



张宇冕, 夏唯一, 骆玉川, 陆梦娜, 黄霖沛. 基于系统动力学模型的内蒙古水资源承载力及其影响因素[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(04): 274-287.
ZHANG Yumian, XIA Weiyi, LUO Yuchuan, LU Mengna, HUANG Linpei. Water resources carrying capacity of Inner Mongolia under different scenarios and its influential factors based on a system dynamics model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(04): 274-287.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.24

基于系统动力学模型的内蒙古水资源承载力及其影响因素

张宇冕¹ 夏唯一² 骆玉川^{3*} 陆梦娜⁴ 黄霖沛⁵

- (1. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;
2. 中国人民大学 公共管理学院, 北京 100872;
3. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715;
4. 中国农业大学 土地科学与技术学院, 北京 100083;
5. 四川大学 匹兹堡学院, 成都 610065)

摘要 为科学测度区域水资源承载力, 探究区域水资源可持续利用, 基于系统动力学理论, 以内蒙古自治区为例, 借助 Vensim 系统动力学仿真建模平台, 从资源环境、社会经济角度构建区域水资源供需系统, 并模拟分析 2020—2025 年现状延续情景、经济发展情景、节约与绿色低碳情景、科技创新情景 4 种发展情景下的区域水资源供需情况。最后, 运用 AHP-熵权混合模型评价了 4 种不同情景下水资源承载力并通过敏感性分析方法识别其主要影响因素。结果表明: 1) 科技创新情景能有效节约工业用水和生活用水, 用水总量为 216.93 亿 m³; 节约与绿色低碳情景主要节约农业用水和生活用水, 用水总量为 217.01 亿 m³; 现状延续情景用水总量为 220.26 亿 m³, 而经济发展情景对水资源消耗最大, 用水总量为 225.75 亿 m³。2) 科技创新情景下的水资源承载力指数最高, 是今后内蒙古自治区水资源利用领域的重要发展方向; 节约与绿色低碳情景、现状延续情景次之; 经济发展情景的承载指数最低, 水资源的利用将不可持续。3) 发电量、降水量、各类作物种植面积、绿地面积是影响水资源承载力的主要因素, 主要原因是非化石能源发电所占比例小, 种植业规模广、单位绿地面积耗水量大。因此, 能源利用结构调整、种植业节水、水的再处理等技术革新及节约低碳手段是提高内蒙古自治区水资源承载力的有效措施。

关键词 水资源承载力; 系统动力学模型; 情景模拟; 影响因素; 内蒙古自治区

中图分类号 TV213.9; N941.3

文章编号 1007-4333(2024)04-0274-14

文献标志码 A

Water resources carrying capacity of Inner Mongolia under different scenarios and its influential factors based on a system dynamics model

ZHANG Yumian¹, XIA Weiyi², LUO Yuchuan^{3*}, LU Mengna⁴, HUANG Linpei⁵

- (1. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. School of Public Administration and Policy, Renmin University of China, Beijing 100872, China;
3. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;
4. College of Land Science, China Agricultural University, Beijing 100083, China;
5. Pittsburgh Institute, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract In order to scientifically measure regional water resources carrying capacity and study sustainable utilization of water resources, Inner Mongolia Region was taken as the case and the modeling platform of

收稿日期: 2023-08-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991230); 科技兴蒙项目(NMKJXM202109)

第一作者: 张宇冕(ORCID: 0009-0000-8952-1416), 硕士研究生, E-mail: 202221051014@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 骆玉川(ORCID: 0009-0008-8392-7392), 副教授, 主要从事植被遥感监测与模拟、气候变化影响与适应性分析等研究, E-mail: lyc20230703@swu.edu.cn

Vensim was used to construct a regional water resources supply and demand system based on system dynamics theory. Considering resources, environment and economy, this study simulated four scenarios, namely, the quo scenario, economic development scenario, saving and green low-carbon scenario, technological innovation scenario from 2020 to 2025. AHP and entropy weight combinational method were adopted to predict the water resources carrying capacity index value and identified factors affecting water resource carrying capacity through sensitivity analysis. The results showed that: 1) The technological innovation scenario effectively decreased industrial and domestic water demand with a total water consumption of 21.693 billion m^3 . The saving and green low-carbon scenario mainly saved agricultural and domestic water with a total water consumption of 21.701 billion m^3 . The quo scenario had a total water consumption of 22.026 billion m^3 , while the economic development scenario had the largest water resource consumption with a total water consumption of 22.575 billion m^3 . 2) The water resource carrying capacity index under technological innovation scenario was the highest, which was an important development direction in the field of water resource utilization in Inner Mongolia Autonomous Region. The saving and green low-carbon scenario as well as quo scenario took next places. The index of the economic development scenario was the lowest and the utilization of water resources was unsustainable. 3) The main factors affecting water resource carrying capacity were power generation, precipitation, planting area of various crops and green planting. The main reasons were the small proportion of non-fossil energy power generation, the wide scale of crop planting industry, the high water consumption per unit area for crop and the high water demand for green planting. Therefore, the optimization of energy utilization structure, water-saving in planting, water reprocessing and other technological innovations as well as low-carbon conservation measures are effective to improve the carrying capacity of water resources in Inner Mongolia Autonomous Region.

Keywords water resources carrying capacity; system dynamics model; scenario simulation; factors; Inner Mongolia Autonomas Region

伴随着我国新型城镇化与工业化的快速推进,区域水资源短缺问题日益突出,水资源供应不足或需求超过供应,威胁到区域发展和当地福祉,特别是在我国北方的干旱和半干旱地区,供需矛盾最为突出^[1-2]。因此,科学测度我国北方地区水资源供需情况,并合理预测不同发展情景下水资源的供需求,已成为当前水资源研究的重要研究内容之一^[3]。水资源承载力作为区域水资源承载状态的评判标准,指当地天然水资源能够维系和支撑的人口、经济和环境规模总量,对实现经济社会发展与环境保护协同作用具有重要意义^[4]。水资源是维系社会发展与稳定的重要基础资源,无论是生物对于水的饮用,还是工业或服务业对水的使用等,都对水资源的数量及质量提出了较高要求^[5]。因此,科学测度区域水资源承载力,探究不同发展情景下的地区水资源承载力变化,已成为社会可持续发展研究的重要内容之一^[6]。

目前,基于可持续发展的水资源利用研究主要关注资源的时空特征^[7-8]、影响因素^[9-10]、效应与调控^[11-12]等多个维度,研究内容主要聚焦于水资源与

社会经济、自然环境的动态互馈关系等^[13]。早在20世纪80年代末,国内研究开始使用水资源承载力这一概念表示水资源对人口、经济、环境的承载情况,并在水资源承载力理论框架^[13]、水资源承载力评价模型^[14-15]、水资源承载力系统与情景模拟^[16-17]等方面开展了大量的研究。目前水资源承载力研究已经由最初的静态分析转向多情景预测的动态分析,研究指标也从最初的单一指标丰富为多元指标分析,水资源承载力相关的研究系统也从最初的简单水资源系统演变为复杂水资源系统^[18-20]。该领域研究主要采用系统动力学法^[21-23]、主成分分析法^[24-25]、生态足迹法^[26-27]、综合评价法^[28-29]和BP神经网络法^[30]等多种方法,以期在理清各地区当前水资源承载力基本情况的背景下,进一步预测其发展趋势。系统动力学方法因具有动态性与反馈性的特点,使其成为水资源承载力预测过程中最为常用的关键技术手段。借助系统动力学模型,可有效分析并预测不同发展情景下区域水资源承载情况的变化趋势,为提出具有针对性的措施提供了科学依据。例如:珠澳地区取用水系统水资源承载力的分

析预测结果显示工业用水效率的提高是优化区域水资源环境承载力的重要途经^[31];阿拉善地区分析研究则表明三生用水的优化是该区域提高水资源承载力的最优选择^[32]。虽然这些研究均为提高区域水资源环境承载力提出了可行方案,但当前研究缺乏对各水资源各子系统的细节刻画,特别是用水需求较大的农业用水、工业用水。除此之外,基于系统学理论的水资源承载力主要影响因素识别研究较少。因此,丰富与刻画水资源承载力系统动力学模型,分析水资源承载情况并识别影响水资源承载力的主要因素是急需解决的关键问题。

内蒙古自治区地处我国北部地区,承担着保障我国粮食、能源供给的重任。农业生产、工业生产对水资源的极大需求进一步加剧了该地区的水资源供需矛盾^[35]。研究该地区水资源承载力、未来预测及识别影响水资源承载力的主要因素,是探索区域水资源可持续利用的关键。因此,本研究拟以内蒙古自治区为研究对象,借助 Vensim 系统仿真建模平台,依据农业、工业、生态、生活用水特征,构建系统动力学视域下的水资源承载力评估模型,将水资源利用与经济、生态环境相结合,通过调整参数的组合^[21],分析并模拟不同情景下(现状延续情景、经

济发展情景、节约与绿色低碳情景、科技创新情景)水资源承载力,识别影响内蒙古自治区水资源承载的主要因素,以期探索缓解内蒙古自治区水资源供需矛盾、实现区域可持续发展提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于我国北部地区,地处季风的边界区,多年平均年降水量小于700 mm,区域内降水稀少且雨水集蓄利用量不足,呈现东多西少的分布特征,详见图1。内蒙古自治区单位面积水资源占有量不足全国平均水平的1/6^[35]。内蒙古自治区水资源量变化如图2所示。可见:地表水资源量和地下水资源量均呈现波动趋势,多年平均水资源总量为500.19亿m³;2017年水资源总量最小,为309.93亿m³,2013年水资源总量最大,达到959.81亿m³。研究区供水主要来源于地表水与地下水,引水工程与提水工程是地表水源供水的主要途径,浅层地下水利用是地下水供给的主要途径,其他供给大部分来自污水处理回用^[35]。生态、工业、农业等是主要的用水去向,占需水总量的94%。

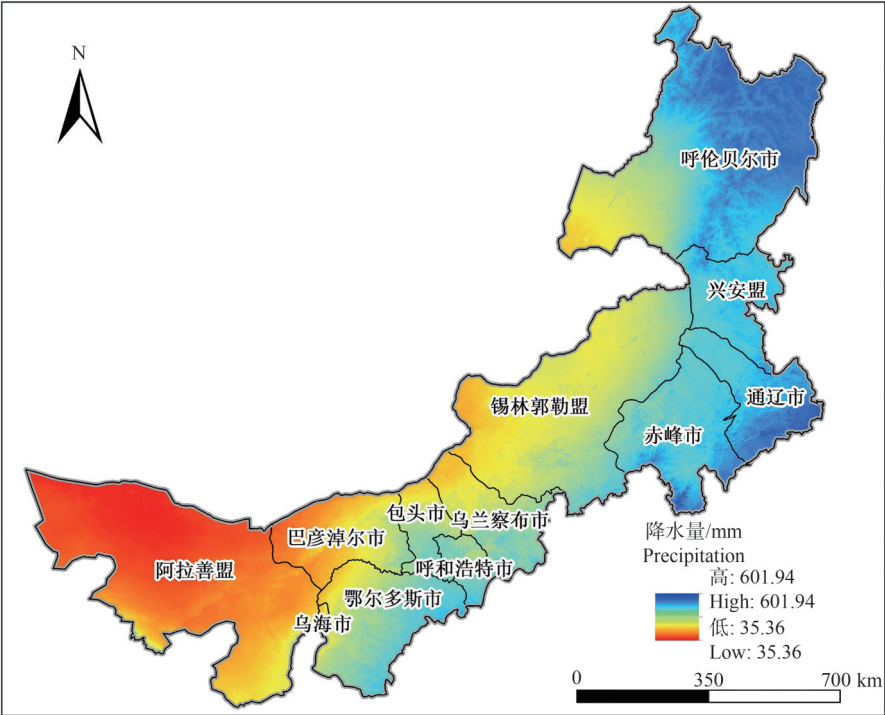


图1 2016—2020年内蒙古自治区年平均降水量空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution of average annual precipitation from 2016 to 2020 in Inner Mongolia

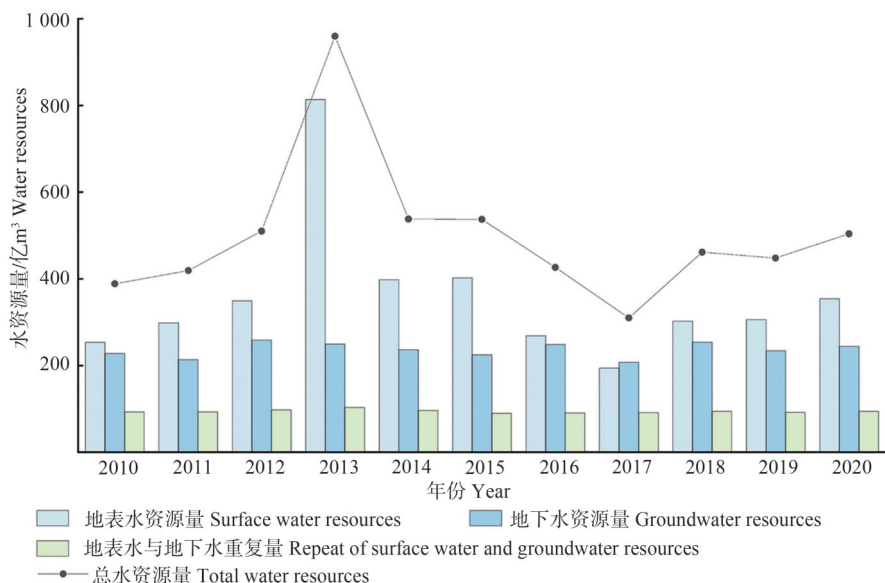


图2 2010—2020年内蒙古自治区水资源情况

Fig. 2 Water Resources in Inner Mongolia from 2010 to 2020

1.2 内蒙古自治区水资源利用系统建模

为厘清研究区内的水资源承载力现状并分析其未来的发展趋势,基于水资源供给与需求关系,将内蒙古自治区水资源的需求及供应视作一个系统,构建研究区水资源供需系统动力学模型。水资源供需系统及系统内部之间的关系如图3所示。可见:水资源供给主要来源于地表水、地下水、再生水。地表水、地下水量受降水影响,而降水受环境及气候改变的影响;再生水由工业用水及生活用水决定;水资源需求主要包括农业用水、生态用水、工业用水、生活用水;农业用水受种植面积与养殖数量影响,生活用水受人口数量影响,社会经济发展一定程度上影响着工业用水、生活用水的需求。

1.2.1 系统边界定义

以内蒙古自治区为案例研究边界,包括呼和浩特市、鄂尔多斯市、通辽市等12个地级市/盟。模型系统边界由生活用水、生态用水、工业用水、农业用水等用水子系统及再生水、地表水和地下水组成的供水子系统构成。

1.2.2 系统构成

供需系统由各类用水、供水构成。用水包括生活用水、生态用水、工业用水、农业用水。供给来源包含地下水、地表水以及再生水。地下供水、地表供水受降水的影响,再生水由生活污水排放与工业废水排放构成。水资源总供需差(NW)计算公式如下:

$$NW = \sum_{i=1}^m IN_i - \sum_{i=1}^n OUT_i \quad (1)$$

式中: IN_i 为第 i 类水资源供给来源; OUT_i 为第 i 类水资源需求类型。

生活用水子系统包括农村生活用水、城镇生活用水两部分,主要受到人口总量、城镇化率、生活用水定额等变化的影响。人均生活用水量(WCN_{pp})计算公式如下:

$$WCN_{pp} = WCN_{lim} \times [1 + k \times (GDPR_n - 1)] \quad (2)$$

式中: WCN_{lim} 为生活用水定额; k 为修正系数。第 n 年GDP比值系数($GDPR_n$)计算公式如下:

$$GDPR_n = GDP_n / GDP_{n-1} \quad (3)$$

式中: GDP_n 为第 n 年GDP; GDP_{n-1} 为第 $n-1$ 年GDP。

生态用水主要是城市环境用水与其他生态用水,城市环境用水主要受绿地面积、绿化用水定额影响,其他生态用水主要是河湖、湿地补水等。

农业用水子系统由各类农作物用水及各牲畜禽等用水构成。各类作物用水包括玉米、小麦、稻谷、豆类、薯类等用水,牲畜禽等用水包括大牲畜、羊、猪、家禽等用水。

工业用水子系统由核火工业用水与非核火工业用水构成。核火工业用水随发电量、新增发电量的火力发电比例、火力发电用水系数等变化而改变。

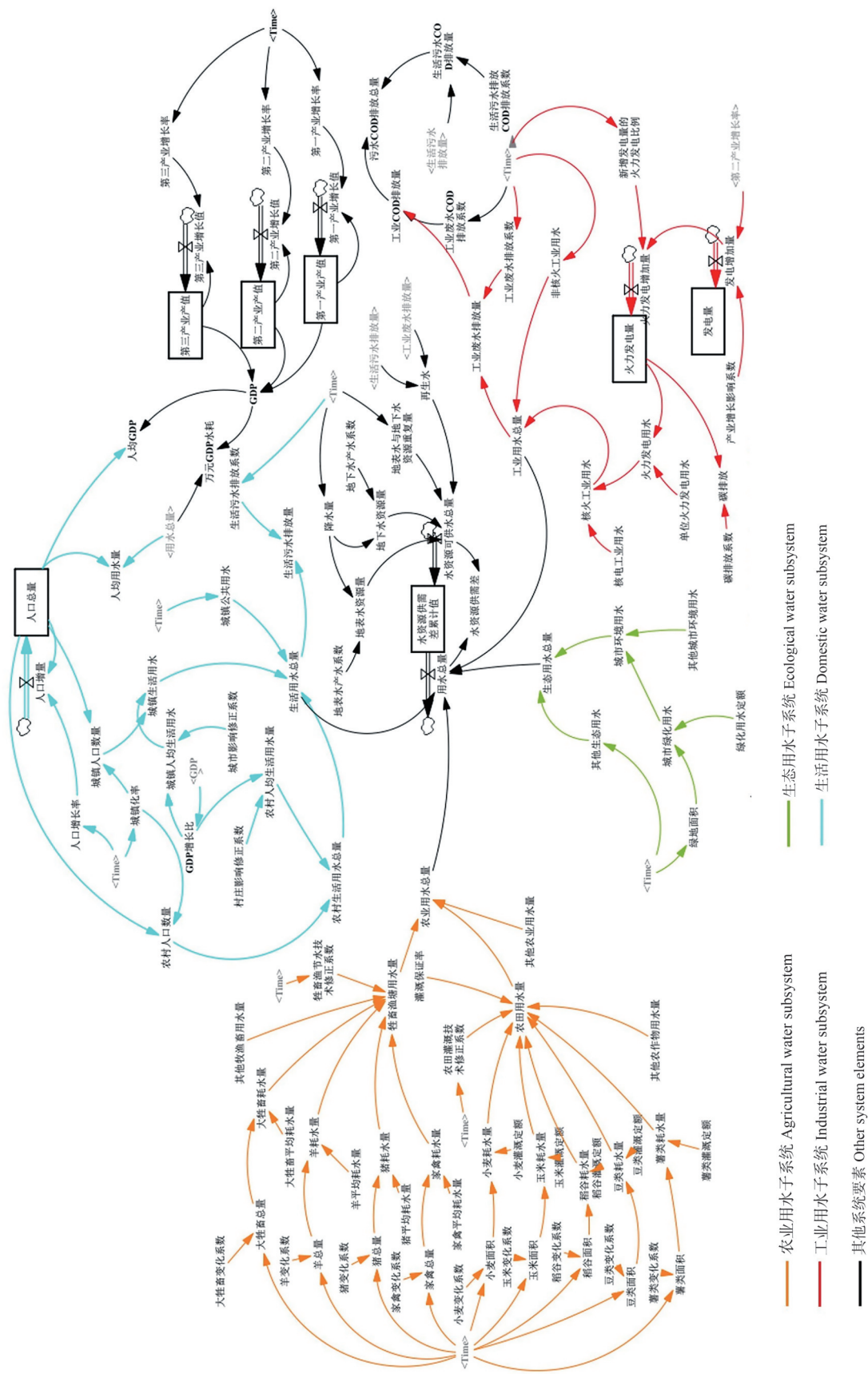


图3 内蒙古自治区水资源系统动力学整体架构及具体指标

Fig. 3 System dynamics overall structure and specific indicators of water resources in the Inner Mongolia

1.2.3 水资源供需模型方程

系统中各变量间的关系方程是系统动力学的重要组成部分,模型中参数的初始值、关系方程是运用统计分析法、趋势外推法、平均增长法等分析拟合得到。参数及方程详见表 1。

表 1 内蒙古自治区水资源系统动力学模型的参数及方程

Table 1 Variations and equations of water resources system dynamics model in Inner Mongolia

子系统 Subsystem	变量 Variable	数据来源 Data source	系统动力学方程 System dynamics equation	单位 Unit
生活用水子系统 Domestic water subsystem	人口总量	内蒙古自治区统计年鉴 (2010—2020 年) ^[32]	INTEG(人口增量)+2 472.2	万人
	城镇人口数量		人口总量×城镇化率	万人
	农村人口数量		人口总量-人口总量×城镇化率	万人
	城镇生活用水总量		城镇人口数量×城镇人均生活用水量×365×10 000/1 000	亿 m ³
	农村生活用水总量		农村人口数量×农村人均生活用水量×365×10 000/1 000	亿 m ³
	城镇化率		0.555+0.011 9×(Time-2 010)	
工业用水子系统 Industrial water subsystem	工业用水总量	内蒙古自治区水资源公报(2010—2020 年) ^[33]	核火工业用水+非核火工业用水	亿 m ³
	核火工业用水量		火力发电用水+核力发电用水	亿 m ³
	非核火工业用水量		(2 010-Time)×IF THEN ELSE(Time<2 014, 0.266 7, 1.4)+15	亿 m ³
	新增发电量的火力发电比例	内蒙古十四五能源规划 (https://www.nmg.gov.cn/zwgk/zfxgk/zfxgkml)		
生态用水子系统 Ecological water subsystem	发电量	中国电力年鉴(2010—2020 年) ^[34]	INTEG(发电增加量)+2 483.9	亿 kW·h
	单位火力发电用水	项潇智等 ^[37-38] 研究成果	3	m ³ /MW·h
	绿地面积	内蒙古自治区统计年鉴(2010—2020 年) ^[32]	41 611+2 152.1×(Time-2 010)	hm ²
	城市环境用水	内蒙古自治区水资源公报(2010—2020 年) ^[33]	绿化用水定额×绿地面积+其他城市环境用水	亿 m ³
农业用水子系统 Agricultural water subsystem	其他生态用水		(Time-2 010)×1.760 2+6.262 2	亿 m ³
	牲畜禽数量	内蒙古自治区统计年鉴(2010—2020 年) ^[32]		
	种植面积	内蒙古自治区行业用水定额,FAO(https://www.fao.org/partnerships/leap)		
	用水定额			
其他要素 Other elements	农业用水总量	内蒙古自治区水资源公报(2010—2020 年) ^[33]	牲畜渔塘用水量+农田用水量	亿 m ³
	COD 排放量	内蒙古自治区统计年鉴(2010—2020 年) ^[32]	生活污水 COD 排放量+工业废水 COD 排放量	万 t

表 (续)				
子系统 Subsystem	变量 Variable	数据来源 Data source	系统动力学方程 System dynamics equation	单位 Unit
	用水总量	内蒙古自治区水资源公报(2010—2020年) ^[33]	农业用水总量+工业用水总量+生活用水总量+生态用水总量	亿 m ³
	碳排放系数	王彦哲等 ^[39] 研究成果	800.00	g/(kW·h)
	万元 GDP 水耗		用水总量×10 ⁸ /(GDP×10 000)	m ³ /万元
	第一产业产值	内蒙古自治区统计年鉴 (2010—2020年) ^[32]	INTEG(第一产业增长值)+ 2 025.12	亿 m ³
	第二产业产值		INTEG(第二产业增长值)+ 6 868.03	亿 m ³
	第三产业产值		INTEG(第三产业增长值)+ 8 466.66	亿 m ³

注: INTEG, 积分函数。
Note: INTEG is the integral function.

1.2.4 水资源供需模型检验

为对模型模拟结果的可靠性及合理性进行检验,基于2010—2017年区域用水情况及用水来源情况进行了建模,并用2018—2020年的数据与模拟情

况进行了比对检验。比对结果表明模型的模拟结果与实际已知的历史数据相近,误差控制在15%以内(表2),表明模型与实际系统的拟合效果比较理想^[12,16-18]。

表2 系统动力学误差检验用水结果表

Table 2 Water consumption results of system dynamics error test							%
年份 Year	农田用水 Water for farmland	牲畜鱼塘用水 Water for livestock and fish ponds	农业用水 Water for agriculture	工业用水 Water for industry	生活用水 Water for domestic use	生态用水 Water for ecology	用水量合计 Total water consumption
2018	9.00	14.10	-3.72	2.10	-4.20	0.20	-2.60
2019	12.50	8.10	-1.95	6.90	-5.10	6.10	-0.30
2020	11.90	10.80	-0.79	11.10	-2.00	-3.20	-0.30

1.2.5 情景设置

影响水资源需求的因素较多,涉及各产业用水标准、技术水平等方面。既有生活用水、农业生产等基本用水标准的影响,亦有各产业需求及节水技术等因素的影响。为进一步为明确不同政策对内蒙古自治区水资源承载力的影响及其效果,依据水资源承载的人口、经济与生态环境系统,结合内蒙古自治区实际情况和内蒙古自治区国民经济和社会发展第十四个五年规划,设计了现状延续、经济发展、节约与绿色低碳、科技创新4种情景(表3)。模型设置的初始时间为2010年,结束时间为2020年,时间步长为1年,模拟预测的起始时间为2021年,结束时间为2025年。

基于构建的水资源供需系统动力学模型,本研

究通过政府统计数据、公报及相关研究成果,收集了所有所需的模型输入参数。所有参数可以分为2类:一类是统计参数,如GDP、人口、绿地面积、发电量、污染物排放量、用水量等数据,数据来源于内蒙古自治区统计年鉴、水资源公报、中国电力年鉴及前人研究成果;另一类是经验参数,用于计算水的使用量以及再生量,如发电增加量、火力发电比例、单位火力发电用水、修正系数、废水排放系数等,此类参数主要来自相关文献、十四五规划目标、排放标准及模型模拟等(表1)。

1.3 基于AHP-熵权混合模型的综合评价

层次分析法作为一种定性与定量分析方法相结合的多目标决策分析方法,有利于建立各层、各准则之间的关系,从而综合各要素进行评价比较^[43]。

表 3 不同情景参数设置
Table 3 Parameters setting of different scenarios

情景设置 Scenario setting	指标 Index
现状延续 Continuation of the status quo	第一、二、三产业增长率 3.50%、4.00%、5.00%，城镇化率 67.00%，人口增长率-2.57%，新增发电量的火力发电比例 0.28，新增发电量 169.12 亿 kW·h，牲畜渔节水修正系数 0.95，农田灌溉技术修正系数 0.812，工业废水 COD 排放系数 0.90，生活污水排放系数 0.60，工业废水排放系数 0.175，生活污水排放系数 0.60
经济发展 Economic development	第一、二、三产业增长率 4.50%、7.00%、8.00%，城镇化率 70.00%，人口增长率 1.00%，产业增长影响发电系数提高 20%，牲畜禽变化系数提高 20%，农作物变化系数提高 20%
节约与绿色低碳 Green low-carbon	新增发电量的火力发电比例 0.20，新增发电量 202.94 亿 kW·h，牲畜禽等变化系数降低 20%，农作物变化系数降低 20%，绿地面积变化率提高 20%
科技创新 Technological innovation	牲畜渔节水修正系数 0.84，农田灌溉技术修正系数 0.809，工业废水 COD 排放系数 0.675，生活污水排放系数 0.45，工业废水排放系数 0.39，生活污水排放系数 0.75

熵权法能够充分利用数据,而客观地进行权重赋值^[43]。本研究准则层采取层次分析法计算,指标层采用熵权法计算,最后综合准则层和目标层指标权重运算得到评价体系各指标的权重,从而既专业准确又客观可信地计算 2021—2025 年各情景下内蒙古自治区水资源承载力的综合评价分值。结合系统动力学模型、研究文献^[13-15]构建评价体系,选取 11 个评价因子作为指标层指标,并得到最终权重(表 4)。

表 4 内蒙古自治区水资源承载力评价指标权重
Table 4 Weight of Water Resources Carrying Capacity Evaluation Index in Inner Mongolia

目标层 Objective level	准则层 Criteria level	指标层 Indicator level	性质 Property	最终权重指数 Final weight index
水资源承载力评价 Water resources carrying capacity evaluation	水资源利用承载(0.57)	发电量(0.084)	正向	0.048
		人口数量(0.071)	正向	0.041
		人均日用水(0.117)	正向	0.067
	水资源利用状态(0.13)	水资源供需差(0.108)	正向	0.014
		用水量(0.074)	负向	0.010
		COD 排放总量(0.184)	负向	0.024
		碳排放(0.083)	负向	0.011
	水资源利用效率(0.30)	再生水(0.062)	正向	0.019
		绿地面积(0.076)	正向	0.023
		万元 GDP 水耗(0.058)	负向	0.017
		总 GDP(0.081)	正向	0.024

1.4 影响因素分析

为识别水资源承载力的主要影响因素,进行敏感性分析及相对敏感性分析。

通过敏感性分析评估各参数对水资源承载力的影响,结果越大,该参数越敏感,即影响力越大。敏感性指数(CS)计算公式如下:

$$CS=\left|\frac{WRCC_j-WRCC_i}{WRCC_i}\div\frac{P_j-P_i}{P_i}\right| \quad (4)$$

式中:WRCC_i 为 2021 年的水资源承载力指数;WRCC_j 为调整后的水资源承载力指数;P_i 为 2021 年的参数值;P_j 为调整后的参数值,本研究调整幅度为 15%。

通过相对敏感性分析评估各参数的潜在影响力。相对敏感性分析评估了敏感性的变化趋势,评估各参数对水资源承载力的潜在影响,结果值越大,即敏感性增长越快,潜在的影响力越大。相对

敏感性指数(CSR)计算公式如下:

$$CSR=\left|\frac{CS_k-CS_l}{CS_l}\div\frac{k-l}{l}\right|$$

(5)

式中:CS_k为调整幅度为k时的敏感性指数;CS_l为调整幅度为l时的敏感性指数。本研究k设置为30%,l设置为15%。

2 结果与分析

2.1 不同发展情景下的模拟结果

各子系统用水量变化见图4。可见:工业用水呈现先减少后增加的趋势,由2010年的22.58亿m³减少到2020年的13.41亿m³,2020年到2025年,又

增加至15.90亿m³(现状延续情景);农业用水经历先减少后增加的变化过程,由2010年的140.06亿m³减少到2014年的118.01亿m³,2014年到2025年,又增加至150.54亿m³(现状延续情景);生活用水持续增加,由2010年的9.49亿m³增加至2025年的11.99亿m³(现状延续情景);生态用水持续增加,由2010年的9.78亿m³增加至2025年的38.06亿m³(现状延续情景)。不同情景用水需求比较结果显示,科技创新情景有效节约了工业用水和生活用水,而节约与绿色低碳情景主要节约了农业用水和生活用水,经济发展情景工业用水量、农业用水量、生活用水量均有增加。

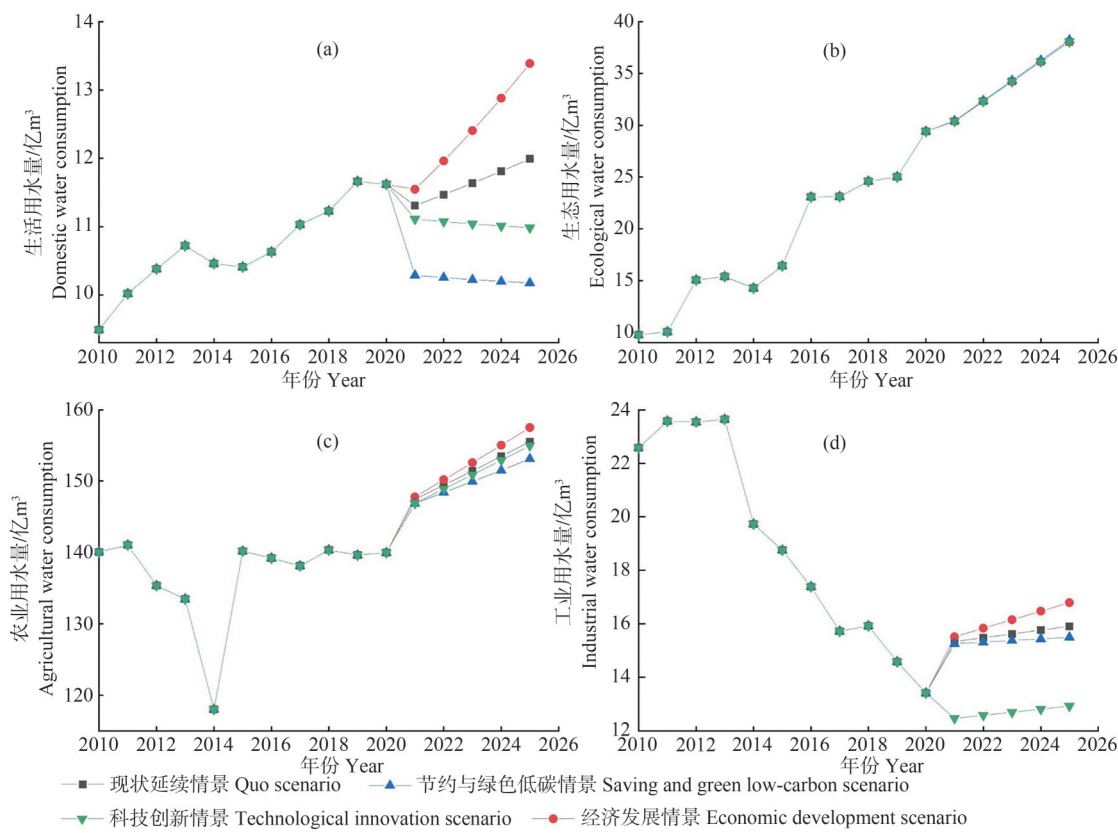


图4 不同发展情景下各类用水量变化

Fig. 4 Changes of water consumptions in different scenarios

对区域4种不同发展情景下的水资源利用状况进行了预测评估,结果见表5。可见:经济发展情景用水总量最高(225.75亿m³,2025年);现状延续情景的用水总量次之(220.26亿m³,2025年);节约与绿色低碳情景用水总量相对较小(217.01亿m³,2025年);科技创新情景最低(216.93亿m³,2025年)。

电力生产碳排放整体上呈快速增长的趋势如图5所示。由图5(a)可见:2010—2025年,电力生产碳排放从17 812.40万t增加至39 742.16万t(现状延续情景)。其中,经济发展情景电力生产碳排放最多,现状延续情景、科技创新情景其次,节约与绿色低碳情景排放最少。污水COD排放量整体呈现快速减少再缓慢增加的趋势。由图5(b))可见:

表 5 不同情景下水总量变化/亿 m^3

Table 5 Changes of total water consumption in different scenarios

亿 m^3

年份 Year	现状延续 Continuation of the status	经济发展 Economic development	科技创新 Green low-carbon	节约与绿色低碳 Technological innovation
2021	204.13	205.22	200.84	202.81
2022	208.15	210.29	204.86	206.35
2023	212.14	215.37	208.84	209.86
2024	216.18	220.52	212.86	213.41
2025	220.26	225.75	216.93	217.01

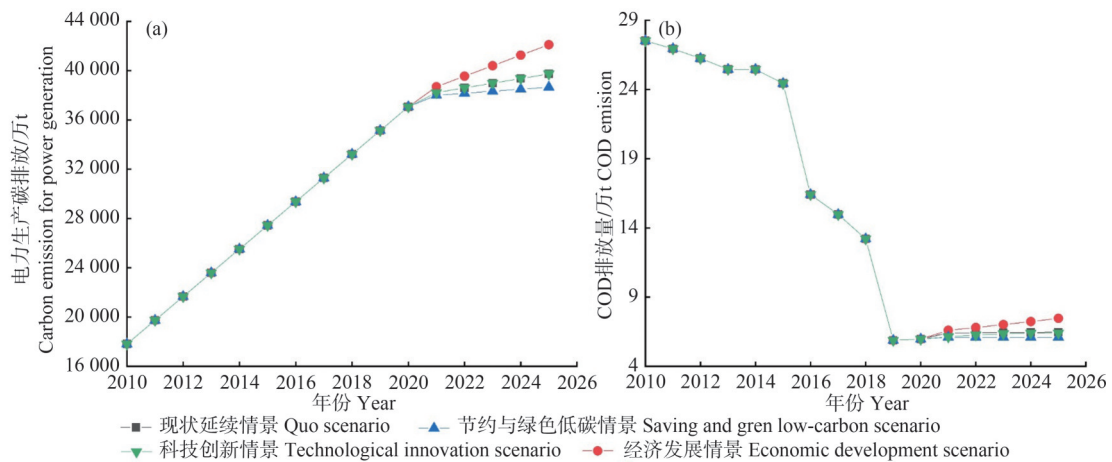


图 5 不同情景下工业用水碳排放与 COD 排放量

Fig. 5 The change of CO_2 emission by water use in industrial production and COD emission in different scenarios

2010—2020 年,污水 COD 排放量由 27.51 万 t 减少至 5.96 万 t;2020—2025 年,污水 COD 排放量又增加至 6.46 万 t(现状延续情景)。其中,经济发展情景污水 COD 排放最多,现状延续情景、科技创新情景其次,节约与绿色低碳情景排放最少。

GDP 呈现增长趋势,万元 GDP 水耗呈现下降趋势(图 6)。可见:2010—2025 年,GDP 从 8 199.86 亿元增加至 21 557.80 亿元(现状延续情景);2010—2025 年,万元 GDP 水耗从 221.83 m^3 /万元减少至 102.17 m^3 /万元(现状延续情景)。经济发展情景下

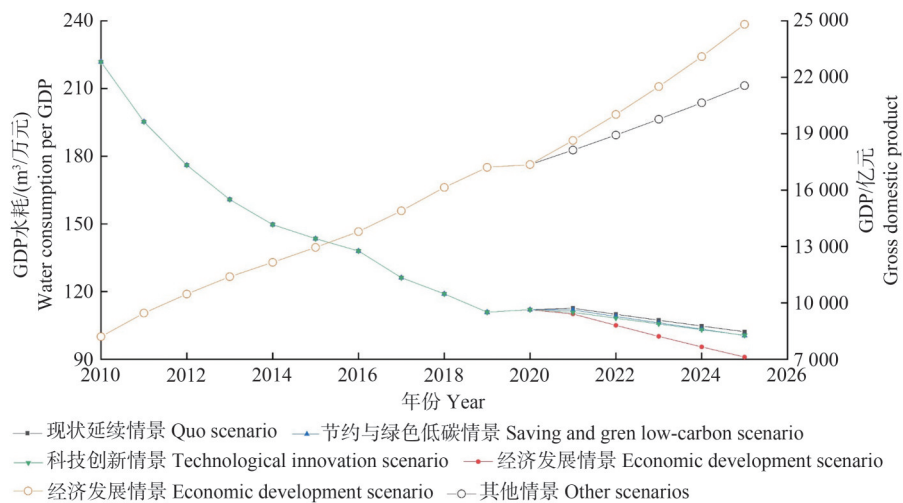


图 6 不同情景下万元 GDP 水耗与 GDP

Fig. 6 The change of WCGDP and GDP index in different situations

的GDP增长明显大于其他情景GDP增长,各情景万元GDP水耗均呈下降趋势,表明水资源利用效率持续改善。经济发展情景万元GDP水耗最低,节约低碳情景、科技创新情景万元GDP水耗适中,而现状延续情景方案万元GDP水耗最高。

2.2 水资源承载力综合评价结果

2010—2025年内蒙古自治区水资源承载力变化趋势图见图7。可见:2010—2020年,内蒙古自治区水资源承载力整体呈现上升趋势,承载力由约0.168提

高至约0.180,其中2012年承载力为最低值0.151,2013年承载力为最大值0.197;2020—2025年,科技创新情景、节约低碳情景承载力呈现上升趋势,科技创新情景水资源承载力变化最为明显,与2020年相比,2025年分值上涨了约10.3%达0.199;节约低碳情景在2025年时上涨了约5.5%达0.190;现状延续情景变化较为平缓,承载力指数约为2020的101.1%。经济发展情景承载力呈现下降趋势,承载力指数从0.181降至0.161,降幅约10.5%。

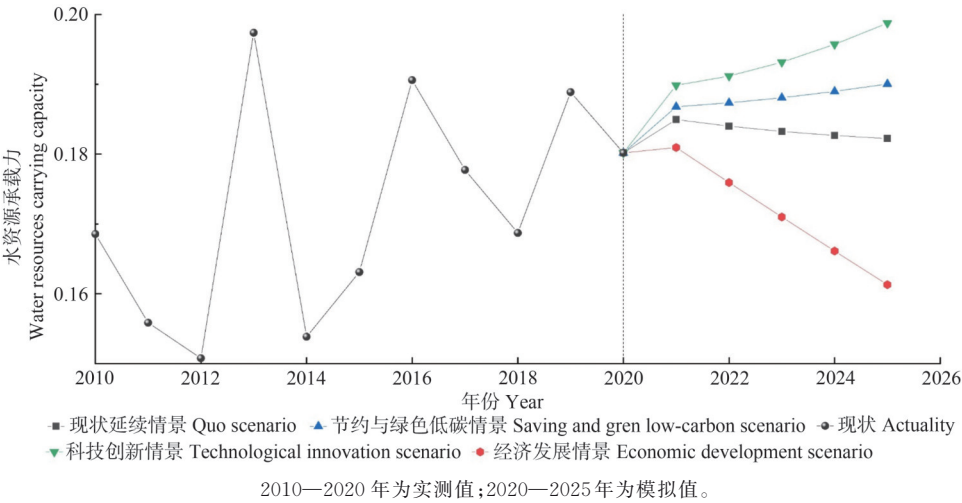


图7 2010—2025年四种情景下水资源综合承载力综合得分变化

Fig. 7 The change of comprehensive score of water resources carrying capacity in four simulation scenarios from 2010 to 2025

在未来,科技创新是水资源承载力提高的第一驱动力,节约低碳措施能够有效改变当前承载能力逐渐降低的趋势^[40-41],而一味追求社会经济的快速

发展将使得水资源承载能力大幅降低。

2.3 影响因素分析

敏感性分析与相对敏感性分析结果见图8。由

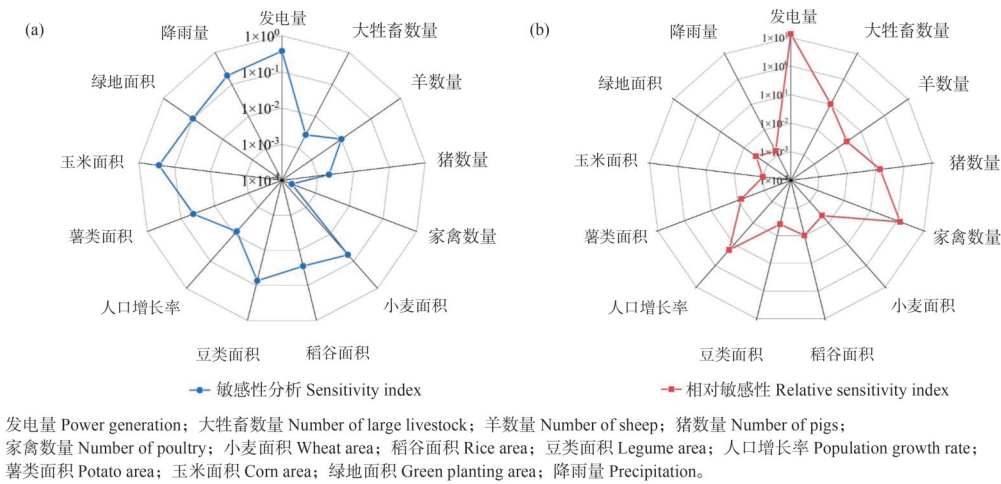


图8 用水敏感性分析(a)及用水相对敏感性分析(b)

Fig. 8 Sensitivity analysis (a) and relative sensitivity analysis (b)

图8(a)可见:发电量、降水量、绿地面积对评价结果影响较大,其敏感性分别为0.37、0.19、0.10,种植面积包括玉米面积、豆类面积、小麦面积、薯类面积、稻谷面积对评价结果同样具有一定影响,敏感性分别为0.27、0.08、0.05、0.04、0.03,而大牲畜数量、猪数量、羊数量、家禽数量、人口增长率影响较小,敏感性均低于0.02。由图8(b)可见:发电量、人口增长率、各牲畜用水单位(大牲畜数量、猪数量、羊数量、家禽数量)对水资源承载力的潜在影响较大,相对敏感性均超过0.05,而降水量、绿地面积以及种植面积包括玉米面积、豆类面积、小麦面积、薯类面积、稻谷面积相对敏感性均低于0.05。

3 结 论

本研究通过系统动力学模型,分析水资源供需系统与经济、环境之间的相互关系,寻求提高水资源承载力的有效策略,并通过调整不同发展情景方案的参数,进行情景方案之间的对比分析,主要结论如下:

1)内蒙古自治区水资源安全仍面临较大压力,在现状延续情景下,其水资源承载力将缓慢降低;

2)经济发展情景下,水资源承载指数低;节约与绿色低碳情景下,虽然从一定程度上减少了生活用水、降低了污染物排放及碳排放,但是生态环境用水需求增加;科技创新情景不仅保证了水资源供需的安全,而且尽可能地保护了生态环境,减少了污染物及温室气体的排放;

3)发电量、降水量、种植面积及绿地面积对水资源承载力影响巨大,其敏感性指数较大;发电量、人口增长率、牲畜禽等数量对水资源承载力具有较大的潜在影响,其相对敏感性远高于其他参数。

综上,节约低碳与科技创新是内蒙古自治区水资源利用领域的重要发展方向,提高新能源装机比重,发展并采取节水科技等是实现水资源可持续利用的重要手段。

参考文献 References

- [1] Bunsen J, Berger M, Finkbeiner M. Planetary boundaries for water: A review[J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107022
- [2] 尹云鹤, 马丹阳, 邓浩宇, 吴绍洪. 中国北方干湿过渡区生态系统生产力的气候变化风险评估[J]. *地理学报*, 2021, 76(7): 1605-1617

- Yin Y H, Ma D Y, Deng H Y, Wu S H. Climate change risk assessment of ecosystem productivity in the arid/humid transition zone of northern China[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2021, 76(7): 1605-1617 (in Chinese)
- [3] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. *水利学报*, 2004, 35(1): 38-45
- Long T R, Jiang W C, He Q. Water resources carrying capacity: New perspectives based on economic analysis and sustainable development[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 35(1): 38-45 (in Chinese)
- [4] Hardin G. *Applied Ethic*[M]. New York: Routledge, 2017
- [5] Boyd C E. *Water Quality: An Introduction*[M]. Springer Nature, 2019
- [6] 余灏哲, 李丽娟, 李九一. 基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J]. *资源科学*, 2020, 42(2): 358-371
- Yu H Z, Li L J, Li J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. *Resources Science*, 2020, 42(2): 358-371 (in Chinese)
- [7] 王文国, 何明雄, 潘科, 祝其丽, 周芸, 樊毅, 胡启春. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1555-1565
- Wang W G, He M X, Pan K, Zhu Q L, Zhou Y, Fan Y, Hu Q C. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1555-1565 (in Chinese)
- [8] Scheidegger A, Leitao J P, Scholten L. Statistical failure models for water distribution pipes-A review from a unified perspective[J]. *Water research*, 2015, 83: 237-247
- [9] 赵娟, 史文兵, 穆兴民. 基于DEMATEL方法的水资源承载力影响因素分析[J]. *生态经济*, 2015, 31(9): 166-169
- Zhao J, Shi W B, Mu X M. Analysis of influencing factors on the water resource carrying capacity based on DEMATEL method [J]. *Ecological Economy*, 2015, 31(9): 166-169 (in Chinese)
- [10] Yang H Y, Tan Y N, Sun X B, Cheng X W, Liu G Q, Zhou G Y. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity and analysis of obstacle factors in Weifang City based on hierarchical cluster analysis-VIKOR method [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(36): 50388-50404
- [11] 张凯, 吴凤平, 成长春. 三重属性的承载力约束下中国水资源利用效率动态演进特征分析[J]. *环境科学*, 2021, 42(12): 5757-5767
- Zhang K, Wu F P, Cheng C C. Dynamic evolution characteristics of water resources utilization efficiency in China under the constraint of triple attribute carrying capacity [J]. *Environmental Science*, 2021, 42(12): 5757-5767 (in Chinese)
- [12] 徐凯莉, 吕海深, 朱永华. 水资源承载力系统动力学模拟及研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(6): 67-72
- Xu K L, Lü H S, Zhu Y H. Simulation of water resources carrying capacity based on system dynamics[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31(6): 67-72 (in Chinese)
- [13] 党丽娟, 徐勇. 水资源承载力研究进展及启示[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(3): 341-348

- Dang L J, Xu Y. Review of research progress in carrying capacity of water resources [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(3): 341-348 (in Chinese)
- [14] Zhao Y, Wang Y Y, Wang Y. Comprehensive evaluation and influencing factors of urban agglomeration water resources carrying capacity [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 288: 125097
- [15] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 薛小杰. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(1): 30-34
- Xi Y H, Jiang X H, Huang Q, Xue X J. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2001, 21(1): 30-34 (in Chinese)
- [16] 张晓宇, 许端阳, 卢周扬帆, 赵志荣. 基于系统动力学的阿拉善“三生”用水系统演化模拟与调控[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8): 107-113
- Zhang X Y, Xu D Y, Lu Z Y F, Zhao Z R. Evolution simulation and regulation of ‘Production-Living-Ecological water system’ in Alax based on system dynamics [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(8): 107-113 (in Chinese)
- [17] 陈文娟, 姚润铎, 石文豪, 李奇, 赵景琨, 张永根. 基于系统动力学模型的天津市水资源承载力模拟分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(2): 42-51
- Chen W J, Yao R Y, Shi W H, Li Q, Zhao J K, Zhang Y G. Simulation analysis of water resources carrying capacity of Tianjin based on system dynamics model [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2023, 34(2): 42-51 (in Chinese)
- [18] 位帅, 陈志和, 梁剑喜, 黄晶, 银磊, 朱志华. 基于SD模型的中山市水资源系统特征及其演变规律分析[J]. 资源科学, 2014, 36(6): 1158-1167
- Wei S, Chen Z H, Liang J, Huang J, Yin L, Zhu Z H. Analysis of water resource system characteristics and variation law for Zhongshan city based on system dynamics [J]. *Resources Science*, 2014, 36(6): 1158-1167 (in Chinese)
- [19] 王友贞, 施国庆, 王德胜. 区域水资源承载力评价指标体系的研究[J]. 自然资源学报, 2005, 20(4): 597-604
- Wang Y Z, Shi G Q, Wang D S. Study on evaluation indexes of regional water resources carrying capacity [J]. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(4): 597-604 (in Chinese)
- [20] 刘丙军, 陈晓宏, 雷洪成, 陈文静. 流域水资源供需系统演化特征识别[J]. 水科学进展, 2011, 22(3): 331-336
- Liu B J, Chen X H, Lei H C, Chen W J. Distinguishing of water resources supply and demand system evolution features [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 331-336 (in Chinese)
- [21] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 薛小杰. 二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J]. 地理研究, 2001, 20(2): 191-198
- Hui Y H, Jiang X H, Huang Q, Xue X J. On system dynamic simulation model of water resources bearing capacity in duality mode [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 191-198 (in Chinese)
- [22] 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[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(4): 8-15
- Wang Y, Wang H X, Yang Y H, Li H F. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang Province [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4): 8-15 (in Chinese)
- [23] Gain A K, Giupponi C, Benson D. The water-energy-food (WEF) security nexus: the policy perspective of Bangladesh [J]. *Water International*, 2015, 40(5-6): 895-910
- [24] 曹丽娟, 张小平. 基于主成分分析的甘肃省水资源承载力评价[J]. 干旱区地理, 2017, 40(4): 906-912
- Cao L J, Zhang X P. Assessment of water resources carrying capacity in Gansu Province based on principal component analysis [J]. *Arid Land Geography*, 2017, 40(4): 906-912 (in Chinese)
- [25] 周亮广, 梁虹. 基于主成分分析和熵的喀斯特地区水资源承载力动态变化研究: 以贵阳市为例[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5): 827-833
- Zhou L G, Liang H. A study on the evolution of water resource carrying capacity in karst area based on component analysis and entropy [J]. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(5): 827-833 (in Chinese)
- [26] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 范晓秋. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286
- Huang L N, Zhang W X, Jiang C L, Fan X Q. Ecological footprint method in water resources assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1279-1286 (in Chinese)
- [27] 赵静, 王颖, 赵春子, 金明姬. 延边州水资源生态足迹与承载力动态研究[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(12): 74-82
- Zhao J, Wang Y, Zhao C Z, Jin M J. Dynamic research on the ecological footprint and load-carrying capacity of water resources in Yanbian area [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2017, 22(12): 74-82 (in Chinese)
- [28] 范嘉炜, 黄锦林, 袁明道, 张旭辉, 谭彩. 基于子系统熵权模型的珠三角水资源承载力评价[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(3): 100-105
- Fan J W, Huang J L, Yuan M D, Zhang X H, Tan C. Water resources carrying capacity evaluation of Pearl River Delta based on entropy weight model of subsystem [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(3): 100-105 (in Chinese)
- [29] Rodrigues D B B, Gupta H V, Mendiondo E M. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security [J]. *Water Resources Research*, 2014, 50(9): 7187-7205
- [30] 杨琳琳, 李波, 付奇. 基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2016, 52(2): 216-222
- Yang L L, Li B, Fu Q. Scenario analysis of water resources carrying capacity in Xinjiang based on BP neural network model [J]. *Journal of Beijing Normal University: Natural Science*, 2016, 52(2): 216-222 (in Chinese)
- [31] 李文雅, 赵玲玲, 翁学先, 柳玉梅, 宋小燕. 基于系统动力学的珠澳地区取水系统水资源承载力[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(6): 103-110
- Li W Y, Zhao L L, Weng X X, Liu Y M, Song X Y. Water resources carrying capacity evaluation of Zhuhai-Macao water intake system based on system dynamics [J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 103-110 (in Chinese)
- [32] 内蒙古自治区统计局. 内蒙古自治区统计年鉴, 2010—2020 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2010—2020

- Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Statistics. *Inner Mongolia Statistical Yearbook, 2010—2020* [M]. Beijing: China Statistics Press, 2010-2020 (in Chinese)
- [33] 内蒙古自治区水利局. 内蒙古自治区水资源公报, 2010—2020 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010—2020
- Inner Mongolia Autonomous Region Bureau of Water Resources. *Inner Mongolia Water Resources Bulletin, 2010—2020* [M]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2010-2020 (in Chinese)
- [34] 国家能源局. 中国电力统计年鉴, 2010—2020 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010—2020
- National Energy Administration. *China Electric Power Yearbook, 2010—2020* [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010—2020 (in Chinese)
- [35] 千峰. 可持续发展视角下内蒙古自治区水资源管理研究 [D]. 大连: 东北财经大学, 2021
- Qian F. Study on water resources management in inner Mongolia autonomous region from the perspective of sustainable development [D]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics, 2021 (in Chinese)
- [36] 热孜娅·阿曼, 方创琳. 新疆水资源承载力的系统动力学仿真与情景模拟 [J]. 环境科学与技术, 2020, 43(6): 205-215
- Aman R Z Y, Fang C L. System dynamics and scenario simulation of water resources carrying capacity in Xinjiang [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 43(6): 205-215 (in Chinese)
- [37] 项潇智, 贾绍凤. 中国能源产业的现状需水估算与趋势分析 [J]. 自然资源学报, 2016, 31(1): 114-123
- Xiang X Z, Jia S F. Estimation and trend analysis of water demand of energy industry in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(1): 114-123 (in Chinese)
- [38] 孙旭东, 张蕾欣, 张博. 碳中和背景下我国煤炭行业的发展与转型研究 [J]. 中国矿业, 2021, 30(2): 1-6
- Sun X D, Zhang L X, Zhang B. Research on the coal industry development and transition in China under the background of carbon neutrality the background of carbon neutrality [J]. *China Mining Magazine*, 2021, 30(2): 1-6 (in Chinese)
- [39] 王彦哲, 周胜, 王宇, 秦旭映, 陈福冰, 欧训民. 中国核电和其他电力技术环境影响综合评价 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2021, 61(4): 377-384
- Wang Y Z, Zhou S, Wang Y, Qin X Y, Chen F B, Ou X M. Comprehensive assessment of the environmental impact of China's nuclear and other power generation technologies [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2021, 61(4): 377-384 (in Chinese)
- [40] 张莉, 王俏丽, 李伟, 李素静. 电力行业温室气体排放情景分析 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2015, 49(12): 2244-2251
- Zhang L, Wang Q L, Li W, Li S J. Scenario analysis on greenhouse gas emission of power sector [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2015, 49(12): 2244-2251 (in Chinese)
- [41] Jacobson M Z. *100% Clean, Renewable Energy and Storage for Everything* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2020

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介: 张宇冕, 硕士研究生, 现就读于北京师范大学, 硕士就读于北京师范大学, 学士毕业于中国农业大学。硕士期间获得学业一等奖学金, 本科期间获得学业二等奖学金。研究方向为可持续发展与生态系统服务。先后获得土地整治与生态修复工程创新设计大赛一等奖, 自然资源科技作品大赛三等奖等。硕士期间对土地利用、土壤侵蚀等研究颇有兴趣。



通讯作者简介: 骆玉川, 男, 副教授。现任西南大学地理科学学院副教授。主要从事植被遥感监测与模拟、气候变化影响与适应性分析等研究。已在 *Earth System Science Data*、*Science China Earth Sciences*、*International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*、*Environmental Research Letters*、*Agricultural and Forest Meteorology*、*Advances in Climate Change Research* 等国内外期刊发表论文 20 余篇, 入选 ESI 高被引论文, 荣获 IOP 出版社 2023 年“中国高被引文章奖”。