

近 30 年三峡库区生态系统服务价值与生态风险时空变化及相关性研究

李辉^{1, 2} 周启刚¹ 李斌³ 国洪磊⁴ 王福海^{1, 2} 何昌华^{1, 21}

(1. 生态环境空间信息数据挖掘与大数据集成

重庆市重点实验室, 重庆 401320; 2. 重庆财经学院, 重庆 401320;

3. 重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067;

4. 南京师范大学 虚拟地理环境教育部重点实验室, 江苏 南京 210023)

【摘要】: 随着空间要素的集聚和经济快速发展, 大量生态用地向非生态用地转变、区域景观格局中的关键生态涵养源不断萎缩、生态服务功能弱化等, 使得生态安全面临新的挑战。文章在 RS 和 GIS 技术的支撑性下, 以 1986、1995、2000、2007、2010 和 2018 年 6 期三峡库区 Landsat TM/Landsat 8OLI 遥感影像为数据源, 基于 5km*5km 评价单元格, 核算了 30 年来三峡库区生态系统服务价值和生态风险指数的时空分异特征及二者的相关性。研究结果表明: (1) 1986~2018 年三峡库区生态系统服务价值总量由 1639.56×10^8 元持续增长到 1662.01×10^8 元, 整体增幅 1.37%, 高级别生态风险等级占比呈现缓慢降低趋势, 总体下降 10.89%, 研究区生态状况有所改善; (2) 三峡库区单位面积生态系统服务价值和生态风险指数在数值上存在一定的负向相关性, 同时在空间上也具有一定的负向相关性; (3) 生态系统服务价值和生态风险指数在变化速率上具有一定的非同步性, 生态风险高指数区域所对应的生态系统服务价值具有较大降低的可能性, 需要特别关注。研究旨在为三峡水利工程的安全运行与三峡库区的可持续开发利用提供参考。

【关键词】: 生态系统服务价值 生态风险 相关性 三峡库区

【中图分类号】: X87 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)03-0654-13

近年来, 在全球环境恶化的背景下, 过度的资源开发和不合理的土地利用加剧了生态环境的进一步破坏, 导致生态系统服务功能退化、区域生态风险加剧, 给人类的可持续发展造成了极大的挑战。自然生态系统和人工生态系统在能量流动、物质循环和信息传递过程中对于维持地球生命系统起着至关重要的作用, 生态系统结构和功能的稳定性是保障人类社会生存和发展的必要条件^[1~4]。随着人口的急剧扩张和经济的快速增长, 人类城市用地空间占用范围不断扩张, 对自然资源的开采力度也相应增

作者简介: 李辉(1989~), 男, 讲师, 主要研究方向为资源环境评价. E-mail: 1h25941630@163.com

基金项目: 2019 年重庆市社会科学规划项目(2019QNGL29); 2020 年重庆市教委人文社科研究重点项目(2020SKGH285); 重庆市科学技术局项目(cstc2020jcyj-msxmX0578); 重庆市社会科学规划项目(2017YBGL147); 重庆市教委科技项目(KJ1600622)

强, 由于人类活动的强度越来越大, 使得原始自然环境与生态系统被剧烈改变, 土壤、大气和水资源被污染和破坏, 进而反向对人类自身福祉产生了负面影响^[8~7]。为了满足人们不断提升的生活品质和人类社会的可延续发展, 人居环境、生态环境质量与安全的相关研究成为全球的研究热点之一。

生态系统服务评价和生态风险评价是生态环境评价的重要类型, 与生态安全评价关系十分密切。生态系统服务是指生态系统及其物种组成用以满足和维持人类生存、生活的条件和过程^[8,9]。生态风险是生态系统及其组分对外部干扰作出退化反映的可能性, 指一定区域内具有不确定性的事故或灾害对生态系统的结构和功能可能产生的不利影响。生态风险评价是对生态环境状况未来发展变化的预判, 是风险控制的前提, 从反面表征区域生态安全状况^[10]。曹祺文等^[11]提出了基于生态系统服务价值的生态风险评价框架, 并对实现路径和优势进行了阐述。赵岩洁等也构建了相应的生态风险评估框架, 基于土地利用变化视域下, 对三峡库区小流域生态风险进行了评估, 并提出了调控对策, 提高了对土地利用变化和生态风险之间关系的进一步认识。刘世梁等^[12]将提升区域生态系统服务功能作为生态风险评价的重要途径研究, 进而得到了土地整治全过程分析视域下的生态风险识别、评价以及调控思路。宋科等^[13]利用生态系统服务价值量化和生态风险数学模型进行合并研究, 构建了生态风险评价的 EVR 模型, 并对生态风险进行了定量化研究, 并通过以浙江舟山作为研究对象对此方法进行了可行性探讨。李俊翰等^[14]运用灰色关联模型和空间自相关模型核算了生态系统服务价值和生态风险指数和相关性, 并以山东滨州作为研究对象进行实证研究, 属于为数不多进行生态系统服务价值和生态风险相关性研究的文献。由此可见, 生态系统服务价值和生态风险的评价呈现出由独立分析逐步走向二者融合的研究, 然而当前的研究中针对特殊生态区域的大空间长时期的生态系统服务价值评估和生态风险评价的时空关系以及二者相关性机理的研究较少, 本文将对该部分研究内容进行丰富和补充。

三峡库区拥有十分独特而脆弱的生态系统, 是长江经济带乃至全国重要的生态宝库, 在当前及今后相当长的时期内三峡库区的生态环境在长江经济带的发展中将始终占据着十分重要的地位。随着长江上游地区经济快速发展和三峡大坝的建设及蓄水, 使得库区土地利用格局发生了较大变化, 大量生态用地被淹没, 建设用地规模不断扩大, 从而与之密切相关的生态系统服务价值也发生了变化。本文以 6 期美国陆地卫星 LandsatTM 影像和 Landsat8OLI 影像作为基础数据源, 运用空间分析技术提取了三峡库区 1986、1995、2000、2007、2010 及 2018 年近 30 年的土地利用现状数据, 并对三峡工程建成前后各 15 年的生态系统服务价值和生态风险指数变化规律及空间分异特征深入分析, 并对二者的相关性进行研究。文章旨在为三峡库区及相似区域的生态恢复提供更科学、合理的参考依据。

1 研究区概况

三峡库区介于 106° 20' E~110° 30' E 和 29° 00' N~31° 50' N 之间, 北南两面分别为大巴山和川鄂高原, 与四川盆地相互衔接, 囊括重庆市所辖的 22 个区县(长寿区、江津区、巫山县、巴南区、渝中区、武隆县、巫溪县、北碚区、丰都县、奉节县、沙坪坝区、石柱县、南岸区、渝北区、云阳县、涪陵区、九龙坡区、开县、大渡口区、万州区、江北区以及忠县)以及湖北省所属的 4 个区县(巴东县、秭归县、兴山县和夷陵区)。研究区以亚热带季风气候为主, 年均降水总量在 1000~1800mm 之间, 且区内降水量差异不明显。研究区自然灾害频发, 水土流失严重, 崩塌、泥石流、滑坡和地震时常发生。由于三峡工程的修建、投用和库区蓄水改变了库区原有的气候环境, 水域面积扩大明显, 日夜温差缩小。库区土地资源总量多, 而人均土地面积少, 耕地面积更少。土壤类型以紫色土、石灰土、粗骨土和水稻土为主, 区内植被类型繁多, 矿产资源丰富。研究区土地资源以山地和丘陵为主, 其中山地占 76.1%, 丘陵占 15.3%, 地形起伏大、地貌类型多样, 林地农用地中占比较大, 坡耕地多且分布零散, 水田较少; 建设用地可利用率低, 基础设施投资建设成本高, 各类用地分布各异, 土地利用水平地区差异大, 具有大库区和大山区的双重特点。

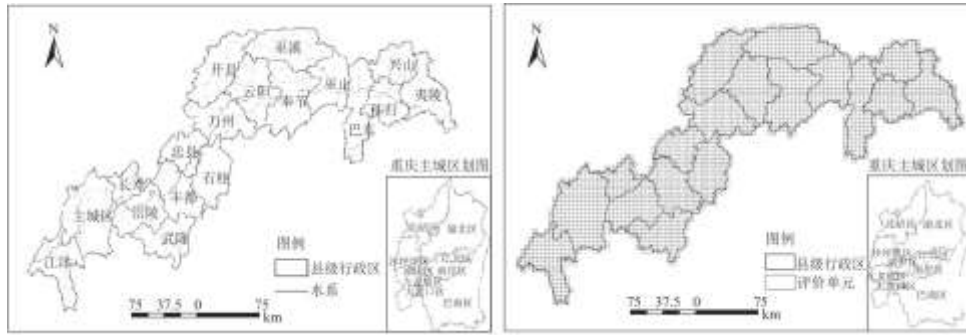


图 1 研究区概况及评价单元划分图

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

文章以三峡库区 30 年(1986、1995、2000、2007、2010 和 2018 年)的 Landsat TM 和 Landsat 8OLI 影像为基础数据源(2018 年影像来源为 Landsat8OLI);研究区 TM 影像数据的 1、2、3、4、5、7 波段为 30m 的空间分辨率,第六波段为 120m 的空间分辨率。除此之外,文中所涉及到的矢量行政区数据来自于地理国情监测云平台(<http://www.dsac.cn/>);文中其他基础数据来自历年中国统计年鉴、重庆市统计年鉴、湖北省统计年鉴以及全国农产品成本收益资料汇编,相关数据经过基础数据计算得到。

2.2 数据处理

由于遥感卫星传感器自身具有一定的误差,再加上受大气等因素的影响使得部分影像存在几何畸变和辐射畸变等问题,因而对这部分的数据进行了一定的处理,如:运用 ENVI 软件对影像进行了辐射校正、几何校正(基于 2018 年影像)以及镶嵌处理等,并对影像的图像特征进行增强处理,加强了影像的清晰度和辨识度,使得解译标志更为明显。文中所有 Landsat 系列遥感图像均以 ALBERS 投影进行投影,使用中央经线为 $E110^{\circ}$,分别使用 $N25^{\circ}$ 和 $N47^{\circ}$ 作为双标准纬线。此外,作者对原始矢量行政区数据进行了投影变换,使其与影像数据保持了空间的统一性。文章参考中科院“八五”期间的土地利用分类标准,在结合三峡库区自然环境和土地利用特征的基础上,将研究区土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地六种类型,并对遥感影像进行人机交互解译,得到了研究区 30 年 6 期土地利用现状数据库(图 2)。为提高土地利用分类精度,保证研究结果的可靠性,文章参考 91 卫图和三峡库区各区县土地利用现状图等资料对解译数据进行了精度验证,作者对 6 期土地利用分类结果随机选取了 2000 个样点与实际调查地类进行精度验证,总体精度显示为 86.88%、87.12%、91.32%、89.98%、90.33% 和 89.76%,Kappa 系数为 0.82、0.81、0.87、0.90、0.89 和 0.92,数据精确度符合文章要求。

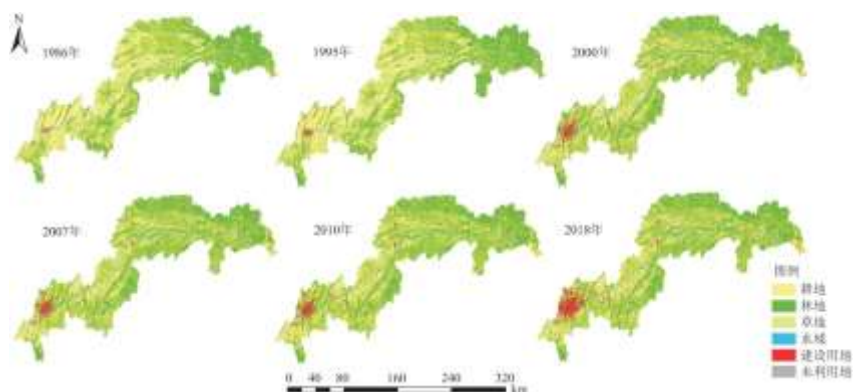


图 2 1986~2018 年三峡库区土地利用现状空间格局变化图

在 GIS10.3 软件的技术支撑下,文章采用 5km*5km 的评价单元网格对三峡库区土地利用/景观格局类型进行格网化重采样,得到 2549 个评价单元(图 1)。并基于评价单元核算了研究区 30 年来的生态系统服务价值以及生态风险指数,并采取中心点赋值法进行空间插值,分析其时空分布特征。

2.3 研究方法

2.3.1 生态系统服务价值核算模型

基于谢高地等 2007 年所修订的生态系统生态服务价值当量因子表^[15,16],定义单位(1hm²)面积农田生态系统粮食生产的净利润作为 1 个标准当量因子的生态系统服务价值量(标准当量)。研究区耕地以旱地和水田为主,主要作物为水稻和玉米;林地以有林地、灌木林地和针阔叶混交林为主;未利用地主要为盐碱地及滩涂。本研究尺度相对较小,区域自然地理特征较为一致,农业生产方式相同,研究区内各生态系统属性近似,可以应用当量赋值的方法进行生态系统服务价值的核算。在参考相关文献的基础上,结合研究区实际状况进行标准当量的系数修订。

$$ESV_k = \sum A_k \times VC_k \quad (1)$$

$$ESV = \sum_k ESV_k \quad (2)$$

式中: ESV_k 、 ESV 分别为第 k 类型的服务价值和总服务价值; A_k 为第 k 类型的土地面积, VC_k 为价值系数,代表第 k 类型单位面积的服务价值。

本研究基础数据来自历年中国统计年鉴、重庆市统计年鉴、湖北省统计年鉴以及全国农产品成本收益资料汇编,相关数据经过基础数据计算得到。根据三峡库区的实际情况,参考谢高地等^[17~20]的研究成果,对各生态系统的服务价值系数进行修正,以三峡库区 1986、1995、2000、2007、2010 以及 2018 年 6 年的粮食平均产量(4468kg/hm²)以及平均价格(1.46 元/kg)为研究区基准单产和价格基准,得出三峡库区的生态系统服务价值当量因子为 931.90 元/hm²,利用公式 1 和公式 2 得到三峡库区 1986~2018 年的生态系统单位面积生态服务价值的平均值(表 1)。

表 1 1986~2018 年三峡库区生态系统单位面积生态服务价值平均值(元/hm²)

一级类型	二级类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
供给服务	食物生产	1355.68	135.97	367.54	142.76	0	22.40
	原料生产	136.57	3366.18	62.68	14.43	0	0.00
	水资源供给	762.61	3936.50	1207.65	27587.36	0	47.89
调节服务	气体调节	589.64	4503.66	1204.65	0.00	0	0.00
	气候调节	1224.42	3501.25	1234.62	587.75	0	0.00
	净化环境	198.87	3654.61	360.65	8670.86	0	1606.33

	水文调节	512.38	8865.33	456.51	17335.25	0	3204.43
支持服务	土壤保持	1945.24	4843.65	2543.34	15.34	0	27.32
	维持养分循环	2211.54	1752.34	1746.43	25921.63	0	15.24
	生物多样性	915.35	4204.34	125.53	3346.24	0	453.87
文化服务	景观类型	18.88	2986.54	65.67	5756.43	0	16.16
总计		9871.18	41750.37	9375.27	89378.05	0	5393.64

2.3.2 土地利用生态风险指数核算模型

不同用地类型的生态服务功能和价值不同，一般来说建设用地生态服务价值低，而农用地、水面等的生态服务价值高^[21~24]。样地的生态风险状态取决于该地块的不同用地类型的空间组合及比例情况，即受景观干扰度、景观脆弱度影响。基于此，参考已有研究成果，根据样地内不同土地利用类型的面积比例，构建土地利用生态风险指数^[25~27]，并以此评价三峡库区各评价单元的生态服务功能的损失风险，比较各单元的生态风险差异，详见公式 3：

$$ERI_a = \sum_{i=1}^n \frac{S_{ai}}{S_i} C_i \quad (3)$$

式中：ERI_a为第 a 个评价单元格内土地利用生态风险指数值；S_{ai}为第 a 个评价单元格内土地利用类型 i 面积；C_i为代表第 i 类土地利用类型的生态风险参数。

采用反正切函数归一化方法^[28]处理之后得到研究区各土地利用类型的生态风险参数 C_i 值，分别为：0.3564、0.1655、0.0548、0.0521、0.0395、0.0182；反正切函数模型如下：

$$x^* = \arctan(x) * \frac{2}{\pi} \quad (4)$$

式中：x*为需要计算的归一化研究数据，其中 x>0, 则 0<x*<1。

在区域土地利用生态系统当中，对生态系统最主要的干扰因素是人类活动，土地利用程度不仅反映土地本身的自然属性，同时也反映人为因素与自然环境因素的综合效应。参考相关文献^[29]，同时根据研究区的实际状况，三峡库区划分的 6 种景观类型，以耕地最为脆弱，其次是草地，未利用地和林地，水域和建设用地较为稳定；6 种景观类型分别赋值为：耕地为 6、草地为 5、未利用地为 4、林地为 3、水域较稳定为 2、建设用地为 1。

2.3.3 双变量空间自相关模型

空间自相关模型能够反映某种因素在空间位置的相关程度，分为全局空间自相关和局部空间自相关。为了探究生态系统服务和生态风险的空间相关特征，采用双变量空间分析模型，利用全局自相关系数 Moran' sI 指数反映整体空间关联和差异状况，

计算公式^[30~32]如下：

$$I_{sr} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} \left(\frac{y_{i,s} - \bar{y}_s}{\sigma_s} \right) \left(\frac{y_{i,r} - \bar{y}_r}{\sigma_r} \right)}{(n-1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}} \quad (5)$$

式中： I_{sr} 为单位面积生态系统服务价值 s 和生态风险指数 r 的双变量全局自相关系数； $y_{i,s}$ 和 $y_{i,r}$ 为第 i 个评价单元单位面积生态系统服务价值和生态风险指数， σ_s 和 σ_r 为方差。为了全面具体地反映研究区各部分之间的空间关联性，采用 LISA 进行局部空间自相关分析，以表述局部集聚和离散效应。本文依据空间分布关系将空间关联性具体划分为高高聚集 (H-H)、高低聚集 (H-L)、低高聚集 (L-H) 以及低低聚集 (L-L) 4 种集聚类型。

3 结果分析

3.1 生态系统服务价值时空变化分析

在 GIS 技术的支持下，结合三峡库区生态系统单位面积生态服务价值表，得到了 1986~2018 年三峡库区生态系统服务价值核算结果以及结构变化情况表 (表 2)。通过对表 2 分析可知，研究区 1986~2018 年生态系统服务价值总量由 1639.56×10^8 元持续增长到 1662.01×10^8 元，增长率 1.37%；单位面积生态系统服务价值由 28596.02 元/hm² 增长到 28987.57 元/hm²。研究区各土地利用类型的生态系统服务价值占比大小依次为：林地 > 耕地 > 水域 > 草地 > 未利用地 > 建设用地；研究区域内耕地、林地和草地的生态系统服务价值持续减少，变化率分别为-3.62%、-2.11%和-39.45%；水域和未利用地生态系统服务价值持续增加，变化率为 97.91%和 0.01%；耕地生态系统服务价值减速逐渐降低；林地、草地和水域生态服务价值呈现先增后减趋势；未利用地生态服务价值逐年增加。

表 2 1986~2018 年三峡库区各地类生态系统服务价值结构及变化表

景观类型/ 价值划分		生态系统服务价值(×10 ⁸ 元)						生态服务价值变化率(%)				
		1986 年	1995 年	2000 年	2007 年	2010 年	2018 年	1986 至 1995 年	1995 至 2000 年	2000 至 2007 年	2007 至 2010 年	2007 至 2018 年
耕地	价值量	218.57	216.39	215.60	214.20	212.87	210.66	-0.20	-0.15	-0.13	-0.09	-0.08
	比例	13.33%	13.13%	12.98%	12.85%	12.76%	12.68%					
林地	价值量	1330.96	1324.33	1313.94	1311.31	1310.14	1302.87	-0.84	-1.24	-0.43	-0.17	-0.11
	比例	81.18%	80.34%	79.10%	78.67%	78.50%	78.39%					
草地	价值量	21.62	21.43	13.21	13.18	13.11	13.09	-0.02	-0.50	-0.01	0.00	0.00
	比例	1.32%	1.30%	0.80%	0.79%	0.79%	0.79%					
水域	价值量	68.36	86.17	118.25	128.05	132.69	135.29	1.06	1.89	0.56	0.27	0.19
	比例	4.17%	5.23%	7.12%	7.68%	7.95%	8.14%					

建设用地	价值量	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	比例	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%					
未利用地	价值量	0.05	0.05	0.10	0.10	0.10	0.10	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
	比例	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%					
合计	价值量	1639.56	1648.37	1661.1	1666.84	1668.91	1662.01	0.00	0.01	-0.01	0.01	0.00
	比例	100%	100%	100%	100%	100%	100%					

文章通过计算评价单元格单位面积生态系统服务价值，结合中心点赋值法，运用 GIS 软件进行空间插值，同时采用几何间隔分类,并结合 GIS 自然间断点法和研究区实际状况,将研究区评价单元生态系统服务价值划分为低[0, 2000)、较低[2000, 4000)、中[4000, 6000)、较高[6000, 8000)、高[8000, ∞)共 5 个等级，形成 6 期单位面积生态系统服务价值空间格局分布图(图 3)。三峡库区单位面积生态系统服务价值主要以较高和高两个等级为主,面积平均占比为 53%和 32. 53%;高和中等面积比例逐渐减少，低、较低和较高面积比例逐渐增加，所有等级的面积变化速率呈现先增后减得趋势；东北部、东南部山地以及长江沿岸区域单位面积生态系统服务价值较高，主要为高级和较高级分布区域，江津区、长寿区以及忠县是中等级生态系统价值的主要分布区，重庆主城区和渝西地区是较低和低级生态系统服务的集中区域。

3. 2 生态风险时空变化分析

在 ArcGIS10. 3 软件中利用空间插值法中的克里格法(Ordinary Kriging)对研究区划分出来的 2549 个评价网格单元的生态风险指数进行空间插值，通过 ArcGIS 数据处理，发现 6 期土地利用生态风险预测值的范围都介于 0. 0237~0. 3568 值域范围内。文章为了便于比较研究区 6 期土地利用生态风险的空间分布情况，根据相对指标法将各时段的生态风险指数划分为了 5 个等级，具体划分情况如下：高生态风险(>0. 25)、较高生态风险(0. 2~0. 25)、中生态风险(0. 15~0. 2)、较低生态风险(0. 1~0. 15)和低生态风险(<0. 1),进而绘制出了 6 个研究时间段的生态风险时空分异图(图 4)。

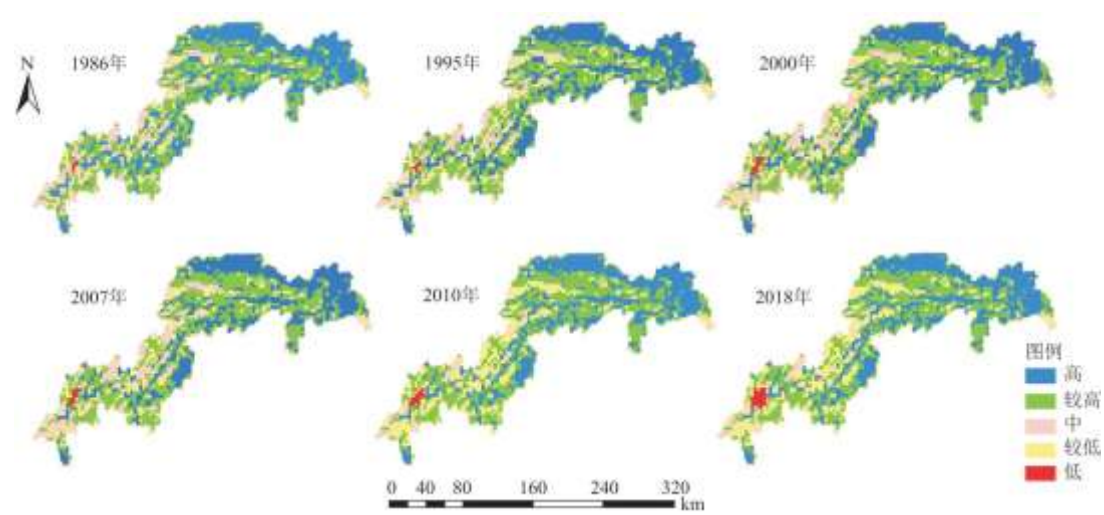


图 3 1986~2018 年三峡库区生态系统服务价值空间格局变化图

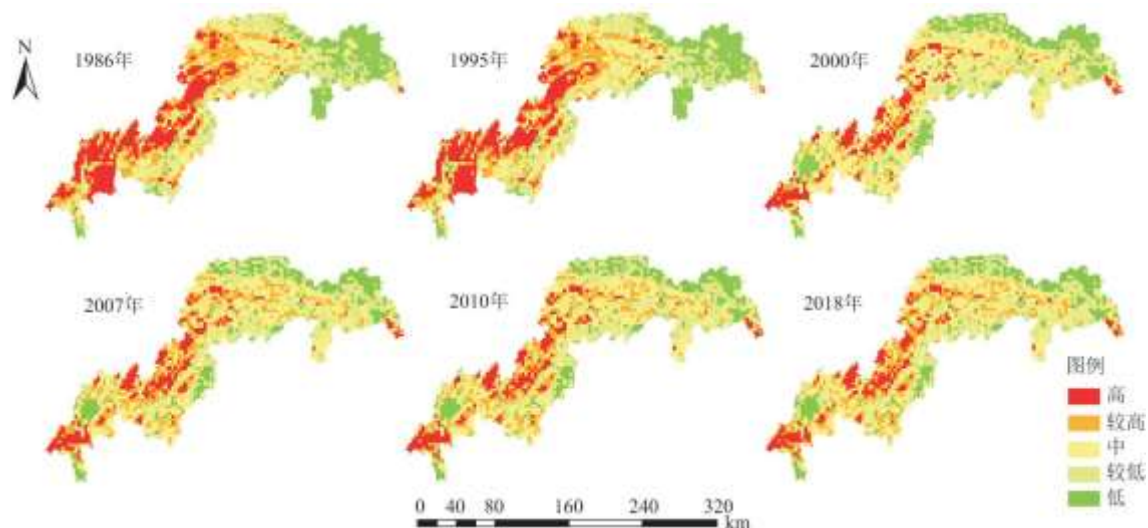


图 4 1986~2018 年三峡库区生态风险空间格局变化图

由图 4 可知，1986~2018 年三峡库区的生态风险空间差异十分明显，总体呈条带状分布，以长江为轴线向西南方向和东北方向扩散，生态风险呈现出先降后增再降的发展趋势；1986~1995 年，高生态风险区主要集中在重庆市建成区周边和研究区中部长江以北大片地区，由于该地区位于城市周边，毁林变耕现象严重，大量森林转变为生态风险值更高的耕地。低生态风险区主要集中在研究区东北端的湖北省区域，呈大规模片状分布形态，得益于区域地势较高，林业资源丰富，人类开发活动较少，生态保育较好；2000~2018 年，高生态风险区主要集中渝西地区和研究区中部长江周边地区以及湖北小片区域，未来需要该部分区域加强生态恢复，缓解环境压力。低生态风险区位于三峡库区北部区域和重庆都市区，此外在重庆市石柱县区域也要小块低生态风险区。中低生态风险区主要沿长江两岸呈现条状分布。中生态风险区主要分布长江沿线远离江岸的区域，呈带状分布，未来需要对此加强生态建设，改善城市内部的生活环境。

从图 5 和表 3 可以看出，研究区总体上 1986~2018 年，在土地利用生态风险的各等级的相互转变上呈现出由高、低以及较高生态风险向中、较低生态风险转变的特征，其中高生态风险区面积降幅最大，降幅达到 9.92%，中生态风险区面积增幅最大，增加了 7.51%，其次是较低生态风险区，其面积增幅为 4.75%，较高生态风险区和低生态风险区面积变化幅度相对不大。此外，在 1995~2000 年期间，由于三峡工程的建设 and 蓄水，致使长江沿岸代表生态风险较高的景观类型耕地被大量淹没，因而使得研究区高风险区域和较高风险区域的面积占比呈现出断崖式下降现象。

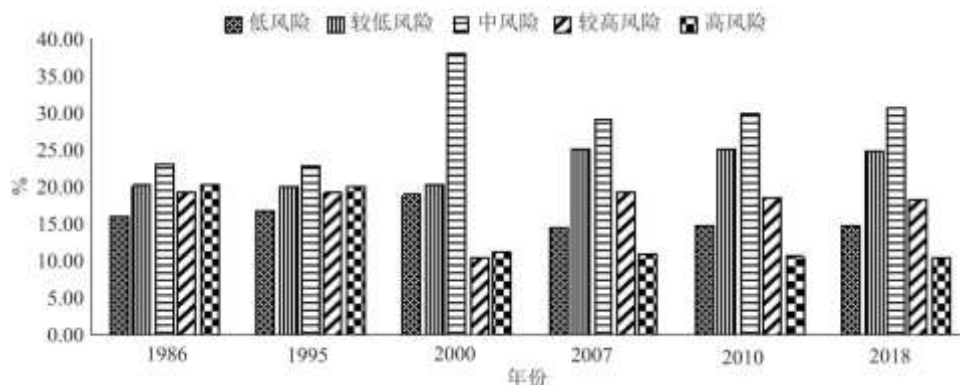


图 5 1986~2018 年三峡库区各生态风险等级变化趋势图

表 3 1986~2018 年三峡库区各生态风险等级结构表

年份	1986 年	1995 年	2000 年	2007 年	2010 年	2018 年	1986~2018 年
	面积比例 (%)	面积比例 (%)	面积比例 (%)	面积比例 (%)	面积比例 (%)	面积比例 (%)	变化率 (%)
低风险	16.21	16.86	19.14	14.67	14.86	14.84	-1.37
较低风险	20.39	20.37	20.59	25.28	25.35	25.14	4.75
中风险	23.41	23.15	38.26	29.47	30.21	30.92	7.51
较高风险	19.45	19.41	10.61	19.39	18.74	18.48	-0.97
高风险	20.54	20.22	11.40	11.18	10.83	10.62	-9.92

3.3 生态系统服务价值与生态风险相关性分析

3.3.1 数量相关性

文章分别基于 6 个时期 2549 个评价单元格的单位面积生态系统服务价值和生态风险指数值绘制散点分析图，并计算相关性系数。结果如图 6 所示，散点图呈现出类似于斜三角形的格局，研究区单位面积的生态系统服务价值与对应生态风险指数并未呈现出明显的数学函数趋势关系，而是在一定程度上呈现出类似于负向相关性关系，即单位面积生态系统服务价值减小，生态风险指数值增大。文章运用 SPSS 软件将研究区单位面积生态系统服务价值与生态风险指数作为两个变量进行正态性检验，发现二者都不服从正态分布，因而不宜采用 Pearson 相关分析，故采用 Spearman 相关分析两变量间的相关关系。研究区 6 个时期的单位面积生态系统服务价值与生态风险的 Spearman 相关系数分别为 0.7253、0.7326、0.7568、0.7721、0.7730、0.7866。

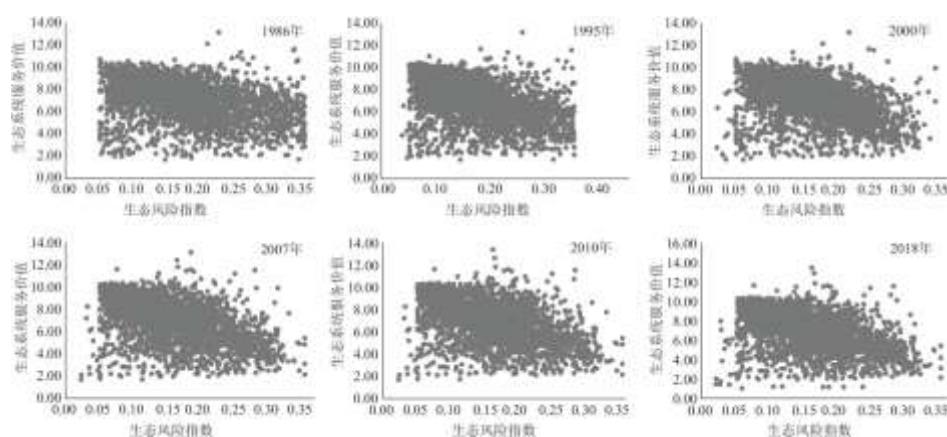


图 6 研究区单位面积生态风险指数与生态系统服务价值散点分析图

3.3.2 时间相关性

基于研究区 2549 个评价单元格单位面积生态系统服务价值以及土地利用生态风险指数值，将各评价单元格 1986 年生态风险指数值与 1986~2000 年单位面积生态系统服务价值的变化结果进行叠加分析，2000 年生态风险指数值与 2000~2010 年单位

面积生态系统服务价值变化结果进行叠加分析, 2010 年生态风险指数值与 2010~2018 年单位面积生态系统服务价值变化结果进行叠加分析, 并统计评价单元格的数目, 对各时段基期生态风险强度值对期内生态系统服务价值变化的影响(表 4)。

表 4 1986~2018 年三峡库区生态服务价值对生态风险强度的响应表

基期生态风险等级	1986~2000 年			2000~2010 年			2010~2018 年			总体情况		
	增加	不变	减少	增加	不变	减少	增加	不变	减少	增加	不变	减少
高风险	198	3	296	190	0	85	180	1	80	190	0	307
较高风险	207	5	255	159	0	91	282	0	167	210	0	257
中风险	266	3	284	534	0	393	397	16	321	268	0	285
较低风险	246	2	220	215	0	283	257	5	349	246	0	222
低风险	213	11	186	167	2	274	110	5	231	219	2	189

由表 4 可知, 评价基期为高、较高和中生态风险等级的评价单元格在 6 个研究时间段内单位面积生态系统服务价值的变化特征为减少的单元格数目要高于表现为增加的单元格数目。研究区从高风险到低风险的五个等级的评价单元格数量在整个研究期间的生态系统服务价值增加数目占比分别为 38.23%、44.97%、48.46%、52.56%和 53.41%, 基本接近对应生态风险等级评价小区数量的一半左右; 低生态风险等级的评价单元单位面积生态系统服务价值的变化表现为增加, 占有低生态风险评价单元格的 53.41%; 较低生态风险等级的评价单元单位面积生态系统服务价值变化主要表现为增加和较少, 分别占比 52.56%和 46.59%。总体来看, 在整个研究时间内, 高生态风险区域所对应的生态服务价值减少的比例最高, 达到 61.77%, 低生态风险区域所对应的生态服务价值增加的比例最大, 达到 53.41%。一般而言, 高生态风险区域代表着未来该区域生态系统服务价值最可能会呈现出减小的态势, 而低等级生态风险区域在未来生态系统服务价值往往表现为保持稳定或增加的变化趋势。

3.3.3 空间相关性

文章采用双变量空间自相关模型, 对三峡库区生态系统服务价值和生态风险指数的空间关联特征进行分析。得到图 7 所示结果, 从生态服务价值的四大类型来看, 1986~2018 年, 供给服务和调节服务与生态风险强度指数的空间相关性比支持服务价值与生态风险指数的空间相关性要高, 景观服务价值与生态风险指数的空间相关性则低于调节服务价值与生态风险指数的空间相关性; 供给服务价值与生态风险指数的全局 Moran' sI 指数的变化趋势与支持服务价值的变化趋势一致性较强, 调节服务价值与文化服务价值的生态风险指数的全局 Moran' sI 指数变化趋势大致一致; 1986、1995、2000、2007、2010 和 2018 年研究区支持服务和调节服务成为三峡库区的主导服务。研究区全局 Moran' sI 指数变量表(表 5)如下:

表 5 研究区全局 Moran' sI 指数变量表

研究区	统计变量	不同阶段生态服务价值与生态风险关系统计变量				
		1986~1995 年	1995~2000 年	2000~2007 年	2007~2010 年	2010~2018 年
三峡库区	Moran' s I	0.12	0.18	0.13	0.20	0.28

	Z	0.33	0.60	0.52	0.09	0.84
	P	0.01 级别，相关性显著				

研究区生态系统服务价值和生态风险值局部空间自相关 LISA 分析结果如图 7 所示，结果显示相关性显著区域主要分布在长江流域沿岸地区、研究区东北部分和湖北地区以及重庆都市区，具体分为高价值-高风险、高价值-低风险、低价值-高风险、低价值-低风险以及不显著 5 种模式。

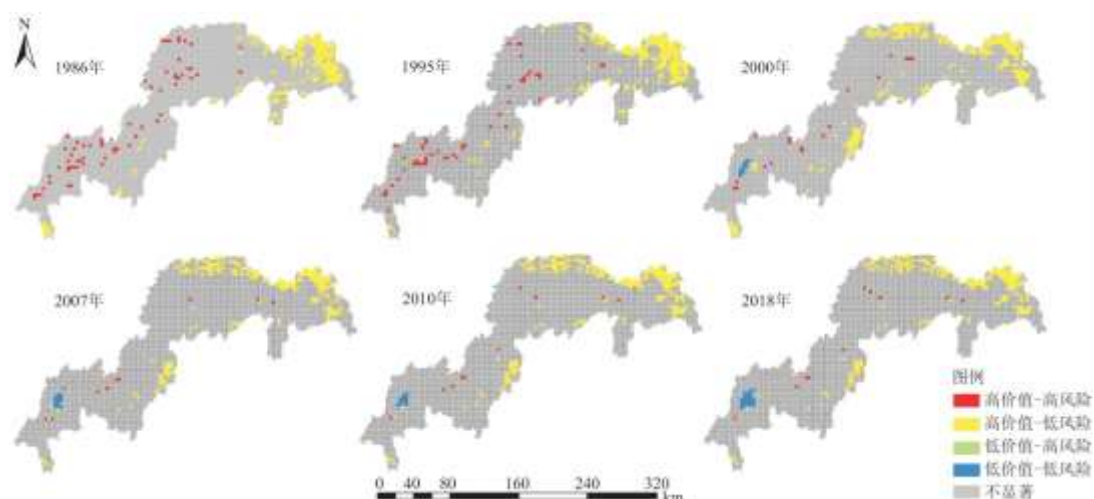


图 7 1986~2018 年单位面积生态系统服务价值与生态风险指数空间自相关分布图

高价值-高风险区代表研究区单位面积生态系统服务价值高，同时生态风险等级高的区域。主要分布在三峡库区长江沿线部分地区，其生态系统服务价值高，生态风险也高，由于三峡库区的蓄水，使得大量高风险景观类型被淹没，因而该区域面积逐渐减小。高价值-低风险区代表研究区单位面积生态系统服务价值较高，而生态风险较低的区域，期初主要分布在研究区东北一隅，由于研究区生态有所恢复，使得该部分区域面积有所增加。低价值-高风险区代表研究区单位面积生态系统服务价值较低而生态风险较高的区域；这种类型主要分布于高价值-高风险区的临近地区，由于受到高价值景观的集聚效应和自身地类性质的影响，其生态系统服务价值相对较低，该类型总量较少，并在后期消失。低价值-低风险区代表单位面积生态系统服务价值低，生态风险也低的区域。研究基期在重庆市都市区少量分布，以建设用地为主，后期由于城市建设不断加快，其面积逐渐增，该类型分布区域主要在人类活动干扰相对较强的区域，其所提供的生态系统服务价值主要供人类的需求为主，而人类活动对生态环境的改造和影响，又使该部分区域处于一种相对稳定状态，其生态风险处于较低水平。不显著区代表单位面积生态系统服务价值和生态风险强度指数集聚关系不明显的区域。该部分区域占研究区总面积 81.98~86.77%，以成片分布的耕地及林地为主，生态系统服务价值和生态风险指数分布都相对平均，没有出现明显的极值中心。

4 结论与讨论

文章在空间技术的支撑下，运用生态系统服务价值模型、生态风险评价模型以及双变量空间自相关模型，系统地分析了三峡库区 1986~2018 年的生态系统服务价值和生态风险时空变化特征以及二者相关性。

4.1 结论

(1) 1986~2018 年三峡库区生态系统服务价值的总量呈现持续增长的态势, 由研究期初的 1639.56×10^8 元持续增长到 1662.01×10^8 元, 但整体增长速率水平较低并趋于平缓, 整体增幅仅为 1.37%; 高等级生态风险指数值持续降低, 30 年来总体下降 10.89%; 区域生态安全状况总体上有一定的改善。

(2) 三峡库区单位面积生态系统服务价值和生态风险指数在等级上具有一定的负向相关关系, 但缺乏明显的函数关系; 研究区 6 个时期的单位面积生态系统服务价值与生态风险的 Spearman 相关系数分别为 0.7253、0.7326、0.7568、0.7721、0.7730、0.7866。

(3) 从 LISA 分析可知, 1986~2018 年研究区高价值-高风险区域比例不断减小, 低价值-低风险区面积逐渐增加; 生态风险指数的变化能够对生态系统服务价值的变化起到一定的预示作用, 高等级生态风险区域的生态系统服务价值在一定程度上具有极大的减小可能性。长江沿线的部分地区是高价值-高风险区的主要分布区域, 既是整个库区生态系统服务的主要供给区, 同时也是区域生态风险峰值区。生态系统服务价值的提高显示着生态环境得到了一定的改善, 而高等级生态风险区域则揭示了生态系统的脆弱性, 需要引起特别关注。

4.2 讨论

将区域生态系统服务价值评价和生态风险评价的有机结合并运用, 在一定程度上能够较好地反映出人类活动所引起的生态环境状况的改变, 分析和预测其生态环境承载力, 环境保护和高质量的可持续发展提供决策管理参考。由于本文是基于遥感影像解译的土地利用类型基础上进行的生态系统服务价值和生态风险评价, 属于两个结果之间的相互作用研究, 未能很好地描述和反映生态系统服务和生态风险评价直接的内在联系; 在研究深度和新方法的探索上还有较大空间。此外, 理清生态系统服务和生态风险相互影响的内在机理和相互作用效果将是今后的重点研究方向。

参考文献:

- [1] 许凤娇, 吕晓. 基于土地利用变化的江苏沿海地区生态风险格局[J]. 生态学报, 2018, 38(20): 7312-7325.
- [2] 杨凤海, 赵烨荣, 宋佳佳, 等. 齐齐哈尔市土地生态系统服务价值时空变化研究[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(2): 105-114.
- [3] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性[J]. 生态学报, 2019, 39(21): 1-14.
- [4] LIN Y, HU X, ZHENG X, et al. Spatial variations in the relationships between road network and landscape ecological risks in the highest forest coverage region of China[J]. Ecological Indicators, 2019, 96: 392-403.
- [5] YUAN Y, CHEN D, WU S, et al. Urban sprawl decreases the value of ecosystem services and intensifies the supply scarcity of ecosystem services in China[J]. Science of the Total Environment, 2019: 134170.
- [6] 荔琢, 蒋卫国, 王文杰, 等. 基于生态系统服务价值的京津冀城市群湿地主导服务功能研究[J]. 自然资源学报, 2019, 34(8): 1654-1665.
- [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]曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855.
- [9]康鹏, 陈卫平, 王美娥. 基于生态系统服务的生态风险评价研究进展[J]. 生态学报, 2016, 36(05): 1192-1203.
- [10]杨青, 刘耕源. 湿地生态系统服务价值能值评估——以珠江三角洲城市群为例[J]. 环境科学学报, 2018, 38(11): 4527-4538.
- [11]LI L, LIU D, ZHANG Q, et al. Occurrence and ecological risk assessment of selected antibiotics in the freshwater lakes along the middle and lower reaches of Yangtze River Basin[J]. Journal of Environmental Management, 2019, 249: 109396.
- [12]王涛, 张超, 于晓童, 等. 洱海流域土地利用变化及其对景观生态风险的影响[J]. 生态学杂志, 2009, 36(7): 2003-2009.
- [13]谢小平, 陈芝聪, 王芳, 等. 基于景观格局的太湖流域生态风险评估[J]. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3369-3377.
- [14]ARFAEINIA H, DOBARADARANS, MORADI M, et al. The effect of land use configurations on concentration, spatial distribution, and ecological risk of heavy metals in coastal sediments of northern part along the Persian Gulf[J]. Science of the Total Environment, 2019, 653: 783-791.
- [15]郑俊鹏, 刘震宇, 王婷. 先导区土地利用变化及生态服务价值研究[J]. 国土资源导刊, 2016, 13(1): 68-73.
- [16]曾永年, 靳文凭, 王慧敏, 等. 青海高原东部土地利用变化模拟与景观生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 185-194.
- [17]田鹏, 李加林, 史小丽, 等. 浙江省土地利用格局时空变化及生态风险评价[J]. 长江流域资源与环境, 2018(12): 2697-2706.
- [18]敖荣军, 梅琳, 梁鸽, 等. 湖北省县域人口迁入与工业集聚的空间关联性研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(3): 514-522.
- [19]叶长盛, 冯艳芬. 基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 224-232.
- [20]罗雅琴. 临川区土地利用与生态系统服务价值时空变化研究[D]. 东华理工大学, 2019.
- [21]钟小龙. 洞庭湖区景观格局与土地生态系统服务价值变化的关联性研究[D]. 湖南师范大学, 2019.
- [22]周启刚, 张晓媛, 王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 289-297.
- [23]朱治州, 钟业喜. 长江三角洲城市群土地利用及其生态系统服务价值时空演变研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(7): 1520-1530.
- [24]刘迪, 陈海, 耿甜伟, 等. 基于地貌分区的陕西省区域生态风险时空演变[J]. 地理科学进展, 2020, 39(02): 243-254.

-
- [25] 马世五, 谢德体, 张孝成, 等. 三峡库区重庆段土地生态状况时空格局演变特征[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8512-8525.
- [26] 叶鑫, 邹长新, 刘国华, 等. 生态安全格局研究的主要内容与进展[J]. 生态学报, 2018, 38(10): 3382-3392.
- [27] 杨勇, 任志远. 城市近郊区土地利用生态风险评价——以西安市长安区为例[J]. 土壤通报, 2015, 46(3): 519-525.
- [28] 黄春波, 滕明君, 曾立雄, 等. 长江三峡库区土地利用/覆盖的长期变化[J]. 应用生态学报, 2018, 29(5): 1585-1596.
- [29] 刘迪, 陈海, 史琴琴, 等. 黄土丘陵沟壑区生态风险时空动态及其风险分区——以陕西省米脂县为例[J]. 自然资源学报, 2019, 34(9): 2012-2025.
- [30] 杨远琴, 任平, 洪步庭. 基于生态安全的三峡库区重庆段土地利用冲突识别[J]. 长江流域资源与环境, 2019(2): 322-332.
- [31] 熊秀海, 代侦勇. 奉化市生态服务与土地利用强度的相关性分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(4): 102-104.
- [32] 黄金川, 林浩曦, 漆潇潇. 面向国土空间优化的三生空间研究进展[J]. 地理科学进展, 2017, 36(3): 378-391.