

重庆市石柱县生态系统服务功能时空格局研究^{*}

陈 琴

(西南大学 园艺园林学院, 重庆 400044)

摘要:【目的】对三峡库区具有典型山地特征的重庆市石柱县生态系统服务功能进行定量评估,分析石柱县生态系统服务功能变化的时空特征。【方法】以 2000,2005,2010 及 2015 年这 4 期石柱县的遥感影像为基础,采用植被净初级生产力及归一化植被指数数据对生态系统服务价值评估模型进行修订。【结果】1) 2015 年石柱县生态系统服务功能总价值比 2000 年增加约 39.46%(6.42 亿元),其中提供价值最高的是林地,价值为 63.24 亿元,占总价值的 79.30%,最低的为未利用地。2) 土壤保持和水源涵养成为石柱县最重要的生态系统保护功能。从不同生态系统来看,不同土地利用类型它们提供的生态系统服务功能价值总量由高到低排列依次为:林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地。3) 石柱县生态系统服务功能价值量东部高于西部,且由研究区东部逐渐向西部减少。【结论】研究结果可为石柱县区域生态、经济可持续发展提供理论支持。

关键词:生态系统服务功能;时空格局;土地利用;山地

中图分类号:X826

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2021)06-0030-15

生态系统是维持人类社会可持续发展的功能单元^[1-2],生态系统服务即是人类直接或间接从生态系统结构、过程和功能中获取维持生存所需的物质产品等各种效益,它的变化与人类福祉密切相关^[3]。生态系统服务具有多重价值的特点,使之成为生态资产的重要组成部分,而人类在利用、改造自然的过程中忽视了生态系统的生态效益及价值,未形成生态系统服务价值观,生态系统破坏“零成本”现象的长期存在致使人类社会可持续发展受到了严重威胁^[4-5]。20 世纪 90 年代初生态系统服务功能价值化问题已引起国际学术界的高度关注^[6],基于不同尺度、不同类型生态系统服务功能价值评估及评价方法的研究已取得丰富成果,例如:欧阳志云等人^[7]探讨了中国陆地生态系统的间接经济价值;谢高地等人^[8]建立了中国陆地生态系统生态服务价值当量表,而当量因子法也成为之后的研究范式;Barrio 等人^[9]利用 CV 法评估世界各地森林生态系统提供的服务价值。在生态系统服务价值评估过程中,遥感信息是重要信息源。无论是基于遥感监测的生态模型法,或是基于专家知识的价值当量法都依托了遥感与 GIS 技术。“3S”技术开辟了生态系统服务功能量化评估的新角度,例如:Schägnner 等人^[10]利用 GIS 及综合分析方法研究了欧洲的娱乐文化生态系统服务价值变化;马依拉·热合曼等人^[11]基于遥感与 GIS 研究了渭库绿洲生态系统服务功能时空变化特征。从已有研究成果看,国内外关于生态系统服务功能的研究范围包含有全球^[12]、区域^[9,13]、流域^[14-15]、单一生态系统^[16]等多个尺度的生态系统服务功能评估研究,且不同尺度有不同的评估方法。有关评估方法主要有能值分析法、物质质量评价法及价值当量法,其中价值当量法被国内外学者广泛采纳。随着研究的深入,国内学者基于谢高地提出的全国生态系统服务价值当量法进行了修正,以适应不同区域不同生态系统的价值评估,如卢元清等人^[17]、吴娇等人^[18]依据各自研究区实际情况对各土地利用类型的服务类型的当量因子进行了修正。据相关研究,生态系统服务价值高低除了与土地利用相关,还与植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)、归一化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI)、增强植被指数(Enhanced vegetation index, EVI)等高度相关,因此相关学者以 NPP 和 NDVI 为数据源修正生态系统服务价值,如程滔^[6]以 NPP、NDVI、EVI 及植被生长季为数据源,并以土地利用为基础修正得出石柱县各生态系统服务功能的价值,开辟了生态系统服务功能研究新思路。

三峡库区是长江上游重要的生态功能区,学者们对三峡库区生态系统功能重要性进行了评价^[19],对不同土

^{*} 收稿日期:2021-11-10 修回日期:2021-11-16 网络出版时间:2021-11-18 10:57

资助项目:国家社会科学基金(No. 14BJY146)

第一作者简介:陈琴,女,副研究员,博士,研究方向为景观生态,E-mail:453222741@qq.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20211118.1035.006.html

地利用类型^[20]和不同生态系统功能^[21]等进行了系列研究。目前基于当量因子法评估三峡库区的生态系统服务功能不胜枚举,鲜有以 NPP 和 NDVI 为数据源修正生态系统服务价值的研究。本研究利用 NPP 及 NDVI 数据对生态系统服务功能的价值评估模型进行修订,选取位于三峡库区腹地的具有典型山地特征的重庆市石柱县为研究区,通过对石柱县生态系统服务功能的定量评估,清晰认知该区域生态资产及生态环境质量变化的情况,为优化当地景观格局,提高生态系统服务功能提供依据。

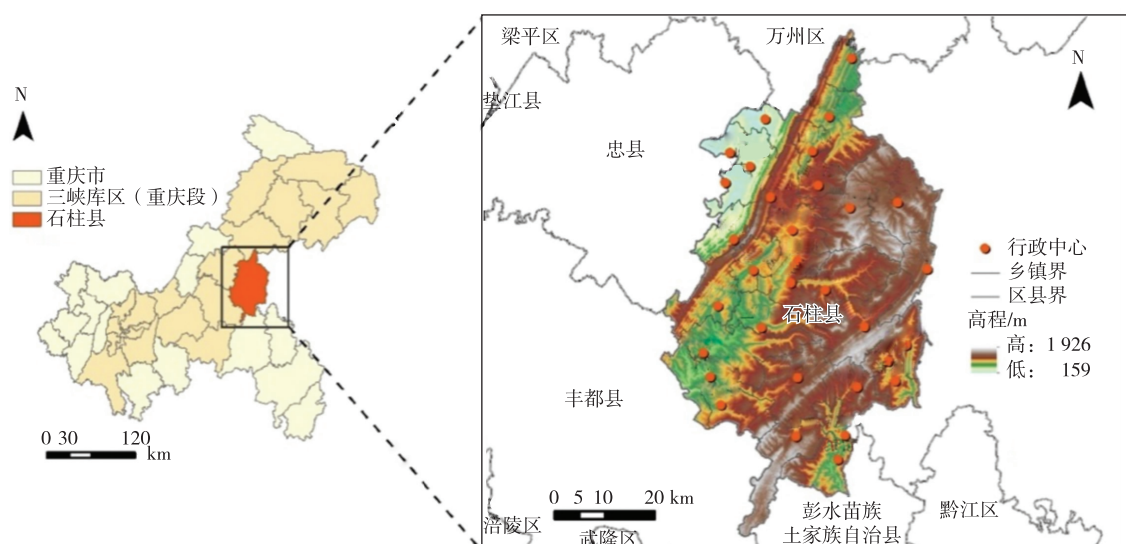
1 数据与方法

1.1 研究区概况

石柱县地处东经 107°59′~108°34′、北纬 29°39′~30°32′之间,位于三峡库区腹心地带(图 1),全县总面积 3 012.51 km²,是三峡库区惟一的少数民族自治县。辖区地势东高西低,境内溪河遍布,森林、矿产资源富集,主要的用地类型有草地、林地、耕地、建设用地、未利用地及水域,属中亚热带湿润季风气候。

1.2 数据来源与数据处理

1.2.1 土地利用数据 本研究所使用的 4 期土地利用数据(2000,2005,2010 和 2015 年)来源于重庆市规划和自然资源局,再利用谷歌历史影像数据(2000,2005,2010 和 2015 年)并结合 ENVI 5.1, ArcGIS 10.1 软件平台进行精度验证,经验证 4 期土地利用数据总体精度均达 90%以上, Kappa 系数均大于 88%,精度满足本研究需求,栅格大小统一为 25 m×25 m。



注:底图来源于重庆市标准地图服务网,审图号:渝 S(2019)064 号,下同

图 1 石柱县区位图

Fig. 1 Map of Shizhu county

1.2.2 MODIS 数据集 在生态系统服务功能价值计算过程中,遥感信息是重要数据源。MODIS 数据因具有高时间、高光谱分辨率等特点,已被广泛应用于资源、环境、生态等方面的研究。本研究选取 MODIS 数据蕴含的 NDVI 和 NPP 作为主要数据源进行研究计算。

1.3 研究方法

1.3.1 生态系统服务功能单位面积价值确定 标准单位生态系统服务功能的当量因子是指 1 hm²全国平均产量的农田每年自然粮食产量的经济价值;其他生态系统服务功能是指生态系统产生该生态系统服务相对于农田食物生产服务贡献的大小,具体计算方式为:

$$H_n = \frac{1}{7} \times m_G \times T_i, \quad (1)$$

其中: H_n 表示某种土地类型的某种服务功能提供的经济价值,单位为元·hm⁻²; T_i 表示标准生态系统服务功能当量因子经济价值,单位为元·hm⁻²,研究选取 2000—2015 年的均值,为 2 841.16 元·hm⁻²; m_G 为生态系统服务功能的当量因子; $\frac{1}{7}$ 是指在无人力投入的自然生态系统提供的经济价值在现有单位面积农田提供的食物生

产经济价值中的占比。

1.3.2 生态系统服务功能价值评估模型修订 千年生态系统评估(MA)的方法将生态系统服务分为供给服务、调节服务、支持服务和文化服务共 4 个大类。Costanza 等人^[12]对生态系统服务功能进行了分类,谢高地等人^[8,22]在此基础上采用千年生态系统评估方法作了进一步细分,把生态系统服务功能划分为气候调节、气体调节、水源涵养、土壤保持、废物处理、生物多样性保护、食物生产、原材料生产、娱乐文化等 9 类。本研究参考上述研究成果,根据三峡库区(重庆段)具体情况修订得到三峡库区(重庆段)生态系统单位面积生态系统服务功能价值表,在此基础上,利用 NPP 和 NDVI 多源遥感信息及单位面积生态系统服务价值当量因子(表 1),计算各栅格单项生态系统服务功能价值及生态系统服务功能总价值。

1) 生态系统服务功能总价值评估模型:

$$V_i = V_{ig} + V_{it}; \tag{2}$$

2) 食物生产和原材料生产功能价值评估模型:

$$V_{ig} = S_i \times \frac{H_n}{10\ 000} \times \frac{m_{NPP_i}}{m_{NPP'}}; \tag{3}$$

3) 土壤保持、水源涵养、气体调节、气候调节、废物处理和生物多样性保护功能价值评估模型:

$$V_{it} = S_i \times \frac{H_n}{10\ 000} \times \frac{m_{NDVI_i}}{m_{NDVI'}}. \tag{4}$$

(2)~(4)式中: V_{ig} 为第*i*个栅格食物生产和原材料生产功能价值; V_{it} 为第*i*个栅格土壤保持、水源涵养、气体调节、气候调节、废物处理和生物多样性保护功能价值; S_i 为第*i*个栅格的面积; H_n 为标准生态系统服务功能当量因子经济价值量; m_{NPP_i} , m_{NDVI_i} 分别为第*i*个栅格内特定地表覆盖类型的 NPP 和 NDVI; $m_{NPP'}$, $m_{NDVI'}$ 分别为研究区特定地表覆盖类型生态系统的平均 NPP 和平均 NDVI。

4) 娱乐文化功能价值评估模型:

$$E_r = \sum_{i=1}^3 \frac{P_u \times D_q}{A}. \tag{5}$$

式中: E_r 代表建设用地生态系统娱乐文化功能的价值系数; P_u 为旅游过程中的每一种花费总额; D_q 为石柱县建设用地面积; A 为石柱县面积。

表 1 石柱县不同土地利用类型生态系统服务功能当量因子

Tab. 1 Equivalent factor of ecological service of land use typie of Shizhu county

功能类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	功能类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
气体调节	0.52	3.64	2.25	0.90	-0.16	0.00	生物多样性保护	0.70	3.24	2.16	2.48	0.00	0.33
气候调节	1.08	3.26	2.18	10.61	0.00	0.00	食物生产	1.00	0.10	0.21	0.20	0.00	0.01
水源涵养	0.71	3.80	2.38	21.32	-1.93	0.03	原材料生产	0.10	2.59	1.32	0.03	0.00	0.00
土壤保持	1.45	3.89	2.92	0.85	0.00	0.02	娱乐文化	0.01	1.28	0.04	4.95	16.10	0.01
废物处理	1.63	1.30	1.30	18.09	-0.07	0.01							

2 结果与分析

2.1 NPP 与 NDVI 空间格局分析

2.1.1 NPP 空间分布特征分析 石柱县(2000,2005,2010 和 2015 年)植被 NPP 空间分布如图 2 所示,4 期 NPP 值呈先减后增的态势,规律与土地利用类型分布具有一致性。图 2 中 NPP 取值区间为 $[0,1\ 212.10]$,其中谷值出现在 2005 年,为 $758.60\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$;峰值出现在 2000 年,为 $1\ 212.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。从研究区整体来看,4 期的 NPP 低值区在石柱县各乡(镇、街道)都有分布,但以西部的乡(镇、街道)为主,最低值分布在西北方的黎场乡、西沱镇及西南方的南宾、下路等街道,与研究区建设用地和水域相呼应。NPP 中值区主要土地利用类型为耕地,在石柱县都有分布,主要集中在七曜山区域,4 期数据呈逐渐增加的态势。NPP 高值区的主要土地利用类型为林地,主要分布在万寿山和方斗山片区,呈现由东向西逐渐降低的态势。

2.1.2 NDVI 空间分布特征分析 由图 3 可知,研究区(2000,2005,2010 和 2015 年)的 NDVI 值均较高,并呈稳

定的缓速增长态势,整体呈现由万寿山向四周降低的态势。2000—2005年、2010—2015年的NDVI值呈微增长;2005—2010年,NDVI值增长0.04,得益于国家退耕还林、退耕还草的宏观政策。2005年NDVI低值为-0.04,与其他3期的低值较为一致,与建设用地、水域和未利用地相呼应,主要包含黎场乡、西沱镇、沿溪镇、王场镇等。从整体来看,4期的NDVI空间分布有相似性和一致性。在宏观上石柱县各乡(镇、街道)均有低值分布,如:南部和东南部,最低值分布在建设用地为主的西部地区;中值区在除黎场乡、西沱镇、沿溪镇、王场镇、万朝镇之外的区域均有分布;高值区主要分布在万寿山片区。NDVI值整体上呈中间高、四周低的特征,且NDVI高值呈现略微增加的态势。

2.2 生态系统服务功能动态变化

2.2.1 不同服务功能类型的价值变化 从表2可以看出,石柱县各生态系统服务功能的价值都有所变化,2000和2005年气候调节、气体调节、生物多样性和水源涵养的价值贡献较多,而食物生产、土壤保持、原材料生产、废物处理和娱乐文化的价值贡献较少。其中,水源涵养在2000和2005年对生态系统服务功能的价值贡献最多,根据表2可以看出水源涵养价值分别达到2.75亿元和3.04亿元,所占比例达16.90%和17.25%。从表2各生态系统服务功能的生长趋势看,2000和2015年气候调节、气体调节、生物多样性保护、水源涵养、废物处理和娱乐文化的功能价值都有显著增长,食物生产、土壤保持和原材料生产有变化但变化趋势不明显。

由表2可以看出,2010和2015年土壤保持功能的价值贡献急剧增加,超过水源涵养而成为价值贡献最多的生态系统服务功能类型,土壤保持功能的价值从2000年的1.59亿元和2005年的1.65亿元提升到2010年的3.86亿元和2015年的3.84亿元,贡献超过水源涵养,占比分别达到16.67%和16.93%。数据表明,土壤保持功能已成为石柱县最重要的一项保护功能。气候调节、气体调节、生物多样性、水源涵养和原材料生产相较于前两期的数据均有明显增长,而贡献率方面由于受到土壤保持急速增长的影响有一定程度的下滑。值得一提的是,水源涵养功能虽然在功能价值方面被土壤保持超过,但是它一直维持着稳定的增长趋势,说明水源涵养功能一直是石柱县重要的保护功能。2010年除娱乐文化功能外,其他生态系统服务功能的价值均达到4期数据的最高值,其中气候调节达3.29亿元,气体调节达3.34亿元,生物多样性保护达3.08亿元,水源涵养达3.70亿元,原材料生产达2.26亿元,废物处理达1.86亿元。

随着国家退耕还林政策的推进实施,越来越多的耕地转化为林地,森林覆盖率的增加使得石柱县境内土地的水源涵养、土壤保持能力不断增强,提高了土地的水分下渗能力,起到了调节径流的作用,减小了雨水对土地的冲蚀作用。并通过森林生态系统特有的改良土壤的能力提高了土壤的蓄水能力,减少了土地面积的损失和土壤肥力的流失,使石柱县的生态系统服务功能不断提高。

1) 水源涵养功能价值。从图4和图5可以看出,石柱县内的水源涵养功能的价值呈现东部高于西部的分布特点,尤其以沙子镇、六塘乡、黄水镇、中益乡等地的水源涵养功能价值相对较高。2015年的水源涵养生态系统服务功能的价值达到2000万元以上,分别为2351.16万元、2526.73万元、2552.10万元和3350.17万元,表明石柱县东部水源涵养的功能价值要优于西部。石柱县西部处于山地,森林保护区多,可以起到涵养水源的作用。而类似沿溪镇、三益乡、西沱镇、黎场乡的水源涵养功能价值较低,2015年低于500万元,分别为386.56万元、384.08万元、320.55万元和475.00万元。研究区西部区域部分为沿江地区,降水转化为地表径流流失,西部建设用地较多,水源涵养的功能弱,导致价值较低。通过这4期数据的对比,黄水镇、龙潭乡的水源涵养功能的价值提升明显,黄水镇的水源涵养功能价值从2005年的2270.64万元增长到2010年的3379.65万元,龙潭乡水源涵养功能价值最低时为2005年890.68万元,最高时为1725.68万元。

2) 土壤保持功能价值。由图6和图7可以看出,2000和2005年石柱县各乡(镇、街道)的土壤保持功能价值变化不大;2005和2010年变化较大,大部分区域的土壤保持功能价值都达到了顶峰。而2010和2015年基本保持一致,说明大部分区域前期功能价值维持在较高水平。2000和2005年,石柱县中部地区土壤保持功能价值相对较高,例如沙子镇、南宾街道、六塘乡、中益乡等,土壤保持功能价值基本都在500万元以上,黄水镇的价值最高,均在1000万元以上。而在2010年,石柱县绝大部分区域土壤保持功能价值都飞跃式增长,大致呈现东部高于西部的态势。只有几个乡镇变化不大,例如沿溪镇、三益乡、黎场乡等,土壤保持功能的价值依然未超过500万元,这与它们的面积较小和土地利用情况相关。三益乡虽位于中西部高值区,但面积较小、发展空间不大,导致功能价值较低。以上表明,退耕还林政策在改变土地类型的同时,带来了极大的功能价值。中益乡和沙子镇的功能价值均达到2500万元以上,黄水镇更是接近3500万元,一直以来都是石柱县土壤保持功能价值贡献最多的镇。

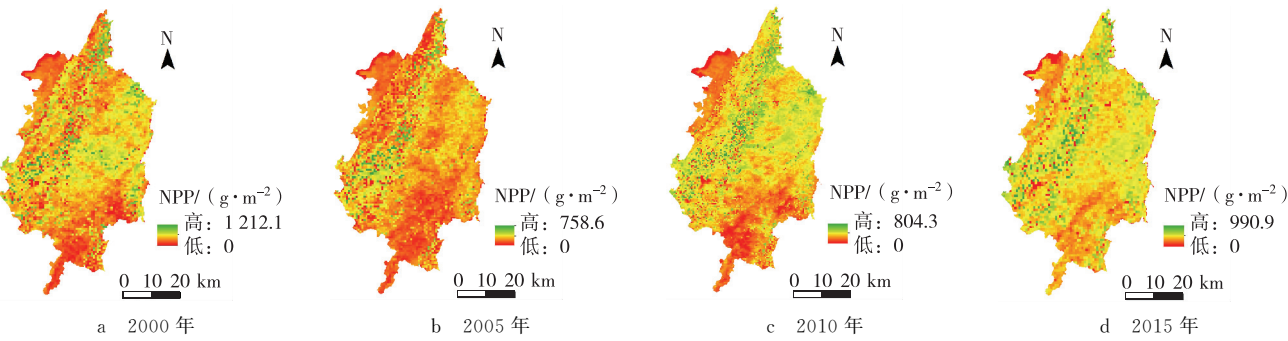


图 2 2000—2015 年石柱县 NPP 空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NPP in Shizhu county from 2000 to 2015

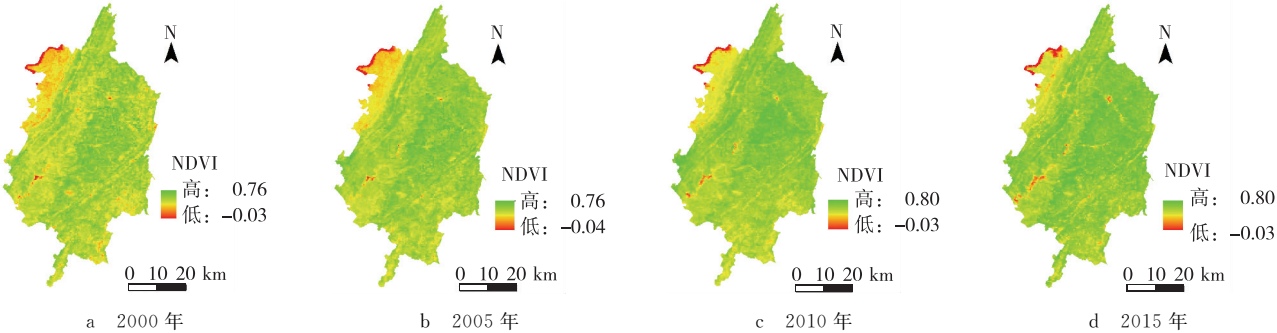


图 3 2000—2015 年石柱县 NDVI 空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of NDVI in Shizhu county from 2000 to 2015

表 2 2000—2015 年石柱县不同生态系统服务功能的价值及占比

Tab. 2 The value and ratios of different ecosystem services of Shizhu county from 2000 to 2015

服务类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年	
	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%
气候调节	2.59	15.92	2.83	16.06	3.29	14.21	3.25	14.32
气体调节	2.53	15.55	2.74	15.55	3.34	14.42	3.30	14.55
生物多样性保护	2.40	14.75	2.60	14.76	3.08	13.30	3.04	13.40
食物生产	0.49	3.01	0.53	3.01	0.44	1.90	0.39	1.72
水源涵养	2.75	16.90	3.04	17.25	3.70	15.98	3.65	16.09
土壤保持	1.59	9.77	1.65	9.36	3.86	16.67	3.84	16.93
原材料生产	1.41	8.66	1.49	8.46	2.26	9.76	1.91	8.42
废物处理	1.69	10.39	1.85	10.50	1.86	8.03	1.82	8.02
娱乐文化	0.82	5.05	0.89	5.05	1.33	5.74	1.49	6.56

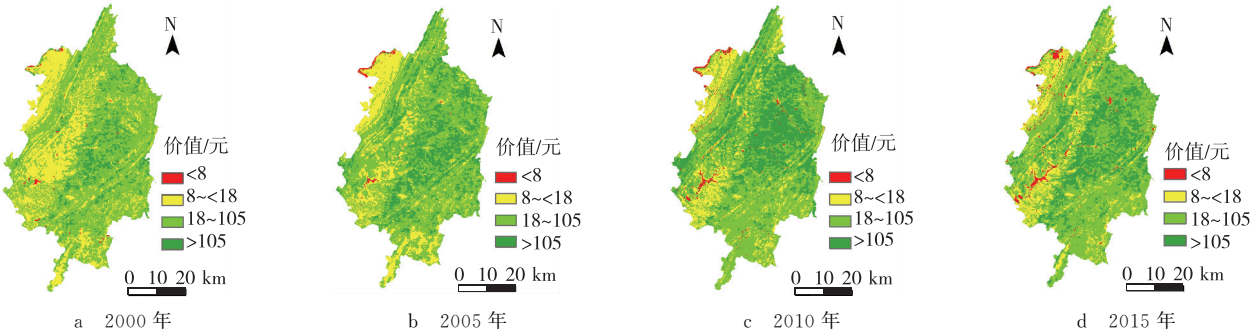


图 4 2000—2015 年石柱县水源涵养功能价值

Fig. 4 Spatial distribution of the value of water conservation function in Shizhu county from 2000 to 2015

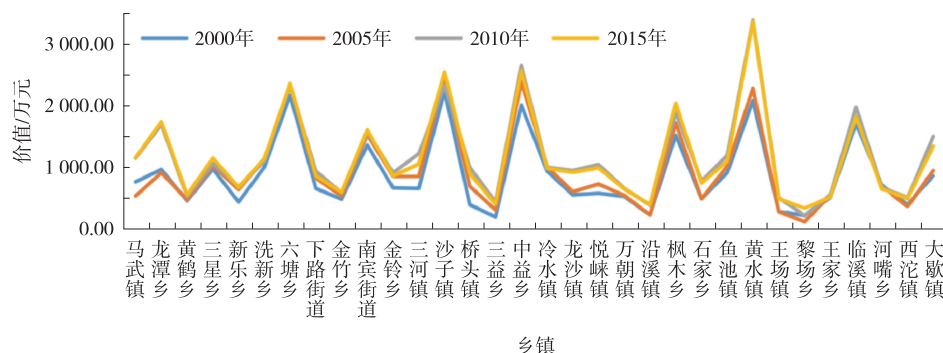


图5 2000—2015年石柱县各乡镇水源涵养功能价值

Fig. 5 The value of water conservation function in different villages and towns from 2000 to 2015

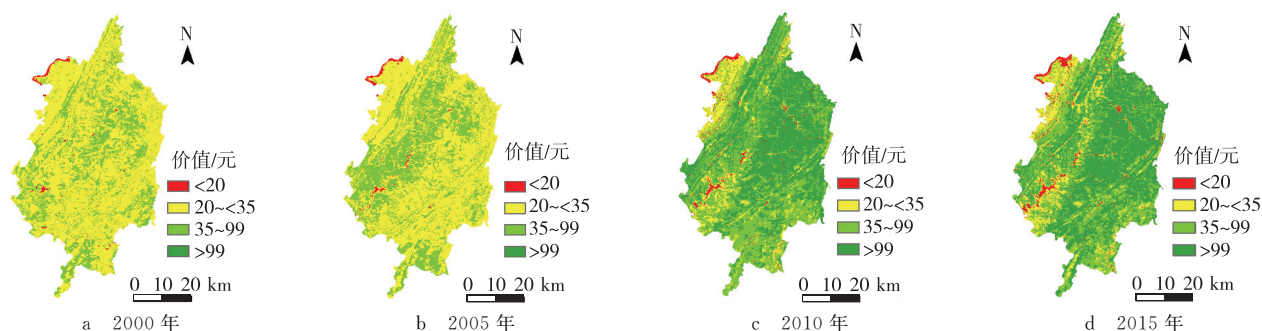


图6 2000—2015年石柱县土壤保持功能价值空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the value of soil conservation function in Shizhu county from 2000 to 2015

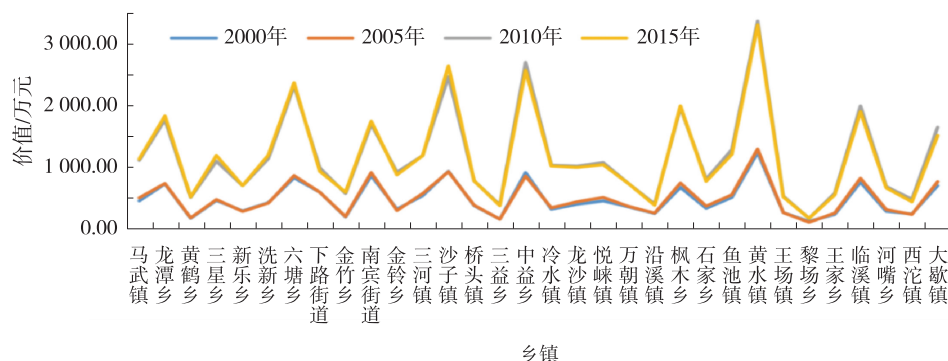


图7 2000—2015年石柱县各乡镇土壤保持功能价值

Fig. 7 The value of soil conservation function in Shizhu county from 2000 to 2015

3) 气候调节功能价值。由图8、图9可知,石柱县气候调节功能价值大致呈现自东部向西部递减的空间分布特点。大多数乡镇的气候调节功能价值保持稳中有进,但增长幅度不明显,个别乡镇增幅较大。石柱县南部的龙潭乡,2005年功能价值最低,为942.77万元,位于中游偏下的水平;但在2015年达到最高值,为1531.85万元,位于中游偏上的水平。黄水镇是气候调节功能价值贡献最多的乡镇,在保持原有较好功能价值的同时,从2000年的1931.89万元提升到2010年的2923.24万元。其他增长明显的还有石柱县中部的部分乡镇,例如龙沙镇、悦峰镇等都有较明显的增长。

4) 气体调节功能价值。从图10和图11可以看出,气体调节的空间分布特征与气候调节的空间分布大致相同,石柱县西部的气体调节功能价值低于东部的功能价值。其中,以2015年为例,气体调节功能最大价值出现在东部的黄水镇,2010年黄水镇气体调节功能价值为3082.79万元,2015年稍有下滑,但仍然保持在高水平,为3041.61万元;最小值出现在西部的黎家乡,2005年的功能价值仅为58.85万元,2010年有所提升,但也只有123.46万元,约为黄水镇总价值的4%,说明石柱县气体调节功能价值存在一定的区域差异。从生态系统服务功能价值的变化来看,石柱县南部的龙潭乡与黄水镇的功能价值变化最大:龙潭乡从2005年的802.69万元上升到2010年的1608.69万元,增长了1倍;黄水镇从2000年的1925.75万元提升到2010年的3082.79万元,

遥遥领先其他乡镇。而黄鹤乡、黎场乡、临溪镇等地由于受到土地利用类型等因素的限制,2000—2015 年气候调节功能的价值基本没有变化。

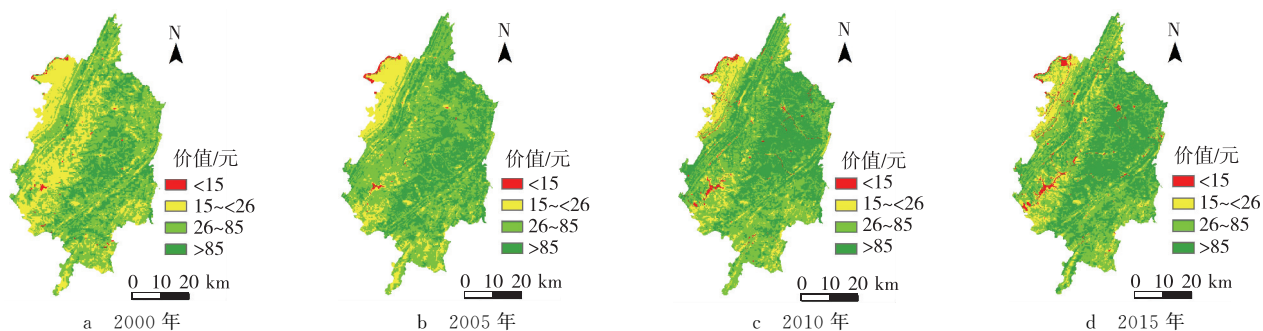


图 8 2000—2015 年石柱县气候调节功能价值空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of the value of climate regulation function in Shizhu county from 2000 to 2015

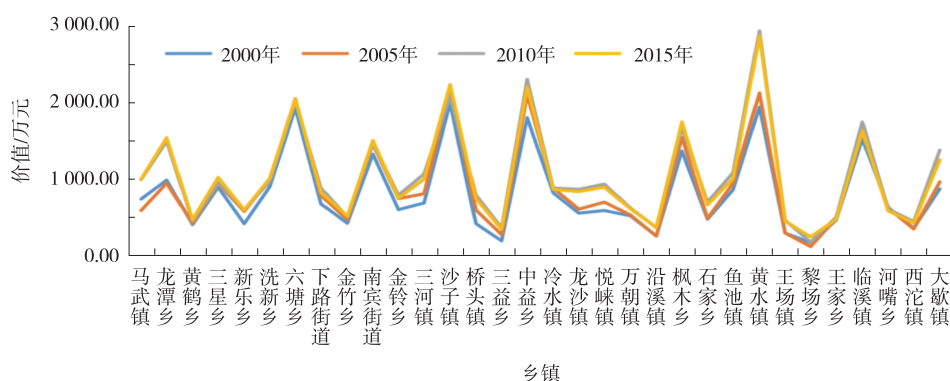


图 9 2000—2015 年各乡镇气候调节功能价值

Fig. 9 The value of climate regulation function in different villages and towns from 2000 to 2015

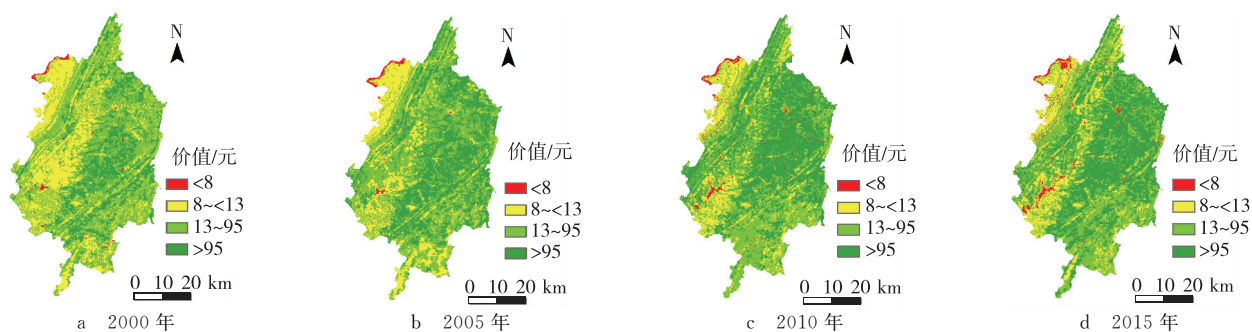


图 10 2000—2015 年石柱县气体调节功能价值空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of the value of climate regulation function in Shizhu county from 2000 to 2015

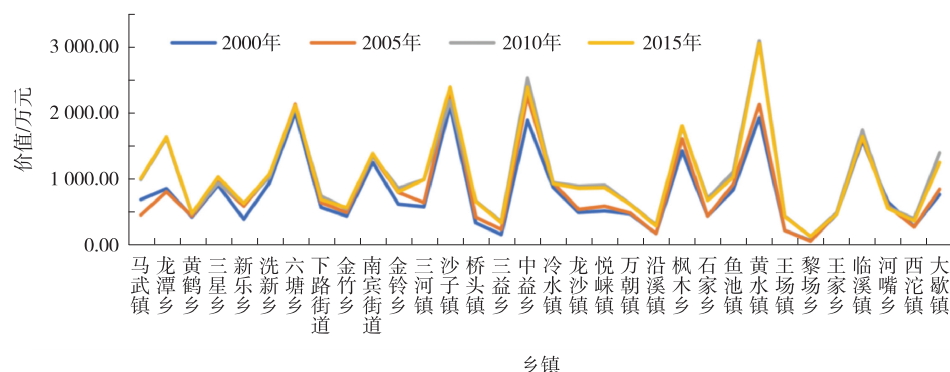


图 11 2000—2015 年各乡镇气体调节功能价值

Fig. 11 The value of climate regulation function in different villages and towns from 2000 to 2015

5) 生物多样性保护功能价值。如图 12 和图 13 所示,石柱县生物多样性保护功能的价值同气候调节、气体调节的空间分布和变化趋势大致相同,呈现出东高西低的特点。黄水镇、中益乡、沙子镇、六塘乡等靠近东部的地域生物多样性保护功能价值较高,三益乡、沿溪镇、黎场乡等中西部地域的生物多样性保护功能价值较低。生物多样性保护功能价值区域差异明显。有所不同的是,生物多样性保护功能的价值发生变化的乡(镇、街道)数量更多,除了黄水镇和龙潭乡,还有部分中部的三河镇、石家乡、金铃乡等地的这一价值增长明显。

6) 原材料生产功能价值。从图 14 和图 15 可以看出,原材料生产功能价值呈现东高西低的分布特点,各乡镇基本在 2010 年达到原材料生产功能价值的最高值。其中,原材料生产功能价值最高的两个乡镇为黄水镇和中益乡,2010 年黄水镇的原材料生产功能价值为 2 147.65 万元,中益乡的功能价值为 1 771.00 万元。新乐乡和三益乡在 2000 年处于原材料生产功能价值的最低值,2000 年后的价值量虽有一定程度的增长,但由于两地土地面积太小,致使总价值较低;黎场乡和沿溪镇在 2005 年功能价值最低,2005 年后的变化趋势也不明显,主要是由于该区域缺少林地,土地利用类型以耕地、水域和建设用地为主。

7) 废物处理功能价值。由图 16 和图 17 可知,石柱县废物处理功能价值呈现西部较低、其他地方较均匀的分布特点。大多数地方每期数据的变化趋势不明显。黄水镇废物处理功能价值贡献最大,每期功能价值都有一定程度的增幅。六塘乡、南宾街道、沙子镇、中益乡的功能价值仅次于黄水镇,但每期变化趋势不明显。临溪镇经过近 10 年的发展,废物处理功能价值提高到了较高水平,2010 年废物处理功能价值达到 1 005.50 万元。龙潭乡的废物处理功能价值出现下降趋势,与其他生态系统服务功能价值趋势相反。废物处理功能价值较低的是黄鹤乡、金竹乡、三益乡、黎场乡等面积较小或者缺少林地的区域。

8) 食物生产功能价值。由图 18 和图 19 可知,石柱县的食物生产功能价值呈现西高东低的特点,绝大多数的区域都呈现出下降的趋势。其中下降最明显的乡镇是龙潭乡和黄水镇,龙潭乡从 2005 年的 314.72 万元下降到 2010 年的 115.56 万元,黄水镇从 2005 年的 300 万元下降到 2015 年的 145.89 万元,说明乡镇的职能已经发生转变,不再依靠食物生产作为主要价值来源。南宾街道的食物生产功能价值变化不大且价值相对较高,与当地以建设用地为主,有较多人口需要食物供应有关。价值低值出现在黄鹤乡、金竹乡、金铃乡等林地较多且面积较小的区域。

9) 娱乐文化功能价值。由图 20 和图 21 可知,石柱县的娱乐文化功能价值呈现西低东高的空间分布特点,各乡镇娱乐文化功能的价值呈现逐渐增加的趋势,娱乐文化功能价值与林地与建设用地关系较大。重庆市成为直辖市后,重庆市政府对石柱县的发展力度加大,县域内各地各乡镇的建设用地逐渐增加,此外,退耕还林等其他护林工程的实施使林地面积都有一定程度的增加。通过对各乡(镇、街道)娱乐文化功能价值的对比发现,龙潭乡、南宾街道、六塘乡、沙子镇、中益乡、黄水镇、临溪镇等地的娱乐文化功能的价值增加较多,其中黄水镇娱乐文化功能价值 2000 年初为 583.06 万元,2015 年增加到 1 054.74 万元;三益乡、黎场乡、黄鹤乡、金竹乡等乡镇娱乐文化功能的价值增加幅度较小,其中三益乡 2000 年 79.37 万元增加到 143.58 万元。黄水镇对整个石柱县的娱乐文化功能的价值贡献较大,2015 年黄水镇娱乐文化功能价值占全县娱乐文化功能价值的 7.09%,这与黄水镇利用得天独厚的自然资源优势,借助原生态的绿水青山,大力发展旅游产业密切相关。

2.2.2 生态系统服务功能时空变化 研究利用修正的生态系统服务功能价值评估模型,得到 2000—2015 年石柱县生态系统服务功能总价值的空间分布情况(图 22)。从时间序列看:2000—2010 年石柱县生态系统服务功能总价值增长趋势明显,增加近 6.42 亿元,增幅为 39.43%;2015 年较 2010 年生态系统服务功能总价值呈小幅下降趋势,损失约 0.47 亿元,降幅为 2.03%,而 2000—2015 年间石柱县生态系统服务功能总价值增幅远大于损失,整体呈现为增加态势。2000—2015 年黄水镇的生态系统服务功能总价值增加最多,增加了约 0.45 亿元,其次为沙子镇、六塘乡、南宾街道,分别增加 0.38 亿元、0.37 亿元和 0.36 亿元。由于 1998 年政府实施退耕还林还草政策及之后开展的森林工程、长江生态屏障工程等生态修复工程,使 2000—2010 年间研究区森林面积快速扩增,植被覆盖度增加,生态环境质量改善,生态系统服务功能价值随之增加。而 2010—2015 年间,经济的快速发展,城镇化进程的加快,人类活动范围急剧扩张,城镇化在提高人们生活水平、促进社会发展的同时也增加了废气、污水、固体废弃物等的排放,增加了生态系统负担,致使这 5 年间生态系统服务功能价值呈现减弱趋势。

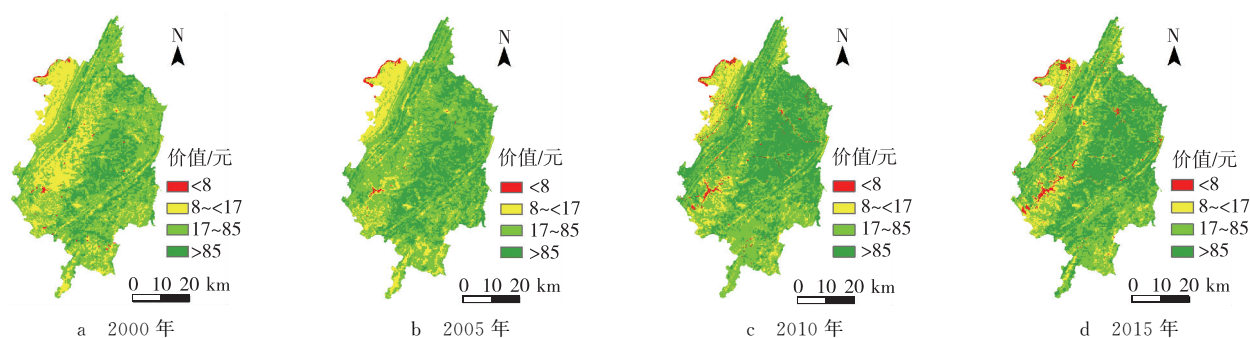


图 12 2000—2015 年石柱县生物多样性保护功能价值空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of the value of biodiversity conservation function in Shizhu county from 2000 to 2015

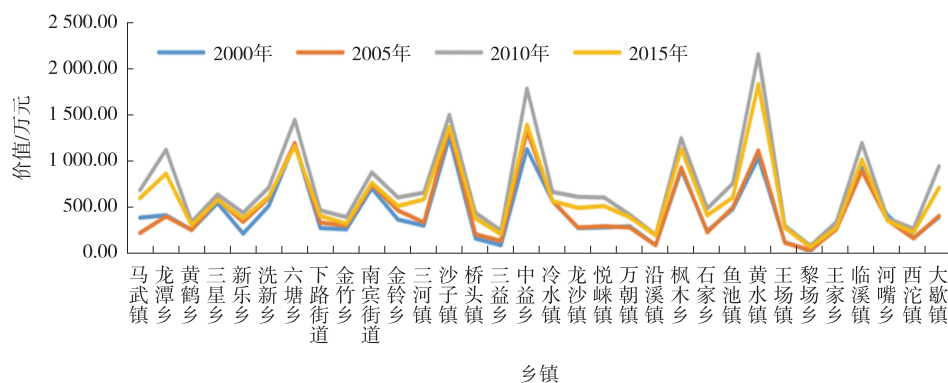


图 13 2000—2015 年各乡镇生物多样性保护功能价值

Fig. 13 The value of biodiversity conservation function in different villages and towns from 2000 to 2015

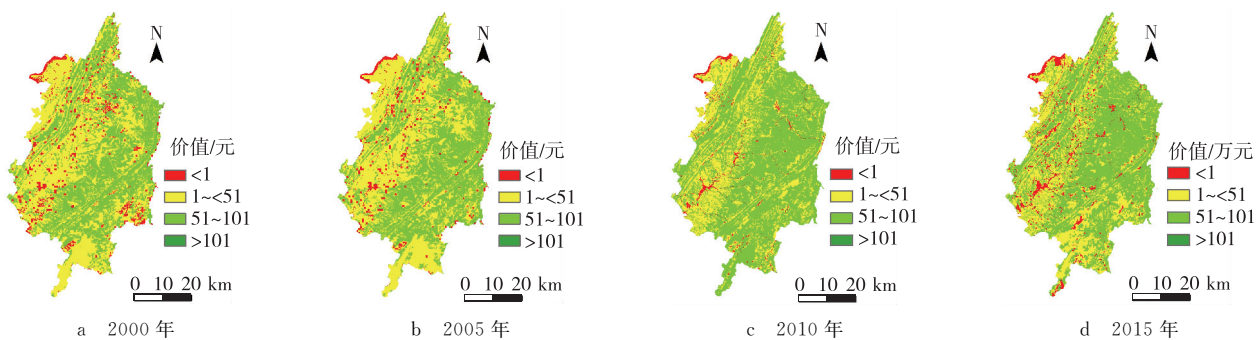


图 14 2000—2015 年石柱县原材料生产功能价值空间分布

Fig. 14 Spatial distribution of the value of raw material production function in Shizhu county from 2000 to 2015

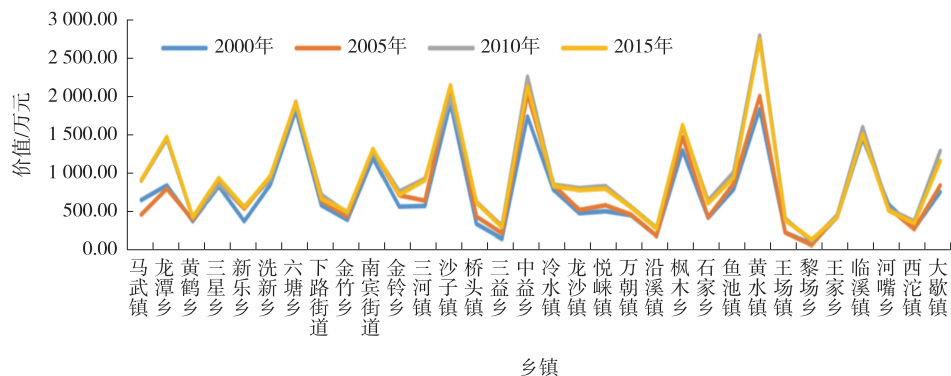


图 15 2000—2015 年各乡镇原材料生产功能价值

Fig. 15 The value of raw material production function in different villages and towns from 2000 to 2015

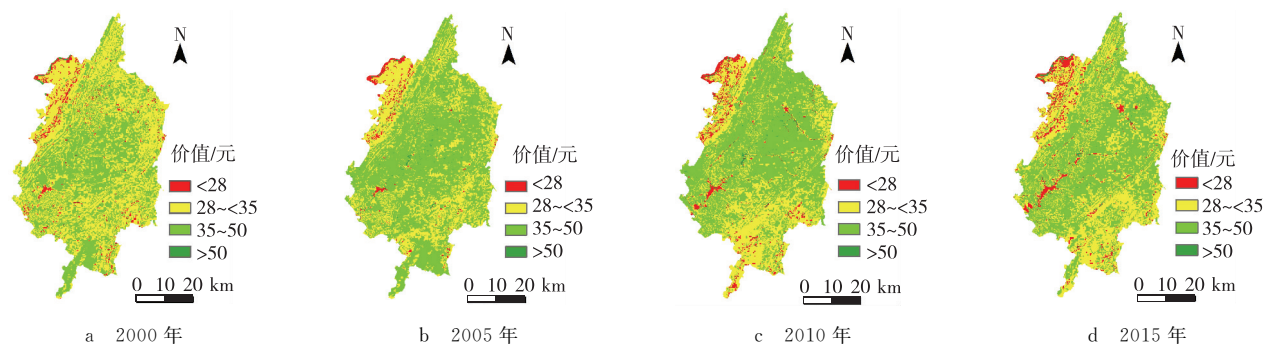


图 16 2000—2015 年石柱县废物处理功能价值空间分布

Fig. 16 Spatial distribution of the value of waste disposal function in Shizhu county from 2000 to 2015

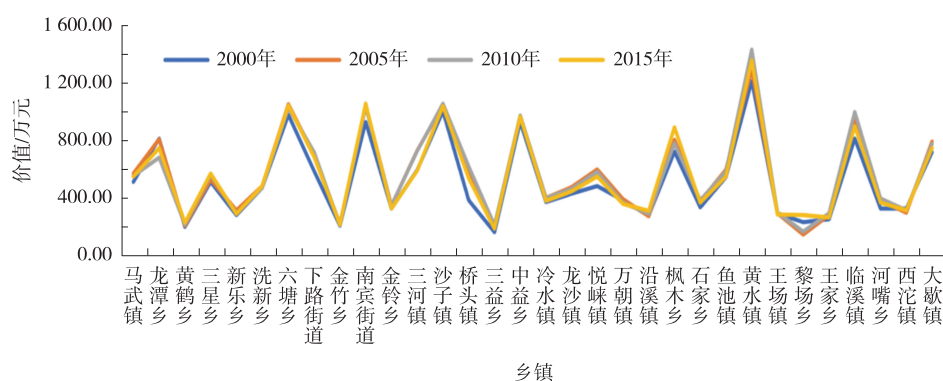


图 17 2000—2015 年各乡镇废物处理功能价值

Fig. 17 The value of waste disposal function in different villages and towns from 2000 to 2015

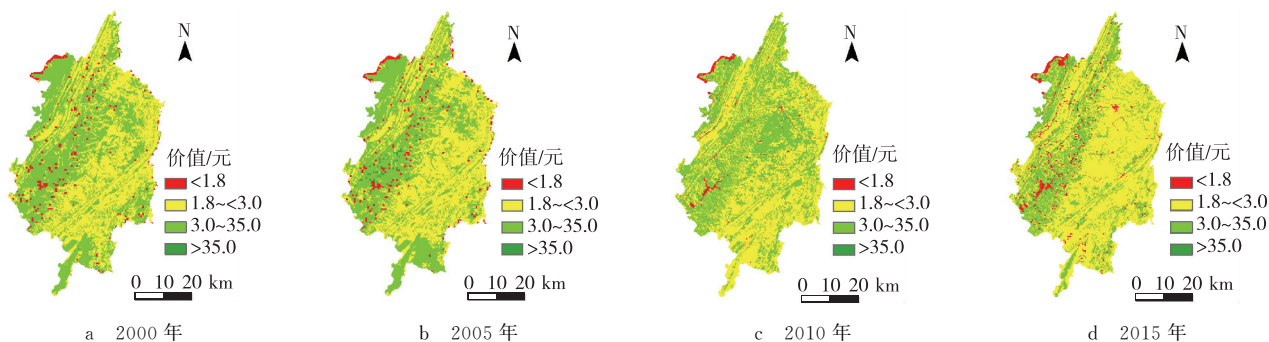


图 18 2000—2015 年石柱县食物生产功能价值空间分布

Fig. 18 Spatial distribution of the value of food production function in Shizhu county from 2000 to 2015

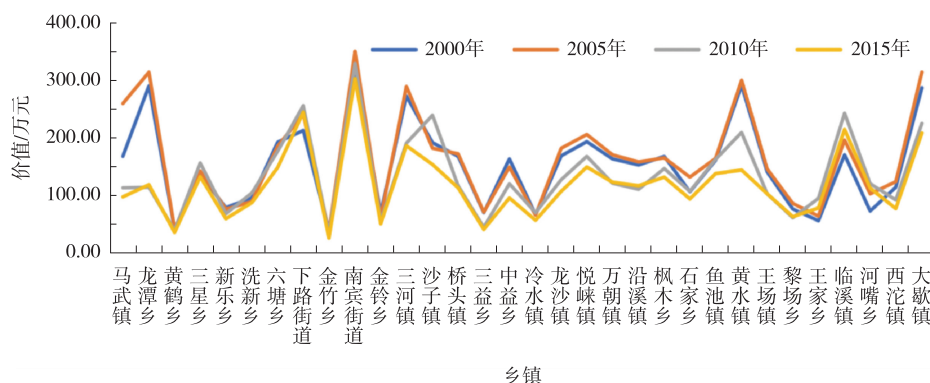


图 19 2000—2015 年各乡镇食物生产功能价值

Fig. 19 The value of food production function in different villages and towns from 2000 to 2015

从空间分布格局看,石柱县生态系统服务功能的总价值量东部高于西部,且由西部逐渐向东部增加,低值区主要分布于以建设用地及耕地为主的西部地区,如黎场乡、沿溪镇、王场镇等。高值区主要集中于林地连片分布、植被较好的七曜山、方斗山两大山脉以及城东万寿山、黄水镇大风堡风景区。从图 23 可以看出,2000 和 2005 年生态系统服务功能总价值最高的乡镇为黄水镇,价值分别为 1.15 亿元、1.25 亿元,其次为沙子镇,价值分别约为 0.97 亿元、1.05 亿元;2010 和 2015 年生态系统服务功能总价值最高的为黄水镇,两年价值均超过 1.60 亿元,其中黄水镇 2010 年生态服务功能总价值达到最大值,为 1.64 亿元。4 个年度总价值最低的均为三益乡,2000—2015 年 4 期生态服务功能总价值分别为 1.16 亿元、0.17 亿元、0.22 亿元和 0.22 亿元。单位面积生态系统服务功能价值中林地最高,建设用地及草地较高,耕地较低,未利用地最低,因此高价值区与林地分布趋势一致,而低值区的分布与耕地、未利用地相关。据相关研究表明^[18]政府实施的相关生态修复政策效应具有滞后性,使 2010 年与 2015 年研究区分布着大面积的生态系统服务功能高值区。

2.3 不同土地利用类型生态系统服务功能的价值变化

2000—2015 年石柱县不同土地利用类型生态系统服务功能价值见表 3。从表 3 可以看出,2000,2005,2010 和 2015 年石柱县生态系统服务功能总价值呈现先增长再略微减少趋势。2000—2015 年的 4 期数据显示,石柱县不同土地利用类型按它们的生态系统服务功能价值由大到小排序依次为:林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地,其中林地提供的生态系统功能价值为 63.24 亿元,占石柱县生态系统服务功能总价值的 79.28%;耕地提供的生态系统功能价值为 11.33 亿元,占总价值的 14.20%;草地和水域提供的生态系统功能价值为 4.59 亿元,占生态系统服务功能总价值的 5.76%;建设用地生态系统功能价值为 0.61 亿元,占生态系统服务功能总价值的 0.76%;未利用地生态系统服务功能价值极少。

2000 和 2005 年石柱县不同土地利用类型按生态系统服务功能价值由大到小排序依次为:林地、耕地、草地、水域、建设用地和未利用地。2010 和 2015 年林地、耕地生态系统服务功能价值分别排第一、二,水域的这一功能价值超越草地,位居第三。建设用地 2000 和 2005 年提供的生态系统服务功能价值较少,2010 年到 2015 年生态系统服务功能价值由 0.19 亿元增加到 0.33 亿元,增加了 0.14 亿元,增加率为 71.64%。

从整体来看,耕地、林地生态系统服务功能价值是不同土地利用类型生态系统服务功能总价值的主要组成部分,其中耕地和林地提供的生态系统服务功能价值之和占全县总价值的 93.51%。石柱县生态系统服务功能价值增加量最大的是林地,增加了 8.09 亿元,增加率为 72%,耕地、草地、水域的生态系统服务功能价值则有一定的减少。减少量最大的是耕地,减少了 0.98 亿元,减少率为 83.62%。4 期数据中,2010 年林地生态系统服务功能价值达到最高值,为 19.76 亿元。

由表 3 得知,耕地的生态系统服务功能价值呈先增加再减少的趋势,2000—2005 年从 3.12 亿元增加到 3.43 亿元,增加了 0.31 亿元,增长率为 9.04%;2005—2015 年呈下降的趋势,从 2005 年的 3.43 亿元减少到 2015 年的 2.33 亿元,总共减少了 1.10 亿元,其中 2005 年到 2010 年的减少率最大,为 29.15%。总体上耕地的生态系统服务功能价值从 2000—2015 年减少了 0.79 亿元。林地比其他土地利用类型的生态系统服务功能价值高,这与林地面积有较大相关。从图中看出,林地生态系统服务功能价值从 2000 年到 2015 年呈先增长再略微减少的趋势,2005 年到 2010 年增长 52.17%,2010 年到 2015 年减少率为 2.40%。草地和水域的生态系统服务功能价值总体偏低且呈减少的趋势。建设用地 2000 年和 2005 年生态系统服务功能价值分别为 0.03 亿元、0.05 亿元,到 2010 年和 2015 年,增加到 0.19 亿元、0.33 亿元。未利用地提供的生态系统服务功能价值极少。

3 结论与讨论

本研究通过生态系统服务功能的价值评估模型计算了各栅格单项生态系统服务功能价值及生态系统服务功能总价值,研究结论如下:

1) 本研究结合重庆市石柱县地形地貌实际情况,采用修订后的当量因子结合 NPP、NDVI 数据修正了原有生态系统服务功能价值模型,得出的评价结果显示不同地域生态系统服务功能的时空差异更加直观凸显,大大增强了原评估模型的时空适用度。

2) 石柱县生态系统服务功能总价值呈现增加态势。2015 年生态系统服务功能总价值与 2000 年相比,增加了 6.42 亿元,增幅为 39.46%。

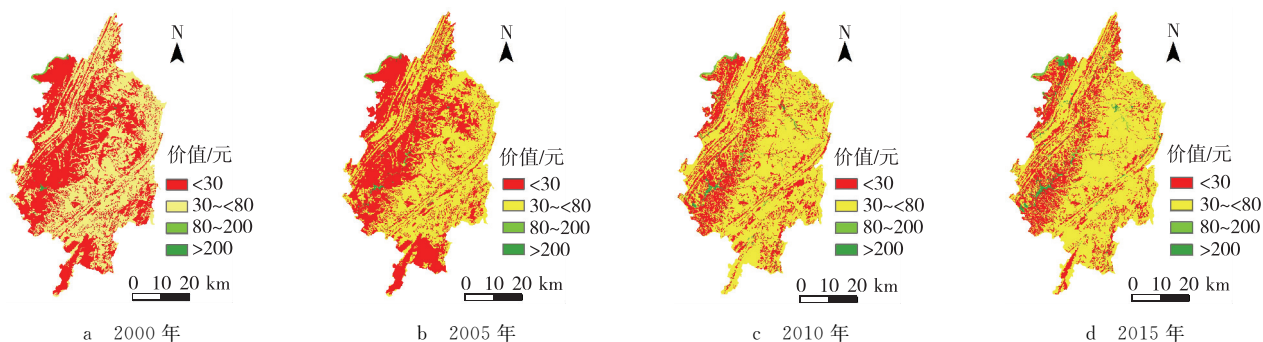


图 20 2000—2015 年石柱县娱乐文化功能价值空间分布

Fig. 20 Spatial distribution of the value of ecosystem's recreation service in Shizhu county from 2000 to 2015

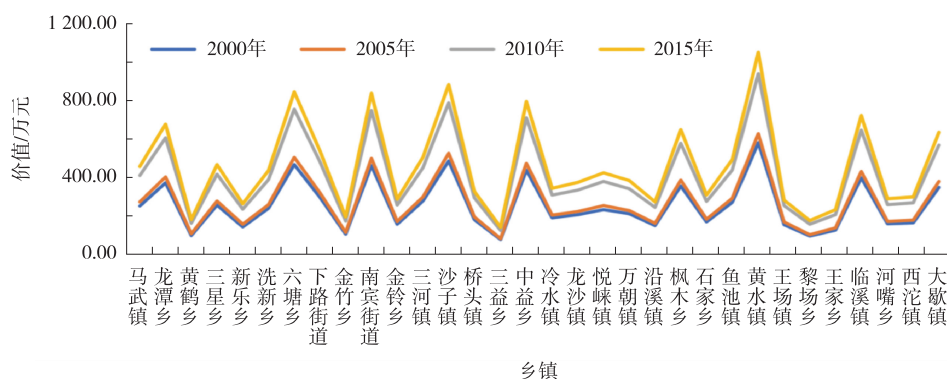


图 21 2000—2015 年各乡镇娱乐文化功能价值

Fig. 21 The value of ecosystem's recreation service in different villages and towns from 2000 to 2015

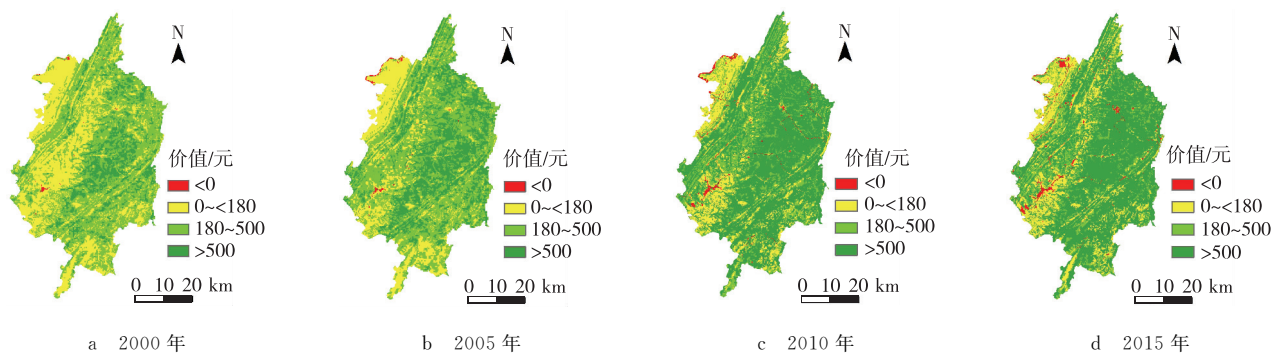


图 22 2000—2015 年石柱县生态系统服务功能总价值空间分布

Fig. 22 Spatial distribution of the total value of ecosystem services in Shizhu county from 2000 to 2015

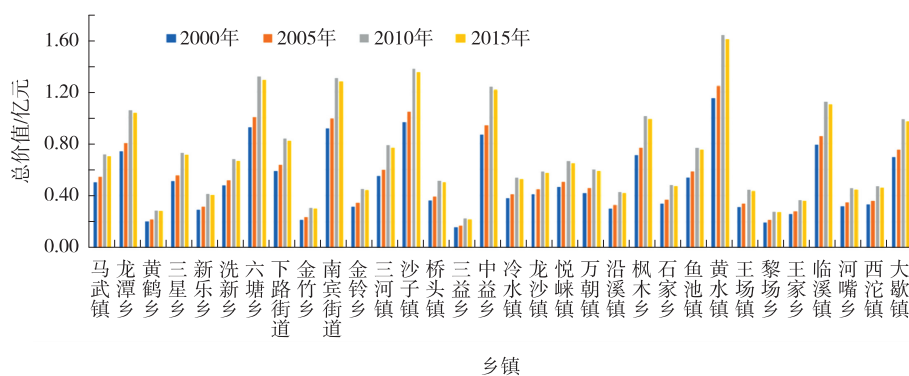


图 23 2000—2015 年各乡镇生态系统服务功能总价值

Fig. 23 Total value of ecosystem services in different villages and towns from 2000 to 2015

表 3 2000—2015 年石柱县不同土地利用类型生态系统服务功能价值

Tab. 3 Ecosystem services value of different land use types in Shizhu county from 2000 to 2015

土地类型	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		总计	
	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%	价值/亿元	比例/%
耕地	3.12	19.19	3.43	19.49	2.43	10.51	2.33	10.28	11.33	14.20
林地	11.20	68.76	12.99	73.71	19.76	85.33	19.29	84.98	63.24	79.28
草地	1.17	7.16	0.87	4.96	0.26	1.13	0.19	0.84	2.49	3.13
水域	0.76	4.69	0.27	1.56	0.51	2.19	0.55	2.43	2.10	2.63
建设用地	0.03	0.20	0.05	0.27	0.19	0.84	0.33	1.47	0.61	0.76
未利用地	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
总计	16.27	20.41	17.62	22.09	23.16	29.04	22.69	28.46	79.74	100.00

3) 从不同的服务功能来看,2000 年和 2005 年,石柱县土壤保持的功能价值最高,2010 年和 2015 年,石柱县水源涵养的功能价值增长迅速,超过土壤保持成为石柱县最为重要的生态系统服务功能。从乡镇来看,石柱县东部地区的生态系统服务功能高于西部,黄水镇的功能最好,部分乡(镇、街道)由于面积小,土地利用类型等问题导致生态系统服务功能价值低。

4) 从不同生态系统来看,各土地利用类型按生态系统服务功能的价值由大到小排列依次为林地、耕地、草地、水域、建设用地、未利用地。其中林地生态系统服务功能价值占总价值的 79.30%,生态系统服务功能价值最低的为未利用地。

本研究对石柱县的生态系统服务功能的总价值、不同功能类型的价值和不同土地利用类型的功能价值进行了深入分析,定量揭示了研究区不同生态系统服务功能的重要性、空间分布特征与时空演变规律,以及不同时期各乡镇不同生态系统服务功能的价值变化规律,这为区域土地资源的优化配置提供了参考依据。由于受到人类对生态系统服务功能类型偏好的影响,在追求某一种或者几种生态系统服务功能的同时,会有意无意的对其他生态系统服务功能产生影响,因此在未来的研究中有必要从系统角度进一步研究生态系统服务功能之间的权衡和协同问题。

参考文献:

- [1] 卢婷,姚娟. 生态系统服务价值评价研究现状及展望[J]. 农业展望,2018,14(4):53-57.
LU T, YAO J. Research status quo of value evaluation of ecosystem service and its prospect[J]. Agricultural Outlook, 2018, 14(4):53-57.
- [2] 李丽,王心源,骆磊,等. 生态系统服务价值评估方法综述[J]. 生态学杂志,2018,37(4):1233-1245.
LI L, WANG X Y, LUO L, et al. A systematic review on the methods of ecosystem services value assessment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4):1233-1245.
- [3] 王鹏,刘小鹏,王亚娟,等. 黄土丘陵沟壑区生态移民过程及其生态系统服务价值评价:以宁夏海原县为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2):433-443.
WANG P, LIU X P, WANG Y J, et al. Ecological migration process and the evaluation of its ecosystem service value in Loess hilly and gully region: a case study of Haiyuan county, Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2):433-443.
- [4] 涂小松,龙花楼. 2000—2010 年鄱阳湖地区生态系统服务价值空间格局及其动态演化[J]. 资源科学, 2015, 37(12):2451-2460.
TU X S, LONG H L. Spatial patterns and dynamic evolution of ecosystem service values in Poyang lake region from 2000 to 2010[J]. Resources Science, 2015, 37(12):2451-2460.
- [5] 陈仲新,张新时. 中国生态系统效益的价值[J]. 科学通报, 2000(1):17-22.
CHEN Z X, ZHANG X S. The value of ecosystem benefits in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2000(1):17-22.
- [6] 程滔. 一种全国陆地生态系统服务价值的大数据计算与分析方法[J]. 测绘通报, 2018(8):41-46.
CHENG T. A calculating and analyzing method of national land ecosystem service values big data[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(8):41-46.

- [7] 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(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(5):19-25.
- [8] 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.
XIE G D,LU C X,LENG Y F,et al. Ecological assets valuation of the Tibetan plateau[J]. Journal of Natural Resources,2003,18(2):189-196.
- [9] BARRIO M,LOUREIRO M L. A meta-analysis of contingent valuation forest studies[J]. Ecological Economics,2010,69:1023-1030.
- [10] SCHÄGNER J P,BRANDER L,PARACCHINI M L,et al. Spatial dimensions of recreational ecosystem service values: a review of meta-analyses and a combination of meta-analytic value-transfer and GIS[J]. Ecosystem Services,2018,31:395-409.
- [11] 马依拉·热合曼,买买提·沙吾提,尼格拉·塔什甫拉提,等. 基于遥感与 GIS 的渭库绿洲生态系统服务价值时空变化研究[J]. 生态学报,2018,38(16):5938-5951.
MAYILA R H M,MAMAT S W T,NIGELA T X P L T,et al. The ecosystem service value spatial-temporal changes in the Ugan-kuqa river delta oasis based on RS and GIS[J]. Acta Ecologica Sinica,2018,38(16):5938-5951.
- [12] COSTANZA R D,ARGE R,GROOT R,et al. The value of the world's ecosystem services and nature capital[J]. Nature,1997,387:253-260.
- [13] 唐启琳,刘方,刘秀明,等. 基于 LUCC 的喀斯特山区生态系统服务价值评价[J]. 环境科学与技术,2019,42(1):170-177.
TANG Q L,LIU F,LIU X M,et al. Evaluation of ecosystem service value in Karst mountains based on land use change[J]. Environmental Science & Technology,2019,42(1):170-177.
- [14] 王云,潘竞虎. 基于生态系统服务价值重构的干旱内陆河流域生态安全格局优化:以张掖市甘州区为例[J]. 生态学报,2019,39(10):3455-3467.
WANG Y,PAN J H. Establishment of ecological security patterns based on ecosystem services value reconstruction in an arid inland basin: a case study of the Ganzhou district, Zhangye city, Gansu province[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(10):3455-3467.
- [15] 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.
XU Z T,CHEN P F,ZHOU S J,et al. Study on land cover change and its impact on ecological services in Baiyangdian watershed[J]. Ecological Science,2018,37(6):83-90.
- [16] 刘永杰,王世畅,彭皓,等. 神农架自然保护区森林生态系统服务价值评估[J]. 应用生态学报,2014,25(5):1431-1438.
LIU Y J,WANG S C,PENG H,et al. Evaluation of ecosystem service values of the forests of Shennongjia nature reserve[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(5):1431-1438.
- [17] 卢元清,白中科,胡兴定,等. 基于修正模型的矿-农-城复合区生态服务价值研究:以山西省平朔为例[J]. 中国矿业,2015,24(11):56-64.
LU Y Q,BAI Z K,HU X D,et al. Ecosystem services value study of mine-agriculture-urban composite area based on fixed model: a case study of Pingshuo mine area[J]. China Mining Magazine,2015,24(11):56-64.
- [18] 吴娇,李月臣. 三峡库区(重庆段)景观格局变化及其对生态系统服务价值的影响[J]. 生态与农村环境学报,2018,34(4):308-317.
WU J,LI Y C. Variation of landscape pattern and its influences on ecosystem service in value in Three Gorges reservoir area (Chongqing section)[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2018,34(4):308-317.
- [19] 李月臣,刘春霞,闵婕,等. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报,2013,33(1):168-178.
LI Y C,LIU C X,MIN J,et al. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Gorges reservoir area (Chongqing section)[J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(1):168-178.
- [20] 刘琼阁,彭道黎,施鹏程,等. 三峡库区森林生态系统服务功能评估[J]. 东北林业大学学报,2014,42(11):62-66.
LIU Q G,PENG D L,SHI P C,et al. Evaluation of forest ecosystem services in Three Gorges reservoir area[J]. Journal of Northeast Forestry University,2014,42(11):62-66.
- [21] 田宇,朱建华,李奇,等. 三峡库区土壤保持时空分布特征及其驱动力[J]. 生态学杂志,2020,39(4):1164-1174.
TIAN Y,ZHU J H,LI Q,et al. Spatial and temporal distribution of soil conservation and its driving forces in the Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Ecology,2020,39(4):1164-1174.
- [22] 谢高地,肖玉,甄霖,等. 我国粮食生产的生态服务价值研究[J]. 中国生态农业学报,2005,13(3):10-13.

XIE G D, XIAO Y, ZHEN L, et al. Study on ecosystem services value of food production in China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2005, 13(3): 10-13.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Spatial and Temporal Pattern of Ecological Service Function in Shizhu County, Chongqing

CHEN Qin

(College of Horticulture and Landscape Architecture, Southwest University, Chongqing 400074, China)

Abstract: [Purposes] The intrinsic mechanism, driving mechanism and temporal and spatial characteristics of ecosystem service function change in Shizhu County were discussed. [Methods] Based on remote sensing images of 2000, 2005, 2010 and 2015, it revised the ecosystem service function assessment model by using NPP and NDVI data in Shizhu County, a typical mountainous area in the Three Gorges Reservoir Area. [Findings] The results show that: 1) The total value of ecosystem services increased by 39.46% (642 million yuan) from 2000 to 2015, the highest one being forestland, with a value of 6.324 billion yuan, accounting for 79.30% of the total value, and the lowest one unused land. 2) Soil conservation and water conservation had become the most important ecosystem protection functions in the study area. From the perspective of different ecosystems, the total value of ecosystem services provided by different land use types decreased from forestland, cropland, grassland, water bodies, built-up land to unused land, with forestland at the top and unused land at the bottom. 3) The value of ecosystem services function in the east was higher than that in the west, and gradually decreased from the east of the study area to the west. When it comes to towns and villages, Huangshui town had the highest value of ecosystem services function, while the value of some towns and villages were quite low, affected by factors such as small area and land use types. [Conclusions] It can provide theoretical support for regional ecological and economic sustainable development.

Keywords: ecosystem services function; spatial and temporal pattern; land use; mountainous area

(责任编辑 黄 颖)