

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.04.015

谢海浪, 赵伟, 江雅婷, 等. 城镇生态化视角下三峡库区人口—经济—环境(PEE)耦合协调发展[J]. 水土保持学报, 2024, 38(4): 209-221, 235.

XIE H L, ZHAO W, JIANG Y T, et al. Coupling coordination of population—economic—environmental (PEE) in the Three Gorges Reservoir Area from the perspective of urban ecologicalization [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(4): 209-221, 235.

城镇生态化视角下三峡库区人口—经济—环境(PEE)耦合协调发展

谢海浪^{1,3}, 赵伟^{2,3}, 江雅婷^{1,3}, 侯孟彬¹

(1.重庆工商大学环境与资源学院, 重庆 400067; 2.重庆工商大学公共管理学院, 重庆 400067;
3.重庆工商大学成渝地区双城经济圈建设研究院, 重庆 400067)

摘要: [目的] 探索 PEE 系统的互动耦合特征, 可为三峡库区城镇生态化发展提供理论支撑和量化依据。[方法] 在 2000—2020 年三峡库区 PEE 系统综合评价基础上, 运用耦合协调度模型、引力模型和障碍度模型对系统耦合协调度的时空演化特征、空间联系特征及主要障碍因子进行实证研究。[结果] (1) 2000—2020 年库区 PEE 系统综合发展水平呈逐步上升趋势; (2) 研究期内系统的耦合协调度基本不变, 协调等级不高, 协调类型呈“西南—东北”“中部—北部”的空间特征, 总体呈良性上升趋势; (3) 邻近区域系统耦合协调度的空间相关性存在显著的正自相关, 空间联系总量总体上升, 空间联系强度较弱, 且随着地理距离增大而逐渐减弱; (4) 各因素对系统发展影响具有趋同性, 经济和人口系统是主要制约因子系统, 而环境系统的障碍度逐年增加。[结论] 库区 PEE 系统耦合协调发展水平总体向好, 区域差异缩小, 未来应重点从单一系统优化向多元系统协调出发, 从系统自身与区域协同 2 个角度进行调整, 加强政策制度调控, 科学探索发展路径。

关键词: 城镇生态化; 耦合协调发展; 人口—经济—环境; 时空演化; 三峡库区;

中图分类号: X821; X321 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)04-0209-13

Coupling Coordination of Population-Economic-Environmental (PEE) in the Three Gorges Reservoir Area from the Perspective of Urban Ecologicalization

XIE Hailang^{1,3}, ZHAO Wei^{2,3}, JIANG Yating^{1,3}, HOU Mengbin¹

(1. College of Environment and Resources, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 2. School of Public Administration, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 3. Institute For Chengdu-Chongqing Economic Zone Development, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: [Objective] Investigating the interactive coupling characteristics of the PEE system can provide theoretical support and quantitative basis for the ecological advancement of urban areas in the Three Gorges Reservoir Area. [Methods] Based on a comprehensive evaluation of the PEE system in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020, this study utilized the coupling coordination degree model, gravity model, and obstacle degree model to empirically investigate the spatiotemporal evolution characteristics, spatial connectivity features, and main obstacle factors of the system's coupling coordination degree. [Results] (1) The comprehensive development level of the PEE system in the reservoir area had shown a gradual increase from 2000 to 2020. (2) During the study period, the coupling and coordination degree of the system was basically unchanged, with a not very high level of coordination. The type of coordination showed the spatial characteristics of “Southwest-Northeast” and “Central-North”, with an overall benign upward development trend. (3) The spatial correlation of the coupling and coordination degree of the system in neighboring regions had a significant positive autocorrelation, the total spatial linkage was rising in general,

收稿日期: 2024-01-10 修回日期: 2024-02-28 录用日期: 2024-03-10 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-05-10

资助项目: 重庆市社科规划重大项目 (2023ZDSC11); 重庆市社科规划重点项目 (2022MZD09); 重庆工商大学研究生科研创新项目 (yjscxx2024-284-160); 国家社会科学基金项目 (20BMZ148)

第一作者: 谢海浪 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境科学与资源利用研究。E-mail: xiehailang0509@163.com

通信作者: 赵伟 (1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事土地与环境规划研究。E-mail: zw200802@ctbu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

the spatial linkage strength was weak, and it was gradually weakening with the increase of the geographic distance. (4) The influence of each factor on the system's development had a convergence, with the economic and demographic system being the main constraining subsystems, and the obstacle degree of the environmental system was increasing year by year. [Conclusion] The overall level of coupled and coordinated development of the PEE system in the reservoir area was improving, and regional differences were narrowing. In the future, the focus should be on the optimization of a single system to the coordination of multiple systems, and adjustments should be made from both the perspectives of the system itself and regional synergy, in order to strengthen policy and institutional regulation and scientifically explore the development path.

Keywords: urban ecologicalization; coupling and coordinated development; population-economic-environment; space-time evolution; Three Gorges Reservoir Area

Received: 2024-01-10

Revised: 2024-02-28

Accepted: 2024-03-10

Online(www.cnki.net): 2024-05-10

党的二十大报告强调“高质量发展”,提出要“深入实施新型城镇化战略”,城镇生态化作为新型城镇化的重要组成部分,是推动高质量发展的重要抓手^[1]。习近平总书记指出,“要牢牢把握人口与社会、经济、环境系统的相互关系”^[2],PEE(P指人口、E指经济、E指环境,简称“PEE”)系统的协调发展作为评价区域可持续发展的关键点和重要途径,是实现城镇生态化的重要体现,更是生态文明理念的具体实践,这充分体现 PEE 系统耦合协调发展的必要性^[3]。三峡库区作为我国重要的生态功能区和水源涵养区,承担着国家赋予的生态建设和环境保护的重大使命,其生态地位重要而特殊^[2]。同时,作为“一圈两群”发展战略的重要组成部分,积极全面融入共建“一带一路”,既是提升区域竞争力、影响力,又是推动高质量发展的重大历史机遇^[4]。库区在新型城镇化战略中逐步向着良性运行和协调发展的格局迈进^[5],但库区人多地少、产业“空心化”、水土流失和土壤污染、发展不平衡不充分等突出问题,加剧库区城镇生态化 PEE 系统间的矛盾^[6]。统筹推进人口、经济、环境等要素协调发展,在落实推进国务院关于《重庆市国土空间总体规划(2021—2035 年)》的批复中明确强调三峡库区应积极促进城乡功能互补,完善城市功能结构和空间布局,促进人口发展、经济建设、环境保护全方位提升和生态文明建设具有重要意义^[7]。

近年来,学术界围绕 PEE 系统耦合协调等问题展开了相关研究,取得一定成果,梳理已有研究,一是从不同视角开展研究,如双碳目标^[8]、高质量发展^[9]、系统动力学^[10]等;二是从不同空间尺度开展研究,如国家^[11]、流域^[12]、省域^[13]等;三是运用不同方法模型进行评估分析,如耦合协调度模型^[14]、空间计量模型^[15]、重心模型^[16]。已有研究为 PEE 系统协调研究提供有力的理论基础、技术支持和成果借鉴,但依然

存在一定程度的不足:一是在新型城镇化背景下,缺乏以城镇生态化发展为目标导向的研究框架构建和 PEE 系统学理分析;二是研究区域多聚焦城市群、都市圈和流域,对于三峡库区这样的特殊地理单元,研究成果相对较为薄弱。

基于此,本文基于 2000—2020 年三峡库区 26 个区县面板数据,构建城镇生态化发展目标导向下的 PEE 研究框架和耦合协调评价体系,并对城镇生态化概念内涵与 PEE 系统交互机理进行学理分析;利用熵权法测算 PEE 系统的发展水平和耦合协调度,并借助耦合协调度模型、莫兰指数、障碍度模型等方法探索系统的时空演化特征、空间联系特征和主要障碍因子,为库区夯实基础增长发展动能、深化区域内外开放协作、完善政策制度保障支撑的区域生态可持续发展提供决策支撑(图 1)。

1 概念解析与 PEE 系统机理分析

城镇生态化是新型城镇化的一种生态发展理念,旨在城镇建设发展进程中实现人与自然和谐共生的现代化。以优化城镇用地格局、产业结构、交通出行、基础设施、能源体系、建筑体系、消费方式为出发点和归宿,以实现城镇经济、社会和生态效益的均衡协调发展为核心,综合考虑人口、经济、环境等多方面因素,全面构建科学发展、集约高效、功能完善、社会和谐、环境友好的绿色城镇。

城镇生态化与 PEE 系统交互关系复杂,彼此相互影响、共同构建城镇可持续发展的框架(图 2)。城镇生态化作为目标指引和规划约束,是 PEE 系统耦合协调发展的前提,而 PEE 作为城镇生态化发展的关键要素构成^[2,17],决定着城镇生态化的发展方向和结果^[18]。在城镇生态化发展过程中,需要协调和均衡人口、经济和环境,实现可持续发展目标。而城镇

生态化发展视角下的 PEE 系统是多元复杂的动态开放系统^[9,19],相互影响制约并受政策制度的调控,需要在城镇规划和管理中统筹考虑。人口是城镇生态化发展的出发点^[20],是系统的主体。通过向系统提供人才、知识与技术来促进经济发展与生态环境质量的提高,但不协调的人口规模、结构、质量和需求可能会造成更高的就业压力、资源压力和环境压力^[5,21];经济是城镇生态化发展的基本内容,是系统的核心。通过向系统提供生活供给、科学技术与资金投入,其水平、结构与质量决定城镇的就业机会、生活条件和环境状况,但同时也可能带来资源消耗和环境破坏;环境作

为城镇生态化发展的物质基础和目的,是系统的支撑^[21]。城镇生态化的核心目标之一是保护和改善生态环境。环境质量的提升或恶化直接影响人口的生产生活质量、经济的可持续发展和城镇生态化建设的进程与质量。系统内部结构的合理性和子系统间交互作用的协调性与有效性决定系统生态发展的状态,主要存在增长促进型、阻碍退步型和先阻碍后促进的倒“U”形等 3 种交互关系^[22]。当变化超过阈值后,系统处于宏观有序状态,实现协调发展。因此,实现人口、经济和环境的良好交互,是系统协调可持续发展前提,更是实现城镇生态化发展的关键(图 2)。

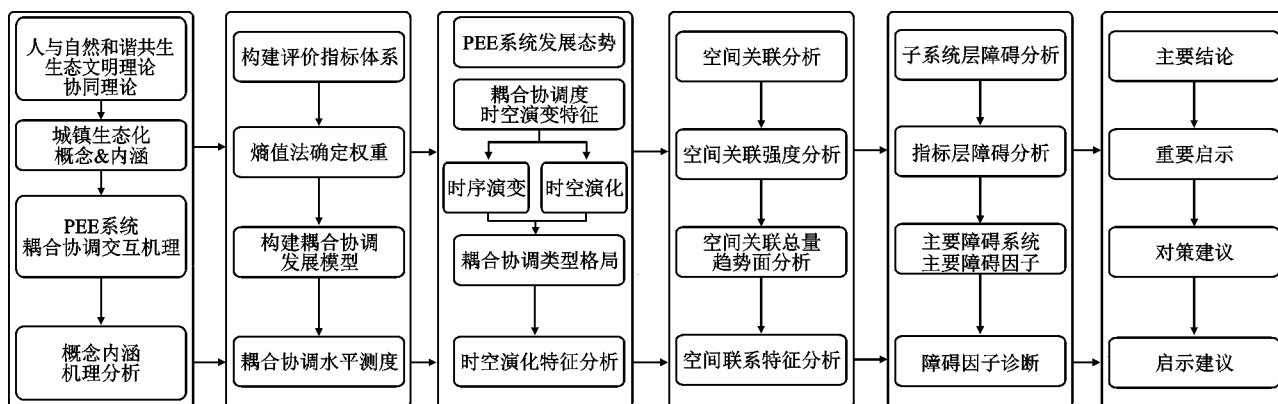


图 1 研究框架

Fig. 1 The framework of the study

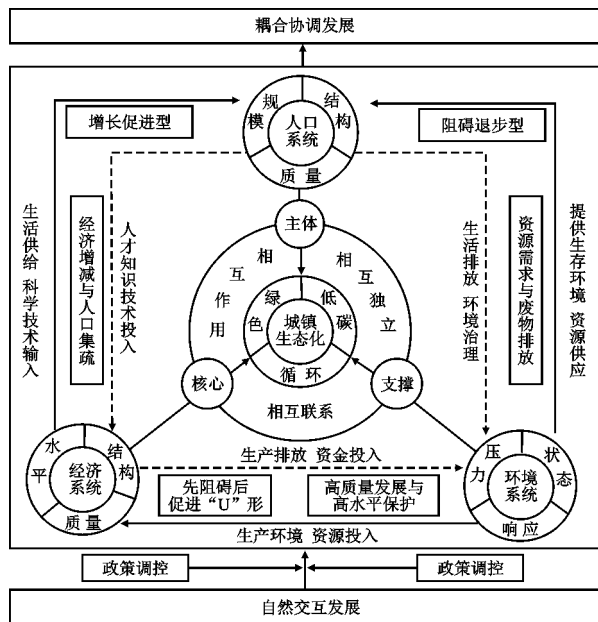


图 2 PEE 系统耦合协调发展机理

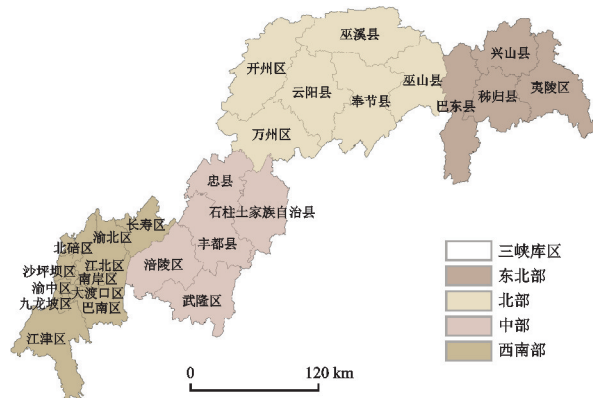
Fig. 2 Coupling coordination mechanism between PEE

2 研究区域与方法

2.1 研究区概况

三峡库区(28°56′00″—31°50′00″N, 106°20′00″—110°30′00″E)位于我国中西部结合地带,在经济地理上连南引北、承东启西,具有特殊的地理区位和战略地位,包括重庆市 22 个区县和湖北省恩施州、宜昌市

4 个区县,总面积约 5.7 万 km²^[6,13]。2020 年末库区常住人口 2 225.59 万,地区生产总值 17 577.14 亿元。当前,库区处在新的历史起点^[2,14],成渝地区双城经济圈、西部陆海新通道建设等国家重大战略落地机遇,以及东西部协作、定点帮扶等国家政策支持,为集大山区、大农村、大库区于一体,城乡空间品质相对落后、城镇缺绿少绿现象突出、城镇体系不健全、发展仍既不充分也不平衡的库区推动 PEE 系统协调发展,促进城乡功能互补,推进产业、居住和公共服务设施协同配置,完善城镇生态化建设提供有利契机(图 3)。



注:基于自然资源部地图技术审查中心标准地图服务网的审批号为 GS(2019)3266 号的标准地图绘制,底图边界无修改。

图 3 三峡库区行政区划

Fig. 3 The location of Three Gorges Reservoir Area

2.2 研究方法

2.2.1 指标构建 借鉴已有研究^[3,8,23],遵循代表性、科学性、可获得性等原则,围绕人口的规模、结构和质量,经济的水平、结构和质量与环境的压力、状态和响应等内容,结合库区发展实际,构建三峡库区城镇生态化 PEE 系统耦合协调发展评价指标体系,具体指标体系见表 1。

表 1 PEE 系统指标体系

Table 1 The index system of coordinated development of PEE system

系统名称	指标	单位	指标属性	权重
人口(X)	人口总量(X1)	万	+	0.230 9
	人口自然增长率(X2)	%	+	0.041 4
	城镇化率(X3)	%	+	0.273 5
	人口密度(X4)	人/km ²	-	0.065 9
	男女性别比(X5)	%	-	0.023 5
	中小学在校学生数(X6)	人	+	0.364 8
经济(Y)	地区生产总值(Y1)	万元	+	0.142 8
	人均 GDP(Y2)	元	+	0.095 5
	二三产业比重(Y3)	%	+	0.160 2
	社会消费品零售总额(Y4)	万元	+	0.144 5
	全社会固定资产投资(Y5)	万元	+	0.358 4
	一般公共预算收入(Y6)	万元	+	0.098 6
环境(Z)	优良天数(Z1)	d	+	0.071 9
	森林覆盖率(Z2)	%	+	0.337 2
	PM _{2.5} 年均浓度(Z3)	μg/m ³	-	0.255 4
	用水总量(Z4)	亿/m ³	-	0.042 9
	化肥施用量(Z5)	t	-	0.146 4
	建设用地面积占比(Z6)	%	-	0.104 4
	城市生活垃圾无害化处理率(Z7)	%	+	0.041 8

2.2.2 数据来源与处理 本研究选取 2000—2020 年三峡库区 26 个区县为样本,包括库区西南部区县 10 个、中部 6 个、北部 6 个及东北部 4 个。数据来源于 EPS 数据库(Economy Prediction System),数据来源网址为(<https://www.epsnet.com.cn>)、重庆市县域经济数据库,数据来源网址为(<https://cqxyjj.ctbu.edu.cn/>)及 2000—2021 年《重庆市统计年鉴》^[24]《湖北省统计年鉴》^[25]及各区县统计资料,采用价格平减和缺值填充对数据进行处理。相关指标数据以 2000 年为基期采用相应价格指数进行平减处理^[8,15,21-22],以消除价格波动带来的影响。对于部分缺失数据,采用插值法进行补充。

2.2.3 研究方法 (1)熵权法。利用熵权法计算系统发展水平,公式为:

$$X'_{ij} = \begin{cases} \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} & (+) \\ \frac{\max(X_{ij}) - X_{ij}}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} & (-) \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{ij} = \sum_j^k \frac{1 - K \sum_{i=1}^m \left(\frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \cdot \ln p_{ij} \right)}{\sum_{j=1}^m d_j} \cdot X'_{ij}$$

$$(K > 0, K = 1/(\ln m), E_j \geq 0, 0 \leq P_{ij} \leq 1) \quad (2)$$

式中: X_{ij} 为指标样本值; $\max(X_{ij})$ 、 $\min(X_{ij})$ 为指标最值; P_{ij} 为指标比重; X'_{ij} 为标准值; d_j 为差异系数; U_{ij} 为系统综合水平。

(2)Kernel 密度估计。本文运用高斯核函数估计子系统的分布特征动态演进过程,相关公式见文献^[21]。

(3)耦合协调度模型。引入耦合协调度模型测算系统的耦合协调度^[8],公式为:

$$C = \left\{ \frac{(X_1 \times X_2 \times X_3)}{[(X_1 + X_2 + X_3)/3]^3} \right\}$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad T = \alpha X_1 + \beta X_2 + \gamma X_3 \quad (3)$$

式中: C 为耦合度; D 为耦合协调度; T 为综合指数; α 、 β 、 γ 为各子系统权重,一般认为各系统同等重要,因此, $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ ^[8,16]。参考已有研究^[8,22],将耦合协调度分为 5 个等级(表 2),等级越高,系统间协同促进作用越强。

表 2 耦合协调度等级划分

Table 2 Coupling coordination degree evaluation grade division

耦合协调度	协调等级	等级描述
$D \in [0.8, 1.0]$	I	PEE—良好协调
$D \in [0.6, 0.8]$	II	PEE—中度协调
$D \in [0.4, 0.6]$	III	PEE—勉强协调
$D \in [0.2, 0.4]$	IV	PEE—轻度失调
$D \in [0.1, 0.2]$	V	PEE—严重失调

(4)耦合协调度的空间相关性模型。运用空间自相关^[15]、引力模型^[23]和趋势面分析模型^[26],从空间集聚程度、交互作用情况和空间总体格局 3 个维度综合分析各区县耦合协调度的空间演化的联系,公式为:

$$R_{ij} = K \frac{E_i E_j}{T_{ij}^2} \quad (4)$$

式中: R_{ij} 为地区间的空间联系强度,值越大,空间联系程度越高; E_i 和 E_j 为耦合协调度; T_{ij} 为时间距离成本; K 为引力常数,一般为 1^[23]。

(5)障碍度模型。借助障碍度模型诊断阻碍系统耦合协调度提升的因素,公式为:

$$A_{ij} = \left[\frac{(1 - Y_{ij}) \cdot r_j \cdot w_i / \sum_{j=1}^m (1 - Y_{ij}) \cdot r_j \cdot w_i H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - Y_{ij}) \cdot r_j \cdot w_i H_j} \right] \times 100\% \quad (5)$$

$$O_{ij} = \sum A_{ij} \quad (6)$$

式中: r_j 为指标权重; w_i 为准则层权重; Y_{ij} 为指标标准化值; A_{ij} 为指标障碍度; O_{ij} 为准则层障碍度,数值越大,阻碍程度越强^[27]。

3 结果与分析

3.1 三峡库区 PEE 子系统特征

运用 Kernel 密度估计方法^[21],借助 MATLAB 7.1 绘制子系统的高斯核密度三维分布图,从密度曲线的分布位置、分布态势、分布延展性和波峰数目等关键属性分析系统特征(图 4)。结果表明,人口系统发展水平呈似“M”形的阶段性变化特征,分布曲线左移,主峰高度下降、宽度变小且存在双峰和显著的左拖尾现象,说明人口发展处于下行轨道、发展压力较大、未出现明显极化现象,但仍有较大发展空间(图 4a);经济系

统发展水平呈明显“M”形发展特征,分布曲线右移,主峰高度上升、宽度变小且存在双峰和显著的右拖尾现象,说明经济发展水平整体提升、绝对差异逐渐缩小并存在明显极化特征(图 4b);环境系统发展水平呈似“W”形变化特征,分布曲线右移,主峰高度上升、宽度变大且为单峰和存在一定的右拖尾现象,说明环境质量持续上升、但速度较缓,极化特征整体上趋于弱化、区县间差异程度逐渐降低(图 4c),说明库区各子系统发展状况整体向好、区域差异逐渐降低,与各区县发展本底和区位条件、资源环境状况密不可分。

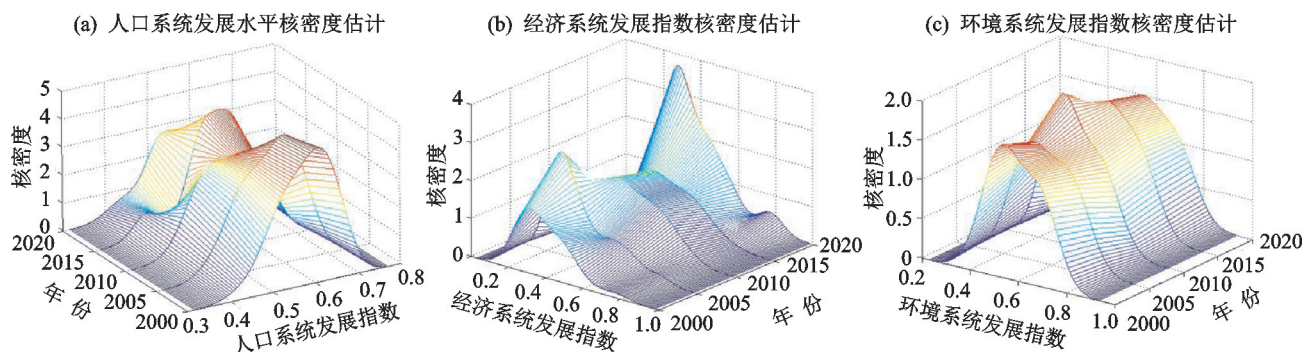


图 4 三峡库区 PEE 子系统的时空演变态势

Fig. 4 Spatial and temporal evolution trends of PEE subsystem in the Three Gorges Reservoir Area

3.2 三峡库区 PEE 系统耦合协调发展的时空演化特征

3.2.1 时序演变分析 运用耦合协调度模型计算库区 2000—2020 年 PEE 系统耦合协调度(图 5),并对耦合协调度等级进行划分(表 3),据此分析系统耦合协调度的时序变化。2000—2020 年库区 PEE 系统耦合协调度变化较小,位于 $[0.492, 0.571]$,耦合协调等级呈现由 I ~ III ~ II 级波动上升的良性发展趋势,但尚未达到良好协调水平,上升空间大。2000—2005 年,库区耦合协调度由 0.571 下降到 0.530,大渡口区等 5 个区县耦合协调度减少,夷陵区下降幅度最大(-0.165),这主要是由于这一时期的库区社会经济快速发展,对自然生态系统的干扰进一步加强,系统

自我恢复韧性减弱。

2005—2015 年,库区耦合协调度由 0.530 上升到 0.563,达到协调发展等级的区县有 23 个,主要因为在深入实施生态文明建设、区域协调发展战略和新型城镇化战略以来,库区社会经济稳步发展,污染防治能力和生态环境治理力度大幅度加大。2020 年,库区平均耦合协调度略微下降(-0.071),处于协调阶段的区县占 88.46%。其中,开州区增长幅度最大(0.135),北碚区下降幅度最大(-0.188),这主要受库区区位特殊、使命重大,产业支撑弱,发展既不充分,也不平衡,加上子系统间矛盾突出、变化不匹配的影响。

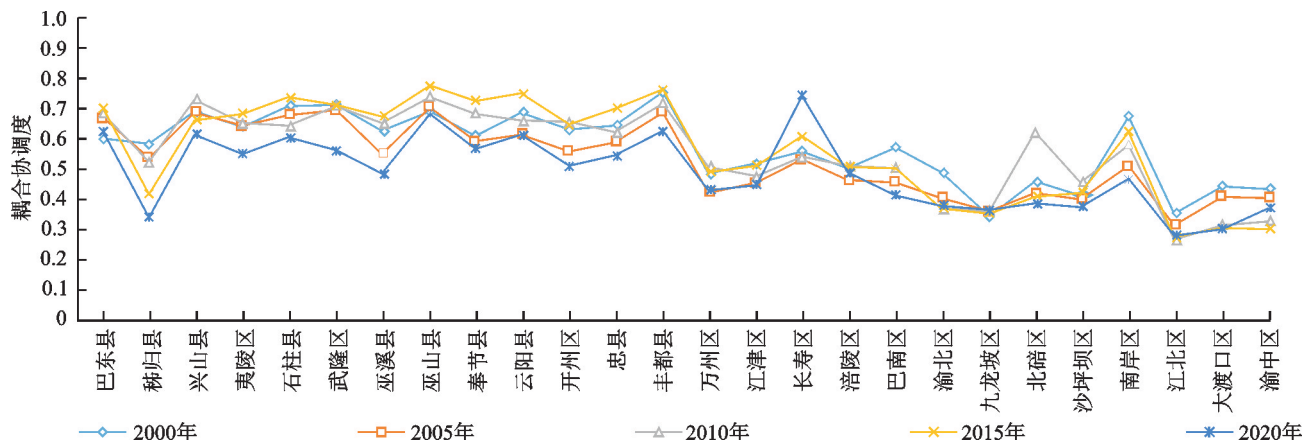


图 5 三峡库区 PEE 系统耦合协调度的时间变化趋势

Fig. 5 The time development trend of coupling coordination degree of PEE system in the Three Gorges Reservoir Area

表 3 2000—2020 年三峡库区各区(县)耦合协调度

Table 3 Coupling coordination degree of PEE system in districts (counties) in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

行政区	2000 年		2005 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	D	协调等级	D	协调等级	D	协调等级	D	协调等级	D	协调等级
渝中区	0.600 6	Ⅱ	0.669 2	Ⅱ	0.684 5	Ⅱ	0.700 2	Ⅱ	0.623 7	Ⅱ
大渡口区	0.582 6	Ⅱ	0.539 4	Ⅲ	0.524 8	Ⅲ	0.418 8	Ⅲ	0.342 6	Ⅳ
江北区	0.689 3	Ⅱ	0.688 6	Ⅱ	0.729 9	Ⅱ	0.662 1	Ⅱ	0.616 5	Ⅱ
沙坪坝区	0.638 4	Ⅱ	0.643 6	Ⅱ	0.652 5	Ⅱ	0.682 9	Ⅱ	0.551 1	Ⅱ
九龙坡区	0.709 8	Ⅱ	0.680 4	Ⅱ	0.643 6	Ⅱ	0.736 6	Ⅱ	0.604 1	Ⅱ
南岸区	0.713 9	Ⅱ	0.694 3	Ⅱ	0.709 2	Ⅱ	0.711 1	Ⅱ	0.562 2	Ⅱ
北碚区	0.626 9	Ⅱ	0.551 4	Ⅱ	0.651 2	Ⅱ	0.674 2	Ⅱ	0.486 0	Ⅲ
渝北区	0.689 3	Ⅱ	0.705 4	Ⅱ	0.739 8	Ⅱ	0.775 4	Ⅰ	0.683 2	Ⅱ
巴南区	0.611 8	Ⅱ	0.592 7	Ⅱ	0.682 9	Ⅱ	0.727 4	Ⅱ	0.567 5	Ⅱ
涪陵区	0.687 4	Ⅱ	0.615 4	Ⅱ	0.660 7	Ⅱ	0.750 1	Ⅰ	0.613 6	Ⅱ
长寿区	0.630 3	Ⅱ	0.560 1	Ⅱ	0.655 0	Ⅱ	0.646 6	Ⅱ	0.510 1	Ⅲ
江津区	0.645 0	Ⅱ	0.589 1	Ⅱ	0.622 9	Ⅱ	0.700 0	Ⅱ	0.546 1	Ⅲ
万州区	0.754 3	Ⅰ	0.688 1	Ⅱ	0.717 2	Ⅱ	0.761 9	Ⅰ	0.625 3	Ⅱ
丰都县	0.485 4	Ⅲ	0.423 3	Ⅲ	0.509 4	Ⅲ	0.490 9	Ⅲ	0.431 7	Ⅲ
忠 县	0.519 3	Ⅲ	0.455 7	Ⅲ	0.476 7	Ⅲ	0.512 4	Ⅲ	0.448 1	Ⅲ
开州区	0.559 0	Ⅱ	0.531 4	Ⅲ	0.541 9	Ⅲ	0.608 5	Ⅱ	0.743 7	Ⅱ
云阳县	0.501 4	Ⅲ	0.464 2	Ⅲ	0.510 0	Ⅲ	0.509 6	Ⅲ	0.490 1	Ⅲ
奉节县	0.573 3	Ⅱ	0.456 7	Ⅲ	0.504 4	Ⅲ	0.502 9	Ⅲ	0.414 7	Ⅲ
巫山县	0.490 4	Ⅲ	0.405 4	Ⅲ	0.369 4	Ⅲ	0.371 9	Ⅲ	0.380 4	Ⅲ
巫溪县	0.345 2	Ⅳ	0.360 5	Ⅲ	0.364 6	Ⅲ	0.355 2	Ⅲ	0.366 7	Ⅲ
武隆区	0.460 7	Ⅲ	0.420 3	Ⅲ	0.622 1	Ⅱ	0.410 9	Ⅲ	0.387 1	Ⅲ
石柱县	0.415 9	Ⅲ	0.401 1	Ⅲ	0.457 0	Ⅲ	0.424 0	Ⅲ	0.375 7	Ⅲ
夷陵区	0.675 4	Ⅱ	0.510 5	Ⅲ	0.581 1	Ⅱ	0.623 2	Ⅱ	0.469 1	Ⅲ
兴山县	0.354 6	Ⅲ	0.316 4	Ⅳ	0.267 8	Ⅳ	0.275 6	Ⅳ	0.283 4	Ⅳ
秭归县	0.443 8	Ⅲ	0.409 6	Ⅲ	0.317 4	Ⅳ	0.306 7	Ⅳ	0.304 9	Ⅳ
巴东县	0.437 3	Ⅲ	0.405 6	Ⅲ	0.330 3	Ⅳ	0.303 0	Ⅳ	0.372 2	Ⅲ
库区均值	0.570 8	Ⅱ	0.529 9	Ⅲ	0.558 7	Ⅱ	0.563 2	Ⅱ	0.492 3	Ⅲ

注:D 为耦合协调度。

3.2.2 空间演化分析 基于 ArcGIS 10.8 绘制研究区耦合协调度(图 6)和耦合协调等级的空间格局(图 7),用于分析耦合协调度的空间分布格局与演化特征。由图 6 可知,各区县耦合协调度存在空间异质性。高值区主要为库区西南部和北部,位于经济社会较发达区域;低值区主要在库区中部和东北部,呈现

与人口—经济系统发展水平相似的“西南—东北”“北部—中部”降低的空间格局,与各区县生态环境本底和发展水平有关。因此,应立足各区县发展实际,制定一系列可提升生态优先、绿色发展的强县富民的城镇生态化发展新路子,有效提升库区整体协调发展水平。

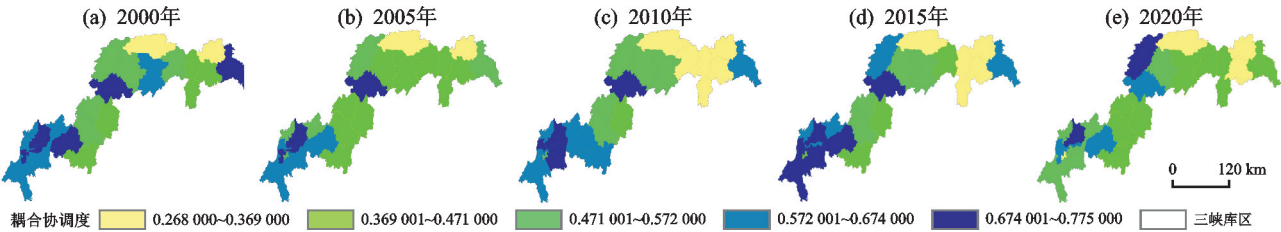


图 6 三峡库区 PEE 系统耦合协调度的空间格局

Fig. 6 Spatial distribution of coupling coordination degree of PEE system in the Three Gorges Reservoir Area

由图 7 可知,各区县协调等级整体向高一级协调方向演进,总体跨越Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ 4 个等级,但耦合协调等级整体不高,协同性有待提升。综合来看,耦合

协调度存在时间上发展不充分、空间上发展不平衡,区域差异明显,库区协调等级呈“W”形格局。库区西南部区域与资源优势良好,制约因素少,“虹吸效应”

明显,更利于系统良性循环,协调发展水平优势明显;库区中部、北部区域产业条件较好,而东北部地区发展基础差、产业支撑薄弱,协调发展水平较差。因此,务实基础,发挥区域优势互补、空间治理一体化,加强区域协同联动聚合,可有效推动库区整体协调等级提高。

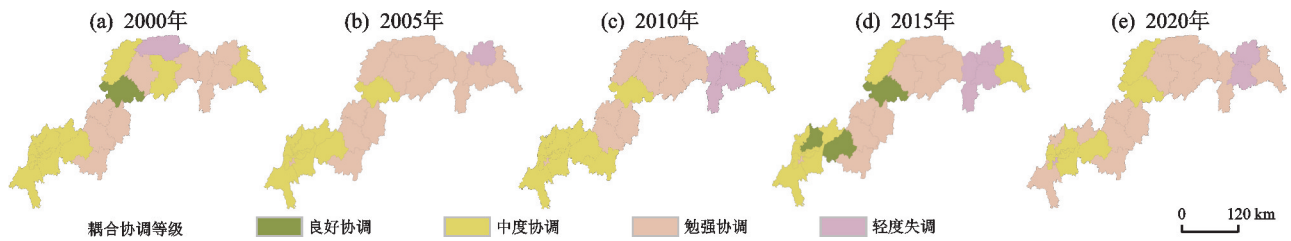


图 7 三峡库区 PEE 系统耦合协调等级空间格局

Fig. 7 Spatial distribution of coupling coordination level of PEE system in the Three Gorges Reservoir Area

3.3 三峡库区 PEE 系统耦合协调类型演变格局

借鉴相关方法^[8,16,22],计算子系统发展指数均

值,代表系统总体发展水平,用于对比分析耦合协调类型演变格局(图 8),将子系统分为 8 种类型(表 4)。

	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
渝中区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
大渡口区	II-GDD	III-GDD	III-GDD	III-GDD	IV-GDD
江北区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
沙坪坝区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
九龙坡区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
南岸区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
北碚区	II-GDD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	III-GDD
渝北区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	I-GGD	I-GGD
巴南区	II-GDD	II-GGD	II-GGD	II-GGD	II-GGD
涪陵区	II-GGD	II-GGD	II-GGD	I-GGD	I-GGD
长寿区	II-DDD	II-DDD	II-DDG	II-GDD	II-DDD
江津区	II-DGD	II-DDD	II-DDG	II-GGD	III-GGD
万州区	I-GGD	II-GGD	II-GGD	I-GGD	II-GGD
丰都县	III-DDD	III-DDD	III-DDD	III-DDG	III-DDG
忠县	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDD	III-DDG
开州区	II-DDD	III-DDD	III-DDD	II-GDD	II-GGD
云阳县	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG
奉节县	II-GDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG
巫山县	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG
巫溪县	IV-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG
武隆区	III-DDG	III-DDG	II-DDG	II-DDG	III-DDG
石柱县	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG	III-DDG
夷陵区	II-DGG	III-GDG	II-GDG	III-DGG	III-DDD
兴山县	III-GDG	IV-GDG	IV-GDG	IV-DDG	IV-DDG
秭归县	III-GDG	III-GDG	IV-GGD	IV-DDG	IV-DDG
巴东县	III-DDG	III-DDG	IV-GGD	IV-DDG	III-DDG

轻度失调

勉强协调

中度协调

良好协调

注: I、II、III、IV、V 分别为 PEE 系统耦合协调等级。

图 8 2000—2020 年三峡库区各区(县)PEE 系统耦合协调类型划分

Fig. 8 Classification of coupling coordination degree of PEE system in districts (counties) in the Three Gorges Reservoir Area from 2000 to 2020

总体上,各区县耦合协调类型变化较小,发展滞后有效改善,库区西南部表现为单系统滞后—GGD,其他区域多为二元系统滞后—DDG,整体呈“无序—有序、同步—局部”滞后演化趋势。结合图 6 发现,耦合协调等级与子系统发展滞后程度存在异质性。如库区西南部处于 II—GGD、而北部和东北部多处于 III—DDG,表明子系统间发展水平差异大,发展不同步,极化特征明显。其原因可能是:在城镇发展中多以经济增长为主而弱化对资源环境的保护,加上自身

发展基础差,导致 DGD 情况出现,建议这类区县应立足生态文明理念,坚持走人与自然和谐共生的发展道路。

空间分布上,各区县耦合协调类型的演化格局符合上述的“西南—东北、中部—北部”的纵向分布特征。库区西南部除大渡口区因产业结构调整,耦合协调等级阶段性下降,其余区县协调等级多为 II 向 I 级转变,耦合协调主要受 GGD 制约;库区中部区域耦合协调类型表现为 III 和 II 级,这与中心城区的辐射联

动有重要关系,但其经济社会发展与环境生态保护不匹配阻碍耦合协调类型提高;库区北部区域耦合协调类型表现为以万州区为核心的“内高外低”的分布格局。万州区表现为Ⅱ—GGD 状态,而周围 5 个区县

表现为Ⅲ—DDG 状态;库区东北部区域受自身发展规模较小、区域优势较差、辐射联动性差,耦合协调类型基本属于Ⅳ—GDG 和Ⅳ—DDG 2 种类型,而夷陵区条件相对较好,为Ⅲ—DDD 状态。

表 4 PEE 子系统发展类型及判别标准

Table 4 Subsystem development types and criteria

系统名称	判别标准	类型	可视化表达
三元系统同步发展	$X_p \geq \bar{X}_p, X_e \geq \bar{X}_e, X_E \geq \bar{X}_E$	PEE 优先型	GGG
	$X_p < \bar{X}_p, X_e \geq \bar{X}_e, X_E \geq \bar{X}_E$	人口滞后型	DGG
单系统滞后	$X_p \geq \bar{X}_p, X_e < \bar{X}_e, X_E \geq \bar{X}_E$	经济滞后型	GDG
	$X_p \geq \bar{X}_p, X_e \geq \bar{X}_e, X_E < \bar{X}_E$	环境滞后型	GGD
	$X_p < \bar{X}_p, X_e < \bar{X}_e, X_E \geq \bar{X}_E$	人口—经济滞后型	DDG
	$X_p < \bar{X}_p, X_e \geq \bar{X}_e, X_E < \bar{X}_E$	人口—环境滞后型	DGD
二元系统滞后	$X_p < \bar{X}_p, X_e < \bar{X}_e, X_E < \bar{X}_E$	经济—环境滞后型	GDD
	$X_p \geq \bar{X}_p, X_e < \bar{X}_e, X_E < \bar{X}_E$	PEE 滞后型	DDD

注: $\bar{X}_p, \bar{X}_e, \bar{X}_E$ 分别为人口、经济、环境综合发展指数均值。

3.4 三峡库区 PEE 系统耦合协调发展空间相关性分析

3.4.1 空间关联分析 运用地理权重矩阵计算全局 Moran's I ^[15],反映库区耦合协调度的空间关联性(表 5)。结果显示,研究期内耦合协调度的全局 Moran's I 均显著为正,整体呈下降态势。表明库区 PEE 耦合协调度存在显著的空间正自相关,同时区县间的空间正自相关性也逐渐加强,但耦合协调度的空间关联效应逐渐减弱。

表 5 全局 Moran's I 指数结果

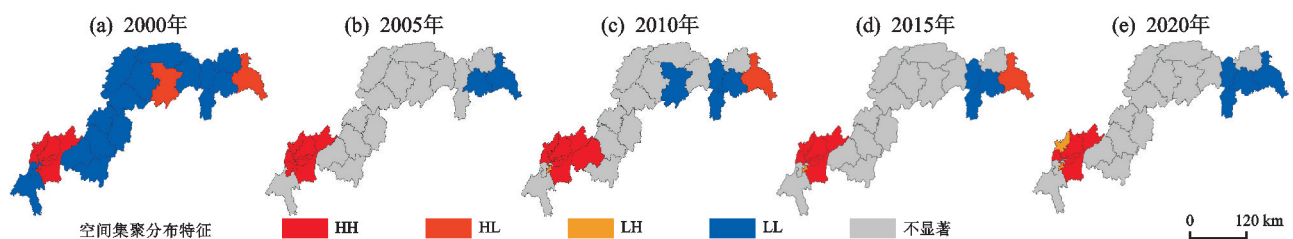
Table 5 The global Moran's I index results

年份	Moran's I	Z 值
2000	0.417 814 ***	3.815 928
2005	0.811 567 ***	7.060 773
2010	0.646 923 ***	5.731 724
2015	0.420 518 ***	3.840 625
2020	0.272 901 ***	2.603 880

注:***、**、* 分别表示在 1%,5%,10% 的水平上显著。

从图 9 可以看出,研究期内空间集聚特征具有空间分异性,存在 H—H 聚集、L—H 聚集、L—L 聚集和 H—L 聚集 4 种集聚状态。

数量上,以 H—H 聚集、L—L 聚集和 H—L 聚集的区县占主导,存在正向空间关联特征;时间上,耦合协调水平越高区县的空间溢出效应越高,辐射联动作用越强;空间分布上,第 1 象限内主要是重庆中心城区及近邻区县,第 3 象限内主要是巴东县、秭归县、夷陵区、奉节县等区县,说明耦合协调度较高区域集中在库区西南部,而库区北部和东北部的耦合协调度较低且空间关联较弱,子系统发展不平衡,系统间的匹配程度存在错位问题。这反映出库区“西南—东北”“中部—北部”地区间的发展分级现象严重,极大阻碍库区整体协调发展水平。因此,亟须探索库区分河段、分地区且具有流域特色和地域特色的区域协同的城镇生态化新模式。



注:图中 H—H、L—L 型集聚分别表示区域 i 与 j 的因变量值都较高和都较低,分布分别位于第 1 和第 3 象限;H—L 型集聚表示区域 i 的自变量值较高,邻近区域 j 的因变量值较低(第 4 象限);L—H 型集聚表示区域 i 的自变量值较低,邻近区域 j 的因变量值较高(第 2 象限)。

图 9 空间集聚分布特征变化

Fig. 9 Spatial agglomeration distribution characteristics variation

3.4.2 空间联系强度分析 引入引力模型测算区县间耦合协调度相互作用的空间联系强度,并利用

ArcGIS 10.8 进行可视化,反映区县间辐射能力及其接受程度^[28](图 10)。总体上,区域间的空间联

系强度呈“西南—北部突出、中部北部塌陷”的集聚格局,且辐射能力随着地理距离增大逐渐衰减。渝中区、江北区、南岸区、沙坪坝区等区县的空间联系总量优势较高,空间指向性较强,形成以“链状结构”为主轴的网络框架;库区北部的云阳县与奉节县、库区东北部的夷陵区等区域的空间联系较为紧密,而库区中

部的区县,因“虹吸效应”、发展基础与政策限制,导致其空间联系总量未能明显凸显。时间上,各区县空间联系总量稳步提升,表明在区域协调联动下,区县间的空间联系强度在逐步提升。因此,推动库区城乡融合区域协调发展、县乡村功能衔接互补,对 PEE 系统协调发展作用显著。

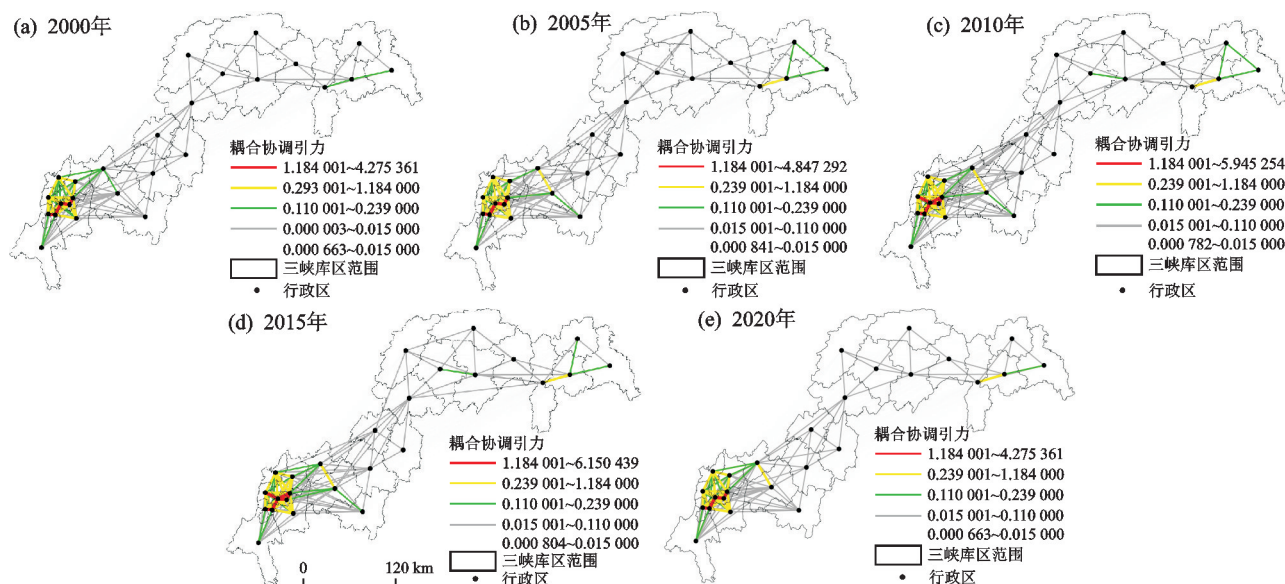


图 10 空间联系强度变化

Fig. 10 Spatial correlation intensity variation

3.4.3 空间联系总量趋势面分析 借助 ArcGIS 10.8 趋势面分析工具对库区 PEE 系统耦合协调度进行可视化处理,进一步分析 PEE 系统耦合协调度的空间联系总量变化趋势的空间分布规律^[26](图 11)。2000—2005 年,空间联系总量在空间格局上呈现“西高东低、南弱北强”的分布趋势,表明西南部和中部地区 PEE 系统的空间联系程度比北部和东北部地区更深入;2010—2015 年,空间联系总量趋势曲线在东西向的趋势有所减缓,表明库区西南部和中部地区不平

衡格局在不断改善,而在北部呈现微弱的上升趋势,说明库区北部和东北部地区的空间联系总量的增长较明显;2020 年,空间联系总量呈现“西南—东北、中部—北部”减弱的演化格局初步形成,但地区间的空间联系总量上升趋势减小,部分区域有减弱的趋势,部分原因可以归结于:外部环境对各区县社会经济的影响,导致 PEE 系统原有协调水平失衡,加上区县间 PEE 子系统发展基础和对影响调节能力的不同,不同程度地抑制库区 PEE 系统耦合协调发展。

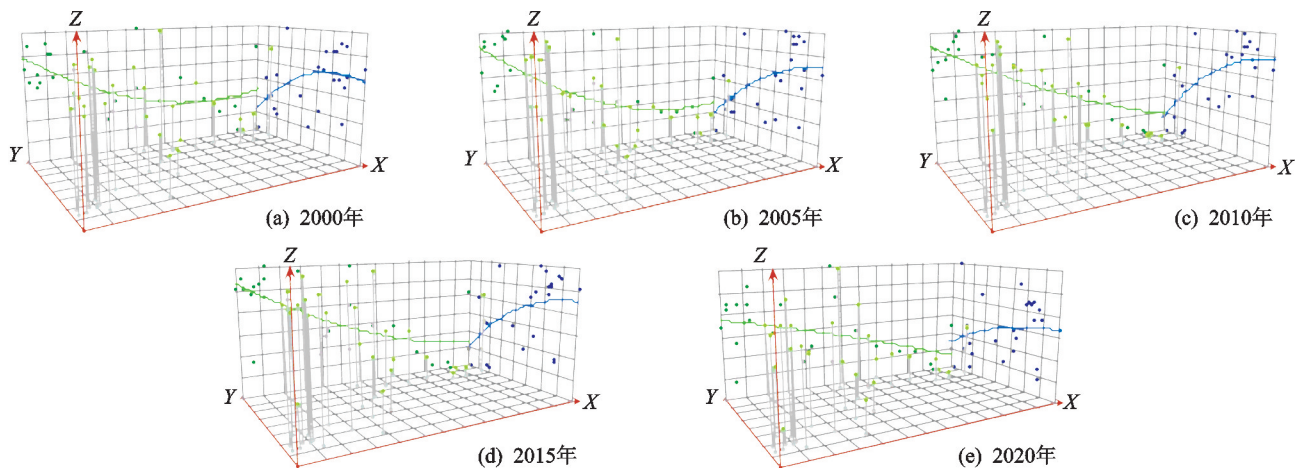


图 11 空间联系总量趋势面变化

Fig. 11 Trend surface variation of total amount of space linkage

3.5 三峡库区 PEE 系统耦合协调发展障碍因子诊断

将研究期内各研究单元数据取 20 年平均值^[27,29],依据障碍度模型计算 PEE 子系统层和指标层的主要障碍因子(图 12、图 13 和表 6),基于障碍度大小排序,筛选出各区县障碍度前 6 的障碍因子进行分析。

3.5.1 子系统层障碍分析 由图 12 可知,从障碍因子频数来看,准则层对系统的障碍作用:经济系统>人口系统>环境系统。从障碍度均值来看,研究期内各准则层障碍度从高到低依次是经济系统(48.22%)、人口系统(27.23%)和环境系统(24.55%),说明经济系统

影响始终保持高位且呈上升态势。因此,应在城乡融合发展中推动县域生态经济发展,打好三峡牌,建设人与自然和谐共生的库区山区现代化。人口系统对系统耦合协调发展影响较大,如何促进人口规模和分布、人口质量和结构愈发合理仍是不容忽视的问题。此外,经济与环境系统障碍度排名上呈负向关系,经济系统障碍度排名靠前的区县,其环境系统障碍度排名基本靠后,对比推断研究期内库区经济发展多以牺牲环境为代价,说明环境面临较大压力,还需加大环境保护与治理投入,提升区域整体环境质量。

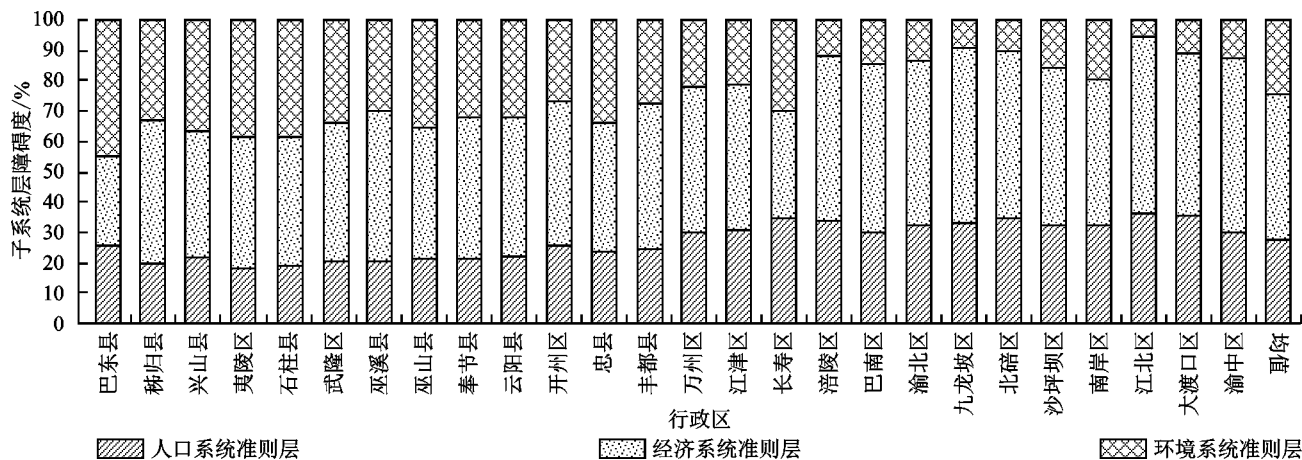


图 12 PEE 系统准则层障碍分析

Fig. 12 Systematic analysis of obstacles to the rule layer of PEE system

3.5.2 指标层障碍分析 从障碍因子频数来看(图 13),指标层障碍度排名前 6 的因子为全社会固定资产投资(Y5)、二三产业比重(Y3)、中小学在校学生数(X6),PM_{2.5}年平均浓度(Z3)、地区生产总值(Y1)、城镇化率(X3)、森林覆盖率(Z2)、人口总量(X1)和化肥施用量(Z5),分别出现 25,22,16,15,5,3 次,为改善系统发展状况的首要调控对象。从障碍因子平均值来看(表 6),前 6 个障碍因子的数值介于 10.12%~19.50%,大小为 Y5>X6>Z2>X3>Z3>X1。其中,Y5 的障碍度最高,说明全社会固定资产投资是限制库区 PEE 系统耦合协调发展的关键因子,表明投资力度不足抑制生态安全水平,未来应加大环境保护和污染治理投入。从障碍因子贡献度来看,相邻区县的障碍因子贡献度具有相似性,整体呈现库区西南部和中部低于库区北部和东北部。如库区北部区县障碍因子均为 Y5、Y3、X3、X1、Y1、Y4,东北部区县障碍因子均为 Y5、X6、Y3、Y1、Y4、X3,同时前 5 位障碍度和基本上大于 50%,以经济影响为主、人口影响次之、环境影响最后。由此可见,夯实基础建设、强化产业培育、加强区域协作联动、深化政策保障已成为库区 PEE 耦合协调发展亟待解决的问题。

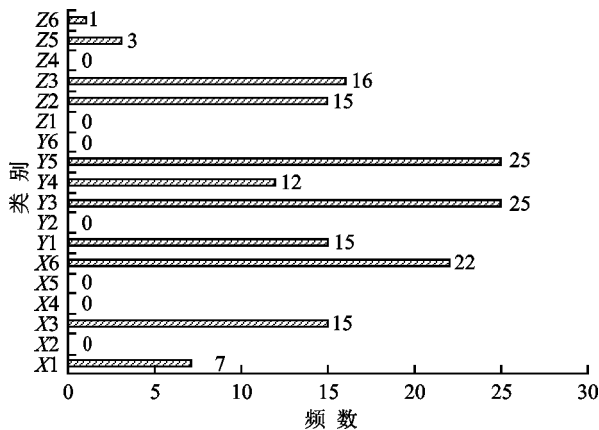


图 13 PEE 系统指标层主要障碍因子频数统计

Fig. 13 Frequency statistics of the main obstacle factors of element layer of PEE system

4 讨论

本研究基于对城镇生态化概念内涵与 PEE 系统交互机理的学理阐释,并分析库区 PEE 系统耦合协调发展状况,是对已往研究视角和成果的有效补充,为库区多层次便利化复合化城乡生活圈构建提供决策支撑。整体来看,2000—2020 年,库区 PEE 系统综合发展水平、耦合协调度、协调等级、协调类型、空间关联强度总体等呈稳中向好的发展态势,主要经历

快速向好(2000—2015 年)和缓慢向好(2015—2020 年)2 个阶段。主要因为开展生态文明建设以来,各地环境保护和污染治理投入力度加大,产业转型升级,经济持续向好。但从 2015 年以来,社会经济活动频繁,对系统干扰力度增强,耦合协调水平提升减缓。局部来看,库区北部和东北部 PEE 系统耦合协调水平较低,主要与当地经济水平、发展基础和人口规模等因素有关。

表 6 PEE 系统指标层主要障碍因子
Table 6 Main obstacle factors of element layer of PEE system

行政区	因子 1	因子 2	因子 3	因子 4	因子 5	因子 6
渝中区	Y5(17.91)	Z2(18.18)	X6(17.67)	Z3(15.53)	Z6(6.37)	Y1(5.21)
大渡口区	Y5(17.91)	X6(16.78)	Z2(13.96)	Z3(12.69)	Y3(7.93)	Y4(7.02)
江北区	Y5(20.61)	Z2(18.73)	X6(16.10)	Z3(12.68)	Y3(8.41)	Y1(5.62)
沙坪坝区	Y5(19.27)	Z2(18.18)	Z3(13.19)	X6(11.85)	Y3(8.30)	Y1(5.46)
九龙坡区	Y5(20.78)	Z2(17.67)	Z3(14.85)	X6(11.37)	Y3(9.00)	X1(5.77)
南岸区	Y5(20.52)	X6(14.95)	Z2(14.82)	Z3(12.99)	Y3(9.07)	Y1(6.23)
北碚区	Y5(19.88)	X6(15.32)	Z2(13.25)	Z3(11.75)	Y3(8.87)	Y4(6.83)
渝北区	Y5(21.80)	Z2(16.18)	Z3(12.29)	X6(10.13)	Y3(9.76)	X1(8.24)
巴南区	Y5(20.07)	Z2(14.12)	X6(12.69)	Z3(11.08)	Y3(8.85)	Y1(6.24)
涪陵区	Y5(20.74)	Z2(13.14)	Z3(9.84)	Y3(9.30)	X6(9.20)	X1(8.35)
长寿区	Y5(18.79)	X6(12.33)	Z2(11.28)	Z3(9.85)	Y3(8.38)	X3(7.76)
江津区	Y5(18.45)	Z2(11.69)	Z3(11.52)	X1(10.05)	Y3(8.21)	X3(6.26)
万州区	Y5(21.90)	X1(14.16)	Y3(9.46)	Z2(9.09)	Z3(8.75)	Z5(7.14)
丰都县	Y5(18.21)	X3(11.95)	X6(11.10)	Z2(9.99)	Y3(7.92)	Z3(7.35)
忠 县	Y5(18.56)	X3(13.27)	X6(9.65)	Z3(9.36)	Y3(8.00)	Y1(6.82)
开州区	X3(17.83)	X1(14.17)	Y3(10.37)	Z2(10.14)	Z5(9.68)	Y1(8.32)
云阳县	Y5(21.25)	X3(16.22)	X1(10.13)	Y3(9.21)	Y1(7.84)	Y4(7.28)
奉节县	Y5(21.10)	X3(12.80)	Y3(8.98)	X6(8.42)	Y4(8.16)	Y1(7.91)
巫山县	Y5(20.64)	X6(14.15)	X3(12.14)	Y3(8.51)	Y4(8.11)	Y1(8.10)
巫溪县	Y5(21.37)	X6(16.31)	X3(12.04)	Y3(8.82)	Y4(8.60)	Y1(8.52)
武隆区	Y5(24.13)	X6(20.67)	Y3(10.36)	Y4(9.31)	X3(9.02)	Z3(6.17)
石柱县	Y5(19.72)	X6(14.73)	X3(12.09)	Y3(8.46)	Y4(7.69)	Y1(7.69)
夷陵区	Y5(19.35)	X6(16.67)	X3(11.90)	Y3(8.57)	Z5(7.30)	Y4(6.89)
兴山县	X6(21.88)	Y5(21.49)	X3(13.94)	Y3(9.39)	Y4(8.67)	Y1(8.51)
秭归县	Y5(19.55)	X6(18.30)	X3(14.92)	Y3(8.28)	Y4(7.73)	Y1(7.66)
巴东县	Y5(21.42)	X6(17.60)	Y3(8.78)	Y1(8.47)	Y4(8.46)	X3(7.96)
平均值	Y5(19.50)	X6(14.45)	Z2(12.28)	X3(12.01)	Z3(11.24)	X1(10.12)

注:括号内的数据为障碍因子的障碍度(%)。

本研究发现,库区 PEE 系统间的匹配度存在错位,耦合协调度具有较大发展空间。应正确处理好人
与自然、保护与发展的关系,从系统自身与区域协同
2 个角度、单一系统优化向多元系统协调出发,夯实
基础增长发展动能、深化区域内外开放协作、完善政
策制度保障支撑,探索新型 PEE 协同可持续发展路
径。基于研究结果,本文提出 3 点建议:一是“以人为
本”,优化人口发展战略,建立全生命周期的人口服务
体系,科学控制人口规模和提升人口质量,促进人口
内部均衡发展,推动人口与外部环境动态均衡;二是
坚持以创新引领为主导,以“生态+”理念谋划库区发
展、夯实基础增动能,推动库区高质量发展;三是加强
党的领导、健全工作机制,科学完善库区环境法规政
策,推进库区环境全过程一体化治理,提升库区对外
开放合作水平,推动生态效益更好向经济效益和社会
效益转化。

PEE 系统作为城镇生态化发展的关键要素构

成,是一个多元复杂的系统,本研究在参考相关研究
的基础上,以三峡库区为研究范围,构建城镇生态化
视角下的 PEE 耦合协调发展评价体系,并分析其时
空演化特征、空间联系特征和主要障碍因子。从研究
结果来看,PEE 系统耦合协调水平演化趋势、分布特
征与逯进等^[7]、李佳等^[8]、王建康等^[17]的研究结果存
在一致性。但由于研究区域本身和 PEE 系统多维机
制的高度复杂性、多变性和时空异质性,评价指标的
内涵仍可能不够全面系统,后续研究将继续补充完
善;同时,库区不同于多个行政单元的简单集合,各区
县发展相互联系又独立,需立足自身又强化协同。因
此,立足城镇生态化视角、结合 PEE 系统发展状况,
挖掘促进库区资源要素一体化配置、产业培养、区域
联动开放的政策保障机制值得进一步关注。

5 结 论

(1)2000—2020 年,三峡库区 PEE 系统综合发

展水平总体呈逐步上升态势,子系统间发展演化趋势空间异质性明显。经济系统发展水平增速较快且区域差异较大,人口系统发展水平平稳增长且区域差距逐渐缩小,环境系统整体质量稳步上升。

(2)研究期内 PEE 系统耦合协调度总体呈逐步上升的良性发展态势,整体耦合协调等级不高,主要处于Ⅱ—Ⅲ级交互演进的阶段;总体上、区域内和区域间的耦合协调等级差异逐渐缩小,主要呈现库区西南部>中部>北部>东北部的分布格局。

(3)研究期内 PEE 系统的耦合协调类型总体趋于稳定,主要呈现“西南—东北、中部—北部”的空间特征。子系统发展滞后逐步改善,经历了从“无序—有序、多元系统—单系统”滞后的演变。库区西南部主要表现为单系统滞后—GGD,其余区县多为二元系统滞后—DDG。

(4)邻近区域系统耦合协调度的空间相关性存在显著的正自相关性,空间联系强度和联系总量分别呈“西南—北部突出、中部北部塌陷”和“西高东低、南弱北强”的特征,且随地理距离增大而逐渐减弱,与库区区域优势分异与内部异质显著等因素有关。

(5)障碍度分析显示经济和人口系统是阻碍系统耦合协调发展的主要子系统,而环境系统的障碍度逐年增加。其中,全社会固定资产投资、中小学在校学生数、PM_{2.5}年平均浓度、城镇化率、森林覆盖率、人口总量为主要障碍因子,是今后首要的调控对象。

参考文献:

- [1] 范贤贤,周云蕾.长江经济带土地利用与经济—社会—环境耦合协调研究[J].水土保持研究,2023,30(5):370-378.
FAN X X, ZHOU Y L. Coupling coordination of land use and economic-social-environmental in the Yangtze River economic belt[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(5):370-378.
- [2] 吴月.更好统筹人口与经济社会、资源环境关系[N].人民日报,2023-06-06(013).
WU Y. Better integrating population with economy, society, resources and environment[N].People's Daily, 2023-06-06(013).
- [3] HAN D, CHEN L, WU H, et al. Evaluation on coupling coordinated development of population economy and eco-geological environment in the twin-city economic circle of Chengdu-Chongqing region [J].Scientific Reports,2023,13:e13459.
- [4] MORETTINI G. Demographic and socioeconomic effects of environmental policies: The 1927 special goat tax and mountain depopulation in Italy[J].Population and Environment,2023,45(3):e16.
- [5] XIAO J, QIAO J J, HAN D, et al. Spatial coupling relationship and driving mechanism of population and economy in rural areas in Qinling-daba mountains, China[J].Chinese Geographical Science,2023,33(5):779-795.
- [6] 宋洁.黄河流域人口—经济—环境系统耦合协调度的评价[J].统计与决策,2021,37(4):185-188.
SONG J. Evaluation of coupling coordination degree of population-economy-environment system in the Yellow River Basin[J].Statistics and Decision,2021,37(4):185-188.
- [7] 逮进,常虹,郭志仪.中国省域能源、经济与环境耦合的演化机制研究[J].中国人口科学,2016(3):23-33,126.
LU J, CHANG H, GUO Z Y. The evolutionary mechanism analysis of coupling relationship among energy, economy and environment in China[J].Chinese Journal of Population Science,2016(3):23-33,126.
- [8] 李佳,赵伟,骆佳玲.成渝地区双城经济圈人口—经济—环境系统协调发展时空演化[J].环境科学学报,2023,43(2):528-540.
LI J, ZHAO W, LUO J L. The spatio-temporal evolution of the coordinated development of population, economy and environmental system in Chengdu-Chongqing economic circle[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2023, 43(2):528-540.
- [9] CHU N C, ZHANG P Y, WU X L. Spatiotemporal evolution characteristics of urbanization and its coupling coordination degree in Russia: Perspectives from the population, economy, society, and eco-environment[J].Environmental Science and Pollution Research,2022,29(40):61334-61351.
- [10] 周璐红,杨光绪.合肥市资源环境承载力与经济发展水平耦合关系的时空演变分析及障碍因素诊断[J].水土保持研究,2023,30(3):440-447.
ZHOU L H, YANG G X. Spatiotemporal evolution analysis and obstacle factor diagnosis of the coupling relationship between resource and environmental carrying capacity and economic development level in Hefei city [J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(3):440-447.
- [11] 孔凡斌,杨文才,徐彩瑶.环杭州湾城市群生态环境与社会经济耦合协调关系及其影响因素[J].生态学报,2023,43(6):2287-2297.
KONG F B, YANG W C, XU C Y. Coordinated relationship and influencing factors of ecological environment and socio-economic coupling of urban agglomeration around Hangzhou Bay in China[J].Acta Ecologica Sinica,2023,43(6):2287-2297.

- [12] WANG W, WANG H F, YANG G S, et al. Interactions between ecosystem services and social economies in the Yangtze River economic belt[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2023, 7(3): e2200400.
- [13] BONTEMPI E, COCCIA M. International trade as critical parameter of COVID-19 spread that outclasses demographic, economic, environmental, and pollution factors[J]. *Environmental Research*, 2021, 201: e111514.
- [14] 邹欣怡, 赵伟, 蒲海霞. 三峡库区重庆段土地利用转型及生态服务功能价值时空分异特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 267-275.
- ZOU X Y, ZHAO W, PU H X. Spatiotemporal differentiation of land use transformation and ecological service function value in Chongqing section of the Three Gorges Reservoir[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 267-275.
- [15] 周李磊, 苏湘媛, 向洪莉, 等. 重庆市生态系统服务与人类福祉耦合关系模拟[J]. *中国环境科学*, 2023, 43(5): 2560-2573.
- ZHOU L L, SU X Y, XIANG H L, et al. Simulation of the coupling relationships between ecosystem services and human well-being in Chongqing[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(5): 2560-2573.
- [16] 刘洁, 栗志慧, 周行. 双碳目标下京津冀城市群经济—人口—资源—环境耦合协调发展研究[J]. *中国软科学*, 2022(增刊1): 150-158.
- LIU J, LI Z H, ZHOU X. Research on the coupled and coordinated development of economy-population-resources-environment in the Beijing—Tianjin—Hebei city cluster under the dual-carbon target[J]. *China Soft Science*, 2022(S1): 150-158.
- [17] 王建康, 韩倩. 中国城市经济—社会—环境耦合协调的时空格局[J]. *经济地理*, 2021, 41(5): 193-203.
- WANG J K, HAN Q. Spatial-temporal pattern of the coupling coordination of urban economy—society—environment in China[J]. *Economic Geography*, 2021, 41(5): 193-203.
- [18] 李雪松, 龙湘雪, 齐晓旭. 长江经济带城市经济—社会—环境耦合协调发展的动态演化与分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(3): 505-516.
- LI X S, LONG X X, QI X X. Dynamic evolution and analysis of coupling development of economy, society and environment in Yangtze River economic belt[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(3): 505-516.
- [19] 任祁荣, 于恩逸. 甘肃省生态环境与社会经济系统协调发展的耦合分析[J]. *生态学报*, 2021, 41(8): 2944-2953.
- REN Q R, YU E Y. Coupling analysis on coordinated development of ecological environment and social economic system in Gansu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(8): 2944-2953.
- [20] 苏胜亮. 宁夏回族自治区生态环境与经济发展耦合协调研究[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 367-374.
- SU S L. Research on the coordinated development of ecology and economic system of Ningxia Hui autonomous region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021, 28(2): 367-374.
- [21] 周文慧, 钞小静. 黄河流域数字基础设施、经济发展韧性与生态环境保护的耦合协调发展分析: 基于三元系统耦合协调模型[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(9): 1-9.
- ZHOU W H, CHAO X J. Coupling coordinated development of digital infrastructure, economic resilience and environmental protection in the Yellow River Basin: An approach of ternary system coupling coordination model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2023, 37(9): 1-9.
- [22] 刘庆芳, 杨定, 杨振山, 等. 青藏高原国家公园群人文生态系统耦合协调评价及障碍因子识别[J]. *地理学报*, 2023, 78(5): 1119-1135.
- LIU Q F, YANG D, YANG Z S, et al. Evaluation of coupling coordination and identification of obstacle factors of human ecosystem in Qinghai-Tibet Plateau National Park Cluster[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(5): 1119-1135.
- [23] 饶清华, 林秀珠, 李家兵, 等. 流域社会经济与水环境质量耦合协调度分析[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1784-1792.
- RAO Q H, LIN X Z, LI J B, et al. Analysis of coupling coordination between social economy and water environment quality in river basin[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(4): 1784-1792.
- [24] 重庆市统计局. 重庆统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Chongqing Municipal Bureau of Statistics. Chongqing statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [25] 湖北省统计局. 湖北统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
- Hubei Provincial Bureau of Statistics. Hubei statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.

(下转第235页)

- [23] 傅伯杰,黄土高原土地利用变化的生态环境效应[J].科学通报,2022,67(32):3769-3779.
FU B J. Ecological and environmental effects of land-use changes in the Loess Plateau of China[J].Chinese Science Bulletin,2022,67(32):3769-3779.
- [24] 包玉斌.基于 InVEST 模型的陕北黄土高原生态服务功能时空变化研究[D].西安:西北大学,2015.
BAO Y B. Temporal and spatio change of ecological services on Loess Plateau of Shaanxi by InVEST model [D].Xi'an: Northwestern University,2015.
- [25] 毕早莹,李艳忠,林依雪,等.基于 Budyko 理论定量分析窟野河流域植被变化对径流的影响[J].北京林业大学学报,2020,42(8):61-71.
BI Z Y, LI Y Z, LIN Y X, et al. Quantitative assessment on the effects of vegetation changes on runoff based on Budyko theory in Kuyehe River Basin of northern China [J].Journal of Beijing Forestry University,2020,42(8): 61-71.
- [26] 桑潇,张成业,李军,等.煤炭开采背景下的伊金霍洛旗土地利用变化强度分析[J].自然资源遥感,2021,33(3): 148-155.
SANG X, ZHANG Y C, LI J, et al. Application of intensity analysis theory in the land use change in Yijin Holo Banner under the background of coal mining[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2021, 33 (3): 148-155.
- [27] 圆圆,盛艳,刘林甫,等.窟野河流域生境质量时空演变特征及其影响机制研究[J].林草资源研究,2023(6):67-74.
YUAN Y, SHEN Y, LIU L F. Temporal and spatial evolution characteristics of habitat quality in the Kuye River Basin and its influencing mechanism[J].Research on Forest and Grass Resources,2023(6):67-74.
- [28] 郭巧玲,陈新华,窦春峰,等.近 60 年来窟野河全流域年径流变化及其影响因素分析研究[J].水土保持学报,2016,30(3):90-95.
GUO Q L, CHEN X H, DOU C F, et al. Study on the variation of annual runoff and influencing factors in Kuye River during the past 60 years[J].Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(3):90-95.
- [29] 陈新华,郭巧玲,陈志辉.近 50 年来牯牛川径流变化及影响因素分析[J].干旱区资源与环境,2015,29(5): 186-191.
CHEN X H, GUO Q L, CHEN Z H. The runoff variation characteristics and influencing factors in Beiniuchuan River[J].Journal of Arid Land Resources and Environment,2015,29(5):186-191.
- [30] 张学儒,周杰,李梦梅.基于土地利用格局重建的区域生境质量时空变化分析[J].地理学报,2020,75(1):160-178.
ZHANG X R, ZHOU J, LI M M. Analysis of spatio-temporal changes of regional habitat quality based on land use pattern reconstruction [J]. Acta Geographica Sinica,2020,75(1):160-178.
- [31] 王童,何海,吴志勇.近 30 年来窟野河流域土地利用与植被覆盖度变化分析[J].水电能源科学,2017,35(11): 127-130.
WANG T, HE H, WU Z Y. Analysis of land use and vegetation coverage changes in the Kuye River Basin in the past 30 years[J].Hydropower Energy Science,2017, 35(11):127-130.
- [32] 胡健,曹全恒,刘小龙,等.草灌植被转变对草地生态系统及其水碳过程的影响研究进展[J].生态学报,2022,42 (11):4324-4333.
HU J, CAO Q H, LIU X L, et al. Resreach progress on the effect of the transition between shrub and grass vegetation on grassland ecosystem and its water-carbon processes [J].Acta Ecologica Sinica,2022,42(11):4324-4333.
- (上接第 221 页)
- [26] 李琛,吴映梅,高彬斌.滇中城市群城镇化与资源环境承载力耦合协调研究[J].水土保持研究,2022,29(2):389-397.
LI C, WU Y M, GAO B P. Research on coupling and coordination of urbanization and resources and environmental carrying capacity in city agglomeration of central Yunnan[J].Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):389-397.
- [27] 姜旭,卢新海.长江中游城市群城镇化与人居环境耦合协调的时空特征研究[J].中国土地科学,2020,34(1):25-33.
JIANG X, LU X H. Temporal and spatial characteristics of coupling and coordination degree between urbanization and human settlement of urban agglomerations in the middle reaches of the Yangtze River[J].China Land Science, 2020,34(1):25-33.
- [28] 王凌青,王雪平,方华军,等.青藏高原典型区域资源环境与社会经济耦合分析[J].环境科学学报,2021,41 (6):2510-2518.
WANG L Q, WANG X P, FANG H J, et al. Coupling relationship between resource environment and social economydevelopment in typical regions of Qinghai-Tibet Plateau[J].Acta Scientiae Circumstantiae,2021,41 (6):2510-2518.
- [29] CAI C Y, TANG J X, HE X, et al. The coupling coordination between tourism urbanization and ecosystem services value and its obstacle factors in ecologically fragile areas; A case study of the Wuling Mountain area of Hunan Province, China[J].Environmental Science and Pollution Research,2023,30(54):115125-115151.