三峡库区重庆段生态环境与水源涵养协同特征及其成因

黄志毅，张守平，冉国全，李 霞
（重庆交通大学 河海学院，重庆 400074）

摘 要：［目的］分析区域可持续发展的核心科学问题：生态系统质量与服务功能之间的协调关系及其内在机制。旨在突破当前研究中“质-能”协同关系及驱动机制认知的不足，为库区生态管理提供科学依据。［方法］以典型生态脆弱区与重要生态功能区——三峡库区重庆段5个重要区县为研究对象，综合运用InVEST模型评估水源涵养功能、RSEI模型量化生态环境质量，引入耦合协调度模型诊断两者的协同关系，并借助地理探测器定量解析自然与社会经济因子对协调关系的驱动机制。［结果］①时序上，研究区生态质量持续改善，水源涵养量先降后升，波动显著；②空间上，二者协调水平显著提升，并具有“四周高，中间低”的规律性地理分异格局；③驱动分析表明，高程和温度是主导驱动因子，自然因子间的交互作用显著增强了协调度的空间分异。［结论］三峡库区重庆段生态质量与水源涵养功能间协同关系显著增强，其协调状态受自然因子与人类活动的非线性耦合驱动。建议在后续生态建设中实施分区差异化策略，在高人类干扰区严格控制开发强度，在中高海拔生态敏感区加强植被恢复与水源涵养能力提升，以促进区域生态系统的整体协调与可持续发展。

关键词：生态环境；水源涵养；地理探测器；耦合协调；三峡库区
文献标识码：A **文章编号：**1000-288X(2026)04-0385-12 **中图分类号：**P964，X171.1

文献参数：黄志毅，张守平，冉国全，等.三峡库区重庆段生态环境与水源涵养协同特征及其成因[J].水土保持通报，2026，46(4)：385-396. Huang Zhiyi, Zhang Shouping, Ran Guoquan, et al. Synergistic characteristics and their causes of ecological environment and water conservation at Chongqing section of Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(4): 385-396.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.009 **CSTR：32312.14.stbctb.2026.04.009**

Synergistic characteristics and their causes of ecological environment and water conservation at Chongqing section of Three Gorges reservoir area

Huang Zhiyi, Zhang Shouping, Ran Guoquan, Li Xia
(*School of River & Ocean Engineering*, *Chongqing Jiaotong University*, *Chongqing* 400074, *China*)

Abstract: [Objective] The core scientific issues of regional sustainable development, the coordination relationship between ecosystem quality and service functions and its underlying mechanism, were analyzed in order to break through the current limitations in the understanding of the “quality-energy” synergy relationship and driving mechanism in research, and provide a scientific basis for ecological management in the reservoir area. [Methods] This study focused on five key districts/counties at Chongqing section of the Three Gorges reservoir area. The InVEST model was used to evaluate water conservation, the RSEI model was used to quantify ecological environment quality, a coupling coordination degree model was introduced to diagnose their synergistic relationship, and GeoDetector was used to quantitatively analyze the driving mechanisms of natural and socioeconomic factors affecting the coordination relationship. [Results] ① Temporally, ecological environment quality in the study area continued to improve, whereas water conservation first decreased and then increased,

收稿日期：2025-10-27 **修回日期：**2026-01-19 **采用日期：**2026-01-21
资助项目：重庆市技术创新与应用发展专项重点项目“干旱条件下山丘区农村地区供水风险防控与联动调度关键技术研究及应用”(STB2022TIAD-KPX0198)；重庆市水利科技项目“面向高质量发展的重庆市水资源配置新格局关键技术研究”(CQSLK-2022005)；长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV20241171/KY)
第一作者：黄志毅(2000—)，男(汉族)，福建省泉州市人，硕士研究生，研究方向为水文学及水资源。Email：hzy1656474355@163.com。
通信作者：张守平(1984—)，男(汉族)，重庆市江津区人，博士，讲师，主要从事水利水电工程方面的研究。Email：510443567@qq.com。

with marked fluctuations. ② Spatially, the coordination level improved significantly, with a distinct geographical pattern of "higher in the periphery and lower in the center". ③ Driving-force analysis showed that elevation and temperature were the dominant driving factors, and interactions among natural factors significantly enhanced the spatial heterogeneity of the coordination degree. [Conclusion] The synergy between ecological environment quality and water conservation function at Chongqing section of the Three Gorges reservoir area is significantly enhanced, with its coordination state driven by nonlinear coupling between natural factors and human activities. This study recommends implementing differentiated zoning strategies in subsequent ecological construction: strictly controlling development intensity in areas with high human disturbance, and strengthening vegetation restoration and water conservation capacity in ecologically sensitive middle and high elevation areas, so as to promote overall ecosystem coordination and regional sustainable development.

Keywords: ecological environment; water conservation; GeoDetector; coupling coordination; Three Gorges Reservoir area

生态系统质量与服务功能是区域可持续发展的核心支柱。遥感生态指数(RSEI)通过集成绿度、湿度、干度和热度等多维信息,为区域生态质量的宏观、动态评价提供了有效工具[1];而水源涵养作为关键的调节性服务,其能力高低直接关乎区域水安全与生态稳定性[2]。然而,优质的生态本底未必能高效地转化为充沛的水源供给,这种"质-能"脱钩现象凸显了厘清二者耦合关系与互馈机制的必要性。

近年来,学界对RSEI与水源涵养的研究,已形成了从"孤立解析"到"关联探索"的清晰路径。RSEI模型自提出以来,其研究范式已从基础框架的广泛验证,走向针对区域特异性的模型优化与机理解析。早期研究集中于城市、流域等典型区域[3],验证RSEI的适用性。随后RSEI研究进入精细化的发展阶段,王恒恒等[4]为适应干旱区特征,引入沙度与盐渍化指数,构建了增强型RSEI;张萍等[5]在滇西北高山峡谷区开展了长时序动态监测,深化了对生态演变过程的理解;马林等[6]则通过细分土地覆盖类型,精细揭示了人类活动影响生态质量的具体路径。与之平行的水源涵养研究领域,评估方法经历了从早期的经验估算、野外观测等发展到模型的定量评价[7],涌现出如WEP-L (water and energy transfer process)模型[8]、SWAT (soil and water assessment tool)模型[9]、InVEST (integrated valuation of ecosystem services and tradeoffs)模型、元胞自动机等[10]一批模型。其中,InVEST模型以其参数需求相对简化、运算高效,被广泛应用于全球各个区域的生态系统水源涵养功能评估中[11]。上述两个领域方法论的日趋成熟,为交叉探究其内在关联奠定了坚实基础。在此背景下,研究者开始尝试构建桥梁。如许丽婷等[12]通过RSEI与InVEST模型评估了汾河流域生态环境质量与水源涵养量的时序变化特征,并利用皮尔逊相关性揭示了二者存在显著的正相关关系;曹源[13]的研究实现了双重突破,不仅从静态角度分析了两者的空间分布相关性,还从动态视角探究了其变化趋势的关联性。但现有关联研究在认知维度上仍存在关键瓶颈,一方面是在状态诊断上,无法判定相互作用的协调状态与演进路径;另一方面是在机理解析上,难以揭示空间分异的主导驱动力与因子交互效应,对于自然要素与人类活动的相对贡献及非线性关系认知模糊。这种机理认识的不足,制约了研究结论对区域差异化生态管理政策制定的精准支撑能力。

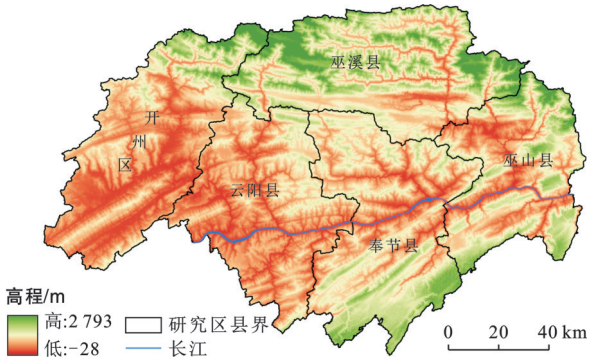
鉴于此,本研究选取生态地位重要且系统脆弱的三峡库区腹地重庆段5县作为研究对象,旨在实现从"现象关联"到"状态诊断"与"机理解析"的深化。研究将量化2000—2025年生态环境质量与水源涵养能力的时空演变规律;构建耦合协调模型,精准诊断二者的协同效应等级及其时空分异特征;运用地理探测器,定量揭示自然地理要素与人类活动因素对协调度空间格局的驱动作用及因子间的交互关系,从机理层面阐释协同效应的形成机制。本研究旨在为渝东北生态涵养发展区的差异化生态管控与空间治理提供科学依据。

1 研究区概况

本研究选取三峡库区腹心地带重庆段的巫山县、巫溪县、奉节县、开州区、云阳县(以下简称"研究区")作为研究对象(图1)。该区域是构筑三峡库区生态屏障的核心地段,亦是重庆市"渝东北生态涵养发展区"的主体构成部分,其生态质量与水安全状况对长江中下游地区的整体生态安全具有全局性影响[14]。

研究区地处重庆市东北部,地理位置为107°55′—110°11′E,30°29′—31°44′N,总面积约18 000 km^2,地处长江中下游平原与成渝地区之间的过渡带,同时也是渝、陕、鄂三省市的交界区和经济交通枢纽。区域气候属典型的中亚热带季风性湿润气候,四季

分明,雨热同期。年均气温 16～18 ℃,年均降水量 1 000～1 400 mm。然而,降水时空分布不均,雨季洪涝与旱季水资源短缺现象交替发生,构成了区域典型的水文气象特征[15]。在地貌形态上,研究区以中低山和丘陵为主体,巫山、七曜山、大巴山等山脉交汇于此,地形起伏剧烈、破碎度高,海拔落差显著。叠加广泛分布的喀斯特地貌,导致该区域土层浅薄、保水能力较弱,使之成为三峡库区内水土流失与地质灾害高发、生态系统先天脆弱性与敏感性突出的典型区域之一[16]。正是由于上述自然地理条件的复杂性与生态系统的敏感属性,在本区域开展生态质量与水源涵养能力的协同研究,不仅具有典型的理论价值,更对保障三峡库区生态安全、推进生态涵养区科学建设具有重要而紧迫的现实意义。



注:基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2024)0650 号标准地图制作。底图无修改。下同。

图 1　三峡库区重庆段概况

Fig.1　Overview of Chongqing section of Three Gorges reservoir area

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与预处理

本研究数据包括遥感影像、高程数据和土地利用数据等(表 1)。遥感数据来自 GEE 平台,通过调用对应年份(2000,2005,2010,2015,2020,2025)植被生长季(6—9 月)的 Landsat 产品,掩膜去除云及阴影,并采用中值合成法生成完整影像,作为计算绿度、湿度、干度和热度 4 个生态指标的基础。水源涵养量计算需要完整的年度气候数据,但由于 2025 年度尚未结束,无法获取完整观测数据,本研究采用 CMIP6 重采样后的 SRCPCN10 数据集的相应模拟值进行填补。为确保模拟数据与历史观测数据在气候态上的一致性,我们基于 2000—2024 年历史基准期,计算了 SRCPCN10 模拟数据与所用再分析数据在相同月份(10—12 月)的系统性偏差,并以此偏差对 2025 年 10—12 月的模拟数据进行逐月校正。将校正后的 2025 年 10—12 月模拟数据,与 2025 年 1—9 月的再分析数据进行无缝拼接,从而生成一套完整的、可用于驱动水文模型的 2025 年气候数据集。

表 1　研究数据来源

Table 1　Data sources of study

数据名称	数据来源	空间分辨率/m
遥感影像	全球云计算平台	30
高程数据	地理空间数据云	30
土地利用数据	中国科学院地理资源环境科学与数据中心	30
土壤数据	国家地球系统科学中心	1 000
气象数据	国家青藏高原科学数据中心	1 000
人口密度	全球人口数据	1 000
地表水资源量	重庆市水资源公报	—

2.2　研究方法

2.2.1　遥感生态指数(RSEI)

为了系统评估区域宏观生态环境质量的时空演变,避免单一指标(如 NDVI)的局限性,本研究选用遥感生态指数(RSEI)作为核心评价工具。相较于单一指标方法,该指数通过主成分分析(PCA)客观融合绿度(NDVI)、湿度(WET)、干度(NDBSI)和热度(LST)4 个相互独立又关联的维度,表征生态系统的植被活力、水热条件及人为胁迫。

计算过程首先对各指标进行标准化以消除量纲影响,随后进行主成分分析并选取承载信息量最大的第一主成分(PC1)构建初始指数 $RSEI_0$。其计算公式为

$$RSEI_0=\begin{cases}PC_1\left[f(NDVI,WET,NDBSI,LST)\right] & (V_{NDVI},V_{WET}>0)\\ 1-PC_1\left[f(NDVI,WET,NDBSI,LST)\right] & (V_{NDVI},V_{WET}<0)\end{cases} \quad (1)$$

为便于时空对比,对 $RSEI_0$ 进行归一化处理,得到最终取值范围在 0～1 的标准化生态指数 RSEI。计算公式为

$$RSEI=\frac{(RSEI_0-RSEI_{0min})}{(RSEI_{0max}-RSEI_{0min})} \quad (2)$$

为直观揭示质量的空间分异格局,参考相关研究的通用标准,将 RSEI 图层重分类为差(0～0.2)、较差(0.2～0.4)、中等(0.4～0.6)、良好(0.6～0.8)、优(0.8～1)。

2.2.2　水源涵养量

定量评估研究区关键生态系统服务——水源涵养的时空格局,本研究采用 InVEST 模型中的

“Annual Water Yield”模块计算水源涵养量。该模型基于Budyko水热耦合平衡理论和水量平衡原理,通过计算降水量、实际蒸散量等参数来评估产水量,尤其适用于大中尺度的长期趋势评估与空间异质性分析。计算过程基于水量平衡原理计算每个栅格的年产水量,其核心公式如下:

$$Y_{x,j}=(1-\frac{AET_{x,j}}{P_x})\cdot P_x \tag{3}$$

式中:$Y_{x,j}$为第j类土地利用方式下栅格单元x的产水量(mm);$AET_{x,j}$为第j类土地利用类型x的年实际蒸散发总量(mm);P_x为栅格x的年降水量总量(mm),计算的关键在于精准估算实际蒸散发与降水量的比值[17],近似公式如下:

$$\frac{AET_{x,j}}{P_x}=\frac{1+w_xR_{x,j}}{1+w_xR_{x,j}+1/R_{x,j}} \tag{4}$$

式中:w_x和$R_{x,j}$分别为气候-土壤非物理参数[18]和通过第j类土地利用栅格x计算的布德科干燥度指数。计算公式分别为

$$w_x=Z\times\frac{AWC_x}{P_x} \tag{5}$$

$$R_{xj}=\frac{k_{ij}\times ET_0}{P_x} \tag{6}$$

式中:Z为Zhang系数,用于表征降水的季节性分布特征,其具体数值通过《重庆市水资源公报》中的水资源量来校正,其值一般在1~10之间[19],AWC_x为植被可利用含水量[20],计算公式见(7);k_{ij}是植物蒸散系数;ET_0为潜在蒸散发。

$$\begin{aligned}AWC_x=&54.509-0.132P_{sand}-0.003P_{sand}^2-\\&0.055P_{silt}-0.006P_{silt}^2-0.738P_{clay}+\\&0.007P_{caly}^2-2.688P_{OM}+0.501P_{OM}^2\end{aligned} \tag{7}$$

式中:P_{sand}为土壤砂粒含量(%);P_{silt}为土壤粉粒含量(%);P_{clay}为土壤黏粒含量(%);P_{OM}为土壤有机质含量(%)。基于InVEST年产水量计算结果运用以下公式计算得到水源涵养量:

$$\begin{aligned}C_W=&\min\left(1,\frac{249}{V}\right)\times\min\left(1,\frac{0.9\times D}{3}\right)\times\\&\min\left(1,\frac{K_{soil}}{300}\right)\times Y\end{aligned} \tag{8}$$

式中:C_W代表水源涵养量(mm);V表示流速系数,根据参考表的系数值选取[21];D为无量纲的地形指数,根据式(9)计算;K_{soil}为土壤饱和导水率(mm/d),由式(10)计算;Y为产水量(mm)。

$$D=\lg\left(\frac{P_{water}}{D_{soil}\times P_{slope}}\right) \tag{9}$$

$$K_{soil}=60.96\times10^{(-0.6+0.012\,6P_{sand}-0.006\,4P_{clay})} \tag{10}$$

式中:P_{water}为集水区栅格数量,无量纲;D_{soil}为土层深度(mm);P_{slope}为百分比坡度(%)。

2.2.3 耦合协调度

本研究运用耦合协调度模型评估RSEI与水源涵养功能之间的协调关系。为了更好地展示耦合协调关系,参考相关研究[22]将耦合协调度结果划分为10级。[0,0.1]为极度失调,(0.1,0.2]为严重失调,(0.2,0.3]为中度失调,(0.3,0.4]为轻度失调,(0.4,0.5]为濒临失调,(0.5,0.6]为勉强协调,(0.6,0.7]为初级协调,(0.7,0.8]为中级协调,(0.8,0.9]为良好协调,(0.9,1]为优质协调。耦合度计算公式为

$$C=2\times\left\{(P\times R)/(P+R)^2\right\}^{1/2} \tag{11}$$

$$D=\sqrt{C\times T} \tag{12}$$

$$T=aP+bR \tag{13}$$

式中:C表示耦合度;P表示水源涵养量归一化值;R表示RSEI归一化值;D表示协调度;T表示水源涵养量与RSEI综合评价值;a和b表示待定系数,本研究将权重设定为$a=b=0.5$,是基于二者在生态系统“状态-功能”协同框架中具有理论对等性,且该处理符合耦合协调度模型中对等重要性维度的标准分析方法[23]。

2.2.4 双变量空间自相关

双变量空间自相关分析能够有效揭示两个不同地理变量在空间上的关联模式和集聚特征,主要包括双变量全局自相关和双变量局部自相关分析。双变量Global Moran's I指数计算公式为:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})}{S^2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}w_{ij}} \tag{14}$$

$$I_i=\frac{(x_i-\bar{x})\sum_{j=1}^{n}w_{ij}(x_i-\bar{x})}{S^2} \tag{15}$$

式中:I和I_i分别代表全局双变量指数Moran's I和局部双变量Moran's I指数;其中n为区域总数;w_{ij}是一个$n\times n$的空间权重矩阵,用于衡量不同位置之间的关联程度;x_i和x_j分别为第i和j个位置的属性值;$\bar{x}$和S^2分别为属性值的均值和方差。

2.2.5 地理探测器

采用因子探测器探测识别研究区RSEI与水源涵养量耦合协调度的空间分异的影响因素X,并运用交互探测器分析这些因素对耦合协调度变化Y的解释程度。具体计算公式如下:

$$q=1-\frac{\sum_{i=1}^{m}n_i\delta^2}{n\delta^2} \tag{16}$$

式中:q为单因素对耦合协调度变化的解释力,取值

范围为0～1；$i=1,2\cdots m$为变量Y或因素X的分层；n_i和Y分别为层i和全区的单元数；δ_i^2和δ^2分别为层i和全区的Y值的方差。q值越大，空间分异性越明显，自变量X对因变量Y的解释力越强。

3　结果与分析

3.1　遥感生态指数

3.1.1　结果验证

为检验RSEI模型对研究区生态环境质量评价中的适用性，对2000—2025年同期绿度、湿度、热度和干度进行系统验证（表2），研究时段内第一主成分（PC_1）的贡献率始终高于70%，表明PC_1能够有效综合绿度、湿度、热度和干度4个指标的大部分信息，符合RSEI模型的阈值标准。在各成分指标的贡献度中，绿度和湿度均为正荷载，与生态质量呈正相关；热度和干度均为负荷载，反映其对研究区生态环境改善有一定的阻碍作用，符合实际情况。各指标及贡献率在研究时段内保持稳定，未出现方向性逆转或异常波动，表明PC_1构建RSEI在研究区具有稳定的生态意义，在长序列分析结果上是可靠的。

表2　2000—2025年三峡库区重庆段各指标第一主成分

Table 2　First principal components of each indicator at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

年份	绿度	湿度	热度	干度	贡献率/%
2000	0.765	0.202	−0.313	−0.544	71.8
2005	0.705	0.192	−0.353	−0.603	73.7
2010	0.727	0.264	−0.176	−0.627	82.7
2015	0.72	0.299	−0.229	−0.603	74.1
2020	0.898	0.108	−0.249	−0.363	75.1
2025	0.853	0.221	−0.213	−0.440	70.7

3.1.2　时空变化特征

基于已验证的RSEI模型，本研究将生态环境质量划分为差、较差、中等、良好和优5个等级，并通过统计各等级面积占比，系统揭示2000—2025年研究区生态质量的演变趋势（见图2）。由图2可知，在区域尺度上，研究区生态质量呈现逐渐改善的总体态势。RSEI均值由2000年的0.53波动上升至2025年的0.65，增幅达22.6%，平均以0.004 8/a的速率提升。这一变化反映出生态恢复措施具有长期持续成效。在县域尺度上，改善幅度存在差异。巫溪县的改善幅度最显著，增幅达23.9%；云阳县与奉节县的生态质量亦显著提升，增幅分别为20.6%与20.1%，表明这些区域生态治理效果显著。相比之下，开州区RSEI虽整体呈上升趋势，但在2005—2015年时段内存在较大波动，反映出该区域生态改善过程的稳定性相对较弱。

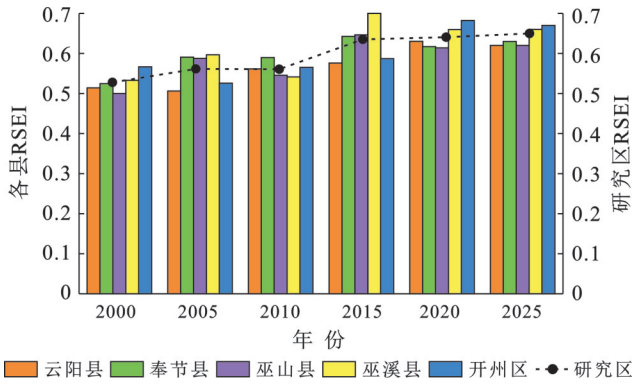


图2　2000—2025年三峡库区重庆段RSEI时序变化

Fig.2　Temporal changes in RSEI at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

研究区RSEI等级结构在2000—2025年发生了系统性转变（图3，图4），整体实现了从“中等”等级主导向“良好”等级占优的结构性跨越。具体表现为差级与较差级得到有效控制并显著减少，其中差级面积至2025年降至401.37 km^2，较2000年减少7.1%；较差级面积出现大幅减少趋势，从2 308.11 km^2降至1 306.69 km^2，反映出中度生态退化区域治理成效显著；中等级面积呈现持续缩减态势，共减少40.0%，从6 962.70 km^2降至4 183.82 km^2，表明大量中等质量生态系统已实现向更高等级的转化；良好级面积稳步增长24.6%，由7 411.73 km^2增至9 232.24 km^2，成为占比最高的等级，为区域生态安全提供了核心支撑；优秀级面积在观测期内整体实现显著增长，增幅达155.3%，由1 330.37 km^2增至3 396.77 km^2；尽管其在2020—2025年有所回落，但总体仍反映出生态环境质量的提升。

3.2　水源涵养量

3.2.1　结果验证

为保障InVEST模型在研究区水源涵养量估算的可靠性，本研究依据2011—2024年《重庆市水资源公报》中的水资源总量数据进行参数率定与验证（表3）。其中2011—2020年为率定期，2021—2024作为验证期。通过不断调整Z参数使产水量模拟值更接近实际值，最终确定Z参数取值范围为2.1～8.7。结果表明，在率定期内，平均相对误差为8.65%；在验证期内，平均相对误差为9.70%。两项误差均低于10%，表明模型在研究区具有较高的可靠性，其输出结果可用于后续水源涵养功能的时空评估与分析。

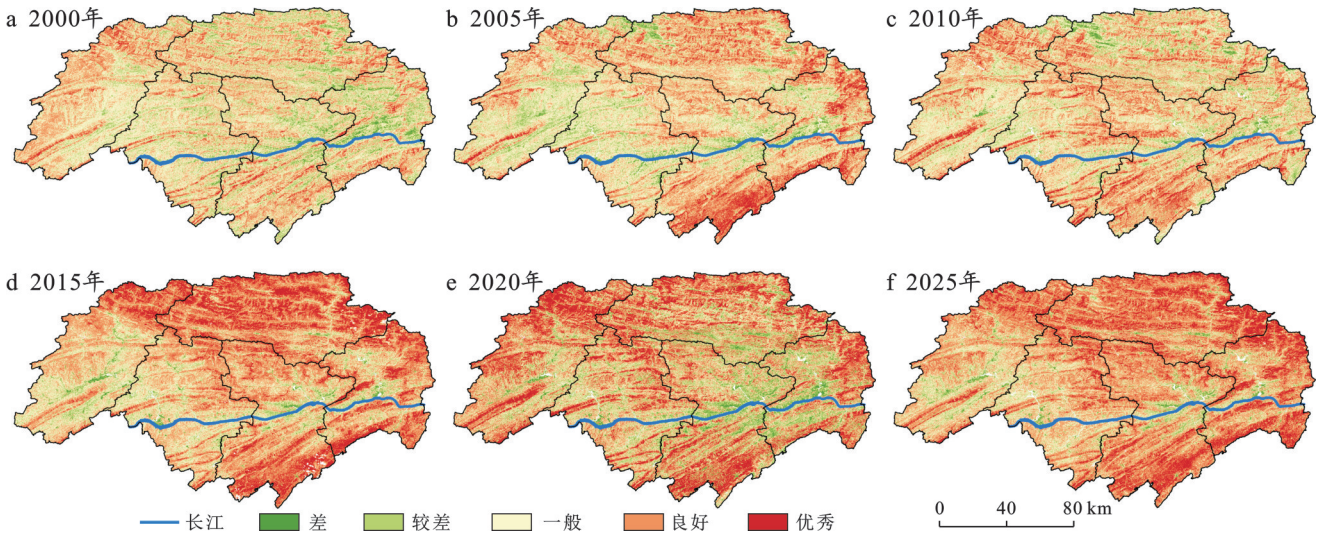


图 3 2000—2025 年三峡库区重庆段 RSEI 等级分布

Fig.3 Distribution of RSEI grades at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

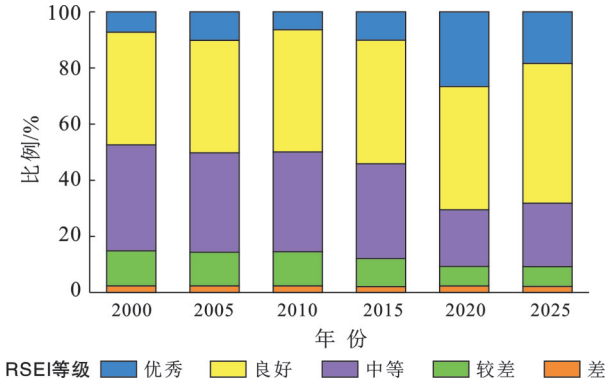


图 4 2000—2025 年三峡库区重庆段 RSEI 各等级面积及占比统计

Fig.4 Statistics on area and proportion of each RSEI grade at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

表 3 InVEST 模型参数率定及结果校验

Table 3 InVEST model parameter calibration and result verification

模型验证	年份	模拟产水量/mm	实际产水量/mm	相对误差/%
模拟期	2011	1 271.30	1 374.85	7.53
	2012	837.81	789.74	6.09
	2013	896.44	807.59	11.00
	2014	1 256.23	1 388.53	9.53
	2015	899.67	953.85	5.68
	2016	1 010.36	1 042.46	3.08
	2017	1 461.20	1 638.74	10.83
	2018	920.36	819.38	12.32
	2019	832.43	746.93	11.45
	2020	1 273.20	1 168.74	8.94
验证期	2021	1 422.57	1 387.16	2.55
	2022	787.72	901.04	12.58
	2023	1 366.69	1 253.42	9.04
	2024	891.36	777.61	14.63

3.2.2 时空变化特征

基于已验证的 InVEST 模型，本研究系统揭示了 2000—2025 年研究区水源涵养量的时空变化规律（图 5）。将水源涵养量按 100 mm 为间隔划分为 5 个等级。结果表明，研究区水源涵养量具有“先降后升，波动显著”的鲜明特征。2000 年水源涵养量高达 631 mm，随后持续下降至 2010 年的最低值 311 mm，之后逐步回升，2020 年达到峰值 645 mm，2025 年略降至 518 mm，整体呈“V”形波动趋势。在空间格局上，水源涵养量表现出明显的县域分异。巫溪县的水源涵养量始终居于最高水平，但年际波动最为剧烈；奉节县的水源涵养量次之，其变化趋势与巫溪县相似；云阳县、巫山县与开州区的水源涵养量相对较低；其中在多数年份，云阳县的水源涵养量略高于开州区。研究区水源涵养量的时序波动与年降水量变化高度同步，表明降水是影响其波动的重要驱动因素。

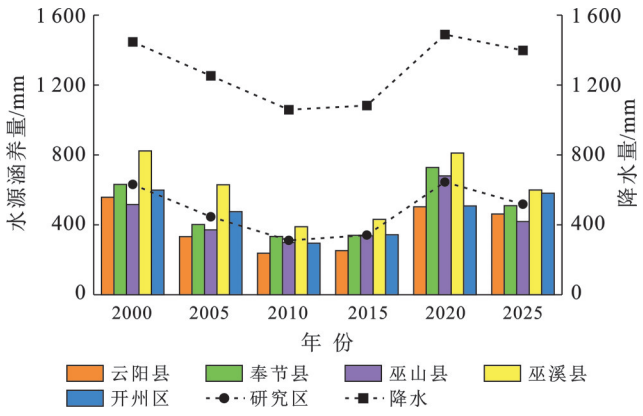


图 5 2000—2025 年三峡库区重庆段水源涵养量时序变化

Fig.5 Temporal changes in water conservation at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

基于长时间序列分析,研究区水源涵养等级结构发生系统性空间重构与优化(图 6,图 7)。空间格局呈现“东北高,西南低”的分布特征。高等级区域主要集中在巫溪县和奉节县,面积由 2000 年的 13 542 km²降低至 2025 年的 11 424 km²,整体减少约 15.6%。在 2010 年达到最低值,此后有所回升;较高等级区域面积在 2 300~2 700 km²区间内反复波动;中等级区域广泛集中在开州区西部及县域交界地带,在 2005 年达到峰值后波动下降;较低等级区域面积由 2000 年的 2 222 km²波动增至 2025 年的 2 568 km²,增幅约 15.5%;低等级区域则位于开州区与云阳县西南部,面积在 2025 年降低至 308 km²。

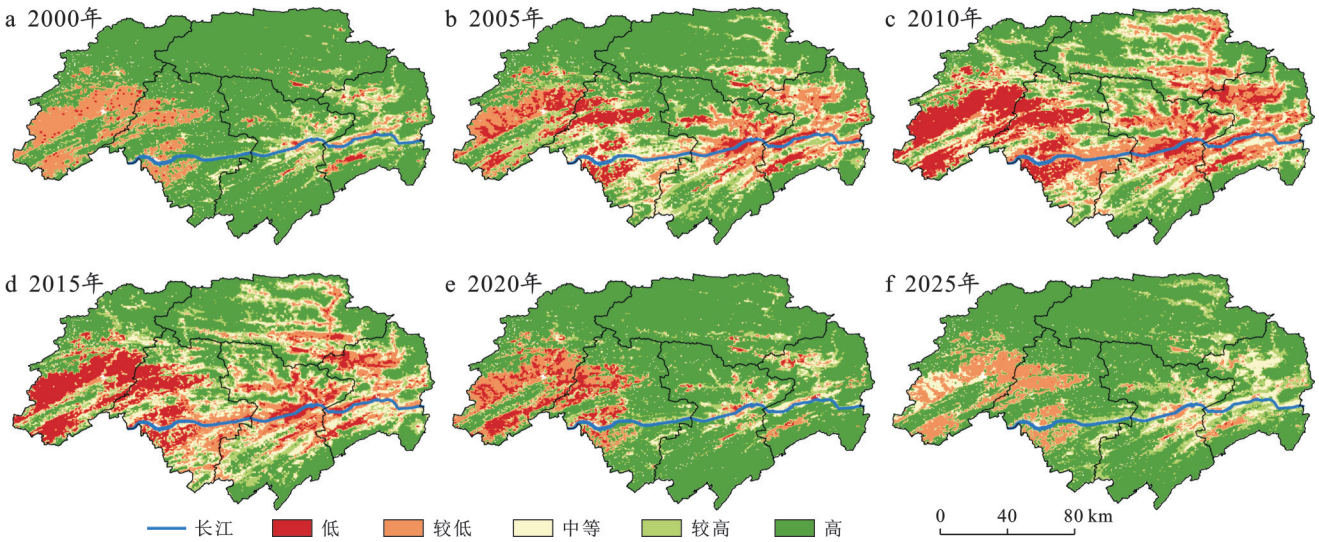


图 6　2000—2025 年三峡库区重庆段水源涵养量等级分布

Fig.6　Hierarchical distribution of water conservation capacity at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

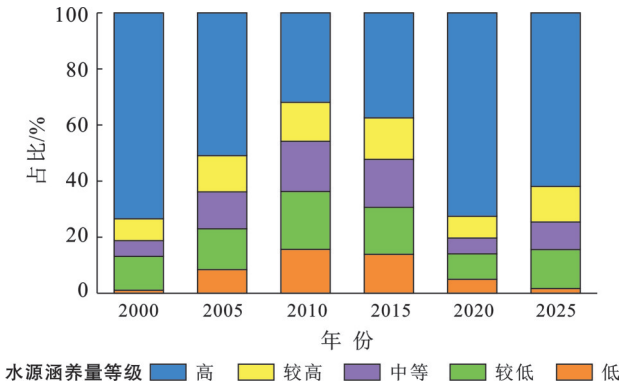


图 7　2000—2025 年三峡库区重庆段水源涵养量各等级面积及占比统计

Fig.7　Statistics on area and proportion of each water conservation grade at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

2000—2025 年研究区平均耦合协调度为 0.396,整体处于轻度失调水平;耦合协调度呈波动上升变化,于 2000 年的 0.418 波动下降至 2010 年的低谷 0.359,此后逐步回升,至 2025 年为 0.414。从协调等级演变来看,镇域单元类型的数量结果发生显著变化(表 4),具体表现为严重失调单元数量在 2~5 个之间波动,未完全消失;中度失调单元数先增后减;轻度失调单元数波动最为剧烈,由 2000 年的 55 个增至 87 个,随后锐减至 2025 年的 50 个;濒临失调单元数整体增加,由 54 个增至 2025 年的 75 个,并在 2020 年达到峰值;勉强协调单元数在 2015 年降低至 2 个后,在 2020 年大幅反弹至 44 个,后回落至 28 个。实现了突破性增长,从 13 个增加至 84 个,其中 2000—2010 年增幅尤为突出。尽管各等级数量年际波动显著,但对比初期和末期,失调类单元(严重、中度、轻度)总数减少,而协调类单元(濒临失调、勉强协调)总数增加,反映出系统结构在一定程度上的优化趋势。

表 4　2000—2025 年三峡库区重庆段 RSEI 与水源涵养量耦合协调等级划分

Table 4　Classification of coupling coordination grades of RSEI and water conservation capacity at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

等级类型	分级标准	镇级单位数量					
		2000年	2005年	2010年	2015年	2020年	2025年
严重失调	[0.1,0.2]	2	5	2	2	1	2
中度失调	(0.2,0.3]	18	24	42	23	18	17
轻度失调	(0.3,0.4]	55	76	74	87	23	50
濒临失调	(0.4,0.5]	54	54	46	58	86	75
勉强协调	(0.5,0.6]	43	13	8	2	44	28

在空间格局方面,耦合协调度呈现“四周高,中间低”的分布特征(图 8)。勉强协调、濒临失调区域

主要分布在研究区西北部和东南部。值得注意的是，沿长江流域周边的镇级单位仍存在轻度至濒临失调现象，反映出人类活动密集区仍是生态协同提升的重点区域。

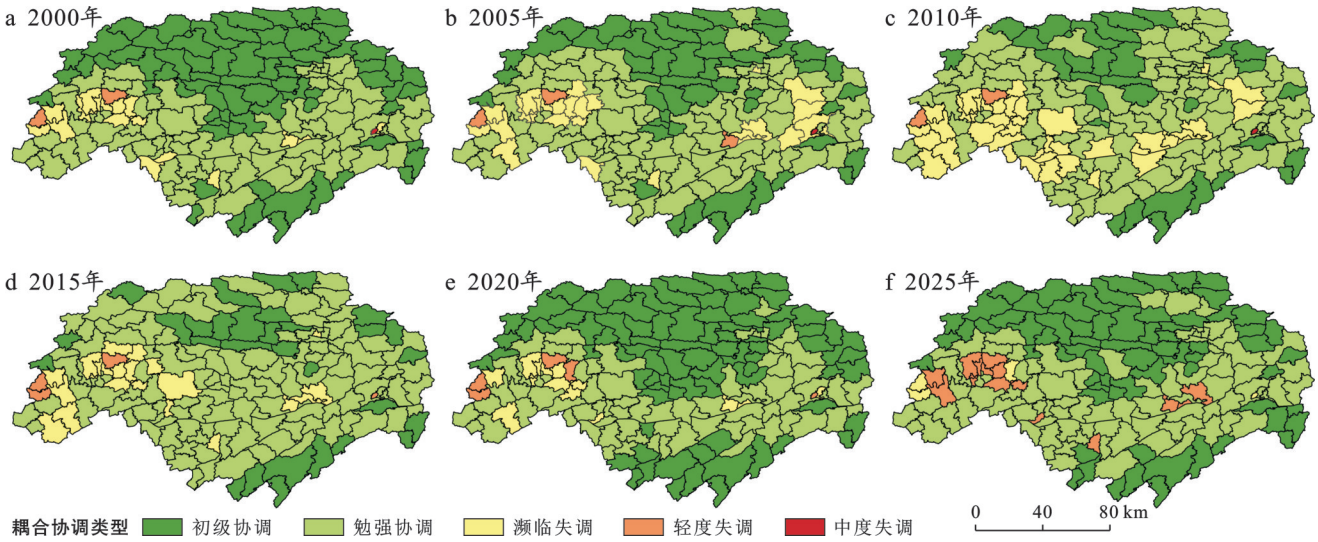


图 8 2000—2025 年三峡库区重庆段 RSEI 与水源涵养量耦合协调类型空间分布

Fig.8 Spatial distribution of coupling coordination types of RSEI and water conservation at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

3.3 遥感生态指数与水源涵养量的空间关联

为揭示 RSEI 与水源涵养量在镇域尺度上的空间依赖关系，本研究进一步进行了局部空间自相关分析。经 999 次置换检验（p=0.001），各年份的 Moran's I 指数均通过显著性检验，分别为 0.454，0.470，0.509，0.416，0.576，0.504。这表明研究区 RSEI 与水源涵养量存在稳定的空间正相关关系。从时序演变来看，空间关联强度呈现波动性变化。其中，2010 年的相关性最强，2015 年的相关性最弱。

局部自相关分析进一步识别出 4 类空间关联模式（图 9）。其中，“高-高”聚类为主要类型，集中分布于巫溪县大部分镇域，表明该区域生态质量与水源涵养能力协同优势显著；“低-低”聚类单元数量相对稳定，研究初期与末期数量基本持平。“高-低”与“低-高”聚类其单元数量始终很少。从空间分布特征来看，“低-低”聚类分布在开州区，保护措施较好的镇域形成“高-高”聚类集中分布在巫溪县，少数镇域分布在长江流域以南区域；保护措施较差的镇域形成“低-高”与“高-低”聚类。总体而言，研究区生态质量与水源涵养功能的协同关系在空间上表现为稳定的正相关格局，且主要的集聚类型在空间分布和数量上均未发生系统性扩张或缩减。

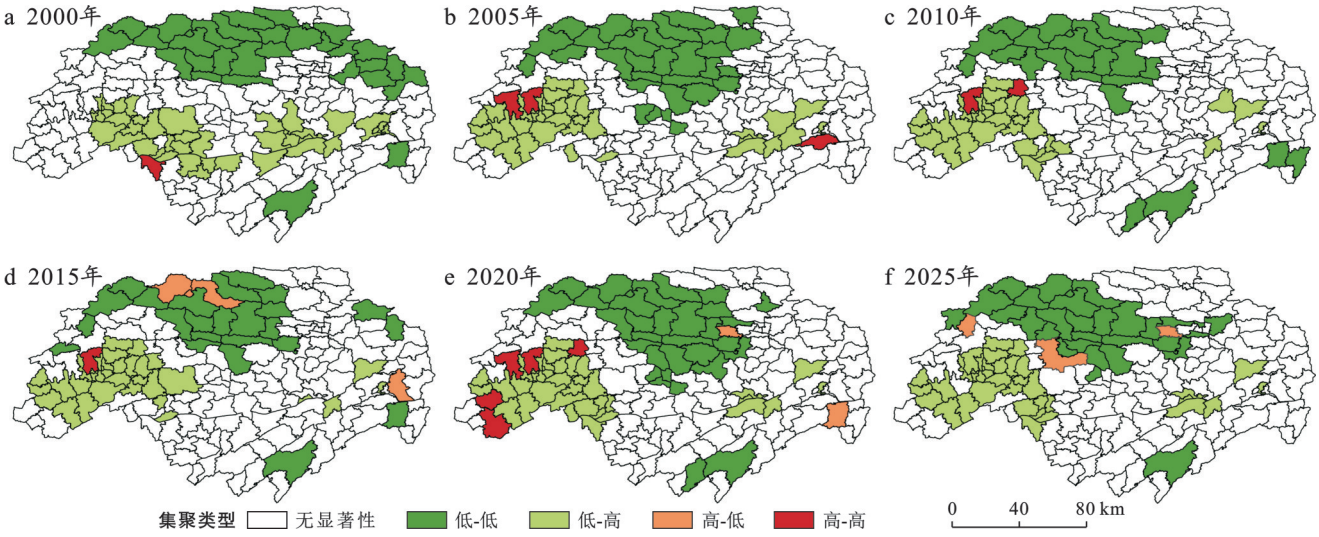


图 9 2000—2025 年三峡库区重庆段 RSEI 与水源涵养量 LISA 聚类

Fig.9 LISA clustering of ecological environment quality and water conservation capacity at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

3.4　耦合协调关系影响因素探测

3.4.1　单因子探测结果

为系统辨识影响RSEI与水源涵养量协同发展的关键驱动因素,本研究采用地理探测器方法,选取土地利用(X_1)、高程(X_2)、实际蒸散发(X_3)、NDVI(X_4)、人口密度(X_5)、降水(X_6)和温度(X_7)7项指标作为探测因子进行分析。各因子q值结果见图10,其6 a平均q值排序为:高程>温度>归一化植被指数>人口密度>土地利用>实际蒸散发>降水。从时序演变来看,高程与温度始终保持最强的解释力且最稳定,高程q值介于0.647~0.715之间;温度q值稳定在0.643~0.697的窄幅区间。NDVI与实际蒸散发的解释力则显著衰减,NDVI的q值由2005年峰值0.740持续下降至2025年的0.391;实际蒸散发q值也从2005年的0.496逐渐降低至2025年的0.252。人口密度的影响稳步增强,q值从2000年0.354持续上升至2025年0.529。土地利用的解释力波动显著,在2005年降至谷底0.374后,于2015年回升至0.568,2025年回落至0.485。降水在所有年份中解释力最弱,q值普遍低于0.27,表明其对研究区空间分异的驱动作用有限。

3.4.2　因子交互探测结果

本研究进一步评估了各驱动因子对RSEI与水源涵养量耦合协调度空间分异的交互影响机制,具体结果见图11。结果表明,任意两因子间的交互作用均表现为非线性增强或双因子增强,显示出显著的协同效应。在研究期内,生态-地形-气候因子间的交互持续表现出最强的解释力,其中高程∩NDVI、温度∩NDVI始终占据主导地位,其q值稳定维持在0.80左右的高水平,显著超越单因子的独立贡献,表明地形-植被与气候-植被是驱动协调度空间分异的核心机制。实际蒸散发虽独立解释力较弱,但实际蒸散发∩高程持续产生极强的协同效应,q值始终高于0.75,揭示出地形因素对蒸散发过程的关键调制作用。

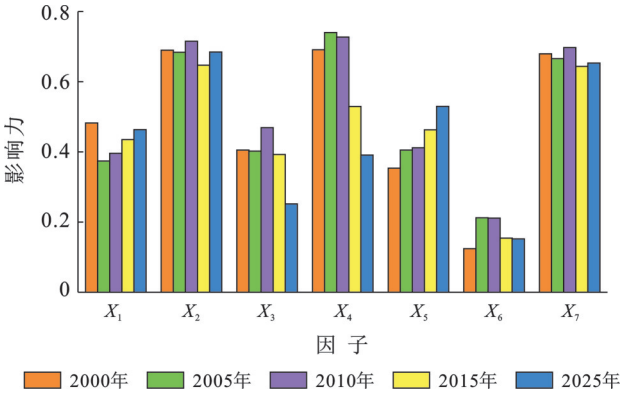


图10　2000—2025年三峡库区重庆段耦合协调度影响因素探测结果

Fig.10　Detection results of influencing factors of coupling coordination degree at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

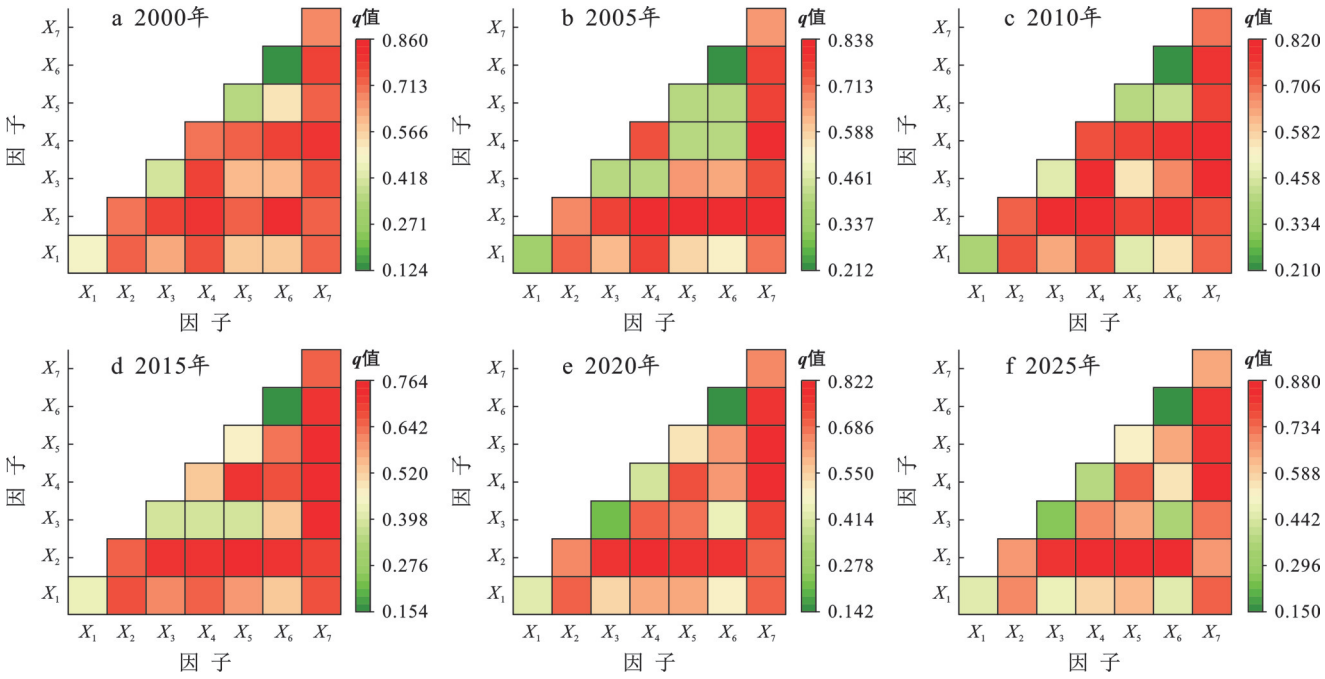


图11　2000—2025年三峡库区重庆段耦合协调因子交互探测结果

Fig.11　Interaction detection results of coupling coordination factors at Chongqing section of Three Gorges reservoir area (2000—2025)

同时,人类活动因子与自然因子的交互也表现出稳定的增强效应,如高程∩人口密度的q值持续保持在0.70以上,反映了人类活动在自然地理本底上的持续性叠加影响。尽管降水的独立解释力最弱,

但其与地形、气候因子的交互作用却表现出显著的增强效应。例如,降水∩高程在2000年与2025年达到了0.80以上,揭示了降水的空间效应高度依赖于地形背景。同时,该交互项存在明显年际波动,结合其单因子的影响力微弱且稳定,表明降水并非基础驱动力,而是通过放大其他因子的作用强度来产生阶段性、调制性的影响,凸显了极端气候事件对系统驱动格局的重要干扰。

4 讨 论

4.1 生态质量与水源涵养的演变特征

本研究全面解析了三峡库区5个重点区县生态环境质量(RSEI)与水源涵养功能的时空演变特征。研究结果表明,研究区RSEI呈现稳定上升趋势,生态环境质量整体上呈现“中等为主”向“良好主导”的转变,这一发现与焦欢等[24]和王永祥等[25]的研究成果吻合,验证了RSEI模型在三峡库区生态质量评估中的适用性。同时,研究区水源涵养呈先下降后回升的演变态势,这与杨佳等[26]与周瑞娇等[27]对三峡库区生态系统服务功能的结论相符,证实了该区域生态水文功能正在逐步恢复。

从时间变化角度来看,RSEI的持续提升与水源涵养量的波动上升形成了鲜明对比。RSEI之所以能够实现稳定增长,主要得益于2000年以来实施的退耕还林等一系列生态工程[28],这些工程通过系统性的植被恢复有效遏制了水土流失,为生态系统质量的整体提升奠定了坚实基础。此外,区域经济发展也为生态修复提供了资金保障,绿色发展理念的深入推进从政策层面确保了生态保护的持续性[29]。水源涵养量的波动特征反映了其对气候变化,特别是降水格局的高度敏感性;而地理探测器的结果则进一步揭示,两者协同关系的空间格局由生态-地形等本底因子耦合控制,降水则通过其普遍强劲的交互作用参与格局塑造,并在极端年份成为关键扰动源。

在空间分布上,生态质量与水源涵养功能之间存在显著的协同关系。RSEI高值区与水源涵养高值区在空间上高度吻合,特别是在森林覆盖度较高的山区表现得尤为明显。这种空间耦合关系揭示了植被在生态水文过程中的核心纽带作用,植被恢复不仅通过增加生物量和改善生态系统结构直接提升生态质量,还通过冠层截留、枯落物持水和根系固土等生态过程显著增强生态系统的水源涵养能力。随着生态修复工程的持续推进,这种协同关系在研究期间表现出不断加强的趋势,体现了生态恢复过程中植被结构与功能协同演进的正反馈机制。

4.2 耦合协调度的形成机制与调控启示

各驱动因子通过不同的生态过程影响协调度格局[30]。高程因子的持续主导作用,体现了地形通过调控人类活动强度产生关键影响:高海拔区域因人类干扰较低、生态保护较好,易于形成生态质量与水源涵养功能的正向协同;而低海拔区域受强烈的人类活动影响,加剧了协调度的垂直梯度差距。温度因子的稳定高影响力反映了能量基础对生态水文过程的整体制约,其空间格局直接决定了植被生理活动和水分循环的基本强度。NDVI因子解释力呈先增后降的趋势,说明了植被恢复存在阶段性转变:恢复初期,覆盖度提升直接推动生态质量与水源涵养功能同步提升;当覆盖度达到临界值后,二者协同关系更多受植被结构与功能性状调控。

在因子交互层面,生态-地形-气候因子的协同效应展现出了比单因子更强的解释力。高程与温度的交互通过地形对水热条件的再分配,构建了协调度的宏观格局框架;其与植被的联动则体现了生物对能量水分循环的反馈调节,这种多级联动的耦合机制是协调度空间分异的本质特征。值得注意的是,实际蒸散发虽单因子影响力较弱,但其与高程的强交互效应凸显了地形因子对“植被-水分”关系的关键调制作用——在不同的地形条件下,相同的蒸散过程可能对应着截然不同的生态水文协调状态。

基于上述机制解析,本研究提出以下生态调控建议:首先,需要根据海拔梯度的差异,建立不同的管控体系,在高海拔区域加强自然恢复过程的完整性保护,在低海拔区域重点调控人类活动的强度和方式。其次,植被恢复策略需要从追求数量指标转向注重质量提升,可通过优化群落结构和物种组成来增强生态系统的协同功能。此外,生态保护应特别关注地形-水文过程的耦合特征,在地形转换带等关键区域实施针对性保护措施。最终统筹土地利用与水资源管理,重视景观格局对生态质量与服务功能的协同维持作用,优化土地利用结构,促进“质-能”长期协调。

5 结 论

(1) 2000—2025年研究区RSEI呈现持续改善态势,RSEI均值由2000年的0.53提升至0.65,实现了从“中等”等级向“良好”等级的结构性跨越。水源涵养量总体呈“先降后升,波动显著”的趋势,多年均值为482 mm,空间上表现出“东北高、西南低”的格局。

(2) 2000—2025年研究区生态质量与水源涵养功能的协调关系显著增强,镇域协调类型以“濒临失

调”为主,空间上形成“四周高,中间低”的分布模式,局部空间自相关分析表明高-高聚类为主要关联类型。

(3) 2000—2025年研究区内高程与温度是驱动协调度空间分异的主导因子。高程解释力的持续增强凸显了生态水文过程的海拔梯度效应,温度则作为稳定的热力基础调控系统协同演进。人类活动因子中,人口密度与土地利用变化对协调性构成持续胁迫。自然因子间交互作用进一步放大了解释力,揭示出多因子耦合是协调度空间格局形成的深层机制。

6　展　望

本研究基于镇域尺度,通过空间聚合表征乡镇单元的整体状态,便于跨乡镇比较及重点治理区识别,但同时也平滑了内部异质性,使耦合协调度难以反映镇内细节差异。因此,研究结果主要服务于宏观靶向决策(如确定优先治理乡镇及适配政策类型),而对镇内具体空间的生态精细化设计支撑有限。未来可构建“像元-村域-镇域”多尺度嵌套框架,将镇域分析结果向更微观尺度延伸,以揭示内在机理,从而贯通从宏观识别到微观实施的决策链条。数据方面,部分时段依赖预测值校正,虽经处理仍可能引入不确定性;后续可融合多源遥感与地面观测数据,提升参数反演精度。方法上,建议通过多模型对比、参数敏感性分析及本地实测数据率定等方式,优化模型的区域适用性与模拟精度。

参考文献(References)

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

[2] 王云飞,叶爱中,乔飞,等.水源涵养内涵及估算方法综述[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(6):1041-1071.
Wang Yunfei, Ye Aizhong, Qiao Fei, et al. Review on connotation and estimation method of water conservation [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2021,19(6):1041-1071.

[3] 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 Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(24):7853-7862.

[4] 王恒恒,王佳蓉,侯嘉烨,等.基于SA-RSEI模型的西北地区生态环境质量时空变化及驱动因素[J].生态学杂志,2025,44(11):3852-3863.
Wang Hengheng, Wang Jiarong, Hou Jiaye, et al. Spatiotemporal variations and driving factors of ecological environment quality in the northwest China based on SA-RSEI model [J]. Chinese Journal of Ecology, 2025, 44(11):3852-3863.

[5] 张萍,庞咏,陈庆松,等.基于RSEI模型的滇西北高山峡谷区生态环境质量动态监测及驱动因子分析[J].自然资源遥感,2025,37(5):243-253.
Zhang Ping, Pang Yong, Chen Qingsong, et al. Dynamic monitoring and driving factor analysis for eco-environmental quality in alpine gorges of northwest Yunnan based on a remote sensing ecological index model [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025,37(5):243-253.

[6] 马林,梁勇,张雅芹,等.基于RSEI的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J].水土保持研究,2024,31(2):389-400.
Ma Lin, Liang Yong, Zhang Yaqin, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the eco-environment quality of different land covers in Shandong Province based on RSEI [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024,31(2):389-400.

[7] Joshi G, Negi G C S. Quantification and valuation of forest ecosystem services in the western Himalayan region of India [J]. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2011, 7(1):2-11.

[8] 王东东,贾仰文,牛存稳,等.基于分布式水文模型的水源涵养不同功能评估方法:以渭河涵养区为例[J].生态学报,2024,44(10):4342-4352.
Wang Dongdong, Jia Yangwen, Niu Cunwen, et al. Evaluation method for main functions of water retention based on WEP-L model: a case of water retention area in Wei River [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4342-4352.

[9] Da Silva A C, Armindo R A, Prevedello C L. Splintex 2.0: A physically-based model to estimate water retention and hydraulic conductivity parameters from soil physical data [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020,169:105157.

[10] 吴佩君,刘小平,黎夏,等.基于InVEST模型和元胞自动机的城市扩张对陆地生态系统碳储量影响评估:以广东省为例[J].地理与地理信息科学,2016,32(5):22-28.
Wu Peijun, Liu Xiaoping, Li Xia, et al. Impact of urban expansion on carbon storage in terrestrial ecosystems based on InVEST model and CA: A case study of Guangdong Province, China [J]. Geography and Geo-

Information Science, 2016,32(5):22-28.

[11] 刘尧兰,温智亮,郑博福,等.生态型县域生态系统服务时空格局及其协同关系:以国家全域旅游示范区江西省武宁县为例[J].水土保持通报,2024,44(2):400-415.
Liu Yaolan, Wen Zhiliang, Zheng Bofu, et al. Spatio-temporal patterns of ecosystem services and trade-off/synergistic relationships in ecological counties: Taking national comprehensive tourism demonstration zone at Wuning County, Jiangxi Province as an example [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(2):400-415.

[12] 许丽婷,刘海红,黄丽洁,等.2000—2020年汾河流域生态环境与水源涵养时空变化[J].干旱区研究,2023,40(2):313-325.
Xu Liting, Liu Haihong, Huang Lijie, et al. Spatial and temporal changes of ecological environment and water conservation in Fenhe River basin from 2000 to 2020 [J]. Arid Zone Research, 2023,40(2):313-325.

[13] 曹源.渭河流域水源涵养功能与生态环境质量动态监测评价[D].甘肃 兰州:西北师范大学,2024.
Cao Yuan. Dynamic monitoring and evaluation of water source conservation function and ecological environment quality in the Wei River basin [D]. Lanzhou, Gansu: Northwest Normal University, 2024.

[14] 胡馨怡,肖作林,秦川,等.基于PLUS-InVEST模型的三峡库区土地利用变化与土壤侵蚀多情景预测[J].水土保持学报,2025,39(6):106-117.
Hu Xinyi, Xiao Zuolin, Qin Chuan, et al. Multi-scenario prediction of land use changes and soil erosion in Three Gorges reservoir region based on PLUS-InVEST model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(6):106-117.

[15] 曹华盛,李进林.三峡库区水系形态分形特征及地貌发育指示[J].科技通报,2016,32(9):30-34.
Cao Huasheng, Li Jinlin. Fractal characteristics of river system morphology and indication of landscape evolution in the Three Gorges reservoir area, China [J]. Bulletin of Science and Technology, 2016,32(9):30-34.

[16] 文雯,李阳兵,李睿康,等.三峡库区腹地土壤侵蚀动态演变研究[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):544-555.
Wen Wen, Li Yangbing, Li Ruikang, et al. Temporal-changes in hinterland soil erosions within Three Gorges reservoir area [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018,27(3):544-555.

[17] 周苹苹,罗艺,宋小燕,等.基于InVEST-PLUS模型的陕西省水源涵养量估算及预测[J].水土保持学报,2024,38(3):187-194.
Zhou Pingping, Luo Yi, Song Xiaoyan, et al. Estimation and prediction of water conservation capacity in Shaanxi Province based on the InVEST-PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024,38(3):187-194.

[18] Donohue R J, Roderick M L, McVicar T R. Roots, storms and soil pores: Incorporating key ecohydrological processes into Budyko's hydrological model [J]. Journal of Hydrology, 2012,436/437:35-50.

[19] 游松财,邸苏闯,袁晔.黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J].自然资源学报,2009,24(3):545-552.
You Songcai, Di Suchuang, Yuan Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau region [J]. Journal of Natural Resources, 2009,24(3):545-552.

[20] 刘越,李雨珊,单姝瑶,等.甘肃祁连山国家级自然保护区水源涵养量的时空变化[J].草业科学,2021,38(8):1420-1431.
Liu Yue, Li Yushan, Shan Shuyao, et al. Spatiotemporal variability in the water conservation amount in Gansu Qilian Mountain National Nature Reserve [J]. Pratacultural Science, 2021,38(8):1420-1431.

[21] Manyame C, Morgan C L, Heilman J L, et al. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions [J]. Geoderma, 2007,141(3/4):407-415.

[22] 王淑佳,孔伟,任亮,等.国内耦合协调度模型的误区及修正[J].自然资源学报,2021,36(3):793-810.
Wang Shujia, Kong Wei, Ren Liang, et al. Research on misuses and modification of coupling coordination degree model in China [J]. Journal of Natural Resources, 2021,36(3):793-810.

[23] 贾天朝,文琦,施琳娜,等.黄河流域县域水源涵养与人类活动时空耦合及其空间关联[J].环境科学,2025,46(8):5112-5121.
Jia Tianchao, Wen Qi, Shi Linna, et al. Spatiotemporal coupling and spatial correlation between water conservation and human activities in counties of the Yellow River basin [J]. Environmental Science, 2025,46(8):5112-5121.

[24] 焦欢,何宗,郭强,等.基于遥感生态指数的三峡库区(重庆段)生态环境质量时空演变及驱动机制研究[J].三峡生态环境监测,2025,10(3):55-66.
Jiao Huan, He Zong, Guo Qiang, et al. Spatiotemporal evolution and driving mechanisms of ecological environment quality in the Three Gorges reservoir area (Chongqing section) based on remote sensing ecological index [J]. Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges, 2025,10(3):55-66.

(下转第432页)