

文章编号:0559-9350(2021)01-0003-09

城市水循环演变及对策分析

王浩^{1,2}, 王佳¹, 刘家宏^{1,2}, 梅超¹

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038;

2. 水利部水资源与水生态工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 全球气候变化和快速城市化改变了自然水循环过程, 使水循环呈现“自然-社会”二元特征。城市是二元水循环耦合程度最深的区域, 城市水循环的驱动力、结构与过程呈现复杂化, 由此引发的城市水问题越来越突出, 未来城市水循环面临严峻挑战。本文在识别城市水循环的演变历程和机理的基础上, 解析了城市水问题的产生根源。以城市水问题以及未来城市水循环发展趋势为导向, 提出了未来城市水循环调控的总体思路, 论述了未来城市水循环调控的“理水”“用水”“治水”“管水”四大战略, 阐明了以“安”“和”“畅”“保”“节”“回”“净”“智”八字方针为指导的未来城市水循环调控实现途径。

关键词: 城市水循环; 二元水循环; 水循环演变; 城市化; 城市水文学

中图分类号: TV11; TV213

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200501

1 研究背景

城市是人类文明的集中载体。随着人类社会的不断发展, 城镇化也将高度发达。联合国2018年的报告显示, 1950年, 全球人口的30%是城市人口, 2018年全球55%的人口是城市人口, 到2050年, 预计世界68%的人口将居住在城市。全球特大型城市的数量也在急剧上升。1990年, 全球只有10个人口超过1000万的特大型城市, 2018年已增至33个, 预计到2030年将增至43个, 主要位于发展中国家^[1]。我国是世界上最大的发展中国家, 城镇化率从2000年的36.22%增加到了2019年的60.60%。我国正处于快速城镇化阶段, 在新型城镇化战略的进一步推动下, 未来一段时间内, 我国的城镇化率以及城市人口将进一步增加。

随着城镇化的快速发展, 人水关系逐渐增强, 水循环和人类逐渐演变成为一个耦合系统^[2]。水循环由自然水循环逐渐演变为“自然-社会”二元水循环模式^[3]。城市是人类活动与自然水循环相互耦合最剧烈的区域, 在自然、社会等多种因素的综合影响下, 城市水循环的过程与结构呈现复杂化, 由此引发的城市水问题越来越突出^[4]。我国城市目前正面临着水灾害频发、水资源短缺、水环境污染、水生态退化等新老四大水问题^[5-6]。未来在快速城市化和气候变化的大背景下, 水问题呈复杂化、综合化趋势, 城市水循环面临严峻挑战, 成为制约经济社会持续健康发展的突出瓶颈^[7-8]。如何应对这一严峻形势, 既是一个具有现实紧迫性的问题, 也是一个具有长远战略意义的问题。

城市水循环演变机理及过程是当前水文水资源学研究的热点问题^[9]。由于城市水循环的“自然-社会”二元性和复杂性, 量化水在时间和空间上的变化非常困难。现有研究对气候变化、城市发展、人类社会经济活动等多因素影响下, 水资源开发利用过程、供水、用水、回用、污水和雨水等城市水

收稿日期: 2020-07-14; 网络首发时间: 2020-11-05

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20201103.1535.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51739011); 国家重点研发计划项目(2016YFC0401401)

作者简介: 王浩(1953-), 博士, 教授级高级工程师, 中国工程院院士, 主要从事水文水资源研究。

E-mail: wanghao@iwhr.com

通讯作者: 刘家宏(1977-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事城市水文学研究。E-mail: liujh@iwhr.com

循环过程、流域二元水循环及其伴生水生态和水环境过程、大尺度陆地水循环过程的变化规律及发展趋势进行了探索^[10-13]。这些研究解析了水循环变化过程及其关键影响因素，但未能综合分析影响因素及整个城市水循环过程间复杂的相互作用及演化机理。目前为止，涵盖整个城市水循环系统演变机理及过程的定量化综合集成模型仍然处于起步阶段^[14]。

本文将在识别城市水循环的演变机理和驱动机制的基础上，系统剖析城市水问题的产生根源，并对发展情势做出判断，进而阐述未来城市水循环构建的总体思路 and 关键策略，为科学推动未来城市水循环的可持续发展提出切实可行的实现途径。

2 城市水循环的演变历程及机理

2.1 城市水循环演变历程 人类经济社会的发展过程也是人类对自然水循环逐渐介入的过程^[15]。随着城市的发展，城市水循环的演变过程大致可以分为三个阶段：工业化前阶段，工业化初期阶段和大规模工业化、快速城市化阶段。

工业化前阶段：早期的城市出现在原始社会到奴隶社会的过渡时期。畜牧业、手工业和商业社会分工出现后，人类开始聚居并形成了城市。以饮用水为主的城市供水系统逐渐建立，并开始修建排水沟渠将雨污水引入附近的水体，形成了早期的合流制排水系统。这个阶段人类对自然水循环的扰动微乎其微。

工业化初期阶段：第一次工业革命标志着人类跨进了以机器代替手工的工业时代。清末我国开始了工业化的起步，一直到1949年。这一时期工业发展速度较为缓慢，城市的人口和经济得到一定集聚，供水服务范围扩大，污水排放增加，水源开始受到污染。为应对水源污染问题，出现了城市的净水和污水处理单元。这个阶段的水循环模式仍以自然水循环为主导。

大规模工业化、快速城市化阶段：改革开放政策带来了我国经济的腾飞。我国的工业化和城市化进入飞速发展阶段。随着人类开发利用水资源强度的加大，自然水循环的转换路径、转换方式和转换强度被改变，城市水循环已经从“自然”模式占主导逐渐转变为“自然-社会”二元模式^[16]。人类活动持续干扰下，自然水循环和社会水循环耦合过程演变失衡，并且呈现持续恶化趋势，引发了城市水灾害、水资源、水生态、水环境等一系列水问题。

未来城市要走可持续发展之路。城市化发展的大背景下，“自然-社会”二元水循环基本模式不会改变，未来城市水循环要通过对社会水循环过程各环节的调控，通过对自然水循环的保护和恢复，使社会干扰不超过自然水循环的承载能力，以达到自然水循环与社会水循环耦合平衡的目的。

综上所述，总结城市水循环的演变历程及发展趋势如图1所示。采用0~1来表示城市化程度和对自然水循环的扰动程度，0表示无城市化以及对自然水循环无干扰，1表示完全城市化或对自然水循环的完全干扰。

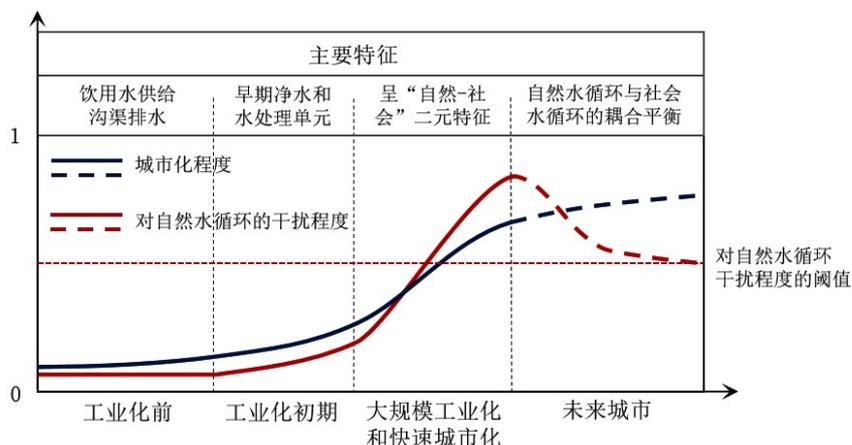
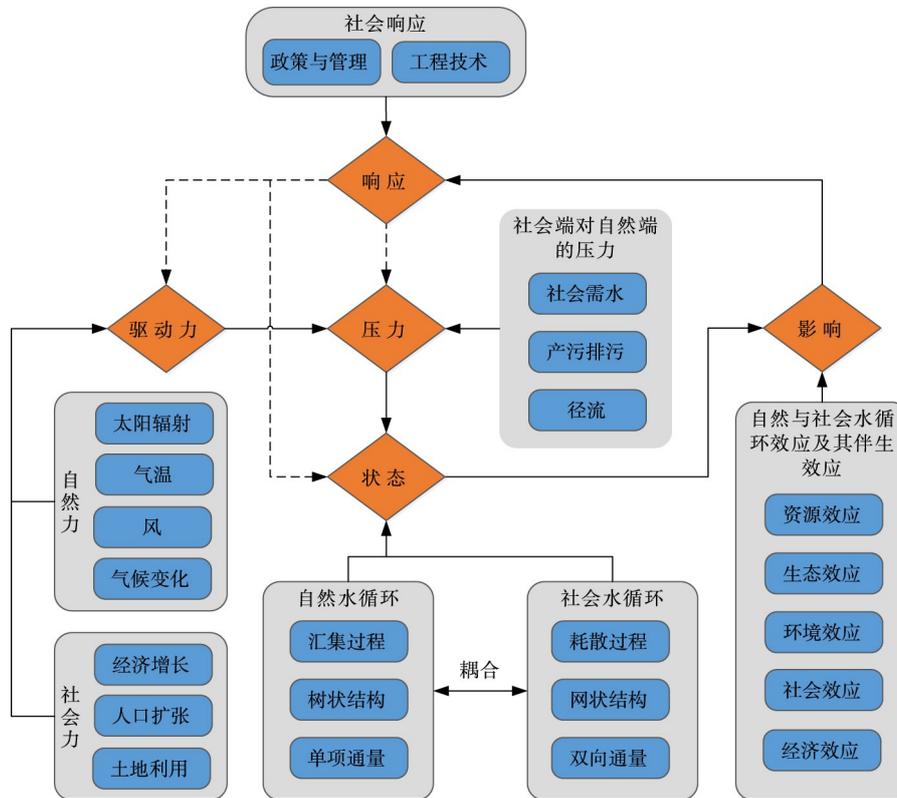


图1 城市水循环演变历程及发展趋势

2.2 基于 DPSIR 的城市水循环演变机理分析 “驱动力-压力-状态-影响-响应”(DPSIR)模型通常用于识别和描述人类与环境系统演变过程中的驱动机制、交互过程和相互作用。DPSIR 模型是一种系统动力学模型, 基于特定指标的因果关系, 分析人类社会与环境在过去到现在的演变规律和未来的发展方向, 了解人类活动如何以及多大程度影响了自然系统, 最终使决策者能够就当前的环境质量以及将来可能引起的环境影响做出工程、政策和管理方面的反馈^[17]。本文基于 DPSIR 模型, 提出城市水循环演变的机理分析方法(图2)。城市水循环的驱动力包括太阳辐射、气温、风、气候变化等自然力以及经济增长、人口扩张、土地利用等社会力。压力是人类活动对自然水循环可能产生的直接扰动, 包括社会需水、产污排污以及径流等。状态是指在压力影响下水循环系统所处的状态, 包括自然水循环的汇集过程、树状结构、单项通量, 以及社会水循环的耗散过程、网状结构、双向通量, 也包括自然水循环与社会水循环之间在过程、结构、通量之间的动态耦合。影响是指水循环状态改变引起的自然以及人类社会经济结构的改变效应, 包括资源效应——体现在径流性水资源衰减, 生态效应——体现在天然生态退化, 环境效应——体现在水体和环境污染, 社会效应——体现在科技水平, 水价值观与水文化的变化, 经济效应——体现在经济发展状态、产业结构、水的经济价值与流向等变化^[3]。响应是指人类在缓解水循环耦合状态失衡方面所采取的对策, 包括工程技术和政策与管理等。



(图中实线表示 DPSIR 模型的主要过程, 虚线表示响应措施对 DPSIR 模型其他子系统的反馈作用)

图2 城市水循环演变机理分析方法框架

3 城市水问题的产生根源及发展情势

城市化带来下垫面改变, 洼地被填埋, 用水量和排污量加大, 水系格局改变, 对自然水循环产生影响。随着人类活动对自然水循环的影响逐渐加深, 自然与社会水循环在循环通量上此消彼长, 在循环过程上深度耦合, 在循环功能上竞争融合^[12]。自然生态系统和经济社会系统逐渐演变失衡,

是一系列城市水问题的产生根源。变化环境下城市水循环的脆弱性以及由此衍生的城市水灾害、水资源、水生态、水环境等问题成为水科学研究的热点^[18]。水灾害问题主要指气候变化下的自然水循环过程演变失衡导致的洪涝灾害事件；水资源问题主要指自然水循环-社会水循环过程演变失衡导致的缺水问题；水环境问题大多指与水循环伴生的水环境过程演变失衡带来的水污染；水生态问题大多指与水循环伴生的水生态过程演变失衡带来的水生态退化^[9]。随着全球气候变化和快速城镇化的发展，深刻剖析城市水问题的产生根源及发展情势，客观认识未来城市水循环面临的主要矛盾是实现城市良性水循环的关键。

3.1 城市洪涝 城市洪涝问题是多种因素综合作用的结果。张建云等^[19]、夏军等^[20]、程晓陶等^[21]、黄国如^[22]、宋晓猛等^[23]分别从流域产汇流、城市化的水文效应、基础设施建设、城市暴雨和水循环系统角度分析了我国城市洪涝的成因机制。总的来说，气候变化带来极端降水事件增多，城市“热岛效应”、“雨岛效应”的影响，加之城市扩张使得区域不透水面积迅速增大，雨洪调蓄面积被挤占，导致城市范围内径流系数和径流量增加，改变了自然水循环过程，导致城市洪涝风险增大。

全球范围内，气候变化与极端降水事件存在显著的相关性^[24]。Hirabayashi等^[25]和 Dottori等^[26]构建的未来气候预测模型显示，全球洪水风险程度以及人员和经济损失将随气候变暖的程度增加而增加。《中国气候变化蓝皮书(2019)》显示，我国气候系统变暖趋势进一步持续，极端天气气候事件趋多趋强，气候风险水平呈上升趋势。不同增温情景下气候系统的响应及极端水文事件响应的差异及其应对策略是全球面临的紧迫挑战，亦是我国实现可持续发展战略的迫切需求。

城市“热岛效应”是指城市的温度显著高于周围乡村^[27]，城市“雨岛效应”是指城市的短时强降雨显著高于周围乡村^[28]。城市“热岛”与“雨岛”的共同作用，导致了城市极端降雨事件频发，进而引发城市洪涝。

快速城市化带来城市土地利用变化导致城市范围的径流量激增，加剧城市洪涝风险^[29]。徐宗学^[30]利用水文模型模拟了城市化对北京市暴雨洪水过程的影响规律。柳杨等^[31]研究了城镇化背景下我国城市洪涝灾害的演变特征。程晓陶^[32]对城镇化和气候变化大背景下我国面临的洪涝风险形势进行了系统分析和判断。在过去的几十年里，城市化对洪涝、干旱和河流整体状况的影响已经得到了广泛的认识，但这种影响的量化和预测在水文学领域仍然是一个挑战。

3.2 水资源短缺 城市水资源的数量和质量对维持城市社会经济发展具有重要意义。随着经济的发展和城市化进程，水资源需求日益增长(图3)，加上全球气候变化带来的极端干旱事件增多，诸多城市面临缺水挑战。扩大的水资源供需矛盾造成城市自然-社会水循环矛盾越加尖锐。

从供水角度来说，城市可利用的水资源量受区域降水禀赋的影响。陆咏晴等^[33]，使用区域降水量，降水时间和空间不均匀性以及气候变化导致的极端干旱评估了我国各城市的水资源压力。总体而言，我国城市水资源呈现北少南多的特点，气候变化下，区域水资源不平衡状况会进一步扩大。

从需水角度来说，城市化对水资源的需求是刚性的。Yang等^[34]通过构建系统动力学模型，模拟了社会经济增长对城市需水的影响。陈似蓝等^[35]以水资源需求场为理论基础，以海河流域的城市为例定量剖析了城市社会经济用水需求对自然水循环的干扰和驱动原理。栾勇等^[36]通过构建分布式城市需水预测模型，模拟不同城市功能区的需水总量及其空间分布。我国仍处于社会经济和城市化快速发展阶段，刚性用水需求在今后较长一个时期会持续增加，需求结构会进一步演进。

3.3 水污染 污染源排放是发生水污染的首要条件。城市化早期，人口密度低，人类排放的污染物相对较少，水体自净能力足以抵消人类活动对水环境的影响；随着城市化快速发展，人口迅速

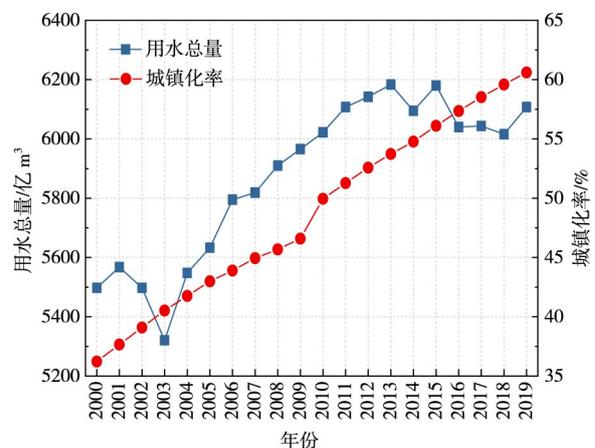


图3 2000—2019年我国城镇化率及用水总量的变化过程

增长，人类活动增加引起污染物排放量明显增多。图4为2000—2018年我国废水排放总体情况，废水总量及生活污水排放量仍存在持续增加的趋势。随着污染物排放量的增加，对自然水循环伴生的水环境过程的扰动加大，超出了水体自净能力，催生了水污染。随着我国产业结构的不断调整，工业用水效率的不断提高，近10年来工业废水排放量呈逐年减小趋势。尽管工业废水排放量已经得到有效控制，但突发的工业水污染事件仍对水环境造成巨大的压力^[37]。此外，雨水径流带来的面源污染也是城市水污染的重要来源。水动力学条件不足也是引起城市水污染的主要原因。河道水量不足，河道渠化，河道内淤泥、城市垃圾等导致水流不畅、水动力学条件不足，加剧了水污染^[38]。

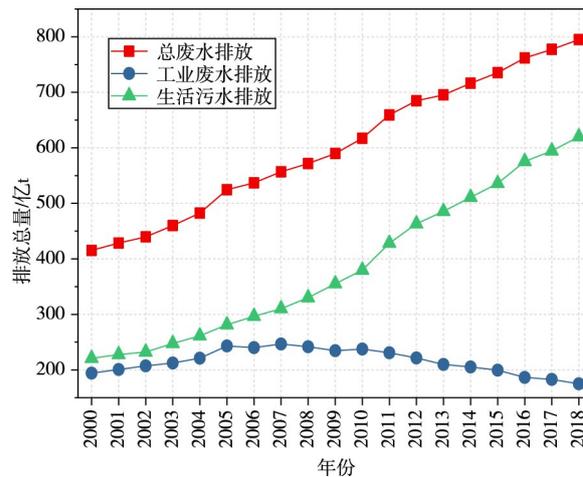


图4 2000—2018年我国废水排放总体情况

城市水循环是水污染过程的载体。水污染成因复杂，在区分不同地区、污染源、水体类型等的基础上，构建水文水质或水动力水质耦合模型，综合分析污染源输入构成及负荷与水污染形成、迁移、转化等一系列过程的响应机理，未来需要进一步探索^[38-40]。

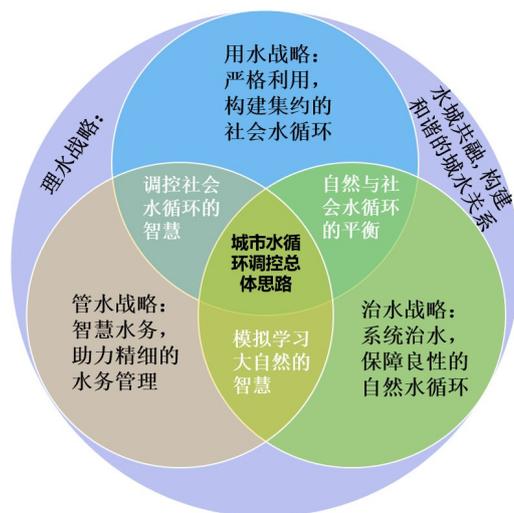
3.4 水生态退化 城市建设挤占了原有的生态系统，导致植被破坏，水土流失，湿地退化，湖泊萎缩，河湖水体破碎，生态斑块、廊道整体连通性减弱，水生态呈持续退化态势，生态系统服务功能大幅丧失。同时，地下水的严重超采，也造成对地表水生态系统的破坏性影响。尤其我国京津冀、长三角、珠三角等城市群区域城市建设范围广、强度高，水资源开发量大，导致生态环境承载力脆弱，保护水生态环境形势严峻。

水循环过程控制着水生态系统特征、功能和过程。水文条件的改变是水生态退化最主要的驱动因素^[41]。为集成研究水循环及其伴生的水生态过程，衍生出了生态水文学，并受到学术界的高度重视^[42]。Fraaije等^[43]采用动态监测的方法，分析了不同的水文梯度对植被格局及生物多样性演替的影响。Huckelbridge等^[44]通过构建湿地水文-水动力-生态耦合模型，模拟了上游截流后湿地水文条件的变化对湿地植被退化的影响机制。de Graaf等^[45]基于全球视角，分析了地下水位下降与地表径流减少之间的关系，并定量评估了地下水超采对地表水生态环境的影响机制。城市化背景下二元水循环自身演变失衡问题没有得到有效解决的情况之下，水生态退化风险将会持续，水生态保护与恢复任务艰巨。

4 城市水循环调控总体思路

4.1 城市水循环调控的四大战略 城市水循环的系统性和城市水问题的复杂性决定了未来城市水循环调控方向必定是综合的。在深刻剖析城市水循环的演变机理和城市水问题产生根源的基础上，概括提出理水、用水、治水和管水四大战略。四大战略相互依存、相互影响，综合协同实现城市水循环的可持续发展，如图5所示。

理水战略：水城共融，构建和谐的城市水关系。和谐的城市水关系，是科学配置城市水资源，提升城市功能，改善人居环境，增强城市竞争力，实现人与自然协调发展的前提和基础。城市理水，是以水为主体，寻求水与城市的空间、自然、人文、生态、经济、文化等的相互联系、相互作用的最佳融合方式，让水中蕴含的生态价值、经济价值、文化价值和美学价值等得以充分发挥。在城市化进程中，要持续秉承“建城先理水”的思路，把理水建城理念贯穿城市规划、建设、发展与管理的全过程。



用水战略：严格利用，构建集约的社会水循环。解决城市缺水问题的核心，是集约用水，实施水资源总量和开发强度双控，减少从自然水循环取水，提高用水效率，减少向自然水循环排放污水，减少对自然水循环的干扰，实现社会水循环从粗放式向集约式的转化，以维持自然与社会水循环结构、过程和通量的平衡。

治水战略：系统治水，保障良性的自然水循环。系统治水要尊重水循环的自然规律，维系和恢复城市健康的水环境。海绵城市理念以保障良性的自然水循环为出发点，为我国城市系统治水提供了新思路。海绵城市理念是适合中国国情的城市水问题生态化的综合治理战略，既是城市水问题治理的中国智慧，也是人类学习大自然智慧的集中体现。

管水战略：智慧水务，助力精细的水务管理。随着人工智能技术的发展，智慧水务的构想应运而生。智慧水务的目标是充分利用云计算、大数据分析、物联网技术、地理信息系统以及水文、水动力模型等，深入挖掘和广泛运用水务信息资源，通过水务信息采集、传输、存储、处理和服务，全面提升水务管理的效率和效能，实现水务的动态和精细化管理。

4.2 城市水循环调控的八字方针 以上述四大战略作为方向指引，概括提出城市水循环调控“安”“和”“畅”“保”“节”“回”“净”“智”八字方针，统筹综合调控城市水循环。

安：确保水安全。要保障水源地，全面提高水厂运行安全系数，加强供水管网的检测和改造，加强饮用水卫生监测，确保供水安全。要加强风险管理，合理布局防洪治涝体系，既要防城市外过境洪水——“外水”，又要治城市内积存涝水——“内水”，构筑“由外向内、由内向外”两道防线(图6)，综合统筹内外水，保障防洪治涝安全。

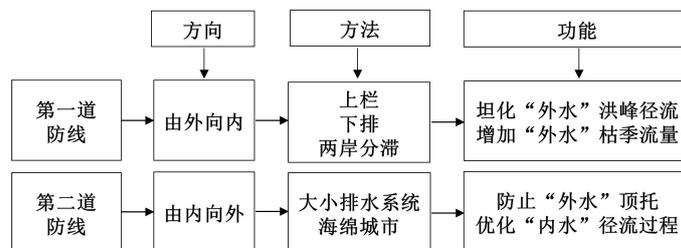


图6 城市防洪治涝两道防线

和：水城共融、人水和谐。处理好城水关系、人水关系对于构建可持续城市水系统至关重要。实现水城共融，就要做到以水定城，以水定人、以水定产、以水定地，把水资源作为城市的刚性约

束。

畅：河湖水系健康通畅，保持一定的水动力。河湖水系连通性是城市河流健康以及提高水资源利用的一个重要指标。通过疏导、沟通、引排、调度等措施，维持河湖水系连通，提高水资源利用，保障行洪，保持一定的水动力，改善水生态环境和维持生物多样性。

保：保护水生态环境。加强城市水系的保护与生态修复，加强城市黑臭水体的治理力度，恢复城市雨水循环的自然通道，保障城市水生态环境健康。

节：节约用水、高效利用。在宏观上要控制自然资源的开采量，在用水的各个环节上要完善节水法规和标准体系，优化配置水资源，应用先进的节水技术，控制社会水循环的总量，实现水资源的节约和高效利用。

回：污废水和雨水再生回用。社会用水要实现从“直线型”用水模式向“循环型”用水模式的转变。在城市乃至城市群间，进行污废水和雨水的分类施策、分质循环利用，加强社会水循环转小圈，等于在社会用水单元上的水总量加大，减少了对自然水循环的干扰。

净：源头减排、过程阻断、末端治理。水污染治理与防控由传统以“末端治理”为主的思路，转变为“源头减排、过程阻断、末端治理”的思路，全过程、多尺度、最大化减少污染排放对河流下游的干扰和冲击。

智：智慧水务。综合采用气候模型、水文模型、水资源配置模型与宏观经济多目标决策模型及其耦合模型等，实现对城市二元水循环及其伴生的“水资源-水环境-水生态”三大系统全方位的耦合模拟，建立精细化的城市水循环监测、分析、预警、调度和管理工具，为城市水循环调控提供技术支撑。

5 结论与展望

城市化是世界经济社会发展的大趋势，未来城市水循环将会面临更加严峻的挑战，城市治水是未来生态文明建设的重点和基础之一。本文基于“驱动力-压力-状态-影响-响应”(DPSIR)模型，提出了城市水循环演变机理分析方法。以“自然-社会”二元水循环理论为基础，剖析了自然水循环过程、自然水循环-社会水循环耦合过程、与水循环伴生的水环境过程以及与水循环伴生的水生态过程逐渐演变失衡的发展历程，这种“不平衡”是一系列城市水问题的产生根源。论文综述了城市洪涝、水资源短缺、水污染和水生态退化等四大水问题的形成机理及发展情势。未来要加强城市水循环过程、机理和预测的综合集成模型研究，要在保护“山水林田湖草”生命共同体的基础上维系城市水循环系统健康，进行水循环过程、水环境过程、水生态过程等多过程的耦合调控，以应对不同水问题的交织和叠加。未来城市水循环调控须落实“理水”“用水”“治水”“管水”四大战略，贯彻“安”“和”“畅”“保”“节”“回”“净”“智”八字方针，综合应用现代化技术手段，让自然水循环和社会水循环高效、协调、共生共荣，最终实现城市水循环系统的可持续发展。本文作为基础研究，仅做了理念层面的梳理和探讨，至于如何落实“四大战略”，贯彻城市水治理“八字方针”，尚需进一步深化探讨。未来拟在该顶层设计框架的基础上，提出“八字方针”落实情况的指标体系及其量化方法，为城市水治理方案评估和效果考核提供技术支撑。

参 考 文 献：

- [1] United Nations . The World's Cities in 2018[R] . 2018 .
- [2] 田富强,程涛,芦由,等. 社会水文学和城市水文学研究进展[J]. 地理科学进展, 2018, 37(1): 46-56 .
- [3] 王浩,贾仰文. 变化中的流域“自然-社会”二元水循环理论与研究方法[J]. 水利学报, 2016, 47(10): 1219-1226 .
- [4] 徐宗学,程涛. 城市水管理与海绵城市建设之理论基础——城市水文学研究进展[J]. 水利学报, 2019, 50

- (1): 57-65 .
- [5] 赵钟楠, 田英, 张越, 等 . 水资源风险内涵辨析与中国水资源风险现状[J] . 人民黄河, 2019, 41(1): 52-56 .
- [6] 陈敏建, 周飞, 马静, 等 . 水害损失函数与洪涝损失评估[J] . 水利学报, 2015, 46(8): 883-891 .
- [7] 夏军, 石卫 . 变化环境下中国水安全问题研究与展望[J] . 水利学报, 2016, 47(3): 292-301 .
- [8] 王浩, 梅超, 刘家宏 . 海绵城市系统构建模式[J] . 水利学报, 2017, 48(9): 1009-1014 .
- [9] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等 . 变化环境下城市水文学的发展与挑战—— I . 城市水文效应[J] . 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605 .
- [10] 王建华, 翟家齐, 赵勇 . 北京市水资源演变形势及应对策略[J] . 中国水利, 2012(S1): 15-17 .
- [11] HARDY M J, KUCZERA G, COOMBES P J . Integrated urban water cycle management: the Urban Cycle model [J] . Water Science and Technology, 2005, 52(9): 1-9 .
- [12] 王浩, 贾仰文, 杨贵羽, 等 . 海河流域二元水循环及其伴生过程综合模拟[J] . 科学通报, 2013, 58(12): 1063-1077 .
- [13] 汤秋鸿, 刘星才, 李哲, 等 . 陆地水循环过程的系统集成与模拟[J] . 地球科学进展, 2019, 34(2): 5-13 .
- [14] EGGIMANN S, MUTZNER L, WANI O, et al . The potential of knowing more: A review of data-driven urban water management[J] . Environmental science & technology, 2017, 51(5): 2538-2553 .
- [15] 秦大庸, 陆垂裕, 刘家宏, 等 . 流域“自然-社会”二元水循环理论框架[J] . 科学通报, 2014(59): 419-427 .
- [16] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等 . 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法[J] . 水利学报, 2006, 37(12): 1496-1502 .
- [17] WALMSLEY J J . Framework for measuring sustainable development in catchment systems[J] . Environmental management, 2002, 29(2): 195-206 .
- [18] 刘家宏, 王浩, 高学睿, 等 . 城市水文学研究综述[J] . 科学通报, 2014(36): 3581-3590 .
- [19] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等 . 中国城市洪涝问题及成因分析[J] . 水科学进展, 2016, 27(4): 485-491 .
- [20] 夏军, 张永勇, 张印, 等 . 中国海绵城市建设的水问题研究与展望[J] . 人民长江, 2017, 48(20): 1-5 .
- [21] 程晓陶, 李超超 . 城市洪涝风险的演变趋向、重要特征与应对方略[J] . 中国防汛抗旱, 2015(3): 12-15 .
- [22] 黄国如 . 城市暴雨内涝防控与海绵城市建设辨析[J] . 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 8-14 .
- [23] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等 . 北京城市洪涝问题与成因分析[J] . 水科学进展, 2019, 30(2): 153-162 .
- [24] DONAT M G, LOWRY A L, ALEXANDER L V, et al . More extreme precipitation in the world's dry and wet regions[J] . Nature Climate Change, 2016, 6(5): 508-513 .
- [25] HIRABAYASHI Y, MAHENDRAN R, KOIRALA S, et al . Global flood risk under climate change[J] . Nature Climate Change, 2013, 3(9): 816-821 .
- [26] DOTTORI F, SZEWCZYK W, CISCAR J C, et al . Increased human and economic losses from river flooding with anthropogenic warming[J] . Nature Climate Change, 2018, 8(9): 781-786 .
- [27] MOHAJERANI A, BAKARIC J, JEFFREY-BAILEY T . The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete [J] . Journal of environmental management, 2017, 197: 522-538 .
- [28] YANG P, REN G, YAN P . Evidence for a strong association of short-duration intense rainfall with urbanization in the Beijing urban area[J] . Journal of Climate, 2017, 30(15): 5851-5870 .
- [29] JODAR-ABELLAN A, VALDES-ABELLAN J, PLA C, et al . Impact of land use changes on flash flood prediction using a sub-daily SWAT model in five Mediterranean ungauged watersheds (SE Spain)[J] . Science of the Total Environment, 2019, 657: 1578-1591 .
- [30] 徐宗学 . 北京市城市化对暴雨洪水过程的影响及其数值模拟[J] . 中国防汛抗旱, 2018, 28(2): 4 .
- [31] 柳杨, 范子武, 谢忱, 等 . 城镇化背景下我国城市洪涝灾害演变特征[J] . 水利水运工程学报, 2018(2): 10-18 .
- [32] 程晓陶 . 我国防洪形势的基本判断与适应对策[J] . 中国水利, 2016(14): 1-4 .
- [33] 陆咏晴, 严岩, 丁丁, 等 . 我国极端干旱天气变化趋势及其对城市水资源压力的影响[J] . 生态学报, 2018, 38(4): 1470-1477 .
- [34] YANG Z, SONG J, CHENG D, et al . Comprehensive evaluation and scenario simulation for the water resources

- carrying capacity in Xi'an city, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 230: 221–233.
- [35] 陈似蓝, 刘家宏, 王浩. 城市水资源需求场理论及应用初探[J]. *科学通报*, 2016, 61(13): 45–52.
- [36] 栾勇, 刘家宏. 分布式城市需水预测模型[J]. *科学通报*, 2017, 62(24): 2770–2779.
- [37] 许静, 王永桂, 陈岩, 等. 中国突发水污染事件时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(12): 168–177.
- [38] 王旭, 王永刚, 孙长虹, 等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. *应用生态学报*, 2016(4): 1331–1340.
- [39] ROMAGNOLI M, PORTAPILA M, RIGALLI A, et al. Assessment of the SWAT model to simulate a watershed with limited available data in the Pampas region, Argentina[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 596: 437–450.
- [40] YAO H, NI T, YOU Z. Characterizing pollutant loading from point sources to the Tongqi River of China based on water quality modeling[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(11): 6599–6608.
- [41] 董哲仁. 论水生态系统五大生态要素特征[J]. *水利水电技术*, 2015, 46(6): 42–47.
- [42] 夏军. 生态水文学的进展与展望[J]. *中国防汛抗旱*, 2018, 28(2): 63–67.
- [43] FRAAIJE R G A, TER BRAAK C J F, VERDUYN B, et al. Dispersal versus environmental filtering in a dynamic system: drivers of vegetation patterns and diversity along stream riparian gradients[J]. *Journal of Ecology*, 2015, 103(6): 1634–1646.
- [44] HUCKELBRIDGE K H, STACEY M T, GLENN E P, et al. An integrated model for evaluating hydrology, hydrodynamics, salinity and vegetation cover in a coastal desert wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(7): 850–861.
- [45] de GRAAF I E, GLEESON T, van BEEK L R, et al. Environmental flow limits to global groundwater pumping[J]. *Nature*, 2019, 574: 90–94.

Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures

WANG Hao^{1, 2}, WANG Jia¹, LIU Jiahong^{1, 2}, MEI Chao¹

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Hydrological Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Engineering and Technology Research Center for Water Resources and Hydroecology of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Global climate change and rapid urbanization have profoundly changed the process of natural water cycle, which lead to a presentation of nature–society dualistic water cycle. City is the region with the deepest coupling degree of dualistic water cycle. The driving force, structure and process of urban water cycle tend to complicate and imbalance, which causes more and more prominent urban water issues. In this study, the root cause of urban water issue is analyzed on the basis of identifying the evolution process and mechanism of urban water cycle. Guided by urban water issues and future evolution trend of urban water cycle, the theoretical framework of urban water cycle optimization in the future which contains four strategies of "water governance", "water use", "water regulation" and "water management" is addressed, and the eight–word guideline –"safety", "harmony", "smooth", "protection", "saving", "reuse", "clean" and "intelligence" to realize the optimization of urban water cycle in the future is expounded.

Keywords: urban water cycle; nature–society dualistic water cycle; water cycle; urbanization; urban hydrology

(责任编辑: 李福田)