

DOI: 10.5846/stxb202012013075

王若思, 潘洪义, 刘翊涵, 唐玉萍, 张之风, 马红菊. 基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究. 生态学报, 2022, 42(1): 76-90.

Wang R S, Pan H Y, Liu Y H, Tang Y P, Zhang Z F, Ma H J. Evolution and driving force of ecosystem service value based on dynamic equivalent in Leshan City. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(1): 76-90.

基于动态当量的乐山市生态系统服务价值时空演变及驱动力研究

王若思^{1,2}, 潘洪义^{1,2,*}, 刘翊涵^{1,2}, 唐玉萍^{1,2}, 张之风^{1,2}, 马红菊³

1 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610066

2 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610066

3 四川省水产学校, 成都 611730

摘要: 生态系统服务价值评估作为土地资源合理配置、生态环境保护和生态补偿标准制定的重要前提, 是当前的研究热点之一。以乐山市为研究区域, 基于 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 期土地利用数据, 运用生态系统服务价值动态当量法、地理探测器模型等方法, 定量分析乐山市 2000—2015 年间生态系统服务价值时空变化规律及驱动机制。结果表明: (1) 2000—2015 年乐山市生态系统服务价值整体呈下降趋势, 仅在 2005—2010 年有所回升, 总量共减少了 23.22 亿元, 主要与林地大量减少和建设用地大量增加有关; (2) 空间上呈现西南高、东北低的分布态势, 且各区域变化不同, 西南方向山地以下降为主, 东部平原丘陵上升为主, 河流两侧上升明显; (3) 影响生态系统服务价值时空分布的主导因素为土地利用、NPP、降水量和坡度, 除此之外气温、高程、土壤类型也有较大决定力; (4) 自然因子决定力大于社会经济因子, 但社会经济因子的影响越来越突出。研究揭示了乐山市生态系统服务价值的时空变化规律及驱动因子, 为该地区土地利用规划与生态环境保护机制的建立提供了科学参考。

关键词: 动态当量; 生态系统服务价值; 时空演变; 地理探测器; 驱动因子; 乐山市

Evolution and driving force of ecosystem service value based on dynamic equivalent in Leshan City

WANG Ruosi^{1,2}, PAN Hongyi^{1,2,*}, LIU Yihan^{1,2}, TANG Yuping^{1,2}, ZHANG Zhifeng^{1,2}, MA Hongju³

1 Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610066, China

2 Geography and Resources Science College, Chengdu 610066, China

3 Sichuan Fisheries School, Chengdu 611730, China

Abstract: As an important prerequisite for the reasonable allocation of land resources, ecological environment protection and the formulation of ecological compensation standards, evaluation of ecosystem services value is one of the current research hotspots. Taking Leshan City as the research area, based on the four periods of land use data in 2000, 2005, 2010, and 2015, the dynamic equivalent method of ecosystem service value was used to quantitatively analyze the temporal and spatial changes of ecosystem service value in Leshan City from 2000 to 2015. Based on the temporal and spatial heterogeneity of the ecosystem, this method combined the vegetation net primary productivity data, precipitation data and soil conservation data of Leshan City to dynamically correct the equivalent to make the results more accurate, spatial and comprehensive. Then, the geographic detector model was used to quantitatively detect the driving mechanism of the temporal

基金项目: 国家自然科学基金(42071222); 教育部规划基金项目(18XJA630005)

收稿日期: 2020-12-01; 网络出版日期: 2021-08-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: panhongyi80@163.com

and spatial changes of the ecosystem service value. The factor detector could detect the spatial correlation between driving factors and ecosystem service value. The interaction detector could evaluate whether the two factors worked together to increase or decrease the impact on the temporal and spatial distribution of ecosystem service value. And the ecological probes could compare whether there were significant differences in the impact of two factors on the temporal and spatial distribution of ecosystem service values. The results indicated that: (1) the ecosystem service value of Leshan City showed a downtrend from 2000 to 2015, and only rebounded from 2005 to 2010, with a total decrease of 2.322 billion yuan, which was mainly related to the massive reduction in forest land and the massive increase in construction land. (2) In terms of space, the distribution trend was high in the southwest and low in the northeast, and the changes in each region were different. The mountains in the southwest were mainly declining, the hills of the eastern plains were mainly rising, and the two sides of the river rose significantly. (3) The dominant factors affecting the temporal and spatial distribution of ecosystem service value were land use, vegetation net primary productivity (NPP), precipitation, and slope. In addition, temperature, elevation, and soil type also had a great effect. (4) The influence of natural factors was greater than that of social economic factors, but the influence of social economic factors was becoming more and more prominent. The study revealed the rule of temporal and spatial changes and driving factors of the ecosystem service value in Leshan City, and provided a scientific reference for the establishment of land use planning and ecological environment protection mechanisms in this area.

Key Words: dynamic equivalent; ecosystem service value; spatiotemporal evolution; geographic detector; driving factor; Leshan City

生态系统服务是指人类从生态系统中直接或间接获得的产品和服务,包括供给服务、支持服务、调节服务和文化服务^[1]。对生态系统服务价值的评估,是生态环境评价与生态补偿的基础,也是如今地理学、生态学的研究热点之一。近年来,生态系统服务价值的评估方法主要可分为直接评估法和间接评估法两大类^[2]。目前,应用最广泛的是间接评估法中的价值当量法,通过生态系统面积与单位面积生态系统服务价值相乘得到生态系统最终服务价值^[2]。1997年 Costanza 等^[3]在 Nature 上发表文章估算了全球生态系统服务价值并制定了全球生态系统服务价值当量因子表,是价值当量法的开端,为之后国内外的研究提供了理论与方法支撑。国外学者在此基础上,多与土地利用动态变化相结合,从全球^[4]、海岸带^[5]、高原地区^[6]、热带雨林^[7]等各尺度入手研究生态系统服务价值的变化以及与人类活动之间的相互关系。国内方面,谢高地等^[8]在 Costanza 等的基础上结合 200 位专家的意见,将生态系统服务价值当量因子表中国化,并进行了修正和改进^[9-10]。此后,我国学者从地形区^[11]、流域^[12-13]、省域^[14-15]等各种尺度对生态系统服务价值的时空分布特征^[16]、驱动力^[15]和预测模型^[17]进行了探索,并与土地利用变化^[18]、生态敏感性^[19]、生态补偿^[20]和经济协调度^[21]等概念结合研究,涌现出大量的成果。研究主要呈现出以下特点:(1)估算以土地利用数据为基础,多研究土地利用与生态系统服务价值相互关系;(2)以“热点地区”、“脆弱区”为研究区较多,中小尺度区域研究较少;(3)生态系统服务价值以静态评估为主,驱动力分析主要采用回归分析或是定性分析,总体缺乏时间和空间上的动态性。

乐山市作为成渝城市群的重要交通节点、港口城市和旅游城市,具有战略发展的区位优势^[22]。近年来,随着人口的迅速增长、城市化的速度加快以及文旅产业的繁荣发展,区域耕地面积减少、水土流失、植被覆盖率下降、酸雨污染等生态安全问题日益突出,如何在保证生态安全的前提下进行城市经济发展亟待解决。鉴于此,本文基于乐山市土地利用矢量数据,采用生态系统服务价值动态当量法与地理探测器模型,分析乐山市生态系统服务价值时空分布规律与驱动机制,为乐山市土地资源合理利用与生态补偿机制的建立提供科学依据。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区概况

乐山市地处四川盆地西南部,为成都平原至川西南山地的过渡带,处 $102^{\circ}50'—104^{\circ}30'E$ 、 $28^{\circ}25'—30^{\circ}20'N$ 之间,总面积 12720.03 km^2 ,全市共辖 11 个区县(图 1)。地势西南高、东北低,地势起伏大。地貌以山地为主(66.5%),丘陵次之(21%),平原面积狭小(12.5%),仅沿河流两岸分布。气候属于中亚热带季风气候,四季分明,雨热同期,无霜期长,垂直气候带谱完整,植物种类繁多。有大渡河、岷江、青衣江等河流,水系丰富^[22]。

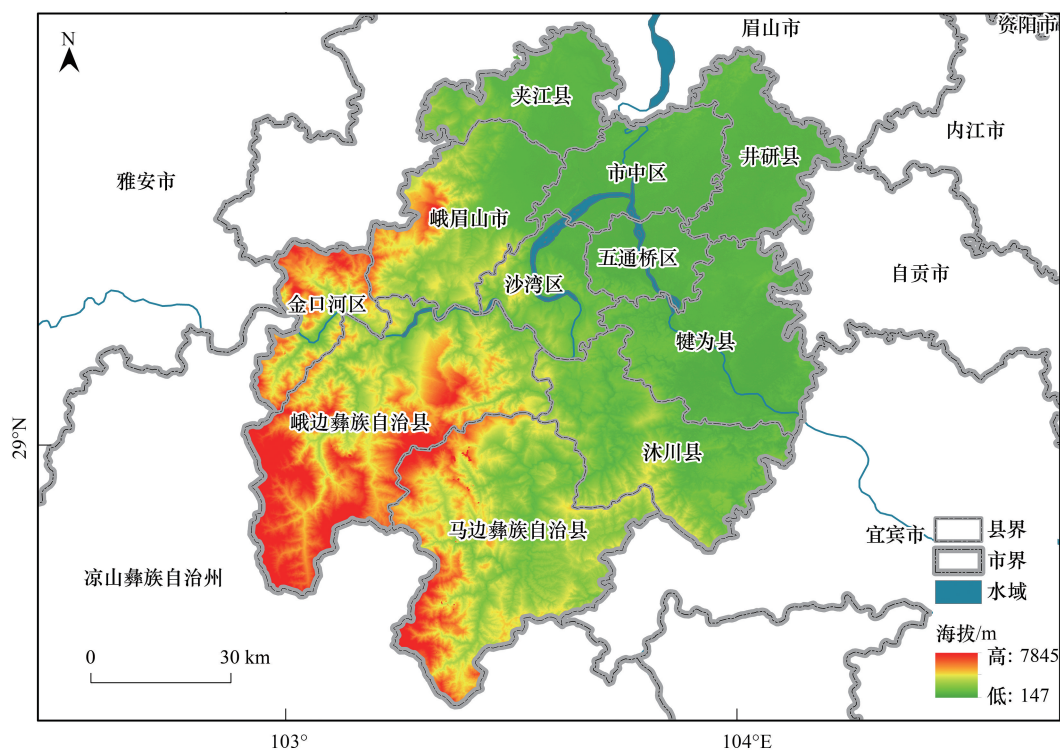


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Location map of the study area

1.2 数据来源与处理

本文所使用到的数据如下:①土地利用/覆被数据、行政边界矢量数据和 1 km 分辨率的气温、土壤类型数据从中国科学院资源环境科学数据中心获取(<http://www.resdc.cn/>),将土地利用类型重分类分为 6 个一级类,分别为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用地;②DEM 数据从地理空间数据云(<http://www.gscloud>)获取,通过 ArcGIS 得到研究区高程、坡度和坡向;③NPP 数据从美国国家航空航天局(<https://www.nasa.gov/>)获取;④降水量数据和土壤侵蚀模数从国家地球系统科学数据共享服务平台(<http://www.geodata.cn/>)获取,土壤保持量数据通过通用土壤流失方程(ULSE)进行计算;⑤其他社会经济数据来自《乐山统计年鉴》、《全国农产品成本收益资料汇编》。

2 研究方法

2.1 土地利用变化分析

利用 ArcGIS 对 2000 年和 2015 年的土地利用数据进行叠置分析,计算得到土地利用转移矩阵,以此分析 15 年来乐山市土地利用的变化量及变化方向,具体计算公式参见^[23—24]。

2.2 生态系统服务价值估算

1 个标准单位生态系统生态服务价值当量因子(以下简称标准当量)是指 1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值^[25]。基于谢高地等^[9]的研究,粮食产量价值主要依据稻谷、小麦和玉米进行计算,以 2015 年的物价水平为基准,运用 CPI 指数对各年标准当量的价值进行修正,计算平均后得到研究区 2000—2015 年平均标准当量经修正后的价值量为 2392 元/hm²。

由于研究区不同年份、不同区域的生态系统的基本情况是变化的,生态系统服务价值也相应发生动态变化。本文参考谢高地等^[10]的研究,认为生态系统食物生产、原材料生产、气体调节、气候调节、净化环境、维持养分循环、生物多样性和美学景观功能与生物量在总体上呈正相关,水资源供给和水文调节与降水变化相关,而土壤保持与降水、地形坡度、土壤性质和植被盖度密切相关^[10]。故而选取 NPP、降水量和土壤保持量三项因子对当量进行动态调节,以此构建生态服务时空动态价值当量表,计算公式为:

$$F_{nij} = \begin{cases} P_{ij} \times F_{n1} & \text{或} \\ R_{ij} \times F_{n2} & \text{或} \\ S_{ij} \times F_{n3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, F_{nij} 指某种生态系统在第 i 年第 j 地区第 n 类生态服务功能的单位面积价值当量因子; F_n 指该类生态系统的第 n 种生态服务价值当量因子; $n1$ 表示与 NPP 相关的服务功能; $n2$ 表示与降水相关的服务功能; $n3$ 指土壤保持服务功能, P_{ij} 指 NPP 时空调节系数, R_{ij} 指降水时空调节系数, S_{ij} 指土壤保持时空调节系数,此三项指标计算公式参见^[10]。

研究区生态系统服务价值计算公式为^[26]:

$$E = \sum_{c=1}^n E_c \quad (2)$$

$$E_c = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D \times F_{nij} \times A_{ij} \quad (3)$$

式中, c 为第 c 种生态系统服务功能; E_c 为第 c 种生态系统服务功能价值; F_{nij} 表示某种生态系统在第 i 年第 j 地区第 n 类生态服务功能的单位面积价值当量因子; D 为多年的 1 个标准当量因子的生态系统服务平均价值量(元/hm²),此处为 2392 元/hm²; A_{ij} 为第 i 年第 j 地区的面积。

2.3 指标信息提取

参考以往的研究成果^[27-28],并结合研究区的具体情况,本文选取 6 项反映区域自然环境状况和人类影响程度并的指标进行驱动力探测,分别是高程、坡向、气温、土壤类型、距公路的距离、距城镇的距离。利用 ArcGIS 10.7 渔网功能建立 1 km×1 km 的格网,共 12714 个中心采样点,以提取对应的代表生态系统服务价值的 Y 值和代表各项驱动因素的 X 值。假设 $A = \{Ah\}$ 是生态系统服务价值空间分异的一项驱动因素。其中不同类型 $h=1,2,\dots,L$, L 代表该因素的分类数,本文分别采用 1 倍、1/2 倍、1/3 倍、1/4 倍标准差分级法计算决定力 q 值,采用 q 值最大的 1/2 倍标准差分级法进行分类(图 2)^[29]。

2.4 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法^[30]。可以在几乎无假设条件的基础上,通过空间异质性定量探测各驱动因子对某地理事物分布的解释力大小(即 q 值)^[31]。本文运用地理探测器模型探测驱动因素与生态系统服务价值之间的空间相关性,得到自变量 X 对 Y 值空间分异的决定力 q 的公式为^[32]:

$$q = 1 - \frac{1}{n \sigma^2} \sum_{h=1}^L n_k \sigma_k^2 \quad (4)$$

式中, n_k 和 n 分别为在因子 A 的类型 h 和整个研究区域内的样本数; σ_k^2 和 σ^2 分别为在因素 A 的第 h 类型和整个区域的离散方差。 q 值取值范围为 $[0,1]$, q 值越大,代表该因素对生态系统服务价值空间分布的影响越

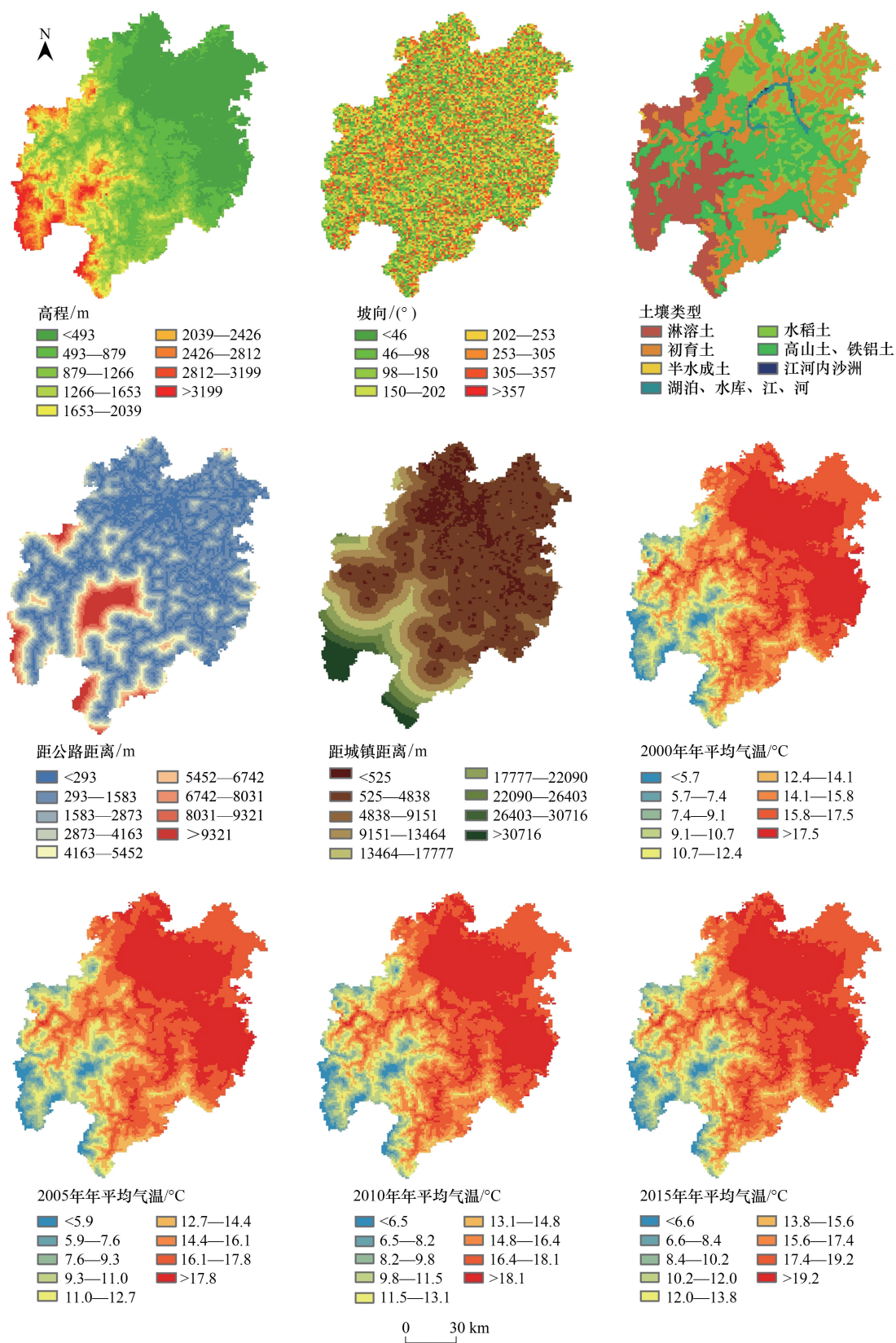


图2 乐山市驱动因子空间分类

Fig.2 Spatial distribution of classified driving factors in Leshan City

大,反之越小^[29]。

交互探测器用于评估两两因子共同作用时是否会增加或减弱对生态系统服务价值时空分布的影响,生态探测器用于比较两个因子对生态系统服务价值时空分布的影响是否有显著差异^[30]。

3 结果分析

3.1 土地利用及动态生态系统服务价值时空演变分析

3.1.1 土地利用时空变化分析

乐山市土地利用以耕地和林地为主,二者占比 88%以上。林地、草地主要集中在西南部山地地区,耕地大多分布在东北方向的平原丘陵地区(图 3)。从地类变化上来看(表 1),西南方向山区林地大量减少,主要转为耕地和草地,而河流两岸平原地区建设用地显著增加,来源主要为耕地。

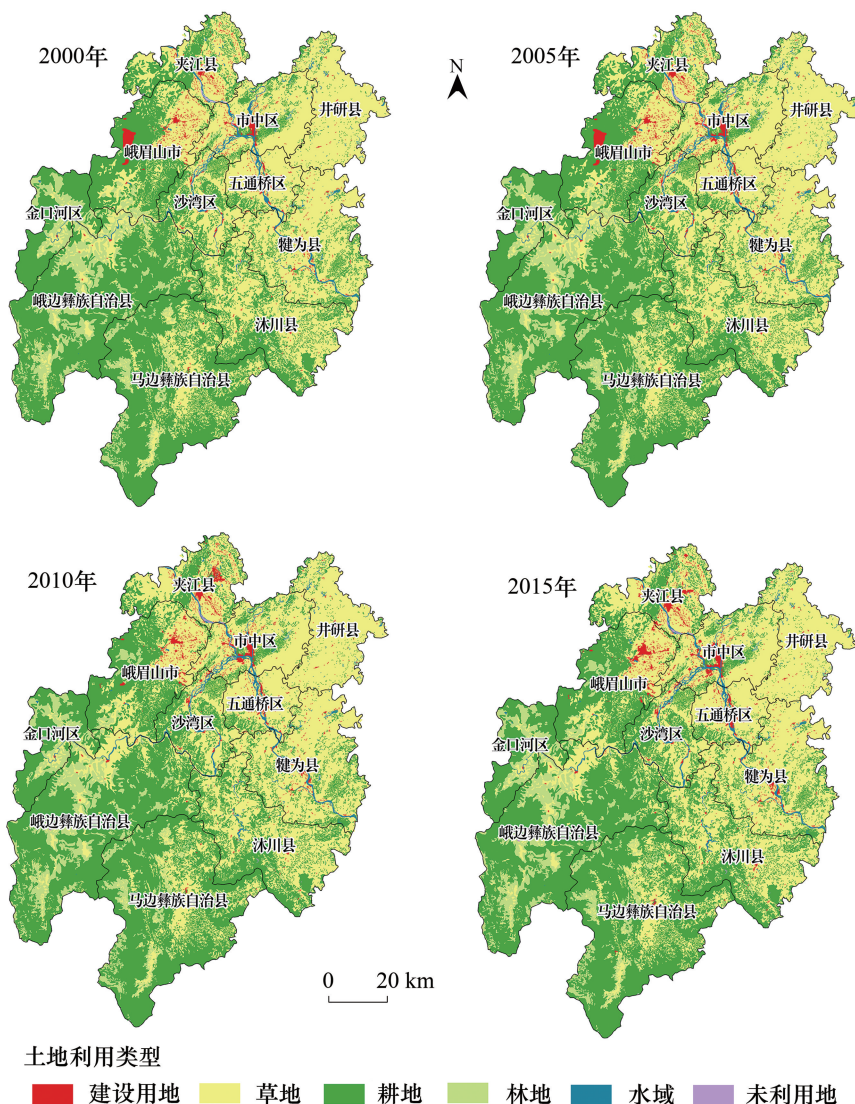


图 3 2000—2015 年乐山市土地利用分布

Fig.3 Distribution of land use in Leshan City from 2000 to 2015

3.1.2 生态系统服务价值时间动态演变分析

由图 4、5、6 显示出 2000—2015 年研究区调节系数的时空变化,总体上 2000—2015 年间乐山市西南部山

地的降水调节系数与 NPP 调节系数均有所下降,东北方向有所增加。土壤保持量调节系数,相对比较稳定,西南地区有少量减少。

表 1 2000—2015 年乐山市土地利用转移矩阵/hm²
Table 1 Land use transfer matrix in the Leshan city from 2005 to 2015

年份 Year	土地利用类型 Land use types	2015					
		草地 Grassland	耕地 Cropland	建设用地 Built land	林地 Forestland	水域 Water land	未利用地 Unused land
2000	草地	92856.82	7926.14	16.13	2355.88	67.16	0.00
	耕地	503.40	556664.69	7155.97	6879.56	2084.33	0.00
	建设用地	1699.55	254.44	12393.64	1049.97	319.36	2.34
	林地	6615.23	8428.16	815.09	545940.10	148.12	0.00
	水域	0.00	693.62	108.85	16.65	16170.28	0.00
	未利用地	0.00	0.00	17.32	0.00	189.06	765.08

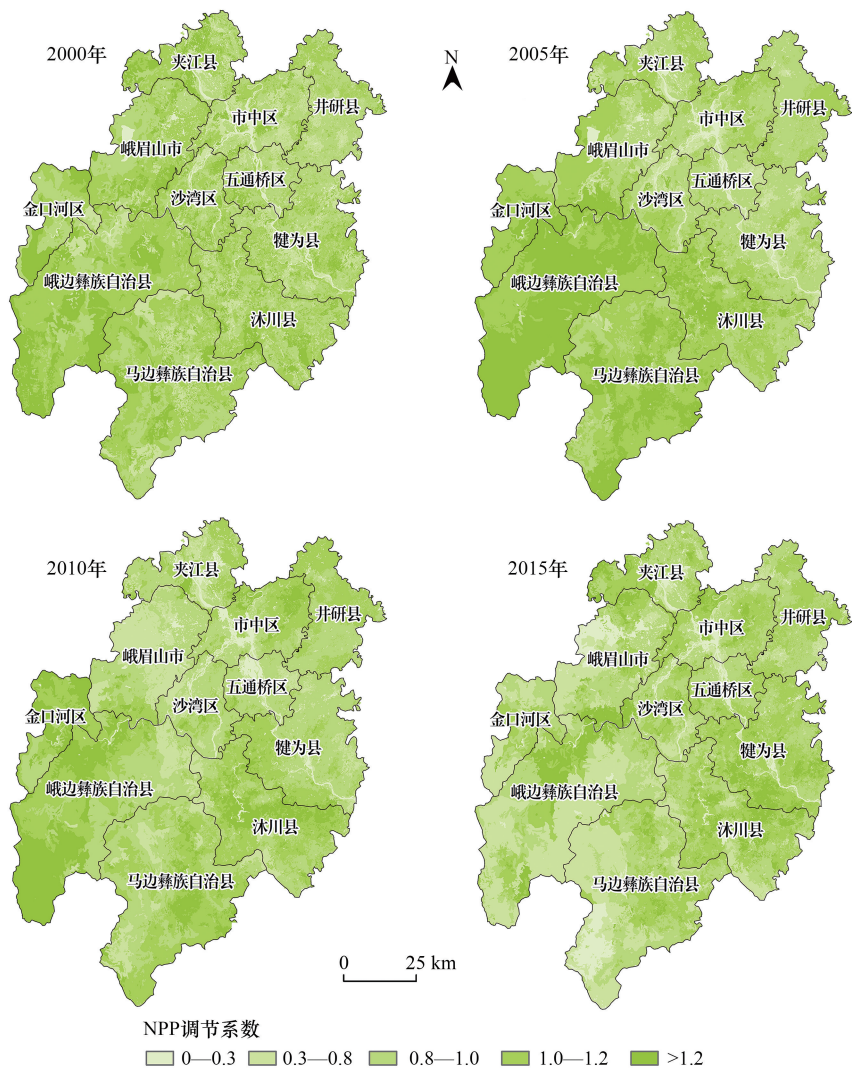


图 4 生态系统服务价值基础当量 NPP 调节系数
Fig.4 Net primary productivity adjustment coefficient of ecological service value

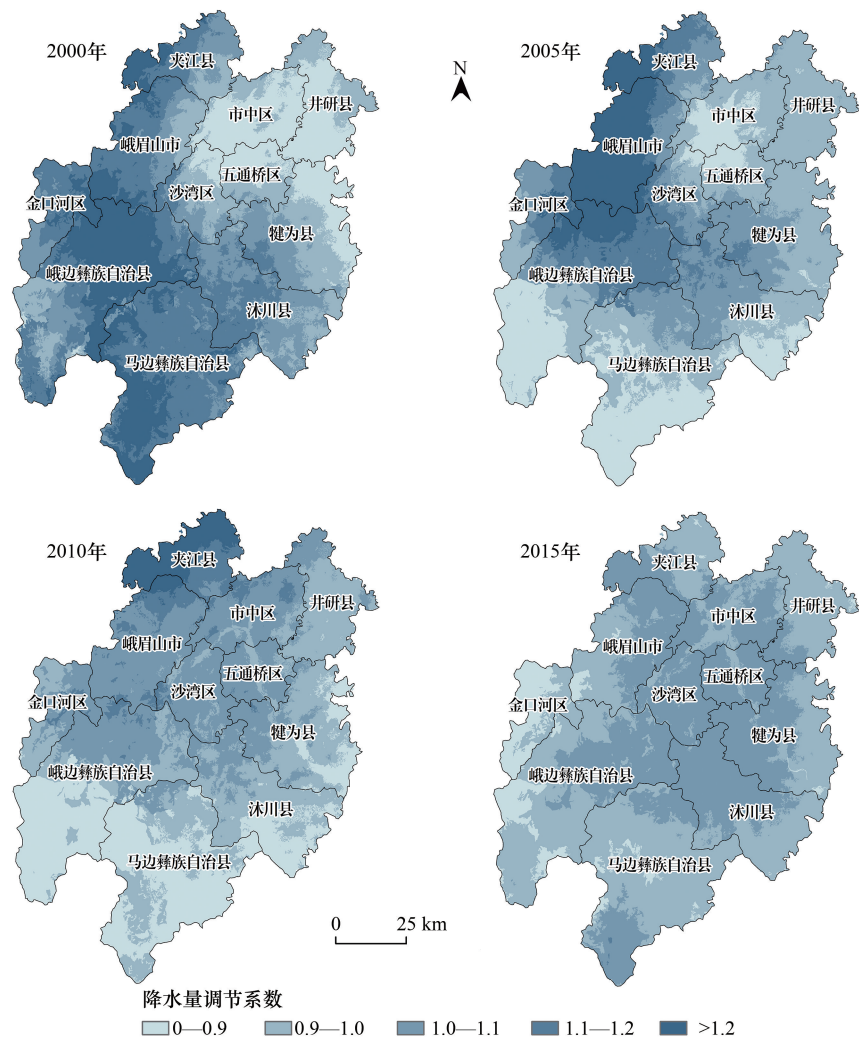


图 5 生态系统服务价值基础当量降水量调节系数

Fig.5 Precipitation adjustment coefficient of ecosystem service value

由表 2 可知,2000—2015 年乐山市的生态系统服务价值整体呈波动下降趋势,从 397.42 亿元降至 374.2 亿元,减少了 23.22 亿元,其中 2005—2010 年有明显上升,增加了 16.31 亿元。

表 2 2000—2015 年乐山市各类土地生态系统服务价值估算/10⁸元

Table 2 Ecosystem service value estimation of various ecosystem types in Leshan City from 2000 to 2015							
生态系统类型 Ecosystem type	年份 Year	耕地 Cropland	林地 Forestland	草地 Grassland	水域 Water land	未利用地 Unused land	合计 Total
生态系统服务价值 Ecosystem service value	2000	51.62	301.25	12.68	31.84	0.04	397.42
	2005	52.70	289.68	13.85	33.22	0.03	389.47
	2010	54.11	296.89	13.65	41.07	0.06	405.78
	2015	54.76	265.55	11.79	42.04	0.06	374.20
变化率/% Increment percentage	2000—2005	2.10	-3.84	9.22	4.31	-17.54	-2.00
	2005—2010	2.68	2.49	-1.40	23.65	75.92	4.19
	2010—2015	1.20	-10.56	-13.64	2.35	10.08	-7.78
	2000—2015	6.10	-11.85	-7.00	32.01	59.68	-5.84

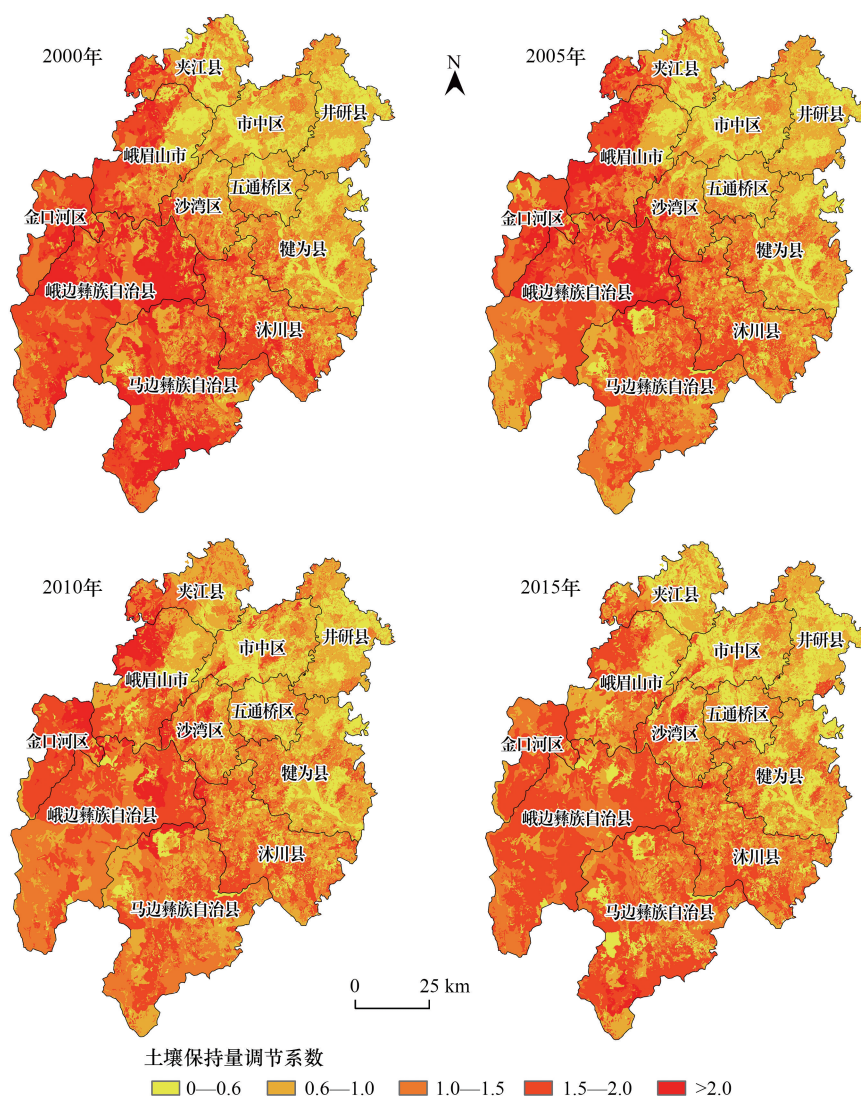


图 6 生态系统服务价值基础当量土壤保持量调节系数

Fig.6 Soil conservation adjustment coefficient of ecosystem service value

从土地利用类型来看(表 2),乐山市的生态系统服务价值主要来自林地,贡献率达 70%以上,其次是耕地和水域,分别占比 14%左右和 10%左右,草地和未利用地贡献率较小。研究时段内,耕地、水域、未利用地生态系统服务价值持续上升,林地和草地价值波动减少,特别是林地价值减少幅度大,从 301.25 亿元下降至 265.55 亿元,变化率为-11.85%。具体来看,2000—2005 年,耕地、草地和水域的服务价值都呈增长状态,草地的增长率最高,而林地价值大量减少,减少了 11.57 亿元。2005—2010 年,整体较为稳定,除草地生态系统服务价值有少量减少外,各土地利用类型的生态系统服务价值均呈上升状态,所以 2010 年生态系统服务价值总量回升。2010—2015 年,仅耕地和水域少量增加,其他地类价值下降,林地、草地下降明显,总体呈减少趋势。

从各服务类型来看(表 3),研究时段内,调节服务功能贡献率最大,占研究区生态系统服务功能的 66.56%。二级功能中,水文调节功能的生态系统服务价值最多,为 115.52 亿元,占比 30.87%,与研究区水系发达有关。其次是气候调节和土壤保持,价值占比分别为 20.28%和 15.34%,气体调节、生物多样性、净化环境的价值占比也都超过了 5%。而水资源供给功能的生态系统服务价值一直为负,与研究区耕地面积大关系密切。2000—2015 年,乐山市的生态环境整体上是趋于恶化的,除生物多样性、水文调节和食物生产价值有所增加之外,其余服务功能价值均呈减少趋势。其中,气体调节功能的生态系统服务价值明显减少,减少了

22.11 亿元,主要与林地面积和 NPP 调整系数的减少有关。而生物多样性功能的生态系统服务价值呈上升趋势,增加了 23.51 亿元,与沼泽地和水域的增加有关。

3.1.3 生态系统服务价值空间动态演变分析

通过研究区生态系统服务价值密度分布可以看出(图 7),乐山市生态系统服务价值空间分异明显,呈现西南高、东北低的态势,高值以西南山地及河流为中心,低值以东北平原丘陵为中心向外扩展。该分布趋势与土地利用分布基本吻合,结合高程图分析,研究区西南部以山地为主,地势高,人类活动较少,土地利用以林地和草地为主,植被覆盖率高,生态系统服务价值较高。而东北部地势相对平坦,人类活动密集,以耕地和建设用地为主,植被覆盖率低,生态系统服务价值较低。而河流成为高值中心主要与水域的水文调节价值高有关。从行政区划上看(表 4),2000—2015 年,生态系统服务价值高值中心位于峨边彝族自治县和马边彝族自治县,最高分别为 103.4 亿元和 89.85 亿元,低值中心位于井研县和五通桥区。

表 3 2000—2015 年乐山市各服务功能生态系统服务价值估算/10⁸元

Table 3 Ecosystem service value estimation of various service functions in Leshan City from 2000 to 2015									
一级类型 First category	二级类型 Second category	2000	2005	2010	2015	2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2015
供给服务 Provisioning services	食物生产	17.57	18.28	18.04	17.66	0.71	-0.24	-0.38	0.09
	原材料生产	12.98	13.36	12.51	11.07	0.38	-0.85	-1.44	-1.92
	水资源供给	-5.52	-6.22	-6.27	-5.89	-0.70	-0.05	0.38	-0.37
调节服务 Regulating services	气体调节	41.70	42.42	39.77	35.03	0.72	-2.65	-4.75	-6.67
	气候调节	98.02	98.79	90.65	75.90	0.78	-8.14	-14.75	-22.11
	净化环境	29.25	29.50	27.11	22.63	0.25	-2.39	-4.49	-6.62
支持服务 Supporting services	水文调节	114.80	109.55	113.24	115.52	-5.25	3.69	2.28	0.71
	土壤保持	63.09	57.87	57.43	57.39	-5.22	-0.44	-0.04	-5.69
	维持养分循环	4.74	4.85	4.62	4.20	0.11	-0.24	-0.42	-0.54
文化服务 Cultural services	生物多样性	4.74	4.85	33.78	28.25	0.11	28.93	-5.53	23.51
	美学景观	16.06	16.21	14.89	12.45	0.15	-1.31	-2.44	-3.61

表 4 2000—2015 年乐山市各区县生态系统服务价值估算/10⁸元

行政区划 District	生态系统服务价值 Ecosystem service value			
	2000	2005	2010	2015
峨边彝族自治县	103.40	105.68	102.76	85.97
峨眉山市	34.10	34.10	37.37	34.69
夹江县	22.85	21.49	21.63	20.50
犍为县	27.83	26.55	29.13	31.60
金口河区	22.05	21.50	24.74	19.54
井研县	11.00	11.07	11.94	11.59
马边彝族自治县	89.85	84.32	84.04	74.39
沐川县	40.34	39.42	42.04	41.26
沙湾区	19.69	19.59	21.57	22.73
市中区	17.35	17.19	20.69	21.48
五通桥区	8.95	8.57	9.86	10.46

将研究区相邻两期的生态系统服务价值密度相减得到 2000—2015 年乐山市生态系统服务价值的动态变化图(图 8),由图 8 可知,2000—2015 年生态系统服务价值在研究区西南方向以减少为主,而东北方向多增加。其中位于东北方向的市中区、犍为县、沙湾区、五通桥区受退耕还林还草工程的影响,NPP 调整系数增

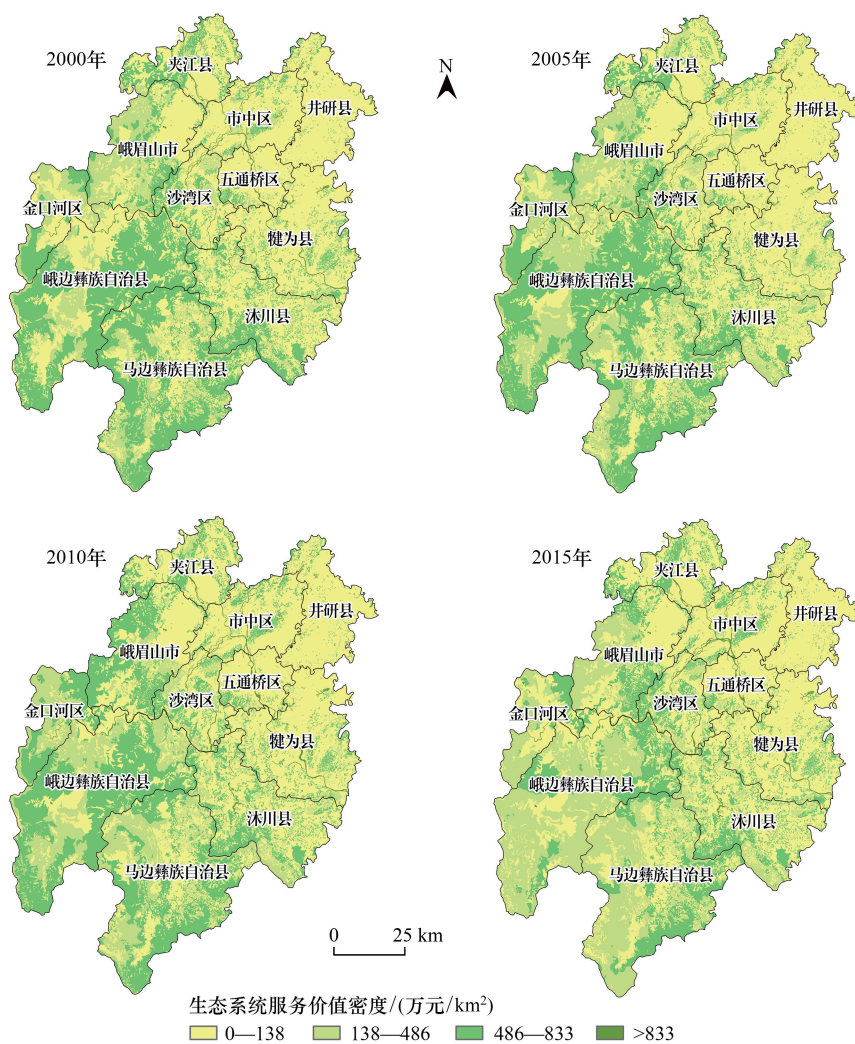


图7 2000—2015年乐山市生态系统服务价值密度分布

Fig.7 Distribution of ecosystem service value density in Leshan City from 2000 to 2015

加,生态系统服务价值相应增加。而西南方向的峨边彝族自治县、马边彝族自治县、金口河区及峨眉山市的西部山区,由于林地与草地的转出与退化,NPP调整系数减少,加之降水调整系数下降导致生态系统服务价值减少。东部河流周围生态系统服务价值增加最为突出,与降水调整系数增加,水域面积扩大有关。

3.2 生态系统服务价值时空分布驱动因子分析

从地理探测器模型的因子探测器结果表明(图9),6项驱动因子的平均决定力 q 值从大到小依次排序为气温>高程>土壤类型>距公路的距离>距城镇的距离>坡向。气温、高程和土壤类型决定力 q 值在0.07以上,为主要驱动因素。距公路的距离和距城镇的距离决定力 q 值在0.05—0.07之间,为次要驱动因素。坡向决定力 q 值低于0.05,为其他驱动因素,解释力极小。由此表明对于乐山市来说,气温、高程和土壤类型对生态系统服务价值的时空分布作用最大。气温为植物生长提供能量,在一定范围内,气温升高,NPP值随即增加,生态系统服务价值就越大,反之就越小。高程影响生态系统服务价值的空间分异,海拔较低的河流两岸的平原地区及低矮丘陵地区,方便农业发展与城市开发,生态用地破坏明显,而海拔较高的西南山地,地势陡峭,不利于人类活动开发,生态用地保留程度高,生态系统服务价值高。土壤类型方面,土壤类型为铁铝土与淋溶土的地区较利于植被生长,生态系统服务价值较高。

从驱动力的演变来看(图9),受主导驱动力解释力太大的影响,其他六项驱动因子的决定力在2000—

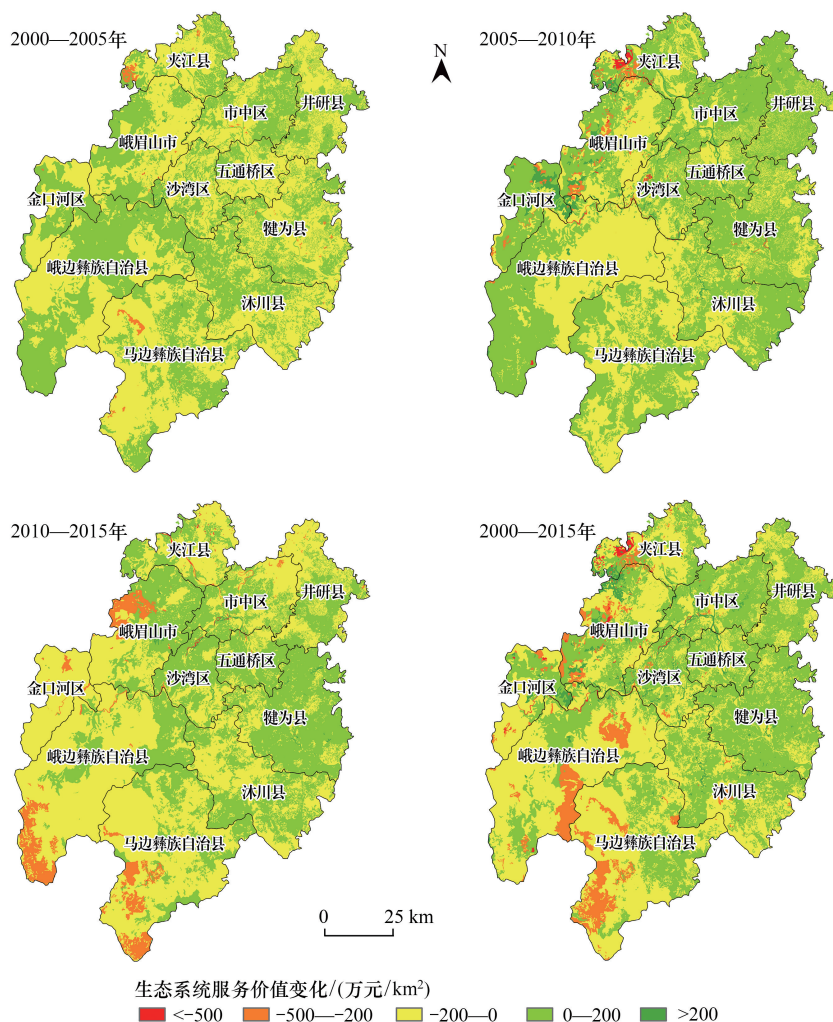


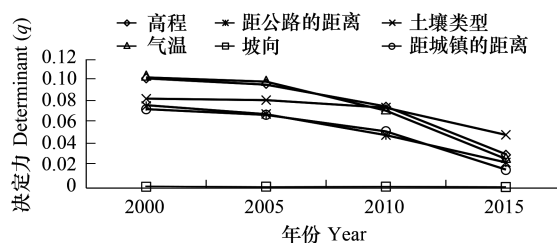
图 8 2000—2015 年乐山市生态系统服务价值变化

Fig.8 Spatial change of ecosystem services value in Leshan City from 2000 to 2015

2015 年均处于下降状态。2000—2005 年,各因子决定力基本稳定,变化量小。2005—2010 年,除坡向与土壤类型较为稳定外,其他几项因子决定力出现小幅度的下降,减少约 25%。2010—2015 年,除坡向外均出现大幅度下降,距城镇距离、气温与高程的决定力下降幅度最大,分别为 68.11%、61.53%和 59.05%。由图 9 可以看出,各驱动因子的决定力差距在逐渐缩小,15 年间,高程和气温的决定力分别下降了 0.071 和 0.077,而距公路和城镇的距离两个因子的决定力分别下降了 0.052 和 0.056,自然驱动因子的下降幅度大于社会经济因子,说明社会经济因子对生态系统服务价值的影响力日益突出。

从生态探测器结果来看(表 5),除坡向与气温、土壤类型、距公路的距离、距城镇的距离之间存在着显著性差异外,各因子与其它因子之间无显著性差异。这与因子探测器结果相对应,进一步证实高程、气温、土壤类型、距公路的距离、距城镇的距离对生态系统服务价值的分布存在一定影响,而坡向影响微弱。

从交互探测器结果来看(表 5),坡向与任意其他因子两两交互后的 q 值都大于各自单独的 q 值,表现为

图 9 2000—2015 年驱动力 q 值及变化Fig.9 2000—2015 driving force q value and changes

非线性增强,其他因子两两交互后大于两者 q 值的最大值,呈现为双因子增强。由此可知所有驱动因子两两叠加之后都增强了对生态系统服务价值时空分布的影响,尤其是坡向,虽然单个因子来看解释力小,但与其它因子交互探测后解释力都明显增强,说明研究区生态系统服务价值时空分布受到自然和社会因子的共同作用。

综合来看,研究区的生态系统服务价值时空分布受到自然与社会经济各因子不同程度的共同影响。六项因子中气温、高程和土壤类型的决定力较大,表明自然因子较社会经济因子对研究区生态系统服务价值的时空分布影响更大,但二者的差距在逐渐缩小,社会经济因子的作用日渐明显。

4 结论与讨论

4.1 讨论

本文以谢高地等的单位面积生态系统服务价值当量为基础,结合乐山市的 NPP 数据、降水量数据和土壤保持量数据,对当量进行动态修正,与目前广泛使用的静态生态系统服务价值评估方法相比更具准确性、空间性和全面性,计算结果可分析性更强,得到乐山市生态系统服务价值的整体波动减少,空间上呈现西南高、东北低的时空分异特征,跟前人对同区域的研究结果基本一致^[33—36]。

表 5 生态探测器与交互探测器结果
Table 5 Ecological probe and interactive probe results

	高程 Elevation	坡向 Aspect	气温 Temperature	土壤类型 Soil type	距公路的距离 Distance from road	距城镇的距离 Distance from town
高程 Elevation						
坡向 Aspect	N *					
气温 Temperature	N	Y *				
土壤类型 Soil type	N	Y *	N			
距公路的距离 Distance from road	N	Y *	N	N		
距城镇的距离 Distance from town	N	Y *	N	N	N	

* 表示两两因子的交互作用为非线性增强,空白为双因子增强;“Y”表示生态探测器中二者具有显著差异,“N”表示二者无显著差异

利用地理探测器模型,选取自然和社会驱动因子,研究空间分异的驱动机制,对近年来缺乏空间性的定性分析和回归分析进行补充,结果显示自然因子的决定力仍处于主导位置,其中气温、高程、土壤类型对生态系统服务价值的分布影响明显,与前人研究吻合^[27—28]。但值得注意的是,社会因子的影响日渐突出,距公路和城镇的距离反映出人类活动包括城市化与农业活动对生态的影响,主要通过改变土地利用产生影响。通过本文可以了解研究区的生态环境变化特征及驱动机制,要重视人类活动对生态的影响,为区域的生态保护和区域生态补偿机制的建立提供参考。

需要指出的是,本文依据谢高地等^[10]的研究进行了生态系统服务价值的计算与修正,所以在驱动因子的选择上,默认土地利用、NPP、降水量和坡度对生态系统服务价值的时空分布有很大的决定力,为主导驱动力,未将此 4 项驱动因子带入模型,选择了其他 6 项驱动因子进入地理探测器模型进行分析,这也是导致计算结果 q 值整体较小的原因。基于本文的生态系统服务价值计算方法,未来还应进一步计算岷江流域的生态系统服务价值,探究流域的生态补偿机制,为流域生态保护政策的制定提供参考依据。

4.2 结论

本文基于岷江中下游段乐山市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 4 期的土地利用数据,运用土地利用转移矩阵、生态系统服务价值动态当量法和地理探测器等方法,分析乐山市 2000—2015 年间的生态系统服务价值的时空演变特征及驱动力,有以下结论:

(1) 2000—2015 年乐山市生态系统服务价值整体呈下降趋势,减少 23.22 亿元,仅在 2005—2010 年有所

上升,且各生态系统与各服务功能之间变化明显不同。各土地利用类型中,林地生态系统服务价值占比最高,达70%以上,但大幅度减少,耕地和水域生态系统服务价值持续上升,林地和草地生态系统服务价值波动减少。各项生态系统服务功能中,水文调节功能价值最高,气候调节与生物多样性功能变化最大。

(2)2000—2015年乐山市生态系统服务价值空间分异呈现西南高、东北低的态势,且各区域变化差异显著。乐山市生态系统服务价值高值位于以峨边彝族自治县、马边彝族自治县等为中心的西南山地及河流中,且呈减少趋势。低值集中于五通桥区、市中区为代表的东北平原丘陵地带,多呈增加态势。

(3)各驱动因子对生态系统服务价值时空分异的决定力存在差异。除土地利用、NPP、降水量和坡度是主导驱动力之外,气温、高程和土壤类型对生态系统服务价值时空分布的决定力较大,说明自然因子是主要驱动因素,但从演变看社会因子作用日益明显。

参考文献(References):

- [1] 谢高地, 鲁春霞, 成升魁. 全球生态系统服务价值评估研究进展. 资源科学, 2001, 23(6): 5-9.
- [2] 李丽, 王心源, 骆磊, 冀欣阳, 赵燕, 赵颜创, Bachagha N. 生态系统服务价值评估方法综述. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1233-1245.
- [3] 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.
- [4] Costanza R, de Groot R, Sutton P, 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.
- [5] Rao N S, Ghermandi A, Portela R, Wang X W. Global values of coastal ecosystem services: a spatial economic analysis of shoreline protection values. Ecosystem Services, 2015, 11: 95-105.
- [6] Kindu M, Schneider T, Teketay D, Knoke T. Changes of ecosystem service values in response to land use/land cover dynamics in Munessa - Shashemene landscape of the Ethiopian highlands. Science of the Total Environment, 2016, 547: 137-147.
- [7] Carrasco L R, Nghiem T P L, Sunderland T, Koh L P. Economic valuation of ecosystem services fails to capture biodiversity value of tropical forests. Biological Conservation, 2014, 178: 163-170.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 刘桂林, 张落成, 张倩. 长三角地区土地利用时空变化对生态系统服务价值的影响. 生态学报, 2014, 34(12): 3311-3319.
- [12] 李云生, 周广金, 梁涛, 吴连喜, 刘伟江. 巢湖流域的土地利用变化及其生态系统功能损益. 地理研究, 2009, 28(6): 1656-1664.
- [13] 李子君, 刘金玉, 姜爱霞, 于元赫. 基于土地利用的祁河流域生态系统服务价值动态变化. 水土保持研究, 2020, 27(2): 269-275, 283-283.
- [14] 刘永强, 廖柳文, 龙花楼, 秦建新. 土地利用转型的生态系统服务价值效应分析——以湖南省为例. 地理研究, 2015, 34(4): 691-700.
- [15] 姚成胜, 朱鹤健, 吕晞, 刘耀彬. 土地利用变化的社会经济驱动因子对福建生态系统服务价值的影响. 自然资源学报, 2009, 24(2): 225-233.
- [16] 曾杰, 李江凤, 姚小微. 武汉城市圈生态系统服务价值时空变化特征. 应用生态学报, 2014, 25(3): 883-891.
- [17] 王金凤, 刘方, 白晓永, 代稳, 李琴, 吴路华. 西南地区生态系统服务价值时空演变及模拟预测. 生态学报, 2019, 39(19): 7057-7066.
- [18] 丁丽莲, 王奇, 陈欣, 唐建军. 近30年皖山湖区生态系统服务价值对土地利用变化的响应. 生态学报, 2019, 39(8): 2973-2985.
- [19] 汤峰, 张蓬涛, 张贵军, 赵丽, 郑宇, 魏明欢, 简卿. 基于生态敏感性和生态系统服务价值的昌黎县生态廊道构建. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2675-2684.
- [20] 孟雅丽, 苏志珠, 马杰, 钞锦龙, 马义娟. 基于生态系统服务价值的汾河流域生态补偿研究. 干旱区资源与环境, 2017, 31(8): 76-81.
- [21] 张雪琪, 满苏尔·沙比提, 马国飞. 基于生态系统服务的叶尔羌河平原绿洲生态经济协调发展分析. 环境科学研究, 2018, 31(6): 1114-1122.
- [22] 黎德川, 廖铁军, 刘洪, 郭芙梅, 牟祥, 沈国志. 乐山市土地生态安全预警研究. 西南大学学报: 自然科学版, 2009, 31(3): 141-147.
- [23] 孙思琦, 郭冻, 薛达元. 重庆市巫山县土地利用格局及其生态系统服务价值的时空变化. 生态科学, 2019, 38(1): 176-185.
- [24] 朱治州, 钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1520-1530.

- [25] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 肖玉, 鲁春霞. 中国生态系统服务的价值. 资源科学, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [26] 刘晓, 张学霞, 徐新良, 陈德超. 河北坝上土地利用变化对生态服务价值的影响. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 94-104.
- [27] 程静, 黄越. 宁夏回族自治区生态系统服务价值时空演变及其驱动力. 水土保持研究, 2021, 28(2): 382-389.
- [28] 璩路路, 刘彦随, 周扬, 李裕瑞. 罗霄山区生态用地时空演变及其生态系统服务功能的响应——以井冈山为例. 生态学报, 2019, 39(10): 3468-3481.
- [29] 潘洪义, 黄佩, 徐婕. 基于地理探测器的岷江中下游地区植被 NPP 时空格局演变及其驱动力研究. 生态学报, 2019, 39(20): 7621-7631.
- [30] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [31] 李颖, 冯玉, 彭飞, 陈树登. 基于地理探测器的天津市生态用地格局演变. 经济地理, 2017, 37(12): 180-189.
- [32] 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.
- [33] 彭文甫, 周介铭, 杨存建, 赵景峰, 罗怀良. 基于土地利用变化的四川省生态系统服务价值研究. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1011-1020.
- [34] 武克军, 王海军, 白洁, 王学恭. 西南山地旅游城市土地利用变化对生态系统服务价值的影响. 安徽农业科学, 2018, 46(20): 66-69.
- [35] 潘洪义, 张琴, 李加安, 徐婕, 黄佩. 基于动态当量的彝汉交错深度贫困区生态系统服务价值时空演变研究. 生态学报, 2020, 40(22): 8218-8229.
- [36] 王怀英. 基于遥感与 GIS 的区域土地利用变化与生态安全评价研究——以四川省乐山市为例[D]. 成都: 四川师范大学, 2016.