

滇中城市群绿色空间生态系统服务价值 时空演变及驱动分析

潘悦¹, 王锦¹, 李婧熹¹, 刘敏², 魏晓燕³, 支林蛟⁴

(1.西南林业大学 园林园艺学院, 昆明 650201; 2.昆明理工大学 建筑与城市规划学院, 昆明 650550;

3.云南省测绘资料档案馆(云南省基础地理信息中心), 昆明 650034; 4.国家林业和草原局昆明勘察设计院, 昆明 650031)

摘要:对滇中城市群绿色空间生态系统服务价值(Ecosystem Service value, ESV)进行时空演变及驱动因素的探析, 有利于了解区域生态系统服务空间差异, 有助于规划者从宏观层面掌握滇中城市群的自然资源情况, 合理地制定规划建设策略。研究以滇中城市群49个区、县、市作为研究单元, 对2000年、2010年、2019年3期的ESV进行量化, 并收集“自然—社会—经济”维度的驱动因子, 采用主成分分析与地理加权回归探讨“自然—社会—经济”因素对滇中城市群绿色空间ESV的驱动作用。结果表明:(1)2000—2019年滇中城市群绿色空间的ESV总体呈现增加状态, 一级服务类型中, 供给、支持和文化服务小幅度上升, 调节服务小幅度下降, 二级服务类型中, 气候与水文调节对生态系统服务功能的贡献最大, 其次为土壤保持、生物多样性和气体调节;(2)3期ESV空间分布特征较为一致, 呈现城市群边缘地区的ESV高于城市群中部地区的ESV的特征;(3)社会因素对滇中城市群绿色空间的ESV的时空演变影响最大, 其次为自然因素和经济因素, 主要驱动因子为城镇化率、人均GDP、人口密度、森林覆盖率、第二产业占比。(4)城镇化率、人口密度及第二产业占比呈现两极化驱动特征; 人均GDP呈现负向驱动特征; 森林覆盖率呈现正向驱动特征。综上, 近20年滇中城市群绿色空间的ESV增加, 其变化主要受社会因素影响。研究可为滇中城市群的可持续发展提供参考。

关键词:滇中城市群; 绿色空间; 生态系统服务价值; 驱动因子; 地理加权回归

中图分类号:P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2023)02-0352-09

Spatial and Temporal Evolution and Driving Analysis of Green Space Ecosystem Service Value of Urban Agglomeration in Central Yunnan

PAN Yue¹, WANG Jin¹, LI Jingxi¹, LIU Min², WEI Xiaoyan³, ZHI Linjiao⁴

(1.School of Horticulture, Southwest Forestry University, Kunming 650201, China; 2.School of

Architecture and Urban Planning, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650550, China;

3.Yunnan Surveying and Mapping Data Archives /Yunnan Basic Geographic Information Center, Kunming 650034, China;

4.Kunming Survey and Design Institute, National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650031, China)

Abstract: The analysis of the temporal and spatial evolution and driving factors of the green space ecosystem service value (ESV) of Central Yunnan Urban Agglomeration is conducive to understanding the spatial differences of regional ecosystem services, helps planners master the natural resources of Central Yunnan Urban Agglomeration from the macro level, and reasonably formulates planning and construction strategies. Taking 49 districts, counties and cities of Central Yunnan Urban Agglomeration as research units, we quantified the ESV in three periods of 2000, 2010 and 2019, collected the driving factors of ‘nature society economy’ dimension, and used principal component analysis and geographic weighted regression to explore the

收稿日期:2021-12-29

修回日期:2022-01-22

资助项目:云南省农业联合资助项目(2018FG001-099);国家自然科学基金项目(42061074, 41701470)

第一作者:潘悦(2000—),女,云南昭通人,硕士研究生,研究方向为大地景观规划与生态修复。E-mail:1720323695@qq.com

通信作者:刘敏(1987—),女,湖南冷水江人,博士,博士后,副教授。研究方向为绿色基础设施理论,绿色空间优化,生态规划设计,生态修复。E-mail:minliu_facp@kust.edu.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

driving effect of ‘nature society economy’ factors on the green space ESV of Central Yunnan Urban Agglomeration. The results show that: (1) from 2000 to 2019, the ESV of green space in Central Yunnan Urban Agglomeration generally increased; in the primary service types, the supply, support and cultural services increased slightly, and the regulation services decreased slightly; In the secondary service types, climate and hydrological regulation contributed the most to the ecosystem service function, followed by soil conservation, biodiversity and gas regulation; (2) the spatial distribution characteristics of ESV in the three phases were relatively consistent, showing that the ESV in the marginal area of urban agglomeration was higher than that in the central area of urban agglomeration; (3) social factors had the greatest impact on the temporal and spatial evolution of ESV in green space of urban agglomeration in Central Yunnan, followed by natural factors and economic factors; the main driving factors were urbanization rate, per capita GDP, population density, forest coverage and the proportion of secondary industry; (4) the urbanization rate, population density and the proportion of secondary industry showed the characteristics of two-level driving; per capita GDP showed negative driving characteristics; the forest coverage showed positive driving characteristics. In summary, the ESV of green space in the Central Yunnan Urban Agglomeration has increased in the last 20 years, and its changes are mainly influenced by social factors. This study can provide a reference for the sustainable development of the Central Yunnan Urban Agglomeration.

Keywords: Central Yunnan Urban Agglomeration; green space; ecosystem service value; driving factors; geographically weighted regression

生态系统服务指人类以生存为目的从生态系统中获取的利益^[1],这些利益反映在生态系统自带的条件和过程中^[2],包括文化、供给、支持和调节服务^[3]。近年国内外对生态系统服务价值(ESV)进行了广泛研究。Costanza 等^[4]首次从全球的角度将 ESV 进行量化,为 ESV 的评估奠定了基础。国内欧阳志云等^[5]探讨了 ESV 的内涵以及评估方法;谢高地等^[6]在 Costanza 的基础上,结合 700 位有生态学背景的专家的经验,提出了一种新的 ESV 评估体系,并于 2015 年的研究中对此评估体系进行了改进^[7]。此方法用土地利用面积对 ESV 进行估算,具有直观、数据易获取的优点,能在较短时间内获取较为精准的结果,适用于区域尺度的 ESV 评估^[6-9]。从研究尺度上看,此方法被大量学者广泛用于全国^[8]、区域^[10]、省市^[11]、城市群^[12]、县域等^[13]不同空间尺度的 ESV 估算,并结合土地利用^[14]、生态安全格局等^[15]进行研究,还进一步研究探讨了 ESV 时空变化的驱动机制^[16-17]等。从评估对象上看,学者们针对森林^[18]、草地^[19]、湿地^[20]、农田等^[21]进行量化评估。目前对城市群的 ESV 时空演变与驱动机制进行研究^[22-24]已经成为热点。

城镇化的推进和经济的发展,使城市出现环境污染等城市病。绿色空间作为人类赖以生存的基础^[25]和生态系统服务的主要供给者^[26],其泛指研究区内一切生长植物的区域^[27]。绿色空间囊括了沼泽地、林地、草地、耕地和水库水面等土地利用类型^[28]。近年来,国内外对绿色空间的价值尤为重视,例如:Pulighe^[29]对绿色空间 ESV 的内涵及指标进行梳理;向勤等^[30]基于

城市化背景对乌鲁木齐绿色空间的 ESV 进行研究。从绿色空间的视角进行 ESV 评估作为人类追求可持续发展的重要工具,现已成为了生态学、风景园林学、地理学等交叉跨学科所关注的前沿领域。研究对绿色空间的 ESV 进行定量化分析及驱动因素探究,有利于发现绿色空间生态系统的重要性及其空间分异^[31],为实现区域可持续发展提供参考。

滇中城市群是我国对接东南亚国家及南亚国家的区域中心,其参与国内外区域合作与竞争,并且带动云南省社会经济发展,是云南省开发强度较大的区域。研究滇中城市群绿色空间的演变及驱动机制,有利于滇中城市群的健康人居环境建设。因此,本文对滇中城市群 2000—2019 年绿色空间的 ESV 进行量化及分析,构建“自然—社会—经济”驱动因素指标体系,采用主成分分析与地理加权回归对影响滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动因素进行探析及空间分异分析,探讨自然、社会、经济要素对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动。对滇中城市群的生态环境保护和实现区域可持续发展具有重要的借鉴和指导意义,为今后滇中城市群的发展规划提供依据。

1 研究区概况

滇中城市群地理区位条件独特、环境优质、气候优越,属于低纬度高原季风气候,云南省 2/3 的坝区集中于滇中区域,为高原湖盆喀斯特地貌,由山间盆地和山地组成。按照《滇中城市群规划(2016—2049 年)》,从州

市尺度看,其包括 4 个州市及红河州 7 个县市。从区县尺度看,由 49 个区、县、市组成,是西部大开发的重点区域和国家重点关注的城市群之一。滇中城市群国土面积占云南省 29%,人口约占 44%。近年来,滇中城市群的城镇化发展快速,其面临着生态环境保护、城镇化发展、实现区域可持续发展的压力。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本研究用于提取土地利用信息的影像数据为滇中城市群 2000 年、2010 年及 2019 年空间分辨率为 30 m,云量小于 5% 的影像数据^[27]。其来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。本研究的分类体系参考了现有研究^[27,30,32-33]及《土地利用现状分类(GB/T21010—2017)》,将滇中城市群的土地利

用划分为两级分类,一级类包括绿色空间及非绿空间,其中绿色空间包括水域、耕地、灌草地及林地 4 个二级类,非绿空间包括未利用地及建设用地 2 个二级类(表 1 及图 1)。研究从相应年份的《全国农产品成本收益资料汇编》和《云南省统计年鉴》中收集研究区粮食单位面积产量、粮食价格、森林覆盖率、城镇化率、人均 GDP 等社会经济数据。

表 1 滇中城市群土地利用类型划分表

一级类	二级类	空间类型含义
绿色空间	耕地	用于种植农作物的用地
	灌草地	种植草本以及矮小灌木的用地
	林地	植被覆盖较好的用地
	水域	一切水体空间
非绿空间	未利用地	石砾地、裸地以及未建成用地等
	建设用地	交通道路、居民点、工业用地等硬质空间

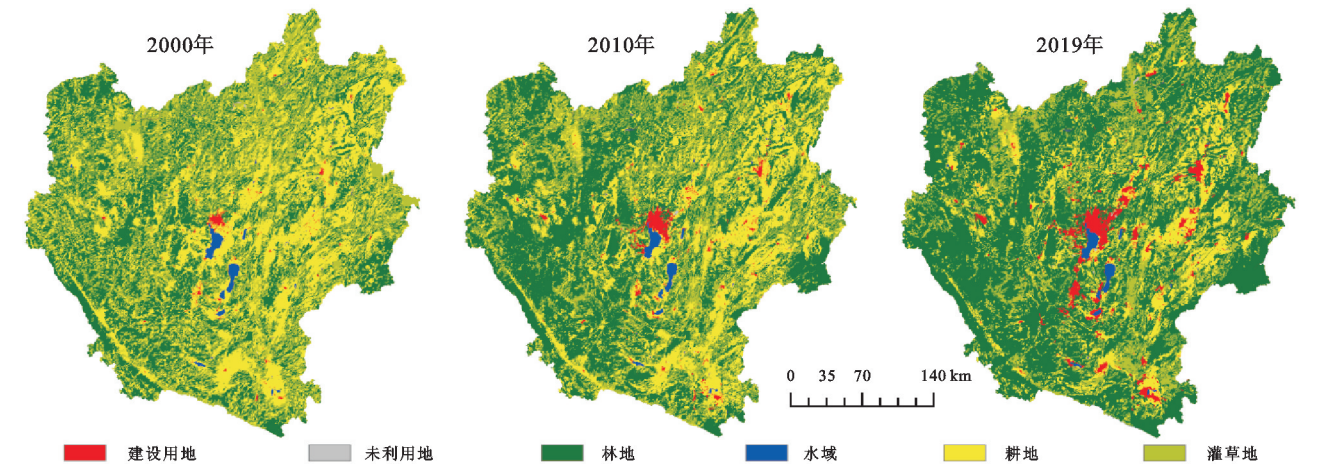


图 1 滇中城市群土地利用类型

2.2 研究方法

2.2.1 当量因子法 本研究采用谢高地等^[8,34]学者的价值评估模型对研究区进行价值的估算,但由于当量因子反映的是全国 ESV 的平均水平,所以对当量因子表根据研究区的情况进行修订。为除去通货膨胀的影响,选取滇中城市群 2000—2019 年主要农作物的平均价格为基础数据。本研究以研究时间内研究区的主要粮食(小麦、玉米和稻谷)的年平均产量(4 409.30 kg/hm²)为基准单产,由于小麦的粮食价格不全,以研究时间内的玉米和稻谷的粮食平均价格作为主要粮食的平均价格(2.07 元/kg)。计算出滇中城市群的单位面积农田粮食生产的经济价值量为 1 303.89 元/hm²。将此经济价值量与当量因子相乘得出研究区生态系统服务价值系数。滇中城市群 ESV 计算模型如下:

$$ESV_g = A_g \times e \frac{PO}{7} \tag{1}$$

$$ESV_z = \sum ESV_g \tag{2}$$

式中:ESV_g表示第 *g* 类土地利用类型的生态系统服务价值;ESV_z表示总生态系统服务价值;*e* 表示当量因子;*P* 表示研究区的主要粮食的平均价格;*O* 表示研究区的平均粮食产量;*A_g*为第 *g* 类土地利用类型的面积。

2.2.2 主成分分析法 研究选用主成分分析法对影响滇中城市群绿色空间的 ESV 的驱动因素进行分析。主成分分析利用降维的形式用少数几个主成分概括多个驱动因子,这些主成分之间互不相关,但尽可能反映原来指标的信息^[35-38]。其数学模型如下:

$$\begin{cases} K_1 = d_{11}e_1 + d_{12}e_2 + \cdots + d_{1T}e_T \\ K_2 = d_{21}e_1 + d_{22}e_2 + \cdots + d_{2T}e_T \\ \vdots \\ K_p = d_{p1}e_1 + d_{p2}e_2 + \cdots + d_{pT}e_T \end{cases} \tag{3}$$

式中:*d* 表示线性组合的系数;*e*₁,*e*₂,⋯,*e_T*为各驱动因子;*K*₁,*K*₂,⋯,*K_p*表示驱动因子降维后的第一、第二、第 *p* 主成分。

原始数据中各个驱动因子有较好的线性相关关系是主成分分析使用的前提条件。主成分分析利用

KMO 检验和 Bartlett 球性检验来验证数据的适用性。KMO 取值为 0~1,值越接近 1 表示因子间的相关性越强,越适合做主成分分析^[39]。

2.2.3 地理加权回归 研究选择地理加权回归探究驱动因子对滇中城市群绿色空间的 ESV 在空间上的影响机制。普通回归模型往往忽略数据的空间异质性,可能会掩盖变量间的局部特性,造成误差^[40]。而地理加权回归将空间权重矩阵应用在线性回归模型中,能较好地展现出空间异质性。其表达式如下:

$$W_i=\beta_0(E_i,F_i)+\sum_{n=1}^k\beta_n(E_i,F_i)Z_{ni}+Y_i \quad (4)$$

式中:(E_i,F_i)表示*i*点的地理坐标; $\beta_0(E_i,F_i)$ 是*i*点的回归常数; $\beta_n(E_i,F_i)$ 表示第*n*项驱动因子在(E_i,F_i)地理坐标上的加权回归参数; Z_{ni} 为*i*点第*n*项驱动因子在(E_i,F_i)地理坐标上的值; Y_i 为*i*点的算法残差。

表 2 滇中城市群 2000—2019 年绿色空间各生态系统服务价值

一级服务	二级服务	2000 年		2010 年		2019 年	
		生态系统 服务价值/亿元	占比/%	生态系统 服务价值/亿元	占比/%	生态系统 服务价值/亿元	占比/%
供给服务	食物生产	191.86	2.87	179.50	2.40	165.62	1.94
	原料生产	202.39	3.03	223.05	2.98	251.10	2.94
	水资源供给	−15.26	−0.23	24.89	0.33	73.92	0.86
	小计	378.99	5.67	427.44	5.71	490.64	5.74
调节服务	气体调节	682.13	10.20	747.47	9.99	835.62	9.79
	气候调节	1787.97	26.73	2033.30	27.18	2360.95	27.65
	净化环境	544.10	8.13	614.84	8.22	708.03	8.29
	水文调节	1445.64	21.61	1582.29	21.15	1768.25	20.71
	小计	4459.84	66.67	4977.90	66.54	5672.85	66.44
支持服务	土壤保持	777.33	11.62	868.43	11.60	989.18	11.58
	维持养分循环	70.36	1.05	74.94	1.00	81.40	0.95
	生物多样性	698.12	10.44	789.80	10.56	910.82	10.67
	小计	1545.81	23.11	1733.17	23.16	1981.40	23.20
文化服务	美学景观	304.02	4.55	343.20	4.59	394.81	4.62
	小计	304.02	4.55	343.20	4.59	394.81	4.62
总计		6688.66	100.00	7481.71	100.00	8539.70	100.00

3.1.2 区县尺度分析 3 期 ESV 空间分布特征较为一致,呈现出城市群边缘地区的绿色空间 ESV 显著高于城市群中部地区(图 2)。2000 年滇中城市群绿色空间的 ESV 高值区与中高值区主要分布于滇中城市群边缘地区,低值区与中低值区主要集中在滇中城市群中部区域,滇中城市群的边缘地区分布有中值区,但分布较分散。2010 年与 2019 年滇中城市群绿色空间的 ESV 高值区范围变大,滇中南部区域高值区明显增加。中低值区、中值区和中高值区数量减少,低值区仍然集中于昆明主城区。

由图 3 知,2000—2010 年滇中城市群南部部分

3 结果与分析

3.1 滇中城市群绿色空间 ESV 时空演变分析

3.1.1 城市群尺度分析 从整体数值上看(表 2),2000—2019 年滇中城市群绿色空间的 ESV 呈现增加趋势,共增加了 1 851.04 亿元。从服务类型看,一级服务类型中,调节服务与支持服务是滇中城市群绿色空间的核心生态系统服务功能,其次为供给和文化服务。供给、支持和文化服务呈现小幅度增加,而调节服务呈现小幅度下降,各一级服务类型所占比例变化幅度较小。二级服务类型中,气候调节与水文调节对生态系统服务功能的贡献最大,3 期占比均大于 20%。其次为土壤保持、生物多样性和气体调节,其占比均在 10%左右。

区县的绿色空间 ESV 减少,其余区县市的绿色空间 ESV 均为增加。2010—2019 年滇中中北部区域少数区县的绿色空间 ESV 减少,其余区县均增大。2000—2019 年均呈现增加状态,滇中城市群东北部部分区县的增长量最大。

3.2 滇中城市群绿色空间 ESV 驱动因子分析

影响 ESV 变化的驱动因素有很多,主要包括自然、社会和经济因素^[22-24,41-42]。本文基于滇中城市群的基础资料,遵循综合性、数据可获取原则,从自然、社会、经济方面选择年降雨量(mm)、财政支出(亿元)、森林覆盖率(%)、城镇化率(%)、第二产业占比

(%)、人口密度(人/平方 km)、人均 GDP(元)、年平均气温(℃)8 项因子作为滇中城市群绿色空间 ESV 变化的驱动因子分析样本,并选择最邻近状态的 2019 年滇中城市群绿色空间 ESV 作为分析对象,对所选用的 8 项因子进行主成分分析,虽然 $KMO>0.5$ 通过检验^[20],但其主成分特征值 >1 的累积贡献率只

有 71%(表 3)。因此对所选因子进行组合式筛选,以 $KMO>0.5$,主成分特征值 >1 的累积贡献值 $\geq 75\%$ 为筛选条件^[43]。最终得出以年降雨量(mm)、第二产业占比(%)、森林覆盖率(%)、人口密度(人/平方 km)、城镇化率(%)、财政支出(亿元)、人均 GDP(元)的因子组合最符合筛选要求(见表 4)。

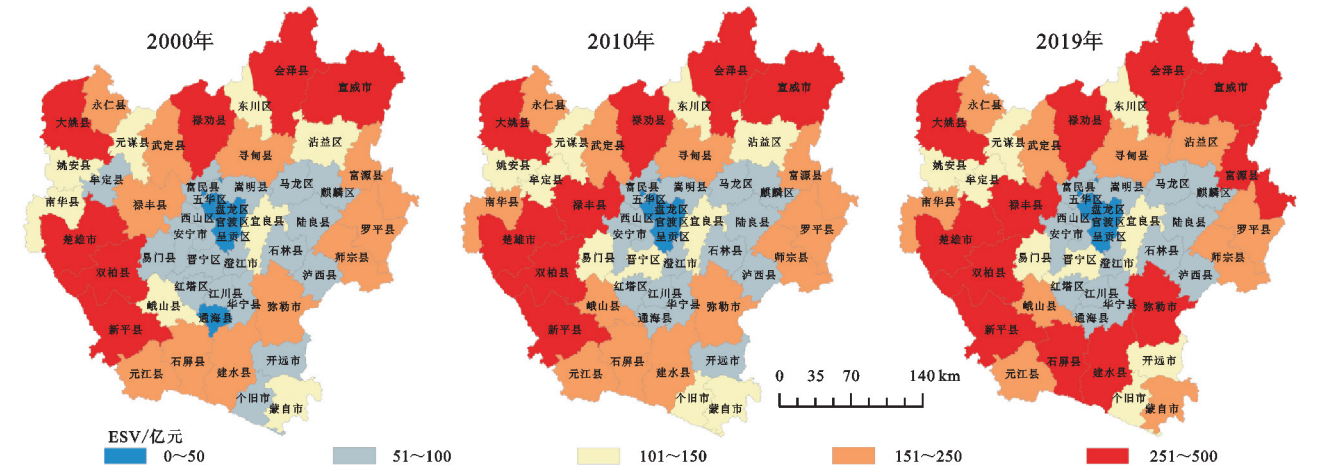


图 2 2000 年、2010 年、2019 年滇中城市群绿色空间 ESV 空间分布

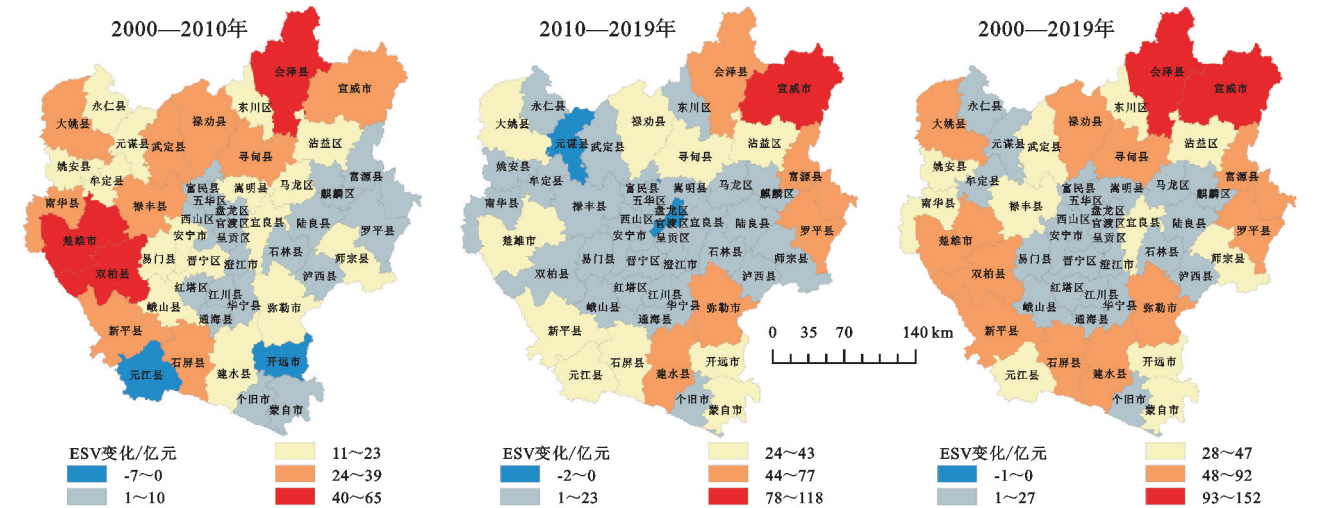


图 3 不同时间段滇中城市群绿色空间 ESV 价值变化

由表 4 和表 5 可知,主成分 1 贡献 40.922%,该主成分为主要影响因素,且主成分 1 主要在城镇化率、人均 GDP、人口密度 3 个因子上载荷较大,概括为社会因素。主成分 2 贡献 21.234%,该主成分为次要影响因素,主要与森林覆盖率有较大的相关性,概括为自然因素。主成分 3 贡献 14.303%,与第二产业占比相关,概括为经济因素。因此影响 2019 年滇中城市群绿色空间的 ESV 的驱动因素主要为社会因素,其次为自然和经济因素。主要驱动力为城镇化率、人均 GDP、人口密度、森林覆盖率、第二产业占比。

3.3 驱动因子与绿色空间 ESV 地理加权驱动结果与分析

利用 ArcGIS 中的地理加权回归工具对筛选后的 5 个主要驱动因子进行地理加权回归,在 ArcGIS

中将 5 个驱动因子地理加权回归的分析结果进行空间可视化(图 4—5),并进一步探索驱动因子的成因与驱动机制。

表 3 组合筛选前的因子解释的总方差						
成分	合计	初始特征值	累积%	合计	提取平方和	累积
		方差%			载体方差%	
1	2.891	36.137	36.137	2.891	36.137	36.137
2	1.697	21.207	57.344	1.697	21.207	57.343
3	1.112	13.897	71.241	1.112	13.897	71.241
4	0.957	11.961	83.202			
5	0.609	7.612	90.814			
6	0.394	4.919	95.733			
7	0.198	2.472	98.205			
8	0.144	1.795	100.000			

表 4 组合筛选后的因子解释的总方差

成分	合计	初始特征值 方差%	累积%	合计	提取平方和 载入方差%	累积
1	2.865	40.922	40.922	2.865	40.922	40.922
2	1.486	21.234	62.156	1.486	21.234	62.156
3	1.001	14.303	76.459	1.001	14.303	76.459
4	0.682	9.743	86.202			
5	0.609	8.699	94.901			
6	0.211	3.012	97.913			
7	0.146	2.087	100.000			

表 5 主成分载荷矩阵(组合筛选后)

原始变量	主成分 1	主成分 2	主成分 3
年降雨量	0.124	−0.752	0.255
人口密度	0.813	−0.102	−0.449
城镇化率	0.912	−0.106	−0.224
森林覆盖率	−0.070	0.765	−0.155
人均 GDP	0.893	0.244	−0.042
财政支出	0.614	−0.154	0.460
第二产业占比	0.421	0.481	0.669

如图 4、图 5A 所示,从驱动特征空间分布来看,滇中城市群城镇化率对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化特征。城镇化率在昆明主城区及其周边区域呈现负向驱动,以其为核心向外扩散呈现正向驱动。从驱动强度来看,以昆明主城区及周边区县为核心,向外驱动逐渐由负转为正,负向驱动逐渐减少,正向驱动逐渐增加。如图 4、图 5B 所示,从驱动特征空间分布来看,滇中城市群人均 GDP 对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现负向驱动。从驱动强度上看以滇中西北部为核心向外负向驱动强度逐渐增强,滇中东北部负向驱动强度最大。如图 4、图 5C 所示,从驱动特征空间分布来看,滇中城市群人口密度对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化特征,除了会泽县为正向驱动外,其余均为负向驱动。从驱动强度来看,会泽县的正向驱动较弱,以会泽县为核心向外扩散,负向驱动强度逐渐增强。如图 4、图 5D 所示,从驱动特征空间分布来看,滇中城市群森林覆盖率对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动均呈现正向驱动。从驱动强度来看,滇中城市群北部往南正向驱动逐渐增加,正向驱动强度最大的区县位于滇中边缘部分区县。如图 4、图 5E 所示,从驱动特征空间分布来看,滇中城市群第二产业占比对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化特征,滇中城市群的北部呈现负向驱动,东部、西部及南部呈现正向驱动。从驱动强度来看,昆明北部与楚雄北部几个区县为负向驱动,以负向驱动区县为中心向外扩散,正向驱动强度增加。

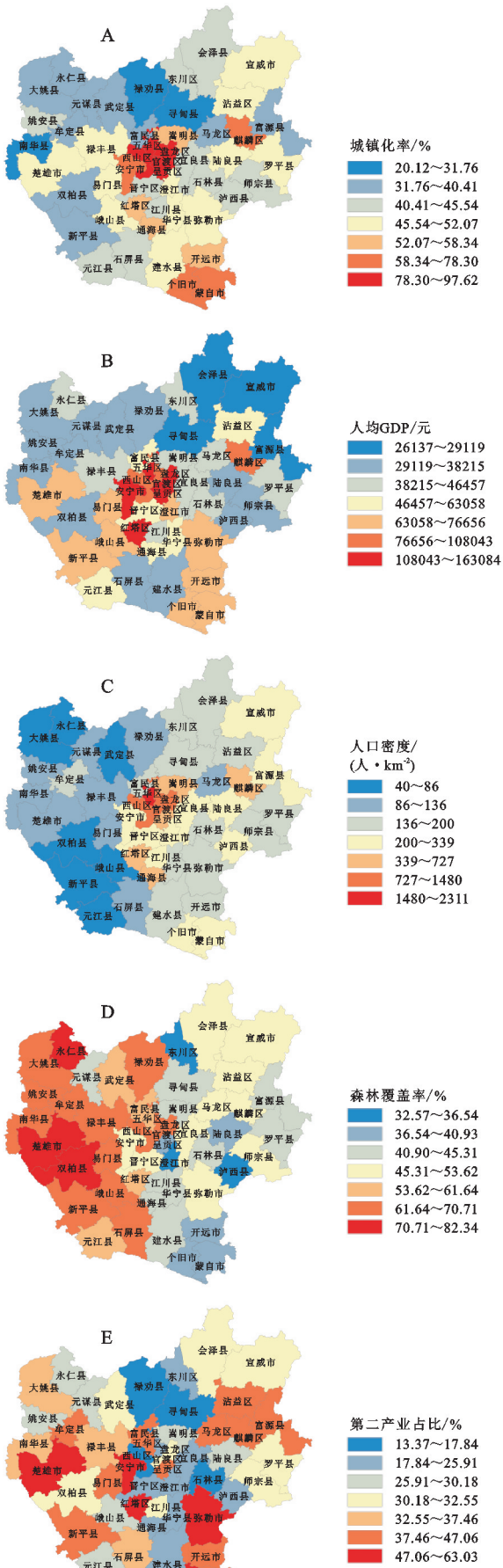


图 4 2019 年滇中城市群各驱动因子空间分布

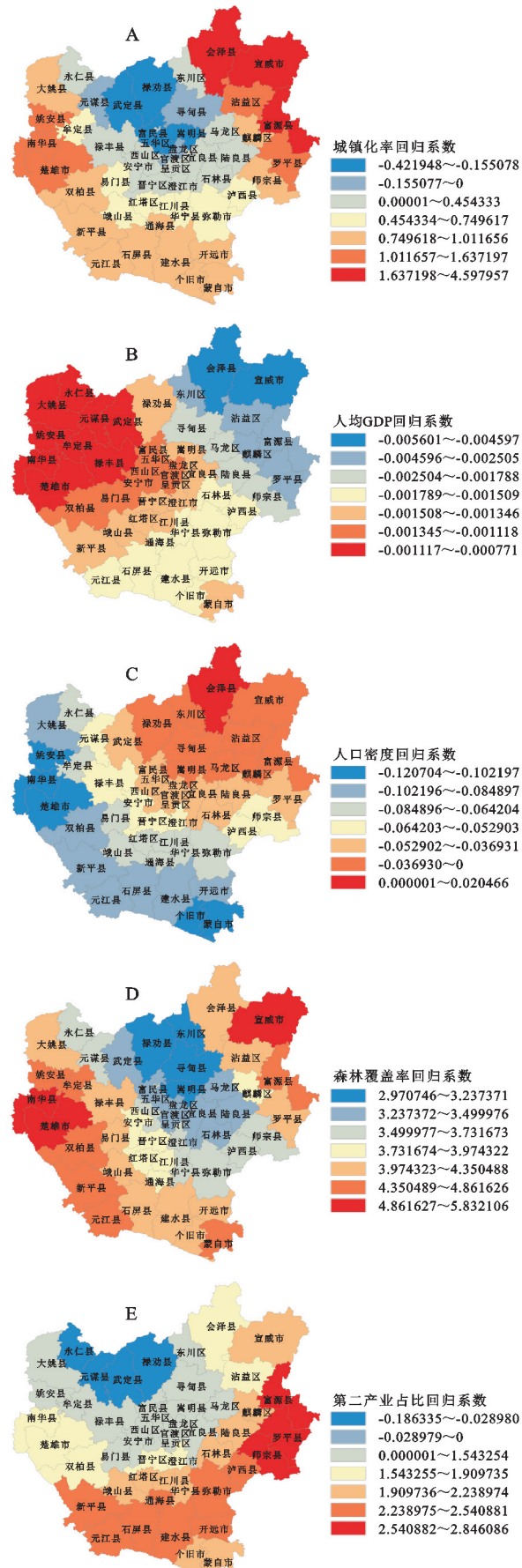


图 5 2019 年滇中城市群各驱动因子与绿色空间 ESV 的回归系数分布

4 讨论与结论

4.1 讨论

(1) 本研究对各驱动因子地理加权回归分析,发现城镇化率、人口密度与第二产业占比对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化特征,人均 GDP 对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现负向驱动,森林覆盖率对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现正向驱动。城镇化率呈现两极化特征这与陈万旭等^[12]的研究结果一致。这是因为在城镇化率超过一定临界值的地方,绿色空间面积减少,导致 ESV 减少,在城镇化率没有达到临界值的地方,对土地的合理利用会使得城镇化率对 ESV 产生一定的正向影响,若没有进行合理的利用则会造成负向驱动。由图 4、图 5A 可以发现,城镇化率在 78.3%~97.6%之间的区县主要呈现负向驱动,而城镇化率小于 78%的区域基本呈现正向驱动。若将城镇化率控制在正向驱动临界值左右,可以将 ESV 达到一个地区的最大化,最终实现区域的可持续发展。人口密度呈现两极化趋势的原因是人口密度越低的地区,对绿色空间生态系统的干扰越少,ESV 就越高,负向驱动就越大,而人口密度越高的地方,已经对绿色空间造成了干扰,对生态系统的负向驱动较弱。但有人为的合理规划,人口密度也会对 ESV 产生正向驱动。人均 GDP 是因为人均 GDP 越高的地方,对 ESV 的负向驱动就越明显。人均 GDP 越低,经济发展就越缓慢,对绿色空间的人为破坏越少,ESV 越高。但人均 GDP 高并不一定对 ESV 的负向驱动强,因为人均 GDP 高的地方,对绿色空间的需求更大,面临人地矛盾,则会更加合理利用土地。森林覆盖率呈现正向驱动,若根据研究中的空间差异针对性的提升滇中城市群的森林覆盖率,则有利于滇中城市群的生态系统服务功能的提升。由图 4、图 5E 可知,第二产业相对不发达的区域,ESV 相对较高,不合理发展第二产业会导致 ESV 的下降。但若在生态环境的承受范围内合理发展第二产业,带动地区经济发展,且合理规划土地利用,第二产业占比也会对 ESV 产生一定的促进作用。虽然第二产业占比对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化趋势,但目前无法确定当第二产业占比达到什么阈值会对生态系统服务价值产生正向驱动作用。

(2) 本研究采用谢高地的当量因子法对 2000—2019 年滇中城市群绿色空间 ESV 进行量化,并根据空间位置进行了修订,但生态系统服务功能不仅取决

于其空间位置,还取决于生物量、NPP 等因素。且本研究的研究对象为绿色空间,未考虑建设用地及未利用地的 ESV,所以得出的 ESV 会偏高。在后续研究中可从不同方法对 ESV 进行量化评估,并且对不同方法得出的 ESV 进行比较研究,探究更科学合适的方法,提高评估的准确性。本研究采用遥感解译,对林地解译时选择颜色为亮绿色、深绿色且有山体纹理或成片规模的区域,而园地其本身也是成片种植,在解译过程中容易将其纳入林地的范畴。在之后的研究中希望能借助相关管理部门的土地利用调查数据和实地考察对绿色空间类型的识别及解译更加精细、准确。由于滇中城市群国土规模较大,跨时较长,对数据的获取具有一定难度,在驱动因子的选择上存在一定局限性。后续希望能增加驱动的类型,对驱动的分析更加完善,提升评价的现实意义。同时,继续探讨关于滇中城市群城镇化率到达什么阈值,才可以对滇中城市群绿色空间的 ESV 起到促进作用,第二产业占比是否真的存在一个阈值可以最大化的促进 ESV 的发展,最终实现区域的可持续发展。

4.2 结 论

(1) 2000—2019 年滇中城市群绿色空间的 ESV 呈现增加趋势,共增加了 1 851.04 亿元。一级服务类型中,供给、支持和文化服务小幅度上升,调节服务小幅度下降,说明生态系统服务结构较为稳定。二级服务类型中,气候与水文调节对生态系统服务功能的贡献最大,其次为土壤保持、生物多样性和气体调节。

(2) 3 期 ESV 空间分布特征较为一致,呈现出城市群边缘地区绿色空间的 ESV 显著高于城市群中部地区。研究时间内高值区数量在增加,中低值区、中值区和中高值区数量减少。这表明滇中城市群在注重经济发展的同时,也重视绿色空间的发展。

(3) 主成分分析的结果表明,导致滇中城市群绿色空间 ESV 时空变化的驱动因素中社会因素的驱动作用最大、其次为自然因素和经济因素。ESV 变化与城镇化率、人均 GDP、人口密度、森林覆盖率、第二产业占比等因子高度相关。

(4) 地理加权回归结果表明,城镇化率、人口密度及第二产业占比对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现两极化驱动特征;人均 GDP 对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现明显负向驱动特征;森林覆盖率对滇中城市群绿色空间 ESV 的驱动呈现正向驱动特征。

参考文献:

[1] Daily G C. Nature's Services: Societal Dependence on

Natural Ecosystems [M]. Washington DC: Island Press, 1997:122-134.

[2] Chen W, Chi G, Li J. Ecosystem services and their driving forces in the middle reaches of the Yangtze River Urban Agglomerations, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020,17(10):1-19.

[3] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-Being[M]. Washington, DC: Island Press, 2005:137.

[4] Costanza R, Arge, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(15):253-260.

[5] 欧阳志云,王效科,苗鸿.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.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 徐媛银,郭砾,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.

[10] 李辉,张晓媛,国洪磊.基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征[J].水土保持研究,2021,28(2):309-318.

[11] 丁梦婷,裴凤松,胡引翠,等.基于 LUCC 的江苏省生态系统服务价值时空变化特征研究[J].生态学报,2020,40(19):6801-6811.

[12] 陈万旭,刘志玲,李江凤,等.长江中游城市群生态系统服务和城镇化之间的空间关系研究[J].生态学报,2020,40(15):5137-5150.

[13] 王永琪,马姜明.基于县域尺度珠江—西江经济带广西段土地利用变化对生态系统服务价值的影响研究[J].生态学报,2020,40(21):7826-7839.

[14] 李子君,刘金玉,姜爱霞,等.基于土地利用的祁河流域生态系统服务价值动态变化[J].水土保持研究,2020,27(2):269-275,283.

[15] 毛诚瑞,代力民,齐麟,等.基于生态系统服务的流域生态安全格局构建:以辽宁省辽河流域为例[J].生态学报,2020,40(18):6486-6494.

[16] 刁震,王文渊,彭云,等.港口区域生态系统服务价值评估及驱动因子分析[J].港工技术,2019,56(1):50-54.

[17] 潘梅,陈天伟,黄麟,等.京津冀地区生态系统服务时空变化及驱动因素[J].生态学报,2020,40(15):5151-5167.

- [18] 欧朝蓉,清科,孙永玉.元谋干热河谷生态交错带森林生态系统服务价值空间分异特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(2):357-365.
- [19] 茹克亚·萨吾提,阿斯娅·曼力克,李虎,等.乌鲁木齐山地草地生态系统服务价值变化评估:基于遥感与GIS[J].生态学报,2020,40(2):522-539.
- [20] 张敏,宫兆宁,赵文吉.近30年来白洋淀湿地演变驱动因子分析[J].生态学杂志,2016,35(2):499-507.
- [21] 乔旭宁,顾羊,唐宏,等.渭干河流域农田生态系统服务价值变化及其影响因素分析[J].干旱地区农业研究,2015,33(2):337-345.
- [22] Xiao S, Crittenden J C, Feng L, et al. Urban expansion simulation and the spatio-temporal changes of ecosystem services, a case study in Atlanta Metropolitan area, USA[J]. Science of the Total Environment, 2018,622/623:974-987.
- [23] Li T, Jing L, Wang Y. Carbon sequestration service flow in the Guanzhong-Tianshui economic region of China:How it flows, what drives it, and where could be optimized? [J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 548-558.
- [24] 严恩萍,林辉,王广兴,等.1990-2010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.
- [25] 谢高地,肖玉,鲁春霞.生态系统服务研究:进展,局限和基本范式[J].植物生态学报,2006,30(2):191-199.
- [26] 韩依纹,戴菲.城市绿色空间的生态系统服务功能研究进展:指标、方法与评估框架[J].中国园林,2018,34(10):61-66.
- [27] 支林蛟,王锦,刘敏,等.滇中城市群绿色空间格局动态变化多尺度研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2021,41(5):88-97.
- [28] 刘庆,李伟,陆兆华.基于遥感与GIS的黄河三角洲绿色空间生态服务价值评估[J].生态环境学报,2010,19(8):1838-1843.
- [29] Pulighe G, Fava F, Lupia F. Insights and opportunities from mapping ecosystem services of urban green spaces and potentials in planning[J]. Ecosystem Services, 2016,22(Part A):1-10.
- [30] 向勤,菊春燕.城市化背景下乌鲁木齐市的绿色空间生态服务价值研究[J].环境污染与防治,2021,43(10):1329-1332.
- [31] 余新晓,鲁绍伟,靳芳,等.中国森林生态系统服务功能价值评估[J].生态学报,2005,25(8):2096-2102.
- [32] 李方正,解爽,李雄.基于多源数据分析的北京市中心城绿色空间时空演变研究(1992—2016)[J].风景园林,2018,25(8):46-51.
- [33] 张彪,徐洁,谢高地,等.2000—2010年北京城市绿色空间格局动态分析[J].生态科学,2016,35(6):24-33.
- [34] 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):189-198.
- [35] 井睿,张蚌蚌,赵敏娟,等.近35年中国耕地集约度时空变化特征分析[J].水土保持研究,2019,26(5):353-358+365.
- [36] 徐启恒,黄滢冰.珠三角典型地区城市扩张测度及驱动机制分析[J].测绘科学,2018,43(1):45-53.
- [37] 高啸峰,王树德,宫阿都,等.基于主成分分析法的土地利用/覆被变化驱动力研究[J].地理与地理信息科学,2009,25(1):36-39.
- [38] 罗耀文,任周鹏,葛咏,等.基于PCA-GWR方法的村级贫困时空格局及致贫因素分析[J].地球信息科学学报,2020,22(2):231-245.
- [39] 刘潇,薛莹,纪毓鹏,等.基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J].中国环境科学,2015,35(10):3187-3192.
- [40] 臧亮,梁红颖,梁文涛,等.基于景观格局的卢龙县耕地细碎化评价及影响因素研究[J].水土保持研究,2018,25(6):265-269,276.
- [41] 邵明,宇翔,林辰松.基于GWR模型的成渝城市群生态系统服务时空演变及驱动因素研究[J].北京林业大学学报,2020,42(11):118-129.
- [42] 闻熠,高峻,姚扬,等.基于改进参数的长三角城市群生态足迹时空动态及驱动因子分析[J].环境工程技术学报,2020,10(1):133-141.
- [43] 乔拥军,张天中.基于主成分分析的榆中县土地利用驱动因子分析[J].甘肃农业科技,2015(10):16-19.