

长江经济带水—能源—粮食—生态脆弱性时空特征及影响机制¹

刘黎明^{1, 3}, 陈军飞^{1, 2, 3*}, 王春宝¹

(¹. 河海大学商学院, 江苏 南京 211100; ². 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; ³. 江苏长江保护与高质量发展研究基地, 江苏 南京 210098)

【摘要】: 水—能源—粮食—生态 (WEFE) 系统脆弱性研究对保障资源安全和生态安全具有重要意义。结合压力—状态—响应框架与随机森林模型, 构建了WEFE脆弱性测度评价指标体系, 采用考虑自评与他评效率结合的数据包络分析法对2005~2020年长江经济带WEFE系统脆弱性进行测算。利用核密度估计与克里金插值模型探讨其时空动态特征, Tobit回归分析WEFE脆弱性的影响因素。结果表明: 长江经济带WEFE系统的脆弱性呈波动上升的态势; 空间呈现“中间高一两边低”的格局特征, 且脆弱性中部>东部>西部, 脆弱性高值区伴随着向西北方向转移的趋势; 经济发展水平、人均肉类产量、环境保护力度和人口密度与WEFE脆弱性呈正相关, 产业结构、技术进步与WEFE脆弱性呈负相关。关键词: 水—能源—粮食—生态; 脆弱性; 随机森林; 交叉效率DEA; 长江经济带

【中图分类号】: X24 文献标识码: A **【文章编号】**: 1004-8227(2023)08-1628-13

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202308007

水、粮食和能源是人类生存的核心需求, 这3种需求之间存在着无限复杂的循环。自2011年波恩会议首次将水、能源和粮食的关系总结为一种“纽带关系”(WEF-Nexus)以来, 相关研究成果大量涌现[1,2], 不仅探究了纽带系统内部的关联关系[3], 还分析了其与外部系统的互动关系[4]。而生态是这三种资源的来源与载体[5], 应处于这一关系的中心, 抛开生态分析WEF三者的互动机制无法充分反映自然资源和社会经济发展的关系。2019年“生态优先, 绿色发展”的战略提出后, 长江经济带高质量发展工作积极推进。然而能源储备低、水质性缺水、生态功能退化等问题逐渐成为制约长江经济带高质量发展的瓶颈, 水-能源-粮食-生态(Water-Energy-Food-Ecology, WEFE)系统的脆弱性特征十分明显。协同发展水、能源、粮食、生态的关系, 基于水-能源-粮食-生态关联框架开展系统多部门联动管理, 利于提高资源利用效率[6,7], 增强自然环境的自我调节和恢复能力, 应对全球环境变化带来的挑战[8]。

WEFE系统不仅描述了水、能源、粮食间的相互关系, 还考虑了生态系统的反馈与调节作用。近年来, 学者们积极使用Nexus方法在三者内部关联的基础上, 引入生态服务、环境保护、气候变化、可持续发展等概念, 制定融合多学科多领域的综合性解决路径, 衍生系统WEEE也成为较热门的研究对象[9]。目前研究多是以WEF-Nexus视角开展生态系统服务的研究[10]、或是基

¹ 收稿日期: 2022-11-22; 修回日期: 2023-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(42071278); 国家社会科学基金重大项目(19ZDA084); 中央高校基本科研业务费专项(B230207002)

作者简介: 刘黎明(1993~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为资源与环境管理. E-mail: lm-liu@hhu.edu.cn

*** 通讯作者** E-mail: chenjunfei@hhu.edu.cn

于生态系统服务视角研究 WEF-Nexus[11],未能从生态系统的视角整体审视 WFEE 的关联[12]。施海洋等[13]探讨了因不合理用水而导致咸海生态危机的跨界内陆河流域水-能源-食物-生态纽带中的因果关系,为用水预测与流域水资源利用管理提供了系统性认知的基础。Martinez 等[14]通过揭示 WEF 与生态系统的交互关系,利用 Nexus 仿真系统,评估了英国生态城镇 WEF-nexus 的协同水平,维持生态系统的同时,平衡资源供需,增强各组成部分之间的协同作用。孙才志等[15]分析了中国干旱区农业生态系统的水-能源-粮食纽带系统协同发展的演化机制进行探究。常奂宇提出了水-粮食-能源-生态耦合协调度的协同优化算法与综合协同指数,实现了 WFEE 关联视角下多水源协同调控方案优化求解[16]。

综上所述,当前关于 WEF 的研究重点在于协同水平、耦合协调等状态评价与关系量化,而较少关注 WEF 系统自身的脆弱性研究。现有关于 WEF 系统的研究存在以下不足:在研究框架上,生态系统调节能力的降低可能会导致不安全的 WEF 关联[17],而目前研究未将生态纳入研究框架,生态属于相对缺失的一环;研究内容主要集中在安全风险评价、协调性评价、效率测算及可持续性评估等,缺少系统脆弱性的研究,而保障水、能源、粮食、生态安全需要风险与脆弱性研究双管齐下;研究方法上,系统边界的模糊性造成了指标体系构建的不一致,无法充分刻画子系统间相互作用的复杂性。随着历史数据的积累和信息科学的发展,WEF 系统涉及数据呈现出多源性和异质性的特点。传统的评估方法在数据量大的地区,尤其是在信息技术水平较高的城市,可靠性较差。作为机器学习方法之一的随机森林(Random Forest, RF)可以有效地提取特征并降低索引的维数。与传统的评估方法相比,RF 不仅具有高的预测精度,而且可以评估特定变量在分类中的重要性,有效解决高维非线性问题[18,19]。因此,本研究首先基于 RF 模型对 WEF 脆弱性评估指标进行筛选,实现指标约简,构建脆弱性评价指标体系。其次,采用交叉效率评价分析法(Cross Efficiency Data Envelopment Analysis, CE-DEA)对长江经济带的 WEF 系统脆弱性进行测算,利用核密度函数与克里金插值模型探讨其时空动态特征。最后,借助 Tobit 回归分析探索长江经济带 WEF 系统脆弱性的主要影响因素。为实现区域水资源利用、能源开发、粮食生产及生态保护的协调发展提供决策支持与政策建议。

1 研究方法

1.1 随机森林模型

随机森林(Random Forest, RF)是 Leo Breiman 在 2001 年提出的一种基于组合分类的机器学习算法[20]。RF 在不增加计算复杂度的情况下提高了预测精度,并实现了最佳分类算法[18]。其基本算法是随机提取变量和数据,并自动生成多个分类树,然后总结这些分类树的结果。

RF 的特征选择主要基于每个特征的重要性,袋外数据(OOB)错误率可作为衡量每个特征贡献率的指标。随机将噪声添加到某个特征中,如果 OOB 数据的精度大幅度降低,则表明该特征对分类结果影响较大,重要程度比较高。

具体计算步骤如下:

(1)对于 RF 中的每棵决策树,使用 OOB 测试各个决策树(DecisionTree, DT)的精度表现,计算它的 OOB 误差率记为 Error1。

(2)对 OOB 的某个特征 X 随机地加入一组样本,即噪声干扰,然后用新的数据再次测试各个 DT 的精度表现,计算此时的 OOB 误差率,记为 Error2。

(3)特征 X 在该 DT 上的重要性度量可以表示为 Error2-Error1,当 RF 中有 ntree 棵树时,特征 X 的重要性度量可以表示为

$$VI = \sum (Error1 - Error2) / ntree \quad (1)$$

1.2 交叉效率 DEA 模型

数据包络分析(DEA)本质上是一个系统的“投入-产出”运行效率的评价模型,对各单元相对的投入产出效率进行评价。WEFE 系统的脆弱性也可以从“投入-产出”的角度进行分析,WEFE 系统的脆弱性可以看作是一负面的“生产活动”。状态、响应作为脆弱性减少的投入,压力作为脆弱性增加的产出,效率即为脆弱性,效率越大,脆弱性越大[21]。

传统非参数数据包络分析如 CCR、BCC 模型[22],存在无法精确区分决策单元的缺陷,为此 Sexton 等提出交叉效率 DEA 模型(CE-DEA)[23],其基本思想是利用决策单元之间自评和他评体系来代替自我评价体系。交叉效率模型主要包括交叉效率计算以及交叉效率集结两部分。其中交叉效率计算 CCR-DEA 模型如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{jj} = \max \sum_{r=1}^s u_{rj} y_{rj} \\ s. t. \sum_{i=1}^m v_{ij} x_{ij} = 1 \\ \sum_{r=1}^s u_{rj} y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_{ij} x_{ij} \leq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ u_{rj} \geq 0, r = 1, 2, \dots, s; v_{ij} \geq 0, \\ i = 1, 2, \dots, m \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: E_{jj} 表示第 j 个决策单元的效率,第 j 个决策单元的输入与输出向量分别为 $X_j=(x_{1j},x_{2j},\dots,x_{mj})^T, Y_j=(y_{1j},y_{2j},\dots,y_{sj})^T$; 输入和输出向量分别通过权重 $v_j=(v_{1j},v_{2j},\dots,v_{mj})^T$ 和 $u_j=(u_{1j},u_{2j},\dots,u_{sj})^T$ 相互联系。

计算得到的最大效率 E_{kk} ,相应权重系数为 $v_k=(v_{1k|max},v_{2k|max},\dots,v_{mk|max})^T$ 和 $u_k=(u_{1k|max},u_{2k|max},\dots,u_{sk|max})^T$ 。然后综合自评效率和 $(n-1)$ 个他评效率得到最终的全局交叉效率。交叉效率集结模型为:

$$E_{kj} = \frac{\sum_{r=1}^s u_{rk} | \max y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_{ik} | \max x_{ij}}, k, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$E_k = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n E_{kj}, k = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

式中: E_{kj} 表示第 k 个评价单元的最大效率对应的权重系数计算得到的第 j 个决策单元的效率值; E_k 指通过交叉评价计算得到的第 k 个决策单元的全局效率。本研究通过 CE-DEA 模型解释了 WEFE 系统脆弱性是由过度压力和敏感性以及缺乏应对能力所致。

1.3 核密度估计方法

运用核密度估计法对 WEFE 脆弱性进行估计拟合得到核密度曲线，根据曲线的形状、峰度、位置等方面的变化来考察长江经济带 WEFE 脆弱性的动态演进特征。概率密度估计函数如下[24,25]:

$$\begin{aligned} \hat{f}_h(x) &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_h(x - x_i) \\ &= \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_i 为独立分布的 n 个样本点; $K(x)$ 为核函数; h 为带宽。

1.4 克里金插值

克里金插值(Kriging)是以空间变异模型为依据对随机过程进行空间建模和插值的一种模拟，公式为:

$$Y(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y(x_i) \quad (6)$$

式中: $Y(x_0)$ 为未知点; $Y(x_i)$ 为已知样本点; λ_i 为第 i 个样本点对未知点的权重; n 为已知点的个数。

2 指标体系构建与数据来源

2.1 指标选取

WEFE 系统的开放性决定了该系统具有较高的敏感性和暴露性，导致系统在内外环境的压力扰动下表现出波动且不稳定的状态。内外环境的压力扰动对 WEFE 系统的脆弱性具有放大或缩小的作用。而系统则通过自身结构的优化和人为治理措施的调整，改变系统脆弱程度，增强系统稳定性，系统过程符合压力-状态-响应(PSR)分析框架[26]。结合脆弱性概念理论[27,28]及 WEFE 系统特征，本研究认为 WEFE 系统脆弱性是 WEFE 系统在面对区域发展带来的客观压力下，采取人类长时间的适应性措施后，WEFE 纽带关系发生恶化造成系统结构和功能受到损害的程度。

基于 PSR 概念模型[29,30], 准则层划分为水、能源、粮食、生态 4 个子系统，每个子系统又包含压力、状态、响应 3 个维度，最终选取 40 个指标因子，构建了 WEFE 系统脆弱性评价指标体系，如表 1 所示。

压力层包括社会经济发展对资源的消耗和发展过程中污染物的排放，主要从社会经济发展需求、资源耗损和环境污染 3 个方面选取指标。状态层为水、能源、粮食、生态子系统对各种资源需求的满足能力，包括外部需求系统和内部需求系统，凸显了 WEFE 系统的综合协调性。外部系统是指社会和经济系统对资源的消耗；内部需求系统是指水、能源、粮食、生态子系统之间的需求、利用与反馈。响应层是综合判断压力和状态变化情况之下，为避免 WEFE 系统脆弱性继续提升而采取的措施，对防止脆弱性上升具有一定的应对作用。

2.2 指标优化

利用随机森林模型评估指标重要性功能，筛选 WEF E 系统脆弱性关键指标，评估结果如图 1 所示，重要性排名前 26 的指标累积重要性贡献率超过 90%，说明它们对 WEF E 系统脆弱性影响最具代表性。剔除其他对 WEF E 系统脆弱性影响不显著的 14 个指标，得到随机森林优化后的长江经济带 WEF E 系统脆弱性评价指标体系(表 2)。

表 1 WEF E 系统脆弱性评价指标体系初始框架

目标层	准则层	要素层	指标层	指标含义	属性		
WEFE 系 统脆弱性	水系统 (W)	压力(P)	X1 农业用水占比(%)	粮食系统对水资源的压力	+		
			X2 能源系统用水占比(%)	能源系统对水资源的压力	+		
			X3 生态用水占比(%)	生态系统对水资源的压力	-		
				X4 人均水资源量(m ³ /人)	区域水资源丰、缺状态	-	
		状态(S)					
			X5 地下水资源利用率(%)	地下水资源安全状况	+		
			X6 年平均降水量(mm)	水资源系统补给情况	-		
			X7 单位面积水资源量(万 m ³ /km ²)	区域水资源可利用程度	-		
		响应(R)	X8 节水灌溉率(%)	粮食系统对水资源系统的修复	-		

			X9 水利治理投资占比(%)	人类对水资源系统的改善力度	-
能源系统 (E)	压力(P)		X10 人均能耗量(t 标准煤/人)	能源与社会发展的协调程度	+
			X11 万元 GDP 能耗(t 标准煤/万元)	能源与经济协调发展的协调程度	+
			X12 万元农业 GDP 耗能(t 标准煤/万元)	粮食生产对能源系统的压力	+
			X13 农业系统用能占比(%)	粮食生产对能源系统的压力	+
			X14 水系统用能占比(%)	水资源系统对能源系统的压力	+
	状态(S)		X15 煤炭消费比例(%)	能源消费结构	+
			X16 能源生产弹性系数(-)	区域能源丰、缺状态	-
			X17 能源自给率(%)	能源供应能力	-
			X18 能源对外依存度(-)	能源对外依赖程度	+

		响应(R)	X19 能源消费弹性系数(-)	能源利用效率	+	
			X20 能源治理投资占比(%)	人类对能源系统的改善力度	-	
	粮食系统 (F)	压力(P)	X21 人口增长率(%)	人口对粮食系统的压力	+	
			X22 成灾率(%)	气候变化对粮食系统的压力	+	
		状态(S)	X23 人均粮食产量(kg/人)	区域粮食丰、缺状态	-	
			X24 人均粮食作物播种面积(hm ² /人)	粮食系统可持续发展能力	-	
			X25 复种指数(%)	耕地的利用效率	-	
			X26 单位面积粮食产量(kg/hm ²)	粮食生产技术进步水平	-	
			X27 排灌能耗强度(KJ/m ³)	粮食生产用水效率	+	
响应(R)		X28 农业机械化水平(%)	能源对粮食系统的支撑力度	-		

			X29 农田有效灌溉率(%)	水资源对粮食系统的支撑力度	-
生态系统 (E)	压力(P)		X30 工业废水排放量(万 t)	资源利用对水质的污染	+
			X31 工业 SO2 排放量(万 t)	资源利用对空气的污染	+
			X32 化肥施用强度(t/hm2)	粮食系统对生态环境的压力	+
			X33 农药施用强度(kg/hm2)	粮食系统对生态环境的压力	+
	状态(S)		X34 森林覆盖率(%)	自然系统基础状态	-
			X35 湿地面积占国土面积比重(%)	生态系统的调节能力	-
			X36 建成区绿地率(%)	城市生态系统的基础状况	-
	响应(R)		X37 城市污水处理率(%)	区域对水环境的修复	-
		X38 工业固体废物综合利用率(%)	区域对生态环境的修复	-	

			X39 治理水土流失面积(khm2)	区域对生态环境的修复	-
			X40 工业污染治理投资占比(%)	对资源利用污染的改善力度	-

2.3 数据来源

本研究的数据主要来源于 2006~2021 年的统计年鉴,其中水资源数据来源于《中国水利统计年鉴》,能源相关数据来源于《中国能源统计年鉴》,粮食相关数据来源于《中国农村统计年鉴》,生态环境数据来源于《中国环境统计年鉴》,经济社会数据来源于《中国统计年鉴》,以及长江经济带地区统计年鉴。需要说明的是部分无法直接获取的数据由计算获得,缺失年份的数据通过线性插值法将其补充完善。本文选取长江经济带 11 个省作为研究样本, 时间跨度为 2005~2020 年, 共计 176 个决策单元, 借助 Matlab 软件构建测算模型, 并将状态、响应作为投入指标, 压力作为产出指标代入模型。

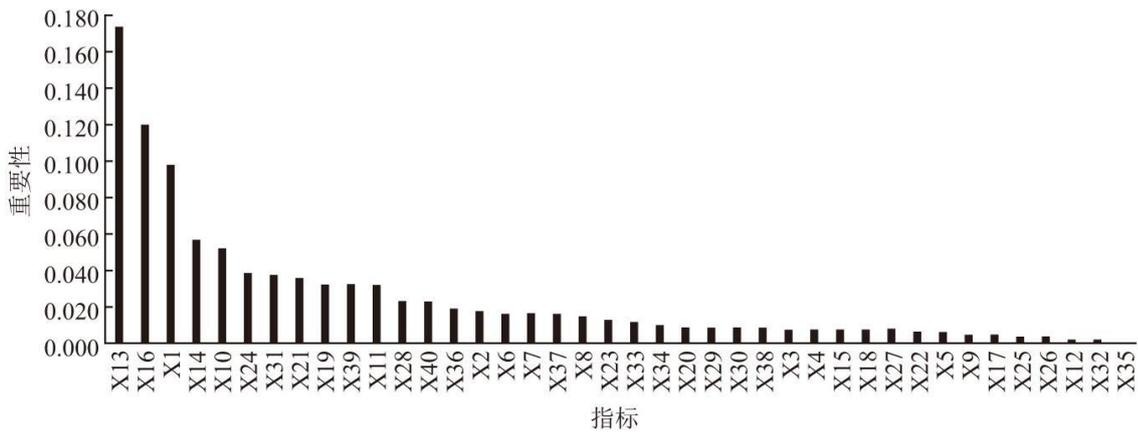


图 1 指标重要性评估结果图

表 2 优化后的 WEF E 系统脆弱性评价指标体系

序号	指标代码	指标名称	指标重要性
1	X13	农业系统用能占比	0.171
2	X16	能源生产弹性系数	0.119

3	X1	农业用水占比	0.096
4	X14	水系统用能占比	0.057
5	X10	人均能耗量	0.052
6	X24	人均粮食作物播种面积	0.039
7	X31	工业 SO2 排放量	0.038
8	X21	人口增长率	0.036
9	X19	能源消费弹性系数	0.033
10	X39	治理水土流失面积	0.033
11	X11	万元 GDP 能耗	0.032
12	X28	农业机械化水平	0.023
13	X40	工业污染治理投资占比	0.023
14	X36	建成区绿地率	0.019

15	X2	能源系统用水占比	0.018
16	X6	年平均降水量	0.017
17	X7	单位面积水资源量	0.017
18	X37	城市污水处理率	0.016
19	X8	节水灌溉率	0.015
20	X23	人均粮食产量	0.013
21	X33	农药施用强度	0.012
22	X34	森林覆盖率	0.010
23	X20	能源治理投资占比	0.009
24	X29	农田有效灌溉率	0.009
25	X30	工业废水排放量	0.009
26	X38	工业固体废物综合利用率	0.009

3 结果分析

3.1 长江经济带 WEFE 系统脆弱性时序变化特征

3.1.1 长江经济带 WEFE 系统脆弱性趋势分析

测度 2005~2020 年长江经济带及其东部、中部、西部地区的 WEFE 系统脆弱性(图 2)。结果显示: 2005~2020 年长江经济带 WEFE 系统脆弱性呈现波动上升趋势, 趋势折线图经历了上升、下降、再上升、再下降 4 个演变阶段, 由 0.242 上升至 0.31, 年均增速为 1.6%,表明研究期间长江经济带水、能源、粮食和生态之间纽带关系脆弱性增加。东部地区的 WEFE 系统脆弱性由 0.176 增长至 0.292,年均增速为 3.43%,整体脆弱性低于长江经济带, 较其他地区其年均增长速度最快。可见, 水、能源、粮食和生态的多资源综合管理不容忽视。2005~2011 年间, 脆弱性呈快速增长态势, 随后出现 4 年回落, 增长态势受到制约, 可能的原因在于“十一五”规划早期国家便发布了相关资源环境政策, 例如《“十一五”资源综合利用指导意见》《国家环境保护“十一五”规划》,为水、能源、粮食和生态的脆弱关系改善提供了良好的制度基础。中部地区的 WEFE 脆弱性由 0.313 增长至 0.363, 年均增速为 1.0%,该地区 WEFE 脆弱性处于三大区域的首位, 各年的脆弱性水平均高于长江经济带, 表明中部地区将是资源环境治理的重点区域。但相对于其他区域, 其年均增长速度最低, 可见该地区水、能源、粮食和生态的互动关系改善的效果最为显著。西部地区的 WEFE 脆弱性由 0.223 增长至 0.264,年均增速为 1.2%,在大多数研究年份中, 西部地区脆弱性处于最低位, 表明该地区水、能源、粮食和生态的互动相对良好。

整体来看, 东部和西部地区脆弱性整体低于长江经济带水平, 中部地区高于长江经济带水平。东部地区依靠发达的经济技术与交通设备, 能够较快的通过贸易等手段弥补自身发展的短板, 优化 WEFE 系统内部关键要素。西部地区位于长江上游, 旅游业相对发达, 对生态环境质量具有较高的要求, 使该地区在发展过程中注重生态和水环境的保护。加上工业化水平低, 生产和生活方式简单, 对资源能源需求不高, 因此西部地区 WEFE 系统脆弱性相对较低, 资源生态可持续发展水平良好。中部地区由于肩负着中部崛起的重要任务, 其经济增长的需求十分强烈, 发展过程中不仅承接了大量下游地区的产业转移, 重化工产业发达, 而且发展方式主要依靠规模扩张, 导致了较大的资源消耗体量和更加突出的生态保护矛盾。

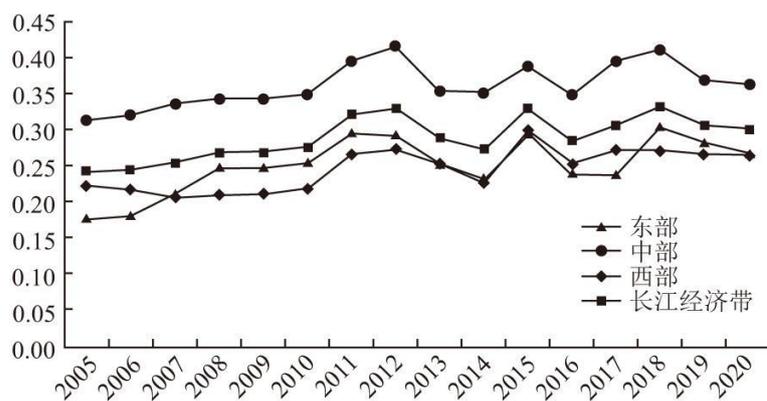


图 2 2005~2020 年长江经济带及三大区域的 WEFE 脆弱性趋势变动

3.1.2 长江经济带 WEFE 系统脆弱性动态演进

采用 Kernel 核密度函数分布对 2005、2010、2015、2020 年的长江经济带的 WEFE 脆弱性进行估计, 生成核密度曲线(图 3), 以动态展示长江经济带 WEFE 脆弱性演变特征。

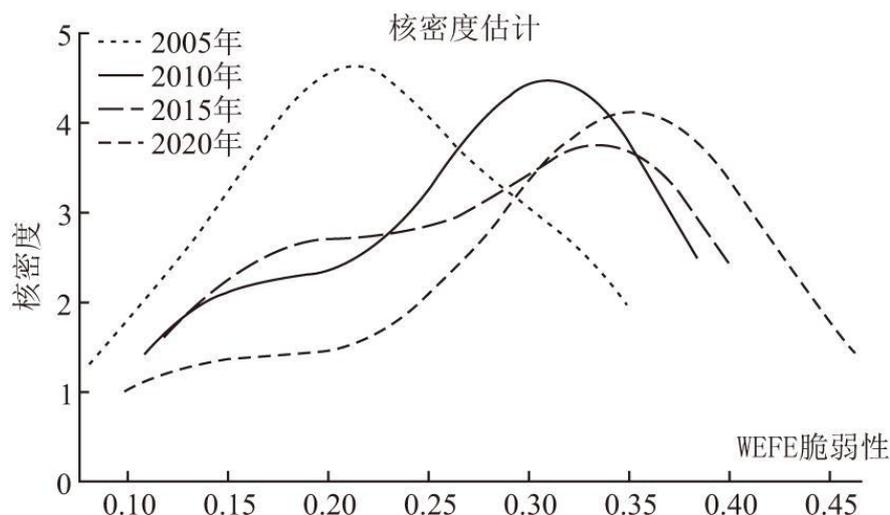


图 3 WEFE 脆弱性核密度

从位置来看, WEFE 脆弱性核密度曲线逐年向右偏移, 表明长江经济带低值区数量下降, 高值区数量增加, 长江经济带 WEFE 脆弱性呈逐渐增高的趋势; 从形状上来看, 核密度曲线实现了从单峰形态逐渐演变为呈“M”型的弱双峰分布。其中, 2005 年呈现明显的单峰形态, 到 2010 年呈现弱双峰形态, 2015 年双峰形态进一步凸显, 2020 年双峰状态有所减弱, 表明长江经济带的 WEFE 脆弱性两级分化的现象逐渐显现, 区域间 WEFE 脆弱性分布差异逐渐拉大。从波峰所在位置来看, 各年份波峰逐渐转移到偏右聚集, 说明长江经济带 WEFE 脆弱性由较低状态向较高状态转变; 从峰度来看, 各年份核密度曲线呈现由尖峰向宽峰发展转变的趋势且波峰明显下降, 表明长江经济带各省 WEFE 脆弱性差距逐渐扩大, 2020 年左峰继续下降且有消失的现象, 表明长江经济带 WEFE 脆弱性低值区分布较为分散而高值区较为集中, 地区间差距进一步加大, 这种差距是由于高值区急剧增多而导致。

总体来看, 整个研究期间长江经济带的 WEFE 脆弱性呈现由“由低至高”的发展态势。随着工业化和城镇化进程的大力推进, 经济生产不可避免的引起能源使用量、用水总量、粮食消费量的增加, 但由于开采和生产技术水平有限, 导致资源大量浪费, 生态环境破坏, 废水、废气、废物量持续上升。水-能源-粮食-生态脆弱性持续的增高, 表明该区域仍有较大的发展隐患。

3.2 长江经济带 WEFE 系统脆弱性空间演化特征

3.2.1 长江经济带 WEFE 系统脆弱性空间格局分析

本研究选取 2005、2010、2015、2020 年份, 利用 ArcGIS 的自然断点法将长江经济带 11 个省的 WEFE 脆弱值由低至高划分为等级 I ~ 等级 V 并对 WEFE 脆弱性进行空间可视化, 得到脆弱性空间格局分布情况(图 4), 空间特征整体表现为“中间高-两边低”的态势。

计算长江经济带三大区域 4 个年份的 WEFE 脆弱性评价结果平均值, 东部地区分别 0.176、0.254、0.232、0.292, 中部地区分别为 0.313、0.350、0.388、0.363, 西部地区分别为 0.223、0.210、0.220、0.264。结合图 4 观测可得, 东部地区脆弱性空间格局演化表征较为活跃, 脆弱性经历了上升-下降-上升的变化阶段; 中部地区 WEFE 脆弱性等级空间格局演化表征呈波动上升态势, 且一直维持在较高水平; 西部地区 WEFE 脆弱性空间格局演化表征呈波动上升, 经历下降-上升的变化阶段, 但数值处于较低水平。对比三大区域可知, 长江经济带资源可持续发展水平为西部>东部>中部, 西部 WEFE 脆弱性平均值低于东部 0.01, 低于中部 0.122。

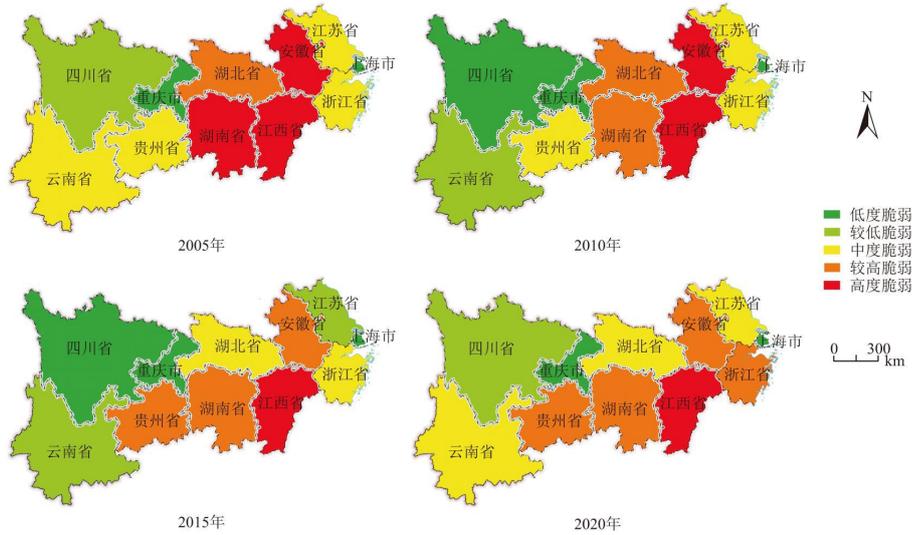


图 4 2005~2020 年长江经济带 WEFE 脆弱性空间分布格局

注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2016)1612 号的标准地图制作，底图边界无修改。

具体分析各省市的 WEFE 脆弱性空间格局演化趋势，发现四川、云南两地空间格局演化表征较为活跃，呈现先下降后上升的发展态势，四川经历了“较低脆弱(等级 II)-低度脆弱(等级 I)-较低脆弱(等级 II)”的变化，云南经历了“中度脆弱(等级 III)-较低脆弱(等级 II)-中度脆弱(等级 III)”的变化。贵州 WEFE 脆弱性变化空间格局演化特征呈现逐渐上升的态势，由中度脆弱(等级 III)转为较高脆弱(等级 IV)。重庆 WEFE 脆弱性空间格局演化表征较为稳定，一直维持在低度脆弱(等级 I)等级。川渝两地属于长江经济带西部地区经济相对发达的地区，改善 WEFE 脆弱性的经济能力和技术水平相对较强，因此 WEFE 脆弱性一直较低。一般而言，资源流通量与经济发展规模呈正相关，重庆经济体量相对较小，水、能源、粮食、生态的需求量也相对较少。云贵两地自然资源丰富，主要以旅游产业带动经济发展，但资源利用方式粗放，生态环境保护不足，导致资源环境效率有待提高。加上不当的经济行为与农业生产方式造成了生态环境的污染与破坏，致使该地区 WEFE 脆弱性水平逐渐上升到中高水平。

安徽、湖南、湖北 WEFE 脆弱性空间格局演化表征略有下降的趋势，但脆弱性一直维持在较高水平。其中安徽与湖南由高度脆弱(等级 V)转为较高脆弱(等级 IV)并维持，湖北由较高脆弱(等级 IV)转为中度脆弱(等级 III)并维持。江西省 WEFE 脆弱性空间格局演化表征非常稳定，一直处在高度脆弱(等级 V)水平。中部地区不仅拥有较多农业生产区，而且以水稻、豆类等高耗水作物种植偏多，加上农业生产管理和技术水平的滞后，导致中部地区农业灌溉效率和能源利用效率处于较低水平。在 2005 年“中部崛起”战略的政策支持下，中部地区工业化、城镇化进程加快，承接了大量来自江浙沪地区的制造业、手工业第二产业的转移，一定程度上拉动了当地的经济的发展，但污染也随之而至，生态环境、水环境均遭受了不同程度的破坏，导致中部地区 WEFE 系统脆弱性虽有改善，但依然较高。分别在“武汉城市圈”“长株潭城市群”的建设推动下，湖北、湖南两地区作为核心区域具有中部崛起的重要战略地位。但发展过程中由于对多资源协同发展规律及趋势认识的不足，以及对生态环境保护的优先级别的改变，导致资源要素没有起到改善 WEFE 系统脆弱性的作用。

江苏 WEFE 脆弱性空间格局演化表征活跃，经历了中度脆弱-较低脆弱-中度脆弱的变化。浙江 WEFE 脆弱性空间格局演化表征呈上升态势，由中度脆弱转为较高脆弱。上海 WEFE 脆弱性空间格局演化表征稳定，一直维持低度脆弱等级。长江经济带江苏省和浙江省经济体量相对较大，不可避免的具有较大水、能源、粮食资源的消耗与流通量。就本研究结果，江苏、浙江以火力发电为主，能源生产耗水强度大，且两地能源消费 90% 依赖外地调入。加上江苏省的化工业、金属冶炼等第二产业发达，属能源、水资源密集和重污染产业，导致江苏省 WEFE 脆弱性下降不明显。上海是以高新技术产业为主的产业结构，资源密集型产业较少，水、能源、粮食、生态各系统间的资源竞争关系较为缓和。《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》提出后，造

业、手工业等第二产业大量的转移到了中游地区，这也意味着资源消耗与环境污染被转移。叠加其先进的生产技术、管理水平也有助于提升区域和产业间资源的适配程度。因而可以看到上海地区 WEFE 系统脆弱性能够保持在优良且平稳的发展趋势。

3.2.2 长江经济带 WEFE 脆弱性空间分异特征

本研究将脆弱性值作为空间变量赋值各省市的几何中心，借助 ArcGIS10.2 软件对 4 个年份分别进行 Kriging 插值计算，结果运用 Surfer 软件可视化表达，探究长江经济带 WEFE 脆弱性空间差异特征，结果如图 5。

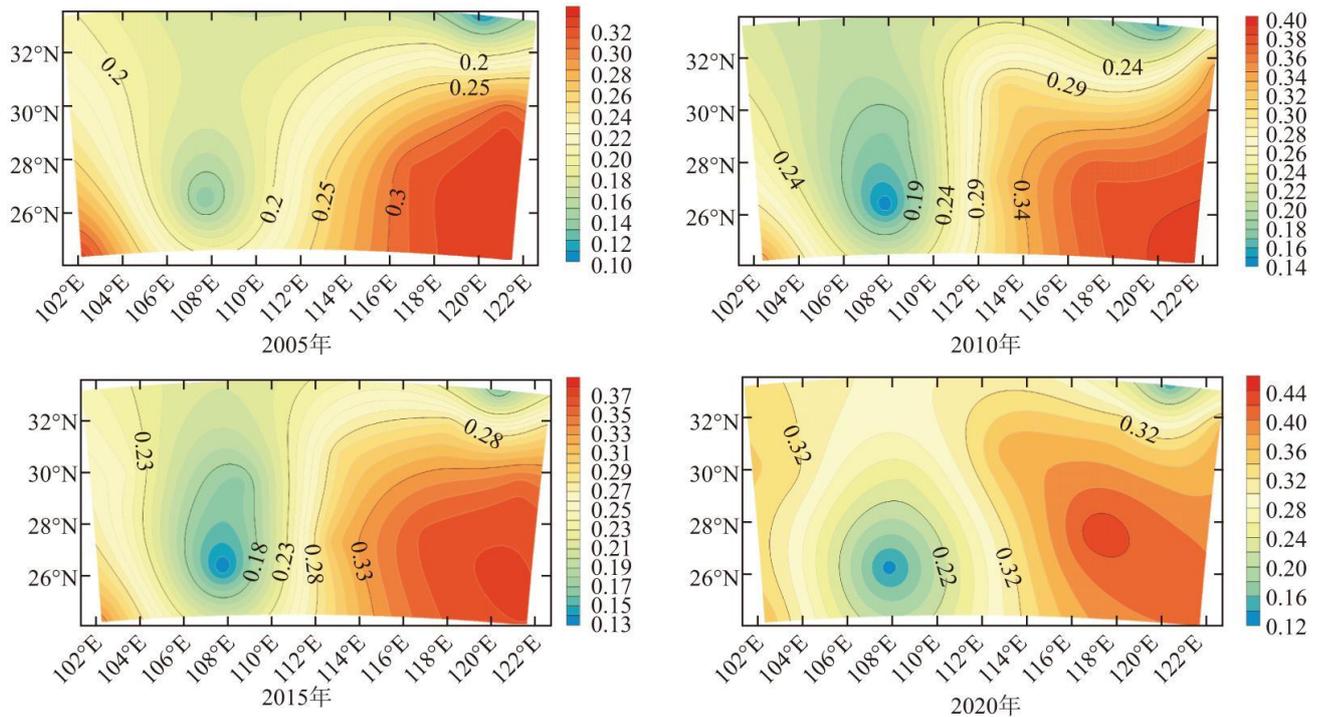


图 5 2005~2020 年长江经济带 WEFE 脆弱性 Kriging 插值模拟

总体观测研究期长江经济带 WEFE 脆弱性空间分异特征和演变趋势，具有一定的连续性，高值区由两个颜色较深的核心、次核心区逐渐扩散分化为一个颜色较淡的核心区，低值区从核心、次核心区逐渐分化为两个低值“双核心”区。整体上长江经济带 WEFE 脆弱性呈现中部>东部>西部的空间格局，脆弱性高值区伴随着明显的西北方向空间转移趋势，等值线也变得更为密集，表明区域差距逐步加大，非均衡性有所增强。具体来看，2005 年，WEFE 脆弱性高值核心区位于 116° E~122° E, 24° N~29.5° N, 高值核心区的边缘覆盖了江西、浙江，此时两地处在高值核心区的较低位置；另一高值区位于 102° E~105° E, 24° N~27° N, 形成以云南为中心的高值次核心区，长江经济带整体呈现以江西、浙江、云南为中心向周边地区递减趋势发展。WEFE 脆弱性低值区位于 116° E~121° E, 31° N~34° N, 以江苏为中心的低值核心区；107° E~109.5° E, 25° N~28° N, 以重庆为中心的低值次核心区。可见，在早期阶段，长江经济带 WEFE 脆弱性空间特征已经初现“中间高两边低”的格局特征。2010 年，WEFE 脆弱性高值区相比 2005 年呈西北方向扩散，逐渐覆盖到湖南、湖北，且高值次核心区具有逐渐缩小的态势，以重庆为中心的低值次核心区凹陷逐渐明显。2015 年，WEFE 脆弱性高值区继续向西北方向转移，高值核心区进一步扩大到安徽地区并不断吞并湖北，高值区的“核心”不断向江西省逼近，完整的“核心”逐渐显露，且高值次核心区有消失的态势。可见，在中期阶段，长江经济带 WEFE 脆弱性空间格局变化显著，高值区向集中点状非均衡化发展，低值区向多点多核心均衡化发展。2020 年，高值区的“核心”已逐渐转移到江西，“次核心”基本消失，形成完全以江西为中心的高值核心区。脆弱性低值区已被完全分割成以重庆、江苏为中心的“双低值”核心区。长江经济带 WEFE 脆弱性“中间高两边低”的分异格局完全形成。

3.3 长江经济带 WEFE 脆弱性影响因素分析

3.3.1 变量选取及模型设定

长江经济带 WEFE 脆弱性时空分异特征明显, 不同区域间 WEFE 脆弱性水平存在空间关联性和差异性。经济水平、社会发展、环境保护、政府支持、技术进步之间的相互影响决定了长江经济带 WEFE 脆弱性时空特征的复杂性。根据已有研究成果 [31,32,33],本研究基于“经济-社会-环境-技术”系统, 选取长江经济带 WEFE 系统脆弱性潜在影响因素: 经济系统选取经济发展水平和产业结构; 社会系统选取城镇化率、人口状况、饮食结构和居民消费水平; 环境系统选取环境保护力度; 技术系统选取技术进步。

为定量分析各因素对 WEFE 系统脆弱性的影响, 构建长江经济带 WEFE 系统脆弱性 Tobit 影响因素模型, 其中被解释变量为长江经济带各省的 WEFE 系统脆弱性, 模型构建如下:

$$\begin{aligned} \ln Y_{it} = & \beta_0 + \beta_1 \ln PGDP_{it} + \beta_2 \ln IS_{it} + \beta_3 \ln UR_{it} + \\ & \beta_4 \ln PQ_{it} + \beta_5 \ln PD_{it} + \beta_6 \ln PVP_{it} + \\ & \beta_7 \ln PMP_{it} + \beta_8 \ln EP_{it} + \beta_9 \ln TP_{it} + \lambda \end{aligned} \quad (7)$$

式中: i 表示的是长江经济带 11 个省(市); t 表示年份; Y_{it} 是被解释变量, 表示第 i 个省(市)在第 t 年的 WEFE 系统脆弱性; β_0 为截距项; $\beta_1 \sim \beta_9$ 分别表示 9 个自变量的回归系数; λ 为随机扰动项。为保证回归结果的准确性和稳健性, 以及减少样本数据可能存在的异方差及波动影响, 在进行面板 Tobit 回归之前, 本研究对模型中的解释变量和因变量进行了对数处理。因变量与解释变量的具体含义、符号表示及表征方法如表 3 所示。

表 3 因变量与解释变量具体含义、符号表示及表征方法

类型	系统	解释变量	符号表示	表征方法
因变量	WEFE 系统	WEFE 系统脆弱性	Y	CE-DEA 效率值
解释变量	经济	经济发展水平	PGDP	地区人均 GDP
		产业结构	IS	第三产业产值/地区总产值

社会	城镇化率		UR	城镇人口/总人口
	人口素质		PQ	平均受教育年限
	人口密度		PD	人口总量/区域面积
	人均蔬菜生产量		PVP	人均蔬菜生产量
	人均肉类生产量		PMP	人均肉类生产量
环境	环境保护力度		EP	财政环境保护支出/财政支出
技术	技术进步		TP	科技支出/财政支出

3.3.2 回归结果及分析

回归分析结果显示，不同自变量对长江经济带 WEFE 系统脆弱性的影响显著性水平具有明显差异，如表 4 所示。

(1) 经济发展水平

地区人均 GDP 的回归系数数值为 13.315,在 5%的显著性水平下对 WEFE 系统脆弱性产生正向影响关系。我国正处于经济高速发展向高质量发展的转型期，经济的发展大多仍是以高成本高耗能高污染产业为主，资源耗损与环境牺牲代价大。长江经济带粗放型的经济增长模式产生大量的污染和资源低效率利用，经济增长与资源环境消耗的矛盾依旧突出。

表 4 长江经济带 WEFE 系统脆弱性影响因素回归结果

影响因素	相关系数	标准误	z 统计量	P 值
lnPGDP	13.315*	5.703	2.335	0.020
lnIS	-4.264**	1.215	-3.510	0.000
lnUR	4.712	3.590	1.312	0.189
lnPQ	1.964	1.081	1.817	0.069
lnPD	16.934**	5.518	3.069	0.002
lnPVP	0.997	0.757	1.317	0.188
lnPMP	0.962*	0.421	2.288	0.022
lnEP	0.472*	0.228	2.071	0.038
lnTP	-19.362*	9.454	-2.048	0.041

注释：*、**分别表示在 5%,1%显著性水平显著。

(2)产业结构

从产业结构来看，回归系数值为 -4.264,在 1%的显著性水平下对 WEFE 系统脆弱性产生负向影响关系。随着服务业、高新技术产业的发展，长江经济带第三产业结构占比越来越大。第三产业对资源环境的压力负荷较小，对 WEFE 系统脆弱性具有改善作用。结果表明长江经济带产业结构优化升级的成效显著，有效引导资源向低消耗低污染的产业流动，降低了 WEFE 系统的

脆弱性。

(3)城镇化率

城镇化率的回归系数值为 4.712,对 WEF E 系统脆弱性产生正向影响关系,但影响不显著。城镇化导致土地利用方式转变引发用地矛盾突出和生态环境破坏,对 WEF E 系统带来一定压力。相比较而言,长江经济带城镇化开展较早,现处于稳定时期,加上新型城镇化的提出,城市建设过程中融入生态文明理念,因此在城市建设过程中能够加快引导资源高效利用和生态文明建设。因此,长江经济带城镇化推进对 WEF E 系统的压力影响不显著性。

(4)人口状况

人口素质回归系数值为 1.964,对 WEF E 系统脆弱性产生不显著的正向影响。一般来说国民素质的提升,利于环境保护意识与资源节约意识的增强。回归结果显示人口素质增加了 WEF E 脆弱性,当前大众的“非绿色”消费观念和消费模式依旧普遍存在,不利于长江经济带 WEF E 系统脆弱性的降低,当前这种影响还并不显著。人口密度回归系数值为 16.934,在 1%的显著性水平下对长江经济带 WEF E 系统脆弱性产生正向影响关系。人口密度是引起 WEF E 脆弱性上升的重要原因,人口密度越大,对水、能源、粮食和生态资源的需求量就越大。长江经济带人口众多,分布密集,有限的资源与生态供应无法满足高强度的需求,明显引起 WEF E 系统脆弱性上升。

(5)饮食结构

人均蔬菜生产量回归系数值为 0.997,对 WEF E 系统脆弱性表现处不显著的正向影响关系。蔬菜的种植和生产过程消耗水、能源、土地,农药化肥的施用产生一定水土污染,对长江经济带 WEF E 系统脆弱性具有恶化加剧的作用,但这种作用并不显著。人均肉类生产量的回归系数值为 0.962,在 5%的显著性水平下对长江经济带 WEF E 系统脆弱性产生正向影响关系。养殖、制造、运输牲畜消耗大量的水资源、能源、土地,不仅直接占用土地资源,还需要大量的土地用于种植喂养牲畜的作物。牲畜粪便和污水任意排放及处理不当还会带来水质、空气和土壤污染。随着人民生活水平的提高,长江经济带饮食结构向着肉蛋奶和水产品方向改变,意味着更多粮食饲料、水资源、矿物能源以及养殖土地的投入,另一方面更多污染的产生使生态环境承受了更大压力。因此,人均肉类生产量对 WEF E 系统脆弱性的影响更显著。

(6)环境保护力度

环境保护力度的回归系数值为 0.472,在 5%的显著性水平下对 WEF E 系统脆弱性产生正向影响关系。一般情况下,环境保护力度越大,污染排放越小,环境质量越高,进而降低 WEF E 脆弱性。这一结果与预期相反,相比较于快速增长的经济总量与污染排放,长江经济带环保力度与经济社会发展带来的污染未实现同步增长,污染治理设施与环境保护投资相对滞后,表明长江经济带目前的环境保护力度仍旧不足,限制了系统脆弱性改善,导致 WEF E 脆弱性增加。

(7)技术进步

技术进步的回归系数值为 -19.362,在 5%的显著性水平下对 WEF E 系统脆弱性产生负向影响关系。表明技术进步是长江经济带 WEF E 系统脆弱性变化的重要因素。科学技术可以有效节约和循环利用资源提升行业资源利用效率,降低污染。生产技术进步可以促进水、能源、粮食生产工艺改进以及资源集约节约利用。零排放处理技术的进步可以减少废水、废气、废物的排放。长江经济带注重科技投入的增加,对 WEF E 系统脆弱性的降低具有显著的作用。

4 结论与建议

4.1 结论

本研究结合 PSR 分析框架和随机森林的数据降维功能, 构建了 WEFE 系统脆弱性评价指标体系, 采用考虑自评和他评的交叉效率 DEA 模型对长江经济带的 WEFE 系统脆弱性进行测算, 并结合 Kernel 核密度函数和克里金插值可视化方法考察了 WEFE 脆弱性的时间动态演变特征, 最后运用 Tobit 回归分析探索长江经济带 WEFE 系统脆弱性的主要影响因素。得出以下结论:

从时间演化特征来看, 2005~2020 年间长江经济带 WEFE 脆弱性变化趋势经历了先上升后下降, 再上升再下降的演变阶段, 且整个研究期间 WEFE 脆弱性呈现由“由低至高”的发展趋势。从三大区域时序变化来看, 东部和西部地区脆弱性整体低于长江经济带水平, 中部地区高于长江经济带水平, 且东部地区脆弱性表征较为活跃, 经历了上升-下降-上升的变化阶段; 中部地区脆弱性表征呈平稳上升的发展态势, 且一直维持在较高水平; 西部地区脆弱性表征呈平稳上升趋势, 且数值依然处于较低水平。

从空间演化特征来看, WEFE 脆弱性呈现“中间高两边低”的空间分布格局, 整体上中部>东部>西部。空间演化特征表现一定的规律性和连续性, 高值区向集中点状分布非均衡化发展, 低值区向多点多核心均衡化发展, 高值区伴随明显的空间转移趋势。随着时间推移, 长江经济带省域间的 WEFE 脆弱性差距逐步拉大, 形成相对独立的空间格局, 两级分化的空间分异特征日益凸显。

从影响因素来看, 优化产业结构、加大科技创新投入将有助于降低 WEFE 系统脆弱性。高投入高污染的经济发展方式对资源消耗及环境牺牲过大, 经济生产必须向高质量发展转变; 肉类食品的生产加工加剧了资源消耗和污染排放; 城镇化加速了人口密集, 对资源和生态的耗竭扩大, 且国民素质有待提高; 目前长江经济带环境治理不达标, 环境保护力度与经济社会发展带来的污染未实现同步增长。

4.2 建议

基于以上分析及研究结论, 提出以下资源环境治理的对策建议:

系统认识和优化 WEFE 耦合系统内部要素, 推动区域资源可持续发展。加强区域资源底线管控, 确保“水土资源不过载”, 强化水资源统一调度; 注重提升水、能源、粮食的生产利用效率及资源结构优化, 扩大清洁能源与可再生能源使用比例; 加快生产技术创新和绿色技术创新, 减少农业和工业水资源消耗和污染物排放, 增加粮食绿色产出, 推动 WEFE 系统耦合关系良性发展。

强化空间差异化管控, 分区采取针对性治理政策。西部地区作为降脆观察区, 采用预防保护手段为主, 重点防控与监测该区域水、能源、粮食资源情况, 增强生态保护意识; 东部地区作为重点降脆区, 以保护恢复为主, 加大产业技术创新和生态保护的投资力度, 提高资源利用效率, 持续改善 WEFE 系统脆弱性, 并发挥对中部地区的政策、经济辐射作用; 中部地区作为优先降脆区, 以治理修复为主, 转移落后企业, 发展科技创新型产业, 注重吸纳其他地区先进理念、方法和技术, 以资源集约化、效率化的利用方式拉动区域经济可持续增长。

权衡 WEFE 系统多因素的综合管理, 促进区域高质量发展。优化产业结构, 加大新型服务业在国民经济中的占比; 加大科技投入, 增强国民素质, 通过技术和知识溢出推进科技进步; 促进饮食结构多样化, 加强绿色农业和生态农业发展, 引导蔬菜和肉类食品绿色生产; 促进经济转型, 改变经济增长方式, 大力发展低耗能低污染型的绿色环保产业和高技术产业; 继续加强环境治理投资力度, 增加环境污染治理重点项目建设。

参考文献:

-
- [1] HAN D , YU D , CAO Q. Assessment on the features of coupling interaction of the food - energy - water nexus in China[J] . Journal of Cleaner Production , 2020 , 249 : 119379.
- [2] 罗 巍 , 杨玄酯 , 杨永芳 , 等. 黄河流域水—能源—粮食纽带关系协同 演化 及 预测 [J] . 资源 科 学 , 2022 , 44 (3) :608-619.LUO W , YANG X Z , YANG Y F , et al. C o - evolution of water- energy- food nexus in the Yellow River Basin and forecast of fu- 619.
- [3] ZHANG C , CHEN X , LI Y , et al. Water- energy- food nexus: C oncepts , questions and methodologies [J] . Journal of Cleaner Production , 2018 , 195(10) : 625-639.
- [4] CHEN W , CHEN Y. Two - step measurement of water- energy- food symbiotic coordination and identification of key influencing factors in the Yangtze River Basin [J] . Entropy , 2021 , 23(7) :798.
- [5] KARABULUT A , EGOH B N , LANZANOVA D , et al. Map- ping water provisioning services to support the ecosystem- water- food - energy nexus in the Danube river basin [J] . Ecosystem services , 2016 , 17 : 278-292.
- [6] UNITED NATIONS. Transforming our world : The 2030 agendafor sustainable development[J] . Journal of the South African In- stitution of Civil Engineering , 2016 , 24(1) : 26-30.
- [7] RINGLER C , BHADURI A , LAWFOR D R. The nexus across water, energy , land and food (WELF) : P otential for improved resource use efficiency [J] . C urrent Opinion in Environmental Sustainability , 2013 , 5(6) : 617-624.
- [8] DE ANDRADE GUERRA J B S O , BERCHIN I I , GARCIA J , et al. A literature- based study on the water- energy- food nexus for sustainable development[J] . Stochastic Environmental Research and Risk Assessment , 2021 , 35(1) : 95- 116.
- [9] DAI J Y , WU S Q , HAN G Y , et al. Water- energy nexus: A review of methods and tools for macro - assessment [J] . Applied
- [10] RAMEEN S A , Hussam S F , Nic P. Valuing of wadi el - rayanecosystem through water- food - energy nexus approach [J] . Eco- hydrology & hydrobiology , 2017 (17) : 247-253.
- [11] MAASS M. Integrating food - water - energy research through a so - cio - ecosystem approach [J] . Frontiers in Environmental Sci- ence , 2017 , 5 : 48.
- [12] RASUL G , SHARMA B. The nexus approach to water- energy- food security: An option for adaptation to climate change [J] .Climate P olicy , 2016 , 16(6) : 682-702.
- [13] 施海洋 , 罗格平 , 郑宏伟 , 等 . 基于 “水—能源—食物—生态” 纽带因 果 关 系 和 贝 叶 斯 网 络 的 锡 尔 河 流 域 用 水 分 析 [J] . 地 理 学 报 , 2020 , 75(5) : 1036- 1052.SHI H Y , LUO G P , ZHENG H W , et al. Water use analysis of syr

darya river basin: Based on “ water- energy- food - ecology ” nexus and bayesian [J] . Acta Geographica Sinica , 2020 , 75(5) : 1036- 1052.

[14] MARTINEZ- HERNANDEZ E , LEACH M , YANG A. Under- standing water- energy- food and ecosystem interactions using thenexus simulation tool NexSym [J] . Applied Energy , 2017 ,206 : 1009- 1021 .

[15] 孙才志 ,魏亚琼 ,赵良仕 .干旱区水—能源—粮食纽带系统协同演化—以中国西北地区为例 [J]. 自然资源学报, 2022 , 37(2) : 320-333.SUN C Z , WEI Y Q , ZHAO L S , et al. Co - evolution of water- energy- food nexus in arid areas: Take Northwest China as an ex- ample [J] . Journal of Natural Resources , 2022 , 37 (2) :320-333.

[16] 常奂宇 ,赵 勇 ,桑学锋 ,等 .京津冀水资源—粮食—能源—生态协同调控研究 I :方法与模型 [J]. 水利学报, 2022 , 53(6) : 655-665.CHANG H Y , ZHAO Y , SANG X F , et al. Research on thecoordinated regulation of water resources- food - energy- ecology inB eijing- Tianjin - Hebei Region I : Methods and Model[J] . Jour- nal of Hydraulic Engineering , 2022 , 53(6) : 655-665.

[17] SMAJGL A , WARD J , PLUSCHKE L. The water- food - energy Nexus - Realising a new paradigm [J] . Journal of hydrology ,

[18] SVETNIK V , LIAW A , TONG C , et al. Random forest: Aclassification and regression tool for compound classification andQSAR modeling[J] . Journal of chemical information and com-

[19] CHEN W , LI Y , XUE W , et al. Modeling flood susceptibility using data - driven approaches of naive bayes tree , alternating de- cision tree , and random forest methods[J] . Science of The To-

[20] BREIMAN L. Random forests[J] . Machine learning , 2001 , 45 (1) : 5-32.

[21] ZOU L L , WEI Y M. Impact assessment using DEA of coastal hazards on social- economy in Southeast Asia [J] . Natural haz-

[22] CHARNES A , COOPER W W , RHODES E. Measuring the ef- ficiency of decision making units[J] . European Journal of Oper-

[23] SEXTON T R , SILKMAN R H , HOGAN A J. Data envelop- ment analysis: C ritique and extensions [J] . New Directions for Program Evaluation , 1986 , 1986(32) : 73- 105.

[24] 杨 勇 ,邓祥征. 中国城市生态效率时空演变及影响因素的区域 差 异 分 析 [J]. 地 理 科 学 , 2019 , 39(7) : 1111 -1118.YANG Y , DENG X Z. Spatial- temporal evolution of the urbaneco- efficiency in China and its regional differences [J] . Geo-

[25] 王兆峰,刘庆芳. 长江经济带旅游生态效率时空演变及其与旅游经济互动响应[J]. 自然资源学报, 2019 , 34 (9) :1945- 1961 .WANG Z F , LIU Q F. The temporal and spatial evolution oftourism eco- efficiency in the Yangtze River Economic Zone andits interaction with tourism economy[J] . Journal of Natural Re-

-
- [26] 孙才志 , 覃雄合 , 李 博 , 等. 基于 WSBM 模型的环渤海地区海洋经济脆弱性研究[J]. 地理科学 , 2016 , 36(5) :705-714.SUN C , QIN X , LI B , et al. Assessment of marine economy vulnerability of coastal cities in bohai sea ring area based onWSBM model [J]. Geographical Science , 2016 , 36 (5) :705-714.
- [27] CUTTER S L. Vulnerability to environmental hazards [J]. Pro-
- [28] MORROW B H. Identifying and mapping community vulnerabil-
- [29] SKEES J R. Agricultural risk management or income enhance-
- [30] 刘凌燕 , 王慧敏 , 刘 钢 , 等. 供需视角下水—能源—粮食系统风险的驱动机理与政策仿真—面向东北三省的系统动力学分析[J]. 软科学 , 2020 , 34(12) : 52-60.LIU L Y , WANG H M , LIU G , et al. Driving mechanism and policy simulation of water- energy- food risks from the P erspec- tive of Supply and Demand[J]. Soft Science , 2020 , 34(12) : 52-60.
- [31] 张子龙, 逯承鹏, 陈兴鹏, 等. 中国城市环境绩效及其影响因素分析: 基于超效率 DEA 模型和面板回归分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015 , 29(6) : 1 -7.ZHANG Z L , LU C P , CHEN X P , et al. Analysis of China’ s urban environmental performance and its influencing factors: Based on the super efficiency DEA model and panel regressionanalysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment , 2015 , 29(6) : 1 -7.
- [32] 胡 彪, 程 达. 京津冀地区城市新陈代谢效率的时空格局演变研究[J]. 现代城市研究, 2018 , 33(6) : 37-43.HU B , CHENG D. Temporal and spatial differences of urbanmetabolic efficiencies in B eijing-Tianjin -Hebei region [J].
- [33] 黄和平, 李亚丽, 王智鹏. 基于 Super-SBM 模型的中国省域城市工业用地生态效率时空演变及影响因素研究[J]. 生态学报, 2020 , 40(1) : 100- 111 .HUANG H P , LI Y L , WANG Z P. Spatio-temporal changes of eco-efficiency and influencing factors of industrial land use atthe provincial level of China [J]. Acta Ecologica Sinica , 2020 , 40(1) : 100- 111 .