

# 三峡库区生态环境质量的时空格局演变及影响因素<sup>1</sup>

安 敏<sup>1,3</sup> 李文佳<sup>1,2</sup> 吴海林<sup>1,2\*</sup> 安 慧<sup>1,2</sup> 黄 进<sup>3</sup>

(1. 湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002;

3. 三峡大学经济与管理学院, 湖北 宜昌 443002)

**【摘要】：**准确把握生态环境的演变趋势，有效识别其影响因素，对生态环境保护以及实现可持续发展具有决定作用。基于遥感技术，获取三峡库区 2000~2020 年的生态因子指标，构建遥感生态指数(RSEI)，利用网格技术对 RSEI 进行行政区映射，并运用地理探测器模型测算经济社会因素对生态环境质量的影响程度。结果显示：(1)三峡库区生态环境质量整体上呈现向好趋势，生态环境质量等级为“中等”和“良”的面积平均占比达 72%；(2)三峡库区湖北段生态环境状况优于重庆段，其中湖北兴山县生态环境状况最好，RSEI 指数平均为 0.474，生态环境较差的地区集中在重庆核心城区；(3)人口密度、城镇化、三大产业对生态环境有显著影响，而人均 GDP 与其他因素联动才能有较强影响力。研究表明，改善三峡库区生态环境，需进一步提高经济水平，关注第二产业转型，重点控制人口规模以及城镇化发展。

**【关键词】：**三峡库区；生态环境质量；遥感生态指数；影响因素；地理探测器；可持续发展

**【中图分类号】：**X171. 1 **【文献标识码】：**A **【文章编号】：**1004- 8227(2022)12- 2743- 13

**【DOI】：**10. 11870 / cjllyyyhj202212017

三峡库区是保护长江流域生态安全的关键屏障，具有重要战略地位<sup>[1]</sup>，是我国主要的生态修复区，也是党和政府关注的重点区域。2011 年国务院批复《长江流域综合规划(2012~2030 年)》，明确了三峡库区发展是保护长江生态环境的关键环节。但同时，基于三峡库区在形成方式、发展模式以及地理气候的特殊性，使得其成为我国生态环境最为脆弱、破坏最为严重的区域之一<sup>[2]</sup>。首先，三峡库区是因人为建设三峡工程而形成的地理区域，受工程影响淹没了大量土地、田地、植被等，导致库区生态结构严重失衡。其次，库区后续为在短期内弥补淹没所造成的经济损失，选择牺牲短期内经济回报效益较低的生态环境，而向外扩张建设、过度开发，进一步消耗绿色资源，使得土地流失严重。最后，库区位于我国的第二阶梯东缘，且雨水较多，特殊的地理位置和气候特征导致水土流失面积较大，地质灾害频发<sup>[3]</sup>。多重因素复合影响，加速了对改善三峡库区生态环境的迫切需求。科学评价生态环境质量，掌控全局生态状况，是后续开展治理工作的前提。但基于传统定量评价生态环境的方法具有指标体系复

<sup>1</sup> 【收稿日期】：2022- 01- 11; 【修回日期】：2022- 02- 07

【基金项目】：国家自然科学基金青年项目(72004116)；2021 年湖北省教育厅科学研究计划资助项目中青年人才项目(Q20211211)；湖北省人文社会科学重点研究基地项目(2021- SDSG- 05)

【作者简介】：安 敏(1991 ~ )，女，讲师，主要研究方向为资源与环境管理。E-mail: anmin@ctgu.edu.cn

\* 通讯作者 E-mail: whlctgu@ctgu.edu.cn

---

杂、数据获取难等弊端，尤其是对于由小型行政单位县、区构成的三峡库区而言，难以实现精准、快速的生态环境评价。除此以外，识别关键影响因素是保障生态环境治理有效性的重要环节。生态环境系统虽具有自我修复、调节的功能，但无法抵抗过强人为因素的干扰，从而治理生态环境，归根结底在于对以人为主导的一系列经济、社会活动进行控制，识别人类活动中的主要因素。因此，科学合理地评价三峡库区生态环境质量，并找到影响其生态环境质量的关键因素，是制定、实施改善三峡库区生态环境政策的前提要素，同时对于促进库区高质量可持续发展和建设人与自然和谐的生态文明社会具有重要的理论价值和实际意义。

评价生态环境质量，是指按照人们的实际发展需求对生态环境的好坏程度加以衡量，其根本落脚点在于评价人类的感官知觉和可持续发展程度<sup>[4,5]</sup>。目前评价生态环境质量的方法主要包括：“压力—状态—响应”(Pressure-State-Response, PSR)模型<sup>[6,7,8,9,10,11]</sup>以及生态环境状况指数(Ecological Index, EI)。这两种评价方法均存在一定不足。首先，PSR模型涵盖社会、经济、环境、制度四大维度指标，EI指数包括对生物、植物、水体、土地以及环境污染五大方面的测度，两种评估体系均需要大量指标充盈，而对于市级以下地区而言数据获取性不足。其次，这两种评价结果表现形式均为数值，无法观测所有分布面的环境状况，缺乏可视化。2013年，我国学者徐涵秋<sup>[12]</sup>提出遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, RSEI)，完全依靠遥感技术捕获生态指标信息，克服了PSR模型以及EI指数对于评价地区的限制，通过遥感技术实现实时、迅速、精准的生态环境评价，评价结果从时空尺度上呈现可视化表达<sup>[13]</sup>。自此，RSEI指数成为测算生态环境质量的另一有效手段。何盈利等<sup>[5]</sup>通过MODIS卫星数据，对中国整体的RSEI数据集进行研究；王士远等<sup>[14]</sup>、李妍等<sup>[15]</sup>、刘栩位等<sup>[16]</sup>采用Landsat卫星数据，分别对自然保护区、乡镇、县区三个级别地区测算RSEI指数。通过充分利用遥感技术，弥补了小范围地区数据获取难的问题，同时还可实现数据可视化展示，动态观测生态环境变化。因此，评价三峡库区生态环境质量，采用RSEI指数具有更强的适用性，结果呈现更直观简洁。

近年来，不少学者通过研究生态环境的影响因素探寻提高生态环境的有效途径。环境库兹涅茨曲线假说(Environmental Kuznets Curve, EKC)<sup>[17]</sup>提出环境与经济存在倒“U”型影响关系。除经济因素外，Chikaraishi等<sup>[18]</sup>、Effiong等<sup>[19]</sup>分别通过STIRPAT模型和半参数面板固定效应回归技术，考察了城市化对环境的作用；周侃等<sup>[20]</sup>运用GWR回归模型还考察了人口规模、工业化水平对环境质量在空间上产生的影响；王苗等<sup>[21]</sup>基于主成分分析，得出人为因素对生态环境的影响力大于自然因素。另外，排日海·合力等<sup>[22]</sup>通过地理探测器模型，考察了绿度、湿度、热度、干度、人口密度、土地利用、海拔、经济密度8项因子对乌鲁木齐生态环境产生的影响，分别测算了单因子与多因子交互作用对生态环境产生的驱动效应。通过梳理前人研究，可知影响因素主要包括：自然因素、人为因素。自然因素对于生态环境质量具有直接影响，但其难以人为管控、改变，因此改善生态环境的主要途径，要通过控制人类主导的社会经济活动。另外，不同影响因素间可能存在交互作用，对生态环境产生额外影响，而上述模型中除地理探测模型外，其余计量模型均无法实现对多因素交互反应进行分析，因此运用地理探测器模型分析单因素以及多因素交互对生态环境质量的驱动作用。

综上，为探索改善三峡库区生态环境的有效途径，本文将人为因素与库区生态环境质量的演变过程关联。考虑到三峡工程对库区生态环境会产生突变影响，而这种影响自2000年以后趋于稳定<sup>[16,23]</sup>，因此研究区间选定在2000~2020年，利用遥感技术构建RSEI指数，运用地理探测器模型探索影响生态环境质量的经济社会因素以及影响路径，以期为库区的生态环境治理及实现高质量高水平可持续发展提供理论依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区为建设三峡工程而被淹没的区域，以及有移民任务的地区，包括重庆市、恩施州以及湖北省宜昌市所辖的26个区、县(图1)，总面积约5.9万km<sup>2</sup>，位于长江上游段，地势处于我国第二阶梯，地理范围在105° 49' E~111° 39' E, 28° 28' N~31° 44' N，属于亚热带湿润气候。三峡工程于1994年正式动工，涉及的移民总数达130万人，淹没文物景点共计25处，建设期间库区内水土流失严重，大量森林生态系统被毁坏，生态环境急剧恶化。同时，伴随工程蓄水水位的升高，产生大量突发性地质

灾害，导致三峡库区成为长江上游主要生态脆弱区之一。

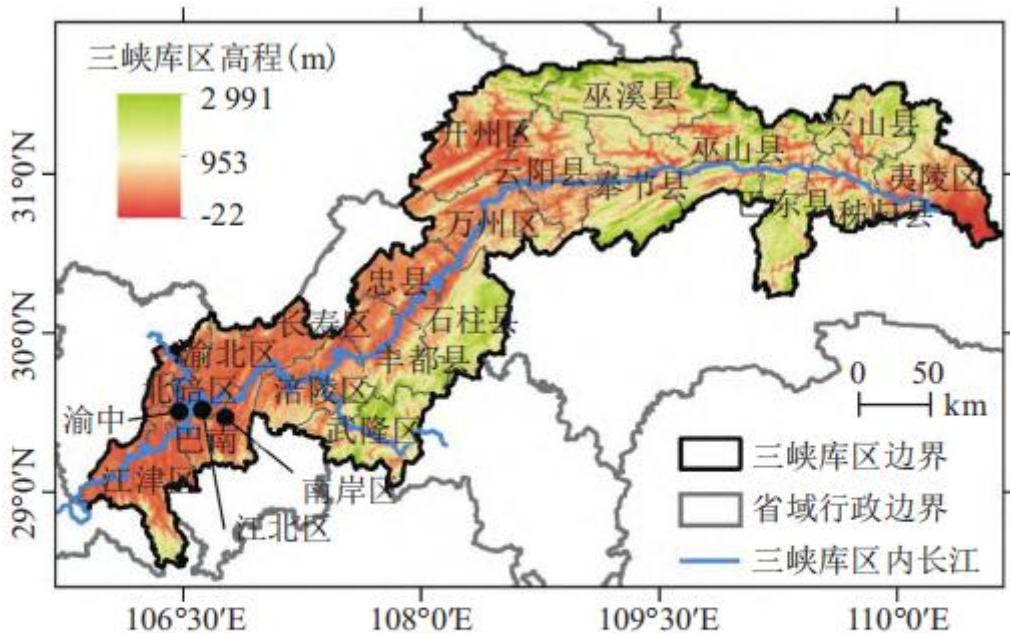


图 1 三峡库区地理位置

Fig. 1 Geographical location of Three Gorges Reservoir Area

### 1.2 数据来源与预处理

本研究所用数据主要包括两种类型：

(1) 遥感数据，采用 MODIS 产品数据中的 MOD09A1 以及 MOD11A2 数据集。MOD09A1 是 Terra MODIS 传感器经大气校正的包含 7 种波段的地表反射率数据，每个 MOD09A1 像素包含 8 天的最佳 L2G 观测结果，空间分辨率为 500 m，时间分辨率为 8 d；MOD11A2 为 MODIS 陆地温度产品，空间分辨率为 1 000 m，时间分辨率为 8 天。筛选成像时间在 2000~2020 年 6~9 月白天、少云的优质影像，经 MODIS Reprojection Tool (MRT) 批处理工具投影转换为 WGS84 投影，拼接影像，并重采样为 250×250 m，其中 NDVI、WET 和 NDSI 采用中值合成，而 LST 采用均值合成。遥感数据均来源于 NASA 网站 (<https://labsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。

(2) 社会经济数据，兴山县、秭归县、夷陵区数据来源于 2001~2021 年《宜昌市统计年鉴》，巴东县数据来源于 2000~2020 年《恩施州统计年鉴》，重庆市下属县区数据均来自 2001~2021 年《重庆市统计年鉴》，部分缺失数据来源于各县区国民经济和社会发展统计公报，凡在年鉴以及公报均缺失的数据采用插值法补全。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 遥感生态指数

RSEI 函数表达式如下：

---

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

式中：NDVI 为植被指数；WET 为湿度分量；LST 为地表温度；NDBSI 为建筑和裸土指数，它们分别代表绿度、湿度、温度和干度 4 个生态因子<sup>[12, 24]</sup>。

(1) 绿度指标。

NDVI 与植被生长情况和植被覆盖度有密切的关系，通常绿度与生物丰富度是正相关的，因此该指标也可间接反映生态脆弱性<sup>[25]</sup>。

$$NDVI = \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{(\rho_2 + \rho_1)} \quad (2)$$

(2) 湿度指标。

通过缨帽变换达到压缩数据和去冗余的效果，并可得到亮度、湿度和绿度等信息，这些信息可用来监测生态环境<sup>[26, 27]</sup>。其中的湿度分量是映照植被健康状况和土壤湿度状况的重要指标，因此湿度指标用湿度分量 WET 来表示，利用 MOD09A1 地表反射率产品通过 MODIS 缨帽变换公式<sup>[28]</sup>，计算湿度指数。

$$\begin{aligned} WET = & 0.1147\rho_1 + 0.2489\rho_2 + 0.2408\rho_3 + \\ & 0.3122\rho_4 - 0.3122\rho_5 - 0.6416\rho_6 - \\ & 0.5087\rho_7 \end{aligned} \quad (3)$$

(3) 干度。

干度即裸土指数，反映了土地退化程度，使用裸土指数 SI<sup>[29]</sup> 和建筑指数 IBI<sup>[30]</sup> 合成表示，不仅包含了传统土地退化，同时还考虑了社会发展中建筑用地逐渐占据主导地位，同样加速了土地干化程度。

$$SI = \frac{(\rho_6 + \rho_1) - (\rho_2 + \rho_3)}{(\rho_6 + \rho_1) + (\rho_2 + \rho_3)} \quad (4)$$

$$IBI = \frac{2\rho_6/(\rho_6+\rho_2) - [\rho_2/(\rho_2+\rho_1) + \rho_4/(\rho_4+\rho_6)]}{2\rho_6/(\rho_6+\rho_2) + [\rho_2/(\rho_2+\rho_1) + \rho_4/(\rho_4+\rho_6)]} \quad (5)$$

$$NDBSI = \frac{SI + IBI}{2} \quad (6)$$

(4) 热度。

热度指标选用地表温度(LST)代表，从MOD11A2数据集中获取LST数据，并将其灰度值转换为华氏温度。

### 1.3.2 遥感生态指数构建

三峡库区内水域丰富，并有长江贯通，为避免水体影响湿度因子WET的计算，采用MNDWI水体指数掩膜掉水体信息。由于NDVI、WET、NDBSI和LST四个指标量纲不统一，构建RSEI指数前需要对每个指标进行归一化处理，使其值介于0~1之间，公式如下：

$$N = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (7)$$

式中：X为原始指标；X<sub>max</sub>和X<sub>min</sub>分别为指标X的最小值和最大值。

为了使不同年份不同区域的生态指数具有可比性，在对指标进行归一化前，需对各项指标确定一致的最大值和最小值，具体做法：首先逐年计算各指标数据，然后按指标类型分别对影像进行均值合成，为避免影像异常值对统计最值产生影响，剔除在置信区间98%以外的数据，在剔除异常值后的数据中确定最大值和最小值<sup>[5]</sup>。

主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)是为简化数据集，创建互不相关的变量组合，从多维变量信息中通过正交变换将存在潜在相关的变量重新组合为互不相关的变量，并剔除存在密切相关性的变量。利用RSEI指数评价生态环境质量，经常借助主成分分析来确定各指标权重，主要是通过统计各指标对各主成分的贡献程度来确定，可以有效抑制主观因素对权重的影响<sup>[24]</sup>。通过ENVI 5.3软件计算RSEI。

$$RSEI = PC1 [f(NDVI, WET, NABSI, LST)] \quad (8)$$

式中：PC1 为第一主成分，剔除了位于 1 分位和 99 分位以外的异常值；f 为对 4 个指标进行正向归一化处理。为便于对不同时期不同区域进行生态状况比较，对 RSEI 数据的分布情况进行统计，得到数据分布的最大值为 1，最小值为 -1.5，将 RSEI 以 0.5 为间隔分为“差” (-1.5~ -1)、“较差” (-1~ -0.5)、“中等” (-0.5~ 0)、“良” (0~ 0.5) 和“优” (0.5~ 1) 5 个等级，数值越高表示生态质量状况越好。

### 1.3.3 地理探测器

地理探测器是由王劲峰用 Excel 编制的地理探测器软件，不仅可以用来检测地理事物的空间分异性，还能够通过检验两变量的空间耦合性，来分析变量间的驱动作用<sup>[31]</sup>。本文基于地理探测器中的因子检测和交互探测方法，揭示不同因子及其相互作用对生态环境的影响。

因子检测：探测某因子 X 多大程度上解释了属性 Y 的空间分异。通常用 q 值度量，表达式为：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (9)$$

式中：L 为变量的分类数；N 和 Nh 分别为全局与各分类 h 的样本数； $\sigma^2$  和  $\sigma_{2hh2}$  分别为全局与分类 h 的方差；q 为探测因子对生态环境质量的解释程度，取值在 0 到 1 之间，q 值越接近 1，说明该因素对生态环境质量的解释力度越强，反之亦然。

交互探测：识别不同因子  $X_i$  之间的交互作用，即探测因子  $X_1$  和  $X_2$  共同作用时是否会增加或减弱对因变量 Y 的解释力。具体实现方法为：首先，分别计算因子  $X_1$  和  $X_2$  对 Y 的 q 值，即  $q(X_1)$  和  $q(X_2)$ ；其次，计算它们交互时的 q 值，即  $q(X_1 \cap X_2)$ ；最后，对  $q(X_1)$ 、 $q(X_2)$  与  $q(X_1 \cap X_2)$  进行比较。

地理探测器具体使用步骤包括：

(1) 收集数据，包括自变量 X 与因变量 Y，自变量为数值型时需进行离散化处理，转为类型量。

(2) 将样本以 (Y, X) 的形式导入到 GeoDetector 软件中，然后运行软件。

## 2 结果分析

### 2.1 三峡库区生态环境质量时空格局

图 2 反映了三峡库区 2000~2020 年的 RSEI 时空分布情况。从整体来看，生态环境质量等级为“优”“良”的区域大多分布在库区边界、高程较高区域，如巫溪县、巫山县、兴山县北部，秭归县、巴东县、奉节县南部，石柱县、丰都县、武隆区东南部；生态环境质量等级为“中等”的区域集中分布在长江沿线两侧，同时等级为“差”、“较差”的区域也主要集聚在长江两侧，并且随时间变化，生态环境质量为“差”以及“较差”的地区从库区下游逐渐演化向上游转移；除此以外，截止到 2020 年三峡库区中生态环境等级为“差”的区域，集中在重庆核心城区（渝中区、北碚区、大渡口区、南岸区、九龙坡区、沙坪坝区和江北区），呈现城区分布越为密集的地区，其生态环境问题也越突出的现象。

对2000~2020年三峡库区生态环境状况变化的面积进行统计，结果如图3所示。首先，生态环境质量为“中等”和“良”的面积平均占比为72%，并且在20年期间，生态环境质量为“良”的面积整体占比呈上升趋势，而“中等”所占的面积出现明显减少的状态。其次，生态环境质量为“优”“较差”以及“差”的面积稳定在40%左右，其中生态环境等级为“差”的面积所占比重最小，但在20年期间其占比缓慢上升，从2000年的2.80%到2020年的6.29%，反映出三峡库区部分地区生态环境存在持续恶化的现象。最后，生态环境质量为“优”的面积占比变化，在2000~2012年中呈现“下降—上升”交替出现的变动，而2012年以后生态环境质量为“优”的面积持续增加，到2020年“优”的面积占比增加了11.41%，“优”所占的总面积与2000年保持基本一致。从分析三峡库区生态环境等级变化中可知：三峡库区内大部分地区生态环境等级表现为“中等”和“良”，而“优”、“较差”和“差”占小部分面积，且各等级所占比面积依次递减；根据以往各等级面积变化趋势，推测2020年之后生态环境质量为“中等”等级的面积有减少的趋势，而其余等级所占面积则呈现增加的可能。

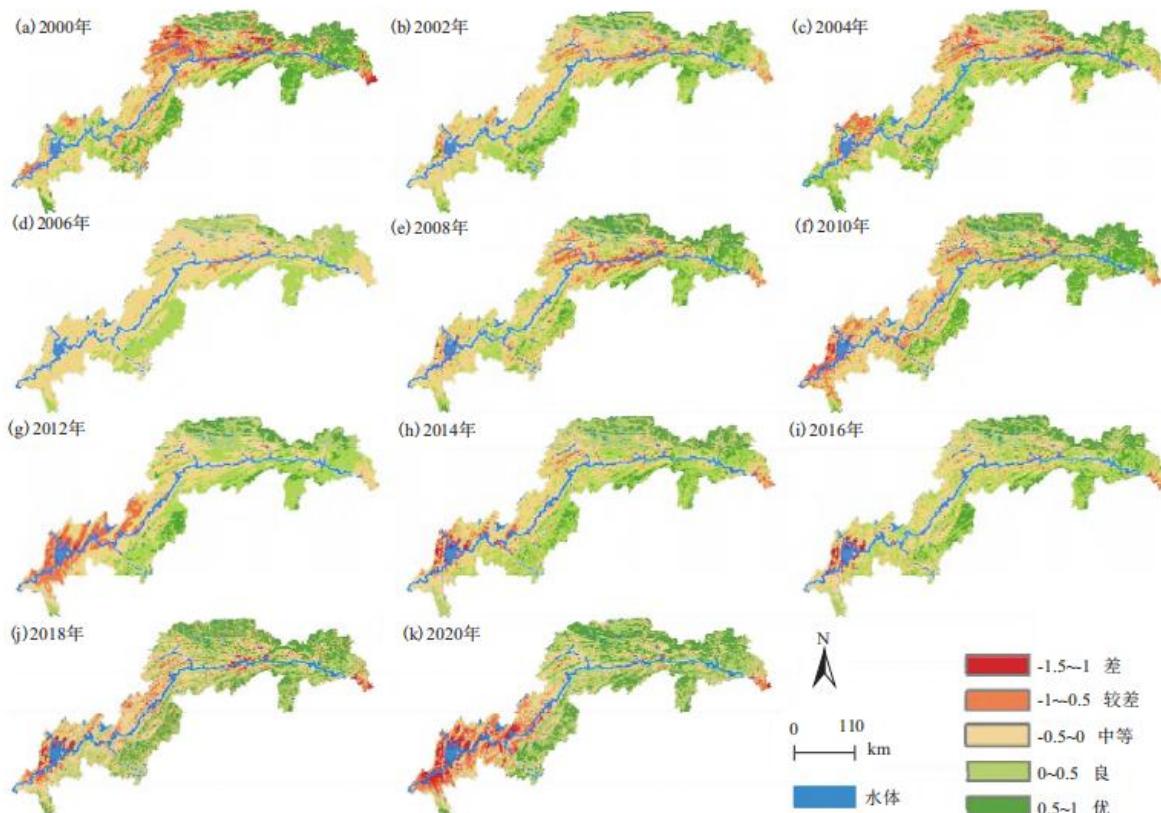


图2 2000~2020年三峡库区生态环境质量时空分布

Fig. 2 Temporal and spatial distribution of eco-environmental quality in Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2020

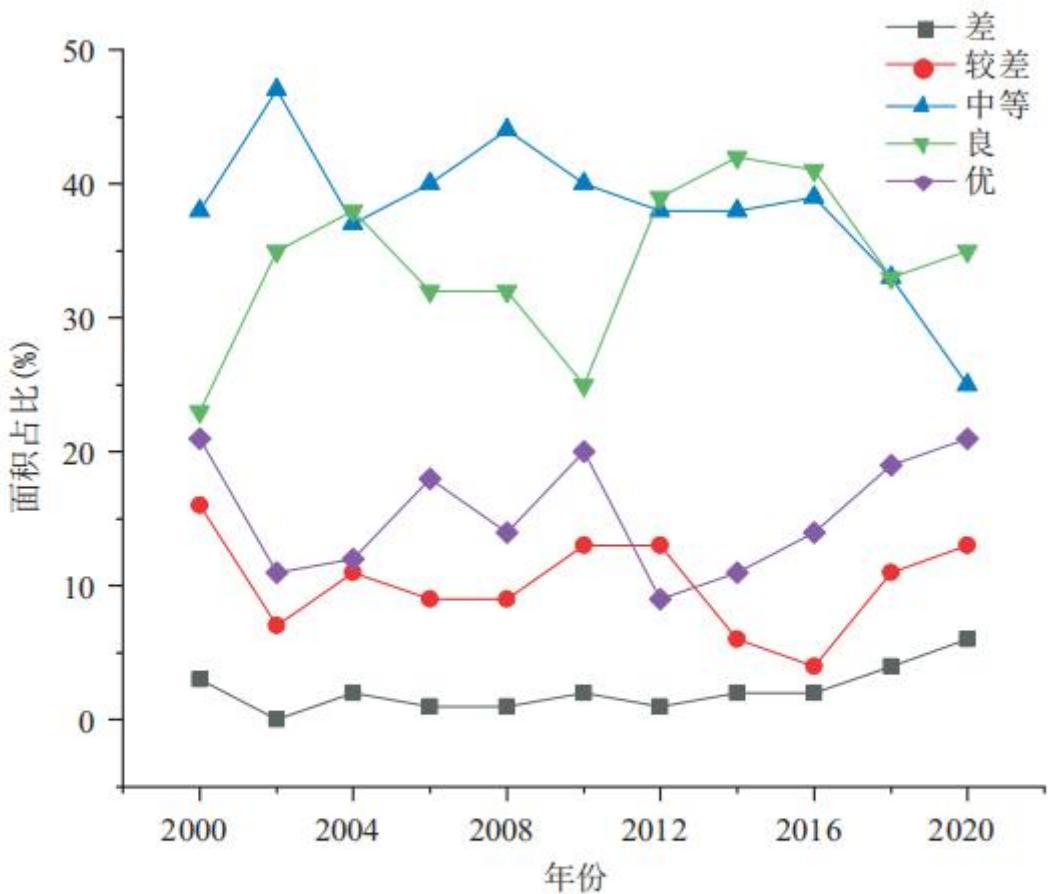


图 3 2000~2020 年三峡库区生态环境等级变化

Fig. 3 Change of ecological environment level in Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2020

为界定三峡库区内生态环境质量变化较为突出的地区，逐年计算库区内 26 个县、区遥感生态指数的均值，结果如下图 4 所示。(1)三峡库区湖北段的生态环境质量在 20 年间均未出现“中等”、“差”、“较差”的等级，并且兴山县的生态环境评价在 2000、2008、2010 和 2020 年 4 个时期皆为“优”，这也是三峡库区中生态环境质量为“优”等级的唯一地区。(2)三峡库区重庆段在 20 年期间生态环境等级每年均为“良”的地区为武隆区、石柱土家族自治县、巫溪县，三峡库区未出现生态环境等级每年均为“差”的地区，但是渝中区在 20 年间生态环境状况一直在“较差”和“差”两等级间变换。除此以外，生态环境质量恶化的状况呈现出以渝中区为源头向其周围地区辐射扩散的现象。(3)从全局来看，生态环境质量等级为“良及以上”的县、区从 2000 年的 7 个增长到 2020 年的 12 个，同时“较差以下”的县、区个数从 1 个增加到 11 个，而生态环境质量表现为“中等”等级的县、区个数在不断减少，这说明生态环境质量一般的县、区在这期间一部分生态环境得到改善，一部分则趋于恶化。

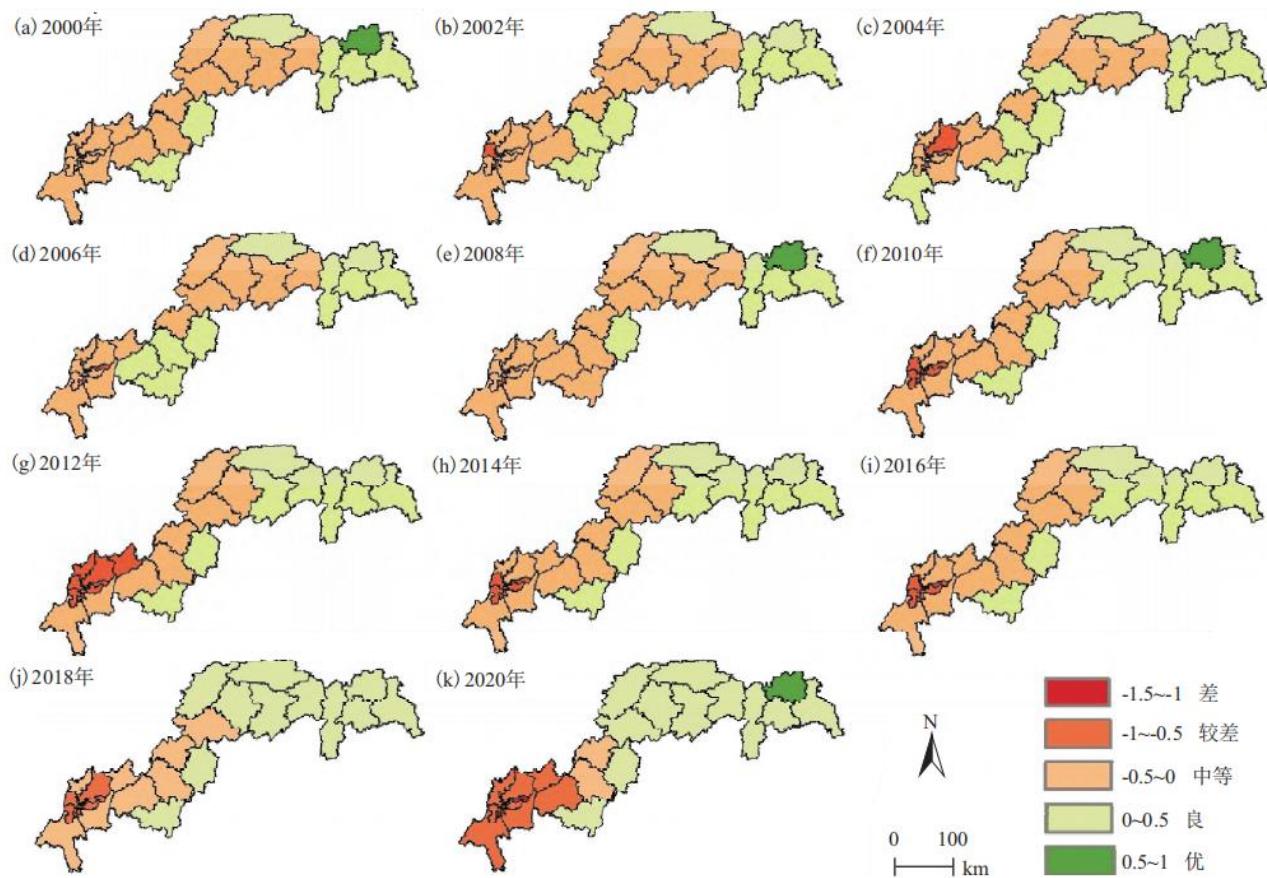


图 4 三峡库区 26 个县、区生态环境质量变化

Fig. 4 Changes of eco-environmental quality in 26 counties and districts in Three Gorges Reservoir Area

## 2.2 三峡库区生态环境质量变化

为进一步研究三峡库区在 20 年中生态环境质量的变化程度，以 2010 年为分界线，将三峡库区生态环境质量变化划分为 2000~2010 年以及 2010~2020 年两个时期。将前后两个时期的生态环境等级变化程度分为 5 个级别，具体划分依据为：生态环境等级变化范围超两级及以上的，认定为明显变化；变化范围为一级的，是一般变化；变化范围不变的，为无变化。因此，三峡库区 20 年中生态环境质量等级变化分为“明显变差”“变差”“不变”“变好”和“明显变好”5 个等级。

统计 2000~2020 年期间生态环境质量等级变化的面积，如表 1 所示，2000~2010 年和 2010~2020 年两个时期三峡库区整体生态环境质量均处于优化的状态。2000~2010 年期间，生态环境质量等级变化中的“明显变差”和“变差”的总面积占比为 19%，而生态环境质量优化（“变好”、“明显变好”）的总面积占 25.3%，表明近 10 年来生态环境质量总体上有所改善；而 2010~2020 年生态环境优化的面积比恶化的面积仅高出 2.98%，改善程度不足于 2000~2010 年阶段。从总的 20 年来看，三峡库区生态环境质量“明显变差”、“变差”的面积比重比“明显变好”、“变好”的面积比重低 7.54%，因此三峡库区在 2000~2020 年期间生态环境质量得到改善。

表 1 2000~2020 年三峡库区生态环境质量等级变化面积

变化	2000 年~2010 年		2010 年~2020 年		2000 年~2020 年	
	面积 ( $\text{km}^2$ )	占比 (%)	面积 ( $\text{km}^2$ )	占比 (%)	面积 ( $\text{km}^2$ )	占比 (%)
明显变差	1 275.727	2.30	1 708.651	3.08	4 307.923	7.78
变差	9 241.815	16.70	11 577.53	20.88	11 204.42	20.24
不变	30 826.47	55.69	27 218	49.09	20 156.36	36.42
变好	12 580.87	22.73	13 816.95	24.92	14 476.08	26.16
明显变好	1 424.777	2.57	1 121.703	2.02	5 202.039	9.40

为达到可视化的效果, 图 5 展示了三峡库区 2000~2020 年生态环境质量等级变化的具体情况。在这两个时期, 生态环境质量“变好”的范围不断扩大, 但同时, “变差”和“明显变差”的范围也在扩张。生态环境质量提升的区域集中在库区中段部分, 生态环境质量等级发生“明显变差”和“变差”的区域主要分布在库区东、西两段, 其中生态环境恶化严重的区域集中在重庆核心城区。

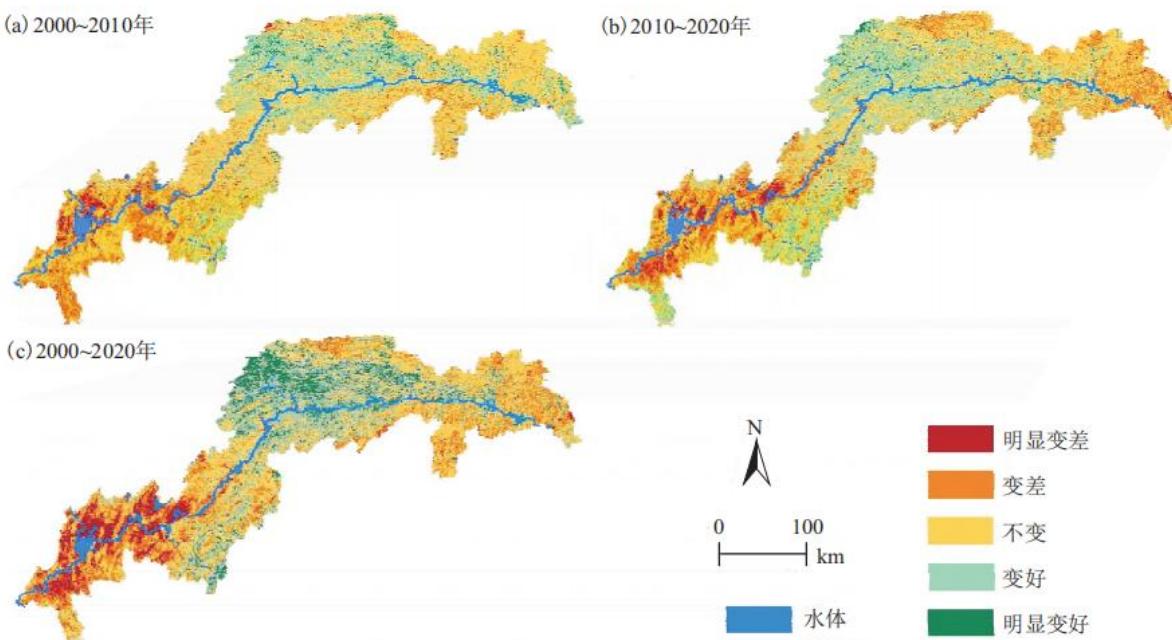


图 5 2000~2020 年三峡库区生态环境等级变化情况

Fig. 5 Changes of ecological environment level in Three Gorges Reservoir area from 2000 to 2020

### 2.3 生态环境质量影响因素探测分析

为实现三峡库区生态环境可持续发展, 需加强控制人为因素, 本文参考现有研究成果<sup>[20, 22]</sup>, 并结合地级尺度数据的可获取性, 着重考察并深入分析以下 10 个经济、社会因素对生态环境质量的影响: 包括人口密度(X1), 选取每平方千米常住人口的数量; 城镇化(X2), 选取城市人口占总人口的比例; 第一、二、三产业水平(X3、X4、X5), 分别选取第一、二、三产业生产总值反映三

---

大产业的发展水平；经济发展水平(X6)，选取人均GDP作为指标，即区域生产总值与总人口的比值；农业、林业、牧业、渔业发展水平(X7、X8、X9、X10)，指标分别选取其对应的生产总值。收集2000~2020年三峡库区26个县区截面数据(图6)，将遥感生态指数作为因变量，10个影响因素作为自变量，建模之前必须依靠空间单元将数据整合。因此本研究采用自然断点法对自变量进行分级，并创建研究区范围内 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的格网，获取格网中心点作为样本点，共计6 419个。采用地理探测器模型探测影响生态环境质量的驱动因素，各因素对生态环境质量的贡献程度与交互作用结果见表2与表3。

### 2.3.1 单因子探测结果

结果如表2所示，不同时期，对三峡库区生态环境质量影响较大的因子为人口密度、城镇化率，其中人口密度因子对三峡库区生态环境的影响力强度稳居在前2名，城镇化率因子对生态环境质量的影响强度排名大多期间在前3名；而人均GDP以及林业，这两个因子对三峡库区生态环境质量的影响能力长期位于末尾段；第二产业和第三产业对生态环境的影响逐渐由弱到强，向上游逼近，而农业和渔业则明显表现出对生态环境的驱动效果逐渐减弱。

#### (1) 人口密度、城镇化率。

人口密度和城镇化率的q值分别在 $0.147\sim0.366$ 、 $0.137\sim0.308$ 之间波动，呈阶段性变化。城镇化过程自身属于阶段性变动，而人口密度反映了一定空间内人口的聚集程度，对城镇化发展起推动的作用，两者对生态环境质量的解释力度相近且影响效果也表现为阶段性。人口密度对三峡库区生态环境质量的影响力较强，主要在于人口密度较直接地衡量了人为因素对生态环境的影响，一定空间范围内人口增加造成人均生态资源占有量减少，资源利用矛盾推进社会活动转型，非农业活动增加，聚集型高排放型产业产生，引发生态环境问题出现连锁反应。城镇化过程是通过人口规模扩张、产业聚集、居民生活方式转变等渠道作用于生态环境。重庆核心城区位于库区尾部，以库区4.23%的面积承载了31.33%的人口，并且城镇化水平显著高于库区内其他地区，在近几年中重庆核心城区生态环境质量明显较差。

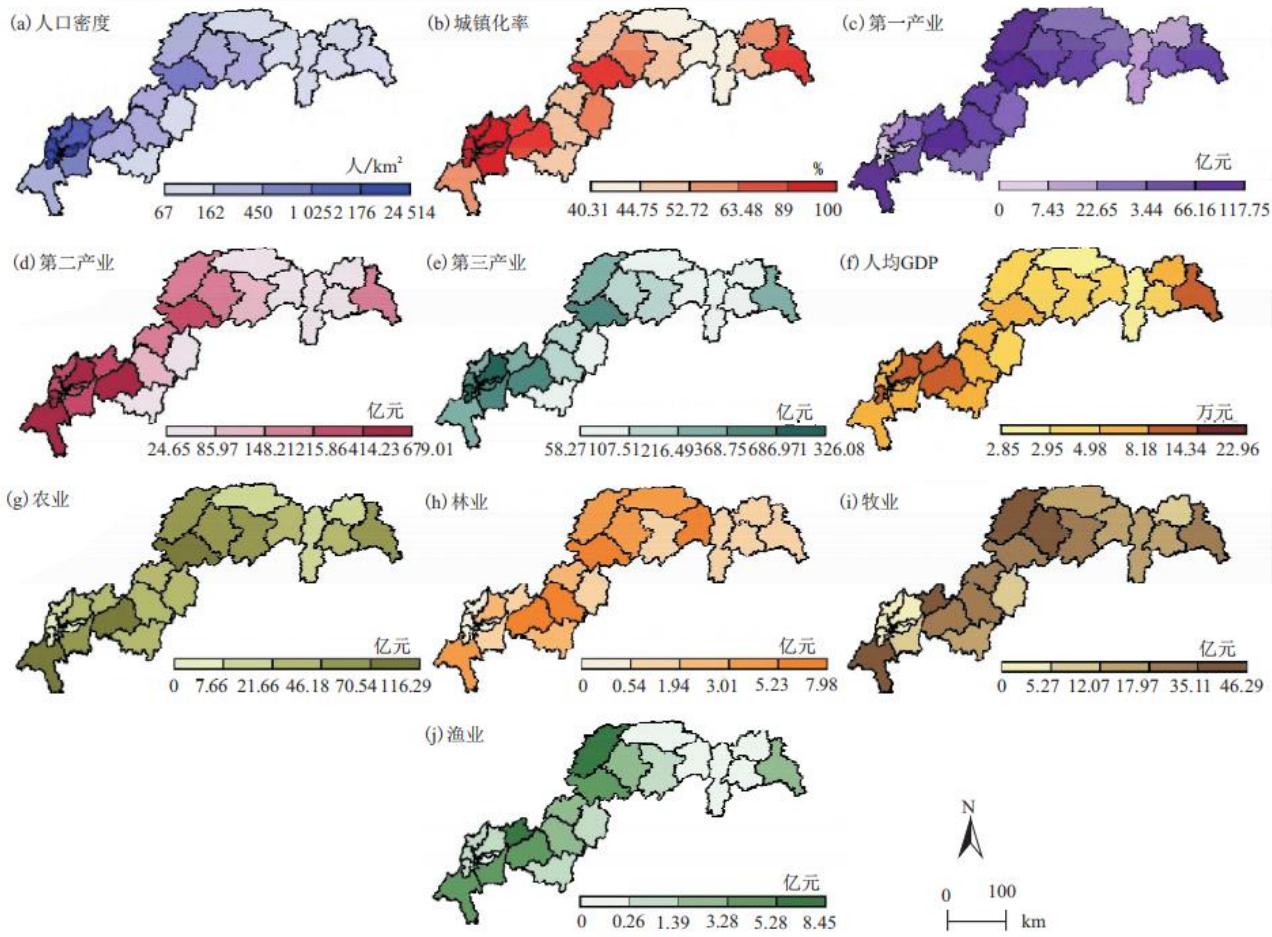


图 6 2020 年生态环境影响因子空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of eco-environmental impact factors in 2020

(2) 人均 GDP、林业。

人均 GDP 和林业对三峡库区生态环境的驱动程度较弱，两者  $q$  值基本在 0.1 以下，造成该现象的主要原因在于：① 人均 GDP 与生态环境间影响效应存在间接性。EKC 假说指出人均 GDP 和环境之间存在一定的影响关系，两者之间具体存在何种互动关系取决于经济发展水平。经济效益是由一系列经济活动运作产生，而生态环境一方面是经济活动的主要作用对象之一，另一方面也是评判经济活动的反馈者，因此经济活动与生态环境存在直接相互影响，间接造成经济水平影响环境。② 人均 GDP、林业发展势头不足其他因素，使得对生态环境质量的影响力较小。三峡库区原本属于中国 14 个集中连片特困区之一，三峡工程蓄水后大量良田、企业和城镇被淹没，对三峡库区经济发展成为巨大挑战，三峡工程运营后，在防洪、发电、航运、旅游、供水灌溉等方面对库区产生了巨大经济效益，同时全国对口支援库区通过项目帮扶、资金援助、技术交流、市场拓展等多方面途径，使得库区在 2020 年全面实现脱贫。林业发展与生态环境质量紧密相连，但库区内泥石流、山洪等自然灾害频发，人为过度开发进一步破坏森林资源，使得林业发展受到自然、社会多方面的限制。

(3) 第二产业、第三产业、农业、渔业。

第二、三产业对生态环境质量的解释力度逐渐增强， $q$  值分别从 0.066、0.084 上升到 0.383、0.265，反观农业、渔业  $q$  值从 2000 年到 2020 年变化不明显，但驱动力排名在不断下降。三峡库区在经历了大规模迁建、新建后，大量原有企业破产关闭，

库区内出现产业“空心化”现象，落后的产业体系已不能满足开放型市场经济要求，在政府以及三峡工程运行发展的带动下，库区重庆段一、二、三产业均取得阶段性成果，比重由1992年的42:35:33调整到2020年的9:49:42[32]，产业结构逐步由第一产业为主导力量转向第二、三产业并存主导的现象。产业优化推动了库区经济发展，进而提高了对生态环境的影响程度，而农业、渔业属于第一产业范畴，研究初期其仍是主导产业，对生态环境的驱动力排名也处于上位段，随着产业结构转型，第一产业所占比重逐渐削减，其驱动力排名也不断下降。

表2 单因子探测结果 导出到EXCEL

影响因子	q 值										
	2000年	2002年	2004年	2006年	2008年	2010年	2012年	2014年	2016年	2018年	
人口密度(X1)	0.147** * [2]	0.206** * [1]	0.109** * [1]	0.197** * [1]	0.171** * [2]	0.281** * [2]	0.366** * [1]	0.257** * [1]	0.183** * [1]	0.164** * [1]	0.269** * [2]
城镇化(X2)	0.137** * [4]	0.195** * [2]	0.091** * [5]	0.157** * [6]	0.201** * [1]	0.224** * [3]	0.308** * [2]	0.210** * [2]	0.176** * [2]	0.158** * [3]	0.238** * [4]
第一产业(X3)	0.082** * [7]	0.119** * [6]	0.080** * [6]	0.127** * [7]	0.083** * [7]	0.086** * [9]	0.138** * [8]	0.189** * [5]	0.109** * [7]	0.054** * [10]	0.149** * [8]
第二产业(X4)	0.066** * [8]	0.093** * [8]	0.080** * [6]	0.159** * [5]	0.162** * [3]	0.193** * [4]	0.244** * [4]	0.202** * [3]	0.133** * [5]	0.144** * [4]	0.383** * [1]
第三产业(X5)	0.084** * [6]	0.103** * [7]	0.093** * [4]	0.165** * [3]	0.140** * [4]	0.219** * [1]	0.180** * [6]	0.176** * [6]	0.135** * [4]	0.159** * [2]	0.265** * [3]
人均GDP(X6)	0.055** * [9]	0.019** * [10]	0.064** * [8]	0.051** * [9]	0.024** * [10]	0.057** * [10]	0.141** * [7]	0.108** * [8]	0.057** * [9]	0.063** * [8]	0.233** * [5]
农业(X7)	0.144** * [3]	0.146** * [4]	0.104** * [3]	0.164** * [4]	0.088** * [6]	0.106** * [7]	0.120** * [9]	0.063** * [9]	0.108** * [8]	0.055** * [9]	0.172** * [7]

	0.043**	0.037**	0.066**	0.039**	0.030**	0.104**	0.018**	0.007**	0.017**	0.071**	0.051**
林业 (X8)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	[10]	[9]	[9]	[10]	[9]	[8]	[10]	[10]	[10]	[7]	[10]
牧业 (X9)	0.098**	0.144**	0.049**	0.113**	0.098**	0.155**	0.279**	0.197**	0.115**	0.119**	0.185**
	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	[5]	[5]	[10]	[8]	[5]	[6]	[3]	[4]	[6]	[5]	[6]
渔业 (X10 )	0.156**	0.177**	0.108**	0.186**	0.053**	0.189**	0.204**	0.138**	0.141**	0.097**	0.119**
	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	[1]	[3]	[2]	[2]	[8]	[5]	[5]	[7]	[3]	[6]	[9]

注: \*、\*\*、\*\*\*分别表示  $p < 0.1$ ,  $p < 0.05$ ,  $p < 0.01$ ; []内数字代表对应因子在当期的驱动力排名.

### 2.3.2 多因子探测结果

分别对 2000、2004、2008、2012、2016 年以及 2020 年 6 期因子交互作用结果进行排序, 将交互作用影响力排名前 10 的因子组合整理得到表 3。结果显示, 各因子在交互作用下对生态环境的影响力度均显著增强, 均比单因子对生态环境的解释力更强。

从时间序列来看, 不同期间, 整体交互因子所表现出对生态环境质量的影响力具有小范围波动, 整体变强的状态。2000~2012 年交互作用的  $q$  值在不断升高, 从 0.195 3 到 0.473, 2016 年跌落至 0.241 8, 2020 年升至 0.437 8。早期交互作用影响力排在前 10 的因子组合, 大多以人均 GDP、农业、林业、牧业、渔业两两组合。三峡库区经历了大规模移民, 造成的是对人口规模、结构的影响, 更是将原有经济社会打乱再重组的艰难过程, 由于原有生活生产方式以及产业重建的长期性导致前期重组阶段农业经济占据主要部分, 因此在 2008 年前农业、林业、牧业、渔业对生态环境质量表现出较突出的驱动作用。从 2008 年开始, 人口密度、城镇化、第一、二产业对生态环境的作用突显出来, 成为影响生态环境的主要推动因素, 同时渔业与其他因子的交互作用更能表现出较强的影响力。这是因为此时期三峡百万移民安置基本结束, 库区经济发展成为后续社会稳定的关键问题。三峡库区面临经济发展水平低, 工业基础薄弱, 移民造成大量失业人员和剩余劳动力等经济发展难题, 为实现三峡库区脱贫摘帽, 国家发布了《三峡库区经济社会发展规划》, 规划中提出要充分发挥库区的资源优势, 集中劳动力大力发展劳动密集型为主的加工制造业, 加大宣传建设提升当地旅游业发展, 推动特色农业产业化。使得 2008 年后, 产业结构对三峡库区的生态环境质量起到显著驱动作用。在国家政府的帮助下, 三峡库区产业空心化问题得到一定缓解, 实现了产业结构优化, 并于 2020 年全面脱贫。

与单因素探测结果对比, 人均 GDP 在与其他 9 项因素交互后, 其对生态环境质量的影响作用才突显出来, 可见经济发展水平在与其他因素组合后能产生较强交互作用, 即经济发展水平在影响生态环境的因素中充当了“催化剂”的成分, 通过与其他因素产生联动进而作用于生态环境。

表 3 影响因子交互作用探测结果 导出到 EXCEL

交互因子	2000	交互因子	2004	交互因子	2008	交互因子	2012	交互因子	2016	交互因子	2020
X6 $\cap$ X10	0.195 3	X6 $\cap$ X8	0.195 8	X2 $\cap$ X10	0.256 2	X4 $\cap$ X10	0.473 0	X1 $\cap$ X3	0.241 8	X4 $\cap$ X8	0.437 8
X8 $\cap$ X9	0.190 3	X6 $\cap$ X9	0.186 8	X6 $\cap$ X7	0.256 0	X2 $\cap$ X7	0.464 7	X2 $\cap$ X3	0.232 8	X6 $\cap$ X10	0.437 7
X9 $\cap$ X10	0.189 2	X8 $\cap$ X10	0.186 2	X2 $\cap$ X6	0.255 0	X3 $\cap$ X10	0.457 4	X3 $\cap$ X4	0.232 4	X1 $\cap$ X6	0.437 1

X6 ∩ X7	0.188 3	X5 ∩ X6	0.184 4	X2 ∩ X7	0.251 0	X1 ∩ X8	0.450 6	X4 ∩ X10	0.228 2	X4 ∩ X10	0.429 0
X2 ∩ X10	0.187 2	X3 ∩ X6	0.179 8	X2 ∩ X3	0.250 6	X4 ∩ X9	0.448 5	X6 ∩ X10	0.223 9	X2 ∩ X10	0.427 8
X8 ∩ X10	0.187 0	X5 ∩ X7	0.174 8	X6 ∩ X9	0.249 6	X9 ∩ X10	0.444 8	X1 ∩ X7	0.223 2	X4 ∩ X7	0.427 7
X2 ∩ X7	0.185 8	X5 ∩ X9	0.173 5	X3 ∩ X6	0.244 8	X1 ∩ X10	0.444 7	X3 ∩ X5	0.223 0	X1 ∩ X7	0.426 7
X2 ∩ X5	0.185 3	X1 ∩ X8	0.171 7	X4 ∩ X6	0.243 0	X6 ∩ X9	0.439 7	X2 ∩ X10	0.222 2	X1 ∩ X9	0.421 1
X7 ∩ X8	0.184 8	X6 ∩ X10	0.171 1	X2 ∩ X8	0.240 2	X1 ∩ X6	0.436 4	X1 ∩ X10	0.220 4	X2 ∩ X4	0.418 6
X5 ∩ X6	0.184 5	X1 ∩ X4	0.170 4	X2 ∩ X9	0.237 8	X2 ∩ X3	0.431 3	X6 ∩ X7	0.219 1	X3 ∩ X4	0.414 2

### 3 结论与讨论

#### 3.1 结论

本研究以三峡库区作为研究对象，通过遥感技术测算其 2000~2020 年的遥感生态指数(RSEI)，揭示了三峡库区生态环境质量的时空分布特征，并运用地理探测器模型进一步解析影响生态环境质量的经济社会因素，得到以下主要结论：

(1) 20 年中，三峡库区的生态环境质量等级为“中等”和“良”的面积占据主要部分，等级为“较差”和“差”的地区聚集在长江两侧，随时间推移从库区下游逐渐向上游转移，并呈扩张的趋势。2000~2020 年，三峡库区有 28.02% 的面积生态环境质量恶化，35.56% 的区域生态环境状况得到改善，总体上生态环境有所好转。

(2) 从具体地区来看，三峡库区湖北段生态环境状况优于重庆段，其中湖北兴山县的生态环境质量最好，重庆段生态环境较差，较差的地区集中在重庆的核心城区(渝中区、北碚区、沙坪坝区、南岸区、九龙坡区、大渡口区和江北区)。20 年期间，三峡库区重庆段虽未出现生态环境质量持续为“差”的区域，但渝中区的生态环境状况均在“较差”、“差”间变换，并出现生态环境恶化以渝中区为中心向周围地区蔓延的现象。截止到 2020 年，重庆段有 11 个生态环境质量等级为“较差”和“差”的地区。

(3) 单因子探测结果显示：20 年期间人口密度和城镇化对三峡库区生态环境影响较强，第二、三产业的驱动作用逐年增强，从 2016 年驱动力排名跻身到上位段，但农业、渔业的驱动作用逐年减弱。多因子探测结果显示：各因子在交互作用下对生态环境的影响力显著增强，2008 年以前人均 GDP、农业、林业、牧业、渔业五项因子的彼此交互作用对生态环境影响较大，而 2008 年之后，人口密度、城镇化、第一、二产业对生态环境的作用才突显出来，逐渐成为影响生态环境的主要驱动因素。

#### 3.2 讨论

通过直观了解三峡库区 20 年来的生态环境质量的演化状况，掌握区域间生态环境差异，探究影响库区生态环境质量的驱动因素以及其影响程度，后续实现三峡库区生态环境可持续发展需重点关注以下方面：

(1) 经济发展。EKC 假说理论指出经济位于低水平时，经济发展会对生态环境的发展产生负面影响，当经济增长到一定水平时，经济对生态环境的发展则表现为正向促动的作用。三峡库区的人均 GDP 对生态环境质量未表现出较强的驱动作用，在于三峡库区经济实力较弱，据统计三峡库区 2002 年人均生产总值为 5 033 元，仅相当于全国平均水平的 62%，在国家实施了一系列帮扶政策后，库区在 2020 年实现全面脱贫，但对于依靠经济驱动推动生态环境发展，仍存在明显距离。

(2) 人口密度和城镇化发展。单因子、多因子探测结果均表明近年来人口密度和城镇化对生态环境的影响度在加强。三峡库区经历了百万移民工程，对人口规模、结构产生巨大影响，“人”作为最活跃的因素，对三峡库区而言不仅需要妥善安置移民，更要长期关注库区人口规模发展趋势。因此，改善三峡库区未来生态环境质量仍需合理控制人口规模以及城镇化水平。

(3) 单因子探测结果显示 2020 年第二产业和渔业发展水平对三峡库区生态环境质量的驱动程度排名分别在第 1、9 位，多因子探测结果表明 2020 年第二产业与渔业交互作用对生态环境影响力达 0.429，交互作用排名在第 4 位，并且第二产业以及渔业与其他因子交互也对三峡库区生态环境产生了显著影响，因此为改善三峡库区生态环境，后续经济发展可注重培育产业，转换劳动密集型工业，提升传统产业，立足库区优势，提高第二产业发展水平，充分利用水利优势适度发展库区水产养殖，提升渔业发展水平。

## 参考文献

- [1] 孟浩斌, 周启刚, 李明慧, 等. 基于 MODIS 像元尺度的三峡库区植被覆盖度变化的地形分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(8):1790–1799. MENG H B, ZHOU Q G, LI M H, et al. Topographic distribution characteristics of vegetation cover change in the Three Gorges Reservoir area based on MODIS pixel scale[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(8):1790–1799.
- [2] 李辉, 谭淼, 姜文, 等. 三峡库区经济发展与生态环境的时空耦合特征[J]. 水土保持通报, 2020, 40(1):243–249. LI H, TAN M, JIANG W, et al. Spatiotemporal characteristics of coupling economic development and ecological environment in Three Gorges Reservoir area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(1):243–249.
- [3] 叶润青, 付小林, 郭飞, 等. 三峡水库运行期地质灾害变形特征及机制分析[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3):680–692. YE R Q, FU X L, GUO F, et al. Deformation characteristics and mechanism analysis of geological hazards during operation period of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3):680–692.
- [4] 叶亚平, 刘鲁君. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究[J]. 环境科学研究, 2000, 13(3):33–36. YE Y P, LIU L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China[J]. Research of Environmental Sciences, 2000, 13(3):33–36.
- [5] 何盈利, 尤南山, 崔耀平, 等. 2000 年来中国生态状况时空变化格局[J]. 自然资源学报, 2021, 36(5):1176–1185. HE Y L, YOU N S, CUI Y P, et al. Spatio-temporal changes in remote sensing-based ecological index in China since 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(5):1176–1185.
- [6] 王晓君, 吴敬学, 蒋和平. 中国农村生态环境质量动态评价及未来发展趋势预测[J]. 自然资源学报, 2017, 32(5):864–876. WANG X J, WU J X, JIANG H P. Dynamic assessment and trend prediction of rural eco-environmental quality in China[J]. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5):864–876.
- [7] 李重阳, 江磊, 刘兆香, 等. 中国大气污染防治技术推广效果评价——基于 PSR 评价模型[J]. 科技管理研究, 2021, 41(8):209–214. LI C Y, JIANG L, LIU Z X, et al. Effect evaluation of air pollution control technology extension in China: Based on PSR assessment model[J]. Science and Technology Management Research, 2021, 41(8):209–214.
- [8] 王同达, 曹锦雪, 赵永华, 等. 基于 PSR 模型的陕西省土地生态系统健康评价[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1563–1572. WANG T D, CAO J X, ZHAO Y H, et al. Evaluation of land ecosystem health in Shaanxi

Province, Northwest China based on PSR Model [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5):1563–1572.

[9] 郭荣中, 申海建, 杨敏华. 基于改进 PSR 模型的长株潭地区土地生态系统健康评价研究 [J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(3):29–34. GUO R Z, SHEN H J, YANG M H. Studies on land ecosystem health evaluation in Chang-Zhu-Tan region based on the improved PSR model [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2021, 33(3):29–34.

[10] 曹文平, 刘喜坤, 赵天晴, 等. 基于压力-状态-响应 (PSR) 模型的潘安湖湿地水环境健康评价 [J]. 环境工程, 2021, 39(5):231–237, 245. CAO W P, LIU X K, ZHAO T Q, et al. Evaluation of water environmental health of Pan’ an Lake wetland based on Pressure-State-Response (PSR) model [J]. Environmental Engineering, 2021, 39(5):231–237, 245.

[11] 戈亚玲, 李巧云. 基于改进 PSR 模型的洞庭湖区生态安全评价及主要影响因素分析 [J]. 农业现代化研究, 2021, 42(1):132–141. GUO Y L, LI Q Y. Ecological security evaluation and main effects analysis around Dongting Lake based on the improved Pressure-State-Response model [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(1):132–141.

[12] 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. XU H Q. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24):7853–7862.

[13] 张亚球, 姜放, 纪梦达, 等. 基于遥感指数的区县级生态环境评价 [J]. 干旱区研究, 2020, 37(6):1598–1605. ZHANG Y Q, JIANG F, JI M D, et al. Assessment of the ecological environment at district and county level based on remote sensing index [J]. Arid Zone Research, 2020, 37(6):1598–1605.

[14] 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. WANG S Y, ZHANG X X, ZHU T, et al. Assessment of ecological environment quality in the Changbai Mountain Nature Reserve based on remote sensing technology [J]. Progress in Geography, 2016, 35(10):1269–1278.

[15] 李妍, 张国钦, 吕涛, 等. 乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究——以天津市蓟州区为例 [J]. 生态学报, 2022, 42(2):474–486. LI Y, ZHANG G Q, LIN T, et al. The spatiotemporal changes of remote sensing ecological index in towns and the influencing factors: A case study of Jizhou District, Tianjin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(2):474–486.

[16] 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. LIU X W, ZHOU Q G, ZHOU L, et al. 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 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5):278–286.

[17] GROSSMAN G M. Environmental Impacts of a North American Free Trade Agreement [M]. Cambridge, 1991.

[18] CHIKARAISHI M, FUJIWARA A, KANEKO S, et al. The moderating effects of urbanization on carbon dioxide emissions: A latent class modeling approach [J]. Technological Forecasting and Social Change, 2015, 90:302–317.

[19] EFFIONG E L. On the urbanization-pollution nexus in Africa: A semiparametric analysis [J]. Quality & Quantity, 2018, 52(1):445–456.

[20] 周侃, 李会, 申玉铭. 京津冀地区县域环境胁迫时空格局及驱动因素 [J]. 地理学报, 2020, 75(9):1934–1947. ZHOU K, LI

H, SHEN Y M. Spatiotemporal patterns and driving factors of environmental stress in Beijing-Tianjin-Hebei region:A county-level analysis[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9):1934-1947.

[21] 王苗, 刘普幸, 乔雪梅, 等. 基于 RSEDI 的宁夏生态环境质量时空演变及其驱动力贡献率分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10):3278-3289. WANG M, LIU P X, QIAO X M, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of ecological environmental quality in Ningxia and its driving force contribution based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10):3278-3289.

[22] 排日海·合力力, 昝梅, 阿里木江·卡斯木. 乌鲁木齐市生态环境遥感评价及驱动因子分析[J]. 干旱区研究, 2021, 38(5):1484-1496. PARIHA HELILI, ZAN M, ALIMJAN KASIM. Remote sensing evaluation of ecological environment in Urumqi City and analysis of driving factors[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(5):1484-1496.

[23] 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. TENG M J, ZENG L X, XIAO W F, et al. Research progress on remote sensing of ecological and environmental changes in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(12):3683-3693.

[24] 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. XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5):889-897.

[25] 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. LIN M S, LIN J H, CHENG Y, et al. Ecological vulnerability assessment of key villages of tourism poverty alleviation in Fujian Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(19):7093-7101.

[26] BEHLING R, BOCHOW M, FOERSTER S, et al. Automated GIS-based derivation of urban ecological indicators using hyperspectral remote sensing and height information[J]. Ecological Indicators, 2015, 48:218-234.

[27] CRIST E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. Remote Sensing of Environment, 1985, 17(3):301-306.

[28] LOBSER S E, COHEN W B. MODIS tasseled cap: Land cover characteristics expressed through transformed MODIS data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(22):5079-5101.

[29] ROY P S, RIKIMARU A, MIYATAKE S. Tropical forest cover density mapping[J]. Tropical Ecology, 2002, 43:39-47.

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

[31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1):116-134. WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1):116-134.

[32] 朱光福, 周超, 赵军峰. 新时代库区高质量发展的新难题和破解路径——以长江三峡库区为例[J]. 西部论坛, 2020, 30(1):90-99. ZHU G F, ZHOU C, ZHAO J F. The new problem and its breaking path for the high-quality development

---

of reservoir areas at the new era:A case study of Chongqing Reservoir areas of Three Gorges[J].West Forum, 2020, 30(1):90–99.