

重庆都市区生态系统服务价值时空演变及其驱动力

周渝¹, 邓伟^{1,2}, 刘婷^{1,3}, 齐静^{1,2}, 艾婕¹, 李寄聪¹

(1.重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147;

2.重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400020; 3.重庆工商大学, 重庆 400067)

摘要:开展快速城市化区 ESV 量化描述是理顺生态环境和经济协调发展的有效手段。基于三期遥感解译数据,采用农田粮食单位面积产量比值、生物量和植被覆盖度修订价值当量表,定量分析了重庆都市区 2000—2015 年 ESV 时空演变及驱动因素。结果表明:(1) 研究区生态系统类型以森林和农田为主,森林主要分布在“四山”山脊,农田主要分布在平坝槽谷地带;(2) 时段内城市变化最为显著,空间上向南、北、西 3 个方向快速扩张,增幅高达 225.90%;(3) 15 a 间总 ESV 从 278.51 亿元增加到 297.71 亿元,年均增幅 0.7%;生态系统类型中,水域 ESV 增加最为显著,增幅高达 60.56%;研究区以水文调节服务功能为主,且增加最为明显;(4) 研究区 ESV 密度高值主要集中在“四山”山脊、长江和嘉陵江干流及南部桃子荡山等低山区;时段内“四山”和“两江”干流等区域价值密度呈增加趋势,减少主要集中在西部缙云山与中梁山间的槽谷平坝区及中部都市核心区域。(5) 研究区 ESV 与城镇化率呈显著负相关,与林业生产总值呈显著正相关,表明研究区 ESV 与社会经济发展相互耦合,通过合理调控社会经济结构可以使区域 ESV 保持在高水平。

关键词:生态系统服务价值; 时空演变; 驱动机制; 重庆都市区

中图分类号:X171

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)01-0249-08

Spatio-temporal Evolution and Driving Force of Ecosystem Service Value in Chongqing Metropolitan Area

ZHOU Yu¹, DENG Wei^{1,2}, LIU Ting^{1,3}, QI Jing^{1,2}, AI Jie¹, LI Jicong¹

(1.Chongqing Research Academy of Environment Science, Chongqing 401147, China;

2.State Key Laboratory of Coal mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing 400044,

China; 3.Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Quantitative description of ecosystem service value (ESV) in rapidly urbanized areas is an effective means to straighten out the relationship between ecological environment and economic development. Based on the three-phase remote sensing interpretation data of Chongqing Metropolitan Area, the spatio-temporal evolution characteristics and driving factors of ESV in this region from 2000 to 2015 were comprehensively analyzed. The results show that: (1) the ecosystem types in the study area are mainly forest and farmland, and the forests mainly distribute in the ‘Four Mountains’ ridges running from north to south, the farmlands mainly distribute in the flat dam trough; (2) during the period, the urban ecosystem changes most significantly, and the space expands rapidly towards the three directions of south, north and west, with an increase of 225.90%; (3) the total ESV increases from 27.851 billion yuan to 29.771 billion yuan within 15 years, with an average annual increase of 0.7%; among all ecosystem types, the ESV increases in water body is the most significant, with an increase of 60.56%; from the perspective of various types of ecological service functions, the hydrological regulation service function is the main function in the research area, and the increase is the most significant; (4) the high value density of ESV in the study area mainly concentrates in the ‘Four Mountains’ ridge, the mainstream of the Yangtze River and Jialing River, and the low mountain areas such

收稿日期:2019-03-15

修回日期:2019-07-31

资助项目:重庆市科院所绩效激励引导专项“重庆市生态资产评估”(cstc2018jxjl20016);重庆市科院所绩效激励引导专项“长江经济带生态保护红线监管体系研究”(cstc2018jxjl20010);重庆市生态环境局环保科技环境管理支撑专项“基于生态资产时空演变的重庆市生态保护红线生态补偿标准研究”“生态保护红线监管制度研究”

第一作者:周渝(1990—),女,重庆长寿人,硕士,工程师,主要从事环境经济与政策模拟研究。E-mail:2120130569@mail.nankai.edu.cn

通信作者:邓伟(1983—),男,重庆江津人,博士,高级工程师,主要从事生态遥感研究。E-mail:20112001027@cqu.edu.cn

as Taozidang Mountain in the south; in spatial change, the increase of value density mainly concentrates in the ‘Four Mountains’ and ‘Two Rivers’ mainstream, and the decrease mainly concentrates in the trough valley and Pingba area between Jinyun Mountain and Zhongliang Mountain in the west, as well as in the central urban core area; (5) the results of driving mechanism analysis show that the ESV in the study area is negatively correlated with the urbanization rate, and positively correlated with the gross forestry product, showing that ESV in the study area is coupled with social and economic development, and the reasonable regulation of economic structure can effectively enhance the value of regional ecosystem services.

Keywords: ecosystem service value; spatio-temporal evolution; driving mechanism; Chongqing metropolitan area

生态系统服务是人类从生态系统获得的各种产品和服务,包括供给、支持、调节和文化等直接或间接功能^[1]。开展生态系统服务价值(Ecosystem Service Value, ESV)时空演变定量化描述可为合理高效配置环境资源和制定生态环境保护政策提供参考^[2],已成为当前生态学领域的研究热点之一。近年来,国内外学者围绕 ESV 进行了广泛探索,涌现了大量研究成果^[3-9]。1997 年, Costanza^[4]提出的“全球生态系统服务价值当量表”及“生态系统服务价值分析模型”使得 ESV 的估算原理及方法从科学意义上得以明确;国内学者从 20 世纪末开始涉足生态系统服务研究领域^[10],先后从基础概念^[11]、评估方法^[12-14]、区域^[15-17]、流域^[18-19]、单一生态系统^[20-21]、单一生态系统服务功能^[22]等不同角度进行了积极探索。但由于评估体系不统一、方法各异,导致研究结果间差异较大,限制了对生态系统服务功能及其价值的客观认识。2015 年,谢高地^[23]在系统收集和梳理国内外相关研究成果的基础上,对前期研究进行了修订和补充,建立了不同生态系统类型、不同生态服务功能价值的当量因子评估方法。该方法因其直观易用、数据量需求少等特点,在国内大区域尺度 ESV 评估中得到了广泛应用^[24]。但是,由于各区域生态系统的异质性、复杂性和动态性,在不同区域存在结构和质量状况的差异,应结合实际进行系数修正;目前大多数 ESV 评估均为静态评估,在空间时间变化方面未作深入研究,此外,在定量化探究区域 ESV 变化的驱动因素方面鲜有成果。

重庆都市区地处长江水域生态涵养带和嘉陵江水域生态涵养带的交汇地带,位于三峡库区的咽喉位置,是影响三峡库区水质安全、长江母亲河乃至国家生态安全的关键区域。1997 年直辖后,快速经济发展和城市化进程,加速了对重庆都市区自然生态系统的干扰和破坏,引发了矿山地质环境、水环境质量安全、湿地生态功能退化、生物多样性减少等一系列的生态环境问题。截至目前,对重庆都市区生态系

统结构、ESV 时空演变及驱动力的研究尚不多见,社会经济发展和区域生态系统变化间的关系仍不清楚。鉴于此,本研究在综合分析重庆都市区生态系统格局变化的基础上,以谢高地制定的“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”为基础,采用农田粮食单位面积产量比值、森林生物量和植被覆盖度作为地区修订系数,并建立基于遥感反演数据与生态系统服务价值当量的 ESV 评估模型,综合分析重庆都市区 2000—2015 年 ESV 的时空演变特征及驱动因素,以期重庆都市区生态文明建设和区域可持续发展提供科学参考。

1 研究方法及数据处理

1.1 研究区概况

重庆都市区是市域中心城市,是全市经济最发达、城镇化水平最高的区域^[25],包括渝中区、江北区、渝北区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区、北碚区以及巴南区 9 个行政区全部辖区范围,总面积 5 473 km²。地处川东平行岭谷区,长江与嘉陵江的交汇处,两江合抱,青山纵隔,呈现出“一岛、两江、三谷、四脉”的自然空间格局。地形以山地、丘陵为主,平地较少。地势由西向东逐步升高,并从南北两面向长江、嘉陵江河谷倾斜,起伏较大。位于典型的亚热带季风区,常年平均气温 16~18℃,常年均降雨量在 1 000~1 400 mm。2015 年常住人口 745.76 万人,常住城镇人口 626.37 万人,城镇化率 83.99%,地区生产总值 3 435.07 亿元,以占全市 6.6%的土地面积和 25.85%人口,实现了全市 43.51%的 GDP 份额。

1.2 生态服务价值计算

以谢高地等^[23]提出的“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”为基础,参考王燕等^[26]的研究成果,对表征生态系统质量状况的生物量和植被覆盖度进行修正,计算公式见(1):

$$VC_p = n_i / N_i \times f_i / F_i \times V_0 \times VC_0 \quad (1)$$

式中: VC_p 为研究区第 i 年生态系统服务价值系数

[元/(hm²·a)]; n_i 和 f_i 分别为第 i 年研究区平均生物量和植被覆盖度; N_i 和 F_i 分别为第 i 年我国生物量年均值和植被覆盖度年均值; V_0 为中国生态系统服务单位面积价值当量; VC_0 为研究区农田的生产服务经济价值[元/hm²·a]。需要说明的是,由于大区域尺度生物量无法完全获取,采用净初级生产力(Net Primary Production;NPP)数据代替。 VC_0 的确定方式为:根据重庆都市区各区 2015 年的统计年鉴相关数据汇总计算,得到研究区地均粮食产量为 5 402.53 kg/hm²,同期全国地均粮食产量为 4 974 kg/hm²,确定修正系数为 1.086,以此修正谢高地等^[23]确定的中国 1 个生态系统价值当量的经济价值 3 406.50 元/hm²,即得到研究区 1 个标准当量因子的 ESV 为 3 699.98 元/hm²,以 2015 年的价格指数分别计算研究区不同生态系统服务价值量,其中,单位面积城市生态系统价值当量赋值为 0。植被覆盖度计算模型见公式(2):

$$f = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (2)$$

式中: f 为植被覆盖度;NDVI为像元归一化植被指数;NDVI_{max},NDVI_{min}分别表示不同生态系统NDVI最大值和最小值。

ESV 计算过程见公式(3):

$$ESV = \sum_k \sum_j A_k \times VC_{ikj} \quad (3)$$

式中:ESV为生态系统服务价值; VC_{ikj} 为第 i 年 k 类生态系统的 j 项生态系统服务的ESV系数[元/(hm²·a)]; A_k 为 k 类生态系统类型面积(hm²)。

1.3 生态系统服务价值密度

采用生态系统服务价值密度作为研究区ESV综合评价的核心指标^[27]。根据重庆都市区 2000 年、2010 年和 2015 年生态系统类型,分别计算每一个斑块的各期各类生态系统服务功能的价值量,建立基于GIS网格单元(1 km×1 km)的各类生态系统服务价值量。通过 ArcGIS 10.2 的数据处理 fishnet 功能构建评价单元的网格,大小为 1 km²,划分时网格应涵盖所有并略大于研究区边界,再进行剪切,计算各评价单元生态系统服务价值量,即价值密度。

1.4 社会因子驱动力分析

1.4.1 驱动因子的选择 ESV 的变化受到诸多因素影响和制约,主要来说包括自然因素和社会因素。随着人类社会的发展,尤其对于人口密集、经济活动高度集聚的都市区来讲,社会因素成为引起其生态系统变化的主要驱动力^[28-29]。根据相关研究,结合重庆都市区实际,选取了人口和经济共计 15 个指标进行驱动力分析,其中人口指标为常住人口 X_1 ,非农业人口 X_2 ,城镇化率 X_3 ,经济指标为人均地区生产总值

X_4 ,城镇居民人均总收入 X_5 ,房地产业增加值 X_6 ,地区生产总值 X_7 ,第一产业产值 X_8 ,第二产业产值 X_9 ,第三产业产值 X_{10} ,工业总产值 X_{11} ,农业生产总值 X_{12} ,林业生产总值 X_{13} ,牧业生产总值 X_{14} ,渔业生产总值 X_{15} 。

1.4.2 驱动力分析方法 驱动力分析是借助 SPSS 21.0 软件,分别对上述指标进行相关性分析和回归方程的建立,以研究社会因素对ESV变化的影响。相关性分析是分别将 2000—2015 年研究区ESV与社会因子指标,作两两双变量分析,剔除相关性较低的因子^[30]。回归分析是在相关性分析的基础上选取 2000—2015 年社会经济因子作为自变量,ESV 为因变量进行逐步回归,建立ESV与社会经济因子之间的线性回归方程。线性回归方程驱动机制模型见(4):

$$Y_m = \alpha F(x_n) + \beta \quad (4)$$

式中: Y_m 为生态系统服务价值; x_n 代表社会驱动因子; α, β 为模型系数。

1.5 数据来源与处理

(1) 生态系统格局:采用重庆都市区 2000 年 8 月、2010 年 8 月和 2015 年 8 月共 3 期 Landsat TM, ETM 影像为基本数据源,空间分辨率为 30 m,辅助参考数据有研究区 1:10 000 地形图及研究区 2015 年 10 月和 2015 年 8 月空间分辨率为 2.5 m 的全覆盖 Spot 卫星影像和空间分辨率为 1 m 的覆盖区为城镇区的 IK-NOS 影像,以及 2015 年 8 月 6 日—23 日实地观测的野外土地覆盖核查数据。在分类之前,对三期遥感影像均进行波段合成、几何精纠正、图像切割等预处理,采用面向对象方法进行遥感影像土地利用分类获得 3 期土地覆盖数据,在此基础上参照《土地覆被遥感分类学》,结合相关研究成果^[31-32],对研究区生态系统类型进行判定和分析,划分出农田、森林、草地、水域、裸土和城市 6 类生态系统。(2) NPP 数据:来源于美国国家航空航天局(NASA)EOS/MODIS 数据产品的 MODIS17 Q1 数据(<http://e4ft101.cr.usgs.gov>),空间分辨率为 1 km×1 km。(3) NDVI 数据:来自于上述产品的 MODIS13 Q1 数据,空间分辨率为 250 m×250 m,时间分辨率为 16 d。以上相关数据处理在 ArcGIS 10.2 和 ENVI 4.8 环境中完成,所用数据均转成统一的双标准纬线等面积圆锥(Albers)投影,采用的椭球体为 Krasovsky 椭球体。(4) 人口、经济数据:本研究涉及的人口、经济等数据来自相应年份的《重庆市统计年鉴》、《重庆市国民经济和社会发展统计公报》、重庆都市区各区统计年鉴,以及重庆市统计局创建的“重庆数据”公共统计数据库和其他相关文献。

2 结果与分析

2.1 生态系统类型时空变化特征

研究区生态系统类型主要以森林和农田为主(表 1),两者共占研究区面积的 78%以上。2000—2015 年,农田、森林和裸土均有不同程度减少,其中农田减少最多,为 496.23 km²;城市生态系统面积从 230.10 km²增加至 749.87 km²,增幅高达 225.90%。从相互间转化来看(表 2),研究时段内农田转出强度最大,共转出 496.33 km²,分别向城市和森林转化 347.10 km²,91.91 km²;其次是森林,共转出 212.11 km²,分别向城市和水域转化 174.11 km²,27.80 km²;转入强度最大的是城市生态系统,主要由农田和森林转化而来。

表 1 重庆都市区 2000—2015 年生态系统类型变化

生态系统		农田	森林	草地	水域	裸土	城市
2000 年	面积/km ²	2323.01	2573.09	225.91	109.25	7.18	230.10
	占比/%	42.48	47.05	4.13	2.00	0.13	4.21
2010 年	面积/km ²	2084.31	2477.96	254.43	147.20	3.68	500.96
	占比/%	38.11	45.31	4.65	2.69	0.07	9.16
2015 年	面积/km ²	1826.78	2454.38	262.07	175.41	0.01	749.87
	占比/%	33.41	44.88	4.79	3.21	0.00	13.71
2000—2015 年	变化量/km ²	−238.70	−95.14	28.52	37.95	−3.50	270.86
	变化率/%	−10.28	−3.70	12.63	34.74	−48.72	117.72
2010—2015 年	变化量/km ²	−257.53	−23.57	7.64	28.21	−3.68	248.91
	变化率/%	−0.12	−0.01	0.03	0.19	−1.00	0.50
2000—2015 年	变化量/km ²	−496.23	−118.71	36.17	66.16	−7.18	519.78
	变化率/%	−21.36	−4.61	16.01	60.56	−99.91	225.90

表 2 重庆都市区 2000—2015 年生态系统类型转移矩阵

生态系统		2015 年/hm ²					
		农田	森林	草地	水域	裸土	城市
2000 年/ hm ²	农田	182559	9191.04	3417.47	2315.07	0	34709.57
	森林	34.98	235990.84	984.89	2780.44	0	17411.02
	草地	0.46	143.45	21791.76	47.87	0	583.97
	水域	0.83	0.03	0.01	10918.28	0	0.60
	裸土	0.21	0.37	0.19	715.88	0.65	0.60
	城市	0.05	0.33	0.42	755.38	0	22240.95

2.2 生态系统服务价值量动态评估结果

研究时段内,ESV 总量从 278.51 亿元增加到了 297.71 亿元(表 3),呈轻微增加趋势,增幅为 6.89%。从构成情况来看,研究区 ESV 主要由森林和水域构成,分别为 170.28 亿元和 81.51 亿元,两者共占研究区 ESV 的 84%以上,其次为农田、草地和裸土。从各生态系统服务价值的变化来看,研究时段内森林、农田和裸土的 ESV 均有不同程度减少,而水域和草地 ESV 有一定程度的增加,其中,水域 ESV 量变化最大,价值从 50.77 亿元增加到了 81.51 亿元,增幅高达 60.56%。

从各生态系统服务类型来看,水文调节服务价值占研究区 ESV 的 26%以上(表 4),一直远高于其他服务类

型,其次为气候调节、土壤保持、气体调节、生物多样性、净化环境等功能。从各生态服务功能变化来看,食物生产、原料生产、气体调节等六项服务价值均有不同程度减少;生物多样性服务价值先小幅减少后小幅增加,但其价值增加量略小于减少量;而水源供给、净化环境、水文调节和美学景观服务价值却有不同程度增加,其中水文调节价值增加量最大,从 90.21 亿元增加到 112.32 亿元,增幅达 24.51%,这与重庆都市区水系发达、水资源丰富的区域特征密切相关。

根据生态系统服务价值密度显示(图 2),重庆都市区 ESV 呈现明显的空间分异特征,ESV 价值密度高值集中在“四山”山脊、长江和嘉陵江干流以及南部

桃子荡山等低山区域。ESV 价值密度增加集中在“四山”和“两江”干流,减少区域集中在西部缙云山与中梁山之间的槽谷平坝区,主要是由于近年来该区域内重庆大学城的快速建设,导致生态空间不断受到挤压;此外,中部都市核心区域 ESV 价值密度也显著减少,并逐渐朝南北方向延伸。从行政区划来看,ESV

价值较高的区县为巴南区、渝北区和北碚区,ESV 总量基本保持在 40 亿元以上;渝中区和大渡口区 ESV 价值相对较低,ESV 总量不足 10 亿元(表 5);2000—2015 年,除沙坪坝区 ESV 有减少外,其他各区 ESV 均有不同程度的增加,其中巴南区 and 南岸区增加最多,分别增加了 7.63 亿元和 4.44 亿元。

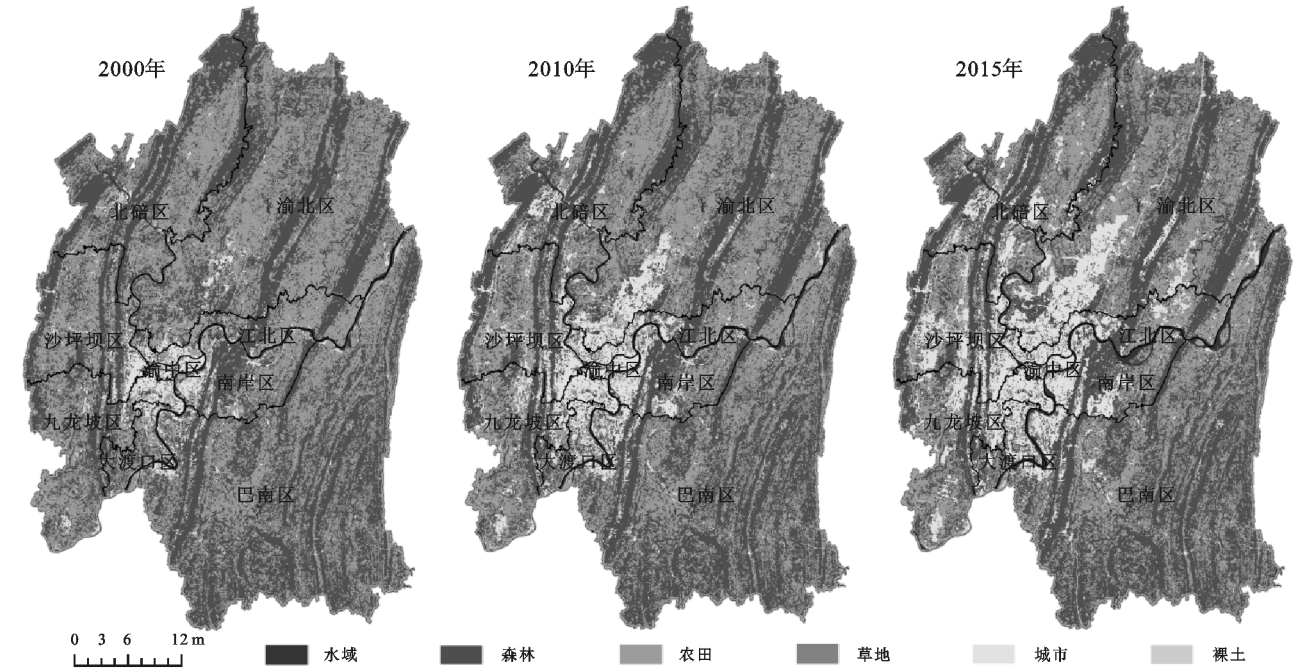


图 1 重庆都市区 3 期生态系统类型分布

表 3 重庆都市区 2000—2015 年生态系统服务价值变化

生态系统	生态系统服务价值/(10 ⁸ 元)			变化率/%		
	2000 年	2010 年	2015 年	2000—2010 年	2010—2015 年	2000—2015 年
农田	34.12	30.62	26.83	−10.26	−12.38	−21.37
森林	177.16	171.21	170.28	−3.36	−0.54	−3.88
草地	16.46	18.53	19.09	12.63	3.00	16.01
水域	50.77	68.40	81.51	34.74	19.17	60.56
裸土	0.0053	0.0027	0.00000048	−48.72	−99.82	−99.91
城市	0	0	0	0	0	0
合计	278.51	288.77	297.71	3.68	3.10	6.89

表 4 重庆都市区 2000—2015 年各类型生态系统服务价值变化

生态系统 服务类型	生态系统服务价值/(10 ⁸ 元)			变化率/%		
	2000 年	2010 年	2015 年	2000—2010 年	2010—2015 年	2000—2015 年
食物生产	11.62	10.77	9.92	−7.28	−7.89	−14.59
原料生产	8.24	7.91	7.62	−3.95	−3.70	−7.50
水源供给	−1.08	0.91	2.39	183.90	162.57	320.30
气体调节	25.74	24.76	24.07	−3.80	−2.80	−6.49
气候调节	59.19	58.01	57.75	−1.99	−0.45	−2.43
净化环境	19.69	20.03	20.47	1.76	2.18	3.98
水文调节	90.21	102.60	112.32	13.73	9.48	24.51
土壤保持	28.79	27.93	27.26	−2.97	−2.42	−5.31
维持养分循环	2.96	2.81	2.69	−5.12	−4.50	−9.39
生物多样性	22.82	22.65	22.74	−0.74	0.40	−0.35
美学景观	10.34	10.37	10.49	0.32	1.14	1.46

表 5 不同行政区 2000—2015 年生态系统服务价值及价值密度

评价单元	2000 年		2010 年		2015 年		变化量/10 ⁸ 元		
	价值密度/ (10 ⁶ 元·km ⁻²)	ESV/ (10 ⁸ 元)	价值密度/ (10 ⁶ 元·km ⁻²)	ESV/ (10 ⁸ 元)	价值密度/ (10 ⁶ 元·km ⁻²)	ESV/ (10 ⁸ 元)	2000—2010 年	2010—2015 年	2000—2015 年
巴南区	5.17	94.85	5.36	98.27	5.59	102.48	3.42	4.21	7.63
北碚区	5.32	40.11	5.58	42.10	5.65	42.62	1.99	0.52	2.51
大渡口区	5.74	5.90	5.72	5.88	6.44	6.62	-0.02	0.74	0.72
江北区	6.11	13.02	6.27	13.36	6.73	14.33	0.34	0.97	1.31
九龙坡区	4.74	20.47	4.84	20.91	4.90	21.15	0.44	0.24	0.68
南岸区	6.06	15.95	6.53	17.18	7.75	20.39	1.23	3.21	4.44
沙坪坝区	4.55	18.04	4.68	18.53	4.49	17.78	0.49	-0.75	-0.26
渝北区	4.78	69.47	4.87	70.73	4.95	71.87	1.26	1.14	2.4
渝中区	7.17	1.70	7.80	1.85	8.44	2.00	0.15	0.15	0.3

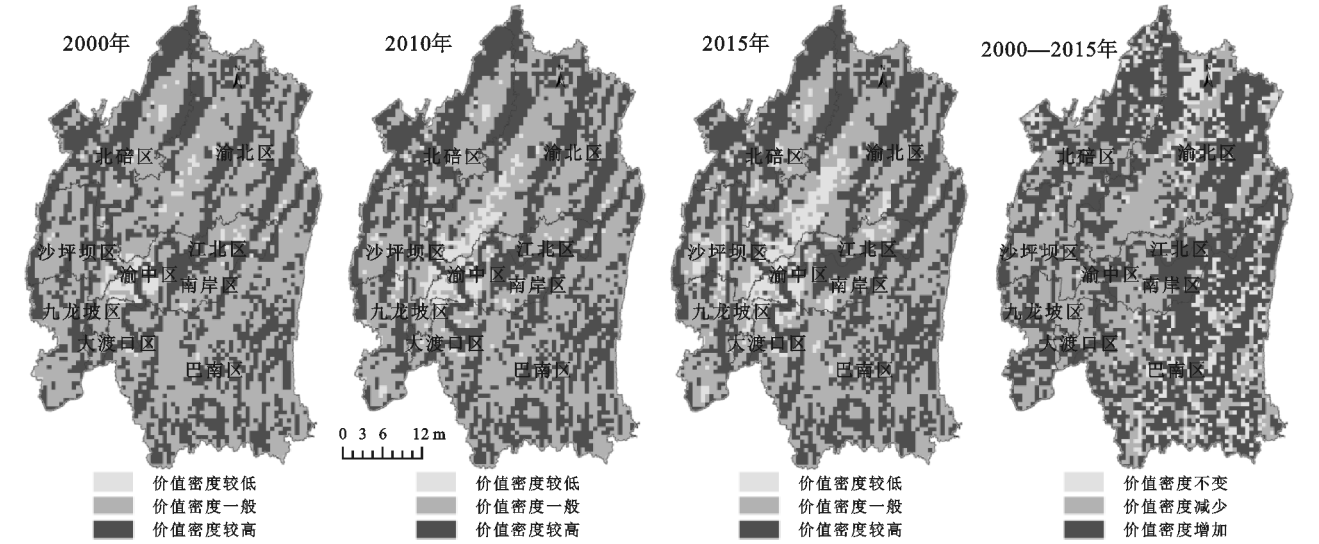


图 2 重庆都市区 2000—2015 年生态系统服务价值密度变化

2.3 生态系统服务价值变化驱动力分析

回归模型表明(表 6),重庆都市区 ESV 与城镇化率 X_3 (人口因素)呈显著负相关,与林业生产总值 X_{10} (经济因素)呈显著正相关,说明合理调控社会经济结构可有效提升重庆都市区 ESV。城镇化是一个综合复杂的变革过程,涉及人口的迁徙流动、生产生活方式改变、产业与经济结构的变化等方面。快速城镇化往往伴随城市生态系统激增,以及大量农田和森林生态系统的消失,这无疑会引起生态系统服务价值负效应;此外,林业生产总值与森林生态系统具有一致性,森林作为研究区的主要景观类型和服务价值的主要提供类型,其面积的增加、质量的提升以及服务功能的优化必定会带来 ESV 的增长。

从各生态系统服务类型来看,工业总产值是供给服务价值和调节服务价值的第二驱动因素,且与二者呈显著负相关,工业的快速发展造成耕地大量减少和城市污水量迅速增加,从而影响供给服务和调节服务价值。林业生产总值是支持服务的第二驱动因素,且

两者显著正相关,突出了森林对支持服务价值维持在高水平的重要性。城镇居民人均总收入是文化服务价值的第二驱动因素,且两者显著正相关,城镇居民人均总收入可以反映一个区域经济发展水平、居民生活水平,收入增加会刺激文化服务需求,进而提升文化服务价值。

表 6 重庆都市区生态系统服务价值回归模型

生态系统服务价值	回归模型
生态系统服务总价值	$Y = -9.522 \times 10^7 X_3 + 1.176 \times 10^7 X_{13} + 1.914 \times 10^{10}$
供给服务价值	$Y_1 = -1.109 \times 10^7 X_3 - 6.178 \times 10^3 X_{11} + 9.227 \times 10^8$
调节服务价值	$Y_2 = -9.842 \times 10^7 X_3 - 1.211 \times 10^5 X_{11} + 1.048 \times 10^8$
支持服务价值	$Y_3 = -1.377 \times 10^7 X_3 + 1.08110^4 X_{13} + 6.667 \times 10^9$
文化服务价值	$Y_4 = -5.160 \times 10^5 X_3 + 3.72510^4 X_5 + 1.067 \times 10^9$

注: Y_m 为服务价值; X_3 为城镇化率; X_5 为城镇居民人均总收入; X_{11} 为工业总产值; X_{13} 为林业生产总值。

3 结论与讨论

本研究以“中国生态系统单位面积生态服务价值当量”表为基础,用农田粮食单位面积产量比值、森林

生物量和植被覆盖度作为地区修订系数,综合分析重庆都市区 ESV 时空演变规律,并揭示其变化的主要影响因素。结果表明:(1) 2000—2015 年,研究区 ESV 呈持续轻微增加趋势,主要源于水域 ESV 显著增加,说明三峡大坝蓄水后,水域面积大幅增加,使研究区 ESV 明显上升;但另一方面,由于城市生态系统面积呈倍数增长,侵占了大量农田和森林,导致 ESV 大量流失。(2) 从生态服务功能来看,研究时段内水文调节服务价值占总价值的 26% 以上,且其价值增加量最大,主要原因是水域水文调节服务价值当量远大于其他服务,且随水域面积增长而增加,为研究区 ESV 上升提供了重要支撑。(3) 研究区内价值密度呈南部、北部、东部地区高,中部、西部地区低的分布格局,增加主要集中在巴南区 and 南岸区,减少地区域主要集中在沙坪坝区;主要与南部、北部、东部森林覆盖率普遍较高有关,优质的生态资源带来了较高的生态服务价值,而中西部地区主要以低价值生态系统城市和农田分布为主,少量水域覆盖优势也无法提升区域整体 ESV 至高水平。(4) 驱动力分析表明,重庆都市区 ESV 与城镇化率呈显著负相关,与林业生产总值呈显著正相关,说明合理调整产业空间布局、优化升级产业结构、加大建设用地管控力度可有效缓解城镇化发展造成的生态负效应。此外,加快实施“四山”地区各类生态修复重点工程,大力开展森林抚育和低效林改造以及适度发展生态旅游,是在“共抓大保护,不搞大开发”的前提下,使重庆都市区 ESV 维持在一个较高水平的有效手段。

对 ESV 的评估,众多学者提出了不同的计算方法,但以谢高地基于 Costanza 的研究成果提出的计算方法被广泛接受和认可。本研究与张艳军等^[27]开展的重庆市 ESV 的研究结果趋于一致,说明本研究价值当量修订是可行的,与采用谢高地 2007 年提出价值表计算的张凤太等^[33]和张骞等^[34]的研究结果相差较大,主要在于谢高地 2015 年的研究成果中极大的提升了水域生态系统服务价值当量,而重庆都市区水系发达、水资源丰富,所以结果间差异较大。此外,需指出的是,谢高地提出的价值当量表并不涉及城市生态系统,本研究对城市各项服务价值当量赋值为 0,但实际上,一方面城市生态系统的负面影响会波及到近自然、半自然生态系统,导致这些生态系统的服务功能无法正常发挥,进而引起 ESV 降低;另一方面,城市生态系统中的公园、绿地等对生态系统具有正向影响,有的甚至具有较高 ESV。因此,只从

自然生态系统本身来考虑整个生态系统的服务价值是不全面的,应将城市生态系统纳入 ESV 计算范畴,但如何对其科学定量计算仍需进一步研究。

驱动机制研究有定性分析和定量分析两种方法,本研究采取的是定量分析法,通过相关分析剔除存在共线性以及与生态系统服务相关性低的数据后,选取相关性高的指标对 ESV 进行逐步回归分析,模型及相关待估参数均达到显著水平,结果显示城镇化率与重庆都市区 ESV 呈显著负相关,林业总产值与重庆都市区 ESV 呈显著正相关,与姚小微等^[35]运用双变量空间自相关分析得出的“空间城镇化与生态系统服务价值呈负相关”一致。但必须指出的是,本研究纳入驱动力分析的仅包含人口和经济两方面的量化指标,未纳入对社会发展影响巨大的政策措指标,评价结果会有一定偏差,如何更科学、更全面的量化 ESV 驱动力分析值得进一步探索。

当量因子法是当前比较常用的 ESV 评估方法,尤其是大尺度区域的 ESV 评估。本研究虽然对“单位面积生态系统服务价值当量表”进行了系数修正,为重庆都市区 ESV 时空演变分析提供了可行途径。但是,由于生态系统本身的异质性、复杂性和动态性,在不同区域存在结构和质量状况的差异,表现出来的 ESV 存在明显差别。此外,在系数修正方面,本研究考虑了农田粮食单位面积产量比值、生物量(用净初级生产力代替)、植被覆盖度 3 个因素,进行了研究区域的 ESV 修正,价值系数的调整对于森林、农田和草地具有良好效果,但对水域可适性较差,仍需研究更为科学、准确的计算方法,尤其是在 ESV 的空间转换和尺度效应方面,仍需开展深入的研究。本研究所采用的研究方法,虽有上述不足,但并没有影响研究的结论。

参考文献:

- [1] 高吉喜.区域生态资产评估:理论、方法与应用[M].北京:科学出版社,2013.
- [2] 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[J].应用生态学报,2014,25(3):883-891.
- [3] Grossman G M, Krueger A B. Economic Growth and the Environment[J]. Nber Working Papers, 1994,110(2):353-377.
- [4] Costanza R, D'Arge R, De Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. World Environment, 1997,387(6630):253-260.
- [5] Daily G C. Nature's services:Societal dependence on natural ecosystems[M]. Washington D C:Island Press, 1997.
- [6] Kreuter U P, Harris H G, Matlock M D, et al. Change

- in ecosystem service values in the San Antonio area, Texas[J]. *Ecological Economics*, 2001, 39(3): 333-346.
- [7] MA (Millennium Ecosystem Assessment). *Ecosystems and human well-being* [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [8] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, et al. Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, 319(5864): 756-760.
- [9] Costanza R, de Groot R, Sutton P, et al. Changes in the global value of ecosystem services[J]. *Global Environmental Change*, 2014, 26: 152-158.
- [10] 欧阳志云, 王效科. 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[J]. *生态学报*, 1999, 19(5): 607-613.
- [11] 张明军, 周立华. 对生态系统服务价值问题的思考[J]. *国土与自然资源研究*, 2004, 1(1): 48-49.
- [12] 王燕, 高吉喜, 王金生, 等. 生态系统服务价值评估方法述评[J]. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(S): 337-339.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 陈阳, 张建军, 杜国明, 等. 三江平原北部生态系统服务价值的时空演变[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6157-6164.
- [16] 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.
- [17] 邓伟, 刘红, 李世龙, 等. 重庆市重要生态功能区生态系统服务动态变化[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 250-258.
- [18] 陈美球, 赵宝苹, 罗志军, 等. 基于 RS 与 GIS 的赣江上游流域生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(9): 2761-2767.
- [19] 王爽, 丁建丽, 王璐, 等. 基于遥感的艾比湖流域近 20 年生态服务价值对土地利用变化的响应[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(5): 144-149.
- [20] 王金龙, 杨伶, 张大红, 等. 京冀水源涵养林生态效益计量研究—基于森林生态系统服务价值理论[J]. *生态经济: 中文版*, 2016, 32(1): 186-190.
- [21] 陈春阳, 陶泽兴, 王焕炯, 等. 三江源地区草地生态系统服务价值评估[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(7): 978-984.
- [22] 杨怀宇, 王春晓, 郭宗香, 等. 池塘养殖生态系统空气调节服务价值的实证研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(5): 432-438.
- [23] 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.
- [24] 殷莎, 赵永华, 韩磊, 等. 秦岭森林生态系统服务价值的时空演变[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3777-3786.
- [25] 刘春霞, 李月臣, 罗茜. 重庆市都市区土地利用/覆盖变化的生态响应研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(1): 111-115.
- [26] 王燕, 高吉喜, 邹长新, 等. 生态保护红线划定及其生态资产变化研究[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(6): 2369-2376.
- [27] 张艳军, 官冬杰, 翟俊, 等. 重庆市生态系统服务功能价值时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(3): 1169-1177.
- [28] 罗盛锋, 闫文德. 广西北部湾沿岸地区生态系统服务价值变化及其驱动力[J]. *生态学报*, 2018, 38(9): 260-271.
- [29] 孙洪波, 杨桂山, 万容容, 等. 昆山生态系统服务价值变化及其驱动力差异性分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2009, 18(8): 759-764.
- [30] 高凌寒, 赵鹏祥, 张晓莉, 等. 西宁市主城区土地利用时空变化驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(2): 234-239.
- [31] 曾志远, 潘贤章. 数字卫星图像分类和航空像片目视判读所确定的地面覆盖和土地利用类型面积的初步比较: 以长江三峡地区为例[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 810-814.
- [32] 刘金勇, 孔繁花, 尹海伟, 等. 济南市土地利用变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1231-1236.
- [33] 张凤太, 苏维词, 赵卫权. 基于土地利用/覆被变化的重庆城市生态系统服务价值研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2008, 24(3): 21-25.
- [34] 张骞, 高明, 杨乐, 等. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575.
- [35] 姚小微, 曾杰, 李旺君. 武汉城市圈城镇化与土地生态系统服务价值空间相关特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(9): 249-256.