

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.006

京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价

李 激¹, 姜 珊¹, 赵 勇¹, 王璐琪², 何 凡¹, 李海红¹, 朱永楠¹, 何国华¹

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:为实现京津冀水-能源-粮食协同合作,从可靠性、协同性和韧性3方面选取31个指标构建水-能源-粮食耦合系统安全评价指标体系,分析了2000—2020年京津冀水-能源-粮食耦合系统安全水平,并基于Copula函数计算联合风险概率。结果表明:2000—2020年京津冀水-能源-粮食耦合系统安全指数整体呈现上升趋势,其中北京年均指数最高,达0.63,河北最低,仅为0.48;各区域间可靠性水平无显著差异,均呈现较差水平;人均水资源量、人均能源消费量、地下水供水占比、二氧化碳排放量等是影响水-能源-粮食耦合系统安全的主要障碍因子;京津冀可靠性、协同性和韧性三维联合达到较安全水平的概率为0.723,不均衡发展会影响整体水-能源-粮食耦合系统安全。

关键词:水-能源-粮食耦合系统; Copula函数; 可靠性; 协同性; 韧性; 京津冀地区

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)05-0039-10

Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region//LI Wei¹, JIANG Shan¹, ZHAO Yong¹, WANG Luqi², HE Fan¹, LI Haihong¹, ZHU Yongnan¹, HE Guohua¹ (1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China*)

Abstract: In order to realize the water-energy-food cooperation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, 31 indicators were selected to construct a safety index system for water-energy-food coupling system from reliability, synergy and resilience. The security level of water-energy-food coupling system in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020 was analyzed, and the joint risk probability was calculated based on Copula function. The results show that the security index of water-energy-food coupling system in the Beijing-Tianjin-Hebei region shows an overall upward trend from 2000 to 2020. The annual average index of Beijing is the highest, reaching 0.63, and that of Hebei is the lowest, only 0.48. There is no significant difference in reliability levels among different regions, and they all exhibit poor levels. The main obstacles influencing the security of the water-energy-food coupling system include per capita water resources, per capita energy consumption, the proportion of groundwater supply, and carbon dioxide emissions. The probability of achieving a relatively safe level of reliability, synergy, and resilience in the Beijing Tianjin Hebei region is 0.723, and uneven development will affect the overall security of the water-energy-food coupling system.

Key words: water-energy-food coupling system; Copula function; reliability; synergy; resilience; Beijing-Tianjin-Hebei region

水、能源、粮食三者间相互关联、制约与依存^[1],是影响经济增长和社会稳定的重要因素。现阶段单资源管理方式存在潜在风险,开展多系统研究有利于加强部门间的协同合作、支撑水-能源-粮食耦合系统安全发展^[2]。受人口增长、经济发展、城镇化水平提高、饮食结构变化等影响,预计到

2030年,全球对水、能源和粮食的需求将分别增长40%、35%和50%^[3],水资源短缺与能源、粮食需求不断增长之间矛盾突出。京津冀地区作为首都经济圈,是我国经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强、吸纳人口最多的地区之一^[4],却也是我国水资源最为短缺、能源、粮食压力较大的地区

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC3200204);国家自然科学基金项目(52025093,52239004,52061125101,52109042)

作者简介:李激(1993—),女,博士研究生,主要从事水资源管理研究。E-mail:296121004@qq.com

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

之一^[5]。因此,科学评估水-能源-粮食耦合系统安全状态,识别影响区域安全的主要障碍因子,是保障京津冀地区水-能源-粮食可持续发展、减少风险发生的关键。

目前相关研究多集中在传统的水资源、能源、粮食准则层^[6-15],属于单资源研究范畴,未能体现水-能源-粮食多系统间的耦合协同内涵及机理分析,较少针对系统内部及外部环境产生的互馈耦合协同风险开展研究,且不能反映水-能源-粮食耦合系统内部及外部的可靠性、协同性及韧性水平。基于此,本文以单系统间的可靠性、两两系统间的协同性和三系统间的韧性为核心构建指标体系,旨在打破系统间的藩篱,开展水-能源-粮食耦合系统间的集成研究。为科学评价 2000—2020 年京津冀地区水-能源-粮食耦合系统安全状况,探讨影响研究区耦合系统安全的主要障碍因素,将 Copula 函数与耦合风险评价分析相结合,计算研究区单指标的边缘分布函数以及二维、三维联合分布函数,研判水-能源-粮食耦合系统安全联合风险概率,提出京津冀地区水-能源-粮食协同管理相关建议,以期京津冀城市群优化资源配置、提高资源利用效率提供参考。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

京津冀地区是我国“水-能源-粮食”纽带关系表现最显著、联合风险最突出的区域之一,以不到全国 1% 的水资源,匹配了 8.2% 的灌溉面积和 6.2% 的发电量,占据了全国 10% 的能源消耗总量、7.8% 的粮食消耗总量,承载了全国 8% 的人口和 8.5% 的经济量。多年平均水资源开发率为 134%,远超过国际公认的海河、辽河地区的水资源开发利用合理值(40%)^[16]。水资源短缺已经成为制约区域粮食、能源可持续发展的关键要素,在很大程度上影响着首都安全和京津冀地区的协同发展。图 1 为京津冀地区土地利用类型分布。

1.2 数据来源

研究时段为 2000—2020 年,经济社会数据源于《中国统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《北京统计年鉴》《天津统计年鉴》《河北统计年鉴》;水资源和用水数据主要来源于历年《水资源公报》《中国水利统计年鉴》;能源数据主要来源于历年《中国能源统计年鉴》;农业农村数据主要来源于历年《中国农村统计年鉴》等。为便于开展京津冀地区整体分析,京津冀整体数据采用 3 个区域平均值。

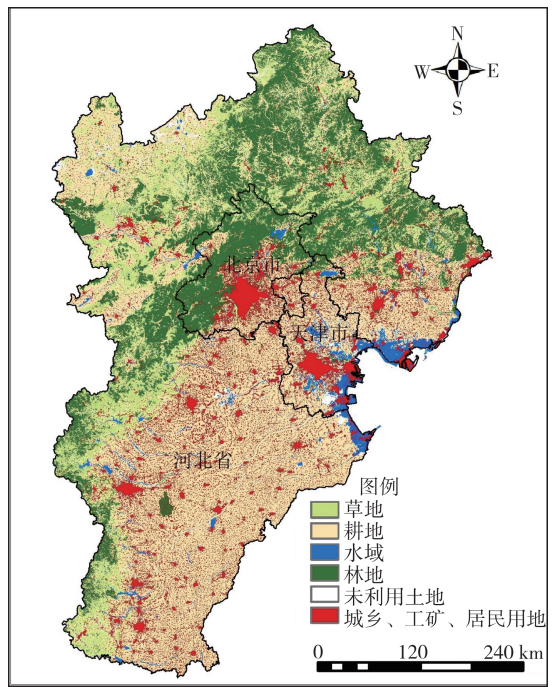


图 1 京津冀地区土地利用类型分布

Fig. 1 Distribution of land use types in Beijing-Tianjin-Hebei region

2 研究方法

2.1 水-能源-粮食耦合系统的内涵

水、能源、粮食各子系统耦合起来形成复杂巨系统,水-能源-粮食系统既受内部供需不稳定影响,又受外部环境经济社会发展状况、生产水平、发展政策等变化影响^[17]。因此,安全的水-能源-粮食系统是指在一定区域环境容量内,各子系统内部尽可能保证数量充足、质量安全、满足需求;在社会生产过程中,尽可能优化水-能源-粮食间的资源配置,从而提升水-能、水-粮、粮-能之间的协同效率水平;同时,通过社会、经济、政策调控,最大限度地提高水-能源-粮食抗风险能力,增强水-能源-粮食对外部环境的适应能力,最终使三者之间相协调,形成相对安全、风险较低的系统。

依据水-能源-粮食耦合系统的内涵,主要涉及可靠性、协同性和韧性 3 方面的评价。可靠性指数表征各子系统内部耦合安全状态,主要从各子系统内部资源数量、质量、供需水平等角度开展评价,各子系统可靠性指数越高,水-能源-粮食耦合系统越趋于安全;协同性指数表征两个子系统间的耦合安全状态,由于水-能源、水-粮食和能源-粮食间既存在着竞争关系又存在着合作关系,因此可以从两个子系统间转化效率和影响程度等角度进行评价,协同水平越高,资源配置和利用效率越高,水-能源-粮食耦合系统越趋于安全;韧性指数表征系统外部耦合

安全状态,即抗风险能力,可选择水-能源-粮食系统面对外界压力、风险、环境等冲击扰动时的抵抗风险能力相关指标,抗风险能力越高,水-能源-粮食耦合系统越趋于安全。

2.2 耦合系统评价

2.2.1 评价指标体系构建

在遵循客观性、综合性、科学性、实用性、可量化等原则的基础上,参考已有研究^[15,18-21]遴选具有典型性、代表性的评价指标。结合水-能源-粮食耦合系统的内涵及京津冀地区的特点,选出较为全面且能够反映京津冀地区水-能源-粮食耦合系统安全特点的31个指标,构建的评价指标体系如图2所示(图中“正”表示正向指标,“负”表示逆向指标,括号中数据为指标权重)。

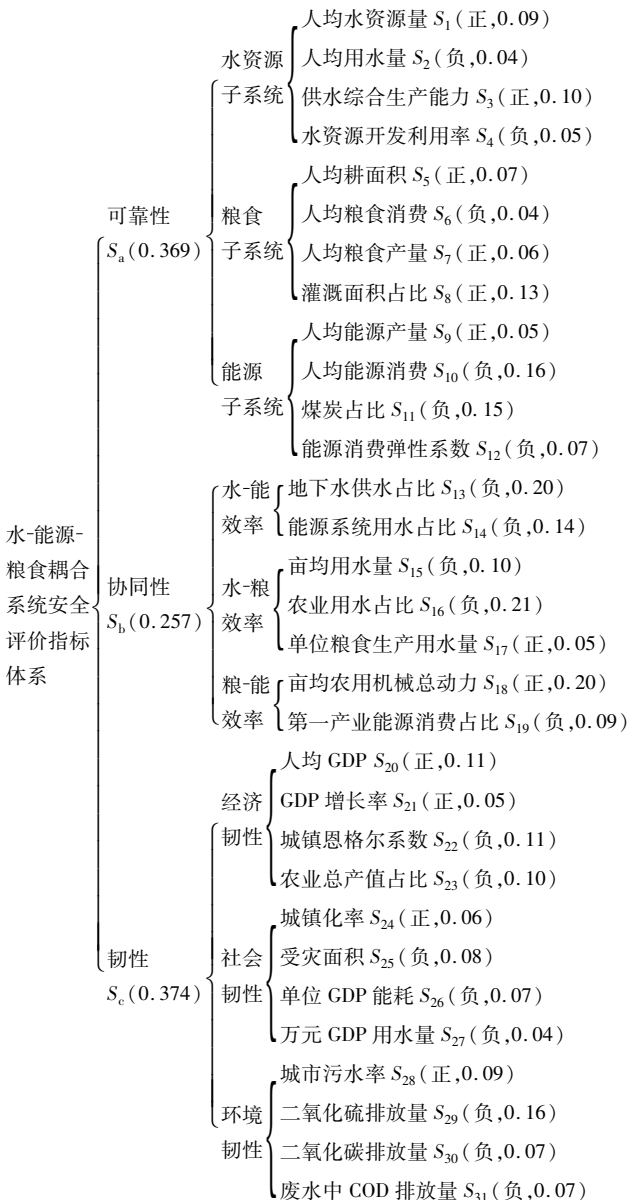


图2 水-能源-粮食耦合系统安全评价指标体系

Fig.2 Safety evaluation index system for water-energy-food coupling system

2.2.2 评价方法

采用单指标量化-多指标综合-多准则集成的方法进行评价^[22],评价步骤如下:①指标量化;②对原始数据进行无量纲化处理;③根据行业规划指标或标准、规划资料、相关研究成果等综合确定评价指标的特征节点值^[5,8-9,17],如表1所示;④对于指标 k ,根据特征节点值计算其水-能源-粮食耦合系统安全指数 μ_k ,正向指标计算公式为式(1),逆向指标计算公式为式(2);⑤综合指数计算。根据准则层所含因素 t 对应的无量纲化指数,采用加权方法,综合得到准则层所含因素 t 的水-能源-粮食耦合安全指数,计算公式见式(3)。

$$\mu_k = \begin{cases} 0 & x_k \leq a_k \\ 0.3 \left(\frac{x_k - a_k}{b_k - a_k} \right) & a_k < x_k \leq b_k \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{x_k - b_k}{c_k - b_k} \right) & b_k < x_k \leq c_k \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{x_k - c_k}{d_k - c_k} \right) & c_k < x_k \leq d_k \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{x_k - d_k}{e_k - d_k} \right) & d_k < x_k \leq e_k \\ 1 & x_k > e_k \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_k = \begin{cases} 1 & x_k \leq e_k \\ 0.8 + 0.2 \left(\frac{d_k - x_k}{d_k - e_k} \right) & e_k < x_k \leq d_k \\ 0.6 + 0.2 \left(\frac{c_k - x_k}{c_k - d_k} \right) & d_k < x_k \leq c_k \\ 0.3 + 0.3 \left(\frac{b_k - x_k}{b_k - c_k} \right) & c_k < x_k \leq b_k \\ 0.3 \left(\frac{a_k - x_k}{a_k - b_k} \right) & b_k < x_k \leq a_k \\ 0 & x_k > a_k \end{cases} \quad (2)$$

$$T = w_a S_a + w_b S_b + w_c S_c \quad (3)$$

$$\text{其中 } S_a = \sum_{i=1}^{n_1} w_{1i} x'_{1i} \quad S_b = \sum_{i=1}^{n_2} w_{2i} x'_{2i}$$

$$S_c = \sum_{i=1}^{n_3} w_{3i} x'_{3i}$$

式中: μ_k 为指标 k 的无量纲化指数; a_k 、 b_k 、 c_k 、 d_k 、 e_k 分别为指标 k 的最差值、较差值、及格值、较优值、最优值; x_k 为指标 k 的值; T 、 S_a 、 S_b 、 S_c 分别为水-能源-粮食耦合安全指数、可靠性指数、协同性指数和韧性指数值; w_a 、 w_b 、 w_c 为各准则层权重; w_{1i} 、 w_{2i} 、 w_{3i} 为可靠性、协同性和韧性准则层中各指标权重,本文采用熵权法确定权重; x'_{1i} 、 x'_{2i} 、 x'_{3i} 为可靠性、协同性和韧性准则层中各指标标准化

表1 水-能源-粮食耦合系统安全评价特征节点值

Table 1 Characteristic node values for safety evaluation of water-energy-food coupling system

特征节点值	S_1/m^3	S_2/m^3	$S_3/(万 m^3/d)$	$S_4/\%$	S_5/m^2	S_6/kg	S_7/kg	$S_8/\%$	S_9/t	S_{10}/t	$S_{11}/\%$
最差值	500	500	60	100	40	225	120	40	0	12	120
较差值	1000	300	530	85	450	195	310	50	1.5	8	90
及格值	2000	150	1000	70	900	170	500	60	3.0	4	60
较优值	4000	100	2500	55	3200	145	750	70	9.5	2	45
最优值	6000	50	4000	40	5500	120	1000	80	26.0	0	30
特征节点值	$S_{12}/\%$	$S_{13}/\%$	$S_{14}/\%$	S_{15}/m^3	$S_{16}/\%$	$S_{17}/(m^3/kg)$	S_{18}/kW	$S_{19}/\%$	$S_{20}/万元$	$S_{21}/\%$	$S_{22}/\%$
最差值	8.5	100	50	800	80	3.20	0.40	6	3	2	55
较差值	4.5	75	40	570	70	1.90	0.70	4	5	4	45
及格值	1.0	50	30	350	60	0.55	1.00	2	7	6	35
较优值	0.5	25	20	250	50	0.35	1.25	1	11	8	27
最优值	0	0	10	150	40	0.15	1.50	0	15	10	18
特征节点值	$S_{23}/\%$	$S_{24}/\%$	$S_{25}/10^3 hm^2$	S_{26}/t	S_{27}/t	$S_{28}/\%$	$S_{29}/万 t$	$S_{30}/10^6 t$	$S_{31}/万 t$		
最差值	30.0	30	6400	35	150	0	30.0	950	160		
较差值	18.5	45	3900	23	125	30	20.0	650	120		
及格值	7.0	60	1300	11	100	60	10.5	350	85		
较优值	3.5	70	650	7	75	80	5.5	200	45		
最优值	0.2	80	0	3	50	100	0	40	5		

后的数据; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为可靠性、协同性和韧性准则层中指标个数。

2.2.3 等级划分

水-能源-粮食耦合系统安全指数值分布区间为 0~1, 参考相关学者研究成果^[23], 以 0.2 为步长进行分类划分, 共划分为 5 个等级: [0, 0.2) 为极不安全、[0.2, 0.4) 为不安全、[0.4, 0.6) 为临界安全、[0.6, 0.8) 为较安全、[0.8, 1.0] 为非常安全。

2.2.4 障碍因子诊断

为识别影响水-能源-粮食耦合系统安全的重要因素, 本文运用障碍度模型进行障碍因子诊断^[24], 计算公式为

$$P_{ij} = F_j I_{ij} / \sum_{j=1}^n F_j I_{ij} \quad (4)$$

式中: F_j 为第 j 个评价指标的因子贡献度; I_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的指标偏离度; P_{ij} 为第 i 年第 j 个评价指标的障碍度。

2.3 Copula 函数

水、能源、粮食是非独立的三维随机变量, 利用

Copula 函数反映变量之间的相关性, 确定最优拟合函数的步骤如下: ①构建可靠性指数、协同性指数和韧性指数的单变量边缘分布函数, 确定最优拟合函数并计算概率; ②构建可靠性-协同性、协同性-韧性、可靠性-韧性、可靠性-协同性-韧性的二维及三维联合分布函数, 确定最优拟合函数并计算概率。

2.3.1 水-能源-粮食单变量边缘分布

采用常见的 Weibull、Gamma、Exp、Normal 和 Lognormal 等 Copula 函数计算单变量边缘分布概率, 利用极大似然法估算参数, 各函数计算公式如表 2 所示。通过拟合优度检验来判断一组数据是否服从以上某种分布, 常用的拟合优度检验方法有 Quantile-Quantile plot (Q-Q) 图法和 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验法, 其中 K-S 检验结果较为精准, 本文采用 K-S 检验确定最优的边缘分布函数。

2.3.2 水-能源-粮食多变量联合分布

多变量联合分布函数常采用 Archimedean 分布族, 较多用于水资源评价, 主要包括 Frank、Clayton、Gumbel 等 Copula 函数, 二维和三维计算公式如表 3

表2 5种常见的 Copula 函数

Table 2 Five common Copula functions

Copula 函数	公式	参数
Weibull	$f(x) = \frac{b}{a} \left(\frac{x}{a}\right)^{b-1} \exp(-x^b/a)$	a 为比例参数; b 为形状参数
Gamma	$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \exp(-x/\beta)$	β 为形状参数; α 为尺度参数
Exp	$f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$	$\lambda > 0$
Normal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(\ln x - \mu)^2/2\sigma^2]$	μ 为对数均值; σ 为对数标准差
Lognormal	$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp[-(y - \mu)^2/2\sigma^2]$	μ 为对数均值; σ 为对数标准差; $x > 0$

表 3 3 种常见的 Archimedean Copula 函数

Table 3 Three common Archimedean Copula functions

Copula 函数	二维和三维计算公式	参数取值
Gumbel	$C(U, V) = \exp\{- [(-\ln U)^\rho + (-\ln V)^\rho]^{1/\rho}\}$ $C(U, V, Z) = \exp\{- [(-\ln U)^\rho + (-\ln V)^\rho + (-\ln Z)^\rho - 2]^{1/\rho}\}$	$\rho \geq 1$
Clayton	$C(U, V) = (U^{-\rho} + V^{-\rho} - 1)^{-1/\rho}$ $C(U, V, Z) = (U^{-\rho} + V^{-\rho} + Z^{-\rho} - 2)^{-1/\rho}$	$\rho \geq 0$
Frank	$C(U, V) = -\frac{1}{\rho} \ln \left\{ 1 + \frac{[\exp(-\rho U) - 1][\exp(-\rho V) - 1]}{\exp(-\rho) - 1} \right\}$ $C(U, V, Z) = -\frac{1}{\rho} \ln \left\{ 1 + \frac{[\exp(-\rho U) - 1][\exp(-\rho V) - 1][\exp(-\rho Z) - 1]}{[\exp(-\rho) - 1]^2} \right\}$	$\rho \neq 0$

所示。本文采用 AIC、BIC 法进行模型检验, AIC、BIC 值越小则 Copula 联合分布函数的拟合程度越高。

3 结果与分析

3.1 耦合系统安全评价结果

3.1.1 时空演变特征分析

图 3 为 2000—2020 年京津冀地区水-能源-粮食耦合系统安全指数。可见, 研究期间该指数在各区域均呈上升趋势, 区域之间存在明显差异, 北京水-能源-粮食耦合系统安全水平始终处于区域领先, 安全指数多年平均值为 0.63, 2000 年后均超过 0.5, 处于临界安全状态, 2019 年后超过 0.7, 处于较安全状态; 天津安全指数多年平均值为 0.62, 略低于北京, 同样 2000 年后均超过 0.5, 2017 年后达到 0.7; 京津冀地区安全指数多年平均值为 0.57, 整体水平低于北京、天津; 河北水-能源-粮食耦合系统安全水平持续偏低, 2000—2014 年安全指数均低于 0.5, 2014 年后高于 0.5, 但直到 2020 年仍低于 0.6, 处于临界安全状态。因此, 从京津冀地区整体来看, 河北是京津冀地区水-能源-粮食耦合系统安全的短板。

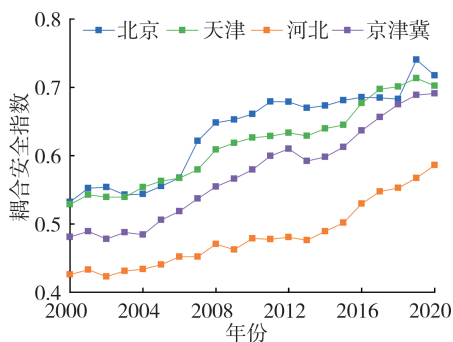


图 3 2000—2020 年京津冀水-能源-粮食耦合系统安全指数

Fig. 3 Security index of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

权重计算结果见图 2, 准则层要素权重由大到小为韧性 (0.374)、可靠性 (0.369)、协同性 (0.257), 可见韧性、可靠性对水-能源-粮食耦合系统安全影响较大。由准则层评价结果 (图 4) 可见,

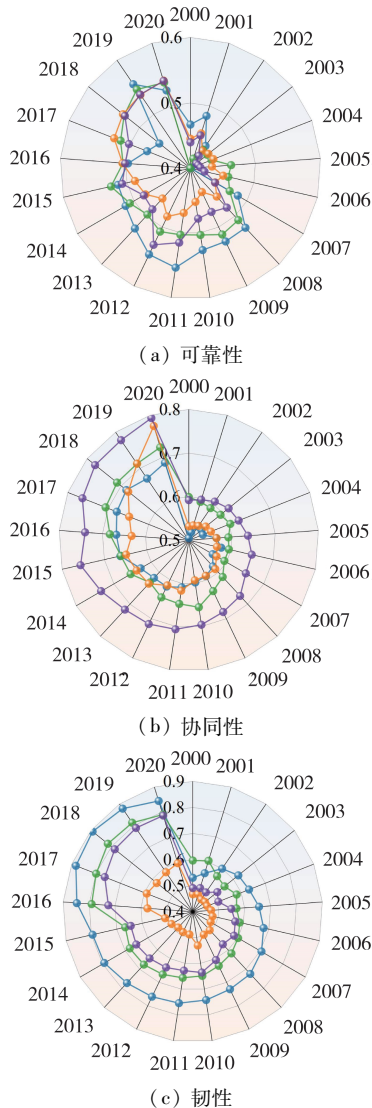


图 4 2000—2020 年京津冀水-能源-粮食耦合系统准则层评价结果

Fig. 4 Evaluation results of criterion layer of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

在可靠性方面,由于京津冀地区资源禀赋条件较差,各地区差别不大,2000—2020年可靠性指数均位于0.4~0.6之间,远低于其他准则层,表明京津冀地区存在资源压力较大的问题。在协同性方面,较可靠性整体有了较大提升,协同性指数基本处于0.5~0.8之间,处于较安全水平,区域间差距明显,表现为京津冀整体最优,至2020年协同性指数接近0.8,但河北、北京协同指数较低,低于0.7。在韧性方面,各地区呈现出显著差异,具体表现为河北最差,多年平均韧性指数为0.51,京津冀整体为0.62、天津为0.6、北京最优,为0.73,尤其是北京韧性指数在2015年后超过0.8,达到非常安全水平,该结果符合近年来北京构建韧性城市的愿景^[25]。

3.1.2 障碍度分析

图5为2000—2020年京津冀地区障碍度分析结果。由图5可见,北京、天津、河北各地区水-能源-粮食耦合系统安全指数障碍因子中可靠性因子和韧性因子累积占比均较高,分别达40%和38%,协同性因子累积占比为22%,表明可靠性和韧性中存在较多指标影响水-能源-粮食耦合系统安全。影响水-能源-粮食耦合系统安全指数的因子在时间序列上发生了明显变化,水资源开发利用率(S_4)、农业总产值占比(S_{23})、受灾面积(S_{25})、万元GDP用水量(S_{27})、城市污水处理率(S_{28})等在2000—2005年对水-能源-粮食耦合系统安全障碍度较大,指标远超过特征节点值的最差值,表明随着经济社会发展

这些指标逐渐变好。以河北万元GDP用水量指标为例,随着京津冀地区对水资源的重视,逐步提高水资源利用效率,使得该指标障碍度逐渐减小,由2000年的 456.5m^3 降至2020年的 50.5m^3 ,降幅非常大。人均水资源量(S_1)、人均耕地面积(S_5)、人均能源消费量(S_{10})、地下水供水占比(S_{13})、GDP增长率(S_{21})、二氧化碳排放量(S_{30})、废水中COD排放量(S_{31})等指标在2015年后障碍度呈现增大趋势,是未来影响水-能源-粮食耦合系统安全的关键。此外,北京还应注意水资源开发利用率(S_4)、人均粮食产量(S_7)、人均能源产量(S_9)等指标;天津应关注人均水资源量(S_1)、人均耕地面积(S_5)指标;河北应重点关注能源消费弹性系数(S_{12})、地下水供水占比(S_{13})。

3.2 Copula 函数概率计算结果

3.2.1 单变量边缘分布函数模型确定

应用极大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)法评价 Weibull、Gamma、Exp、Normal、Lognormal 等单变量边缘分布函数的统计特性,包括一致性、有效性和不变性。当K-S检验的显著性水平 $\alpha = 0.05$ 、 $n = 21$,且对应的P值均大于0.05时,说明假设成立。结果表明,各地区适合的单变量 Copula 函数有所不同,对于京津冀整体而言,可靠性、协同性、韧性分别表现为 Weibull、Gamma、Lognormal 函数拟合最优;对于北京而言,可靠性、协同性均表现为 Weibull 函数拟合最优,韧性表现为

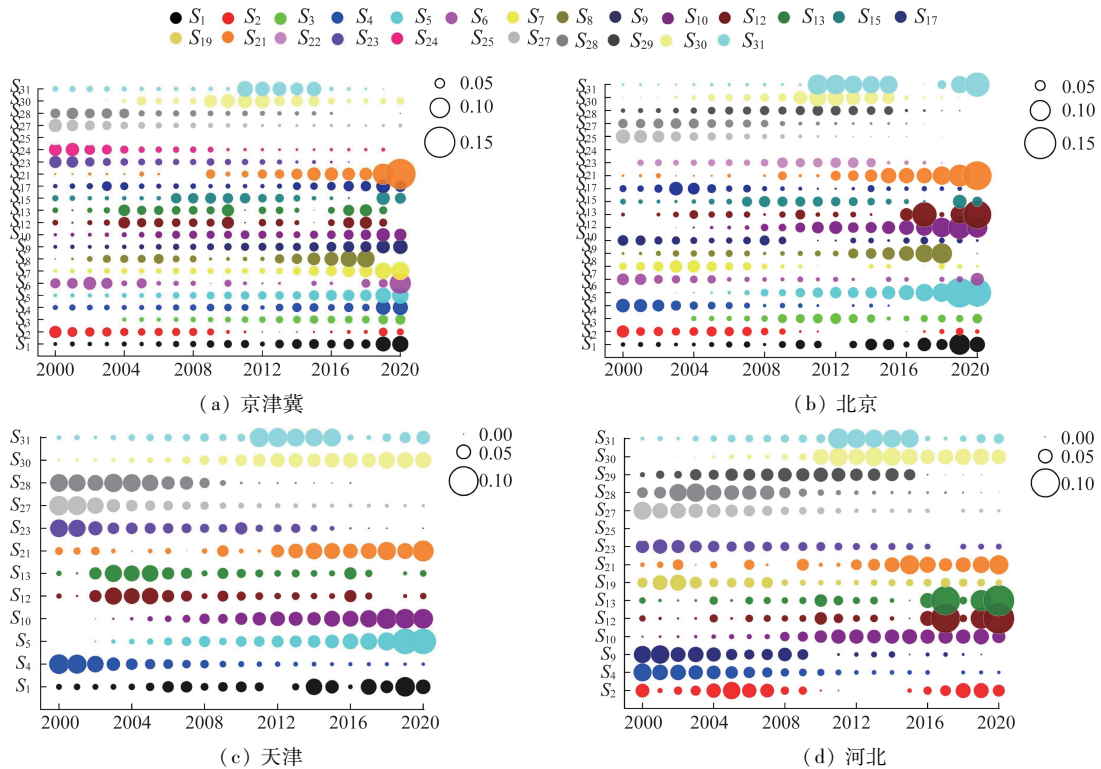


图5 2000—2020年京津冀地区障碍度分析结果

Fig. 5 Analysis results of obstacle degree in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

Normal 函数拟合最优;对于天津而言,可靠性、协同性均表现为 Weibull 函数拟合最优,韧性表现为 Lognormal 函数拟合最优;对于河北而言,可靠性、协同性、韧性均表现为 Lognormal 函数拟合最优。

3.2.2 多变量联合分布函数模型确定

多变量联合分布参数及拟合检验计算结果显示,各地区的最优拟合函数有所不同。对于京津冀整体而言,二维可靠性-协同性和二维可靠性-韧性表现为 Frank 函数拟合最优,二维协同性-韧性和三维可靠性-协同性-韧性则表现为 Clayton、Gumbel 函数拟合最优;对于北京而言,二维可靠性-协同性和三维可靠性-协同性-韧性则表现为 Clayton 函数拟合最优,而二维协同性-韧性和二维可靠性-韧性分别表现为 Gumbel、Frank 函数拟合最优;对于天津和河北而言,二维和三维联合分布均表现为 Frank 函数拟合最优。

3.3 水-能源-粮食耦合系统安全风险概率

3.3.1 二维联合风险概率

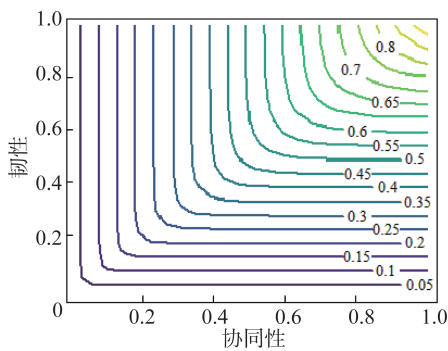
计算京津冀地区多维联合分布达到较安全水平(0.8)的概率,结果见表4。从京津冀整体来看,可靠性-协同性、可靠性-韧性二维联合概率达到较安全水平的概率较低,分别仅为0.638、0.693;受京津冀协同性和韧性整体水平较高影响,协同性-韧性二维联合概率达到较安全水平的概率较高,为0.771。北京市受韧性水平较高影响,协同性-韧性二维联合

概率达到较安全水平的概率较高,为0.767,可靠性协同性和可靠性-韧性二维联合概率达到较安全水平的概率分别为0.662、0.684。天津市受区域协同性、韧性水平稳步上升影响,协同性-韧性、可靠性-韧性二维联合概率达到较安全水平的概率相对较高,可达0.775、0.725,可靠性-协同性达到较安全水平的概率较低,仅为0.651。河北的二维联合概率达到较安全水平的概率最低,除协同性表现稍好外,可靠性和韧性水平均表现较差。选取京津冀协同性-韧性、北京协同性-韧性、天津协同性-韧性和河北可靠性-协同性4种情况绘制等值线图,结果见图6。可见,可靠性-协同性、协同性-韧性和可靠性-韧性二维联合分布概率值变化趋势大致相同,均表现为随着一个值的增大另一个值减小。

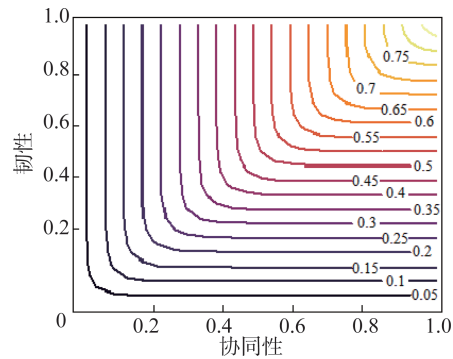
表4 多维联合分布概率计算结果

Table 4 Calculation results of multidimensional joint distribution probability

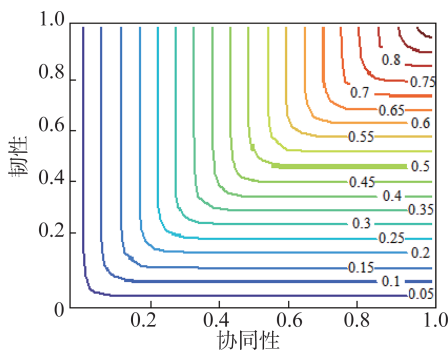
地区	二维可靠性-协同性	二维协同性-韧性	二维可靠性-韧性	三维可靠性-协同性-韧性
京津冀	0.638	0.771	0.693	0.723
北京	0.662	0.767	0.684	0.718
天津	0.651	0.775	0.725	0.693
河北	0.658	0.646	0.638	0.653



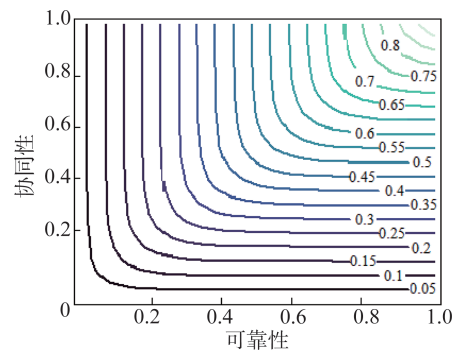
(a) 京津冀协同性-韧性



(b) 北京协同性-韧性



(c) 天津协同性-韧性



(d) 河北可靠性-协同性

图6 各地区二维联合分布概率等值线

Fig. 6 Contour map of two-dimensional joint distribution probability in Beijing-Tianjin-Hebei region

3.3.2 三维联合风险概率

图7为各地区可靠性-协同性-韧性三维联合分布概率,图中坐标轴分别代表了可靠性、协同性和韧性发生联合风险的概率,显示了各子系统对联合风险的耦合效应。可以看出,在可靠性、协同性和韧性3个维度上均呈现联合概率会随着子系统概率的增加而增加。当可靠性、协同性和韧性3个子系统概率均达到0.8,可认为可靠性-协同性-韧性三维联合分布概率达到较安全水平。不同地区最优 Copula 拟合函数不同,对应的联合风险概率也略有不同,京津冀地区可靠性-协同性-韧性三维联合分布达到较安全水平的概率最大,为0.723,北京、天津、河北三维联合分布达到较安全水平的概率分别为0.718、0.693、0.653。表明区域可靠性、协同性和韧性三者之间需协同合作、相互促进,如果发展不均衡或者是整体水平较低,会阻碍三者耦合系统安全。

4 讨论与建议

从京津冀地区水-能源-粮食耦合系统安全评价的障碍因子来看,可靠性及韧性部分指标是京津冀地区需关注的重点,主要为人均水资源量、人均耕地面积、人均能源消费量、地下水供水占比、二氧化碳排放量、废水中COD排放量,这表明水资源及能源问题仍是京津冀地区较为突出的障碍因子。为确保

京津冀地区的水资源保障能力,应坚持南水北调工程通水,逐步恢复健康地下水。并进一步提升用水水平和用水效率,保障社会合理用水需求,严格限制废水中COD排放量,使得水资源能够支撑水-能源-粮食及生态环境功能^[26-27]。同时,能源方面应坚持落实“双碳”目标,基于各城市功能定位,细化落实区域碳达峰目标,实行差异化减排政策并注重加强京津冀间节能减排合作,同时加大节能宣传,增强公众节能意识,减少能源需求^[28]。

京津冀可靠性-协同性-韧性三维联合分布达到较安全水平的概率为0.723,表明整体水平较低,会阻碍耦合系统安全,河北是京津冀水-能源-粮食耦合系统安全的明显短板,协同性、韧性水平均处于区域最差状态,韧性指数最差,仅为北京的2/3。从协同性方面提出建议,作为全国水资源供需矛盾较为尖锐的地区之一,应坚持加大非常规水利用,尤其是微咸水、海水淡化等方面,提高工业重复水利用率。并基于地下水超采目标严格控制灌溉面积和高耗水作物种植面积,继续推广普及节水农业综合配套技术,持续提升农业水资源、能源利用效率,以促进农业效率全面提升。从韧性方面提出建议,一直以来河北产业结构以重化工业为主,钢铁、化工、建材等高能耗高污染项目占比过大,存在能源结构不合理问题,优化和调整产业结构有利于缓解资源和环境

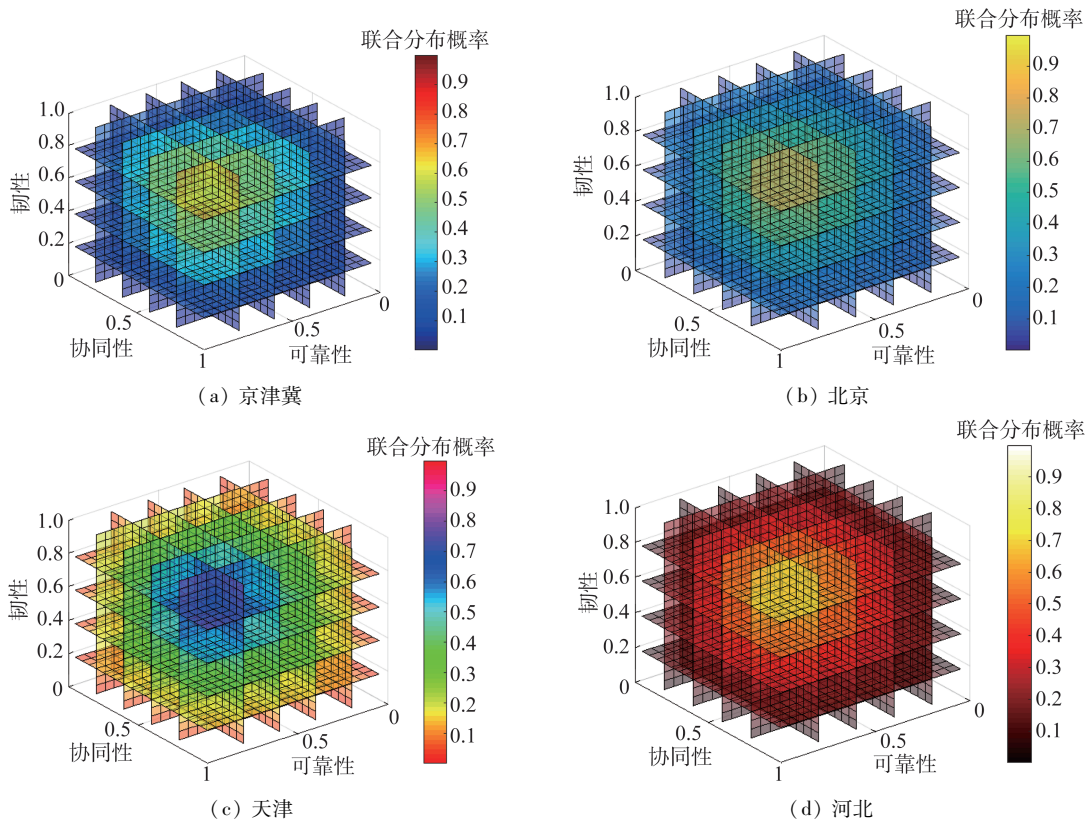


图7 各地区可靠性-协同性-韧性三维联合分布概率

Fig.7 Probability of three-dimensional joint distribution of reliability, synergy, and resilience in different regions

压力。同时利用河北地理优势,逐步加大可再生能源生产,提高清洁能源使用比例,发展绿色低碳产业,抓好节能降碳改造^[28]。河北是京津冀韧性短板,但也是发展潜力所在,缩小河北与京津之间的差距,有助于推进京津冀水-能源-粮食整体耦合安全,进而实现京津冀协同发展。

5 结 论

a. 京津冀地区整体 2000—2020 年水-能源-粮食耦合系统安全指数呈现整体上升趋势,区域间存在明显差异,北京始终处于领先水平,多年平均安全指数为 0.63,天津略低于北京,京津冀整体次之天津,多年平均安全指数为 0.57,河北安全水平偏低,多年平均指数为 0.48,2020 年安全指数最优值仍低于 0.6,处于临界安全状态。

b. 从准则层来看,各地区间可靠性无明显差异,指数整体水平较低,数值为 0.4~0.6;协同性和韧性指数呈现明显的差异,数值分别为 0.5~0.8、0.4~0.9。

c. 障碍因子主要分布在可靠性和韧性准则层,累积占比分别达 40% 和 38%,协同性仅占 22%。未来京津冀水-能源-粮食耦合系统安全应重点关注人均水资源量、人均耕地面积、人均能源消费量、地下水供水占比、二氧化碳排放量、废水中 COD 排放量等指标。

d. 各地区水-能源-粮食耦合安全二维联合分布概率结果较大的为京津冀协同性-韧性、北京协同性-韧性、天津协同性-韧性,达到较安全水平的概率分别为 0.771、0.767、0.775;河北协同性-韧性联合分布概率达到较安全水平的概率仅为 0.638。可靠性-协同性-韧性三维联合分布达到较安全水平的概率京津冀最大,为 0.723,河北最低,仅为 0.653。表明区域可靠性、协同性和韧性三者之间需协同合作、相互促进,将有利于水-能源-粮食耦合系统安全。

参考文献:

[1] WEN C L, DONG W H, ZHANG Q C, et al. A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: a case study in Daqing City, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 806: 150497.

[2] 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.

[3] VAN VUUREN D P, BIJL D L, BOGAART P, et al. Integrated scenarios to support analysis of the food-energy-

water nexus [J]. *Nature Sustainability*, 2019, 2(12): 1132-1141.

[4] 赵勇,翟家齐. 京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用[J]. *中国环境管理*, 2017, 9(4): 113-114. (ZHAO Yong, ZHAI Jiaqi. Beijing-Tianjin-Hebei water resources security technology research and development integration and demonstration application [J]. *China Environmental Management*, 2017, 9(4): 113-114 (in Chinese))

[5] 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. (ZHANG Hongfen, ZENG Jingjing, QU Jiansheng, et al. Research on the coupling coordinative degree among water-energy-food system in high-intensity flow areas: a case study of Beijing, Tianjin and Hebei Province [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(5): 17-21. (in Chinese))

[6] 李玲慧,何国华,赵勇,等. 京津冀“水-食物”系统风险评估及变化规律[J/OL]. *水资源保护*. [2023-02-06]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRad>. (LI Linghui, HE Guohua, ZHAO Yong, et al. Risk assessment and change rule of “water-food” system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J/OL]. *Water Resources Protection*. [2023-02-06]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRad>. (in Chinese))

[7] 汪中华,田宇薇. 我国水-能源-粮食耦合关系及影响因素[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(2): 243-252. (WANG Zhonghua, TIAN Yuwei. Water-energy-food coupling relationship and its influencing factors in China [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2022, 20(2): 243-252. (in Chinese))

[8] LI J W, MA J X, YU L, et al. Analysis and regulation of the harmonious relationship among water, energy, and food in nine provinces along the Yellow River[J]. *Water, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2022, 14(7): 1042.

[9] ZHANG C, CHEN X X, YU L, et al. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 625-639.

[10] 王红瑞,赵伟静,邓彩云,等. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2): 307-319. (WANG Hongrui, ZHAO Weijing, DENG Caiyun, et al. Analysis on issues of water-energy-food nexus[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(2): 307-319. (in Chinese))

[11] 孙才志,郝帅,赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征[J]. *水资源保护*, 2021, 37(1): 61-68. (SUN Caizhi, HAO Shuai, ZHAO Liangshi. Spatial-temporal differentiation characteristics of water resources-energy-food nexus system efficiency in China [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(1): 61-68.

- (in Chinese))
- [12] 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. (ZHAO Liangshi, LIU Sijia, SUN Caizhi. Study on coupling and coordinated development of water-energy-food security system in the Yellow River Basin [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 69-78. (in Chinese))
- [13] 白景锋,张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析[J]. 地理科学, 2018, 38(10):1653-1660. (BAI Jingfeng, ZHANG Haijun. Spatio-temporal changes and driving forces of water-energy-grain pressure in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1653-1660. (in Chinese))
- [14] 李红芳,王会肖,赵茹欣,等. 基于 Copula 函数的水-能源-粮食共生安全风险概率[J]. 农业工程学报, 2021, 37(8): 332-340. (LI Hongfang, WANG Huixiao, ZHAO Ruxin, et al. Estimating the symbiosis risk probability of water-energy-food using Copula function[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(8): 332-340. (in Chinese))
- [15] 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. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. Review of quantitative research methods for water-energy-food Nexus [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(6):42-63. (in Chinese))
- [16] 贾绍凤,柳文华. 水资源开发利用40% 阈值溯源与思考[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 87-89. (JIA Shaofeng, LIU Wenhua. Tracing and thinking about 40% threshold value of water resources development and utilization ratio [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1):87-89. (in Chinese))
- [17] 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.
- [18] 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, 15: 151731.
- [19] 孙才志,孟程程. 中国区域水资源系统韧性与效率的发展协调关系评价[J]. 地理科学, 2020, 40(12): 2094-2104. (SUN Caizhi, MENG Chengcheng. Evaluation of the development coordination relationship between resilience and efficiency of regional water resources system in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2020, 40(12): 2094-2104. (in Chinese))
- [20] 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))
- [21] 赵勇,常奂宇,桑学锋,等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 II: 应用[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 1251-1261. (ZHAO Yong, CHANG Huanyu, SANG Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei region II: application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(10): 1251-1261. (in Chinese))
- [22] 左其亭. 和谐论:理论·方法·应用[M]. 北京:科学出版社, 2012.
- [23] JIANG L, ZUO Q T, MA J X, et al. Evaluation and prediction of the level of high-quality development: a case study of the Yellow River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107994.
- [24] 孙才志,吴永杰,刘文新. 基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 1-8. (SUN Caizhi, WU Yongjie, LIU Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4):1-8. (in Chinese))
- [25] 张永欢,薛晔,徐美玲,等. 京津冀城市韧性动态预测及时空演进研究[J]. 管理现代化, 2021, 41(5): 77-81. (ZHANG Yonghuan, XUE Ye, XU Meiling, et al. Dynamic prediction and spatio-temporal evolution of urban resilience in Beijing-Tianjin-Hebei [J]. Management Modernization, 2021, 41(5): 77-81. (in Chinese))
- [26] 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. (WANG Fuqiang, YING Zhuohui, LYU Subing, et al. Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(5): 80-86. (in Chinese))
- [27] 赵勇,王庆明,王浩,等. 京津冀地区水安全挑战与应对战略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 8-18. (ZHAO Yong, WANG Qingming, WANG Hao, et al. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei region: challenges and strategies [J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(5): 8-18. (in Chinese))
- [28] 韩楠,罗新宇. 多情景视角下京津冀碳排放达峰预测与减排潜力[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1277-1288. (HAN Nan, LUO Xinyu. Carbon emission peak prediction and reduction potential in Beijing-Tianjin-Hebei region from the perspective of multiple scenarios [J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1277-1288. (in Chinese))

(收稿日期:2022-12-25 编辑:王芳)