

DOI: 10.5846/stxb202104080909

王舒,张骞,王子芳,余砾,向书江,高明.基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建.生态学报,2022,42(11):4654-4664.

Wang S, Zhang Q, Wang Z F, Yu L, Xiang S J, Gao M. GIS-based ecological risk assessment and ecological zoning in the Three Gorges Reservoir area. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(11): 4654-4664.

基于 GIS 的三峡库区生态风险评估及生态分区构建

王 舒¹, 张 骞², 王子芳¹, 余 砾³, 向书江¹, 高 明^{1,*}

1 西南大学资源环境学院, 重庆 400715

2 平顶山学院旅游与规划学院, 平顶山 467000

3 重庆市璧山区防汛抗旱调度中心, 重庆 402760

摘要:快速城市化与土地利用变化导致的一系列问题不断影响着生态系统健康。开展生态系统服务供给和生态风险的空间量化研究,有助于科学管控区域生态用地,促进生态文明建设。采用 GIS 技术,利用生态系统服务价值核算模型、生态风险指数模型,研究了 2000 年以来三峡库区生态系统服务供给值和生态风险指数的时空演化特征,并利用 Z-score 标准化法进行生态功能分区构建。结果表明:(1)2000—2015 年,三峡库区生态系统服务供给值总体变化较小,生态系统服务以调节服务为主且林地供给值最高。高供给值区主要分布于湖北省夷陵区、秭归县和兴山县等植被覆盖度高的区域,低供给值区分布在库区西南部的渝中区、渝北区和沙坪坝区等人口密集区。(2)三峡库区生态风险值总体呈小幅上升趋势,“西高东低”的分布特征明显,生态安全逐步向中等风险类型转移,其中低、较低生态风险区占区域总面积的 55% 以上,高风险区主要集中在重庆市主城区。(3)研究期间 4 种生态分区变化程度较小,表明生态分区处于较为稳定的状态。高供给值-高风险区(I)的分布连续性最差,低供给值-高风险区(II)和高供给值-低风险区(IV)分布较为集中。对三峡库区生态系统服务供给、生态风险及生态分区的研究,可加强库区土地集约节约利用,保护生态用地,平衡库区经济建设与环境保护。

关键词:三峡库区;生态系统服务;生态风险;生态分区;分区管理措施

GIS-based ecological risk assessment and ecological zoning in the Three Gorges Reservoir area

WANG Shu¹, ZHANG Qian², WANG Zifang¹, YU Le³, XIANG Shujia¹, GAO Ming^{1,*}

1 College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China

2 College of Tourism and Planning, Pingdingshan University, Pingdingshan 467000, China

3 Chongqing Bishan District Flood Control and Drought Relief Dispatching Center, Chongqing 402760, China

Abstract: Land use change is an extremely important factor in ecosystem services and ecological health. A series of problems caused by rapid urbanization and land use changes, such as biodiversity sharp decline, environmental pollution and ecological land loss, continue to affect ecosystem health. The spatially quantitative researches of ecosystem service supply and ecological risk are contributed to scientific management of the regional ecological land, and promote the construction of ecological civilization. In this work, geographic information system (GIS) technology, the accounting model of ecosystem service value, and ecological risk index model, were used to study the spatio-temporal evolution characteristics of ecosystem service supply value and ecological risk index in the Three Gorges Reservoir area (TGR) from 2000 to 2015. Further, the Z-score standardization method is used to construct the ecological function zoning. The research results of the

基金项目:重庆市技术创新与应用示范专项重点研发项目(cstc2018jscx-mszdX0061);国家重大水利工程建设基金三峡后续工作科研项目(5001022019CF50001);国家自然科学基金(42177019)

收稿日期:2021-04-08; 网络出版日期:2022-02-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gaoming@swu.edu.cn

paper are as follows: (1) for 2000—2015 period, the whole change of ecosystem service supply value in the Three Gorges Reservoir area was insignificant. In addition, the ecosystem service mainly played role as regulation service, especially forest land. The ecosystem service supply value in the Three Gorges Reservoir area are highly heterogeneous. High-value supply regions mainly distributed in Yiling District, Zigui County and Xingshan County with high vegetation coverage. Low-value supply regions mainly distributed in Yuzhong District, Yubei District and Shapingba District with high population density. (2) The ecological risk value of the Three Gorges Reservoir area showed a slight upward trend, with a distribution characteristics of “high in the west and low in the east”. Ecological safety of the Three Gorges reservoir is gradually transferred to medium risk types. The small and smaller ecological risk areas accounted for more than 55% of the total area. High-risk zone is mainly concentrated in the main city of Chongqing Yuzhong District, Yubei District, Shapingba District and Nan'an District, etc. (3) During the study period, the four ecological zones changed little, indicating that the ecological zones kept a relatively stable balance. The distribution continuity of high-supply and high-risk areas (I) is the worst, while the distributions of low-supply and high-risk areas (II) and high-supply and low-risk areas (IV) are more clustered. Based on the study on ecosystem service supply, ecological risks and ecological zoning of the Three Gorges Reservoir area, it contributes greatly to boost the intensive and economical utilization, protects ecological land, and balances economic construction and environmental protection in the Three Gorges Reservoir area.

Key Words: Three Gorges Reservoir Region; ecosystem services; ecological risk; ecological zoning; zoning management measures

生态系统服务系指人类通过生态系统的结构、过程和功能直接或间接获得的利益^[1-2]。生态系统在提供各项服务的同时,自身也面临着各种风险^[3]。快速的城镇化发展在一定程度上加剧了人类对物质的追求以及对自然资源的索取,导致生态系统服务的退化和生态风险的不断增加^[4-7]。联合国、世界银行等国际性组织发起的以生态系统服务为基点的千年生态系统项目及《绿色数据手册》汇编对不同尺度的生态系统服务进行了评估,明确提出生态系统的状况和变化与人类物质福利的密切关系,而生态系统保护的重点在于生态系统服务的衡量及生态风险的把控^[8-10]。因此,研究生态系统服务和生态风险及其空间格局具有重要意义。目前关于生态系统服务与生态风险的研究已在影响因素^[11]、时空演变^[12]、价值量化^[13-14]及风险评价^[15]等方面取得了较多研究成果,但忽视了生态系统服务功能与生态风险的联动性、复杂性及动态性。随着对生态系统服务研究的深入,生态系统服务在生态风险评价方面的作用越来越受到重视^[16]。生态系统服务与生态风险的研究多集中于京津冀^[17]和长三角等^[18]经济发达区域以及黄河流域^[19]等;研究方法多采用基于某种特定服务的实体属性评价方法^[20]、基于复杂生态系统作用的评价方法^[21]、基于社会生态系统分析的评价方法及基于 DPSIR 理论框架的风险评价方法^[22]。上述研究为生态系统服务研究提供了扎实的基础,但鲜有将生态系统服务、生态风险与生态分区作为链条连接起来的研究,尤其是长江流域上游的生态系统服务与生态风险的演变趋势及生态分区仍不明确^[23]。本文将生态系统服务与生态风险作为同等重要的研究范畴,从生态系统服务的视角对三峡库区生态风险进行量化并开展生态分区构建,研究成果不仅能从正反两方面表征区域生态安全状况,还能让管理者根据不同分区,有针对性地提高生态系统服务能力和稳定性^[24-26],进一步推动区域生态系统的良性循环。

三峡库区作为长江经济带的重要组分,是长江流域的重要生态走廊和生态经济区^[27],其土地利用变化能够对区域生态系统的结构和格局产生巨大影响^[28-29]。2003 年,三峡大坝正式下闸蓄水,此后十多年间由于受大型水利工程的影响,库区地质灾害频发,虽然库区在生态保护方面已实施《三峡库区地质灾害防治总体规划》,同时采用岸线修复、退耕还林等工程措施^[30-31],但随着人类活动加剧及城市规模扩展,生态风险仍在增加。因此,本文在已有研究的基础上,以生态系统服务为切入点,量化生态系统服务供给,构建生态风险模型,分析三峡库区生态系统服务供给与生态风险关系并对其进行生态分区,能够在很大程度上丰富生态系统

服务相关研究,同时为维持生态平衡、促进库区经济与环境协调发展提供一定的科学依据。

1 研究区概况

三峡库区作为全国最为特殊的生态功能区,系指因长江三峡工程水位升高而受淹没影响的有关行政区域(图1),地理位置为 $106^{\circ}20'E-110^{\circ}30'E$, $29^{\circ}00'N-31^{\circ}50'N$,东起夷陵区,西至江津区,总面积约为 58000 km^2 ,被认为是长江流域最为重要的生态走廊和生态经济区。截至2015年末,库区总人口数为2160.96万,区内人口分布极不平衡。库区自然资源丰富,森林覆盖率约为48.2%,地形东高西低,多山地、丘陵地貌。

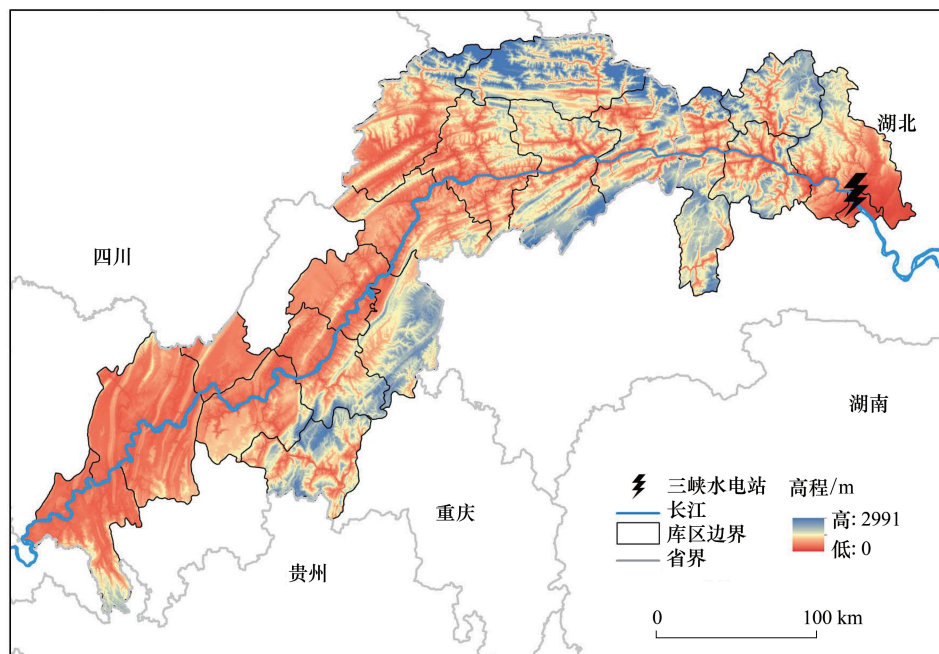


图1 研究区位置

Fig.1 Location of study area

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及处理

本文对三峡库区生态系统服务供给值的评估方法是在前人研究的基础上结合三峡库区实际情况进行修订的。研究数据为土地利用数据和社会经济统计数据。(1)本研究所使用的三峡库区土地利用数据经美国 Landsat ETM+/OLI 图像(<https://glovis.usgs.gov/>)解译得到,分辨率为30 m,影像无云层干扰。根据中国国家标准《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2007)与《第二次全国土地调查技术规程》(TD/T 1014—2007),利用目视解译法,并结合三峡库区生态系统服务供给情况,进行了相应地类的调整与归并,将研究区分为耕地、林地、草地、水体、建设用地和未利用地六大类。采用随机取样对分类结果进行 Kappa 检验,2000—2015 年精度均高于0.85,满足研究需求。(2)社会经济、自然资源数据来源于中国知网年鉴资料库(<http://cyfd.cnki.com.cn/index.htm>),包括《重庆市统计年鉴》、《湖北省统计年鉴》、《中国县、市社会经济统计年鉴》及各政府部门相关统计报告等。

2.2 研究方法

2.2.1 研究单元的划分

为提高研究数据的准确性和模型的精度,避免行政区划分割产生的分配误差,参照相关研究成果^[32],考

虑到数据计算与图幅限制,最终确定 5 km×5 km 的格网作为基本单元对三峡库区进行分割,最终得到 2624 个格网,以格网为研究单元进行生态系统服务和生态风险指数的计算。

2.2.2 生态系统服务供给评估

本研究在谢高地等^[33]的研究基础上选取了 9 种主要的生态系统服务类型,采用价值当量法对生态系统服务供给量进行评估,并结合三峡库区实际情况对当量系数进行适当修正。其中,供给功能的价值当量修正以研究区内单位土地农、林、牧、渔产值为依据;调节功能采用研究区森林覆盖率进行修正;支持功能与调节功能间的差异存在于自然基底,故也采用森林覆盖率修正;文化功能采用旅游总收入进行修正^[25]。具体公式为:

$$n = \frac{m_i}{M_i}$$
(1)

n :修正系数,无量纲; m_i :三峡库区平均值; M_i :全国平均值。经计算,供给功能中耕地、林地、草地、水体的修订值分别为 2.09、1.59、2.12、0.80;调节功能和支持功能的修订值为 2.08;文化功能的修订值为 1.51。由于建设用地和未利用地所提供的生态服务价值极低,故将其赋值为 0^[34]。基于三峡库区生态系统服务价值系数(表 1),计算各区县生态系统服务价值总量,公式如下:

$$ESV = \sum_{i=1}^n VC_i \times \frac{U_i}{U}$$
(2)

ESV:单位面积生态系统服务供给值; n :土地利用类型数量; VC_i :第 i 种地类的生态系统服务价值系数; U_i :第 i 种土地利用类型面积; U :评价区域土地总面积。

表 1 三峡库区生态系统服务价值系数表/(元 hm⁻² a⁻¹)

Table 1 Coefficients of ESV in the TGR area

类型 Types	二级类型 The secondary types	耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水体 Water
供给服务	食物生产	501.9	235.2	410.1	190.9
Supply services	原材料生产	195.7	2124.0	343.4	126.1
调节功能	气体调节	672.7	4036.2	1401.5	178.7
Regulating services	气候调节	906.3	3802.6	1457.5	531.5
	水文调节	719.4	3821.3	1420.1	4356.1
	废物净化	1298.7	1607.0	1233.3	3446.4
支撑功能	土壤保持	1373.4	3755.9	2092.8	215.8
Support services	生物多样性	953.0	4213.7	1747.2	591.8
文化功能	景观美学	114.9	1406.3	588.2	1030.4
Cultural Services					
总价值 Total Value		6736.1	25002.4	10694.2	10589.8

2.2.3 生态风险指数模型构建

为建立不同土地利用类型与区域生态风险指数之间的经验联系,选用不同土地利用类型所占面积比例和生态风险权重构建研究单元(格网)内的生态风险指数(ERI_{kf}),具体计算公式如下:

$$ERI_{kf} = \sum_{f=1}^n \frac{S_{kf} W_f}{S}$$
(3)

n :土地利用类型的数量; S :研究单元总面积(km²); S_{kf} :研究单元 k 的第 f 类土地利用类型面积(km²); W_f :第 f 类土地利用类型的风险权重。综合以往学者的研究成果^[35],对不同地类赋予不同权重, W_f 分别为耕地 0.32、林地 0.12、水体 0.53、草地 0.16、建设用地 0.85 和未利用地 0.82。

2.2.4 生态系统服务-风险分区建设

运用 Z-score 标准化方法对 2624 个格网的生态系统服务供给值和生态风险指数进行标准化,得到其标准

化数值。X 轴表征生态系统服务供给值、Y 轴表征生态风险值,划分出的四个象限分别表示高供给-高风险(I 象限)、低供给-高风险(II 象限)、低供给-低风险(III 象限)、高供给-低风险(IV 象限)。具体标准化方法:

$$x = \frac{x_i - \bar{x}}{s} \quad (4)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

x : 标准化后每个格网的生态风险值、生态系统服务供给量; x_i : 标准化后第 i 个格网的生态风险值、生态系统服务供给值; $\bar{x}$: 区域内每个格网的生态风险、生态系统服务供给均值; s : 区域标准差; n : 评价单元的总数。

3 结果与讨论

3.1 三峡库区土地利用变化分析

基于遥感数据和统计分析,得到三峡库区不同土地利用类型面积变化结构(图2)。2000—2015 年林地始终是三峡库区最主要的土地利用类型,占全区总面积的 46% 以上,其次为耕地。研究期内不同土地利用类型均发生了变化,主要特征为耕地和草地的面积轻微减少;水体和建设用地面积明显扩张;林地面积呈波动增长趋势,未利用地变化不显著。

结合三峡库区土地利用数据与表 2 来看,近 15 年间,三峡库区土地利用类型产生较大变化,发生转变的面积为 3762.02 km², 占总面积的 6.45%, 耕地、草地和未利用地面积持续缩减,分别减少了 963.20 km²、1180.86 km² 和 4.88 km², 林地和建设用地扩张明显,分别增加了 1155 km² 和 1351 km², 未利用地面积变化不大,这与王大菊等对三峡库区 2000—2015 年的土地利用结果基本保持一致^[13]。耕地作为转出地类的主要来源,其转出面积占总转出面积的 45.27%。林地规模持续扩张,其转入面积中耕地占 37.02%,绝大部分来源于草地。作为三峡库区转入地类的主要成分,建设用地的转入来源主要是耕地和林地。土地利用在时间和空间上的变化与人类对生态环境开发的强度密切相关。人口增加、建设用地面积扩张,耕地被侵占,出现草地退化等现象;水域面积受气候、径流和水利设施等影响较大;退耕还林工程的实施对于林地恢复有重要意义;地类变化频繁,主要是自然条件和社会经济发展综合作用的结果,因此各个时期三峡库区土地利用呈现出不同的状态。

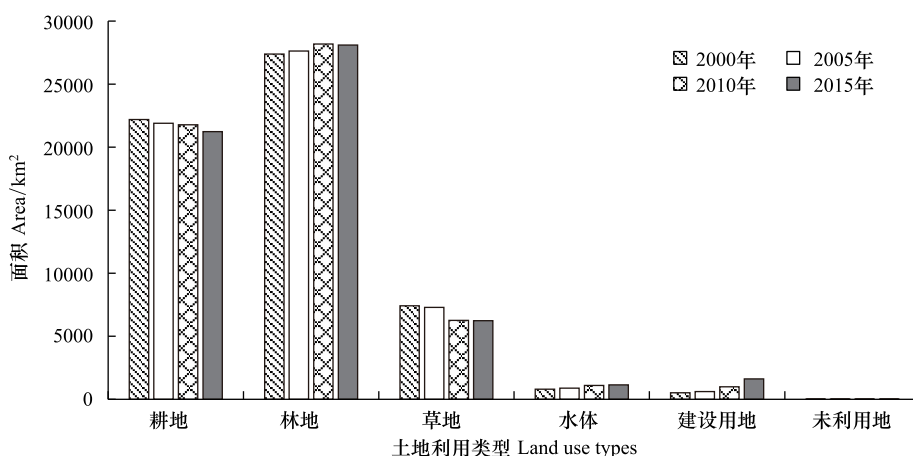


图2 2000—2015 年三峡库区不同土地利用类型面积变化

Fig.2 Area change of different land use types in the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015

表 2 2000—2015 年三峡库区土地利用转移矩阵/km²

Table 2 Land use transition in the Three Gorges Reservoir from 2000 to 2015

		2015						
		耕地 Farmland	林地 Woodland	草地 Grassland	水体 Water	建设用地 Built-up land	未利用地 Unused land	总转出 Exported area
2000	耕地		490.38	171.67	129.68	911.34	0.00	1703.08
	林地	243.39		48.95	153.11	160.71	0.00	606.15
	草地	485.97	825.78		52.29	39.90	0.00	1403.94
	水体	2.43	3.49	1.52		5.24	0.00	12.69
	建设用地	7.51	3.72	0.60	19.45		0.00	31.28
	未利用地	0.58	1.11	0.33	2.52	0.33		4.88
	总转入	739.88	1324.49	223.08	357.06	1117.52	0.00	3762.02

3.2 三峡库区生态系统服务供给时空演化

自然间断点分级法(Jenks)是运用聚类思维,将生态系统服务供给值分为不同的群组^[23],最终分类结果与实际生态系统服务供给值分布相符,因此使用自然间断点分级法将生态系统服务供给值分为 5 种类型。由于三峡库区不同类型用地面积差异较大,直接导致了库区内生态系统服务供给分布的高度异质性。如图 3 所示,库区东部山区供给值显著高于西部地区,高值区主要集中出现在夷陵区、秭归县、兴山县及巴东县东部和南部,其余高供给值区分布较分散。李辉等^[36]对三峡库区生态系统服务供给值进行了空间特征分析,所得结果与本文大致相似。生态系统服务供给高值区多为生态环境较好、人类活动干扰较小的地区,该地区生态系统拥有较强的内部调节能力,等级较高,可提供的生态系统服务种类多、价值高。较高供给值集中分布在库首西部的巫溪县和奉节县,其余则穿插在高值区域间,分布较为分散。低供给值区主要分布在库区西南部的重庆市渝中区、渝北区及沙坪坝区等人口密集区,该区域经济发达,建设用地所占面积较大,植被覆盖率低,生态环境人为破坏严重,因此生态系统服务供给值较低。

三峡库区在研究期内的生态价值损益能反映出长江流域上游在兼顾城市发展与生态保护方面的重要

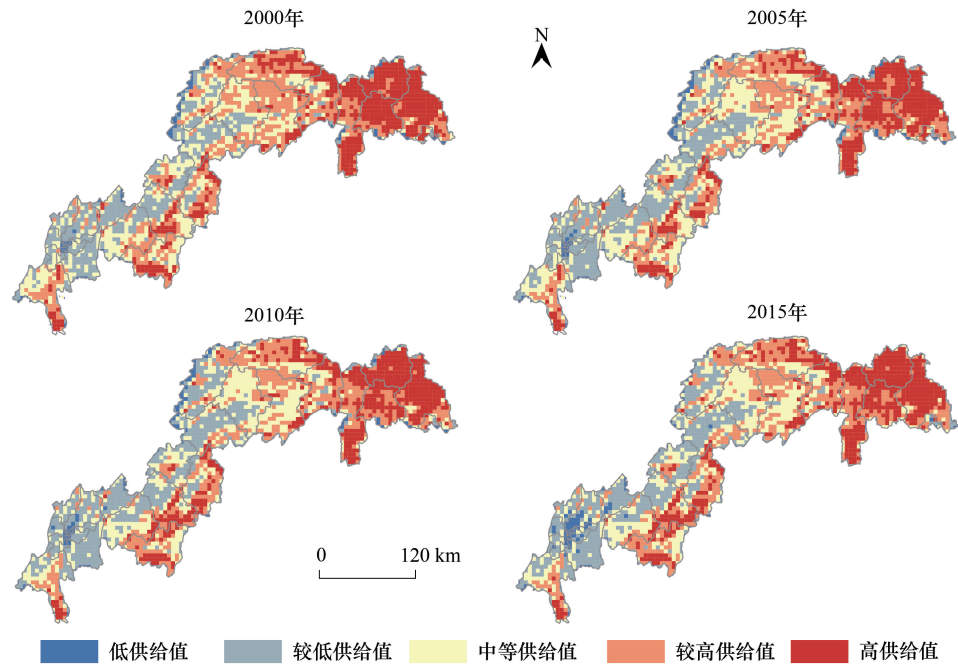


图 3 三峡库区生态系统服务供给值空间分布

Fig.3 Supply value of ecosystem services in the Three Gorges Reservoir Area

性^[32]。由表 3 可知,2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年生态系统服务供给值分别为 918.93×10^8 元、 922.58×10^8 元、 927.15×10^8 元和 921.42×10^8 元,总体供给值变化幅度较小,且与严恩萍等^[37]对三峡库区生态系统服务价值的测算结果在同一数量级。2000—2015 年,在各土地利用类型中,林地占地区总面积比例最大,且林地的生态系统服务供给值最高,均在 74% 以上。耕地和草地的生态系统服务供给值在 15 年内分别降低了 6.49×10^8 元和 12.63×10^8 元,这是由于快速的城镇化发展,大量城乡建设占用耕地和草地及对生态用地的不合理利用,导致耕地和草地的供给值有所减少。水体的供给值提高了 3.64×10^8 元,三峡库区生态文明建设、退田还湖等系列政策的实施,水域生态用地面积不断增大,其生态系统服务供给值得以增加。据《长江三峡工程生态与环境监测公报(2010)》,2010 年三峡库区森林覆盖率在鼎盛期达 68.0%。由于 2000 年以来库区陆续实施岸线生态保护修复、退耕还林等生态工程,生态环境不断改善,增加了库区生态系统服务价值。研究区作为长江中上游的重要生态屏障,且拥有重要的三峡水利工程,水文调节作用突出,因而在各类生态系统服务中,该区以调节服务为主,其占比均高于 53%。支撑服务略低于调节服务,所占比例均高于 31%,足以体现三峡库区能够提供足够的其他生态系统服务所需的基础功能。供给服务和文化服务的总占比不足 15%,库区耕地数量较少,粮食产量较低,此外该区域文化旅游资源开发程度不高,所对应的生态系统服务供给值相对较低。

表 3 不同土地利用类型生态系统服务供给值及占比/($\times 10^8$ 元)

Table 3 Ecosystem service value and proportion of different land use types

土地利用类型 Landuse type	2000		2005		2010		2015	
	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion
耕地 Farmland	149.25	16.24	147.23	15.96	146.45	15.80	142.76	15.49
林地 Woodland	682.19	74.24	688.25	74.60	702.30	75.75	700.15	75.99
草地 Grassland	79.05	8.60	77.75	8.43	66.72	7.20	66.42	7.21
水体 Water	8.44	0.92	9.36	1.01	11.69	1.26	12.08	1.31
供给服务 Supply services	85.57	9.35	85.92	9.09	86.49	9.01	85.89	8.99
调节服务 Regulating services	486.02	53.12	510.85	54.02	522.57	54.41	520.58	54.47
支撑服务 Support services	297.76	32.54	301.01	31.83	302.36	31.48	300.43	31.43
文化服务 Cultural services	45.58	4.98	47.89	5.06	48.98	5.10	48.90	5.12

3.3 三峡库区生态风险时空分布

通过普通克里金法,对三峡库区 4 个时期的生态风险进行空间插值,并利用自然间断点分级法进行分级,即低风险($ERI \leq 0.15$)、较低风险($0.15 < ERI \leq 0.20$)、中等风险($0.20 < ERI \leq 0.26$)、较高风险($0.26 < ERI \leq 0.38$)和高风险($0.38 < ERI \leq 0.60$),得到其生态风险的空间分布。研究区四期生态风险均值分别为 0.1893、0.1899、0.1944 和 0.1999,呈逐渐上升趋势,生态安全逐步向中等风险类型转移,并呈现“西高东低”的空间分异特征。据图 4、表 4 及生态风险的最大、最小值可知,生态风险高值和低值差距逐渐增大,且低、较低生态风险区占总面积的 55% 以上,表明研究区部分地区如秭归县、兴山县和巴东县等地区生态安全恶化趋势减缓,生态环境得到改善,但也有部分地区如渝中区、渝北区和沙坪坝区等生态难以得到保护和恢复,生态环境有所恶化。

生态风险指数的空间分布格局受自然因素及人为因素如人口密度、社会发展程度等的影响^[21],在三峡库区表现为:2000 年高生态风险区集中分布在库区西部重庆市主城区,受社会经济的影响,该地区有大量建设用地,人口分布集中,经济发达,人类活动严重影响生态系统。2015 年高生态风险区在 2000 年的基础上逐渐向外围扩张,原因是重庆市是以渝中区为核心,主城各区共同发展为目标的多组团城市结构,15 年间其建设用地面积不断扩张,而生态用地面积不断缩减,导致该区域在生态本底脆弱的状态下,更难以进行生态系统良性循环。2000 年较高生态风险区集中出现在库区中部和西部,并呈“勺状”分布特征,而 2015 年较高生态风险区相比前 15 年,呈明显萎缩态势,集中分布区仅出现在高生态风险区外围,其余散落分布在库区中部,

所占面积减少了 892.63 km²;中等生态风险区的面积 15 年内降低了 3451.47 km²。2007 年“建优秀水电工程、创优美生态环境”政策的提出和实施,三峡库区着重发展生态保护,整体降低了库区生态风险值。较低生态风险区和低生态风险区在研究时段内面积分别增加了 1005.92 km²和 2295.46 km²,这是由于库区坚持生态优先原则,实行退耕还林还草,土地合理利用性逐渐增大,在万州区等地大力发展香橙种植业,使原有耕地转换为园地、林地等,生态环境得到改善,生态安全有所提升。

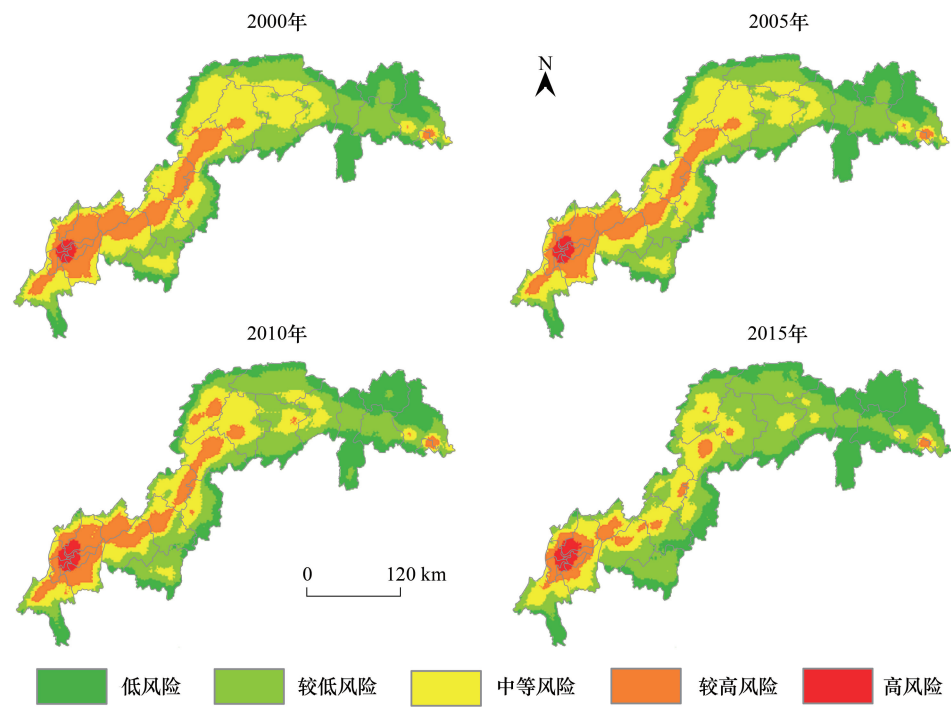


图 4 三峡库区生态风险等级空间分布

Fig.4 Distribution of ecological risk levels in the Three Gorges Reservoir area

表 4 三峡库区生态风险等级面积及比例/km²

生态风险等级 Ecological risk level	2000		2005		2010		2015	
	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion	供给值 Supply	占比/% Proportion
低生态风险区 Low ecological risk area	2224.25	3.82	4607.82	7.91	4433.13	7.61	4519.71	7.76
较低生态风险区 Lower ecological risk area	21202.32	36.38	22559.52	38.71	21885.29	37.56	22208.24	38.11
中等生态风险区 Medium ecological risk area	22574.71	38.74	20586.80	35.33	19308.29	33.13	19123.24	32.82
较高生态风险区 Higher ecological risk area	11548.76	19.82	9976.20	17.12	11514.26	19.76	10656.13	18.29
高生态风险区 High ecological risk area	725.00	1.24	544.70	0.93	1134.07	1.95	1767.72	3.03

3.4 三峡库区生态分区构建

将三峡库区各区县生态系统服务供给量和生态风险值带入公式(4),(5),(6)进行标准化,可以把三峡库区划分成 4 种不同的生态区(图 5、图 6),并针对不同生态分区提出了相应的分区管理措施。总体来看,研究期间生态分区均发生了不同程度的变化。高供给值-低生态风险区(Ⅳ)是研究区中占比最高的一类分区,

所占面积比例均高于 37%, 主要分布于秭归县、兴山县、巴东县、夷陵区西北部等地区, 随着时间推移, 分布地区呈逐渐增长趋势。该区生态资源丰富, 能够在数量和空间上提供较高水平的生态系统服务。作为三峡库区的生态核心, 高供给值-低生态风险区(IV)应秉持可持续发展理念, 加强生态建设, 坚持宜林则林, 宜草则草, 强化保护水土保持林、水源涵养林等生态用地, 保障生态系统服务流向周边区域的持续输送。

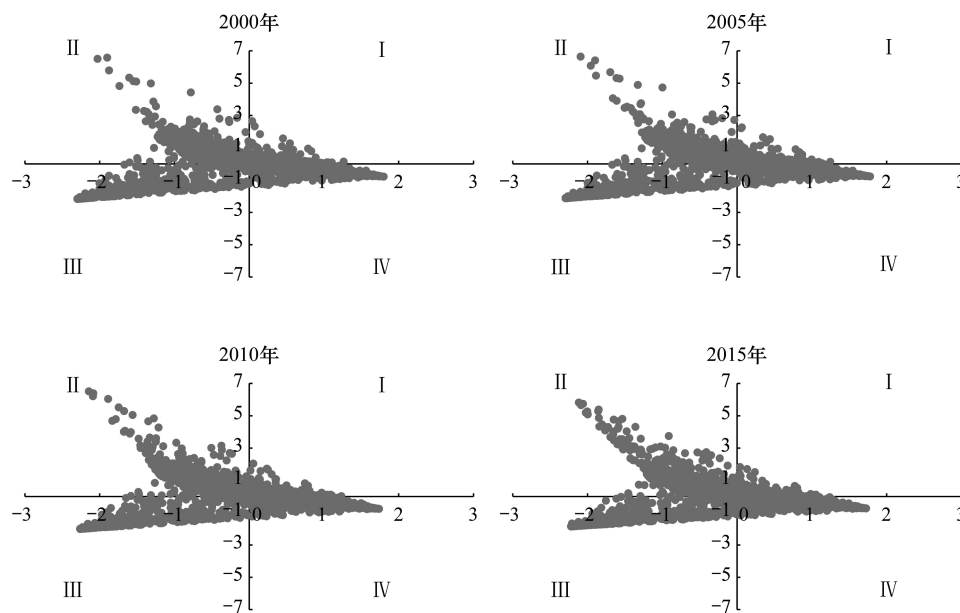


图 5 三峡库区生态分区象限分布

Fig.5 Quadrant distribution of ecological zones in the Three Gorges Reservoir Area

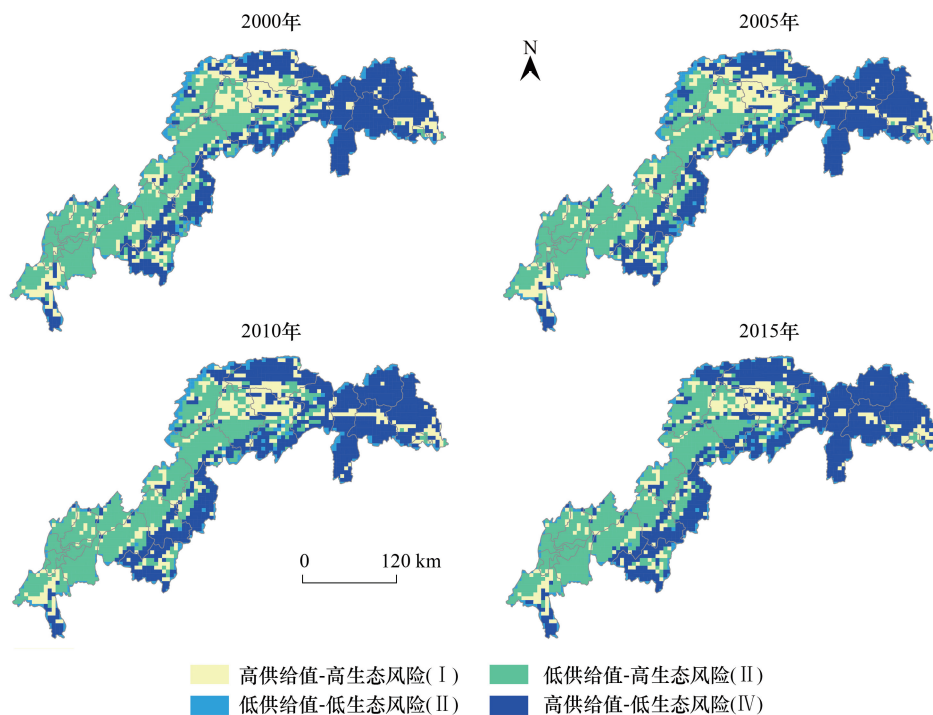


图 6 三峡库区生态分区空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ecological zones in the Three Gorges Reservoir Area

低供给值-低生态风险区(Ⅲ)零散分布于奉节县南部和库区边缘,呈波动增长态势,增长率为 1.22%,表明研究区在响应国家政策的情况下采取的生态保护措施取得部分成效,部分地区生态系统服务与生态风险趋于协调。针对该区域土地开发利用强度不高,生态用地数量较低,尤其以林地和草地较低的情况,尽管该区域生态风险值较低,但能够提供生态系统服务的用地面积较少。该地区经济基础相对薄弱,应在正确处理城镇建设与环境关系的前提下,围绕基础设施建设补短板、惠民生,加强对区域交通、通讯、能源等重点基础设施的建设,以工促农,以城带乡进行转变,优化空间格局,促进该区域形成布局合理、节约集约、配套齐全、生态宜居的新型城镇。

低供给值-高生态风险区(Ⅱ)集中分布于重庆市主城区及忠县、丰都县、万州区等区域,该区人口稠密,城镇建设用地逐年扩张,生态用地逐渐减少,城市大量的人口聚集和工业发展在带动经济提升的同时也增加了对生态用地的需求,人地矛盾加剧。因此,该区域应以“人地协调”为宗旨,加强土地集约节约利用,以生态保护和生态建设优先,由于区域内已聚集大量城市发展要素,在充分考虑城市承载力的基础上,加大力度完善城市绿色基础设施,同时加强周边生态用地保护,禁止过度开发。

高供给值-高生态风险区(Ⅰ)面积较少,零星分布在奉节县、云阳县和江津区等地。该区作为林草地与建设用地的交界,既有一定的植被覆盖度又有城镇分布,但城镇布局较为零散,使得高生态系统服务供给与高生态风险共存。对于这类区域,应建立生态保护片区,通过就近原则将责任分配到乡镇;落实生态环境保护政策的实施与生态环境修复责任的同时增加生态建设的资金与技术投入。

4 结论

本文以三峡库区为研究区,通过修订生态系统服务价值系数、构建生态风险模型,对库区 2000—2015 年生态系统服务供给值及生态风险的时空分布特征进行了研究,并将二者结合起来对生态分区进行构建,得出如下结论:

(1)2000—2015 年三峡库区土地利用类型变化明显,林地占全区总面积的 46%,其次为耕地。研究区内不同土地利用类型的变化深刻影响着库区生态系统服务供给值和生态风险值。

(2)生态系统服务供给总体呈“东高西低”的特征,高值区主要分布于夷陵区、秭归县和兴山县等植被覆盖度高的区域,该区域应加强生态建设,强化保护生态用地;生态风险呈“西高东低”的分布特征,高生态风险区主要分布于重庆市主城区,该区人口密集、建设用地占比高、植被覆盖度较低,该区应坚持生态优先,禁止过度开发。

(3)2000—2015 年 4 种生态分区变化程度较小,处于较为稳定的状态。高供给值-高风险区(Ⅰ)的分布连续性最差、占比最低,低供给值-高风险区(Ⅱ)和高供给值-低风险区(Ⅳ)分布较为集中。

本文综合考虑了生态系统服务和生态风险两方面,对三峡库区进行生态分区,是对生态系统服务与生态风险关系整合的有益探索。但由于尚未引入较成熟的空间量化模型,未做到生态系统服务的精准量化。此外,生态分区作为生态系统服务和生态风险相互作用的结果,本文未深入分析两者间的内在机理。

参考文献(References):

- [1] Talukdar S, Singha P, Shahfahad N, Mahato S, Praveen B, Rahman A. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic plain of India. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106-121.
- [2] Zheng L, Liu H, Huang Y F, Yin S J, Jin G. Assessment and analysis of ecosystem services value along the Yangtze River under the background of the Yangtze River protection strategy. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(4): 553-568.
- [3] 付梦娣,唐文家,刘伟玮,何跃君,朱彦鹏. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识——以长江源区为例. *生态学报*, 2021, 41(10): 3846-3855.
- [4] Schröter M, Barton D N, Remme R P, Hein L. Accounting for capacity and flow of ecosystem services: a conceptual model and a case study for Telemark, Norway. *Ecological Indicators*, 2014, 36: 539-551.
- [5] Gos P, Loucougaray G, Colace M P, Arnoldi C, Gaucherand S, Dumazel D, Girard L, Delorme S, Lavorel S. Relative contribution of soil, management and traits to co-variations of multiple ecosystem properties in grasslands. *Oecologia*, 2016, 180(4): 1001-1013.

- [6] Lauf S, Haase D, Kleinschmit B. Linkages between ecosystem services provisioning, urban growth and shrinkage - A modeling approach assessing ecosystem service trade-offs. *Ecological Indicators*, 2014, 42: 73-94.
- [7] 刘立程, 刘春芳, 王川, 李鹏杰. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例. *地理学报*, 2019, 74(9): 1921-1937.
- [8] 李双成, 谢爱丽, 吕春艳, 郭旭东. 土地生态系统服务研究进展及趋势展望. *中国土地科学*, 2018, 32(12): 82-89.
- [9] 翟天林, 王静, 金志丰, 祁元. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析. *生态学报*, 2019, 39(15): 5414-5424.
- [10] 刘长峰, 侯鹰, 陈卫平, 崔昊天. 基于生态系统服务的城市化区域生态风险表征方法研究. *生态学报*, 2021, 41(9): 3343-3353.
- [11] 高彬娉, 李琛, 吴映梅, 郑可君, 武燕. 川滇生态屏障区景观生态风险评价及影响因素. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1603-1613.
- [12] 欧维新, 王宏宁, 陶宇. 基于土地利用与土地覆被的长三角生态系统服务供需空间格局及热点区变化. *生态学报*, 2018, 38(17): 6337-6347.
- [13] 王大菊, 卫海燕, 贺敏, 辜清, 马明国, 李晶. 基于土地利用的三峡库区生态系统服务价值时空格局分析. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(1): 90-100.
- [14] 唐秀美, 刘玉, 刘新卫, 潘瑜春, 吴彦澎, 李虹. 基于格网尺度的区域生态系统服务价值估算与分析. *农业机械学报*, 2017, 48(4): 149-153, 205-205.
- [15] 刘焱序, 王仰麟, 彭建, 张甜, 魏海. 基于生态适应性循环三维框架的城市景观生态风险评价. *地理学报*, 2015, 70(7): 1052-1067.
- [16] 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. *生态学报*, 2016, 36(5): 1192-1203.
- [17] Kang P, Chen W P, Hou Y, Li Y Z. Linking ecosystem services and ecosystem health to ecological risk assessment: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 1442-1454.
- [18] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [19] 谢丽霞, 白永平, 车磊, 乔富伟, 孙帅帅, 杨雪获. 基于价值—风险的黄河上游生态功能区生态分区建设. *自然资源学报*, 2021, 36(1): 196-207.
- [20] Nienstedt K M, Brock T C M, Van Wensem J, Montforts M, Hart A, Aagaard A, Alix A, Boesten J, Bopp S K, Brown C, Capri E, Forbes V, Köpp H, Liess M, Luttik R, Maltby L, Sousa J P, Streissl F, Hardy A R. Development of a framework based on an ecosystem services approach for deriving specific protection goals for environmental risk assessment of pesticides. *Science of the Total Environment*, 2012, 415: 31-38.
- [21] Watanabe M D B, Ortega E. Dynamic emergy accounting of water and carbon ecosystem services: a model to simulate the impacts of land-use change. *Ecological Modelling*, 2014, 271: 113-131.
- [22] Lozoya J P, Sardá R, Jiménez J A. A methodological framework for multi-hazard risk assessment in beaches. *Environmental Science & Policy*, 2011, 14(6): 685-696.
- [23] 李辉, 周启刚, 李斌, 国洪磊, 王福海, 何昌华. 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. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(3): 654-666.
- [24] 李慧蕾, 彭建, 胡熠娜, 武文欢. 基于生态系统服务簇的内蒙古自治区生态功能分区. *应用生态学报*, 2017, 28(8): 2657-2666.
- [25] 彭建, 杨旸, 谢盼, 刘焱序. 基于生态系统服务供需的广东省绿地生态网络建设分区. *生态学报*, 2017, 37(13): 4562-4572.
- [26] 寿飞云, 李卓飞, 黄璐, 黄绍荣, 严力蛟. 基于生态系统服务供求评价的空间分异特征与生态格局划分——以长三角城市群为例. *生态学报*, 2020, 40(9): 2813-2826.
- [27] 殷兴伟, 王金柱, 黄容, 高明. 三峡库区重庆段人类活动强度的景观格局梯度响应. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(12): 2718-2732.
- [28] 王宁, 杨光, 韩雪莹, 贾光普, 刘峰, 李涛, 贾宁. 内蒙古 1990—2018 年土地利用变化及生态系统服务价值. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 244-250.
- [29] 刁震. 基于生态系统服务价值的港口区域土地利用结构优化研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [30] 王丽婧, 席春燕, 郑丙辉. 三峡库区流域水环境保护分区. *应用生态学报*, 2011, 22(4): 1039-1044.
- [31] 沈田华. 三峡水库重庆库区生态公益林补偿机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013.
- [32] 张骞, 高明, 杨乐, 陈成龙, 孙宇, 王金柱. 1988—2013 年重庆市主城九区生态用地空间结构及其生态系统服务价值变化. *生态学报*, 2017, 37(2): 566-575.
- [33] 谢高地, 甄霖, 鲁春霞, 肖玉, 陈操. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法. *自然资源学报*, 2008, 23(5): 911-919.
- [34] 吴健生, 黄乔, 曹祺文. 深圳市基本生态控制线划定对生态系统服务价值的影响. *生态学报*, 2018, 38(11): 3756-3765.
- [35] 徐羽, 钟业喜, 冯兴华, 徐丽婷, 郑林. 鄱阳湖流域土地利用生态风险格局. *生态学报*, 2016, 36(23): 7850-7857.
- [36] 李辉, 张晓媛, 国洪磊. 基于土地利用的三峡库区近 30 年生态系统服务价值时空变化特征. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 309-318.
- [37] 严恩萍, 林辉, 王广兴, 夏朝宗. 1990—2011 年三峡库区生态系统服务价值演变及驱动力. *生态学报*, 2014, 34(20): 5962-5973.