

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.018.

武燕, 吴映梅, 高彬嫫, 等. 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度空间关系[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 173-182.

WU Yan, WU Yingmei, GAO Binpin, et al. Spatial Relationship Between Human Activity Intensities and Ecosystem Services Value in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 173-182.

# 成渝城市群生态系统服务价值与 人类活动强度空间关系

武燕<sup>1</sup>, 吴映梅<sup>1</sup>, 高彬嫫<sup>1</sup>, 李琛<sup>1</sup>, 郑可君<sup>1,2</sup>, 李婵<sup>1</sup>

(1. 云南师范大学 地理学部, 昆明 650500; 2. 云南省社会科学院, 昆明 650000)

**摘要:**科学揭示生态系统服务价值与人类活动强度的空间关系,对土地管理和城市规划具有重要意义。以成渝城市群为例,基于2000年、2010年、2018年三期土地利用数据,构建土地利用转移矩阵、生态系统服务价值评估模型及流向损益模型、人类活动强度指数评估模型,综合运用双变量空间自相关和多尺度地理加权回归方法,探究了成渝城市群地区人类活动强度与生态系统服务价值的空间关系,揭示人类活动强度对生态系统服务价值的深刻影响。结果显示:(1)2000—2018年生态系统服务价值由5 064.6亿元下降到5 061.27亿元,建设用地过度侵占耕地已经成为了生态系统服务价值降低的主要原因;(2)2000—2018年人类活动强度呈现出“双核圈层式”的空间特征,人类活动强度高值区主要集中于成都、重庆两地,边缘地区人类活动强度较弱;(3)人类活动强度增强会导致生态系统服务价值减少,二者存在显著空间负相关,中部地区恶化明显,2000—2018年总体而言负向效应加剧。研究表明退耕还林以及植被恢复对区域生态系统恢复而言至关重要,未来应更加重视区域生态保护,制定合理规划措施,共筑城市群绿色可持续发展一体化。

**关键词:**生态系统服务价值;人类活动强度;双变量空间自相关;多尺度地理加权回归;成渝城市群

中图分类号:F061.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)01-0173-10

## Spatial Relationship Between Human Activity Intensities and Ecosystem Services Value in Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration

WU Yan<sup>1</sup>, WU Yingmei<sup>1</sup>, GAO Binpin<sup>1</sup>, LI Chen<sup>1</sup>, ZHENG Kejun<sup>1,2</sup>, LI Chan<sup>1</sup>

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Yunnan Academy of Social Sciences, Kunming, Yunnan 650000, China)

**Abstract:** Scientifically revealing the spatial relationship between the ecosystem services value and the human activity intensity index is of great significance to land management and urban planning. Taking the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration an example, based on the three phases of land use data in 2000, 2010, and 2018, we constructed a land use transfer matrix, ecosystem service value evaluation model, flow profit and loss model, and human activity intensity index evaluation model, and comprehensively used the multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model to explore the spatial relationship between the human activity intensity index and ecosystem services value in the Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration area, and revealed the profound impact. The results show that: (1) the ecosystem services value dropped from  $5.0646 \times 10^{11}$  yuan to  $5.06127 \times 10^{11}$  yuan during 2000—2018; excessive occupation of cultivated land by

收稿日期:2021-10-11

修回日期:2021-10-27

资助项目:国家自然科学基金“云南山地资源梯度开发与贫困农户生计耦合发展机理研究”(41761037);云南省哲学社会科学规划社会智库项目“云南基本实现社会主义现代化进程中推进新型城镇化研究”(SHZK2021415);云南省教育厅资助项目“云南保山万亩工程建设区绿色发展的时空演变及机理研究”(2020J0092)

第一作者:武燕(1997—),女,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为区域经济开发与管理。E-mail:546264721@qq.com

通信作者:吴映梅(1968—),女,云南昆明人,博士,教授,博士生导师,研究方向为区域经济与地方发展。E-mail:wuyingmei@hotmail.com

<http://stbcj.paperonce.org>

construction land had become the main reason for the decrease in ecosystem service value; (2) during the years 2000—2018, the human activity intensity index showed the spatial characteristics of ‘dual-core circle’; The areas with strong human activity mainly concentrated in Chengdu and Chongqing, and the intensity of human activities in the marginal areas was weak; (3) the increased intensity of human activities would lead to decrease of ecosystem service value; there was a significant negative spatial correlation between the service value and the decline in the central region; the overall negative effect intensified from 2000 to 2018. Studies have shown that returning farmland to forests and vegetation restoration are critical to the restoration of regional ecosystems. In the future, more attention should be paid to regional ecological protection, reasonable planning measures should be formulated, and the integration of green and sustainable development of urban agglomerations should be built together.

**Keywords:** ecosystem services value; human activity intensity; bivariate spatial autocorrelation; multi-scale geographically weighted regression (MGWR) model; Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration

随着经济社会的快速发展,剧烈土地利用的变化带来了城市经济增长与自然环境持续退化等问题<sup>[1]</sup>,威胁着区域生态安全,制约社会经济高质量发展,导致对城市空间需求增加、环境问题日益严重。因此,快速城镇化引发的大规模人类活动与生态系统服务之间的作用关系逐渐成为社会关注的热点话题<sup>[2-3]</sup>。

人类活动强度是指一定面积的区域受人类活动的影响而产生的扰动程度<sup>[4-5]</sup>。生态系统服务价值(Ecosystem Services Value, ESV)是人类从支持地球生命的自然环境和生态系统中获得的利益<sup>[6]</sup>,是生态系统功能效用的价值表现、衡量区域生态环境质量的重要指标,也是突出自然资源对人类福祉重要性的有效工具<sup>[7]</sup>。千年生态系统评估指出生态系统服务包括供给、调节、支持与文化服务,认为全球 60% 的生态系统功能正在或者已经退化,最主要原因是受到人类活动的干扰<sup>[8]</sup>。由于生态系统的服务价值是在与人类的相互作用之中实现的,受到人类活动的强烈影响,二者有着十分密切的关系。土地利用变化作为人类活动最直接的表现形式<sup>[9-10]</sup>,其通过直接或间接地对生态系统格局与过程的影响,正在改变着地表景观格局,导致地表生态过程发生急剧变化<sup>[11]</sup>,从而影响生态系统服务产品与服务的供给,同时不同的土地利用类型代表着不同的人类开发利用强度<sup>[12]</sup>,对生态系统服务价值起着决定性作用<sup>[13]</sup>,进而深刻影响到人类福祉<sup>[14]</sup>。目前有关人类活动强度空间关系研究多集中在自然保护地<sup>[15]</sup>、湿地景区<sup>[16]</sup>、植被覆盖<sup>[17]</sup>,关于生态系统服务价值与人类活动的空间关系研究早有学者对其产生关注:张彩霞等<sup>[9]</sup>以黄土高原典型丘陵沟壑区安塞县纸坊沟为例关注了长时间序列的人类活动以及政策对其生态系统服务价值的影响,随后不同学者针对不同区域探讨了二者的空间关系:南笛等<sup>[18]</sup>以华阳河湖群地区为例运用数

理化分析方法测算了生态系统服务价值与人类活动强度的关联性;李理等<sup>[19]</sup>测算了淇河流域生态系统服务权衡协同关系,并且引入人类活动强度指数评估模型分析人类活动影响空间特征;王庭辉等<sup>[20]</sup>分析了丹江口库区生态系统服务价值和人类活动强度的时空关联特征。从现有研究可知,大多数研究多从探究二者的时空关联性出发,往往不能全面具体地揭示人类活动强度对生态系统服务价值的深刻影响程度。此外研究区多集中于库区<sup>[20]</sup>、河湖群等<sup>[18]</sup>生态保护地区,有关人类活动密集的城市群地区仍不多见,作为国家新型城镇化的空间主体,也是人类活动与生态环境相互作用最为频繁的地区之一<sup>[21]</sup>,城市群在我国社会生产力空间布局中承担着增长极和战略支撑点的重要作用,同时良好的生态发展状况既体现了城市群综合发展水平也是城市群高质量发展的必然要求<sup>[22-23]</sup>。鉴于不合理的人类活动可能会导致生态系统结构失衡,因此关注人类活动过程中生态系统服务价值的损益情况,对城市群绿色可持续发展而言至关重要。

作为长江上游的国家级城市群之一,西部大开发的重要平台,长江经济带的战略支撑,国家推进新型城镇化的重要示范区,成渝城市群一方面承担着西部新型城镇化的主体角色,另一方面也具有保障长江上游生态具有服务供给的重大责任,同时当前发展面临着经济高速增长与环境承载能力有限、经济短期发展与长期可持续发展的城市发展矛盾。因此本文基于 2000 年、2010 年、2018 年三期土地利用数据,运用当量因子法估算 2000—2018 年成渝城市群生态系统服务价值及测度其损益情况,并通过计算人类活动强度指数识别人类高集聚活动区域,利用双变量空间自相关模型探究人类活动强度和生态系统服务价值二者的时空关联性特征,同时采用在 GWR(地理加权回

归)上进行带宽改进的 MGWR(多尺度地理加权回归)对人类活动强度对生态系统服务价值影响程度进行补充分析,旨在全面揭示成渝城市群人类活动强度对生态系统服务价值空间关系特征,以期快速城镇化过程中培育和发展城市群,提升生态系统服务功能效用,保障国土安全和优化国土布局等提供相关理论依据和科学参考。

## 1 研究区概况

成渝城市群位于我国西南(27°39′—33°03′N, 101°56′—110°11′E),地处长江上游,四川盆地腹地,地势西低东高,地貌类型复杂多样,主要以平原和丘陵为主,属亚热带湿润季风气候区,雨量充沛,年均降水量达到 1 000~1 300 mm。根据 2016 年 5 月国务院批准《成渝城市群发展规划》<sup>[24]</sup>划定,其具体范围包括重庆市的 29 个区(县)以及四川省 15 个市,总面积 185 000 km<sup>2</sup>,成渝城市群 2018 年城镇化率达 53.8%、属西南地区最高,因处于全国“两横三纵”城市化战略格局沿长江通道横轴和包昆通道纵轴的交汇地带,发展战略地位突出。

## 2 数据来源、研究方法

### 2.1 数据来源

2000 年、2010 年、2018 年土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m×30 m,依据中国科

学院生态遥感监测土地利用/覆盖分类体系,将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地共 6 类;粮食作物的播种面积、粮食产量数据来源于《四川省统计年鉴》、《重庆市统计年鉴》及各地方经济社会公报,粮食价格数据来源于《全国农产品成本收益资料汇编 2019》。

### 2.2 研究方法

2.2.1 生态系统服务价值估算 以谢高地<sup>[25]</sup>提出的中国生态系统单位面积生态服务价值当量为评估基准,即 1 个生态服务价值当量因子的经济价值为当年全国平均粮食单产市场价值的 1/7 进行评估,并根据研究区的具体情况对当量表进行修订<sup>[26]</sup>:成渝地区农田生态系统的平均生物量因子为 1.28,2000—2018 年成渝城市群平均粮食产量为 5 551.98 kg/hm<sup>2</sup>,2018 年成渝地区平均粮食价格为 2.32 元/kg,由此计算出成渝城市群生态系统服务价值量为 1 836.72 元/hm<sup>2</sup>。将此与各生态服务价值当量值相乘,最终得出成渝城市群生态系统单位面积服务价值系数表(表 1)。

$$ESV = \sum_{k=1}^n (A_k \times VC_k) \quad (1)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \times VC_{fk}) \quad (2)$$

式中:ESV 为生态系统服务总价值; $A_k$  为土地利用类型  $k$  的面积; $VC_k$  为单位面积上土地利用类型  $k$  的生态系统服务价值; $ESV_f$  为生态系统第  $f$  项服务功能价值; $VC_{fk}$  为单位面积上土地利用类型  $k$  的生态系统第  $f$  项服务价值。

表 1 成渝城市群生态系统服务价值系数

元/(hm<sup>2</sup>·a)

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	2406.10	606.12	789.79	973.46	0.00	36.73
	原料生产	938.38	5473.43	661.22	642.85	0.00	73.47
	气体调节	1534.03	7934.63	2755.08	936.73	0.00	110.20
调节服务	气候调节	2066.68	7475.45	2865.28	3783.64	0.00	238.77
	废水处理	2961.53	3159.16	2424.47	27275.30	0.00	477.55
	水文调节	1640.56	7512.19	2791.82	34475.25	0.00	128.57
支持服务	土壤保持	3131.98	7383.62	4114.25	753.06	0.00	312.24
	维持生物多样性	2173.21	8283.61	3434.67	6299.95	0.00	734.69
文化服务	美学景观	362.20	3820.38	1597.95	8155.04	0.00	440.81

2.2.2 生态系统服务价值损益估算 以土地利用转移矩阵为基础,运用生态系统服务价值损益计算公式,可对人类活动干扰下不同土地类型间相互转化引起的生态系统服务价值损益进行定量计算,揭示生态系统服务价值内部增损情况,计算公式如下<sup>[27]</sup>:

$$P_{ij} = (VC_i - VC_j)A_{ij} \quad (3)$$

式中: $P_{ij}$  为土地利用类型由  $i$  类转为  $j$  类时的生

态系统服务价值损益; $VC_i, VC_j$  为  $i$  地类、 $j$  地类的生态系统服务价值系数; $A_{ij}$  为  $i$  地类转为  $j$  地类的面积。

2.2.3 人类活动强度指数评估模型 人类活动导致了土地利用变化,参考以往研究<sup>[10,20,28]</sup>确定各土地利用类型对应的人类活动强度系数,将不同土地利用类型对应的人类活动系数代入人类活动强度指数评估

模型进行计算。数值越大表示人类活动对生态系统服务价值变化的干扰越强;反之表示人类干扰越小。将人类活动强度指数依次划分为低影响( $HAI \leq 0.2$ )、较低影响( $0.2 < HAI \leq 0.4$ )、中影响( $0.4 < HAI \leq 0.6$ )、较高影响( $0.6 < HAI \leq 0.8$ )和高影响( $0.8 < HAI$ ) 5类。本文采用 Lohani 清单法、Leopold 矩阵法和 Delphi 法 3 种方法的平均值作为研究区人类活动强度系数  $P_i$  (表 2), 计算公式参考文献[29]。

$$HAI = \frac{\sum_{i=1}^N A_i P_i}{TA} \quad (4)$$

式中:  $HAI$  为人类活动强度指数;  $N$  为土地利用类型数量;  $A_i$  为第  $i$  种土地利用类型面积;  $P_i$  为第  $i$  种地类所代表的人类活动强度系数;  $TA$  为土地利用总面积。

表 2 不同土地类型人类活动强度指数

参数	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
Lohani	0.61	0.12	0.09	0.12	0.96	0.09
Leopold	0.59	0.14	0.08	0.13	0.94	0.04
Delphi	0.64	0.13	0.09	0.16	0.91	0.05
平均值	0.61	0.13	0.09	0.14	0.94	0.06

2.2.4 双变量空间自相关 空间自相关可以反映出—个区域单元上某种地理现象或某一属性值与邻近区域单元上同一现象或属性值相关程度[30]。选用双变量空间自相关来表征二者之间的空间关联性, 该模型包括全局空间自相关和局部空间自相关, 公式为[31]:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5)$$

式中:  $x_i, x_j$  为观测值;  $\bar{x}$  为  $x_i$  的平均值;  $W_{ij}$  为空间单元  $i$  与  $j$  的空间权重邻接矩阵 ( $ij = 1, 2, 3, \dots, n$ )。全局 Moran's  $I$  取值 $[-1, 1]$ , 常用  $p$  值进行显著性检验。

$$I_{kl}^i = Z_k^i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_l^j \quad (6)$$

式中:  $w_{ij}$  为空间单元  $i, j$  之间的空间连接矩阵;  $z_k^i = \frac{x_k^i - \bar{x}_k}{\lambda_k}$ ;  $Z_l^j = \frac{x_l^j - \bar{x}_l}{\lambda_l}$ ;  $x_k^i$  是空间单元  $i$  属性  $k$  的值;  $x_l^j$  是空间单元  $j$  属性  $l$  的值;  $\bar{x}_k, \bar{x}_l$  是属性  $k, l$  的平均值;  $\lambda_k, \lambda_l$  是属性  $k, l$  的方差。根据 Local Moran's  $I$  指数, 计算结果中 H—H 类型表示高人类活动强度和高生态系统服务价值类型区, L—L 类型表示低人类活动强度和低生态系统服务价值类型区, H—L 类型表示高人类活动强度和低生态系统服务价值类型区, L—H 类型表示低人类活动强度和高生态系统服务价值类型区。

考虑到可塑性面积单元问题, 结合前人研究成果以及研究区实际情况[32-34], 创建等不同格网尺度对比二者的空间关系, 发现  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$  格网划分下可视化效果较好, 能够更好表达出成渝城市群人类活动强度和生态系统服务价值空间信息特征。

2.2.5 空间回归分析 参考过往有关生态系统服务价值与人类活动强度关联性研究[18-20], 往往忽略了二者间的影响作用程度。因此引入多尺度地理加权回归模型 (MGWR) 分析人类活动强度对生态系统服务价值影响作用程度[35]。选用美国亚利桑那州立大学空间分析研究中心 (SPARC) 开发的 MGWR 2.2 软件 (<https://sg-sup.asu.edu/SPARC>) 进行操作, 其结构如下。

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_{j=1}^k \beta_{bwj}(u_i, v_i) x_{ij} + \epsilon_i \quad (7)$$

式中:  $(u_i, v_i)$  为位置  $i$  处的中心坐标;  $v_i$  为  $i$  处的属性值;  $bwj$  代表第  $i$  个变量回归系数使用的带宽;  $\beta_{bwj}(u_i, v_i)$  为  $i$  处第  $j$  个变量的回归系数;  $\beta_0(u_i, v_i)$ ,  $\epsilon_i$  分别是为模型在  $i$  处的截距和误差项。

## 3 结果与分析

### 3.1 土地利用变化情况

人类活动强度作用过程主要体现在土地利用变化的速度、转移方向和土地利用程度 3 个方面[36]。研究区土地利用类型以耕地、林地和草地为主, 3 类土地面积总和占成渝城市群总面积的 94.61% 以上, 其中耕地面积占比最大, 3 个时期占比均在 61.99% 以上; 从变化度来看, 2000—2018 年以建设用地变化速度最快, 2000 年建设用地面积为  $3\,048.56 \text{ km}^2$ , 2018 年增至  $7\,076.45 \text{ km}^2$ , 近二十年间增加了  $4\,027.89 \text{ km}^2$ , 变化率高达 132.12%, 这是由于城市群空间建设发展的迫切需求, 逐渐加大对基础设施的建设投入, 使建设用地的面积快速增加; 同时, 在研究期间, 耕地总面积减少了  $3\,540.23 \text{ km}^2$ , 草地总面积减少了  $2\,453.82 \text{ km}^2$ , 此外林地面积有所增加, 增加面积达  $1\,504.86 \text{ km}^2$ , 变化率达 12.55%, 由于生态文明建设逐步开展, 退耕还林效果较为显著, 一部分耕地逐渐转变为林地 (表 3)。

从各类土地利用类型相互转移来看 (表 4), 成渝城市群各地类变化上以耕地、建设用地以及林地三者之间转换为主, 其中以耕地转为林地转出的面积最多, 达  $4\,281.61 \text{ km}^2$ , 耕地转为建设用地面积为  $4\,065.15 \text{ km}^2$ ; 从转移强度来看, 耕地、林地转化最活跃, 且二者之间相互转化基本平衡, 可见成渝城市群地区在进行退耕还林保护工程实施取得成效的同时也有相当大的一部分林地因城市化扩张, 农业生产活动的需要转为耕地。

表 3 各土地利用面积及其变化

km<sup>2</sup>

类型	土地利用面积			2000—2010 年	2010—2018 年	2000—2018 年
	2000 年	2010 年	2018 年	变化面积	变化面积	变化面积
耕地	117607.34	115833.52	114067.10	-1773.81	-1766.43	-3540.24
林地	49227.94	50211.37	50732.80	983.42	521.44	1504.86
草地	12305.55	10775.96	9851.73	-1529.59	-924.23	-2453.82
水域	2802.02	3011.76	3189.79	209.74	178.03	387.77
建设用地	3048.56	5073.70	7076.45	2025.14	2002.75	4027.89
未利用地	125.04	210.14	198.58	85.09	-11.56	73.53

表 4 土地利用转移矩阵

km<sup>2</sup>

2000 年	2018 年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	水域
耕地	107909.80	4281.61	834.62	507.63	4065.15	8.54
林地	4253.21	43909.72	602.67	105.56	269.76	87.03
草地	1309.16	2462.46	8383.05	54.15	87.53	9.20
水域	238.25	32.68	8.26	2466.23	53.82	2.78
建设用地	351.10	38.92	21.15	38.12	2599.09	0.18
未利用地	5.59	7.42	1.99	18.09	1.10	90.85
合计	114067.10	50732.80	9851.73	3189.79	7076.45	198.58

### 3.2 生态系统服务价值分析

3.2.1 生态系统服务价值估算及空间分布 2000—2018 年,成渝城市群生态系统服务总价值由 5 064.6 亿元下降到 5 061.27 亿元,变化量为 3.33 亿元。各土地利用类型 ESV 从高到低依次为林地>耕地>草地>水域>未利用地>建设用地(表 5)。耕地、草地 ESV 在 2000—2010 年变化显著,且均呈现下降趋势,其中,耕地、草地 ESV 各下降了 30.54 亿元、32.79 亿元,而林地 ESV 增加了 50.79 亿元,这是由于退耕还林以及禁牧政策实施起到了非常大的作用,使得成渝城市群林地面积增加的同时 ESV 显著提升。2010—2020 各地类 ESV 的变化情况与前 10 a 相似,耕地、草地 ESV 呈现下降趋势,林地 ESV 呈现上升趋势。从各单项态系统服务价值来看,ESV 排序由高到低依次为:调节服务>支持服务>供给服务>文化服务(表 6),其中供给服务以及支持服务 ESV 呈现下降趋势,耕地以及草地面积的下降使得供给服务能力有所损耗,同时调节服务是成渝城市群首要生态系统服务功能,占 4 类生态系统服务功能的价值量 50%以上。2000—2018 年调节服务 ESV 总体呈现上升趋势,升值达 9.46 亿元,调节服务 ESV 的上升与林地面积增大息息相关:由于自 1998 年以来实施的退耕还林工程,大量耕地、草地转为林地,使得林地面积呈现恢复趋势,ESV 整体显著提升。

通过划定 5 km×5 km 格网,并运用自然断点法将不同时间段内 ESV 进行分为低价值、较低价值、中价值、较高价值、高价值 5 类,同时基于 ArcGIS 进行可视化表达。由图 1 可以看出,在空间上成渝城市群

ESV 以成都、重庆两地为核心呈现出由低到高的“圈层式”空间分布特征:ESV 低价值区分布于城镇化水平高、人类活动作用强、建设用地的集中连片的成都、重庆双城及周边地区;而城市郊区因分布大量的耕地农田,自然生态环境相对较好,ESV 呈现中价值分布;再往外过渡至外围边缘地区为林、草地密集分布区,生态环境优质,ESV 呈现较高价值或高价值。此外,在 2000—2018 年 ESV 低价值区在成都、重庆“双核”地区有所扩大,但在重庆市以东的黔江区及周边地区 ESV 呈现逐年增长趋势,这是由于该区域为我国退耕还林工程首批示范区县,之前因煤矿开采使其生态系统遭到破坏,后续以森林生态系统保护建设为重点,着力实施天然林保护、退耕还林还草等工程,使其生态环境得到较大程度的改善,ESV 显著提高。

3.2.2 生态系统服务价值损益分析 基于 2000—2018 年成渝城市群土地利用转移矩阵测算近 20 年间 ESV 损益情况,具体见表 7。大部分耕地转换为林地使得生态系统服务价值损失了 147.43 亿元,此外还有一部分损失来自耕地转为水域,同时草地转为林地损失了 74.40 亿元。ESV 增加部分主要以林地转为耕地最为突出,增加了 146.45 亿元,可以看出成渝城市群近 20 年间退耕还林、还草工程实施到位的同时也有面积相对大的一部分林地、水域因城市经济、人口发展需要转变为耕地、建设用地。ESV 更高的林地、水域被耕地、建设用地取代,成为研究区 ESV 损失的主要原因,今后应该高度重视在城市快速发展下对于生态环境的保护,树立林草地保护意识。

表5 2000—2018年成渝城市群生态系统服务价值及变化

地类	ESV/(亿元·hm <sup>-2</sup> )			2000—2010年	2010—2018年	2000—2018年
	2000年	2010年	2018年	变化量/变化率/%	变化量/变化率/%	变化量/变化率/%
耕地	2024.57	1994.04	1963.63	-30.54/-1.51	-30.41/-1.52	-60.94/-3.01
林地	2542.55	2593.35	2620.28	50.79/2.00	26.93/1.04	77.72/3.06
草地	263.76	230.98	211.17	-32.79/-12.43	-19.81/-8.58	-52.60/-19.94
水域	233.39	250.87	265.69	17.47/7.49	14.83/5.91	32.30/13.84
建设用地	0.00	0.00	0.00	0.00/0.00	0.00/0.00	0.00/0.00
未利用地	0.32	0.54	0.51	0.22/68.05	-0.03/-5.50	0.19/58.81
合计	5064.60	5069.76	5061.27	5.16/0.10	-8.49/-0.17	-3.33/-0.07

表6 2000—2018年成渝城市群各项生态系统服务的价值及变化

服务类型	ESV/(亿元·hm <sup>-2</sup> )			2000—2010年	2010—2018年	2000—2018年
	2000年	2010年	2018年	变化量/变化率/%	变化量/变化率/%	变化量/变化率/%
供给服务	715.02	713.19	709.40	-1.82/-0.26	-3.79/-0.53	-5.62/-0.79
调节服务	2568.37	2576.91	2577.83	8.55/0.33	0.92/0.04	9.46/0.37
支持服务	1507.98	1504.00	1497.06	-3.98/-0.26	-6.94/-0.46	-10.92/-0.72
文化服务	273.24	275.65	276.98	2.42/0.89	1.32/0.48	3.74/1.37

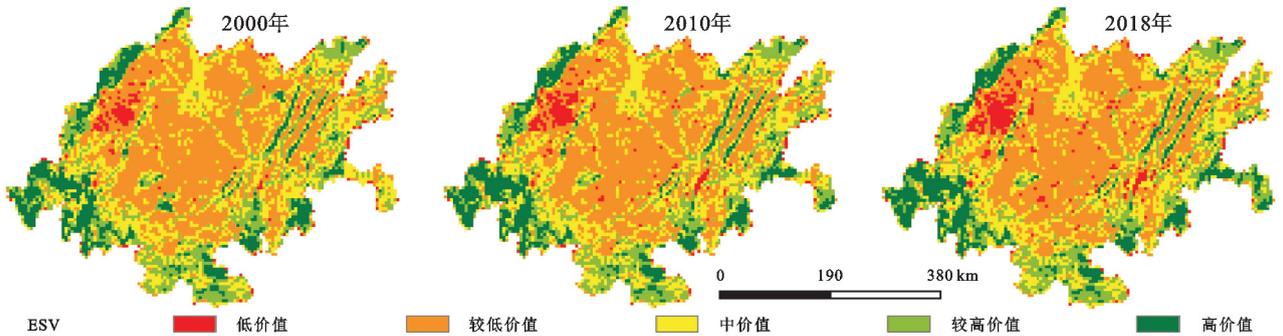


图1 成渝城市群生态系统服务价值空间分布

表7 2000—2018年成渝城市群生态系统服务价值损益情况

2000年	2018年					
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	其他土地
耕地	0.00	-147.43	-3.52	-33.54	69.98	0.13
林地	146.45	0.00	18.21	-3.34	13.93	4.27
草地	5.52	-74.40	0.00	-3.35	1.88	0.17
水域	15.74	1.03	0.51	0.00	4.48	0.22
建设用地	-6.04	-2.01	-0.45	-3.18	0.00	0.00
其他土地	-0.08	-0.36	-0.04	-1.46	0.00	0.00

### 3.3 人类活动强度分析

成渝城市群在研究时段内,人类活动强度(HAI)在空间上呈现“双核圈层模式”分布,高强度区主要分布在经济发达,人口密集的成都、重庆“双核地区”,较高强度以及中强度区围绕“双核地区”集中分布于中部平原地区,城市外围地区则以较低强度、低强度区为主,空间变化显著。从时间变化趋势上来看,2000年以来高强度区域在“双核地区”面积增大,城市化快速推进过程中土地利用转变加剧等人类活动影响使其增加迅速,而在成都市以北的城市边缘地区,人类

活动强度较小,总体以低强度为主。城镇化的迅速发展导致城市群核心区人类活动强度集聚,结合图1,图2可知成渝城市群 HAI 与 ESV 在空间上存在一定相关性。

### 3.4 人类活动强度和生态系统服务价值空间相关性分析

3.4.1 双变量空间相关性分析 利用 SPSS 软件对 ESV 和 HAI 进行 K-S( Kolmogorov-Smirnov)正态性检验,同时采用 Spearman 相关分析确定两变量之间的相关关系。2000年、2010年、2018年二者相关系数为-0.867, -0.878, -0.889,均呈极显著负相关关系,说明当人类活动强度减弱时,生态系统服务价值随之增加。

为进一步验证成渝城市群 ESV 与 HAI 的关联性,依托双变量空间自相关模型采用 Geoda1.1.14 空间分析工具,建立空间权重矩阵,计算二者的双变量空间自相关指数,由图3可知,2000年、2010年、2018年二者的双变量空间自相关指数分别为-0.677, -0.692, -0.703,进一步说明其存在较为明显的空间负相关关系,且这种负相关关系在研究时间期内随时间推进呈现增加的变化趋势逐渐增强。

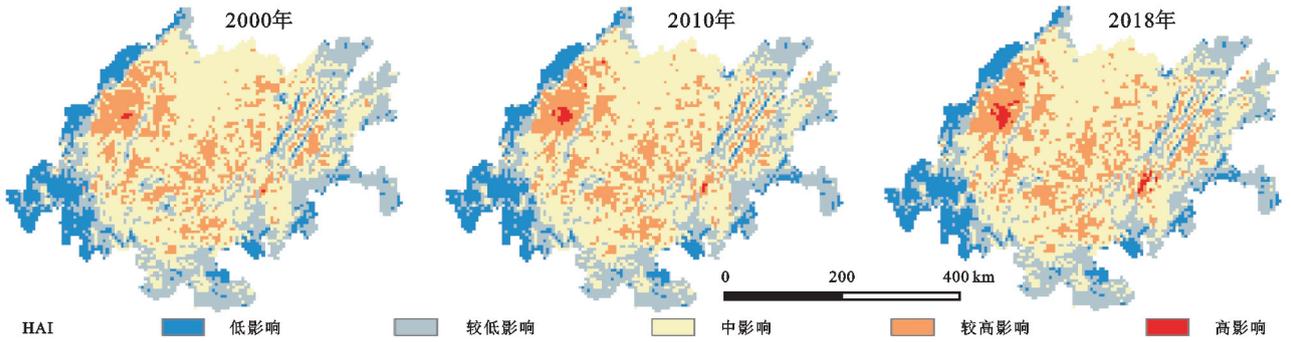


图 2 成渝城市群人类活动强度空间分布

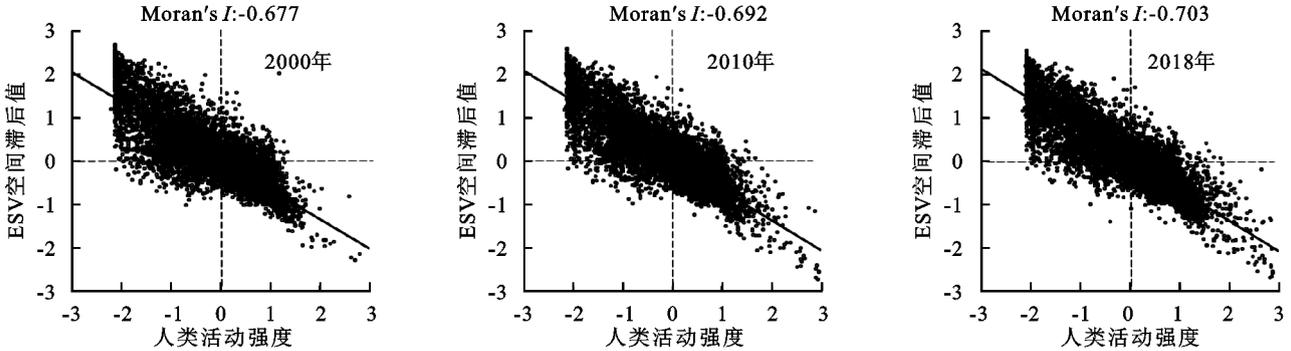


图 3 成渝城市群生态系统服务价值与人类活动强度 Moran 散点

在  $z$  检验的基础上 ( $p=0.05$ ) 绘制双变量局部空间自相关 LISA 聚集图。由图 4 可知,成渝城市群 ESV 和 HAI 在局部空间聚集形态上以高活动—低服务型区域和低活动—高服务型区域为主,低活动—低服务型区域以及高活动—高服务型区域零星分布。高活动—低服务型区域主要分布在研究区中部地形较为平坦、城镇化集中发展的区域,而城市群外围林、

草地密集区域则大多为低活动—高服务型区域。从现实情况分析,这与成渝城市群“双城”经济发展中心相对吻合,人类活动对生态系统干扰强度显著增加,由于生态用地保护机制欠缺而建设用地扩张迅速,阻碍了生态系统功能的发挥,从而 ESV 降低,而外围地区自然环境较优,且地势相对较高,受人类活动干扰程度较小。

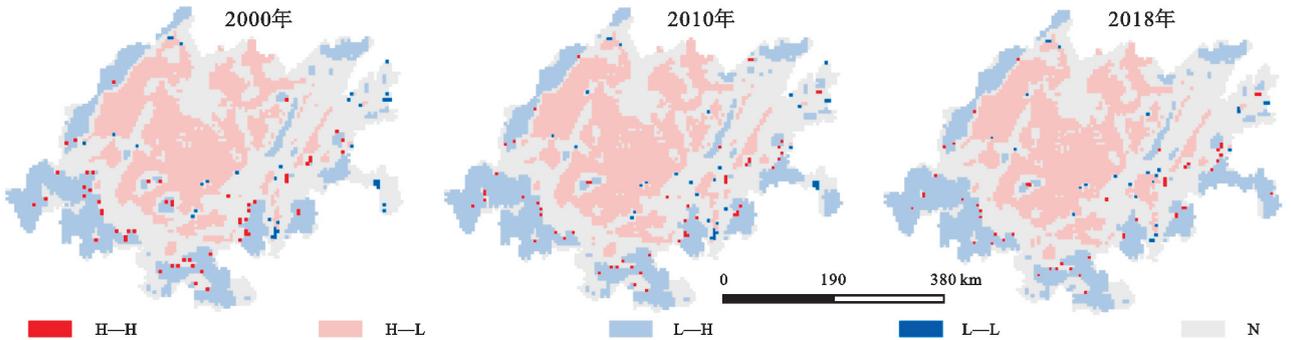


图 4 成渝城市群人类活动强度与生态系统服务价值 LISA 聚类

3.4.2 人类活动强度对生态系统服务价值影响的空间分异特征 为揭示 ESV 与 HAI 二者相互影响作用机制,分别运用 OLS(普通最小二乘法)、GWR, MGWR 这 3 种空间回归模型对比成渝城市群 HAI 对 ESV 空间格局影响程度(表 8),运用 3 种不同模型对比结果显示:MGWR 相较于 OLS 以及 GWR 的  $R^2$  更高,同时 AICc 更低,表明引入的 MGWR 取得了更接近于真实值的拟合效果,拥有更佳的解释力效果,总体来看模型构建较好。

从时间变化来看,2000—2018 年成渝城市群 HAI 对 ESV 整体回归系数由  $-0.848$  逐渐下降到  $-0.876$ ,具有显著负向效应,绝对值增大,影响程度不断增强。2000 年在遂宁市、广安市、南充市以及重庆市北部交汇地区负向关系影响剧烈且呈团块化空间分布,该区域以耕地为主要地类,林、草地密集穿插分布,由于人类活动增强以及城镇化建设的需要使得本底脆弱的大量林、草地区域慢慢转化为耕地或建设用地,而建设用地的增加以及耕地扩张使得该地区

ESV 受 HAI 增强而减少加剧,至 2018 年快速城镇化发展时期,耕地、建设用地的布局已形成较为稳定态势使得该区域内部收缩加剧逐渐形成破碎化分布

特征,即在阆中市、盐亭县、射洪县、船山区以及西充县和蓬溪县交界处回归系数绝对值降低,影响程度减弱(图 5)。

表 8 2000—2018 年成渝城市群人类活动强度指数对生态系统服务价值影响回归模型结果对比

参数	2000 年			2010 年			2018 年		
	OLS	GWR	MGWR	OLS	GWR	MGWR	OLS	GWR	MGWR
Residual Squares	2109.75	1007.17	936.78	1905.84	988.98	922.03	1745.93	949.39	885.60
Sigma	0.28	0.38	0.37	0.25	0.38	0.37	0.23	0.37	0.36
AICc	11771.87	7648.86	7235.89	11010.54	7517.97	7119.55	10354.17	7213.08	6818.30
$R^2$	0.72	0.87	0.88	0.75	0.87	0.88	0.77	0.87	0.88
Adjusted $R^2$	0.72	0.85	0.86	0.75	0.86	0.86	0.77	0.86	0.87
$p$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

从地理空间分布看,HAI 对 ESV 影响的空间差异较大,总体回归系数值绝对值呈现出中间高边缘低的分布特征。成渝城市群中部大面积地区由于城镇化进程发展需要,HAI 对 ESV 影响程度高,而在研究区西北大部分地区回归系数变化稳定,该区域大面积属川滇生态屏障区一线,林、草地密集分布,地势地形复杂多样,受 HAI 影响较弱,加之对于生态屏障区

绿色保护的重视使得该区域 ESV 受 HAI 影响程度呈稳定态势。同时在研究区东南角的重庆市黔江区及周围地区 HAI 与 ESV 回归系数绝对值逐渐增大,对该区域而言因 HAI 减弱而 ESV 增加的负向效应增强。这与上文所提到的黔江区退耕还林还草措施实施到位,植被增加以及人们生态保护意识的加强使得该地区使得生态系统得以恢复相吻合(图 5)。

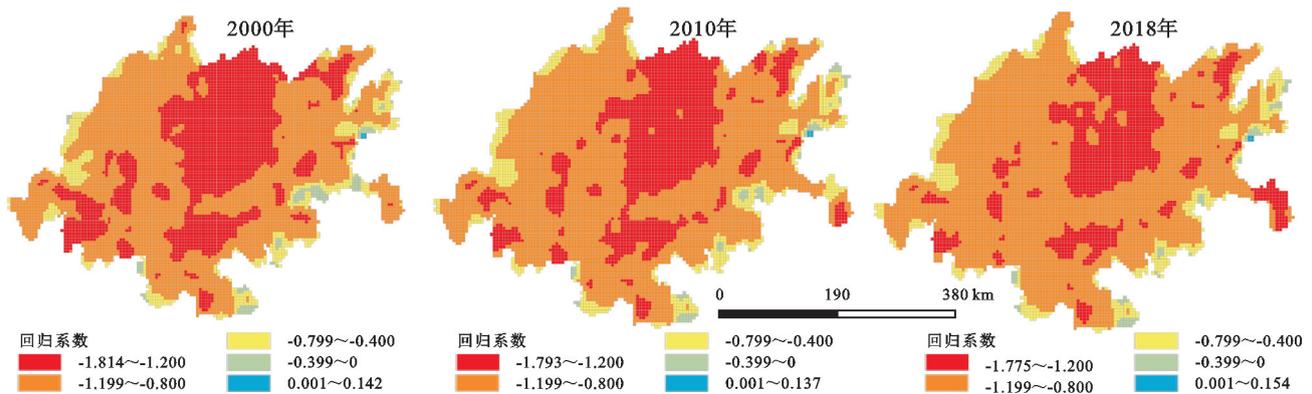


图 5 人类活动强度对成渝城市群生态系统服务价值空间分异格局

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 鉴于城市发展进程加快导致 HAI 和 ESV 负相关程度加剧。成渝城市群在研究时间段内以高活动—低服务型和低活动—高服务型区域占比较高,未来可着重对于不同类型区域精准实施管理调控,高活动—低服务型区域应注重在经济建设过程中应强化环境保护意识,实施可持续发展战略,完善生态文明领域统筹协调机制,推动经济社会发展全面绿色转型;对于低活动—高服务型区域应继续以生态保护为首要任务,遵循科学规划、生态优先、严格保护的原则,实施生态环境共保联治,同时应注重对生态屏障区的保护,加强生态资金支持力度,筑牢长江上游安全屏障,维护城市群生态安全。

(2) 退耕还林还草工程实施对成渝城市群水生

生态系统服务价值整体提升具有一定效果。从黔江区可以看出,由于退耕还林工程设施的实施到位以及人们环境保护意识的提升,人类活动负向影响强度的减弱使得该区 ESV 得到明显提升。未来成渝城市群应在经济发展建设中注重生态环境的修复,保护生态环境的连通性和完整性,减少因人类活动对城市群生态环境的损害,将城市群经济发展与环境保护的目标统合起来,同时把生态优化放在更为突出的位置上,继续推进退耕还林保护工程实施,共筑美丽中国。

(3) 随着人类活动强度增强,生态系统服务价值在“双核地区”降低范围不断扩大,成渝城市群正处在一个由双核聚集向网络化演变的中心过渡地带,极化效益与扩散效益并存,因此在此发展阶段,聚焦“双城”、“双核”,思考其因人类活动强度对于区域绿色发展格局产生的影响,对后续城市群可持续发展而言意义重大。

(4) 人类活动强度以土地利用变化为主要表征

形式对生态系统服务价值损益情况影响突出,但如何更准确评估二者之间的内在关系和影响机理有待进一步探究,未来也可细分小区域研究可适当调整研究方法以反映地区实际情况。

#### 4.2 结论

(1) 成渝城市群土地类型以耕地和林地为主要类型,2000—2018 年土地利用变化以耕地转为建设用地、林地最为突出,城市化进程加快的过程中退耕还林还草工作显著,但仍有一部分林地因经济需要转化为耕地。

(2) 从生态系统服务价值来看,2000—2018 年成渝城市群生态系统服务价值总量下降明显,其中耕地下降最为突出;在空间分布上“双核地区”生态系统服务价值呈现低值分布,高值区则多分布于成渝城市群边缘林地、草地较为富集的地区,近年来黔江区因退耕还林还草工程实施到位,生态系统服务价值总体呈现出增加趋势。

(3) 从人类活动强度来看,2000—2018 年成渝城市群人类活动强度呈现出“边缘低中间高”的分布态势,以“双核地区”人类活动强度最大,中部平原地区因耕地种植,受人类活动影响较强,边缘大部分地区生态环境良好,人类活动强度较弱,在空间分布来看人类活动强度与生态系统服务价值存在一定的负向关联性。

(4) 2000—2018 年,成渝城市群人类活动强度与生态系统服务价值之间存在显著的影响作用,二者回归系数上存在明显负向效应且程度加剧,其中成渝城市群中部地区负向效应严重,但部分地区已达城市发展稳定形态,内部收缩加剧呈现破碎化特征。

#### 参考文献:

- [1] Li S, Wu J, Gong J, et al. Human footprint in Tibet: Assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621:18-29.
- [2] 方创琳. 改革开放 40 年来中国城镇化与城市群取得的重要进展与展望[J]. *经济地理*, 2018, 38(9):1-9.
- [3] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. *地理研究*, 2019, 38(9):2173-2187.
- [4] 徐勇, 孙晓一, 汤青. 陆地表层人类活动强度: 概念、方法及应用[J]. *地理学报*, 2015, 70(7):1068-1079.
- [5] 曾辉, 郭庆华, 喻红. 东莞市凤岗镇景观人工改造活动的空间分析[J]. *生态学报*, 1999, 19(3):298-303.
- [6] Costanza R, d'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Nature*, 1997, 387(6630):253-260.
- [7] Small N, Munday M, Durance I. The challenge of valuing ecosystem services that have no material benefits[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 44:57-67.
- [8] Reid W V, Mooney H A, Cropper A, et al. Ecosystems and human well-being-Synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment[M]. Washington DC: Island Press, 2005.
- [9] 张彩霞, 谢高地, 杨勤科, 等. 人类活动对生态系统服务价值的影响: 以纸坊沟流域为例[J]. *资源科学*, 2008, 30(12):1910-1915.
- [10] 陈浮, 葛小平, 陈刚, 等. 城市边缘区景观变化与人为影响的空间分异研究[J]. *地理科学*, 2001, 21(3):210-216.
- [11] 郭少壮, 白红英, 孟清, 等. 1980—2015 年秦岭地区景观格局变化及其对人为干扰的响应[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(12):4080-4088.
- [12] 朱纹君, 韩美, 孔祥伦, 等. 1990—2018 年黄河三角洲人类活动强度时空格局演变及其驱动因素[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5):287-292.
- [13] 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.
- [14] Burkhard B, Petrosillo I, Costanza R. Ecosystem services-bridging ecology, economy and social sciences[J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(3):257-259.
- [15] 贾艳艳, 唐晓岚, 张卓然. 长江中下游流域自然保护地空间分布及其与人类活动强度关系研究[J]. *世界地理研究*, 2020, 29(4):845-855.
- [16] 李海萍, 王娜萍, 代宇庭. 云贵高原湿地景区人类活动强度的空间分布: 以云南省拉市海流域为例[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(8):2915-2922.
- [17] 温小洁, 姚顺波. 黄河中上游植被覆盖与人类活动强度的时空动态演化[J]. *福建农林大学学报: 自然科学版*, 2018, 47(5):607-614.
- [18] 南箔, 杨子寒, 毕旭, 等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析: 以长江中游华阳河湖群地区为例[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9):3531-3541.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhao J, Chen S, Jiang B, et al. Temporal trend of green space coverage in China and its relationship with urbanization over the last two decades[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442:455-465.
- [22] 曾鹏, 朱玉鑫. 中国十大城市群生态发展状况比较研究[J]. *地域研究与开发*, 2013, 32(1):45-51.
- [23] Yang Y, Liu Y, Li Y, et al. Measure of Urban-rural

- Transformation in Beijing-tianjin-hebei Region in the New Millennium: Population-land-industry Perspective [J]. *Land Use Policy*, 2018, 79:595-608.
- [24] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 成渝城市群发展规划[EB/OL]. (2016-05-04) [2020-12-07]. [https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/ghs/sjdt/201605/t20160504\\_1170022.html](https://www.ndrc.gov.cn/fzggw/jgsj/ghs/sjdt/201605/t20160504_1170022.html).
- [25] 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.
- [26] 谢高地, 肖玉, 甄霖, 等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. *中国生态农业学报*, 2005, 13(3): 10-13.
- [27] 荣益, 李超, 许策, 等. 城镇化过程中生态系统服务价值变化及人类活动影响的空间分异: 以黄骅市为例[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(5): 1374-1381.
- [28] 梁发超, 刘黎明. 景观格局的人类干扰强度定量分析与生态功能区优化初探: 以福建省闽清县为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(6): 1138-1144.
- [29] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 等. 1990—2011年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力[J]. *生态学报*, 2014, 34(20): 5962-5973.
- [30] 高彬, 李琛, 吴映梅, 等. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [31] 周婷, 陈万旭, 李江风, 等. 神农架林区人类活动与生境质量的空间关系[J]. *生态学报*, 2021, 41(15): 6134-6145.
- [32] 乔斌, 祝存兄, 曹晓云, 等. 格网尺度下青海玛多县土地利用及生态系统服务价值空间自相关分析[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1660-1672.
- [33] 王俊秀, 牟风云, 田甜, 等. 成渝城市群黑碳气溶胶的时空分异特征及其对土地利用/土地覆被变化(LUCC)的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6): 724-732.
- [34] 张宏锋, 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务功能的空间尺度特征[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(9): 1432-1437.
- [35] 沈体雁, 于瀚辰, 周麟, 等. 北京市二手住宅价格影响机制: 基于多尺度地理加权回归模型(MGWR)的研究[J]. *经济地理*, 2020, 40(3): 75-83.
- [36] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 等. 1976年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应[J]. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.

(上接第172页)

- [38] Tian M, Zhou J, Jia B, et al. Impact of three gorges reservoir water impoundment on vegetation-climate response relationship[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2860.
- [39] Zhang P, Cai Y, Yang W, et al. Contributions of climatic and anthropogenic drivers to vegetation dynamics indicated by NDVI in a large dam-reservoir-river system[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 256: 120477.
- [40] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1951, 116(1): 770-799.
- [41] Wang Y Z, Li B, Wang R Q, et al. Application of the Hurst exponent in ecology[J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011, 61(8): 2129-2131.
- [42] Barunik J, Kristoufek L. On Hurst exponent estimation under heavy-tailed distributions[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2010, 389(18): 3844-3855.
- [43] 聂勇, 刘林山, 张懿铨, 等. 1982—2009年珠穆朗玛峰自然保护区植被指数变化[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 895-903.
- [44] 马飞, 李景吉, 彭培好, 等. 珠穆朗玛峰自然保护区南北坡植被覆盖变化[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1427-1432.
- [45] 何航, 张勃, 侯启, 等. 1982—2015年中国北方归一化植被指数(NDVI)变化特征及对气候变化的响应[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 70-80.
- [46] Chu H, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2051-2062.
- [47] 高江波, 焦珂伟, 吴绍洪. 1982—2013年中国植被NDVI空间异质性的气候影响分析[J]. *地理学报*, 2019, 74(3): 534-543.
- [48] Zhao X, Tan K, Zhao S, et al. Changing climate affects vegetation growth in the arid region of the northwestern China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2011, 75(10): 946-952.
- [49] 杜加强, 贾尔恒·阿哈提, 赵晨曦, 等. 1982—2012年新疆植被NDVI的动态变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(012): 3567-3578.
- [50] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 599: 967-980.
- [51] 阚媛珂, 王绪本, 高志勇, 等. 2000—2007年珠峰自然保护区植被时空变化与驱动因子[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(6): 1261-1271.