

基于 VOR 模型的三峡库区消落带 2010—2020 年生态系统健康评价

周启刚^{1,2}, 彭春花^{2,3}, 刘栩位^{2,3}, 向宇峰⁴, 周浪^{2,3}

(1.重庆工商大学 公共管理学院, 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 环境与资源学院, 重庆 400067; 4.石柱土家族自治县精绘勘测有限公司, 重庆 409100)

摘 要:健康的生态系统可保障人类社会的可持续发展,三峡库区作为我国重点生态环境保护区域,其生态系统健康状况是判断库区可持续发展的重要指标。为综合诊断全面蓄水后三峡库区消落带的生态系统健康状况,研究以景观生态学理论和遥感影像数据为基础,从生态系统活力、组织力和恢复力 3 个方面构建 VOR 模型,定量评价消落带 10 年间的生态系统健康状况。结果表明:(1) VOR 模型可适用于三峡库区消落带生态系统健康评价,具有快速、高效等特点;(2) 10 年间研究区生态系统健康水平总体保持良好状态,其中改善型健康特征总面积占比最大,为 44.47%,消落带健康状况呈现逐年稳定并改善趋势;(3) 空间分布上,健康水平数量结构呈“凸”形分布态势,库腹消落带生态系统健康状况好于库首和库尾;(4) 库首消落带生态系统活力值偏低,低值面积占库首消落带面积比超过 60%,需要重视。综上,通过评价消落带的生态系统健康状况,可为三峡库区消落带生态系统保护与修复提供参考和决策支持。

关键词:生态系统健康评价; VOR 模型; 遥感; 三峡库区消落带

中图分类号:X82

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0310-09

Ecosystem Health Assessment of Water Level Fluctuating Zone in Three Gorges Reservoir Area Based on VOR Model

ZHOU Qigang^{1,2}, PENG Chunhua^{2,3}, LIU Xuwei^{2,3}, XIANG Yufeng⁴, ZHOU Lang^{2,3}

(1.College of Public Management, 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.College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 4.Shizhu Tujia Autonomous County Precision Survey Corpation, Chongqing 409100, China)

Abstract: Healthy ecosystem ensures the sustainable development of human society, and the health status of regional ecosystem is an important indicator of regional sustainable development. In order to comprehensively diagnose the ecosystem health status of the water level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir area after the full impoundment, based on the theory of landscape ecology and remote sensing image data, a VOR model was constructed from three aspects of ecosystem vitality, organization and resilience to quantitatively evaluate the ecosystem health status of the water level fluctuating zone in 2010—2020. The results show that: (1) VOR model can be applied to the ecosystem health assessment of the water level fluctuating zone in the Three Gorges Reservoir area, which is fast and efficient; (2) in the past 10 years, the ecosystem health level in the study area remained in a good state, and the improved health characteristics accounted for the largest proportion, accounting for 44.47%; (3) in terms of spatial distribution, the quantitative structure of health level presented a ‘convex’ distribution, and the ecosystem health status of the fluctuating zone at the bottom of the reservoir was better than that at the head and tail of the reservoir; (4) ecosystem vitality,

收稿日期:2021-06-19

修回日期:2021-08-25

资助项目:重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-msxmX0493);重庆市基础研究与前沿探索项目(cstc2018jcyjAX0497);重庆市技术创新与应用发展重点研发项目(cstc2018jszx-zdyfxmX0021)

第一作者: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

通信作者:彭春花(1995—),女,重庆开州人,硕士研究生,主要研究方向为环境规划与管理。E-mail:827055619@qq.com

organization and resilience had positive effects on the ecosystem health of the water level fluctuating zone, but the ecosystem vitality value of the water level fluctuating zone at the head of the reservoir was low, and the low value area accounted for more than 60% of the water level fluctuating zone area at the head of the reservoir. This study can provide reference and decision support for the protection and restoration of the water level fluctuating zone ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area by evaluating the ecosystem health status of the water level fluctuating zone.

Keywords: ecosystem health assessment; VOR model; remote sensing; falling zone of the Three Gorges Reservoir Area

健康的生态系统是人类可持续发展的核心保障。近年来经济的发展、社会的进步以及人口数量的增大,不断消耗生态环境的物质资源,给生态环境带来巨大的压力^[1-2],而人类生存活动所需要的自然资源需要健康的生态环境来提供^[3]。在全球社会经济高速发展导致生态系统健康状况日益恶化的严峻形势下,对生态系统健康状况的定量监测和评价是评估区域可持续发展的重要途径^[4],生态环境健康评价能够客观评价生态环境的健康状况,分析区域主要环境问题及驱动因素,可为区域环境的综合管理提供新思路。

当前,国内外学者对生态系统健康研究主要集中于评价方法的选取和指标体系的构建,如何完善生态环境健康评价体系成为重点研究课题之一。目前评价区域生态系统健康主要有物种指示法和指标体系法^[5-6],物种指示法主要针对于单一的生态系统,综合性的生态系统主要采用指标体系法。国内外主要采用指标体系法对区域生态系统健康进行评价研究,指标体系法中比较成熟的模型方法有:综合指数法^[7-9]、层次分析法^[10-14]、压力—状态—响应模型(PSR 模型)等^[15-17]方法。其中,综合指数法多用于水生态系统评价,能很好体现水生态系统的综合性、整体性和层次性^[18-19];层次分析法可全面分析区域生态系统发生的动态变化,但权重确定倾向于主观因素,受人为因素影响较大^[20];PSR 模型从压力、状态和响应 3 个层次构建多个重要指标进行系统评价,此方法较多依赖主观选取评价指标,指标的科学性难以保证^[21]。研究发现,以往众多学者应用上述方法开展研究过程中,指标选取的主观性、科学性以及指标数量难以达成共识,而 VOR 模型从活力、组织力、恢复力 3 个方面综合构成生态系统健康评价体系,能全面反映区域生态系统内各子系统的健康状况,使生态系统健康评估从定性向定量转变,可客观评价区域的生态系统健康的综合情况,是生态系统健康研究的重要评价模型^[22-23]。同时,VOR 模型可基于遥感影像数据,快速构建评价指标进行评价,适用于小尺度下的生态系统

健康评价,该评价模型具有合理、有效且简便等特点。

三峡库区消落带是生态环境容易被破坏、较难恢复的一个重点保护区域,该区域是库区水域与周边陆地环境的过渡地带,对库区水域系统和库区两岸坡地系统的物质循环、能量交换起着重要作用。近年来,随着经济的快速发展,三峡库区消落带受土壤侵蚀、重金属污染、城市建设等影响,其地表覆被发生相应变化,对生态系统健康带来一定的影响。为探究 2009 年三峡大坝建成并全面蓄水后三峡库区消落带的生态系统健康状况,本研究以三峡库区消落带为研究区,以景观生态学和地理统计学为理论基础,基于高清遥感影像数据划分生态系统类型,从生态系统活力(V)、组织力(O)、和恢复力(R)3 个方面科学构建 VOR 模型,定量评估 2010—2020 年三峡库区消落带生态系统健康的动态变化状况。本研究旨在为三峡库区消落带生态系统的修复和保护提供研究基础和参考价值。

1 研究区概况

三峡库区消落带位于北纬 29°16′—31°25′、东经 106°—110°50′,主要范围为三峡水库水位线 145~175 m 的区域,涉及重庆市和湖北省的 26 个区县,面积共计 348.34 km²,其中重庆市三峡库区消落带总面积 268.54 km²,占库区消落带总面积的 77.09%;湖北省三峡库区消落带总面积 79.80 km²,占库区消落带总面积的 22.91%;在空间上库首消落带主要涵盖巴东县、秭归县、夷陵县、兴山县共 4 个区县,库腹涵盖奉节县、巫山县、巫溪县、云阳县、万州区、开州区、忠县、石柱县、丰都县、涪陵区、武隆区共 11 个区县,库尾涵盖长寿区、渝北区、江北区、北碚区、沙坪坝区、南岸区、巴南区、九龙坡区、渝中区、大渡口区、江津区共 11 个区县。

三峡库区地处四川盆地与长江中下游平原的相交处,横跨越渝、鄂中山区峡谷以及川东岭谷地带,属南温带和亚热带过渡地带,年均气温 16~19℃,年均

降水 1 100~1 200 mm,年均相对湿度为 76%。三峡库区消落带是全球面积较大的水陆生态系统交替演变的过渡地带,其主要是由三峡水库调度引起的水位周期性变化形成的。三峡库区消落带生态系统因其边缘性、过渡性和脆弱性极易导致水土流失、水体环境污染、生物多样性减少等问题。我国水利工程建设各类水库数量众多,由于季节性蓄水变化形成大面积消落带,研究三峡库区消落带生态环境状况对同类水库具有借鉴意义。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源与处理

本研究基础遥感数据来源于 Google Earth 发布的高分辨率遥感影像,其空间分辨率为 2 m×2 m,采用的地理坐标系为 GCS_Krasovsky_1940,投影坐标系采用 Albers 圆锥等面积投影,其时间分辨率为 2010 年、2014 年、2018 年和 2020 年四期第二季度(4 月、5 月和 6 月)遥感数据。三峡库区消落带地表覆被类型采用中科院分类标准,将其分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和裸地 6 类。通过采用 eCognition 软件,对基础遥感数据进行面向对象的解译方式基础上,采用人工目视解译的方法提高遥感影像的解译精度。为保证整体范围不改变,每一时期的地表覆被数据均在前一期数据的基础上进行变更修改。归一化植被指数(NDVI)数据,通过 Google earth engine 平台获取 Landsat 系列卫星影像进行编码反演,分辨率为 30 m×30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 生态系统健康评价体系构建 本研究基于遥感影像的生态健康评价方法,从活力、组织力和恢复力 3 个方面来反映生态系统健康。活力即系统的活性、新陈代谢能力和初级生产力,可选取光合效率或光合产物、地上生物量等指标进行评价,本次选取归一化差值植被指数(NDVI)表征系统活力。组织力用于表示生态系统的复杂性,主要体现在人类活动干扰和自然景观多样性这两方面,本次选用景观多样性,蔓延度,聚合度和人为干扰度 4 个指标来表征系统组织力。恢复力是指系统受外界干扰的自我抵抗力和恢复速率,本次选用生态弹性度表征系统恢复力。所以本研究选用 3 个子系统,6 类指标,从环境资源,景观生态和人为干扰 3 个角度,构建了研究区的生态系统健康评价指标体系(表 1)。

(1) 活力。活力(Vigor,V)是指生态系统的新陈

代谢或初级生产力,一般用植被生产力表示,由于归一化植被指数(NDVI)与植被生产力高度正相关,本文选取研究区的 NDVI 作为生态系统活力指标^[24-26]。归一化植被指数(NDVI)是利用植物叶面在红光波段的较强吸收特性和在近红外波段强烈的反射特性进行组合而成,其可以综合反映出研究区域的植被覆盖率,在遥感影像中,其计算公式为:

NDVI= (NIR-R) / (NIR+R) (1)

式中:NIR 为近红外波段的反射值;R 为红外光波段的反射值。当绿度指标(NDVI)>0 时,则表示有植被覆盖,且绿度指标(NDVI)越大时,表示覆盖度越大。

表 1 生态系统健康评价指标体系

评价模型	评价子系统	评价指标	指标类型
生态系统健康(VOR)	活力	NDVI	积极
		景观多样性	积极
		蔓延度	积极
	组织力	聚集度	积极
		人为干扰度	消极
	恢复力	生态弹力系数	积极

(2) 组织力。组织力(Organization,O)是指生态系统的结构,描述生态系统的复杂性,主要表现在人为活动影响和自然景观多样性上,其结构越复杂,生态就越健康^[27]。本研究选用景观多样性指数(SHDI)、蔓延度指数(CONTAG)、聚集度指数(AI)、人为干扰度指数(HDI)作为组织力的指标因子,其中景观多样性指数(SHDI)揭示景观的复杂程度;蔓延度指数(CONTAG)描述不同斑块类型的团聚程度或延展趋势;聚集度指数(AI)体现相应斑块类型的自然状态连通度;人为干扰度指数(HDI)能表征生态系统的受到人类活动的干扰程度。

(1) 景观多样性指数指不同类型的景观在空间结构、功能机制和时间动态方面的多样化和变异性,反映景观类型的多少和所占比例的变化,揭示景观的复杂程度。该指数与生态风险程度呈正相关,属于正向指标,计算公式如下:

H = - \sum_{i=1}^m (P_i) (2)

式中:H 为研究区景观多样性指数;P_i为研究区内第 i 种土地利用类型占土地总面积的比例;m 为研究区土地利用类型的总数。

(2) 蔓延度指数描述景观里不同斑块类型的团聚程度或延展趋势。一般来说,高蔓延度值说明景观中的

某种优势斑块类型形成了良好的连接性,反之则表明景观具有多种要素的密集格局,景观的破碎化程度较高。

$$CONTAG = [1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{P_{ij} \ln P_{ij}}{2 \ln(m)}] \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_{ij} 是随机选择的两个相邻栅格属于类型 i 与 j 的概率。

(3) 聚集度指数,其数值越大,聚集度越高,反映了生态系统各成分间相互依赖的程度越强,生态系统结构愈加稳定,计算公式如下:

$$AI = \left[\frac{f_{ij}}{\max \rightarrow f_{ij}} \right] \quad (4)$$

式中: f_{ij} 为根据单一算法类型 I 相邻斑块数。

(4) 人为干扰度指数(HDI)为人类生产生活中对生态环境的干扰强度,即为人为干扰度,不同的地

表覆被类型代表着不同的人类开发利用强度。本文参考孙永光、陈爱莲等研究成果^[28-29],结合三峡库区消落带地表覆被类型和人为活动因素,确定干扰度系数(表 2),通过构建人为干扰度(HDI)模型来表示三峡库区消落带的人类活动影响强度,其表达式为:

$$HDI = \sum_{x=1}^n (A_x / A_y) \times P_x \quad (5)$$

式中: n 为地表覆被类型; A_x 为采样网格中第 x 种地表覆被的面积(km²); A_y 为采样网格的面积(km²); P_x 为第 x 种地表覆被类型所反映的人为干扰度系数。

(5) 组织力(O)计算模型为:

$$O = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{4} \quad (6)$$

式中: O 为组织力; X 为 i 类指标因子的值; $1 \geq n \geq 4$ 。

表 2 研究区地表覆被类型与人为干扰强度系数

一级类型	二级类型	界定标准	生态干扰度指数 HI
全干扰(人造地物等)	建设用地	工、商、住混合区	0.96
半干扰(自然、人为干扰参半)	耕地	旱生作物用地、水稻田	0.65
	水域	消落区淡水水域	0.20
	林地	林地、幼林、苗圃生长地	0.17
无干扰(几乎无人为干扰)	草地	草本和灌木植物生长地	0.15
	裸地	裸土、滩涂	0.00

(3) 恢复力。恢复力(Resilience, R)是指景观斑块在自然界和人为干扰情况下,保持其原有结构和功能的能力,反映其在生态系统中自我抗干扰与适应的能力^[30]。地表覆被类型的属性越接近自然生态系统,越容易在受到干扰之后自我恢复。本研究根据不同的地表覆被类型,参考前人研究^[18,24,30],设定其生态弹力系数(表 3):

表 3 地表覆被类型与生态弹力系数 RC

地表覆被类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	裸地
恢复力系数 RC	0.4	0.8	0.65	0.8	0.2	1

在自然及人为外界压力下,接近自然生态系统的地表覆被类型更易恢复,而以人为主导的地表覆被类型在外部压力下的恢复能力较低,从而遭受更大的破坏。地表覆被中的水体和裸地,可以从水循环中迅速恢复,而地表覆被为裸地的区域在目视解译和野外考察中多为消落带邻近水域的滩地和滩涂,特别是呈荒地状态的区域,对自然灾害具有很强的抵抗性,在外界干扰消失后能够自我更新或保持原状,因此具有最高的恢复潜力。

2.2.2 VOR 生态系统健康评价模型 本研究基于活力、组织力和恢复力 3 个评估因子,构建三峡库区消落带生态系统健康指数,公式如下:

$$EHI = \sqrt[3]{V \times O \times R} \quad (7)$$

式中:EHI 为生态系统健康指数, V, O, R 分别为生态系统活力、组织力和恢复力,三者均是评估生态系统健康的重要因子,具有同等重要性,因此采用乘法运算。由于不同的指标因子的增量会使生态系统健康更加健康和稳定或使生态系统健康更脆弱和不稳定,为综合评价研究区生态系统健康,根据表 1 中的指标类型对其进行归一化处理,计算公式如下。

积极意义指标:

$$Y = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

消极意义指标:

$$Y = \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (9)$$

式中: Y 为归一化后得结果值,范围[0,1]; X 为样本值, X_{\max} 为样本数据最大值; X_{\min} 为样本数据最小值。

2.2.3 生态健康评价等级划分 本研究参考相关专家学者提出的生态系统健康等级划分标准^[30-31],将三峡库区消落带区域的活力、组织力和恢复力生态健康子系统及生态健康指数按照等值法划分为 5 类等级,见表 4。

3 结果与分析

3.1 消落带生态系统活力健康分析

研究区生态系统活力健康由图 1 可知,库首消落带部分生态系统健康活力等级总体变化趋势一致,均

在 2018 年出现明显变化,其中活力健康水平等级为 I 时,突变尤为剧烈,其空间面积占比为 55.37%;在 2010—2020 年,在活力健康水平等级为 V 时,生态系统活力呈现较为明显的转好趋势。库腹消落带在时序上活力健康水平主要呈现为 IV 级,其各年空间面积占比分别为 34.54%,36.89%,34.92%,38.41%,占比均超过库腹面积的 1/3,其活力整体波动不大,稳定性较好;库尾消落带在 10 a 间生态系统活力健康水平在 V 级的占比均出现最低,分别为 0.14%,5.65%,3.27%,2.86%,其他 4 类生态系统活力健康水平等级在空间面积占比差异较小,库尾消落带部分区域生态系统活力健康状况整体偏低。

表 4 研究区生态系统健康评价等级

健康等级	分值区间	健康水平
I	0~0.2	差
II	0.2~0.4	较差
III	0.4~0.6	一般
IV	0.6~0.8	良好
V	0.8~1	好

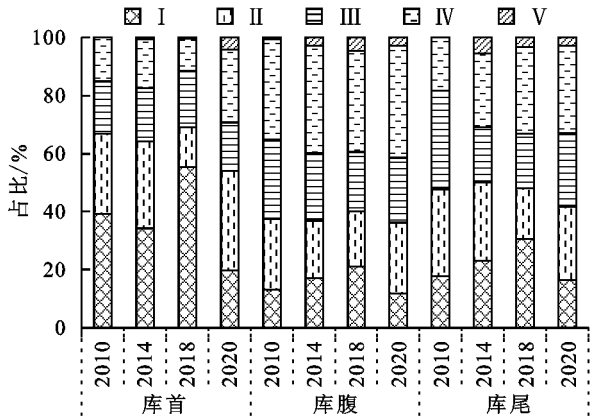


图 1 2010—2020 年研究区生态系统活力等级分布占比图

研究发现,近 10 a 间三峡库区消落带生态系统活力健康水平总体偏低,但在 2010—2018 年期间,消落带生态系统活力健康状况整体呈现由差向好发展趋势,活力健康水平有所改善。在 2018—2020 年研究区生态系统活力健康状况发生明显变化,库首和库尾生态系统活力健康状况好转,库腹生态系统活力健康状况有所下降,其原因为当年上游连降大雨,导致三峡入库量增加,库腹大部分消落带区域被淹没,导致其生态系统活力下降明显。

3.2 消落带生态系统组织力健康分析

生态系统组织力的健康主要表现在其复杂性,组织结构越复杂,其生态系统越健康。研究区的生态系统组织力健康状况由图 2 可知。10 a 间,库首消落带组织力健康水平较差和一般的区域面积有所增加,增加了 10.23%和 6.9%,健康水平较好和好的区域,面

积减少了 10%和 5.44%,库首消落带生态系统组织力健康水平有所下降;库腹消落带组织力健康水平一般的区域明显增加,面积占比增加了 10%,而健康水平为较好和好区域的面积减少程度高于差和较差的区域,表明库腹消落带组织力健康水平也有所降低;库尾消落带组织力健康水平为一般的区域面积增加了 16.42%,健康水平为差和好的区域面积分别减少了 11.68%和 5.22%,库尾消落带生态系统组织力健康性有所提高。

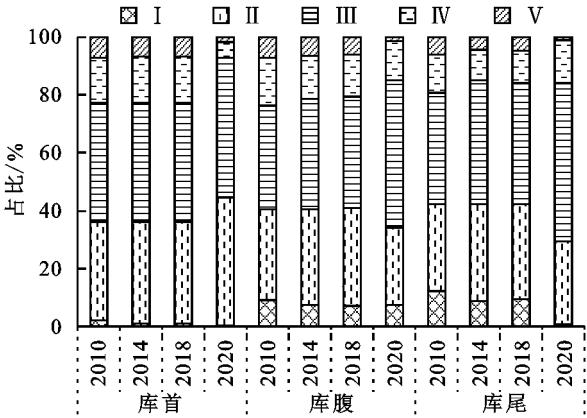


图 2 2010—2020 年研究区生态系统组织力等级分布占比

研究发现,2010—2020 年,库首、库腹和库尾消落带生态系统组织力健康水平变化呈 I 级和 IV 级向 II 级和 III 级转换趋势。其中,2010—2018 年研究区各级生态系统组织力健康水平面积占比波动幅度较小,健康水平整体较好。2018—2020 年变化幅度较大,整体向 III 级一般健康状态发展。

3.3 消落带生态系统恢复力健康分析

研究区生态系统恢复力健康状况由图 3 可知。2010—2020 年,三峡库区消落带生态系统健康恢复力等级空间面积占比整体保持稳定状态,各水平等级的恢复力在时序上未发生明显变化,恢复力等级 IV 级占比在时序上占比最大,均超过 50%,恢复力最差的 I 级空间上的占比均小于 2%。库腹部分消落带生态系统健康恢复力在空间上占比较大的部分表现为 III 级和 IV 级,与 I 级、II 级、V 级 3 个等级之间空间占比差别较大。库尾部分在研究时序上均以 IV 级占比最大,生态系统健康恢复力 V 级整体上呈现一个“凹”型变化。

总体上看,三峡库区消落带生态系统健康恢复力整体上以 IV 级的占比为主导。其中库首 IV 级区域面积占比高达约 69%,占据绝对主导,这部分区域主要由林地和水域组成,林地作为以木本植物为主体的高级生物群落,拥有更完善的自然生态系统,面对外部压力能及时完成自我更新,更容易恢复。同时,消落带水位涨落频繁,水体作为消落带的一部分,易从水循环中恢复,恢复力较高。V 级和 III 级区域面积占比

次之,且库腹的Ⅲ级区域面积占比远大于库首和库尾,Ⅲ级区域以草地为主,属于较次等的自然生态系统,恢复速率一般,因此恢复力居于中等水平。在空间上库尾和库腹的Ⅰ级区域面积占比均持续上升,恢复力健康水平最低。

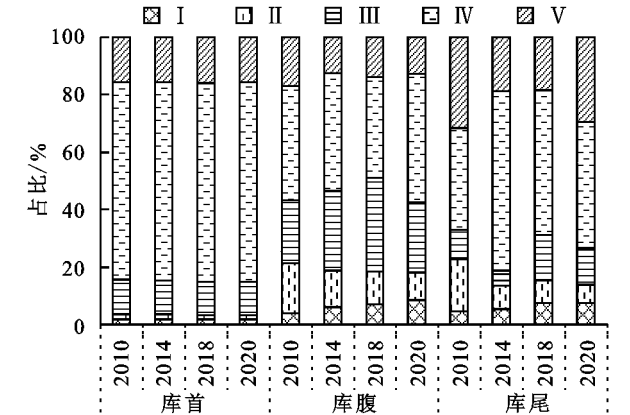


图3 2010—2020年研究区生态系统恢复力等级分布占比

表5 2010—2020年研究区生态系统健康状况等级面积占比

等级	分值 区间	2010年		2014年		2018年		2020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/%
I	0~0.2	31.88	9.15	37.91	10.88	30.11	8.64	28.15	8.08
II	0.2~0.4	76.96	22.09	73.71	21.16	68.08	19.54	63.70	18.29
III	0.4~0.6	110.21	31.64	102.79	29.51	105.77	30.36	107.45	30.85
IV	0.6~0.8	78.27	22.47	84.26	24.19	97.44	27.97	78.17	22.44
V	0.8~1	51.01	14.64	49.67	14.26	46.94	13.48	70.85	20.34

从整体情况看,研究区在4个时期各级生态系统健康状况数量结构保持一致,均呈“中间高两端低”的分布趋势,近10a研究区各级生态系统健康状况过渡情况较为稳定,差到一般等级的健康水平区域正逐步向健康水平为良好和好的区域发展,三峡库区消落带整体生态系统健康状况呈明显改善趋势。

从空间分布来看(表6),本研究生态系统健康等级空间分布主要从三峡库区的库首、库腹和库尾3个区域进行分析研究。在2010—2020年,库首消落带生态系统健康等级主要为Ⅱ级和Ⅲ级,面积占比超过库首总面积的55%,健康状况主要处于较差和一般水平,但库首消落带健康等级为Ⅰ级和Ⅱ级面积占比明显逐年减小,Ⅲ级到Ⅴ级面积占比逐年增加,表明库首消落带生态系统健康水平在逐年提升;库腹消落带生态系统健康等级主要为Ⅲ级和Ⅳ级,面积占比大于库腹总面积的50%,健康状况主要处于一般和良好水平,但库腹消落带处于Ⅱ级到Ⅳ级的面积呈波动减小趋势,为Ⅰ级和Ⅴ级的面积呈波动增加趋势,整体生态系统健康向好;在2010—2014年,库尾消落带生态系统健康状况呈较差和一般水平,在2014—

3.4 消落带生态系统健康状况分析

3.4.1 三峡库区消落带生态系统健康状况时空变化特征 本研究从生态系统活力、组织力和恢复力3个方面得出三峡库区消落带生态系统健康状况综合评价结果。在时间变化上(表5),2010—2020年,生态系统健康等级为Ⅰ级和Ⅱ级的面积呈明显减小趋势,表明研究区生态系统健康为差和较差水平的区域在逐渐减少,整体健康状况逐渐好转;生态系统健康等级为Ⅲ级的面积呈小幅度波动变化,研究区健康状态变化不明显;生态系统健康等级为Ⅳ级和Ⅴ级的面积发生明显变化,在2010—2018年,Ⅳ级面积逐年增加,健康水平为良好的区域明显增多,Ⅴ级面积逐年减少,健康水平为好的区域有所下降,在2018—2020年,Ⅳ级面积大幅度减少,减少了19.27 km²,Ⅴ级面积大幅度增加,增加了23.91 km²,研究区健康状况上升幅度明显。

2020年,库尾消落带生态系统健康状况呈一般和较好水平,但库尾消落带生态系统健康整体向Ⅳ级和Ⅴ级进行转化,健康水平明显提高。

表6 2010—2020年研究区生态系统健康等级空间分布面积占比

区域	年份	生态系统健康等级面积占比/%				
		I	II	III	IV	V
库首	2010	12.72	34.76	25.62	16.76	10.15
	2014	14.34	28.16	28.79	17.72	11.00
	2018	6.40	34.75	28.90	19.14	10.81
	2020	2.08	25.68	29.52	22.81	19.91
库腹	2010	8.45	19.72	32.46	23.46	15.91
	2014	10.44	19.35	29.34	25.81	15.06
	2018	8.51	17.29	30.28	30.00	13.92
	2020	9.31	16.90	31.06	22.35	20.38
库尾	2010	9.90	23.54	33.70	22.50	10.37
	2014	9.43	26.38	32.15	19.83	12.21
	2018	13.33	15.96	33.41	23.66	13.65
	2020	6.44	19.26	30.99	22.68	20.63

研究发现,库首、库腹和库尾消落带的生态系统

健康状况空间分布上生态系统健康状况整体呈现稳定并健康的发展趋势,各区生态系统健康等级数量结构均以Ⅲ级在各年保持一致。呈“凸”形分布态势。10 a 间,各级生态系统健康状况面积占比由低等级向高等级逐年过渡,差和较差健康水平面积占比明显下降,良好和好健康水平面积占比明显上升,健康程度大幅度提高。

表 7 研究区生态健康状况变化类型面积统计

变化 类型	差值 类别	2010—2014 年			2014—2018 年			2018—2020 年			2010—2020 年		
		面积/km ²	占比/%	总面积/km ²	面积/km ²	占比/%	总面积/km ²	面积/km ²	占比/%	总面积/km ²	面积/km ²	占比/%	总面积/km ²
高度退化型	−3,−4	3.31	0.95		1.08	0.31		9.58	2.75	102.82	12.10	3.47	
中度退化型	−2	10.18	2.92	73.88	5.54	1.59	55.18	35.64	10.23		37.07	10.64	103.64
轻度退化型	−1	60.39	17.34		48.56	13.94		57.60	16.54		54.46	15.64	
稳定型	0	200.30	57.50	200.30	211.82	60.81	211.83	99.76	28.64	99.76	89.78	25.77	89.78
轻度改善型	+1	63.26	18.16		70.99	20.38		97.25	27.92	145.75	89.69	25.75	
中度改善型	+2	9.92	2.85	74.16	9.79	2.81	81.30	40.44	11.61		52.16	14.97	154.92
高度改善型	+3,+4	0.98	0.28		0.52	0.15		8.06	2.31		13.07	3.75	

第一时期(2010—2014 年),研究区稳定型面积最大,为 200.30 km²,改善型总面积微高于退化型总面积,面积分别为 74.16 km² 和 73.88 km²。其中,轻度改善型占研究区总面积的 18.16%,轻度退化型占研究区总面积的 17.34%;中度退化型和中度改善型面积差异较小,分别为 10.18 km² 和 9.92 km²;高度退化型和和高度改善型面积仅为 3.31 km² 和 0.98 km²。

在空间分布上(表 8),库首消落带生态健康以轻度退化型为主,占库首总面积的 61.57%,其次为稳定型和中度退化型,高度改善型面积 0.98 km²;库腹和库尾消落带均以稳定型为主,中、高度退化型和改善型面积占比较小。

第二时期(2014—2018 年),研究区稳定型面积仍最大,相比第一时期面积有所增加,增加了 11.53 km²,退化型总面积相比第一时期有所减小,减小了 18.68 km²,改善型总面积有所增加,增加了 7.15 km²。其中,轻度改善型和轻度退化型分别占研究区总面积的 20.38% 和 13.94%;中度改善型高于中度退化型面积,分别为 9.80 km²、5.54 km²;高度退化型和高度改善型面积仅为 1.10 km² 和 0.51 km²。在空间分布上,库首消落带生态健康以稳定型为主,占库首消落带面积的 61.04%,相比第一时期,高度退化型面积几乎为 0,高度改善型面积小幅度增加,库腹和库尾消落带仍以稳定型为主,中度退化型、改善型面积均增加,高度退化型、改善型面积均减小。

3.4.2 三峡库区消落带生态系统健康等级差值变化特征 通过对研究区前后 4 个时点生态健康状况等级值进行计算得到 3 个时期的差值,将等级差值分为以下 7 种变化类型:高度退化型(−3,−4)、中度退化型(−2)、轻度退化型(−1)、稳定型(0)、轻度改善型(+1)、中度改善型(+2) 和高度改善型(+3,+4),对 7 种变化类型分别进行统计,分类结果见表 7。

第三时期(2018—2020 年),研究区改善型总面积最大,为 145.75 km²,退化型总面积微高于稳定型,面积分别为 102.82 km²,99.76 km²。其中,轻度改善型面积占研究区总面积的 27.92%,面积为 70.99 km²,稍低于稳定性面积,远高于轻度退化型面积,为 57.60 km²。中度改善型面积占消落带面积 11.61%,为 40.44 km²,高于中度退化型面积,为 35.64 km²。高度改善型面积占消落带总面积的 2.31%,为 8.06 km²,低于高度退化型面积,为 9.58 km²。在空间分布上,消落带库首、库腹和库尾生态健康均以稳定性和轻度改善型为主,分别占该区域总面积的 67.49%,56.72%和 53.59%。

第四时期(2010—2020 年),10 a 间研究区改善型总面积占比最大,为 44.47%,退化型总面积高于稳定型,分别为 103.64 km²,89.78 km²。其中轻度、中度和高度改善型面积均大于轻度、中度和高度退化型面积。在空间分布上,库首、库腹和库尾消落带生态健康主要以稳定和轻度改善型为主,整体生态健康状况呈稳定偏改善型方向发展。

通过对消落带生态系统健康等级差值变化特征分析。研究发现,在三峡库区消落带在第一时期和第二时期均以稳定型为主,表明库区消落带整体的生态系统健康状态整体保持相对稳定;在第三时期和第四时期,发现研究区整体改善型面积最大,表明在 2018 年后,我市对库区消落带有一定的治理和保护,整体健康状况逐渐向好发展。

表 8 研究区生态健康差值类型空间面积分布

区域	变化 类型	2010—2014 年		2014—2018 年		2018—2020 年		2010—2020 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/%
库首	高度退化型	0.284	0.60	0.001	0.00	0.467	0.99	0.469	0.99
	中度退化型	7.844	16.61	0.158	0.34	3.370	7.13	2.892	6.12
	轻度退化型	29.083	61.57	6.718	14.22	6.338	13.42	5.983	12.67
	稳定型	8.870	18.78	28.832	61.04	13.747	29.10	11.994	25.39
	轻度改善型	1.063	2.25	11.136	23.58	13.412	28.39	12.277	25.99
	中度改善型	0.090	0.19	0.385	0.82	8.633	18.28	11.340	24.01
	高度改善型	0.001	0.00	0.004	0.01	1.267	2.68	2.281	4.83
库腹	高度退化型	3.195	1.18	0.818	0.30	8.233	3.04	10.941	4.04
	中度退化型	8.809	3.26	4.160	1.54	29.389	10.86	31.367	11.59
	轻度退化型	46.106	17.04	37.194	13.74	46.485	17.18	43.912	16.23
	稳定型	155.690	57.53	167.876	62.03	77.793	28.75	69.606	25.72
	轻度改善型	48.400	17.89	52.192	19.29	75.696	27.97	69.827	25.80
	中度改善型	7.674	2.84	7.939	2.93	28.287	10.45	36.275	13.40
	高度改善型	0.742	0.27	0.437	0.16	4.743	1.75	8.687	3.21
库尾	高度退化型	0.110	0.36	0.278	0.91	0.89	2.90	0.665	2.18
	中度退化型	1.099	3.61	1.225	4.02	2.86	9.38	2.773	9.10
	轻度退化型	6.453	21.17	4.657	15.28	4.75	15.58	4.548	14.92
	稳定型	15.544	50.99	15.122	49.60	8.20	26.90	8.189	26.86
	轻度改善型	5.980	19.62	7.668	25.15	8.14	26.69	7.577	24.85
	中度改善型	1.176	3.86	1.471	4.82	3.56	11.66	4.589	15.05
	高度改善型	0.124	0.41	0.066	0.22	2.10	6.88	2.146	7.04

4 讨论与结论

4.1 讨论

研究发现,在近 10 a 库腹消落带生态系统健康水平为差的区域面积呈现先增后减的趋势,总体健康水平为差的区域仍在增加,增加了 0.86%,2014 年库腹健康水平为差的面积占比最大,为 10.44%。而库首和库尾消落带健康状况呈改善明显趋势。因此,在后续消落带治理中,应针对库腹区域消落带进行大力度的生态修复工程,严格消落带的保护,应严厉禁止在消落带区域从事的农耕,畜禽养殖等活动;加强面源污染防治,严控周边耕作区域富营养化和含重金属污水向消落带的排放;对消落带实施耐淹植物种植及湿地公园示范区域建设等生态保护修护工程,增强消落带的自我更新和恢复能力。

生态系统健康评价对空间尺度比较敏感,生态系统健康状况在不同尺度上会存在显著差异^[31]。三峡库区消落带区域自身具有长、窄等形状特点,不适合进行大尺度研究。本研究为提高评价结果的可靠性,选择适合小尺度下的评价指标,构建适用于消落带生

态系统健康的 VOR 评价模型该评价模型既能反映生态系统的结构和功能,又能反映消落带在外界干扰下的恢复能力,同时评价结果能有效反映研究区的生态系统健康状况和空间分布特征。另外,本研究不足之处在于仅从三峡库区消落带的角度进行了生态系统健康评价,评价指标主要基于遥感数据进行选取,未涉及到水质、经济和生物学群落等指标,在后续研究中,可将研究区与周边环境结合研究,探究其生态系统健康变化的影响因素和驱动机制,同时可进一步完善生态系统健康评价指标体系的构建,提高评价结果的科学性与完整性。

4.2 结论

- (1) 近 10 a 间,研究区生态系统健康状况总体呈现稳定并改善的趋势;各年生态系统健康水平等级数量结构均呈“凸”形分布态势,健康水平整体向良好和好发展;在空间分布上,库腹消落带健康状况最佳,库首和库尾消落带健康水平逐年向好发展。
- (2) 从 4 个研究时期的健康变化特征来看,第一时期和第二时期研究区均以稳定型为主,面积分别为 200.30 km² 和 211.83 km²;第三时期和第四时期研究区

均以改善型为主,面积分别为 145.75 km², 154.92 km²;表明三峡库区消落带整体生态健康状况特征以稳定偏改善型趋势发展。

(3) 在生态系统活力健康状况上,研究区整体活力健康水平总体偏低,发展趋势呈现逐年向好发展;在生态系统组织力健康状况上,健康水平呈现两端向中间发展趋势,健康水平向一般状态发展;在生态系统恢复力健康状况上,整体以较好的恢复力水平保持健康稳定。

参考文献:

- [1] 马克明,孔红梅,关文彬,等.生态系统健康评价:方法与方向[J].生态学报,2001,21(12):2106-2116.
- [2] 惠婷婷.生态系统健康评价研究进展[J].环境保护与循环经济,2020,40(2):52-54.
- [3] Harrison C. Ecosystem health-New goals for environmental management[J]. Ecological Engineering, 1993, 2(4):378-379.
- [4] Rapport D J. Ecosystem health: exploring the territory [J]. Ecosystem Health, 1995,1(1):5-13.
- [5] Liu X F, Yi H J, Shu T, et al. Restoration of marine coastal ecosystem health as a new goal for integrated catchment management in Tolo Harbor, Hong Kong, China[J]. Environmental Management, 2006,37(4):540-552.
- [6] 张虹.三峡重庆库区消落区基本特征与生态功能分析[J].长江流域资源与环境,2008,17(3):374-378.
- [7] 刁承泰,黄京鸿.三峡水库水位涨落带土地资源的初步研究[J].长江流域资源与环境,1999,8(1):75-80.
- [8] 张晟,杨春华,雷波,等.三峡水库蓄水初期消落带植被分布格局[J].环境影响评价,2013,6(5):45-50.
- [9] 许文杰,许士国.湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法[J].水土保持研究,2008,15(1):125-127.
- [10] 刘祥,陈凯,王敏,等.基于 O/E 模型和化学—生物综合指数的淮河流域关键断面生态健康评价[J].环境科学学报,2017,37(7):2767-2776.
- [11] 杨林,万晓安,魏小熙.熵权综合健康指数法在鲁湖健康评价中的应用[J].广州化工,2016,44(8):146-150.
- [12] 胡立刚.基于层次分析法的贵州省六硐河健康评估研究[J].中国农村水利水电,2019,443(9):87-93.
- [13] 董金茂,崔一民.基于层次分析法的森林健康状况评价研究[J].林业调查规划,2020,45(1):15-18.
- [14] 狄磊.基于层次分析法的河长制下流域健康评价[J].地下水,2019,41(6):151-154.
- [15] Walz R. Development of environmental indicator systems: Experiences from Germany[J]. Environmental Management, 2000,25(6):613-623.
- [16] 钟少华,时鹏,杨文刚,等.基于 PSR 模型的土地利用系统健康评价及障碍因子诊断:以延长县为例[J].水土保持研究,2019,26(2):283-289.
- [17] 杨予静,李昌晓,丽娜·热玛赞.基于 PSR 框架模型的三峡库区忠县汝溪河流域生态系统健康评价[J].长江流域资源与环境,2013,22(Z1):66-74.
- [18] 张渊.基于 VOR 模型的滇池流域生态系统健康多尺度评价研究[D].昆明:云南财经大学,2020.
- [19] 彭翠华,吴文佑,孙景昆,等.用综合指数评价法对大渡河猴子岩工程河段水生态系统进行健康评价[J].四川水力发电,2018,37(5):117-119.
- [20] 马行天,曹涵.基于层次分析法的陕西省城市生态系统健康动态评价[J].四川环境,2019,38(3):150-158.
- [21] 徐国荣,马维伟,李广,等.基于 PSR 模型的甘南尕斯湖湿地生态系统健康评价[J].水土保持通报,2019,39(6):275-280.
- [22] 李翠漫.钦州湾海岸带景观格局时空演变及生态系统健康评价[D].南宁:南宁师范大学,2019.
- [23] 袁毛宁,刘焱序,王曼,等.基于“活力—组织力—恢复力—贡献力”框架的广州市生态系统健康评估[J].生态学杂志,2019,38(4):1249-1257.
- [24] 朱捷缘,卢慧婷,王慧芳,等.汶川地震重灾区恢复期生态系统健康评价[J].生态学报,2018,38(24):9001-9011.
- [25] 孙永光,赵冬至,吴涛,等.河口湿地人为干扰度时空动态及景观响应:以大洋河口为[J].生态学报,2012,32(12):3645-3655.
- [26] 陈爱莲,朱博勤,陈利顶,等.双台河口湿地景观及生态干扰度的动态变化[J].应用生态学报,2010,21(5):1120-1128.
- [27] Peng J, Liu Y X, Li T Y, et al. Regional ecosystem health response to rural land use change: A case study in Lijiang City, China[J]. Ecological Indicators, 2017, 72(8):399-410.
- [28] Peng J, Liu Y X, Wu J S, et al. Linking ecosystem services and landscape patterns to assess urban ecosystem health: A case study in Shenzhen City, China[J]. Landscape and Urban Planning, 2015,143(6):56-68.
- [29] 李建龙.村庄压煤山丘区土地生态系统健康及其管控机制研究[D].北京:中国地质大学,2017.
- [30] 于伟宣.基于隐马尔可夫模型的城市群生态系统健康评价研究[D].武汉:武汉大学,2019.
- [31] 王春叶.基于遥感的生态系统健康评价与生态红线划分[D].上海:上海海洋大学,2016.