

王璐琪, 姜珊, 刘红卫, 等. 京津冀地区水-能源-粮食系统安全耦合协调发展特征评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 12-23. WANG L Q, JIANG S, LIU W H, et al. Evaluation of coupling and coordinated development characteristics of Water-Energy-Food system security in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 12-23. (in Chinese)

京津冀地区水-能源-粮食系统安全 耦合协调发展特征评价

王璐琪¹, 姜珊², 刘红卫³, 李淑², 程金花¹, 何凡²

(1. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083; 2. 中国水利水电科学研究院水利部京津冀水安全保障重点实验室, 北京 100038; 3. 唐山市滦河下游灌溉事务中心, 河北 唐山 063200)

摘要:以京津冀地区为研究区域, 选取 28 个代表性指标, 利用层次分析法构建水-能源-粮食耦合安全综合指标体系, 运用耦合协调度模型和障碍度模型分析 2000—2020 年水-能源-粮食系统耦合安全性和影响因素。研究结果表明: 京津冀地区水安全、能源安全和粮食安全系统综合评价指数呈整体上升的趋势, 其浮动范围为 0.3~0.7; 水-能源-粮食系统耦合协调度年际间均呈上升趋势, 北京市耦合协调度最高, 河北省耦合协调度较低; 人均水资源量、废水中 COD 排放量、人均能源消费量和亩均农用机械总动力为京津冀地区主要障碍因子。未来北京应调整用水结构、挖掘节水潜力。天津市和河北省要注重优化能源消费结构, 进行低碳技术创新, 加大脱碳步伐, 其中河北省农业发展需要进一步采取节水灌溉措施、减少农作物受灾面积。

关键词: 京津冀地区; 水-能源-粮食系统; 耦合安全评价; 耦合协调发展; 影响因素分析

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0002

水、能源、粮食是人类社会赖以生存和发展的三大物质基础和战略资源^[1]。人口增长和经济发展使得全球对水、能源、粮食需求持续增大, 联合国预计到 2050 年全球粮食、能源需求将会较 2016 年分别增加 60% 和 80%^[2], 全球需水量预计将增加 20%~30%, 将有超过 20 亿人生活在水资源严重短缺的国家^[3]。在此背景下, 全球资源供给形势严峻, 水-能源-粮食(Water-Energy-Food, 后文简称 WEF)系统安全耦合协调问题备受世界关注。因此科学定量评估 WEF 耦合协调程度, 是提升区域 WEF 系统安全的关键, 也是坚持可持续发展的重要环节。

水、能源、粮食是相对独立又紧密关联的互锁系统, 2011 年在德国波恩召开“水-能源-粮食安全纽带关系”会议, 首次将水、能源、粮食三者确定为“纽带关系”, 此后国内外很多学者对此展开了大量研究。相关研究可归为定性研究和定量研究。在

定性研究中, 主要集中于 WEF 的研究框架构建及相互间关系, 以及针对典型地区的政策研究; 李良等^[4]基于关联关系的视角, 提出 WEF 风险管控研究框架及核心研究议题在 WEF 风险研究中可构建 WEF 耦合模型、WEF 与风险的关联传导机制和动态调节与反馈机制; 郑人瑞等^[5]从地球科学的角度, 分析了 WEF 纽带关系在形成演化、空间分布和资源利用等方面的复杂性; Hejnowicz 等^[6]从可持续发展角度为南半球国家的 WEF 提出更全面的政策建议; Kellner 等^[7]以瑞士为案例回顾过去 WEF 的共同进化, 通过多领域制定相关政策解决 WEF 关联案例中的权衡问题。定量方法主要用于评价和分析 WEF 相互作用的模型, 以及测评 WEF 关系与外部环境之间的状态。定量研究方法主要有 Copula 函数、压力-状态-响应模型、系统动力学模型、实码遗传加速投影追踪模型等。Copula 函数^[8-9]通过多

收稿日期: 2023-08-28 修回日期: 2023-12-01 网络出版时间: 2024-01-10

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240109.1045.016>

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(52061125101)

作者简介: 王璐琪(1998—), 女, 河北唐山人, 主要从事水-能源-粮食耦合风险研究。E-mail: 3194556696@qq.com

通信作者: 姜珊(1987—), 女, 山东威海人, 高级工程师, 博士, 主要从事水资源管理研究。E-mail: jiangs@iwhr.com

维函数计算 WEF 联合风险概率,进一步量化 WEF 的安全状况;压力-状态-响应模型^[10]综合考虑社会、经济、生态等方面的影响,全面量化复杂因子的相关性;系统动力学模型^[11]通过在 WEF 内部变量之间建立因果反馈回路,量化和模拟不同情景下 WEF 相关性,但它易受主观因素的影响并且大量的数据也会增加其模型构建的难度;实码遗传加速投影追踪模型^[12]耦合了投影追踪模型和实码加速遗传算法,不仅使指标权重更准确并且解决了计算速度慢及易早熟收敛等缺点。耦合协调度模型是研究 WEF 耦合关系的方法,具有量化单一系统和多维系统间的发展水平、发展过程中的和谐程度以及对整个系统的发展做出综合评价等优点,还在水-能-碳(Water-Energy-Carbon, WEC)^[13]、区域经济发展^[14]、植被与土壤关系^[15]、水-经济-生态^[16]等多个领域开展应用,并得到相关认可。已有部分学者^[17]利用耦合协调度模型对我国部分省市开展 WEF 研究,如彭俊杰^[18]、赵良仕等^[19]、毕博等^[20]和王晶等^[21]分别对黄河流域 9 省、辽宁省和河北省 WEF 系统耦合协调度进行评价,但未进行影响因素分析。因此,在耦合协调度模型对 WEF 系统进行定量评价的基础上加强影响因素分析是至关重要的。

以 WEF 纽带关系表现最显著、联合风险最突出的京津冀地区为研究对象,运用耦合协调度模型对京津冀地区 WEF 系统的综合评价指数以及耦合安全协调发展特征进行分析,建立障碍度模型对研究区域内影响因子进行全面识别,研究成果可为我国京津冀地区 WEF 系统安全管理提供理论依据,提出的 WEF 系统安全相关意见对提高京津冀地区 WEF 系统安全性发展有着重要的作用。

1 研究方法

1.1 评价指标体系

WEF 作为复杂关联系统,科学全面地构建评价指标体系是 WEF 耦合协调评价的关键。因此,本文遵循客观性、科学性、代表性和数据可获得性等原则,在考虑 WEF 三者内部相互作用的基础上,结合京津冀地区各个系统实际情况,从水资源、能源和粮食 3 个方面采用层次分析法全面构建 WEF 评价指标体系。选取 28 个指标,建立目标层、准则层以及指标层为框架的 WEF 安全耦合综合评价指标体系^[22],见表 1。其中每个准则层又包含可靠性、协同性和韧性:可靠性代表子系统内部耦合安全状

态,主要从各个子系统内资源数量、质量以及供需水平等方面评价;协同性代表两个子系统间的耦合安全状态,用于衡量水-粮食、水-能源、粮食-能源转化过程中的资源配置与利用效率;韧性代表 WEF 系统与外部系统相互影响时的耦合安全状态,即抗风险能力^[7]。

1.2 评价方法

1.2.1 权重计算

为减少人为因素对指标权重的影响,采用熵权法确定指标体系中各层次指标的权重。熵权法是一种根据各评价指标提供的信息确定其权重的客观赋权方法^[23]。指标的信息熵越小,说明该指标提供的信息量越大,在综合评价中发挥的作用越大,权重应越高。熵权法确定权重步骤如下:

数据同趋势化与归一化。对指标进行标准化处理,正向指标的标准化公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (1)$$

逆向指标标准化公式为

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为原始数据; x'_{ij} 为归一化后的指标值; x_{\max} 和 x_{\min} 分别为同一指标下的最大值和最小值。

计算第 j 个指标的信息熵 H_j

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} \quad (3)$$

$$P_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^m x'_{ij}} \quad (4)$$

式中: m 表示统计年限; P_{ij} 为指标值的比重。

计算第 j 个指标的权重 w'_j

$$w'_j = \frac{G_j}{\sum_{j=1}^m G_j} \quad (5)$$

$$G_j = 1 - H_j \quad (6)$$

式中: G_j 为信息冗余度。

1.2.2 综合评价指数

水资源安全、粮食安全和能源安全系统的综合评价指数计算公式^[16]为

$$Y_{1j} = \sum_{i=1}^{n_1} w_{1i} x_{1ij} \quad (7)$$

$$Y_{2j} = \sum_{i=1}^{n_2} w_{2i} x_{2ij} \quad (8)$$

$$Y_{3j} = \sum_{i=1}^{n_3} w_{3i} x_{3ij} \quad (9)$$

式中: Y_{1j} 、 Y_{2j} 、 Y_{3j} 分别为水安全、粮食安全和能源安全系统第 j 年的综合评价指数; w_{1i} 、 w_{2i} 、 w_{3i} 分别为

水安全、粮食安全和能源安全系统中指标 i 权重; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为水安全、粮食安全和能源安全系统中指标个数; x_{1ij} 、 x_{2ij} 、 x_{3ij} 分别为水安全、粮食安全和能源安全系统指标 i 第 j 年标准化数值。

表 1 WEF 安全耦合综合评价指标体系

Tab. 1 WEF safety coupling comprehensive evaluation index system

目标层	准则层	性质	指标层	指标属性	权重
WEF耦合安全	水安全0.254	可靠性	人均水资源量 W_1/m^3	正	0.145
		可靠性	人均用水量 W_2/m^3	负	0.068
		可靠性	供水综合生产能力 $W_3/(\text{万}\text{m}^3\cdot\text{d}^{-1})$	正	0.156
		可靠性	水资源开发利用效率 $W_4/\%$	负	0.075
		协同性	地下水供水占比 $W_5/\%$	负	0.229
		协同性	万元GDP用水量 W_6/m^3	负	0.068
		韧性	城市污水处理率 $W_7/\%$	正	0.145
		韧性	废水中COD排放量 $W_8/\text{万t}$	负	0.113
		粮食安全0.360	可靠性	人均耕地面积 F_1/m^2	正
	可靠性		人均粮食消费 F_2/kg	负	0.087
	可靠性		人均粮食产量 F_3/kg	正	0.046
	可靠性		灌溉面积占比 $F_4/\%$	正	0.149
	协同性		每公顷用水量 F_5/m^3	负	0.078
	协同性		农业用水占比 $F_6/\%$	负	0.168
	协同性		每千克粮食生产用水量 F_7/m^3	负	0.043
	韧性		城镇恩格尔系数 $F_8/\%$	负	0.126
	韧性		农业总产值占比 $F_9/\%$	负	0.137
	能源安全0.386	可靠性	人均能源产量 E_1 (标准煤)/t	正	0.048
		可靠性	人均能源消费量 E_2 (标准煤)/t	负	0.168
		可靠性	煤炭占比 $E_3/\%$	负	0.162
		可靠性	能源消费弹性系数 $E_4/\%$	负	0.040
		协同性	一产能源消费占比 $E_5/\%$	负	0.066
		协同性	能源系统用水占比 $E_6/\%$	负	0.103
		协同性	亩均农用机械总动力 $E_7/\text{万kW}$	正	0.090
		韧性	万元GDP能耗 E_8 (标准煤)/t	负	0.070
		韧性	二氧化硫排放量 $E_9/\text{万t}$	负	0.176
		韧性	二氧化碳排放量 $E_{10}/10^6\text{t}$	负	0.077

1.2.3 耦合协调度模型

耦合协调度模型计算公式为

$$C_j = \frac{Y_{1j}Y_{2j}Y_{3j}^{1/3}}{(Y_{1j} + Y_{2j} + Y_{3j})/3} \quad (10)$$

$$T_j = \alpha Y_{1j} + \beta Y_{2j} + \gamma Y_{3j} \quad (11)$$

$$D_j = \sqrt{C_j T_j} \quad (12)$$

式中: C_j 为各系统第 j 年的耦合度; T_j 为各系统第 j 年的综合发展指数; α 、 β 、 γ 为待定系数, 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。由于水安全、粮食安全和能源安全系统之间相互制约影响, 因此三者同等重要, 故取 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$ 。 D_j 为第 j 年的耦合协调度, 既可以反映系统发展的综合水平, 也可以体现系统发展的协调状况, $0 \leq$

$D_j \leq 1$: D_j 越小,系统间协调状况越差; D_j 越大,协调状况则越好。参考已有研究成果^[24-27],结合实际情况对耦合协调度等级进行划分,见表 2。

表 2 耦合协调度等级
Tab. 2 Levels of coupling coordination

类型	取值范围	分类
协调发展类	(0.9~1.0]	优质协调发展类
	(0.8~0.9]	良好协调发展类
	(0.7~0.8]	中级协调发展类
	(0.6~0.7]	初级协调发展类
过度发展类	(0.5~0.6]	勉强协调发展类
	(0.4~0.5]	濒临失调发展类
失调衰退类	(0.3~0.4]	轻度失调衰退
	(0.2~0.3]	中度失调衰退
	(0.1~0.2]	严重失调衰退

1.2.4 障碍度模型

为了解京津冀地区 WEF 安全问题的阻碍因素,并且便于对京津冀地区的 WEF 耦合系统进行病理性诊断,将障碍度模型^[27-29]引入 WEF 安全耦合系统进行分析。

障碍度计算采用因子贡献度、指标偏离度和障碍度各个指标进行分析诊断,计算公式为

$$F_j = w_j w'_j \quad (13)$$

$$I_j = 1 - x_{ij} \quad (14)$$

$$P_j = \frac{F_j I_j}{\sum_{j=1}^n F_j I_j} \quad (15)$$

式中: w_j 为因子贡献度,是指单个因素对总目标的贡献程度,用单个因素的权重表示; I_j 为指标偏离度,是指单因素指标与系统发展目标的差距,此处设为单项指标标准化值与 100% 之差; P_j 为障碍度,是指单项指标或准则层因素对 WEF 耦合安全的影响程度。

2 研究区域概况与数据来源

2.1 研究区域概况

京津冀地区位于华北平原北部,属于温带半湿润半干旱大陆性季风气候^[29],多年平均降水量约为 540 mm,面积约为 22 万 km^2 ,占全国总面积的 2.3%。京津冀地区以全国 0.7% 的水资源量承载着全国 8% 的人口和 8.2% 的灌溉面积、10% 的经济总量^[30-33],WEF 系统与经济社会要素的空间错配特征十分显

著。京津冀地区 2000—2020 年人均水资源量为 150 m^3 ,约为全国平均水平 ($2\,240 \text{ m}^3$) 的 6.7%;能源消费量与自身产量严重不平衡,人均能源消费量约为人均能源产量的 3 倍;同时,北京市和天津市的人均粮食消费量分别是其人均粮食生产量的 2 倍多和 1.2 倍,河北省人均粮食消费量是其人均粮食生产量的 34%。详见图 1。

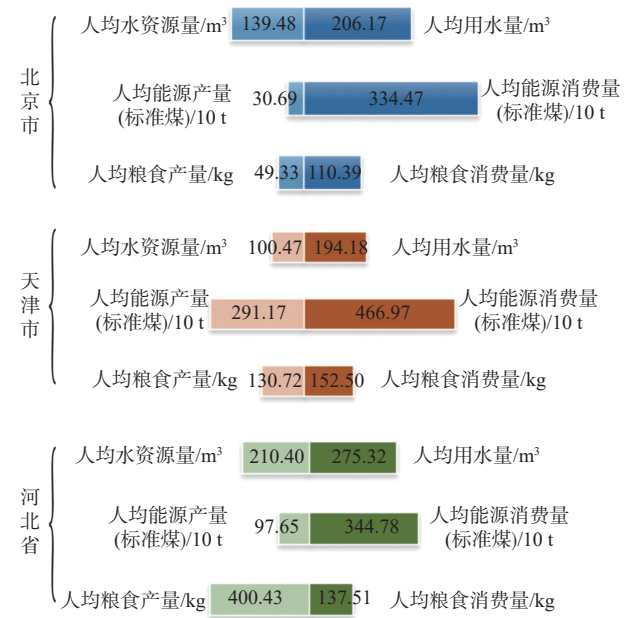


图 1 京津冀地区概况

Fig. 1 Study area map of Beijing-Tianjin-Hebei region

2.2 数据来源

研究时段为 2000—2020 年,人均水资源量、人均用水量、总用水量、总供水量、地区 GDP、人口数量、农业用水量、工业用水量、废水中 COD 排放量、二氧化硫排放量、二氧化碳排放量、有效灌溉面积、耕地面积、城镇恩格尔系数、能源消费弹性系数、煤炭占比、供水综合生产能力、水资源开发利用效率、城市污水处理率、煤炭占比、能源消费弹性系数、受灾面积、亩均农用机械总动力、能源生产总量、能源消费总量等数据直接从《中国统计年鉴》《中国能源统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《中国水资源公报》《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》中获取。地下水供水占比、万元 GDP 用水量、人均耕地面积、人均粮食消费量、人均粮食产量、灌溉面积占比、亩均用水量、农业用水占比、单位粮食生产用水量、农业总产值占比、人均能源产量、人均能源消费量、一产能源消费占比、能源系统用水占比、单位 GDP 能耗数据根据计算获取。计算公式见表 3。

表 3 指标计算公式
Tab. 3 Calculation formula of index

指标	计算公式
地下水供水占比	地下水供水占比=地下水供水量/总供水量
万元GDP用水量	万元GDP用水量=总用水量/地区GDP
人均耕地面积	人均耕地面积=耕地面积/人口数
人均粮食消费量	人均耕地面积=耕地面积/人口数
人均粮食产量	人均粮食产量=粮食生产总量/人口数
灌溉面积占比	灌溉面积占比=有效灌溉面积/耕地面积
亩均用水量	亩均用水量=农业用水量/耕地面积
农业用水占比	农业用水占比=农业用水量/总用水量
单位粮食生产用水量	单位粮食生产用水量=农业用水量/粮食生产总量
农业总产值占比	农业总产值占比=农业总产值/地区GDP
人均能源产量	人均能源产量=能源生产总量/人口数
人均能源消费量	人均能源消费量=能源消费总量/人口数
一产能源消费占比	一产能源消费占比=农林牧渔业能源消费量/能源消费总量
能源系统用水占比	能源系统用水占比=工业用水量/总用水量
单位GDP能耗	单位GDP能耗=能源消费总量/地区GDP

3 结果与分析

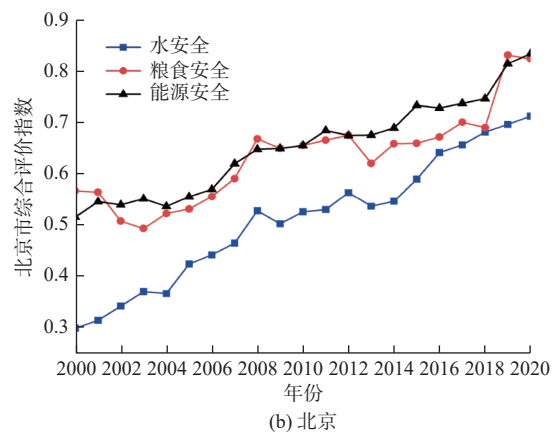
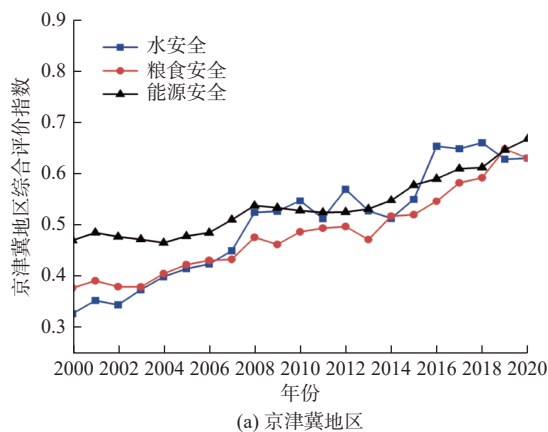
3.1 WEF 综合评价指数分析

通过熵权法计算确定了各个指标的权重,见表 1。在准则层中,能源安全所占的权重最大为 0.386,其

次是粮食安全的权重为 0.360,水安全的权重最小为 0.254。这说明近 21 年来,能源安全和粮食安全对整个京津冀地区的 WEF 耦合安全系统影响较大。

图 2(a)展示了京津冀地区的综合评价指数,反映了 2000—2020 年该地区的水安全、粮食安全和能源安全系统整体上升的趋势,其浮动范围为 0.3~0.7。相比于粮食安全系统和能源安全系统综合评价指数的相对平稳上升,水安全系统综合评价指数的上升趋势波动较大。特别是在 2012—2014 年出现明显的下降趋势,自 2015 年开始又大幅度上升。这主要归因于南水北调东、中线一期工程全面通水,提升了京津冀地区的水资源安全保障能力。

各个地区间 WEF 综合评价指数也存在明显差异。北京市各子系统综合评价指数 [图 2(b)] 的浮动范围最大(0.3~0.8),多年平均值为 0.6。其中,水安全系统的综合评价指数在 21 年间上升了 1 倍,但仍低于能源和粮食两个系统。这说明在 2000—2020 年,北京市的水安全系统得到了迅速发展,并且水安全状况朝着良好的方向发展。在未来,水安全仍然是北京市的重点关注领域。天津市各子系统综合评价指数 [图 2(c)] 的浮动范围最小(0.4~0.7),多年平均值为 0.5。天津市水安全系统综合评价指数上升趋势最大,由 0.4 上升到 0.7,自 2008 年以来,水安全综合评价指数超过粮食安全和能源安全综合评价指数。河北省各子系统综合评价指数 [图 2(d)] 最低,多年平均值为 0.4,水安全综合评价指数高于能源安全和粮食安全综合评价指数,从 2005 年开始,粮食安全综合评价指数超过能源安全综合评价指数。河北省的能源安全综合评价指数仅为 0.31,低于北京市(0.56)和天津市(0.53)的能源安全综合评价指数,这表明河北省需要加大对能源安全的保障能力。



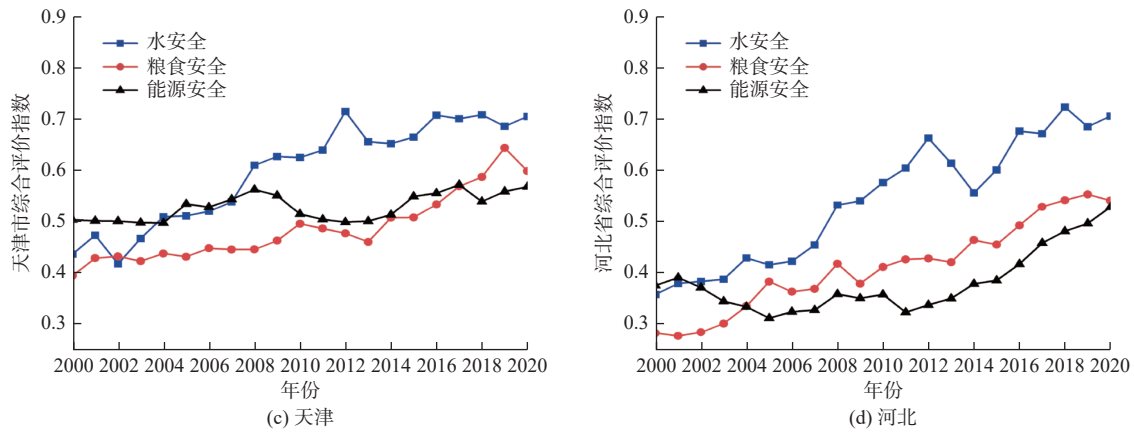


图2 京津冀地区水安全、粮食安全和能源安全系统综合评价指数变化趋势

Fig. 2 The change trend of water security, food security and energy security system comprehensive evaluation index in Beijing-Tianjin-Hebei region

3.2 WEF 安全耦合协调度时空演变分析

京津冀地区水资源、粮食安全和能源安全耦合协调度变化趋势见图3。在2000—2020年,研究区WEF耦合协调度类型均处于协调发展类,但呈现不同程度的上升趋势。京津冀地区WEF系统耦合协调度由2000年的0.65提升到2020年的0.80,相对增长率为23%,多年平均值为0.72。京津冀地区大部分年份处于水安全系统滞后状态,水资源矛盾始终影响区域WEF耦合协调发展。2000—2006年,由于水安全综合评价指数快速增长,使京津冀地区耦合协调发展出现转变,向着良好方向发展。京津冀地区耦合协调发展经历为初级协调发展类(2000—2007年)—中级协调发展类(2008—2019年)—良好协调发展类(2020年)。

北京市WEF耦合协调度由2000年的0.7提升到2020年的0.9,增长了近0.3倍,多年平均值为0.78。尽管北京市的水资源系统一直滞后于粮食和能源安全系统,但水安全系统综合评价指数稳步增长。截至2020年,北京市的耦合协调度达到最高值(0.9),水资源、粮食和能源安全系统的耦合状态最佳。北京市耦合协调度的发展进展较快,由2000—2003年的初级协调发展类到2004—2010年的中级协调发展类,再到2011—2020年的良好协调发展类。

天津市WEF耦合协调度由2000年的0.7提升到2019年的0.8,相对增长率为13%,多年平均值为0.75。在2000—2008年,天津市的水安全系统综合评价指数滞后于粮食和能源安全系统,但自2008年以后,水安全系统综合评价指数超过其他2个系统。天津市的耦合协调度增长缓慢,一直保持在中级协调发展类状态,表明该市的WEF安全一直保

持平稳增长。

河北省WEF系统耦合协调度在研究期间增长了约0.3倍(0.6~0.8),多年平均值为0.68,增长幅度与北京市相似,但最终的耦合协调度等级低于北京市。在大部分年份,河北省的能源安全系统滞后于粮食和水资源系统,由2000—2014年的初级协调发展类逐渐转变为2015—2020年的良好协调发展类,这表明能源安全是影响河北省WEF的耦合协调发展的主要因素。

3.3 WEF 安全影响因素分析

通过公式(8)~(10)计算2000—2020年研究区各影响因子障碍度,结果见图4。图4反映了各个地区的28个指标对WEF耦合安全的影响程度,红色越深代表该因素对WEF耦合安全的影响程度越重,蓝色越深代表因素对WEF耦合安全的影响程度越轻。从各个系统来看,水安全系统中 W_4 、 W_6 和 W_7 的障碍度结果显著降低,特别是北京 W_6 降低比例高达90%。这是由于北京市对水资源紧缺现象的关注度增加,改善了用水效率和污水处理率,并且人们普遍意识到了节水的重要性,使得水安全系统朝着良好的方向发展。在粮食安全系统中 F_{10} 的障碍度结果存在明显差异,北京市和天津市 F_{10} 障碍度结果分别下降了99%和95%,河北省 F_1 的障碍度结果增长了9%。这是因为在2000—2020年,河北省的人均耕地面积从1 027.39 m²减少到805.22 m²。在能源安全系统中,不同地区的影响因子障碍度结果也存在着差异, E_8 的障碍度结果有着很大改善。在2000—2020年,北京市 E_8 障碍度结果下降90%(标准煤1.28~0.19 t),这体现了北京市在能源利用效率方面取得了重大进展。相反, E_2 的障碍度结果在京津冀地区整体上呈上升趋势,其

中河北省的障碍度结果增加了 7%, 这可能是因为河北省以钢铁等重工业为主要产业, 导致能源需求持续增长。

从时间维度上来看: 2000—2005 年, W_4 、 W_6 、 W_7 、 F_9 、 F_{10} 、 E_5 、 E_8 、 E_{10} 对 WEF 系统耦合安全有着至关重要的影响, 为主要障碍因子; 2006—2015 年 W_6 、

W_7 、 F_9 等障碍度变化速率逐渐减缓并且呈降低趋势, 其中京津冀整体的 W_6 年变化率为 0.4%, 远低于 2000—2005 年 1.3% 的年变化率; 2016—2020 年 W_6 、 W_7 、 F_7 、 F_9 、 E_8 和 E_9 等影响因子障碍度计算结果变化较小且稳定, 其中京津冀区域 F_9 的变化幅度最小 (0.1%), 年变化率为 0.02%。

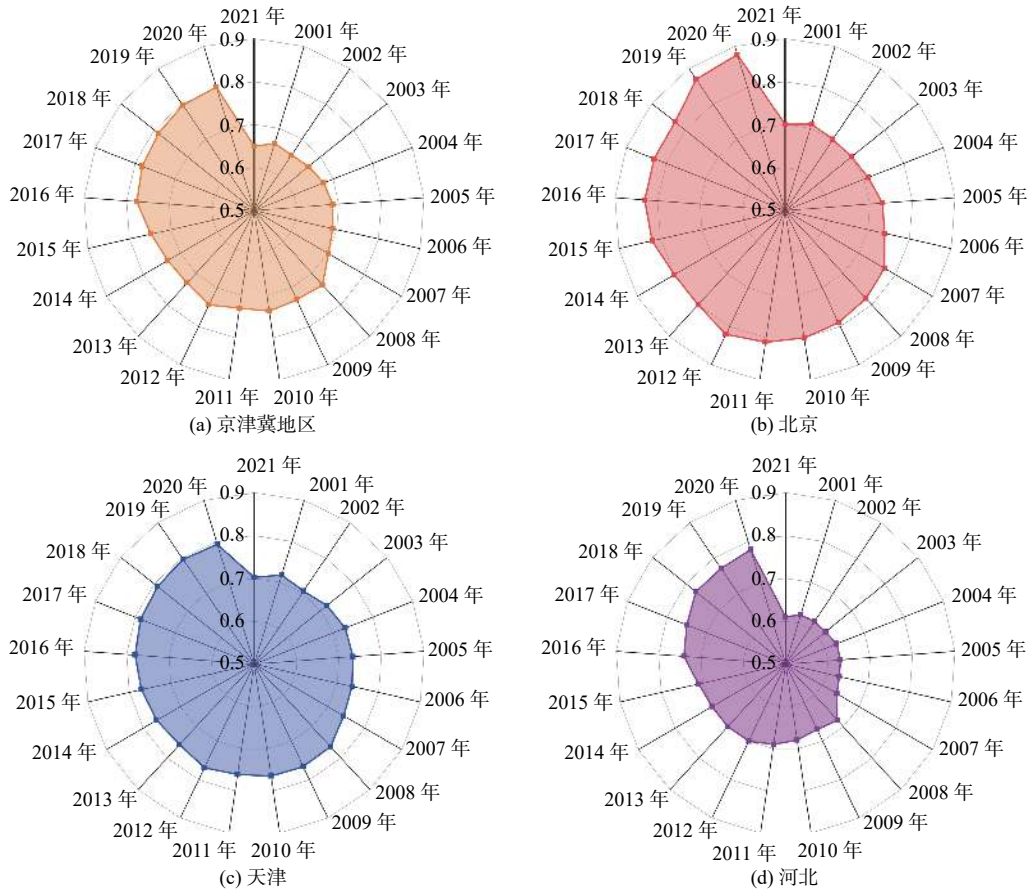
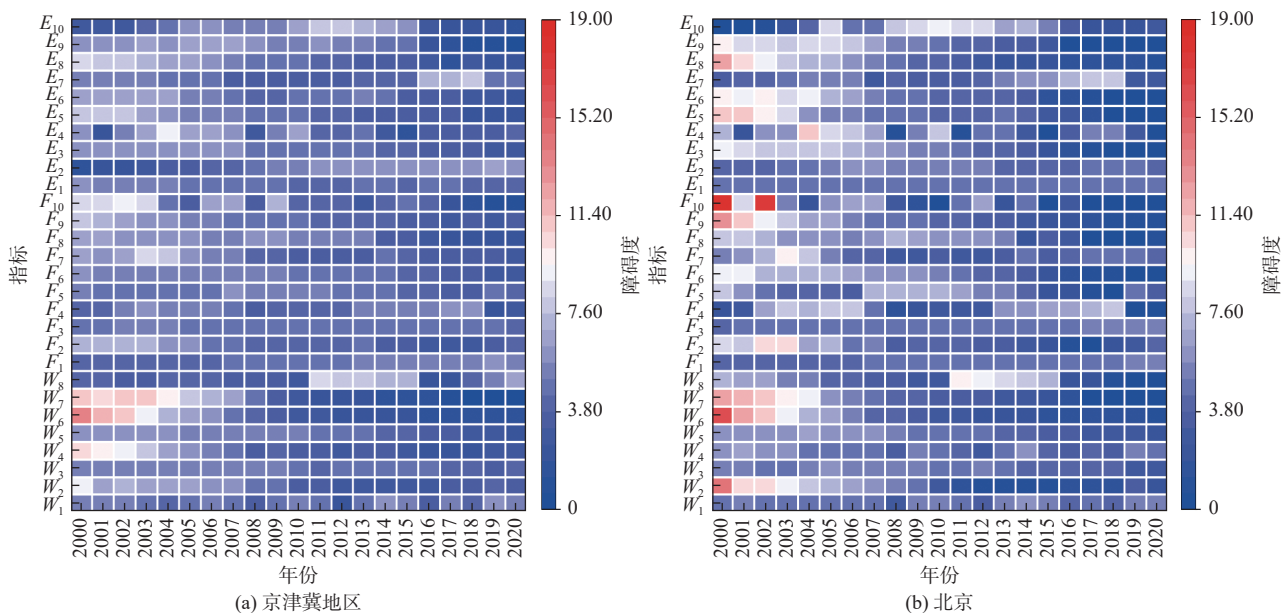


图 3 京津冀地区水安全、粮食安全和能源安全系统耦合协调度变化趋势

Fig. 3 The trend of coupling coordination degree of water security, food security and energy security system in Beijing-Tianjin-Hebei region



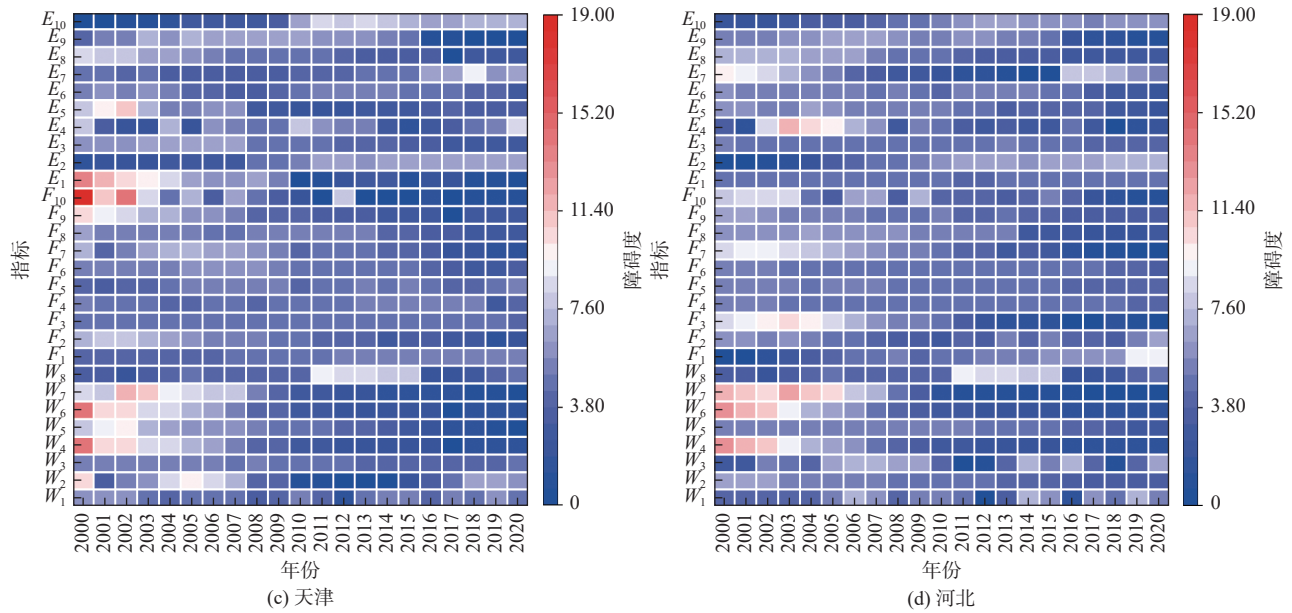


图4 京津冀地区各影响因子障碍度结果

Fig. 4 The results of obstacle degree of obstacle factors in Beijing-Tianjin-Hebei region

京津冀地区整体以及各个地区的障碍度变化大致可以分为3个阶段:2000—2005年主要障碍因子的障碍度值明显高于其他障碍因子并且变化率较大,导致各要素对 WEF 耦合安全指数产生较大影响,整体处于波动阶段;2006—2015年各个地区障碍度计算结果绝大多数由浅蓝色转变为深蓝色并且红色完全消失,是障碍度变化速率减缓的一个过程,这个阶段由于各地区开始关注用水效率、农田保护以及能源消耗,相关指标有所提升,大部分影响因子的影响程度减弱,属于过渡阶段;2016—2020年多数影响因子的障碍度结果变化幅度很小并且趋于稳定,体现了影响因子对整个 WEF 耦合安全的影响程度差距的减小,属于平稳阶段。

W_1 、 W_8 、 E_2 和 E_7 等障碍因子的障碍度在近5年有上升趋势为主要障碍因子,是影响未来京津冀区域 WEF 耦合安全的关键因子。除此之外,北京市应关注 W_4 、 F_2 ;天津市应注重 W_2 、 E_4 和 E_{10} ;河北省应注意 W_3 、 F_1 、 E_2 和 E_{10} 。

4 讨论

耦合协调度模型计算结果显示,2000—2020年京津冀地区水安全、粮食安全和能源安全系统综合评价指数整体上升。这与张红芬等^[25]、Wang等^[33]研究的耦合协调度发展趋势相同,但由于研究时段不同且选取指标有差异导致发展进程有所差别。京津冀地区 WEF 系统安全耦合协调发展经历初级

协调发展类(2000—2007年)—中级协调发展类(2008—2019年)—良好协调发展类(2020年)。张红芬等研究的2005—2016年京津冀地区 WEF 耦合协调度历经勉强协调、初级协调和中级协调3种类型向良好协调类型演进,但并没有达到良好协调发展。2000—2020年 WEF 系统安全耦合协调发展提升速度北京市最快,河北省、京津冀整体、天津市次之。Wang等^[33]研究显示2005—2017年北京市 WEF 协同效应提升速度最快,其次是京津冀整体、天津市和河北省。

京津冀整体耦合协调度提高了23.42%,但各地区仍存在明显短板,北京市水安全系统、天津市能源安全系统以及河北省能源安全系统和粮食安全系统仍然是制约京津冀 WEF 安全耦合协调的关键。北京市主要因为自身水资源条件相对较差,人均用水量远大于人均水资源量。虽然南水北调东、中线一期工程全面通水,提升了京津冀地区的水资源系统安全,使得北京市水安全系统综合评价指数持续上升,但仍不能满足北京市的用水需求, W_1 和 W_4 是主要的障碍因子。基于此,未来北京市应该注重提升水安全系统,严控水资源开发利用强度;实施全行业深度节水,深度挖掘各行业节水潜力并优化节水模式;注重地下水健康发展,防控地下水安全系统风险。北京市水安全系统的提升将加速京津冀区域 WEF 安全耦合协调向好发展。

天津市能源安全综合评价指数低于京津冀整体

的 15%, 并且近几年 E_4 和 E_{10} 的障碍度影响呈增长趋势, 主要原因是天津市能源生产量和能源消耗量高的同时能源利用效率低。2016—2020 年天津市人均能源产量是北京市的 15 倍、河北省的 4 倍, 人均能源消费量却是北京市的 2 倍、河北省的 1.5 倍。且相较于北京市, 在近 5 年(2016—2020 年), 天津市二氧化硫排放量约为北京市的 3.5 倍、二氧化碳排放量和废水中 COD 排放量约为北京市的 2 倍。未来天津市在能源安全提升方面, 不仅需要在满足能源需求的同时提高能源利用效率, 而且要积极利用清洁能源降低煤炭使用, 制定可靠的石化能源替代方案, 推动高耗能产业低碳技术创新, 加大能源脱碳步伐。

河北省为京津冀区域 WEF 安全风险较大的地区。作为我国重要的粮食生产基地之一, 河北省 2022 年粮食总产量高达 773.02 亿 t, 人均粮食产量远大于人均粮食消费量, 可以保障粮食自给自足, 河北省粮食的可靠性较高。但是由于农业基数大、耕地耗能多、受灾面积大, 并且以钢铁为主的高耗能工业发展带来能源消耗增加以及污染物排放量增大等原因, 造成协同性和韧性较差, 因此能源和粮食安全指数最低。根据障碍度模型计算结果, 近 5 年人均能源消费量(E_2)、亩均农用机械总动力(E_7)和二氧化碳排放量(E_{10})为河北省主要障碍因子。未来河北省应注重水、能源、粮食的协同效应, 农业发展要采取喷灌、滴管等节水措施, 避免过度使用污染水质及农药及化肥等, 提高农用机械的使用效率。这不仅能够提升粮食系统的安全状况, 还可以减轻水资源与能源的压力。

为提升京津冀地区 WEF 系统安全发展, 要积极采取协同措施。建立京津冀水资源系统网络监测体系; 加强再生水等非常规水的利用, 进一步促进京津冀水资源安全一体化。充分利用河北省丰富的风、光资源, 在京津冀地区开展风、光荷储一体化的能源基础设施协同建设。这不仅可促进河北省可再生能源技术发展, 还能达到京津冀地区低碳减排与环保的双重目的, 提升能源安全性。京津冀地区在发展经济的同时, 也要提高土地利用效率保护耕地, 增强自然灾害预警机制、加强农业保护、增加粮食产量, 促进粮食安全协同发展。

5 结论

研究通过层次分析法建立系统安全耦合综合评

价指标体系, 运用熵权法确定各个指标权重, 通过耦合协调度模型对京津冀地区 WEF 系统的综合评价指数以及耦合安全协调发展特征进行分析, 并利用障碍度模型对研究区域内各个影响因子进行识别, 得出以下结论:

2000—2020 年京津冀地区水安全、粮食安全和能源安全系统综合评价指数整体呈上升趋势, 其浮动范围为 0.3~0.7。北京市综合评价指数的浮动范围最大(0.3~0.8), 多年平均值为 0.6; 天津市综合评价指数浮动范围最小(0.4~0.7), 多年平均值为 0.5; 河北省综合评价指数在 0.3~0.7 浮动, 多年平均值为 0.4。

京津冀地区 2000—2020 年 WEF 耦合协调度年际间均呈上升趋势, 同时区域之间存在明显差异。北京市耦合协调度由 0.7 提升到 0.9, 增长了 0.29 倍, 多年平均值最高(0.79); 天津市耦合协调度由 0.7 提升到 0.8, 相对增长率为 13%, 多年平均值次之(0.75), 耦合协调程度无跨度; 河北省 WEF 系统耦合协调度由 0.6 提升到 0.8 增长了 0.33 倍, 多年平均值最低(0.68)。

京津冀整体以及各个地区的障碍度变化大致可以分为 3 个阶段: 2000—2005 年为波动阶段; 2006—2015 年为过度阶段; 2016—2020 年为平稳阶段。未来京津冀 WEF 耦合安全应重点关注人均水资源量、水资源开发利用、废水中 COD 排放量、二氧化碳排放量、人均能源消费量和亩均农用机械总动力等指标。

北京市水安全系统、天津市能源系统以及河北省能源安全系统和粮食安全系统是影响京津冀整体耦合协调度的关键。未来北京市应提高用水效率、调整用水结构、挖掘节水潜力; 天津市和河北省要注重提升能源回用效率、优化能源消费结构、进行低碳技术创新, 加大脱碳步伐; 河北省农业发展需要进一步采取节水灌溉措施、减少农作物受灾面积、提高农用机械的使用效率。京津冀整体可建立京津冀水资源系统网络监测体系, 开展风、光荷储一体化的能源基础设施协同建设, 增强自然灾害预警机制, 加强农业保护, 保障京津冀 WEF 协同发展。

参考文献:

- [1] CHANG Y, LI G, YAO Y, et al. Quantifying the Water-Energy-Food nexus: Current status and trends[J].

- Energies, 2016, 9(2): 65. DOI: 10.3390/en9020065.
- [2] FLAMMINI A, PURI M, PLUSCHKE L, et al. Walking the nexus talk: Assessing the Water-Energy-Food nexus in the context of the sustainable energy for all initiative[J]. *Journal of Physical Chemistry A*, 2014, 115(26): 7869-7870. DOI: 10.1021/jp2046323.
- [3] UN-water. World Water Development Report 2019 [R]. 2019.
- [4] 李良, 毕军, 周元春, 等. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(7): 85-92. DOI: 10.120622/cpre.20180203.
- [5] 郑人瑞, 唐金荣, 金玺. 水-能源-粮食纽带关系: 地球科学的认知与解决方案[J]. *中国矿业*, 2018, 27(10): 36-41. DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.2018.10.007.
- [6] HEJNOWICZ A P, THORN J P R, GIRAUDO M E, et al. Appraising the Water-Energy-Food nexus from a sustainable development perspective: a maturing paradigm?[J]. *Earth's Future*, 2022, 10(12): e2021EF-002622. DOI: 10.1029/2021ef002622.
- [7] KELLNER E, MARTIN D A. Learning from past co-evolutionary processes to envision sustainable futures: Extending an action situations approach to the Water-Energy-Food nexus[J]. *Earth System Governance*, 2023, 15: 100168. DOI: 10.1016/j.esg.2023.100168.
- [8] LI W, JIANG S, ZHAO Y, et al. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for Water-Energy-Food nexus[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 856: 159236. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159236.
- [9] 李激, 姜珊, 赵勇, 等. 基于Copula的WEF耦合系统安全评价及联合风险概率计算: 以京津冀为例[J/OL]. *水资源保护*: 1-15 [2023-05-30].
- [10] 刘晶, 刘翠善, 李潇, 等. 中国水-能源-粮食关联系统协同安全评价[J]. *水利水电工程学报*, 2020(4): 24-32. DOI: 10.12170/20190603009.
- [11] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 8-15. DOI: 10.3880/j.issn.10067647.2020.04.002.
- [12] 蒲傲婷. 新疆水-能源-粮食系统安全评价及影响因素分析[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2020 DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.028.
- [13] XIANG W, YANG X, BIAN D, et al. Evaluation and prediction of Water-Energy-Carbon nexus efficiency in China based on a new multiregional input-output perspective[J]. *Journal of Environmental Manage-*
- ment*, 2023, 339: 117786. DOI: 10.1016/j.jenvman.2023.117786.
- [14] 李海央, 许雨辰, 柴正猛. 长江经济带现代化发展水平测度及耦合协调性分析[J]. *统计与决策*, 2023, 39(9): 74-79. DOI: 10.13546/j.cnki.tjyjc.2023.09.013.
- [15] FENG L, GUO M, WANG W, et al. Evaluation of the effects of long-term natural and artificial restoration on vegetation characteristics, soil properties and their coupling coordinations[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 884: 163828. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.163828.
- [16] 王富强, 应卓晖, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价[J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 80-86. DOI: 10.3880/j.issn.10046933.2022.05.012.
- [17] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 水-能源-粮食纽带关系定量研究方法综述[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2020, 18(6): 42-63. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2020.0114.
- [18] 彭俊杰. 黄河流域"水-能源-粮食"纽带系统的耦合协调及时空分异[J]. *区域经济评论*, 2022(2): 51-59. DOI: 10.14017/j.cnki.2095-5766.2022.0029.
- [19] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 69-78. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.010.
- [20] 毕博, 陈丹, 邓鹏, 等. 区域水资源-能源-粮食系统耦合协调演化特征研究[J]. *中国农村水利水电*, 2018(2): 72-77. DOI: 10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2021.0047.
- [21] 王晶, 叶宁杰. 水-能源-粮食系统耦合协调的动态演化与空间特征分析: 以河北省为例[J]. *中国农村水利水电*, 2022(12): 66-71. DOI: 10.12396/znsd.220269.
- [22] 左其亭, 姜龙, 马军霞, 等. 黄河流域高质量发展判断准则及评价体系[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(3): 1-8, 22. DOI: 10.13522/j.cnki.ggps.2020465.
- [23] 周齐彬, 邹进, 容祎, 等. 基于熵权TOPSIS法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(4): 73-84. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.02.007.
- [24] 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. DOI: 10.12062/cpre.20190832.
- [25] 张洪芬, 曾静静, 曲建升, 等. 资源高强度流动区水、能源和粮食耦合协调发展研究: 以京津冀地区为例[J]. *中国农村水利水电*, 2019(5): 17-21, 28. DOI:

- 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.05.004.
- [26] 焦士兴, 王安周, 李青云, 等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况[J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 21-26. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2020.02.004.
- [27] 鲁春阳, 文枫, 杨庆媛, 等. 基于改进TOPSIS法的城市土地利用绩效评价及障碍因子诊断: 以重庆市为例[J]. *资源科学*, 2011, 33(3): 535-541.
- [28] 余亮亮, 蔡银莺. 基于农户满意度的耕地保护经济补偿政策绩效评价及障碍因子诊断[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(7): 1092-1103. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.07.003.
- [29] 陈亚利, 赵强, 艾明乐, 等. 1959—2019 年辽河流域气象干旱时空特征分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 42-52. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.01.004.
- [30] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(3): 211-218. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.03.036.
- [31] 刘宁. 基于水足迹的京津冀水资源合理配置研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [32] 王勤勤, 刘俊国, 赵丹丹. 京津冀地区主要农作物生产水足迹研究[J]. *水资源保护*, 2018, 34(2): 22-27, 33. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2018.02.05.
- [33] WANG Y, XIE Y, QI L, et al. Synergies evaluation and influencing factors analysis of the Water-Energy-Food nexus from symbiosis perspective: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151731. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.151731.

Evaluation of coupling and coordinated development characteristics of Water-Energy-Food system security in Beijing-Tianjin-Hebei region

WANG Luqi¹, JIANG Shan², LIU Hongwei³, LI Wei², CHENG Jinhua¹, HE Fan²

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Water Resources Beijing-Tianjin-Hebei Water Security Key Laboratory, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Center for Irrigation Affairs Downstream of Tangshan Luan River, Tangshan 063200, China)

Abstract: Water, energy and food are the three material bases and strategic resources for the survival and development of human society. The United Nations predicts that global food and energy demand will increase by 60% and 80% respectively compared with 2016 by 2050; global water demand is expected to increase by 20% to 30%, with more than 2 billion people living in countries with severe water shortages. Beijing-Tianjin-Hebei region is one of the regions with the most significant "Water-Energy-Food" link and the most prominent joint risk in China, with a shortage of water resources and a large consumption of energy and food. With 0.7% of the country's water resources, it carries 8% of the country's population, 8.2% of the irrigated area and 10% of the total economy, which makes the security of the Water-Energy-Food system very tense. Therefore, the scientific and quantitative evaluation of the coordination degree of Water-Energy-Food coupling in Beijing-Tianjin-Hebei region and the analysis of the main obstacle factors of Water-Energy-Food coupling security are not only the key to improve the security of regional Water-Energy-Food system, but also an important link to adhere to sustainable development.

Based on the collected data of the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020, the key research and analysis of the Water-Energy-Food coupling security in the Beijing-Tianjin-Hebei region is carried out. The analytic hierarchy process was used to establish a comprehensive evaluation index system for Water-Energy-Food system security coupling, and the evaluation indicators were divided into water security systems, food security systems and energy security systems. The entropy weight method is used to determine the weight of each indicator; the comprehensive evaluation index of the Water-Energy-Food system in the Beijing-Tianjin-Hebei region and the characteristics of coupled security and coordinated development are analyzed through the coupling coordination degree model; and the obstacle degree model is used to analyze the influencing factors in the study area.

The results show that the comprehensive evaluation index of water security, food security and energy security system in Beijing-Tianjin-Hebei region shows an overall upward trend from 2000 to 2020, and its floating range is 0.3–0.7. The floating range of Beijing comprehensive evaluation index is the largest (0.3–0.8), Tianjin

comprehensive evaluation index is the smallest (0.4–0.7), and Hebei comprehensive evaluation index fluctuates between 0.3–0.7. The results of coupling coordination degree show that the coupling coordination degree of Water-Energy-Food in Beijing-Tianjin-Hebei region shows an upward trend from 2000 to 2020, and there are obvious differences between regions. Among them, the coupling coordination degree of Beijing is the highest, while that of Hebei Province is poor. The result of the obstacle degree of Beijing, Tianjin and Hebei as a whole and each region can be roughly divided into three stages: the fluctuation stage from 2000 to 2005, the transition stage from 2006 to 2015, and the stable stage from 2016 to 2020. Per capita water resources, COD discharge in wastewater, per capita energy consumption and total power per mu of agricultural machinery are the main obstacle factors.

Based on the above analysis, Beijing's water security system, Tianjin's energy system, and Hebei's energy security system and food security system are the keys to the overall coupling and coordination of the Beijing-Tianjin-Hebei region. In the future, Beijing should improve water use efficiency, adjust water use structure, and tap water-saving potential; Tianjin and Hebei Province should focus on improving energy recycling efficiency, optimizing energy consumption structure, and carrying out low-carbon technology innovation to increase the pace of decarbonization; Hebei Province also needs to save energy, irrigation measures of water-saving, protect crops, reduce the affected area, and improve the efficiency of agricultural machinery.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; Water-Energy-Food system; coupling safety assessment; coupling and coordinated development; influencing factors analysis

