

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

刘栩位^{1,2}, 周启刚^{2,3}, 周浪^{1,2}, 孟浩斌^{1,2}, 李明慧^{1,2}, 彭春花^{1,2}

(1.重庆工商大学 环境与资源学院, 重庆 400067; 2 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; 3.重庆工商大学 公共管理学院, 重庆 400067)

摘 要:集成绿度、湿度、热度和干度共 4 个指标构建遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI),可快速定量评价区域生态环境状况,客观反映生态环境的变化过程。以 1994 年、2000 年、2007 年、2013 年、2019 年 Landsat TM/OLI 影像为数据源,采用遥感生态指数评价了三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量状况,并预测 2025 年研究区生态环境质量。结果表明:构建的 RSEI 指数能够反映三峡库区重庆段水土保持生态功能区的生态环境质量状况,1994—2019 年 RSEI 值由 0.525 上升至 0.653,上涨幅度达 24.38%,生态环境质量改善面积为 6 265.673 km²,所占比例为 59.78%,退化区域面积为 604.789 km²,面积占比为 5.77%,生态环境总体质量改善效果明显并趋于稳定;从空间分布来看,研究区改善区域较广,主要集中于奉节县和云阳县全境;而退化区域集中于研究区主要的城市建成区和管辖范围内具有一定规模的村镇,以及巫山县北部和东南部地区,研究区整体改善明显;预测的 2025 年 RSEI 仍持续上升,但上升速率明显放缓,因此研究区在后续的生态环境建设中,仍应进行持续性生态治理及保护。研究结果实现了水土保持生态功能区生态环境质量的快速监测,可为其生态治理提供科学依据。

关键词:生态环境质量; 遥感生态指数(RSEI); 动态变化; 水土保持生态功能区; 三峡库区

中图分类号:X835

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0278-09

RSEI-Based Dynamic Monitoring of Ecological Quality of the Soil and Water Conservation Functional Area in the Chongqing Section of the Three Gorges Reservoir Area

LIU Xuwei^{1,2}, ZHOU Qigang^{2,3}, ZHOU Lang^{1,2}, MENG Haobin^{1,2}, LI Minghui^{1,2}, PENG Chunhua^{1,2}

(1.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business

University, Chongqing 400067, China; 2.Chongqing Key Laboratory of Spatial Data

Mining and Big Data Integration for Ecology and Environment, Chongqing 401320, China;

3.School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: Integrating four indicators of greenness, humidity, heat and dryness to predict the remote sensing ecological index (RSEI) can quickly and quantitatively evaluate the status of the regional ecological environment and objectively reflect the change process of the ecological environment. Based on the data of 1994, 2000, 2007, 2013, 2019 Landsat TM/OLI images, we used the remote sensing ecological index to evaluate the ecological environment quality of the soil and water conservation ecological function zone in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir area, and to predict the ecological environment quality of the study area in 2025. The results show that the constructed RSEI index can reflect the ecological environment quality of the water and soil conservation ecological function zone in the Chongqing section of the Three Gorges Reservoir. The RSEI value increased from 0.525 to 0.653 from 1994 to 2019, with the increase rate of

收稿日期:2020-09-23

修回日期:2020-10-13

资助项目:重庆市技术创新与应用发展重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0497);重庆工商大学创新型科研项目(yjcx2020-094-74)

第一作者:刘栩位(1994—),男,重庆巴南人,硕士研究生,主要研究方向为环境规划与管理。E-mail:1577869862@qq.com

通信作者:周启刚(1976—),男,重庆铜梁人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为环境规划与管理。E-mail:zqg1050@126.com

24.38%, and the area of improvement in ecological environment quality was 6 265.673 km², the proportion was 59.78%, the area of the degraded area was 604.789 km², and the proportion is 5.77%. The overall quality of the ecological environment was improved obviously and tended to be stable; from the spatial distribution, the improvement area of the study area distributed widely, mainly concentrated the whole area of Fengjie County and Yunyang County, while the degraded areas concentrated in the main urban areas of the study area and villages and towns of a certain scale within the jurisdiction, as well as the northern and southeastern areas of Wushan County. The overall improvement of the study area was obvious. The predicted 2025 RSEI will continued to rise, but the rate of increase will slow down significantly. Therefore, the study area should continue to conduct ecological management and protection in the subsequent ecological environment construction. The research results have realized the rapid monitoring of the ecological environment quality in the ecological function zone of soil and water conservation, which can provide a scientific basis for its ecological governance.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; dynamic change; functional area of soil and water conservation; Three Gorges Reservoir area

随着我国工业化、城镇化的快速发展,因生态环境被破坏而造成的森林退化、水土流失、土地荒漠化等一系列生态环境问题成为近年来人们广泛关注和研究的热点^[1-2]。生态环境质量是对生态系统要素、结构和功能综合特征的表现,能反映区域生态环境状况的优劣程度,生态环境质量的好坏与人类活动、经济社会发展和自然环境变化有着密切关联,对生态环境质量状况的及时评价是实现生态环境动态监测和自然资源可持续利用的重要方式,有利于促进社会经济与生态环境保护的可持续发展^[3-5]。

目前,随着人们对生态环境问题相关研究的重视,有关生态环境质量动态监测和评价的方法众多^[6-7]。其中,遥感技术以快速、实时及范围广等监测特点被广泛应用于生态环境等研究领域^[8],国内外学者利用遥感技术对城市、森林、矿区、流域和自然保护区等方面的生态环境质量动态监测和评价进行了大量研究和应用^[9-13],但生态环境是由复杂的生态系统组成,受多因素的综合影响,单一的生态质量指数只能代表生态系统某一方面的生态特征,难以准确和全面的反映生态系统综合特征。由徐涵秋提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)可客观、快速监测和评价生态环境质量变化,应用较为成熟^[14]。如农兰萍等^[15]运用 RSEI 模型对昆明市生态环境质量进行动态监测,研究结果能较好的反映区域生态环境状况。航鑫等^[16]基于遥感生态指数模型评价南京城市化过程中的生态质量变化情况,发现城市化是南京生态质量下降的一大影响因素。大量的研究表明遥感生态指数是在时空中对生态环境质量评价结果进行高精度可视化表达的一种可靠技术手段,对于区域生态环境质量长时序的周期性监测

极具价值^[17]。现目前遥感生态指数研究对象较广,主要以城市、自然保护区为研究对象,但鲜有对水土保持生态功能区的研究,同时现阶段多为大时间尺度、长时间段研究,较缺乏大时间尺度的多个短时间段研究。

水土流失不仅破坏水土资源,威胁粮食、防洪、饮水安全,同时还将对生态平衡造成破坏,影响生态环境安全,是制约经济社会发展的主要生态环境问题^[18]。三峡库区重庆段水土保持生态功能区是我国重要的水土流失防治生态功能区,是集水源涵养、生物多样性保护、水土保持等多种重要生态价值于一体的关键区域,但由于该区域人地关系较为紧张,以坡耕地为主的耕作方式和过度开发致使植被覆盖度降低并引起土地干化,又因处于地势第二级阶梯东缘,水土流失面积大,山洪、泥石流等地质灾害频发,多种因素对脆弱的生态环境造成持续威胁,因此对该区域生态环境质量的快速评价显得尤其重要^[19]。本研究基于 RSEI 对三峡库区重庆段水土保持生态功能区 1994—2019 年生态环境质量进行长时间序列的动态变化分析,快速监测区域生态状况,以期为今后的生态保护和生态治理提供支撑。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况与数据来源

1.1.1 研究区概况 三峡库区重庆段水土保持生态功能区是建设长江上游重要生态屏障的重点生态功能区,是关系全市乃至全国生态安全的重点区域^[20]。该研究区包括云阳、奉节、巫山 3 个区县,地理位置介于东经 108°69′—109°87′,北纬 30°93′—31°07′,总面积达 10 480.858 km²。研究区内地形起伏度大,地貌

复杂,雨水充沛,湿度大,云雾多,土壤抗蚀性差。区域植被类型丰富,以亚热带山地常绿阔叶林以及常绿落叶阔叶混交林为主,森林覆盖率较高。土地资源利用结构以林业用地为主导,耕地次之,其中,林业用地以有林地为主,而坡耕地占耕地绝大部分。云阳县、奉节县及巫山县属于重庆市渝东北生态涵养发展区,是我国重要生物多样性保护区和生态功能维护区,由于区域内坡耕地的大量耕作,又是水土流失敏感程度高且重力侵蚀最严重的区域。因此,本研究以三峡库区重庆段水土保持生态功能区为研究区域,研究其区域生态质量变化情况,实现对水土资源可持续利用和生态环境的可持续监管,有助于构筑长江上游重要生态屏障,进一步改善生态环境。

1.1.2 数据来源与处理 本研究数据来源于美国地质勘探局(<https://earthexplorer.usgs.gov/>) Landsat 系列卫星遥感数据。考虑季节差异性对 RSEI 各分量指标的计算造成的影响,因此本次研究筛选出 8—10 月的遥感数据,其中包含行列号为 126/038,126/039 的 1994 年 8 月 17 日、2000 年 9 月 2 日、2007 年 9 月 22 日的 Landsat5 (TM) 和 2013 年 10 月 8 日、2019 年 9 月 23 日的 Landsat8 (OLI/TIRS) 共 5 期数据,空间分辨率为 30 m,云量均低于 10%,影像质量较好。

为减少不同时相影像在大气、地形、光照方面的差异,保证影像在空间叠加分析的准确性,对原始数据在 ENVI5.3 中采用辐射定标将灰度值转换为反射率,利用 FLAASH 大气校正消除大气辐射与散射造成的误差,采用二次多项式和最邻近像元法对 5 期影像进行几何校正,使均方根误差满足 $(RMS) < 0.05$ 的要求,避免后期差值变化分析出现误差^[21],依据研究区矢量边界裁剪预处理后的遥感影像。

1.2 研究方法

遥感生态指数(RSEI)是一种基于湿度、绿度、干度和热度 4 种自然因子为主的评价生态状况的体系,可以快速评价生态环境状况^[22]。计算湿度、绿度、干度和热度 4 个自然指标,将各个指标进行标准化从而消除量纲的差异,利用主成分分析法,构建一个快速且客观的定量评价模型^[23-24]。

$$RSEI = f(WET, NDVI, NDBSI, LST) \quad (1)$$

式中:WET 代表湿度指标;归一化植被指数(Normalized Differential Vegetation Index, NDVI)代表绿度指标;地表温度(Land Surface Temperature, LST)代表热度指标;建筑指数—裸土指数(Normalized Differential Building-Soil Index, NDBSI)代表干度指标,4 个分量指标的计算如下。

1.2.1 湿度指标 湿度指标(WET)高低与生态环境

质量存在相关性,反映了土壤及植被的湿度^[25]。通过缨帽变换法^[26]压缩数据和去除数据的冗余,得到 3 个分量分别是“亮度”、“绿度”和“第三分量”,将第三分量作为湿度因子,反演公式^[27-28]。

$$\begin{aligned} \text{TM 数据: } WET = & 0.0315\rho_{\text{blue}} + 0.2021\rho_{\text{green}} + \\ & 0.3102\rho_{\text{red}} + 0.1594\rho_{\text{nir}} - \\ & 0.6806\rho_{\text{swir1}} - 0.6109\rho_{\text{swir2}} \quad (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{OLI 数据: } WET = & 0.1511\rho_{\text{blue}} + 0.1973\rho_{\text{green}} + \\ & 0.3283\rho_{\text{red}} + 0.3407\rho_{\text{nir}} - \\ & 0.7171\rho_{\text{swir1}} - 0.4559\rho_{\text{swir2}} \quad (3) \end{aligned}$$

式中: $\rho_{\text{blue}}, \rho_{\text{green}}, \rho_{\text{red}}, \rho_{\text{nir}}, \rho_{\text{swir1}}, \rho_{\text{swir2}}$ 分别为 TM 和 OLI 影像蓝、绿、红、近红外、短波红外 1,短波红外 2 波段的反射率值。在大气校正过程中,反射率被扩大 10 000 倍,需除以 10 000,得到湿度指标。

1.2.2 绿度指标 绿度指标(NDVI)可以反映出生态环境的脆弱性^[29],且被广泛的应用于植被变化监测,可以明显的区分植被的生长态势和密度状况,本研究选取 NDVI 作为绿度指标。

$$NDVI = \frac{\rho_{\text{nir}} - \rho_{\text{red}}}{\rho_{\text{nir}} + \rho_{\text{red}}} \quad (4)$$

1.2.3 干度指标 干度指标(NDBSI)以选取的建筑指数和裸土指数两个指标的平均值表示^[30],两种指标指数可以表示出地表生态环境的“干化”情况。

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2} \quad (5)$$

式中:IBI 为建筑指数;SI 为土壤指数。

1.2.4 热度指标 热度指标(LST)地表温度与社会经济发展、自然现象等有着密不可分的关系^[31],通过地表温度来反映地表生态环境的状况,本文采用大气校正法,根据 Landsat 手册以及最新的参数进行反演计算^[32]。

$$L = \text{gain} \times \text{DN} + \text{bias} \quad (6)$$

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L} + 1\right)} \quad (7)$$

$$LST = T / \left[1 + \left(\frac{\lambda T}{\rho}\right) \ln \epsilon\right] \quad (8)$$

式中: L 为热红外波段的辐射值,像元的 DN 值;gain 和 bias 为 L 波段的增益值和偏置值,从影像的头文件获得; T 为传感器处温度值; K_1 和 K_2 分别为定标参数,根据用户手册及 Chander^[33] 最新定标参数获得:对于 TM, $K_1 = 607.76 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,260.56 \text{ K}$;对于 TIRS, $K_1 = 774.89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$, $K_2 = 1\,321.08 \text{ K}$; λ 为热红外波段的中心波长($\lambda = 11.45 \mu\text{m}$; $\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{ mK}$; ϵ 为地表比辐射率)。

1.2.5 遥感生态指数的综合构建 以上述公式计算出遥感生态指数的分量指标,对 4 个分量指标进行归

一化处理以消除量纲差异,构建 RSEI。研究区水系发达,更有长江横贯而过,为避免大规模水体对湿度指标反演造成影响,故通过计算归一化水体指数(Modified NDWI,MNDWI)^[34]提取水域范围,通过掩膜处理并剔除。常规方法可以通过对各指标直接求和^[35],或者通过计算出 4 个分量的平均值再进行求和,或者赋予相应权重再相加^[36]。上述方法的局限性在于数值上的简单相加减以及指标权重的人为确定无法真实反映指标之间的内在联系,不能较好的反映出评价模型的精确性。综上,为保证评价模型的全面性和准确性,本研究采用主成分分析(Forward PCA Rotation New Statistics and Rotate),该方法采取依次垂直旋转坐标轴的方法将多维信息集中到少数几个特征分量,从而实现多因子的降维^[37]。对主成分分析贡献率最大的第一主成分进行正负转置处理并得到初始值 RSEI₀,使大的数值代表好的生态状况。

$$RSEI_0=1-\{PC1[f(NDVI,WET,NDBSI,LST)]\}$$

(9)

考虑到多期指数的度量和比较,对 RSEI₀ 进行归一化处理后最终构建遥感生态指数 RSEI。

$$RSEI=\frac{RSEI_0-RSEI_{0-\min}}{RSEI_{0-\max}-RSEI_{0-\min}}$$

(10)

式中:RSEI₀和 RSEI 分别为遥感生态指数 4 个分量指标经过主成分变换后得到的初始值和归一化后的 RESI₀;PC1 为贡献率最大的第一主成分值;RSEI_{0-max}和 RSEI_{0-min}分别为 RSEI₀的最大值和最小值。遥感生态指数 RSEI 的值域为 0 到 1,其值越大,表示生态状况越好。

2 结果与分析

2.1 RSEI 的构建与相关性分析

运用 ENVI 对 4 个指标的叠加图层进行主成分分

析,主成分分析结果(表 1)表明,1994 年、2000 年、2007 年、2013 年、2019 年分析结果的第一主成分贡献率分别为 84.5%,75.4%,81.3%,76.2%,78.9%,均大于 75%,说明能较好集中 4 个指标的大部分属性特征。同时,观察表 1 中各年份第一主成分 4 个指标的贡献度,其中绿度和湿度的贡献度均为正值,可说明该两项指标共同对生态环境起促进作用,而热度和干度指标的均为负值,说明该两项指标共同对生态环境起阻碍作用,这与实际的生态现象相符,因此本研究采用贡献率最高的第一主成分进行 RSEI 的计算。

表 1 指标第一主成分

指标	1994 年	2001 年	2007 年	2013 年	2019 年
	PC1	PC1	PC1	PC1	PC1
NDVI	0.531	0.458	0.401	0.338	0.447
WET	0.376	0.485	0.521	0.580	0.520
LST	-0.548	-0.511	-0.558	-0.463	-0.453
NDBSI	-0.526	-0.542	-0.506	-0.579	-0.570
特征值	0.084	0.041	0.061	0.055	0.059
贡献率/%	84.5	74.4	81.3	76.2	78.9

分析各指标与遥感生态指数 RSEI 以及各指标自身之间的相关性(表 2),该分析可进一步揭示 RSEI 相对于各指标的综合代表性。就 4 个指标的平均相关度而言,干度指数 NDBSI 的平均相关度最高,NDBSI 在 5 个年份的均值达 0.722;而平均相关度最低的指标为热度指数 LST,5 个年份的均值为 0.571。RSEI 与各年份 4 个指标之间的平均相关度都大于 0.8,且 5 个年份的相关度平均值达 0.842,比单指标最高的 NDBSI 高出 16.6%,比最低的 LST 高出 47.5%,比 4 个指标的相关度均值 0.626 高出 34.5%。因此,该结果表明构建的 RSEI 与 4 个指标之间存在较好的相关性,在全面综合反映本研究区生态环境质量方面比任一单指标更具优势和代表性。

表 2 各指标和 RSEI 指数的相关性统计

指标	1994 年					2001 年					2007 年				
	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI
NDVI	1.000	0.558	-0.778	-0.888	0.925	1.000	0.354	-0.576	-0.719	0.788	1.000	0.416	-0.577	-0.757	0.768
WET	0.558	1.000	-0.597	-0.778	0.778	0.354	1.000	-0.477	-0.787	0.796	0.416	1.000	-0.595	-0.797	0.850
LST	-0.778	-0.597	1.000	0.743	-0.896	-0.576	-0.477	1.000	0.563	-0.800	-0.577	-0.595	1.000	0.591	-0.846
NDBSI	-0.888	-0.778	0.743	1.000	-0.951	-0.719	-0.787	0.563	1.000	-0.925	-0.757	-0.797	0.591	1.000	-0.912
平均相关度	0.741	0.644	0.706	0.803	0.888	0.550	0.539	0.539	0.689	0.827	0.583	0.603	0.588	0.715	0.844

指标	2013 年					2019 年				
	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI	NDVI	WET	LST	NDBSI	RSEI
NDVI	1.000	0.415	-0.542	-0.546	0.675	1.000	0.596	-0.353	-0.756	0.729
WET	0.415	1.000	-0.515	-0.904	0.913	0.596	1.000	-0.589	-0.928	0.914
LST	-0.542	-0.515	1.000	0.492	-0.746	-0.353	-0.589	1.000	0.576	-0.744
NDBSI	-0.546	-0.904	0.492	1.000	-0.928	-0.756	-0.928	0.576	1.000	-0.960
平均相关度	0.501	0.612	0.516	0.647	0.816	0.568	0.705	0.506	0.754	0.837

2.2 三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量分析

2.2.1 三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量时序变化 统计 1994—2019 年三峡库区重庆段水土保持生态功能区 NDVI, WET, LST, NDBSI 等 4 个分量指标和 RSEI 遥感生态指数(归一化)的均值,分析研究区整体生态环境质量(图 1)。结果表明,25 a 间研究区 RSEI 平均值从 0.525 上升至 0.653,上涨幅度达 24.38%,生态环境质量整体呈明显改善趋势;其中,对生态环境起促进作用的绿度和湿度指数在 25 a 间上涨幅度分别为 17.33%和 14.12%;而对生态环境起阻碍作用的热度指标变化幅度较小,上升幅度仅为 3.56%,干度指数则因为植被覆盖度的上升以及裸土面积的减少,下降幅度明显,达 17.54%,生境质量改善趋势明显。

为了更好分析研究区生态环境质量,将各年份的遥感生态指数 RESI 按 0.2 为间隔等间距划分为 5 个等级,依次代表研究区生态环境质量差(0~0.2)、较差(0.2~0.4)、中等(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1)^[38],统计 1994—2019 年研究区各生态环境质量等级的面积及占比见表 3。由表 3 中的信息,分析各年份研究区各等级地类所占面积和比例的统计结果,表明 1994—2019 年以生态环境质量中等和良的地

区为主,生态环境质量是中等的地区面积占比分别为 45.66%,58.01%,48.33%,36.20%以及 24.13%,除 2000 年有增长外,占比呈逐年下降趋势,25 a 间共减少 2 256.92 km²;生态环境为良的地区面积占比逐年攀升,分别为 29.05%,32.90%,39.88%,52.15%以及 60.39%,总增幅为 31.34%,共增加面积 3 191.99 km²,同时,优等级地区面积占比总增幅为 8.05%,共增加面积 843.71 km²,生态环境状况改善趋势明显;较差和差等级地区面积在 25 a 间呈总体下降趋势,共下降面积达 1 778.79 km²,其中生态环境质量较差等级的面积占比从 1994 年的 21.05%下降到 2019 年的 4.56%,降幅为 16.49%,下降幅度明显,再次印证了三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量持续改善的总体趋势。

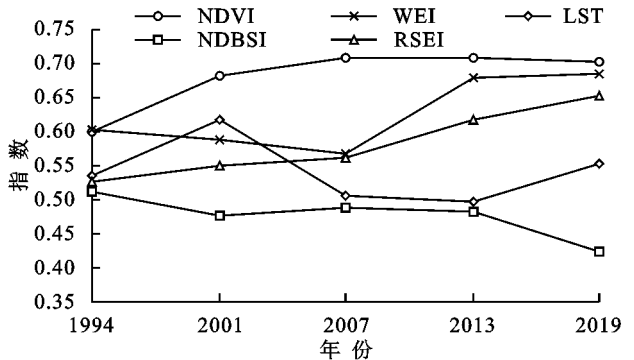


图 1 1994—2019 年单一指标和 RSEI 平均值

表 3 1994—2019 年 RSEI 各等级面积及百分比

等级	1994 年		2001 年		2007 年		2013 年		2019 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
优:(0.0~0.2)	91.2771	0.87	24.3153	0.23	33.4791	0.32	28.7739	0.27	40.4289	0.39
较差:(0.2~0.4)	2206.255	21.05	886.1967	8.46	1047.4	9.99	559.0197	5.33	478.314	4.56
中等:(0.4~0.6)	4785.696	45.66	6080.226	58.01	5064.955	48.33	3793.896	36.20	2528.777	24.13
良:(0.6~0.8)	3137.024	29.93	3448.351	32.90	4179.534	39.88	5465.382	52.15	6329.023	60.39
良:(0.8~1.0)	260.6067	2.49	41.769	0.40	155.4894	1.48	633.7863	6.05	1104.315	10.54

2.2.2 三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态变化监测 在对三峡库区重庆段水土保持生态功能区 RSEI 值的分级基础上,运用差值变化揭示 1994—2000 年、2000—2007 年、2007—2013 年、2013—2019 年 4 个时间段生态环境质量的动态变化过程。根据表 4 的分析结果可以看出:1994—2000 年研究区生态环境质量退化的面积为 991.895 km²,面积占比达 9.46%,生态环境质量改善的面积达 2 336.257 km²,占总面积的 22.29%,生态环境总体质量得到好转。2000—2007 年,研究区生态环境质量退化的面积为 983.010 km²,所占比例达 9.38%,生态环境质量改善的面积 1 785.949,占总面积的17.04%,而保持稳定未发生变化的区域面积为 7 711.900 km²,面积占比为 4 个时间段最高,达 73.58%,虽较上一

时段增幅放缓但生态状况仍在改善。2007—2013 年,研究区生态环境质量退化区域为 548.081 km²,面积占比 5.229%,而生态环境质量改善区域面积为 3 251.328 km²,面积占比为 31.02%,生态环境转好趋势明显。2013—2019 年,生态环境质量退化区域面积为 966.874 km²,面积占比 9.22%,较上一时段略有上升,生态环境质量改善区域面积为 2 789.933 km²,面积占比 26.62%。稳定不变区域面积为 6 724.051 km²,占总面积的 64.156%,与上一时段的 63.75%基本持平。研究区总体生态环境质量持续改善,但改善速率逐渐放缓。

总体来看,1994—2019 年的 25 a 间,生态环境质量改善面积为 6 265.673 km²,所占比例为 59.78%,退化面积较小,为 604.789 km²,面积占比仅为 5.77%,改善面积占比高出退化面积占比 54 个百分点,总体生态环

境质量改善趋势明显,同时说明重庆市政府在近 25 a 内对三峡库区水土保持生态功能区的生态状况保持极高的重视程度,一系列针对研究区生态治理的措施

在有力推进和大力实施下取得了成效。但从总体的变化趋势来看,近期改善的速率放缓而退化的面积增加,对待生态保护的工作仍不能懈怠。

表 4 1994—2019 年 RSEI 差值变化

类别	RSEI 级差	1994—2001 年			2001—2007 年			2007—2013 年		
		级面积/ km ²	类面积/ km ²	占比/ %	级面积/ km ²	类面积/ km ²	占比/ %	级面积/ km ²	类面积/ km ²	占比/ %
退化	−4	0.001	991.895	9.464	0.005	983.010	9.379	0.001	548.081	5.229
	−3	2.592			0.304			0.836		
	−2	29.146			33.113			17.969		
	−1	960.156			949.587			529.276		
稳定	0	7152.707	7152.707	68.245	7711.900	7711.900	73.581	6681.449	6681.449	63.749
改善	+1	2319.345	2336.257	22.291	1767.421	1785.949	17.040	3197.515	3251.328	31.022
	+2	16.849			18.002				53.426	
	+3	0.063			0.515				0.388	
	+4	0			0.012				0.000	

类别	RSEI 级差	2013—2019 年			1994—2019 年		
		级面积/km ²	类面积/km ²	占比/%	级面积/km ²	类面积/km ²	占比/%
退化	−4	0.032	966.874	9.225	0.131	604.789	5.770
	−3	3.084			4.835		
	−2	44.131			63.764		
	−1	919.626			536.060		
稳定	0	6724.051	6724.051	64.156	3610.396	3610.396	34.448
改善	+1	2717.308	2789.933	26.619	5164.898	6265.673	59.782
	+2	70.935			1083.080		
	+3	1.685			17.633		
	+4	0.005			0.062		

结合图 2 可看出,1994—2000 年三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量改善较为明显,主要改善区域集中于长江沿岸地区,而主要退化区域集中于研究区南部以及东北和西北边缘地区;2000—2007 年,研究区生态环境质量变化较小,大体保持稳定态势,长江以北区域退化面积较为集中,而长江以南改善面积较为集中;2007—2013 年研究区生态环境质量改善明显,3 个区县境内生态状况大幅好转,除主要城镇建成区发展需要使周边退化区域略微增加外,奉节县东南部因主体施工活动加剧致使退化区域较为集中;2013—2019 年,生态环境质量改善面积仍大于退化面积,生态环境质量持续好转。生态环境改善区域在云阳县北部和奉节县南部出现大面积连片聚集,但因社会经济发展的需要,长江沿岸人为活动再次加剧,致使 3 个区县城市建成区以及周边沿岸的退化区域增加明显,巫山县因新建机场等主体施工活动,退化状况尤为突出。

总体来看,1994—2019 年研究区生态环境质量

得到明显改善,改善面积占比接近总面积的 60%,改善面积幅度经历“下降—上升—下降—上升”的过程,于第三时间段 2007—2013 年幅度达到峰值,为 31.02%,该时间段稳定区域面积占比为 63.75%,第四时间段 2013—2019 年稳定区域面积占比 64.17%,说明该地区在这两个时间段稳定区域面积已占据主导且整体生态环境质量趋于稳定,表明近期生态环境治理措施较为成熟,取得显著成效。巫山县东南和东北部植被覆盖度减少,出现大面积裸土致使生态退化,因此在对长江沿岸生态重视的同时也应注意对研究区边缘区域的合理保护,避免出现顾此失彼的情况。

综上,三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量改善效果明显。其原因可分为自然因素和人为因素两部分,自然因素为该研究区属湿润亚热带季风气候,常年雨量充沛、湿度大、云雾多,为植物生长提供了充足的水源,自然生长条件较好,植被覆盖面积易上升;人为因素主要包括该地区社会经济的发展,产业持续转型升级,一定程度上降低了对农耕经

济的依赖程度,退耕还林和退牧还草使大量坡耕地面积转变为植被。加之对不合理土地利用方式的转变

以及集约节约等措施的大力度实施,减缓了紧张的人地关系,使得本研究区生态环境质量逐渐改善。

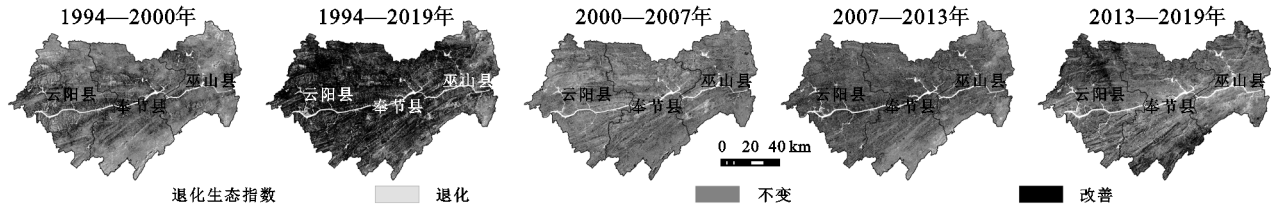


图 2 遥感生态指数变化监测

2.3 RSEI 的建模和预测

为进一步定量刻画三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态状况,建立研究区生态模型,用于对生态环境质量变化的模拟和预测。对本研究区进行随机采样,以生态指数 RSEI 为因变量,以 NDVI, WET, LST 及 NDBSI 为自变量进行逐步回归分析。从研究区中采集 90 000 个点,并按各分量对其赋值。足够多的样点和贯穿全影像的采样方法可以避免少量样点和局域性地抽样所带来结果的不确定性,各年份回归模型如下(均通过 1% 显著性检验):

$$RSEI_{1994} = 0.314 + 0.390NDVI + 0.287WET - 0.248LST - 0.123NDBSI \quad (R^2 = 0.990) \quad (11)$$

$$RSEI_{2000} = 0.322 + 0.340NDVI + 0.362WET - 0.240LST - 0.146NDBSI \quad (R^2 = 0.985) \quad (12)$$

$$RSEI_{2007} = 0.436 + 0.256NDVI + 0.315WET - 0.271LST - 0.193NDBSI \quad (R^2 = 0.994) \quad (13)$$

$$RSEI_{2013} = 0.376 + 0.223NDVI + 0.420WET - 0.242LST - 0.188NDBSI \quad (R^2 = 0.989) \quad (12)$$

$$RSEI_{2019} = 0.478 + 0.265NDVI + 0.337WET - 0.244LST - 0.249NDBSI \quad (R^2 = 0.997) \quad (13)$$

研究区生态模型各指标在 5 个年份的回归分析中未出现任何一个被剔除的情况,说明所选 4 个指标皆为刻画研究区生态环境质量的关键性指标。其中 RSEI 与 NDVI, WET 成正比关系,说明对生态环境质量起正面影响;RSEI 与 LST, NDBSI 成反比关系,说明对生态环境质量起负面影响,这与选取的贡献度最大的第一主成分情况吻合。从模型各指标回归系数的绝对值来看,对 RSEI 贡献度最大的是 WET,为影响生态环境的主要因素。NDVI 次之,然后依次为 LST 和 NDBSI,且各年份对生态起正面作用的 NDVI 和 WET 系数之和均大于起负面作用 LST 和 NDBSI 系数绝对值之和,这与上述生态环境质量连

年改善的结论也相符。进一步分析 5 个年份回归模型的系数变化可以看出:正向指标中,NDVI 对 RSEI 的贡献率呈先下降后上升的趋势,WET 对 RSEI 的贡献率呈明显波动趋势;负向指标中,LST 对 RSEI 的贡献率波动较为稳定,NDBSI 对 RSEI 的贡献率连年上升,说明随着经济提振及发展的需要,研究区建设用地的面积在不断扩大,地表植被遭到破坏,裸土面积增加。虽研究年限内生态环境质量改善趋势明显,但仍需要警惕过度开发对生态环境带来的潜在风险。

以 2019 年为例,图 3 各指标的散点在三维特征空间的分布状况来分析它们与 RSEI 之间的相互关系。可以看出,图 3A 中 NDVI 和 WET 值越高时,RSEI 值随之升高,进一步说明植被生长越好、水分越高的区域,生态环境质量越高;图 3B 是对生态起负面影响的 RSEI 与 NDBSI, LST 的三维关系图,可以看出,NDBSI 和 LST 值越高时,RSEI 值随之降低,说明地表温度越高、建筑及裸土面积越大的区域,生态环境质量越低。

基于现有研究内容,利用 1994—2019 年 NDVI, WET, LST, NDBSI 及 RSEI 的平均值并运用 Excel 中的 TREND 函数预测 2025 年研究区的生态环境质量各指标值。由图 4 观察可知,2025 年研究区生态环境质量将继续上升,但上升幅度较小,NDVI 上升幅度较大,NDBSI 较 2019 年基本持平,而 LST 出现下降,下降幅度较小,总体来看研究区的生态状况在多年治理和保护下逐渐趋于稳定。因此,研究区在后续的生态环境建设中,应仍采取积极的措施进行持续的生态治理及保护,在提高研究区植被面积的基础上努力提升植被质量,培育抗干扰性强、稳定性高的质量森林植被。在今后的发展过程中既满足人口及经济增长、城市化程度上升等需求的同时协调好与生态保护之间的关系,加强城市建成区的绿化建设,并时刻警惕长江沿岸因过度开发致使的土地干化和植被退化以及随之而来的水土流失,这都将是库区水土保持生态功能区生态治理的重点。

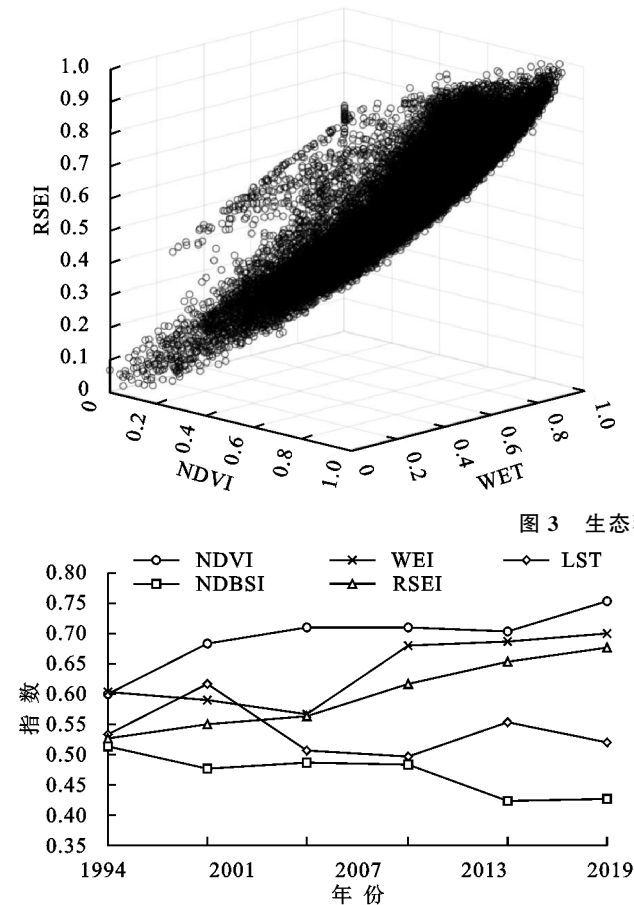


图 3 生态环境质量三维关系

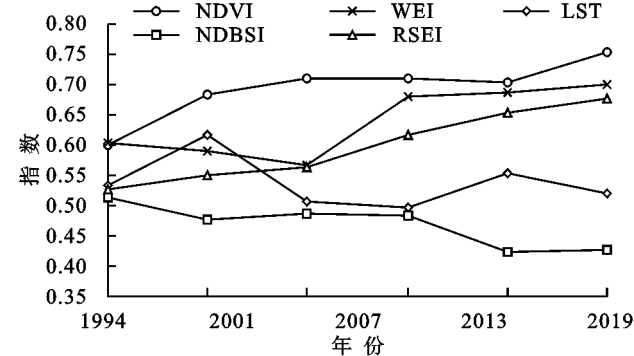


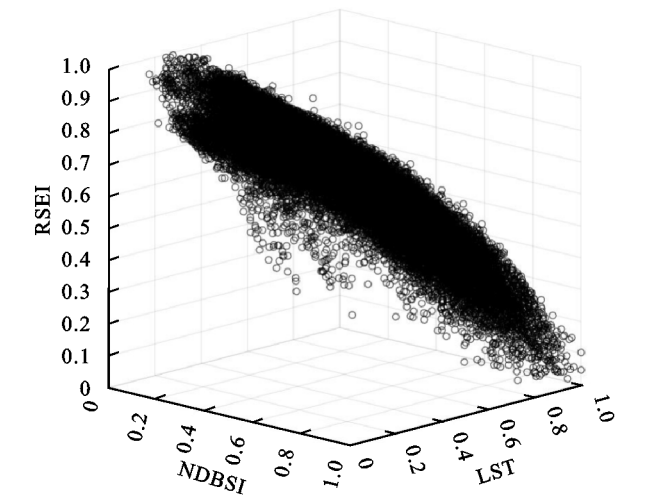
图 4 RSEI 变化趋势及预测

3 结论

(1) 1994—2019 年三峡库区重庆段水土保持功能区 RSEI 均值由 0.525 上升至 0.653,增加 0.151,上涨幅度达 24.38%,且自 2013 年来,良和优等级地区面积占比均超过 55%,说明生态环境整体质量改善明显并逐渐趋于稳定。

(2) 差值分析结果表明,生态环境质量改善面积为 6 265.673 km²,所占比例为 59.78%,退化区域面积较小,为 604.789 km²,面积占比仅为 5.77%,改善面积占比高出退化面积占比 54 个百分点,总体生态环境质量改善趋势明显。从空间分布上看,1994—2019 年研究区改善区域较广,主要集中于奉节县和云阳县;退化区域集中于三区县主要的城市建成区以及管辖范围内具有一定规模的村镇,巫山县北部和东南部退化面积较集中,但整体改善趋势明显。

(3) 对 2025 年研究区的生态环境质量各指标值进行预测,NDVI,WET 均出现上升趋势,LST 则出现下降,NDBSI 小幅度上升,RSEI 仍持续上升,但上升速率明显放缓,研究区在后续的生态环境建设中,仍应进行持续的生态治理及保护。



参考文献:

[1] 张行,陈海,史琴琴,等.陕西省景观生态脆弱性时空演变及其影响因素[J].干旱区研究,2020,37(2):496-505.

[2] 茹克亚·萨吾提,阿不都艾尼·阿不里,李虎,等.基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J].水土保持研究,2020,27(1):283-289,297.

[3] 刘新卫,周华荣.基于景观的区域生态环境质量评价指标体系与方法研究[J].水土保持研究,2005,12(2):7-10.

[4] 彭建,汪安,刘焱序,等.城市生态用地需求测算研究进展与展望[J].地理学报,2015,70(2):333-346.

[5] 王尚义,李玉轩,马义娟.地理学发展视角下的历史流域研究[J].地理研究,2015,34(1):27-38.

[6] Xu H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008,29(14):4269-4276.

[7] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985,17(3):301-306.

[8] Ning L, Jiayao W, Fen Q. The improvement of ecological environment index model RSEI[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13:1-14.

[9] Hu X, Xu H. A new remote sensing index for assessing the spatial heterogeneity in urban ecological quality: A case from Fuzhou City, China[J]. Ecological Indicators, 2018,89:11-21.

[10] 翁俊,徐璐,居萍.洪泽湖古堰森林公园生态环境初步监测与评价[J].安徽农业科学,2018,46(24):53-54,64.

[11] Zhu D, Chen T, Zhen N, et al. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2020,27(13):15716-15728.

[12] 范小安,王金辉,徐美娜,等.典型入海口海岸带生态环

- 境质量遥感评价研究:以宝山区为例[J].海洋学研究, 2020,38(2):66-73.
- [13] 栾春风,喻小钗,穆占强,等.基于 RS 环境质量评价的自然保护地建设策略:以河南太行山猕猴国家级自然保护区为例[J].中国国土资源经济,2020,33(7):75-82.
- [14] 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.
- [15] 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):284-292.
- [16] 杭鑫,罗晓春,曹云,等.基于 RSEI 模型的生态质量评估及城镇化影响:以南京市为例[J].应用生态学报, 2020,31(1):219-229.
- [17] 王东升,王小磊,雷泽勇.基于遥感生态指数的阜新市生态质量评估[J].生态科学,2020,39(3):88-94.
- [18] 余新晓.议“民生水土保持”[J].中国水土保持科学, 2013,11(4):116-122.
- [19] 刘军林,陈国生.国家重点生态功能区旅游化发展研究:以三峡库区水土保持生态区为例[J].南通大学学报:社会科学版,2018,34(1):41-47.
- [20] 国家林业局.三峡库区水土保持生态功能区生态保护与建设规划(2014—2020 年)[Z].中国林业年鉴,2016: 422-423.
- [21] 孔金玲,杨晶,孙晓明,等.多光谱遥感影像大气校正与悬沙浓度反演:以曹妃甸近岸海域为例[J].国土资源遥感,2016,28(3):130-137.
- [22] 温小乐,林征峰,唐菲.新兴海岛型城市建设引发的生态变化的遥感分析:以福建平潭综合试验区为例[J].应用生态学报,2015,26(2):541-547.
- [23] 王士远,张学霞,朱彤,等.长白山自然保护区生态环境质量的遥感评价[J].地理科学进展,2016,35(10): 1269-1278.
- [24] Gao Y, Huang J, Li S, et al. Spatial pattern of non-stationarity and scale-dependent relationships between NDVI and climatic factors: A case study in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Ecological Indicators, 2012, 20:170-176.
- [25] 杨凤海,宋佳佳,赵烨荣,等.东北黑土水土流失区生态环境遥感动态监测[J].环境科学研究,2018,31(9): 1580-1587.
- [26] 王帅,徐涵秋,施婷婷. GF-1 WFV2 传感器数据的缨帽变换系数反演[J].地球科学进展,2018,33(6):641-652.
- [27] Chen C, Fu J, Zhang S, et al. Coastline information extraction based on the tasseled cap transformation of Landsat-8 OLI images [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2019,217:281-291.
- [28] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(8):1741-1748.
- [29] 林明水,林金煌,程煜,等.省域乡村旅游扶贫重点村生态脆弱性评价:以福建省为例[J].生态学报,2018,38(19):7093-7101.
- [30] 张浩,杜培军,罗洁琼,等.基于遥感生态指数的南京市生态变化分析[J].地理空间信息,2017,15(2):58-62,10.
- [31] 张立伟,张运,黄晨.皖江城市带近 20 a 生态环境变化遥感指数分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(5): 1061-1070.
- [32] NASA. Landsat7 Science Data Users Handbook[R]. Http://Landsathandbook.Gsfc.Nasa.Gov/Inst_Cal/Prog_Sect8_2.Html(7),2011.
- [33] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009,113(5):893-903.
- [34] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):79-85.
- [35] Rogers R H. Important prospect;Third thematic conference on remote sensing for marine and coastal environments, to be held in seattle, Washington, USA, from 18-20 September 1995[J]. Environmental Conservation, 1994,21(4):376-376.
- [36] Williams M, Longstaff B, Buchanan C, et al. Development and evaluation of a spatially-explicit index of Chesapeake Bay health[J]. Marine Pollution Bulletin, 2009,59(1/3):14-25.
- [37] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [38] 李粉玲,常庆瑞,申健,等.黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例[J].应用生态学报,2015,26(12):3811-3817.