

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.05.007

# 京津冀水-食物系统风险评估

李玲慧<sup>1</sup>,何国华<sup>1</sup>,赵勇<sup>1</sup>,何凡<sup>1</sup>,李海红<sup>1</sup>,常奂宇<sup>1,2</sup>

(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. 清华大学水利水电工程系,北京 100084)

**摘要:**构建了京津冀水-食物系统风险评估体系,考虑农业水足迹因素,分3个时段对2000—2020年京津冀水-食物系统风险进行了评估。结果表明:2000—2020年京津冀水-食物系统总体面临损害性风险,系统会发生风险并造成明显破坏;河北邯郸、张家口和石家庄等市为系统风险最大的地区,北京最小;在时间变化上,2000—2020年京津冀大部分地区为Ⅲ级风险,Ⅳ级风险地区在第一时期(2000—2006年)为4个,第二时期(2007—2013年)为2个,第三时期(2014—2020年)为0个,系统稳定性随时间有所提高;在空间变化上,前两个时期风险最高的地区为张家口,第三时期为邯郸,3个时期中风险最小的地区分别为邢台、北京、唐山;2000—2020年系统主要致险因素为农业灌溉缺水率,主要承险因素为节水灌溉程度、农业灌溉设施建设状况和本地水资源量满足需求率。

**关键词:**水-食物系统;损害性风险;农业水足迹;农业灌溉缺水率;京津冀地区

**中图分类号:** TV213.4;F327

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1004-6933(2023)05-0049-09

**Risk assessment of water-food system in Beijing-Tianjin-Hebei region//LI Linghui<sup>1</sup>, HE Guohua<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>1</sup>, HE Fan<sup>1</sup>, LI Haihong<sup>1</sup>, CHANG Huanyu<sup>1,2</sup>** (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. *Department of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** A risk assessment system of water-food system in the Beijing-Tianjin-Hebei region was constructed. Considering the factor of agricultural water footprint, risk assessment of the water food system in the Beijing Tianjin Hebei region from 2000 to 2020 in three time periods was performed. The results showed that the overall water-food system in the Beijing-Tianjin-Hebei region faced a risk of damage from 2000 to 2020, indicating that the system would be at risk and cause significant damage. Cities such as Handan, Zhangjiakou, and Shijiazhuang in Hebei Province had the highest systemic risk, while Beijing had the lowest. In terms of time variation, most areas in the Beijing-Tianjin-Hebei region during the research period were classified as level III risk, with four areas of level IV risk in the first period (2000-2006), two areas in the second period (2007-2013), and 0 in the third period (2014-2020). The system stability has improved over time. In terms of spatial changes, the area with the highest risk in the first two periods was Zhangjiakou, and in the third period was Handan. The regions with the least risk in the three periods are Xingtai, Beijing, and Tangshan. In terms of the contribution of risk indicators, the main factors causing risk of the system from 2000 to 2020 were water shortage rate of agricultural irrigation, and the main factors bearing risk were the degree of water-saving irrigation, the construction status of agricultural irrigation facilities, and the rate of local water resources meeting demand.

**Key words:** water-food system; risk of damage; agricultural water footprint; water shortage rate of agricultural irrigation; Beijing-Tianjin-Hebei region

农业用水的有效供给是保障食品安全的基础,而食物生产又是耗水量最大、对水循环扰动最显著的环节<sup>[1-3]</sup>。目前,农业用水占全球水资源消耗总量的70%,根据《第二次全国污染源普查公报》,

2017年我国农业面源污染产生的化学需氧量、总氮和总磷排放分别占地表水体污染总负荷的49.8%、46.5%和67.2%,是水体污染的主要贡献源。在全球气候变暖、人口规模增加、消费水平升级、水生态

**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, 52109042, 52061125101)

**作者简介:**李玲慧(1996—),女,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:lilinghuihill@163.com

**通信作者:**何国华(1990—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:hegh@iwhr.com

环境整体恶化等多种因素的影响下,农业供水能力、食物生产用水需求、农业废污水排放之间的不匹配现象日益突出<sup>[4]</sup>,识别水-食物系统风险,确保水资源和食物的协同安全已经成为世界各国面临的共同挑战。

水-食物系统风险是指水资源和食物相互作用产生的双向影响。一方面,由于降水波动、地下水供水能力下降、水利工程不完善等因素影响,导致农业生产用水受限,进而影响区域食物生产;另一方面,由于灌溉用水损耗、农业废污水排放等因素影响,导致水资源粗放利用和水环境污染,影响整个水循环系统健康运行<sup>[5]</sup>。从20世纪60年代起,许多学者对水资源和食物的风险评估开展了研究,但早期研究大多将水资源或食物作为单一研究对象,未将二者整体考虑<sup>[6-8]</sup>。随着水系统和食物系统的耦合不断加深,将水-食物作为一个关联系统开展风险研究成为近年来的前沿热点。目前,世界银行、联合国教科文组织、联合国粮农组织等国际机构都已着手开展水-食物系统风险研究,并取得了一定的研究成果<sup>[9-14]</sup>。但总体来看,水-食物系统风险研究仍处于起步阶段,相关研究主要集中在水-食物关联系统与风险的定性描述<sup>[15-16]</sup>,仅有少数开展了理论模型框架构建<sup>[17-21]</sup>。此外,目前大多数研究仅考虑了水资源与某一种作物之间的关联风险,较少将全口径类食物作为研究对象开展水-食物系统风险的定量研究。

京津冀地区是我国水资源最短缺、地下水超采问题最突出的区域,人均水资源量不足全国平均水平的1/8,多年平均水资源量不足全国总量的1.3%,但却承担着全国6.0%的粮食生产、5.5%的肉类生产和3.3%的油料生产。水-食物系统风险已经成为京津冀地区水资源安全保障和食物有效供给的最突出制约因素,建立京津冀水-食物系统风险评估体系,准确评估水-食物系统可能面临的风险源,对于京津冀地区可持续发展具有重要意义。

## 1 京津冀水-食物系统风险评估指标体系

随着居民收入水平的不断提高,京津冀地区已经度过了粮食匮乏的贫困期和以满足温饱为目的的温饱期,正在由植物性食物消费向动物性食物消费调整,并逐步向营养健康阶段过渡<sup>[22]</sup>。在这种食物消费需求变化的环境下,更应关注“大食物安全”<sup>[23]</sup>。面对京津冀地区严重缺水和大规模食物生产并存的情况,量化评估水-食物系统风险成为保障区域水资源系统和食物系统协同安全的重要基础。本文全面考虑粮食、肉类、蛋类、奶类等全口径类食物,选取小麦、玉米、稻谷、豆类、薯类、蔬菜、油料、干鲜果、饲料、猪肉、牛肉、羊肉、禽蛋、奶类、水产品等15种区域典型食物类型作为研究对象,在综合考虑水-食物系统属性、风险过程的基础上,基于致险因素、承险因素及损害性风险,构建水-食物系统风险的评估指标体系。

### 1.1 评估指标的选取

水-食物系统风险的构成可归结为外界输入的致险因素,以及系统内部对此做出响应的承险因素两类。致险因素包括输入要素的短缺性、系统内部的波动性以及系统输出时的脆弱性;承险因素是指系统本身在面对致险因素作用时做出的反馈和调节能力,从而降低风险产生的危害程度,包括系统本身的资源禀赋、对输入要素的适应程度以及可能做出的应急响应<sup>[24-26]</sup>。当承险因素不足以抵抗致险因素的压力时,即产生风险,水-食物系统风险产生过程如图1所示。水-食物系统是相互联系、紧密耦合的复杂系统,水资源系统对食物的生产、贸易、消费等环节都会产生影响,而食物生产则是最大的用水环节,占全国用水量的60%以上。此外,社会制度、气候变化、人口增长、经济水平、生态保护等多种外部要素也会通过激励或约束作用改变水资源的配置格局、食物生产模式及需求规模,从而与水-食物系

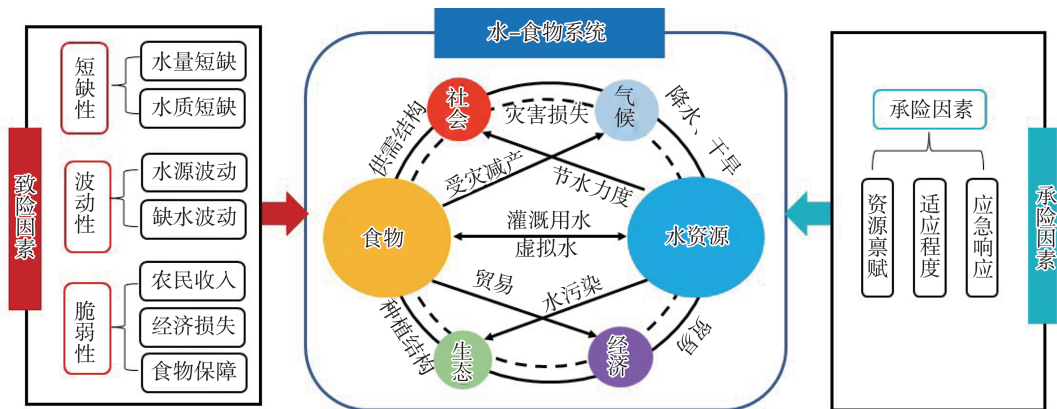


图1 水-食物系统风险产生过程

Fig. 1 Water-food system risk generation process

统构成复杂的纽带网络。总体来看,水-食物系统风险传递过程与致险因素和承险因素的相互作用密切相关。在致险性方面,水-食物系统的短缺性包含水资源对农业生产的供给不足,以及食物生产对水资源造成的污染两方面,即水量短缺性和水质短缺性;波动性指农业用水、耗水和缺水的多年不平衡程度对系统造成的损害,可用水源波动性和缺水波动性表征;脆弱性表示系统风险输出后对社会、经济、生态等产生的潜在损害程度,主要体现在农民收入、食物保障和经济损失等方面。在承险性方面,水-食物系统本身具有一定的抵御风险能力,包括自身水资源禀赋条件、在长期的农业生产活动中形成的高效灌溉手段和节水措施等,以及面对突发缺水事件时相关部门的应急能力。

基于以上水-食物系统风险产生过程,构建出京津冀水-食物系统风险评估指标体系如图 2 所示。各指标计算方法如下: $D_1$ 为蓝水消费水足迹超过蓝水生产水足迹年数占比; $D_2$ 为地下水灌溉量超过地下水资源量年数占比; $D_3$ 为农业废水水中 COD 排放超标率; $D_4$ 为灰水生产水足迹最值之比; $D_5$ 为降水量最值之比; $D_6$ 为单位面积灌溉耗水量最值之比; $D_7$ 为消费与生产水足迹差值最值之比; $D_8$ 为农作物受灾损失占农民收入比例; $D_9$ 为农作物受灾减产占总产量比例; $D_{10}$ 为食物自给率低于 95% 年数占比; $D_{11}$ 为农业受灾损失占农业产值比例; $D_{12}$ 为水资源开发利用倒数; $D_{13}$ 为节水灌溉面积占耕地面积

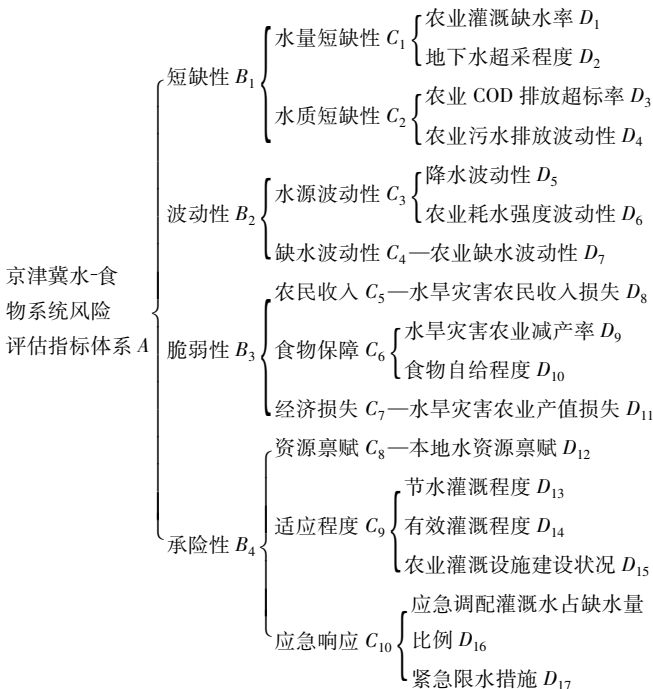


图 2 京津冀地区水-食物系统风险评估指标体系  
Fig. 2 Risk assessment index system for water-food system in Beijing-Tianjin-Hebei region

比例; $D_{14}$ 为有效灌溉面积占耕地面积比例; $D_{15}$ 为灌溉水利用系数; $D_{16}$ 、 $D_{17}$ 通过专家意见及部分调查问卷得到。本文通过微信、邮件、短信等方式发放了 122 份调查问卷,收回有效问卷 98 份,结果显示,对于京津冀地区应急调配水量的设施、预警、管理与能力建设状况,83 位专家认为通过多年的水资源保障设施的建设,京津冀应急调配灌溉水占缺水比例这一指标处于优秀水平,故赋值 0.9;76 位专家认为在缺水状况下京津冀紧急限水措施处于能够容忍的阈值,故赋值 0.3。需要说明的是,为了对水-食物风险评估指标进行准确量化,本文在部分指标计算过程中引入生产水足迹和消费水足迹概念。考虑到水足迹计算方法近年来被广泛使用,并且同一地区的相关参数取值基本相近,因此不再赘述,具体可参考文献[27-33]。

### 1.2 评估模型的构建

采用 Tobin 等<sup>[34]</sup>提出的利用风险概率与系统脆弱性的乘积来度量风险的思路,构建京津冀水-食物系统综合风险评估模型:

$$D = PC \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad P = I_{RB} - I_{RS} \quad I_{RB} = \sum_{i=1}^{11} w_{Ri} R_i$$

$$I_{RS} = \sum_{i=12}^{17} w_{Ri} R_i \quad C = \sum_{j=8}^{11} w_{Sj} R_j$$

式中: $D$ 为系统综合风险损害参数; $P$ 为风险概率; $C$ 为系统脆弱性; $I_{RB}$ 为致险率; $I_{RS}$ 为承险率; $w_{Ri}$ 为因子  $i$  的权重; $R_i$ 为风险因子  $i$  的指标值。在这里,脆弱性作为致险性中所包含的一个风险属性层,与其他属性层的权重统一计算。 $w_{Sj}$ 为脆弱性指标  $j$  的独立权重,需独立计算; $R_j$ 为脆弱性指标  $j$  的值。

为了便于量化分析,利用系统综合风险损害参数用来计算风险指数  $F$ <sup>[5]</sup>:

$$F = \begin{cases} \sqrt{D} & D > 0 \\ 0 & D < 0 \end{cases} \quad (2)$$

美国军用标准 MIL-STD-882<sup>[35]</sup>是当前国内外普遍采用的一种定量分析某一复杂系统安全性的分类标准体系,具有计算简单、层次性强的优点,近年来被广泛应用于多要素系统风险评估研究<sup>[5,36]</sup>。本文采用此方法对京津冀水-食物系统风险进行分类,并根据风险定义及风险属性,将水-食物系统风险划分为 5 级(表 1)。

### 1.3 指标权重的计算

为使指标权重计算结果更加客观,采用层次分析法和熵权法相结合的 AHP-熵权法计算各评估指标权重,具体计算方法参考文献[37-39]。指标权重计算结果如表 2、3 所示。

表1 京津冀水-食物系统风险等级

Table 1 Risk levels of Beijing-Tianjin-Hebei water-food system

风险等级	风险指数/%	风险类别	风险描述
I	0~15	可接受风险	风险产生概率极低或破坏性极弱
II	>15~30	约束性风险	风险可能发生或造成轻微破坏
III	>30~45	损害性风险	风险会发生并造成明显破坏
IV	>45~70	严重破坏性	风险极易发生并造成极大破坏
V	>70~100	毁灭性风险	风险频繁发生且造成不易恢复的破坏

表2 水-食物系统风险评估指标权重

Table 2 Weight of water-food system risk assessment index

地区	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	D <sub>6</sub>
北京	0.096 1	0.141 7	0.107 3	0.063 0	0.074 4	0.108 8
天津	0.092 6	0.107 6	0.138 4	0.033 1	0.052 8	0.100 5
河北	0.101 8	0.121 0	0.074 3	0.049 4	0.066 8	0.119 8
地区	D <sub>7</sub>	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>11</sub>	D <sub>12</sub>
北京	0.061 3	0.049 3	0.058 9	0.055 6	0.059 8	0.034 9
天津	0.054 1	0.080 7	0.051 2	0.079 1	0.072 4	0.026 3
河北	0.062 7	0.080 6	0.074 1	0.040 2	0.053 8	0.046 2
地区	D <sub>13</sub>	D <sub>14</sub>	D <sub>15</sub>	D <sub>16</sub>	D <sub>17</sub>	
北京	0.027 7	0.030 7	0.029 7	0.000 6	0.000 1	
天津	0.016 4	0.037 5	0.025 2	0.014 7	0.017 3	
河北	0.034 7	0.034 9	0.039 0	0.000 6	0.000 1	

表3 脆弱性风险评估指标权重

Table 3 Weight of vulnerability risk assessment index

地区	D <sub>8</sub>	D <sub>9</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>11</sub>
北京	0.083 9	0.336 6	0.455 9	0.123 6
天津	0.099 6	0.315 2	0.465 5	0.119 8
河北	0.134 2	0.305 7	0.421 9	0.138 1

1.3 数据来源及处理

本文评估指标计算中所需的气象数据来自中国气象数据网公布的中国地面气候资料日值数据集 (<http://data.Cma.cn>);食物产量、人均消费量等数据来自国家统计局 (<http://data.stats.gov.cn>) 及京

津冀各地区统计年鉴;灌溉耗水量、本地水资源量等数据来源于各省(市)水资源公报;农产品受灾面积、受灾损失等数据来自《中国水旱灾害公报》;农民收入、有效灌溉面积及 COD 排放量等数据取自《中国统计年鉴》、京津冀各市的统计年鉴及搜集数据。研究期为2000—2020年,为了探究风险变化规律,将研究期分为3个子时段:时期1为2000—2006年,时期2为2007—2013年,时期3为2014—2020年。

2 结果与分析

2.1 京津冀水-食物系统风险变化

2.1.1 时间变化

根据构建的系统风险指标及权重计算结果,得到京津冀地区2000—2020年不同时期水-食物系统的致险率、承险率及风险等级如表4所示。由表4可见,2000—2020年京津冀各地区水-食物系统风险等级整体为Ⅲ级风险。分时段看,近年来京津冀水-食物系统风险有所减缓,处于Ⅳ级风险的地区2000—2006年的4个,减少到2007—2013年的2个,并进一步减少到2014年以来的0个。致险率方面,虽然整体上各地区均表现为降低趋势,但邯郸和邢台两市致险率有所增大。承险率方面,除北京市承险率减弱外,其余各地承险率均有所提高,其中邢台和沧州两市表现为先减小后增大的趋势,天津、保定和张家口3市表现为先增大后减小的趋势。

2.1.2 空间变化

图3为京津冀地区不同时期水-食物系统风险指数空间分布,可见2000—2020年京津冀地区水-食物系统风险等级最高的3个地区分别为邯郸、保定和衡水;风险等级最低的3个地区分别为承德、北

表4 京津冀地区不同时期各风险要素计算值

Table 4 Calculated values of risk factors in different periods in Beijing-Tianjin-Hebei region

地区	2000—2006年			2007—2013年			2014—2020年			2000—2020年		
	致险率	承险率	风险等级	致险率	承险率	风险等级	致险率	承险率	风险等级	致险率	承险率	风险等级
北京	0.467	0.104	Ⅲ	0.413	0.107	Ⅲ	0.381	0.091	Ⅲ	0.348	0.099	Ⅲ
天津	0.478	0.072	Ⅳ	0.389	0.082	Ⅲ	0.375	0.077	Ⅲ	0.361	0.076	Ⅲ
石家庄	0.532	0.076	Ⅳ	0.535	0.083	Ⅳ	0.444	0.088	Ⅲ	0.404	0.092	Ⅲ
唐山	0.512	0.076	Ⅲ	0.525	0.088	Ⅲ	0.404	0.092	Ⅲ	0.398	0.090	Ⅲ
秦皇岛	0.487	0.075	Ⅲ	0.499	0.092	Ⅲ	0.422	0.092	Ⅲ	0.384	0.091	Ⅲ
邯郸	0.556	0.067	Ⅳ	0.504	0.083	Ⅲ	0.510	0.090	Ⅲ	0.446	0.082	Ⅲ
邢台	0.474	0.090	Ⅲ	0.432	0.076	Ⅲ	0.433	0.087	Ⅲ	0.377	0.089	Ⅲ
保定	0.515	0.081	Ⅲ	0.508	0.090	Ⅲ	0.440	0.084	Ⅲ	0.414	0.083	Ⅲ
张家口	0.496	0.062	Ⅳ	0.499	0.083	Ⅳ	0.379	0.080	Ⅲ	0.355	0.082	Ⅲ
承德	0.443	0.072	Ⅲ	0.456	0.076	Ⅲ	0.366	0.078	Ⅲ	0.331	0.086	Ⅲ
沧州	0.512	0.077	Ⅲ	0.503	0.068	Ⅲ	0.438	0.091	Ⅲ	0.397	0.080	Ⅲ
廊坊	0.500	0.075	Ⅲ	0.495	0.075	Ⅲ	0.405	0.094	Ⅲ	0.383	0.089	Ⅲ
衡水	0.517	0.073	Ⅲ	0.515	0.081	Ⅲ	0.426	0.081	Ⅲ	0.405	0.083	Ⅲ

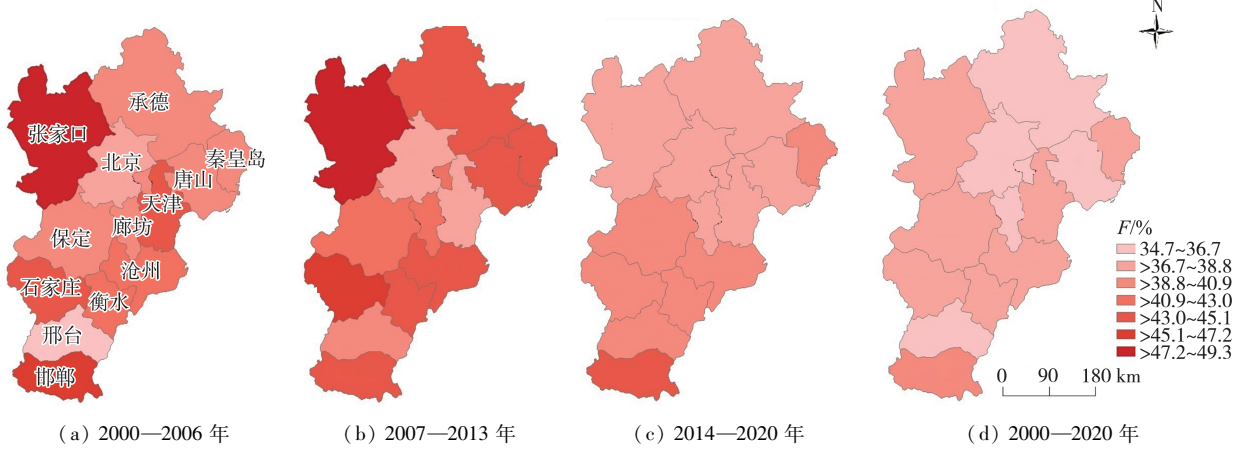


图3 京津冀地区不同时期水-食物系统风险指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of water-food system risk index in different periods in Beijing-Tianjin-Hebei region

京和天津。2000—2006年处于Ⅳ级风险的地区包括张家口、邯郸、石家庄和天津。2007—2013年，邯郸和天津由Ⅳ级风险降低为Ⅲ级风险，石家庄、唐山、张家口、承德和沧州的风险等级虽然没有提高，但风险指数则有所增大。2014—2020年，京津冀13个地区的风险指数均较前两个时期有所减小，此阶段风险指数最高地区的为邯郸。

## 2.2 京津冀水-食物系统风险归因

图4为2000—2020年京津冀水-食物系统指标风险贡献率。可以看出，在致险因素方面，2000—2020年京津冀地区致险率最高的指标为农业灌溉缺水率( $D_1$ )，该因素在河北、北京和天津的贡献率分别为10.18%、9.61%和9.26%。其他主要致险因素包括地下水超采灌溉程度( $D_2$ )、农业耗水强度波动性( $D_6$ )和农业缺水量波动性( $D_7$ )。在承险因素方面，北京起主要承险作用的指标为节水灌溉程度( $D_{13}$ )，承险率2.93%；天津为有效灌溉程度( $D_{14}$ )，承险率3.15%；邯郸、保定和衡水的主要承险指标为农业灌溉设施建设状况( $D_{15}$ )，其余各市

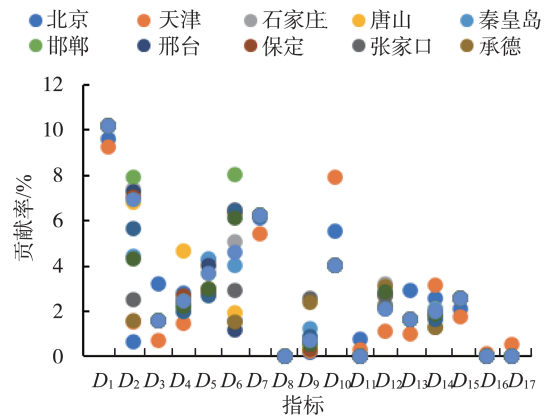


图4 2000—2020年京津冀水-食物系统指标风险贡献率  
Fig. 4 Risk contribution rate of water-food system factors in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2000 to 2020

则是本地水资源禀赋( $D_{12}$ )。

表5为京津冀地区不同时期各指标风险贡献率变化情况，可见，2000—2020年京津冀地区农业灌溉设施建设状况( $D_{15}$ )指标持续增大，说明近年来京津冀地区农田水利建设不断完善，成为重要的承

表5 京津冀地区不同时期各指标风险贡献率变化情况

Table 5 Change of risk contribution rates of factors in different periods in Beijing-Tianjin-Hebei region

地区	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$D_5$	$D_6$	$D_7$	$D_8$	$D_9$	$D_{10}$	$D_{11}$	$D_{12}$	$D_{13}$	$D_{14}$	$D_{15}$	$D_{16}$	$D_{17}$
北京	—	↓	↓	↑	↓	↓	—	↓	↓	—	↓	↑	↓	↓	↑	—	—
天津	—	↓	↑	—	↓	↑	—	↓	↓	—	↓	↑	↓	↓	↑	—	—
石家庄	—	↓	↓	↑	↑	↓	—	—	↓	—	↓	↑	↑	↑	↑	—	—
唐山	—	↓	↓	↑	↑	↓	—	—	↑	—	—	↑	↑	↓	↑	—	—
秦皇岛	—	↓	↓	↑	↑	↓	—	—	↑	—	↑	↑	↑	↑	↑	—	—
邯郸	—	↓	↓	↑	↑	↑	—	—	↓	—	—	↑	↑	↑	↑	—	—
邢台	—	↓	↓	↑	↑	↑	—	↓	↑	—	—	↓	↑	↑	↑	—	—
保定	—	↓	↓	↑	—	↓	—	—	↑	—	—	↓	↑	↑	↑	—	—
张家口	—	↓	↓	↑	↓	↓	—	—	↓	—	—	↑	↑	—	↑	—	—
承德	—	↓	↓	↑	↑	↓	—	—	↓	—	—	↑	↑	↓	↑	—	—
沧州	—	↓	↓	↑	↓	↓	—	↓	↑	—	—	↑	↑	↓	↑	—	—
廊坊	—	↓	↓	↑	↓	↓	—	—	↑	—	—	↑	↑	↑	↑	—	—
衡水	—	↓	↓	↑	↓	↓	—	↓	↓	—	—	↑	↑	↑	↑	—	—

注：↑表示增大；—表示不变；↓表示减小。

险因素。持续减小的指标为地下水超采灌溉程度( $D_2$ ),表明近年来京津冀地区地下水超采情况不断好转,水生态环境在不断改善。基本保持不变的指标主要有农业灌溉缺水率( $D_1$ )、农业缺水波动性( $D_7$ )、食物自给率( $D_{10}$ )、应急调配灌溉水占缺水比例( $D_{16}$ )和紧急限水措施( $D_{17}$ ),表明京津冀地区农业缺水问题仍十分严重,近年来未出现明显好转。具体来看,邯郸和邢台致险率增大主要是由于农业耗水强度波动性( $D_6$ )致险贡献率的增加。北京承险率减小是由于适应程度不断下降,主要表现为节水灌溉程度( $D_{13}$ )和有效灌溉程度( $D_{14}$ )承险率均逐渐减小。

综合来看,农业缺水是京津冀水-食物系统风险的主要来源,其中灌溉供水短缺和农业生产加工造成水污染等是破坏区域水-食物系统稳定性的首要风险因子;承险因素中的适应程度在系统中起到了重要的风险抵御作用,应急调配水与紧急限水对于农业常态化灌溉用水短缺贡献并不明显。

### 2.3 京津冀水-食物系统风险评估及建议

研究表明,京津冀水-食物系统风险主要来源于系统的短缺性,其中起主导作用的因素是农业灌溉用水短缺和农业地下水超采;抵御风险的主要因素为农业灌溉设施和节水灌溉程度。胡振通等<sup>[40-42]</sup>的研究表明,灌溉既是京津冀地区农业稳产高产的主要支撑条件,也是导致京津冀平原区地下水持续超采的主要原因。京津冀地区承担着全国12%的小麦和8%的玉米生产任务,自然降水无法满足小麦-玉米一年两熟模式的水分需求,年均水分亏缺达到250 mm以上。为了解决农业缺水问题,京津冀地区长期超采地下水进行农业灌溉,20世纪70年代以来,京津冀平原区开凿了近100万眼灌溉机井,农业用水量占平原区地下水开采量70%以上,超出了区域地下水可开采规模<sup>[43]</sup>。据水利部统计,1990年以来华北地区地下水超采累计亏空1800亿 $m^3$ 左右,超采的面积达到18万 $km^2$ <sup>[44]</sup>,导致京津冀地区成为仅次于印度北部的全球第二大地下水漏斗区,造成地面沉降、河道断流等严重问题。近年来,京津冀地区对于农业用水风险问题高度重视,各类节水灌溉技术与田间减蒸降耗措施促进了京津冀平原区作物水分利用效率的持续提高<sup>[45]</sup>,2020年北京、天津、河北的灌溉水有效利用系数分别较2011年提高了7.6%、8.6%和4.0%,有效缓解了京津冀地区农业用水短缺的问题,提高了水-食物系统的承险能力。

为了应对水-食物系统风险,近年来京津冀地区采取了大量措施。在降低致险率方面,2007年北京和河北部分地市联合实施“稻改旱”项目,通过水稻

改种玉米等方式减少灌溉用水量和农业面源污染。2014年北京出台了《调结构,转方式,发展高效节水农业的意见》,开始压缩小麦种植面积和肉禽生产总量。同年,天津进一步修订了《天津市地下水取水控沉预审管理规定》,加强了地下水开采限值约束。针对京津冀地区农业地下水超采问题,2014年起,财政部、水利部、农业农村部等有关部门组织河北省开展了地下水超采综合治理试点。通过实施体制机制改革、工程节水、农艺节水、调整结构节水、水源置换、严格地下水管理等多种治理措施,有效压减地下水开采量。在提高承险性方面,2007年北京发布了《北京市农业节水灌溉初步设计报告编制大纲》,推广利用高新技术提升农业节水水平,自此建设了多处高标准精准灌溉示范区,通过适时适量灌溉有效促进农业增产。同年,河北水利厅颁布《关于加强节水农业工作的指导意见》,对节水农业灌溉在管理运行机制、技术推广、工程建设、投入渠道等方面存在的问题进行改进,为提升节水农业的发展做出了制度安排。自2014年以来,河北依托高标准农田建设和旱作节水农业项目,大力推广高效节水灌溉技术,有效提高了水分利用率;天津则大力推进农业末级渠系节水改造,提升节水灌溉及相关配套设施,农田灌溉水有效利用系数达到了全国领先水平。

虽然近年来京津冀水-食物系统风险有所降低,但依旧面临着中等风险,现状仍不乐观。根据风险归因分析,未来北京和天津应重视水量短缺和波动问题,立足区域水资源供需格局,提高废污水、雨洪水等非常规水源的利用效率,通过推动区域内污水资源化利用提升农业供水保障效率。河北作为京津冀地区水-食物系统风险最大的地区,应有效平衡好水资源短缺与农业生产水安全保障之间的关系。在农业节水方面,继续推广普及节水农业综合配套技术,完善用水计量设施,在微咸水区、渠灌区等不同区域因地制宜分类实施节水灌溉工程;在粮食生产方面,应根据水资源承载能力和国土空间规划,合理确定农业发展布局和规模,研究制定农业用水承载上限。在地下水严重超采区综合协调地下水压采、粮食安全等国家战略目标,严格控制灌溉面积和高耗水作物种植面积。

## 3 结 论

a. 在时间变化方面,2000—2020年京津冀水-食物系统总体处于Ⅲ级风险。分时段来看,京津冀绝大部分地区长期处于为Ⅲ级风险,处于Ⅳ级风险的地区由2000—2006年的4个,减少到2007—2013年的2个,再进一步减少到2014—2020年0个,可

见近年来京津冀地区水-食物系统风险发生概率呈降低趋势。

**b.** 在空间变化方面,2000—2020年京津冀水-食物系统风险等级最高的3个地区分别为邯郸、保定和衡水;风险等级最小的3个地区分别为承德、北京和天津。2000—2006年和2007—2013年时期风险最高的地区主要为张家口,2014—2020年变为邯郸;3个时期中面临风险最小的地区变化依次为邢台、北京、唐山。

**c.** 在风险指标贡献方面,2000—2020年京津冀水-食物系统致险率最高的因素为农业灌溉缺水率,该因素在河北、北京和天津的贡献率分别为10.18%、9.61%和9.26%。其他主要致险因素包括地下水超采灌溉程度、农业耗水强度波动性和农业缺水量波动性。在承险因素方面,北京起主要承险作用的指标为节水灌溉程度;天津为有效灌溉程度;河北的邯郸、保定和衡水的主要承险指标为农业灌溉设施建设状况,其余各市为本地水资源禀赋。

#### 参考文献:

[1] 王慧敏,洪俊,刘钢. “水-能源-粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2019, 29(6): 74-84. (WANG Huimin, HONG Jun, LIU Gang. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food [J]. China Population, Resources and Environment, 2019, 29(6): 74-84. (in Chinese))

[2] 马振超. 总体国家安全观: 开创中国特色国家安全道路的指导思想[J]. 行政论坛, 2018, 25(4): 5-10. (MA Zhenchao. Overall national security outlook: the guiding ideology of creating a national security road with Chinese characteristics [J]. Administrative Forum, 2018, 25(4): 5-10. (in Chinese))

[3] 谷树忠, 成升魁. 中国资源报告: 新时期中国资源安全透视[M]. 北京: 商务印书馆, 2010.

[4] 马永喜, 孙亚丽. “食品-能源-水”纽带关系研究方法评述与展望[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(7): 97-103. (MA Yongxi, SUN Yali. Review and prospect of research methods on food-energy-water link [J]. China Comprehensive Utilization of Resources, 2021, 39(7): 97-103. (in Chinese))

[5] 张士锋, 陈俊旭, 华东, 等. 水资源系统风险构成及其评价: 以北京市为例[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1855-1863. (ZHANG Shifeng, CHEN Junxu, HUA Dong, et al. Research on the assessment of water resource system risk: a case study of Beijing [J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1855-1863. (in Chinese))

[6] ROSENZWEIG C, PARRY M L. Potential impact of

climate change on world food supply [J]. Nature, 1994, 367: 133-138.

[7] 唐国平, 李秀彬, GUENTHER Fischer, 等. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 地理学报, 2000, 55(2): 129-138. (TANG Guoping, LI Xiubin, GUENTHER Fischer, et al. Climate change and its impacts on China's agriculture [J]. Acta Geographica Sinica, 2000, 55(2): 129-138. (in Chinese))

[8] HOFF H. Understanding the Nexus [C]//Background Paper for the Bonn 2011 Conference: The water energy and food security nexus. Stockholm: Stockholm Environment Institute, 2011.

[9] BIGGS E M, BRUCE E, BORUFF B, et al. Sustainable development and the water-energy-food nexus: a perspective on livelihoods [J]. Environmental Science & Policy, 2015, 54(12): 389-397.

[10] 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.

[11] LASPIDOU C S, MELLIOS N, KOFINA S D. Towards ranking the water-energy-food-land use-climate nexus interlinkages for building a nexus conceptual model with a heuristic algorithm [J]. Water, 2019, 11(2): 306.

[12] 董战峰, 张力小, 赵元浩, 等. 生命周期视角下中国餐饮浪费的生态环境效应研究[J/OL]. 生态经济. [2022-08-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.F.20220803.2042.002.html>. (DONG Zhanfeng, ZHANG Lixiao, ZHAO Yuanhao, et al. Study on the eco-environmental effect of food waste in China from the perspective of life cycle [J/OL]. Ecological Economy. [2022-08-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1193.F.20220803.2042.002.html>. (in Chinese))

[13] 纪鸿飞, 李翔鹏, 李方豪, 等. 水足迹视角下哈尔滨市玉米生产用水分析[J]. 农业与技术, 2022, 42(14): 29-33. (JI Hongfei, LI Xiangpeng, LI Fanghao, et al. Analysis of water consumption for maize production in Harbin from the perspective of water footprint [J]. Agriculture and Technology, 2022, 42(14): 29-33. (in Chinese))

[14] 刘徐然, 李小雅, 赵耀, 等. 基于冬小麦水足迹的黄河流域农业结构协同调整[J]. 人民黄河, 2022, 44(增刊1): 30-32. (LIU Xuran, LI Xiaoya, ZHAO Yao, et al. Collaborative adjustment of agricultural structure in the Yellow River Basin based on water footprint of winter wheat [J]. Yellow River, 2022, 44(Sup1): 30-32. (in Chinese))

[15] SANDERS K T, MASRI S F. The energy-water agriculture nexus: the past, present and future of holistic resource management via remote sensing technologies [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 117: 73-88.

[16] SMIDT S J, HACKER M K, KENDALL A D, et al.

- Complex water management in modern agriculture; trends in the water-energy-food nexus over the high plains aquifer [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 566: 988-1001.
- [17] LAL R. Research and development priorities in water security [J]. *Agronomy Journal*, 2015, 107 (4): 1567-1572.
- [18] JARVIE H P, SHARPLEY A N, FLATEN D, et al. The pivotal role of phosphorus in a resilient water-energy-food security nexus [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(4): 1049-1062.
- [19] MILLER R L, RAMASWAMI A, AMERASINGHE P. Wastewater treatment and reuse in urban agriculture: exploring the food, energy, water, and health nexus in Hyderabad, India [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(7): 11.
- [20] MOORE B C, COLEMAN A M, WIGMOSTA M S, et al. A high spatiotemporal assessment of consumptive water use and water scarcity in the conterminous United States [J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(14): 5185-5200.
- [21] HATFIELD D S, SCHANDL H, ADAMS P D, et al. Australia is “free to choose” economic growth and falling environmental pressures [J]. *Nature*, 2015, 527: 49-53.
- [22] 吴刚, 郝兰凤. 加快推进粮食安全信用体系建设 [J]. *江南论坛*, 2006 (1): 43-44. (WU Gang, HAO Lanfeng. Accelerating the construction of food security credit system [J]. *Jiangnan Forum*, 2006(1): 43-44. (in Chinese))
- [23] 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗 [N]. *人民日报*, 2022-10-26(001).
- [24] 张翔, 夏军, 史晓新, 等. 可持续水资源管理的风险分析研究 [J]. *武汉水利电力大学学报*, 2000, 33(1): 80-83. (ZHANG Xiang, XIA Jun, SHI Xiaoxin, et al. Risk analysis of sustainable water resources management [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2000, 33(1): 80-83. (in Chinese))
- [25] 韩宇平. 水资源短缺风险管理理论与实践 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2008.
- [26] 姜秋香, 曹璐, 王子龙, 等. 基于 CVaR-TSP 的黑龙江城市水资源配置及风险管理 [J]. *水利水电科技进展*, 2022, 42(1): 40-46. (JIANG Qiuxiang, CAO Lu, WANG Zilong, et al. Urban water resources allocation and risk management in Heilongjiang Province based on CVaR-TSP [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2022, 42(1): 40-46. (in Chinese))
- [27] 何国华. 我国北方地区水土资源空间优化及其生态效应系统评价 [D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2019.
- [28] 孙才志, 高春阳. 中国与“一带一路”沿线国家能源贸易隐含水足迹分形特征分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(1): 52-61. (SUN Caizhi, GAO Chunyang. Analysis on the fractal characteristics of embodied water footprint of energy trade between China and countries along the Belt and Road [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(1): 52-61. (in Chinese))
- [29] ALLEN R G, PEREIRA L S, RASE D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements-FAO irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: FAO, 1998, 300: 6541.
- [30] 徐晋轩, 杨默远, 潘兴瑶, 等. 基于水足迹的北京市水资源开发利用演变特征分析 [J]. *水资源保护*, 2022, 38(5): 96-104. (XU Jinxuan, YANG Moyuan, PAN Xingyao, et al. Evolution characteristics of water resources development and utilization in Beijing based on water footprint [J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(5): 96-104. (in Chinese))
- [31] 黄会平, 王如厂, 李新生, 等. 农业水足迹生产和消费协调度评价及调控研究 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2021, 42(2): 66-75. (HUANG Huiping, WANG Ruchang, LI Xincheng, et al. Evaluation and regulation of the coordination degree of agricultural water footprint production and consumption [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2021, 42(2): 66-75. (in Chinese))
- [32] 王圣云, 林玉娟. 中国区域农业生态效率空间演化及其驱动因素: 水足迹与灰水足迹视角 [J]. *地理科学*, 2021, 41(2): 290-301. (WANG Shengyun, LIN Yujuan. Spatial evolution and its drivers of regional agro-ecological efficiency in China's from the perspective of water footprint and gray water footprint [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2021, 41(2): 290-301. (in Chinese))
- [33] 孙才志, 阎晓东. 基于 MRIO 的中国省区和产业灰水足迹测算及转移分析 [J]. *地理科学进展*, 2020, 39(2): 207-218. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Estimation and transfer analysis of grey water footprints of provinces and industries in China based on MRIO [J]. *Progress in Geography*, 2020, 39(2): 207-218. (in Chinese))
- [34] TOBIN G A, MONTZ B E. Natural hazards: explanation and integration [M]. New York: The Guilford Press, 1997.
- [35] 张士锋, 陈俊旭, 华东等. 水资源系统风险构成及其评价: 以北京市为例 [J]. *自然资源学报*, 2010, 25(11): 1855-1863. (ZHANG Shifeng, CHEN Junxu, HUA Dong, et al. Research on the assessment of water resource system risk: a case study of Beijing [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(11): 1855-1863. (in Chinese))
- [36] 胡彩虹, 高建菊, 吴泽宁, 等. 黑河中游取水总量控制风险管理研究 [J]. *水资源研究*, 2012, 1(6): 407-412. (HU Caihong, GAO Jianju, WU Zening, et al. Study on risk management of total water intake control in the middle reaches of Heihe River [J]. *Water Resources Research*,



- 2012,1(6):407-412. (in Chinese))
- [37] 龚国辉. 主客观结合的 AHP-GWR 耕地地理空间质量评价方法研究[D]. 沈阳:辽宁工程技术大学,2021.
- [38] 张立新,王翔. 基于 AHP-熵权法下的装配式建筑项目绿色施工评价研究[J]. 佳木斯大学学报,2021,39(6):24-28. (ZHANG Lixin, WANG Xiang. Evaluation of green construction of assembly building based on AHP: entropy weight method[J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2021, 39(6): 24-28. (in Chinese))
- [39] 李芳,李东坪. 基于熵权法的组合评价模型[J]. 信息技术与信息化,2021(9):148-150. (LI Fang, LI Dongping. Portfolio evaluation model based on entropy weight method [J]. Information Technology and Informatization,2021(9):148-150. (in Chinese))
- [40] 胡振通,王亚华. 地下水超采综合治理的农户评价、原因分析与改进建议[J]. 中国人口·资源与环境,2018,28(10):160-168. (HU Zhentong, WANG Yahua. Farmer's evaluation, cause analysis and improvement suggestions for comprehensive treatment of groundwater overextraction [J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(10): 160-168. (in Chinese))
- [41] 胡春胜,张喜英,程一松,等. 太行山前平原地下水动态及超采原因分析[J]. 农业系统科学与综合研究,2002,18(2):89-91. (HU Chunsheng, ZHANG Xiyong, CHENG Yisong, et al. An analysis on dynamics of water table and overdraft of groundwater in the Piedmont of Mt. Taihang [J]. System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture, 2002, 18(2): 89-91. (in Chinese))
- [42] HU Y K, MOIWO J P, YANG Y H, et al. Agricultural water-saving and sustainable groundwater management in Shijiazhuang irrigation district, North China Plain [J]. Journal of Hydrology, 2010, 393(3/4): 219-232.
- [43] 张光辉,费宇红,王金哲. 华北灌溉农业与地下水适应性研究[M]. 北京:科学出版社,2012.
- [44] 齐永青,罗建美,高雅,等. 京津冀地区农业生产与水资源利用:历史与适水转型[J]. 中国生态农业学报(中英文),2022,30(5):713-722. (QI Yongqing, LUO Jianmei, GAO Yan, et al. Agricultural production and water resources utilization in Beijing-Tianjin-Hebei region: history and suitable water transition [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(5): 713-722. (in Chinese))
- [45] LU Y, ZHANG X Y, CHEN S Y, et al. Changes in water use efficiency and water footprint in grain production over the past 35 years: a case study in the North China Plain [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 116: 71-79.

(收稿日期:2022-10-13 编辑:王芳)

(上接第 38 页)

- [20] 门宝辉,蒋美彤. 基于生态足迹法的水资源承载力研究:以北京市为例[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):29-36. (MEN baohui, JIANG Meitong. Research on water resources carrying capacity based on ecological footprint: a case study of Beijing [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 29-36. (in Chinese))
- [21] 孙才志,陈栓,赵良仕. 基于 ESDA 的中国省际水足迹强度的空间关联格局分析[J]. 自然资源学报,2013,28(4):571-582. (SUN Caizhi, CHEN Shuan, ZHAO Liangshi. Spatial correlation pattern analysis of water footprint intensity based on ESDA model at provincial scale in China [J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(4): 571-582. (in Chinese))
- [22] HU Minghao, YUAN Juhong, CHEN La. Water ecological footprint size, depth and its spatial pattern correlation in the "Four-city Area in Middle China" [J]. Ecological Indicators, 2021, 133: 108387.
- [23] LI Donglin, ZUO Qiting, ZHANG Zhizhou. A new assessment method of sustainable water resources utilization considering fairness-efficiency-security: a case study of 31 provinces and cities in China [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 81: 103839.
- [24] LI Donglin, ZUO Qiting, JIANG Long, et al. An integrated analysis framework for water resources sustainability considering fairness and decoupling based on the water resources ecological footprint model: a case study of Xinjiang, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 383: 135466.
- [25] 王慧亮,李卓成. 基于能值水生态足迹模型的黄河流域水资源利用评价[J]. 水资源保护,2022,38(1):147-152. (WANG Huiliang, LI Zhuocheng. Evaluation of water resources utilization in the Yellow River Basin based on energy water ecological footprint model [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 147-152. (in Chinese))
- [26] 张岳. 中国水资源与可持续发展[M]. 南宁:广西科学技术出版社,2000.
- [27] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [28] SAK H, SENIOR A, RAO K, et al. Speech recognition with deep recurrent neural networks [C] // 2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. New York: IEEE, 2013: 6645-6649.
- [29] XU Kui, BIN Lingling, XU Xinyi. Assessment of water resources sustainability in Mainland China in terms of water intensity and efficiency [J]. Environmental Management, 2019, 63(3): 309-321.

(收稿日期:2023-02-02 编辑:王芳)