#### DOI: 10.20103/j.stxb.202305221082

陈银花,姜丰,王赛鸽,陈彬.基于系统动力学的北京市再生水利用潜力与生态网络特征分析.生态学报,2025,45(1):280-295. Chen Y H, Jiang F, Wang S G, Chen B.System dynamics-based analysis of the potential and ecological network characteristics of Beijing's reclaimed water system. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1):280-295.

## 基于系统动力学的北京市再生水利用潜力与生态网络 特征分析

### 陈银花1,姜 丰2,王赛鸽2,陈 彬1,2,\*

1 湖南工商大学资源环境学院,长沙 410205

2 北京师范大学环境学院环境模拟与污染控制国家重点实验室,北京 100875

**摘要:**为应对再生水利用的潜在风险,有必要对再生水利用与再生水系统网络稳定性之间的不确定性关系展开研究。以北京市 为研究区域,基于 2015—2020 年再生水需求、供给、利用及其影响因素,采用系统动力学方法构建了再生水供需模型,揭示了 2020—2050 年再生水供需变化特征,并确定了 7 种工业再生水使用情景下的生态环境、生活、工业、污水处理和再生水利用部门 间用水变化。此外,基于生态网络分析方法,分析了再生水系统网络系统代谢效率、冗余和部门关系特征,揭示了再生水系统鲁 棒性水平和互惠程度。研究结果表明:(1)再生水系统模拟值与现实值的误差小于 10%,所构建再生水系统动力学模型能准确 反馈再生水各变量间因果关系。经模拟发现,北京市 2015—2050 年再生水供给量增幅(2.55%)远低于再生水需求量增幅 (2.82%)。(2)2020—2050 年各情景下再生水系统平均鲁棒性指数呈现"先上升后下降"趋势。(3)在工业再生水比例为0.45 时,再生水系统平均鲁棒性指数达到最大值 0.28。此时再生水大量流入工业部门,形成工业对再生水的依赖,从而大大减少工 业用水压力。通过结合系统动力学与生态网络方法,明晰了工业再生水潜力,为北京市工业部门节约用水提供参考。 关键词:再生水利用;再生水利用潜力;再生水网络;工业再生水

# System dynamics-based analysis of the potential and ecological network characteristics of Beijing's reclaimed water system

CHEN Yinhua<sup>1</sup>, JIANG Feng<sup>2</sup>, WANG Saige<sup>2</sup>, CHEN Bin<sup>1,2,\*</sup>

1 School of Resource & Environment, Hunan University of Technology and Business, Changsha 410205, China

2 State Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

**Abstract**: Given the potential risks of reclaimed water usage, the uncertain relationship between reclaimed water usage and the stability of the network of reclaimed water system should be explored. Based on the system dynamics approach and the factors affecting the supply, demand and usage of reclaimed water from 2015 to 2020, this study constructed a model for reclaimed water supply and demand in Beijing. We characterized the changes in reclaimed water supply and demand from 2020 to 2050, and identified the water use network changes between the domestic, industrial and environmental sectors under seven scenarios of industrial reclaimed water use. Based on ecological network analysis method, the system metabolic efficiency, redundancy and sectoral interaction characteristics of the reclaimed water network were further examined, revealing the level of robustness and reciprocity in reclaimed water system. The results showed that: (1) there was less than 10% discrepancy between the simulated and actual values of the reclaimed water system. The reclaimed water. The growth rate of reclaimed water supply (2.55%) in Beijing from 2015 to 2050 was much lower than the growth rate of reclaimed water supply (2.82%). (2) The average robustness index exhibited a trend of "first rising then declining" under different scenarios from 2020 to 2050. (3) The average robustness index reached a maximum of 0.28 when the industrial reclaimed

基金项目:湖南省科技创新计划资助(2023RC4008);国家自然科学基金项目(72091511,72103022)

收稿日期:2023-05-22; 网络出版日期:2024-09-23

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: chenb@ bnu.edu.cn

water ratio was 0.45. At this point, a large amount of reclaimed water entered the industrial sector, creating a dependency on it and greatly reducing the pressure associated with industrial water consumption. This study clarified the industrial reclaimed water potential by combining system dynamics and ecological networks and provided a reference for water conservation in the industrial sector in Beijing.

Key Words: reclaimed water use; reclaimed water use potential; reclaimed water network; industrial reclaimed water

水资源短缺是制约城市经济社会发展的关键因素<sup>[1]</sup>。随着水资源承载能力约束的增强,污水资源化利 用成为解决水资源匮乏的有力举措。再生水由废水或雨水经适当处理并达到一定的水质标准后形成,其供应 稳定可控<sup>[2]</sup>,缓解了城市水安全问题<sup>[3-4]</sup>。随着城市化进程加快,高工业需求伴随更高的用水强度<sup>[5]</sup>,因此 急需推进废水循环利用。由于存在潜在水质风险,再生水应用范围有限<sup>[6-8]</sup>。鉴于工业用水对水质的要求相 对较为宽松<sup>[9]</sup>,工业再生水利用有助于促进用水系统与污水处理系统之间的协调,并有效提升工业用水效 率<sup>[10]</sup>。在此背景下,北京市于 2003 年在全国率先实现了再生水利用的"零"突破。此后,再生水行业迅速发 展。2015 年起,再生水被广泛应用于环境、工业和市政。2022 年 6 月,北京市政府发布《北京市"十四五"时 期污水处理及资源化利用发展规划》,该规划提出将重点推进生产生活用水再生水替代,有效推动再生水成 为工业用水主要来源。截至 2022 年,北京市再生水供给量约占水资源供给总量的 30.10%,主要用于生态补 水、工业、市政等领域,显著减轻了对地表水和地下水资源的需求压力,促进了北京市水资源保护。

系统动力学为模拟和分析具有各种相关因素的复杂系统提供了一种有效的工具<sup>[11]</sup>,能够预测再生水未 来发展情况<sup>[12]</sup>,为城市水资源可持续管理提供辅助信息。相对于灰色模型 GM(1,N)<sup>[13]</sup>、随机森林法<sup>[14]</sup>、聚 类分析方法<sup>[15]</sup>、Spearman 秩相关<sup>[16]</sup>等预测方法,系统动力学方法能够在分析相关关系的基础上,模拟变量间 的相互作用与反馈机制,从而实现未来情景下再生水系统内部驱动因素和变化趋势的定量分析。自 20 世纪 70 年代以来,一些学者开始应用系统方法来研究城市水资源系统,并逐渐将再生水作为可用水源纳入水系 统<sup>[17-18]</sup>。如 Park 等<sup>[19]</sup>利用系统动力学模型合理预测了替代水源开发对供水系统的影响,并对替代水源的 可行性给出了理论解释。诸多学者从技术、生态和经济等角度探讨了再生水利用的可行性<sup>[20]</sup>,包括再生水处 理技术优化<sup>[21]</sup>、再生水生态风险<sup>[22]</sup>、再生水利用效益<sup>[23-24]</sup>等方面。已有研究表明,城市废水经过高级处理 可实现再利用<sup>[25]</sup>,这为再生水利用的可行性提供了实质性支持。Nezami 等<sup>[26]</sup>将系统动力学和城市水代谢方 法相结合,对城市水系统中各子系统间的交互作用进行全面的动态模拟与分析,实现水资源有效管理。鉴于 未来环境和社会条件的高度不确定性,再生水管理将面临更多外部干预的挑战<sup>[27-28]</sup>,因此明晰再生水供水部 门与各再生水利用部门间关系至关重要。

然而,系统动力学强调系统内部各个因素之间的相互关系和反馈循环,常因使用过于复杂的变量描述使 得系统的整体性难以简单刻画,不易了解系统中各个组成部分的相互关系和连接方式。生态网络分析起源于 1973年,是分析生态系统结构与功能之间相互作用的主要方法之一<sup>[29]</sup>。1976年,Patten首次提出生态网络 分析方法<sup>[30]</sup>。该方法随后被引入城市新陈代谢系统分析中<sup>[31]</sup>,并被广泛应用于城市水系统,以分析系统各 组成部分间的水质代谢作用或水资源利用的相互关系,为水资源可持续利用提供有效信息。生态网络分析可 从网络整体状况和网络内部节点间互动作用开展分析<sup>[32]</sup>。具体而言,通过评估不同部门之间的相互关系和 资源分配情况揭示网络内部结构和功能<sup>[33-36]</sup>。生态网络模型可以分析水生态网络模型中各组成部分之间的 流量和代谢关系<sup>[37]</sup>。例如,Xu等<sup>[38]</sup>建立了能、水、碳三个生态网络以探讨各种复杂代谢过程下不用部门之 间的水资源利用、能源消耗和碳排放的复杂关系,全面评估了能-水-碳代谢系统。Zheng等<sup>[39]</sup>基于生态网络 分析和投入产出分析来研究工业废水的代谢情况,为减排政策提供决策支持。

系统动力学适于研究复杂系统内变量间反馈关系,而生态网络分析从整体视角反映系统特征。系统动力 学与生态网络分析结合使研究能以网络形式表征系统内各部门间相互作用,使复杂系统内各部门相互关系与 结构特征得以可视化呈现<sup>[40]</sup>。以往再生水利用潜力的量化研究侧重于变量间的相互影响,对评估未来再生 水系统内部结构与外在功能特征的研究相对缺乏,亟待从水资源复杂系统整体性能的评估视角研究各部门流量与结构功能<sup>[41]</sup>。为此,本研究以北京市为例,采用系统动力学构建再生水系统模型,结合情景分析模拟预测 2020—2050 年不同工业再生水利用情景下的再生水变化;基于生态环境、生活、工业、污水处理和再生水利 用这五个关键部门间流量,进一步结合生态网络分析方法将系统动力学模型转换为网络以评估再生水系统的 稳健性水平和系统代谢效率,指出城市增加再生水利用比例对水系统结构与功能的调节作用,确定城市再生 水系统中各部门用水结构和部门间交互控制关系。研究结果基于系统视角表明工业再生水的利用能够提高 再生水系统代谢效率,对水资源的节约具有参考意义。

#### 1 研究区域与数据来源

#### 1.1 研究区域概况

北京市 2020 年常住人口数量达 2189.3 万人,其中城镇人口 1916.6 万人。北京市水资源有以下特点:(1) 水资源自然禀赋不足,年人均水资源量约 150m<sup>3</sup>。年平均降水时空分布不均,汛期 6—9 月降水占全年 80%左 右;地下水开发达最大限度,短期难以恢复。(2)开发再生水利用具有巨大潜力。截至 2020 年,全市规模以 上污水处理厂日处理能力为 687.9 万 m<sup>3</sup>,污水处理率达到 84.6%。北京市总供水为 40.6 亿 m<sup>3</sup>,其中地下水与 再生水是供水的主要来源,分别占总供水的 33.3%、29.6%。在供水结构中,再生水利用量占全国再生水利用 量的 8.2%,位居全国之首。

#### 1.2 数据来源

研究所用数据包括总人口、地区生产总值、工业生产总值、污水排放量、污水处理量、污水处理率、污水回 用率、再生水供给量、环卫绿化再生水、河湖补水再生水等,具体数据来源如表1所示。鉴于《北京市统计年 鉴》未明确其他污水排放量,且当前没有关于其他污水排放的统计口径,本文以2015—2020年污水的总排放 量减去生活与工业污水排放量进行粗略计算,保障污水排放量的平衡。2020—2050年其他污水排放量以 2020年总排放量与工业、生活污水排放量间的差值代替。

Table 1 Data resour	rce
变量 Variables	来源 Sources
地区生产总值 Gross Domestic Product(GDP) 工业生产总值 Industrial output 总人口 Total population 污水处理量 Sewage discharge volume 污水处理率 Sewage treatment rate	北京市统计局:2016—2021 年《北京市统计年鉴》 (https://tjj.beijing.gov.cn/)
道路清扫面积 Road sweeping area 绿化面积 Landscaped areas	2015—2020 年 EPS 数据库 ( https://www.epsnet.com.cn/index.html#/Index)
工业再生水需求 Industrial demand for reclaimed water 河湖补水再生水需求 Reclaimed water demand for river and lake recharge 环卫绿化再生水需求	北京市水务局:2015—2020 年《北京市水务统计年鉴》 (http://swj.beijing.gov.cn/zwgk/sjfb/)
Reclaimed Water demand for road sweeping and landscaping water 洗车与冲厕再生水需求 Reclaimed Water Demand for Car Washing and Toilet Flushing	

#### 表1 数据来源

#### 2 研究方法

#### 2.1 系统动力学模型构建

#### 2.1.1 研究边界

以北京市行政区作为地理边界,时间边界为 2015 年至 2050 年,构建再生水系统(Reclaimed water system; RWS)动力学模型。

#### 2.1.2 系统建模

RWS模型包括再生水供给、需求和利用3个子系统(图1)。2015年至2020年为模型检验的时间区间。 模型时间步长设定为1a,界长为36a。



图 1 北京市再生水系统(RWS)动力学流图 Fig.1 RWS dynamics flow diagram in Beijing

#### (1)再生水供给子系统

再生水是城市废污水的再利用,主要来自于工业和生活,部分来源于雨水和农业用水。在城市化背景下, 生活用水需求与工业用水需求逐步提高,导致污水排放量增长。基于此,选取总人口、工业 GDP、生活污水排 放、工业废水排放、污水处理量、排水投资等变量作为子系统关键变量。主要变量的反馈环路为"再生水供给 量-再生水紧张程度-工业 GDP 增量-工业 GDP-工业需水-工业废水排放-污水排放量-污水处理量-再生水供给 量"。其中,生活污水排放率和工业污水排放率参考秦欢欢<sup>[42]</sup>将 2020 年后的比率分别设为 0.86 和 0.9。

(2)再生水需求子系统

再生水需求来源于工业冷却、道路清扫、绿化灌溉、洗车、冲厕等方面。其中,工业冷却水、道路清扫、绿化 灌溉的再生水需水量受工业 GDP 和用水面积的影响。从居民节水意识水平和自来水与再生水价差两个方面 衡量用户接受程度,假定居民节水意识水平为 90%,进而确定用户对再生水需求的现实需求。在该子系统 中,反馈环路有两条,分别为"再生水需求量-再生水紧张程度-河湖补水增量-河湖补水-河湖补水再生水需求 量-再生水需求量","再生水需求量-再生水紧张程度-工业 GDP 增量-工业 GDP-工业需水-工业再生水需求量 再生水需求量"。

(3)再生水利用子系统

再生水利用子系统包含再生水供水设施建设速度、再生水利用效率、再生水供给量、再生水需求量、再生 水利用量、再生水紧张程度等变量。各变量能较好反映再生水利用情况,所构建再生水利用子系统与再生水 需求、再生水供给子系统之间形成了紧密的反馈关系。这意味着任何系统内部或外部的变化都可能影响再生 水系统的整体平衡。其中,再生水紧张程度是链接再生水供需系统的唯一变量,用于衡量再生水需求压力。 再生水供水设施建设程度通过再生水供给效率来衡量,其受排水投资因子的影响。随着再生水排水投资的增 加,更多资金用于再生水建设,从而在一定程度上保障再生水供给设施维护与建设。

#### 2.1.3 模型方程

模型涉及的主要变量包括四种类型:状态变量、速度变量、辅助变量和常量,针对部分关键变量列出模型 方程如表2所示。

Table 2	KWS Key	variables in beijnig
变量 Variables	单位 Unit	计算方法 Calculation method
总人口 Total population	人	INTEG (总人口增量,2077.5×10 <sup>4</sup> )
总人口增量 Total population growth	人	总人口×总人口增长率
生活需水 Domestic water demand	m <sup>3</sup>	人均生活用水定额×总人口
生活污水排放 Domestic sewage discharge volume	m <sup>3</sup>	生活污水排放率×生活需水
污水排放量 Sewage discharge volume	m <sup>3</sup>	工业废水排放+生活污水排放+其他污水排放
污水处理量 Sewage treatment volume	m <sup>3</sup>	污水排放量×污水处理率
工业废水排放 Industrial wastewater discharge	m <sup>3</sup>	工业需水×工业废水排放系数
工业需水 Industrial water demand	$m^3$	万元工业 GDP 用水量×工业 GDP
河湖补水再生水需求量 River and lake recharge reclaimed water demand	m <sup>3</sup>	河湖补水再生水使用比例×河湖补水
工业再生水需求量 Industrial demand for reclaimed water	$m^3$	工业需水×工业再生水使用比例
再生水供给量 Reclaimed water supply	$m^3$	污水处理量×污水回用率
再生水需求量 Reclaimed water demand	m <sup>3</sup>	(工业再生水需求量+河湖补水再生水需求量+市政杂用水)×用户 接受程度

表 2 北京市再生水系统关键变量 Table ? DWS low variables in Paijing

RWS: 构建再生水系统 Reclaimed water system

#### 2.1.4 情景设计

再生水的有限需求与水质风险的矛盾是制约再生水规模化应用的核心因素。再生水自身的水质隐患对 生产生活具一定负面影响,难以规模化应用。工业用水水质要求低,内部循环既能减少环境污染,亦能提高工 业再生水需求,减轻水资源供给压力。然而,再生水系统涉及生态环境、工业、生活、污水处理和再生水利用部 门,需考虑工业再生水比例对再生水网络效率的影响,进一步确定再生水利用潜力。故本文将工业再生水使 用比例三等分,其中,低工业再生水为0—0.33,中工业再生水为0.34—0.66,高工业再生水为0.67—1,并从中 选取如表 3 所示的 7 种代表性情景。当前,2015—2020 年的平均工业再生水使用比例为 0.18,处于低工业再 生水使用情景。

	4	KJ 梦奴旧京区N	
	Table 3	Parameter scenario design	
		情景 Scenarios	工业再生水使用比例 Proportion of industrial reclaimed water use
低工业再生水 Low industrial reclaimed water		基准情景	0.18
		S1	0.30
中工业再生水 Mid industrial reclaimed water		S2	0.45
		S3	0.60
高工业再生水 High industrial reclaimed water		S4	0.70
		S5	0.80
		S6	0.90

主? 分粉桂早识计

#### 2.2 生态网络分析

用生态网络分析法评估复杂水系统的整体性能。水网络结构特征与代谢特征的表征以各节点的输入与 输出作为公式计算的基础,通过生态网络分析中网络效用分析和鲁棒性分析评估再生水系统中部门间关系及 系统稳定性。采用生态网络分析法评估再生水系统代谢情况,构建概念性网络结构模型(图2)。再生水系统 的生态网络模型以生态学的视角划分为以生态环境为生产者、以工业和生活部门为消费者、以污水处理和再 生水利用部门为分解者的生态网络模型。基于系统动力学模拟获取各部门之间的路径与流量,以 2025-



2050年预测数据输入再生水系统网络,分别用网络效用和稳健性分析网络节点相互关系与系统效率情况。

图 2 北京市再生水系统网络模型示意图 Fig.2 Schematic diagram of the network model of RWS in Beijing

再生水系统网络模型由一系列定向流构成,其中定义了 12 个代谢途径,它们反映了这五个部门之间的流动。生活用水、工业用水是指在生态环境中取水后供水至自来水厂,然后进一步分配给生活、工业部门的自来水,南水北调水代表城市再生水代谢系统外进入系统内的流量。通过梳理 2025—2050 年系统动力学模拟数据,分别将每五年的水流数据进行整理,得到数据网络以进一步分析。

#### 2.2.1 网络效用分析

参考 Wang 等<sup>[43]</sup>,采用网络效用分析方法研究城市再生水系统生态网络中各节点间的相互作用。Fang 和 Chen<sup>[44]</sup>通过引入系统效用指标(U),计算积分效用矩阵 U 和相应的符号矩阵 SignU 来反映系统中节点间 的互惠、拮抗关系。

$$D = (d_{ij}) = \frac{(f_{ij} - f_{ji})}{T_{,j}}$$
(1)

$$U = (u_{ii}) = D^{0} + D^{1} + D^{2} + D^{3} + \dots + D^{m} = (I - D)^{-1}$$
(2)

其中,D为直接效用矩阵,是由节点 *i*与节点 *j*之间的净流出在节点 *j* 总流出中所占的比例构成的矩阵;D<sup>0</sup>-D<sup>m</sup> 为包含节点间直接和间接的流动效用;U 指无量纲积分效用矩阵。

在生态网络效用分析中,矩阵 U 中的一个元素的符号可以用来确定网络中节点之间的互动关系,"+"代表得到,"-"代表损失,"0"则代表中性,例如当(Su<sub>21</sub>,Su<sub>12</sub>)=(+,-)时,代表节点 2 得到更多,节点 1 损失更 多。(+,-)、(-,+)代表利用与被利用关系,(-,-)代表竞争关系,(+,+)代表互惠关系。

为反映系统网络整体代谢关系,结合 Guan 等<sup>[45]</sup>在 SignU 的基础上计算网络共生指数(*MI*),研究网络节点相互关系。

$$MI = \frac{\text{Sign}U(+)}{\text{Sign}U(-)}$$
(3)

$$\operatorname{Sign} U(+) = \sum_{ij} \max(\operatorname{sign}(u_{ij}), 0)$$
(4)

$$\operatorname{Sign} U(-) = \sum_{ij} - \min(\operatorname{sign}(u_{ij}), 0)$$
(5)

若 *MI*>1,即正相关关系为显性,系统代谢关系为互惠,数值越大结构越稳定。如果矩阵中正值累加数更大,这意味着城市系统主要表现出变量间的正关系,从而代表了网络互惠关系。

2.2.2 网络稳健性分析

(1)代谢效率分析

AMI(Average mutual information)是分析系统中水流及这些流动如何影响系统效率的方法。AMI 指数越 大,说明网络系统中水流集中性增强,即水流趋向于通过特定路径传递,而分散路径相对较少。在这种情况 下,代谢效率越高,系统能更有效地转化和利用来水。

$$AMI = k \times \sum_{ij} \left( \frac{f_{ij}}{T_{..}} \right) \times \log_2 \left( \frac{f_{ij} \times T_{..}}{T_{i..} \times T_{.j}} \right)$$
(6)

其中, $f_{ij}$ 表示节点j到m的流量; $T_{i}$ 表示所有节点之间的总流量; $T_{j}$ 表示来自隔间j的流量, $T_{i}$ 表示流向节点i的流量;k为尺度系数(通常为1)。

(2)冗余分析

*H<sub>e</sub>*(Conditional entropy)是用来评估网络节点间相互作用模式的方法,其关注点在于选择路径的数量,即 网络中一个部门平均输入和输出的备选路径。*H<sub>e</sub>* 值越大,说明再生水系统网络中各节点之间存在更多的备 选路径。在这种情况下,系统展现出更强的的抗干扰能力,能更有效地维持其功能和稳定性。

$$H_{c} = -k \times \sum_{ij} \left( \frac{f_{ij}}{T_{..}} \right) \times \log_{2} \left( \frac{f_{ij}^{2}}{T_{i.} \times T_{.j}} \right)$$
(7)

(3)鲁棒性分析

系统效率的提高必然降低冗余,反之亦然。这两者之间存在一种平衡关系,即在保证高效率的同时,也需 要具备足够的冗余来应对各种异常情况。通过考虑效率和冗余的相互作用,创建了一个对复杂网络可持续性 的广义但定量的度量,即鲁棒性指标。鲁棒性指标用来评估网络在面对各种干扰和攻击时,仍然能够保持其 结构和功能稳定的能力。

$$a = \frac{\mathrm{AMI}}{\mathrm{AMI} + H_c} \tag{8}$$

$$R = -a \times \log_2(a) \tag{9}$$

a和R之间呈现倒U型。当a<0.37时,再生水网络系统相对冗余,可能导致系统停滞,代谢效率有限。 当a>0.37时,再生水网络系统相对有效,这可能会导致系统更加脆弱,因为过度的效率会牺牲冗余。当a接近0.37时,即R接近其峰值(R>0.5),再生水网络系统达到效率和冗余之间的代谢平衡并获得高水平的鲁棒性,即系统在保持完整性和稳定性的同时有利于长期可持续发展。

#### 3 结果与分析

3.1 系统模型检验

3.1.1 误差分析

研究选取总人口、工业需水、污水处理量、再生水供给为典型代表,对模型进行现实性检验,将 2015—2020年中每两年的模拟值与真实数据进行比较并计算误差,如表 4 所示。

根据模拟值与现实值误差情况可知,总人口、工业需水、污水处理量的误差范围在 7%以内,再生水供给与实际值差异稍大(10%以内)。整体而言,总人口、工业需水、污水处理量、再生水供给这四个变量的模拟值与现实之差处在 10%以内,属于系统动力学模拟的合理误差范围。

3.1.2 敏感性分析

参考 Li 等<sup>[46]</sup>,知政策变量对再生水系统的影响较大,敏感度超过 10%。本文选择了四个控制变量和四 个特性指标,将控制变量的参数值依次增加 10%,观察特征值指标的变化率,并取平均值作为控制变量的综 合灵敏度。灵敏度公式计算如下:

				表	€4 模拟(	直与现实值	误差情况					
				Table 4	Error of s	imulated a	nd realistic	values				
年份	总人口 年份 Total population Indu				工业需水 rial water d	emand	污水处理量 Sewage treatment volume			再生水供给 Reclaimed water supply		
Year	模拟值	实际值	误差/%	模拟值	实际值	误差/%	模拟值	实际值	误差/%	模拟值	实际值	误差/%
2015	2188.2	2188.3	-0.00	3.8	3.8	0.00	14.50	14.45	0.35	8.6	9.5	-9.47
2016	2195.2	2195.4	-0.01	3.8	3.8	0.00	15.15	15.28	-0.85	9.0	10.0	-10.00
2017	2194.1	21944	-0.01	3.4	3.5	-2.86	16.67	17.31	-3.70	10.0	10.5	-4.76
2018	2191.4	2191.7	-0.01	3.1	3.3	-6.06	18.24	19.04	-4.20	10.9	10.8	0.93
2019	2189.9	2190.1	-0.01	3.2	3.3	-3.03	18.95	19.97	-5.11	11.4	11.5	-0.87
2020	2188.8	2189.0	-0.01	3.0	3.0	0.00	19.89	19 41	2 47	12.0	12.0	0.00

$$S = \frac{(Y' - Y)}{0.1 \times Y}$$
(10)

其中,S代表灵敏度,Y'、Y是调节变量改变前后的其他特征变量的值。S≥10%,非常敏感;10%>S≥5%,较敏 感;5%>S≥1%,不太敏感;S<1%,不敏感。如下表所示:

	Table 5	Sensitivity of sensiti	vity indicators		
	污水排放量 Sewage discharge volume	再生水供给量 Reclaimed water supply	再生水需求量 Reclaimed water demand	再生水利用量 Reclaimed water use	平均敏感度 Average sensitivity
排水投资增长率 Growth rate of drainage investment	0.00	1.13	0.01	1.25	0.60
工业 GDP 増长率 Growth rate of industrial output	4.03	4.02	1.16	4.03	3.31
道路清扫面积增长率 Growth rate of road sweeping area	0.00	0.00	0.11	0.00	0.03
工业再生水使用比例 Proportion of industrial reclaimed water use	0.00	0.00	3.60	0.00	0.90

表5 敏感性指标灵敏度/%

如表 5 所示,工业 GDP 增长率对再生水系统的影响最大,敏感度达 3.31%,其中对再生水供给子系统的 灵敏度达4.02%。其次,工业再生水使用比例对再生水系统的影响较大,主要体现在对再生水需求量的影响。 敏感性分析的结果表明,工业的发展有助于推动再生水的供给与利用,工业再生水使用比例的提高能一定程 度上增加再生水需求,进一步刺激再生水供给与利用。

#### 3.2 再生水供需变化特征

#### 3.2.1 北京市水资源现状

北京市可供利用的水资源包括地表水、地下水、南水北调水、再生水四部分。如图 3 所示,2020 年水资源 经供水管网输送至环境、生活、农业和工业用水部门,生活、工业、环境部门用水过后形成污水,在污水总排放 量中有 19.4 亿 m<sup>3</sup> 污水排入污水处理厂进行初步处理,将近 1 亿 m<sup>3</sup> 污水直接排入环境,造成水污染。经过初 步处理过的污水,再次处理后最终可回用污水占比达58.8%。生活用水与环境用水作为主要用水部门,用水 之和为 34.4 亿 m<sup>3</sup>,占比高达 84.73%。其中环境再生水达 11.26 亿 m<sup>3</sup>,不仅能有效补充生态环境需水,还可以 利用生态环境进一步净化水源,实现水源的间接补充。但其他部门再生水使用量相对较少,如工业部门与生 活部门再生水用量之和仅为0.75亿m<sup>3</sup>,再生水回用还可进一步提升,即再生水仍有开发利用空间。

3.2.2 再生水供需模拟

在北京系统动力学模型中输入初始变量数据,基于设定公式对再生水系统进行模拟。根据模拟结果,发 现再生水需求量的多年平均增长速度为 2.82%,快于再生水供给量的增长速度(2.55%),2050 年再生水利用

45 卷



图 3 2020 年北京市水资源供水、用水、排水、处理示意图/亿 m<sup>3</sup>

Fig.3 Schematic diagram of water supply, water use, drainage and treatment of water resources in Beijing in 2020

量预计达到 19.18 亿 m<sup>3</sup>(图 4)。其中,在 2015—2019 年,再生水供给量高于再生水需求量,供过于求。再生 水供给后期增长趋于平缓,随着再生水需求的增加,再 生水供应稍显不足。再生水的利用取决于再生水需求 与供给中更小的一方,在 2019 年后,随着再生水用途日 益广泛,能在工业、市政用水、环卫绿化上减少新水使用 量,相关部门的再生水需求持续增加,再生水供给量成 为制约再生水利用量的重要因素。即在设定情境下, 2020 年后再生水供不应求,改善再生水基础设施将提 高再生水供给能力,并进一步促进再生水的利用。

通过调高参数工业再生水使用比例,发现再生水需 求量随着工业再生水使用比例的增加而提升,而每一种 情景下的再生水供给量变化趋势基本重叠(图5)。工 业再生水使用比例的变化能直接影响再生水需求量,但





难以引起当年再生水供给增加。当工业再生水使用比例提至 0.9 时,通过比对再生水供需用量发现,再生水 需求量远超再生水供给量,此时应加强再生水基础设施建设以保障高质再生水的供给。

#### 3.3 再生水网络结构特征

#### 3.3.1 代谢效率分析

以基准情景预测为依据,考察再生水网络代谢效率指数与冗余指数变化情况。2020—2050 年期间 AMI 和 H<sub>e</sub> 的平均值分别为 1.41±0.10 和 0.39±0.02,指数变化趋势并不相同(图 6)。在 2020—2050 年期间,AMI 指数在 2030 年与 2040 年出现峰值,分别为 1.45 和 1.51。而 H<sub>e</sub> 仅在 2030 年出现峰值,值与 2020 年一致 (0.41),此后保持先下降后上升趋势。在 2025—2050 年间,工业再生水使用比例的大幅增加,仅小幅降低了





再生水系统代谢效率指数(AMI),S1 情景至 S6 情景下计算所得 AMI 在保留两位小数后基本一致。与此同时,冗余指数呈现出上升趋势,S2 情景中冗余指数值最高,平均达到了 0.41,但仍远小于代谢效率指数。总体 而言,工业再生水比例的增加伴随着代谢效率的小幅下降与冗余的明显增加。



图 6 2020—2050 年北京市各情景下再生水系统效率与冗余指数 Fig.6 RWS efficiency and redundancy index for each scenario in Beijing, 2020—2050

3.3.2 鲁棒性分析

图 7 表示了 2020—2050 年北京市在不同工业再生水情景下平均鲁棒性变动情况。各情景下,鲁棒性 R 的多年平均值在 0.27—0.28 之间波动,表明北京的再生水系统的鲁棒性较差(0.2—0.3)。在 7 种情景中,系统 鲁棒性在 2020—2050 的平均值得到了不同程度地提升或下降。其中,在 2020 年,S2 情景下系统的鲁棒性最高, 即在 2020 年工业再生水使用比例在 0.45 为宜。基准情景下平均 R 为 0.27,S6 情景相较于基准情景有所下降,但 下降幅度不足 0.01。此 S2 情景提升最多,系统冗余提高 0.03、系统效率减少 0.01,鲁棒性指数提升 0.01。

如图 8 所示,系统效率与冗余的权衡点主要分布在鲁棒性曲线的右侧,说明再生水系统相对效率高。这 是因为再生水主要流向河湖环境以实现二次利用,使得再生水系统相对有效率。在 S1—S2 情景中,再生水系 统冗余指数增长,权衡点沿鲁棒性曲线往左移动,系统鲁棒性提高。随着工业再生水使用比例进一步增加,系 统冗余指数下降,稳健性水平逐步下降。在再生水系统网络中,较高的效率阻碍了系统达到高水平的鲁棒性。 虽然再生水系统高效率有利于水的循环利用,但是网络中水流的相对集中会降低系统的稳定性,从而影响系 统的抗干扰能力。 3.4 再生水网络节点关系

基于系统动力学模拟与预测的数据确定生态环境、 生活、工业、污水处理和再生水利用部门间水流量,形成 部门间网络数据流,构建再生水系统生态网络模型。以 基准情景为例,展示 2025—2050 年中每五年北京市各 部门间流量,如表 6 所示:

运用公式(1)、(2),计算各部门输入与输出净值占 总输入值的比重,进而得到 2025—2050 年无量纲积分 效用矩阵,如表 7 所示。无量纲积分效用矩阵 U 内各 数值反映了两两部门间水流的强弱关系,从而揭示各部 门的控制和依赖情况。如果控制强度的值大于 0.6,可 定义为强关系;但如果小于 0.2,则定义为弱关系。矩阵 中网络对角线上的数值基本都超过了 0.6,表示生态环 境、生活、工业部门的输出较依赖其输入水量。此外,生 态环境与污水处理、生活与再生水部门间相互依赖关系



2050 under various scenarios

相对较强,维持在 0.3—0.4 之间。而工业对污水处理、再生水的依赖较弱,会随时间小幅增加。因此,生态环境在该系统中扮演源头角色,大量供应水资源给工业、生活部门,而后者是系统中污水排放的主要来源,也是污水处理和再生水的主要供应部门。即生态环境、工业和生活三个部门在系统内部关系中起决定作用。





Fig.8 Average robustness of the reclaimed water network in Beijing under various scenarios for 2020-2050

表 6 2025—2050 年北京市基准情景下各部门间流量

Table 6	Intersectoral	Flows	under	the	2025 -	-2050	Beijing	base	scenario
I able 0	muscuora	110 113	unuci	unc	2025	2020	Deijing	Duse	scenario

			2025						203	30			
	1	2	3	4	5	$T_{j}$		1	2	3	4	5	$T_j$
1	0.00	17.60	2.69	0.00	0.00	20.29	1	0.00	17.72	2.94	0.00	0.00	20.66
2	2.49	0.00	0.00	15.29	0.00	17.78	2	2.51	0.00	0.00	15.40	0.00	17.90
3	0.33	0.00	0.00	2.96	0.00	3.28	3	0.36	0.00	0.00	3.23	0.00	3.59
4	0.21	0.00	0.00	0.00	21.13	21.34	4	0.09	0.00	0.00	0.00	21.64	21.72
5	15.49	0.18	0.59	0.00	0.00	16.27	5	16.83	0.18	0.65	0.00	0.00	17.65
$T_i$	18.52	17.78	3.28	18.24	21.13		Ti	19.78	17.90	3.59	18.62	21.64	

45 卷

续	表													
			2035						204	40				
	1	2	3	4	5	$T_{j}$		1	2	3	4	5	$T_j$	
1	0.00	17.82	3.21	0.00	0.00	21.03	1	0.00	17.90	3.50	0.00	0.00	21.40	
2	2.52	0.00	0.00	15.48	0.00	18.00	2	2.53	0.00	0.00	15.55	0.00	18.08	
3	0.39	0.00	0.00	3.52	0.00	3.91	3	0.43	0.00	0.00	3.85	0.00	4.27	
4	0.09	0.00	0.00	0.00	22.01	22.10	4	0.09	0.00	0.00	0.00	22.40	22.49	
5	18.16	0.18	0.70	0.00	0.00	19.05	5	19.50	0.18	0.77	0.00	0.00	20.44	
$T_i$	21.16	18.00	3.91	19.00	22.01		Ti	22.54	18.08	4.27	19.39	22.40		
			2045					2050						
	1	2	3	4	5	$T_{j}$		1	2	3	4	5	$T_{j}$	
1	0.00	17.96	3.83	0.00	0.00	21.79	1	0.00	18.02	4.19	0.00	0.00	22.21	
2	2.54	0.00	0.00	15.60	0.00	18.14	2	2.55	0.00	0.00	15.65	0.00	18.20	
3	0.47	0.00	0.00	4.20	0.00	4.67	3	0.51	0.00	0.00	4.60	0.00	5.11	
4	0.09	0.00	0.00	0.00	22.81	22.90	4	0.09	0.00	0.00	0.00	23.25	23.35	
5	20.84	0.18	0.84	0.00	0.00	21.86	5	22.19	0.18	0.92	0.00	0.00	23.29	
$T_i$	23.94	18.14	4.67	19.80	22.81		Ti	25.34	18.20	5.11	20.25	23.25		

其中,1代表生态环境;2代表生活部门;3代表工业部门;4代表污水处理部门;5代表再生水利用部门;T;代表各部门输出流量;T;代表各部门流入流量

表 7 2025—2050 年北京市基准情景下无量纲积分效用矩阵

Table 7 Dimensionless integral utility matrix for the base scenario in Beijing, 2025-2050

		20	)25			2030						
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	0.67	-0.26	-0.18	0.37	0.15	1	0.66	-0.25	-0.17	0.37	0.17	
2	0.22	0.71	-0.32	-0.11	0.35	2	0.21	0.72	-0.32	-0.12	0.34	
3	0.02	-0.04	0.95	-0.02	0.08	3	0.02	-0.04	0.95	-0.03	0.09	
4	0.38	0.14	0.27	0.54	-0.33	4	0.39	0.15	0.27	0.56	-0.3	
5	-0.14	0.34	0.24	0.26	0.54	5	-0.16	0.35	0.25	0.26	0.55	
		20	)35					2	2040			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	0.65	-0.23	-0.17	0.37	0.18	1	0.64	-0.22	-0.16	0.38	0.19	
2	0.2	0.72	-0.31	-0.13	0.33	2	0.19	0.72	-0.31	-0.13	0.32	
3	0.02	-0.04	0.94	-0.03	0.09	3	0.02	-0.05	0.94	-0.04	0.09	
4	0.39	0.16	0.28	0.57	-0.27	4	0.39	0.17	0.29	0.58	-0.25	
5	-0.18	0.36	0.26	0.25	0.55	5	-0.2	0.38	0.26	0.25	0.55	
		20	)45					2	2050			
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5	
1	0.63	-0.21	-0.15	0.38	0.2	1	0.62	-0.21	-0.15	0.38	0.21	
2	0.18	0.73	-0.31	-0.14	0.31	2	0.17	0.73	-0.3	-0.14	0.29	
3	0.02	-0.05	0.93	-0.04	0.1	3	0.02	-0.06	0.93	-0.05	0.1	
4	0.39	0.18	0.29	0.59	-0.23	4	0.39	0.19	0.3	0.6	-0.21	
5	-0.22	0.39	0.27	0.24	0.56	5	-0.23	0.4	0.28	0.23	0.56	

无量纲积分效用矩阵符号 U 转化后的部门关系如图 9 所示,可得 10 组部门组合,反映了部门间互惠、利 用、被利用和竞争四种代谢关系。在基准、S1 情景下,2025—2050 年各部门之间的关系状况没有变化,随着工 业再生水使用比例不断提升,部门代谢关系发生改变。具体而言,代谢关系发生变化的部门组合为图中未连 接成线的部门组合,共有 3 组,分别是生态环境与工业、生活与工业、工业与再生水。水资源由生态环境部门 流入工业部门,生态环境与工业部门间表现为利用关系。但当工业再生水比例的增加至 0.45(S2)时,再生水 部门流入工业部门水量增加,生态环境与工业部门间关系转变为竞争关系,表明工业再生水使用比例的提升 有利于调节再生水的分配,能适度降低再生水的生态环境补水量。生活与工业部门在再生水系统中相互竞争 淡水资源,当工业再生水使用比例提至 0.6(S3)时,工业内部水循环难以满足再生水需求,部分依赖生活污水 的转化利用,即工业再生水包含工业废水循环量和生活污水再生量。工业与再生水部门保持合作互惠的关 系,当工业再生水比例提至 0.6 时,直接流入工业部门的再生水量超过工业部门对再生水部门的间接流入,工 业与再生水部门转为利用与被利用关系。由上述分析结果可知,代谢关系发生变化的部门组合占总代谢关系 组的 30%,说明通过工业用水改变再生水分配的原有结构对部门间关系的影响并不十分显著。其中,当工业 再生水比例稍低时,工业与生活部门保持竞争关系,任一方再生水利用的增加都会挤占对方的使用。从节约

用水与保障水质的双重角度来看,工业部门部分使用自身的废水回用量到逐步实现工业再生水替代的过程,

极大提高了工业用水重复率,减少了工业用水。因此,应当先行推动工业领域再生水使用。



图 9 2025—2050 年北京市各情景下部门间关系 Fig.9 Relationships between sectors in Beijing under various scenarios, 2025—2050

其余部门间代谢关系均未发生改变,包括2组互惠关系和5组利用关系。其中,互惠关系组分别为生态 环境和污水处理部门、生活和再生水部门,说明生活部门有再生水利用潜力,一旦生活部门再生水使用比例增加,再生水将进一步得到利用。生态环境、生活、污水处理、再生水四个部门两两之间呈现出利用或被利用的 状态,可明晰水流经各部门的路径。即生活部门利用生态环境部门来水,污水处理部门利用生活所用污水进 行处理,再生水部门利用所处理污水进一步处理,生态环境部门利用经过二次处理的再生水补给生态环境,呈现"生态环境-生活-污水处理-再生水-生态环境"的水循环路径。

在明晰再生水系统网络各部门关系的基础上,需进一步探讨网络整体关系。根据公式(3),计算可得网络共生指数。如图 10 所示,2020—2050 年网络共生指数 *MI* 均大于 1,呈现正相关关系,说明再生水系统各部门整体上保持共享协作。

具体而言,当工业再生水处于低工业再生水水平时,工业再生水比例的增加提升了系统的互惠指数。随着工业再生水进一步增加,再生水系统互惠指数逐渐下降。系统的代谢关系主要由再生水系统的影响因素决定,有限的污水回用率与再生水供水设施的建设限制了再生水可供量。在再生水供给一定的前提下,某个部门再生水量的增加将拉低其他部门可用再生水量。这说明了工业再生水量的大幅增加虽然降低了再生水系



图 10 2020—2050 年北京市各情景下再生水网络互惠指数 Fig.10 Reciprocity index of reclaimed water network in Beijing for each scenario from 2020 to 2050

统的互惠程度,但在保障互惠关系的同时有效降低了工业用水的压力。

3.5 讨论

3.5.1 再生水系统稳定性能变化

从系统稳健性视角看,北京再生水系统稳健性指数接近于 0.3,说明系统再生水分配效率较高,抗干扰性 较弱,系统相对效率高。如图 8 所示,这些权衡点全部位于鲁棒性曲线右侧,说明系统仍有较大空间提高抗干 扰能力。系统整体稳定高效的关键在于再生水分配结构稳定,工业再生水使用比例是关键可调节变量。尽管 系统冗余的提高必然以效率降低为代价,但两者之间的适当权衡不会削减系统鲁棒性。因此,提高工业再生 水利用是推动北京再生水系统可持续发展的重要途径。

从各部门间代谢关系看,生态环境与污水处理,生活、工业与再生水部门之间保持相互促进的互惠关系。 基于生态环境开发的水资源经利用流入污水处理部门,处理过的污水最终大部分以直接或间接方式流入环 境,水资源实现循环利用。再生水在建筑、冲厕、工业冷却塔中的应用实现了部分生活用水循环与工业用水循 环。生活与工业部门之间相互竞争,二者会争夺自来水与再生水资源。伴随着工业再生比例进一步提升,工 业部门逐渐对生活部门污水资源化形成依赖,即在中等工业再生水水平下(S3),生活与工业部门代谢关系转 为被利用关系。生态环境与工业部门之间的代谢关系属于被利用类型,工业部门所用水资源依赖生态环境供 给。当工业再生水达到中等工业再生水水平时,工业部门不完全依赖于生态环境部门的自来水供给,生态环 境与工业部门之间形成竞争。此外,生态环境与除污水处理部门外的其他部门为利用关系,其中再生水部门 是生态环境唯一的利用部门,再生水回用于环境对北京生态环境保护起关键作用,有利于水源涵养。总而言 之,加大利用工业再生水,合理减少河湖补水等环境再生水使用比例,能够增强再生水系统面对不确定冲击的 能力,缓解经济发展与环境保护之间的矛盾。

3.5.2 基于情景分析的再生水利用潜力建议

从情景分析视角出发,提升工业再生水使用比例有利于增加再生水的需求,并对再生水利用量具有正向 促进作用。当工业再生水比例为 0.9 时,2050 年再生水需求量增加至 23.81 亿 m<sup>3</sup>,约为 2020 年的两倍。 2020—2050 年,再生水需求、再生水供给与再生水利用整体呈现上升趋势。其中,再生水需求作为核心因素 拉动着再生水供给,并进一步带动再生水的利用量的提高。但由于当前北京市工业用水相对其他部门较少, 单一的工业再生水使用情景难以大规模开发再生水,从经济、环境、技术等综合情景出发,可能会更为全面地 模拟并比较再生水利用潜力。基于北京市规划对生产生活新水利用的限制,各行业的自来水需求将受到限 制,在此情况下再生水需求的提升能有效缓解用水压力。由于污水排放量不会大幅变化,相应地需增强污水 处理、再生水处理的基础设施建设以保障再生水供给。

3.5.3 方法改进

以往生态网络分析主要用于分析现状,致力于提高水生态网络的功能韧性和结构韧性<sup>[47]</sup>,忽略了未来规 划带来的变化,导致现有建议对未来可持续利用的规划并不一定合理;系统动力学侧重于预测、分析和评价系 统内部的变量间反馈关系,由于考量变量较多,难以从整体视角直接分析各部门间结构特征与功能特征。为 解决这一问题,本研究结合系统动力学与再生水生态网络,突出未来生态环境、生活、工业、污水处理和再生水 利用五部门的代谢关系变化,分析不同再生水使用比例情景下再生水系统的鲁棒性和各部门之间关系,从而 判断出再生水结构稳定性的变化趋势和部门用水压力情况。

#### 4 结论

(1)再生水系统模拟值与现实值的误差小于 10%,所构建再生水系统动力学模型能准确反馈再生水各变量间因果关系,明晰再生水供需变化特征。经模拟发现,2050年北京市再生水利用量预计达到 19.18 亿 m<sup>3</sup>,且 2015—2050年再生水供给量增幅(2.55%)远低于再生水需求量增幅(2.82%)。因此,在设定情境中,未来再生水利用量的提高需通过提升再生水供给量实现。

(2)2020—2050年再生水系统平均鲁棒性指数呈现"先上升后下降"趋势。在中等工业再生水比例情景 下随系统冗余指数增加达到最大值 0.28。此时,再生水会大量流入工业部门,形成工业对再生水的依赖,从而 大大减少工业用水压力。

(3)结合系统动力学与生态网络分析的方法为再生水系统的分析提供了多维度、动态性的视角。在生态 网络分析中,节点与路径的概念可用于描述系统内的各个组成部分及其相互关系,而系统动力学则提供了对 系统演变过程的定量模拟。这一综合方法可用于指导再生水资源的合理配置、提高系统的效能和稳定性,促 使再生水在不同背景下的可持续应用。未来的研究可进一步考虑不同地域和环境建立定制化模型以更好地 满足再生水系统管理需求,指导未来水资源管理和再生水利用。

#### 参考文献(References):

- [1] Liu J, Yang H, Gosling S N, Kummu M, Flörke M, Pfister S, Hanasaki N, Wada Y, Zhang X, Zheng C M, Alcamo J, Oki T. Water scarcity assessments in the past, present and future. Earth's Future, 2017, 5(6): 545-559.
- [2] Wencki K, Thöne V, Ante A, Hogen T, Hohmann C, Tettenborn F, Pohl D, Preiss P, Jungfer C. Approaches for the evaluation of future-oriented technologies and concepts in the field of water reuse and desalination. Journal of Water Reuse and Desalination, 2020, 10(4): 269-283.
- [3] 王浩,王佳,刘家宏,梅超.城市水循环演变及对策分析.水利学报,2021,52(1):3-11.
- [4] 徐傲,巫寅虎,陈卓,崔琦,白宇,李魁晓,时玉龙,高强,胡洪营.北京市城镇污水再生利用现状与潜力分析.环境工程,2021,39(9): 1-6,47.
- [5] Jeong S, Park J. Evaluating urban water management using a water metabolism framework: a comparative analysis of three regions in Korea. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 155: 104597.
- [ 6 ] Voulvoulis N. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2018, 2: 32-45.
- [7] Deng S, Yan X, Zhu Q, Liao C. The utilization of reclaimed water: possible risks arising from waterborne contaminants. Environmental Pollution, 2019, 254: 113020.
- [8] Foglia A, Gonzúlez-Camejo J, Radini S, Sgroi M, Li K, Eusebi A L, Fatone F. Transforming wastewater treatment plants into reclaimed water facilities in water-unbalanced regions. An overview of possibilities and recommendations focusing on the Italian case. Journal of Cleaner Production, 2023, 410; 137264.
- [9] Zhao P, Ma M, Hu Y, Wu W, Xiao J. Comparison of international standards for irrigation with reclaimed water. Agricultural Water Management, 2022, 274: 107974.
- [10] Shi C, Miao X, Zhang L, Chiu Y, Zeng Q, Zhang C. Spatial patterns of industrial water efficiency and influencing factors—based on dynamic twostage DDF recycling model and geographically weighted regression model. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 134028.
- [11] Li C Z, Xu X X, Shen G Q, Fan C, Li X, Hong J K. A model for simulating schedule risks in prefabrication housing production: A case study of six-day cycle assembly activities in Hong Kong. Journal of cleaner production, 2018, 185: 366-381.
- [12] 刘洪波,谢玉霞,叶健,刘波.系统动力学在再生水供水量预测中的应用.系统工程,2013,31(7):87-90.
- [13] 周宇茗,陈恬玥,郭青,宋松柏.中国内地分区年用水总量预测模型研究.水资源与水工程学报,2022,33(6):111-119.
- [14] Zhang T, Guna A, Yu W, Shen D. The recycled water use policy in China: evidence from 114 cities. Journal of Cleaner Production, 2022,

344: 131038.

- [15] Mesa-Pérez E, Berbel J. Analysis of barriers and opportunities for reclaimed wastewater use for agriculture in Europe. Water, 2020, 12(8): 2308.
- [16] 余鹏明, 管孝艳, 陈俊英, 管佳洁, 张晨阳, 郝彦昕. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究. 节水灌溉, 2019(10): 78-82.
- [17] Bishop A B, Hendricks D W. Water reuse systems analysis. Journal of the Sanitary Engineering Division, 1971, 97(1): 41-57.
- [18] Mulvihill M E, Dracup J A. Optimal timing and sizing of a conjunctive urban water supply and waste water system with nonlinear programing. Water Resources Research, 1974, 10(2): 170-175.
- [19] Park S, Sahleh V, Jung S Y. A system dynamics computer model to assess the effects of developing an alternate water source on the water supply systems management. Procedia Engineering, 2015, 119: 753-760.
- [20] Li X, Li X, Li Y. Research on reclaimed water from the past to the future: a review. Environment, Development and Sustainability, 2022, 24(1): 112-137.
- [21] Ren X, Zhang S, Miao H. Biological stability of reclaimed greywater reused for flushing household toilets. Journal of Cleaner Production, 2023, 387: 135863.
- [22] Song K, Zhu S, Lu Y, Dao G, Wu Y, Chen Z, Wang S, Liu J, Zhou W, Hu H. Modelling the thresholds of nitrogen/phosphorus concentration and hydraulic retention time for bloom control in reclaimed water landscape. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2022, 16 (10): 129.
- [23] 张爱国, 阙莉莉, 李鑫, 王月锋, 崔伟伟. 基于利益相关者视角的再生水项目成本——效益评估模型及其应用. 水电能源科学, 2021, 39 (6): 136-139.
- [24] 付澜清,杨侃,刘建林,钟金华,邱光树,谷桂华,姜敏,王新奎,梁永静.基于多级优度评价法的再生水评估模型.水电能源科学, 2018,36(3):34-37.
- [25] Finnerty C T, Childress A E, Hardy K M, Hoek E M, Mauter M S, Plumlee M H, Rose J B, Sobsey M D, Westerhoff P, Alvarez P J, Elimelech M. The Future of Municipal Wastewater Reuse Concentrate Management: Drivers, Challenges, and Opportunities. Environmental Science & Technology, 2023, 58(1): 3-16.
- [26] Nezami N, Zarghami M, Tizghadam M, Abbasi M. A novel hybrid systemic modeling into sustainable dynamic urban water metabolism management: Case study. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104065.
- [27] Jackson R B, Carpenter S R, Dahm C N, McKnight D M, Naiman R J, Postel S L, Running S W. Water in a changing world. Ecological applications, 2001, 11(4): 1027-1045.
- [28] Marsalek J. Urban water cycle processes and interactions: urban water series-UNESCO-IHP. CRC press, 2014.
- [29] Hannon B. The structure of ecosystems. Journal of theoretical biology, 1973, 41(3):535-546.
- [30] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems. Systems analysis and simulation in ecology, 1976, 4: 457-579.
- [31] Patten B C, Auble G T. System theory of the ecological niche. The American Naturalist, 1981, 117(6): 893-922.
- [32] 张妍,郑宏媚,陆韩静.城市生态网络分析研究进展.生态学报,2017,37(12):4258-4267.
- [33] Zhang G, Huang G, Liu L, Niu G, Li J, McBean E. Ecological network analysis of an urban water metabolic system based on input-output model: A case study of Guangdong, China. Science of the Total Environment, 2019, 670: 369-378.
- [34] Cui D, Zeng W, Ma B, Zhuo Y, Xie Y. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: Integrated metabolic processes of physical and virtual water. Science of the Total Environment, 2021, 787: 147432.
- [35] Wang X, Zhang Y, Yu X. Characteristics of Tianjin's material metabolism from the perspective of ecological network analysis. Journal of Cleaner Production, 2019, 239: 118115.
- [36] Fath B D.Network mutualism: Positive community-level relations in ecosystems. Ecological Modelling, 2017, 208(1): 56-67.
- [37] Wu B, Zeng W, Chen H, Zhao Y. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3138-3151.
- [38] Xu W, Xie Y, Cai Y, Ji L, Wang B, Yang Z. Environmentally-extended input-output and ecological network analysis for Energy-Water-CO2 metabolic system in China. Science of the Total Environment, 2021, 758: 143931.
- [39] Zheng B, Huang G, Liu L, Zhai M, Guan Y. Metabolism of urban wastewater: ecological network analysis for Guangdong Province, China. Journal of Cleaner Production, 2019, 217: 510-519.
- [40] Honti G, Dörgö G, Abonyi J. Review and structural analysis of system dynamics models in sustainability science. Journal of Cleaner Production, 2019, 240; 118015.
- [41] 普拉提莫合塔尔,祖拜代木依布拉,倪明霞,夏建新.南疆于田绿洲水资源系统演变的生态网络分析.应用基础与工程科学学报, 2022,30(5):1138-1151.
- [42] 秦欢欢. 华北平原水资源利用系统动力学模拟与仿真. 东华理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 158-168.
- [43] Wang S, Fath B, Chen B. Energy-water nexus under energy mix scenarios using input-output and ecological network analyses. Applied Energy, 2019, 233: 827-839.
- [44] Fang D, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [45] Guan Y, Huang G, Liu L, Huang C Z, Zhai M. Ecological network analysis for an industrial solid waste metabolism system. Environmental pollution, 2019, 244: 279-287.
- [46] Li Q, Wang W, Jiang X, Lu D, Zhang Y, Li J. Analysis of the potential of reclaimed water utilization in typical inland cities in northwest China via system dynamics. Journal of Environmental Management, 2020, 270; 110878.
- [47] 黄梅,刘晨曦,俞晓莹,焦胜.城市水生态网络韧性评价与优化策略——以长沙市为例. 经济地理, 2022, 42(10): 52-60.