

2000—2020 年三峡库区生态环境质量综合评估*

向万淋¹ 姬翠翠^{2#} 周 伟³

(1.北京建筑大学测绘与城市空间信息学院,北京 102600;2.重庆交通大学智慧城市学院,重庆 400074;
3.西南大学地理科学学院,重庆金佛山喀斯特生态系统国家野外科学观测研究站,重庆 400715)

摘要 客观综合地评估区域生态环境质量是现今全球关注和研究的热点问题。三峡库区自蓄水后,生态环境就变得比较脆弱,因此评价三峡库区生态环境质量十分必要。基于 2000、2010、2020 年的遥感数据,结合生态环境指数(EI)和遥感生态指数(RSEI)构建了三峡库区生态环境质量综合评价体系。结果表明,构建的生态环境质量综合评价体系能够有效实现三峡库区大尺度长时间序列的生态环境质量评价,精度可靠。2000—2010 年三峡库区生态环境质量呈现下降趋势,而 2010—2020 年呈现上升趋势,2000—2020 年整体上表现为上升趋势。空间上,三峡库区生态环境质量较好的区域主要分布在东部、北部和东南部的巫溪县、宜昌县、兴山县、石柱县和巴东市等;质量较差的区域主要分布在西南部和长江沿岸城市化进程较快的地区。

关键词 生态环境质量 遥感生态指数 生态环境指数 三峡库区

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.01.017

Ecological environment quality comprehensive evaluation in Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020 XIANG Wanlin¹, JI Cuicui², ZHOU Wei³. (1.School of Surveying and Urban Spatial Informatics, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102600; 2.School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074; 3. School of Geographical Sciences, Chongqing Jinfoshan Karst Ecosystem National Field Science Observation and Research Station, Southwest University, Chongqing 400715)

Abstract: It is a hot issue of global concern and research to objectively and comprehensively evaluate regional ecological environment quality. Since the Three Gorges Reservoir Area has been impounded with water, the ecological environment has become relatively fragile, so it is quite necessary to evaluate the ecological environment quality of the Three Gorges Reservoir Area. Based on remote sensing data of 2000, 2010 and 2020, ecological environment index (EI) and remote sensing ecological index (RSEI) was combined to construct an ecological environment quality comprehensive evaluation system in Three Gorges Reservoir Area. Results showed that the constructed ecological environment quality comprehensive evaluation system could effectively evaluate the ecological environment quality of Three Gorges Reservoir Area at a large scale for long time series, and the accuracy was reliable. The ecological environment quality showed a downward trend from 2000 to 2010, an upward trend from 2010 to 2020, and an upward trend as a whole from 2000 to 2020. In spatial, the areas with better ecological environment quality were mainly distributed in eastern, northern and southeastern cities like Wuxi County, Yichang County, Xingshan County, Shizhu County, Badong City, and so on; the areas with worse ecological environment quality were mainly distributed in areas with rapid urbanization such as the southwestern region and the riverside of Yangtze River.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; ecological environment index; Three Gorges Reservoir Area

生态环境质量是生态系统要素、结构和功能综合特征的表现,生态环境质量好坏与人类活动、经济社会发展 and 自然环境变化有着密切关联,因此,对生态环境质量及时评价可为生态环境动态监测和自然资源可持续利用提供理论依据^[1]。由于监测数据的限制,以前只能采用单一评价因子进行生态环境质

量评价^[2]。2006 年,原国家环境保护总局发布的《生态环境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T 192—2006)通过集成 5 个指数和 1 个约束性指标提出了生态环境指数(EI)的概念,考虑了自然因素和人为因素两个方面,能较为全面地反映生态环境质量,但 EI 存在数据不易获取等问题^[3]。遥感可为生态环

第一作者:向万淋,男,1998 年生,硕士研究生,主要从事环境遥感信息图像提取与分析方面的研究。# 通讯作者。
* 重庆市教委科研基金项目(No.KJQN202000746);国家自然科学基金地区科学基金项目(No.32060373);重庆市自然科学基金项目(No.cstc2021jcyj-msxmX0384)。

境质量评价提供海量数据^[4-7],特别是遥感云计算平台(如 Google Earth Engine(GEE)平台)的发展,为大尺度长时间序列地表信息监测与评价提供了可能^[8]。由此,徐涵秋^[9]提出了遥感生态指数(RSEI),并得到广泛应用。如农兰萍等^[10]运用 RSEI 对昆明市生态环境质量进行动态监测与评价,研究结果能较好地反映区域生态环境状况。然而,RSEI 又把人为因素排除在外了。

三峡库区是典型的生态敏感和脆弱地区,特别是三峡工程建成后,产生了水土流失、土地退化、水体污染、生态失衡等问题,因此定期评价三峡库区的生态环境质量对三峡库区未来生态环境的治理和利用具有重要指导作用。本研究为了更全面、更精准地评价三峡库区生态环境质量,基于 GEE 平台,在沿用 EI 中相关指标的基础上结合 RSEI,形成由植被覆盖度(FVC)指数、生物丰富度指数、水体密度指数、土壤侵蚀指数、人类活动指数、地表温度(LST)指数、地表湿度(WET)指数和干度指数构成的三峡库区生态环境质量综合评价体系,对 2000—2020 年三峡库区的生态环境质量进行全面评价。

1 研究方法

$$B=A_{\text{bio}}\times\left(\frac{0.35\times S_{\text{林地}}+0.21\times S_{\text{草地}}+0.28\times S_{\text{水域}}+0.11\times S_{\text{耕地}}+0.04\times S_{\text{建设用地}}+0.01\times S_{\text{未利用地}}}{S_{\text{区域}}}\right)\quad (3)$$

式中: B 为生物丰富度指数; A_{bio} 为生物丰富度指数的归一化系数; $S_{\text{林地}}$ 、 $S_{\text{草地}}$ 、 $S_{\text{水域}}$ 、 $S_{\text{耕地}}$ 、 $S_{\text{建设用地}}$ 、 $S_{\text{未利用地}}$ 、 $S_{\text{区域}}$ 分别为林地、草地、水域、耕地、建设用地、未利用地和整个区域的面积,km²,可从土地利用遥感数据中获取。

3) 水体密度指数

采用水体密度指数来反映研究区的水资源状况,计算公式如式(4)所示。

$$W=A_{\text{wat}}\times\frac{S_{\text{水域}}}{S_{\text{区域}}}\quad (4)$$

$$S=A_{\text{ero}}\times\left(\frac{0.005\times S_{\text{微}}+0.025\times S_{\text{轻}}+0.070\times S_{\text{中}}+0.100\times S_{\text{强}}+0.300\times S_{\text{极强}}+0.500\times S_{\text{剧烈}}}{S_{\text{区域}}}\right)\quad (5)$$

式中: S 为土壤侵蚀指数; A_{ero} 为土壤侵蚀指数的归一化系数; $S_{\text{微}}$ 、 $S_{\text{轻}}$ 、 $S_{\text{中}}$ 、 $S_{\text{强}}$ 、 $S_{\text{极强}}$ 、 $S_{\text{剧烈}}$ 分别为微度、轻度、中度、强度、极强度和剧烈侵蚀类型土壤的面积,km²。

$$H=A_{\text{pop}}\times\left(\frac{10\times S_{\text{林地}}+15\times S_{\text{草地}}+22\times S_{\text{水域}}+47\times S_{\text{耕地}}+70\times S_{\text{建设用地}}+35\times S_{\text{未利用地}}}{S_{\text{区域}}}\right)\quad (6)$$

式中: H 为人类活动指数; A_{pop} 为人类活动指数的归

1.1 指数计算

1) FVC 指数

用像元二分模型来反演研究区的 FVC 指数,先计算出归一化植被指数(NDVI)(计算方法见式(1)),再利用 NDVI 计算研究区的 FVC 指数(计算方法见式(2)),反射率数据可从 Landsat 系列遥感数据中获取,下同。

$$N=\frac{\rho_{\text{NIR}}-\rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}}+\rho_{\text{Red}}}\quad (1)$$

$$F=\frac{N_{\text{总}}-N_{\text{裸}}}{N_{\text{全}}-N_{\text{裸}}}\quad (2)$$

式中: N 为 NDVI; ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 分别为 TM 影像中第 3、4 波段的反射率或 OLI 影像中第 4、5 波段的反射率; F 为研究区的 FVC 指数; $N_{\text{总}}$ 、 $N_{\text{裸}}$ 、 $N_{\text{全}}$ 分别为全部的、完全是裸土的和完全被植被覆盖的像元 NDVI。

2) 生物丰富度指数

生物丰富度指数可用来评价研究区内生物数量及种类的多少^[11],因此本研究用生物丰富度指数来反映三峡库区的生物多样性,计算公式如式(3)所示,归一化系数参照 HJ/T 192—2006 计算,下同。

4) 土壤侵蚀指数

土壤侵蚀是当今世界资源和环境问题研究中的重点^[12]。土壤侵蚀强度与 FVC 存在密切的关系^[13],根据水利部公布的土壤侵蚀强度评价表,其评价标准如表 1 所示。按照不同的土壤侵蚀强度计算得出研究区的土壤侵蚀指数,计算公式见式(5)。

5) 人类活动指数

人类活动对生态环境质量具有重要影响,土地利用类型基本上就反映了人类活动对生态环境质量的影响,因此人类活动指数按式(6)计算。

一化系数。

表 1 土壤侵蚀强度评价标准
Table 1 Criteria for evaluating the degree of soil erosion

FVC 指数	坡度					
	≤5°	>5°~8°	>8°~15°	>15°~25°	>25°~35°	>35°
>75	微度	微度	微度	微度	微度	微度
>60~75	微度	轻度	轻度	轻度	中度	中度
>45~60	微度	轻度	轻度	中度	中度	强度
>30~45	微度	轻度	中度	中度	强度	极强度
≤30	微度	中度	中度	强度	极强度	剧烈

表 2 各指数权重
Table 2 Weights of each index

项目	FVC 指数	LST 指数	土壤侵蚀指数	生物丰富度指数	WET 指数	水体密度指数	干度指数	人类活动指数
权重	0.203 1	0.086 0	0.032 8	0.212 5	0.199 2	0.018 7	0.135 1	0.112 6

6) LST 指数

LST 是生态系统的一个重要因子^[14], 所以 LST 指数也是生态环境质量评价中的一个重要指标, 本研究采用 LST 遥感数据中的地表平均温度作为 LST 指数。

7) WET 指数

WET 反映了水体、土壤和植被的湿度, 与生态环境质量密切相关, 在生态环境监测中有广泛应用。Landsat 系列遥感数据中 TM、OLI 影像的 WET 指数分别可按式(7)和式(8)来计算。

$$W_{TM}=0.315\ 0\times\rho_{Blue}+0.202\ 0\times\rho_{Green}+0.310\ 2\times\rho_{Red}+0.159\ 4\times\rho_{NIR}-0.680\ 6\times\rho_{S1}-0.610\ 9\times\rho_{S2}\tag{7}$$

$$W_{OLI}=0.151\ 0\times\rho_{Blue}+0.197\ 2\times\rho_{Green}+0.328\ 3\times\rho_{Red}+0.340\ 7\times\rho_{NIR}-0.711\ 7\times\rho_{S1}-0.455\ 9\times\rho_{S2}\tag{8}$$

式中: W_{TM} 、 W_{OLI} 分别为 TM、OLI 影像的 WET 指数; ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{S1} 、 ρ_{S2} 分别为 TM 影像中第 1、2、5、7 波段的反射率或 OLI 影像中第 2、3、6、7 波段的反射率。

8) 干度指数

干度指数通常用裸土指数表示, 但建筑用地也会造成地表干化, 因此本研究选用裸土指数和建筑指数的平均值来表示干度指数, 裸土指数和建筑指数的计算分别参见文献[15]和文献[16]。

以上 8 个指标由于单位不同, 需要进行无量纲化处理, 处理公式如下:

$$M=\frac{I-I_{\min}}{I_{\max}-I_{\min}}\tag{9}$$

式中: M 为归一化后的指数; I 为原始指数; $I_{\min}$ 、 $I_{\max}$ 分别为原始指数的最小值和最大值。单位根据实际情况而定。

1.2 数据来源

研究中所需的遥感数据包括 2000、2010、2020 年 3 期的 Landsat 系列遥感数据、土地利用遥感数据、LST 遥感数据、数字高程模型(DEM)遥感数据, 分别来源于 <https://code.earthengine.google.com>、<http://www.globallandcover.com/>、<https://code.earthengine.google.com>、<https://code.earthengine.google.com>, LST 遥感数据的分辨率为 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$, 其余为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ 。

1.3 层次分析法确定指数权重

根据层次分析法对专家打分构建综合评估判断矩阵, 通过计算判断矩阵的特征向量及特征根, 得到权重(见表 2), 并且随机一致性指标 $=0.080\ 2<0.1$, 满足一致性检验, 说明所得权重可靠。

1.4 生态环境质量综合指数

根据上面得到的各个指数及其权重通过取加权平均值计算得到生态环境质量综合指数。

2 结果与分析

2.1 三峡库区生态环境质量综合指数分析

由表 3 可见, 2000 年三峡库区生态环境质量综合指数平均值为 0.52, 2010 年为 0.46, 并且 2010 年的生态环境质量综合指数最小值和最大值也均小于 2000 年, 因此 2010 年的生态环境质量相较于 2000 年有所退化。2020 年三峡库区生态环境质量综合指数平均值为 0.53, 相较于 2010 年增加 0.07, 相较于 2000 年增加 0.01, 生态环境质量有所改善。三峡库区生态环境质量较差的地区主要分布于长江沿岸地城市化进程较快的地区, 比如重庆市主城区及万州区等; 而生态环境质量较好的地区主要分布于各大山区, 如武隆区、石柱县、宜昌县等。总体来说, 三峡库区生态环境质量综合指数呈现先下降后上升的趋势, 2000—2020 年, 三峡库区生态环境质量整体

表 3 三峡库区 2000—2020 年生态环境质量综合指数
Table 3 Ecological environment quality comprehensive index in Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

年份	最小值	最大值	平均值
2000	0.35	0.63	0.52
2010	0.29	0.60	0.46
2020	0.37	0.63	0.53

有所改善。

2.2 三峡库区生态环境质量分级评价

参考文献[9],将各期的生态环境质量综合指数按差[0,0.20]、较差(0.20,0.35]、一般(0.35,0.55]、良(0.55,0.75]、优(0.75,1.00] 5 个等级进行分级评价,结果如表 4 所示。总体而言,生态环境质量等级为“差”和“较差”的面积比例较小,生态环境质量等级为“良”的面积比例最大。2020 年,生态环境质量等级为“良”和“优”的面积比例为 63.73%,明显高于 2010 年的 57.14%和 2000 年的 59.10%,进一步证明三峡库区生态环境质量整体趋向于改善。生态环境质量等级为“差”和“较差”的地区多分布于三峡库区的西南部,因为西南地区以城区为主,人口密集,人类活动频繁,并且植被较少,土壤侵蚀相对

严重。

2.3 生态环境质量的动态转移分析

进一步统计分析得到三峡库区 2000—2010、2010—2020、2000—2020 年 3 个阶段的生态环境质量变化情况(见表 5)。2000—2010 年三峡库区生态环境质量整体上有所退化,变差的面积比例达到 30.37%,而变好的面积比例只有 22.29%。2010—2020 年三峡库区生态环境质量整体上有较大提升,变差的面积比例只有 19.08%,而变好的面积比例达到了 33.17%。2000—2020 年三峡库区生态环境质量先下降再上升,整体呈现上升趋势,变差的面积比例为 20.68%,变好的面积比例为 27.35%。

2.4 精度验证

由于三峡库区的研究尺度较大,难以进行实地调查验证。本研究采用高分辨率 Landsat 系列遥感数据结合 Google Earth 高分辨率影像数据,随机选取了研究区内 50 个点,对照《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)中生态环境质量状况级别,得到精度验证结果如表 6 所示,总体精度可靠。

表 4 2000—2020 年三峡库区生态环境质量分级
Table 4 Ecological environment quality grade in Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

年份	指标	生态环境质量等级				
		差	较差	一般	良	优
2000	面积/km ²	747.00	4 631.50	17 953.25	21 880.75	11 831.50
	比例/%	1.31	8.12	31.47	38.36	20.74
2010	面积/km ²	246.50	3 354.75	20 737.25	27 356.75	5 086.75
	比例/%	0.43	5.91	36.52	48.18	8.96
2020	面积/km ²	901.25	4 189.50	15 505.25	23 194.25	13 004.75
	比例/%	1.59	7.38	27.30	40.83	22.90

表 5 2000—2020 年三峡库区生态环境质量动态变化
Table 5 Dynamic changes of ecological environment quality in Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

年份	指标	变差	无变化	变好
2000—2010	面积/km ²	17 175.75	26 770.00	12 606.00
	比例/%	30.37	47.34	22.29
2010—2020	面积/km ²	10 833.25	27 105.50	18 823.25
	比例/%	19.08	47.75	33.17
2000—2020	面积/km ²	11 696.50	29 394.25	15 467.00
	比例/%	20.68	51.97	27.35

表 6 精度验证结果
Table 6 The accuracy verification result

评价结果	年份	一致点数	精度/%
分级评价	2000	40	80
	2010	43	86
	2020	42	84
动态转移	2000—2010	43	86
	2010—2020	39	78
	2000—2020	41	82

3 讨 论

本研究结合 EI 和 RSEI 构建了生态环境质量评价体系,对三峡库区长时间序列的生态环境质量进行了评价,从时间和空间两个维度分析了三峡库区整体与局部的生态环境质量及变化特征。总体上,三峡库区生态环境质量 2000—2010 年有所退化,2010—2020 年整体有所改善,与申文明等^[17]、周谐等^[18]、田培等^[19]研究的结论基本一致。在空间格局上,生态环境质量较好的区域位于三峡库区的东部、北部和东南部的山区,如巫溪县、宜昌县、兴山县、石柱县和巴东市等。刘春霞等^[20]对三峡库区进行生态敏感性综合评价也表明,山区植被覆盖良好,生态系统多样,物种丰富,生物多样性价值高,生态环境质量较好。土地利用类型变化是揭示区域生态环境质量变化比较直观的指标^[21]。在三峡工程建设前期(1990—2002 年),三峡库区土地利用类型耕地占主导;而 2002 年以后,林地、水体、建设用地等土地利用类型比例逐渐提高,耕地面积下降,这与国家在三峡库区采取退耕还林还草、封山育林和建设库区多功能生态防护林等政策^[22]有关,加强了水土保持能力,改善了库区的生态环境质量,但效果的显现有一定的滞后性。

EI 和 RSEI 是最常见的生态环境质量评价指标。EI 主要在权重合理设置、指标容易获取方面存在问题,还有一个明显不足是无法可视化,空间分析方面的能力较弱。RSEI 虽然弥补了 EI 的一些不足,但存在只考虑自然因素的问题,而且评价结果以主成分表示,不能保证较高的准确性^[23-24]。本研究选取 EI 中部分人为因素指数,结合 RSEI 中的自然因素指数,采用层次分析法客观准确地确定各指数权重,得到三峡库区的生态环境质量综合指数,可以定性和定量地反映三峡库区生态环境质量空间分布及其变化情况,并且精度可靠。

由于三峡库区生态环境质量评价的模型不统一,因此不同研究者对三峡库区生态环境质量的评价结果难以进行横向比较^[25]。因此,建立一个合适的三峡库区生态环境质量评价体系及评价标准还有待进一步研究。在今后的研究中还应加强对三峡库区生态环境质量变化的影响因素研究,从根源上找出影响三峡库区生态环境质量的主要因素,同时应深入分析三峡库区生态环境质量变化的驱动力和驱动机制,针对库区当前的主要生态环境问题采取科学合理的应对方案,从而为三峡水库的长久运行和

库区社会经济的可持续发展提供支持^[26]。

4 结 论

1) 结合 EI 和 RSEI 形成的三峡库区生态环境质量综合评价体系可有效实现三峡库区大尺度长时间序列的生态环境质量评价。

2) 2000—2010 年三峡库区生态环境质量呈现下降趋势,而 2010—2020 年呈现上升趋势,2000—2020 年整体上表现为上升趋势。2020 年三峡库区生态环境质量等级表现为“良”和“优”的面积比例高于 2010、2000 年。

3) 从空间分布上看,三峡库区生态环境质量较好的区域主要分布在东部、北部和东南部,如巫溪县、宜昌县、兴山县、石柱县和巴东市等,这些地区以山区为主,植被丰富。生态环境质量较差的区域主要分布在西南部和长江沿岸城市化进程较快的地区,如重庆市主城区和万州区等。

参考文献:

- [1] 刘栩位,周启刚,周浪,等.基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J].水土保持研究,2021,28(5):278-286.
- [2] 贾浩巍,颜长珍,邢学刚,等.基于改进的遥感生态指数(MRSEI)的青海省都兰县生态环境质量评价[J].中国沙漠,2021,41(2):181-190.
- [3] SHAN W. Ecological environment quality assessment based on remote sensing data for land consolidation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 23(9): 118-126.
- [4] 滕明君,曾立雄,肖文发,等.长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J].应用生态学报,2014,25(12):3683-3693.
- [5] 李德仁.展望大数据时代的地球空间信息学[J].测绘学报,2016,45(4):379-384.
- [6] 李德仁,张良培,夏桂松.遥感大数据自动分析与数据挖掘[J].测绘学报,2014,43(12):1211-1216.
- [7] 付东杰,肖寒,苏奋振,等.遥感云计算平台发展及地球科学应用[J].遥感学报,2021,25(1):220-230.
- [8] 程伟,钱晓明,李世卫,等.时空遥感云计算平台 PIE-Engine Studio 的研究与应用[J].遥感学报,2022,26(2):335-347.
- [9] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [10] 农兰萍,王金亮.基于 RSEI 模型的昆明市生态环境质量动态监测[J].生态学杂志,2020,39(6):2042-2050.
- [11] 牛文元.可持续发展的中国行动[J].中国生态文明,2016(5):18-19.
- [12] 宋慧敏.基于 RS 和 GIS 的渭南市生态环境质量评价研究[D].西安:陕西师范大学,2017.
- [13] 卢玉东,尹光志,熊有胜,等.应用 TM 图像分析重庆南川市土壤侵蚀与植被覆盖度的关系[J].南京农业大学学报,2005,28(4):72-75.

(下转第 110 页)