

三峡库区重庆段土地利用转型及生态服务功能价值时空分异特征

邹欣怡¹, 赵伟², 蒲海霞²

(1.重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067; 2.重庆工商大学 长江上游经济研究中心, 重庆 400067)

摘要:为充分掌握土地系统与生态系统时空分异特征,推动自然生态系统和社会经济系统长期协调发展,以三峡库区(重庆段)为研究对象,基于土地利用数据,考虑土地利用转入转出双过程,挖掘空间置换的土地利用转移,采用Costanza的生态系统服务价值当量法,探讨了2005—2018年研究区土地利用转型时空特征及其生态系统服务价值时空变化特征,并运用空间自相关理论定量研究了生态系统服务价值空间分布关系及土地利用与生态价值间的空间响应特征。结果表明:研究区近15 a间耕地转出幅度最大,建设用地转入幅度最高;土地利用转型活跃程度与生态系统服务价值变化空间分布一致。生态系统服务价值量先增后减,以巫溪—涪陵为界,西低东高,西减东增;生态系统服务价值强度的空间分布具有显著的正向空间自相关关系,聚集趋势明显;土地利用程度与ESV具有显著空间负效应,极显著相关区域主要位于主城区范围、江津北侧及研究区东北边缘等地区。

关键词:三峡库区重庆段;土地利用转型;生态服务功能价值;时空分异

中图分类号:F301.24; F062.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0267-09

Spatiotemporal Differentiation of Land Use Transformation and Ecological Service Function Value in Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir

ZOU Xinyi¹, ZHAO Wei², PU Haixia²

(1.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2.Research Center for Economy of Upper Reaches of the Yangtze River, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In order to fully grasp the temporal and spatial differentiation characteristics of land systems and ecosystems, and promote the long-term coordinated development of natural ecosystems and social economic systems, we took the Three Gorges Reservoir area (Chongqing section) as the research site, and used Costanza's Ecosystem Service Value Equivalent Method to explore the spatial and temporal characteristics of land use transition and the ecosystem service value (ESV) in the study area from 2005 to 2018 based on land use data. The spatial auto-correlation theory was used to quantitatively explore the spatial distribution relationship of ecosystem service values and the spatial response characteristics between land use and ecological value, with a view to providing scientific support for optimizing urban spatial development models and promoting the coordinated and sustainable development of urban social ecology. The results suggest that the research area had the largest transfer rate of cultivated land and the highest transfer rate of construction land in the past 15 years; the active degree of land use transformation was consistent with the spatial distribution of ecosystem service value changes. The value of ecosystem services increased first and then decreased. Wuxi-Fuling was taken as the boundary, value of ecosystem services was low in the west and was high in the east, and it decreased in west and increased in the east; the spatial distribution of the value intensity of ecosystem

收稿日期:2020-04-29

修回日期:2020-05-07

资助项目:重庆市教委哲学社会科学重大理论研究课题(19SKZDZX10);重庆工商大学研究生创新型项目(yjscxx2019-101-60);重庆市教委人文社科项目(20SKGH099)

第一作者:邹欣怡(1996—),女,四川南充人,硕士研究生,研究方向为环境规划与管理。E-mail:792449430@qq.com

通信作者:赵伟(1982—),男,江苏连云港人,博士,副教授,主要从事土地与环境规划研究。E-mail:21145291@qq.com

services had a significant positive spatial autocorrelation, and the aggregation trend was obvious; land use degree and ESV had a significant spatial negative effect, and the most significant related areas were mainly located in the main urban area, the north of Jiangjin and the northeast edge of the research area.

Keywords:Chongqing section of the Three Gorges Reservoir; land use transformation; ESV; spatiotemporal differentiation

土地是人类生存和发展的物质基础,其类型在自然因素及人类活动的影响下不断发生变化,土地利用转型是造成陆地生态系统变化的重要原因^[1]。生态系统服务是指生态环境通过其特性、结构等所带来的各种功能效益如调节服务、供给服务、支持服务等。而土地利用转型影响生态环境的结构特性,以及生态功能效益,进而影响人类的生存环境^[2]。在生态保护的发展大背景下,研究土地利用转型对生态系统服务价值的影响,将“绿水青山”量化为“金山银山”,将生态系统服务价值核算引入到生态管理决策中,可推动生态环境系统与社会经济系统协调发展,促进自然资源的合理开发和可持续利用。目前土地利用转型及其生态系统服务价值动态变化已成为研究热点之一。阅读文献发现,国内学者对土地利用转型与生态系统服务价值研究已开展了不同尺度上的定量评价研究,但在土地利用研究上大多采用土地利用转型净值,未考虑土地利用上转入转出的双向性;在生态服务价值研究中,多偏于景观及敏感性等的静态研究,对其时空特征动态变化以及空间聚集等仍是研究热点方向^[3-6]。

三峡库区(重庆段)是长江上游重要的生态功能区,其生态系统服务功能的维持和改善对三峡库区以及长江流域生态安全意义重大^[7]。三峡库区(重庆段)生态系统受人类经济活动影响大,尤其是重庆直辖以后,城市化与工业化的快速推进,以及三峡工程以及移民等工作的开展,使得该区域土地利用转型程度大。因此本文以三峡库区(重庆段)为研究对象,充分考虑土地的空间信息,重点关注变化过程,并利用空间分析等方法探究生态系统服务价值空间动态变化特征及空间分异情况。不仅可识别土地利用转型对生态系统产生的影响,也对三峡库区生态系统的健康状况有着重要参考,为生态资源利用的有效补偿和促进自然生态系统持续发展提供科学的依据;另外以货币形式量化土地利用类型所提供的产品和服务,可为决策者进行区域土地资源优化配置提供更直观有效的信息,进而对土地进行合理开发、实现生态管控与区域可持续发展具有重要的指导意义。

1 研究区概况

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原结合

部,跨越鄂中山区峡谷及川东岭谷地带,北屏大巴山,南依川鄂高原,范围横跨湖北省与重庆市部分地区,地处北纬 28°28′—31°44′,东经 105°49′—110°12′,库区土地总面积约 5.7 万 km²,总人口 3 000 多万人^[8]。

三峡库区(重庆段)位于长江上游末端,东南、东北与鄂西交界,西南与川黔接壤,西北与川陕相邻,包括重庆市 22 个区县,幅员面积 4.62 万 km²,占整个三峡库区面积 80%以上^[2]。气候类型属于中亚热带湿润季风气候,受峡谷地形影响显著,具有冬暖、春旱、夏热、秋雨云雾多、霜雪少等特征。库区植被类型多样,主要以亚热带常绿阔叶林为主。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源及预处理

以 2005—2018 年为研究时段,参照土地分类系统将土地利用分为 6 种类型:耕地、林地、草地、水域、建设用地以及未利用地,利用 ArcGIS 10.1 建立研究区土地利用数据库,并以此作为生态系统服务价值研究基础数据;另生态环境研究所需数据主要来源于《重庆市统计年鉴》。为细化生态服务价值的空间分布情况,利用 ArcGIS 10.1 渔网工具将研究区划分 1 km×1 km 正方形网格单元,共计 47 416 个,研究每个单元网格的土地利用类型及生态服务价值。

2.2 研究方法

为研究三峡库区(重庆段)土地利用转型及其生态系统服务价值时空分布特征,首先对研究区土地利用转型进行分析,利用当量法定量核算生态服务价值,最后运用空间自相关理论对生态服务价值空间分异情况及土地利用系统与生态服务价值系统的空间相关性进行研究。

(1) 土地利用类型转移矩阵。结合地理信息系统(GIS)技术,获取三峡库区重庆段土地利用显性转型动态信息,建立数据库获取土地利用转型类型面积以及空间分布数据,精准识别土地利用转型时空特征。利用土地利用转型矩阵刻画土地显性转型特征,转移矩阵数学形式为:

$$S_{ij} = \begin{vmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{23} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nm} \end{vmatrix} \tag{1}$$

式中: S 为面积; n 为土地利用的类型数; i, j 分别为研究初期与末期的土地利用类型。

(2) 年综合土地利用变化率。基于 GIS 的空间分析模型,重点关注土地利用转型过程,识别并考虑转移与新增这一对方向相逆的变化过程,可弥补单一增加量或是减少量的局限性,考虑了土地利用类型的空间置换,能将增减量较大但相互抵消区域与增减变化相对较小的区域相区分,测算和比较区域土地利用转型的总体或综合活跃程度,并且可以探测土地利用变化的热点区域^[9-10]。并结合土地利用转移矩阵,更明确地展示土地利用不同类型相互转型的具体情况。相关公式为:

$$TR_i = \frac{(LA_{i,t_2} - ULA_i) + (LA_{i,t_1} - ULA_i)}{LA_{i,t_1}} / (T_2 - T_1) \times 100\% = TRL_i + IRL_i \quad (2)$$

式中: TR_i 为总年综合土地利用变化率,为 i 种土地利用类型在该时期内的转移速率 TRL_i 与新增速率 IRL_i 之和; t_1, t_2 分别为期初与期末; LA_i 为 i 种地类的面积; ULA_i 为该时段中同一空间位置未发生地类转变的面积; n 为区域内土地利用类型的分类数; $i \in (1, n)$ ^[11]。

(3) 土地利用程度指数。土地利用程度在一定程度上反映了人类活动导致土地利用变化的程度。参考多位学者提出的数量化土地利用程度分析方法,将土地利用程度分级赋予指数,分为未利用地,林地、草地和水体,耕地以及建设用地 4 级,并依次将土地利用程度参数赋值为 1~4,来表征土地利用程度^[12-14]。相关方式为:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n A_i P_i / A_i \quad (3)$$

式中: L 为区域土地利用程度综合指数; A 为土地利用类型的面积; i 表示不同的土地利用类型; A_i 为研究区域总面积; n 为土地利用类型的数量; P 为土地利用程度参数^[15]。

(4) 生态系统服务价值评估法。利用当量法,依据 Costanza 的研究原理,参考谢高地等^[16]提出制定的中国陆地生态系统单位面积服务价值当量表,以平均粮食单产市场价值的 1/7 来确定 1 个生态服务价值当量因子的经济价值量。以研究区 22 个区县 2005 年、2010 年、2015 年及 2018 年 4 a 平均粮食单位面积产量 4 739 kg/hm² 为基准粮食单位产量,选取研究时间段中间点 2010 年重庆粮食平均收购价格 2.06 元/kg 为基准价格^[7],计算出三峡库区(重庆段)单位面积农田生态系统提供粮食生产服务的经济价值,进而估算研究区生态系统服务价值。另为消除研究区边缘不完整网格的价值高低差异,利用价值强度

对每个网格价值高低进行表征。具体公式如下:

$$ESV_y = \sum_x A_x \times VC_{xy} \quad (4)$$

$$ESV_x = \sum_y A_x \times VC_{xy} \quad (5)$$

$$\overline{ESV}_i = \overline{ESV}_i / S_i \quad (6)$$

$$ESV = \sum_x \sum_y A_x \times VC_{xy} \quad (7)$$

式中: ESV 为总生态系统服务价值; x 为第 x 类土地利用类型; y 为第 y 类生态系统服务功能; ESV_x , ESV_y 分别为第 x 土地利用类型的生态服务价值与第 y 项生态服务功能的价值; A 为土地面积; VC_{xy} 为不同土地利用类型的不同生态功能单位面积的生态系统服务价值; \overline{ESV}_i 为每个网格的生态系统服务价值强度; S 为每个网格的面积; i 为格网数。

(5) 空间自相关分析。空间自相关分析主要用于判断要素空间分布特征,是否具有空间聚集性等,包括全局空间自相关分析和局部空间自相关分析^[17]。另为了揭示多个变量之间的空间相关性,Anselin 提出双变量空间自相关,揭示空间单元属性值与邻近空间上其他属性值的相关性^[18]。

全局莫兰指数 Moran's I 值可以反映要素与邻近单元要素间的空间联系,是应用较广的全局自相关统计量,计算公式为:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i \sum_j w_{ij}} \quad (8)$$

局部空间自相关指标(Local Indicators of Spatial Association)可以识别局部空间要素单元的空特性,常采用局部 Moran's I 统计量进行度量,综合其 Z 值、 p 值,以及 LISA 分布图,可在全局自相关的基础上进一步判断局部分布特征^[19],计算公式为:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})}{S^2} \quad (9)$$

$$S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

式中: n 为空间单元数量; x_i 和 x_j 分别为单元 i 和单元 j 的观测值; $(x_i - \bar{x})$ 为第 i 个空间单元上的观测值与平均值的偏差; w_{ij} 为基于空间 k 邻接关系建立的空间权重矩阵; S^2 为方差^[15]。

3 结果与分析

3.1 三峡库区(重庆段)土地利用转型分析

3.1.1 三峡库区(重庆段)土地利用基本情况 三峡库区(重庆段)2005—2018 年土地利用类型整体上来看:耕地为地类组成结构中的重要组成成分,多年占比达 42% 以上,但耕地最易受人类社会活动影响,数

量及占比均呈历年下降趋势,面积减少近 6.5 万 hm^2 ;林地占比 40%左右,受人类活动以及政策因素的影响,占比及面积均先上升后小幅度下降,总体为上升趋势,面积增加约 5 万 hm^2 ;草地总体为下降趋

势,减少量约 10 万 hm^2 ;水域面积及建设用地面积均为历年上升,建设用地增加幅度最大,超过 200%,增加面积约 9 万 hm^2 ;未利用地相对平稳;4 个时期不同土地利用类型面积具体见表 1。

表 1 2005—2018 年三峡库区(重庆段)土地利用类型面积及占比

土地利用类型	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年	
	面积/ hm^2	占比/%	面积/ hm^2	占比/%	面积/ hm^2	占比/%	面积/ hm^2	占比/%
耕地	2043192.70	44.18	2023852.65	43.77	2007992.14	43.42	1979312.49	42.80
林地	1815168.11	39.25	1869804.77	40.43	1867732.09	40.39	1864017.44	40.31
草地	646813.68	13.99	539871.26	11.67	539673.58	11.67	540557.75	11.69
水域	72583.06	1.57	97992.19	2.12	96871.60	2.09	101507.96	2.20
建设用地	45818.21	0.99	92216.23	1.99	110957.35	2.40	138084.73	2.99
未利用地	692.72	0.01	531.38	0.01	1041.72	0.02	788.11	0.02

在空间分布上(图 1),2005—2018 年土地利用类型分布特征与地形特征较为一致,土地利用类型多受地形因素的影响,林地草地多分布在库区北部及东部边缘的山地地区;建成区与耕地地势平坦,分布主要集中在西部低山丘陵及中部平行岭谷区。近 15 a 间建设用地、耕地以及林草地空间变化最为明显。建成区以各个区县城镇为中心,逐步向外围扩

展,其中以主城区及周边区县扩展范围最大;而建成区的扩展往往伴随着耕地的减少,耕地地势平坦,区位优势明显,也是建设用地的优选地形,因此耕地减少范围与建设用地增加空间大致符合,主要集中在主城区周围,另由于耕地撂荒、退耕还林还草等因素,在万州开州巫溪等地耕地转变为林地草地的面积也不在少数。

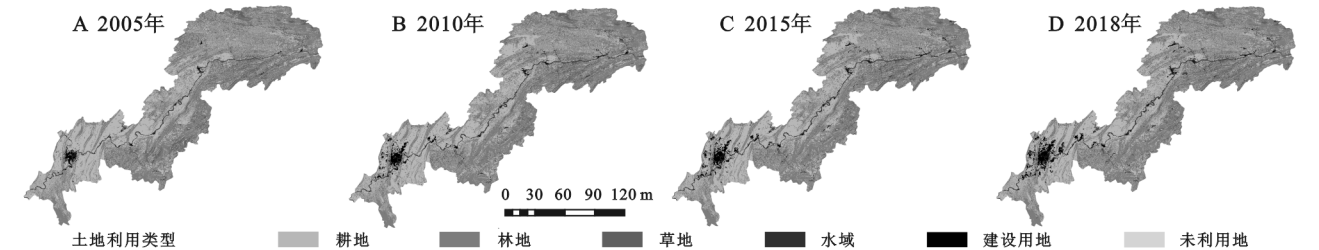


图 1 2005—2018 年三峡库区(重庆段)土地利用类型空间分布

3.1.2 三峡库区(重庆段)土地利用转型特征 充分考虑土地转型的双向性与空间性,计算得到研究区 2005—2010 年、2010—2015 年、2015—2018 年以及 2005—2018 年 4 个时段的年综合土地变化率(表 2),发现建设用地与未利用地的土地变化率明显高于其余 4 种地类。其中 2005—2010 年年综合土地变化率高达 42.09%,建设用地综合土地变化率达 22.36%,远高出其他 5 种地类;未利用地面积较小,对整体土地利用格局影响不大;2010—2018 年建设用地综合土地变化率有所下降。空间分布上,2005—2018 年,主城区范围及周边区县以及长江沿线区县综合土地利用变化率较高,表明城市扩展地区以及长江沿线地区地类间转型活跃,而研究区东北侧,即巫山巫溪以及奉节南侧等地综合土地利用变化率较小,山地地区地类间转型相对迟缓。

结合各时段土地利用转移矩阵(表 3),发现在近 15 a 时间内耕地转出(减少)幅度最大,建设用地转入(新增)幅度最高。耕地处于逐年减少的状态,且

其转移面积(指由耕地转为其他土地利用类型单向过程的面积)占三峡库区(重庆段)土地利用类型转移总面积的 43.93%,草地次之达 40.85%,森林转出幅度 13.76%;新增面积建设用地增长幅度最高为 30.9%,森林与耕地次之。

表 2 2005—2018 年各时间段不同土地利用类型年综合土地变化率 %

土地利用类型	年综合土地变化率			
	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2018 年	2005—2018 年
耕地	1.60	0.52	1.06	0.78
林地	1.41	0.29	0.52	0.57
草地	4.37	0.47	0.99	1.72
水域	7.45	1.51	3.75	3.40
建设用地	22.36	4.81	10.07	16.41
未利用地	4.90	19.70	20.52	4.74
合计	42.09	27.30	36.91	27.61

3.2 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值分析

3.2.1 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值数量动态变化 根据 2005—2018 年三峡库区(重庆段)22

个区县平均粮食单位面积产量及 2010 年重庆市粮食平均收购价格计算得到研究区单位面积(hm²)生态系统服务价值当量经济价值为 4 738.94 元。参考谢高地等学者的中国生态系统单位面积生态服务价值当量因子表,建设用地服务价值为 0,得到各土地利用类型单位面积生态系统服务价值系数(表 4),并基于此计算得到 2005 年、2010 年、2015 年及 2018 年三峡库区(重庆段)生态系统服务价值分别为 1 088.13 亿元,1 106.09 亿元,1 102.8 亿元,1 101.25 亿元(表 5),呈先增后减的倒 V 型,减少幅度变缓;从价值结构上来看,各年林地的生态系统服务价值均占总价值的 65%以上,是生态系统服务价值的重要组成成分,对生态价值贡献具有绝对优势;各年耕地生态价值占比都在 20%左右,是生态系统服务价值第二主要成分,表明耕地系统不仅仅与粮食安全息息相关,对生态的重要性也不可忽视,其次是草地和水域。

表 3 2005—2018 年各时段三峡库区(重庆段)土地利用转移矩阵								hm ²
年份	土地利用类型	2010 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2005 年	耕地	1951818.77	21401.64	14083.15	13786.15	42100.21	2.77	2043192.70
	林地	22968.85	1778354.31	2962.66	6460.40	4420.89	0.99	1815168.11
	草地	47264.86	69791.81	522714.40	5036.89	2005.49	0.23	646813.68
	水域	432.91	61.11	27.34	71774.08	287.44	0.17	72583.06
	建设用地	1363.38	92.35	50.01	910.67	43401.73	0.07	45818.21
	未利用地	3.88	103.54	33.69	24.00	0.47	527.15	692.72
	总计	2023852.65	1869804.77	539871.26	97992.19	92216.23	531.38	4624268.48
年份	土地利用类型	2015 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2010 年	耕地	1989381.52	10740.97	3877.39	1389.42	17986.42	476.92	2023852.65
	林地	10213.62	1855040.70	1951.84	1022.76	1574.70	1.15	1869804.77
	草地	3870.93	1379.81	533470.32	457.89	691.91	0.40	539871.26
	水域	3290.18	403.17	349.46	93738.20	211.09	0.09	97992.19
	建设用地	1231.88	165.58	24.50	263.07	90492.90	38.32	92216.23
	未利用地	4.01	1.86	0.07	0.25	0.32	524.85	531.38
	总计	2007992.14	1867732.09	539673.58	96871.60	110957.35	1041.72	4624268.48
年份	土地利用类型	2018 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2015 年	耕地	1961701.87	10218.24	5708.91	4144.12	26106.71	112.30	2007992.14
	林地	10889.99	1851247.69	1387.28	1784.57	2420.71	1.86	1867732.09
	草地	3890.53	1356.72	532091.43	1311.14	1023.70	0.07	539673.58
	水域	1292.17	750.71	745.43	93739.62	343.42	0.25	96871.60
	建设用地	1515.53	442.94	622.04	528.42	107769.01	79.40	110957.35
	未利用地	22.41	1.15	2.67	0.09	421.19	594.22	1041.72
	总计	1979312.49	1864017.44	540557.75	101507.96	138084.73	788.11	4624268.48
年份	土地利用类型	2018 年						
		耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
2005 年	耕地	1908153.94	21426.82	15882.04	15061.34	82409.08	259.49	2043192.70
	林地	22634.21	1772877.40	2963.60	8035.56	8656.35	0.99	1815168.11
	草地	46671.39	69208.63	521222.17	6153.08	3558.18	0.23	646813.68
	水域	948.05	61.72	213.37	70988.23	371.52	0.17	72583.06
	建设用地	901.03	339.34	242.89	1245.74	43089.15	0.07	45818.21
	未利用地	3.88	103.54	33.69	24.00	0.47	527.15	692.72
	总计	1979312.49	1864017.44	540557.75	101507.96	138084.73	788.11	4624268.48

表 4 三峡库区(重庆段)不同土地类型单位面积生态服务价值系数元/hm²

功能类型		农田	森林	草地	水体	未利用地
供给服务	食物生产	1394.60	460.22	599.68	739.14	27.89
	原材料生产	543.89	4155.91	502.06	488.11	55.78
调节服务	气体调节	1004.11	6024.68	2091.90	711.25	83.68
	气候调节	1352.76	5676.03	2175.58	2872.88	181.30
	水文调节	1073.84	5703.92	2119.79	26176.68	97.62
	废物处理	1938.50	2398.72	1840.87	20709.84	362.60
支持服务	保持土壤	2050.06	5606.30	3123.91	571.79	237.08
	维持生物多样性	1422.49	6289.65	2607.91	4783.48	557.84
文化服务	提供美学景观	237.08	2900.77	1213.30	6192.03	334.70
合计		11017.35	39216.20	16275.00	63245.19	1938.50

表 5 三峡库区(重庆段)不同时段生态服务价值

土地利用 类型	2005 年		2010 年		2015 年		2018 年		ESV 变化/亿元		
	ESV/亿元	占比/%	ESV/亿元	占比/%	ESV/亿元	占比/%	ESV/亿元	占比/%	2005—2010 年	2010—2015 年	2015—2018 年
耕地	225.11	20.69	222.97	20.16	221.23	20.06	218.07	19.80	-2.13	-1.75	-3.16
林地	711.84	65.42	733.27	66.29	732.45	66.42	731.00	66.38	21.43	-0.81	-1.46
草地	105.27	9.67	87.86	7.94	87.83	7.96	87.98	7.99	-17.40	-0.03	0.14
水域	45.91	4.22	61.98	5.60	61.27	5.56	64.20	5.83	16.07	-0.71	2.93
未利用地	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
总计	1088.13	100.00	1106.09	100.00	1102.80	100.00	1101.25	100.00	17.96	-3.29	-1.55

综合来看,2005—2018 年 ESV 总量为提升,林地与水域生态价值的增加弥补了耕地及草地生态系统服务价值损失。林地、耕地以及水域的生态系统服务价值的变化很大程度上决定了整个研究区总生态系统服务价值的变化方向。2005—2010 年 ESV 增加了 17.96 亿元,在此期间林地与水域的生态系统服务价值的提高是引起 ESV 增加的主要原因,抵消了耕地与草地所带来的价值损失。2010—2015 年 ESV 减少了 3.29 亿元,各地类生态价值仅有未利用地生态价值有轻微提升,难以弥补耕地、林地、草地以及水域所带来的价值损失,尤其耕地价值减少占据该时段总生态系统服务价值变化的 53.1%,其次是林地生态价值损失占总值变化的 24.7%。2015—2018 年 ESV 持续减少 1.55 亿元,减少幅度有所减缓,但单项生态价值减少趋势加大,其中耕地减少所带来的生态服务价值损失达 3.16 亿元,是该时段生态系统服务价值总变化量的 2.1 倍,林地生态价值减少量次之,为 1.46 亿元;该时段水域的增加带来生态服务价值提升 2.93 亿元,一定程度上补偿了总生态系统价值的部分损失。

3.2.2 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值空间动态变化 为消除研究区边缘网格不完整所带来的面积差异,选用生态系统服务价值强度来表征每个网

格生态价值的高低。根据 4 个年份生态系统服务价值强度数值特征,参考 GIS 自然断点分级将价值强度分为:Ⅰ级低值区(<15 500 元/hm²)、Ⅱ级较低值区(15 500~21 500 元/hm²)、Ⅲ级中值区(21 500~27 400 元/hm²)、Ⅳ级较高值区(27 400~33 300 元/hm²)、Ⅴ级高值区(>33 300 元/hm²)5 个等级,从 2005—2018 年生态系统服务价值强度分级空间分布上来看(图 2),以巫溪—涪陵为界,生态系统服务价值强度较高区域主要分布在界线以东,强度偏低的区域主要分布在界线以西。高值区主要分布在库区东部边缘地带的方斗山、大巴山、巫山等地,库区西南边缘江津的四面山也有少量分布,低值区主要位于库区西部主城九区范围以及西北边缘的万州、开州与中部地区的丰都、长寿等地,中值区主要分布在库区北部的云阳奉节等县。

为明晰 2005—2018 年生态系统服务价值强度空间变化特征,通过生态系统服务价值强度变化率来进一步分析。根据 4 个时间段生态系统服务价值强度变化特征,将其变化率分为:Ⅰ级显著降低区(<-30%),Ⅱ级降低区(-30%~0),Ⅲ级增长区(0~30%),Ⅳ级显著增长区(>30%)4 个等级,从 2005—2018 年各时段生态系统服务价值强度变化率分级空间分布上来看(图 3),各时段变化率均以-30%~30%区间即Ⅱ、Ⅲ级

区范围为主,大量分布在研究区各个地区;Ⅰ级显著降低区主要集中在库区西部主城九区范围内,Ⅳ级显

著增长区主要分布在东南丰都、武隆、石柱等地以及北部云阳、奉节等地。

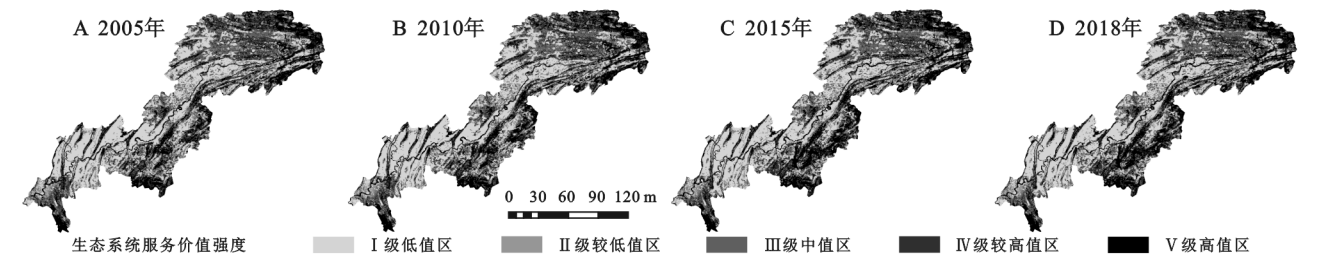


图 2 2005—2018 年生态系统服务价值强度空间分布

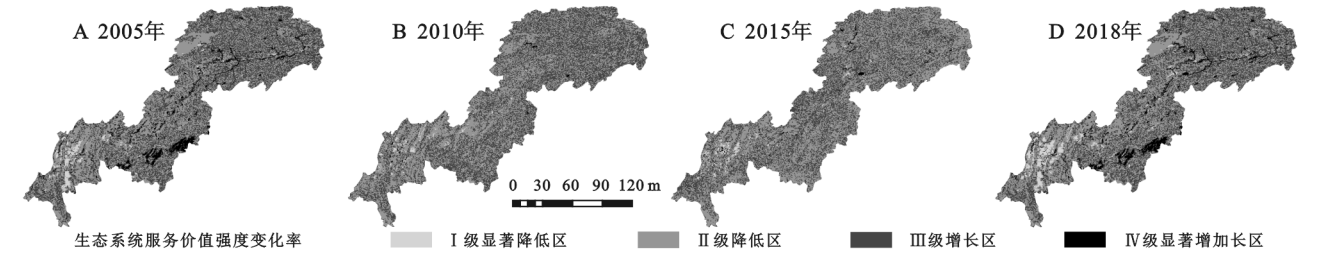


图 3 2005—2018 年各时段生态系统服务价值强度变化率空间分布

2005—2010 年内Ⅲ,Ⅳ级增长区域范围明显大于Ⅰ,Ⅱ级降低区域范围分布,也符合生态系统服务价值数量变化特征。该时段丰都、武隆、石柱等区县增长速度快,且北部云阳、奉节等地属于价值增长的主要区域,武隆等地开发打造本土自然资源,如仙女山、白马山、乌江、芙蓉江等,注重林地水域的保护与建设,带来生态价值的提升;而Ⅰ,Ⅱ级降低区域主要分布的西部主城九区范围由于经济建设,生态地类转变为建设用地,使得生态价值的快速下降。总体上东部的生态价值增长抵消了西部经济发展的生态价值损失,并使 2010 年生态价值较 2005 年有了大幅提升。

2010—2015 年时间段与 2015—2018 年时间段生态系统服务价值强度变化率空间分布特征大致相同,Ⅱ,Ⅲ级即小幅度变化区域分布广,Ⅰ,Ⅳ级显著变化区仅有零星分布,显著下降区均主要位于西部主城区范围,而显著上升区分布较少,位于开州与万州区。2010—2018 年重庆处于经济建设快速发展的阶段,建设用地的快速增长同时也意味着生态用地的面积减少,尤其耕地与林地在这期间的连续下降,耕地普遍拥有更好的区位优势,更平坦的地势,同时也是建设所需要的优势条件,而林地的减少多是由于城市范围的扩张等,该两时间段减少区域明显多于增加区域,也符合生态系统服务价值在数量上的变化特征。总体来看,2005—2018 年Ⅰ,Ⅱ级降低区域主要分布于巫溪—涪陵一线以西,以主城区为主,Ⅲ,Ⅳ级增长区域主要分布于巫溪—涪陵一线以东,变化特征与生态价值强度空间分布特征较为一致,意味着以巫溪—涪陵为界,东西两部分低高值分异更加明显。

3.3 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值空间相关性分析

3.3.1 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值空间自相关 2005—2018 年三峡库区(重庆段)生态系统服务价值强度全局空间自相关指数 Moran's I 值分别为 0.700 7,0.701 6,0.703 8,0.705 1(表 6),均为正值, Z -score 均达到 214 以上(>2.58), p -value 均为 0 (<0.01),表明生态系统服务价值强度的空间分布具有显著的正向空间自相关关系,即具有明显的空间聚集效应。2005—2018 年 Moran's I 指数以及 Z 值均呈现持续增长趋势,生态系统服务价值强度聚集趋势明显且在持续加强。

表 6 2005—2018 年生态系统服务价值强度
全局空间自相关指数

年份	Moran's I 指数	Z -score	p -value
2005	0.700739	214.119610	0.000000
2010	0.701587	214.379172	0.000000
2015	0.703805	215.056948	0.000000
2018	0.705122	215.459252	0.000000

全局空间自相关莫兰指数(Moran's I 指数)能够反映数据在整体空间上的分布情况,为探测聚集效应的具体位置以及空间局部变异即特定单元的空间联系方式等,利用局部空间自相关分析来进行研究。从 LISA 分布图来看(图 4),HH 表示高一高聚集,HL 表示高一低聚集,LH 表示低—高聚集,LL 表示低—低聚集,Not significant 表示没有显著聚集效应。从 2005—2018 年 4 个时间上来看三峡库区(重庆段)局部空间自相关分布格局大致相同,空间分布稳定。HH 区域主要在研究区东北边缘地带、东南

边缘地区以及西南方江津区边缘有连片分布,表示该区域及其周围的 ESV 强度都较高,且呈显著空间正相关,该区域大多为山地地区具有优良的森林资源;LL 区域主要分布在主城区及其周围区县范围与研究区西北部开州区、万州区以及云阳县等地,表示该区域及其相邻区域 ESV 强度均较低,且表现出显著

的空间正相关效应,该区域人口分布较为密集,建设用地面积比例高;HL 区域表示区域高值被低值包围,LH 区域则反之,表示低值区域被高值环绕,空间上呈显著的负相关,具有空间异质性,这两类区域在研究区内数量极少且分布零星,主要位于丰都县中部以及万州区中部。

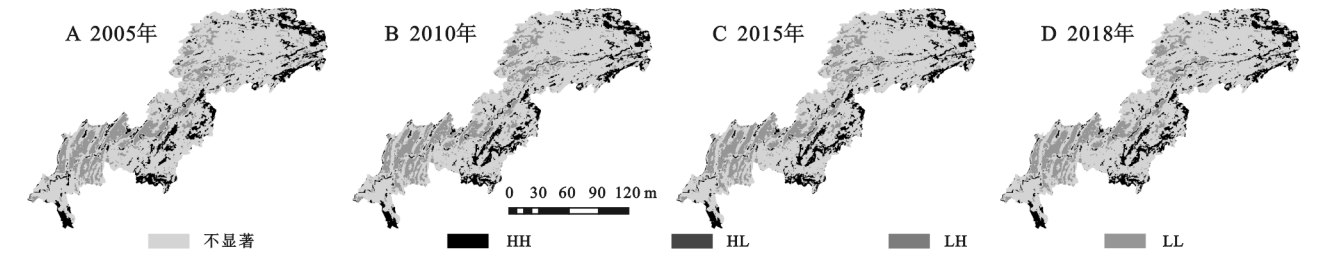


图 4 2005—2018 年生态系统服务价值强度局部自相关空间分布

3.3.2 三峡库区(重庆段)土地利用程度与生态系统服务价值双变量空间自相关 为进一步探索三峡库区(重庆段)土地利用情况与生态系统服务价值强度之间的空间关系,计算每个格网内土地利用程度指数值,采用双变量空间自相关进行分析,得到 2005 年、2010 年、2015 年、2018 年 Moran's I 指数分别为 -0.463 、 -0.496 、 -0.502 、 -0.508 。4 期 Moran's I 指数均为负值,且绝对值逐年增长,表明土地利用程度指数与生态系统服务价值强度间存在显著的负效应,且逐年加强,即生态系统服务价值强度随着土地利用程度的增加而下降。从

LISA 分布图上看(图 5),HH 区域与 LL 区域在研究区范围内数量少且分布零星,HL 区域在研究区巫溪—涪陵一线西侧呈较大的连片分布,主要位于主城区及周围区县以及开州、万州、丰都以西等地区。LH 区域主要位于研究区东侧边缘地带以及江津武隆北侧等地。从双变量 LISA 显著性水平来看(图 6),主城区中梁山脉与铜锣山脉之间、江津北侧、武隆北侧、开州区中部、万州区西北侧以及巫溪巫山东侧等地土地利用强度与 ESV 呈 HL 或 LH 极显著相关($p < 0.01$),其周边地区表现为显著相关($p < 0.05$)。

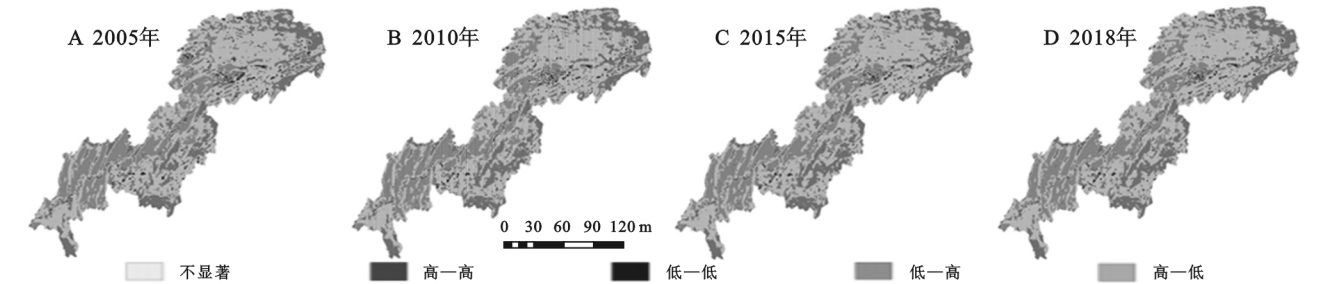


图 5 2005—2018 年双变量 LISA 空间分布

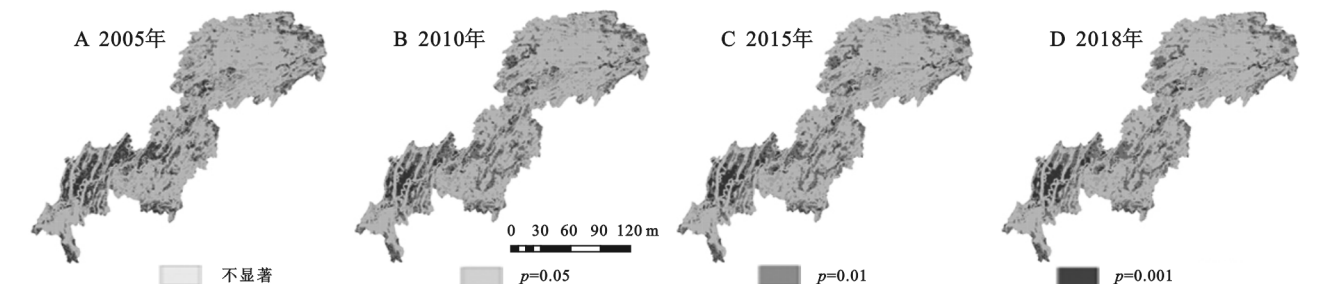


图 6 2005—2018 年双变量 LISA 显著性水平空间分布

4 结论与建议

(1) 三峡库区(重庆段)在 2005—2018 年土地利用转型活跃程度与生态系统服务价值变化空间分布一致。土地利用转型数量上耕地转出(减少)幅度最大,建设用地转入(新增)幅度最高,空间上主城区范

围及周边区县以及长江沿线地区地类转型活跃,研究区东北侧山地地区综合土地利用地类转型相对迟缓,与生态系统服务价值变价率空间分布一致。

(2) 三峡库区(重庆段)生态系统服务价值呈现以巫溪—涪陵为界,西低东高,西减东增的格局。以巫溪—涪陵界以西为生态系统服务价值强度低值区

及主要强度降低区,界线以东是强度高值区及强度主要增长区。今后应把握 ESV 空间分布及时空变化特性,全局调整生态规划。

(3) 生态系统服务价值强度的空间分布具有显著的正向空间自相关关系,且空间聚集趋势明显。HH 区域大多为山地地区具有优良的森林资源;LL 区域人口分布较为密集,建设用地面积比例高。ESV 空间特性明显,充分利用其聚集效应,改善生态环境,提高其服务价值。

(4) 土地利用程度指数与生态系统服务价值强度间存在显著的负效应,且逐年加强。HL 区域在研究区巫溪—涪陵一线西侧呈较大的连片分布;LH 区域主要位于研究区东侧边缘地带以及江津武隆北侧等地。应探究生态系统服务价值空间异质性及土地利用与生态系统服务价值间的空间相关性与异质性,把握空间集聚效应热点区,合理规划土地利用类型。

探究近 15 a 来土地利用转型特征,采用了综合土地利用变化率,考虑土地利用转型转入转出双向转型,区分由于转型增减抵消而忽略的单向转入转出面积较大的情况,更加精确地识别土地利用转型的活动情况;利用当量法将“绿水青山”量化为“金山银山”,定量研究土地利用转型所引起的生态服务价值变化空间分布规律;利用空间自相关方法对生态系统服务价值空间分异情况进行探查,了解空间变量的分布特性,并且运用双变量空间自相关来揭示土地利用系统与生态环境系统的空间相关性,更加清晰土地利用系统与生态系统的关系,为决策者进行区域土地资源优化配置提供更直观有效的信息。近 15 a 生态系统服务价值的提升主要得益于 2005—2010 年的林地增长,重庆自 1997 年直辖以来,加强林业建设,推进退耕还林,森林增长速度达全国平均水平的 4 倍,由此使得 EVS 总量增加。随着重庆经济社会快速发展,近年来林地耕地面积持续减少,使得生态服务价值呈下降趋势,亟需优化土地利用结构模式,科学管理土地开发利用,统筹生态要素合理布局,实现生态管控,推动自然生态系统和社会经济系统长期协调发展。

参考文献:

- [1] 徐志涛,陈鹏飞,周世健,等.白洋淀流域土地覆被变化及其生态服务价值评价[J].生态科学,2018,37(6):83-90.
- [2] 石龙宇,崔胜辉,尹锴,等.厦门市土地利用/覆被变化对生态系统服务的影响[J].地理学报,2010,65(6):708-714.
- [3] 周渝,邓伟,刘婷,等.重庆都市区生态系统服务价值时空演变及其驱动力[J].水土保持研究,2020,27(1):249-256.
- [4] 史洋洋,吕晓,黄贤金,等.江苏沿海地区耕地利用转型及其生态系统服务价值变化响应[J].自然资源学报,2017,32(6):961-976.
- [5] 李全峰,胡守庚,瞿诗进.1990—2015 年长江中游地区耕地利用转型时空特征[J].地理研究,2017,36(8):1489-1502.
- [6] 何昌华,张嫦,李天国,等.基于土地利用变化趋势的生态服务价值分析:以重庆市石柱县为例[J].城市环境与城市生态,2016,29(5):7-11.
- [7] 马骏,马朋,李昌晓,等.基于土地利用的三峡库区(重庆段)生态系统服务价值时空变化[J].林业科学,2014,50(5):17-26.
- [8] 刘婷.三峡库区重庆段城市空间扩展与生态承载力时空变化研究[D].重庆:重庆工商大学,2018.
- [9] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [10] 刘永强,龙花楼,李加林.长江中游经济带土地利用转型及其生态服务功能交叉敏感性研究[J].地理研究,2018,37(5):1009-1022.
- [11] 刘永强,龙花楼.长江中游经济带土地利用转型时空格局及其生态服务功能影响[J].经济地理,2017,37(11):161-170.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 胡和兵,刘红玉,郝敬锋,等.南京市九乡河流域土地利用程度空间异质性分析[J].地球信息科学学报,2012,14(5):627-634.
- [15] 雷金睿,陈宗铸,吴庭天,等.海南岛东北部土地利用与生态系统服务价值空间自相关格局分析[J].生态学报,2019,39(7):2366-2377.
- [16] 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.
- [17] 姚小薇,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.
- [18] 陈婧祎,罗红霞,胡林利,等.生态系统服务价值与社会经济相关性研究:以重庆市大都市区为例[J].水土保持研究,2017,24(4):330-336.
- [19] 谷建立,张海涛,陈家赢,等.基于 DEM 的县域土地利用空间自相关格局分析[J].农业工程学报,2012,28(23):216-224.