认的方法。目前,较为常用的方法为主观经验与客观经济指标相结合的方法^[11]。供需关系基于生态系统服务的供给量与需求量,采用供需比、需求率、供需协调等指数评价生态系统服务的供需匹配关系。例如,王雪燕等利用供需比评估太行山区粮食供给、产水、固碳服务的供需关系及其时空变化^[12];Feng 等利用供需匹配度对黄土高原 30 个小流域的固碳、土壤保持和产水服务供需平衡进行分析^[13]。厘清区域生态系统服务供需关系的表现形式与基本特征,可以为解决生态系统服务供需不均衡状况提供依据^[14]。

神农架国家公园于 2015 年被纳入国家公园试点,作为我国十大国家公园试点之一具有重要的生态保护价值。2021 年,与神农架国家公园试点区毗邻的巴东金丝猴、兴山万朝山、竹山堵河源、竹溪十八里长峡 4 个省级以上自然保护区被纳入神农架国家公园。目前,对神农架地区生态系统服务的研究主要聚焦价值量评估。例如,刘君等利用修正的当量因子法对原神农架国家公园 2005—2018 年生态系统服务的价值进行了评估^[15];刘永杰等利用影子工程法和替代成本法对神农架自然保护区 2012 年水源涵养服务和土壤保持服务的价值量进行了核算^[16]。总体上,以往研究对神农架国家公园生态系统服务供需平衡以及权衡/协同关系的探究较少。神农架国家公园生态产品丰富,在供需平衡的基础上量化其生态价值并通过调控生态系统服务之间的关系实现效益最大化,对于神农架国家公园生态价值实现至关重要。因此,本研究以新划定的神农架国家公园作为研究区,在生态系统服务评估的基础上,采用相关性分析、热点分析和权衡协同度探究生态系统服务的权衡/协同关系,利用供需比探究生态系统服务供需平衡关系,基于市场价值法、替代成本法计算其剩余价值量。研究结果可为神农架国家公园未来科学规划和统筹发展提供科学依据,促进生态价值交易市场形成发展。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

神农架国家公园(东经 109°42′45.442″—110°40′11.366″,北纬 31°11′43.041″—31°47′11.231″),东起宜昌市兴山县南阳镇,西至重庆市巫溪县,南自恩施土家族苗族自治州巴东县溪丘湾乡,北到十堰市竹山县官渡镇,东西长 90 km,南北宽 86 km,总面积 2372 km²(图 1)。总地势西南高东北低,西南部为高山区,东北部为

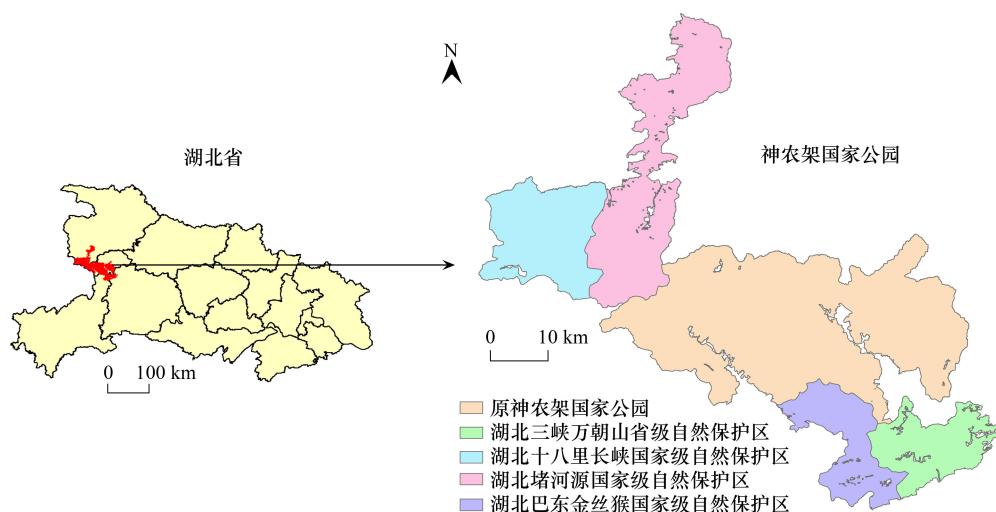


图 1 神农架国家公园区位图

Fig.1 Location of the Shennongjia National Park

低山区,海拔在 220—3108 m。神农架国家公园位于北亚热带季风气候区,降雨量丰沛,年降雨量 800—2500 mm,平均气温为 11.0—12.2 ℃。全年辐射量 103.7 kcal/m²,全年日照时数 1858.3 h,日照时数及总辐射量随着海拔的增高而减少。该区山势险峻,垂直梯度变化明显,形成了典型的山地植被垂直带谱,从低海拔的常绿阔叶林或常绿落叶阔叶混交林,到中山地带的落叶阔叶林或为针阔混交林,再到高山地带温带针叶林以及山顶区域的高山灌丛和草甸。神农架国家公园不仅森林资源丰富,珍稀动物资源也十分丰富,分布有国家重点保护动物 131 种,国家重点保护野生植物 29 种。

1.2 数据来源

本研究所使用的数据包括数字高程数据、土壤属性数据、土地利用/覆盖数据、气象数据(降水、潜在蒸散量)、水文数据(生活用水量、单位 GDP 耗水量、农田灌溉用水量)、社会经济统计数据(能源消耗量、GDP 人口数量)等,以上所有栅格数据转换为统一的投影坐标系(WGS_1984_UTM_49N)并重采样为 30 m 空间分辨率。数据信息详见表 1。

表 1 数据来源
Table 1 Data source

数据 Data	分辨率 Resolution	时间 Time	来源 Source
土地利用/覆盖数据 LULC data	30 m	2010—2020	全球 30 m 精细地表覆盖动态监测数据(https://data.casearth.cn/sdo/)
数字高程模型 Digital elevation model	30 m	—	ASTER GDEM V3 数据集(https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003/)
气象数据 Meteorologist data	1 km	2010—2020	国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn/home)
土壤数据 Soil data	1 km	—	世界土壤数据库(v1.2)(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/)
NPP 数据 NPP data	500 m	2010—2020	全球陆表特征参量产品 GLASS 产品数据集(https://glass-product.bnu.edu.cn/index.html)
人口密度数据 Population density data	100 m	2010—2020	NASA WorldPop 人口数据(https://www.worldpop.org/)
GDP 密度数据 GDP density data	1 km	2010—2020	全球电力消费 GDP 数据集(https://www.nature.com/articles/)
用水量数据 Water volume data	—	2010—2020	湖北省水资源公报(https://slt.hubei.gov.cn/bsfw/cxfw/szygb/)
统计数据 Statistical data	—	2010—2020	湖北省及各市县统计年鉴(https://tjj.hubei.gov.cn/tjsj/sjksx/tjnj/qstjnj/index.shtml)

2 研究方法

2.1 生态系统服务供给评估

(1) 产水服务

产水服务利用 InVEST 模型的 Annual Water Yield 模块进行评估,该模块基于 Budyko 水热耦合平衡公式计算产水量,计算公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x}\right) \times P_x \quad (1)$$

式中, Y_x 为栅格 x 的产水量(mm); AET_x 为栅格 x 的实际蒸散量(mm); P_x 为栅格 x 的年平均降雨量(mm)。

(2) 土壤保持服务

土壤保持服务基于修正的通用土壤流失方程(Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE)进行评估,即潜在土壤侵蚀量与实际土壤侵蚀量的差值,计算公式如下:

$$A_c = A_p - A_r = R \times K \times LS \times (1 - C \times P) \quad (2)$$

式中, A_c 为土壤保持量 (t/hm^2), 由潜在侵蚀 (A_p) 与实际侵蚀 (A_r) 之差决定; R 为降雨侵蚀力因子 ($MJ\ mm\ hm^{-2}\ h^{-1}$); K 为土壤可蚀性因子 ($t\ hm^2\ h\ hm^{-2}\ MJ^{-1}\ mm^{-1}$); LS 为地形因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持措施因子。模型中, 降雨侵蚀力因子 R 通过年降雨量计算得到, 土壤可蚀性因子 K 根据土壤中砂粒、粉粒、黏粒和有机碳的含量计算, C 通过归一化植被指数计算得到。

(3) 固碳服务

1 kg C 相当于 2.2 kg 的有机物质, 根据绿色植被光合作用化学方程式可知, 植被每生产 1 kg 有机物能固定 1.63 kg CO_2 , 1 kg CO_2 中包含 0.27 kg C 元素。因此, 可根据 NPP 总量估算固碳量, 计算公式如下:

$$W_c = NPP \times 2.2 \times 1.63 \times 0.27 \tag{3}$$

式中, W_c 为单位面积的固碳量 ($g\ C/m^2$), NPP 为净初级生产力 ($g\ C/m^2$)。

(4) 水质净化服务

水质净化服务利用 InVEST 模型中的 Nutrient Delivery Ratio 模块评估, 即通过氮元素的保留量来表征生态系统的水质净化服务, 不同植被类型的氮元素载荷值及保留效率由参数表决定, 计算公式如下:

$$P_x = S_x \times a_x \tag{4}$$

式中, P_x 为栅格 x 的氮载荷值 (kg/hm^2); S_x 为栅格 x 的水文敏感性值, 通过径流系数之比计算得到; a_x 为栅格 x 的氮输出系数 (kg/hm^2)。

(5) 生境质量

以神农架国家公园的国家一级保护动物川金丝猴作为目标物种, 利用指标体系法评估其生境质量。其中, 海拔、坡度、坡向和到河流的距离为非生物因子; 植被类型为生物因子; 距道路、居民点和农田的距离为人为干扰因子。将上述 8 个指标划分为最适宜、适宜、次适宜和不适宜 4 个等级并赋值(表 2)。根据川金丝猴生活习性和神农架国家公园实际情况, 对不同等级的指标赋予权重, 以此评估川金丝猴的生境质量^[17–22]。

表 2 指标选取及分级表

Table 2 Indicator selection and grades

指标 Indicator	最适宜 Optimal	适宜 Suitable	次适宜 Sub-suitability	不适宜 Not suitable
海拔 Elevation	2000—2600 m	1600—2000 m	2600—3000 m	>3000 m, <1600 m
坡度 Slope	>35°	25°—35°	15°—25°	0—15°
坡向 Aspect	E/W	S/SE/SW	NE/NW	N/Flat
距河流距离 Distance from river	500—1000 m	<500 m	1000—3000 m	>3000 m
距道路距离 Distance from road	>1000 m	500—1000 m	100—500 m	<100 m
距居民点距离 Distance from settlements	>2000 m	1000—2000 m	500—1000 m	<500 m
距农田距离 Distance from farmland	>750 m	500—750 m	250—750 m	<250 m
赋值 Value	1	0.6	0.3	0

E: 东 East; S: 南 South; W: 西 West; N: 北 North; SE: 东南 SouthEast; SW: 西南 SouthWest; NE: 东北 NorthWest; NW: 西北 NorthWest; Flat: 平坡

2.2 生态系统服务关系分析

(1) 相关性分析

按照两点距离不小于栅格大小(30 m)的原则生成随机点, 运用 Spearman 秩相关分析计算两两生态系统服务之间的相关系数。在 $P<0.05$ 显著性水平下, 相关系数为正代表二者具有协同关系, 相关系数为负代表二者具有权衡关系。

(2) 热点分析

将各生态系统服务大于其平均值的栅格视为该服务的热点区域, 利用叠加分析对神农架国家公园生态系统服务的多重热点区进行识别。最终将整个区域划分为非热点区和 1—5 类热点区共 6 种情况。

(3) 权衡协同度

为统一各生态系统服务由于单位不同造成的差异,首先对各服务进行标准化处理。然后,运用自然间断点法将其分为低、中、高三个等级。根据 5 种服务的叠置结果制定权衡/协同的分类标准(表 3)。

进一步将权衡划分为强权衡和弱权衡:强权衡为一种服务供给能力较强而其他服务供给能力较低的状态;弱权衡为 2 种、3 种或 4 种服务供给能力较高而其他较低的状态。同理,协同划分为高协同和低协同:高协同即 5 种服务供给能力都较高,是最协调的状态,也是生态系统管理的最终目标;低协同即 5 种服务供给能力都较低,这种状态是最不理想的。

表 3 生态系统权衡/协同度划分标准

Table 3 Criteria for delineating ecosystem trade-offs/synergies

一级分类 Level 1 classification	二级分类 Level 2 classification	供给能力组合 Ecosystem services combination
权衡 Trade-offs	强权衡	1 高 4 低、1 高 1 中 3 低、1 高 2 中 2 低、1 高 3 中 1 低
	弱权衡	2 高 3 低、2 高 1 中 2 低、2 高 2 中 1 低、3 高 2 低、3 高 1 中 1 低、4 高 1 低
协同 Synergies	高协同	5 高、4 高 1 中、3 高 2 中、2 高 3 中、1 高 4 中、5 中
	低协同	1 中 4 低、2 中 3 低、3 中 2 低、4 中 1 低、5 低

2.3 生态系统服务供需关系评估

利用社会经济统计数据对神农架国家公园产水服务、土壤保持服务和固碳服务的需求量进行评估,具体计算方法如下表 4 所示。

表 4 生态系统服务需求量评估

Table 4 Assessment of ecosystem services demands

指标 Indicator	含义 Connotation	公式 Formula	解释 Interpretation
产水服务 Water yield	将耗水量作为产水服务需求量。耗水量包括生活用水、经济用水和耕地灌溉用水三部分,通过查找各级统计年鉴和水资源公报获取相关数据 ^[23]	$D_{wy} = D_a \times \rho + D_b \times GDP + D_c \times AGR$	式中, D_{wy} 为产水服务的需求量(m^3/hm^2); D_a 为人均生活用水量($m^3/人$); ρ 为人口密度数据($人/hm^2$); D_b 为每万元 GDP 耗水量($m^3/万元$);GDP 为国内生产总值($万元/hm^2$); D_c 为单位面积耕地的灌溉水量(m^3/hm^2);AGR 为耕地数量。
土壤保持 Soil conservation	将实际土壤侵蚀量作为土壤保持服务需求量。根据修正的土壤流失方程计算原理,当地区的水土流失越严重,人们期望减少的土壤侵蚀量越大 ^[24-26]	$D_{sc} = R \times K \times LS \times C \times P$	式中, D_{sc} 为实际土壤侵蚀量(t/hm^2); R 为降雨侵蚀因子; K 为土壤侵蚀因子; LS 为坡度坡长因子; C 为植被覆盖因子; P 为水土保持因子。
固碳服务 Carbon sequestration	将碳排放量作为固碳服务的需求量,由人均碳排放量与人口密度计算得到 ^[27]	$D_{cs} = p_{pop} \times D_{cp}$	式中, D_{cs} 为固碳服务需求量(t); p_{pop} 为区域人口密度($人/km^2$); D_{cp} 为人均碳排放量($t/人$)。

利用生态系统服务供需比反映神农架国家公园各生态系统服务的供需情况,计算公式如下:

$$ESDR_i = \frac{S_i - D_i}{(S_{imax} + D_{imax}) / 2} \quad (5)$$

式中, $ESDR_i$ 为第 i 种生态系统服务的供需比; S_i 为第 i 种生态系统服务的供给量; D_i 为第 i 种生态系统服务的需求量; S_{imax} 为第 i 种生态系统服务供给量的最大值; D_{imax} 为第 i 种生态系统服务需求量的最大值。当 $ESDR_i > 0$ 时,表示该生态系统服务供大于求;当 $ESDR_i = 0$ 时,表示供需平衡;当 $ESDR_i < 0$ 时,表示供不应求。在得到单项生态系统服务的供需比后,通过计算各项服务供需比的算术平均值,即综合供需比来表示神农架国家公园生态系统服务供需关系的整体水平。

2.4 生态系统服务价值量评估

参考《陆地生态系统生产总值(GEP)核算技术指南》,对产水服务、土壤保持服务、固碳服务的价值量进

行计算。

(1) 产水服务

运用影子工程法,即模拟建设蓄水量与生态系统产水量相当的水利设施,以建设该水利设施所需要的成本核算产水服务价值,计算公式如下:

$$V_{wy} = Q_{wy} \times C_{we} \quad (6)$$

式中, V_{wy} 为产水服务价值(元); Q_{wy} 为核算区内的水源涵养量(m^3), C_{we} 为水库单位库容的工程造价及维护成本(元/ m^3)。根据《森林生态系统服务功能评估规范》(LYT 1721—2008), 1993—1999 年《中国水利年鉴》平均水库库容造价为 2.17 元/ m^3 , 2005 年价格指数为 2.816, 由此得到单位库容造价为 6.11 元/ m^3 , 再利用居民消费指数计算得到相应年份的产水服务单价。

(2) 土壤保持服务

土壤保持服务的经济价值主要体现在减少面源污染和减少泥沙淤积两个方面的价值。其中,减少面源污染的价值根据土壤中污染物含量及污染物处理成本核算,减少泥沙淤积的价值根据泥沙淤积系数、土壤容重和单位水库清淤工程费用核算。计算公式如下:

$$V_{sr} = V_{sd} + V_{dpd} \quad (7)$$

$$V_{sd} = \lambda \times (Q_{sr} / \rho) \times c \quad (8)$$

$$V_{dpd} = \sum_{i=1}^n Q_{sr} \times c_i \times p_i \quad (9)$$

式中, V_{sr} 为土壤保持服务的价值量(元); V_{sd} 为减少泥沙淤积的价值量(元); V_{dpd} 为减少面源污染的价值量(元); λ 为泥沙淤积系数; A_e 为土壤保持量(t); ρ 为土壤容重(t/m^3); c 为单位水库清淤工程费用(元/ m^3); c_i 为土壤中氮、磷等污染物的含量(%); p_i 为污染物处理成本(元/t); i 为土壤中氮、磷等污染物的数量, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

(3) 固碳服务

利用市场价值法(碳交易价格)对固碳服务价值量进行核算,计算公式如下:

$$V_c = C \times P \quad (10)$$

式中, V_c 为固碳服务价值量(元); C 为固碳量(t/hm^2); P 为碳交易价格(元/t),本研究采用湖北碳排放权交易中心 2020 年每月月初碳交易价格的平均值作为碳交易价格(表 5)。

表 5 湖北碳排放权交易中心 2020 年每月月初碳交易价格

Table 5 Carbon trading price at the beginning of each month in 2020 by the Hubei Carbon Emissions trading Market

时间 Time	单价/(元/t) Unit price	时间 Time	单价/(元/t) Unit price	时间 Time	单价/(元/t) Unit price
2020.01	27.96	2020.05	25.50	2020.09	29.00
2020.02	—	2020.06	25.20	2020.10	27.37
2020.03	25.59	2020.07	26.39	2020.11	29.41
2020.04	25.89	2020.08	27.80	2020.12	27.02

3 结果分析

3.1 神农架国家公园生态系统服务时空变化

神农架国家公园 2010、2015 和 2020 年生态系统服务评估结果如图 2 所示。其中,产水量先减少后增加,并在 2020 年达到最大为 715.43 mm。产水服务高值主要集中在研究区中部,即原神农架国家公园所在区域,2020 年的产水量均值为 818.29 mm;新纳入的湖北堵河源国家级自然保护区的产水量最小,2020 年产水量均值仅为 539.03 mm。

固碳量先大幅增加后略有减少。湖北三峡万朝山省级自然保护区的年均固碳量最高,原神农架国家公园的固碳量最低,两个区域的固碳量差值最高达到了 0.57 t/hm^2 ,这是由于中部地区的主要植被类型为草地,与

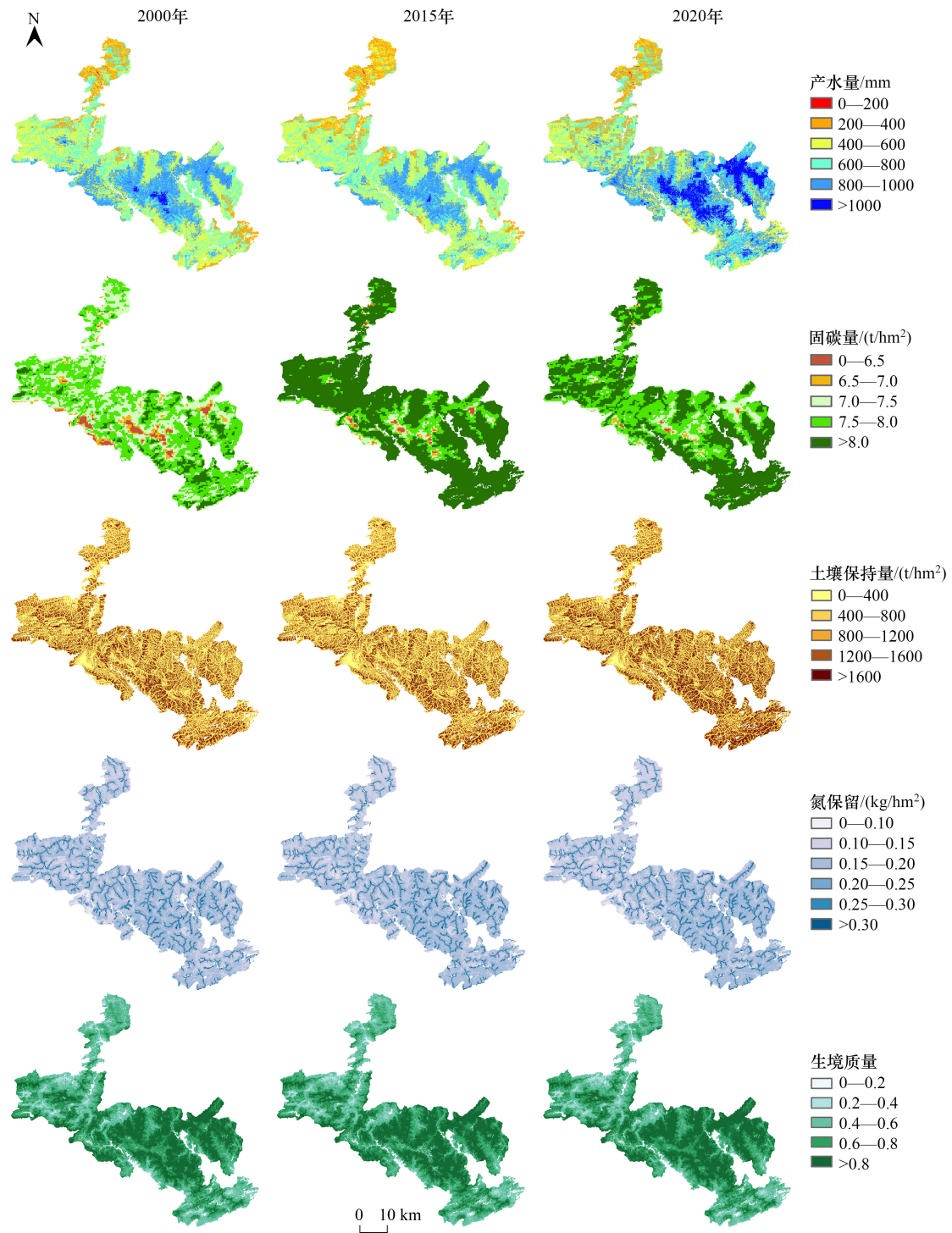


图2 神农架国家公园生态系统服务供给空间格局

Fig.2 Spatial pattern of ecosystem services in the Shennongjia National Park

其他区域分布的林地相比固碳能力较低。

2010—2020 年,土壤保持服务、水质净化服务、生境质量的空间格局较为稳定,变化不大。其中,土壤保持量呈增加趋势,至 2020 年土壤保持量达到 1043.41 t/hm²。土壤保持服务高值区分布较为零散,主要集中在海拔较高的区域,其他区域的土壤保持值均较低。氮元素保有量基本不变(2010 年为 0.8837 kg/hm²,2020

年为 0.8839 kg/hm^2), 大部分区域的值相对较低, 高值主要出现在地势较低的区域。川金丝猴生境质量指数有所增加但增幅较小, 由 2010 年的 0.691 增加到 2020 年 0.695。川金丝猴生境质量指数较高的区域集中在中部, 即原神农架国家公园所在位置, 2020 年达到了 0.774; 指数较低的区域分布在湖北堵河源国家级自然保护区的指数最小, 2020 年仅为 0.597, 其余区域指数均在 0.6 以上。

3.2 神农架国家公园生态系统服务权衡/协同关系

(1) 相关性分析

首先通过计算两两服务之间的相关性系数来分析神农架国家公园生态系统服务的权衡/协同关系 (图 3)。总体上, 生态系统服务之间的相关性均通过了 0.01 水平的显著性检验 (2020 年产水服务与固碳服务的相关性不显著除外)。相关系数的年际间波动较小, 表明服务之间的权衡/协同关系较为稳定。通常, 相关系数绝对值在 0.8 以上表示高度相关, 0.5—0.8 之间为中度相关, 0.3—0.5 之间为低度相关, 0.3 以下表示相关性很弱。生境质量与产水服务表现为强协同关系, 相关系数为 0.64—0.65; 固碳服务与产水服务表现为低权衡关系, 相关系数为 -0.42—-0.35; 水质净化与土壤保持为低权衡关系, 相关系数为 -0.37—-0.38; 其余服务间的相关系数均小于 0.3, 相关性较弱。

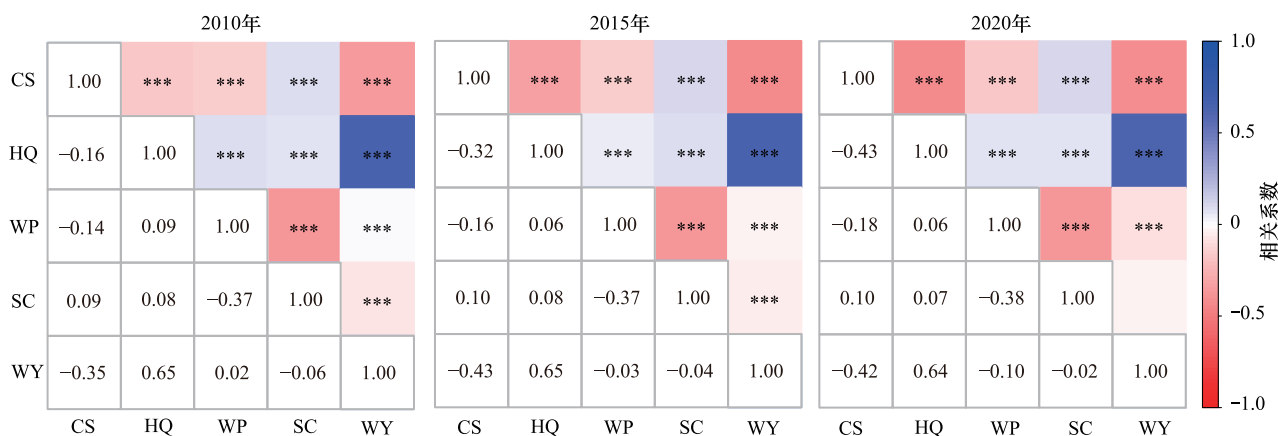


图 3 神农架国家公园生态系统服务之间的相关系数

Fig 3 Correlation between ecosystem services in the Shennongjia National Park

CS: 固碳服务; HQ: 生境质量; WP: 水质净化; SC: 土壤保持; WY: 产水服务; ***: 表示相关性通过了 0.01 水平的显著性检验

(2) 权衡协同度

2010—2020 年, 神农架国家公园生态系统服务关系以弱权衡为主, 面积比例达到了 50% 以上 (2010 年为 53%, 2015 年为 56%, 2020 年为 54%)。说明在较少受到人类活动干扰的情况下, 生态系统服务之间仍然存在权衡的情况。高协同和强权衡占比为 20%—25%。低协同面积占比最小, 不同时期占比均在 3% 以下 (图 4)。整体上, 权衡/协同关系的空间分布变化不大, 强权衡主要分布在西北部分区域, 即湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖北堵河源国家级自然保护区; 高协同则主要分布在中部区域, 即原神农架国家公园所在区域。研究时间段内, 强权衡和低协同分布的面积有所增加, 弱权衡和高协同分布的面积有所减少。中部部分区域由高协同转为弱权衡, 原因为中部固碳服务低于均值的区域增加; 南部出现部分权衡转为高协同, 主要由产水量和固碳量在南部增加导致。

(3) 热点分析

2010—2020 年, 神农架国家公园生态系统服务热点区时空变化整体较为稳定 (图 5)。2 类、3 类热点区面积占比最大, 且呈逐年增加趋势, 由 2010 年的 63% 增加到 2020 年的 67%。4 类、5 类热点区的面积均有所减少, 由 2010 年的 25% 减少到 2020 年的 21%。空间上, 2 类热点区主要分布在研究区北部和东南角, 即湖北堵河源国家级自然保护区和湖北三峡万朝山省级自然保护区。1 类热点区仅占 10%, 分布在湖北堵河源国家

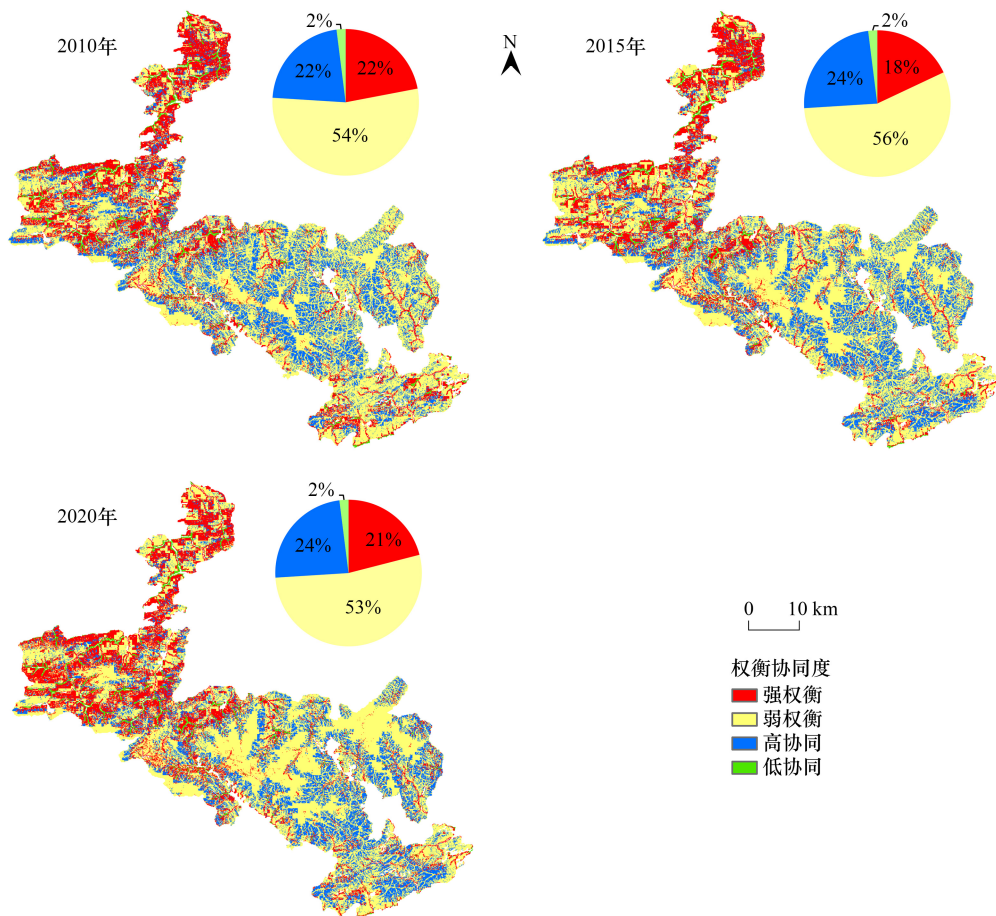


图 4 神农架国家公园生态系统服务权衡协同度

Fig.4 Trade-offs and synergies of ecosystem services in the Shennongjia National Park

级自然保护区的北部,而非热点区面积仅占 1%。

综合相关性分析、热点分析和权衡协同度分析结果,神农架国家公园生态系统服务权衡关系主要出现在原湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖北堵河源国家级自然保护区的固碳服务与生境质量、产水服务与固碳服务之间;协同关系主要出现在原神农架国家公园、湖北巴东金丝猴国家级自然保护区和湖北三峡万朝山省级自然保护区的产水服务与生境质量之间。

3.3 神农架国家公园生态系统服务供需关系

神农架国家公园 2010、2015 和 2020 年生态系统服务供需关系评估结果如图 6 所示。2010—2020 年,产水服务整体上表现为供大于求。中部地区供大于求较为明显,原因是该地区产水量较大、人类活动较少。研究区北部有少数地区出现供不应求,但其面积占比逐年减少(2020 年仅占全域总面积的 0.1%),集中分布在湖北堵河源国家级自然保护区。该地区有一定面积水体,产水量较小,导致产水服务出现供不应求的情况。

固碳服务在 2010 年表现为供大于求,且大部分区域的供需比大于 0.9,仅中部少数地区的供需比介于 0.6—0.9。2015 年的供需比在三个时段内最小,这是因为该年的固碳服务供给量较其他年份少。2020 年中部的供需较南北部小,由固碳服务供给量的空间差异造成。研究区的东南方向有少数地区在 2015 和 2020 年出现供不应求的情况,这些地区主要为新建的民宿、餐馆等旅游配套设施。土壤保持服务整体上表现为供大于求,且年际变化不大,这是由相对稳定的土地利用类型决定的。

整体上,神农架国家公园 2010—2020 年产水服务、土壤保持服务和固碳服务在大部分区域表现为供大于需,即生态系统服务在满足当地需求的前提下还有较大的剩余。综合考虑以上 3 种生态系统服务的供需关

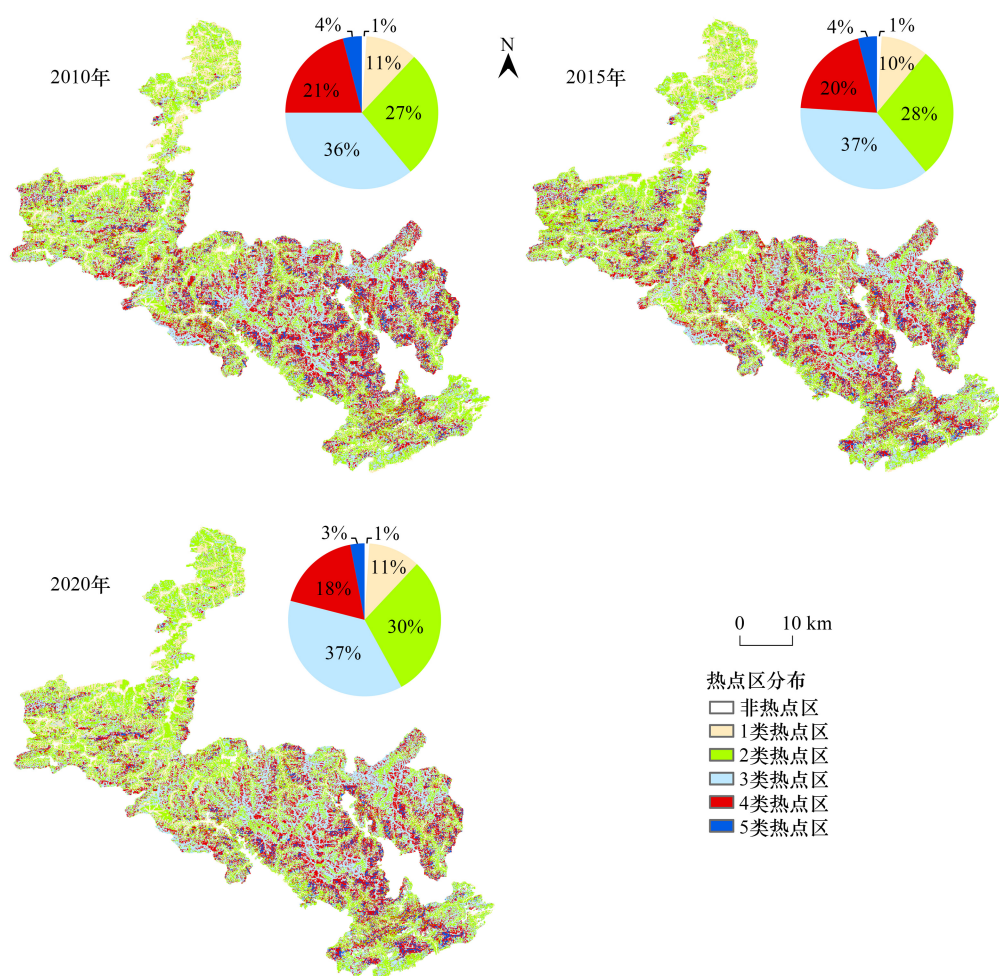


图5 神农架国家公园生态系统服务热点区分布

Fig.5 Hotspot areas of ecosystem services in the Shennongjia National Park

系,得到神农架国家公园生态系统服务综合供需关系。2010—2015年,综合供需比有所下降,主要由固碳供需比减少造成。研究区北部极少数地区出现供不应求情况,主要由北部部分区域的产水量较小造成。2015—2020年,由小部分区域的供不应求转变成均为供大于求,供需关系逐渐向好。中部区域,即原神农架国家公园范围,供需比显著增加,这是产水服务和固碳服务供需比均增加的叠加效果。

3.4 神农架国家公园生态系统服务价值量

为了消除通货膨胀带来的影响,根据《中国统计年鉴》中的居民消费指数确定2010、2015和2020年各生态系统服务的单价(表6)。在产水服务、土壤保持服务和固碳服务供需关系评估的基础上,计算神农架国家公园在满足当地生态系统服务需求的情况下所能产生的剩余服务价值量(表7)。结果表明,神农架国家公园2010、2015和2020年产生的剩余生态系统服务价值量分别为144.06亿元、162.99亿元和216.62亿元。其中,原神农架国家公园产生的剩余价值量最大,占比达到54%;湖北省堵河源国家级自然保护区占比为16%—18%,湖北十八里长峡国家级自然保护区、湖北巴东金丝猴国家级自然保护区和湖北三峡万朝山省级自然保护区占比仅各为10%左右。

4 讨论与结论

4.1 讨论

2010—2020年产水量在中南部地区呈现先减少后增加的趋势,这与神农架国家公园的年降雨量变化趋

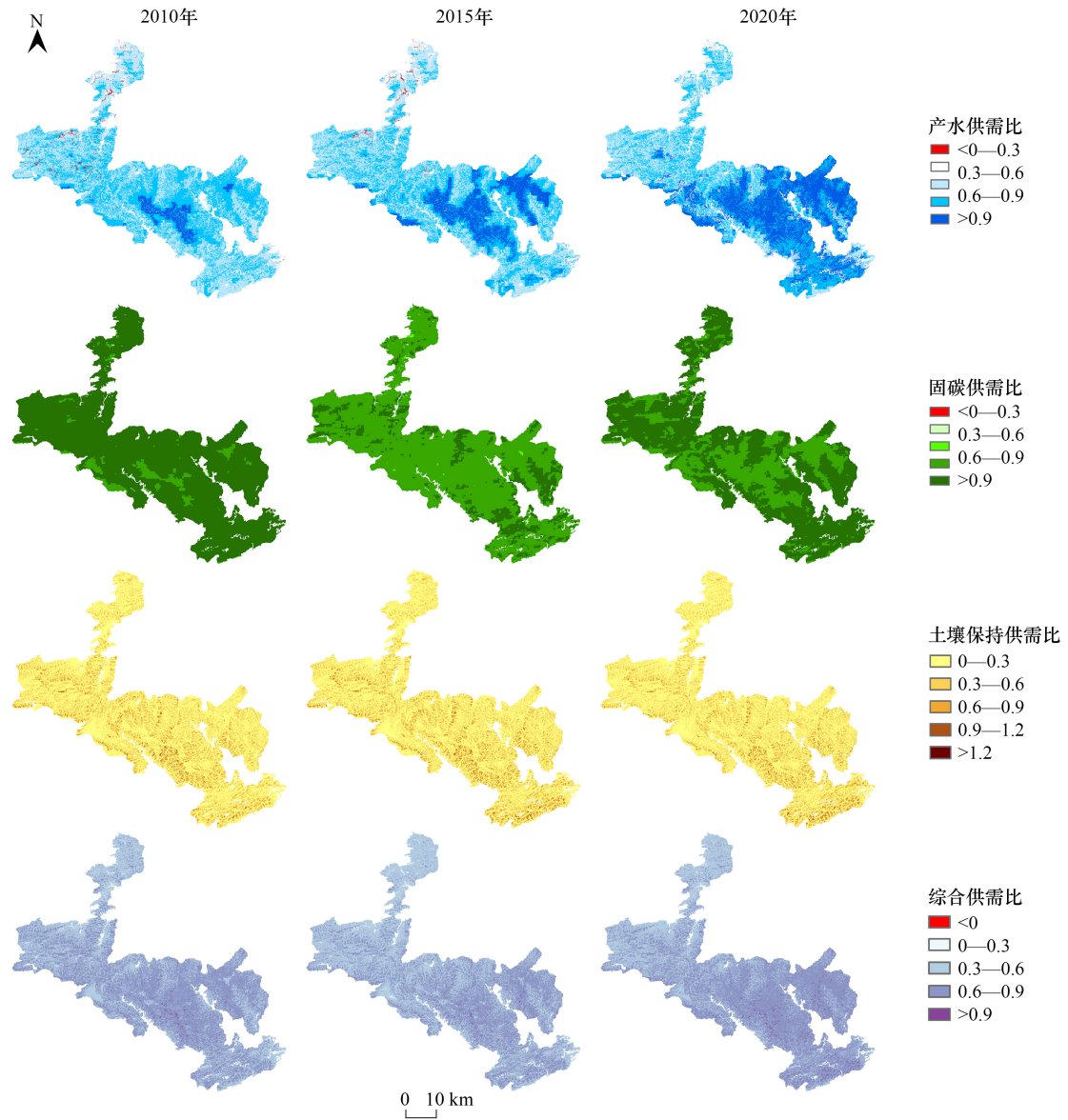


图 6 神农架国家公园生态供需关系分析结果

Fig.6 Supply and demand results of ecosystem services in Shennongjia National Park

表 6 生态系统服务单价

Table 6 Unit price of ecosystem services

单价 Unit price/元	2010	2015	2020
产水服务 Water yield service/m ³	7.06	8.10	9.04
土壤保持服务 Soil conservation service/t	20.89	23.45	26.75
固碳服务 Carbon sequestration service/t	21.09	24.20	27.01

表 7 生态系统服务价值量

Table 7 Value of ecosystem services

价值量 Value/亿元	2010	2015	2020
产水服务 Water yield service	101.56	115.91	150.15
土壤保持服务 Soil conservation service	42.13	46.61	65.97
固碳服务 Carbon sequestration service	0.37	0.47	0.50
合计 Total	144.06	162.99	216.62

势相一致,降雨量变化是影响神农架国家公园产水量的主要原因。固碳量呈现先增加后减少的趋势,主要为气温、降雨、辐射等气象因素共同影响。已有研究表明,神农架国家公园 NPP 整体上与降水表现为负相关,与

气温和太阳辐射表现为正相关。固碳量变化与神农架国家公园年降雨量先减少后增加而气温变化不大相一致^[28]。在土地利用/覆盖较为稳定的情况下,土壤保持服务、水质净化服务、生境质量的时空变化较小^[29-38]。原神农架国家公园范围内的生境质量指数较高,大部分地区生境质量相对稳定。已有研究利用 InVEST 模型的生境质量模块计算得到神农架林区的生境质量整体较高,60%以上的地区都处于较高等级和高等级,与本研究计算结果一致^[39]。2010—2020 年,固碳服务年均值稳定在 7.8—8.3 t/hm²,与已有相关研究结果相比偏高,主要原因是本文的研究区为新划定的神农架国家公园,与原范围相比常绿阔叶林占比增大,因此得到的固碳量更大^[40]。

权衡协同度和热点区具有明显的空间异质性。位于西部与北部的湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖北堵河源国家级自然保护区的大部分区域表现为强权衡和 2 类热点区。这两个自然保护区的固碳量相对较高而其他服务较低,主要原因是林地中的阔叶林占比较大,蒸散量较大导致产水量较小,平均海拔较低导致土壤保持量较小且不宜川金丝猴生存,也使得固碳服务与生境质量整体上呈低权衡。原神农架国家自然保护区中部表现为弱权衡而周围表现为高协同,出现差异的主要原因是中部分布有大片的草地、针叶林和针阔混交林,使得部分区域的固碳量与生境质量指数较低,因此低权衡和 2、3 类热点区占主导。草地与针叶林的蒸散量较小导致产水量较大,也使得产水服务与固碳服务整体上呈低权衡。周边以阔叶林为主且海拔较高,除产水服务外其他生态系统服务均较高,因此高协同和 4 类热点区占主导。原湖北巴东金丝猴国家级自然保护区和湖北三峡万朝山省级自然保护区以高协同为主且面积逐年增加,4 类热点区分布也较多,得益于此处分布的常绿阔叶林分布面积较广。

产水服务、土壤保持服务和固碳服务整体呈现供大于需,仅在小部分区域出现供小于需的情况(主要分布在北部的水体附近和东南部的机场、相关旅游配套设施周围)^[41]。较高的森林覆盖率和较少的人类活动决定了供需的整体关系。换言之,神农架国家公园有极大的生态系统服务“盈余”,对剩余生态系统服务的价值进行量化是推进生态产品市场化的基础。刘永杰等分别利用影子工程法和替代成本法对神农架自然保护区 2012 年水源涵养和土壤保持服务的价值量进行了核算,核算结果分别为 1.13 万元/hm² 和 3.69 万元/hm²^[16]。本研究评估的神农架国家公园 2010 年产水服务和土壤保持服务的剩余价值量分别为 4.28 万元/hm² 和 1.78 万元/hm²,与刘永杰等的核算结果存在差异但仍处于同一数量级。产生差异的原因是本研究的产水服务价值包括水源涵养价值和地表径流价值两部分,因此核算结果偏高;同理,本研究的土壤保持服务价值包括减少面源污染和泥沙淤积的价值,并未考虑保持土壤肥力的价值,因此核算结果偏低。总体上,当前对生态系统服务需求的量化较少考虑当地居民的偏好,后续研究应更多考虑主观因素对生态系统服务需求的影响。

为更好地实现新划定的神农架国家公园全域管理,促进国家公园试点落地,在本文研究结果的基础上,参考已正式设立的武夷山国家公园、海南热带雨林国家公园、大熊猫国家公园管理措施,提出以下政策建议:(1)加强纳入国家公园范围内的周边各级自然保护区的联合管理,构建大数据平台,实现全域的天空地一体化监测系统;(2)针对原湖北堵河源国家级自然保护区和湖北十八里长峡国家级自然保护区生态系统服务供给量较低、服务之间权衡较强的区域,结合实地状况进行生态功能区与动物栖息地的划分;(3)重视神农架国家公园的生态系统服务价值,积极探索生态产品价值实现机制,将生态效益转换为经济价值,提高当地和周边居民福祉。

4.2 结论

(1)2010—2020 年,神农架国家公园生态系统服务总量呈增长趋势。产水服务、土壤保持服务先下降后大幅上升;固碳服务先上升后有所下降;水质净化和生境质量持续上升。从空间分布上看,产水服务和生境质量的高值区主要分布于中部,即原神农架国家公园所在位置;土壤保持服务高值区主要分布在山脊周围;水质净化、固碳服务和生境质量的空间格局较为稳定。

(2)神农架国家公园生态系统服务之间的关系以权衡为主,其中湖北十八里长峡国家级自然保护区和湖

北堵河源国家级自然保护区的权衡关系最强。产水服务与生境质量之间的协同关系较强,主要在中部地区。2010—2020 年,生态系统服务 5 类热点区和非热点区的面积略有减小,2、3 类热点区的面积有所增加。

(3)2010—2020 年,神农架国家公园产水服务、土壤保持、固碳服务整体上均为供大于求,综合供需比逐年增加。在满足当地生态系统服务需求的基础上,神农架国家公园的剩余生态系统服务价值量由 144.06 亿元增加到 216.62 亿元,增长达 50.37%。

参考文献(References):

- [1] 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. *Ecological Economics*, 1998, 25(1): 3-15.
- [2] Alcamo J, Bennett E M, Assessment M E. *Ecosystems and human well-being: a framework for assessment*. Washington, DC: Island Press, 2003
- [3] 张碧天, 闵庆文, 焦雯珺, 何思源, 刘某承, 杨伦. 生态系统服务权衡研究进展. *生态学报*, 2021, 41(14): 5517-5532.
- [4] 李鹏, 姜鲁光, 封志明, 于秀波. 生态系统服务竞争与协同研究进展. *生态学报*, 2012, 32(16): 5219-5229.
- [5] 戚琦, 王玲, 陈俊辰, 王彬宇, 贺淑钰, 韩建南, 李兆华, 李昆. 武汉市城市快速扩张与生态系统服务价值权衡/协同的交互作用. *地理科学*, 2024, 44(6): 953-963.
- [6] 赵文鹏, 吕荣芳, 庞吉丽, 张建明, 王乃昂. 2000—2020 年祁连山生态系统服务时空分异研究. *冰川冻土*, 2023, 45(4): 1367-1378.
- [7] 朱丹丹, 安睿, 刘艳芳, 仝照民, 窦超, 晏阳. 湖北省生态系统服务协同权衡时空差异及归因分析. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(4): 799-809.
- [8] 曹祺文, 卫晓梅, 吴健生. 生态系统服务权衡与协同研究进展. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 3102-3111.
- [9] Cui F Q, Tang H P, Zhang Q, Wang B J, Dai L W. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different scales: a case study in Hulunbuir, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100984.
- [10] 吴舒雁, 朱庆林, 翟焕锋. 基于 InVEST 模型的广西茅尾海土地利用变化与碳储量评估. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 432-442.
- [11] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 王玥瑶, 孙福月. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望. *自然资源学报*, 2021, 36(8): 1909-1922.
- [12] 王雪燕, 赵丽, 苏孟维. 供需关系下保定太行山区生态系统服务时空演化研究. *林业与生态科学*, 2024, 39(1): 57-65.
- [13] Feng Q, Duan B L, Zhang X. Relationship between ecosystem-services trade-offs and supply-demand balance along a precipitation gradient: a case study in the central Loess Plateau of China. *Land*, 2024, 13(7): 1057.
- [14] 安志英, 孙才志, 郝帅. 我国东北生态系统服务供需匹配关系——基于水-能源-粮食纽带视角. *生态学报*, 2024, 44(10): 4170-4186.
- [15] 刘军, 刘霁玮, 岳梦婷. 国家公园生态银行模式构建——以神农架国家公园试点为例. *中国生态旅游*, 2021, 11(5): 798-810.
- [16] 刘永杰, 王世畅, 彭皓, 李镇清. 神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估. *应用生态学报*, 2014, 25(5): 1431-1438.
- [17] 刘广超. 川金丝猴栖息地质量评价和保护对策研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [18] 姜哲. 湖北神农架林区川金丝猴栖息地适宜性变化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [19] 张宇, 李丽, 李迪强, 吴巩固. 基于斑块尺度的神农架川金丝猴生境适宜性评价. *生态学报*, 2018, 38(11): 3784-3791.
- [20] 李武. 基于景观连接度的神农架自然保护区川金丝猴生境评价与保护策略研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2016.
- [21] 张宇. 神农架川金丝猴生境适宜性评价[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [22] 唐诚. 神农架自然保护区川金丝猴生境选择与适宜性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- [23] 王佳雯. 丹东市生态系统服务供需格局时空演变研究[D]. 大连: 辽宁师范大学, 2022.
- [24] 邓丽明, 杨骥, 尹小玲, 贾凯, 孙嘉, 舒思京, 黄爱琳. 粤港澳大湾区生态系统服务供需关系及其对城市化多空间尺度的响应. *生态学报*, 2024, 44(20): 9094-9107.
- [25] Chen Y R, Qiao X N, Yang Y J, Zheng J C, Dai Y L, Zhang J. Identifying the spatial relationships and drivers of ecosystem service supply-demand matching: A case of Yiluo River Basin. *Ecological Indicators*, 2024, 163: 112122.
- [26] Hou W Y, Hu T Z, Yang L P, Liu X C, Zheng X Y, Pan H Y, Zhang X H, Xiao S J, Deng S H. Matching ecosystem services supply and demand in China's urban agglomerations for multiple-scale management. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 420: 138351.

- [27] 李成, 赵洁. 长三角城市群生态系统服务供需格局与影响因素研究. 生态经济, 2022, 38(9): 160-169, 187.
- [28] Jia L, Yu K X, Li Z B, Li P, Xu G C, Cong P J, Li B B. Spatiotemporal pattern of NPP and its response to climatic factors in the Yangtze River Economic Belt. *Ecological Indicators*, 2024, 162: 112017.
- [29] 郑德凤, 郝帅, 吕乐婷, 徐文瑾, 王燕燕, 王辉. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系. 地理研究, 2020, 39(1): 64-78.
- [30] 王晓琪, 赵雪雁. 人类活动对国家公园生态系统服务的影响——以祁连山国家公园为例. 自然资源学报, 2023, 38(4): 966-982.
- [31] 段宝玲, 冯强, 原燕燕, 李鹏晖. 钱江源国家公园体制试点区生态系统服务权衡与协同分析. 旅游科学, 2021, 35(5): 11-31.
- [32] 赵文斐. 气候变化背景下生态系统服务功能特征研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2021.
- [33] 李博, 林文鹏, 李鲁冰. 面向 SDG15 的钱江源国家公园生态系统服务时空分析. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 243-253.
- [34] 韩武宏. 基于 InVEST 模型的祁连山国家公园生态系统服务功能评估及其驱动力研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2022.
- [35] 范振林, 李娜, 李维明. 甘肃省祁连山国家公园生态系统服务价值评估. 当代经济, 2021, 38(12): 70-77.
- [36] 罗金玲, 谢余初, 刘秋华, 童凯, 胡宝清. 流域生态系统服务权衡/协同关系时空格局及热点区识别——以南流江流域为例. 水土保持研究, 2023, 30(5): 397-407.
- [37] 方露露, 许德华, 王伦澈, 牛自耕, 张明. 长江、黄河流域生态系统服务变化及权衡协同关系研究. 地理研究, 2021, 40(3): 821-838.
- [38] 乔旭宁, 杨祯, 杨永菊. 1995—2020 年淮河流域生态系统服务权衡协同关系的尺度效应. 地域研究与开发, 2023, 42(2): 150-154, 166.
- [39] 周婷, 陈万旭, 李江风, 梁加乐. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系. 生态学报, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [40] 田野. 神农架国家公园生态保护补偿机制研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.
- [41] He G Y, Zhang L, Wei X J, Jin G. Scale effects on the supply-demand mismatches of ecosystem services in Hubei Province, China. *Ecological Indicators*, 2023, 153: 110461.