

王富强, 张蒙, 吕素冰, 等. 京津冀地区水-经济-生态系统耦合协调发展模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2023, 21(2): 218-232.
WANG F Q, ZHANG M, LYU S B, et al. Simulation of coordinated development of water-economy-ecology system coupling in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 21(2): 218-232. (in Chinese)

京津冀地区水-经济-生态系统耦合协调发展模拟

王富强^{1,2}, 张蒙¹, 吕素冰^{1,2}, 赵衡^{1,2}, 应卓晖¹

(1. 华北水利水电大学水资源学院, 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, 郑州 450046)

摘要:针对京津冀地区水资源、经济社会和生态环境系统未来可能面临的失衡失稳问题, 构建水-经济-生态系统动力学模拟模型, 设置开源节流、发展经济、保护环境等 5 种情景方案, 预测京津冀地区水资源、经济社会和生态环境系统指标发展趋势, 运用耦合协调度模型模拟京津冀地区 2020—2035 年不同情景下耦合协调发展趋势。结果表明: 2020—2035 年 5 种情景下北京、天津和河北水-经济-生态系统耦合协调度均呈上升趋势, 其中延续现状型耦合协调度均最低, 开源节流型、发展经济型和保护环境型次之, 综合协调型均最高。说明在维持现状发展条件下, 京津冀水-经济-生态系统耦合协调发展程度略有增加但变化较小, 只有在节约用水和发展经济的同时充分考虑环境保护才能促进区域协调发展; 2035 年延续现状情景下北京、天津和河北耦合协调发展水平均属于中级耦合协调型, 综合协调情景下北京和天津耦合协调发展属于良好耦合协调型, 河北省经济发展相对滞后导致耦合协调发展缓慢, 仍属于中级耦合协调型, 未来应注重京津冀一体化发展。研究可为京津冀地区协调可持续发展提供参考依据。

关键词:水-经济-生态系统; 系统动力学; 耦合协调度模型; 发展趋势模拟; 京津冀地区

中图分类号: TV213.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2023.0023

水-经济-生态系统是水资源系统、经济社会系统和生态环境系统相互联系、相互作用、相互耦合形成的有机整体。各系统之间时刻进行着物质循环、能量交换和信息传递, 系统各要素之间存在着复杂的、非线性的动态互馈关系^[1]。随着资源供给与经济发展不协调问题的逐渐显现, 制约区域高质量发展^[2]。2017 年, 党的十九大报告明确提出“实施区域协调发展战略”^[3], 区域环境保护与水资源利用协调发展是当前亟待解决的问题。京津冀地区的水资源、经济社会和生态环境系统失衡影响了区域可持续发展^[4], 预测模拟其水-经济社会-生态系统的耦合协调发展趋势, 对促进京津冀地区的高质量发展具有重要意义。

近年来, 复合系统的耦合协调发展逐渐成为研究热点, 国内外学者对此提出了不同的协调计算模型。王搏^[5]和宋红丽等^[6]以耦合理论为基础建立了

区域经济社会-生态环境耦合模型; 王淑佳等^[7]基于传统耦合协调度模型提出修正模型, 并验证其具有较好的效度; Xi 等^[8]、Davies 等^[9]和 Xu 等^[10]通过建立系统动力学模型, 针对区域水资源可持续性的问题进行了探讨; 徐楠^[11]、田俏^[12]和李雪松等^[13]在经济-生态耦合的基础上, 结合多种因素进行经济-社会-环境系统的耦合协调动态分析; 杨红霞等^[14]基于 WDO-PP 模型对云南省 16 个州市水资源系统和经济社会生态系统的协调度进行评价; 闻豪等^[15]探究“一带一路”沿线重点区域水资源、经济社会和生态环境三系统的协调共生关系, 并构建耦合协调度模型进行定量分析; 焦士兴等^[16]基于层次分析法和耦合协调度模型, 对河南省城镇化与水资源系统的协调发展进行研究; 赵晨光等^[17]将 SMI-P 方法与耦合协调度模型相结合, 对研究区资源-生态-经济系统的耦合协调关系进行综合评价; 蔡文静等^[18]、

收稿日期: 2022-10-12 修回日期: 2023-02-13 网络出版时间: 2023-04-13

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20230412.1038.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52279014, 51879106); 中原科技创新领军人才计划项目(214200510001); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(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, 河南济源人, 教授, 博士生导师, 主要从事水循环模拟与调控、生态水文学等研究。E-mail: wangfuqiang@ncwu.edu.cn

周成等^[19]和凌立文等^[20]应用灰色 GM 模型对区域复合系统的未来耦合协调度进行预测;孙才志等^[21]通过 SBM-DEA 模型与耦合协调度相结合,对 31 个省区市复合系统的协调发展进行了阐述;韩瑞玲等^[22]应用 ARMA 模型与耦合协调度模型对沈阳经济区复合系统进行短期预测,为解决沈阳经济区经济发展与环境保护之间的矛盾提供参考依据;张雪花等^[23]结合系统动力学模型和多目标规划整合模型对区域水资源结构调整前后的发展趋势进行评价及预测。系统动力学侧重于分析复杂系统之间的动态变化,与其他模型相比,系统动力学适合处理复杂的、非线性的多系统耦合问题和长时间序列的动态趋势研究。耦合协调度模型则定量的分析水-经济-生态系统的耦合协调发展情况。

学者^[24-26]关于复合系统耦合协调发展的研究成果较为丰富,大多数方法都是将统计学方法与耦合协调度相结合,甚少在考虑复合系统内部机理和互馈关系的基础上定量分析系统之间的耦合协调发展趋势。基于此,本文以京津冀地区为研究对象,构建京津冀地区水-经济-生态系统动力学模型,预测水资源、经济社会和生态环境系统相关指标发展趋势,并在水-经济-生态指标体系建立的基础上,运用耦合协调度模型模拟京津冀地区 2020—2035 年不同情景下的耦合协调发展情况,旨在为实现京津冀地区高质量协调发展提供政策依据。

1 水-经济-生态系统模拟模型构建

1.1 系统动力学模型构建

1.1.1 系统边界确定

系统动力学是研究复杂系统之间或系统内部信息反馈的模型,应用系统动力学分析京津冀地区水-经济-生态系统,有利于从动态发展的角度预测京津冀地区各项指标发展趋势。运用 Vensim 软件构建京津冀地区水-经济-生态系统动力学模型,以京津冀地区为空间边界,时间边界为 2006—2035 年,基准年为 2019 年,其中 2006—2019 为历史年,2020—2035 年为预测年,时间步长为 1 年。为保证长系列分析数据的一致性,历史分析采用京津冀地区 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)、各地政府工作报告等数据(少数未统计数据利用插值法补齐)。预测期选取依托京津冀地区“十四五”规划。

1.1.2 因果关系分析

在系统动力学中,常用因果关系分析图来描述因素之间的关系。因果关系图分为正、负反馈回路,其中:正反馈回路通过任一因素的正向变化,使该因素呈现更大的正向变化;负反馈回路则相反,起到控制系统平衡的作用。

水资源系统主要研究区域水资源量和各类供水之间的关系。系统中存在“降水量→地表水资源量→地表水供水量→供水总量”等正因果链和“人口总量→人均水资源量”“人口总量→人均生活用水量→生活需水量”“工业总产值→万元工业增加值用水量→工业需水量”等负因果链。

经济社会系统主要研究区域 GDP、人口总量与城市发展之间的关系。系统中存在“城市发展→教育水平→每万人高校在校生数”等正反馈因果链和“人口总量→人均城市道路面积”“人口总量→人均 GDP”等负反馈因果链。

生态环境系统主要研究生态用水总量与城市生态、工业用水总量与工业废水之间的关系。系统中存在“工业增加值→能源消耗→万元 GDP 能耗”等正反馈因果链和“生态用水总量→城市绿地面积→城市绿化覆盖率→可吸入颗粒物质量浓度”等负反馈因果链。3 个子系统的因果关系见图 1。

1.1.3 模型构建

因果关系图仅仅是对系统的定性分析,为更精确定义各变量之间的关系,还需在构建主体结构的基础上,将各系统因素按属性分为状态变量、辅助变量、速度变量等,并以数字方程的形式定量表示相关关系。水资源系统主要包括 3 个状态变量,分别为人口总量、工业增加值和有效灌溉面积,将人口增量、工业增加值增量和灌溉面积增量定义为速度变量,其余变量均为辅助变量。经济社会系统以 GDP 增长和财政支出为主要变量,选取旅游、教育、交通运输及科技发展定量展示城市经济社会方面的发展情况,主要包括第一产业、第二产业和第三产业增加值等状态变量,其余变量均为辅助变量。生态环境系统以城市绿化面积和生态需水量作为主要变量,选取污水处理及工业废水排放情况定量展示城市生态环境方面的情况,模拟生态环境系统各变量变化情况,主要包括状态变量城市绿地面积,将其增量定义为速度变量,其余变量均为辅助变量。京津冀地区水-经济-生态系统流图见图 2,系统动力学模型的部分方程式见表 1。

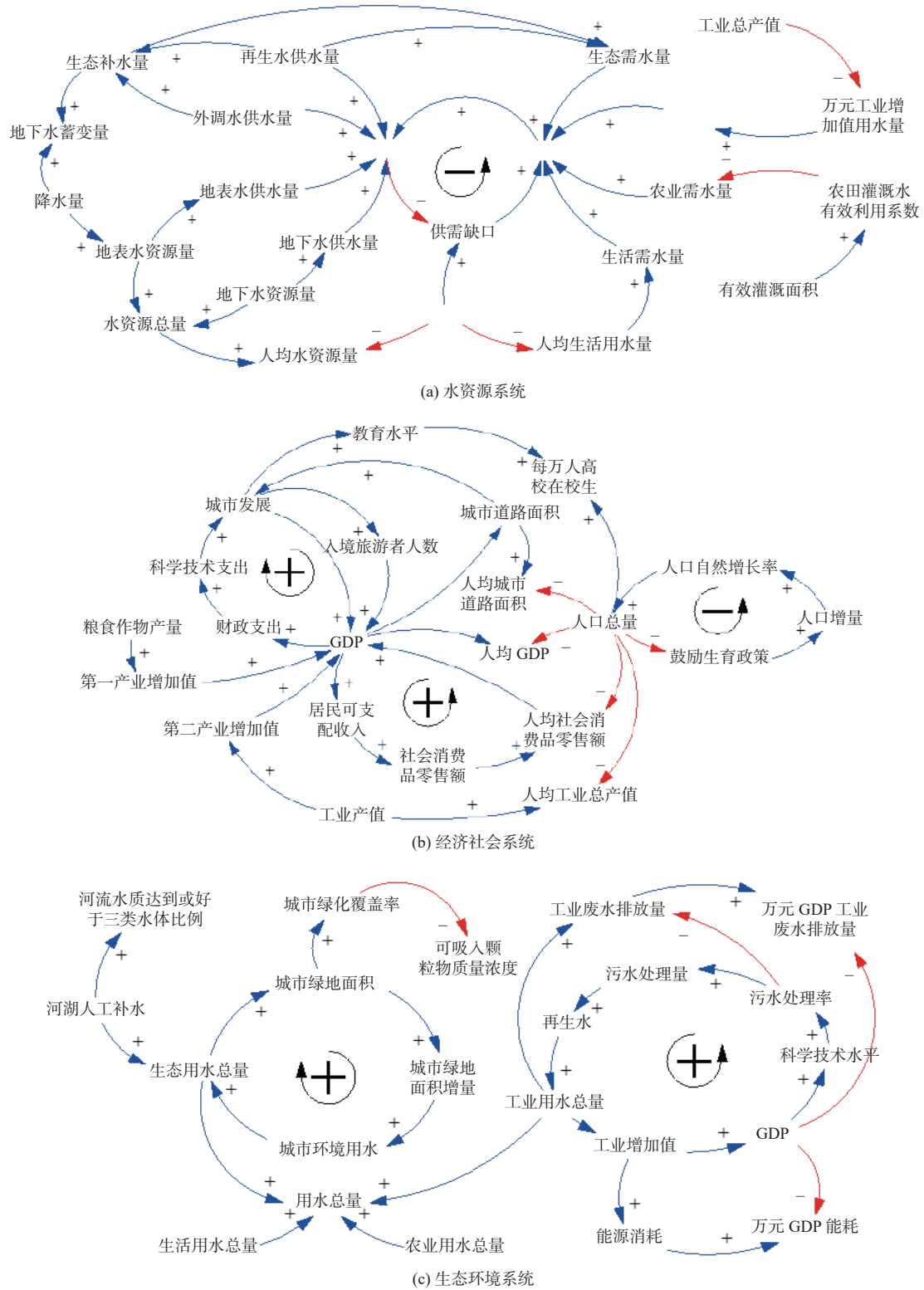


图 1 京津冀水-经济-生态系统因果关系

Fig. 1 causal relationship of the "water-economy-ecology" system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

1.2 耦合协调度模型构建

1.2.1 指标体系构建

水-经济-生态系统指标体系构建以推动京津冀地区协调发展为目标,依据指标体系构建的科学性、全面性和可行性原则,充分考虑水-经济-生态系统

三者内部机理,对京津冀地区水-经济-生态系统进行耦合协调分析。从水资源、经济社会和生态环境三大系统入手,构建了水资源量、开发利用、用水效率等 10 个要素层共计 24 个指标的指标体系,具体见表 2。

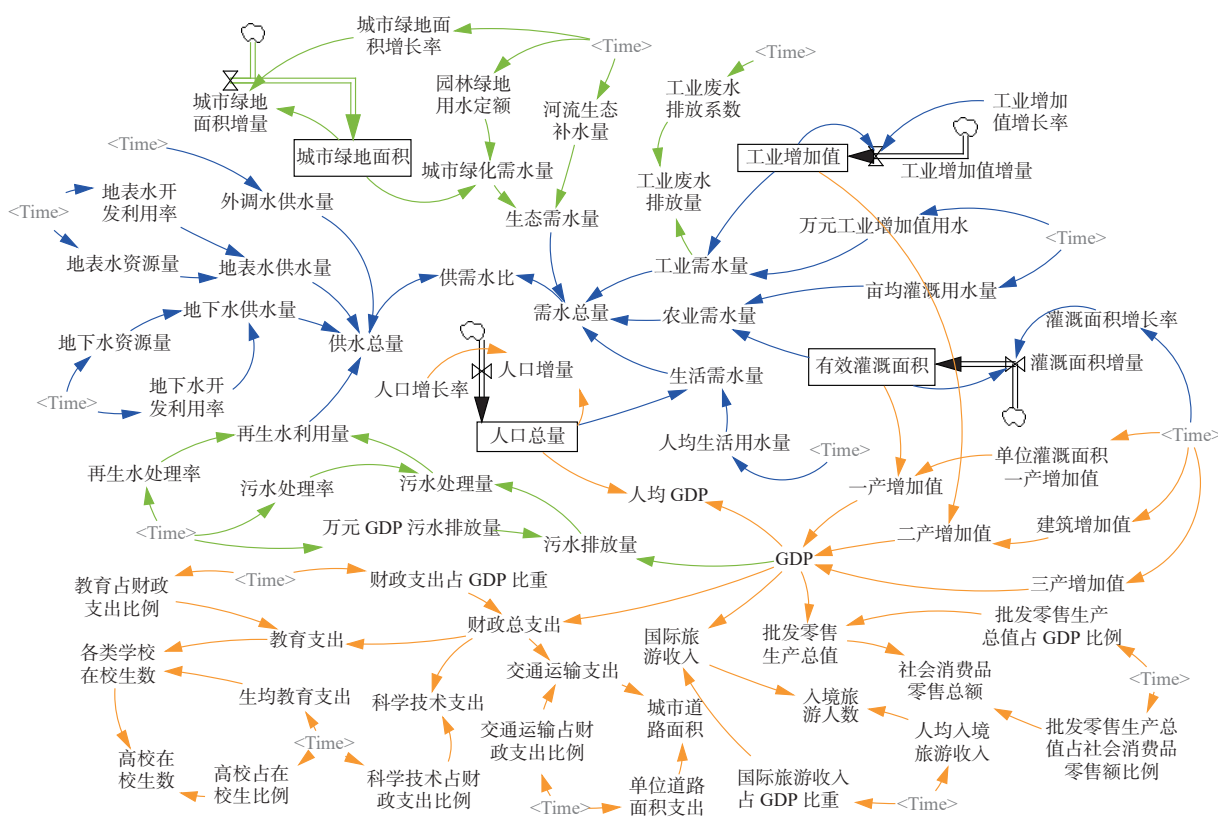


图 2 京津冀水-经济-生态系统流图

Fig. 2 Flow diagram of "water-economy-ecology" system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

表 1 系统动力学模型方程式

Tab. 1 System dynamics model equation

变量名称	设计思路
总人口数/人	INTEG(人口增量, 人口初始值)
需水总量/m ³	农业需水量+工业需水量+生态需水量+生活需水量
生态需水量/m ³	城市绿化需水量+河流生态补水量
亩均灌溉用水量/m ³	INTEG(亩均灌溉用水增量, 亩均灌溉用水初始值)
有效灌溉面积/亩	INTEG(灌溉面积增量, 灌溉面积初始值)
万元工业增加值用水量/m ³	INTEG(万元工业增加值用水增量, 万元工业增加值用水初始值)
供水总量/m ³	再生水供水量+地下水供水量+地表水供水量+外调水供水量
供需水比	供水总量/需水总量
地下水供水量/m ³	地下水资源量×地下水开发利用率
GDP/元	INTEG(GDP增量, GDP初始值)
工业增加值/元	INTEG(工业增加值增量, 工业增加值初始值)
入境旅游人数/人	国际旅游收入/人均入境旅游收入
城市道路面积/m ²	交通运输支出/单位道路面积支出
城市绿地面积/m ²	INTEG(城市绿地面积增量, 城市绿地面积初始值)
工业废水排放量/m ³	工业需水量×工业废水排放系数
再生水利用量/m ³	污水处理量×再生水处理率

表 2 京津冀地区水-经济-生态系统指标体系
Tab. 2 Index system of "water-economy-ecology" system in Beijing-Tianjin-Hebei region

系统层	要素层	指标性质	指标层	指标意义
水资源系统	水资源量	+	水资源总量/亿m ³	水资源禀赋条件
		+	人均水资源量/m ³	
		+	地下水储量/亿m ³	
	开发利用	+	水资源开发利用/%	水资源开发利用水平
		+	外调水占供水比例/%	
		+	再生水占供水比例/%	
		-	年人均生活用水量/m ³	
用水效率	-	万元工业增加值用水量/m ³	工业用水效率	
	+	农田灌溉水有效利用系数	农业用水效率	
	+	人均GDP/元	区域经济效益	
经济社会系统	经济效益	+	人均工业总产值/万元	国际旅游业发展水平
		+	入境旅游人数/万人	
	发展质量	+	科学技术支出占财政总支出/%	科技发展水平
		+	每万人普通高校在校学生数/人	教育发展水平
		+	人均城市道路面积/m ²	道路设置合理程度
	居民生活	-	常住人口自然增长率/%	常住人口增减程度
		+	人均社会消费品零售额/元	国内消费需求
生态环境系统	居住环境	+	城市绿化覆盖率/%	城市环境质量
		+	生态用水比例/%	河流水质情况
		+	河流水质达到或好于Ⅲ类水体比例/%	
	环保生产	-	日均可吸入颗粒物质量浓度/(mg·m ⁻³)	空气质量
		-	万元GDP工业废水排放量/t	污染物排放水平
		-	万元GDP能耗标准煤/t	能源消耗程度
		+	污水处理率/%	污染物处理水平

注：“+”、“-”分别代表正指标和负指标(水资源开发利用大于100%时为“-”)。

1.2.2 模型构建

耦合协调度模型可以清晰的描述区域水资源、经济社会和生态环境系统之间的协同发展情况和耦合协调程度。耦合是指两个或两个以上的系统通过各种相互作用而彼此影响的现象^[27-28]。耦合协调度是衡量系统耦合协调情况的指标,当耦合协调度达到最优时表明系统达到最佳状态。

耦合协调度模型由耦合度 C 和综合发展指数 T 构成,首先运用熵值法确定各指标权重(表 3),加权求和计算得到京、津、冀三地水资源、经济社会和生态环境系统的综合评价指数 U ,进而测算得到耦合度 C 和综合发展指数 T ,最终得到区域耦合协调度 D ,计算公式^[29]为

$$C = \left[\frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{\left(\frac{U_1 \times U_2 \times U_3}{3} \right)^3} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$U_1 = \sum_{i=1}^n \omega_1 x_i \quad (2)$$

$$U_2 = \sum_{i=1}^n \omega_2 x_i \quad (3)$$

$$U_3 = \sum_{i=1}^n \omega_3 x_i \quad (4)$$

$$T = \alpha U_1 + \beta U_2 + \gamma U_3 \quad (5)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (6)$$

式中: C 为各系统的耦合度; U_1 、 U_2 、 U_3 为计算得到的综合评价指数; ω_1 、 ω_2 、 ω_3 为系统各指标权重; x_1 、 x_2 、 x_3 为系统各指标标准化数值; T 为综合发展指数; α 、 β 、 γ 分别为水资源、经济社会和生态环境系统的贡献份额,且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$,本文中三者重要程

度相同,故 $\alpha = \beta = \gamma = 1/3$; D 为耦合协调度,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, $0 \leq D \leq 1$, 耦合协调度越小说明系统间协调状况越差,耦合协调度越大协调状况则越好。

表 3 京津冀地区水-经济-生态系统指标权重
Tab. 3 Index weight of "water-economy-ecology" system in the Beijing-Tianjin-Hebei region

系统层	要素层	指标层	北京		天津		河北		
			权重	综合权重	权重	综合权重	权重	综合权重	
水资源系统	水资源量	水资源总量	0.123 3		0.153 2		0.142 8		
		人均水资源量	0.081 6	0.340 7	0.094 1	0.307 7	0.126 4	0.324 0	
		地下水储变量	0.135 8		0.060 4		0.054 8		
	开发利用	水资源开发利用	0.185 0		0.099 4		0.069 3		
		外调水占供水比例	0.142 6	0.382 1	0.086 9	0.411 6	0.203 2	0.417 5	
		再生水占供水比例	0.054 5		0.225 3		0.145 0		
		人均生活用水量	0.088 0		0.071 6		0.092 3		
	用水效率	万元工业增加值用水量	0.055 3	0.277 2	0.050 4	0.280 8	0.047 8	0.258 5	
		农田灌溉水有效利用系数	0.133 9		0.158 8		0.118 4		
		人均GDP	0.114 0		0.109 9		0.120 6		
经济社会系统	经济效益	人均工业总产值	0.106 2	0.220 2	0.086 8	0.196 7	0.101 9	0.222 5	
		入境旅游人数	0.151 0		0.130 6		0.176 7		
	发展质量	科学技术支出占财政总支出	0.088 8	0.456 9	0.069 5	0.285 3	0.064 5	0.350 2	
		每万人普通高校在校学生数	0.217 1		0.085 2		0.109 0		
		人均城市道路面积	0.107 9		0.149 4		0.071 8		
	居民生活	常住人口自然增长率	0.107 2	0.322 9	0.263 4	0.518 0	0.194 4	0.427 3	
		人均社会消费品零售额	0.107 8		0.105 2		0.161 1		
		城市绿化覆盖率	0.143 1		0.073 6		0.114 9		
	生态环境系统	居住环境	生态用水比例	0.199 7	0.571 6	0.301 1	0.688 3	0.313 5	0.514 5
			河流水质达到或好于Ⅲ类水体比例	0.228 8		0.313 6		0.086 1	
日均可吸入颗粒物质量浓度			0.099 9		0.085 3		0.072 4		
环保生产		万元GDP工业废水排放量	0.073 7		0.073 8		0.074 4		
		万元GDP能耗	0.131 5	0.428 4	0.092 5	0.311 7	0.089 4	0.485 5	
		污水处理率	0.123 3		0.060 1		0.249 3		

参考相关研究文献^[30-32], 结合实际情况对耦合协调度进行划分, 见表 4。

表 4 耦合协调度等级划分
Tab. 4 Table of coupling coordination degree

耦合协调度 D	耦合协调类型	系统对比发展类型
$0 \sim \leq 0.4$	失调衰退	
$>0.4 \sim \leq 0.6$	勉强耦合协调	在 U_1 、 U_2 、 U_3 中, U_1 最小为水资源滞后型, U_2 最小为经济社会滞后
$>0.6 \sim \leq 0.8$	中级耦合协调	型, U_3 最小为生态环境滞后型
$>0.8 \sim \leq 1.0$	良好耦合协调	

2 水-经济-生态系统耦合协调发展模拟

2.1 系统动力学模型指标预测

2.1.1 模型检验

为进一步确保模型的有效性和真实性, 需对初步构建的京津冀地区水-经济-生态系统动力学模型进行历史检验。将参数输入模型进行仿真运行, 所得结果与历史实际数据进行比较, 验证其吻合程度。由于模型较复杂、变量较多, 主要对 2006—2019 年京津冀地区水-经济-生态系统中的个别指标进行历史验证。参考系统耦合协调分析所需指标并结

合模型检验的需要,故选取水资源系统中的供水总量和人均生活用水量、经济社会系统中的 GDP 和工业增加值、生态环境系统中的生态需水量和再生水利用量作为检验指标,模拟结果见图 3。

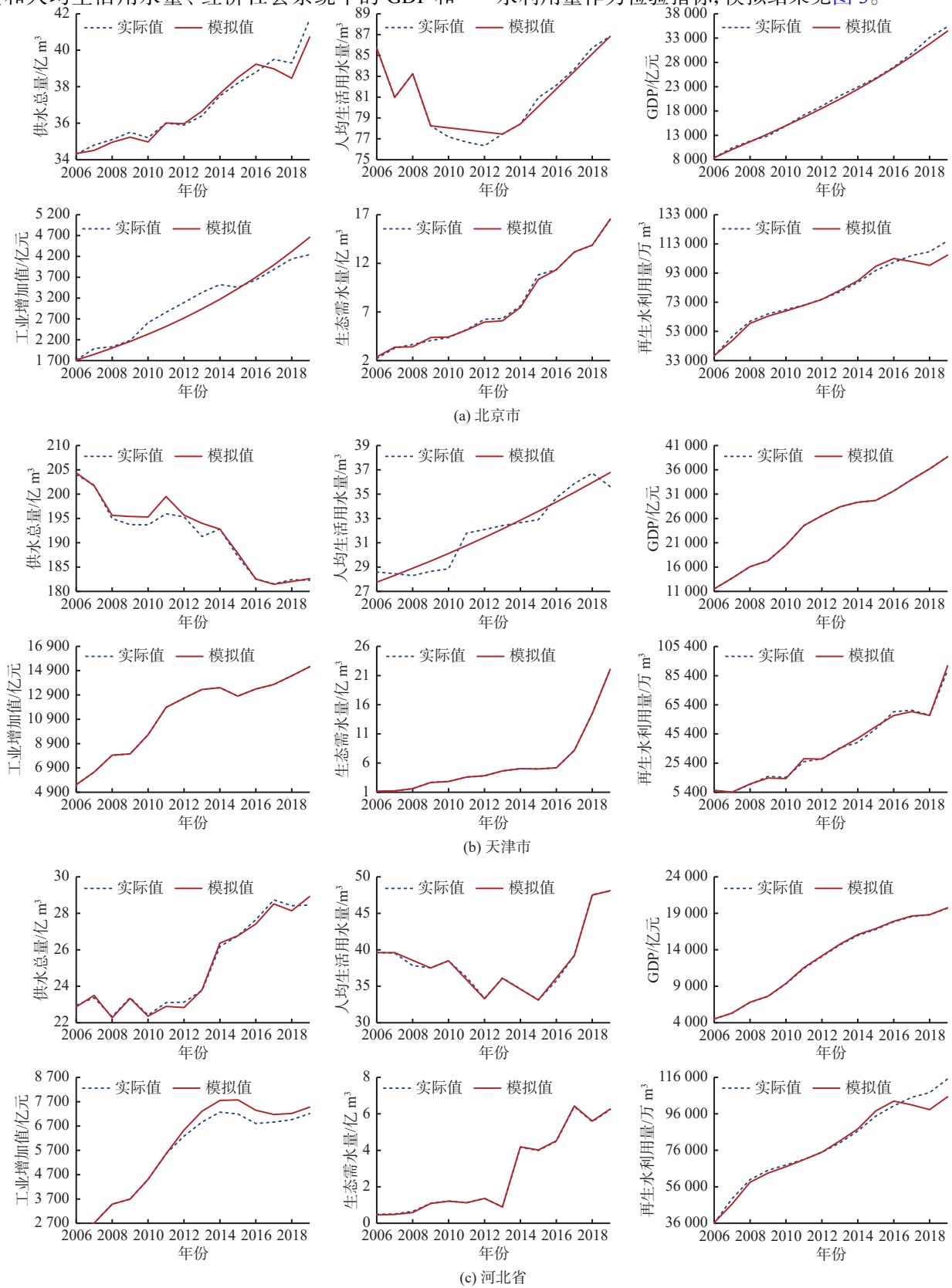


图 3 2006—2019 年京津冀地区水-经济-生态系统历史模拟结果

Fig. 3 Historical simulation results of water-economy-ecology system in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2006 to 2019

由对比结果可知,除个别年份存在突变情况外,水-经济-生态系统各指标模拟值与实际值的误差基 本都在 10% 以内,且模拟值的变化趋势与实际值 的变化趋势一致,因此判定本文构建的水-经济-生态

系统动力学模型具有较好的模拟精度,能够用于实际系统的模拟预测。

2.1.2 情景设定

根据 2006—2019 年京津冀地区水资源、经济社会和生态环境系统内各指标发展趋势,假定预测期内水资源总量及降水量等自然因素无极端变化情况,结合京津冀地区实际供水情况、经济指数发展情况及排污减污能力,设定以下 5 种情景:

情景 1: 延续现状型。即维持现有状态不变,保持现有的供水能力、用水效率、人口增长、城市发展水平以及治污排污能力,不采取任何措施。

情景 2: 开源节流型。即以现状型为基础,实现区域用水效率最优,向多水源供水格局转变,提高外调水和再生水的供水比例,减少开发地下水资源;放缓区域经济发展和常住人口增长速度,将一部分财政支出从硬件设施建设转移到科研教育上;提高污水处理和中水回用的能力。

情景 3: 发展经济型。即以现状型为基础,以经济高速发展为核心,除外调水和再生水外,充分利用现有

地表水资源和地下水资源,实现区域用水最大化;加大制造业的财政投入,放缓教育、科技等支出;加大废水排放及能源消耗,并提高污水处理和中水回用能力。

情景 4: 保护环境型。即以现状型为基础,以降低污染,优化生态环境为核心,适当放缓经济发展及人口增长速度,发展绿色产业,降低单位污水排放及能源消耗,增大城市绿化覆盖率,改善河流水质及空气质量。

情景 5: 综合协调型。即综合水资源、经济社会发展和生态保护多个因素,着眼长期可持续协调发展,各项指标居中调和。

2.1.3 参数设定

根据《北京市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《天津市国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》《河北省国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标纲要》以及《河北省城镇体系规划(2016—2030年)》等规划,结合京津冀地区现状发展,确定 5 种方案下相关参数的设定,以北京市为例,具体参数设置见表 5。

表 5 北京多种情景下参数设置
Tab. 5 Parameter settings in various scenarios of Beijing

参数	初始值	延续现状	开源节流	发展经济	保护环境	综合协调
	2019年	2035年	2035年	2035年	2035年	2035年
地表水供水量占地表水资源量的比重/%	77.82	48.00	29.00	56.00	48.00	43.00
地下水供水量占地下水资源量的比重/%	96.55	50.00	36.00	70.00	59.00	45.00
外调水占供水比例/%	19	23	31	20	23	24
再生水占供水比例/%	27.6	48.0	46.0	53.0	50.0	53.0
年人均生活用水量/m ³	86.831	87.500	73.900	87.700	86.100	80.100
万元工业增加值用水量/m ³	7.781	3.400	2.400	4.050	3.420	2.890
亩均灌溉用水量/m ³	225.8	106.3	83.9	117.5	117.5	99.4
有效灌溉面积/万亩	163.9	89.6	60.9	85.3	85.3	72.1
GDP/亿元	35 371.3	106 643.0	66 250.0	104 422.0	77 211.0	83 309.0
工业增加值/亿元	4 241.1	14 529.8	7 943.5	12 520.0	9 258.0	11 616.0
教育占财政总支出/%	15.4	14.9	15.6	15.1	15.6	15.4
交通运输占财政比例/%	5.4	8.7	7.4	10.2	7.4	9.4
城市绿化覆盖率/%	48.5	60.6	56.9	66.6	77.8	66.6
绿化覆盖面积/亿m ²	9.33	11.70	10.90	12.80	13.90	12.80
生态用水比例/%	38.4	42.6	47.9	42.0	47.0	47.8
日均可吸入颗粒物质量浓度/(mg·m ⁻³)	0.068	0.030	0.030	0.035	0.025	0.030
工业废水排放系数	0.234	0.375	0.321	0.347	0.253	0.306
万元GDP能耗/t标准煤	0.230	0.196	0.181	0.184	0.166	0.178
单位GDP污水排放量/(m ³ ·万元 ⁻¹)	6.000	2.900	3.110	3.380	3.668	3.377
污水处理率/%	94.5	99.2	100	100	100	100
人口/万人	2 153.6	3 350.1	2 525.3	3 456.0	2 956.0	2 733.0

2.1.4 结果分析与讨论

通过向 Vensim 软件输入北京、天津和河北 5 种情景下水资源、经济社会和生态环境系统内的相

关参数,并不断加以修正,得到 2020—2035 年 5 种情景下北京、天津和河北相关指标发展趋势,部分指标模拟趋势见图 4—6。

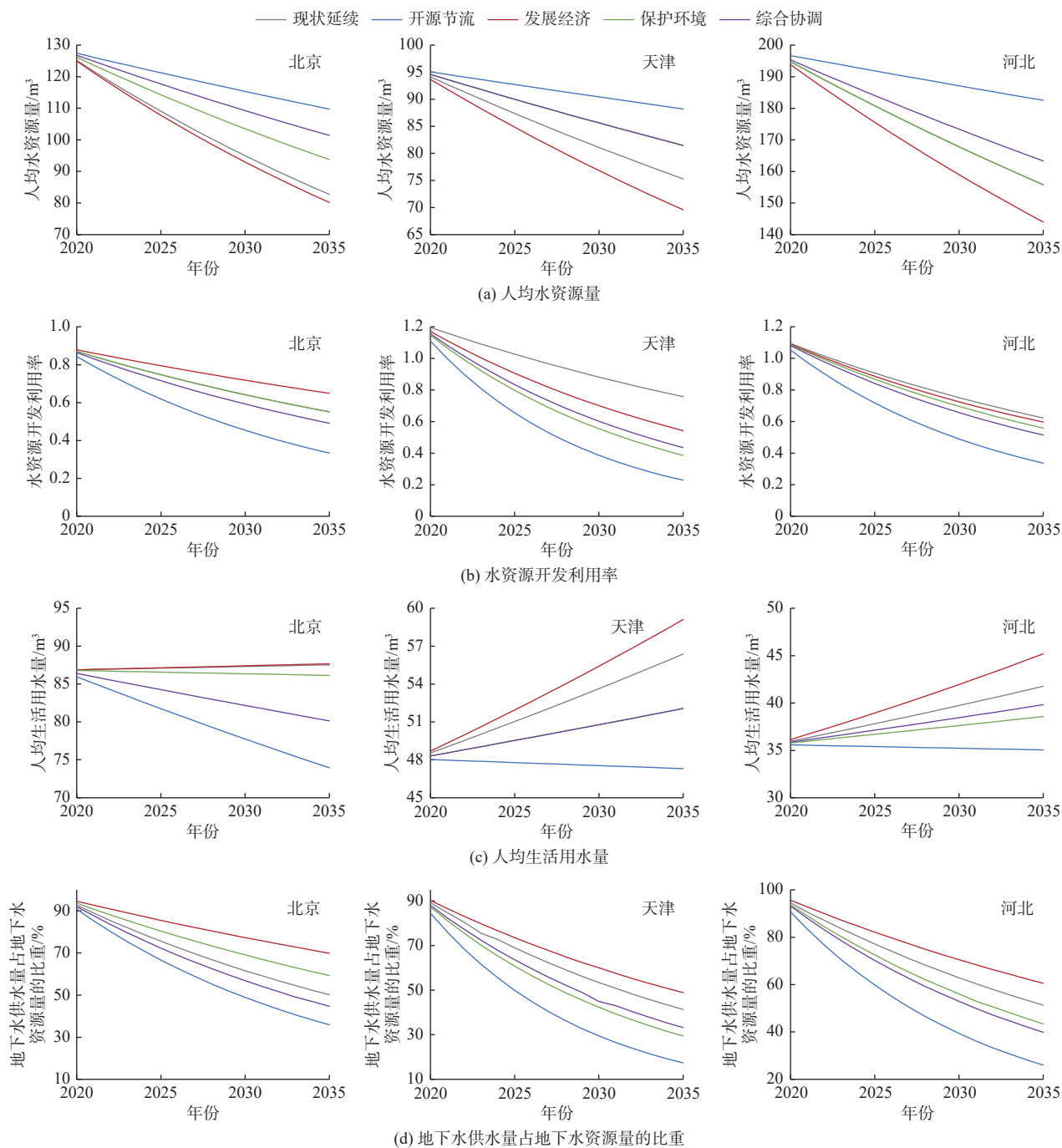


图 4 水资源系统指标模拟趋势

Fig. 4 Trends of indicator simulation in water system

水资源系统。从系统模拟结果可知:北京、天津和河北人均水资源量均处于下降趋势,且开源节流型的人均水资源量最高,2035 年北京为 109.7 m^3 ,天津为 88.2 m^3 ,河北为 182.5 m^3 ;发展经济型的人均水资源量最低,2035 年北京为 80.0 m^3 ,天津为 69.6 m^3 ,河北为 144.0 m^3 。

北京、天津和河北本地水资源开发利用率均处于下降趋势,北京发展经济型的水资源开发利用率最高,2035 年为 0.65,天津和河北延续现状型的水资源开发利用率最高,分别为 0.90 和 0.60;开源节流型的水资源开发利用率最低,2035 年北京为 0.33,天津为 0.30,河北为 0.40。采取开源节流等措施可

有效降低京津冀地区的水资源开发利用率。

北京、天津和河北人均生活用水量大部分处于上升趋势,部分情景下处于下降趋势,且发展经济型的人均生活用水量最高,2035年北京为 87.67 m³,

天津为 59.1 m³,河北为 45.2 m³;开源节流型的人均生活用水量最低,2035年北京为 73.9 m³,天津为 47.3 m³,河北为 35.1 m³。开源节流型始终处于下降趋势。

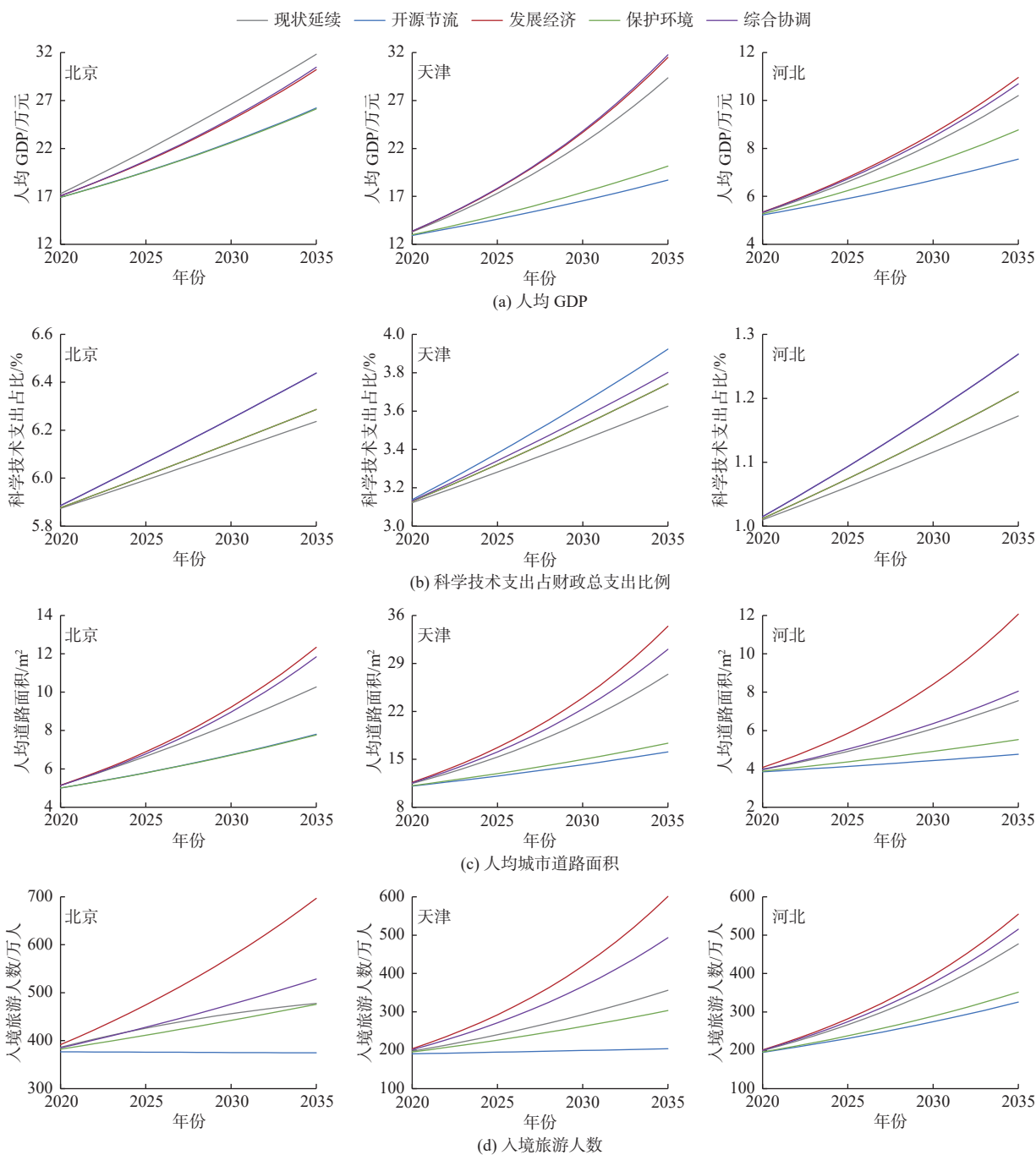


图 5 经济社会系统指标模拟趋势

Fig. 5 Trends of indicator simulation in Economy system

北京、天津和河北地下水供水量占地下水资源量的比重均处于下降趋势,发展经济型的地下水供水占比最高,2035年北京为 69.9%,天津为 48.9%,河北为 60.6%;开源节流型的地下水供水占比最低,2035年北京为 35.9%,天津为 17.4%,河北为 26.0%。

由模拟结果可知,2020年京津冀地区地下水供水量占地下水资源量的比重达到 90%,如果采取用水效率最大化、多水源格局、压减地下水开采等措施,2035年地下水供水量占地下水资源量的比重可降低至 50% 以下,缓解地下水超采状况。

从以上指标的发展趋势可以看出,在开源节流情景下,水资源系统各项指标最优。

经济社会系统。从系统模拟结果可知,北京、天津和河北人均 GDP 均处于上升趋势,北京延续现状型的人均 GDP 最高,2035 年为 31.8 万元,天津最高为综合协调型,为 31.8 万元,河北最高为发展经

济型,为 11.0 万元;北京保护环境型的人均 GDP 最低,2035 年为 26.1 万元,天津和河北开源节流型的人均 GDP 最低,分别为 18.7 万元和 7.6 万元。发展经济型和综合协调型因注重经济发展和统筹考虑水资源、经济社会发展和生态保护多个因素,人均 GDP 普遍高于开源节流型和保护环境型。

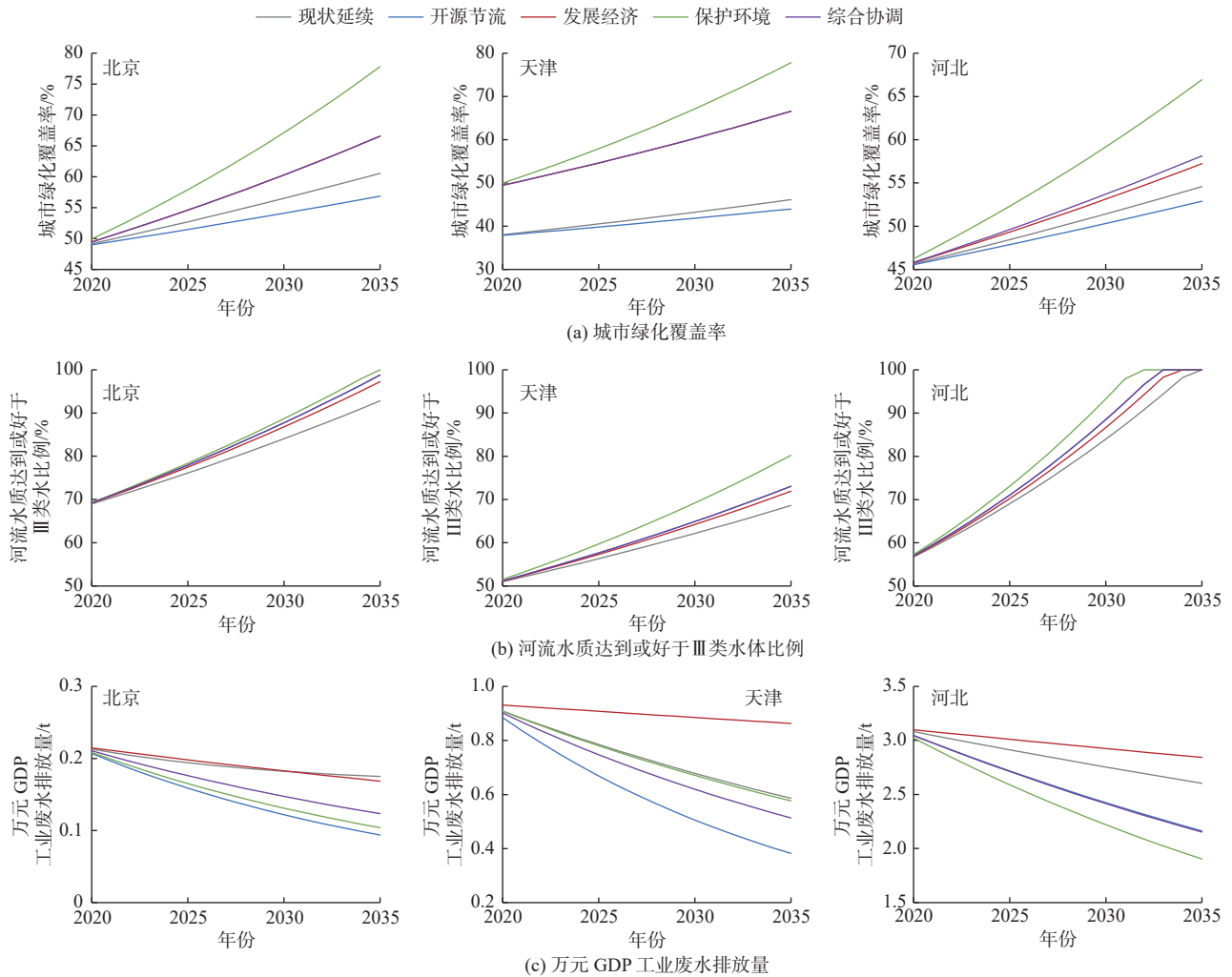


图 6 生态环境系统指标模拟趋势

Fig. 6 Trends of indicator simulation in Ecology system

北京、天津和河北科学技术支出占比均处于上升趋势,开源节流型因放缓区域经济发展和常住人口增长速度,将一部分财政支出从硬件设施建设转移到科研教育上,导致科学技术支出占比最高,2035 年北京为 6.4%,天津为 3.9%,河北为 1.3%;延续现状型的科学技术支出占比最低,2035 年北京为 6.2%,天津为 3.6%,河北为 1.2%。

北京、天津和河北人均城市道路均处于上升趋势,发展经济型的人均城市道路最高,2035 年北京为 12.34 m²,天津为 34.40 m²,河北为 12.10 m²,经济

快速发展带动城市建设,人均城市道路增加;北京保护环境型的人均城市道路最低,2035 年为 7.77 m²,天津和河北开源节流型最低,分别为 16.10 m² 和 4.80 m²。

北京、天津和河北入境旅游人数均处于上升趋势,发展经济型的入境旅游人数最高,2035 年北京为 697 万人,天津为 601 万人,河北为 555 万人;开源节流型的入境旅游人数最低,2035 年北京为 375 万人,天津为 204 万人,河北为 326 万人。综合协调型均高于延续现状型和保护环境型。

从以上指标的发展趋势可以看出,发展经济情景下,经济社会系统的各项指标更优,且河北的经济发展明显滞后于北京和天津。

生态环境系统。从系统模拟结果可知,北京、天津和河北城市绿化覆盖率均处于上升趋势,保护环境型以降低污染,优化生态环境为核心,城市绿化覆盖率最高,2035年北京为77.8%,天津为77.0%,河北为66.9%;开源节流型注重实现区域用水效率最优,城市绿化覆盖率最低,2035年为56.9%,天津为44.0%,河北为52.9%。

北京、天津和河北河流水质达到Ⅲ类水占比均处于上升趋势,保护环境型注重保护生态环境,河流水质最优,2035年北京和河北达到或好于Ⅲ类水占比均为100%,天津为80.2%;延续现状型维持现有的治污排污能力,水质较差,2035年北京达到或好于Ⅲ类水占比为93.0%,天津为68.6%,河北为100%。

北京、天津和河北万元GDP工业废水排放量均处于下降趋势,经济发展型以发展经济为核心,

万元GDP工业废水排放量最高,2035年北京为0.17 t,天津为0.86 t,河北为2.84 t;开源节流型提高污水处理和中水回用的能力,北京和天津的万元GDP工业废水排放量最低,分别为0.10 t和0.38 t,河北保护环境型最低,为1.90 t。

从以上指标可以看出,在保护环境情景下,生态环境系统各项指标的发展趋势更好。

综上,从动态发展的角度,利用系统动力学预测了京津冀地区水-经济-生态系统各指标的发展趋势,还需运用耦合协调度模型模拟京津冀地区不同情景下耦合协调度,定量分析其水-经济-生态的协调发展。

2.2 耦合协调度模型模拟

根据2020—2035年北京、天津和河北多种情景下各项指标的模拟结果,运用耦合协调度模型,对不同情景下的耦合协调发展水平进行模拟,为使结果具有可比性,在指标标准化时采用所有情景下各指标的极值作为各个情景下的极值。具体结果见表6和图7。

表6 京津冀地区2020—2035年耦合协调度模拟结果

Tab. 6 Simulation of coupling coordination in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2020 to 2035

(a)北京					
年份	延续现状型	开源节流型	发展经济型	保护环境型	综合协调型
2020	0.715	0.722	0.716	0.717	0.721
2025	0.745	0.761	0.753	0.750	0.764
2030	0.772	0.796	0.791	0.780	0.806
2035	0.795	0.827	0.826	0.807	0.846
(b)天津					
年份	延续现状型	开源节流型	发展经济型	保护环境型	综合协调型
2020	0.679	0.684	0.679	0.682	0.684
2025	0.713	0.723	0.729	0.722	0.736
2030	0.747	0.756	0.780	0.757	0.788
2035	0.781	0.785	0.830	0.788	0.839
(c)河北					
年份	延续现状型	开源节流型	发展经济型	保护环境型	综合协调型
2020	0.615	0.623	0.613	0.612	0.613
2025	0.656	0.673	0.666	0.660	0.665
2030	0.698	0.717	0.716	0.706	0.719
2035	0.741	0.759	0.767	0.746	0.770

根据模拟结果可知,北京、天津和河北水-经济-生态系统耦合协调度在5种情景下均呈上升趋势。其中:北京市延续现状型耦合协调度最低,在维持现状发展水平下,2035年耦合协调度为0.795;保护环境型其次,通过减少产业污染,优化生态环境,2035

年耦合协调度为0.807;发展经济型前期发展较缓,后期发展加快,通过加大经济发展速度,加大供水,2035年耦合协调度为0.827;开源节流型前期发展较快,后期逐渐放缓,通过提高用水效率,改善供水格局,2035年耦合协调度为0.827;综合协调型始

终处于最高水平,通过综合水资源、经济社会发展和生态保护多个因素,2035 年耦合协调度为 0.846。

天津市延续现状型耦合协调度最低,在维持现状发展水平下,2035 年耦合协调度为 0.781;开源节流型和保护环境型其次,分别通过提高用水效率,

改善供水格局和减少产业污染,优化生态环境提升耦合协调度,2035 年为 0.785 和 0.788;发展经济型通过加大经济发展速度,2035 年耦合协调度为 0.830;综合协调型始终处于最高水平,2035 年耦合协调度为 0.839。

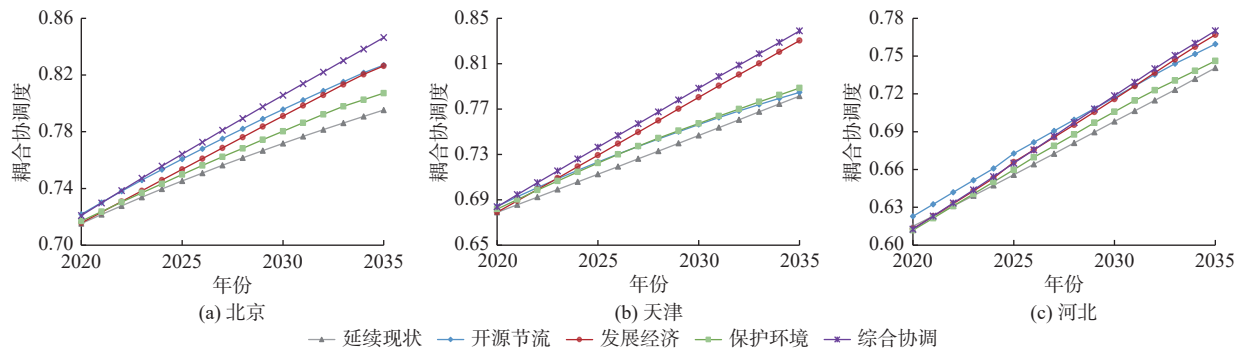


图 7 京津冀地区 2020—2035 年耦合协调发展趋势

Fig. 7 Coupling coordination in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2020 to 2035

河北省延续现状型耦合协调度最低,2035 年耦合协调度为 0.741;保护环境型其次,通过减少产业污染,优化生态环境提升耦合协调度,2035 年为 0.746;开源节流型前期发展迅速,后期逐渐放缓,2035 年耦合协调度为 0.759;发展经济型通过加大经济发展速度,2035 年耦合协调度为 0.767。河北省水资源系统主要面临着地下水超采问题,采用多水源供水,压减地下水超采量,可以有效提高系统的耦合协调度,但由于河北省的经济相对滞后,所以后期加快经济发展,系统的耦合协调状况更好。综合考虑开源节流和发展经济情景的利弊,综合协调情景的协调发展趋势更好,2035 年耦合协调度为 0.770。

3 结论

本文构建了京津冀地区水-经济-生态系统动力学模型,基于开源节流、发展经济、保护环境等 5 种情景方案的设置,模拟了京津冀地区水-经济-生态系统相关指标发展趋势,并运用耦合协调度模型评价了京津冀地区 2020—2035 年不同情景下耦合协调发展的情况。主要结论如下:

2020—2035 年北京、天津和河北水-经济-生态系统耦合协调度在 5 种情景下均呈上升趋势。

京津冀三地延续现状型耦合协调度均最低,开源节流型、发展经济型和保护环境型其次,综合协调型均最高,表明在维持现状发展条件下,京津冀水-经济-生态系统耦合协调发展程度略有增加但变

化较小,只有在节约用水、发展经济的同时,充分考虑环境保护才能促进区域协调发展。

2035 年延续现状情景下,京津冀三地耦合协调度分别为 0.795、0.781 和 0.741,发展水平均属于中级耦合协调型,在综合协调情景下,北京和天津耦合协调度为 0.846 和 0.839,发展水平属于良好耦合协调型,河北省耦合协调度为 0.770,仍属于中级耦合协调型。

京津冀地区应在经济快速发展的基础上,采用多水源供水格局,加大外调水和再生水供水比例,压减地下水开采量,提高污水处理率,实现用水效率最大化,注重京津冀一体化发展,实现区域水资源、经济社会和生态环境系统的协调可持续发展。

参考文献:

- [1] 姚志春,安琪.区域水资源生态经济系统冲突与协调[J].南水北调与水利科技,2011,9(4):77-80,86. DOI: 10.3724/SP.J.1201.2011.04077.
- [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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.001.
- [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. DOI: 10.14063/j.cnki.1008-9314.20180808.005.
- [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. DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2021.02.016.

- [5] 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.
- [6] 宋红丽, 薛惠锋, 张哲, 等. 经济-环境系统影响因子耦合度分析[J]. *河北工业大学学报*, 2008(3): 84-89. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdx.2008.03.024.
- [7] 王淑佳, 孔伟, 任亮, 等. 国内耦合协调度模型的误区及修正[J]. *自然资源学报*, 2021, 36(3): 793-810. DOI: 10.31497/zrzyxb.20210319.
- [8] XI X, POH K L. Using system dynamics for sustainable water resources management in Singapore[J]. *Procedia Computer Science*, 2013, 16: 157-166. DOI: 10.1016/j.procs.2013.01.017.
- [9] DAVIES E G R, SIMONOVIC S P. Global water resources modeling with an integrated model of the social-economic-environmental system[J]. *Advances in Water Resources*, 2011, 34(6): 684-700. DOI: 10.1016/j.advwatres.2011.02.010.
- [10] XU Z X, TAKEUCHI K, ISHIDAIRA H, et al. Sustainability analysis for Yellow River water resources using the system dynamics approach[J]. *Water Resources Management*, 2002, 16(3): 239-261. DOI: 10.1023/A:1020206826669.
- [11] 徐楠. 丝绸之路省会城市旅游经济与生态环境耦合协调研究[D]. 开封: 河南大学, 2016.
- [12] 田俏. 京津冀地区土地利用-生态环境-经济发展耦合协调发展研究[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2019.
- [13] 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. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201903002.
- [14] 杨红霞, 蔡昕. 基于WDO-PP模型的区域水资源系统与经济社会生态系统协调度评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(2): 68-75. DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2017.02.12.
- [15] 闻豪, 文凤. “一带一路”重点省份水资源-经济-生态环境耦合协调分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2019, 52(10): 870-877. DOI: 10.14188/j.1671-8844.2019-10-004.
- [16] 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.
- [17] 赵晨光, 马军霞, 左其亭, 等. 黄河河南段资源-生态-经济和谐发展水平及耦合协调分析[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2022, 20(4): 660-669, 747. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2022.0068.
- [18] 蔡文静, 夏咏, 赵向豪. 西北5省区“生态环境-经济发展-城镇化”耦合协调发展及预测分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2020, 41(12): 219-227. DOI: 10.7621/cjarrp.1005-9121.20201225.
- [19] 周成, 冯学钢, 唐睿. 区域经济-生态环境-旅游产业耦合协调发展分析与预测: 以长江经济带沿线各省市为例[J]. *经济地理*, 2016, 36(3): 186-193. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2016.03.025.
- [20] 凌立文, 余平祥. 广东省城镇化与生态环境耦合水平分析与预测[J]. *西北农林科技大学学报(社会科学版)*, 2016, 16(4): 138-145, 154. DOI: 10.13968/j.cnki.1009-9107.2016.04.20.
- [21] 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. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2020.12.016.
- [22] 韩瑞玲, 佟连军, 朱绍华, 等. 基于ARMA模型的沈阳经济区经济与环境协调发展研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 32-39. DOI: 10.13249/j.cnki.sgs.2014.01.010.
- [23] 张雪花, 郭怀成, 张宝安. 系统动力学-多目标规划整合模型在秦皇岛市水资源规划中的应用[J]. *水科学进展*, 2002(3): 351-357. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2002.03.015.
- [24] 左其亭, 韩春辉, 马军霞, 等. “一带一路”中国大陆区水资源特征及支撑能力研究[J]. *水利学报*, 2017, 48(6): 631-639. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20160819.
- [25] 张兆方, 沈菊琴, 何伟军, 等. “一带一路”中国区域水资源利用效率评价: 基于超效率DEA-Malmquist-Tobit方法[J]. *河海大学学报(哲学社会科学版)*, 2018, 20(4): 60-66, 92-93. DOI: 10.3876/j.issn.1671-4970.2018.04.010.
- [26] 邓铭江. 中国西北“水三线”空间格局与水资源配置方略[J]. *地理学报*, 2018, 73(7): 1189-1203. DOI: 10.11821/dlxb201807001.
- [27] 高楠, 马耀峰, 李天顺, 等. 1993—2010年中国入境旅游与进口贸易耦合关系时空分异研究[J]. *经济地理*, 2012, 32(11): 143-148, 161. DOI: 10.15957/j.cnki.jjdl.2012.11.025.
- [28] 左其亭, 赵衡, 马军霞, 等. 水资源利用与经济社会发展匹配度计算方法及应用[J]. *水利水电科技进展*, 2014, 34(6): 1-6. DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2014.06.001.
- [29] 姜磊, 柏玲, 吴玉鸣. 中国省域经济、资源与环境协调分析: 兼论三系统耦合公式及其扩展形式[J]. *自然资源学报*, 2017, 32(5): 788-799. DOI: 10.11849/zrzyxb.20160512.
- [30] 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. DOI: 10.5846/stxb202001180147.
- [31] 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.1004-6933.2022.05.012](https://doi.org/10.3880/j.issn.1004-6933.2022.05.012).

及影响因素研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020,

[32] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度

30(1): 120-128. DOI: [10.12062/cpre.20190832](https://doi.org/10.12062/cpre.20190832).

Simulation of coordinated development of water-economy-ecology system coupling in Beijing-Tianjin-Hebei region

WANG Fuqiang^{1,2}, ZHANG Meng¹, LYU Subing^{1,2}, ZHAO Heng^{1,2}, YING Zhuohui¹

(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: As an organic whole, the system of "water-economy-ecology" complements each other, and the coupled and coordinated development is the premise of realizing high quality regional development. However, as the problem of resource supply and economic development derailment gradually emerged, the phenomenon of multi-system imbalance and regional development imbalance became more serious, which restricted the high-quality development of the region.

In view of the imbalance and instability of water resources, economic society and ecological environment system in the Beijing-Tianjin-Hebei region in the future, a dynamic simulation model of "water-economy-ecological" system was constructed, and five scenarios were set up, including open source and reduce expenditure, economic development and environmental protection, to predict the development trend of water resources, economic society and ecological environment system indicators in the Beijing-Tianjin-Hebei region. The coupling coordination degree model was used to simulate the development trend of coupling coordination under different scenarios in the Beijing-Tianjin-Hebei region from 2020 to 2035.

The results show that under five scenarios from 2020 to 2035, the coupling coordination degree of water-economy-ecological system in Beijing, Tianjin and Hebei will all show an increasing trend, among which the coupling coordination degree of the continuation of the status quo will be the lowest, followed by the coupling coordination degree of the open source and expenditure reduction, economic development and environmental protection, and the comprehensive coordination degree will be the highest. It indicates that under the condition of maintaining the current development, the degree of coordinated development of water-economy-ecological system coupling in Beijing-Tianjin-Hebei region increases slightly but changes little. Only when water conservation and economic development are fully considered while environmental protection can regional coordinated development be promoted. Continuation of the status quo in 2035 Beijing, Tianjin and Hebei scenario coupled coordination development level all belong to the intermediate type coupling coordination, comprehensive coordination situation of Beijing and Tianjin coupling coordination development belongs to the good coupling coordination model, coupling due to economic development is relatively lagging in Hebei Province coordinated development is slow, still belong to the intermediate type coupling coordination, should pay attention to the integration of the Beijing-Tianjin-Hebei region development in the future.

In conclusion, the research results can provide a reference for the sustainable economic and social development of the Beijing-Tianjin-Hebei region.

Key words: water-economy-ecology system; system dynamics; coupling coordination degree model; development trend simulation; Beijing-Tianjin-Hebei region