

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.009

中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征

孙才志¹, 郝帅², 赵良仕¹

(1. 辽宁师范大学海洋经济与可持续发展研究中心, 辽宁 大连 116029;

2. 辽宁师范大学地理科学学院, 辽宁 大连 116029)

摘要:采用SBM-DEA模型、网络DEA模型及双变量空间自相关方法对1997—2017年中国30个省级行政区的水资源-能源-粮食纽带系统(WEF系统)效率进行测度,并分析了其时空演化特征。结果表明:研究时段内,中国水资源、能源、粮食3个子系统的效率值呈现逐年上升趋势,水资源子系统、粮食子系统的效率值提升趋势明显,能源子系统效率值提升速度较为缓慢,空间分布上东部地区各子系统的效率值明显高于中部和西部地区;水资源子系统、能源子系统、粮食子系统效率值之间的空间相互作用存在一定差异,但协同作用的地区分布范围较为一致;中国WEF系统效率值呈波动上升趋势,而区域分布上,东部地区、东北地区、中部地区、西部地区的效率平均值呈依次下降的趋势,高效率区主要分布在东部沿海与黄河流域中下游地区,而西部地区则是低效率聚集区。

关键词:水资源-能源-粮食纽带系统;网络DEA模型;SBM-DEA模型;双变量空间自相关;中国

中图分类号:TV213.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0061-08

Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China // SUN Caizhi¹, HAO Shuai², ZHAO Liangshi¹ (1. Center for Studies of Marine Economy and Sustainable Development, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China; 2. School of Geography, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

Abstract: SBM-DEA model, network DEA model and bivariate spatial autocorrelation method were used to measure the efficiency of water resources-energy-food nexus system (WEF system) of 30 provincial administrative regions in China from 1997 to 2017, and the spatial-temporal evolution characteristics were analyzed. The results show that during the study period, the efficiency values of water resources, energy and food subsystems in China showed upward trends year by year. The efficiency values of water resources subsystem and food subsystem showed apparent upward trends while the efficiency value of energy subsystem increased slowly. The efficiency value of each subsystem in eastern region was significantly higher than that in central and western regions. There were certain differences in the spatial interaction among the efficiency values of water resources, energy and food subsystems, but the regional distribution range of synergy was relatively consistent. The efficiency values of WEF system in China were on the rise with fluctuation. In terms of regional distribution, the efficiency values were relatively high in eastern and northeastern regions while low in central and western regions. The high efficiency values were mainly distributed in the eastern coastal areas and the middle and lower reaches of the Yellow River Basin, while the western regions were low efficiency areas.

Key words: water resources-energy-food nexus system; network DEA model; SBM-DEA model; bivariate spatial autocorrelation; China

水资源、能源、粮食作为支撑人类生存和区域经济社会发展的战略性、基础性资源,三者之间相互作用、交互影响。在17项可持续发展目标(sustainable development goals, SDGs)中,SDG2、SDG6和SDG7重点阐述了粮食、水与能源对实现联合国《2030年

可持续发展议程》的重要意义^[1-2]。当前,中国已成为世界水资源、能源和粮食第一消费国,其中能源、粮食对国际市场的依赖程度逐渐加深,加之工业化及城镇化进程不断加快,以及人口增加、气候变化等因素将不可避免地加大资源供给压力,同时加剧水

基金项目:国家社会科学基金重点项目(19AJY010);辽宁省社会科学规划基金(L17CJY004)

作者简介:孙才志(1970—),男,教授,博士,主要从事水资源经济与海洋经济研究。E-mail: suncaizhi@lnnu.edu.cn

通信作者:赵良仕(1985—),男,副教授,博士,主要从事水资源经济研究。E-mail: liangshizhao@lnnu.edu.cn

资源、能源、粮食所面临的挑战。因此,开展水资源-能源-粮食纽带系统(water resources-energy-food nexus system, WEF 系统)的综合研究对保证水资源安全、能源安全及粮食安全具有重要意义。

2011年,Hoff^[3]于波恩会议上提出水资源、能源、粮食纽带关系,为研究三者之间的相互作用提供了基本框架;亚洲开发银行、国际可再生能源机构、联合国粮农组织则分别以“水资源”“能源”“粮食”为中心对三者之间的“纽带”关系进行了进一步的阐述^[4-6]。目前,关于 WEF 系统的研究尺度各异^[7-8],但就研究方法来看,常用方法有生命周期评估法(life cycle assessment, LCA)^[9-10]、投入产出分析法(input-output analysis, IOA)^[11-12]、指标体系法^[13-14]及系统动力学法(system dynamics, SD)^[15]。Salmoral 等^[10]以英格兰南部的 Tamar 河流域为研究对象,基于生命周期评估法对该区域粮食消费过程中的水资源和能源进行了量化,并对粮食供应链中的关键投入进行了评估,研究结果可为应对 WEF 系统的潜在风险提供依据;Owen 等^[16]运用投入产出分析法,基于能源、水和粮食的消费情况计算了英国 1997—2013 年从原料提取到最终消费不同产品供应链之间能源、水资源和粮食的相互作用;Zhang 等^[17]基于“资源依赖”“资源供给”和“资源集成”3 个视角构建了城市 WEF 系统之间关联关系的基本框架;Liu 等^[18]基于多区域投入产出方法,对中国 WEF 系统之间的关联关系进行了研究,在此基础上识别、确定了 WEF 系统中的关键区域和流量,研究结果可为研究 WEF 系统之间的相互作用及区域 WEF 系统的协调管理提供借鉴;Chu 等^[19-21]则从水资源的视角探讨了中国能源(化石能源及电能)消费与区域水资源之间的关系,为研究 WEF 系统提供了一种新的视角;Yan 等^[22]认为产业联动是推动 WEF 系统发展的一个经济原因,据此基于产业联动视角构建了结构向量自回归(structural vector autoregression, SVAR)模型对中国 1997—2016 年的 WEF 系统的内部作用机制进行了分析;孙才志等^[23-25]通过构建 WEF 系统评价指标,采用空间计量方法对中国省际 WEF 系统的偶合协调程度进行了测度。

综上所述,当前关于 WEF 系统之间的关系框架研究、系统中两两之间的关系研究相对成熟,研究成果较为丰富,而关于 WEF 系统的效率研究则相对较少^[26]。现有关于 WEF 系统效率研究存在的不足之处在于:一是虽然将 WEF 系统作为一个相互依赖、相互作用的系统进而构建效率评价指标体系,但所选指标并未能明确各子系统内部之间的相互联系^[27];二是以某一系统为导向进行指标构建,忽视

了 WEF 系统之间的相互消耗关系及三者之间的传导性。鉴于此,本文以 1997—2017 年中国 30 个省级行政区为研究对象,基于网络数据包络分析(data envelopment analysis, DEA)模型结构的思想,构建 WEF 系统网络结构并据此构建效率评价指标体系,采用基于松弛变量度量(slack based measure, SBM)-DEA 模型对各子系统的效率值进行测度,在此基础上采用双变量空间自相关方法对 WEF 系统中两两之间的空间分布特征进行分析,同时运用网络 DEA 模型对 WEF 系统的综合效率进行测度并对其进行时空演变特征分析,以期为实现中国 WEF 系统的良性循环提供参考。

1 研究方法

1.1 SBM-DEA 模型

SBM-DEA 模型是一种非径向非角度的 DEA 模型,与传统 DEA 模型相比优点在于不要考虑投入产出指标的量纲问题,不影响效率值的测算,且所计算的效率值会根据投入产出松弛程度的变化而严格单调递减^[28-29]。因此本文选取 SBM-DEA 模型计算 WEF 系统各子系统的效率值,计算公式如下:

$$\rho = \min \left(1 - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \frac{s_{bk}}{x_{bko}} \right) / \left(1 + \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n \frac{s_{gr}}{y_{gro}} \right) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} x_{bo} = \mathbf{X}_b \boldsymbol{\lambda} + s_b \\ y_{go} = \mathbf{Y}_g \boldsymbol{\lambda} - s_g \\ s_b \geq 0 \\ s_g \geq 0 \\ \lambda_l \geq 0 \quad (l = 1, 2, \dots, K) \end{cases} \quad (2)$$

式中: ρ 为效率值; m 、 n 分别为投入、产出指标的个数; s_b 、 s_g 分别为投入、产出指标的松弛量; s_{bk} 、 s_{gr} 分别为第 k 个投入指标和第 r 个产出指标的松弛量; x_{bo} 、 y_{go} 分别为被评价单元 o 投入、产出值; x_{bko} 、 y_{gro} 分别为被评价单元 o 的第 k 个投入值和第 r 个产出值; $\boldsymbol{\lambda}$ 为强度向量,即 $\boldsymbol{\lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_K)$,其中 K 为评价单元个数; \mathbf{X}_b 、 \mathbf{Y}_g 分别为投入、产出值构成的矩阵。目标函数 ρ 关于 s_b 、 s_g 严格单调递减,且 $0 < \rho \leq 1$ 。

1.2 双变量空间自相关

与以往空间自相关仅考虑一个变量相比,双变量空间自相关可对不同地理要素的空间关联关系进行表征,双变量空间自相关所得到的莫兰指数被用于评价一个位置变量与其他变量之间的相关程度^[30]。本文采用双变量空间自相关方法探究水资源、能源和粮食子系统之间的空间相互作用,相关计算公式如下:

$$I_{pq} = \frac{N \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij} z_{pi} z_{qj}}{(N-1) \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_{ij}} \quad (3)$$

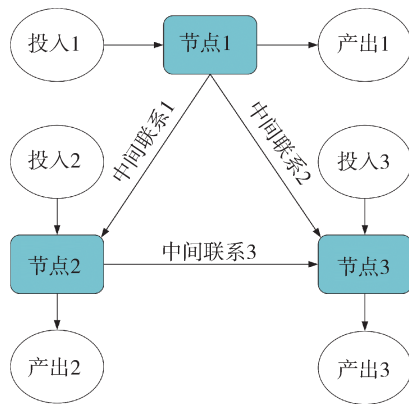
$$I_{i,pq} = z_{pi} \sum_{j=1}^N w_{ij} z_{qj} \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

其中
$$z_{pi} = \frac{p_i - \bar{p}}{\sigma_p} \quad z_{qj} = \frac{q_j - \bar{q}}{\sigma_q}$$

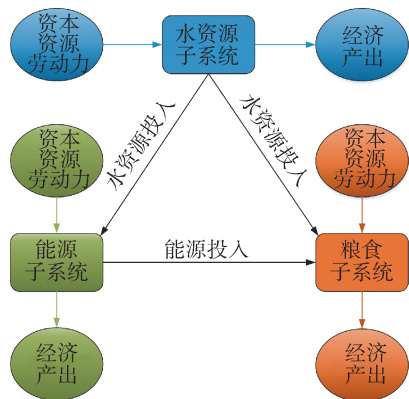
式中: I_{pq} 为观测值 p, q 的双变量全局空间自相关莫兰指数; $I_{i,pq}$ 为空间单元 i 的观测值 p, q 的双变量局部空间自相关莫兰指数; N 为空间个数; w_{ij} 为空间单元 i, j 连接矩阵的元素; p_i, q_j 分别为空间单元 i, j 的观测值; \bar{p}, \bar{q} 分别为观测值 p, q 的均值; σ_p, σ_q 分别为观测值 p, q 的方差。

1.3 网络 DEA 模型

由于传统 DEA 模型在计算效率时均是得出某一阶段的效率值, 而且在计算过程中, 模型将决策单元看作一个“黑箱”, 彼此之间相互独立, 并没有充分考虑“黑箱”内部资源的运作和整合, 仅以“投入-产出”的视角对评价单元进行效率测度, 容易造成评价单元整体效率的高估, 不能有效地表达更多的信息来帮助管理者进行管理和决策^[31]。对此, Färe 等^[32] 提出网络 DEA 模型(图 1(a)), 其实质是打开“黑箱”具体分析内部结构, 即将评价单元系统内部的运作过程进行分解细化, 分为若干连续的子阶段, 通过对各个子阶段进行效率分析评价, 进而探讨各



(a) 网络 DEA 的基本框架



(b) WEF 系统的网络结构

图 1 网络 DEA 的基本框架与 WEF 系统的网络结构
Fig. 1 The framework of network DEA and the network structure of WEF system

节点即子阶段对整体效率的影响。因此, 本文基于网络 DEA 的基本框架, 构建了 WEF 系统网络结构(图 1(b)), 运用网络 DEA 模型对 WEF 系统的综合效率进行测度, 相关计算公式见文献^[33], 同时参考现有研究成果将效率值 θ 分为 5 级^[34]: 低效率 ($0 < \theta \leq 0.4$), 较低效率 ($0.4 < \theta \leq 0.6$), 中等效率 ($0.6 < \theta \leq 0.8$), 较高效率 ($0.8 < \theta < 1$), 高效率 ($\theta = 1$)。

2 评价指标体系构建与数据来源

2.1 评价指标体系构建

结合 DEA 模型的特点及图 1 中 WEF 系统的网络结构, 同时考虑数据的代表性及可获得性构建 WEF 系统效率测度指标体系如图 2 所示。

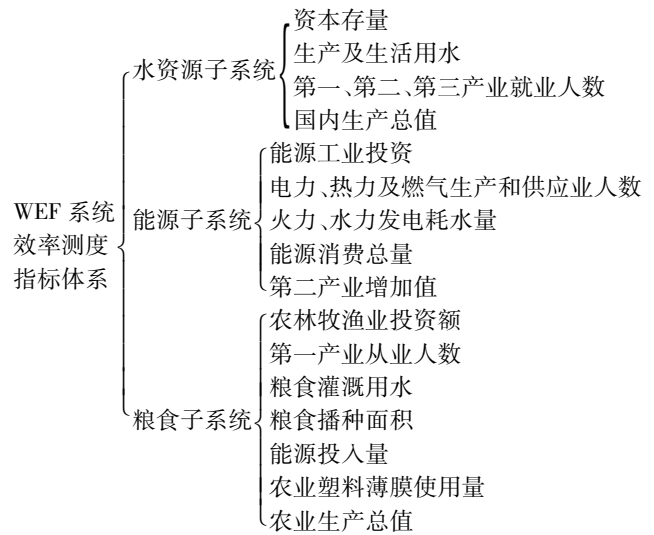


图 2 中国 WEF 系统效率测度指标体系
Fig. 2 Efficiency measurement index of WEF system in China

2.2 数据来源

本文的研究对象为中国 30 个省级行政区(由于数据限制, 不包含香港、澳门、台湾和西藏), 所涉及的数据来源于 1998—2018 年《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国农村统计年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》《中国劳动统计年鉴》。粮食子系统中能源投入包括农村用电量、农用柴油使用量、农药使用量及化肥施用量, 其中电、柴油的发热量数据来源于《中国能源统计年鉴》, 农药及化肥的能源转换系数来源于《农业技术经济手册》。

3 结果与分析

3.1 子系统效率时空演变特征

3.1.1 时间序列演变分析

根据已获取的相关数据, 利用式(1)(2)并基于 MaxDEA Ultra7.0 软件计算得到 1997—2017 年中国

30 个省级行政区水资源、能源、粮食子系统效率值,结果如图 3 所示。

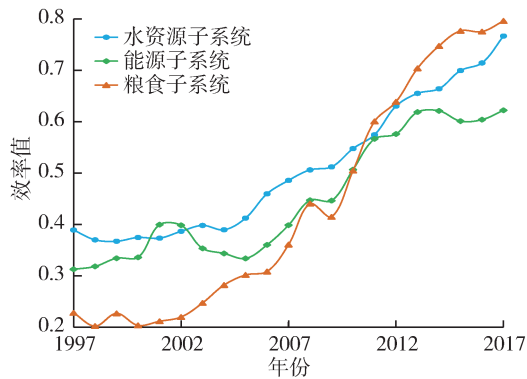


图 3 1997—2017 年中国水资源、能源、粮食子系统效率变化趋势

Fig. 3 Efficiency change trends of water resources, energy and food subsystem in China from 1997 to 2017

由图 3 可知,研究期内,中国水资源、能源、粮食子系统的效率值均呈现波动上升态势,其中粮食子系统由 1997 年的 0.228 上升至 2017 年的 0.796,增长幅度最大,水资源子系统次之,能源子系统效率值增幅相对较小。分阶段来看,第一阶段(1997—2011 年)水资源子系统效率平均值最高(0.427),能源子系统效率平均值次之(0.378),而粮食子系统效率平均值最低,仅为 0.297。第二阶段(2012—2017 年)粮食子系统效率值增速最快,而能源子系统效率值增幅趋缓,该阶段内粮食子系统效率平均值为 0.693,水资源子系统效率平均值为 0.655,而能源子系统效率平均值最低,为 0.589。两个阶段内,3 个子系统效率值的变化情况表明中国在节约资源、提升资源利用效率及能源消费结构调整方面成效显著,但需要注意的是,能源子系统的效率值增幅逐渐趋缓,因此需要继续提升清洁能源在能源消费中的占比,降低能源密集型产业占比。水资源子系统和粮食子系统的效率值稳步提升,说明中国在生产、生活用水方面逐步实现了资源的高效利用。

3.1.2 空间格局分析

表 1 为代表年份水资源、能源、粮食 3 个子系统效率值及研究期内的均值。由表 1 可知:①1997 年中国水资源子系统效率平均值为 0.389,效率值在 0.300 以内的有 7 个省(市、区),其中西南地区的云南、广西、贵州 3 省(区)的水资源效率值排名后 3 位,天津、江苏、浙江、广东 4 省(市)的水资源效率值均在 0.500 以上,其中江苏水资源效率值最高,达到 0.687;能源子系统效率平均值为 0.313,其中仅上海达到中等效率(0.610),而山西、甘肃等 6 省

(区)的能源效率值均在 0.200 以内,主要分布在中国的西北及西南地区;粮食子系统效率平均值为 0.228,低于水资源子系统和能源子系统效率值,粮食子系统效率值介于 0.099 ~ 0.339 之间,普遍较低。②相比 1997 年,2007 年 3 个子系统效率平均值均有所提升,分别为 0.486、0.399 和 0.361。水资源子系统低效率区主要分布在西北地区,水资源效率值均在 0.400 以内,而北京、上海、广东的水资源效率值均在 0.600 以上,其中广东最高,达到 0.781;能源子系统中等及较高效率区主要是北京、天津、上海、江苏等 5 省(市),其中江苏能源效率值最高,达到 0.850,低效率分布区与 1997 年相比变化较小;粮食子系统效率值与 1997 年相比整体提升较为显著,效率值在 0.300 以内的仅有山西、贵州、云南等 9 省(市、区),相比 1997 年减少了 16 个省(区)。③2017 年,3 个子系统效率值提升显著,分别为 0.767、0.622 和 0.796,粮食子系统效率值最高,水资源子系统效率值在 0.600 以内的仅有海南、青海、宁夏和新疆 4 省(区),北京、上海的水资源子系统效率达到高效率水平(1.000);能源子系统低效率区主要是山西、内蒙古、甘肃等 8 省(区),天津、上海、江苏的能源子系统效率达到高效率水平;粮食子系统效率值在 0.600 以内的仅有山西、云南、甘肃、宁夏 4 省(区),江苏、浙江等 6 省的粮食子系统效率达到高效率水平。

3.2 子系统效率值空间相关特征

为进一步了解各子系统效率值的空间相关作用关系,根据已获得的水资源、能源、粮食子系统效率值,利用式(3)并基于 GeoDa 软件进行双变量全局自相关莫兰指数测度,并选取 1997 年、2007 年和 2017 年的数据绘制各子系统之间的 LISA 集聚图如图 3~5 所示。

根据式(3)计算得到 1997 年、2007 年和 2017 年中国水资源子系统与能源子系统效率之间的莫兰指数分别为 0.450、0.465 和 0.244,水资源子系统与粮食子系统效率之间的莫兰指数分别为 0.159、0.359 和 0.262,能源子系统与粮食子系统效率之间的莫兰指数分别为 0.229、0.422 和 0.437,且均通过了 1% 水平的显著性检验。

由图 4 可知,高-高集聚主要分布东部地区,低-低集聚主要分布在西北及西南地区,高-低集聚主要分布在东北,而华北地区则呈现低-高集聚特征,研究期内,高-高集聚的数量增加至 12 个省(市),低-低集聚数量减少至 8 个省(区),结合全局莫兰指数逐年下降的情况可知两个子系统之间的负向协同作用在减弱。

表 1 1997—2017 年中国水资源、能源、粮食子系统效率值

Table 1 Efficiency value of water resources, energy and food subsystem in China from 1997 to 2017

省级行政区	水资源子系统效率值				能源子系统效率值				粮食子系统效率值			
	1997 年	2007 年	2017 年	平均	1997 年	2007 年	2017 年	平均	1997 年	2007 年	2017 年	平均
北京	0.429	0.640	1.000	0.653	0.283	0.747	0.844	0.670	0.339	0.593	0.959	0.654
天津	0.580	0.556	0.923	0.648	0.310	0.599	1.000	0.637	0.310	0.400	0.808	0.503
河北	0.360	0.468	0.624	0.483	0.262	0.371	0.532	0.439	0.196	0.417	0.763	0.468
山西	0.337	0.473	0.882	0.493	0.144	0.200	0.280	0.205	0.188	0.156	0.418	0.241
内蒙古	0.335	0.547	0.818	0.523	0.451	0.202	0.261	0.265	0.193	0.391	0.738	0.441
辽宁	0.383	0.529	0.828	0.585	0.261	0.367	0.469	0.447	0.259	0.394	0.785	0.569
吉林	0.290	0.438	0.852	0.497	0.283	0.291	0.710	0.419	0.221	0.435	0.653	0.479
黑龙江	0.355	0.580	0.880	0.592	0.258	0.397	0.328	0.410	0.363	0.365	1.000	0.484
上海	0.498	0.652	1.000	0.709	0.610	0.701	1.000	0.722	0.331	0.582	0.961	0.616
江苏	0.687	0.593	0.803	0.596	0.560	0.850	1.000	0.801	0.232	0.507	1.000	0.510
浙江	0.655	0.526	0.607	0.535	0.512	0.682	0.867	0.703	0.197	0.438	1.000	0.464
安徽	0.295	0.476	0.840	0.472	0.354	0.363	0.800	0.550	0.158	0.268	0.650	0.330
福建	0.374	0.505	0.759	0.589	0.569	0.488	0.969	0.661	0.269	0.483	1.000	0.555
江西	0.337	0.586	0.900	0.478	0.406	0.555	0.870	0.596	0.224	0.324	0.764	0.388
山东	0.393	0.489	0.860	0.557	0.414	0.574	0.760	0.595	0.273	0.534	1.000	0.597
河南	0.298	0.441	0.750	0.522	0.324	0.429	0.748	0.498	0.325	0.548	0.982	0.634
湖北	0.437	0.496	0.734	0.519	0.274	0.330	0.732	0.462	0.155	0.349	0.961	0.461
湖南	0.395	0.511	0.905	0.541	0.330	0.358	0.711	0.474	0.164	0.361	0.723	0.399
广东	0.568	0.781	0.716	0.687	0.523	0.747	0.976	0.737	0.262	0.366	0.817	0.463
广西	0.268	0.466	0.838	0.489	0.422	0.322	0.579	0.434	0.290	0.374	0.840	0.415
海南	0.340	0.563	0.561	0.462	0.343	0.369	0.385	0.318	0.239	0.350	1.000	0.551
重庆	0.296	0.406	0.805	0.446	0.386	0.315	0.795	0.449	0.178	0.235	0.792	0.379
四川	0.438	0.437	0.784	0.462	0.225	0.281	0.558	0.376	0.277	0.366	0.832	0.406
贵州	0.273	0.427	0.733	0.411	0.153	0.132	0.421	0.205	0.273	0.170	0.709	0.270
云南	0.244	0.446	0.656	0.430	0.300	0.232	0.455	0.312	0.219	0.215	0.575	0.272
陕西	0.470	0.377	0.745	0.448	0.215	0.363	0.706	0.427	0.150	0.227	0.739	0.334
甘肃	0.302	0.338	0.648	0.407	0.164	0.209	0.283	0.232	0.127	0.169	0.381	0.212
青海	0.357	0.378	0.494	0.357	0.098	0.162	0.225	0.179	0.125	0.219	0.610	0.325
宁夏	0.308	0.346	0.525	0.349	0.121	0.121	0.198	0.158	0.099	0.196	0.505	0.239
新疆	0.370	0.400	0.529	0.419	0.129	0.204	0.200	0.190	0.201	0.390	0.919	0.466
平均	0.389	0.486	0.767	0.512	0.313	0.399	0.622	0.452	0.228	0.361	0.796	0.438

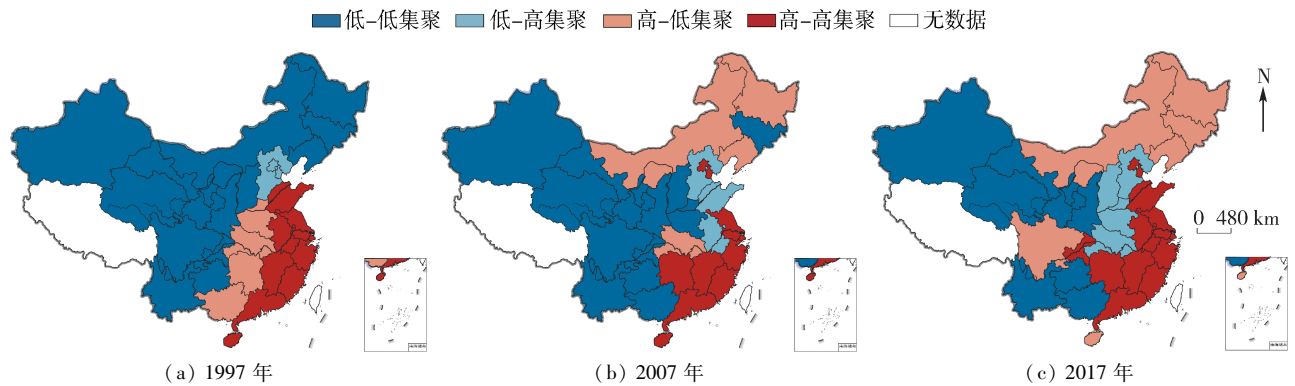


图 4 中国水资源子系统与能源子系统效率的空间 LISA 集聚
Fig. 4 Spatial LISA agglomeration of Chinese water resources and energy subsystem efficiency

图 5 显示,高-高集聚主要集中在东部地区,其数量从 1997 年的 7 个省(市)增加至 2017 年的 11 个省(市);低-低集聚由研究初期的西北、西南地区逐渐集中于黄河流域,其数量从 1997 年的 11 个省(区)减少至 2017 年的 7 个省(区);低-高集聚主要分布在华南地区,高-低集聚则较为分散。表明两个子系统效率值之间的正向协同作用在增强。

图 6 显示,高-高集聚分布与图 4、图 5 高-高集聚分布一致,全局莫兰指数呈上升趋势,其数量由 1997 年的 8 个省(市、区)增加至 2017 年的 11 个省(市);低-低集聚则仍以西北、西南地区为主,高-低集聚的分布范围由 1997 年的东北地区逐渐转移至华中地区,低-高集聚较少。虽然低-低集聚的数量呈减少趋势,但全局莫兰指数呈上升态势,说明两个

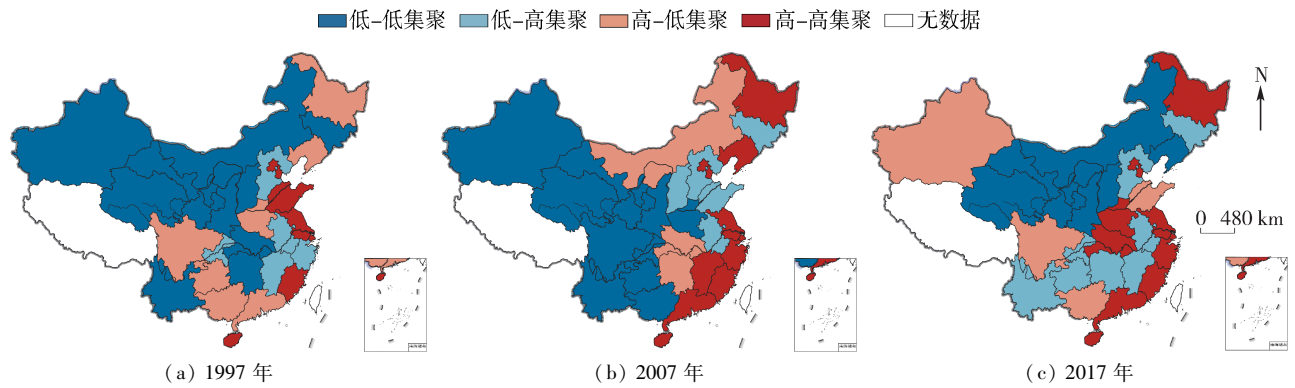


图 5 中国水资源子系统与粮食子系统效率的空间 LISA 集聚
 Fig. 5 Spatial LISA agglomeration of Chinese water resources and food subsystem efficiency

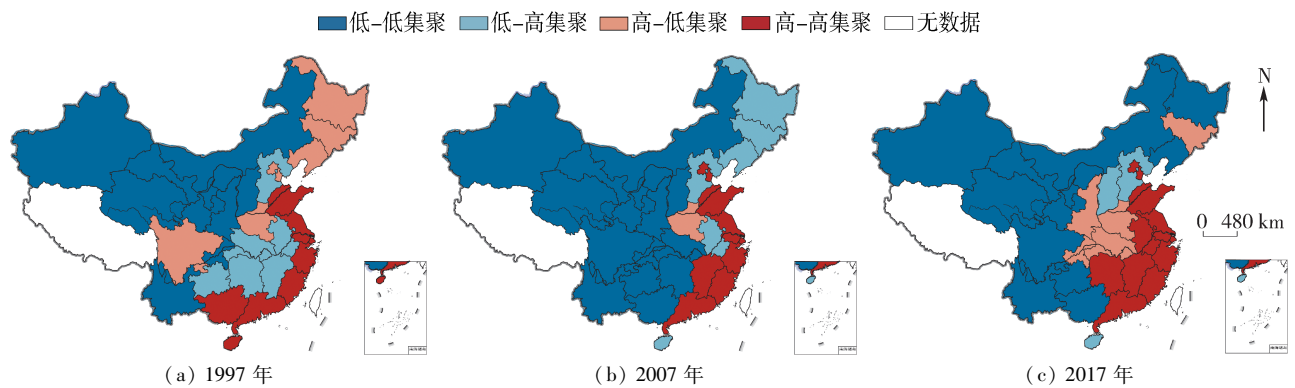


图 6 中国能源子系统与粮食子系统效率的空间 LISA 集聚
 Fig. 6 Spatial LISA agglomeration of Chinese energy and food subsystem efficiency

子系统之间的协同作用在增强。

综合来看,水资源、能源、粮食 3 个子系统的效率值两两之间的空间相互作用存在一定的差异,但协同作用地区(高-高集聚和低-低集聚)的分布范围大致相同,西部地区应在自然生态环境约束背景下,加快产业结构调整,降低单位 GDP 的资源消耗量,提升区域资源综合利用效率,避免水资源、能源、粮食 3 个子系统进入恶性循环。

3.3 中国 WEF 系统效率时空演变特征

3.3.1 时间序列演变分析

为进一步探究 WEF 系统的综合效率,基于网络 DEA 理论计算得到 WEF 系统综合效率,结果如图 7 所示。图 7 显示,中国 WEF 系统效率值呈波动上升趋势,从 1997 年的较低效率水平(0.447)上升至 2017 年的中等效率水平(0.756),增加幅度超过 69%;就四大地区而言,其效率值的变化趋势与全国效率值的变化趋势基本一致。东部效率值从 1997 年的低效率水平(0.377)上升至 2017 年的较高效率水平(0.957),中部地区(0.377)、西部地区(0.314)和东北地区(0.385)均从 1997 年的低效率水平分别上升至 2017 年的中等效率水平(0.683)、较低效率水平(0.590)和较高效率水平(0.845)。研究期内各区域之间虽然存在部分交替上升的年

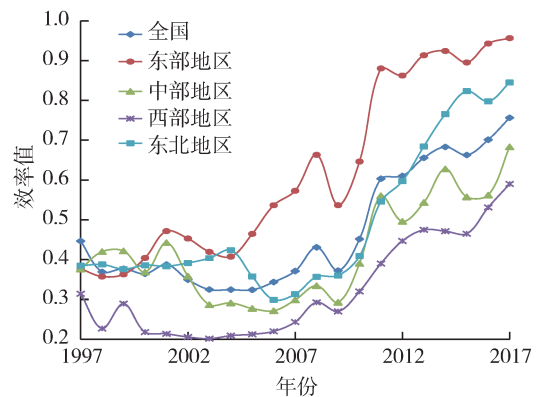


图 7 1997—2017 年中国 WEF 系统效率变化趋势
 Fig. 7 The variation trend of efficiency of WEF system in China from 1997 to 2017

份,但整体上东部地区(0.621)、东北地区(0.490)、中部地区(0.422)、西部地区低(0.324)效率平均值呈依次下降趋势。其原因在于东部及东北地区作为中国资本、技术的集聚区,第三产业占比较高,资源利用效率高,单位 GDP 能耗远低于中、西部地区,因此研究期内 WEF 系统的效率值较高;而中部和西部地区虽然资源丰度高于东部,但该地区同时兼顾中国的能源与粮食生产,加之人口众多、城镇化率较低以及第一、第二产业占比较高,且西部地区资源环境承载能力脆弱,致使研究期内 WEF 系统的效率值

较低。

3.3.2 空间格局分析

根据已获取的 WEF 系统效率值,选取 1997 年、2007 年与 2017 年绘制中国 WEF 系统效率空间分布图如图 8 所示。

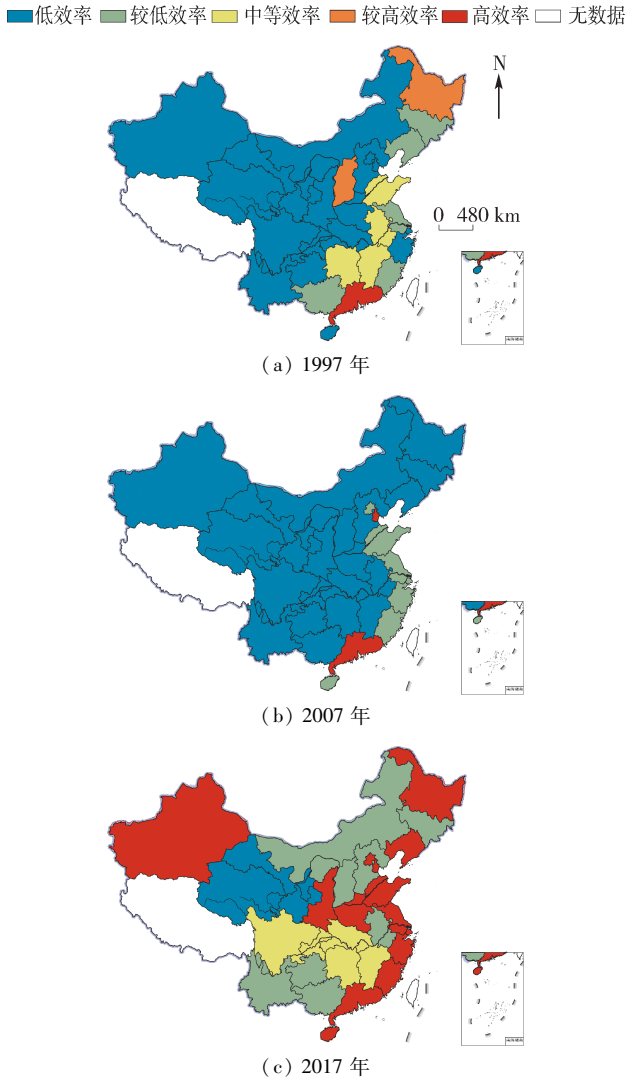


图 8 1997—2017 年中国 WEF 系统效率空间分布
Fig. 8 The spatial distribution of efficiency of WEF system in China from 1997 to 2017

由图 8 可知,1997 年 WEF 系统低效率区主要是河北、内蒙古、云南等中部、西部及西南地区以及浙江、海南等省,吉林、辽宁等 5 省(区)处于较低效率水平,山东、安徽、江西及湖南处于中等效率水平,黑龙江、山西处于较高效率水平,仅广东呈现高效率水平,效率达到完全有效;相比 1997 年,2007 年效率值整体有所下降,其中山西、黑龙江效率值下降幅度较大,均从较高效率值降为低效率值,北京、天津的效率值则呈上升态势,全国效率由 1997 年的较低效率水平(0.447)降为低效率水平(0.371);2017 年,低效率区大幅下降,由 2007 年的 21 个省(市、区)降为 3 个省(区),内蒙古、吉林等 8 省(区)由

2007 年的低效率水平转为较低效率水平,四川、重庆等 5 省(市)上升为中等效率水平,其余省(市、区)则为高效率水平,全国效率水平相比 2007 年提升至中等效率水平(0.756)。综合来看,高效率区主要分布在东部沿海及黄河流域中下游地区,中等效率区则分布于长江上中游地区,较低效率区集中于华北及西南地区,而西部地区则是低效率聚集区。

4 结论

a. 中国水资源、能源、粮食 3 个子系统效率值呈逐年上升趋势,水资源子系统与粮食子系统效率值稳步提升,能源子系统效率值提升较为缓慢;空间上,效率值呈自东向西逐渐递减的趋势。

b. 双变量空间自相关分析表明,各子系统之间的协同作用分布区较为一致,东部地区呈现正向的协同作用,而西部地区则为负向协同作用。

c. 中国 WEF 系统效率值呈波动上升趋势,区域间东部效率值最高,东北地区次之,西部最低;空间分布上,东部沿海地区及黄河中下游区是高效率聚集区。

参考文献:

- [1] United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development [R]. New York: United Nations, 2014.
- [2] 章恒全,蔡晓莹,黄元龙,等. 中国绿色水资源利用效率的时空分布差异[J]. 水利经济, 2020, 38(3): 1-6. (ZHANG Hengquan, CAI Xiaoying, HUANG Yuanlong, et al. Spatial and temporal distribution differences of green efficiency in utilization of water resources in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38(3): 1-6. (in Chinese))
- [3] HOFF H. Understanding the nexus [C]//Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Bonn: Stockholm Environment Institute, 2011: 4-51.
- [4] Asian Development Bank. Asian water development outlook 2013 [R]. Manila: Asian Development Bank, 2013.
- [5] International Renewable Energy Agency. Renewable energy in the water, energy & food nexus [R]. Abu Dhabi: IRENA, 2015.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The water-energy-food nexus: a new approach in support of food security and sustainable agriculture [R]. Rome: FAO, 2014.
- [7] ZHANG Y Y, FANG J K, WANG S G, et al. Energy-water

- nexus in electricity trade network: a case study of inter-provincial electricity trade in China [J]. *Applied Energy*, 2020, 257: 113685.
- [8] NAW A, LIU G Y, MENG F X, et al. Exploring urban energy-water nexus embodied in domestic and international trade: a case of Shanghai [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223: 522-535.
- [9] LI X, FENG K S, SIU Y L, et al. Energy-water nexus of wind power in China: the balancing act between CO₂ emissions and water consumption [J]. *Energy Policy*, 2012, 45: 440-448.
- [10] SALMORAL G, YAN X Y. Food-energy-water nexus: a life cycle analysis on virtual water and embodied energy in food consumption in the Tamar Catchment, UK [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 320-330.
- [11] CEN W M, WU S M, LEI Y L, et al. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water [J]. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 321-333.
- [12] ZHANG B, QU X, MENG J, et al. Identifying primary energy requirements in structural path analysis: a case study of China 2012 [J]. *Applied Energy*, 2017, 191: 425-435.
- [13] SCHLÖR H, VENGHAUS S, HAKE J F. The FEW-nexus city index-measuring urban resilience [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 382-392.
- [14] OZTURK I. Sustainability in the food-energy-water nexus: evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) Countries [J]. *Energy*, 2015, 93: 999-1010.
- [15] HALBE J, PAHL-WOSTL C, LANGE M A, et al. Governance of transitions towards sustainable development: the water-energy-food nexus in Cyprus [J]. *Water International*, 2015, 40(5/6): 877-894.
- [16] OWEN A, SCOTT K, BARRETT J. Identifying critical supply chains and final products: an input-output approach to exploring the energy-water-food nexus [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 632-642.
- [17] ZHANG P P, ZHANG L X, CHANG Y, et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 215-224.
- [18] LIU Y T, WANG S G, CHEN B. Regional water-energy-food nexus in China based on multiregional input-output analysis [J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 3108-3114.
- [19] CHU C, RITTER W, SUN X H. Spatial variances of water-energy nexus in China and its implications for provincial resource interdependence [J]. *Energy Policy*, 2019, 125: 487-502.
- [20] XIE X M, JIANG X Y, ZHANG T T, et al. Study on impact of electricity production on regional water resource in China by water footprint [J]. *Renewable Energy*, 2020, 152: 165-178.
- [21] 田泽, 潘晶晶, 任芳容. 基于 DEA 的长江经济带省际水电能源效率评价及提升方向 [J]. *水利经济*, 2020, 38(4): 1-7. (TIAN Ze, PAN Jingjing, REN Fangrong. Evaluation and improvement direction of inter-provincial hydropower energy efficiency in Yangtze River Economic Belt based on DEA [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(4): 1-7. (in Chinese))
- [22] YAN X C, FANG L, MU L. How does the water-energy-food nexus work in developing countries? an empirical study of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 134791.
- [23] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析 [J]. *水资源保护*, 2018, 34(5): 1-8. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China [J]. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 1-8. (in Chinese))
- [24] 支彦玲, 陈军飞, 王慧敏, 等. 共生视角下中国区域“水-能源-粮食”复合系统适配性评估 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 129-139. (ZHI Yanling, CHEN Junfei, WANG Huimin, et al. Assessment of water-energy-food nexus fitness in China from the perspective of symbiosis [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 129-139. (in Chinese))
- [25] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(1): 120-128. (LI Chengyu, ZHANG Shiqiang. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing factors research [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 120-128. (in Chinese))
- [26] SUN C Z, YAN X D, ZHAO L S. Coupling efficiency measurement and spatial correlation characteristic of water-energy-food nexus in China [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 164: 105151.
- [27] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 中国不同地区水-能源-粮食投入产出效率评价研究 [J]. *经济社会体制比较*, 2017(3): 138-148. (LI Guijun, HUANG Daohan, LI Yulong. Evaluation on the efficiency of the input and output of water-energy-food in different regions of China [J]. *Comparative Economic & Social Systems*, 2017(3): 138-148. (in Chinese))
- [28] 邓光耀. 基于污水排放量分配的中国水资源利用效率测算 [J]. *水资源保护*, 2019, 35(5): 28-34. (DENG Guangyao. Estimation of water use efficiency in China based on sewage discharge distribution [J]. *Water Resources Protection*, 2019, 35(5): 28-34. (in Chinese))

(下转第 78 页)

- 州轻工业学院学报(社会科学版),2017,18(2):68-73.
(GUO Jiarui, LYU Kewen. Analysis of spatial and temporal pattern of urbanization in the Yellow River Basin [J]. Journal of Zhengzhou University of Light Industry (Social Science Edition), 2017, 18 (2): 68-73. (in Chinese))
- [27] 李小建,文玉钊,李元征,等. 黄河流域高质量发展: 人地协调与空间协调[J]. 经济地理,2020,40(4):1-10. (LI Xiaojian, WEN Yuzhao, LI Yuanzheng, et al. High-quality development of the Yellow River Basin from a perspective of economic geography: man-land and spatial coordination[J]. Economic Geography, 2020, 40 (4): 1-10. (in Chinese))
- [28] 杨永春,穆焱杰,张薇. 黄河流域高质量发展的基本条件与核心策略[J]. 资源科学,2020,42(3):409-423. (YANG Yongchun, MU Yanjie, ZHANG Wei. Basic conditions and core strategies of high-quality development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(3):409-423. (in Chinese))
- [29] 徐辉,师诺,武玲玲,等. 黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J]. 资源科学,2020,42(1):115-126. (XU Hui, SHI Nuo, WU Lingling, et al. Environmental stress and optimized path of industrial development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2020, 42(1): 115-126. (in Chinese))
- [30] 彭少明,郑小康,王煜,等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展,2017,28(5):681-690. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5):681-190. (in Chinese))
- [31] BRYAN B A, NOLAN M, HARWOOD T D, et al. Supply of carbon sequestration and biodiversity services from Australia's agricultural land under global change [J]. Global Environmental Change, 2014, 28(1):166-181.
- [32] GAO Lei, BRYAN B A. Finding pathways to national-scale land-sector sustainability[J]. Nature, 2017, 544:217-222.
- [33] 彭世彰,艾丽坤. 提高灌溉水利用系数,保障国家粮食安全与水安全[J]. 水资源保护,2012,28(3):79-82. (PENG Shizhang, AI Likun. Improving irrigation water use coefficient and ensure national food and water safety[J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (3): 79-82. (in Chinese))
- [34] 王慧亮,申言霞,李卓成,等. 基于能值理论的黄河流域水资源生态经济系统可持续性评价[J]. 水资源保护,2020,36(6):12-17. (WANG Huiliang, SHEN Yanxia, LI Zhuocheng, et al. Sustainability assessment of water resources ecological-economic system in the Yellow River Basin based on energy theory [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6):12-17. (in Chinese))
- [35] 周露明,谢兴华,余丽,等. 水资源管理中的水-能源-经济耦合关系[J]. 水电能源科学,2019,37(4):144-147. (ZHOU Luming, XIE Xinghua, YU Li, et al. Water-energy-economy coupling relationship in water resources management [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (4):144-147. (in Chinese))
- (收稿日期:2020-07-14 编辑:王 芳)

(上接第 68 页)

- [29] 赵敏,刘姗. 基于双前沿面 SBM-DEA 模型的农业用水效率评价[J]. 水利经济,2020,38(1):54-60. (ZHAO Min, LIU Shan. Evaluation of agricultural water use efficiency based on SBM-DEA model with double frontiers [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2020, 38 (1):54-60. (in Chinese))
- [30] 郑德凤,郝帅,吕乐婷,等. 三江源国家公园生态系统服务时空变化及权衡-协同关系[J]. 地理研究,2020,39(1):64-78. (ZHENG Defeng, HAO Shuai, LYU Leting, et al. Spatial-temporal change and trade-off/synergy relationships among multiple ecosystem services in Three-River-Source National Park [J]. Geographical Research, 2020, 39(1):64-78. (in Chinese))
- [31] 张兆方,沈菊琴,何伟军,等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价:基于超效率 DEA-Malmquist-Tobit 方法[J]. 河海大学学报(哲学社会科学版),2018,20(4):60-66. (ZHANG Zhaofang, SHEN Juqin, HE Weijun, et al. An analysis of water utilization efficiency of the Belt and Road initiative's provinces and municipalities in China based on DEA-Malmquist-Tobit model [J]. Journal of Hohai University (Philosophy and Social Sciences), 2018, 20(4):60-66. (in Chinese))
- [32] FÄRE R, GROSSKOPF S. Productivity and intermediate products: a frontier approach [J]. Economics Letters, 1996, 50(1):60-70.
- [33] 程昀,杨印生. 矩阵型网络 DEA 模型及其实证检验[J]. 中国管理科学,2013,21(5):103-109. (CHENG Yun, YANG Yinsheng. Network DEA for matrix-type organization with application [J]. Chinese Journal of Management Science, 2013, 21 (5): 103-109. (in Chinese))
- [34] HAN D N, YU D Y, 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.
- (收稿日期:2020-10-12 编辑:熊水斌)