

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.02.006.

刘永婷, 杨钊, 章翩, 等. 安徽省生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(2): 413-421.

LIU Yongting, YANG Zhao, ZHANG Pian, et al. Spatiotemporal Change and Trade-off/Synergy Relationships Among Multiple Ecosystem Services in Anhui Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 413-421.

安徽省生态系统服务时空变化及权衡-协同关系

刘永婷, 杨钊, 章翩, 林嘉敏

(安徽师范大学 地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241002)

摘要: 探析生态系统服务的变化特征及其权衡与协同关系, 为制定生态环境保护政策和区域发展规划提供决策参考。利用 1990—2018 年 4 期土地利用数据, 运用当量因子法、GIS 空间分析与地理探测器模型, 基于格网尺度刻画安徽省生态系统服务价值(Ecosystem Service Values, ESV)时空演变特征和权衡/协同关系, 探讨了影响 ESV 空间分异的主要因素及其交互作用。结果表明: (1) 在 1990—2018 年期间安徽省 ESV 呈不断减少趋势, 从研究初期的 3 647.37 亿元(1990 年)减少至 3 567.78 亿元(2018 年), 下降了 79.59 亿元。(2) 空间尺度上, ESV 空间分布格局变化较小, 空间异质性明显, 呈现明显的南高北低的空间分异特征。(3) 数值关系上, 4 种典型生态系统服务之间呈现不同强度的协同关系。空间分布上, 生态系统服务的空间权衡/协同表现出显著的分异特征, 一对生态系统服务的权衡与协同关系因空间尺度不同而存在一定差异。(4) 县域尺度 ESV 空间分异格局是多种因素综合作用的结果, 其中人口密度和人为影响综合指数对区域 ESV 空间差异的决定力显著强于其他因素。两两驱动因子交互作用对 ESV 的影响力均大于各因子独立作用的解释力。由此可得, 安徽省 ESV 权衡/协同关系具有区域异质性, 未来应在空间尺度上促进多种服务间的协调发展。

关键词: 生态系统服务; 权衡/协同; 驱动因子; 安徽省

中图分类号: X171

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)02-0413-09

Spatiotemporal Change and Trade-off/Synergy Relationships Among Multiple Ecosystem Services in Anhui Province

LIU Yongting, YANG Zhao, ZHANG Pian, LIN Jiamin

(College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu, Anhui 241002, China)

Abstract: The spatio-temporal changes of ecosystem services, trade-offs and synergies of ecosystem services were explored to provide decision-making reference for formulating ecological protection policy and regional sustainable development in the future. Based on the land use classification data of the Anhui Province from 1990 to 2018, the equivalent factor method, GIS spatial analysis and GeoDetector were used to depict the spatial geographical pattern of ecosystem services values (ESV), then the trade-offs and synergies was explored, spatial heterogeneity of the county ESV was quantitatively detected, and the interaction mechanism between the ESV and the geographical environment was revealed. The results showed that: (1) the ESV in Anhui was decreasing from 3 647.37 billion yuan in 1990 to 3 567.78 billion yuan in 2018; (2) in terms of spatial distribution, the spatial distribution pattern of ESV in Anhui Province changed little and the spatial heterogeneity was obvious from 1990 to 2018; (3) there was significant heterogeneity of trade-offs/synergies between ecosystem services on the spatial pattern; the tradeoffs and synergies of ecosystem services varied with different spatial scales; (4) the spatial differentiation of ESV was affected by a variety of

收稿日期: 2021-09-09

修回日期: 2022-01-28

资助项目: 国家社会科学基金“风景道规划的理论、方法与实践”(20FGLB074)

第一作者: 刘永婷(1985—), 女, 安徽阜阳人, 博士研究生, 研究方向为旅游地理与生态系统服务。E-mail: liuyt0701@163.com

通信作者: 杨钊(1978—), 男, 安徽六安人, 博士, 教授, 主要从事旅游地理的研究。E-mail: yangzhao@mail.ahnu.edu.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

factors; the difference in density of population and HAI had always been the most decisive factor for the spatial differences; in the interaction detection, each factor had significant differences in the spatial distribution of ESV, and showed a two-factor enhancement. Therefore, the tradeoffs and synergies of ecosystem services had spatial heterogeneity, and synergistic development of multiple ecosystem services should be spatially promoted at spatial scale in the future.

Keywords: ecosystem services; trade-off and synergies; driving factor; Anhui Province

生态系统服务(Ecosystem Service, ES)是指人类从自然生态系统中获取的惠益,与人类福祉和可持续性关系极其密切^[1-2]。生态系统服务价值(Ecosystem Service Values, ESV)是一种量化和分配生态系统服务及其功能经济价值的核心指标^[3-4]。生态系统服务价值的评估对于确保和管理生态系统的长期能力至关重要,基于地理学视角研究 ESV 的空间异质性、区域差异及其驱动因素对于设计能够增强积极影响和减少负面影响的干预措施至关重要^[5-8]。

目前,ESV 估算方法主要遵循由 Costanza 等^[9]基于土地利用/覆盖数据提出的 ESV 分类和经济价值评价方法。鉴于中国的实际情况,谢高地等^[10-11]基于 Costanza 提出的评价模型,系统收集和梳理相关研究成果,对前期研究进行了修订和补充,构建了符合中国国情的生态系统单位面积 ESV 评估体系,得到诸多学者的青睐,并在不同地域范围的 ESV 评估中得到了广泛应用^[12-15]。张学斌等^[13]测算格网尺度下张掖生态系统服务价值时空变化特征,并分析其地形梯度的分异特征。朱晓南等^[14]分析了武汉市城市用地扩张对生态系统服务的时空影响特征。王庭辉等^[15]研究了丹江口库区生态系统服务价值与人类活动强度的关系,探讨了人类活动对生态系统服务价值空间异质性的影响机制。各项生态系统服务相互影响,在多种因素作用下,各种生态系统服务之间的关系变得更加复杂,且呈现动态变化,通常表现出此消彼长的权衡、相互增益的协同及无关 3 种关系^[16-17]。已有研究主要采用统计分析、空间制图分析、生产可能性边界、情景模拟等多种方法探讨了生态系统服务间的权衡/协同关系,研究发现生态系统服务间的关系具有区域异质性和一定的尺度依赖性,同一对服务在不同研究尺度或不同区域上的权衡与协同关系存在较大差异^[17-21]。因此,开展典型区不同尺度区域差别化的生态系统服务及空间优化调控研究至关重要。

伴随着工业化和城镇化进程加快,安徽省人口和经济的增长与生态保护的矛盾日益突出,局地生态系统结构发生较大变化,生态风险加剧,影响人类社会的可持续发展^[22]。目前,安徽省大别山水源涵养区域、皖江湿地洪水调蓄区等区域已被列为全国重要生

态功能区,生态环境保护已成为区域发展的重要目标。鉴于此,本研究运用 ESV 评估体系和 GIS 空间分析技术分析安徽省 1990—2018 年生态系统服务价值的时空演变特征,并基于县域和格网尺度探讨各项生态系统服务间的权衡/协同关系,运用地理探测器探讨影响区域 ESV 空间分异的关键驱动因子,以期摸清生态资源家底和生态文明建设及制定区域可持续管理政策提供科学参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 研究区概况

安徽省位于中国华东地区,东经 114°54′—119°37′,北纬 29°41′—34°38′,长江三角洲腹地,总面积 $1.401 \times 10^5 \text{ km}^2$,占全国的 1.45%,居第 22 位。地跨淮河、长江、新安江三大水系,平均海拔 119.3 m,地势由北向南变化很大,呈现南高北低的特征。区域内水资源丰富,河流和湖泊众多,其中巢湖是中国五大淡水湖之一。安徽省属于暖温带与亚热带过渡型气候,季风气候显著。2018 年底常住人口为 6 323.6 万人,人口密度约为全国的 3 倍多;地区生产总值 30 006.82 亿元,人口城镇化率由 1990 年的 17.94% 上升到 2018 年的 54.69%。快速城镇化导致景观格局发生巨大变化,对该区域的生态系统产生的压力越来越大,耕地退化、水环境污染、生物多样性下降等趋于严重。

1.2 数据来源

本文数据主要包括 1990 年、2000 年、2010 年及 2018 年 4 个时期 30 m 分辨率土地利用数据,2018 年归一化植被指数(NDVI),均来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>)。研究区 DEM 数据的分辨率为 30 m × 30 m (<http://www.gscloud.cn>);计算 1990—2018 年各生态系统单位面积服务价值所用的粮食作物产量、粮食种植面积及粮食价格等资料来源于《安徽省统计年鉴》和《全国农产品成本收益资料汇编》。在驱动因素分析中,人为影响综合指数(Human Active Index, HAI)和土地垦殖率利用公式进行计算获得^[23]。研究区各个县(区)社会经济统计数据来源于安徽省各县统计年鉴和中国城市统计年鉴。由于统计数据不完全而导致的少

量缺失数据由插值(即移动平均法)来补充。上述数据在预处理完成后,均转换为统一的 Albers 投影,并重采样为 1 km 分辨率用于影响因素分析。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务价值评价 本文参考谢高地等^[10-11]提出的生态系统服务价值量化方法,采用 2015 年修订的符合中国等发展中国家实际的 ESV 当量因子表,结合安徽省实际生产能力,采用单位面积粮食产量修正方法。建设用地作为独特的人为景观格局类型,其基本功能依赖于生态系统,对水资源供应、气体调节、净化环境等功能具有负向影响。本文参考已有研究建设

用地的价值系数,根据各种土地利用类型的对应值,乘单个当量因子价值,得到各土地利用类型的单位面积生态系统服务价值^[24-25](表 1)。各地类 ESV 和各项服务功能价值的测算公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n U_i \times VC_i \quad (1)$$

$$ESV_j = \sum_{i=1}^n U_i \times VC_{ij} \quad (2)$$

式中:ESV 和 ESV_j 分别为研究区生态系统服务价值、第 j 项服务功能价值; U_i 为研究区 i 类用地类型的面积; VC_i 为安徽省用地类型 i 类单位面积的 ESV 系数; VC_{ij} 为第 i 类用地类型的第 j 项 ESV 系数^[23]。

表 1 安徽省各类用地单位面积生态系统服务价值 元/($hm^2 \cdot a$)

一级分类	二级分类	旱地	水田	林地	草地	水域	建筑用地	未利用地
供给服务	食物生产	1549.09	2478.55	528.51	692.54	1457.97	18.79	0.00
	原材料生产	728.99	164.02	1202.83	1020.58	419.17	0.00	0.00
	水资源供应	36.45	-4793.08	619.64	564.96	15108.22	-14110.00	0.00
调节服务	气体调节	1221.05	2022.93	3954.75	3590.25	1403.30	-4546.76	36.45
	气候调节	656.09	1038.80	11846.01	9495.03	4173.44	0.00	0.00
	净化环境	182.25	309.82	3517.35	3134.64	10114.67	-4621.92	182.25
	水文调节	492.07	4957.10	8638.48	6961.81	186328.66	0.00	54.67
支持服务	土壤保持	1877.14	18.22	4829.53	4373.91	1694.89	37.58	36.45
	维持养分循环	218.70	346.27	364.49	328.04	127.57	0.00	0.00
	生物多样性保护	236.92	382.72	4392.14	3972.97	4647.28	638.80	36.45
文化服务	文化娱乐	109.35	164.02	1931.81	1749.56	3444.46	18.79	18.22

1.3.2 生态系统服务权衡与协同关系 为进一步了解安徽省不同生态系统服务在空间上的权衡/协同关系,运用 GeoDa 和 ArcGIS 软件基于格网和县域尺度对 4 类典型生态系统服务进行双变量空间自相关分析,探讨安徽省生态系统服务空间权衡-协同关系^[26],在双变量空间自相关中,高高集聚和低低集聚特征表示协同关系,高低集聚和低高集聚则是权衡关系^[27-29]。全局和局部空间自相关计算公式如下:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

$$I_i = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4)$$

式中: I 和 I_i 分别为双变量全局 Moran's I 指数和局部 Moran's I 指数; n 为评价空间单元数量; x_i (x_j) 为单元 i (j) 的测度值; \bar{x} 为空间单元上平均值; w_{ij} 为空间单元 i, j 之间空间连接矩阵。

1.3.3 驱动因子分析 利用相关性分析剔除与安徽省各区县 ESV 相关性较低的驱动因子,运用 K-means 分类算法将驱动因子进行离散化处理形成空间分区,基于 GeoDetector 工具的“因子探测”和“交

互作用探测”功能,分析了研究区域 ESV 与自然社会经济因素等主要指标的关系,探讨影响安徽省 ESV 空间分异的关键驱动因素,以及各驱动因子间交互作用的特征^[30-31]。计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (5)$$

式中: q 为驱动因子对 ESV 空间分异的影响力探测值; N, σ^2 分别为研究区单元数和方差; N_h, σ_h^2 分别为 h 层 ($h=1, \dots, L$) 单元数和方差。 $q \in [0, 1]$, q 数值越大表明驱动因子对 ESV 的解释力越高,反之则越低^[32-33]。

2 结果与分析

2.1 安徽省生态系统服务价值时空变化

2.1.1 时间变化分析 总体上看,1990—2018 年安徽省 ESV 整体上呈现持续递减的动态变化特征,从 3 647.37 亿元(1990 年)减少至 3 567.78 亿元(2018 年),下降了 79.59 亿元,减幅达 2.18%。从不同土地利用类型 ESV 来看(表 2),水域的 ESV 最高,1990—2018 年占比均在 39% 以上,增幅达 4.49%。林地的 ESV 位居第二,占比在 32% 左右,其变化则恰好相反,在研究期间呈波动下降趋势,由 1 358.56 亿元减小到 1 341.59 亿元。耕地(水田和旱地)ESV 变

化较大,从1990年占比14.24%到2018年占比13.05%,价值减少了32.81亿元。草地的ESV先升高后降低,总体变化幅度较小。建设用地减少最为明显,减少了103.87亿元。未利用土地虽然呈先增加再减少的动态变化特征,但由于其占比较小,单位面积ESV当量很低,对总ESV影响不大。

从ESV变化率可以发现,建设用地和水域的变

化率最大,随着城市化进程加快,造成了生态用地的不合理转化,建设用地快速扩张过程中不可避免地占用了服务价值较高的土地利用类型,而ESV为负的建设用地增加,导致ESV总量减少。虽然水域面积的不断增长导致其ESV呈上升趋势,绝对数量上远不及由其他用地类型减少所损失的ESV,但在一定程度上有效补充了ESV的损失。

表2 1990—2018年各类土地生态系统服务价值变化

土地类型	生态系统服务价值/亿元				变化率/%			
	1990年	2000年	2010年	2018年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2018年	1990—2018年
旱地	271.40	269.39	264.92	259.10	-0.74	-1.66	-2.20	-4.53
水田	315.75	310.64	302.42	295.23	-1.62	-2.65	-2.38	-6.50
林地	1358.56	1350.38	1347.07	1341.59	-0.60	-0.25	-0.41	-1.25
草地	297.56	299.10	298.70	297.83	0.52	-0.13	-0.29	0.09
水域	1641.42	1646.97	1667.83	1715.20	0.34	1.27	2.84	4.49
建设用地	-237.31	-262.12	-302.62	-341.17	10.45	15.45	12.74	43.77
未利用地	0.002	0.002	0.002	0.002	0.03	-9.99	-9.59	-18.60
总计	3647.38	3614.36	3578.32	3567.78	-0.91	-1.00	-0.29	-2.18

2.1.2 生态系统服务价值空间分异特征 安徽省ESV存在明显南高北低的空间分异特征(图1)。整体上来看,ESV的高值区主要分布在淮河、巢湖和长江等水域面积大的区域及皖西和皖南等林地面积比例较高的地区以及一些偏远的乡镇,这些地区水资源较为丰富,林地和水域面积占比较大,受人类活动干扰程度较低。ESV的低值区集中分布合肥都市圈、淮海经济区及其他以建设用地类型为主的中心城区及其周边区域的乡镇,这些区域地势平坦、人口密度高、农田和建设用地比例较高、对自然生态系统的干扰程度大,导致该区域ESV较低,且向周围不断扩张。局部分析来看,ESV较高的区域与水域和林地的空间分布较为一致,主要分布于宿松县、巢湖市、枞阳县、霍山县、东至县以及黄山区等地区。ESV较

低区域分布则与耕地、各城市建成区分布较为吻合。建成区用地对土地利用价值有显著的负向影响,导致在建成区用地比例较大的地区,ESV价值相对较低。随着城镇化进程加快,建设用地蔓延,ESV较低范围有扩张趋势,其空间变化趋势与城市扩张趋势一致。随着时间的推移,ESV空间范围有些许变化,但总体空间分布格局变化不明显。1990—2018年间,除霍邱县、岳西县、当涂县、濉溪县、颍上县和博望区等区县ESV呈波动增加趋势,其余各区县ESV均呈现减少的态势,但是各区县的变化幅度存在一定差异。瑶海区、蜀山区、颍州区、淮城区、田家庵区及蚌山区等城市建成区的ESV均呈现明显下降趋势,减幅均在30%以上,进而致使此期间安徽省ESV的剧烈减少。

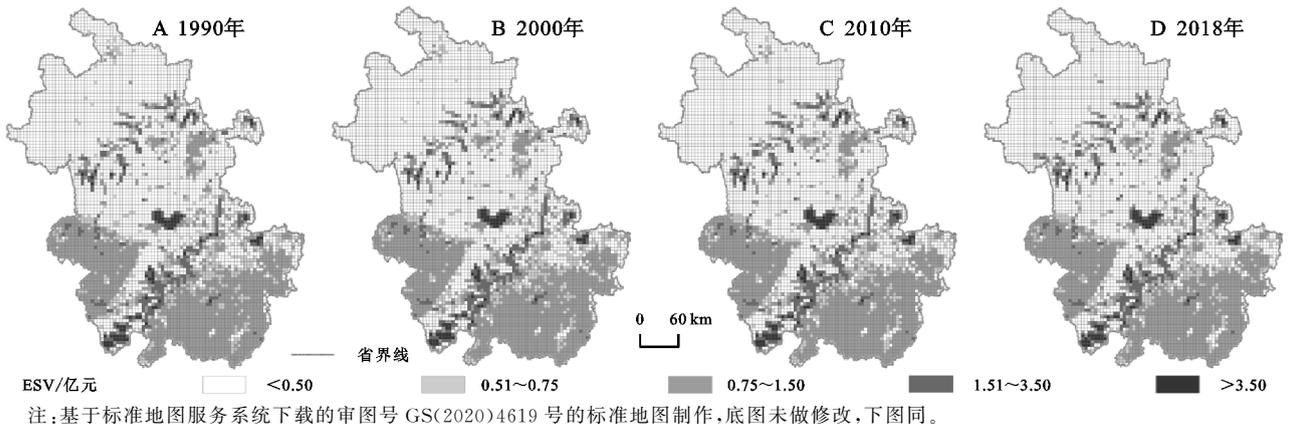


图1 1990—2018年安徽省ESV空间分异

2.2 安徽省生态系统服务的空间权衡—协同关系 在县域和格网尺度上,4种典型生态系统服务间的

相关系数均为正值,且通过0.01显著性水平检验,说明各生态系统服务存在协同关系。由Moran's I 值可知,6

对生态系统服务在县域和格网尺度上存在正向的空间集聚特征,表明生态系统服务之间以协同作用为主,但在两种尺度上 Moran's I 值大小位序存在一定差异。供给服务和调节服务在县尺度上 Moran's I 值最小(0.206),而在格网尺度上 Moran's I 值较大(0.498),表明两种生态系统服务的关系强度因空间尺度不同而存在显著差异。

安徽省生态系统服务间的权衡/协同关系空间异质性显著,各生态系统服务之间关系因尺度不同而呈现显著差异(图 2—3)。在县域尺度上,供给服务和调节服务的高高协同区主要分布在皖南的太湖县、望江县、祁门县,低低协同集聚于安徽北部的部分县区。权衡区主要分布在叶集区、怀远县、大通区和当涂县。供给服务与支持、文化服务,调节服务与支持、文化服务协同区域主要分布在西部、南部、江淮和北部的部分县区,安徽西部和南部的县区属于高高协同区,江淮和北部的部分县区属于低低协同。权衡区分布相对比较分散。从地貌特征上可以看到,这些协同区主要分布在大别山和皖南山区等生态资源比较丰富的

地区和江淮及北部地区城乡建设用地比例高及耕地资源丰富的地区。在格网尺度上,6 对生态系统服务之间的协同作用占主导地位,分布较为聚集,权衡只存在于少量的网格中,分布相对分散。协同效应主要分布在研究区域的皖南和皖西的网格单元。具体表现如下:供给服务-调节服务协同关系分布在皖北地区、巢湖、沿江等地区,供应和支持服务、供应和文化服务、调节和支持服务、调节和文化服务、支持和文化服务的协同作用分布在研究区域的西南和南部,少部分分布在北部和中部。供应和调节、文化服务以及文化和调节、支持服务的协同作用明显更大,除巢湖区域外,协同关系主要集中在皖西和皖南地区。供给和调节服务、供给和文化服务的权衡关系主要分布在皖北地区,其他地区分布比较零星。总体来看,支持服务和文化服务存在协同关系地区的数量最多,达到 2 889 个,相应地其存在权衡关系地区的数量最少,仅 84 个。供给服务和调节服务协同关系地区的数量最少,仅 1 228 个,存在权衡关系地区数量最多的为供给服务和调节服务 539 个,其次是供给服务和文化服务(518 个)。

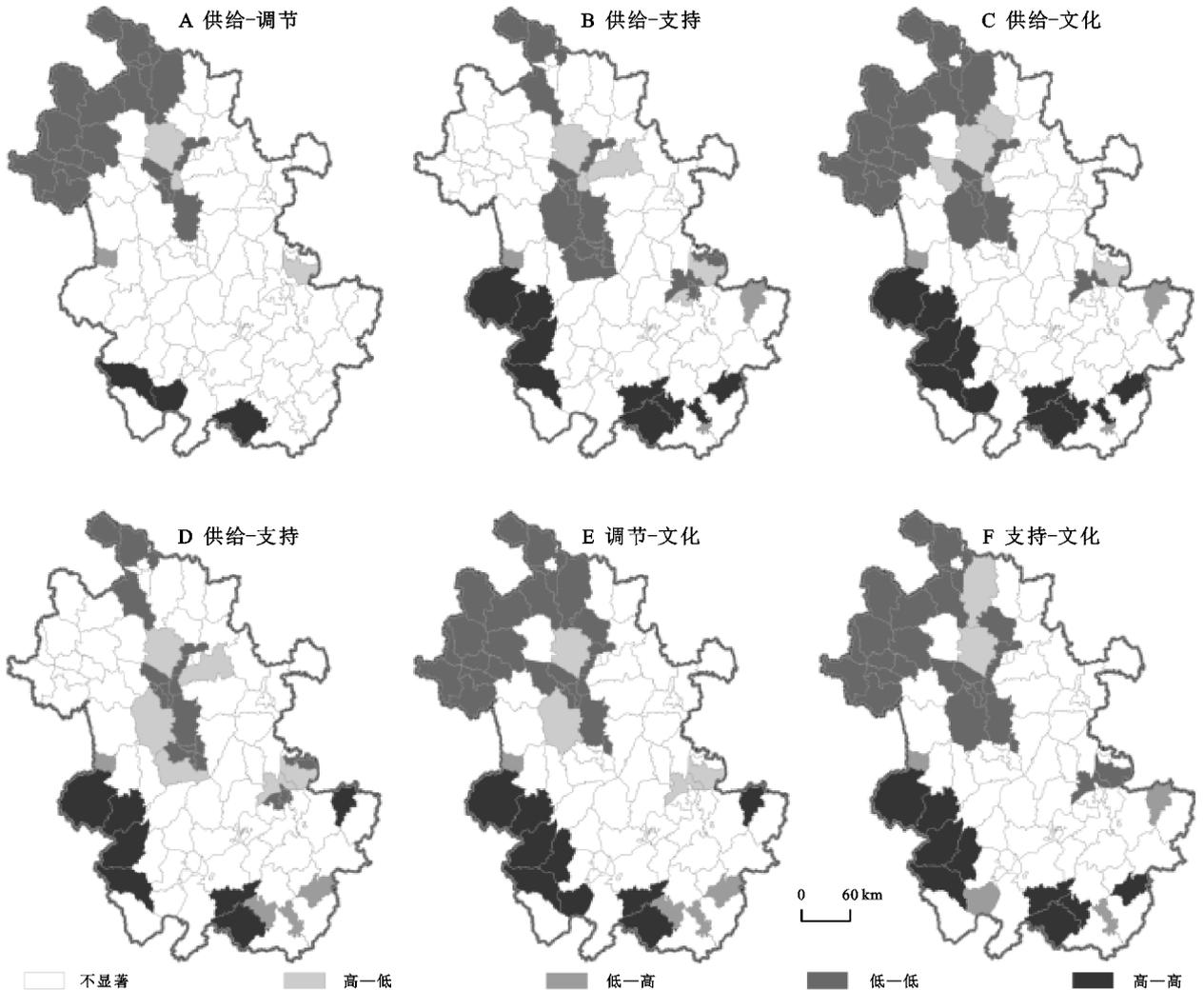


图 2 安徽省县域 4 种典型生态系统服务间局部 LISA 图

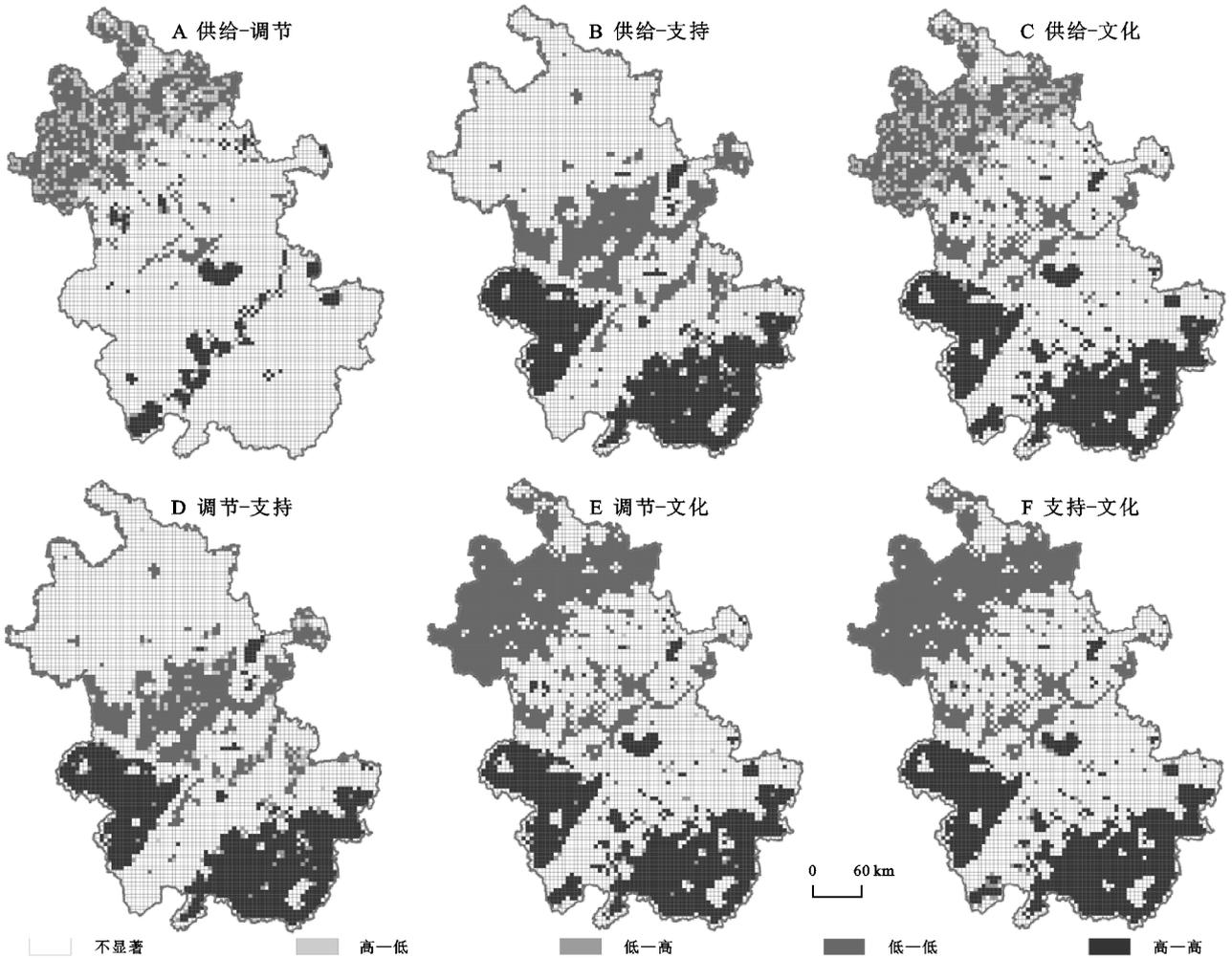


图3 格网尺度下4类生态系统服务双变量局部空间自相关集聚分布

2.3 生态系统服务价值的空间分异驱动机制分析

根据研究区实际社会-生态环境背景,通过参考相关文献及专家建议^[30-31],鉴于研究区域的规模和数据的可得性,以选择因子的代表性兼顾可获得性为基本原则,本文遴选了影响ESV空间分布的DEM(X_1)、坡度(X_2)、NDVI(X_3)、HAI(X_4)、土地垦殖

率(X_5)、人均GDP(X_6)、城市化率(X_7)、人口密度(X_8)、农业人口(X_9)、农业生产总值(X_{10})、农民人均可支配收入(X_{11})和工业产值(X_{12})等自然和社会经济因素。为保证合理性和科学性,利用Pearson相关分析筛选出与ESV相关性较高的因子,并进行地理探测器分析(表3)。

表3 安徽省ESV驱动因子相关性分析

因子	ESV	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}
ESV	1												
X_1	0.42**	1											
X_2	0.42**	0.93**	1										
X_3	0.24*	0.42**	0.40**	1									
X_4	-0.64**	-0.83**	-0.89**	-0.36**	1								
X_5	-0.35**	-0.75**	-0.80**	0.11	0.75**	1							
X_6	-0.29**	-0.13	-0.08	-0.63**	0.19	-0.22*	1						
X_7	-0.42**	-0.26**	-0.22**	-0.73**	0.31**	-0.20	0.59**	1					
X_8	-0.46**	-0.30**	-0.32**	-0.66**	0.50**	-0.09	0.50**	0.66**	1				
X_9	0.20*	-0.27**	-0.35**	0.41**	0.35**	0.56**	-0.41**	-0.59**	-0.21*	1			
X_{10}	0.20*	-0.26**	-0.33**	0.45**	0.32**	0.62**	-0.44**	-0.62**	-0.35**	0.90**	1		
X_{11}	-0.24*	-0.22*	-0.13	-0.66**	0.17	-0.17	0.74**	0.50**	0.51**	-0.37**	-0.35**	1	
X_{12}	-0.02	-0.22*	-0.21*	-0.20	0.20*	0.17	0.42**	0.05	0.03	0.17	0.15	0.36**	1

注:**代表通过0.01显著性水平检验,*代表通过0.05显著性水平检验,下同。

基于地理探测器计算各探测因子对县域尺度 ESV 的探测力 q 统计值及显著性检验,并定量识别其空间异质性特征(表 4)。总体来看,不同因子对其 ESV 的解释力(q 值)存在显著差异。因子探测 q 值范围为 0.10~0.51,除 X_{11} 外,其他影响因子 q 值均大于 0.15,具有相当的解释作用,且 p 值均通过 0.05 水平的显著性检验,显示出明显的区域分异性。其中

$X_8(q=0.51)$ 和 $X_4(q=0.42)$ 是影响 ESV 空间分异的核心决定因子,其次是 $X_2(q=0.25)$ 、 $X_{10}(q=0.25)$ 、 $X_7(q=0.24)$ 、 $X_1(q=0.23)$ 和 $X_5(q=0.22)$,均通过了 0.01 的显著性检验,说明上述因子的解释贡献度较高,是 ESV 的空间分异的重要影响因素,而 $X_3(q=0.21)$ 、 $X_6(q=0.19)$ 和 $X_9(q=0.17)$ 贡献度相对较小,是 ESV 的空间分异基础性影响因素。

表 4 安徽省 ESV 驱动力交互作用探测

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}
X_1	0.23**										
X_2	<u>0.38</u>	0.25**									
X_3	0.46	0.40	0.21*								
X_4	<u>0.50</u>	<u>0.66</u>	0.65	0.42**							
X_5	<u>0.39</u>	<u>0.48</u>	0.51	<u>0.55</u>	0.22**						
X_6	0.45	0.40	0.42	0.59	0.62	0.19*					
X_7	0.55	0.51	0.48	<u>0.66</u>	0.64	<u>0.32</u>	0.24**				
X_8	<u>0.54</u>	<u>0.54</u>	0.70	<u>0.63</u>	<u>0.64</u>	0.62	<u>0.58</u>	0.51**			
X_9	0.51	0.55	0.49	0.78	0.65	0.37	<u>0.37</u>	<u>0.58</u>	0.17*		
X_{10}	0.56	0.59	0.61	0.78	0.73	0.36	<u>0.41</u>	<u>0.60</u>	<u>0.35</u>	0.25**	
X_{11}	0.35	0.40	0.42	0.60	0.44	0.23	<u>0.33</u>	<u>0.56</u>	0.33	<u>0.32</u>	0.10

注:下划线代表双因子增强,无标注则为非线性增强。

各驱动因子之间存在交互作用,以非线性增强型为主,部分属于双因子增强型,非线性或双线性地增强了对 ESV 空间分布的解释力。其中 $q(X_3 \cap X_8)$ 、 $q(X_4 \cap X_9)$ 、 $q(X_4 \cap X_{10})$ 、 $q(X_5 \cap X_{10})$ 交互作用 q 值均在 0.7 以上,对 ESV 空间格局特征具有较强的影响力和解释力。其中 $q(X_4 \cap X_9)$ 、 $q(X_4 \cap X_{10})$ 的交互加强效果显著($q=0.78$),即两组因子的共同作用能在 78% 的程度上解释 ESV 空间分布。 X_4 、 X_8 与其余驱动因子交互作用均在 0.5 以上,进一步验证了 X_4 和 X_8 是 ESV 空间差异的关键驱动因子。任意两两驱动因素交互作用对 ESV 的影响力均大于各因子独立作用的解释力,说明该区域 ESV 是受多种因素共同影响的结果。

安徽省县域尺度 ESV 空间分异是受到自然和人文等多个驱动因子综合作用的结果。自然环境驱动因子中,坡度、DEM、NDVI 是影响县域 ESV 空间分异的重要驱动力,且呈显著正相关性。坡度影响区域耕地资源、基础设施建设及农业生产条件,坡度越大,土地开垦难度和基础设施建设难度及成本都较大,进而影响区域 ESV。社会经济驱动因子中,研究区人为影响综合指数(HAI)和人口密度是影响 ESV 空间分异的主导驱动力,其与 ESV 整体呈强烈的负相关。人口密度大的地区会造成耕地和城乡建设用地侵占其他生态类型用地,而 HAI 的数值越高的区域,说明人为活动占优势的景观组分构成越大,从而加重生态

压力,加剧区域生态系统脆弱性和生态环境质量退化,ESV 相应发生变化^[27,30]。同时,ESV 也受农业生产总值(X_{10})、城市化率(X_7)、土地垦殖率(X_5)、人均 GDP(X_6)和农业人口(X_9)空间分异特征的重要影响,而农村居民可支配收入(X_{11})对县域 ESV 响应强度相对较弱。

3 讨论与结论

3.1 讨论

本研究基于安徽省 1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年 4 期土地利用数据,借助当量因子法、GIS 空间分析方法及地理探测器模型,刻画了安徽省 ESV 空间分异特征和权衡/协同关系,初步探讨了影响 ESV 空间异质性的主要驱动因子。安徽省的 ESV 总体呈下降趋势,并存在明显南高北低的空间分异特征,这与已有的相关研究结果基本一致^[25]。利用局部空间自相关方法,基于县级和格网尺度对 6 对生态系统服务的空间权衡/协同关系进行了度量。6 对生态系统服务主要以协同作用为主,两种生态系统服务的关系强度在不同的尺度上存在一定差异,县级尺度上的协同效应不能代表在格网尺度上存在的相同的相关关系,这与相关研究结论相吻合^[34-36]。6 对生态系统服务之间的权衡/协同作用集中分布在皖北、皖西和皖南地区。皖北平原地区人口密集,大量粮食需求导致农业活动强度较大,土地利用强度高,植被覆

盖度相对较低,该区域供给型生态系统(耕地)占比较大。调节-支持型生态系统(林、草地)主要分布于皖西和皖南等生态保护区,植被覆盖度高,人口密度和土地利用强度均较低。正是这种社会生态环境的空间异质性导致生态系统服务间权衡与协同关系存在一定差异。

县域 ESV 空间分异受 DEM、坡度、人为影响综合指数、人口密度、农业生产总值等自然和人文因素的制约,其中人为综合影响指数是安徽省县域 ESV 空间分异主导驱动因子,这与相关研究结果一致^[23,30]。在资源开发和利用过程中,重视人类活动对区域生态环境的影响,忽视生态保护造成的经济损失可能会超过土地利用的经济效益,政府部门应进一步协调社会经济发展和生态环境保护,合理控制建设用地扩张,加强对生态功能区的保护力度,增益生态福祉,促进区域绿色健康协调发展^[37-38]。此外,在未来经济发展过程中要对土地利用进行合理规划,优化“三生”空间,合理把控城镇建设用地与生态环境的平衡关系。调整地区产业结构,打造绿色高质量生态经济产业,减少资源消耗和工业污染,注重生态农业及生态旅游等特色产业的发展,在保护生态环境的同时获取经济利益,实现生态环境与民生改善的协调发展,提升附近居民福祉水平。加强对各区域城镇及农村环境的综合治理,加大对林地、耕地、水域等调节-支持型生态系统功能的保护力度,建立健全环境保护制度,实现区域生活垃圾的收运处置,减少其造成的环境污染,增强群众的环保意识,广泛宣传环保知识和相关法律法规,呼吁群众爱护生态环境。

当量因子法对数据量需求少,可以直观反映生态系统服务变化趋势,但对于解释区域内生态系统服务尺度效应存在一些不足,需要较为精准的评估模型来进行深入的研究^[39]。本研究揭示了研究区各项生态系统服务在数值与空间上的权衡与协同关系,并探讨其尺度效应,但仍无法充分揭示生态系统服务内部机理和作用机制,未来还需要借助别的方法进一步探讨和深入分析,并采用情景分析法模拟未来不同发展情景下生态系统服务的权衡与协同关系变化及其作用机制,寻求社会经济发展和生态保护的双赢局面,为生态系统服务管理和不同区域发展战略的制定提供参考依据。

3.2 结论

(1) 时间上,1990—2018 年安徽省的 ESV 总体呈下降趋势,从研究初期的 3 647.37 亿元(1990 年)减少至 3 567.78 亿元(2018 年),下降了 79.59 亿元。从研究区各类用地提供的 ESV 来看,除水域及草地外,其他生态景观的价值均呈现不同程度减少态势。

单项 ESV 呈现有增有减的趋势,水文调节的 ESV 贡献量最大。

(2) 空间上,安徽省 ESV 存在明显南高北低的空间分异特征。分布在淮河、巢湖和长江等水域面积较大的区域及皖西和皖南地区 ESV 价值整体较高,皖北和江淮大部分地区 ESV 价值较低,区域差异显著。1990—2018 年安徽省 ESV 空间分布格局变化较小,空间异质性明显。ESV 增加的地区主要分布在江淮地区的多个县区、西北部及东南部的部分县区,其他地区 ESV 处于下降的态势。

(3) 相关系数和 Moran's *I* 指数表明安徽省 4 种典型生态系统服务之间存在协同关系。各生态系统服务之间的权衡/协同关系具有尺度效应,一对服务在不同空间尺度上的权衡与协同关系存在一定差异。

(4) 安徽省县域尺度 ESV 空间分异受多种因素综合作用的结果,各驱动因子对县域 ESV 的空间分异贡献度差异性显著。人为影响综合指数和人口密度对安徽省 ESV 空间差异的解释力最大,DEM 和坡度等自然因素是影响县域 ESV 空间分异的重要驱动力。各驱动因子存在明显的相互加强作用,以非线性增强型为主,部分属于双因子增强型。

参考文献:

- [1] MA(Millennium Ecosystem Assessment). Ecosystem and Human Well-Being: Synthesis[M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [2] Costanza R, De Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. Global Environmental Change, 2014,26(1):152-158.
- [3] Lyu R F, Clarke K C, Zhang J M, et al. Spatial correlations among ecosystem services and their socio-ecological driving factors: A case study in the city belt along the Yellow River in Ningxia, China[J]. Applied Geography, 2019,108:64-73.
- [4] Luo Q L, Zhou J F, Li Z G, et al. Spatial differences of ecosystem services and their driving factors: A comparison analysis among three urban agglomerations in China's Yangtze River Economic Belt[J]. Science of the Total Environment, 2020,725:138452.
- [5] 傅伯杰,张立伟.土地利用变化与生态系统服务:概念、方法与进展[J].地理科学进展,2014,33(4):441-446.
- [6] 李双成,刘金龙,张才玉,等.生态系统服务研究动态及地理学研究范式[J].地理学报,2011,66(12):1618-1630.
- [7] 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.
- [8] Luo Q L, Luo L Y, Zhou Q F, et al. Does China's Yangtze River Economic Belt policy impact on local ecosystem services [J]. Science of the Total Environment,

- 2019,676:231-241.
- [9] Costanza R, Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997,387:253-260.
- [10] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等.一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J].*自然资源学报*,2008,23(5):911-919.
- [11] 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.
- [12] Song W, Deng X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017,576(15):705-719.
- [13] 张学斌,罗君,石培基,等.格网尺度下张掖生态系统服务价值时空演变及地形梯度分异特征[J].*应用生态学报*,2020,31(2):543-553.
- [14] 朱晓南,刘艳中,陈勇,等.武汉市城市用地扩张对生态系统服务的时空影响[J].*水土保持研究*,2020,27(5):288-294.
- [15] 王庭辉,王喜,秦耀辰,等.丹江口库区生态系统服务价值与人类活动时空关联分析[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(2):330-341.
- [16] 戴路炜,唐海萍,张钦,等.北方农牧交错带多伦县生态系统服务权衡与协同关系研究[J].*生态学报*,2020,40(9):2863-2876.
- [17] Gong J, Liu D, Zhang J, et al. Tradeoffs/synergies of multiple ecosystem services based on land use simulation in a mountain-basin area, western China [J]. *Ecological Indicators*, 2019,99:283-293.
- [18] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, et al. Bundling ecosystem services in Denmark: Trade-offs and synergies in a cultural landscape [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2014,125:89-104.
- [19] 杨薇,靳宇弯,孙立鑫,等.基于生产可能性边界的黄河三角洲湿地生态系统服务权衡强度[J].*自然资源学报*,2019,34(12):2516-2528.
- [20] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J].*资源科学*,2016,38(1):1-9.
- [21] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].*地理学报*,2020,75(5):975-988.
- [22] Miao C L, Sun L Y, Yang L, et al. The studies of ecological environmental quality assessment in Anhui Province based on ecological footprint [J]. *Ecological Indicators*, 2016,60:879-883.
- [23] 张鹏岩,耿文亮,杨丹,等.黄河下游地区土地利用和生态系统服务价值的时空演变[J].*农业工程学报*,2020,36(11):277-288.
- [24] Kang Y, Cheng C X, Liu X H, et al. An ecosystem services value assessment of land-use change in Chengdu: Based on a modification of scarcity factor [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2019,110:157-167.
- [25] Hu S, Chen L Q, Li L, et al. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value determined by land-use changes in the urbanization of Anhui Province, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019,16(24):5104.
- [26] 巩杰,柳冬青,高秉丽,等.西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系:以甘肃白龙江流域为例[J].*应用生态学报*,2020,31(4):226-236.
- [27] 钱彩云,巩杰,张金茜,等.甘肃白龙江流域生态系统服务变化及权衡与协同关系[J].*地理学报*,2018,73(5):868-879.
- [28] 王川,刘春芳,乌亚汗,等.黄土丘陵区生态系统服务空间格局及权衡与协同关系:以榆中县为例[J].*生态学报*,2019,38(2):521-531.
- [29] 金贵,邓祥征,赵晓东,等.2005—2014年长江经济带城市土地利用效率时空格局特征[J].*地理学报*,2018,73(7):1242-1252.
- [30] 黄木易,方斌,岳文泽,等.近 20a 来巢湖流域生态服务价值空间分异机制的地理探测[J].*地理研究*,2019,38(11):2790-2803.
- [31] 耿甜伟,陈海,张行,等.基于 GWR 的陕西省生态系统服务价值时空演变特征及影响因素分析[J].*自然资源学报*,2020,35(7):1714-1727.
- [32] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].*地理学报*,2017,72(1):116-134.
- [33] 宋周莺,祝巧玲.中国边境地区的城镇化格局及其驱动力[J].*地理学报*,2020,75(8):1603-1616.
- [34] 傅伯杰,于丹丹.生态系统服务权衡与集成方法[J].*资源科学*,2016,38(1):1-9.
- [35] 张静静,朱文博,朱连奇,等.伏牛山地区森林生态系统服务权衡/协同效应多尺度分析[J].*地理学报*,2020,75(5):975-988.
- [36] 兰紫橙,贾岚,程煜.闽江流域生态系统服务价值评估及权衡协同关系[J].*生态学报*,2020,40(12):3909-3920.
- [37] Mi N, Hou J W, Mi W B, et al. Optimal spatial land-use allocation for limited development ecological zones based on the geographic information system and a genetic ant colony algorithm [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2015,29(12):2174-2193.
- [38] Fan M, Chen L. Spatial characteristics of land uses and ecological compensations based on payment for ecosystem services model from 2000 to 2015 in Sichuan [J]. *Ecological Informatics*, 2019,50:162-183.
- [39] 李理,朱连奇,朱文博,等.生态系统服务价值与人类活动强度关联性分析及权衡:以淇河流域为例[J].*中国环境科学*,2020,40(1):365-374.