

南水北调中线河南段水资源承载力时空差异与情景预测

苏钊贤¹, 陈佳川², 陈基豪³, 付 豪⁴, 丁新睿⁵

(1. 华北水利水电大学公共管理学院; 2. 水利部发展研究中心; 3. 中国农业大学人文与发展学院;
4. 黄河水利职业技术大学商务与管理学院; 5. 苏州大学政治与公共管理学院)

摘要:为识别南水北调中线河南段受水区水资源承载力水平,基于驱动力-压力-状态-影响-响应框架构建水资源承载力评价指标体系,采用改进“纵横向”拉开档次法和空间自相关模型,分析了南水北调中线河南段受水区 2014—2023 年水资源承载力水平的时空演化特征,并运用系统动力学方法模拟了不同情景下水资源承载力水平的变化趋势。结果表明:南水北调中线河南段受水区水资源承载力水平呈螺旋式上升趋势,驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统与水资源承载力水平整体变化趋势基本一致;各城市水资源承载力集中于弱可承载、临界、超载 3 种状态,空间分布特征由南强北弱向内强外弱演变,区域空间差异持续缩小;不同情景水资源承载力水平从大到小综合排序为综合发展型、环保节约型、现状延续型、经济发展型。

关键词:水资源承载力;南水北调中线河南段;改进“纵横向”拉开档次法;系统动力学

Spatiotemporal differences and scenario prediction of water resources carrying capacity in Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project//Su Zhaoxian¹, Chen Jiachuan², Chen Jihao³, Fu Hao⁴, Ding Xinrui⁵ (1. School of Public Administration, North China University of Water Resources and Electric Power; 2. Development Research Center of the Ministry of Water Resources; 3. College of Humanities and Development Studies, China Agricultural University; 4. School of Business and Management, Yellow River Conservancy Technical University; 5. School of Politics and Public Administration, Soochow University)

Abstract: To identify the water resources carrying capacity level of the water-receiving area in Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, an evaluation index system for water resources carrying capacity was established based on the driving force-pressure-state-impact-response (DPSIR) framework. The improved vertical-and-horizontal scatter degree method and spatial autocorrelation model were adopted to quantitatively measure the spatiotemporal evolution characteristics of water resources carrying capacity in the study area from 2014 to 2023. Furthermore, the system dynamics (SD) method was applied to simulate the changing trends of water resources carrying capacity under different scenarios. The results show that the water resources carrying capacity in the Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project exhibits a spiral upward trend, and the overall variation trend of the five subsystems (driving force, pressure, state, impact and response) is basically consistent with that of water resources carrying capacity. The water resources carrying capacity of each city is concentrated in three states: weak bearable, critical and overloaded. The spatial distribution pattern has evolved from strong in the south and weak in the north to strong in the interior and weak in the periphery, with the regional spatial difference continuously narrowing. The comprehensive ranking of water resources carrying capacity under different scenarios from high to low is as follows: comprehensive development scenario, environmental protection & water-saving scenario, status quo continuation scenario, and economic development-oriented scenario.

Key words: water resources carrying capacity; Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project; improved vertical-and-horizontal scatter degree method; system dynamics

随着全球气候变化、社会生产力提升和经济规模扩大,区域水资源短缺、水环境污染、水生态恶化

等问题日益突出,水资源供需在数量与质量上均长期与社会经济发展存在矛盾。水资源承载力是表征

区域水资源与社会经济、生态环境协调性的瓶颈指标,指在可预见的技术、经济与社会发展水平下,以维护生态环境良性循环为条件,以不制约社会经济可持续发展且满足各部门需求为前提,区域水资源可支撑的最大社会经济发展规模,即具体范围内水资源能够支撑社会经济与生态环境可持续发展能力的阈值^[1]。因此,科学测度区域水资源承载力水平,是落实“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”原则的必然要求,对于保障水资源安全、维护生态平衡、支持社会经济高质量发展具有重要意义。

水资源承载力研究主要聚焦于评价指标体系构建、测度方法选择和情景预测等。在评价指标体系构建方面,由于水资源承载力是涉及水环境、社会进步、经济发展和时空变化的复杂系统,学者们在构建评价指标体系时,发现各子系统的划分与具体指标的选取存在明显差异,并据此提出了多种框架体系,如水-经济-生态^[2]、压力-状态-响应^[3]、驱动力-压力-状态-影响-响应^[4]、水资源-社会-经济-生态环境^[5]、输入-消耗-活力-调节-输出^[6]、量-质-域-流^[7]等。在测度方法选择方面,水资源承载力评价方法较为丰富,常见的包括主成分分析法^[8]、投影追踪法^[9]、模糊综合评价法^[10]、TOPSIS 模型^[11]、CRITIC-
VIKOR 法^[12]、模糊数学法^[13]、半偏减法集对势方法^[14]等。在情景预测方面,根据现有相关政策规划及水资源承载力水平的历史演变特征,设置不同情景以模拟其未来演进趋势,常见方法涵盖指标预测法^[15]、系统动力学法^[16]、灰色拓扑模型^[17]、BP 神经网络^[18]等。

当前水资源承载力领域的研究仍存在诸多局限:①在国家水网建设的宏观背景下,针对南水北调受水区水资源承载力的研究较为匮乏,难以精准匹配调水量与区域实际水资源需求,对平衡经济发展、社会承受能力和水资源可持续利用缺乏科学依据;②水资源承载力评价中权重计算方法较多,单一的赋权方法难以兼顾指标本身的价值量和信息量,容易造成评价结果与客观现实存在偏差,影响评价的科学性与准确性;③现有研究较少关注如何改变水资源承载力关键影响因素以提升水资源承载力水平,缺乏对不同情景下区域水资源承载力未来演变趋势的精准预测与模拟。

南水北调工程作为国家水网的主骨架和大动脉,在优化水资源配置、改善河湖生态环境、保障城乡居民饮水安全、支持沿线城市高质量发展等方面的作用日益彰显。截至 2025 年 2 月,南水北调中线工程累计调水量已突破 700 亿 m³,京津冀豫四省(市)直接受益人口超过 1.14 亿人,有效缓解了北

方受水区水资源短缺问题,提升了区域水资源承载能力。

河南省作为南水北调中线工程的核心水源地和渠首所在地,受特殊地理位置和气候条件的影响,水资源时空分布不均,全省人均、亩均水资源量不足全国平均水平的 1/5、1/4;加之经济社会发展用水需求持续增长、农业水资源短缺及粗放用水模式等因素的影响,水资源稀缺性进一步加剧。基于此,本文根据驱动力-压力-状态-影响-响应 (driving force、pressure、state、impact、response, DPSIR) 框架构建南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力评价指标体系,运用改进“纵横向”拉开档次法分析沿线城市水资源承载力的时空演变特征,借助空间自相关模型探讨受水区水资源承载力是否存在空间集聚特征,并运用系统动力学仿真方法对不同情景下受水区水资源承载力的变化趋势进行预测,以期充分发挥调水工程效益、提高水资源节约集约利用提供理论支持。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

南水北调中线工程河南段具有线路最长、覆盖范围最广的特点,干线总长 731 km,占干渠总长度的 51%。自豫西南的淅川县陶岔渠首引水,向北依次流经南阳市、漯河市、周口市、平顶山市、许昌市、郑州市、焦作市、新乡市、鹤壁市、濮阳市、安阳市,以及 2022 年新增的驻马店市共 12 个地级市,最终由安阳漳河进入河北境内(图 1)。南水北调中线工程于 2014 年 12 月正式通水,根据《南水北调工程总体规划》,中线工程规划口门供水量为 85.4 亿 m³,其中分配给河南省年供水量 35.9 亿 m³,通过 42 个分水口门向 135 座水厂、南阳引丹灌区及 2 座调蓄水库供水。

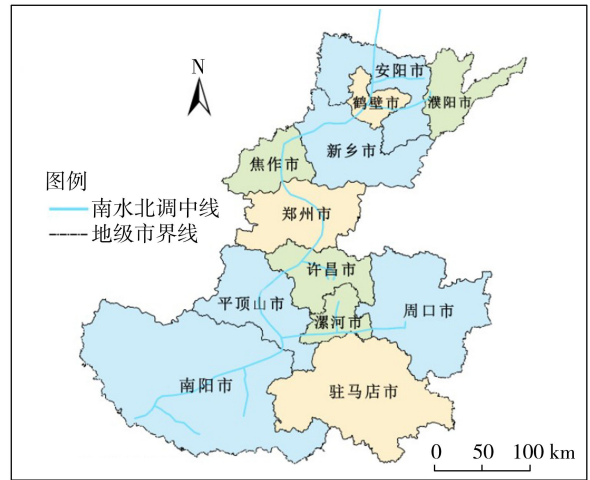


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

1.2 数据来源

选取 2014—2023 年《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国城乡建设统计年鉴》《河南省统计年鉴》等相关统计数据,以及河南省水资源公报、各地市水资源公报和其他官方发布的数据集。针对极少数因统计周期差异、调查范围调整造成的缺失值,采用三次样条插值法予以补齐,在保留原始数据趋势特征的基础上,确保数据矩阵的完整性与分析结论的可靠性。所有数据在导入分析模型前均需完成单位统一与异常值检测,形成标准化的面板数据集。

2 研究设计

2.1 评价指标体系构建

DPSIR 框架涵盖社会、经济、政治与生态要素,可反映人类社会经济活动对生态系统的影响,并将评价因素分层解析为驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个子系统^[19]。本文基于 DPSIR 框架构建南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力评价指标体系:驱动力层面指推动城市水环境承载力变化的人类活动和经济活动指标,反映社会经济发展对水资源的实际需求;压力层面反映用水强度对水资源承载力的影响,反映社会经济发展给水资源带来的压力;状态层面是指水资源承载力在驱动因素和压力共同作用下的状态;影响层面指水资源承载力变化时产生的一系列影响,揭示水资源超载引发的生

态退化与环境污染问题;响应层面指为应对水资源承载力变化采取的节水技术、污染治理等提升水资源承载力的管理对策。基于 DPSIR 框架下水资源承载力系统中的相互作用关系,并根据研究区城市发展现状,构建包含 5 个子系统、20 项指标的水资源承载力评价指标体系(表 1),为制定差异化管控策略提供量化依据。

2.2 研究方法

2.2.1 改进的“纵横向”拉开档次法

水资源承载力涉及水资源、生态环境与社会经济等多重因素,研究数据具有多指标、多维度、多时点的特征。本文对南水北调中线工程河南段受水区 2014—2023 年水资源承载力水平进行综合评价,评价过程加入时间维度,属于具有时序特征的多指标决策问题。常见的评价方法多针对截面数据,若对面板数据先按年截面分析再进行纵向对比,则可能因标准化方法不同,造成不同年份之间其结果不具备可比性。“纵横向”拉开档次法是一种多指标综合评价方法,可在一定程度上解决上述问题。该方法依据时间和数据本身特征确定权重系数,解决了静态测度方法无法对面板数据确定权重系数的问题,能够最大限度体现评价对象在横向(同一时间不同对象)和纵向(不同时间同一对象)的整体差异性^[20]。其基本原理为:设 n 、 m 分别为评价对象与评价指标数量,收集 t_1 、 t_2 、 $\cdots$ 、 t_N 时间段内的原始评价指标数据,构建三维数据集 $X = \{x_{ij}(t_k) \mid i = 1,$

表 1 基于 DPSIR 框架的南水北调中线河南省水资源承载力评价指标体系

Table 1 DPSIR-based evaluation index system of water resources carrying capacity in Henan section of Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project			
准则层	指标	指标意义	指标性质
驱动力 D	人均 GDP(D_1)	经济发展水平	+
	城镇化率(D_2)	城镇化水平	+
	人口变化率(D_3)	人口变化对水资源的影响	-
	第三产业增加值比重(D_4)	区域经济结构优化水平	+
压力 P	万元 GDP 用水量(P_1)	经济发展对水资源的压力	-
	人均生活用水量(P_2)	生活用水压力	-
	万元工业增加值用水量(P_3)	工业用水压力	-
	第一产业增加值比重(P_4)	第一产业发展对水资源的压力	-
状态 S	人均水资源量(S_1)	水资源整体丰裕程度	+
	地表水资源量比重(S_2)	自然资源量补给状态	+
	水资源供需比(S_3)	水资源利用水平	+
	产水系数(S_4)	区域产水状态	+
影响 I	污水排放系数(I_1)	社会经济发展对环境的影响	-
	COD 排放系数(I_2)	化学污染物排放对环境的影响	-
	建成区绿化覆盖率(I_3)	植被对水循环的调节影响	+
	公顷灌溉用水量(I_4)	农业灌溉对水资源的影响	-
	灰水足迹(I_5)	总体水污染情况	-
响应 R	生态用水率(R_1)	生态保护用水情况	+
	污水处理率(R_2)	污水处理效率	+
	再生水量比重(R_3)	非常规水响应水平	+

注:“+”表示正向指标属性,“-”表示负向指标属性。

2,⋯,n;j=1,2,⋯,m;k=1,2,⋯,N}。

a. 数据标准化、无量纲化处理。为便于后续运算,采用最大最小标准化法对原始数据进行标准化处理,以实现其无量纲化。

b. 综合测度值计算。在 t_k 时刻,根据各指标权重对标准化的数据进行加权求和,得到对应评价对象的综合测度值。

c. 权重确定。离差平方和最大化。“纵横向”拉开档次法的核心思想为最大程度体现各评价对象的差异,通过构建目标函数使评价对象间的总体离差平方和 σ^2 达到最大。因原始数据已完成标准化处理,可对目标函数进行简化推导。在限定权重向量模长为 1 的条件下,取由标准化数据构成的 m 阶实对称矩阵最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量,可使 σ^2 取得最大值,最后对所得特征向量分量进行归一化处理,得到最终指标权重。

d. 时间维度加权。在计算得到各评价对象在 t_k 时刻的综合测度值后,仍无法反映其在某一时间段内的总测度值,因此,需对时间因素进行加权处理。采用应用较为广泛的“厚今薄古”法对时间进行二次加权^[21]。该方法的核心思路为:将研究期内的时间截面按时间先后顺序依次编号为 1、2、⋯、 N ,其中编号 $k=1$ 对应研究期的起始年份, $k=N$ 对应研究期内距离当下最近的年份;第 k 个时间截面的标准化时间权重,由参数 α 的 $(k-1)$ 次幂值除以研究期内全部时间截面对应 $\alpha(k-1)$ 次幂值的求和项计算得到。当 $\alpha>1$ 时,越接近当前的年份权重越高,符合“厚今薄古”理论。本文取 $\alpha=1.1$,并据此对 t_k 时刻的时间权重计算公式进行修正,得到 t_k 时刻的时间权重与二次加权的权重系数,进而得到评价对象在研究时段内的总测度值 s_i 。为更清晰地展示水资源承载力评价结果,参考金菊良等^[22-23]的研究成果,将水资源承载力评价值在 $[0,1]$ 范围内平均划分为 5 个等级,对应严重超载、超载、临界、弱可承载、可承载 5 种状态。

2.2.2 系统动力学法

系统动力学(system dynamics,SD)法是以反馈机制解析、动态仿真与多学科耦合建模为核心的系统分析方法,通过构建因果回路与存量流量模型,可精准刻画复杂系统的非线性交互效应,尤其适用于多维动态系统的长期演化预测与政策干预评估。该方法突破了传统模型将经济社会变化视为外部影响因素的局限,通过互联子系统的动态表达式,凸显经济产出、人口规模、生态约束与水资源利用的因果反馈机制,可有效解决高阶次、时变复杂系统的建模难题。在水资源承载力研究中,SD 法可量化其非线性

变化,模拟经济、人口、生态等多元驱动因素耦合作用下的水资源承载力动态演变路径,并通过政策情景测试,为实现社会、经济、生态系统的动态平衡提供方法论支撑。其研究步骤通常包括基于计算机动态仿真构建系统模型、设定互为因果的变量关系,并通过情景试验优化系统行为预测。该方法已在资源环境、生态及区域承载力等研究中得到广泛应用^[24]。

a. 明确系统边界并构建流图。基于 DPSIR 框架构建由驱动力、压力、状态、影响和响应 5 个子系统组成的系统动力学模型,各子系统相互作用、彼此关联。驱动力子系统中,经济发展通过产业结构优化,抑制万元 GDP 用水量等水资源消耗用水压力,人口增长则因生活用水需求增加而加大用水压力;压力子系统引发的水资源供需失衡,会导致人均水资源量下降,破坏地表与地下水资源的比例平衡。水资源状态劣化将造成污水排放系数升高、灰水足迹增大等环境问题;而这些问题又倒逼响应子系统提升生态用水保障力度与污水处理效率,进而缓解用水压力,并改善水资源状态,最终形成驱动力-压力-状态-影响-响应的闭合逻辑回路。SD 法通过变量间的直接因果关联,揭示了人口、经济、资源、环境等水资源承载力的关键指标在水资源承载力约束下的动态演化规律。基于上述多维度因果关系分析,绘制南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力系统流图,如图 2 所示(图中无方框变量为水平变量)。

b. 建立 SD 仿真模型。采用综合分析法、经验公式法、建立表函数等方法,通过反复比对模拟结果与实际情况,对模型参数与公式进行调整和优化。模型共设置 57 个变量,包括 5 个状态变量,5 个速率变量,6 个常量,41 个辅助变量,19 个变量方程,并借助 VENSIM 软件模拟预测南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力演变趋势。

3 结果与分析

3.1 水资源承载力时空演变

3.1.1 时序特征

运用改进的“纵横向”拉开档次法计算南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力评价值,结果如图 3 所示,评价值越大表明水资源承载力水平越高。2014—2023 年受水区水资源承载力水平总体呈螺旋式上升趋势,驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统与水资源承载力总体变化趋势基本一致。受水区水资源承载力水平介于 0.37~0.55,由一般超载逐渐变为临界超载状态,说明受水区水资源承载力水平得到了有效提升。一方面,南水北调

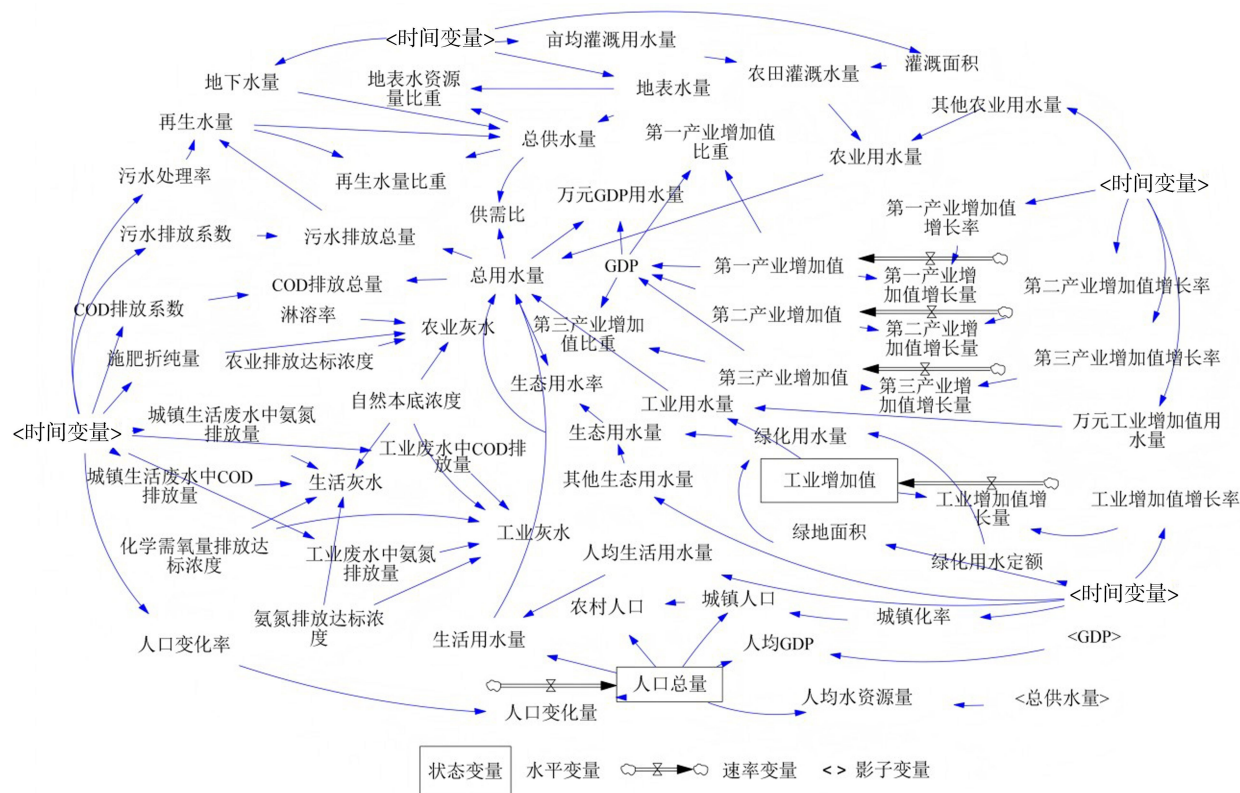


图 2 受水区水资源承载力流图

Fig. 2 Flow chart of water resources carrying capacity in water receiving area

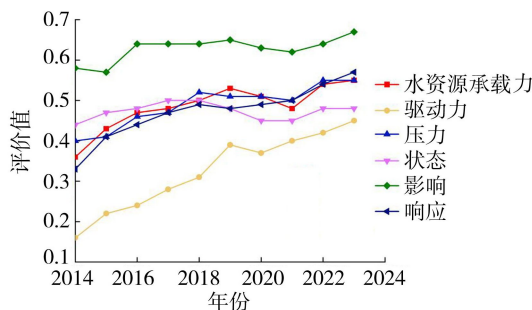


图 3 受水区水资源承载力时序特征

Fig. 3 Temporal characteristics of water resources carrying capacity in water receiving area

中线工程建成通水后,实际供水量由 2014—2015 年调水年度的 7.38 亿 m^3 增至 2023—2024 年的 26.73 亿 m^3 ,有效缓解了供水结构单一性、脆弱性的问题,表明南水北调中线工程对受水区水资源承载力的提升作用持续增强,受水区用水紧张状况得到改善。另一方面,通过制度约束和技术创新提升水资源效率的内生动力,生态用水率、污水处理率、再生水量比重等指标持续上升,污水排放系数、COD 排放系数、吨均灌溉用水量、灰水足迹等指标不断下降,受水区水资源承载力水平整体向健康有序方向发展。

3.1.2 空间演变

为分析 2014—2023 年南水北调中线工程河南段受水区各城市水资源承载力演变特征,采用

ArcGIS 10.2 绘制受水区水资源承载力空间分布图(图 4)。可见,受水区各城市水资源承载力主要集中于弱可承载、临界及超载 3 种状态,城市间差异较小;空间分布特征从南强北弱向内强外弱演变。初始南强北弱特征与受水区水资源量南多北少的空间差异一致,南阳、焦作、周口、驻马店等城市因水资源禀赋优良、降水丰沛,水资源承载力水平较高,说明水资源禀赋是受水区水资源承载力水平的重要影响因素;内强外弱特征是因郑州和许昌等城市在再生水利用与节水管控方面实现双突破,其水资源系统从脆弱平衡转向韧性提升,水资源承载力由省内中下游水平提升至上游水平。

为进一步分析 2014—2023 年南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力情况,揭示各城市间水资源承载力的相关关系,以地级市为单元、综合特征值为变量,借助 Geoda 1.16 软件进行单变量全局自相关分析,得到受水区水资源承载力全局莫兰指数(表 2)。可见 2017 年为受水区水资源承载力的拐点,其差异性由不显著变为显著,且空间集聚表现为正相关。2014—2016 年 $p > 0.05$,表明在 0.05 显著性水平上空间相关性不显著;2017—2023 年 $p < 0.05$,通过显著性检验,表明水资源承载力在整个受水区呈空间正相关,即相距越近的城市,水资源承载力水平差异越小,受水区水资源承载力在一定程度

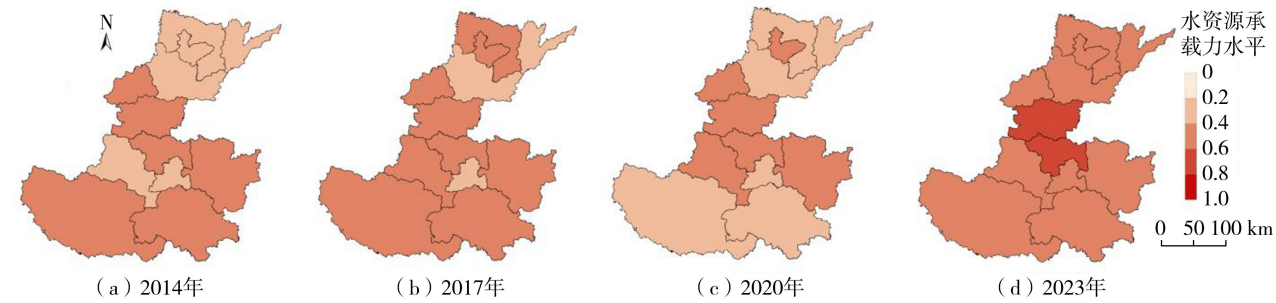


图 4 受水区水资源承载力空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of water resources carrying capacity in water receiving area

表 2 全局自相关检验

Table 2 Global autocorrelation test

年份	全局莫兰指数	<i>p</i>
2014	0.187 2	0.123 4
2015	0.205 7	0.081 0
2016	0.224 2	0.068 9
2017	0.215 6	0.045 5
2018	0.230 1	0.040 3
2019	0.244 6	0.030 2
2020	0.243 8	0.034 3
2021	0.258 3	0.027 5
2022	0.272 8	0.019 8
2023	0.272 1	0.012 1

上存在空间集聚效应。

3.2 变化趋势情景模拟

3.2.1 SD 模型历史有效性检验

为确保所构建的 SD 模型能够准确表征区域水资源承载力演化趋势,选取 2014—2020 年南水北调中线工程河南段受水区 GDP、总供水量、总用水量、人口总量、生活用水量和污水排放总量等数据进行变量参数率定;同时以 2021—2023 年各变量模拟值与实际值进行验证,采用误差分析法对模型进行历史有效性检验,基于 SD 模型验证理论框架,结合系统特征保障模型方程完整性,合理设置表函数范围,并调试至模型正常运行。

历史检验采用相对误差法,通过计算历史数据实际值与 SD 模型模拟值的相对误差判断精度。Lin 等^[25]研究表明,相对误差在±5%以内即可认为模型有效。采用有效性检验,发现各主要变量模拟值与实际值的误差均在±5%以内,表明该模型模拟精度和可信度良好,能够进一步开展情景模拟分析。

3.2.2 情景设置

水资源承载力系统受各因素动态影响,不同政策情景设置会导致水资源承载力呈现不同变化。为进一步揭示各类情景下水资源承载力水平的演变趋势,参考《河南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》《水利部 国家发展改革委关于加强南水北调东中线工程受水区全

面节水的指导意见》等政策文件,结合区域现实情况,设计 4 种发展情景。

情景 1:现状延续型。假定 2024—2035 年受水区维持当前发展现状,方案主要参数参考 2023 年取值,并以此为基础预测受水区 2024—2035 年水资源承载力。

情景 2:经济发展型。情景 1 的基础上,依据《河南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》,将第三产业增长率提升至 6%,以满足服务业等高效益产业发展的需求;在保障粮食安全的前提下,第一产业增长率提高 3%;综合考虑水资源消耗和环境污染阈值,将第二产业增长率最大提高至 6%,工业增加值增长率提升至 6%;同时人口增长率 2025—2030 年设定为 0.2%,2031—2035 年为 0,以适应社会经济发展需求。

情景 3:环保节约型。在情景 1 的基础上,依据《水利部 国家发展改革委关于加强南水北调东中线工程受水区全面节水的指导意见》等政策文件,实施节水降污措施:将污水排放系数降低 2%,污水处理率提高 2%,COD 排放系数削减 2%,人均生活用水量压减 3%;由于减少污染物排放会抑制经济发展,尤其在工业发展受到严格限制的情况下,因此将第二产业增长率降低 4%,万元工业增加值用水量下降 3%。从源头提升水资源利用效率,通过增加 5%绿地面积、降低 1%灌溉面积、削减 2%公顷灌溉用水量、降低 5%化肥折纯量,有效控制农业面源污染;同时严格管控污染物排放,将城镇生活污水和工业废水中 COD 排放量、氨氮排放量均降低 5%,全面削减水资源负荷。

情景 4:综合发展型。通过统筹经济发展与生态保护目标,对关键指标进行精细化调整,将第一、二、三产业增长率及工业增加值增长率均提升 1%,人口增长率设为 0.2%,以保障社会经济合理增长;同时,污水排放系数降低 2%,污水处理率提高 2%,COD 排放系数削减 2%,人均生活用水量降低 1%,

万元工业增加值用水量下降 1.5%, 吨均灌溉用水量减少 2%, 化肥折纯量下降 3%, 系统优化水资源利用效率; 严格管控污染物排放, 将城镇生活和工业废水中的 COD 与氨氮排放量降低 3%, 并增加 5% 绿地面积。

3.2.3 不同情景下南水北调中线工程河南段受水区水资源承载力变化趋势比较

不同情景下南水北调中线工程河南段受水区水

资源承载力水平模拟结果如图 5 所示。从供需比演变特征来看, 情景 3 供需比呈快速上升趋势, 表明该情景通过开源节流有效缓解了水资源供需矛盾; 情景 2 供需比则呈现快速下降趋势, 主要因经济高速增长导致用水需求大幅增加, 而供给能力难以同步匹配, 造成供需矛盾进一步加剧; 情景 4 和情景 1 的供需比总体保持相对稳定, 其中情景 4 通过统筹经济发展与水资源保护, 实现了水资源供需关系的动

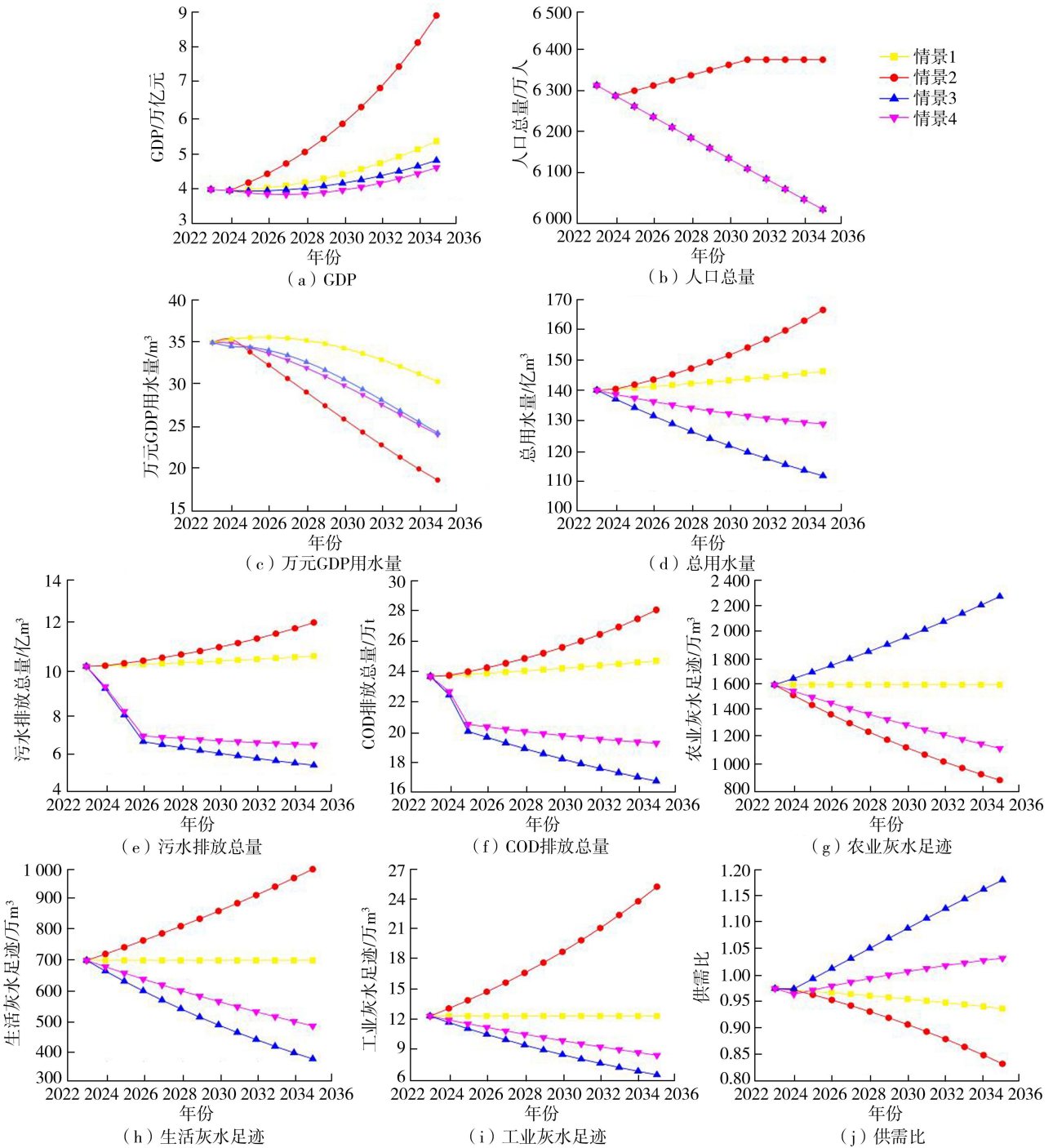


图 5 不同情景下受水区水资源承载力系统主要指标变化趋势

Fig. 5 Trends of main indicators for water resources carrying capacity system in water receiving area under different scenarios

态均衡;情景 1 延续了既有水资源管理模式与经济发展速率,供需矛盾未得到明显改善。

a. GDP。情景 2 中 GDP 保持持续增长趋势,主要得益于各类产业的快速发展。相比之下,情景 4 的 GDP 初期略有下降,随后逐步回升并趋于稳定增长,原因在于该情景初期对产业结构进行调整优化,短期内对经济增长产生了一定的冲击,但长期更有利于经济的可持续发展。情景 3 与情景 1 的 GDP 则基本保持平稳,没有表现出显著的增长动力。

b. 人口总量。情景 2 下人口总量呈持续上升趋势,主要得益于其强劲的经济增长与就业岗位的创造,吸引了大量人口聚集。相比之下,其他 3 种情景人口总量均呈下降趋势,与现实人口增长率保持一致。

c. 万元 GDP 用水量。各情景万元 GDP 用水量由高到低依次为:情景 1、情景 3、情景 4、情景 2。除情景 1 外,其余 3 种情景至 2030 年万元 GDP 用水量降幅均超过 10%,可以在南水北调中线工程河南段受水区范围实现《水利部 国家发展改革委关于加强南水北调东中线工程受水区全面节水的指导意见》中提出的,到 2030 年受水区万元国内生产总值用水量继续下降 10%左右的目标。

d. 总用水量。情景 3 通过建设节水型社会,显著降低了总用水量,从 2023 年的 140.22 亿 m³ 降至 2035 年的 112.28 亿 m³,降幅在各情景中最大;情景 4 通过强化水资源管理、提高用水效率,有效降低了总用水量,降幅位列第二;情景 1 总用水量保持平稳;情景 2 因水资源利用方式较为粗放,导致总用水量急剧上升,水资源消耗总量仍处于较高水平。

e. 污染物排放总量。情景 2 受产业扩张驱动,污染物排放总量持续上升,表明高增长模式下工业污染物产排强度显著提高;情景 3 污染物排放总量呈持续下降态势,表明该情景通过源头减污与监管升级,有效削减了水体污染负荷;情景 4 污染物排放总量先降后稳,体现了阶段性环境政策的介入,促使经济增长与污染控制实现了动态平衡;情景 1 污染物排放总量总体维持低波动稳定状态,但存在微幅上升压力,显示出既有发展模式下污染治理效能的边际递减效应。

f. COD 排放总量。情景 2 与情景 1 的 COD 排放总量均呈上升趋势,情景 4 平缓下降,情景 3 则下降迅速。究其原因,情景 3 通过实施严格的环境监管、采用高效的污水处理技术,有效降低了 COD 排放总量;而情景 2 因侧重经济增长,对环保措施的投入相对不足,导致 COD 排放总量快速上升

g. 工业、农业、生活灰水足迹。3 类灰水足迹

呈现相似的趋势,在情景 2 下,工业、农业和生活灰水排放量均呈上升趋势,表明经济发展带来的水资源需求增长会加剧污染,对水生态环境造成压力。情景 3 下,3 类灰水排放量均呈下降趋势,反映出环保措施和生态环境保护政策的落实,有效降低了水资源压力。情景 1 下,3 类灰水排放量相对稳定,表明当前发展模式在环境压力管控方面未取得明显进展。情景 4 下,3 类灰水排放量均有不同程度下降,表明在推动经济增长的同时,通过强化工业污染防治,严控农业面源污染及加强生态环境保护,可有效缓解各类水污染问题。

3.2.4 不同情景下水资源承载力评价

根据 SD 法预测的未来水资源系统各项指标数值,计算预测期各年份水资源承载力水平,不同情景下受水区水资源承载力水平如表 3 所示。

表 3 不同情景下受水区水资源承载力水平
Table 3 Water resources carrying capacity level in water receiving area under different scenarios

年份	水资源承载力水平			
	情景 1	情景 2	情景 3	情景 4
2023	0.5909	0.5909	0.5909	0.5909
2024	0.5589	0.5428	0.6020	0.6085
2025	0.5725	0.5790	0.6170	0.6225
2026	0.5860	0.5710	0.6295	0.6390
2027	0.6295	0.5420	0.6395	0.6555
2028	0.6305	0.5720	0.6545	0.6645
2029	0.6765	0.5435	0.6640	0.6808
2030	0.6585	0.5595	0.6768	0.6848
2031	0.6880	0.5685	0.6925	0.6905
2032	0.6915	0.5505	0.7155	0.7218
2033	0.7450	0.5778	0.6685	0.7750
2034	0.7690	0.6095	0.8195	0.8228
2035	0.7425	0.6288	0.8525	0.8725

情景 1 和情景 2 水资源承载力水平呈波动上升趋势。情景 1 中,2024 年水资源承载力水平降至 0.5589,随后逐步回升,2034 年升至 0.7690,2035 年又回落至 0.7425,表明在现有发展模式惯性下,无法在水资源压力提升时有效改善各子系统的相关要素。情景 2 中水资源承载力水平波动更为明显,2024 年降至 0.5428,尽管后期有所回升,2035 年也仅达 0.6288,表明该情景下经济增长导向可能造成水资源过度开发与污染物排放量增加,资源消耗速率超出承载阈值,限制了水资源承载力水平提升。

而情景 3 与情景 4 水资源承载力水平呈持续上升趋势,情景 3 下,从 2024 年的 0.6020 持续攀升至 2035 年的 0.8525,体现了水资源保护、节约利用及污染治理措施对水资源承载力的正向驱动作用。情景 4 表现最为突出,2024 年水资源承载力水平为

0.608 5,2035 年跃升至 0.872 5,始终保持领先。该情景实现了经济、社会与生态目标的协同共进,在推动经济发展的同时,强化环境保护与资源高效利用,从而最大程度提升水资源承载力水平。

综合分析表明,情景 1 延续既有发展路径,难以有效适应未来系统动态演变,情景 2 以单一经济增长为导向,导致水资源承载力系统压力超载,二者均无法实现承载力持续提升。情景 3 通过聚焦生态保护与资源节约,推动了水资源承载力的提升,而情景 4 依托经济-社会-生态多维度协同机制,实现了更高水平的承载力进阶。研究显示,水资源承载力提升并非单一要素驱动的结果,而是经济发展模式转型、资源高效利用与生态环境保护措施系统耦合的结果。只有通过多目标协同的综合发展路径,突破资源环境约束瓶颈,方能实现水资源承载力的持续提升。

4 结 论

a. 从时序特征来看,受水区水资源承载力整体呈螺旋式上升趋势,驱动力、压力、状态、影响、响应 5 个子系统的变化趋势与水资源承载力总体趋势基本一致,表明受水区各城市水资源承载力均得到不同程度的提升

b. 从空间演化来看,2014—2023 年南水北调中线工程河南段受水区沿线各城市水资源承载力主要集中在弱可承载,临界及超载 3 种状态,城市间空间差异持续缩小,空间分布特征由南强北弱逐步向内强外弱演变。2017 年为受水区水资源承载力空间分布特征的拐点,此后水资源承载力空间集聚特征逐步显现。

c. 多情景模拟与未来预估结果显示,南水北调中线河南段受水区水资源承载力仍具备较大提升空间,不同情景下水资源承载力水平从大到小综合排序为:综合发展型、环保节约型、现状延续型、经济发展型。经济发展型虽能快速促进经济增长,但会加剧水资源承载力超载;环保节约型虽能有效保护水环境,但对经济增长存在一定约束;现状延续型在预测期内对受水区水资源承载力的改善作用不显著;而综合发展型在经济增长、环境保护与社会发展方面实现了较好平衡,可实现经济、社会和生态协调发展。

参考文献:

[1] Jones E R, Bierkens M F P, Van Vliet M T H. Current and future global water scarcity intensifies when accounting for surface water quality[J]. Nature Climate Change,2024,14(6):629-635.
[2] Wang Yuxi, Wang Yong, Su Xulian, et al. Evaluation of the

comprehensive carrying capacity of interprovincial water resources in China and the spatial effect[J]. Journal of Hydrology,2019,575:794-809.
[3] 刘英杰,丁静媛,薛智文. 基于云模型与 PSR 模型的长江三角洲水资源承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2021,42(2):42-49. (Liu Yingjie, Ding Jingyuan, Xue Zhiwen, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Yangtze River Delta based on cloud model and PSR model[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2021, 42(2): 42-49. (in Chinese))
[4] 王瑛,付艳淙. 改进指标赋权法的水资源承载力动态综合评价[J]. 统计与信息论坛,2022,37(7):98-107. (Wang Ying, Fu Yancong. Dynamic comprehensive evaluation of water resources carrying capacity based on improved index weighting method[J]. Statistics and Information Forum,2022,37(7):98-107. (in Chinese))
[5] 贾玉博,杨宏伟,栗晓玲,等. 基于水代谢和水循环理论的石羊河流域水资源承载力评价[J]. 水资源保护,2024,40(5):86-94. (Jia Yubo, Yang Hongwei, Su Xiaoling, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Shiyang River Basin based on water metabolism and water cycle theory[J]. Water Resources Protection,2024,40(5):86-94. (in Chinese))
[6] 唐顺琦,郭亚科,钱会,等. 关中地区水资源承载力综合评价及耦合协调性研究[J]. 生态科学,2025,44(1):70-79. (Tang Shunqi, Guo Yake, Qian Hui, et al. Comprehensive evaluation and coupling coordination of water resources carrying capacity in Guanzhong region[J]. Ecological Science, 2025, 44(1): 70-79. (in Chinese))
[7] 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 Haozhe, Li Lijuan, Li Jiuyi, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region based on quantity-quality-domain-flow framework[J]. Resources Science,2020,42(2):358-371. (in Chinese))
[8] 顾文权,胡雅洁,包秀凤,等. 典型南方小流域水资源承载能力分析[J]. 武汉大学学报(工学版),2021,54(5):381-386. (Gu Wenquan, Hu Yajie, Bao Xiufeng, et al. Analysis of water resources carrying capacity in typical southern small watershed[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2021, 54(5): 381-386. (in Chinese))
[9] 金菊良,杨通竹,酆建强,等. 投影寻踪方法在水资源承载力评价与预测中的应用[J]. 水利水运工程学报,2020(4):10-16. (Jin Juliang, Yang Tongzhu, Li Jianqiang, et al. Application of projection pursuit method in evaluation and prediction of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering and Water

- Transport,2020(4):10-16. (in Chinese))
- [10] Qiu Qingtai, Liu Jia, Li Chuanzhe, et al. Evaluation of water resource carrying capacity of two typical cities in Northern China [J]. Journal of Water and Climate Change,2021,12(7):2894-2907.
- [11] 左其亭,张志卓,吴滨滨. 基于组合权重 TOPSIS 模型的黄河流域九省区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 1-7. (Zuo Qiting, Zhang Zhizhuo, Wu Binbin, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in nine provinces of the Yellow River Basin based on combined weight TOPSIS model[J]. Water Resources Protection,2020,36(2):1-7. (in Chinese))
- [12] 谭豪,脱云飞,王倩,等. 基于 CRITIC-VIKOR 法的云南省水资源承载力综合评价[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(4): 118-126. (Tan Hao, Tuo Yunfei, Wang Qian, et al. Comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in Yunnan Province based on CRITIC-VIKOR method [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2023,34(4):118-126. (in Chinese))
- [13] Wang Jiayang, Mu Xiaoqin, Chen Shouji, et al. Dynamic evaluation of water resources carrying capacity of the Dianchi Lake Basin in 2005—2015, based on DSPERM framework model and simulated annealing-projection pursuit model[J]. Regional Sustainability, 2021, 2(2): 189-201.
- [14] 金菊良,沈时兴,崔毅,等. 半偏减法集对势在引黄灌区水资源承载力动态评价中的应用[J]. 水利学报, 2021, 52(5):507-520. (Jin Juliang, Shen Shixing, Cui Yi, et al. Application of semi-partial subtraction set pair potential in dynamic evaluation of water resources carrying capacity in the Yellow River Irrigation Area[J]. Shuili Xuebao,2021, 52(5):507-520. (in Chinese))
- [15] 李琦芸,董增川,杨光,等. 基于协调发展度的南通市水资源承载状态预警[J]. 水利经济, 2022, 40(3): 65-70. (Li Qiyun, Dong Zengchuan, Yang Guang, et al. Early warning of water resources carrying status in Nantong City based on coordinated development degree [J]. Water Economy,2022,40(3):65-70. (in Chinese))
- [16] Yang Guang, Fan Ziwu, Li Dongzhou, et al. Prediction of water resource carrying status based on the “three red lines” water resource management policy in the coastal area of Jiangsu Province, China[J]. Water Policy, 2022, 24(10):1610-1630.
- [17] 李谨,董亚军,傅新,等. 基于生态足迹法的徒骇河-马颊河流域水资源承载力动态分析与预测[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(5): 524-532. (Li Jin, Dong Yajun, Fu Xin, et al. Dynamic analysis and prediction of water resources carrying capacity in Tuha-Majia River Basin based on ecological footprint method [J]. Journal of University of Jinan (Natural Science Edition), 2022, 36(5): 524-532. (in Chinese))
- [18] 刘欢,宋孝玉,李磊,等. 中国 31 省(市、自治区)水资源承载力评价及预测研究[J]. 干旱地区农业研究,2023, 41(4): 226-237. (Liu Huan, Song Xiaoyu, Li Lei, et al. Evaluation and prediction of water resources carrying capacity in 31 provinces(cities and autonomous regions) of China[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2023, 41(4): 226-237. (in Chinese))
- [19] Li Siqi, Qian Hui, Xu Panpan, et al. Insight into the water resource carrying capacity of the central water tower in China: integrating the driving-pressure-state-impact-response frame and obstacle degree recognition [J]. Ecological Indicators, 2024, 167: 112730.
- [20] 吴和成,沈立,李翬. 长江沿线城市生态环境脆弱性时空演进研究[J]. 运筹与管理, 2024, 33(10): 159-165. (Wu Hecheng, Shen Li, Li Jiang. Spatiotemporal evolution of eco-environmental vulnerability in cities along the Yangtze River[J]. Operations Research and Management Science, 2024, 33(10): 159-165. (in Chinese))
- [21] 聂长飞,简新华. 中国高质量发展的测度及省际现状的分析比较[J]. 数量经济技术经济研究, 2020, 37(2): 26-47. (Nie Changfei, Jian Xinhua. Measurement of China's high-quality development and interprovincial comparative analysis [J]. Journal of Quantitative & Technological Economics, 2020, 37(2): 26-47. (in Chinese))
- [22] 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. Evaluation method of water resources spatial equilibrium based on connection number and coupling coordination degree [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 1-6. (in Chinese))
- [23] 邓乐乐,郭生练,王俊,等. 基于博弈论-云模型的湖北省汉江中下游地区水资源承载力评价[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 200-208. (Deng Lele, Guo Shenglian, Wang Jun, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in the middle and lower reaches of Hanjiang River in Hubei Province based on game theory-cloud model[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 200-208. (in Chinese))
- [24] 薛晴,杨侃. 基于 BP 神经网络-系统动力学耦合模型的江苏省水资源承载力预测与调控研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(11): 86-99. (Xue Qing, Yang Kan. Prediction and regulation of water resources carrying capacity in Jiangsu Province based on BP neural network-system dynamics coupling model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(11): 86-99. (in Chinese))
- [25] Lin J, Lin T. Object-oriented conceptual modeling for commitment-based collaboration management in virtual enterprises [J]. Information and Software Technology, 2004, 46: 209-217.

(收稿日期:2025-06-09 编辑:胡新宇)