

政策驱动下孙水河流域生态系统服务价值变化

贾 丹^{1,3,4}, 覃发超^{2,3,4*}

(1. 西华师范大学 生命科学学院, 四川 南充 637009; 2. 西华师范大学 地理科学学院, 四川 南充 637009;

3. 西华师范大学 四川省干旱河谷土壤侵蚀监测与控制工程实验室, 四川 南充 637009;

4. 大小凉山干旱河谷土壤侵蚀监测与生态修复野外科学观测研究站, 四川 喜德 616753)

摘 要:为探究政策对区域生态系统服务价值及可持续发展的影响,基于四川省凉山州孙水河流域1990—2020年土地利用遥感解译数据,利用土地利用动态度研究孙水河流域土地利用类型变化程度,利用当量因子法、热点分析法探究孙水河流域生态系统服务价值时空变化特征,并利用地理探测器分析其驱动因素。结果表明,1)1990—2020年孙水河流域土地利用类型以林地为主,土地利用类型之间转换剧烈;2)从时间尺度看,1990—2020年孙水河流域生态系统服务价值累计增长2.55亿元,增长率6.4%,调节服务功能起到了关键作用;3)空间尺度上,有2/3的乡镇生态系统服务价值均增加,分布在流域中部及西北部,变化热点区位于北部光明镇和冕山镇;4)孙水河流域生态系统服务价值的空间分异主要受社会经济因素影响,尤其是人为干扰因素,而退耕还林、脱贫攻坚等政策的实施会深刻影响人为干扰指数、人口密度及地均GDP等社会经济因素,因此政策成为生态系统服务价值空间分异的重要驱动力。研究结果对于地方政府制定生态环境保护政策具有参考价值。

关键词:生态系统服务价值;时空变化;政策驱动;孙水河流域

中图分类号:F307.2

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2022)06-0258-08

Changes of Ecosystem Service Value Under Policy-Driven in Sunshui River Basin

JIA Dan^{1,3,4}, QIN Fa-chao^{2,3,4*}

(1. College of Life Science, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

2. College of Geographical Science, China West Normal University, Nanchong 637009, Sichuan, China;

3. Sichuan Provincial Engineering Laboratory of Monitoring and Control for Soil Erosion on Dry Valleys, Nanchong 637009, Sichuan, China;

4. Liangshan Soil Erosion and Ecological Restoration in Dry Valleys Observation and Research Station, Xide 616753, Sichuan, China)

Abstract: In order to understand the impacts of the government policy on regional ecosystem service value (ESV) and sustainable development, based on the land use data of Sunshui River Basin from 1990 to 2020, using the land use change degree, this paper explored the change between land-use types, and used the equivalent factor method, hot spot analysis and geographical detector to explore the spatiotemporal evolution and heterogeneity of ESV in the basin. The results showed that 1) during 1990—2020, the major land use pattern in the basin was woodland, and the land use structure changed significantly. 2) From the perspective of spatiotemporal scale, the ESV of the basin increased by 255 million yuan RMB in 30 years, increased by 6.4%, contributing a prominent regulation on function and service. 3) From spatial scale, the ESV at the township level changed obviously, and over two-thirds townships in the basin showed a rising trend, which were located in the middle and northwest of the basin. 4) The spatial differentiation of ESV in the basin was influenced by social and economic factors, among which the human disturbance factor had the

收稿日期:2022-01-18 修回日期:2022-05-24

基金项目:四川省自然资源科研项目(KJ-2022-13);西华师范大学科研创新团队项目(KCXTD2022-1);四川省科技厅重点研发项目(2018SZ0337)。

第一作者:贾 丹。研究方向:水土保持与生态修复。E-mail:jd nice@126.com

* 通信作者:覃发超,博士,教授。研究方向:GIS生态应用。E-mail:arcqfc@163.com

greatest impact on the spatial differentiation of ecosystem service. The implementations of the government policies, including "converting farmland to forest and grassland", "poverty alleviation" greatly influenced the social and economic factors such as human disturbance, per capita GDP and population density, which promoted the spatial differentiation of ESV. Our work may provide a theoretical basis for the precise and diversified regulation of ecosystem functions in Sunshui River Basin.

Key words: ecosystem service value; spatial-temporal evolution; policy-driven; Sunshui River Basin

生态系统服务指人类从生态系统中获得的各种惠益^[1],与土地利用类型密切相关^[2-3]。量化和评估生态系统服务功能,利于土地资源的高效调控以及生态补偿政策的科学制定^[4-5]。生态系统服务价值(ecosystem services value,ESV)的提出推进了不同区域的生态系统服务的评估工作^[6],R Costanza等^[7]首先进行了全球ESV评估,实现了ESV的货币表达。谢高地等^[8-9]于2003在研究青藏高原生态价值时提出了“单位面积生态系统服务价值当量表”,并于2015年进行补充和修订,被广泛应用于ESV估算。各国研究人员不断梳理生态系统服务与其影响因素之间的关系,将生ESV、土地利用变化、生态环境发展趋势等有机融合在一起^[10-11]。目前,关于ESV的研究主要聚焦于服务功能分类及价值评估^[12]、时空变化及影响因素3个方面。具体而言,从研究内容上看,主要集中于ESV的理论研究^[13]、时空动态变化及其驱动力^[14]3个方面;从研究尺度上看,行政区^[15]、流域^[16]、格网单元^[17]等尺度均有涉及;从研究对象上看,研究区域多集中在湿地^[18]等ESV高值区域及沙漠^[19]等生态脆弱区;从研究方法上看,统计分析和空间分析应用较广,同时InVEST^[20]、地理探测器^[14]等模型在评估ESV和探究其驱动因素等方面应用越来越广泛;就研究结果而言,ESV空间相关性逐渐变强,生态政策^[21]和人类活动对ESV的影响较大。近年来,关于ESV的研究仍以“热点区”和“脆弱区”为主,小尺度上的研究相对薄弱,且缺乏对区域生态发展与社会政策关系的进一步探讨。

孙水河流域位于我国四川省凉山彝族自治州境内,是长江上游重要的生态屏障,区域集山区、水域、水土流失严重区于一体,同时贫困人口分布广、少数民族聚集多。1999年凉山州作为退耕还林工程的试点并顺利实施以来,孙水河流域生态效益得到明显改善;孙水河流域隶属于乌蒙山集中连片特困区,是《中国农村扶贫开发纲要(2011—2020年)》规划的11个集中连片特困区之一,2013年2月该地区脱贫攻坚政策正式进入实施阶段^[22],自此孙水河流域土地利用结构、生产生活方式不断改进,生态效益和社会效益显著提高。本研究目的在于分析孙水河

流域ESV的时空变化特征,揭示其变化的驱动因素,探究政策因素对ESV的影响。研究结果可为孙水河流域生态系统的良性发展提供理论依据,对实现脱贫攻坚与生态环境保护的有机结合有重要意义。

1 研究区概况

孙水河流域位于四川省凉山彝族自治州境内,雅砻江二级支流(图1)。河流全长95.2 km,流域面积1 617.5 km²,源于昭觉县解放沟镇,河道由南向西北进,在喜德县境内的流长达70.2 km,最后在冕宁县泸沽镇汇入安宁河。该河中、上游汇积区水土流失严重,洪期河水呈高浓度的悬浊流,水土流失严重,生态环境脆弱。

2 数据与方法

2.1 数据来源

孙水河流域范围利用DEM提取,DEM数据来源于NASA(<https://earthdata.nasa.gov/esds/>),分辨率为5 m,提取方法采用ArcGIS 10.5水文分析工具。行政边界矢量数据来源于国家基础地理信息中心(<https://www.webmap.cn/>)。由遥感信息处理研究所(<http://irsip.whu.edu.cn/>)获取1990、1995、2000、2005、2010、2015、2020年7期土地利用遥感解译数据,分辨率为30 m,结合谢高地等^[23]对中国陆地生态系统服务的划分,将孙水河流域土地利用划分为6个类型:林地和灌木归并为林地、草地-草地、耕地-耕地、城镇-城镇、水域和湿地归并为水域、裸地-裸地。

驱动因素的探究根据已有研究结果^[24]主要考虑自然和社会经济因素,结合研究区实际情况选取自然因素6个:气温、降水、高程、坡度、植被覆盖度和土壤侵蚀指数;社会经济因素4个:人口密度、地均GDP、人为干扰指数和土地利用程度。其中,坡度和高程利用DEM提取;土地利用程度^[25]、人为干扰指数^[26]依据相关研究计算;气温、降水、土壤侵蚀、植被覆盖度、人口密度和地均GDP数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)。

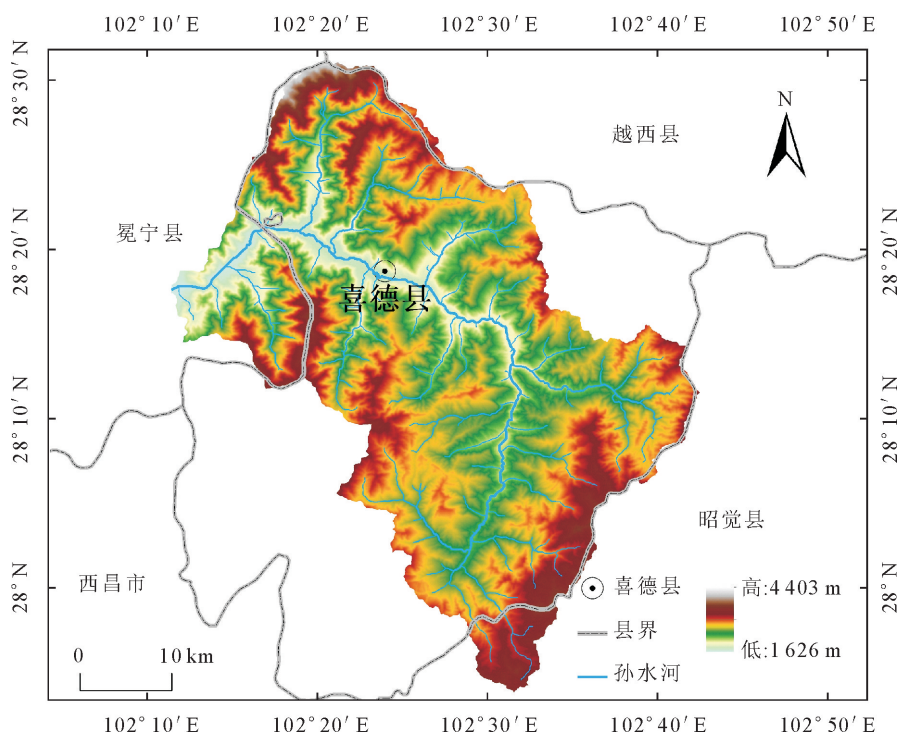


图1 研究区概况

Fig.1 Map of the research area

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用动态度 土地利用类型的变化速度可以借助土地利用动态度衡量^[27]。本研究利用土地利用动态度分析孙水河流域6大土地利用类型的变化速度及转换特征。模型表达式为

$$C = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta U_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n U_i} \right) \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C 代表土地利用动态度, U_i 代表孙水河流域某种土地利用类型面积; ΔU_{i-j} 表示在对应时段内, 孙水河流域的 i 种土地利用类型转化为 j 种的面积; T 为研究时长(a)。

2.2.2 生态系统服务价值计算 通过查阅《四川省统计年鉴》和《中国农产品价格调查年鉴》, 计算出孙水河流域1990—2020年粮食单产为 $4\,257.42 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 单价为2.88元/kg, 并根据“单位当量因子价值量为粮食单价的1/7”修正^[9], 计算出孙水河流域单位当量因子价值为1751.62元, 经过计算得出孙水河流域单位面积ESV(公式中用 E_{SV} 表示)系数(表1)。各土地利用类型及各项生态系统服务功能的价值计算公式如下

$$E_{\text{SV}} = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_i) \quad (2)$$

$$E_{\text{SV}_f} = \sum_{i=1}^n (A_i \times C_{fi})$$

式中: A_i 和 C_i 表示孙水河流域 i 种土地利用类型

面积(hm^2)及ESV系数(元· hm^{-2} · a^{-1}); C_{fi} 表示第孙水河流域 i 类土地利用类型的第 f 项生态服务功能的ESV系数(元· hm^{-2} · a^{-1})。

2.2.3 热点分析 热点分析已广泛应用于ESV空间变化研究^[28], 冷、热点可以表征ESV变化量高值和低值的空间聚集情况, 本研究通过ArcGIS 10.5软件中Getis-Ord G_i^* 指数对孙水河流域ESV变化量热点进行识别。Getis-Ord G_i^* 指数公式为:

$$G_i^* = \frac{\sum_b W_{ab}(d) S_a}{\sum_b S_b} \quad (3)$$

$$Z(G_i^*) = \frac{G_i^* - E(G_i^*)}{\sqrt{V_{\text{ar}}(G_i^*)}}$$

式中: G_i^* 为斑块 i 的集聚指数, $Z(G_i^*)$ 为 G_i^* 的数学期望, W_{ab} 表示要素 a 、要素 b 之间的空间权重, $V_{\text{ar}}(G_i^*)$ 表示 G_i^* 值的方差。本研究将ESV变化热点与冷点划分为热点区、次热点区、不显著变化区、次冷点区和冷点区, 对应的 $Z(G_i^*)$ 取值范围分别为 ≥ 1.96 、 $[1.65, 1.96)$ 、 $(-1.65, 1.65)$ 、 $(-1.96, -1.65]$ 、 ≤ -1.96 。

2.2.4 地理探测器模型 孙水河流域ESV的影响因素探究采用地理探测器工具, 地理探测器是基于空间分层异质性识别主导影响因子的一种统计学新方法^[29]。本研究采用分异及因子探测器对孙水河流域ESV的影响因子进行探测。公式为^[30]:

$$q=1-\frac{1}{N\sigma^2}\sum_{n=1}^LN_h\sigma_h^2\tag{4}$$

式中: q 为衡量自变量 X (自然、社会经济因素) 对因变量 Y (ESV) 的空间分异解释力的统计量, 值域为 $[0,1]$, q 越接近 1, 表明相自变量 X 对因变量 Y 的

空间分布影响力越大; L 表示孙水河流域乡镇行政单元个数; N 和 N_h 分别为孙水河流域全部样本数和 h 乡镇的样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别为孙水河流域和 h 乡镇的离散方差。

表 1 孙水河流域单位面积生态系统服务价值
Table 1 Unit area ecosystem service value in Sunshui River Basin 元·hm⁻²·a⁻¹

一级类型	二级类型	农田	林地	草地	城镇	裸地	水域	总计
供给服务	食物生产	1 936	442	409	0	0	1 401	4 188
	原料生产	429	1 016	601	0	0	403	2 449
	水资源供给	−2 286	525	333	0	0	14 521	13 093
调节服务	气体调节	1 559	3 341	2 114	0	35	1 349	8 398
	气候调节	815	9 997	5 588	0	0	4 011	20 411
	净化环境	236	2 930	1 845	0	175	9 722	14 908
	水文调节	2 619	6 542	4 093	0	53	179 086	192 392
支持服务	土壤保持	911	4 068	2 575	0	35	1 629	9 218
	维持养分循环	272	311	199	0	0	123	904
	生物多样性	298	3 705	2 341	0	35	4 467	10 845
文化服务	美学景观	131	1 625	1 033	81	18	3 311	6 198
总计		6 919	34 503	21 130	81	350	220 021	283 004

3 结果与分析

3.1 孙水河流域土地利用类型动态变化

林地、草地、耕地、城镇、水域和裸地为孙水河流域 6 大土地利用类型, 其中林地占据主导地位, 30 a 比重由 49.1% 持续上升至 56.1%, 其次为草地和耕地, 城镇、水域和裸地所占面积比重较小。土地利用动态评估结果表明 (表 2), 1990—2020 年林地面积持续上升; 草地面积变化趋势与林地相反, 2005 年后下降幅度逐渐变大; 受退耕还林政策影响, 耕地面积持续下降; 城镇面积随着城镇化的快速发展而增加, 2010 年后增速放缓; 水域和裸地面积在人类活动干扰下持续减少。总体来看, 孙水河流域土地利用综合动态度在 1990—2015 年波动上升; 而在 2015—2020 年土地利用综合动态度达到最大值, 林地面积的增幅、草地和耕地面积的降幅均较大, 这一

时段内土地利用最为活跃。

3.2 孙水河流域 ESV 时空变化

3.2.1 孙水河流域 ESV 时间变化 1990—2020 年孙水河流域 ESV 不断增长, 累计增加 2.55 亿元, 增长率为 6.4% (图 2)。其增幅在 1995—2005 年和 2015—2020 年 2 个时间段较大, 与退耕还林政策和脱贫攻坚政策实施期吻合。退耕还林政策实施造成的林地面积扩大和耕地面积缩减利于 ESV 快速增长; 脱贫攻坚政策造成的生产生活方式的改进、土地利用结构的优化也会促进 ESV 增长, 表明政策对 ESV 的影响不可忽视。

在 4 大服务功能中, 调节服务最为突出, 占总价值的 62% 以上, 累计增长 1.64 亿元, 流域总价值与调节服务的变化趋势基本一致; 其次为支持服务, 占总服务价值的 24%, 累计增长 0.61 亿元; 供给服务价值较为稳定; 文化服务价值略微增加。

表 2 1990—2020 年孙水河流域土地利用动态度
Table 2 Dynamic degree of different land use types in Sunshui River Basin from 1990 to 2020

土地利用类型	单一土地利用动态度 (%)					
	1990—1995	1995—2000	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2015—2020
林地	0.182	0.348 1	0.412 7	0.611 3	0.502 9	0.659 3
草地	−0.263	0.263 3	−0.129	−0.716	−0.654	−0.759
耕地	0.041 1	−1.397	−0.982	−0.573	−0.41	−0.843
城镇	4.048 6	6.110 9	3.327 7	4.287 5	0.564	0.263 5
水域	−4.069	−4.675	−2.065	9.945 7	−5.313	−4.856
裸地	−18.7	−5.454	−7.954	−4.15	−10.48	−12
综合动态度	0.101 6	0.262 9	0.213 1	0.323	0.267 7	0.358 7

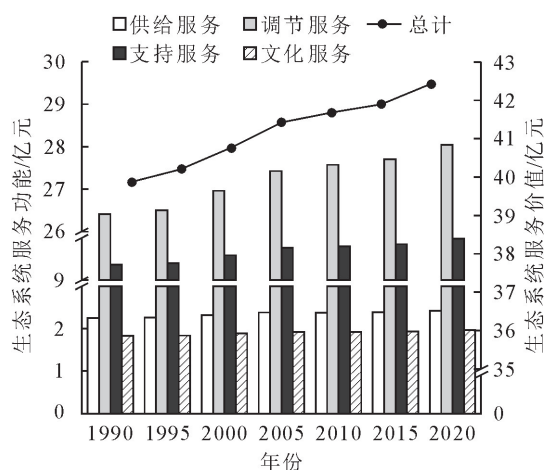


图2 孙水河流域生态系统服务价值动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of ecosystem service value in Sunshui River Basin

3.2.2 孙水河流域 ESV 空间变化 本研究采用单位面积 ESV 来分析孙水河流域内各乡镇 ESV 空间变化(图 3),结果可知,1990—2020 年,孙水河流域 14 个乡镇中有 10 个乡镇 ESV 增长,4 个衰减,其中 3 个乡镇的 ESV 累计上升超过 400 元/hm²,分布于流域中部及西北部,ESV 衰减的乡镇集中于流域中部和东部。

利用 ArcGIS 10.5 将孙水河流域 1990—2020 年 ESV 变化量转化为点要素,探究 ESV 变化量在空间上的局部表现,揭示 ESV 变化冷点和热点的分布状况(图 4)。结果表明,高密度区域主要分布于北部光明镇及流域西北边界,低密度主要分布在西南部的洛哈镇及流域东部边界(图 4a);热点分析表明 ESV 变化的热点区集中在北部光明镇及冕山镇,冷点区分布在南部解放沟镇的局部地区(图 4b)。ESV 的增减变化较为集中,应注重局部地区的生态调控。

3.3 孙水河流域 ESV 变化驱动因素分析

基于孙水河流域 1 km×1 km 格网尺度,采用地理探测器工具探测孙水河流域 ESV 空间分异的主导因素。2020 年各探测因子按 q 统计量的大小排序为人为干扰指数(0.37)>土地利用程度(0.18)>坡度(0.17)>地均 GDP(0.11)>人口密度(0.09)>高程(0.08)>土壤侵蚀(0.005)>植被覆盖度(0.04)>积温(0.0.04)>降雨(0.01)。结果显示造成 ESV 空间分异的主要原因人为干扰;其次土地利用程度、坡度和地均 GDP 的 q 都>10%,为次要原因;而除坡度外的其余 5 个自然因子的 q 统计量均<10%,降水、积温和植被覆盖度甚至<5%,表明自然因素对 ESV 的空间分异影响较小,而社会经济因素发挥重要驱动作用。

从图 5 可以看出,1990—2020 年人为干扰指数

q 统计量呈现出明显的上升趋势,其余探测因子的变化幅度不大。人为干扰指数 q 统计量的上升幅度在 2015—2020 年最大,这一时期,在脱贫攻坚政策的实施下,区域内土地利用结构不断优化、生产生活方式不断改进,ESV 不断增加。表明孙水河流域 ESV 与政策密切相关。

4 结论与讨论

4.1 结论

孙水河流域土地利用类型以林地为主,其次是草地、耕地、城镇、水域和裸地。1990—2020 年土地利用类型之间转换剧烈,林地和城镇面积增幅较大,草地、耕地和水域面积缩减。

孙水河流域 ESV 呈增加态势,且在 2015 年后增幅加大,1990—2020 年累计增加 2.55 亿元,增长率为 6.4%。其中调节服务功能受林地面积持续扩大的影响,累计增加 1.64 亿元,是总价值的主要贡献者;空间上,有 2/3 的乡镇 ESV 均增加,分布于流域中部及西北部,ESV 减少区主要分布在流域东部;价值量变化热点分布在北部的光明镇和冕山镇。

孙水河流域 ESV 的变化和社会政策密切相关。退耕还林政策造成林地面积的不断扩大,对 ESV 的持续增长起到了关键作用;人为干扰因素对 ESV 的空间分异影响最大,并且影响程度逐年上升;人为干扰指数、土地利用程度等社会经济因素在 2015—2020 年对流域 ESV 空间分异的驱动力明显增强,这一时期在脱贫攻坚政策导向下,生产生活方式及经济结构的不断优化深刻影响着土地利用结构,进而驱动 ESV 发生变化。

4.2 讨论

研究结果表明,孙水河流域 ESV 持续增加,这一结果与黄河下游^[14]等地区研究结果不同。黄河下游地区 ESV 持续降低,原因是该地区人口稠密,城镇面积大,耕地面积逐年增加,起关键作用的调节服务价值固然减少,造成 ESV 衰减。孙水河流域土地利用类型以林地为主,其面积的扩大对 ESV 的增加起到了关键性作用,加之受退耕还林政策的影响,耕地面积逐年下降,林地面积持续扩大,益于 ESV 增加;近年来在脱贫攻坚政策的大力支持下,旅游业等环境友好型产业逐步壮大,调节服务和支服务价值上升,造成 ESV 总量持续上升。

林地对孙水河流域 ESV 的维持起到了关键作用,对调节服务功能的增长至关重要,未来发展应注重保持现有林地优势;同时还需进一步完善相关生态政策,针对性进行生态补偿,促进孙水河流域生态环境系统和社会经济系统协调发展。本研究基于乡

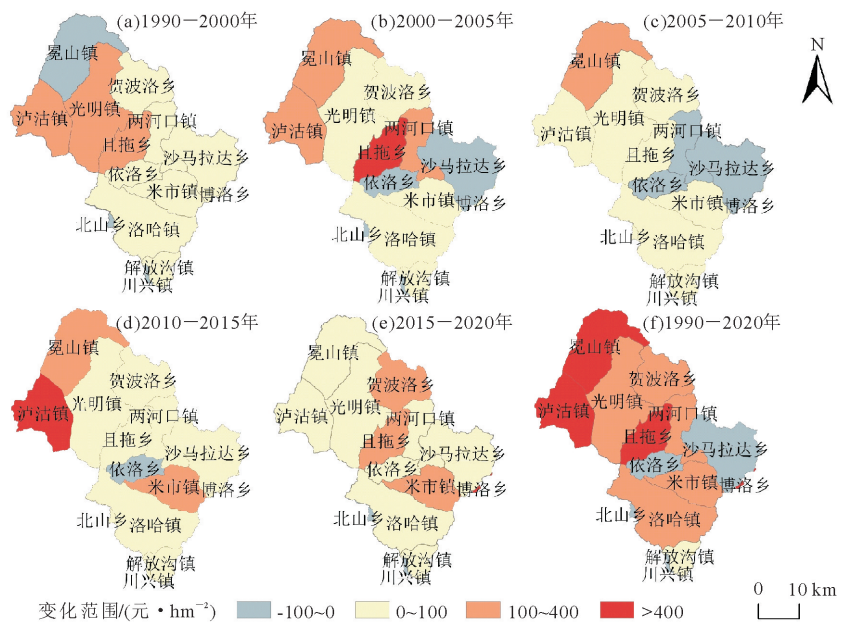


图 3 1990—2020 年孙水河流域生态系统服务价值空间变化

Fig. 3 Spatial distribution of ecosystem service value in Sunshui River Basin from 1990 to 2020

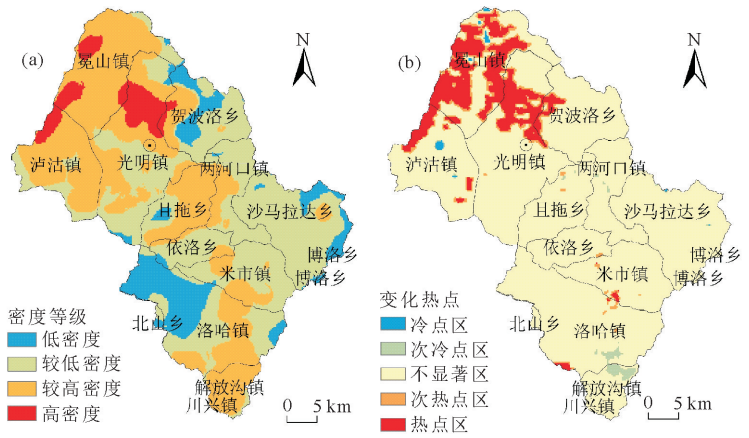


图 4 1990—2020 年孙水河流域生态系统服务价值变化量空间分布

Fig. 4 Density and hotspot of the ecosystem service value changes in Sunshui River Basin from 1990 to 2020

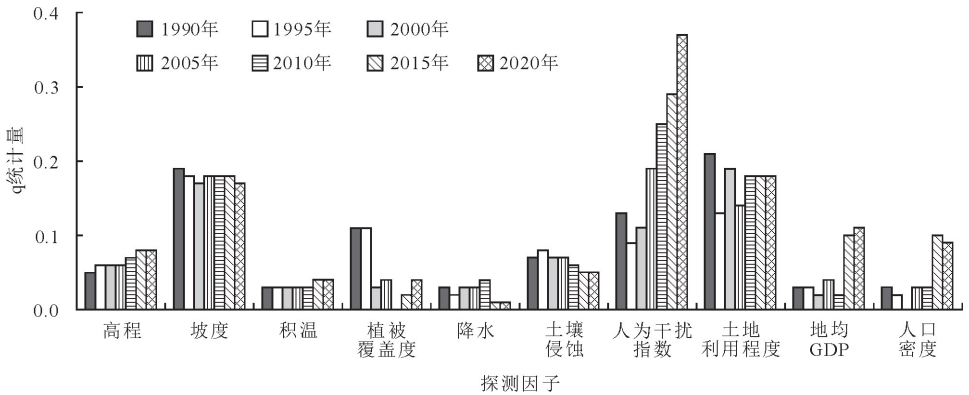


图 5 孙水河流域生态系统服务价值空间分异驱动因子探测 $P<0.01$

Fig. 5 Detection of spatial difference factors of ecosystem service value in Sunshui River Basin $P<0.01$

镇行政尺度评价 ESV,是考虑到以行政边界为尺度单元更易在实践中进行生态管理,而黄木易等^[28]从行政、子流域和格网单元 3 个尺度出发,揭示了 ESV 对尺度变化的响应特征,研究显示 ESV 的空间变化特征对评价尺度的变化具有敏感性,因此不同评价尺度下的孙水河流域 ESV 空间变化特征有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHAO S D, ZHANG Y M. Ecosystems and human well-being: the achievements, contributions and prospects of the millennium ecosystem assessment [J]. *Advances in Earth Science*, 2006, 32(1): 1178-1183.
- [2] PROJECT G L. Science plan and implementation strategy [J]. *Environmental Policy Collection*, 2009, 20(11): 1262-1268.
- [3] BATEMAN I J, HARWOOD A R, MACE G M, *et al.* Bringing ecosystem services into economic decision-making: land use in the United Kingdom [J]. *Science*, 2013, 341(6141): 45-50.
- [4] LANGEMEYER J, BARÓ F, ROEBELING P, *et al.* Contrasting values of cultural ecosystem services in urban areas: the case of park Montjuic in Barcelona [J]. *Ecosystem Services*, 2015, 12.
- [5] RAYMOND C M, KENTER J O. Transcendental values and the valuation and management of ecosystem services [J]. *Ecosystem Services*, 2016, 21.
- [6] SONG W, DENG X. Land-use/land-cover change and ecosystem service provision in China [J]. *Sci. Total Environ*, 2017, 576: 705-719.
- [7] COSTANZA R, GROOT R D, SUTTON P, *et al.* Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [8] 谢高地, 鲁春霞, 冷允法, 等. 青藏高原生态资产的价值评估 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 189-196.
XIE G D, LU C X, LENG Y F, *et al.* Ecological assets valuation of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 189-196. (in Chinese)
- [9] 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.
XIE G D, ZHANG C X, ZHANG L M, *et al.* Improvement of the evaluation method for ecosystem service value based on per unit area [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(8): 1243-1254. (in Chinese)
- [10] CARPENTER S R, MOONEY H A, AGARD J, *et al.* Science for managing ecosystem services: beyond the millennium ecosystem assessment [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106: 5.
- [11] SIMONIT S, PERRINGS C. Bundling ecosystem services in the Panama Canal watershed [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110: 23.
- [12] 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.
XIE G D, ZHEN L, LU C X, *et al.* Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(5): 911-919. (in Chinese)
- [13] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价 [J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 635-640.
OUYANG Z Y, WANG R S, ZHAO J Z. Ecosystem services and their economic valuation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 635-640. (in Chinese)
- [14] 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.
- [15] ZHANG P Y, GENG W L, YANG D, *et al.* Spatial-temporal evolution of land use and ecosystem service value in the Lower Reaches of the Yellow River Region [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(11): 277-288. (in Chinese)
- [15] 李蕴琪, 韩磊, 朱会利, 等. 基于土地利用的延安市退耕还林前后生态服务价值变化 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(1): 203-211.
- [16] LI Y Q, HAN L, ZHU H L, *et al.* Changes of ecological service value in Yan'an City pre and post returning farmland to forestland based on land use [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(1): 203-211. (in Chinese)
- [16] 李曼, 郭俊莉, 刘焕才. 乌鲁木齐河流域中下游生态系统服务价值动态变化 [J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(3): 48-54.
- [17] LI M, GUO J L, LIU H C. Dynamic changes of ecosystem service values of in the middle and lower reaches of the Urumqi River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(3): 48-54. (in Chinese)
- [17] 马勇, 凌旋, 童昀. 格网尺度下典型旅游城市生态服务价值估算与时空分异特征: 三亚案例 [J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7542-7554.
- [18] MA Y, LING X, TONG Y. Ecosystem service value estimation and spatiotemporal differentiation characteristics of typical tourism cities at grid scale: a case of Sanya [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(19): 7542-7554. (in Chinese)
- [18] 贾艳艳, 唐晓岚, 杨阳, 等. 长江沿岸芜湖湖区段景观格局演变及生态系统服务价值分析 [J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(6): 249-258.
- [19] JIA Y Y, TANG X L, YANG Y, *et al.* Landscape pattern changes and ecological service values in Wuhu section along the Yangtze River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(6): 249-258. (in Chinese)
- [19] 赵敏敏, 周立华, 王思源. 生态政策对库布齐沙漠土地利用格局及生态系统服务价值的影响 [J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 252-258.
- [20] ZHAO M M, ZHOU L H, WANG S Y. Effects of ecological policies on land use types and ecosystem service values in Hobq Desert [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(2): 252-258. (in Chinese)
- [20] 李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 726-736.
- [21] LI Y F, LUO Y C, LIU G, *et al.* Effects of land use change on ecosystem services—a case study in Miyun reservoir watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(3): 0726-0736. (in Chinese)
- [21] 徐晓宇, 郭萍, 张帆, 等. 政策驱动下石羊河流域生态效应变化分析 [J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 185-191.
- [22] XU X Y, GUO P, ZHANG F, *et al.* Analysis for changing ecological effects under policy-driven in Shiyang River Basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 185-191. (in Chinese)
- [22] 郭正良. 加快乌蒙山片区区域发展与扶贫攻坚步伐 [N]. *贵州*

- 政协报,2015-10-16(A2版).
- [23] 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.
XIE G D,XIAO Y,ZHEN L,*et al.* Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco. Agriculture,2005,13(3):10-13. (in Chinese)
- [24] 徐媛银,郭涿,薛达元,等.赣南地区土地利用格局及生态系统服务价值的时空演变[J].生态学报,2019,39(6):1969-1978.
XU N Y,GUO L,XUE D Y,*et al.* Land use structure and the dynamic evolution of ecosystem service value in Gannan region,China[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(6):1969-1978. (in Chinese)
- [25] 庄大方,刘纪远.中国土地利用程度的区域分异模型研究[J].自然资源学报,1997,12(2):105-111.
ZHUANG D F,LIU J Y. Regional differentiation model of land use degree in China[J]. Journal of Natural Resources,1997,12(2):105-111. (in Chinese)
- [26] 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.
YAN E P,LIN H,WANG G X,*et al.* Analysis of evolution and driving force of ecosystem service values in the Three Gorges Reservoir region during 1990—2011[J]. Acta Ecologica Sinica,2014,34(20):5962-5973. (in Chinese)
- [27] 刘凤莲,杨人懿.武汉市土地利用变化及对生态系统服务价值的影响[J].水土保持研究,2021,28(3):177-183,193,2.
- [28] 黄木易,岳文泽,方斌,等.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[J].地理学报,2019,74(9):1904-1920.
HUANG M Y,YUE W Z,FANG B,*et al.* Scale response characteristics and geographic exploration mechanism of spatial differentiation of ecosystem service values in Dabie Mountain area, Central China from 1970 to 2015[J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(9):1904-1920. (in Chinese)
- [29] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):136-134.
WANG J F,XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica,2017,72(1):116-134. (in Chinese)
- [30] WANG J F,LI X H,CHRISTAKOS G,*et al.* Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China[J]. International Journal of Geographical Information Science,2010,24(1):107-127.

(上接第214页)

- [10] 李倩,吴英,毛双双.不同地表覆盖类型对城市地表热环境的调节[J].西北林学院学报,2017,32(3):198-204,210.
LI Q,WU Y,MAO S S. Regulation function of different surface cover types to urban surface thermal environment[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(3):198-204,210. (in Chinese)
- [11] STREUTKER D R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas[J]. Remote Sensing of Environment,2003,85(3):282-289.
- [12] 廖志宏.基于地面传感器数据与遥感数据的地表温度反演研究[D].北京:中国矿业大学,2014.
- [13] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis[C]// Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press,2021.
- [14] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2002(3):219-226.
- [15] 马润年,孙智辉,曹雪梅,等.黄土高原山地城市延安的热岛效应[J].气象科学,2011,31(1):87-92.
- [16] 田茜,徐宁,田蕾,等.延安市局地温度变化的影响因素分析[J].延安大学学报:自然科学版,2019,38(3):72-76.
TIAN Q,XU N,TIAN L,*et al.* Analysis of the the impact of “bulldoze mountains to build new city” on local temperature change in Yan'an City[J]. Journal of Yan'an University: Natural Science Edition,2019,38(3):72-76. (in Chinese)
- [17] 聂桐,董国涛,蒋晓辉,等.延安地区植被覆盖度时空变化及驱动力[J].水土保持研究,2021,28(5):340-346.
NIE T,DONG G T,JIANG X H,*et al.* Spatiotemporal variation and driving force of vegetation coverage in Yan'an area[J]. Research of Soil and Water Conservation,2021,28(5):340-346. (in Chinese)
- [18] 陈松林,王天星.等间距法和均值标准差法界定城市热岛的对比研究[J].地球信息科学学报,2009,11(2):145-150.
- [19] 杨山.发达地区城乡聚落形态的信息提取与分形研究——以无锡市为例[J].地理学报,2000,55(6):671-678.