

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.01.003

城市水系统关联模型研究

张翔^{1,2}, 廖辰昉^{1,2}, 韦芳良^{1,2}, 刘玥^{1,2}, 余樯², 肖宜²

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072)

摘要:为了理清城市水系统中多因素间的复杂关系,对系统解决城市水问题提供帮助,基于水系统理论与城市水系统模拟相关研究,提出了城市水系统中水-经济社会-生态环境各因素之间相互作用和反馈的关联模型理论框架,建立了城市水系统演变过程中由针对经济发展的正反馈回路和针对可持续性的负反馈回路共同控制的新模式,构建了模拟城市水-经济社会-生态环境内在联系的城市水系统关联模型。以武汉市为例,应用建立的城市水系统关联模型,采用2001—2017年的历史统计数据,建立了武汉市城市水-经济社会-生态环境各要素之间互馈作用的模拟模型,预测了武汉市的城市发展轨迹,并与武汉市2030年的远期规划进行比较,验证了模型的有效性,表明城市水系统模型能够揭示城市水-经济社会-生态环境多要素的耦合驱动机制,体现了节水技术与绿色发展相关政策两大因子导向下的生态环境、经济社会协同发展的良好预期。

关键词:城市水系统关联模型;城市水问题;水系统理论;耦合机制;武汉

中图分类号:TV213 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)01-0014-06

Research on the nexus model of urban water system // ZHANG Xiang^{1,2}, LIAO Chenyang^{1,2}, WEI Fangliang^{1,2}, LIU Yue^{1,2}, YU Qiang², XIAO Yi² (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Provincial Key Lab of Water System Science for Sponge City Construction, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: To clarify the complex relationship between multiple factors in the urban water system and provide help for the system to solve urban water problems, a theoretical framework of nexus model to describe the interaction and feedback among water-economic society-ecological environment in urban water system was proposed based on water system theory and relevant studies on urban water system. A new model controlled by positive feedback loops for economic development and negative feedback loops for sustainability in the evolution of urban water system was established. A nexus model of urban water system that simulated the interrelationship of water-economic society-ecological environment was constructed. Taking Wuhan City as an example, the built nexus model of urban water system was applied. A simulation model of the mutual feedback effect of water-economic society-ecological environment elements was built by adopting historical statistical data from 2001 to 2017 and predicted the urban development trajectory of Wuhan City. The validity of the model was verified compared with the long-term planning of Wuhan City in 2030, which indicated that the urban water system model could reveal the multi-elements coupling driving mechanism of water-economic society-ecological environment and reflected the good expectation of the coordinated development of ecological environment and economic society under the guidance of two major factors of water-saving technology and green development related policies.

Key words: nexus model of urban water system; urban water problem; water system theory; coupling mechanism; Wuhan

近年来,随着城市化的快速发展,我国城市的内涝、水体黑臭、河湖生态系统退化、水资源短缺“四水”问题日益突出,严重制约了城市经济社会的可持续发展^[1]。“四水”问题对我国物质文明和生态

文明建设的危害极大,且随着社会经济的不断发展有变异趋势,解决“四水”问题迫在眉睫^[2]。城市是政治、经济和社会的中心,具有人口聚集、建筑密集、经济社会活跃的特点,城市水循环与城市空间环境

基金项目:国家自然科学基金(41890823);国家重点研发计划(2019YFC0408901)

作者简介:张翔(1969—),男,教授,博士,主要从事城市水文和生态水文研究。E-mail:zhangxiang@whu.edu.cn

子系统、经济子系统、社会子系统以及要素流动子系统具有密切的联系,城市水问题的解决必须考虑城市各子系统之间的相互交织、互相作用的复杂关系。水系统理论以水循环为纽带,将水文的自然物理过程、水环境的生物地球化学过程和水资源利用的人文过程联系成一个整体^[3],为认识城市复杂水问题的成因和演变规律提供了科学基础,也为系统解决城市水问题提供了耦合的新途径。

城市水系统模拟以城市的水、经济社会、生态环境的相互关系为研究对象,一些学者开展了部分或整体的城市水系统模型^[4-7]研究。Ren 等^[8]提出以分散式污水处理系统、海绵基础设施以及生态河流等部分组成的城市供水系统 3.0,来应对集中式城市供水系统逐渐暴露出的水敏感性、脆弱性和不可持续性等水问题;李文运等^[9]针对水循环中的特定环节,分别建立了天然水系统和社会水系统的水量平衡方程对区域水资源进行合理评价;Lekkas 等^[10-11]研究并建立了城市水量平衡模型(urban water balance model),通过该模型研究了水和部分污染物随着城市内的水流(包括雨水、外调水、地表水、污水和地下水)从源到尾的流动路径和污染物浓度的变化;Willuwei 等^[12]建立了动态城市水模拟模型(dynamic urban water simulation model)的概念框架,以 Dublin 地区为研究对象,探索了该地区包括径流、供水、需水和污水处理等在内的城市水循环的构成,评估了土地利用变化对城市水循环的影响。

近年来,随着生态水文学、社会水文学等交叉学科的发展^[13-16],多要素耦合驱动机制的研究推动了对城市水系统的深入理解和认识^[17-18]。2014 年,德国国际合作组织(GIZ)与地方政府永续发展理事会(ICLEI)首次提出城市关联体系(urban nexus)概念,将城市水-能源-粮食纽带(water-energy-food nexus, WEF-Nexus)范式与城市可持续发展联系起来^[4];孙才志等^[19-20]在此基础上采用耦合协调度模型等方法,对水资源-能源-粮食耦合系统进行了安全评价及空间关联分析;国际科学理事会(ICSU)在 2014 年提出的“未来地球计划(Future Earth)”中,也强调了水与自然环境、经济、社会、政治之间的关联发展模式^[3];Baki 等^[21]则通过系统动力学模拟平台建立了一个仿真概念模型框架,模拟了城市供水系统对社会、经济、环境和技术变化的不同响应;Hale 等^[22]构建了一个研究水资源、社会和生态系统的框架,可用于解构复杂水系统的关键组成要素及其之间的相互联系。然而实现城市水系统 3 个过程之间内在的耦合机制仍有待进一步研究,并且由于

系统涉及的参数众多,各个参数间的联系程度不同,敏感性分析受到很大的影响^[3]。

本文基于水系统理论与城市水系统模拟相关研究,提出了城市水-社会经济-生态环境多因素的关联模型(以下简称城市水系统关联模型)的理论框架,构建了由本构关系和控制方程组成的城市水系统关联模型,可为城市水系统的演变预测和城市未来发展决策提供参考。

1 城市水系统关联模型理论框架

水是水系统内部链接的关键资源要素,在城市宏观体系中扮演着许多角色。建立城市水系统关联模型,需要分析城市水系统内部各要素的发展模式,以及系统中各要素的关联模式^[23]。

城市水系统关联模型是一个集成的模型,由水文物理过程、社会经济取水过程、水生态环境过程组成,以节水技术与绿色发展政策为导向。水文物理过程主要由产汇流模块组成,包括城市水系统区域的降水、出流和入流。社会经济取水过程由需水和供水两大模块组成,包括各行业的需水量和各环节共同构成的可供水量。水生态环境过程主要包含水生态状态、水质状态以及水量状态,由生物量、污染排放、水资源配置等因素控制。城市水系统关联模型理论框架如图 1 所示。

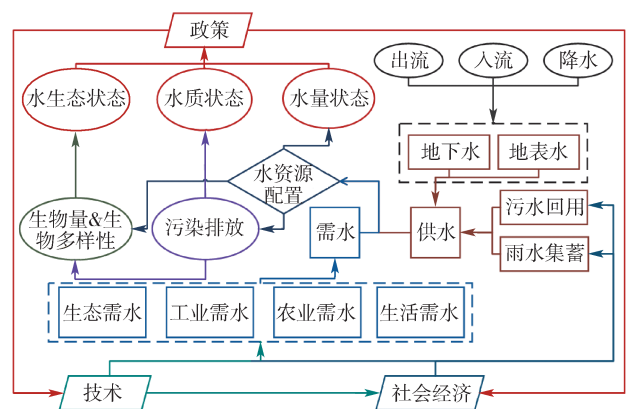


图 1 城市水系统关联模型理论框架

Fig. 1 The theoretical framework of urban water system association model

在城市水系统关联模型中,水资源可用性和需水量受到与之互动的众多不确定因素的影响,并反映了未来有限的可预测性的环境和社会形态。供水与需水之间的不断平衡体现了水资源配置的过程,继而直接或间接地影响系统的生态状态、水质状态和水量状态,迫使城市管理者实施灵活和适应发展的管理策略处理现在与未来发生的不确定性变化(例如气候、人口、社会经济情况)。通过结合城市发展的影响以及降水和产流的影响,城市水系统关

联模型理论框架可以作为一个集成的建模框架,对绿色发展、可持续发展导向下的城市化进程进行建模。

2 城市水系统关联模型构建

根据理论框架,建立城市水系统关联模型需要通过水文物理过程、社会经济取用水过程和水生态环境过程3个过程的耦合。水文物理关系主要对应理论框架中的出流、入流和降水部分,社会经济取用水过程主要对应理论框架中的供水和需水模块,水生态环境过程主要对应理论框架中的水量、水质、水生态状态。本文根据每个过程自身的变化规律,建立各过程的本构关系和控制方程,各过程之间的耦合通过控制方程变量之间的联系来进行。

2.1 水文物理过程

城市的水文物理过程主要是城市降水径流过程,本文采用时变增益水文模型模拟产流量。时变增益水文模型揭示了降水产流过程受降雨强度、土壤湿度(即土壤含水量)和下垫面条件影响的非线性指数律关系,其径流系数是时变的^[24]。

观测资料表明,系统增益因子 G (径流系数)与土壤湿度 S 或流域土壤前期雨量指数 A 呈如下非线性关系:

$$G = g_1 S^{g_2} \quad \text{或} \quad G \approx \alpha + \beta A \quad (1)$$

式中 g_1, g_2, α, β 为与下垫面等因素有关的参数。

在水文物理过程的产流模块中,可将有效净雨 R 表达为降水量 P 和系统增益因子 G 之积,基于时变增益非线性产流机理的计算公式为

$$R = GP = g_1 S^{g_2} P \approx (\alpha + \beta A) P \quad (2)$$

水平衡方程用于描述城市水系统的储水量动态变化,可表达为

$$\frac{dW}{dt} = Q_{in} + R - U - Q_{out} \quad (3)$$

式中: dW 是城市水系统储水量的变化量; Q_{in} 为入流量; Q_{out} 为出流量; U 为城市水系统中经济社会用水量。

2.2 社会经济取用水过程

将社会经济取用水过程概化为取水和排水两大部分,并且主要考虑政策、技术、社会3个因子对各行业用水量、排水量的影响。生活用水量受到政策因子、技术因子和社会因子的共同作用,具体由人口、人均生活用水量等指标决定。工业用水量受到政策和技术因子的作用,主要体现在万元工业产值用水量等指标。农业用水量受灌溉面积、政策和技术的影响较大,随着灌溉技术的不断发展,单位面积灌溉用水量逐渐降低,生态用水量受到政策和技术

的影响。与此同时,考虑系统中水利工程的调蓄作用,构建经济社会取用水量变化方程:

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{k=1}^n S_k + U_a(P, T, N) + U_b(P, T) + U_c(M, P, T) + U_d(P, T) \quad (4)$$

$$\frac{dD}{dt} = D_a(P, T, N) + D_b(P, T) + D_c(M, P, T) \quad (5)$$

式中: U 为用水量; D 为排水量; U_a, U_b, U_c, U_d 分别为生活用水量、工业用水量、农业用水量和生态用水量; D_a, D_b, D_c 分别为生活排水量、工业排水量和农业排水量; M 为灌溉面积; S_k 为第 k 个水利工程的调蓄水量; P 为政策因子; T 为技术因子; N 为社会因子。

2.3 水生态环境过程

对于水生态和水环境成分的描述,重点在于衡量水量、水质、水生态的健康程度,在城市水系统关联模型中水量状态、水质状态、水生态状态的健康程度是相对的,与各个地区的水文、社会经济条件等密切相关^[25-27]。因此,可定义水量、溶质和生物3类指标来描述水量、水质、水生态的状况,主要从受到用水量、排水量影响的角度考虑构建指标的表达式,并通过与相应指标的适宜值比较来衡量生态环境成分的健康程度:

$$\frac{dE_1}{dt} = \frac{q_s}{q_o} \quad (6)$$

$$\frac{dE_2}{dt} = \frac{c_s}{c_o} \quad (7)$$

$$\frac{dE_3}{dt} = \frac{e_s}{e_o} \quad (8)$$

式中: E_1, E_2, E_3 分别表示水量、水质和水生态方面的健康程度; q 为水量指标; c 为溶质指标; e 为生物指标; 下标 s 表示现状值, o 表示适宜值。

3 实例验证与分析

3.1 研究区简介

以湖北省武汉市为实例对城市水系统关联模型进行验证。武汉地处江汉平原东部、长江中游,是长江经济带中游城市群的核心城市,中国中部地区的中心城市,全国重要的工业基地、科教基地和综合交通枢纽。武汉市水资源蕴藏量丰富,长江、汉江在武汉交汇。2018年全市下辖13个区,总面积8569 km²,常住人口1108.1万人,地区生产总值1.48万亿元。由于武汉市地形地势等原因,城市水问题严重,洪水、内涝灾害频发,造成了巨大的经济损失,严重影响了城市化的发展、人民生活和财产安全。模型以武汉市行政边界为空间边界。

水资源的基本数据主要来自《武汉市水资源公报》(2001—2017年)、《湖北省水资源公报》(2001—2017年),以及长江水利委员会提供的汉口站月流量数据(1954—2014年);人口、经济、污染等数据来自《武汉市统计年鉴》(2001—2017年)。另外,用水指标等规划数据主要来自武汉市水务局编制的《武汉市水资源综合规划(2010—2030年)》(该报告以2010为现状年,2030年为远期规划年)和《武汉市水污染防治规划(2016—2035年)》(该报告以2016年为现状年,2035年为远期规划年)。

3.2 建模与验证

武汉市水系统关联模型以2001—2017年为历史统计数据年,也为模型的模拟与检验时段,2020—2035年为模型预测期,选取2030年作为与规划数据对比的主要年份。模型运行的时间步长设置为1a。

结合武汉市的实际情况,参照图1中关联模型理论框架构建武汉市水系统关联模型,模型内各变量的影响因子参照三大过程方程选取。用水量、需水量部分的指标,如单位面积灌溉用水量、万元工业产值用水量等由政策因子、社会因子及技术因子共同驱动,呈逐年下降的趋势。参照水生态环境过程方程,选取相关变量的现状值与适宜值之比来表征水生态系统健康状态。

采用改进的 Logistic 人口增长模型、S 形曲线、

指数型增长、对数型曲线等方法拟合指标变量间的数量关系,并使用 Matlab 拟合变量随时间的变化关系,得到各指标变量的模拟计算公式。

图2给出了主要指标的模拟与预测结果,常住人口、城镇人口比重、GDP、万元 GDP 用水量、COD 排放量、氨氮排放量平均相对误差分别为 5.27%、3.46%、1.46%、3.77%、13.69% 和 12.92%,绝对值平均误差均在 15% 以内,参数的精度符合要求,验证了公式的可靠性和模型的有效性,同时根据公式进行合理的时间外延,可对各项指标进行预测分析。水量健康程度通过武汉市可利用水资源总量与供水总量的比值进行衡量,可利用水资源总量等于时变增益水文模型求出的产流量加上武汉市过境水量,再扣除洪水不可利用量进行计算。水质好坏程度通过单位水体污染物含量与Ⅱ类水体的污染物含量进行比较衡量,水生态的健康程度通过可利用水资源量与适宜生态流量的比值进行衡量。经计算,武汉市可利用水资源量大,随年际间变化较小,导致水量、水生态健康程度变化较小且处于相对健康状态。水质状态逐年改善且总体处于健康状态。

3.3 目标指标的动态比较与模型模拟结果分析

《武汉市水资源综合规划(2010—2030年)》《武汉市水污染防治规划(2016—2035年)》分别将2010年、2016年作为现状年,预测2030年、2035年武汉市的主要指标,这些指标包括水资源利用、经济社会发展和污染物排放三大类。水资源利用指标可

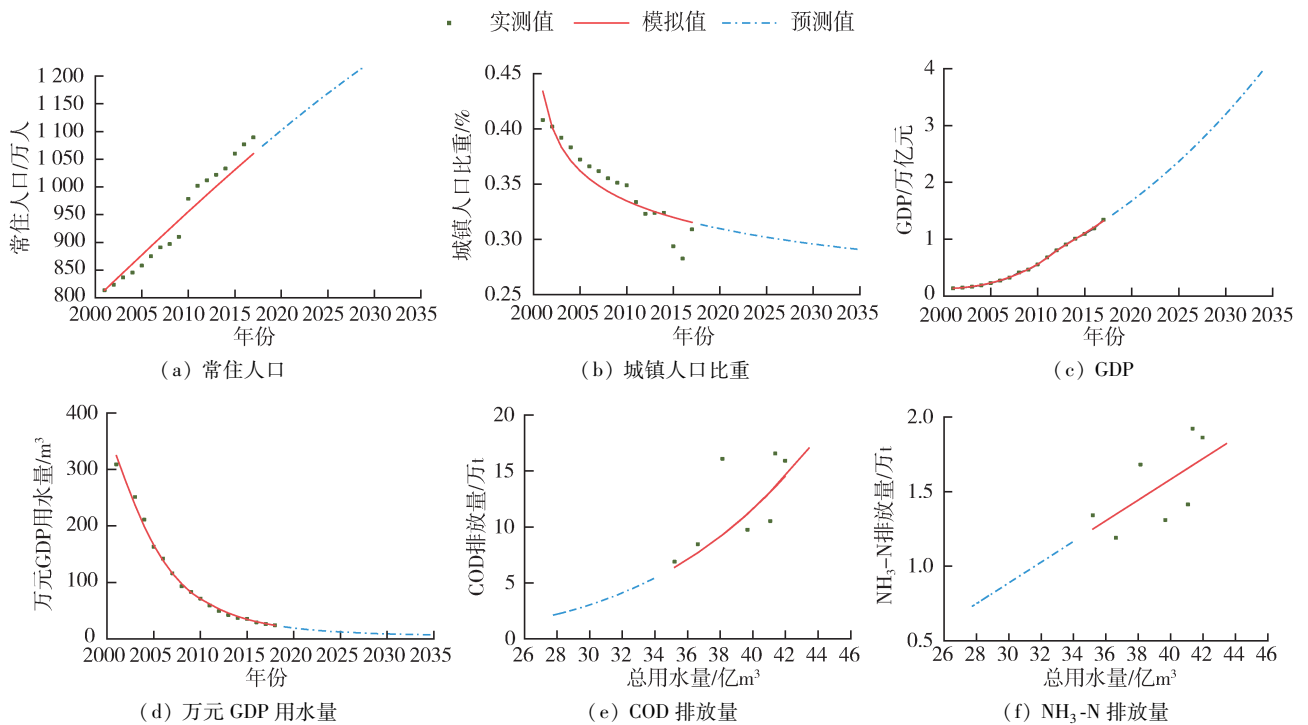


图2 武汉市主要指标实测值、模拟值与预测值

Fig. 2 Comparison of measured, simulated and predicted values of main index in Wuhan

以反映一定时期内的用水、节水、经济和科技发展水平,社会经济指标可以反映国民经济的发展以及城市化的发展水平,污染物排放指标可以反映城市化负面水质效应以及生态环境承压、污染物排放过多导致的环境恶化、生物多样性破坏等问题。本文利用城市水系统关联模型的预测值与规划报告提供的政府预期规划值作比较(表1),分析指标动态变化,同时对模拟结果进行理论分析。

从表1数据分析可知,在参数精度符合要求的情况下,水资源利用指标符合且优于规划值。用水指标的不断降低与节水技术的不断进步有关,模拟值在耦合绿色发展政策等其他因子的作用下出现一定程度的优化,说明与单因素驱动方式相比模型具有更好的预测效果;主要社会经济指标略低于规划值,相差1.6%以内,说明模型预测城市发展方向与武汉市GDP低增长模式下的城市发展规划基本吻合,体现了武汉市产业结构调整大背景下保持GDP低速稳定增长的结果预期;COD排放量控制在规划值范围内且远低于规划值,表明COD排放控制的政策效力符合规划预期;氨氮排放量超过规划范围,削减率的变化方向与规划值一致,但中远期水平年的排放量模拟值与规划值仍有一定差距,一方面与氨氮排放量相关数据不完整有关,另一方面也说明模型在考虑不同污染物对模拟结果的影响上仍有不足。与规划值的比较分析表明,以绿色发展政策为导向的多因素耦合角度下的城市水系统关联模型的预测结果符合政府规划要求并且优于规划报告的预期。同时前文中关键变量的相对误差绝对值的平均值均未超过15%,相对误差在可接受的范围之内,模型的精度符合要求。故可认为模型的模拟结果与实际系统较为吻合,即模型能够有效地对真实系统进行模拟。

综上,说明在耦合了水、生态环境、社会经济三大模块后,与单因素驱动机制相比具有更优化的结果,体现出了节水技术等科学技术与绿色发展相关政策两大因子导向下的生态环境、经济社会协同发展的良好预期。

4 结 语

本文探索提出了基于城市水-经济社会-生态环境关联的城市水系统理论框架,建立了城市水系统演变过程中由针对经济发展的正反馈回路和针对可持续性的负反馈回路共同控制的新模式,量化了政策因子、技术因子和社会因子对模型演变的影响。以武汉市为研究对象,建立了水文物理过程、社会经济取水过程和水生态环境过程变量之间的定量关系。结果表明,城市水系统关联模型模拟预测的指标值具有较高的精度,城市水系统关联模型能够揭示城市水-经济社会-生态环境多要素的耦合驱动机制,模型具有有效性。模型预测的武汉市发展方向与规划报告相符并且优于规划值,体现出了节水技术与绿色发展相关政策的导向作用,可为以后城市水系统的演变预测和城市发展政策的制定提供参考。

城市水系统关联模型依然存在着诸多问题,对于模拟中如何量化人文过程中的各种因素(环境保护意识、生活习惯、发展理念等)的影响,以及如何定量描述社会对环境变化的反应等问题还没有很好的解决方法。应该使用哪些指标来建立动态模型,指标之间的反馈机制等还有待进一步探究。今后城市水系统关联模型还需要继续探究能源、粮食等因素以及发展理念转变等与现有因素之间的耦合机制,量化人为调控及环境治理工程的社会及生态后果。

表1 指标规划值与模型预测值对比

Table 1 Comparison of the planned value of the index and the predicted value of the model

时间	类型	用水总量/亿 m ³	万元工业增加值用水量/m ³	万元 GDP 用水量/m ³	单位面积灌溉用水量/(m ³ · hm ⁻²)	城镇化率/%
现状年	规划值	≤34.48	≤49.00	71.00	6645	71
	模拟值	36.57	37.17	70.72	6488	67
2020 年	规划值	≤48.75	≤40.00	35.40	6600	82
	模拟值	31.34	27.12	18.94	4121	69
2030 年	规划值	≤50.30	≤35.00	17.80	6120	85
	模拟值	26.33	20.79	8.65	2156	70

时间	类型	人口/万人	有效灌溉面积/万 hm ²	GDP 低增长/亿元	GDP 高增长/亿元	氨氮排放量/万 t	COD 排放量/万 t
现状年	规划值	978	16.25	5516	5516	0.85	11.30
	模拟值	955	16.67	5591	5591	1.55	10.98
2020 年	规划值	1130	16.67	16200	17200	≤0.59	≤7.62
	模拟值	1102	16.67	16736	16736	1.01	3.92
2030 年	规划值	1250	16.67	32500	35700	≤0.47	≤6.05
	模拟值	1230	16.67	31994	31994	0.73	2.08

注:用水总量和万元工业增加值用水量现状年为2016年,其余指标均为2010年。

参考文献:

- [1] 崔晨韵,朱永华,吕海深,等. 长兴县与水相关的生态环境承载力评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020,48(5):406-412. (CUI Chenyun, ZHU Yonghua, LYU Haishen, et al. Water-related eco-environmental carrying capacity evaluation index system in Changxing County [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(5):406-412. (in Chinese))
- [2] 王延贵,王莹. 我国四大水问题的发展与变异特征[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(6):1-6. (WANG Yangui, WANG Ying. Variation and development characteristics of four water-related challenges in China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(6):1-6. (in Chinese))
- [3] 夏军,张翔,韦芳良,等. 流域水系统理论及其在我国的实践[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(1):1-7. (XIA Jun, ZHANG Xiang, WEI Fangliang, et al. Water system theory and its practices in China [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018,16(1):1-7. (in Chinese))
- [4] GIZ, ICLEI. Operationalizing the urban nexus: towards resource efficient and integrated cities and metropolitan regions[R]. Eschborn:GIZ,2014:1-8.
- [5] CEOLA S, MONTANARI A, KRUEGER T, et al. Adaptation of water resources systems to changing society and environment: a statement by the International Association of Hydrological Sciences [J]. Hydrological Sciences Journal,2016,61(16):2803-2817.
- [6] 邹进. 基于二元水循环及系统熵理论的城市用水配置[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(2):16-20. (ZOU Jin. Allocation of urban water resources based on dualistic water cycle theory and system entropy [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2):16-20. (in Chinese))
- [7] 周斌,桑学锋,秦天玲,等. 我国京津冀地区良性水资源调控思路及应对策略[J]. 水利水电科技进展, 2019,39(3):6-10. (ZHOU Bin, SANG Xuefeng, QIN Tianling, et al. Regulation ideas and coping strategies of virtuous water resources in Beijing-Tianjin-Hebei region of China [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019,39(3):6-10. (in Chinese))
- [8] REN Nanqi, WANG Qian, WANG Qiuru, et al. Upgrading to urban water system 3.0 through sponge city construction [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017,11(4):2095-2201.
- [9] 李文运,张伟,戈建民,等. 水量平衡分析方法及应用[J]. 水资源保护, 2011, 27(6):83-87. (LI Wenyun, ZHANG Wei, GE Jianmin, et al. Water balance analysis method and its application [J]. Water Resources Protection, 2011,27(6):83-87. (in Chinese))
- [10] LEKKAS D, MANOLI E. Integrated urban water modelling using the aquacycle model [J]. Global NEST Journal Copyright, 2008,10(3):310-319.
- [11] 许时颖. 基于风险传播的城市水系统模型构建与模拟研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [12] WILLUWEI T L, O'SULLIVAN J J. A decision support tool for sustainable planning of urban water systems: presenting the dynamic urban water simulation model [J]. Water Research, 2013,47(20):7206-7220.
- [13] ZALEWSKI M. Ecohydrology: the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources [J]. Ecological Engineering, 2000,16(1):1-8.
- [14] ELSHAFEI Y, SIVAPALAN M, TONTS M, et al. A prototype framework for models of socio-hydrology: identification of key feedback loops and parameterization approach [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18(6):2141-2166.
- [15] ZALEWSKI M. Ecohydrology: the use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources [J]. International Association of Scientific Hydrology Bulletin, 2002,47(5):823-832.
- [16] ZHANG Xiang, XIA Jun. Coupling the hydrological and ecological process to implement the sustainable water resources management in Hanjiang River Basin [J]. Science in China (Technological Sciences), 2009, 52(11):3240-3248.
- [17] FENG Maoyuan, LIU Pan, LI Zejun, et al. Modeling the nexus across water supply, power generation and environment systems using the system dynamics approach: Hehuang Region, China [J]. Journal of Hydrology, 2016, 543(B):344-359.
- [18] VAN EMMERIK T H M, LI Z, SIVAPALAN M, et al. Socio-hydrologic modeling to understand and mediate the competition for water between agriculture development and environmental health: Murrumbidgee River Basin, Australia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014,18(10):4239-4259.
- [19] 孙才志,阎晓东. 中国水资源-能源-粮食耦合系统安全评价及空间关联分析[J]. 水资源保护, 2018,34(5):1-8. (SUN Caizhi, YAN Xiaodong. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in china [J]. Water Resources Protection, 2018,34(5):1-8. (in Chinese))
- [20] 王雨,王会肖,杨雅雪,等. 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 Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. 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))

(下转第 27 页)

- Chinese))
- [37] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru,LUO Haiwan,LU Xinxiang,et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection,2020,36(6):1-6. (in Chinese))
- [38] 杨谨菲,延军平,王新华. 运城市旱涝灾害与太阳黑子周期关系分析[J]. 江西农业学报,2010,22(5):90-92. (YANG Jinfei,YAN Junping,WANG Xinhua. Analysis of relationship between sunspot cycle and drought and flood of Yuncheng City[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2010,22(5):90-92. (in Chinese))
- [39] 李发文,冯平,刘超. 基于谐波周期法的洪水灾害链分析[J]. 天津大学学报,2011,44(1):46-50. (LI Fawen,FENG Ping,LIU Chao. Analysis of flood disaster chain based on harmonic wave methods[J]. Journal of Tianjin University,2011,44(1):46-50. (in Chinese))
- [40] 刘沛林. 长江流域历史洪水的周期地理学研究[J]. 地球科学进展,2000(5):503-508. (LIU Peilin. The cyclic geography study on the historical floods in the Yangtze River[J]. Advance in Earth Sciences,2000(5):503-508. (in Chinese))
- [41] 丁燕,史培军. 台风灾害的模糊风险评估模型[J]. 自然灾害学报,2002(1):34-43. (DING Yan,SHI Peijun. Fuzzy risk assessment model of typhoon hazard [J]. Journal of Natural Diasters,2002(1):34-43. (in Chinese))
- [42] AHMAD S S,SIMONOVIC S P. A three-dimensional fuzzy methodology for flood risk analysis[J]. Journal of Flood Risk Management,2015,4(1):53-74.
- [43] LIAO Qi,YU Ge,JIANG Wensheng,et al. Research on the risk assessment of Qingdao marine disaster based on flooding[J]. Sustainability,2019,11(2):468.
- [44] 陈泽强,陈能成,杜文英,等. 一种洪涝灾害事件信息建模方法[J]. 地球信息科学学报,2015,17(6):644-652. (CHEN Zeqiang,CHEN Nengcheng,DU Wenyong,et al. A method of modelling flood event [J]. Journal of Geo-information Science,2015,17(6):644-652. (in Chinese))
- [45] 杜志强,顾捷晔. 灾害链领域本体构建方法:以暴雨洪涝灾害链为例[J]. 地理信息世界,2016,23(4):7-13. (DU Zhiqiang,GU Jieye. A domain on tology construction method of disaster chain: case study of rainstorm flood disaster chain[J]. Geomatics World,2016,23(4):7-13. (in Chinese))
- [46] 杜志强,王叁,张叶廷. 接入实时降雨数据的暴雨型洪涝灾害临灾预警方法[J]. 地理信息世界,2017,24(1):97-102. (DU Zhiqiang,WANG San,ZHANG Yeting. Temporary precaution method for rainstorm-type flood disaster with real-time rainfall data[J]. Geomatics World,2017,24(1):97-102. (in Chinese))
- [47] 何生兵,朱运亮. 极端气候变化背景下灾害移民的社会适应策略探析[J]. 水利经济,2019,37(5):73-76. (HE Shengbing,ZHU Yunliang. Social adaptation strategy of disaster-forced migration under extreme climate change [J]. Journal of Economics of Water Resources,2019,37(5):73-76. (in Chinese))

(收稿日期:2020-03-15 编辑:彭桃英)

(上接第 19 页)

- [21] BAKI S, KOUTIVA I, MAKROPOULOS C. A hybrid artificial intelligence modelling framework for the simulation of the complete, socio-technical, urban water system[C]//SEPPELT R, VOINOV A A, LANGE S, et al. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2012 International Congress on Environmental Modelling and Software. Leipzig: Leipzig Publishing House,2012:3125-3133.
- [22] HALE R L, ARMSTRONG A, BAKER M A, et al. ISAW: integrating structure, actors, and water to study socio-hydro-ecological systems[J]. Earth's Future,2015,3(3):110-132.
- [23] ZHANG Xiang, WEI Fangliang, MENG Yu, et al. Linking water, society and ecology in a system dynamics framework; case study of Huainan City[J]. Water Science and Technology:Water Supply,2019(8):2400-2409.
- [24] 夏军,王纲胜,谈戈,等. 水文非线性系统与分布式时变增益模型[J]. 中国科学: D 辑 地球科学,2004,34(11):1062-1071. (XIA Jun, WANG Gangsheng, TAN Ge, et al. Hydrological nonlinear system and distributed time-varying gain model [J]. Science in China: Ser. D Earth Sciences,2004,34(11):1062-1071. (in Chinese))
- [25] 邵益生. 城市水系统控制与规划原理[J]. 城市规划,2004(10):62-67. (SHAO Yisheng. Control and plan of city water system [J]. City Planning Review,2004,28(10):62-67. (in Chinese))
- [26] 李树平,余蔚茗. 城市水量平衡模型分析与计算[J]. 同济大学学报(自然科学版),2010,38(12):1767-1771. (LI Shuping, YU Weiming. Urban water balance model analysis [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2010,38(12):1767-1771. (in Chinese))
- [27] 陈庆秋,薛建枫,周永章. 城市水系统环境可持续性评价框架[J]. 中国水利,2004(3):6-10. (CHEN Qingqiu, XUE Jianfeng, ZHOU Yongzhang. Evaluation framework for environmental sustainability of urban water system [J]. China Water Resources,2004(3):6-10. (in Chinese))

(收稿日期:2020-07-18 编辑:熊水斌)