

DOI: 10.20103/j.stxb.202208252434

李可欣, 曹永强, 范帅邦, 王菲, 周姝含, 任博. 东北三省“水-能源-碳”系统仿真模拟——基于系统动力学模型. 生态学报, 2023, 43(17): 6999-7011.
Li K X, Cao Y Q, Fan S B, Wang F, Zhou S H, Ren B. Simulation of water-energy-carbon in Northeast China based on system dynamics model. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(17): 6999-7011.

东北三省“水-能源-碳”系统仿真模拟 ——基于系统动力学模型

李可欣¹, 曹永强^{1,2,*}, 范帅邦³, 王 菲¹, 周姝含¹, 任 博¹

1 辽宁师范大学地理科学学院, 大连 116029

2 天津师范大学京津冀生态文明发展研究院, 天津 300387

3 东北财经大学公共管理学院, 大连 116025

摘要:水资源和能源消费量及碳排放制约区域发展水平, 也影响区域生态环境质量, 区域多要素资源耦合作用与协同管理成为近年来的研究热点。水资源、能源和碳排放三个系统通过不同的流程相互连接, 探究“水-能源-碳”系统耦合关系, 是区域探索绿色协调发展的重要基础。以东北三省为研究对象, 采用系统动力学研究方法, 从自然、社会、经济三个维度来探索水-能源-碳三者的关联模式。以 2001—2019 年东北三省的水资源、能源、碳排放现状为基础数据, 梳理三个子系统的耦合关系, 并对未来二十年其发展变化仿真模拟。结果表明: (1) 水资源、能源、碳排放在未来二十年均呈现增长的趋势, 水资源增长趋势最快, 在仿真情景 5 下, 与 2020 年相比 2040 年水资源、能源消费量和碳排放量分别增长 230.4%、210.7% 和 36.9%; (2) 决策变量对“水-能源-碳”系统的影响程度依次是清洁节能>产业调控>国内生产总值(GDP)增长率, 随着 GDP 增长率升高, 水资源和能源消耗量、碳排放量增加, 随着产业转型升级, 居民意识提高及清洁能源增加, 水资源和能源消耗量、碳排放量减少。在综合调控情景下, 未来水资源消耗量高于基础情景, 能源消耗量和碳排放量则得到了良好的控制; (3) 2020—2040 年, 水资源、能源消费量和碳排放量呈现强相关性, 纽带关系呈协同优化方向改善, 供需缺口减小, 有效的缓解了环境压力; (4) 情景 3 的能源结构调整和居民意识的提高可有效降低碳排放量, 情景 4 产业结构的调整对水资源和能源的影响较为明显。情景 5 权衡经济发展与节能节水以减少碳排放, 严格按照“双碳”目标, 将水资源、能源向较高质量发展的可持续发展方向推进, 更具参考性。研究结果有利于东北三省“水-能源-碳”系统可持续发展, 促进经济发展水平。

关键词:“双碳”目标; “水-能源-碳”系统; 系统动力学; 情景仿真; 东北三省

Simulation of water-energy-carbon in Northeast China based on system dynamics model

LI Kexin¹, CAO Yongqiang^{1,2,*}, FAN Shuaibang³, WANG Fei¹, ZHOU Shuhan¹, REN Bo¹

1 School of Geographical Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China

2 Academy of Eco-civilization development for Jing-Jin-Ji megalopolis, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China

3 School of Public Administration, Dongbei University of Finance and Economics, Dalian 116025, China

Abstract: Water resources and energy consumption and carbon emissions restrict regional development and affect regional ecological and environmental quality, the coupling effect and collaborative management of regional multi-factor resources have become a research hotspot in recent years. Water resources, energy, and carbon emission systems are interconnected through different processes. Exploring the coupling relationship of water-energy-carbon system is an important basis for

基金项目:辽宁省兴辽英才项目(XLYC2008033, XLYC2007111); 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室(清华大学)2021 年对外开放基金项目(sklhse-2021-A -06); 国家自然科学基金项目(52079060)

收稿日期:2022-08-25; **网络出版日期:**2023-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: caoyongqiang@tjnu.edu.cn

regional exploration of green and the coordinated development. This paper takes three northeastern provinces as the research objects, adopts the system dynamics research method to explore the water-energy-carbon correlation model from the natural, social and economic dimensions. Based on the current situation of water resources, energy, and carbon emissions in the three northeastern provinces from 2001 to 2019, the coupling relationship of the three subsystems is sorted out, and the development and change of the next two decades is simulated. The results show that: (1) water resources, energy, and carbon emissions will show an increasing trend in the next twenty years, and water resources will show the fastest growing trend. Under scenario 5, compared with 2020, water resources, energy and carbon emissions will increase by 230.4%, 210.7% and 36.9% in 2040, respectively. (2) The degree of influence of decision variables on the water-energy-carbon system is in the order of clean energy conservation > industrial regulation > GDP growth rate. GDP growth rate is positively correlated with system change, while the industrial structure and residents' consciousness are negatively correlated with the system. In the comprehensive regulation scenario, the future water consumption is higher than the base scenario, while the energy consumption and carbon emissions are well controlled. (3) From 2020 to 2040, there is a strong correlation between water resources, energy consumption and carbon emissions, and the link is improved in the direction of collaborative optimization. The gap between supply and demand is reduced, which effectively alleviates environmental pressure. (4) In scenario 3, the adjustment of energy structure and the improvement of residents' awareness can effectively reduce carbon emissions. In scenario 4, the adjustment of industrial structure has a significant impact on water resources and energy. the scenario 5 balances economic development with energy saving and water saving to reduce carbon emissions, strictly follows the "dual carbon" goal, and promotes the sustainable development direction of higher quality development of water resources and energy, which is more reference. It is conducive to the sustainable development of the water-energy-carbon system in the three northeastern provinces and promotes the level of economic development.

Key Words: "dual carbon" targets; water-energy-carbon system; system dynamics; scenario simulation; the three northeast provinces

能源和水资源是经济发展的基础性资源,这些资源的过度利用加剧供需矛盾,同时也造成环境污染问题。人类社会在快速发展的同时使用大量化石燃料,特别是工业革命时代,大规模的二氧化碳排放到大气中加剧全球变暖^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次气候变化评估报告显示,2011—2020 年全球表面温度要比 1850—1900 年上升 1.09℃。碳排放造成全球变暖的影响在未来数百到千年的时间尺度上是不可逆的^[2],这给国际社会带来了新的挑战,各个国家为此作出响应。2020 年习近平总书记指出:中国预计在 2030 年前出现碳达峰,努力于 2060 年前实现碳中和。中国既是能源生产大国,又是能源消费大国^[3],随着温室效应增加,能源生产产生的碳排放有所降低,但 2020 年中国碳排放仍高达 29%^[4],而水资源呈现“南多北少”的特点,地区分配不均衡,北方耕地多^[5],水资源占比仅为 16%,严重影响具有碳汇功能的植物、农作物等生长发育,也制约着能源的开采和利用,水-能源-碳在一定程度上共同影响各地的可持续发展。因此,从全国角度来看,中国作为拥有 14 亿人口的全球第二大经济体,水-能源-碳不协调的现状成为制约国家高质量发展的“瓶颈”^[6]。东北地区是我国重要的重化工业基地,一直以来面临着水资源短缺,能源枯竭的问题^[7-8],同时,东北三省碳排放压力不容忽视,作为研究区对于推动中国工业基地低碳可持续发展具有重要意义。

伴随着我国“双碳”目标的提出,水-能源-碳关联研究成为当前的研究热点。现有研究已经初步证明,水-能源-碳三者之间存在密切的联系,一方面能源的产生需要水,同时水的提取、处理和分配相关的各种过程都需要能源^[9-13]。另一方面能源使用和废水处理过程释放温室气体^[14-15],气候变化也会导致的水资源可用性变化^[16]。为了实现可持续性和减少包括碳排放在内的环境影响,全面理解水-能源-碳之间的关系至关重要^[17-18]。从研究内容上来看,国外主要从水-能源-碳关联关系及资源消耗方面入手来进行研究,G.Venkatesh^[19]等比较了 Nantes、Oslo、Turin 和 Toronto 四个城市供水系统的新陈代谢,发现:地理、气候、技术

和社会因素对城市水-能源-碳发展有重要影响。Elkhafif^[20]等测算了 Ontario 能源供应组合的水足迹和碳足迹,研究发现安大略省需要进行水和碳排放协调以确保能源与水之间的可持续发展。国内主要从经济社会可持续发展角度出发探讨“水-能源-碳”之间的耦合关系,同时将气候变化、水资源、绿色低碳等研究考虑进去。李增^[17]探究唐山市能源消费影响下的碳排放和水资源消费趋势预测以及如何实现唐山市低碳与节水发展。Sheng 等^[21]研究了北京和上海的水资源、能源和碳排放的关系及其环境效应。Meng 等^[22]提出受到城市结合部或城市的系统边界不明确和城市内部结构不精确限制,城市水-能源-碳作为一个整体进行协同和权衡的关联分析相对较少。Chen 等^[23]提出了一个交互式框架来评估区域间的水-能源-碳关系,建立了一个区域间投入产出模型,以考虑与能源有关的水足迹,与水相关的能源足迹和与水相关的碳足迹。Duan 等^[24]以北京为例,分析了北京能源系统和水系统下的水-能源-碳关系,建立一个城市尺度的水-能量-碳关系模型框架。从研究方法上来看,主要有:一是自上而下的投入产出模型(MRIO 模型),该方法简洁直观,能够揭示经济活动各环节的内在联系,但用到的投入产出表,其编制过程仍有创新空间^[25]。田沛佩^[7]利用多区域投入产出模型分析中国不同时段消费水足迹、能源足迹和碳足迹变化趋势,为降低中国水-能源-碳环境足迹,实现可持续发展提供依据。二是自下而上的生命周期法(LEA 模型),该方法强调系统的整体性,但对数据的依赖性较高,系统边界划分难统一^[26]。M. Carmen Valdez^[27]利用生命周期法比较了墨西哥城城市水网提供的建筑与雨水收集系统不同配置下的温室气体排放和能源消耗以于改善墨西哥城的水资源管理。三是系统动力学(SD 模型),系统动力学是一种成熟的量化系统交互中复杂反馈的方法,对于研究复杂系统的关联关系量化和系统的结构具有独特的优势,能处理高阶项、非线性、多重反馈的系统问题,揭示内部因果关系,但对各因素相互关系的抽象量化的精度要求较高^[28]。Chhipi-Shrestha 等^[29]建立了城市饮用水系统的系统动力学模型,并确定了 Spearman 相关性,研究了水、能源、碳之间的关系,发现它们之间存在显著的相互联系。此外,还有远程能源替代计划系统模型,供应链网络等多种方法^[30]。

随着全球范围内水资源危机、能源危机和气候变暖挑战,导致资源冲突日益凸显^[31]，“水-能-碳”系统的协调与服务功能退化问题显现,国内外研究逐渐从“水-能”“能-碳”“水-碳”关系的研究向“水-能-碳”关系研究转向,作为国家战略的“双碳”目标、对“水-能-碳”的协同研究要力求尽发挥协同效益,从而达到协同节约资源的目的。目前对于“水-能-碳”关联问题的研究视角多数趋于宏观,忽略了“水-能源-碳”关系在生产、转移和消费过程中的定量关系和资源流分析^[32]。因此,有必要协同研究“水-能-碳”耦合关系,实现可持续发展。东北三省仍以能源产业、重化工业为产业核心,传统产业的能源和水资源消耗产生的碳排放压力较大,产生了复杂的交织关系^[33]。由此可见,东北三省是水资源、能源、碳排放重要交互区,是开展“水-能-碳”研究的典型区域。此种背景下,厘清东北三省“水-能-碳”耦合关系,探究水资源、能源和碳排放结构调整方向及其管理模式,对缓解东北三省“水-能-碳”耦合系统压力有重要意义。基于碳排放数据的可获取性,选择 2001—2019 年作为研究期。首先探明东北三省水资源、能源、碳排放现状,梳理三个领域的耦合关系,其次利用系统动力学,从自然、社会、经济三个维度来探索水-能源-碳三者的关联模式,最后仿真模拟 2020—2040 东北地区水、能源以及碳排放情况,并对不同发展情景下的资源需求情况做出预测,以便为东北地区的水-能源-碳的综合管理政策的制定提供参考。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 东北三省水-能源-碳现状

东北三省包含辽宁、吉林、黑龙江三个省(图 1),是我国重要的能源工业基地。该区地处寒温带、中温带湿润半湿润气候区,年平均气温 $-5\sim-10^{\circ}\text{C}$,年降雨量 500—800mm,主要集中在 7—9 月^[34]。

水资源现状:2019 年东北三省水资源开发利用率为 33.3%,由于东北三省以重工业为主,工业、农业用水较多,对水资源需求较高,存在明显的供需缺口,造成水资源短缺。2019 年东北三省水资源量 2273.52 亿 m^3 ,其中辽宁省水资源严重匮乏。

能源现状:东三省作为中国最早的工业基地,能源开采历史悠久,2019 年能源生产量达 8951.3 万吨标准煤,能源消耗 43455.6 万吨标准煤,其中能源供暖占据很大一部分,占全国总量的 8.9%,是能源生产消费高值区。

碳排放现状:东北三省作为老工业基地,碳排放量较高,从统计数据上看,2001—2019 年东北三省碳排放量先增加后减少,单位国内生产总值(GDP)碳排放呈下降趋势。2019 年东三省碳排放量为 11.67×10^4 万 t,占全国碳排放的 9.5%。

水-能源-碳系统中,水-能源是两个相互联系、相互作用的子系统,如图 2 所示,它们之间通过不同途径相互联系,用水过程和水处理过程中消耗能量,同时能源消费过程中也会消耗水资源,而碳排放作为产出系统,主要取决于水、能源等要素之间相互需求的类型、能源结构等^[35—36]。在“双碳”目标下,探究东北三省水-能源-碳三元的时空匹配程度对可持续发展与资源的可持续利用的影响。

1.2 系统动力学模型构建

1.2.1 水-能源-碳(WEC)系统动力学研究边界

水-能源-碳关系受社会、经济、环境等多方面因素的影响,其内部的联系相对复杂。本文将东北三省行政区作为研究区边界,从“双碳”目标出发,从水资源系统的用水和排水、能源系统的生产和消费角度计算碳排放,探究水、能源、碳排放协调发展方案(图 3)。

1.2.2 WEC 系统动力学模型构建

设置模型的初始时间为 2020 年,结束时间为 2040 年,时间步长为 1a,模型包括水资源、能源和碳排放 3 个内部子系统及经济社会、环境 3 个外部子系统,建立系统流图,如图 4 所示。

(1)水资源子系统:水资源子系统将从供水和用水的角度进行分析研究。包括生活用水、单位能源耗水量、单位 GDP 用水、人均生活用水等变量。变量的选取不仅能够反映水资源自身发展,还通过能源耗水量和水资源利用过程中碳排放分别与能源系统和碳系统有着反馈关系。

(2)能源子系统:能源子系统将从能源投资、消费结构及污染排放的角度进行分析研究。包括人均生活能源生产量、煤炭消费占比、工业用水占比、各产业能源消费量等变量。变量的选取不仅能够反映能源自身发展,且通过能源耗水量和能源消费碳排放分别与水资源系统和碳系统有着反馈关系。

(3)碳系统:碳子系统将从能源、水资源碳排放和 GDP 碳排放的角度进行分析研究。包括个用水过程碳排放量、能源消耗过程中碳排放量、碳排放系数等变量。各变量能够很好的反映碳排放现状水平和未来发展趋势,且能分别反映水资源利用、处理和能源消费过程中的碳排放量。

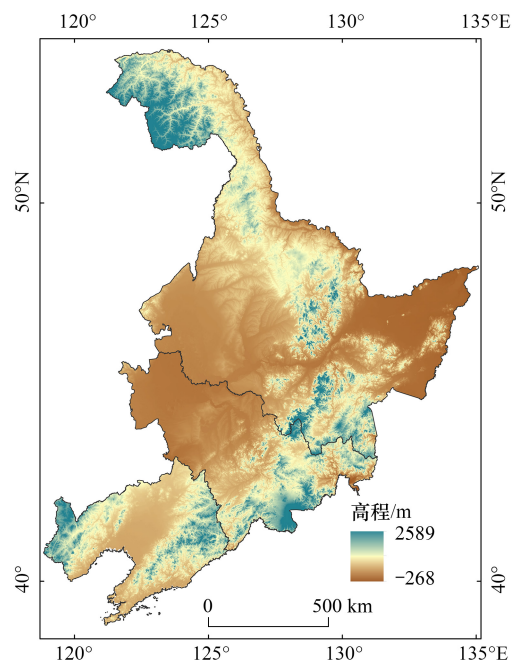


图 1 研究区位置分布示意图

Fig.1 Schematic diagram of location distribution in the study area

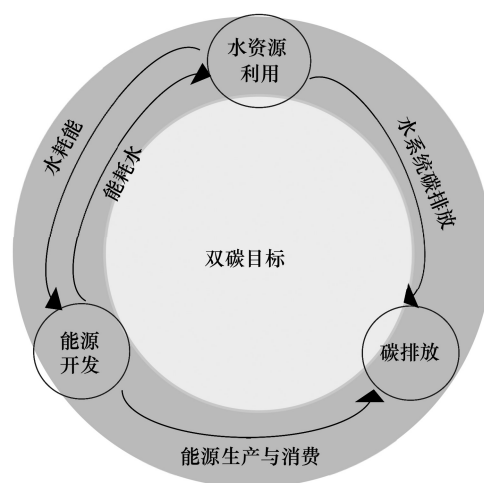


图 2 水-能源-碳耦合系统

Fig.2 Water-energy-carbon coupling system

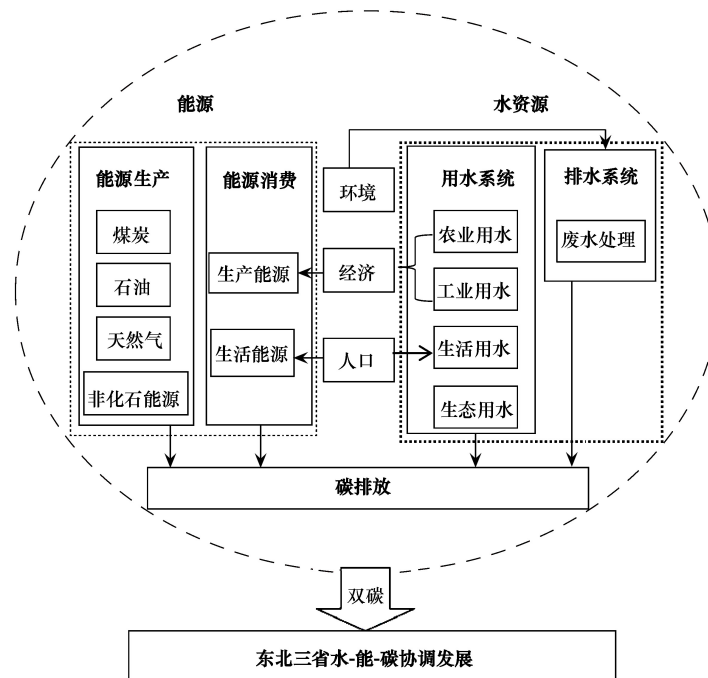


图3 “水-能源-碳”系统研究框架

Fig.3 Research framework of “water-energy-carbon” system

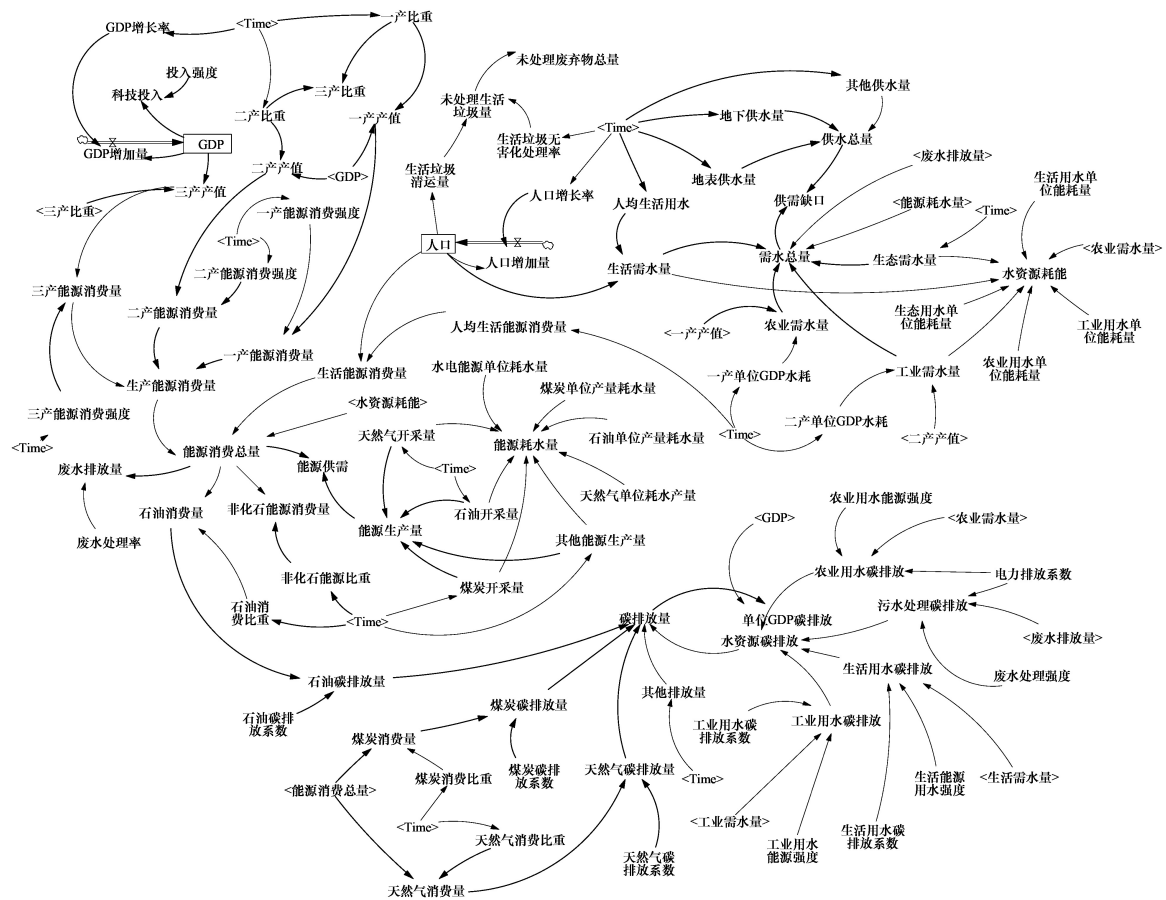


图4 系统流图

Fig.4 System flow diagram

GDP: 国内生产总值 Gross domestic product

<http://www.ecologica.cn>

(4) 经济系统:经济子系统选取三个产业产值和科技投入等变量影响能源消费和农业用水、工业用水,进而影响碳排放量。

(5) 社会系统:以人口为主要决策变量,通过人均能源消费和人均生活用水量联系水资源子系统和能源子系统。

(6) 环境子系统:环境子系统选取废水处理率、生活垃圾无害化处理率等变量构成联系水资源子系统和能源子系统。

1.2.3 模型方程

东北三省水资源相关数据来源于 2001—2019 年各省水资源公报和《中国环境统计年鉴》,能源相关数据来自《能源统计年鉴》;碳排放量直接引用 CEAD 数据库;其他经济及社会等相关数据来源于《中国统计年鉴》,部分数据缺少通过 SPSS 软件的滑动平均法进行补充^[7]。

模型涉及的变量类型主要有四种:状态变量、速度变量、辅助变量和常量^[28],对各变量之间的关系进行归纳,同时参考相关研究^[28],确定本文的模型变量,针对部分关键变量列出模型方程如表 1 所示。

表 1 东北三省水-能源-碳(WEC)系统评测指标
Table 1 WEC system evaluation indexes in the three northeastern provinces

指标 Indicators	单位 Unit	计算方法 Calculation method
人口总量 Total population	万人	INTEG(人口变化量,10569.6)
国内生产总值 GDP	亿元	INTEG(GDP 增量,9275.95)
第三产业产值 Output value of tertiary industry	亿元	GDP×三产比重/100
第二产业能源消费强度 Energy consumption intensity of the secondary industry	t/万元	WITH LOOHUP(科技投入, ((2001,0)-(2019,3)),(2001,1.98),(2002,2.03),(2003,1.83), (2004,1.99),(2005,1.98),(2006,1.93),(2007,1.87),(2008,1.93), (2009,1.83),(2010,1.68),(2011,1.53),(2012,1.56),(2013,1.65), (2014,1.49),(2015,1.65),(2016,1.62),(2017,1.7),(2018,1.51), (2019,1.48))
第一产业能源消费量 Primary industry energy consumption	万吨标准煤	第一产业产值×一产能源强度
生产能源消费 Production energy consumption	万吨标准煤	一产能源消费量+二产能源消费量+三产能源消费量
煤炭碳排放系数 Carbon emission factor of coal	—	0.7476
石油碳排放量 Petroleum carbon emission	万 t	石油碳排放系数×石油消费量
碳排放量 carbon emission	万 t	天然气碳排放量+煤炭碳排放量+石油碳排放量+农业用水碳排放量+ 工业用水碳排放量+生活用水碳排放量+污水处理碳排放量
农业用水碳排放量 Carbon emissions from agricultural water use	万 t	农业用水量×农业用水能源强度×电力排放系数
水资源耗能 Energy consumption of water resources	万吨标准煤	农业用水单位能耗×农业用水+工业用水单位能耗×工业用水+生活用 水单位能耗×生活用水+生态用水单位能耗×生态用水
能源消费总量 Total energy consumption	万 t	生产能源消费量+生活能源消费量
工业用水量 Industrial water consumption	亿 m ³	第二产业单位 GDP 水耗×第二产业产值
供水总量 The amount of water supply	亿 m ³	其他供水量+地下供水量+地表供水量

2 实证分析

2.1 模型验证

本文选取 2001—2019 年历史数据来验证“水-能源-碳”系统动力学模型的有效性,对比 GDP、能源消费总

量、碳排放量和水资源需水量四个指标,参考前人的相关研究,历史值和预测值误差在 20%以内,则认为该模型有效^[37]。误差计算公式如下:

$$\theta = \frac{|X_1 - X_2|}{X_2} \quad (1)$$

式中, θ 为误差值, X_1 为预测数值, X_2 为实际数值。

经过验证发现,水资源需水量和人口模拟精度高,误差均控制在 1%以内,GDP 和能源消费总量的模拟值均在 10%以内,部分数据结果如表 2 所示,因此证明模型有效。

表 2 模型验证
Table 2 Model verification

年份 Year	国内生产总值 GDP			水资源需水量 Water resource requirement			人口 Population			能源消费总量 Total energy consumption		
	预测值	实际值	误差/%	预测值	实际值	误差/%	预测值	实际值	误差/%	预测值	实际值	误差/%
2015	42157.5	41918.3	0.57	628.52	629.6	0.17	10748.5	10703.8	0.42	46528.5	47479.2	2.00
2016	41913.0	42714.5	1.88	619.90	620.6	0.11	10703.8	10676.7	0.25	45761.5	47109.8	2.86
2017	42709.3	44928	4.94	609.75	610.8	0.17	10627.9	10601.0	0.25	44761.8	47871.9	6.50
2018	44921.7	47609.8	5.65	591.22	593.9	0.45	10601.0	10573.9	0.26	48316.6	47656.1	1.39
2019	47603.5	50249.0	5.26	554.90	556.3	0.25	10573.8	10543.2	0.29	51048.2	48766.1	4.68

2.2 情景设定

目前,2019 年东三省第一产业增加值占 14.1%,第二产业增加值占比 32.7%,第三产业增加值占 53.2%。从全国人均 GDP 水平(8.1 万元/人)来看,可以发现,东北三省整体还是较低的,GDP 增速缓慢低于全国平均水平^[38]。在过去东北三省重工业发展导致国有企业大量存在,这也限制了民营企业发展。由于民营企业不活跃,产业结构不合理,从而进一步限制了经济的持续增长,GDP 增速放缓也是在情理之中的^[39],加之随着新兴产业的发展,传统制造业也开始走下坡路,导致东北三省产能严重过剩^[40]。相对于长三角和珠三角一带,新行业迅速成为年轻人心中的首选,这也导致东北三省人才和劳动力渐渐流失,从长远来看,主要还是需要产业转型升级^[41]。基于此,国家批复了全面振兴东北的实施方案,将从企业转型、科技发展、培育新兴产业等多个方面入手,再结合国家“十四五”规划对减排提出更强有力的控制目标,计划 2030 年单位 GDP 碳排放量降低 18%^[42]。因此,通过对变量的灵敏度检验和东北三省《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》中相关政策规划确定。选取 GDP 增长率、产业结构、能源结构和居民环保意识作为调控变量,并参考相关文献,设置变量在合理的范围浮动,并不代表实际值。

情景 1:自然增长:各决策变量保持现在的发展趋势。

情景 2:经济调控:GDP 增长率提高到 8%。

情景 3:清洁节能:2040 年人均能源消耗量和人均水资源消耗量各降低 20%,煤炭比重下降到 45.5%,石油占比下降到 19.8%,天然气比重提到 18.7%,非化石能源提高到 16.1%。

情景 4:产业调控:第一产业保持不变,产业比重由第二产业向第三产业流动,第二产业比重下降 10%,第三产业比重增加 10%。

情景 5:综合调整:GDP 增长率提高到 8%;人均能源消耗量和人均水资源消耗量降低 20%,煤炭比重下降到 45.5%,石油占比下降到 19.8%,天然气比重提到 18.7%,非化石能源提高到 16.1%;第二产业比重下降 10%,第三产业比重增加 10%。

3 仿真模拟分析

通过情景设定,重点分析东北三省水资源消耗量、能源消费量和碳排放量的变化情况,并以三个省种情景的平均值为代表,分析辽宁、吉林和黑龙江的具体变化,以此明确发展方向,探究如何达到节能低碳发展要求。

3.1 水资源消耗量变化趋势

如图 5 所示,从仿真的五个情景看,东三省 2020—2040 年水资源消费量均呈上升趋势,2020 年水资源消耗量为 520.38 亿 m^3 ,到 2040 年,仿真结果均在 2020 年的 3 倍以上,水资源消耗量为情景 2>情景 5>情景 1>情景 3>情景 4。2040 年在情景 5 下水资源消耗较 2020 年增长 230.4%,相比于情景 1 工业用水和农业用水随之升高,因此水资源消耗增长最高,情景 2 中水资源消耗量达到 1538.38 亿 m^3 ,GDP 增长率提高导致三个产业产值增加,从而情景 2 水资源消耗量高于情景 1。情景 3 下,居民意识的提高可有效减少水资源增加速率,2040 年,相比于情景 1 水资源消耗量略有下降,情景 4 水资源消耗量比情景 1 减少 22.22 亿 m^3 ,节水效果明显。从东北三省各省份角度看,辽宁省水资源消耗高于其他两个省,年均增长 12.46 亿 m^3 ,其次为黑龙江,年均增长 11.17 亿 m^3 ,吉林水资源消耗量年均增长 7.92 亿 m^3 。

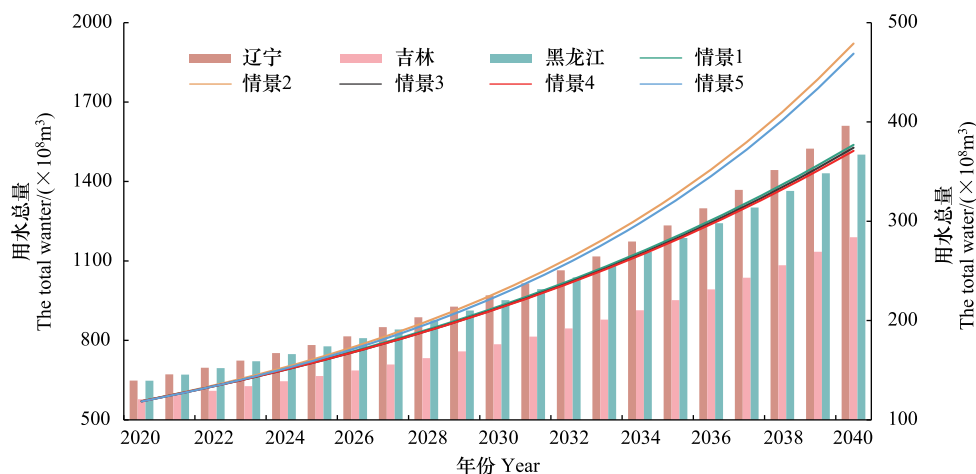


图 5 2020—2040 年东三省水资源消费量变化

Fig.5 Change of water resources consumption in The Three Northeastern Provinces from 2020 to 2040

可以看出,在综合调控下,保持现有的科技水平,随着经济的发展,未来水资源消耗并不会低于现在的发展水平,因此在经济发展的同时,应加大科技投入,充分提高水资源利用效率。

3.2 能源消耗量变化趋势

如图 6 所示,从仿真的五个情景看,能源消费量呈上升趋势,相比于 2001—2019 年,未来二十年能源消耗增速减缓。按照当前的发展水平,能源消费以每年 3375.70 万吨标准煤的速率增长,2040 年增长到 87931.30 万吨标准煤。其他 4 种情景对比情景 1 发现:2040 年情景 2 的能源消费量为 110896 万吨标准煤,单一的提高经济消耗能源消耗,引起能源消费量高于情景 1。而在情景 3 中,居民的消费意识提高和能源结构的调整,可减缓能源消耗速率,2040 年,比情景 1 节约 998.30 万吨标准煤的消耗量。从情景 4 可以看出,产业结构对能源消耗量的影响程度很大,相对于情景 1 有效降低能源 7668.0 万吨标准煤,主要是由于第二产业在发展的过程中,需要消耗大量的能源,第二产业比重的降低导致能源消耗量减少,因此应加快产业结构转型,减少能耗。综合调控情景下,能源以每年 4163.90 万吨标准煤的速率增长,2040 年能源消耗较 2020 年相比,增长了 210.7%,比情景 1 增多 16906 万吨标准煤。根据东北各省《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》要求从调整产业结构和能源结构等入手,有效推进节能降耗。其中到 2025 年,全省非化石能源消费比重提高到 12.5%、煤炭消费比重下降到 62%。在综合调控下,本模型中 2025 年,煤炭消费比重为 60.35%,非化石能源比重提高到了 12.9%,符合绿色发展要求。从东北三省各省份角度看,辽宁省工业比重大,能源消费量远高于其他两省,是黑龙江省能源消费量的 1.5 倍左右,是吉林省能源消费量的 3.5 倍左右,年均增长 2103.2 万吨标准煤。

综上所述,及时转变产业结构可有效降低能源消费增长速度,缓解能源紧张,缩小能源缺口。

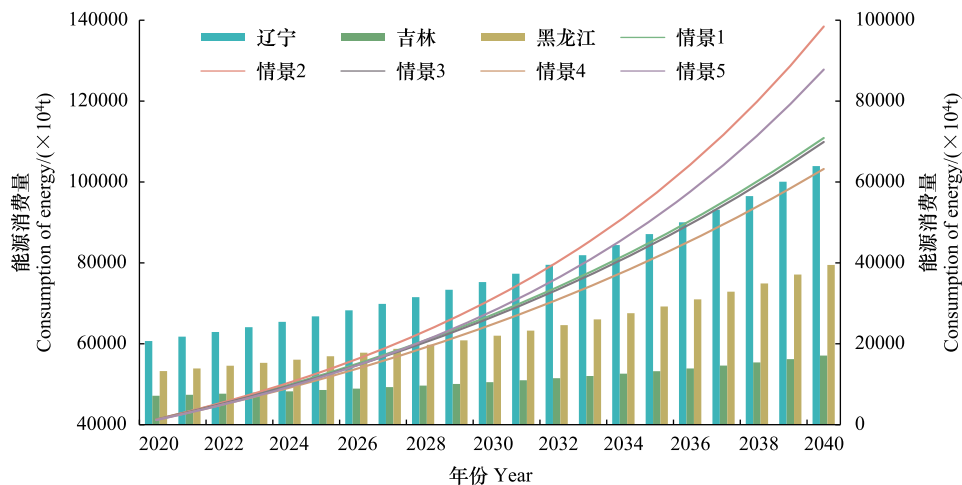


图6 2020—2040年东三省能源消耗量变化

Fig.6 Change of energy consumption in The Three Northeastern Provinces from 2020 to 2040

3.3 碳排放变化趋势

如图7所示,2020—2040年东三省碳排放量呈增长趋势,从仿真的五个情景看,碳排放量情景2>情景1>情景5>情景4>情景3。情景2经济发展的生产活动和社会活动增加,使得2040年碳排放量快速提高,是2020年的1.54倍,其值达到180741.2万t。因此,可以说明,单一的发展经济,而不注重节能减排,将产生大量的碳排放。对比情景1发现,情景3的发展方向可有效减少碳排放量,可降低12709万t碳量,情景4模拟预测下,碳排放量增长趋势缓和,与2020年相比碳排放量增加2倍。情景5下,2040年较2020年相比,碳排放量仅增长36.9%,比情景1的碳排放量放少2921.5万t。从东北三省各省份角度看,辽宁省碳排放年均增长1230.8万t,吉林年均增长766.7万t,吉林年均增长282.4万t碳排放量,三省碳排放速率均下降。

综上所述,从3个决策变量来看,对碳排放友好发展的影响程度依次是:清洁节能>产业结构>GDP增长率。基于国家“十四五”规划要求,情景3利于实现低碳目标。因此,能源结构的转变和居民节能意识的提高是未来碳减排工作的重点方向。

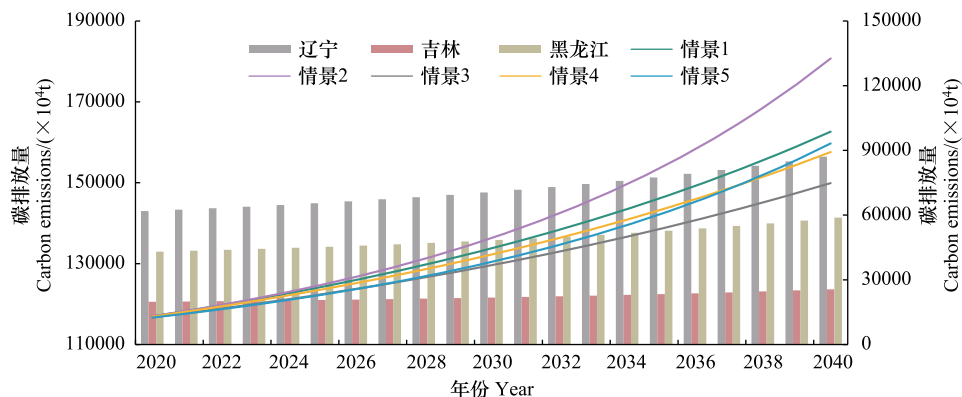


图7 2020—2040年东三省碳排放量变化

Fig.7 Change of carbon emissions in The Three Northeastern Provinces from 2020 to 2040

3.4 水-能源-碳纽带趋势变化

根据以上对水-能源-碳仿真模拟的结果,参照发展水平较好的情景5来探究2020—2040年三个子系统的纽带关系及趋势变化,如图8所示,东北三省水资源、能源、和碳排放在全国所占比重分别为7.8%,8.4%和

9.5%^[43],碳排放量较高,是“水-能源-碳”系统的主导因素,因此将其作为自变量,水资源和能源消耗量为因变量。

2020—2040 年东三省水-能源-碳三要素相关性 R^2 为 0.9,即三变量之间呈强相关。未来用水总量、能源消费量和碳排放量均呈逐年上升趋势,2020—2025 年增长速度相对缓慢,2025 年以后增长速度加快。2040 年较 2020 年水资源和能源消费量增幅均达 3 倍多;碳排放量增幅近 36.92%。但总体来看,尽管从总量上来看三者均高于现在的发展水平,但从供需缺口,根据情景设置,居民意识提高,调整能源结构和产业结构,人均用水和人均耗能减少,耗水量较大的第二产业比重减少,导致资源供需缺口减小。东三省水-能源-碳呈现强相关性,以综合情景 5 为例,相比 2020 年,2040 年单位 GDP 水耗、单位 GDP 能耗和单位 GDP 碳排放均有明显下降,分别下降 8.7%、8.4%、36.8%，“水-能源-碳”系统向着协同优化方向改善。

3.5 耦合与协同分析

耦合是指两个或两个以上系统彼此相互影响。其包括权衡关系,即随着其中某个系统服务的供给,其它系统数量趋于减少^[44];协同关系是指两种或多种系统服务同时增强^[45]。经济增长、产业结构优化与提高环保意识是推动东三省生态环境高质量发展的重要途径,情景分析是目前权衡与协同研究最为常见的一种方法,通过制定优化发展情景,来分析系统之间的耦合关系和动态变化^[46]。

情景 2 在情景 1 的基础上提高经济发展速率。情景 2 对各子系统的影响主要是:GDP 增长率加快-各产业产值增加-生产能源消费量增加-碳排放量增多,同时各产业产值增加-农业、工业用水量增加-需水量加大-废水排放增加,因此水资源供需缺口加大,环境污染加剧,违背绿色发展理念。

情景 3 在情景 1 的基础上提高居民意识,各个子系统之间影响如下:人均生活能源消费量和人均生活用水量减少-能源和水资源消耗量-碳排放量减少-生态环境改善,提高非化石能源结构-能源结构优化碳等污染排放减少-生态环境改善,此方向对低碳排放效果明显。

情景 4 在情景 1 的基础上降低第二产业比重,提高清洁能源比重,走可持续发展路线,影响效果如下:第二产业比重降低-工业耗水降低-水资源供需矛盾缓解。此方向对水资源系统影响较大,其他两个系统影响较小情景 5 结合情景 2、情景 3 和情景 5,将经济发展与节约资源结合,即在发展经济的同时提高能源和水资源利用率,更加符合发展理念。根据图 7 显示,影响效果如下:综合调控-能源结构优化-水资源利用率提高-废水排放减少-CO₂等污染排放降低-生态环境改善。

根据以上对比 5 个情景分析发现,情景 3 的能源结构调整和居民意识的提高可有效降低碳排放量,情景 4 产业结构的调整对水资源和能源的影响较为明显,但情景 5 综合多种决策变量,较其他情景相比,更加立足于东北三省的实际发展情况,权衡经济发展与节能节水以减少碳排放,严格按照“双碳”目标,将水资源、能源向较高质量发展的可持续发展方向推进,因此,情景 5 更具参考性。

4 结论与讨论

4.1 结论

本文利用系统动力学模拟分析了东北三省 2020—2040 年水资源和能源消耗量、碳排放的变化趋势,为节

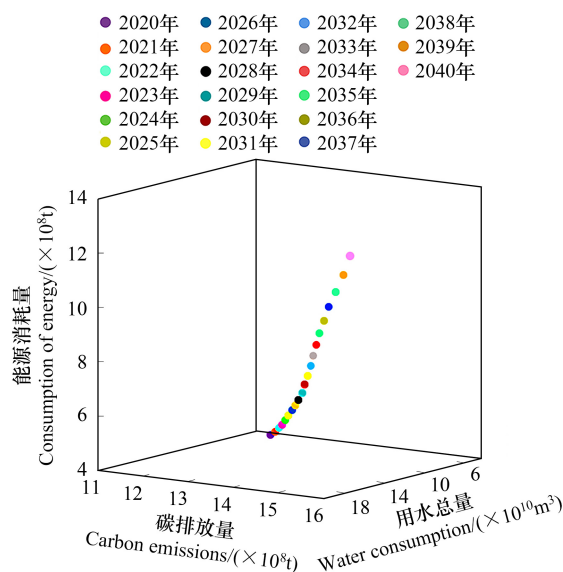


图 8 “水-能源-碳”纽带关系变化趋势

Fig.8 Variation trend of the "water-energy-carbon" bond

能减排的提供发展方向。主要结论如下:

(1)水资源和能源消耗量、碳排放量在研究期内均呈现增长的趋势,水资源消耗增长速度最快,在仿真情景 5 下,与 2020 年相比,水资源和能源消费量、碳排放量分别增长 230.4%、210.7%和 36.9%。2040 年水资源消耗量预计超过 1921.29 亿 m^3 ,能源消费量超过 103000 万吨标准煤,碳排放量也将达到 149900 万 t 以上。

(2)决策变量对水-能源-碳的影响程度依次是:清洁节能>产业调控>GDP 增长率,随着 GDP 增长率升高,水资源和能源消耗量、碳排放量增加,随着产业转型升级,居民意识提高及清洁能源增加,水资源和能源消耗量、碳排放量减少。从仿真结果来看,在经济保持现有的增长速度下,产业结构的调整才是控制水、能消耗和碳排放的有效措施,而在综合调控情景下,未来水资源消耗量高于基础情景,能源消耗量和碳排放量则得到了良好的控制。

(3)2020—2040 年,东三省水-能源-碳呈现强相关性,纽带关系呈协同优化方向改善,资源利用率提高和供需缺口减小,可有效缓解环境压力,利于“水-能源-碳”系统可持续发展,促进经济发展水平。

(4)情景 3 的能源结构调整和居民意识的提高可有效降低碳排放量,情景 4 产业结构的调整对水资源和能源的影响较为明显,情景 5 立足于东北三省的实际发展情况,权衡经济发展与节能节水以减少碳排放,严格按照“双碳”目标,将水资源、能源向较高质量发展的可持续发展方向推进,因此,情景 5 更具参考性。

4.2 讨论

(1)本文在研究水资源能耗和能源耗水时考虑的是直接能耗、直接水耗,未考虑虚拟资源,以避免资源区域之间流动造成资源核算不清晰,便于探讨水-能关联状况及其对碳排放的影响。同时需要注意的是:对于用水系统而言,用水只是碳排放的中间过程,其用水过程所消耗的能源才是引起碳排放的主要原因,因此不同用水过程水资源耗能存在差异。碳系统中重点关注碳排放,主要包括二氧化碳、甲烷、臭氧、氢氟碳化物等温室气体的排放^[47],具体考量了能源消耗过程中产生的碳排放量和水资源消耗和处理过程中的碳排放量。

(2)从研究结果来看,在“双碳”目标和不断变化的国内外环境下,“水-能源-碳”系统也将处于动态演变过程中^[48],而对于系统协调发展,情景 3 中能源结构调整可有效减少碳排放,因此今后未来东北三省应加快能源结构向绿色低碳转型,以清洁能源开发为根本,推动太阳能、风能、水能等能源的综合利用,走清洁能源路线。情景 4 调整产业结构,降低第二产业占比,增加第三产业,可以有效控制能源和水资源消耗,因此今后应加快产业升级,提高节能节水力度,防止资源的过度浪费^[49]。同时,根据国家发展规划,结合自身发展情况,在本模型中,情景 2 中经济发展和资源消耗之间存在因果关系,因此,在 GDP 增长率提高后应将更多的资金投入积极促进和参与碳交易市场活动,以实现区域可持续发展^[50—51]。

(3)由于本文需要明确系统之间的因果关系,需要详细获取每个变量数据并进而确定能源强度、碳排放强度参数较为困难。因此主要参考相关研究成果,未考虑时间尺度上的变化。同时,由于涉及变量较多,难以综合考虑所有变量不同的组合情况,所以在默认能源强度不变的情况下,本文结合规划纲要选择对系统影响最为明显的决策变量设计情景,无论哪种方案都需要结合实际发展情况,并且加强居民环保意识,实现水、能源、碳三者的良性循环。

参考文献 (References):

- [1] 张抗,苗森,张立勤.“双碳”目标与中国能源转型思考(一)——能源转型与碳达峰、碳中和.中外能源,2022,27(3):1-6.
- [2] 周天军,陈梓明,陈晓龙,左萌,江洁,胡帅.IPCC AR6 报告解读:未来的全球气候——基于情景的预估和近期信息.气候变化研究进展,2021,17(6):652-663.
- [3] 李代超,卢嘉奇,谢晓苇,虞虎,李元,吴升.碳中和视角下基于主体功能区分类约束的国土空间分区优化模拟——以福建省为例.生态学报,2022(24):1-16
- [4] 杨振,李泽浩.中部地区碳排放测度及其驱动因素动态特征研究.生态经济,2022,38(5):13-20.
- [5] 郑德凤,王佳媛,李钰,姜俊超,吕乐婷.基于节水视角的中国水资源压力时空演变及影响因素分析.地理科学,2021,41(1):157-166.
- [6] 高培勇,樊丽明,洪银兴,韩保江,吕伟,白重恩,洪永森,蔡继明,寇宗来,黄群慧,刘元春,刘尚希,杨灿明,龚六堂,刘守英,陈斌开,郭凯明,金碚,李曦辉,刘秉镰,陆铭,洪俊杰,刘锡良,陈诗一.深入学习贯彻习近平总书记重要讲话精神 加快构建中国特色经济

学体系. 管理世界, 2022, 38(6): 1-56.

- [7] 田沛佩. 基于 MRIO 的中国水-能-碳耦合关系研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [8] 陈睿山, 郭晓娜, 熊波, 王尧, 陈琼. 气候变化、土地退化和粮食安全问题: 关联机制与解决途径. 生态学报, 2021, 41(7): 2918-2929.
- [9] Yang X C, Wang Y T, Sun M X, Wang R Q, Zheng P M. Exploring the environmental pressures in urban sectors: an energy-water-carbon nexus perspective. *Applied Energy*, 2018, 228: 2298-2307.
- [10] 赵荣钦, 李志萍, 韩宇平, Milind Kandlikar, 张战平, 丁明磊. 区域“水-土-能-碳”耦合作用机制分析. 地理学报, 2016, 71(9): 1613-1628.
- [11] Hiloidhari M, Vijay V, Banerjee R, Baruah D C, Rao A B. Energy-carbon-water footprint of sugarcane bioenergy: a district-level life cycle assessment in the state of Maharashtra, India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 151: 111583.
- [12] Liang M S, Huang G H, Chen J P, Li Y P. Development of non-deterministic energy-water-carbon nexus planning model: A case study of Shanghai. *China. Energy*, 2022. 246: p. 123300
- [13] Yoon P R, Lee S H, Choi J Y, Yoo S H, Hur S O. Analysis of climate change impact on resource intensity and carbon emissions in protected farming systems using Water-Energy-Food-Carbon Nexus. *Resources, Conservation and Recycling*, 2022, 184: 106394.
- [14] Briones-Hidrovo A, Copa Rey J R, Cláudia Dias A, Tarelho L A C, Beauchet S. Assessing a bio-energy system with carbon capture and storage (BECCS) through dynamic life cycle assessment and land-water-energy nexus. *Energy Conversion and Management*, 2022, 268: 116014.
- [15] Li R S, Zhao R Q, Xie Z X, Xiao L G, Chuai X W, Feng M Y, Zhang H F, Luo H L. Water-energy-carbon nexus at campus scale: case of North China university of water resources and electric power. *Energy Policy*, 2022, 166: 113001.
- [16] Zhang Q F, Wang X, Hu T S, Wang K, Gong L Q. Assessing the effectiveness and fairness of carbon tax based on the water-energy-carbon nexus of household water use. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 359: 132063.
- [17] 李增. 环京津城市能源碳排放与水资源纽带关系分析[D]. 中国矿业大学(北京), 2019.
- [18] Nikolov N T, Fox D G. A coupled carbon-water-energy-vegetation model to assess responses of temperate forest ecosystems to changes in climate and atmospheric CO₂. Part I. Model concept. *Environmental Pollution: Barking, Essex*: 1987, 1994, 83(1/2): 251-262.
- [19] Venkatesh G, Brattebø H. Energy consumption, costs and environmental impacts for urban water cycle services: case study of Oslo (Norway). *Energy*, 2011, 36(2): 792-800.
- [20] Elkhafif M A T. An iterative approach for weather-correcting energy consumption data. *Energy Economics*, 1996, 18(3): 221-230.
- [21] Han S, Feng Y L, Zhang F, Yang C Q, Yao Z Q, Zhao W X, Qiu F, Yang L Y, Yao Y F, Zhuang X D, Feng X L. Metal-phosphide-containing porous carbons derived from an ionic-polymer framework and applied as highly efficient electrochemical catalysts for water splitting. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(25): 3899-3906.
- [22] Meng, F X, Liu, G Y, Liang, S, Su, M R, Yang, Z F, Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities. *Energy*, 2019. 171: p. 1017-1032.
- [23] Chen S Q, Tan Y Q, Liu Z. Direct and embodied energy-water-carbon nexus at an inter-regional scale. *Applied Energy*, 2019, 251: 113401.
- [24] Duan C C, Chen B. Energy-water-carbon nexus at urban scale. *Energy Procedia*, 2016, 104: 183-190.
- [25] 王宪恩, 赵思涵, 刘晓宇, 段海燕, 宋俊年. 碳中和目标导向的省域消费端碳排放减排模式研究——基于多区域投入产出模型. 生态经济, 2021, 37(5): 43-50.
- [26] 崔文超, 焦雯珊, 闵庆文, 吴敏芳, 孙业红. 基于碳足迹的传统农业系统环境影响评价——以青田稻鱼共生系统为例. 生态学报, 2020, 40(13): 4362-4370.
- [27] Valek A M, Sušnik J, Grafakos S. Quantification of the urban water-energy nexus in México City, México, with an assessment of water-system related carbon emissions. *The Science of the Total Environment*, 2017, 590/591: 258-268.
- [28] Kotagodahetti R, Hewage K, Karunatilake H, Sadiq R. Long-term feasibility of carbon capturing in community energy systems: a system dynamics-based evaluation. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 377: 134460.
- [29] Chhipi-Shrestha G, Hewage K, Sadiq R. Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: system dynamics approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143(6): 4017016.1.
- [30] 洪竞科, 李沅潮, 蔡伟光. 多情景视角下的中国碳达峰路径模拟——基于 RICE-LEAP 模型. 资源科学, 2021, 43(4): 639-651.
- [31] 杨晓占. 新能源与可持续发展概论. 重庆: 重庆大学出版社, 2019.
- [32] Zhao R Q, Liu Y, Tian M M, Ding M L, Cao L H, Zhang Z P, Chuai X W, Xiao L G, Yao L G. Impacts of water and land resources exploitation on agricultural carbon emissions: the water-land-energy-carbon nexus. *Land Use Policy*, 2018, 72: 480-492.
- [33] 许淑婷. 碳中和背景下东北地区的可持续发展. 地理学求索, 2021, 8(2): 24-27.
- [34] 张茂鑫. 东北旱田不同农作情景下土壤有机碳变化及固碳潜力的模拟研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [35] 毛显强, 郭枝, 高玉冰. 碳达峰、碳中和与经济、社会、生态环境的协同研究. 环境保护, 2021, 49(23): 30-35.

- [36] 陈明星, 先乐, 王朋岭, 丁子津. 气候变化与多维度可持续城市化. 地理学报, 2021, 76(8): 1895-1909.
- [37] 张俊锋, 许文娟, 王跃铸, 尹燕, 谢辉, 梁兴雨, 赵军. 面向碳中和的中国碳排放现状调查与分析. 华电技术, 2021, 43(10): 1-10.
- [38] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 李红芳. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 8-15.
- [39] 王士君, 马丽. 基于宏观形势和地域优势的“十四五”东北振兴战略思考. 地理科学, 2021, 41(11): 1935-1946.
- [40] 王吉喆. 东北人口困局之破解与东北振兴. 前进论坛, 2022(3): 27-28, 24.
- [41] 杨忍, 刘芮彤. 珠三角城市群地区都市农业功能演变及其协同-权衡关系. 地理研究, 2022, 41(7): 1995-2015.
- [42] 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要(草案)》摘编. 人民日报, 2021-03-06(009).
- [43] 于善波. 东北三省工业绿色发展研究——以绿色全要素生产率为视角[D]. 大连: 东北财经大学, 2021.
- [44] 董熙, 陈志泊, 胡春明, 刘平. 气候、径流及河漫滩湿地淹没状态耦合关系研究--以海拉尔河下游段为例. 生态学报, 2022(22): 1-12.
- [45] 曹威威, 孙才志, 杨璇业, 崔莹. 基于能值生态足迹的长山群岛人地关系分析. 生态学报, 2020, 40(01): 89-99.
- [46] 孙才志, 周舟, 赵良仕. 基于 SD 模型的中国西南水—能源—粮食纽带系统仿真模拟. 经济地理, 2021, 41(6): 20-29.
- [47] 高原, 刘耕源, 陈操操, 郭丽思, 张雯, 郭跃. 面向对标的我国城市温室气体排放核算方法框架. 资源与产业, 2022, 24(3): 1-20.
- [48] 曹永强, 李玲慧. 基于水资源综合模拟与调配一体化模型的北京市水资源模拟分析. 水利水电科技进展, 2021, 41(6): 25-31.
- [49] 辽宁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. 辽宁日报, 2021-04-06(001).
- [50] 王连芬, 赵园, 王良健. 低碳试点城市的减碳效果及机制研究. 地理研究, 2022, 41(7): 1898-1912.
- [51] Fang K, Heijungs R, Snoo G D. Theoretical exploration for the combination of the ecological, energy, carbon, and water footprints: overview of a footprint family. Ecological Indicators, 2014, 36: 508-518.