

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2024.01.042.

王浩, 赵旭, 赵菲菲, 等. 金沙江梯级库区生态系统服务供需耦合协调度及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(1): 280-289.

Wang Hao, Zhao Xu, Zhao Feifei, et al. Coupling Coordination Degree and Driving Factors of Ecosystem Service Supply and Demand in Jinsha River Cascade Reservoir Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(1): 280-289.

金沙江梯级库区生态系统服务供需 耦合协调度及驱动因素

王浩^{1,3}, 赵旭^{1,2}, 赵菲菲¹, 刘小雪¹, 龚磊³

(1.三峡大学 经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002;

2.三峡大学 水库移民研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.吉首大学 土木工程与建筑学院, 湖南 张家界 427000)

摘要: [目的]探索金沙江梯级水电工程库区生态系统服务供需关系的时空演变规律及其驱动因素,为水电工程库区生态管理提供决策支撑。[方法]基于金沙江梯级水电工程库区土地利用、人口、国内生产总值、归一化植被指数和降水量等数据,采用市场价值法、耦合协调度模型和地理加权回归模型等方法,开展库区生态系统服务供需耦合协调度及其驱动因素研究。[结果]2005—2019年期间库区生态系统服务价值增加了6.8亿元,总量达到了917亿元。生态系统服务供需严重失调和重度失调的区域,主要分布于金沙江北岸的四川省境内,勉强协调和良好协调的区域主要分布于金沙江南岸的云南省境内。植被覆盖对库区生态系统服务供需耦合度呈现正向驱动关系,人口和地形起伏度为负向驱动关系,降水量对库区北部局部地区为正向驱动关系,其余地区为负向驱动关系。[结论]库区生态系统服务供需耦合协调度呈现南高北低的空间分布特征,且受多重因素影响,未来应加强水电工程库区生态系统服务研究。

关键词:金沙江; 梯级水电库区; 生态系统服务; 供需耦合协调度; 驱动因素

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)01-0280-10

Coupling Coordination Degree and Driving Factors of Ecosystem Service Supply and Demand in Jinsha River Cascade Reservoir Area

Wang Hao^{1,3}, Zhao Xu^{1,2}, Zhao Feifei¹, Liu Xiaoxue¹, Gong Lei³

(1.College of Economics & Management, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002,

China; 2.Research Center for Reservoir Resettlement, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002,

China; 3.School of Civil Engineering and Architecture, Jishou University, Zhangjiajie, Hunan 427000, China)

Abstract: [Objective] We explored the spatiotemporal evolution pattern and driving factors of ecosystem service coupling coordination between supply and demand in the Jinsha River cascade hydropower project reservoir area, and provided decision-making supports for ecological management of hydropower project reservoir area. [Methods] Based on the data of land uses, population, GDP, NDVI and precipitation in the Jinsha River Cascade hydropower project reservoir area, market value method, coupled coordination degree model and geographically weighted regression model were used to study ecosystem service coupling coordination degree between supply and demand and its driving factors. [Results] The value of ecosystem service in the reservoir area reached 91.7 billion yuan in 2019, and the total value of ecosystem service increased by 680 million yuan during the study period. The spatial distribution of coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand in the reservoir area was relatively stable. The regions of extreme maladjustment and

收稿日期: 2022-12-13

修回日期: 2023-01-17

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(72271142); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA089); 湖北省高校优秀中青年科技创新团队计划项目(T2022006)。

第一作者: 王浩(1987—), 男, 江西萍乡人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为生态系统服务。E-mail: 007648@jzu.edu.cn

通信作者: 赵旭(1982—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为生态系统服务。E-mail: zhaoxu@ctgu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

severe maladjustment mainly distributed on the north bank of Jinsha River, while the regions of grudging coordination and good coordination mainly distributed on the south bank of Jinsha River. Vegetation cover had a positive driving effect on the coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand in the Jinsha River Reservoir Area, population and relief amplitude had the negative driving effect, precipitation had the positive driving relationship to the north of the reservoir area, while the rest of the reservoir areas showed the negative driving effect. [Conclusions] This research showed that the spatial distribution of the coupling coordination degree was high in the south and low in the north and was affected by multiple factors. In the future, it is necessary to strengthen the study of ecosystem services in the reservoir area of hydropower projects.

Keywords: Jinsha River; cascade hydropower reservoir; ecosystem service; coupling coordination degree of supply and demand; driving factors

生态系统服务是连接自然环境与人类福祉的桥梁,被定义为人类从生态系统中获取的各种惠益^[1],其不仅受到生态系统的影响,也受到社会经济的影响。联合国千年生态系统评估指出生态系统服务存在供给不足与人类需求增长之间的不协调^[2],威胁到生态系统健康和社会可持续发展。因此,将生态系统服务供应侧和需求侧纳入生态系统服务评估,充分了解生态系统服务供需的规模、差异和动态变化,以及驱动因素,这是当前极具现实价值的研究主题,也是人地系统耦合的核心内容,对于科学、合理地管理生态系统具有重要的决策和实践参考意义^[3]。目前国内外学者已将耦合协调度模型^[4]应用于生态系统服务与城镇化^[5]、人口生计^[6]和生态足迹等^[7]之间的关系研究,关注人类多方面需求与生态系统服务供给之间的关系,但是传统的耦合协调度模型存在耦合度效度不佳,数值集中分布于 0.9 以上^[8],无法正确表示系统间耦合关系的强弱。驱动因素研究中,较多采用最小二乘回归(OLS)等全局回归模型,没有考虑气候、地形等驱动因素的空间异质性,掩盖变量之间关系的空间局部特征。而地理加权回归(GWR)模型具有变参回归和局部回归思想,将空间位置作为权重加入运算,实现变量空间关系的精准识别,已广泛应用于多个领域研究中^[9]。在研究范围方面,目前主要集中在城市群^[10]和流域^[11]内生态系统服务价值的研究,而关于重大工程建设,特别是水电工程建设,对周边生态系统服务及供需耦合关系的研究相对较少。

水电工程库区是水电工程建设而产生的一个新的地域空间名词,是指水电工程蓄水之后被淹没的范围。在水电工程建设之前,库区作为一个普通自然地理单元,是具有较为完整的自然生态系统。水电工程的建设与运营,导致库区大量低海拔土地被淹没,人居空间受到压缩,人类活动向山地生态空间蔓延。在“水进人退”的过程中,出现了大量的移民安置、土地

重新开发、基础设施建设等,虽然促进了库区的城镇化建设和经济发展,但是也造成库区大范围的土地利用结构变化,出现了土地利用不合理、水土流失严重、人地关系紧张等现象;生态系统变为了介于自然与人工之间,陆地与水域交接的复合生态系统。库区也成为了自然环境与人类社会的过渡区和交错区,人类活动和自然环境的相互作用将会导致生态系统服务供给与人类需求之间的矛盾更为突出。

本研究以金沙江下游梯级水电工程库区(以下简称“金沙江库区”)为研究对象,利用土地利用、人口、国内生产总值(GDP)、归一化植被指数(NDVI)和降水量等数据,基于市场价值法和综合多指标模型计算金沙江库区生态系统服务供给与需求规模,基于修正的耦合协调测度方法和空间变异的地理加权回归模型,探讨库区生态系统服务供需关系及驱动机制的空间特征,强调通过耦合协调研究实现空间格局的调整和功能的优化,推动库区科学的生态系统管理和资源优化配置,对丰富生态系统服务供需关系及驱动因素的理论研究、实现区域生态保护与经济协同共进等均具有重要意义。

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区域概况

金沙江库区内向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德 4 座梯级水电站总装机容量达到 4 600 万 kW·h,年发电量为 1 900 亿 kW·h,规模相当于两个三峡水电站。四座水电站均已投产运营,正常蓄水水位分别达到 380 m,600 m,825 m 和 975 m,形成了 7.68 万 km²的库区,库区范围涉及四川和云南 7 个市(州),26 个县(区)。库区地理坐标 24°53′—29°58′N,100°36′—105°41′E(图 1),位于川西南、滇中中高山盆地,地势起伏较大,海拔 265~4 137 m,以山地、丘陵为主;气候属于亚热带季风气候,年平均降雨量达 900 mm,

夏季湿润,冬季干燥,气候变化明显,干湿分明,形成了以干热河谷为基带的复杂立体气候。该区域是欧亚大陆生物群落最富集的地区,是我国的主要林业生产基地和长江上游水源区,也是中国长江上游的重要生态屏障。区域内以少数民族为主,经济社会发展缓慢,生产生活水平低,矿产资源丰富,生态环境脆弱,发展与保护相结合是该区域实现可持续发展的根本途径。

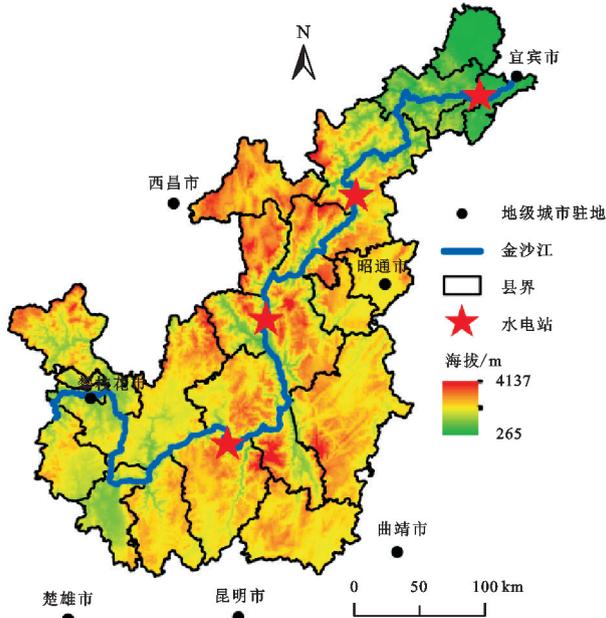


图1 金沙江下游梯级水电工程库区地理位置
(审图号 GS(2019)1822 号)

Fig. 1 Geographical location of the reservoir area of the cascade hydropower project in the lower reaches of Jinsha River (Drawing review No. GS(2019)1822)

1.2 数据来源

2005年、2010年、2015年和2019年金沙江库区土地利用数据(30 m分辨率)来源于武汉大学黄昕等^[12]研究成果,结合金沙江库区土地利用特点,将土地覆盖分为耕地、林地、草地、水域、建设用地及未利用地6类;人口、GDP、NDVI和DEM空间网格数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>);地形起伏度数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所游珍等^[13]研究成果;降水量数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)。

2 研究方法

2.1 生态系统服务价值(供给)

生态系统服务供给能力通过计算生态系统服务价值(ESV)来反映^[14],以Costanza等^[15]的研究成果以及谢高地等^[16]提出的生态系统服务价值当量因子

法为基础,选取消费者价格指数和粮食价格等数据对生态系统服务价值当量进行修正,进一步计算金沙江库区生态系统服务价值,相关公式如下^[17]:

$$a_i = \frac{CPI}{100} \quad (i=0,1,2,\dots,n) \quad (1)$$

$$\frac{a_1}{a_0} \times \frac{a_2}{a_1} \times \frac{a_3}{a_2} \times \dots \times \frac{a_n}{a_{n-1}} = \frac{a_n}{a_0} \quad (2)$$

$$q_i = q_{0i} \times \frac{a_n}{a_0} \quad (3)$$

$$V_0 = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^n \frac{p_i q_i m_i}{M} \quad (4)$$

$$V_k = V_0 \times e_k \quad (5)$$

$$E_{SV} = \sum_{k=1}^6 A_k \times V_k \quad (6)$$

式中: a_i 为第*i*年的单位CPI; q_{0i} 为研究区域某种粮食平均价格; q_i 为修正的某种粮食平均价格; p_i 为研究区域某种粮食的单位面积产量; m_i 是研究区域某种粮食的播种面积; M 是研究区域内粮食总播种面积; V_0 为生态系统服务当量因子价值量; V_k 为生态系统服务价值系数; e_k 为第*k*种土地利用类型单位面积生态系统服务价值当量; E_{SV} 为生态系统服务价值; A_k 为第*k*种土地利用类型的面积。选择了金沙江库区3种主要粮食作物,分别为稻谷、小麦和玉米。

2.2 生态系统服务需求

生态系统服务需求(ESD)为人类消费需求,基于相关学者研究,选取土地利用强度指数、人口密度和经济密度,利用综合多指标模型对生态系统服务需求进行计算,公式如下^[18]:

$$E_{SD} = R \times \lg P \times \lg G \quad (7)$$

$$R = 100 \times \sum_{i=1}^n (H_i \times M_i) \quad (8)$$

式中: E_{SD} 为生态系统服务需求指数; R 为土地利用强度数据; P 为人口密度数据; G 为每1 km²国内生产总值(GDP)数据; H_i 为研究区内第*i*级土地利用强度($i=1,2,3,4,5,6$)^[19]; M_i 为研究区第*i*级土地利用类型所占面积百分比。

2.3 生态系统服务供需耦合协调度

生态系统服务供需耦合协调度是指生态系统服务供给和生态系统服务需求两个系统相互作用、协调发展的程度。在计算耦合协调度之前,还需对生态系统服务供给与需求数据进行标准化平移和归一化处理。相关计算公式如下^[20]:

$$x'_{ij} = A \times \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} + B \quad (9)$$

$$C = \sqrt{\frac{[1 - (\max(U_1, U_2) - \min(U_1, U_2))] \times \min(U_1, U_2)}{\max(U_1, U_2)}} \quad (10)$$

$$T = \alpha U_1 \times \beta U_2 \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

式中: x'_{ij} 为经标准化处理的数据; x_{ij} 为原始数据; $\max(x_{ij})$ 和 $\min(x_{ij})$ 为生态系统服务供给或需求数据中的最大值和最小值, $A=0.99$, $B=0.01$; U_1 和 U_2 分别为标准化处理后的生态系统服务供给指数和生态系统服务需求指数; C 为系统之间的耦合度; T 为协调发展度; α, β 为待定系数, 反映 2 个子系统对总系统贡献的重要程度, 参照文献^[21], 取 $\alpha = \beta = 0.5$; D 为耦合协调度, 具体的耦合度和耦合协调度等级见表 1。

表 1 生态系统服务供需耦合度和供需耦合协调度等级

Table 1 Coupling degree and coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand

| 耦合度 | 耦合类型 | 耦合协调度 | 耦合协调类型 |
|------------|------|------------|--------|
| [0.0, 0.2] | 低级耦合 | [0.0, 0.2] | 严重失调 |
| [0.2, 0.5] | 初级耦合 | [0.2, 0.4] | 重度失调 |
| [0.5, 0.8] | 中级耦合 | [0.4, 0.6] | 勉强协调 |
| [0.8, 1.0] | 高级耦合 | [0.6, 0.8] | 良好协调 |
| | | [0.8, 1.0] | 优质协调 |

2.4 地理加权回归

地理加权回归模型是基于传统的全局回归模型改进而来, 其将空间数据位置信息嵌入到回归参数之中, 能够较好解决数据的空间非平稳性问题。地理加权回归模型公式如下^[9]:

表 2 2005—2019 年金沙江库区各类土地生态系统服务价值

Table 2 Ecosystem service values of land types in the Jinsha River Reservoir Area from 2005 to 2019

| 土地类型 | 时间 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 未利用地 | 总值 |
|-------------|-----------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| 生态系统服务价值/亿元 | 2005 | 77.7860 | 574.9120 | 216.2883 | 41.4904 | 0.0012 | 910.4778 |
| | 2010 | 80.2923 | 581.8472 | 194.6018 | 42.5213 | 0.0013 | 899.2639 |
| | 2015 | 78.0589 | 595.6205 | 185.8832 | 61.3147 | 0.0011 | 920.8784 |
| | 2019 | 79.7360 | 598.0123 | 177.1782 | 62.3844 | 0.0007 | 917.3116 |
| 占比/% | 2005 | 8.5434 | 63.1440 | 23.7555 | 4.5570 | 0.0001 | 100.0000 |
| | 2010 | 8.9287 | 64.7026 | 21.6401 | 4.7285 | 0.0001 | 100.0000 |
| | 2015 | 8.4766 | 64.6796 | 20.1854 | 6.6583 | 0.0001 | 100.0000 |
| | 2019 | 8.6924 | 65.1918 | 19.3149 | 6.8008 | 0.0001 | 100.0000 |
| 变化幅度/% | 2005—2010 | 3.2221 | 1.2063 | -10.0266 | 2.4847 | 5.2909 | -1.2317 |
| | 2010—2015 | -2.7815 | 2.3672 | -4.4803 | 44.1977 | -17.8449 | 2.4036 |
| | 2015—2019 | 2.1484 | 0.4016 | -4.6830 | 1.7446 | -35.2822 | -0.3873 |
| | 2005—2019 | 2.5069 | 4.0181 | -18.0824 | 50.3588 | -44.0179 | 0.7506 |

3.2 金沙江库区生态系统服务供给指数与需求指数空间分布

生态系统服务供给指数(以下简称“生态供给指数”)是对生态系统服务价值进行标准化处理得到的, 生态系统服务需求指数(以下简称“生态需求指数”)是根据土地利用强度, 人口和 GDP 等指标计算得出, 并进行了标准化处理。

$$Y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^p \beta_k(u_i, v_i) \times x_{ik} + \epsilon_i \quad (13)$$

式中: Y_i 为被解释变量, 即 (u_i, v_i) 处生态系统服务供需耦合协调度, 而 (u_i, v_i) 是第 i 个观测点的地理坐标, x_{ik} 为解释变量 x_k 在位置 (u_i, v_i) 处的观测值, ϵ_i 为随机误差项, $\beta_k(u_i, v_i)$ ($k=1, 2, \dots, p$) 是关于空间位置的 p 个未知函数。

3 结果与分析

3.1 金沙江库区生态系统服务价值时间变化

通过表 2 可知, 2005—2019 年金沙江库区生态系统服务价值呈现总体增长的趋势, 增长幅度为 0.7506%。其中在 2005—2010 年和 2015—2019 年出现不同程度的减少, 减少幅度分别达到 -1.2317% 和 -0.3873%, 而在 2010—2015 年出现一定程度的增长, 增长幅度为 2.4036%。从土地类型来看, 林地和水域的生态系统服务价值呈现逐年递增, 2005—2019 年的增长幅度分别为 4.0181%, 50.3588%; 草地的生态系统服务价值呈现逐年递减的态势, 2005—2019 年减少幅度为 -18.0824%; 耕地的生态系统服务价值呈现增减交替的趋势, 总体小幅增长, 2005—2019 年变化幅度为 2.5069%; 未利用地的生态系统服务价值呈现先增后减的趋势, 总体大幅减少, 2005—2019 年减少幅度为 -44.0179%, 但是减少额度仅为 5 万元。

从图 2 可知, 生态供给指数和生态需求指数的空间分布具有显著的空间异质性。库区生态供给指数分布呈现出南高北低的趋势, 高值区主要位于云南省永仁县、武定县、禄劝县、寻甸县、巧家县、金阳县和四川省盐边县, 这些地区均是位于海拔高、森林多、耕地少的地区; 低值区主要位于四川省攀枝花市东区、西区和宜宾市叙州区, 云南省昭通市昭阳区和昆明市东

川区等,这些地区具有经济较为发达、人口密集、城镇化率较高的特点,建设用地和耕地数量相对更多,导致生态系统服务价值较低。库区生态需求指数呈现高值区沿江分布的趋势,例如四川省会理县、宁南县、攀枝花市东区和西区、宜宾市叙州区,这些区域均是沿江分布,海拔较低,以平原和丘陵为主,水资源丰富,交通相对更为发达,城镇和人口沿河集聚,导致形

成生态需求高值集聚;低值区则大部分分布于人口稀少、海拔较高、森林草地覆盖率较高的山地区域。从时间维度来分析,研究期间屏山县、金阳县的生态供给指数呈现较大幅度增长,攀枝花市东区和西区生态供给指数呈现较大幅度递减,同时该区域生态需求指数呈现较大幅度增长,绥江县和巧家县生态需求指数呈现较大幅度递减。

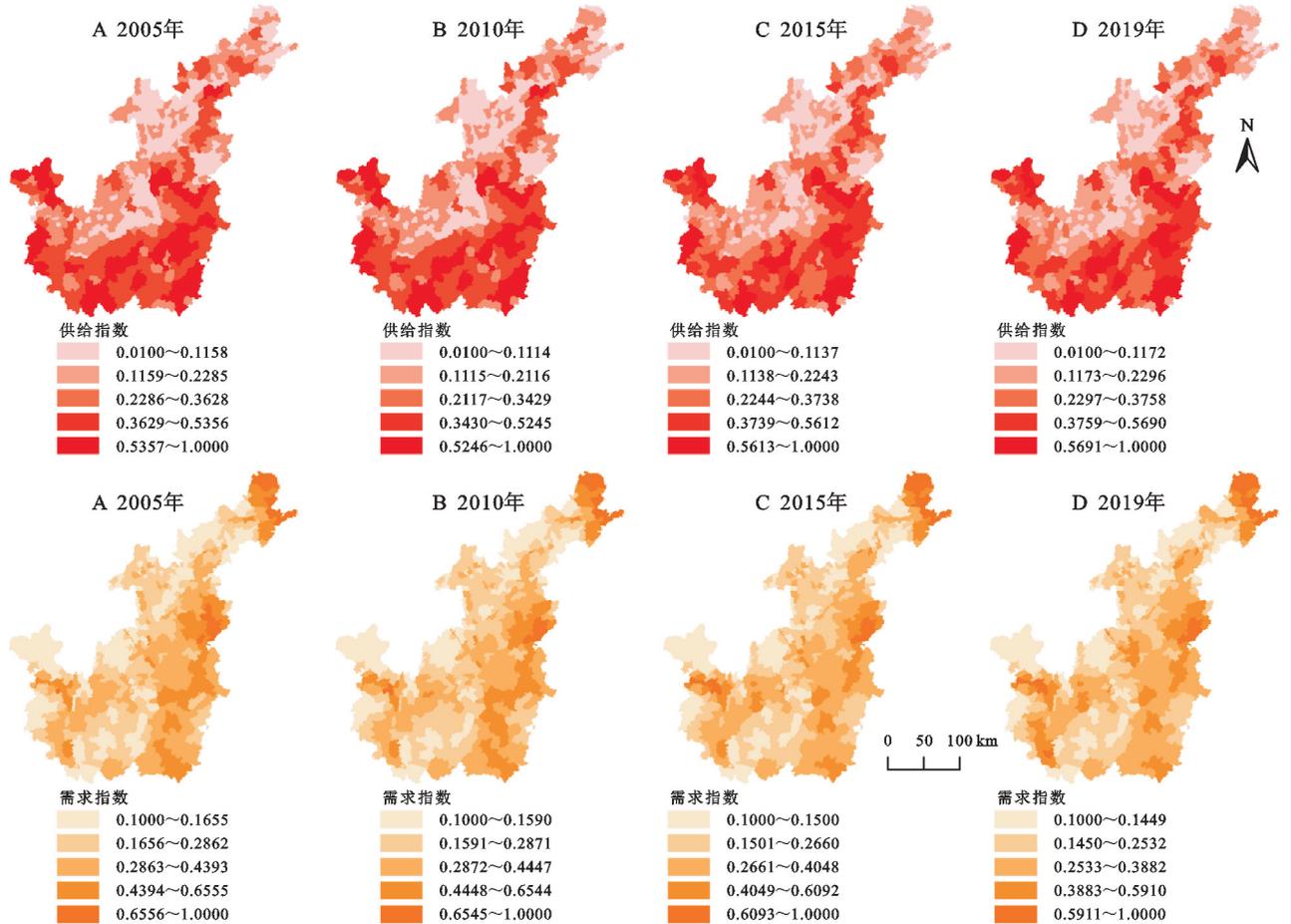


图2 2005—2019年金沙江库区生态系统服务供给指数与需求指数的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of ecosystem service supply index and demand index in Jinsha River Reservoir Area from 2005 to 2019

3.3 金沙江库区生态系统服务供需耦合协调空间分布

从图3、图4和表3可知,2005年、2010年、2015年、2019年生态系统服务供需耦合度和耦合协调度空间分布变化不大。生态系统服务供需耦合度方面,从空间分布来看,4种不同的耦合类型较为均匀的分布在库区内。其中处于中级耦合的乡镇数量最多,占比约为39%,其次为初级耦合的乡镇占比约为27%,高级耦合的乡镇占比约为26%,低级耦合的乡镇数量最少,占比约为8%。从具体的乡镇数量变化来看,研究期间低级耦合和初级耦合的乡镇数量呈现总体增加的趋势,增加数量分别为3个和2个,中级耦合和高级耦合的乡镇呈现总体减少的趋势,减少数量分别为3个和2个。生态系统服务供需耦合协调度(以下简称“供需耦合协调度”)方面,大部

分乡镇处于重度失调和勉强协调的状态,严重失调和良好协调的乡镇数量较少,优质协调的乡镇数量为零。从空间分布来看,严重失调的区域零星分布于四川省雷波县、屏山县和攀枝花市东区、西区等县(区)的部分乡镇;重度失调的区域主要分布于四川省盐边县、会东县、宁南县、金阳县、雷波县和宜宾市叙州区等;勉强协调的区域主要分布于云南省元谋县、寻甸县、巧家县、会泽县和昆明市东川区;良好协调的区域零星分布于云南省武定县、寻甸县、会泽县、巧家县、鲁甸县等县的部分乡镇。从乡镇数量变化来看,研究期间严重失调、勉强协调和良好协调的乡镇数量呈现总体减少的趋势,减少数量分别为3个、1个和8个,重度失调的乡镇呈现总体增长的趋势,增长数量为12个。

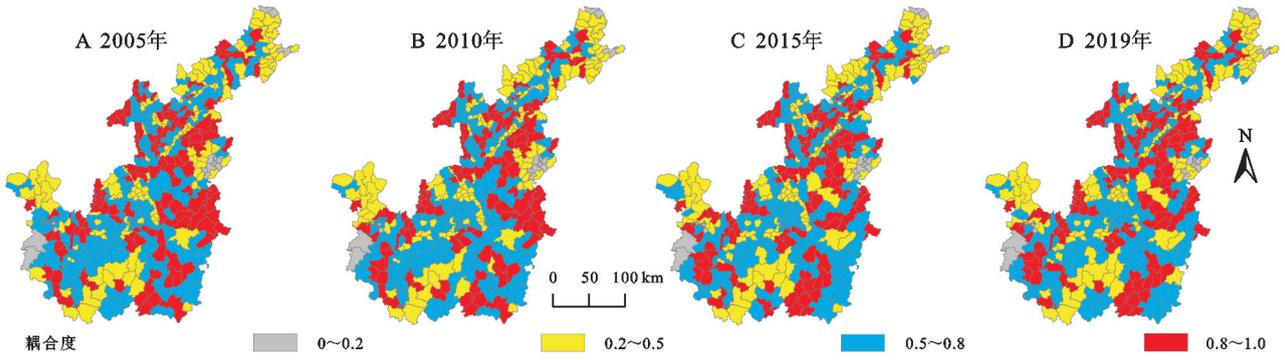


图 3 2005—2019 年金沙江库区生态系统服务供需耦合度的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of coupling degree between ecosystem service supply and demand in Jinsha River Reservoir Area from 2005 to 2019

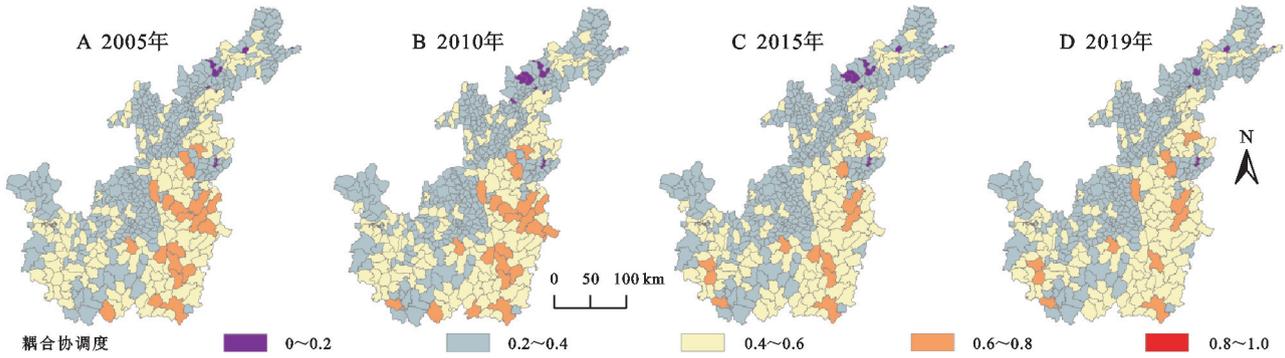


图 4 2005—2019 年金沙江库区生态系统服务供需耦合协调度的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand in Jinsha River Reservoir Area from 2005 to 2019

表 3 各级耦合度和耦合协调度的乡镇数量

Table 3 Number of towns corresponding to coupling degree and coupling coordination degree

| 类型 | 乡镇数量/个 | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|-----|
| | 2005 年 | 2010 年 | 2015 年 | 2019 年 | |
| 耦合度 | 低级耦合 | 32 | 33 | 36 | 35 |
| | 初级耦合 | 145 | 153 | 152 | 147 |
| | 中级耦合 | 209 | 212 | 206 | 206 |
| | 高级耦合 | 147 | 135 | 139 | 145 |
| 耦合协调度 | 严重失调 | 32 | 34 | 34 | 29 |
| | 重度失调 | 341 | 339 | 351 | 353 |
| | 勉强协调 | 140 | 138 | 136 | 139 |
| | 良好协调 | 20 | 22 | 12 | 12 |
| 优质协调 | 0 | 0 | 0 | 0 | |

3.4 金沙江库区生态系统服务供需耦合协调度驱动因素分析

初步选择 8 个指标作为驱动因素,分别为 GDP、人

口、DEM、NDVI、NPP、地形起伏度、生态环境质量指数和降水量。通过计算最大方差膨胀因子(VIF),人口、地形起伏度、NDVI、降水量 4 个指标的 VIF 值小于 7.5,分别为 1.11,2.13,1.58,1.64,说明这 4 个指标不存在多重共线性问题。因此确定人口、地形起伏度、NDVI、降水量 4 个指标作为驱动因素。表 4 为 GWR 模型和 OLS 模型的拟合结果,通过对比可知,各因素的 GWR 模型比 OLS 模型的 AICc 值分别降低了 311.562,290.159,90.265,108.554 个单位,AICc 值绝对差值远远大于 3,表明 GWR 可以更好地拟合观测数据; R^2_{adj} 值分别提高了 0.437,0.466,0.150,0.189 个单位,说明 GWR 模型的拟合结果均优于 OLS 模型的拟合结果。就各驱动因素与供需耦合协调度关系的 GWR 模型而言, R^2_{adj} 值由大到小依次为:人口>地形起伏度>NDVI>降水量, R^2_{adj} 值越大,代表相应的驱动因素对供需耦合协调度的解释力越强。

表 4 OLS 模型与 GWR 模型拟合效果比较

Table 4 Comparison of fitting effect between OLS model and GWR model

| 驱动因素 | 人口 | | 地形起伏度 | | NDVI | | 降水量 | |
|------|-----------|-------------|-----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|
| | AICc | R^2_{adj} | AICc | R^2_{adj} | AICc | R^2_{adj} | AICc | R^2_{adj} |
| OLS | -931.048 | 0.154 | -840.790 | -0.002 | -878.240 | 0.066 | -840.788 | -0.002 |
| GWR | -1242.609 | 0.591 | -1130.949 | 0.464 | -968.505 | 0.216 | -949.342 | 0.188 |
| 差值 | -311.562 | 0.437 | -290.159 | 0.466 | -90.265 | 0.150 | -108.554 | 0.189 |

表 5 为各驱动因素对库区供需耦合协调度的 GWR 回归系数,从均值来看,NDVI 的回归系数平均值为 0.255,说明 NDVI 对供需耦合协调度的影响整体上呈正相关驱动,即 NDVI 越大,耦合协调度也越大,NDVI 的增加是供需耦合协调度上升的主要因素。常住人口、地形起伏度和降水量的回归系数平均值均小于 0,分别为 -0.176 , -0.252 和 -0.055 ,说明常住人口、地形起伏度和降水量对供需耦合协调度的影响整体上呈负相关驱动。其中 NDVI 的 GWR 回归系数绝对平均值最大,说明库区供需耦合协调度对

NDVI 的变化更为敏感,NDVI 是耦合协调度增长的主要因素。从 GWR 模型回归系数的最大值和最小值看,只有降水量的最大值和最小值有正有负,说明其与供需耦合协调度的关系相对较为复杂,存在显著的空间异质性,即随着乡镇空间位置的变化而变化。其余驱动因素中,NDVI 均为正值,常住人口和地形起伏度均为负值,说明这些因素与生态系统服务供需耦合度的驱动关系在整个区域内不会发生变化,但是这些因素对供需耦合度的驱动效应或程度会随着空间位置的变化而变化。

表 5 各因素对金沙江库区生态系统服务供需耦合协调度影响的回归系数对比

Table 5 Comparison of regression coefficients of various factor influence on coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand in Jinsha River Reservoir Area

| 驱动因素 | 最小值 | 1/4 值 | 中位值 | 均值 | 3/4 值 | 最大值 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 人口 | -0.239 | -0.191 | -0.176 | -0.176 | -0.161 | -0.129 |
| 地形起伏度 | -0.298 | -0.267 | -0.259 | -0.252 | -0.241 | -0.171 |
| NDVI | 0.211 | 0.239 | 0.253 | 0.255 | 0.269 | 0.329 |
| 降水量 | -0.127 | -0.076 | -0.060 | -0.055 | -0.041 | 0.038 |

采用 ArcGIS 10.2 软件对各驱动因素在不同空间位置的 GWR 回归系数制作成空间分布图,进一步分析各驱动因素对供需耦合协调度的影响程度及其空间差异(图 5)。人口是影响库区供需耦合协调度的关键因素,其与库区供需耦合协调度为负相关关系,因为人口的增加会导致生态系统服务需求增加,同时如果生态管理措施不当,还会降低生态系统服务供给,进一步导致供需之间的不协调,且回归系数在空间上呈现为北高南低的布局。地形起伏度也是影响生态系统服务供给需求协调的关键控制因素,一般来说,地形起伏程度通过控制人类活动和景观的空间分布格局,导致不同地形上生态系统服务的供

给能力和需求偏好不同。地形起伏度的影响也为负的,且回归系数在空间上也呈现为北高南低的布局。NDVI 与供需耦合协调度之间的关系为正向驱动关系,回归系数空间分布为西高东低的布局。对于生态系统服务供给值低而需求值高的区域,提高植被覆盖可以提高生态系统服务供给,因为植被覆盖是影响生态系统服务价值的重要因素,其可以提高生态系统服务价值,进而提升供需耦合协调度。降水量的回归系数空间分布为库区北部地区的供需耦合协调度随着降水的增加而增大,而其他地区的供需耦合协调度随着降水的增加而减小,这可能与该地区的整体干旱气候条件相关。

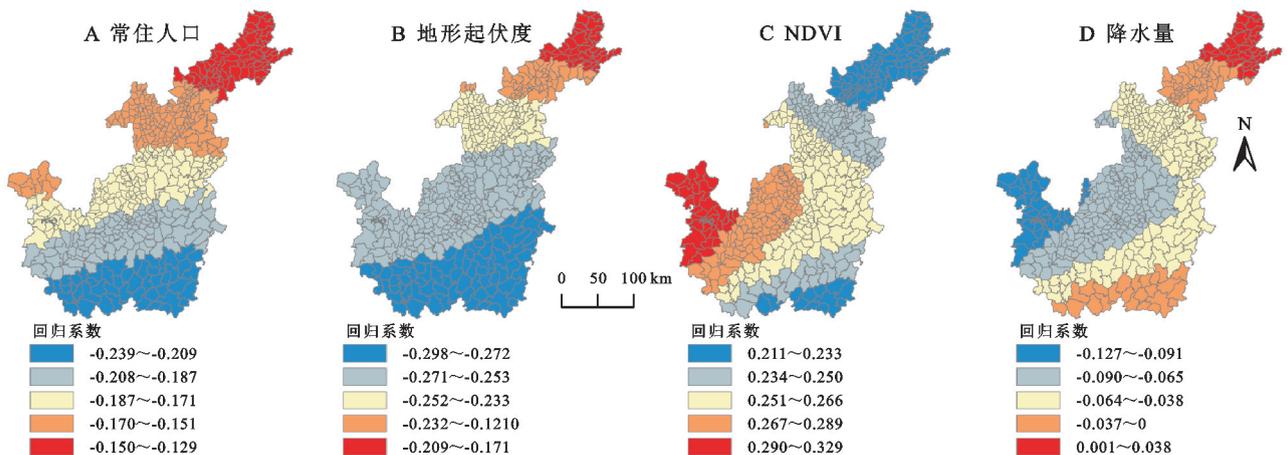


图 5 各因素对金沙江库区生态系统服务供需耦合协调度影响的回归系数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of regression coefficients of various factor influences on coupling coordination degree between ecosystem service supply and demand in Jinsha River Reservoir Area

4 讨论

耦合协调度模型借鉴了王淑佳等^[20]研究成果,对模型进行了修正。模型中耦合度是核心部分,其数值分布 $[0,1]$ 区间内,用于表示系统间耦合关系的强弱。但是现有研究中普遍使用的公式得出的计算结果大概率偏向于 1,因而耦合协调度值主要依赖于系统的协调发展度,导致耦合协调度难以充分实现本身测度的价值与意义。本研究利用修正的耦合协调度模型,计算结果与已有利用修正模型的研究结果^[22]相比,两者耦合度数值区分度均被增大,使计算所得耦合协调度更符合系统之间的相互关系。

研究期间金沙江库区生态系统服务价值呈现增减交替,总体增长的趋势,增长额度为 6.8 亿元,低于三峡库区生态系统服务价值的增长额度^[23],这与库区面积和研究时长有关。金沙江库区生态系统服务价值的增加主要发生在 2010—2015 年期间,因为在该期间溪洛渡水电站和向家坝水电站进行水库蓄水,水位上升,水域面积大幅增加导致生态系统服务价值的增加,这与已有关于三峡库区的研究结论一致^[24]。目前有关的研究集中于生态系统服务供给,而将生态系统服务需求纳入生态系统服务评估,研究生态系统服务供需模式的时空特征和驱动因素,可为实现区域可持续发展目标提供科学依据。张中浩等从省域尺度对长江经济带生态—经济耦合协调进行研究,得出 2010 年云南省耦合协调状态要优于四川省,2015 年两省耦合协调状态基本相当^[25]。Li Tongning 等从县域尺度对长江经济带生态—经济耦合协调研究中,认为 2020 年云南省耦合协调状态要优于四川省^[26]。这与本研究认为金沙江南岸的云南省供需耦合协调状态要优于金沙江北岸的四川省的结论基本一致。在驱动因素方面,除了土地利用类型以外,气候、地形、人类干扰等因素也被确定为影响生态系统服务的关键因素^[27],本研究分析了人口、NDVI、地形起伏度和降水量等因素对供需平衡的影响。Li Tongning 等认为在云南与四川交界区域内 NDVI、温度、人均财政支出对生态—经济耦合协调度具有正向驱动的作用,人均粮食产量具有负向驱动作用^[26],这与本研究对 NDVI 驱动效应分析基本一致。最后本研究结论与上述研究也有一定差异,主要原因是研究范围、尺度和评价指标的不同。

本研究对金沙江水电工程库区生态系统服务供需关系及驱动因素进行了分析,方法成熟简便,能满足研究需求,但仍有不足,首先市场价值法和综合多指标模型计算生态系统服务供给与需求规模具有一

定的不确定性,需要采用更加准确和科学方法进行测算。其次生态系统服务供给与需求存在不均匀性和空间转移性,未来可以从生态系统服务流视角,研究生态系统服务供需关系,识别空间分布特征和流动特性,阐明内部机制,揭示自然、人为等影响因素。

5 结论

(1) 2005—2019 年金沙江库区生态系统服务价值呈现波动增长的趋势,增长了 0.75%。从土地类型来看,林地的生态系统服务价值是主要组成部分,总体增长了 4.01%,水域面积增大是金沙江库区生态系统服务价值增加的主要因素,主要发生在 2010—2015 年,期间水域生态系统服务价值增长了 44.19%,其淹没了沿江耕地和草地,致使相应的生态系统服务价值分别减少了 2.78%和 4.48%。

(2) 金沙江库区生态系统服务供给指数呈现南高北低的空间格局,需求指数为高值沿江分布,低值分布山地区域。供需耦合状态以中级耦合为主,其次为初级耦合,乡镇数量占比分别为 39%,27%,耦合协调状态以重度失调为主,其次为勉强协调,乡镇数量占比分别为 65%,26%。

(3) 人口、地形起伏度、植被覆盖和降水量是影响生态系统服务供需耦合协调度的关键因素,植被覆盖对其影响程度最大,其次是地形起伏度、人口和降水量。其中植被覆盖对金沙江库区生态系统服务供需耦合协调度呈现正向驱动关系,地形起伏度和人口为负向关系,降水量对库区北部地区为正向关系,其余地区为负向关系。

(4) 金沙江南岸的云南省,发展方式较为粗放,生态环境改善成效尚不稳固,需要以长江大保护、长江经济带发展等国家战略为契机,依托原有优势,扩大以绿色制造、智能制造为重点的工业和新兴产业投资,同时大力推进河道综合治理,建设金沙江下游生态廊道,助力打造“绿色能源、绿色食品、健康生活目的地”三张名牌。金沙江北岸的四川省,生态保护与经济发展不平衡问题更为突出,应继续推动区域空间布局优化和新旧动能转换,发展现代制造、航空航天、旅游康养、绿色食品等产业,建设清洁能源基地和沿江生态走廊,实现川南经济区和攀西经济区协同发展。

参考文献:

- [1] Ouyang Z, Zheng H, Xiao Y, et al. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital [J]. Science (American Association for the Advancement of Science), 2016, 352 (6292):1455-1459.
- [2] Zhu S C, Huang J L, Zhao Y L. Coupling coordination

- analysis of ecosystem services and urban development of resource-based cities: A case study of Tangshan city[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 136:108706.
- [3] 傅伯杰,王帅,沈彦俊,等.黄河流域人地系统耦合机理与优化调控[J].中国科学基金,2021,35(4):504-509.
Fu B J, Wang S, Shen Y J, et al. Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin [J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2021, 35(4):504-509.
- [4] Zhang K, Liu T, Feng R, et al. Coupling coordination relationship and driving mechanism between urbanization and ecosystem service value in large regions: A case study of urban agglomeration in Yellow River basin, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021, 18(15):7836.
- [5] 赵雪雁,杜昱璇,李花,等.黄河中游城镇化与生态系统服务耦合关系的时空变化[J].自然资源学报,2021,36(1):131-147.
Zhao X Y, Du Y X, Li H, et al. Spatio-temporal changes of the coupling relationship between urbanization and ecosystem services in the Middle Yellow River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(1):131-147.
- [6] 官冬杰,孙灵丽,周李磊.三峡库区生态系统服务与农户生计耦合模型构建及应用[J].水土保持研究,2020,27(6):269-277.
Guan D J, Sun L L, Zhou L L. Construction and application of coupling model of ecosystem service and farmers' livelihood in Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2020, 27(6): 269-277.
- [7] Xu H, Yang J J, Xia G Z, et al. Spatio-temporal differentiation of coupling coordination between ecological footprint and ecosystem service functions in the aksu region, Xinjiang, China [J]. *Sustainability*, 2022, 14(6):3483.
- [8] 宋娜,毛娅琪,何亚丽,等.三元空间视角下长三角四省市旅游空间的耦合协调研究[J].世界地理研究,2023, 32(1):104-116.
Song N, Mao Y Q, He Y L, et al. A study on the coupling and coordination of tourism space among four provinces and cities in the Yangtze River Delta from the perspective of three-dimensional space [J]. *World Regional Studies*, 2023, 32(1):104-116.
- [9] 张师赫,李宝银,林玉英,等.基于生态系统服务的景观生态风险评价及其驱动因素研究:以福建省为例[J].水土保持研究,2022,29(6):174-182.
Zhang S H, Li B Y, Lin Y Y, et al. Research on landscape ecological risk assessment and driving factors based on ecosystem services: A case study of Fujian Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(6):174-182.
- [10] Li P, Liu C, Liu L, et al. Dynamic analysis of supply and demand coupling of ecosystem services in loess hilly region: A case study of Lanzhou, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2021, 31(2):276-296.
- [11] Heino J, Koljonen S. A roadmap for sustaining biodiversity and ecosystem services through joint conservation and restoration of northern drainage basins [J]. *Ecological Solutions and Evidence*, 2022, 3(2):1-10.
- [12] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(8):3907-3925.
- [13] You Z, Feng Z M, Yang Y Z. Relief degree of land surface dataset of China (1 km) [DB/OL]. *Digital Journal of Global Change Data Repository*, 2018. <https://doi.org/10.3974/geodb.2018.03.16>. V1.
- [14] 王盈丽,徐新良,庄大春,等.湖南省生态系统服务供需格局演变[J].生态学杂志,2021,40(10):3268-3277.
Wang Y L, Xu X L, Zhuang D C, et al. Evolution of the supply and demand pattern of ecosystem services in Hunan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(10):3268-3277.
- [15] Costanza R, D'Arge R, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. *Ecological Economics*, 1997, 25(1):3-15.
- [16] 谢高地,张彩霞,张昌顺,等.中国生态系统服务的价值[J].资源科学,2015,37(9):1740-1746.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem services in China [J]. *Resources Science*, 2015, 37(9):1740-1746.
- [17] Zhao X, Yi P, Xia J, et al. Temporal and spatial analysis of the ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir Area of China based on land use change [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 29(18):26549-26563.
- [18] Wang J, Zhai T L, Lin Y F, et al. Spatial imbalance and changes in supply and demand of ecosystem services in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 657:781-791.
- [19] 韩增林,孟琦琦,闫晓露,等.近30年辽东湾北部区土地利用强度与生态系统服务价值的时空关系[J].生态学报,2020,40(8):2555-2566.
Han Z L, Meng Q Q, Yan X L, et al. Spatial and temporal relationships between land use intensity and the value of Ecosystem Services in northern Liaodong Bay over the past 30 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(8):2555-2566.
- [20] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.

- Wang S J, Kong W, Ren L, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2021, 36(3):793-810.
- [21] Fu J, Zhang Q, Wang P, et al. Spatio-temporal changes in ecosystem service value and its coordinated development with economy: A case study in Hainan Province, China [J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(4):970.
- [22] 孙久文, 崔雅琪, 张皓. 黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(7):1673-1690.
- Sun J W, Cui Y Q, Zhang H. Spatio-temporal pattern and mechanism analysis of coupling between ecological protection and economic development of urban agglomerations in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(7):1673-1690.
- [23] 李辉, 周启刚, 李斌, 等. 近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3):654-666.
- Li H, Zhou Q G, Li B, et al. Spatiotemporal change and correlation analysis of ecosystem service values and ecological risk in Three Gorges Reservoir Area in the past 30 years [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(3):654-666.
- [24] 国洪磊, 周启刚. 三峡库区蓄水前后土地利用变化对生态系统服务价值的影响[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(5):222-228.
- Guo H L, Zhou Q G. Effect of land use change on ecosystem service value pre and post the water storage in the Three Gorges Reservoir Area [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(5):222-228.
- [25] 张中浩, 聂甜甜, 高阳, 等. 长江经济带生态系统服务与经济社会发展耦合协调关联时空特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2022, 31(5):1086-1100.
- Zhang Z H, Nie T T, Gao Y, et al. Study on temporal and spatial characteristics of coupling coordination correlation between ecosystem services and economic-social development in the Yangtze River Economic Belt [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2022, 31(5):1086-1100.
- [26] Li T N, Li D Z, Liang D L, et al. Coupling coordination degree of ecological-economic and its influencing factors in the counties of Yangtze River economic belt [J]. *Sustainability*, 2022, 14(22):15467.
- [27] Fan Q D, Yang X Y, Li H. Research on the change of ecosystem services and their trade-off in urbanization area [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2022, 20(4):3299-3310.
- ~~~~~
- (上接第 279 页)
- [25] 文高辉, 刘蒙罢, 胡贤辉, 等. 洞庭湖平原耕地利用生态效率空间相关性与空间效应[J]. *地理科学*, 2022, 42(6):1102-1112.
- Wen G H, Liu M B, Hu X H, et al. Spatial correlation and spatial effect of cultivated land use ecological efficiency in the Dongting Lake Plain [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2022, 42(6):1102-1112.
- [26] 匡远配, 张容. 农地流转对粮食生产生态效率的影响[J]. *中国人口·资源与环境*, 2021, 31(4):172-180.
- Kuang Y P, Zhang R. Effect of farmland transfer on the ecological efficiency of food production [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2021, 31(4):172-180.
- [27] 潘丹, 应瑞瑶. 中国农业生态效率评价方法与实证: 基于非期望产出的 SBM 模型分析[J]. *生态学报*, 2013, 33(12):3837-3845.
- Pan D, Ying R Y. Agricultural eco-efficiency evaluation in China based on SBM model [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(12):3837-3845.
- [28] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹分析[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(5):203-208.
- Duan H P, Zhang Y, Zhao J B, et al. Carbon footprint analysis of farmland ecosystem in China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(5):203-208.
- [29] 中华人民共和国生态环境部. 第二次全国污染源普查公报[J]. *环境保护*, 2020, 48(18):8-10.
- Ministry of Ecology and Environment the People's Republic of China. The second national pollution source census bulletin [J]. *Environmental Protection*, 2020, 48(18):8-10.
- [30] Dagum C. A new approach to the decomposition of the Gini income inequality ratio [J]. *Empirical Economics*, 1997, 22(4):515-531.
- [31] Huang B, Wu B, Barry M. Geographically and temporally weighted regression for modeling spatial-temporal variation in house prices [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(3):383-401.
- [32] 陈美球. 构建耕地共同保护机制: 理论基础、制约因素与实现路径[J]. *农业经济与管理*, 2022(3):13-19.
- Chen M Q. Construction of common protection mechanism of cultivated land: theoretical basis, restrictive factors and realization path [J]. *Agricultural Economics and Management*, 2022(3):13-19.