

DOI: 10.5846/stxb202010102575

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.

Li D H, Zhang X Y, Wang Y, Zhang X, Li L, Lu L. Evolution process of ecosystem services and the trade-off synergy in Xin'an River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(17): 6981-6993.

新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系

李冬花¹, 张晓瑶¹, 王咏^{1,*}, 张潇², 李磊³, 陆林¹

¹ 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241000

² 华东师范大学城市与区域科学学院, 上海 200241

³ 南京师范大学地理科学学院, 南京 210023

摘要: 新安江流域作为长三角一体化发展的战略水源地与水源涵养区, 其生态系统服务变化与权衡协同关系研究对于推进流域生态文明体制建设, 促进人地关系协调发展具有重要意义。基于生态系统服务变化指数、相关系数及空间自相关等方法, 对新安江流域 1999—2019 年生态系统服务价值及权衡协同关系进行定量分析。结果表明: (1) 新安江流域生态系统服务价值整体呈波动下降态势, 改善趋势渐显, 生态补偿工作的系统实施强化了河流、湖泊的生态保护效应与地位; (2) 新安江流域地均生态系统服务价值空间分布较为稳定, 空间相关类型以正相关为主, 生态系统服务价值增益相对明显地区多分布在上游安徽省境内; (3) 协同关系是新安江流域生态系统服务间相关关系的主体, 生态补偿试点工作实施后, 水文调节服务与其他服务之间的相关关系发生明显转化, 各乡镇单元生态系统服务的相关关系以协同关系为主。

关键词: 生态系统服务; 权衡协同; 生态补偿; 新安江流域

Evolution process of ecosystem services and the trade-off synergy in Xin'an River Basin

LI Donghua¹, ZHANG Xiaoyao¹, WANG Yong^{1,*}, ZHANG Xiao², LI Lei³, LU Lin¹

¹ School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, China

² School of Urban and Regional Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China

³ School of Geographical Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China

Abstract: Based on the background that the Xin'an River Basin is a strategic water source and water conservation area for the integrated development of the Yangtze River Delta, studying the changes in the ecosystem service value of the Xin'an River Basin and the trade-off and synergy between ecosystem services are of great significance to promote the construction of the basin's ecological civilization system. At the same time, it also has an important enlightening effect on promoting the coordinated development of man-land relationship. Using the analysis methods of ecosystem service change index, correlation coefficient and spatial autocorrelation, the development and change of the ecosystem service value and the balance and synergy between ecosystem services in the Xin'an River Basin from 1999 to 2019 are quantitatively measured and analyzed. The results show that (1) the ecosystem service value of the Xin'an River Basin has fluctuated and declined as a whole. After the implementation of the ecological compensation mechanism, the overall ecosystem service value of the Xin'an River Basin has rebounded, and the improvement trend has gradually appeared. After the implementation of the pilot work of the ecological compensation mechanism, the ecological effects of land cover types represented by rivers and lakes in the protection and restoration of watershed ecosystems have been significantly strengthened, and the hydrological regulation

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41930644)

收稿日期: 2020-10-10; 网络出版日期: 2021-06-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yongw1020@126.com

service has the highest value among those ecosystem services. (2) The spatial distribution of ecosystem service value in the Xin'an River Basin is relatively stable overall, but the spatial difference and heterogeneity is quite strong, and there are obvious high-value agglomeration and low-value agglomeration areas, and the correlation is strong. The related types are mainly positive correlation. High-value areas of ecosystem services are concentrated in the Qiandao Lake and surrounding areas of Zhejiang Province, and the areas with relatively obvious gains in ecosystem services are mainly distributed in the upper reaches of the basin in Anhui Province. (3) The synergy relationship is the main body of the correlation relationship between the ecosystem services of the Xin'an River Basin, which mainly exists between the adjustment, support, and cultural service subsystems. After the implementation of the pilot ecological compensation mechanism, the correlation between hydrological regulation services and other ecosystem services has undergone a significant transformation. At the town level, the distribution of synergy between different ecosystem services is relatively consistent, and the correlation between various ecosystem services presents the characteristics of synergy relationship, and the balance relationship is mainly high and low agglomeration, which is most obvious between cultural service and support service.

Key Words: ecosystem services; balance and coordination; ecological compensation; Xin'an River Basin

2012年,在国家财政部、环保部以及安徽、浙江“两部两省”的组织与推动下,全国首例跨省流域生态补偿机制试点在新安江流域正式实施^[1]。新安江流域不仅是长三角地区的重要生态屏障,更是全国水源涵养的重点生态功能区^[2],跨省流域生态补偿对区域可持续发展具有深远意义。生态补偿作为一项重要的经济、社会、环境政策^[3],对新安江流域生态系统服务的数量、质量、形成与供给机制、权衡与协同关系具有重要影响。生态系统服务是生态系统形成的用于维持人类生存和发展的自然环境条件与效应^[4],包括供给、调节、支持和文化四类生态服务^[5]。生态系统各项服务之间同时存在相互作用关系,表现为此消彼长的权衡关系与相互增益的协同关系^[6]。Costanza 率先提出并完善生态系统服务价值(Ecosystem Services Values,ESV)分类与量化评估体系^[6-7],国内学者结合我国国情对生态系统服务价值评价展开持续的探索与改进,以融合生态学、经济学方法的大区域生态系统服务价值评价^[8],及中国生态系统单位面积服务价值当量研究最为典型^[9-11],后续学者基于此对不同尺度行政单元与地理单元的生态系统服务价值展开评价分析^[12-13]。随着生态系统服务评价研究的深入开展,其权衡协同关系也逐渐受到关注。国外学者围绕生态系统服务权衡协同关系的空间特征^[14]、影响因素^[15]、人类生态行为的权衡协同效应^[16]以及权衡协同关系的多尺度转变^[17]等方面展开相关研究。国内学者针对国家公园^[18]、国家屏障区^[19]、水源涵养区^[20]等重要生态功能区生态系统服务权衡协同关系的空间格局差异、尺度依存效应及一般作用特征进行分析与总结。上述研究对指导生态系统服务价值评估与权衡协同关系分析具有重要理论与现实意义,但已有研究尺度大多为区域或自然单元的整体尺度或格网的微观尺度,往往造成评价尺度与治理尺度的偏离,且生态系统服务相关关系的研究整体上仍处于初步发展阶段^[21]。目前关于新安江流域的相关研究主要集中在流域生态补偿的效益评价^[22]、补偿模式^[23]、补偿效率^[24]、关键主体关系等方面^[3],进一步针对生态补偿实施的生态系统服务发展与响应的研究成果还较为少见。

生态系统服务作为具有重要价值的自然生态系统功能^[8],其稳定、协调发展是维系地区可持续发展的必要自然基础^[25]。新安江流域生态补偿工作的系统实施取得了积极的生态与社会效益^[26],是习近平新时代中国特色社会主义思想的先导性与示范性实践。生态补偿试点工作的实施对流域生态系统服务发展及相互关系影响的正确认知,对深化生态文明体制改革及流域生态系统管理具有重要意义。基于此,本文以新安江流域为研究对象,以生态补偿机制试点实施为重要背景,开展流域生态系统服务价值及权衡协同关系的综合评估与空间定量分析,以期推动生态系统服务研究在流域生态保护管理实践中的应用,为流域生态补偿、生态文明建设、区域生态安全格局构建及绿色高质量发展提供决策参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与数据来源

新安江发源于安徽省黄山市休宁县六股尖,向东流经浙江省杭州市淳安县、建德市,最终流入钱塘江,干流全长约 359 km(图 1),流域整体介于 117°38′—119°21′E,29°11′—30°20′N 之间,总面积达 1.1 万 km²,流域全位于长江中下游平原,地形类型以平原低地为主,属亚热带季风气候区。流域内有丰乐水库、新安江水库两大蓄水工程,是长江流域下游地区的重要水源涵养地。

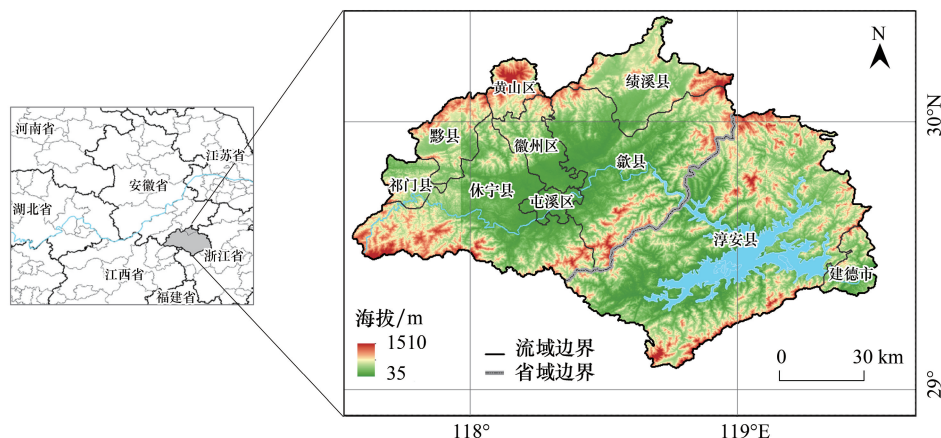


图 1 新安江流域地理范围与区位

Fig.1 Geographical scope and location of Xin'an River Basin

研究数据主要包括土地利用数据、高程数据、统计数据、基础地理信息数据等多源数据集。土地利用数据以 1999—2019 年研究区 5 期 Landsat TM/ETM 系列遥感影像 (30 m×30 m) 为基础数据,借助 ENVI 5.3 和 ArcGIS 10.3 软件平台进行数据处理与影像解译,依据研究区植被覆盖特征和研究需要,采用支持向量机法 (Support Vector Machine, SVM) 将研究区用地划分为林地、草地、耕地、裸地、水域及建设用地 6 大类,并进一步利用野外采样数据、天地图和 Google Earth 随机选取验证样本进行混淆矩阵精度验证,总体分类精度大于 85%,符合精度所要求^[27];高程数据来源于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 提供的 GDEM V2 30 m 分辨率数字高程;社会经济发展统计数据来源于各省、市统计年鉴、统计公报及政府工作报告;行政边界等基础地理信息数据来自国家基础地理信息中心 1:400 万数据库 (<http://ngcc.sbsm.gov.cn/>)。

1.2 生态系统服务价值评价

基于新安江流域土地利用实际,以谢高地等^[10-11]制定的生态系统服务价值当量表为测算基础,通过查阅《安徽省统计年鉴》《浙江省统计年鉴》《中国农产品价格调查年鉴》等统计资料,测算研究期内流域耕地平均粮食单产与市场价格,进一步得出单位面积农田生态系统服务价值与各评价单元的生态系统服务总值^[11],计算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} \times P_{ij} \quad (1)$$

式中,ESV 为研究区生态系统服务总值; S_{ij} 为研究区第 i 种土地利用类型第 j 项生态系统服务价值系数; P_{ij} 为评价单元内第 i 种土地利用类型的面积。

1.3 土地利用变化的生态贡献度

土地利用变化的生态贡献度能够对土地利用类型转变的生态效应进行有效区分^[28],表示第 i 种土地利用类型向第 j 种土地利用类型转变引起的生态系统服务价值的变化率^[12]。计算公式如下:

$$EL_{i-j} = \frac{(VS_j - VS_i) \times LUC_{i-j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [(VS_j - VS_i) \times LUC_{i-j}]} \times 100\% \quad (2)$$

式中, EL_{i-j} 为土地利用转变对生态系统服务价值的贡献度, $EL_{i-j} > 0$ 时, 表明第 i 种土地利用类型向第 j 种土地利用类型的转变改善了局部生态环境, 反之, 则引起局部生态环境的恶化; VS_i 、 VS_j 为 i 、 j 类土地利用类型的生态系统服务价值系数; LUC_{i-j} 为第 i 种土地利用类型向第 j 种土地利用类型转化的面积。

1.4 生态系统服务变化指数

生态系统服务变化指数 (Ecological Services Change Index, ESCI) 能够对生态系统服务的减损或增益进行表征^[29]。ESCI 值为 0 时表示生态系统服务价值未发生变化, 没有增益或减损; 当为正值时表示有增益; 当为负值时表示有减损。计算公式如下:

$$ESCI_x = \frac{ES_{CUR_x} - ES_{HIS_x}}{ES_{HIS_x}} \quad (3)$$

式中, $ESCI_x$ 为单项生态系统服务价值变化指数; ES_{CUR_x} 为最后状态下的生态系统服务; ES_{HIS_x} 为初始状态下的生态系统服务。

1.5 权衡与协同关系评价

相关分析法通常用于研究两个变量之间相关关系及相关程度^[30], 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。双变量空间自相关分析是研究不同要素空间分布的有效方法^[31], 能够实现多个变量之间空间相关性的分析与表达。计算公式如下:

$$R_{pq} = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - p)(q_i - q)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - q)^2}} \quad (4)$$

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; p 、 q 为 p 、 q 的平均值。

$$I_{vw}^z = s_v^z \times \sum_{y=1}^n w_{zy} \times s_w^y \quad (5)$$

$$s_v^z = \frac{X_v^z - X_v}{\sigma_v} \quad (6)$$

$$s_w^y = \frac{X_w^y - X_w}{\sigma_w} \quad (7)$$

式中, I_{vw}^z 为空间单元 z 的双变量全局空间自相关指数; w_{zy} 为空间单元 z 、 y 间的空间连接矩阵; X_v^z 、 X_w^y 分别为空间单元 z 、 y 的属性 v 、 w 的值; X_v 、 X_w 分别为属性 v 、 w 的平均值; σ_v 、 σ_w 分别为属性 v 、 w 的方差。

2 新安江流域生态系统服务价值时空分布特征

2.1 生态系统服务的时间变化特征

根据公式(1)对新安江流域 1999—2019 年生态系统服务价值变化状况进行测度(图 2)。新安江流域生态系统服务价值整体呈波动下降态势, 2014—2019 年有所回升, 改善趋势渐显。1999—2004 年, 流域整体生态系统服务价值有所改善, 浙江段增长率达 3.09%, 为研究期间最大幅度增长。2004—2009 年, 安徽、浙江两省生态系统服务价值均有所降低, 生态系统服务总值降低 6.69 亿元, 降低率为 2.12%, 浙江省降低较为显著。2014—2019 年, 安徽省生态系统服务价值有所回升, 浙江省降低速率也有所放缓。单项生态系统服务价值上(表 1), 水文调节服务价值最高, 并与气候调节、维持生物多样性、土壤保持等服务构成流域生态系统服务价值的主体部分, 食物生产功能在所有服务功能中价值最低, 占比最小; 水文调节、水资源供给服务价值回升趋势明显, 气候调节、保持土壤、维持生物多样性等单项生态系统服务价值波动下降特征较为明显。

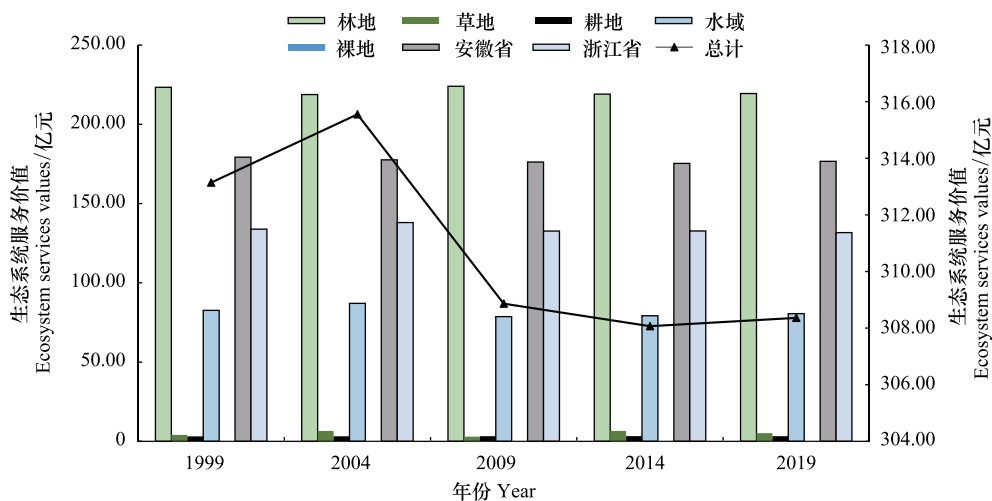


图 2 1999—2019 年新安江流域各类土地生态系统服务价值变化/亿元

Fig.2 Changes in the value of different types of land ecosystem services in the Xin'an River Basin from 1999 to 2019/100 million yuan

表 1 1999—2019 年新安江流域单项生态系统服务价值变化/亿元

Table 1 Changes in the value of individual ecosystem services in the Xin'an River Basin from 1999 to 2019/100 million yuan											
生态系统服务价值 Ecosystem services value		供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services				支持服务 Supporting services		文化服务 Cultural services
		食物生产 Food production	原材料生产 Raw material production	水资源供给 Water supply	气体调节 Gas regulation	气候调节 Climate regulation	水文调节 Hydrological regulation	净化环境 Purification of environment	保持土壤 Soil conservation	生物多样性 Biodiversity	美学景观 Aesthetic landscape
1999	ESV	6.24	8.95	8.89	24.46	62.80	107.43	22.60	25.38	27.90	18.50
	比率/%	1.99	2.86	2.84	7.81	20.05	34.31	7.22	8.10	8.91	5.91
2004	ESV	6.30	8.90	9.24	24.33	62.34	110.28	22.74	25.18	27.80	18.43
	比率/%	2.00	2.82	2.93	7.71	19.75	34.95	7.21	7.98	8.81	5.84
2009	ESV	6.23	8.92	8.42	24.40	62.62	104.52	22.33	25.30	27.74	18.38
	比率/%	2.02	2.89	2.73	7.90	20.27	33.84	7.23	8.19	8.98	5.95
2014	ESV	6.29	8.89	8.39	24.34	62.23	104.59	22.34	25.12	27.60	18.28
	比率/%	2.04	2.89	2.72	7.90	20.20	33.95	7.25	8.15	8.96	5.93
2019	ESV	6.26	8.85	8.52	24.21	62.00	105.41	22.30	25.04	27.53	18.24
	比率/%	2.03	2.87	2.76	7.85	20.11	34.19	7.23	8.12	8.93	5.92

从新安江流域各类用地提供的生态系统服务价值来看(图 2),林地所提供的生态系统服务价值占比最高(71.08%),其次为水域(26.25%)和草地(1.63%)。研究期内,草地、耕地、裸地 3 类用地提供的生态服务价值占比呈波动上升态势,林地、水域 2 类用地的生态系统服务价值占比呈波动下降特征,其中草地、林地的生态服务占比波动幅度较大,其他 3 类用地波动变化则较为平稳。土地利用变化作为人类最基本的实践活动以及人类活动与自然环境最直接的作用表现形式^[32-33],能够直接驱动生态系统的质量、过程、结构及功能发生变化,而生态系统服务价值则是对这种变化过程与作用结果的客观表征^[34],两者之间存在着高度关联性^[35]。为进一步揭示新安江流域土地利用变化的生态效应,根据公式(2)对研究期间流域内土地利用类型转变的生态系统服务价值贡献率进行测度(表 2)。

从新安江流域土地利用类型转化的生态效应上看,1999—2014 年间新安江流域生态系统服务的改善主要依托“耕地-林地”以及“林地-水域”两种形式的转化,两种转化形式的生态贡献度累计均超过 60%,并呈递增趋势发展;2014—2019 年新安江流域生态系统服务的改善转变为以“耕地-林地”以及“耕地-水域”两种转化形式为依托,耕地向水域转化的生态贡献有所强化,说明生态补偿试点工作实施以来,河流、湖泊等土地利用类型在流域生态保护中的生态效应与生态地位不断提升。同时,退耕还林、长江中下游防护林等重大生态

工程的实施对流域生态系统服务改善也产生了持续性重大影响,林地的转入与转出是关系到流域生态系统服务改善与恶化的关键一环。研究期间,林地向耕地的转化是流域生态系统服务恶化的主要原因,1999—2004、2009—2019 年间,“林地-耕地”转化的恶化贡献率占比最大,介于 34%—44%之间,并有增强趋势;河流湖泊向林地的转化是研究期内流域生态系统服务恶化的又一重要原因,在 2004—2009 年间表现最为明显,但伴随水域生态保护力度的加强,此类型转化的恶化贡献度逐渐降低。

表 2 1999—2019 年新安江流域土地利用转变对生态系统服务价值的贡献度

Table 2 Contribution of land use transformation in Xin'an River Basin to ecosystem service value from 1999 to 2019

状态 Status	1999—2004 年		2004—2009 年		2009—2014 年		2014—2019 年	
	转变类型	生态贡献度	转变类型	生态贡献度	转变类型	生态贡献度	转变类型	生态贡献度
恶化	4-2	33.77	6-4	50.19	4-2	38.73	4-2	43.15
Deterioration/%	6-4	32.78	4-2	16.79	6-4	26.81	6-4	22.26
	6-2	9.82	6-2	12.80	6-2	10.30	1-2	10.70
	6-3	6.54	6-3	8.35	6-3	6.49	6-3	6.22
	4-3	5.10	1-2	4.55	4-1	4.63	4-3	5.31
	4-1	3.70	4-3	3.41	1-2	3.79	6-2	4.03
改善	4-6	47.12	2-4	35.02	4-6	39.51	2-4	33.94
Melioration/%	2-6	15.18	4-6	31.67	2-4	35.05	2-6	21.99
	2-4	14.72	2-6	8.95	2-6	7.27	4-6	14.39
	2-1	8.77	1-4	6.25	2-1	5.98	3-6	8.00
	3-6	4.57	2-1	5.83	3-6	3.91	2-1	7.52
	1-6	2.79	3-4	3.88	3-4	3.06	3-4	5.26

其中 1-6 分别代表草地、耕地、建设用地、林地、裸地与水域

2.2 生态系统服务的空间集聚特征

基于生态系统服务价值对土地利用变化的尺度响应特征^[36-37],结合研究区实际及决策发展需要,选取乡镇尺度作为基本评价单元,探索新安江流域生态系统服务价值及生态系统服务变化指数在空间上的局部表现。流域地均生态系统服务价值整体空间分布状况较为稳定(图 3),但存在明显的高值集聚与低值集聚区,空间异质性较强。高值区集中分布在下游浙江省淳安县境内,其余高值区呈现出沿流域境内六股尖山脉、天目—白际山脉、黄山山脉为主线的分布与扩散特征。海拔高值区,人类活动强度与干扰程度相对较弱,土地利用结构及植被结构趋于稳定,得以持续保有高生态价值及强生态功能。低值区随时间演化的空间分布变化较大,沿谷地、盆地等低地分布的特征明显,主要在安徽省徽州区、休宁县、歙县等区县城区呈片状分布。海拔低值区相对密集的城镇结构及道路结构也加剧了人类活动对生态系统的干扰,生态系统服务恢复反复性的空间特征也较为明显。生态系统服务变化指数结果显示(图 3),市、县级行政中心驻地、经济开发区及工业园区的生态系统服务价值减损较大,以黄山市屯溪区、歙县经济技术开发区、绩溪县生态工业园等地较具代表性。生态系统服务价值增益较为明显的地区主要有安徽省境内休宁县渭桥乡、万安镇、歙县许村镇、绩溪县瀛洲镇、黟县宏村镇等乡镇单元。

从生态系统服务价值的空间相关关系来看(表 3),新安江流域生态系统服务总值及各项生态服务子系统的全局 Moran's I 值均大于 0, P 值均小于 0.001,表明其空间分布均具有较强的正向相关性,且生态系统服务总值及供给、调节服务的 Moran's I 值均呈波动上升态势,支持、文化服务的 Moran's I 值持续增长,空间自相关性均逐渐增强。基于研究期间流域地均生态系统服务价值空间分布较为稳定的研究实际,选取 2019 年镇域地均生态系统服务价值作为分析变量,进一步展开流域生态系统服务的局部自相关分析(图 4)。局部自相关 Moran's I 指数将要素单元的空间分布划分为 H-H(高高集聚)、L-L(低低集聚)、H-L(高低集聚)、L-H(低高集聚)四种集聚类型,新安江流域生态系统服务价值局部空间自相关的显著区域包括 H-H、L-L、H-L 三种类型。H-H 型集聚在空间中表现为正向辐射效应,表示相邻地理单元生态系统服务价值高值空间关联性较强,

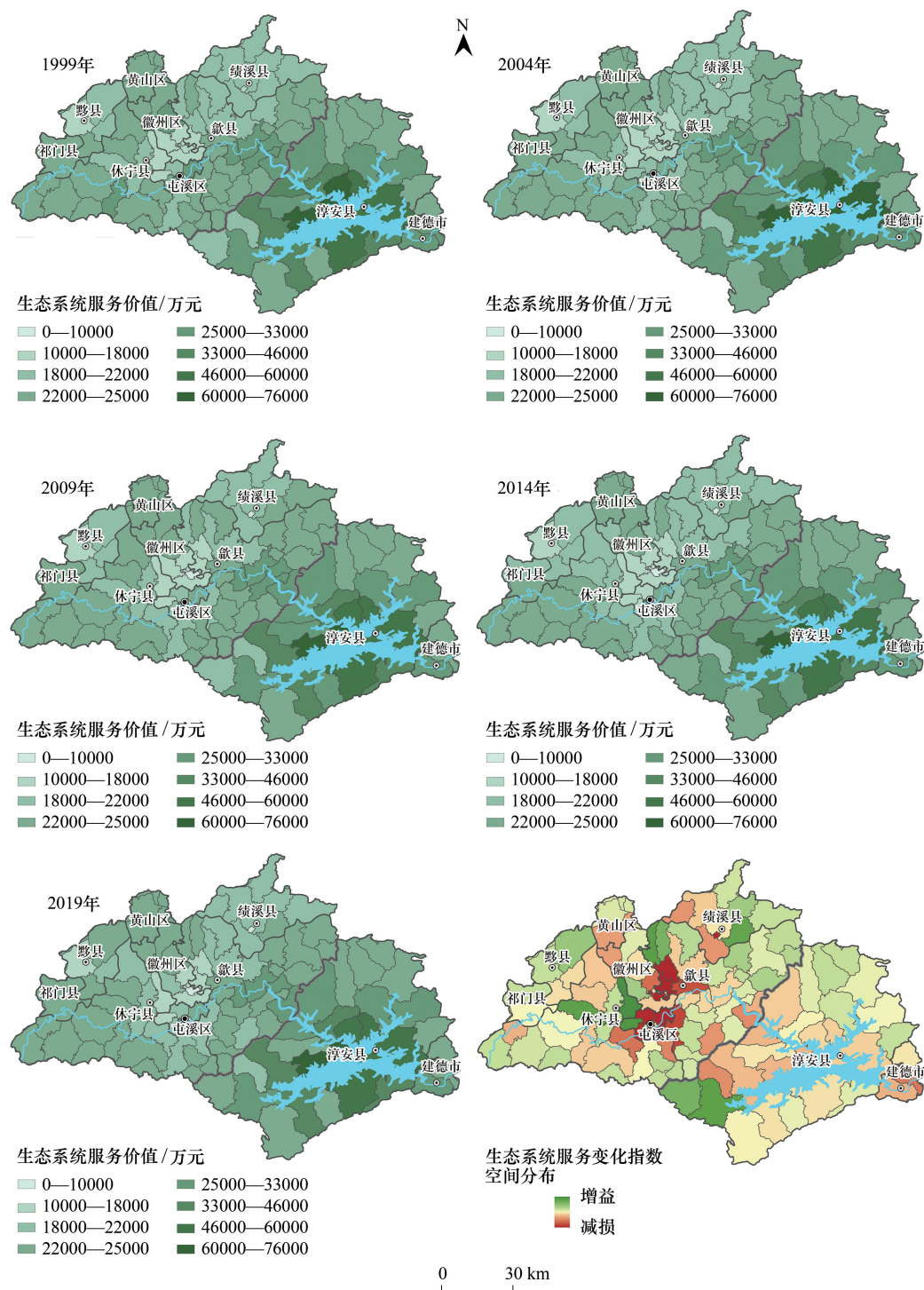


图3 1999—2019年新安江流域生态系统服务价值及生态系统服务变化指数空间分布

Fig.3 The spatial distribution of ecosystem service value and Ecological Services Change Index (ESCI) in the Xin'an River Basin from 1999 to 2019

水域对生态系统服务价值的高贡献率使新安江流域形成以千岛湖为核心并向外辐射的片状高值集聚区,包括千岛湖镇、石林镇等乡镇单元;L-L型集聚在空间关联中表现为负向辐射效应,表示相邻地理单元生态系统服务价值低值空间关联性较强,在黄山市、休宁县、绩溪县等市、县城区形成明显集聚,密集的人类活动对自然资源的依赖驱使林地、草地等覆被向耕地及建设用地大面积转化,且城镇中心地区生态问题复杂,生态系统恢复

面临着长期性和复杂性,低值区在这些地区形成明显集聚。H-L 型集聚在空间上表现为极化效应,表示生态系统服务价值高值与低值空间关联性较大的区域,流域内此类集聚单元较少,以点状邻近分布在黄山市屯溪区 L-L 集聚类型单元周围。

表 3 新安江流域生态系统服务 Moran's I 估计值
Table 3 Moran's I estimates of ecosystem services in the Xin'an River Basin

年份 Years	生态系统服务总值 Total value of ecosystem services	供给服务 Provisioning services	调节服务 Regulating services	支持服务 Supporting services	文化服务 Cultural services
1999	0.2515	0.1464	0.1389	0.1838	0.1778
2004	0.2272	0.1412	0.1335	0.1867	0.1787
2009	0.3089	0.1472	0.1393	0.1880	0.1813
2014	0.2770	0.1510	0.1419	0.1905	0.1840
2019	0.2991	0.1483	0.1412	0.1921	0.1848

总的来说,新安江沿江两侧、千岛湖及环湖区域既是新安江流域生态系统服务的重点恢复区域,也是流域生态系统服务的重点保护区域。除水域外,新安江流域生态系统服务价值及其变化指数的空间分布与境内海拔高程之间存在较强关联,空间异质性较强;高值集聚与低值集聚区明显,空间相关性较强。高值区随时间变化有所减少,中值区逐渐扩展,低值区先增后减。

3 新安江流域生态系统服务的权衡协同关系

3.1 生态系统服务的相关关系

生态系统服务关系的正确认知是区域生态系统服务可持续发展的决策基础^[38]。以乡镇为基本评价单元,基于 SPSS 软件进行双变量相关性分析,得到新安江流域各项生态系统服务之间的相关性(表 4)。相关性结果为正值,表明两种生态系统服务具有协同关系,反之则为权衡关系^[39]。结果显示,新安江流域 10 种生态系统服务形成的 100 组相关关系中,负相关关系为 20 组,正相关关系为 80 组,其中有 64 组在 0.01 水平上呈显著正相关。因此,协同关系是研究期间新安江流域生态系统服务相关关系的主体。协同关系主要存在于调节、支持、文化服务子系统之间,其中,支持服务、文化服务与其他类型服务之间的相关关系均为正相关,调节服务子系统中的水文调节服务与原材料生产、气体调节之间存在负相关关系,其余均为正相关关系。新安江流域存在的权衡关系中,80%与供给服务有关,供给服务提供的有形商品与人类福祉之间的高关联度加剧了供给服务与其他类型服务之间的矛盾。调节服务中,气体调节、气候调节与净化环境之间均为协同关系,其中,气候调节与气体调节之间的正相关关系较强,气体调节与水文调节之间存在较弱的权衡关系。支持服务与文化服务子系统中的保持土壤、维持生物多样性、提供美学景观之间均存在较高程度的协同关系。

为进一步探索生态补偿对生态系统服务相关关系的影响,基于对研究期时间尺度内生态响应的时间滞后性考虑,以新安江流域第一轮生态补偿试点工作结束时间为间隔点,对流域 1999—2014 年、2014—2019 年两个时间段生态系统服务相关关系进行测算(图 5、6)。结果显示,生态补偿实施后流域部分生态系统服务间相关关系发生明显转化。首先,水文调节服务与其他类型服务之间的权衡关系有所增强,协同关系弱化。水文调节服务功能主要受水域影响^[40]。1999—2014 年新安江流域水文调节服务变化值为-2.84 亿元,2014—2019 年水文调节服务价值恢复明显,变化值为 0.82 亿元。生态补偿试点工作实施后,流域内以水文调节为代

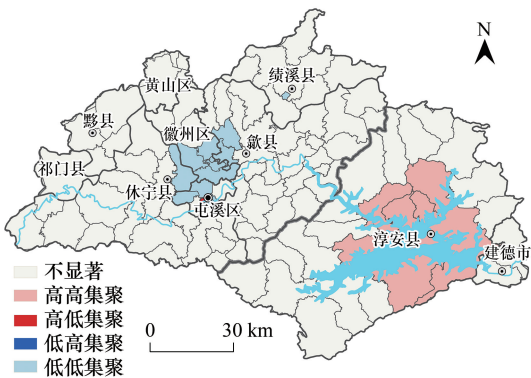


图 4 新安江流域地均生态系统服务价值局部自相关分析
Fig.4 Local autocorrelation analysis of the value of ecosystem services in the Xin'an River Basin

表 4 1999—2019 年新安江流域生态系统服务相关关系

Table 4 The relationship between ecosystem services in the Xin'an River Basin from 1999 to 2019

生态系统服务类型 Ecosystem services type	供给服务 Provisioning services			调节服务 Regulating services				支持服务 Supporting services		文化服务 Cultural services
	食物生产	原材料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	水文调节	净化环境	保持土壤	生物多样性	美学景观
食物生产 Food production	1	-0.624 **	-0.774 **	-0.351 **	-0.642 **	0.037	-0.457 **	-0.711 **	-0.622 **	-0.635 **
原材料生产 Raw material production	-0.624 **	1	0.548 **	0.949 **	0.991 **	-0.047	0.694 **	0.981 **	0.932 **	0.909 **
水资源供给 Water supply	-0.774 **	0.548 **	1	0.316 **	0.604 **	0.593 **	0.849 **	0.667 **	0.752 **	0.788 **
气体调节 Gas regulation	-0.351 **	0.949 **	0.316 **	1	0.931 **	-0.09	0.611 **	0.891 **	0.855 **	0.820 **
气候调节 Climate regulation	-0.642 **	0.991 **	0.604 **	0.931 **	1	0.036	0.738 **	0.995 **	0.962 **	0.945 **
水文调节 Hydrological regulation	0.037	-0.047	0.593 **	-0.09	0.036	1	0.68 **	0.059	0.304 **	0.353 **
净化环境 Environment depuration	-0.457 **	0.694 **	0.849 **	0.611 **	0.738 **	0.68 **	1	0.752 **	0.891 **	0.909 **
保持土壤 Soil conservation	-0.711 **	0.981 **	0.667 **	0.891 **	0.995 **	0.059	0.752 **	1	0.966 **	0.954 **
生物多样性 Biodiversity	-0.622 **	0.932 **	0.752 **	0.855 **	0.962 **	0.304 **	0.891 **	0.966 **	1	0.998 **
美学景观 Aesthetic landscape	-0.635 **	0.909 **	0.788 **	0.82 **	0.945 **	0.353 **	0.909 **	0.954 **	0.998 **	1

** 表示两种生态系统服务在 0.01 水平上显著相关

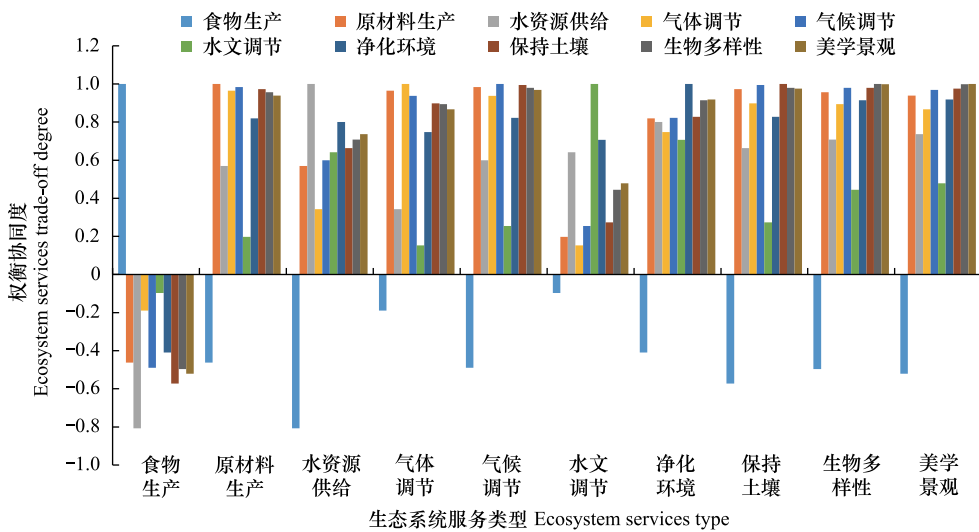


图 5 1999—2014 年新安江流域生态系统服务相关关系

Fig.5 The relationship between ecosystem services in the Xin'an River Basin from 1999 to 2014

表的调节服务价值增速明显高于其他生态服务类型,水文调节服务发展方向的转变使其与其他类型服务之间的相关关系发生变化。其次,供给服务内部以及供给服务与其他服务类型之间的权衡作用有所强化。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^[38],社会经济与人类福祉的持续发展依赖于供给服务的不断开发,致使流域内供给服务与其他类型服务之间权衡关系逐渐强化。整体而言,生态补偿试点工作实施以来水环境保护、水污染治理及流域综合治理等工作的开展,使水域这一土地利用类型在新安江流域生态系统功能改善中发挥越来越重要的作用,但其他类型生态服务功能有待跟进,流域生态系统服务间的

协同关系有待进一步发展强化。

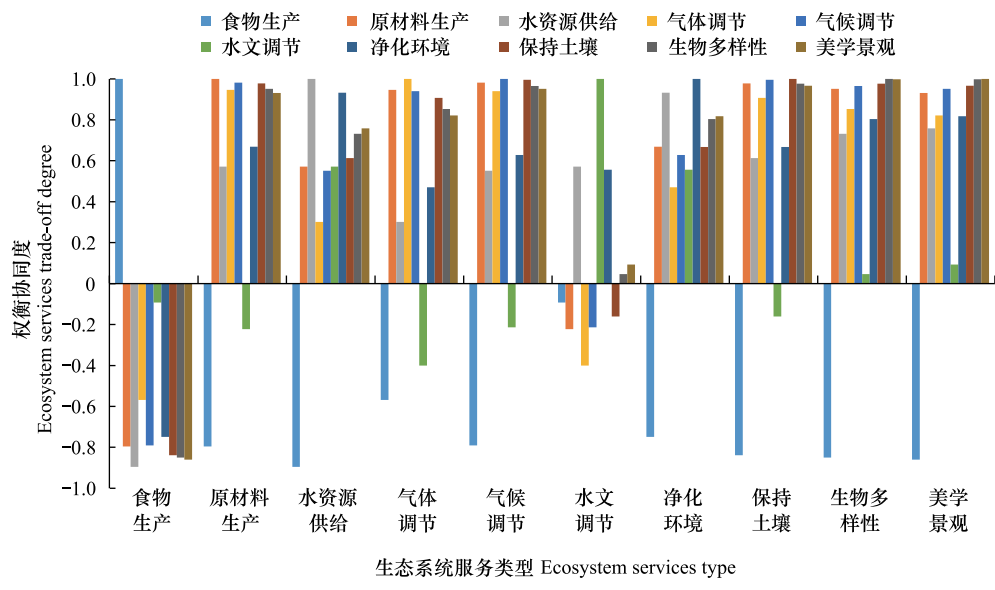


图 6 2014—2019 年新安江流域生态系统服务相关关系

Fig.6 The relationship between ecosystem services in the Xin'an River Basin from 2014 to 2019

3.2 权衡协同关系的空间表达

为进一步探索镇域尺度上生态服务权衡协同关系的空间分布,将新安江流域 2019 年生态系统服务价值导入乡镇行政单元矢量图层中,利用 Geoda 工具对新安江流域生态系统服务进行双变量局部空间自相关分析(图 7)。双变量空间自相关分析中,高高集聚、低低集聚表示协同关系,高低集聚、低高集聚表示权衡关系^[13]。结果显示,协同关系的空间分布存在较高一致性,高高集聚区大部分分布在流域下游浙江省淳安县境内,低低集聚区围绕流域地均生态系统服务价值低值中心区分布,主要在黄山市屯溪区、徽州区、歙县及休宁县城区分布;权衡关系以高低权衡关系为主,主要在休宁县海阳镇、商山镇以及歙县溪头镇、桂林镇等乡镇单

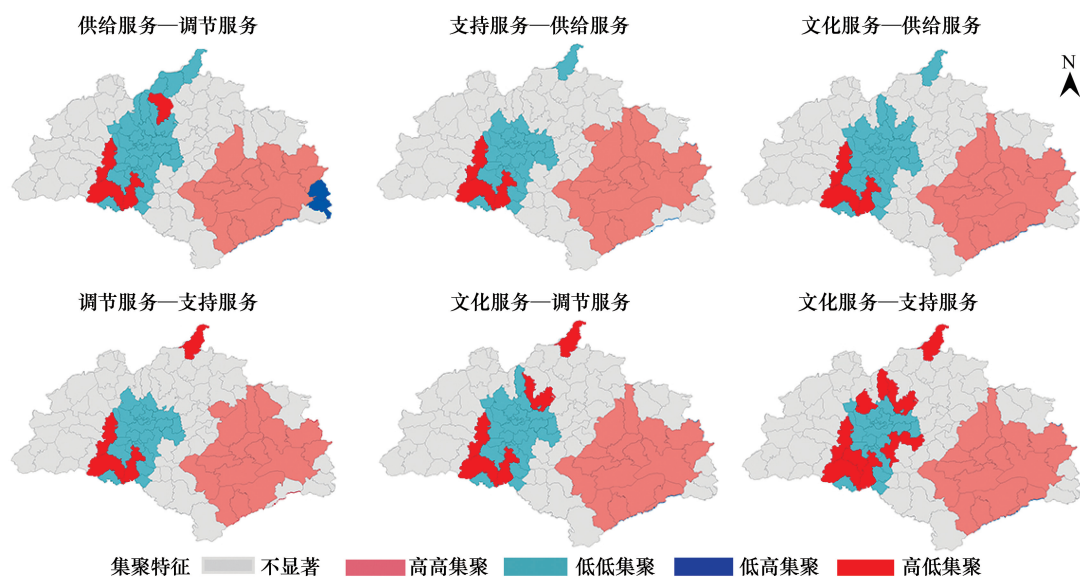


图 7 新安江流域四类生态系统服务子系统间局部自相关分布图

Fig.7 The local indicators of spatial association cluster map of ecosystem service subsystems in the Xin'an River Basin

元分布,沿低低集聚区外围分布的特征明显。从不同生态系统服务间的作用关系来看,供给服务—调节服务低低集聚协同关系较为显著,以生态系统服务价值低值集聚区为中心向南北两端扩散的空间特征明显;供给服务—支持服务、供给服务—文化服务权衡协同关系的空间分布较为一致。调节服务—支持服务、调节服务—文化服务间协同关系的空间分布较为一致,权衡关系存在差别,在低低集聚区北部歙县桂林镇形成调节服务—文化服务的高低集聚权衡关系。文化服务—支持服务的高低集聚权衡关系空间单元数量最多,沿低低集聚区外围紧密围绕分布。

4 讨论与结论

4.1 讨论

目前关于实施重大生态实践区域的生态系统服务价值评估及相互关系量化的已有研究较为少见。因此,本文以新安江跨省流域生态补偿机制试点这一重大改革为研究背景,以第一轮生态补偿试点工作实施结束为关键时间节点,基于土地利用变化生态贡献度、生态系统服务变化指数、双变量空间自相关等方法模型,直观定量地对新安江流域生态系统服务演化过程及权衡协同关系进行系统分析。伴随生态补偿机制试点的实施,水域这一土地利用类型在新安江流域生态系统服务发展中的贡献效应有所增强,主要是得益于流域产业结构调整、流域综合治理、水环境保护和水污染治理等系列工作的开展^[24],河流、湖泊的保护力度日益强化,水域覆被转出面积逐渐缩减,趋于稳定。同时,生态系统服务变化指数结果显示生态系统服务价值增益明显的区域多集中在流域上游安徽省境内,流域上游以水生态环境保护为着力点的生态保护工作在空间上也得到了积极响应^[41]。水生态环境的改善进一步推动流域内水文调节服务的正向演进,生态系统服务价值快速上升,致使生态补偿试点工作实施后水文调节服务与其他生态系统服务之间的相关关系发生明显转化。

本文的研究结果表明,新安江流域生态系统服务价值整体仍有较大回升空间,安徽、浙江两省应继续贯彻对水域、林地等关键土地利用类型的保护工作。虽然生态补偿机制试点工作取得了阶段性成效^[42],但流域这一大范围自然地理单元的生态保护工作仍然面临着长期性和复杂性^[43],政府及相关机构应合力健全流域自然资源产权制度、生态补偿标准体系,强化基础制度体系建设。空间分析结果上,生态系统服务价值的低值集聚区与减损显著区在安徽省徽州区、休宁县、歙县等区县城区重合分布明显,地方亟需综合城市建设、水土保持、粮食安全、经济发展等多目标优化与土地利用之间的关系,科学划定经济产业布局的生态红线区与可开发利用区,从区域经济生态化水平、能源资源综合利用效率、农业科技投入与机械化水平等方面出发探索流域综合治理开发新模式。权衡协同关系上,流域食物生产用地、水环境保护用地与其他用地之间的竞争关系明显,粮食生产与生态保护之间的矛盾突出。同时,生态补偿试点工作的实施推动了水文调节服务的快速发展,但应进一步以水生态环境的改善为抓手,通过科学合理的生态规划,划定“耕地红线”及“生态红线”,促进流域生态系统服务的全面发展,减少生态系统服务间的权衡。新安江沿江两侧、上游安徽省境内流域边界海拔高值区、下游浙江省千岛湖及周边等生态系统服务的重点保护及恢复区域,应是新安江流域生态红线边界划定重点考虑的主体。在流域生态系统负荷较高,尤其是人类活动较为密集的城镇地区,应严控禁止建设区边界及耕地红线,在牢固建立粮食安全系统的基础上推动流域绿色、智慧、高质量发展。

4.2 结论

(1)从演化过程来看,新安江流域生态系统服务价值整体呈波动下降特征,生态补偿实施后有所回升;以河流、湖泊为代表的土地覆被类型在流域生态系统保护和恢复中的生态效应得到明显强化;水文调节服务功能价值最高,林地是新安江流域生态系统服务发展中的关键土地利用类型。

(2)从分布特征来看,新安江流域生态系统服务价值空间差异较大,异质性较强,且存在明显的高值集聚与低值集聚区,相关性较强;生态系统服务高值区集中分布在浙江省千岛湖及周围区域,低值区在黄山市屯溪区、徽州区、歙县等市、县城区形成明显集聚;生态补偿试点工作实施后,流域上游安徽段生态系统服务价值增益较为明显。

(3)从权衡协同关系来看,协同关系是新安江流域生态系统服务间相关关系的主体,主要存在于调节、支持、文化服务子系统之间;生态补偿试点工作实施后,水文调节服务与其他类型生态服务之间的作用关系发生明显转化;镇域尺度上,不同生态系统服务间的协同关系分布较为一致,权衡关系以高低集聚为主,在文化服务—支持服务之间表现最为明显。

参考文献 (References):

- [1] 聂伟平, 陈东风. 新安江流域(第二轮)生态补偿试点进展及机制完善探索. 环境保护, 2017, 45(7): 19-23.
- [2] 何方, 吴楠, 方降龙, 高吉喜, 周晓铁, 冯朝阳. 新安江上游减轻磷素面源污染生态系统服务及价值. 应用生态学报, 2015, 26(4): 1253-1262.
- [3] 任以胜, 陆林, 虞虎, 朱道才. 尺度政治视角下的新安江流域生态补偿政府主体博弈. 地理学报, 2020, 75(8): 1667-1679.
- [4] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington, DC: Island Press, 1997: 49-70.
- [5] MA (Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystems and Human Well-Being. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [6] 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(6630): 253-260.
- [7] Costanza R, De Groot R, Sutton P C, van der Ploeg S, Anderson S J, Kubiszewski I, Farber S, Turner R K. Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change, 2014, 26: 152-158.
- [8] 欧阳志云, 王效科, 苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. 生态学报, 1999, 19(5): 607-613.
- [9] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 郑度, 李双成. 青藏高原生态资产的价值评估. 自然资源学报, 2003, 18(2): 189-196.
- [10] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. 自然资源学报, 2008, 23(5): 911-919.
- [11] 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.
- [12] 陈万旭, 李江凤, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.
- [13] 钱彩云, 巩杰, 张金茜, 柳冬青, 马学成. 甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系. 地理学报, 2018, 73(5): 868-879.
- [14] Haase D, Schwarz N, Strohbach M, Kroll F, Seppelt R. Synergies, trade-offs, and losses of ecosystem services in urban regions: an integrated multiscale framework applied to the Leipzig- Halle region, Germany. Ecology and Society, 2012, 17(3): 22.
- [15] Bennett E M, Peterson G D, Gordon L J. Understanding relationships among multiple ecosystem services. Ecology Letters, 2009, 12(12): 1394-1404.
- [16] Djanibekov U, Khamzina A, Djanibekov N, Lamers J P A. How attractive are short-term CDM forestations in arid regions? The case of irrigated croplands in Uzbekistan. Forest Policy and Economics, 2012, 21: 108-117.
- [17] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
- [18] 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.
- [19] 尹礼唱, 王晓峰, 张琨, 肖飞艳, 程昌武, 张欣蓉. 国家屏障区生态系统服务权衡与协同. 地理研究, 2019, 38(9): 2162-2172.
- [20] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.
- [21] 巩杰, 徐彩仙, 燕玲玲, 郭青海. 1997—2018 年生态系统服务研究热点变化与动向. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3265-3276.
- [22] 景守武, 张捷. 新安江流域横向生态补偿降低水污染强度了吗? 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 152-159.
- [23] 王金南, 王玉秋, 刘桂环, 赵越. 国内首个跨省界水环境生态补偿: 新安江模式. 环境保护, 2016, 44(14): 38-40.
- [24] 王慧杰, 毕粉粉, 董战峰. 基于 AHP-模糊综合评价法的新安江流域生态补偿政策绩效评估. 生态学报, 2020, 40(20): 7493-7506.
- [25] 欧阳志云, 李小马, 徐卫华, 李煜珊, 郑华, 王效科. 北京市生态用地规划与管理对策. 生态学报, 2015, 35(11): 3778-3787.
- [26] 马庆华, 杜鹏飞. 新安江流域生态补偿政策效果评价研究. 中国环境管理, 2015, 7(3): 63-70.
- [27] 张潇, 张晓瑶, 陆林, 李冬花. 旅游干扰下的流域多尺度景观格局演化特征及驱动因素研究——以新安江流域为例. 生态学报, 2021, doi: 10.5846/stxb202006171574.
- [28] Yi L, Zhang Z X, Zhao X L, Liu B, Wang X, Wen Q K, Zuo L J, Liu F, Xu J Y, Hu S G. Have changes to unused land in China improved or exacerbated its environmental quality in the past three decades? Sustainability, 2016, 8(2): 184.
- [29] 李晶, 李红艳, 张良. 关中-天水经济区生态系统服务权衡与协同关系. 生态学报, 2016, 36(10): 3053-3062.
- [30] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析(第二版). 北京: 电子工业出版社, 2002.
- [31] 李淑娟, 高琳. 胶州湾北岸滨海地区 4 个时期生态系统服务价值和生态功能区划分研究. 湿地科学, 2020, 18(2): 129-140.

- [32] 雷金睿, 陈宗铸, 陈小花, 李苑菱, 吴庭天. 1980—2018 年海南岛土地利用与生态系统服务价值时空变化. 生态学报, 2020, 40(14): 4760-4773.
- [33] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 徐新良, 秦元伟, 宁佳, 周万村, 张树文, 李仁东, 颜长珍, 吴世新, 史学正, 江南, 于东升, 潘贤章, 迟文峰. 20 世纪 80 年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. 地理学报, 2014, 69(1): 3-14.
- [34] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 欧阳志云, 郑华. 土地利用变化对生态系统服务功能的影响——以密云水库流域为例. 生态学报, 2013, 33(3): 726-736.
- [35] 刘永强, 龙花楼. 长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响. 经济地理, 2017, 37(11): 161-170.
- [36] 黄木易, 岳文泽, 方斌, 冯少茹. 1970—2015 年大别山区生态服务价值尺度响应特征及地理探测机制. 地理学报, 2019, 74(9): 1904-1920.
- [37] 张宇硕, 吴殿廷, 吕晓. 土地利用/覆盖变化对生态系统服务的影响: 空间尺度视角的研究综述. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1172-1189.
- [38] 彭建, 胡晓旭, 赵明月, 刘焱序, 田璐. 生态系统服务权衡研究进展: 从认知到决策. 地理学报, 2017, 72(6): 960-973.
- [39] Jopke C, Kreyling J, Maes J, Koellner T. Corrigendum to 'interactions among ecosystem services across Europe: Bagplots and cumulative correlation coefficients reveal synergies, trade-offs, and regional patterns' [Ecological Indicators 49 (2015) 46 - 52]. Ecological Indicators, 2015, 53: 295-296.
- [40] 幸赞品, 颜长珍, 冯坤, 修丽娜, 钱大文, 谢家丽. 1975—2015 年甘肃省白龙江流域自然保护区生态系统服务价值及其时空差异. 中国沙漠, 2019, 39(3): 172-182.
- [41] 杨兰, 胡淑恒. 基于动态测算模型的跨界生态补偿标准——以新安江流域为例. 生态学报, 2020, 40(17): 5957-5967.
- [42] 梅宏, 陈佩彤, 陈克亮. 流域—海域生态补偿制度研究. 环境保护, 2019, 47(2): 49-53.
- [43] 樊杰, 王亚飞, 王怡轩. 基于地理单元的区域高质量发展研究——兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点. 经济地理, 2020, 40(1): 1-11.