

doi: 10.6046/zrzyyg.2021323

引用格式: 李静芝,王苗,冯文静,等. 湘西州地区生态系统服务价值时空特征及驱动分析[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):207-217. (Li J Z, Wang M, Feng W J, et al. The characteristics and driving factors of spatiotemporal changes in the ecosystem service value in Xiangxi, Hunan, China[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 207-217.)

湘西州地区生态系统服务价值时空特征及驱动分析

李静芝^{1,2}, 王苗¹, 冯文静¹, 李彬¹

(1. 长沙理工大学建筑学院, 长沙 410076; 2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114)

摘要: 生态系统服务价值评估是生态环境保护、生态补偿、自然资源资产核算等政策的重要依据和基础, 深入研究湖南省湘西土家族苗族自治州生态系统服务价值的时空变化特征及驱动因素, 对其生态环境治理和保护具有重要意义。基于1990—2018年湘西州7期土地利用数据, 对其土地利用变化进行分析, 采用当量因子法对湘西州生态系统服务价值进行评估, 结合空间统计模型对湘西州生态系统服务价值进行时空特征分析, 进一步探究生态系统服务价值的驱动因素。结果表明: 湘西州地区主要土地利用类型为林地, 28 a间由于建设占用, 林地、草地面积减少, 建设用地、湿地和未利用地面积增加, 水域面积基本无变化, 总体来看土地利用活跃程度不高; 生态系统服务总价值呈现先增加后减少再增加最后减少的趋势, 呈M型变化特征, 生态系统服务价值总体下降, 空间上呈现出东南部高于西北部; 空间自相关分析表明研究区生态系统服务价值呈现出正向空间聚集特征, 28 a来湘西州生态空间格局总体上没有发生大的变化; 生态系统服务价值时空差异的主要驱动因素为城镇化率、人口密度、林业总产值和林地面积。研究可以为湘西州土地资源的合理利用与生态环境保护提供理论参考。

关键词: 生态系统服务价值; 时空特征; 空间自相关; 驱动因素; 湘西州

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2022)03-0207-11

0 引言

人类活动与生态环境息息相关, 由于不合理的土地开发与利用, 导致生态环境遭受严重破坏, 农田减少危及耕地红线、生物多样性减少等生态问题, 自然灾害发生频率不断提高^[1]。强化生态文明建设, 尊重大自然基本规律是人类赖以生存的基本法则^[2]。“生态系统服务”是指对人类生存和生活质量有贡献的生态系统产品和服务, 由 Holdren 等^[3]于1974年首次提出, 引起了生态学界、经济界的高度重视; 1997年 Costanza 等^[4]提出“全球生态系统服务价值当量表”对全球生态系统服务功能进行划分和评估; 进入21世纪后, 由联合国环境规划署等机构共同发起了为期4a的千年生态系统评估工作完成^[5], 对生态系统服务研究从静态价值评估转向重视人类福祉的影响方向发展^[6]。国内生态系统服务价值研究起步较晚, 欧阳志云等^[7-8]、谢高地

等^[9-11]、赵同谦等^[12-13]开展了深入研究。在 Costanza 等^[4]提出的评价模型基础上, 对国内200多位生态学者进行问卷调查, 提出“中国生态系统服务价值当量因子表”并进行修正, 对中国生态系统服务价值的研究产生广泛影响。生态系统服务功能是生态系统及其过程所形成与所维持的人类赖以生存的环境条件与效用^[14], 总体上可以划分为3类: 生活与生产物质的提供、生命支持系统的维持、精神生活的享受^[15]。生态系统服务价值是指通过生态系统的结构、过程和功能直接或者间接提供的生命支持产品和服务^[16], 其价值评估是生态环境保护、生态补偿、自然资源资产价值核算等政策的重要依据和基础^[17-18]。

本文以湖南省湘西土家族苗族自治州1990—2018年7期土地利用数据为基础, 对当量因子进行时空修正并建立生态系统服务价值估算模型, 选取敏感性指数检验其结果的准确性, 在地理信息系统 (geographic information system, GIS) 和 Geoda095i 空

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2021-12-01

基金项目: 湖南省自然科学基金项目“快速城市化背景下荆南三口河网地区水系结构变化及城市化响应”(编号: 2018JJ3526) 和湖南省教育厅科学研究项目“荆南三口河网地区城镇化进程中水资源优化调控研究”(编号: 17C0037) 共同资助。

第一作者: 李静芝(1984-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为国土空间规划、城市生态学。Email: lijingzhi2210862@163.com。

通信作者: 王苗(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为城乡规划。Email: Wang_miao97@163.com。

间分析支持下,综合分析研究区生态系统服务价值时空演变特征及驱动力,以期为湘西州土地资源的合理利用与生态环境保护提供理论参考,在未来,合理规划城乡用地开发边界、减少人类活动造成的破坏,同时加大对林地资源的保护,提高生态效益。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

本文研究区湘西州位于湖南省西北部,地理范围在 $N27^{\circ}44.5' \sim 29^{\circ}38'$, $E109^{\circ}10' \sim 110^{\circ}22.5'$ 之间(图1),与湖北、贵州、重庆三省(市)接壤,面积约 1.547万 km^2 ;全州包括吉首市、古丈县、龙山县、永顺县、凤凰县、泸溪县、花垣县、保靖县1个市7个县,含115个街道。截至2018年底,全区总人口约297.24万人,常住人口约264.96万人,城镇化率为46.54%,全年生产总值为605.05亿元。该区属于亚热带季风性湿润气候,具有明显的大陆性气候特征,年均气温在 $15 \sim 22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,年均降水量为 $1\ 300 \sim 1\ 500 \text{ mm}$,年平均湿度为81.2%。近几十年研究区受人类滥砍乱伐、建设用地扩张等活动的影响,林地、草地面积锐减,植被不断退化,生态环境问题日益突出。

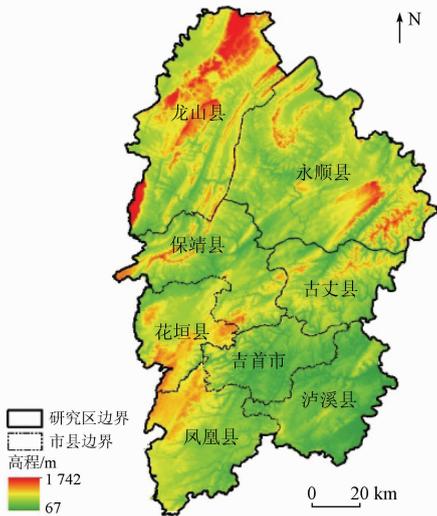


图1 研究区位置及范围示意图

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据源及其预处理

研究采用的数据包括土地覆盖数据、社会经济统计数据和气候气象数据3大类。通过人机交互式解译 Landsat 影像得到湘西州1990年、1995年、2000年、2005年、2010年、2013年和2018年的土地覆盖数据,通过辨识和分类处理,将土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、湿地、建设用地、未利用地

7大类,土地利用一级类型的综合评价精度达到90%以上。湘西州1990—2018年社会经济数据包括粮食产量、播种面积、粮食价格、城镇化率、国内生产总值(gross domestic product, GDP)总量等,均来源于《湘西州统计年鉴》和《湖南省统计年鉴》。气温、降水量等气候气象数据来源于《湖南省水资源公报》。

2 研究方法

2.1 土地利用动态度

土地利用动态度是定量评价土地利用变化速度的指标,包括单一土地利用动态度和综合土地利用动态度^[19-20],计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a T} \times 100\% \quad (1)$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n |U_{ai} - U_{bi}|}{2T \sum_{i=1}^n U_{ai}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: K 为研究期内某种土地利用类型的单一土地利用动态度; U_a 和 U_b 分别为研究期初和期末某种土地利用类型的面积, hm^2 ; T 为研究时长, a ; C 为研究期内研究区的综合土地利用动态度; $|U_{ai} - U_{bi}|$ 为研究区内第 i 类用地转化为非 i 类用地类型的面积的绝对值, hm^2 。

2.2 生态系统服务价值评估

2.2.1 生态系统服务价值的基础当量表

谢高地等^[21]在 Costanza 等^[4]研究的基础上,从我国实际情况出发,根据200多位中国生态学家的调查问卷,制定了中国生态系统服务价值当量表。本文采用谢高地等提出的生态系统服务分类方法,分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务4大类,进一步细分为食物生产、原料生产、水资源供给、气体调节、气候调节、净化环境、水文调节、土壤保持、维持养分循环、生物多样性和美学景观等11种服务功能。

由于本次研究所使用的 LUC 土地利用数据分级标准和谢高地等提出的生态系统分级标准存在差异,故将土地利用类型进行重分类。一级分类中6种土地利用类型不变增加建设用地分类。农田、林地和草地的二级分类不变,由于沼泽地、滩地的生态系统服务价值与湿地比较一致,故将其归为生态系统分类中的湿地;河渠、水库坑塘的生态系统服务价值与水域比较一致,将其归为生态系统分类中的

水域; 建设用地分为城镇用地、农村居民点和其他建设用地。

2.2.2 当量系数修正

不同地区所处的位置、生态环境以及生物多样性等差异对生态系统服务价值的评估产生一定的影响,为了使评估结果更准确,本次研究在谢高地等提出的当量表基础上参考刘倩等^[22]的研究成果,采用社会发展系数和区域差异系数进行时空修正。

社会发展系数反映的是在不同社会经济水平和人民生活水平下,人们对生态价值的支付意愿的相对水平。计算公式为:

$$l' = l_1 M_1 + l_2 M_2 \quad (3)$$

$$D_t = \frac{l'_{\text{研究区}}}{l'_{\text{全国平均}}} \quad (4)$$

式中: l 为与现实支付意愿有关的社会发展系数; l' 为湘西州综合发展系数; l_1 为城镇社会发展系数; M_1 为城镇人口的占比; l_2 为农村社会发展系数; M_2 为农村人口的占比; D_t 为第 t 年的社会发展修正系数。

区域差异系数反映的是不同区域中的各个区域要素共同作用所形成的差异。依据区域生物量的差异对不同区域生态系统服务价值进行修正,采用净初级生产潜力代替生物量。计算公式为:

$$NPP = 3\,000[1 - e^{-0.000\,969(R-20)}] \quad (5)$$

$$Q_t = NPP / NPP_{\text{mean}} \quad (6)$$

式中: Q_t 为第 t 年的区域差异系数; NPP 为自然植被的净初级生产潜力, $t/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$; NPP_{mean} 为所有类型植被的平均净初级生产力; R 为研究区 1 a 内实际蒸散量, mm。

2.2.3 生态系统服务价值计算

生态系统服务价值当量因子是生态系统潜在服务价值的相对贡献率,该因子等于每年每公顷粮食价值的 1/7。1990—2018 年,湘西州地区平均粮食产量为 4 225.82 kg/hm²,2018 年平均粮食价格为 2.25 元/kg,因此湘西州地区一个生态系统服务价值当量因子为 1 359.09 元/hm²。湘西州地区的生态系统服务价值的计算公式为:

$$ESV = \sum (A_k \cdot VC_k \cdot D_t \cdot Q_t) \quad (7)$$

$$ESV_f = \sum (A_k \cdot VC_{fk} \cdot D_t \cdot Q_t) \quad (8)$$

$$VC_k = \sum (VC_{fk}) \quad (9)$$

式中: ESV 为研究区总的生态系统服务价值,元; A_k 为土地利用类型 k 的面积, hm²; VC_k 为第 k 类土地利用类型的单位面积生态系统服务价值系数,元/hm²; ESV_f 为生态系统第 f 项服务功能价值,元; VC_{fk} 为土地利用类型 k 的第 f 项服务功能价值系数(表 1),元/hm²。

表 1 湘西州地区土地利用类型单项生态系统服务价值系数

Tab.1 Single ecosystems service value coefficients of land use categories in Xiangxi (元/hm²)

生态系统分类		供给服务			调节服务				支持服务		文化服务	
一级分类	二级分类	食物生产	原料生产	水资源供给	气体调节	气候调节	净化环境	水文调节	土壤保持	维持养分循环	生物多样性	美学景观
农田	旱地	1 155.23	543.64	27.18	910.59	489.27	135.91	366.95	1 399.86	163.09	176.68	81.55
	水田	1 848.36	122.32	-3 574.41	1 508.59	774.68	231.05	3 696.72	13.59	258.23	285.41	122.32
林地	阔叶	394.14	897.00	462.09	2 949.23	8 834.09	2 623.04	6 442.09	3 601.59	271.82	3 275.41	1 440.64
	针阔混交	421.32	964.95	502.86	3 193.86	9 554.40	2 704.59	4 770.41	3 887.00	299.00	3 533.63	1 549.36
	针叶	299.00	706.73	366.95	2 310.45	6 890.59	2 025.04	4 539.36	2 799.73	217.45	2 555.09	1 114.45
	灌木	258.23	584.41	299.00	1 916.32	5 748.95	1 739.64	4 552.95	2 337.63	176.68	2 133.77	937.77
草地	灌草丛	516.45	761.09	421.32	2 677.41	7 080.86	2 337.63	5 191.72	3 261.82	244.64	2 962.82	1 304.73
	草甸	299.00	448.50	244.64	1 549.36	4 104.45	1 359.09	3 003.59	1 889.14	149.50	1 726.04	761.09
	草原	135.91	190.27	108.73	693.14	1 821.18	598.00	1 331.91	842.64	67.95	761.09	339.77
湿地	沼泽地	285.41	339.77	1 766.82	1 291.14	2 446.36	2 446.36	16 472.17	1 630.91	122.32	5 354.81	3 221.04
	滩地	407.73	339.77	1 753.23	1 291.14	2 446.36	2 446.36	16 458.58	1 508.59	122.32	5 341.22	3 207.45
未利用地	裸土地	13.59	40.77	27.18	149.50	135.91	421.32	285.41	176.68	13.59	163.09	67.95
	裸岩石质地	0.00	0.00	0.00	27.18	0.00	135.91	40.77	27.18	0.00	27.18	13.59
水域	河渠	543.64	163.09	11 361.99	978.54	2 881.27	6 211.04	118 920.38	557.23	54.36	2 786.13	2 147.36
	水库坑塘	543.64	149.50	2840.50	312.59	964.95	1 549.36	29 723.30	706.73	40.77	693.14	543.64
建设用地	城镇用地	13.59	13.59	0.00	380.55	951.36	0.00	27.18	543.64	0.00	0.00	0.00
	农村居民点	13.59	13.59	0.00	380.55	951.36	0.00	27.18	543.64	0.00	0.00	0.00
	其他建设用地	13.59	13.59	0.00	380.55	951.36	0.00	27.18	543.64	0.00	0.00	0.00

2.3 敏感性指数

利用敏感性指数 (coefficient of sensitivity, CS) 来定量分析 *ESV* 对生态系统价值系数的敏感程度^[23]。如果 $CS > 1$, 说明 *ESV* 对 *VC* 是富有弹性的, 说明其准确度差、可信度较低; 如果 $CS < 1$, 说明 *ESV* 对 *VC* 是缺乏弹性的, 结果是可信的。计算公式为:

$$CS = | \frac{(ESV_j - ESV_i) / ESV_i}{(VC_{jk} - VC_{ik}) / VC_{ik}} | \quad (10)$$

式中: CS 为敏感性指数; ESV_i 和 ESV_j 分别为初始和调整后的生态系统服务价值, 元; VC_{ik} 和 VC_{jk} 分别为初始和调整后的第 k 种土地类型的生态系统服务价值系数, 元/hm²。

2.4 空间自相关分析

空间自相关指在地理空间区域上的某种属性与相邻近的空间区域上的同一属性之间的相关程度, 即地理空间上是否存在聚集性, 包括全局空间自相关和局部空间自相关^[24-25]。利用 Geoda095i 模型中的单变量 Moran's I 分析生态系统服务价值空间特征, 在 Z 检验的基础上 ($p = 0.001$), 绘制 LISA 集聚图。计算公式为:

$$I = Z_i \sum (W_{ij} Z_j) \quad (11)$$

式中: Z_i 和 Z_j 为空间单元 i 和 j 的标准化值; W_{ij} 为空间权重 (当区域 i 和 j 相邻接, W_{ij} 为 1; 否则为 0)。LISA 集聚图把区域划分为高-高、低-低、低-高和高-低 4 种类型。

2.5 驱动因素分析

生态系统服务价值演变的驱动力因素包括自然

环境和人为影响 2 个方面。参照文献[26], 并考虑到数据的可获得性, 本次研究以湘西州为单位收集人口指标、经济指标、农业指标和旅游指标 4 个方面的 24 个驱动因子 (表 2), 采用 SPSS 软件分别进行相关性分析和回归方程的建立, 研究驱动因子对生态系统服务价值变化的影响。

表 2 生态系统服务价值演变驱动力指标体系
Tab. 2 Index system of ecosystem service value change driving force

驱动因子	变量		
人口指标	X_1 为总人口, 人; X_2 为城镇人口, 人; X_3 为农村人口, 人; X_4 为少数民族人口, 人; X_5 为人口自然增长率, %; X_6 为人口密度, 人/km ² ; X_7 为城镇化率, %		
	经济指标	X_8 为 GDP 总量, 亿元; X_9 为人均 GDP, 元; X_{10} 为第一产业总产值, 亿元; X_{11} 为第二产业总产值, 亿元; X_{12} 为第三产业总产值, 亿元; X_{13} 为农村人均纯收入, 元; X_{14} 为农业总产值, 万元; X_{15} 为林业总产值, 万元; X_{16} 为牧业总产值, 万元	
		农业指标	X_{17} 为耕地面积, hm ² ; X_{18} 为林地面积, hm ² ; X_{19} 为草地面积, hm ² ; X_{20} 为农作物播种面积, hm ² ; X_{21} 为粮食作物产量, t; X_{22} 为粮食作物播种面积, hm ²
			旅游指标

3 结果与分析

3.1 湘西州地区土地利用变化特征

1990—2018 年间林地一直是湘西州地区的主要土地利用类型, 约占总面积的 70%; 其次为耕地, 约占总面积的 20% (图 2)。由土地利用动态评估结果 (表 3) 可知, 1990—2010 年 $C < 0.1\%$, 这一阶段土地利用不活跃; 2010—2018 年 $C > 0.2\%$, 其原

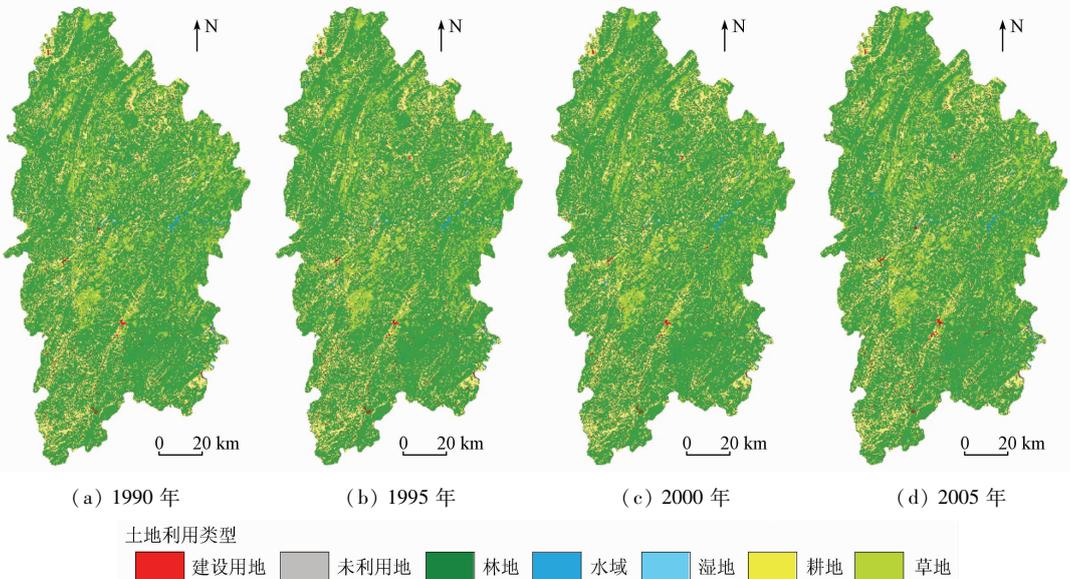


图 2-1 1990—2018 年湘西州土地利用分类

Fig. 2-1 Land use classification in Xiangxi from 1990 to 2018

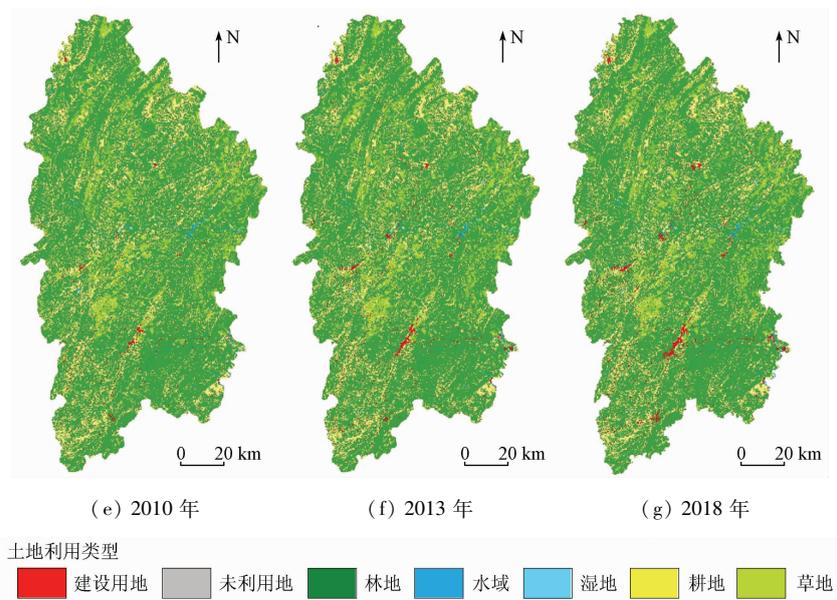


图 2-2 1990—2018 年湘西州土地利用分类

Fig. 2-2 Land use classification in Xiangxi from 1990 to 2018

表 3 1990—2018 年湘西州土地利用动态度

Tab. 3 Dynamic degree of land use in Xiangxi from 1990 to 2018

(%)

土地利用类型	1990—1995 年	1995—2000 年	2000—2005 年	2005—2010 年	2010—2013 年	2013—2018 年	1990—2018 年
耕地	-0.18	0.21	-0.07	-0.04	-0.39	-0.18	-0.09
林地	0.05	-0.06	0.01	-0.01	-0.05	-0.01	-0.01
草地	0.19	-0.26	-0.01	-0.02	-0.13	-0.05	-0.04
水域	-2.29	2.00	0.82	-0.49	-1.65	0.66	-0.10
建设用地	0.17	1.01	1.39	2.37	21.24	5.90	6.03
湿地	-6.11	16.48	-6.25	18.41	-3.36	0.45	1.92
未利用地	0.00	1.53	0.00	0.00	47.99	-1.91	4.91
综合土地利用动态度	0.06	0.06	0.01	0.01	0.26	0.22	0.07

因是在 2010 年以后林地转草地、耕地、建设用地面积大大增多,土地利用较活跃;但总体来说,28 a 间研究区土地利用综合动态度变化较小,土地利用活跃程度不高。

1990—2018 年建设用地、湿地、未利用地单一土地利用动态度呈正向变化,耕地、林地、草地、水域单一土地利用动态度呈负向变化。1990 年湘西州的城镇化率为 10.19%,到 2018 年达到 46.53%,用地面积的变化与城镇化进程有关,由于城镇化进程的加快,28 a 间建设用地呈现快速增长的态势,由 1990 年的 $7.757 \times 10^3 \text{ hm}^2$ 增加至 2018 年的 $20.775 \times 10^3 \text{ hm}^2$,城乡建设空间扩大,主要分布在市区和县城附近;由于建设占用,耕地、林地、草地面积不断减少;受降水量、日照等因素影响较大,28 a 间湿地面积一直呈现波动态势;2010 年以前未利用地基本无变化,而在 2010—2013 年未利用地单一土地利用动态度达到最大值 47.99%,其面积由 52.03 hm^2 增加至 126.95 hm^2 ,由于林草资源不合理的开发利用方式,导致 49.61 hm^2 的林地和 25.31 hm^2 的草

地转化为未利用地;28 a 间水域面积基本保持稳定状态。

3.2 湘西州地区生态系统服务价值时空变化

3.2.1 生态系统服务价值时间维度差异性分析

本研究以 5 a 为一个时间尺度(2010—2013 年为 3 a),估算 1990—2018 年的湘西州生态系统服务价值(表 4),28 a 间湘西州生态系统服务价值总体呈负增长,减少了 142.574 5 亿元。从不同土地利用类型来看,耕地、林地、草地、水域生态系统服务价值不断下降,湿地、建设用地、未利用地生态系统服务价值不断增加。林地对湘西州生态系统服务价值贡献率最大,占总价值的 83% 以上,草地、耕地次之。由于湘西州 70% 以上均为林地,林地面积的减少导致林地生态系统服务价值不断降低,进而造成湘西州生态系统服务总价值的降低。湿地、建设用地、水域、未利用地面积相对较小,生态系统服务价值也明显小于林地、草地。总体来看,湘西州生态系统服务价值贡献率依次为:林地 > 草地 > 耕地 > 水域 > 建设用地 > 湿地 > 未利用地。

表 4 1990—2018 年湘西州各土地利用类型生态系统服务价值变化
Tab. 4 Changes of ecosystem service value in Xiangxi from 1990 to 2018

土地利用类型	ESV/亿元							1990—2018 年 ESV 变化量/亿元	变化率/%
	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2013 年	2018 年		
耕地	30.098 9	33.255 3	28.461 6	30.520 0	28.542 9	25.109 6	23.175 1	-6.923 8	-23.00
林地	560.697 0	626.099 3	529.272 4	569.876 2	533.688 8	473.399 0	440.539 8	-120.157 2	-21.43
草地	53.139 8	59.735 7	50.002 0	53.788 3	50.336 5	44.524 5	41.333 0	-11.806 8	-22.22
湿地	0.265 2	0.205 5	0.317 3	0.234 7	0.422 3	0.338 1	0.322 0	0.056 8	21.42
未利用地	0.000 2	0.000 3	0.000 2	0.0003	0.000 2	0.002 0	0.001 6	0.001 4	700.00
水域	23.849 1	23.679 2	22.102 6	24.835 0	22.803 7	20.665 8	19.794 6	-4.054 5	-17.00
建设用地	0.275 8	0.310 3	0.276 0	0.317 7	0.333 0	0.485 3	0.585 4	0.309 6	112.24
总计	668.326 0	743.285 6	630.432 1	679.572 2	636.127 4	564.524 3	525.751 5	-142.574 5	-21.33

从各生态系统服务功能看(表 5),1990—2018 年湘西州地区 4 大体系服务功能价值表现为调节服务 > 支持服务 > 供给服务 > 文化服务。调节服务中气体调节、气候调节、净化环境和水文调节服务价值主要受林地、草地面积变化影响,与其面积变化保持一致,呈现出快速增加、快速下降、快速增加再缓慢下降的趋势;供给服务中食物生产功能主要受到耕地的影响,由于耕地面积的不断减少,造成食物生产

服务价值减少 3.73 亿元;原料生产受林地、草地的影响较大,1990—1995 年、2000—2005 年呈现上升趋势,其他年份均下降,其服务价值减少了 4.29 亿元;1990—2018 年水资源供给服务价值基本保持不变;支持服务中的土壤保持、维持养分循环、生物多样性服务价值及文化服务中美学景观服务价值总体下降,主要受林地面积变化的影响,由于林地面积比重大对其价值变化的引导起到了主要作用。

表 5 1990—2018 年湘西州各生态系统服务功能价值估算
Tab. 5 Ecosystem service value of each kind of the service function in Xiangxi from 1990 to 2018

生态系统服务功能		ESV/亿元							1990—2018 年 ESV 变化量/亿元	增长率/%
一级类型	二级类型	1990 年	1995 年	2000 年	2005 年	2010 年	2013 年	2018 年		
供给服务	食物生产	16.80	18.68	15.86	17.05	15.95	14.10	13.07	-3.73	-22.21
	原料生产	19.82	22.10	18.71	20.13	18.85	16.70	15.52	-4.29	-21.67
	水资源供给	0.76	0.60	0.69	0.85	0.79	0.74	0.79	0.03	4.05
调节服务	气体调节	66.46	74.17	62.72	67.51	63.22	56.06	52.14	-14.31	-21.54
	气候调节	179.91	200.89	169.78	182.81	171.21	151.88	141.36	-38.54	-21.42
	净化环境	54.21	60.43	51.15	55.10	51.59	45.76	42.59	-11.62	-21.43
	水文调节	149.99	165.16	141.27	152.84	142.84	127.10	118.65	-31.34	-20.90
支持服务	土壤保持	76.26	85.08	71.98	77.48	72.57	64.34	59.88	-16.38	-21.48
	维持养分循环	6.73	7.50	6.35	6.83	6.40	5.66	5.26	-1.46	-21.76
	生物多样性	67.60	75.44	63.79	68.68	64.34	57.04	53.07	-14.53	-21.49
文化服务	美学景观	29.81	33.24	28.13	30.29	28.37	25.16	23.41	-6.39	-21.45
总计		668.33	743.29	630.43	679.57	636.13	564.52	525.75	-142.57	-21.33

3.2.2 生态系统服务价值空间维度差异性分析

从空间上来看,1990—2018 年湘西州生态系统

服务价值总体趋势东南部高于西北部(图 3),原因是东南部坡度较大,林地多,植被覆盖率较高。将湘

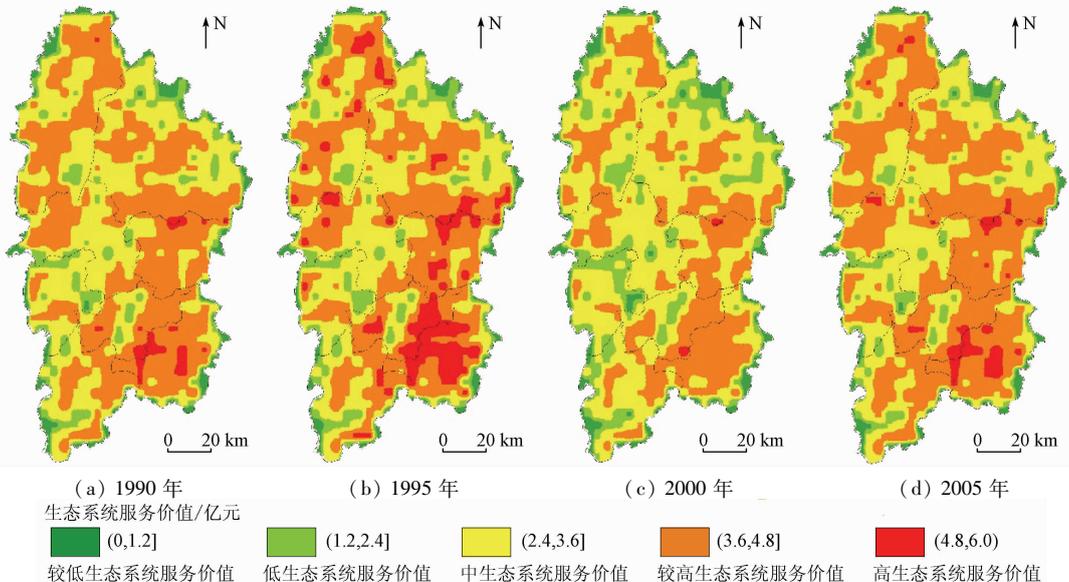


图 3-1 1990—2018 年湘西州生态系统服务价值空间分布

Fig. 3 - 1 Distribution of the ecosystem service value in Xiangxi from 1990 to 2018

3.4.2 局部空间自相关

为了进一步了解研究区生态系统服务价值的局部空间聚集变化规律,根据湘西州 701 个生态系统服务价值网格单元显著的空间聚集关系,进行局部

空间自相关分析,利用 Geoda095i 软件生成 7 期生态系统服务价值 LISA 聚集图(图 4),用来检验研究区生态系统服务价值在地理空间上是否具有高-高相邻、低-低相邻、低-高相邻或高-低相邻。

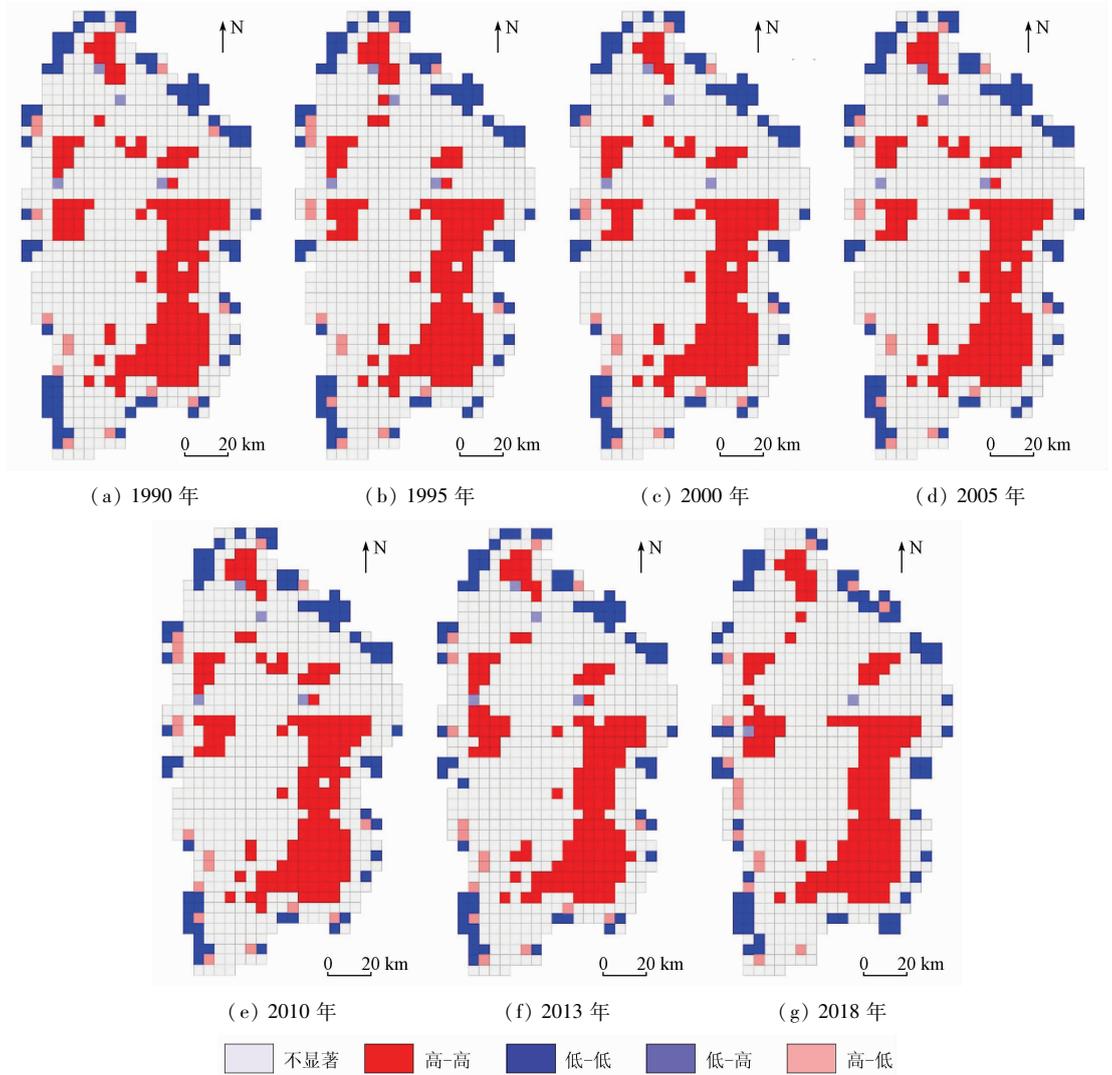


图 4 1990—2018 年湘西州生态系统服务价值 LISA 聚集图

Fig. 4 LISA cluster graph of ecosystem service value in Xiangxi from 1990 to 2018

28 a 间湘西州生态空间格局没有发生大的变化。高-高聚集区主要分布在湘西州东南部,泸溪县、古丈县、保靖县西部以及龙山县北部,这些地区林地、草地资源丰富,森林覆盖率均达 60% 以上,生态资源较好;低-低聚集区主要分布在湘西州与其他市区交界处,凤凰县西南部、龙山县北部和永顺县东北部,表现出明显的城市扩张趋势,生态环境受人为影响较大,生态系统服务价值较低;高-低聚集区主要零散的分布在凤凰县、花垣县、吉首市附近,从土地利用类型来看主要是林地与建设用地、林地与耕地的交界处,故生态系统服务价值存在较大差异;研究区几乎没有低-高集聚区。湘西州生态保护红线划定和自然保护地体系的建立应坚持“应保

尽保”的原则^[29],以东南部泸溪县、古丈县等地为核心,维护和改善其生态系统服务功能,保障生态安全,助力地区高质量发展。

3.5 驱动力分析

利用研究区 1990—2018 年 7 期生态系统服务价值和驱动指标进行相关分析,剔除相关性较低的因子并进行逐步回归分析,调整后 R^2 均大于 0.60,显著性均小于 0.05,说明线性方程对真实数据的反映程度较好(表 8)。结果表明,城镇化率与湘西州生态系统服务总价值呈显著负相关,是影响区域生态系统服务总价值的首要驱动因素;林地面积、林业总产值与湘西州生态系统服务总价值呈正相关,说明林地生态系统对湘西州生态系统服务总价值具

有显著提升作用。城镇化率属于人口结构指标,人口结构的变化会导致地区经济、生态结构发生显著变化,城镇人口的增加导致原料、食物等需求加大,污染物排放量增加,城乡建设空间不断扩大,占用林地、草地等其他用地,最终影响湘西州生态系统服务功能,导致生态系统服务价值降低。

表8 湘西州生态系统服务价值回归模型

Tab.8 Ecosystem service value regression models of each service in the study area

生态系统服务价值类型/亿元	回归模型 ^①	调整后 R ²
生态系统服务价值	$y = -4.361 X_7 + 754.142$	0.609
生态系统服务总价值	$y = -12.148 X_7 + 0.006 X_{15} + 761.993$ $y = -6.133 X_7 + 0.004 X_{15} + 0.025 X_{18} - 2.661 \times 10^4$	0.836 0.984
供给服务价值	$y_1 = -0.200 X_6 + 70.145$ $y_1 = -0.242 X_7 + 42.088$	0.604 0.610
调节服务价值	$y_2 = -2.926 X_7 + 508.02$ $y_2 = -8.171 X_7 + 0.004 X_{15} + 513.340$	0.608 0.837
支持服务价值	$y_3 = -0.996 X_7 + 170.300$	0.610
文化服务价值	$y_4 = -0.197 X_7 + 33.695$	0.609

①: y 为生态系统服务价值,元; y_1 为供给服务价值,元; y_2 为调节服务价值,元; y_3 为支持服务价值,元; y_4 为文化服务价值,元。

从各生态系统服务功能来看,城镇化率均为其首要驱动因子,生态系统服务价值与城镇化率呈显著负相关。除城镇化率外,人口密度也是供给服务价值的首要驱动因子,说明供给服务价值受到人口数量的影响较大;林业总产值是调节服务价值第二驱动因素,说明林地对气候调节、净化环境、土壤保持等有重大作用,突出林地生态系统在调节服务上的重要性。

4 结论与讨论

基于1990—2018年湘西州土地利用数据,对土地利用变化进行分析,采用谢高地等改进后的当量因子法估算湘西州7个时期生态系统服务价值及其时空变化特征,进一步探究生态系统服务价值的驱动因素,研究得出以下结论:

1) 1990—2018年湘西州地区主要土地利用类型为林地,28 a间耕地、林地、草地面积呈现下降趋势,建设用地、湿地、未利用地呈上升趋势,水域面积基本无变化,总的来说,28 a间土地利用活跃程度不高。

2) 从生态系统服务价值的时间演变来看,研究区生态系统服务价值呈现先增加后减少再增加最后减少的趋势,耕地、林地、草地生态系统服务价值的变化趋势与生态系统服务总价值变化趋势一致;从

生态系统服务价值空间分布来看,生态系统服务总价值整体呈现出东南部高于西北部。28 a来生态系统服务价值总体降低,主要是由于城乡空间的不断扩张,建设占用其他用地,在未来要严守生态保护红线,合理规划城乡用地边界,实现湘西州地区可持续发展。

3) 敏感性分析表明,研究区生态系统服务价值对于生态价值系数是缺乏弹性的,敏感性系数均小于1,证明研究结果具有有效性和可信度。

4) 通过空间相关性分析表明,研究期间研究区生态系统服务价值区域相关性显著且具有空间正相关性。高-高聚集区主要分布在湘西州东南部,泸溪县、古丈县、保靖县西部和龙山县北部;低-低聚集区主要分布在湘西州与其他市区交界处,凤凰县西南部、龙山县北部和永顺县东北部;高-低聚集区主要零散地分布在凤凰县、花垣县和吉首市附近;研究区内几乎没有低-高聚集区。28 a间湘西州生态空间格局没有发生大的变化。

5) 影响研究区生态系统服务价值时空变化的驱动因素主要包括人为因素和自然因素,28 a间受人为因素影响较大,主要驱动因素为城镇化率、人口密度、林业总产值和林地面积。要合理规划城乡用地开发边界,减少人类活动造成的破坏;同时,由于林地生态系统服务单位面积价值远大于其他用地生态系统服务单位面积价值,在未来要加大对林地资源的保护。湘西州地区林地资源较丰富,生态基础较好,加强对国家森林公园的建设,加快推进绿色旅游产业的发展,提高生态效益。

本文在研究湘西州生态系统服务价值时空变化特征及驱动力分析时,由于当量因子表并不适用于所有区域的研究,故对其进行时空修正,使生态系统服务价值评估更准确。随着社会经济的不断发展,人们支付能力与意愿不断变化,对生态系统服务价值的认识也不断改变,采用与支付意愿有关社会发展系数进行时间修正;不同区域土地利用类型、生态环境及生物多样性的差异对生态系统服务价值有一定的影响,采用净初级生产潜力代替生物量进行空间修正,该方法适用于林地覆被较广的地区。由于数据获取的限制等各方面的原因,本文还存在一些不足,关于生态系统服务价值与人类福祉的相关性研究较少,在未来将会对生态系统服务与人类福祉及决策管理进行进一步细化研究。随着国家“双碳”战略的深入实施,湘西州作为重要生态功能区,拥有丰富的林地资源,发挥林业碳汇作用助力生态优先绿色发展意义重大。今后应进一步加强对湘西州碳排放、碳足迹的深入研究,为制定科学合理的生态政策、加快推动绿色低碳发展和实施区域可持续

发展提供理论参考。

参考文献 (References):

- [1] 董成森,董明辉. 关于湘西自治州生态环境建设的思考[J]. 农业现代化研究,2002(2):152-154.
Dong C S, Dong M H. On ecological environment construction in Xiangxi Autonomous Prefecture of Hunan Province [J]. Research of Agricultural Modernization,2002(2):152-154.
- [2] 汪久文. 尊重并敬畏大自然的基本规律是人类赖以生存的基本法则[J]. 干旱区资源与环境,2018,32(5):1-4.
Wang J W. Respect and awe of nature is the fundamental law of human being existence [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2018,32(5):1-4.
- [3] Holdren J P, Ehrlich P R. Human population and the global environment; Population growth, rising per capita material consumption, and disruptive technologies have made civilization a global ecological force [J]. American Scientist, 1974, 62(3): 282-292.
- [4] 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.
- [5] Assessment M E. Ecosystems and human well-being [M]. United States of America: Island Press, 2005.
- [6] 杜加强,王金生,滕彦国,等. 重庆市生态系统服务价值动态评估[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1187-1192.
Du J Q, Wang J S, Teng Y G, et al. Dynamic evaluation on ecosystem service value of Chongqing City [J]. Chinese Journal of Ecology, 2008, 27(7): 1187-1192.
- [7] 欧阳志云,王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J]. 世界科技研究与发展,2000(5):45-50.
Ouyang Z Y, Wang R S. Ecosystem services and their economic valuation [J]. World Sci - Tech Research and Development, 2000(5):45-50.
- [8] 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):19-25.
Ouyang Z Y, Wang X K, Miao H. A primary study on Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological - economic values [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(5): 19-25.
- [9] 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(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(2): 189-196.
- [10] 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(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(5):911-919.
- [11] 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.
Xie G D, Zhang C X, Zhang C S, et al. The value of ecosystem service in China [J]. Resources Science, 2015, 37(9): 1740-1746.
- [12] 赵同谦,欧阳志云,郑 华,等. 中国森林生态系统服务功能及其价值评价[J]. 自然资源学报,2004(4):480-491.
Zhao T Q, Ouyang Z Y, Zheng H, et al. Forest ecosystem services and their valuation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2004(4):480-491.
- [13] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等. 中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J]. 生态学报,2004,24(6):1101-1110.
Zhao T Q, Ouyang Z Y, Jia L Q, et al. Ecosystem services and their valuation of China grassland [J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(6):1101-1110.
- [14] Daily G C. Introduction: What are ecosystem services [M]//Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems. Washington: Island Press, 1997:1-10.
- [15] 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[J]. 资源科学,2001,23(6):5-9.
Xie G D, Lu C X, Cheng S K. Progress in evaluating the global ecosystem services [J]. Resources Science, 2001, 23(6): 5-9.
- [16] 张振明,刘俊国. 生态系统服务价值研究进展[J]. 环境科学学报,2011,31(9):1835-1842.
Zhang Z M, Liu J G. Progress in the valuation of ecosystem service [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 1835-1842.
- [17] 王女杰,刘 建,吴大千,等. 基于生态系统服务价值的区域生态补偿——以山东省为例[J]. 生态学报,2010,30(23):6646-6653.
Wang N J, Liu J, Wu D Q, et al. Regional eco - compensation based on ecosystem service assessment; A case study of Shandong Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6646-6653.
- [18] 高振斌,王小莉,苏 婧,等. 基于生态系统服务价值评估的东江流域生态补偿研究[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(6):563-570.
Gao Z B, Wang X L, Su J, et al. Ecological compensation of Dongjiang River basin based on evaluation of ecosystem service value [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(6):563-570.
- [19] 杨 俊,单灵芝,席建超,等. 南四湖湿地土地利用格局演变与生态效应[J]. 资源科学,2014,36(4):856-864.
Yang J, Shan L Z, Xi J C, et al. Land use pattern changes and ecological effects in Nansihu wetland [J]. Resources Science, 2014, 36(4):856-864.
- [20] 佟光臣,林 杰,陈 杭,等. 1986—2013年南京市土地利用/覆被景观格局时空变化及驱动力因素分析[J]. 水土保持研究,2017,24(2):240-245.
Tong G C, Lin J, Chen H, et al. Land use and landscape pattern changes and the driving force factors in Nanjing from 1986 to 2013 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 240-245.
- [21] 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 ecosystem service value method based on unit area value equivalent factor [J]. Journal of Natural Resource, 2015, 30(8): 1243-1254.
- [22] 刘 倩,李 葛,张 超,等. 基于系数修正的青龙县生态系统服务价值动态变化研究[J]. 中国生态农业学报(中英文),2019,27(6):971-980.
Liu Q, Li G, Zhang C, et al. Study on dynamic changes in ecosystem service values in Qinglong County based on coefficient correction [J]. Chinese Journal of Eco - Agriculture, 2019, 27(6): 971-980.
- [23] 杨锁华,胡守庚,瞿诗进. 1990—2014年长江中游经济带生态系统服务价值时空变化特征[J]. 水土保持研究,2018,25(3):

- 164 – 169.
- Yang S H, Hu S G, Qu S J. Spatiotemporal dynamics of ecosystem service value in Middle Yangtze River economic region from 1990 to 2014 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018, 25 (3): 164 – 169.
- [24] 朱增云, 阿里木江·卡斯木. 干旱区绿洲城市生态系统服务价值空间自相关格局分析与模拟 [J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35 (12): 1531 – 1540.
- Zhu Z Y, Alimujiang K. Analysis and simulation of the spatial auto-correlation pattern in the ecosystem service value of the oasis cities in dry area [J]. *Journal of Ecology and rural Environment*, 2019, 35 (12): 1531 – 1540.
- [25] 丁娅楠, 刘海龙, 王炜桥, 等. 基于格网的长治市生态系统服务时空演变及空间相关性分析 [J]. *陕西理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 37 (4): 85 – 92.
- Ding Y N, Liu H L, Wang W Q, et al. Spatial – temporal evolution and spatial correlation analysis of ecosystem services based on grid in Changzhi [J]. *Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 37 (4): 85 – 92.
- [26] 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): 3248 – 3259.
- Luo S F, Yan W D. Evolution and driving force analysis of ecosystem service values in Guangxi Beibu Gulf coastal areas, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (9): 3248 – 3259.
- [27] 胡和兵, 刘红玉, 郝敬锋, 等. 城市化流域生态系统服务价值时空分异特征及其对土地利用程度的响应 [J]. *生态学报*, 2013, 33 (8): 2565 – 2576.
- Hu H B, Liu H Y, Hao J F, et al. Spatio – temporal variation in the value of ecosystem services and its response to land use intensity in an urbanized watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (8): 2565 – 2576.
- [28] 李哲, 张飞, Kung H T, 等. 1998—2014年艾比湖湿地自然保护区生态系统服务价值及其时空变异 [J]. *生态学报*, 2017, 37 (15): 4984 – 4997.
- Li Z, Zhang F, Kung H T, et al. Spatial and temporal ecosystem changes in the Ebinur wetland nature reserve from 1998 to 2014 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37 (15): 4984 – 4997.
- [29] 唐小平, 栾晓峰. 构建以国家公园为主体的自然保护地体系 [J]. *林业资源管理*, 2017 (6): 1 – 8.
- Tang X P, Luan X F. Developing a nature protected area system composed mainly of national parks [J]. *Forest Resources Management*, 2017 (6): 1 – 8.

The characteristics and driving factors of spatiotemporal changes in the ecosystem service value in Xiangxi, Hunan, China

LI Jingzhi^{1,2}, WANG Miao¹, FENG Wenjing¹, LI Bin¹

(1. School of Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco – Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China)

Abstract: The evaluation of ecosystem service value (ESV) is an important basis for formulating policies regarding ecological protection, ecological compensation, and the accounting for natural resource assets. An in – depth study of the characteristics and driving factors of the spatiotemporal changes in the ESV in Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture, Hunan Province, China is greatly significant for ecological control and protection. This study analyzed the changes in land use based on seven phases of 1990—2018 land use data of Xiangxi and evaluated the ESV in Xiangxi using the equivalence factor method. Moreover, it analyzed the spatiotemporal characteristics of the ESV by combining a spatial statistical model and further explored the driving factors of the ESV. The results are as follows. The main land type in Xiangxi is forest land. In the past 28 years, the area of forest land and grassland decreased due to occupation by construction land, the area of construction land, wetland, and unused land increased, and the water area roughly remained unchanged. Overall, land use in Xiangxi had a moderate or low degree of activity. The total ESV successively increased, decreased, increased, and decreased, forming an M – shaped trend. Moreover, it declined overall. Spatially, the total ESV was higher in the southeast than in the northwest. The spatial self correlation analysis indicated that the ESV in the study area showed positive spatial aggregation, and the ecological spatial pattern in Xiangxi had not changed significantly over the past 28 years. The driving factors leading to the spatiotemporal differences in the ESV main included urbanization rate, population density, the gross output by forestry, and area of forest land. This study will provide a theoretical reference for the rational utilization of land resources and ecological protection in Xiangxi.

Keywords: ecosystem service value; spatiotemporal characteristics; spatial self correlation; driving factor; Xiangxi Tujia and Miao Autonomous Prefecture