

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.012

京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征评价

王富强^{1,2}, 应卓晖¹, 吕素冰^{1,2}, 赵衡^{1,2}

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 河南 郑州 450046;

2. 河南省黄河流域水资源节约集约利用重点实验室, 河南 郑州 450046)

摘要:运用耦合协调度模型评价了2006—2019年京津冀地区水资源-经济社会-生态环境的耦合协调发展状态,并利用灰色关联法分析了影响京津冀地区耦合协调发展的主要因素。结果表明:2006—2019年京津冀地区水资源-经济社会-生态环境耦合协调发展水平总体呈上升趋势;京津冀地区和北京水资源系统持续滞后,天津水资源和生态环境系统交互滞后,河北处于经济社会系统滞后的状态;北京始终处于耦合协调发展最好水平,天津其次,河北耦合协调发展缓慢;水资源总量和地下水储变量是影响京津冀地区耦合协调度最重要的因素,人口变化情况次之。

关键词:京津冀地区;水-经济-生态系统;耦合协调发展;水资源;生态环境

中图分类号:TV213.9

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2022)05-0080-07

Evaluation of coupling coordinated development characteristics of water-economy-ecology system in Beijing-Tianjin-Hebei region // WANG Fuqiang^{1,2}, YING Zhuohui¹, LYU Subing^{1,2}, ZHAO Heng^{1,2} (1. College of Water Resources, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. Key Laboratory of Conservation and Intensive Utilization of Water Resources in the Yellow River Basin of Henan Province, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The coupling coordination degree model was used to evaluate and analyze water resources-economic society-eco-environment coupling coordinated development state in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2019, and the grey correlation analysis method was used to identify the relevant factors that affecting the coupling coordination degree. The results indicate that the water resources-economic society-eco-environment coupling coordination degree in Beijing-Tianjin-Hebei region was on the rise from 2006 to 2019; the water resources system in Beijing-Tianjin-Hebei region and Beijing continued to lag behind, the water resources and eco-environment systems in Tianjin lagged behind alternatively, and the economic society system in Hebei was in the backward state; Beijing was always at the highest level of coupling coordinated development, followed by Tianjin, and Hebei was relatively slow in coupling coordinated development; the gross amount of water resources and the groundwater storage variation were the most important factors affecting the coupling coordination degree in Beijing-Tianjin-Hebei region, followed by the change of population.

Key words: Beijing-Tianjin-Hebei region; water-economy-ecology system; coupling coordinated development; water resources; eco-environment

水资源系统是区域内由水循环连结的各种水利工程和非工程措施构成的统一整体,经济社会系统是以人类为主体,产生工业贸易、旅游休闲等社会活动的复杂系统,生态环境系统则是生物与环境构成动态平衡的有机单位^[1]。水资源、经济社会和生态环境之间时刻进行着物质、信息和能量的输入、输出和交换。随着区域发展失衡与空间开发无序问题日

趋突出,水资源、经济社会和生态环境之间供需矛盾加剧,制约区域可持续发展^[2]。2017年党的十九大报告提出实施区域协调发展战略^[3];2019年习近平总书记在京津冀地区考察,强调应正确认识当前区域经济发展新形势,在发展中促进相对平衡;2020年党的十九届五中全会为新时期我国区域协调发展指明了方向。京津冀地区作为我国区域协调发展核

基金项目:国家自然科学基金(51879106);中原科技创新领军人才计划(214200510001);河南省高校科技创新团队支持计划(20IRTSTHN010);郑州市软科学研究计划重点(重大)项目(2020RKXF0090)

作者简介:王富强(1979—),男,教授,博士,主要从事水循环模拟与调控、生态水文学研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

心,水资源、经济社会和生态环境互相制约是区域可持续发展面临的重大问题^[4],揭示其水资源-经济社会-生态环境(下文简称为水-经济-生态)耦合协调发展的特征规律,对促进该地区经济社会高质量发展具有重要意义。

水-经济-生态系统的研究最早聚焦于经济社会和生态环境。二战结束后,具有重大影响的“八大公害”事件迫使人们开始反思推动经济发展对环境产生的影响^[5];Holling^[6]认为生态和经济的发展是复杂多变的,有必要厘清内在发展规律并构建高质量的经济-生态系统;Mehta 等^[7-8]主张站在人类和谐发展的角度解决经济与生态的危机。随着研究的深入,部分学者尝试加入第三方系统分析水-经济-生态的复合关系。Yan 等^[9-10]通过对水-经济-生态系统匹配度及内在机制的探讨,验证协调发展的必要性。而耦合协调度模型普遍用于研究系统间互馈关系,通过定量描述系统间要素相互配合或正向作用的耦合程度,反映各系统发展水平的相对高低,进而识别区域发展中存在的问题^[11]。刘耀彬等^[12]尝试基于协同学思想构建耦合度模型,对经济与生态的交互作用进行定性分析;王会芝等^[13-15]基于现有耦合协调度模型对区域经济社会和生态环境的耦合协调发展进行定量评价;Choi 等^[16-17]对现有模型进行改进,结合河流耗竭潜力指数,基于遗传算法的投影寻踪模型,探究区域系统间的动态演化机制。

国内外学者关于水-经济-生态耦合协调的研究成果逐渐丰富,但甚少在充分考虑水资源、经济社会和生态环境多方面指标的基础上,对三者内在耦合协调状况进行长序列的深入探析。基于此,本文以京津冀地区为研究对象,在合理架构水资源、经济社会和生态环境互馈关系的基础上,构建水-经济-生态耦合协调发展评价指标体系,运用耦合协调度模型对京津冀地区水-经济-生态的耦合协调发展特征进行分析,并利用灰色关联法对主要影响因素进行识别,旨在为京津冀地区制定相关政策提供参考依据。

1 水-经济-生态耦合协调评价模型构建

1.1 评价指标体系

水-经济-生态是覆盖多种指标的复合系统,科学全面地构建评价指标体系是水-经济-生态耦合协调评价的关键。本文依据科学性、系统性、指标的可获得性以及区域性原则,在考虑水资源、经济社会和生态环境三者内部机理的基础上,结合京津冀地区实际情况,构建水-经济-生态耦合协调评价指标体系,初步选取 69 个评价指标,通过下述步骤进行评价指标筛选:

a. 指标数据标准化。为便于不同属性指标之间的分析,将各指标数据标准化为[0,1]之间的数值,消除量纲不同的影响。

b. 灰色关联分析。结合研究区域实际情况,选取人均生活用水量、人均 GDP 和城市绿化覆盖率作为参考序列,其余各指标序列为比较序列,运用灰色关联分析法在各系统中选取与参考序列关联度最高的 9 个指标。

c. 主成分分析。由于灰色关联分析结果与参考序列的选定有直接关系,主观性较强,因此采用主成分分析和聚类分析,在指标互不重复的基础上,选取涵盖最多原始信息的指标。

通过分析,确定京津冀地区水-经济-生态耦合协调评价指标体系,共包含 24 项指标,详见图 1。

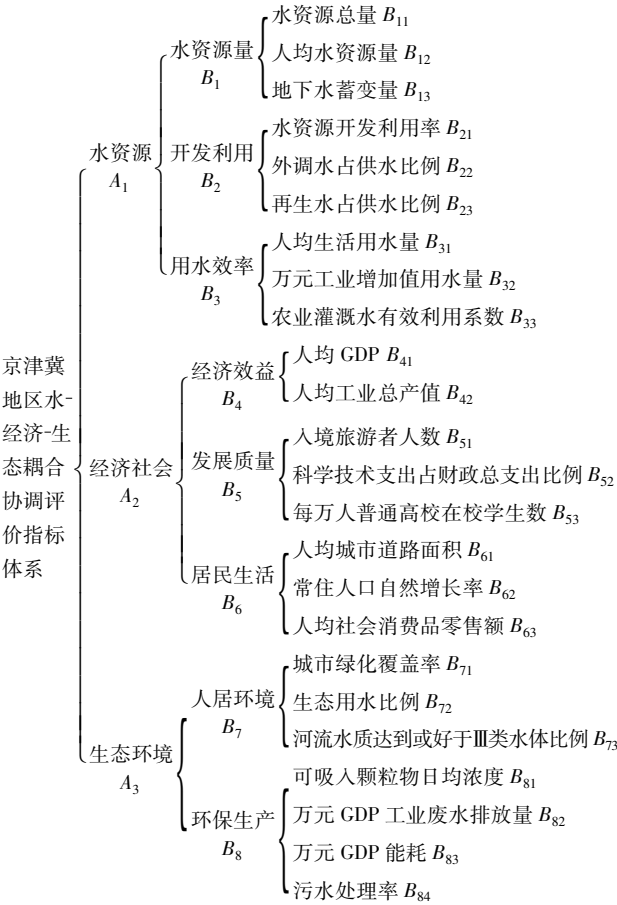


图 1 京津冀地区水-经济-生态耦合协调评价指标体系

Fig.1 Water-economy-ecology coupling coordination evaluation index system of Beijing-Tianjin-Hebei region

1.2 评价模型

水资源、经济社会和生态环境系统间相互作用一般由耦合协调度模型进行评价,耦合协调度 D 表示相互作用中良性耦合程度的大小^[18-19]。耦合协调度模型由综合发展指数 T 和耦合度 C 构成,能够综合评价区域水资源、经济社会和生态环境系统间的协调发展程度,而综合评价指数 Y 是测算耦合协

调度的基础。本文首先运用一般公式和改进的突变模型计算京、津、冀 3 地水资源、经济社会和生态环境系统的综合评价指数,进而测算综合发展指数和耦合度,最终得到区域耦合协调度,并进行演变特征分析。

1.2.1 综合评价指数

综合评价指数常用一般公式^[20]进行计算:

$$\begin{cases} Y_{1j} = \sum_{i=1}^{n_1} w_{1i} x_{1ij} \\ Y_{2j} = \sum_{i=1}^{n_2} w_{2i} x_{2ij} \\ Y_{3j} = \sum_{i=1}^{n_3} w_{3i} x_{3ij} \end{cases} \quad (1)$$

式中: Y_{1j} 、 Y_{2j} 、 Y_{3j} 分别为水资源、经济社会和生态环境系统第 j 年的综合评价指数; w_{1i} 、 w_{2i} 、 w_{3i} 分别为水资源、经济社会和生态环境系统中指标 i 权重; n_1 、 n_2 、 n_3 分别为水资源、经济社会和生态环境系统中指标个数; x_{1ij} 、 x_{2ij} 、 x_{3ij} 分别为水资源、经济社会和生态环境系统指标 i 第 j 年标准化数值。

为使评价结果更真实可靠,引入 Rene-Thom 提出的突变理论组合计算,该理论基于指标的无量纲化处理,按指标间内在逻辑关系进行重要程度排序,通过底层指标的突变模糊隶属度值逐级计算中间层和顶层,以避免指标权重的影响^[21]。突变模型的类型由控制变量决定,当控制变量个数不超过 4 时,可以归纳出 4 种常见的突变模型,即折叠突变、尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变^[22]。本文构建的京津冀地区水-经济-生态评价指标体系各指标层中分别存在 2~4 个指标(控制变量),因此在综合评价指数计算中分别选用尖点突变、燕尾突变和蝴蝶突变进行突变处理。

由于突变评价法归一化公式容易造成最终结果普遍过高且差距较小,因此运用施玉群等^[23]提出的方法进行修正。结合一般公式和改进的突变模型计算结果,得到水资源、经济社会和生态环境各系统的综合评价指数,以分析京津冀地区各系统的发展状态。

1.2.2 耦合协调度模型

耦合协调度模型计算公式^[24]为

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

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

$$D_j = \sqrt{C_j T_j} \quad (4)$$

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 $\alpha + \beta + \gamma = 1$,由于水资源、经济社会和生态环境系统之间

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^[25-26],结合实际情况对耦合协调度等级进行划分(表 1)。在 Y_{1j} 、 Y_{2j} 、 Y_{3j} 中, Y_{1j} 最小时为水资源滞后型, Y_{2j} 最小时为经济社会滞后型, Y_{3j} 最小时为生态环境滞后型。当某系统滞后时,说明该系统与该地区整体发展不协调。

表 1 耦合协调度等级

Table 1 Classification of coupling coordination degree

D	耦合协调类型
$[0, 0.4)$	失调衰退
$[0.4, 0.6)$	勉强耦合协调
$[0.6, 0.8)$	中级耦合协调
$[0.8, 1.0]$	良好耦合协调

1.2.3 灰色关联分析法

灰色关联分析法通过确定参考数列和若干比较数列集合形状的相似程度判断二者的联系是否紧密,反映曲线间的关联程度^[27]。为辨识对耦合协调度影响最大的因素,运用灰色关联分析法分别对京津冀地区及各地区的耦合协调度和所选指标进行关联度计算,以耦合协调度结果作为参考序列,所选指标作为比较序列,利用 MATLAB 进行分析,选取关联度高于均值的指标作为主要影响因子。

1.3 数据来源

本文数据来自京津冀地区 2007—2020 年各地统计年鉴、京津冀地区 2006—2019 年各地水资源公报、《河北省环境状况公报(2006—2019 年)》、各地政府工作报告以及各地国民经济与社会发展统计公报等,少数未统计数据利用插值法补齐。

2 京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展特征及归因分析

利用熵权法确定各系统指标权重,并利用式(1)~(4)测算京津冀地区水资源、经济社会和生态环境系统的综合评价指数、综合发展指数和耦合协调度,基于计算结果分析京津冀地区的耦合协调度,并对主要影响因素进行识别。

2.1 演变特征分析

京津冀地区及各地区水资源、经济社会和生态环境系统综合评价指数和水-经济-生态耦合协调度变化趋势如图 2 和图 3 所示。

a. 京津冀地区 2006 年水-经济-生态耦合协调度最低,为 0.496,属于勉强耦合协调型;2018 年耦

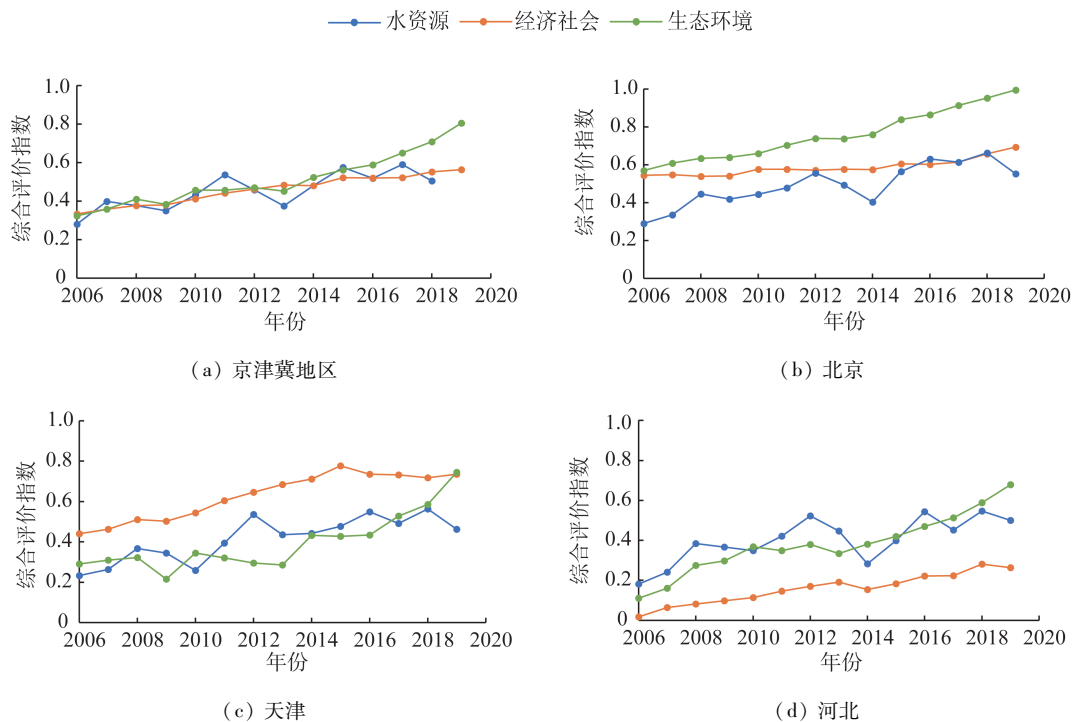


图2 京津冀地区和各地区水资源、经济社会和生态环境系统综合评价指数变化趋势

Fig. 2 Changing trends of comprehensive evaluation indices of water resources, economic society, and eco-environment systems in Beijing-Tianjin-Hebei region and individual regions

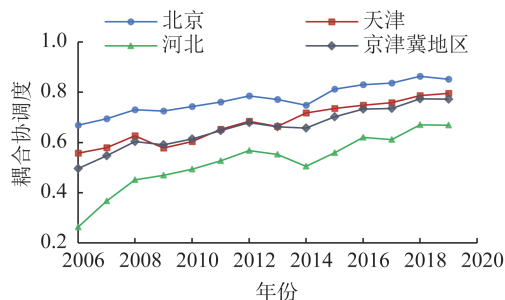


图3 京津冀地区和各地区水-经济-生态耦合协调度演变

Fig. 3 Changes of water-economy-ecology coupling coordination degree in Beijing-Tianjin-Hebei region and individual regions

合协调度最高,为0.773,属于良好耦合协调型。京津冀地区大部分年份处于水资源系统滞后、部分年份处于经济社会系统和生态环境系统滞后的状态,水资源矛盾始终影响区域协调发展,经济社会系统发展较缓,生态环境系统快速发展。2009年和2014年由于区域来水偏枯、人口增长过快,导致耦合协调发展出现减缓趋势,其余年份均正向发展。

b. 北京2006年水-经济-生态耦合协调度最低,为0.669,属于中级耦合协调型;2018年耦合协调度最高,为0.863,属于良好耦合协调型。北京长期处于水资源系统滞后的状态,2016和2018年由于来水较丰,水资源系统综合评价指数上升,人口基数过大导致部分经济指标上升缓慢,使经济社会系统相对水资源和生态环境系统滞后,生态环境系统综合

评价指数逐年上升。2014年和2019年由于区域来水偏枯,耦合协调度出现显著下降。

c. 天津2006年水-经济-生态耦合协调度最低,为0.557,属于勉强耦合协调型;2019年耦合协调度最高,为0.795,属于中级耦合协调型。天津处于水资源和生态环境系统交替滞后的状态,水资源和生态环境问题始终制约天津的发展,经济社会系统指数波动上升,2014年南水北调中线工程全线通水后,水-经济-生态系统逐渐协调发展。2009年由于河流水质和水资源禀赋状况较上年略差,因此耦合协调度呈明显下降趋势。

d. 河北2006年水-经济-生态耦合协调度最低,为0.263,属于失调衰退型;2018年耦合协调度最高,为0.670,属于中级耦合协调型。河北始终处于经济社会系统滞后、水资源系统综合评价指数波动变化、生态环境系统综合评价指数稳步上升的状态。2014年由于水资源赋存条件极差且人口自然增长率较高,导致耦合协调度大幅下降,其余年份大都正向发展。

京津冀地区和各地区水-经济-生态耦合协调度均呈上升趋势,说明京津冀地区各系统之间耦合互动紧密,并向积极的态势发展。同时,地区之间存在明显差异,2006年北京属于中级耦合协调型,天津属于勉强耦合协调型,河北属于失调衰退型;2015年,京津冀一体化方案提出,南水北调中线工程全线

通水后,京津冀地区各地耦合协调发展水平均呈现不同程度的上升,北京转变为良好耦合协调型,天津为中级耦合协调型,河北为勉强耦合协调型;2019年北京和天津耦合协调发展水平在现有基础上缓慢提升,而河北有较大改善,转变为中级耦合协调型。综上,北京耦合协调发展水平始终处于区域领先,天津维持在京津冀地区总体水平上下,河北耦合协调水平虽持续偏低,但始终处于稳步上升的状态。

2.2 归因分析

根据各地区主要影响因子识别情况(图4),京津冀地区水-经济-生态耦合协调度影响因素中关联度最高的是水资源总量,关联度为0.860,且超过半数指标关联度较大;北京水-经济-生态耦合协调度影响因素中关联度最高的是人均水资源量和水资源总量,关联度均为0.816,且大部分影响因子关联度均接近0.7;天津水-经济-生态耦合协调度影响因素中关联度最高的是水资源总量,关联度为0.841,而大部分影响因子关联度均位于0.6~0.7之间;河北水-经济-生态耦合协调度影响因素中关联度最高的是水资源总量,关联度为0.948,远高于其余影响因子。

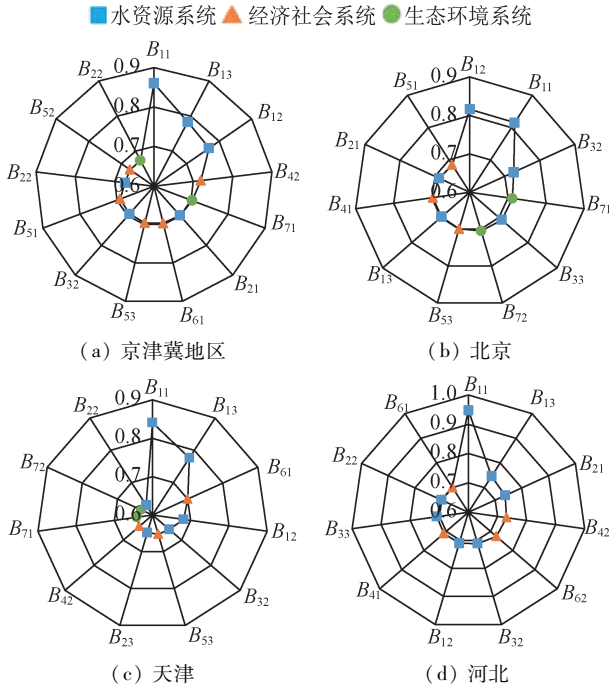


图4 京津冀地区和各地区水-经济-生态耦合协调度主要影响因子

Fig.4 Main influencing factors of water-economy-ecology coupling coordination degree in Beijing-Tianjin-Hebei region and individual regions

从因子识别结果可知,京津冀地区水资源系统指标占比为46.2%,经济社会系统指标占比为38.5%,生态环境系统指标占比为15.4%;京、津两地水资源系统指标占比为54.5%,经济社会系统指

标占比为27.3%,生态环境系统指标占比为18.2%;河北水资源系统指标占比为63.6%,经济社会系统指标占比为36.4%,生态环境系统指标占比为0%。水资源系统各指标是影响京津冀地区水-经济-生态耦合协调发展最为重要的因素,主要是水资源总量和地下水储变量,水资源开发利用情况及用水效率指标次之;经济社会和生态环境系统各指标对水-经济-生态耦合协调度的影响相对较小,其中人口变化指标影响较大。

水资源是京津冀地区协调发展过程中不可或缺的基础性自然资源^[28],因此全面协调本地水、外调水及非常规水源,提高节水水平和用水效率是现阶段推进京津冀地区水-经济-生态协调发展的重要措施。京、津两地处于我国人口经济核心地区,城市飞速发展对水资源及生态环境造成的压力较大,2014年南水北调中线工程全线通水后,缓解了部分来自水资源和生态环境方面的压力,2017年雄安新区的设立帮助分担北京部分人口压力,未来在保障城市水资源和生态环境的基础上,应继续推进京津冀一体化发展进程。而河北在京津冀地区经济发展持续落后,未来应借助沿渤海、临首都的区位优势,推动经济社会高质量发展,建设现代化经济强省,将水资源、经济社会和生态环境紧密结合。

3 结论

a. 京津冀地区2006—2019年水-经济-生态耦合协调度呈上升趋势。京津冀地区和北京水资源系统持续滞后,天津水资源和生态环境系统交互滞后,河北始终处于经济社会系统滞后的状态,水资源系统的矛盾始终制约京津冀地区协调发展。

b. 北京由中级耦合协调型发展成良好耦合协调型,天津由勉强耦合协调型发展成良好耦合协调型,河北由失调衰退型发展成中级耦合协调型。北京处于水-经济-生态耦合协调发展最好水平,天津其次,河北由于经济持续落后导致耦合协调发展缓慢。未来应继续推进京津冀一体化进程。

c. 水资源总量和地下水储变量是影响京津冀地区水-经济-生态耦合协调度最主要的因素,人口变化指标次之,今后应进一步统筹本地水、外调水及非常规水源的开发利用,提升用水水平和用水效率,促进经济社会和生态环境的高质量发展。

参考文献:

[1] 金菊良,周戎星,崔毅,等. 结构水资源学概论[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(3): 7-19. (JIN Juliang, ZHOU Rongxing, CUI Yi, et al.

- Introduction to structural water resources science [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(3): 7-19. (in Chinese))
- [2] 金菊良, 徐新光, 周戎星, 等. 基于联系数和耦合协调度的水资源空间均衡评价方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 1-6. (JIN Juliang, XU Xinguang, ZHOU Rongxing, et al. Water resources spatial balance evaluation method based on connection number and coupling coordination degree[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [3] 孙久文. 论新时代区域协调发展战略的发展与创新[J]. 国家行政学院学报, 2018(4): 109-114. (SUN Jiuren. Theoretical development and practical innovation of regional harmonious development strategy in the new era[J]. Journal of Chinese Academy of Governance, 2018(4): 109-114. (in Chinese))
- [4] 白鹏, 龙秋波. 3种用水量预测方法在京津冀地区的适用性比较[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 102-107. (BAI Peng, LONG Qiubo. Applicability comparison of three water consumption prediction methods in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 102-107. (in Chinese))
- [5] 陈燕. 准东地区资源、环境与经济耦合协调发展研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2018.
- [6] HOLLING C S. Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems[J]. Ecosystems, 2001, 4(5): 390-405.
- [7] MEHTA L. Water and human development[J]. World Development, 2014, 59(1): 59-69.
- [8] ZUO Q, LUO Z, DING X. Harmonious development between socio-economy and river-lake water systems in Xiangyang City, China[J]. Water, 2016, 8(11): 509-528.
- [9] YAN B, YUAN Z, LUO Q, et al. The matching degree of water resources and social economy-ecology-energy in the Yangtze River Economic Belt[J]. Journal of Coastal Research, 2020, 104(Sup 1): 535-540.
- [10] LU Z, FENG Q, XIAO S, et al. The impacts of the ecological water diversion project on the ecology-hydrology-economy nexus in the lower reaches in an inland river basin[J]. Resources Conservation and Recycling, 2021, 164: 105154.
- [11] 王搏. 基于耦合模型的我国区域经济与生态环境协调发展动态研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [12] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. 自然资源学报, 2005(1): 105-112. (LIU Yaobin, LI Rendong, SONG Xuefeng. Analysis of coupling degrees of urbanization and ecological environment in China[J]. Journal of Natural Resources, 2005(1): 105-112. (in Chinese))
- [13] 王会芝. 京津冀城市群经济社会与生态环境协调发展研究[J]. 经济与管理, 2017, 31(5): 22-26. (WANG Huizhi. Research on the coordinated development of economic society and the eco-environment in Beijing-Tianjin-Hebei city agglomeration[J]. Economy and Management, 2017, 31(5): 22-26. (in Chinese))
- [14] 刘玉凤, 高良谋. 京津冀城市群经济与环境的耦合协调发展及时空演化分析[J]. 统计与决策, 2019, 35(10): 134-137. (LIU Yufeng, GAO Liangmou. Coupling coordinated development of economy and environment and spatio-temporal evolution of Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration[J]. Statistics & Decision, 2019, 35(10): 134-137. (in Chinese))
- [15] 李雪松, 龙湘雪, 齐晓旭. 长江经济带城市经济-社会-环境耦合协调发展的动态演化与分析[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 505-516. (LI Xuesong, LONG Xiangxue, QI Xiaoxu. Dynamic evolution and analysis of coupling development of economy, society and environment in Yangtze River Economic Belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 505-516. (in Chinese))
- [16] CHOI S, LEE S O, PARK J. A Comprehensive index for stream depletion in coupled human-water systems[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2017, 16(Sup 1): 58-70.
- [17] LIU Y, YANG L, JIANG W. Coupling coordination and spatiotemporal dynamic evolution between social economy and water environmental quality: a case study from Nansi Lake Catchment, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 119(5): 106870.
- [18] 王永初, 王启志. 耦合度的新定义及其应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1999(3): 59-63. (WANG Yongchu, WANG Qizhi. New definition of coupling degree and its application[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 1999(3): 59-63. (in Chinese)).
- [19] 伏吉芮, 瓦哈甫·哈力克, 姚一平. 吐鲁番地区水资源-经济-生态耦合协调发展分析[J]. 节水灌溉, 2016(12): 94-98. (FU Jirui, WAHAP Halik, YAO Yiping. Analysis of coupling coordinated development of water resources-economic-ecological system in Turpan area[J]. Water Saving Irrigation, 2016(12): 94-98. (in Chinese))
- [20] 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))

- [21] 盖美,王宇飞,马国栋,等. 辽宁沿海地区用水效率与经济的耦合协调发展评价[J]. 自然资源学报,2013,28(12): 2081-2094. (GAI Mei, WANG Yufei, MA Guodong, et al. Evaluation of the coupling coordination development between water use efficiency and economy in Liaoning Coastal Economic Belt[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(12):2081-2094. (in Chinese))
- [22] 夏杰源. 改进的突变评价法在河南省农业干旱中的应用[D]. 郑州:华北水利水电大学,2017.
- [23] 施玉群,刘亚莲,何金平. 关于突变评价法几个问题的进一步研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2003(4): 132-136. (SHI Yuqun, LIU Yalian, HE Jinping. Further study on some questions of catastrophe evaluation method[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2003(4): 132-136. (in Chinese))
- [24] 熊建新,陈端吕,彭保发,等. 洞庭湖区生态承载力系统耦合协调度时空分异[J]. 地理科学,2014,34(9): 1108-1116. (XIONG Jianxin, CHEN Duanlyu, PENG Baofa, et al. Spatio-temporal difference of coupling coordinative degree of ecological carrying capacity in the Dongting Lake Region[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,34(9):1108-1116. (in Chinese))
- [25] 盖美,翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食支撑系统安全测度及协调发展[J]. 生态学报,2021,41(12): 4746-4756. (GAI Mei, ZHAI Yuxi. Measurement and coordinated development of water resources, energy, food and support security in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(12):4746-4756. (in Chinese))
- [26] 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))
- [27] 王平,王云峰. 综合权重的灰色关联分析法在河流水质评价中的应用[J]. 水资源保护,2013,29(5): 52-54. (WANG Ping, WANG Yunfeng. River water quality evaluation based on grey incidence analysis of comprehensive weight[J]. Water Resources Protection, 2013,29(5):52-54. (in Chinese))
- [28] 洪思扬,王红瑞,梁俊芬,等. 京津冀地区水-能源利用效率与资源压力核算[J]. 水资源保护,2021,37(5): 102-111. (HONG Siyang, WANG Hongrui, LIANG Junfen, et al. Calculation of energy-water utilization efficiency and resource pressure in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):102-111. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-16 编辑:施业)

(上接第 79 页)

- [13] 冯钧,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6): 479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6): 479-487. (in Chinese))
- [14] 喻海军,马建明,张大伟,等. IFMS Urban 软件在城市洪水风险图编制中的应用[J]. 中国防汛抗旱,2018,28(7): 13-17. (YU Haijun, MA Jianming, ZHANG Dawei, et al. Application of IFMS urban software in urban flood risk mapping[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 13-17. (in Chinese))
- [15] 马建明,喻海军. 洪水分析软件 IFMS Urban 特点及应用[J]. 中国水利,2017(5): 74-75. (MA Jianming, YU Haijun. Characteristics and application of flood analysis software IFMS Urban[J]. China Water Transport, 2017(5): 74-75. (in Chinese))
- [16] 李曦亨,林铭泽,周浩澜. 降雨时间尺度对城市洪涝模拟的影响[J]. 水电能源科学, 2020,38(1): 9-12. (LI Xiting, LIN Mingze, ZHOU Haolan. Impact of rainfall temporal resolution on urban rainstorm waterlogging simulation[J]. Water Resources and Power,2020, 38(1): 9-12. (in Chinese))
- [17] 石勇. 灾害情境下城市脆弱性评估研究: 以上海市为例[D]. 上海:华东师范大学,2010.
- [18] 姚思敏. 城市暴雨灾害风险评估研究: 以京津冀地区为例[D]. 北京:清华大学,2016.
- [19] 董姝娜,姜臻鹏,张继权,等. 基于 3S 技术的村镇住宅洪灾脆弱性曲线研究[J]. 灾害学, 2012, 27(2): 34-42. (DONG Shuna, JIANG Liupeng, ZHANG Jiquan, et al. Research on flood vulnerability curves of rural dwellings based on "3S" technology[J]. Journal of Catastrophology, 2012, 27(2): 34-42. (in Chinese))
- [20] YU J J, QIN X S, LARSEN O. Joint Monte Carlo and possibilistic simulation for flood damage assessment[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2013,27:725-735.

(收稿日期:2021-04-29 编辑:王芳)