

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.002

城市化水文效应研究进展:机理、方法与应对措施

徐宗学^{1,2}, 李 鹏^{1,2}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:为深刻理解城市化对水文过程与生态环境的影响机制,从水循环过程、暴雨内涝及水体环境变化 3 方面总结了国内外对城市化水文效应的研究进展,梳理了城市化水文效应的研究方法与技术体系,阐述了国内外应对城市化水文效应的基本思路与措施。针对目前研究中的问题,展望了未来研究的重点方向,如城市化水文效应的机理解析、城市水文监测系统与智慧水务建设以及建立健全应急管理机制,旨在为缓解城市化水文效应带来的负面影响提供一定的理论支撑。

关键词:城市化;水文效应;数值模拟;海绵城市;智慧水务

中图分类号:TV122;P333.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0007-11

Progress on hydrological response to urbanization: mechanisms, methods and solutions//XU Zongxue^{1,2}, LI Peng^{1,2}

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to deeply understand the influence mechanism of urbanization on hydrological processes and water environment, the research results achieved on hydrological effects of urbanization in China and other countries were summarized from three aspects: hydrological cycle, rainstorm flooding and waterlogging, and water environment. The research methods and technical systems about hydrological response to urbanization were outlined, and the solutions for mitigating effects of urbanization on hydrological response at home and abroad were investigated. Finally, the key major fields of future research were proposed, including mechanism analysis for the effect of urbanization on hydrological response, construction of urban hydrological monitoring systems and smart water resources systems, and the establishment of perfect emergency management mechanism. It will provide theoretical support for mitigating the effects of urbanization on hydrological response.

Key words: urbanization; hydrological response; numerical simulation; sponge city; smart water resources system

城市地区人类活动最为活跃,近年来全球城市化正处在快速发展期,《2020 年世界城市报告》指出,目前 56.2% 的世界人口居住在城市,未来 10 年,世界将进一步城市化,2030 年世界城市化率将达到 60.4%,预计到 2050 年,世界近 70% 的人口将居住在城市^[1-3]。我国是城市化速率较快的国家之一,从 2000 年的 36.1% 上升至 2020 年的 63.9%,随着城乡一体化战略的实施,未来我国的城市化率将进一步提升。众多研究表明,在全球气候变化背景下,伴随着城市化的快速推进,城市地区面临着前所未有的威胁与挑战^[4-6]。

快速城市化给城市带来一系列水文效应,对城市水循环以及水安全造成了深刻的影响,尤其在城

市暴雨内涝、生态环境、水资源供需矛盾等方面给城市居民造成了巨大困扰与灾害,严重影响了经济社会的可持续发展。随着城市化进程的不断加快,城市区域人类活动更为频繁,城市化水文效应愈演愈烈,已引起全世界范围的广泛关注^[7-8]。国内外相关研究主要集中在城市化对各个水循环过程的影响、对城市水生态环境的影响以及应对城市化水文效应的理论与技术体系等方面,如城市化区域不透水地表快速扩张,导致城区产汇流速度加快,洪峰流量增大,洪峰时间提前,降水频率与强度提高,城市暴雨内涝风险增大^[9];高强度的人类活动导致生活污水与工业废水排放量增加,导致水质与水生态环境恶化^[10],使城市水循环呈现“自然-社会”二元特

征^[11];人们为了应对城市化水文效应,积极探讨并制定实施诸如低影响开发、海绵城市建设等城市水管理措施^[12]。我国深受城市化水文效应负面影响的困扰,是世界上遭受城市暴雨内涝灾害最为严重的国家之一,2021年郑州“7·20”特大暴雨造成严重人员伤亡与财产损失,成为全国人民心中挥之不去的痛,“逢雨必涝”正在成为我国众多城市的“痼疾”^[13]。

在城市化进程不断加剧的背景下,城市化水文效应的研究以及相应的应对措施显得尤为重要。基于此,本文对快速城市化引发的水文效应进行较为系统的总结,梳理该研究所运用的技术方法,简述国内外应对城市化水文效应的先进水管理理念与措施,最后展望了未来城市化水文效应研究及应对的重点方向,以期在城市可持续发展提供参考。

1 城市化水文效应

水循环过程受到气象因素和下垫面因素的共同影响。在快速城市化背景下,城市地区的快速扩张,导致不透水面积迅速增加^[14],局地小气候发生改变,加之大量基础设施的建设(如立交桥、地铁等),极大地影响了城市水循环过程^[15-16]。城市化的水文效应涉及多个方面,本文主要关注以下几个方面:城市化对水循环过程的影响,包括降水、蒸散发及产汇流等对城市化的响应特征;城市化对暴雨内涝的影响;城市化对水体环境的影响,包括城市化对地表及地下水体的水质、水体非点源污染等的影响。

1.1 城市化对水循环过程的影响

水循环过程涉及多个环节,本文聚焦于城区的降水、蒸散发、产汇流过程变化的相关研究。城市区域突显的局地小气候,使得降水、蒸散发过程发生改变,同时城市化建设改变了原有的下垫面条件,产汇流过程变得复杂。在城市化对降水影响的研究方面,城市热岛效应与城市雨岛效应已被诸多研究人员提出与证实,其研究结果主要表现为:城郊的降水量差距较大,城市区域的降水量明显高于郊区^[17-18];城区的降水强度、降水日数及降水频率均较城市化前有所上升,极端降水事件也有明显增多趋势^[19-20];城市化对降水的影响与季节、城市地形以及地理位置等有密切关系,其影响程度不能一概而论^[21]。大量观测与理论分析表明,城市化对降水的影响机理可概括为以下内容:城市人口、建筑、车辆密集,使城区上空热气流聚集形成热岛效应,城区大气环流弱,容易导致对流性降水的发生;城区大量建筑物有利于云的增加与抬升,高大密集建筑群的摩擦阻碍作用增加了云层停留时间;城区汽车尾气

排放等人类活动使空气中凝结核增多,促进了降水的产生。部分研究人员^[22-23]认为,城市化与降水之间或无显著的相关关系,或抑制降水产生,或影响程度被高估。因此,城市化对降水影响机理的研究一直是难点问题,难点在于如何剔除分析的干扰因素,确保研究是从引起现象的机理出发,而非从结果出发去寻找对应的原因,这需要后续持续深入的研究。

在城市化对蒸散发的影响方面,研究人员从多角度分析了城市化的蒸散发效应,一方面认为,城市化对蒸散发具有削弱效应,主要表现为:城区原有植被被不透水地表取代,植被冠层蒸发量降低;城区水体覆盖度较小,且大面积不透水地表阻隔了地下水分蒸发的通道^[24];城市化区域的日照时数有减少趋势,导致获取的太阳辐射能量降低,抑制蒸散发过程^[25]。敬书珍^[26]基于改进 SEBAL 模型,发现北京市日蒸散发存在明显城郊差异,蒸散发量与 NDVI、不透水率及主要地形要素等关系密切。杨凯等^[27]分析了上海市蒸发变化及城郊差异,结果显示城市化导致上海地区城郊的蒸发存在明显差异,且与下垫面状况直接相关。也有人认为城市化增强了蒸散发效应。曹润祥等^[28]基于 SEBS-Urban 模型与城市耗水模型分析了天津平原区城市化地区蒸散发特征,结果显示人为热或社会侧的耗水会增加蒸散发,且建成区的增幅更大。周琳^[29]采用水量平衡法、基于能量平衡的遥感反演法和下垫面分类估算法分析了北京市城市化对蒸散发的影响,发现城区蒸散量相比自然下垫面条件较高,可能与考虑人为热、建筑物内部蒸散及渗漏因素有关。可以看出,复杂的城市下垫面以及多种形式的用水活动,使得城市化蒸散发效应的研究难度加大,考虑因素不同可能会产生相悖的结论。因此,需要针对不同城市的用水活动特点,开展深入的研究与分析,针对具有一定特征的城市评估其蒸散发效应,并探索影响蒸散发的敏感性因素,如城市用水活动强弱、植被地貌等。

城市化对产汇流过程影响的研究内容较为丰富,研究人员普遍认同城市化导致下垫面洼地减少、透水性减弱,产流量增加,同时,下垫面糙率降低,导致汇流时间缩短,复杂的下垫面条件使得城市地表汇流过程变得复杂^[30-32]。在影响产流过程方面,主要体现在城市化导致地表的不透水率提高,原来具备透水性能的植被区、洼地等被道路、广场、建筑物等透水性能很弱或不具透水性的地表替代,极大地减弱了城区的入渗过程,同时,地表蓄滞能力的降低削弱了截留能力,因此表现出城市化后径流系数显著增大(图1)。许有鹏等^[33]分析了秦淮河流域不同城市化程度的年径流量特征,发现城市化后丰、

平、枯水文年的径流量均有增加趋势,枯水年增幅最大,丰水年增幅最小。冯雷^[34]采用城市发展模型与分布式水文模型分析了城市化对济南市水文要素的影响,结果显示随着济南市城市化发展,其总径流量和地表径流量分别增加了 8.6% 和 28.5%,地表径流对土地利用变化最为敏感。也有研究人员指出,城市的排水管网老化的现象会造成水体泄漏,增加了入渗量,但需要进一步验证。在影响汇流过程方面,则主要表现为以下特征(图 1 中, $T_{前}$ 、 $T_{后}$ 分别为城市化前后的峰现时间, $Q_{前}$ 、 $Q_{后}$ 分别为城市化前后的洪峰流量, ΔT 、 ΔQ 分别为城市化前后峰现时间差值和洪峰流量差值):城市化区域地表糙率减小,汇流速度加快,加之城市排水管网的存在,峰现时间明显提前,导致城市化后的洪水过程线变得“尖瘦”;城市极为复杂的下垫面导致其汇流路径发生了巨大变化,地下空间(地下停车场、地下室、地铁等)改变了浅层地下水或壤中流的汇流路径^[35],透水区与不透水区的复杂连通关系影响了地表汇流过程^[36];城市化改变了原有河网水系的形态与结构,支流逐渐消失^[37];城市的水利工程建设,如橡胶坝、泵站等,也在一定程度上影响了城区的汇流过程。Miller 等^[38]利用监测的连续降雨、径流和蒸发数据,分析得出研究区不透水率从 11% 增长到 44% 后,洪峰流量增加了 4 倍。

综上所述,城市化对水循环过程的影响极为复杂,涉及多个方面,正反馈与负反馈效应同时存在,因此,其影响机理仍不明晰,存在诸多研究难点。后续的研究需多从影响机理出发,深入探索城市化对各个水循环过程的影响机理,结合理论计算与试验观测等方式,深入剖析水循环过程对城市化的响应

机理。

1.2 城市化对暴雨内涝的影响

城市化对暴雨内涝的影响,主要体现在暴雨内涝风险的增加以及内涝发生频率上升两方面^[39-40]。对于暴雨内涝造成的风险而言,城市化的影响主要表现为:下垫面条件硬化改变了城区产汇流机理,影响了天然的水文情势,产流量增多,汇流速度加快,城区应对暴雨的调蓄能力降低;城市化地区的人口与经济较为集中,暴雨内涝事件增加了承灾体(人、车、建筑物等)的暴露度,地表淹没水深及流速增大,加剧了人、车、建筑物等的脆弱性,生命财产损失相应增加^[41-42]。如王雪^[43]基于不同时期土地利用数据,采用 SCS 模型及等体积法分析了上海市江桥镇暴雨内涝灾害对城市化的响应,结果显示城市化程度越高,研究区建筑物暴露性及总损失量越大,其空间分布趋于成片化。

在对内涝发生频率的影响方面,主要在于城市化的雨岛效应提高了城区短历时强降雨发生的频率^[44],城市的快速发展导致排水管网系统建设严重滞后,排水管网设计标准相对较低^[45],导致城市内涝事件频发。同时,区域的暴雨强度公式得不到及时更新,严重低估了实际暴雨过程,设计的排水系统能力无法满足实际暴雨径流量排水需求^[46]。如吴息等^[47]基于北京城郊的小时降水观测数据,分析了城市化对北京市短历时降水特征的影响,结果表明市中心短历时暴雨的发生概率和强度显著增加。陈其幸等^[48]发现,广州市城区不同强度的短历时暴雨均有不同程度的增大趋势。因此,城市暴雨内涝模拟、风险分析及内涝防治等成为目前城市水文学领域的重点研究方向。

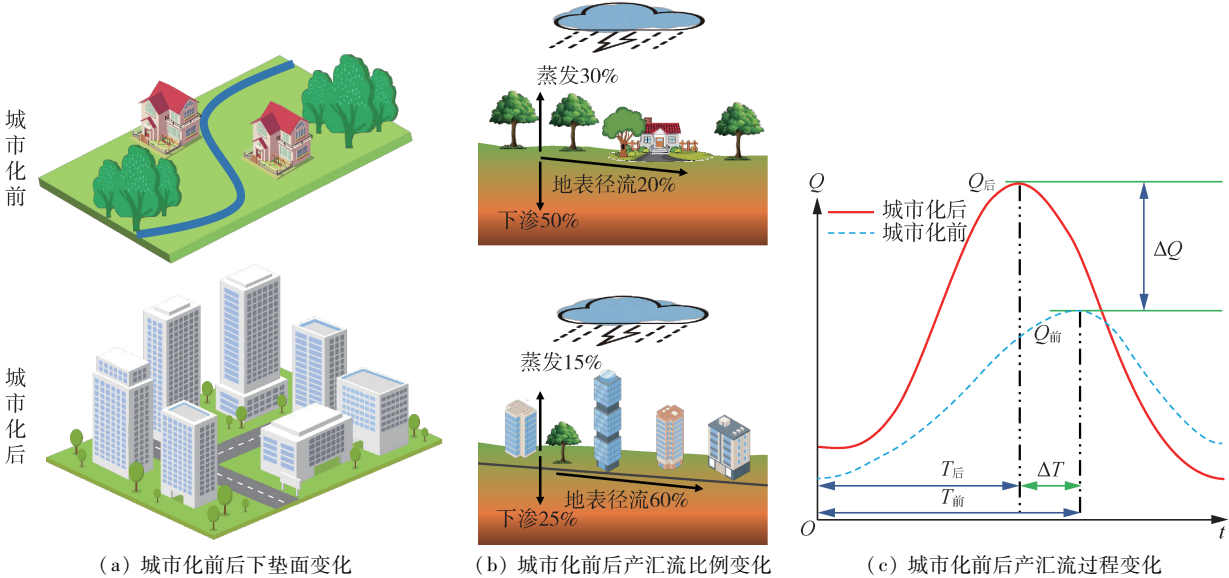


Fig.1 The schematic diagram for the impact of urbanization on runoff generation and confluence

1.3 城市化对水体环境的影响

城市化的发展对城市水体环境产生了很大影响,水体污染事件频发^[49-50],主要体现在城市活动造成生活污水与工业废水排放猛增,城市水体环境恶化;排放的污染尾气使降水酸化,进一步恶化了地表水质;污水管网与合流制管网的泄漏,造成地下水污染,滋生微生物群^[51];城市发展挤占了原有河道、湿地,生物群落的生存空间减少,严重影响了生物多样性。城市化进程导致用水量急剧增加,地下水质量受到巨大影响^[52],用水量占径流量的比例越高对水环境的影响越严重。许多学者探讨了城市化与水质之间的关系,如 Paul 等^[53]认为,城市化对水质影响有两个原因,即污染物的增加与城市降解能力降低,城市降解能力主要体现为城市下垫面的透水性。Razali 等^[54]调查发现城市化及土地利用变化影响了河流水质。Ren 等^[55]基于回归模型,分析了上海市水质与城市化及土地利用变化格局的关系,发现城市化与水质恶化呈显著正相关。Lokhande 等^[56]基于长时间序列资料发现地下水的电导率、硬度和钠含量等具有增加趋势,被利用后以生活污水方式排入河流导致河流水质恶化。

可溶性或固体废弃物等污染物在暴雨径流冲刷的作用下,从非固定的地点进入河流、湖泊、湿地、水库等水体,造成水体环境污染^[57]。城市化对非点源污染的影响最为显著,主要表现为城市化改变了非点源污染的“源、过程、汇”。城区小河流逐渐消失,削减了天然河道对水体的蓄滞和自净能力,人工基础设施等建筑用地不断增加使地表硬化,加强了地表径流冲刷效应,河流的污染负荷增大。Kou 等^[58]基于实测资料研究了3种城市路面对径流污染物的削减特征,结果显示透水沥青混凝土路面具有更好的截留径流污染物的能力,十字路口和人行横道的悬浮物和重金属浓度较高,商业区的有机污染物浓度较高。Vaze 等^[59]基于36 d样本数据,发现墨尔本城市道路的污染物浓度与清扫机有关,普通暴雨对街道污染物的去除率较小。东阳^[60]基于SWMM模型分析了昆明市北部排水片区城市非点源污染逐日排放负荷特征,评价了3种源头控制技术对污染物的削减效果。此外,部分学者从影响因素、研究方法、模型机理、管理和控制手段等方面总结了国内外城市非点源污染的研究现状^[61-62]。

2 城市化水文效应研究方法

城市化水文效应的研究涉及过程复杂、情景变量多、模型参数不确定性等问题,一直是水文科学领域中的难点问题。在许多研究学者数十年的研究过

程中,逐步发展了众多有效的理论支撑与技术方法,研究方法可概括为4类:试验对比观测法、特征参数序列法、场地试验法和数值模拟法。

2.1 试验对比观测法

早期有关城市化水文效应的研究大多采用试验对比观测法,根据观测对象的不同可细分为控制对比法、单独对比法、平行对比法等。该方法的主要思路是建立对比观测的试验流域,通过对比水文条件相似但下垫面条件不同的流域水文要素变化,或针对同一试验流域对比城市化前后的水文要素改变情况,分析城市化的水文效应。例如,Burns 等^[63]分析了美国纽约市 Croton 河附近3个试验流域的27场暴雨径流资料,3个试验流域分别代表高度城市化地区、中等城市化地区和未开发区,结果显示,随着城市化程度的提高,洪峰流量增加,退水时间减少。这类方法存在一定弊端,一方面,该方法所需的研究周期较长,对数据资料的完整性要求较高;另一方面,寻找气象地理条件完全相同的对比流域十分困难,试验流域产生的不确定性以及测量产生的误差会对结果产生较大影响,其精度存疑。因此,该类方法只能以小型流域为研究对象,对于大尺度流域的城市化水文效应适用性较弱,同时,该类方法只能得到一些经验性公式,对水文效应机理的刻画不足,缺乏一定的普适性。

2.2 特征参数序列法

特征参数序列法是针对研究区域,选择研究水文变化的特征参数,如径流系数、径流总量、径流过程线、年内分配不均匀系数、年径流变差系数等水文特征值,基于其长时间序列的变化情况来反映该区域城市化的水文效应。径流系数与径流过程线是最常用的特征参数,前者指任意时段内径流深与降水量的比值,体现土地利用变化对降雨-径流关系的影响,而后者指不同时段(多年、月、日、场次降水)的径流过程,可直观反映区域城市化对产汇流特征的影响。如 Ress 等^[64]研究了洛基流域排水系统对城市水文过程的影响,比较了两个不同不透水比例和排水管网密度集水区的暴雨水文响应,结果显示高不透水比例的集水区径流量显著增加,平均径流系数达0.446,而排水管网密度高的集水区,汇流过程明显加快。郑璟等^[65]分析了快速城市化过程中土地利用变化对深圳市布吉河流域水文要素产生的影响,发现土地利用变化会改变各水文要素的空间和年际分布特征。

特征参数法在表征城市化引起的水文效应时,剔除了其他因素的影响,计算操作相对简单,从这些特征参数的变化趋势上体现城市化水文效应,物理

含义明确,适用性较好。但该方法简单的数理统计,缺乏对水文过程复杂机制的物理表达,忽略复杂的影响因素而单从特征参数的趋势判断水文效应,容易对判断结果产生较大的影响。另外,该方法一般需要长系列资料,对于城市化对水体环境的影响,资料的获取存在一定难度。因此,该方法适用于气象条件变化不大的区域,无法反映气候变化对水文效应的影响,具有一定的局限性。

2.3 场地试验法

场地试验一般分为室内场地试验与野外场地试验,是探究城市化对产汇流影响机理研究中常用的一类方法,按研究对象一般分为地表产汇流过程试验与地表水动力过程试验^[66]。前者主要关注不同降雨条件、不同下垫面条件等对产汇流过程的影响,定量分析径流过程等水文特征参数对表征不同城市化程度试验条件的响应关系。如华亚等^[67]采用人工降雨-径流观测系统,分析了雨强、坡度与降水动能等因素在不同城市下垫面类型的产汇流特性,研究发现,雨强增大会使产流时间提前,汇流时间缩短,坡度影响汇流与退水过程的快慢,降水动能影响下垫面污染物的冲刷特性;杨玉龙等^[68]开展了城市路面产汇流试验研究,发现路面降雨损耗来自路面的洼蓄,路面糙率对汇流的速度影响较大。另一方面,地表水动力过程试验则主要关注城市化后微地形的改变如何影响二维地表汇流过程,这些微地形包括检查井入口、立交桥、地下涵洞、街道、建筑物地下空间等。如刘慧娟等^[69]研究发现城市微景观格局对降雨产流过程有显著影响,并建议规划时考虑在地势较低区域增加植被面积;Velickovic 等^[70]利用方块来表示建筑物构建试验平台,研究了道路宽度和坡度对二维地表水流演进特征的影响,发现道路流量受道路宽度和坡度的影响较大,与上游入流位置无关。

2.4 数值模拟法

随着计算机技术的发展、3S 技术(RS、GIS、GPS)的成熟,数值模拟方法得到了空前发展,采用数值模拟模型来评估城市化的水文效应受到了研究人员的广泛关注。通过改变表征蒸散发、下渗、汇流等过程的参数以及表征下垫面物理特征的参数,模拟求解不同情景并分析各情景水文过程,探究影响机理。Singh 等^[71]综述了 70 多种水文水动力学模型,总结了各模型的优缺点。徐宗学等^[72]总结了分布式水文模型在解决实际问题时面临的困难与应用现状,探讨了水文模型的发展趋势。Bronstert 等^[73]通过应用多尺度模型研究了不同土地利用类型的产汇流过程,发现中尺度模型在城市化背景下的洪水

增加了 0 ~ 4%,对流暴雨使径流量增加了 10% ~ 30%。赵刚等^[74]基于 SWMM 构建了城市化前、后两种情景模型,研究了北京凉水河流域快速城市化对产汇流的影响,结果显示城市化后径流系数明显增大,下渗量明显减少。陈莹等^[75]运用 SWAT 模型分析了太湖上游的西苕溪流域未来城镇化水文效应,结果表明城镇化使径流量增加、蒸发量减小,子流域上表现为建设用地面积与径流深之间呈显著正相关关系。另外,生态水文模型是水文模型的重要分支,是研究生态、环境和水资源等的重要技术手段^[76]。例如,刘江等^[77]通过耦合 MIKE 对流扩散模型和 Ecolab 生态模型,模拟分析了鸭子荡水库 DO、COD、氨氮浓度时空分布规律,结果显示水库对高浓度污染物入流具备净化能力。可见,数值模拟技术因其灵活的应用条件、情景设置的多样性、模拟成本较低以及适用性较为广泛等优势,在城市化水文效应的研究中越来越受到研究人员的青睐。

按计算方法的不同,模型工具一般分为水文学模型和水动力学模型。国外将不同计算方法集成在一起,并开发出操作界面以及一些前后处理功能,形成了诸多开源或者商业模型,如 SWMM、InfoWorks ICM、MIKE 系列模型等;国内集成开发的模型由于受到计算稳定性较差以及前后处理功能不太完善等因素的限制,没有得到广泛的推广。因此,国内在模型自主研发领域的研究需将重点放在计算稳定性、前后处理功能便捷性以及界面易操作性等方面。

3 应对城市化水文效应的举措

3.1 先进的城市水管理理念

由于快速城市化导致了水文循环规律发生剧烈改变,原有城市水资源供需平衡被破坏,城市水资源供需矛盾、水环境恶化以及城市暴雨内涝问题日益突出,先进的城市水管理理念受到各个国家的广泛关注。国外在 20 世纪 70 年代便开始了相关研究,用以解决城市地区的水安全问题,经过数十年的发展,逐渐形成了诸如低影响开发(low impact development, LID)、可持续排水系统(sustainable discharge system)、水敏感城市(water sensitive urban drainage, WSUD)等先进的城市雨水资源化利用和管理体系^[78],并在实践中证明了这些措施具有降低城市洪涝风险、缓解城市水资源短缺、改善水环境等优势^[79-80]。我国于 1980 年左右开始探索城市水资源管理策略和方法。近年来,随着城市防洪排涝与雨水资源化利用思想的转变,我国提出了新一代城市雨洪管理概念——海绵城市(sponge city),并先后在北京、济南等 30 个试点城市开展了海绵城市建

设,取得了大量成功经验。本文针对研究领域最活跃的 LID 和海绵城市两种城市水管理措施,简单梳理其发展历程。

a. LID。20 世纪 90 年代,美国雨洪管理专家提出一种新型的源头管理措施——LID。LID 以维持自然状态下的水文机制为目标,通过增加入渗、蒸发、滞留、过滤等措施,减少城市建设对天然水循环特征的改变^[81]。与传统的水管理措施相比,LID 主张在规划阶段进行更加详细的场地设计,保护场地尽可能地不被城市化进程所干扰,从而减少对城市化区域生态系统及环境的影响,并达到降低城市雨水径流污染、减少城区径流系数及洪峰流量、保护受纳水体与河道安全、提高雨水资源利用效率的目的。Eckart 等^[82]从 LID 设施优化、建模、监控等方面综述了 LID 措施的性能与应用现状,LID 已被广泛应用并在控制城市化水文效应方面具有很好的效果。侯精明等^[83]基于 SWMM 模型分析了某建筑小区 LID 措施的径流控制及洪峰削减效果,结果表明 LID 措施对径流控制率提升显著,随着降雨重现期增大径流控制率先增大后减小,LID 设施饱和状态在遭遇大暴雨时会对下游管网造成较大压力。

b. 海绵城市。海绵城市指城市能像海绵一样,在应对城市化水文效应方面表现出良好的“韧性”,实现自然积存、自然渗透、自然净化,从而达到径流量控制、峰值流量控制、水环境污染控制和雨水资源化利用的目标^[84]。2013 年,在我国生态文明建设的背景下,习近平总书记首次提出海绵城市建设理念。2014 年,住房和城乡建设部颁布了《海绵城市建设技术指南》,标志着我国海绵城市建设步入快速发展阶段。近些年,诸多研究人员从不同角度开展了海绵城市建设相关研究,取得了一些较好的研究成果,如房亚军等^[85]基于 SWMM-CCHE2D 单向耦合模型,探讨了山地海绵措施的内涝管控效果,结果发现海绵措施可明显提高山地径流削减率,生物滞留带的径流削减效果最明显。然而,目前海绵城市建设还处在起步阶段,在理论、技术与实践方面还存在诸多不足,尚需基本理论和技术框架的支撑^[86]。另外,海绵城市建设需要“一城一议”,在明晰研究区排水特征的基础上,采取合适的海绵城市措施^[87]。

3.2 整合绿色与灰色基础设施

灰色基础设施包括水库、河堤、雨/污水管网、排涝泵站、防洪闸等,对城市的防洪排涝起到了关键作用。LID 以及海绵城市的发展极大地丰富了城市绿色基础设施的建设,在应对暴雨内涝以及发挥自然对污染物降解作用方面具有一定成效,然而应对稀

遇极端暴雨的能力较弱,必须结合传统的灰色雨洪基础设施来应对稀遇极端暴雨^[88]。Dong 等^[89]比较了绿色和灰色基础设施对城市排水系统韧性的成本效益,结果表明,预算较少时,灰色基础设施的性价比更高,预算充足时,采用灰色与绿色基础设施的组合方式既经济又有效。王虹等^[90]从多种尺度入手,结合具体案例探讨了海绵城市建设中绿色基础设施与传统灰色雨洪基础设施相结合的重要与必要性,为城市可持续发展建设提供了依据。研究人员基本达成共识,城市雨洪管理并不是灰、绿措施的竞争或替代,只有两者的有效结合,才能发挥最大效益,形成灰绿结合、局部与整体、集水区与流域统一协调的可持续水管理基础设施,实现与自然流域系统的融合。

4 面临的关键问题及挑战

纵观国内外对城市化水文效应的研究,无论从理论方法还是技术创新,近年来都取得了长足的进步,然而也暴露出许多问题,需要进一步深入研究与探讨:城市化水文效应的机理尚不深入与系统,缺乏对复杂产汇流机理以及“自然-社会”二元水循环机理的深入研究;在城市监测系统以及智慧水务建设方面还缺乏科学的理论与技术支持;在应急管理机制方面,还需制定应急响应及时、损失率最小的应急管理制度。针对以上问题与挑战,未来关于城市化水文效应的研究则主要依据图 2 的逻辑框架展开,深入贯彻产学研体系,缓解变化环境与城市化背景下水文效应带来的不利影响。

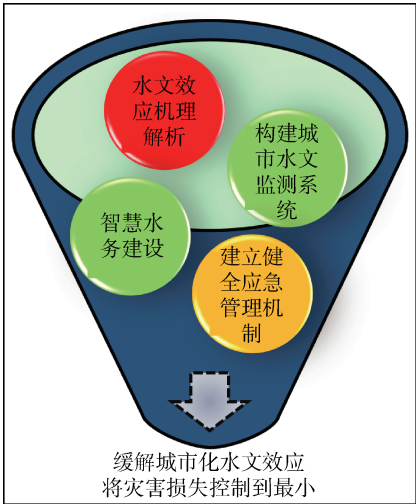


图 2 城市化水文效应未来研究方向逻辑框架

Fig. 2 The framework diagram of the future research field in urbanization hydrological effects

a. 城市化水文效应的机理解析。诸多研究表明,城市化对水循环的影响表现出区域特性,如“雨

岛效应”与“干岛效应”,如何将这些区域特性归纳总结为具有一定规律性的结论是目前面临的关键问题之一。在产汇流机理方面,产流过程还需关注有效不透水面与无效不透水面的识别问题,以及探讨其空间分布方式对产流过程的影响机理;汇流过程需关注城市复杂下垫面空间特征以及微地形对地表汇流过程的影响机理,对关键淹没位置进行监测与模拟,重点解析复杂立交桥等微地形的汇流特征以及城市道路行洪现象的影响机制。另外,在“自然-社会”二元水循环视角下,还需深入解析社会侧人类涉水活动对城市产汇流过程的影响机理^[91]。

b. 城市水文监测系统与智慧水务建设。城市水文循环规律的研究离不开水文资料的支撑,城市水文监测系统构建可为城市化水文效应的研究提供必要数据资料。未来需要从多方位构建城市水文监测系统,为智慧水务建设提供完备的数据库基础,如利用雨滴谱仪、气象雷达等技术设备监测城市气象条件;借助雷达、超声波等在城市地表布设完备的水深、流速监测点,采用先进的传感器设备在地下排水管网系统布设流量、水质监测网络等。智慧水务是智慧城市的重要分支,其理念是基于城市水文监测系统自动收集雨量、水位、流量等水情信息,实时传输至模型平台,基于大数据、云计算以及空间技术高效率完成数据运算,给出分析与决策结果,并将结果实时动态发布,实现城市“智慧水管理”并提高预警预报能力。

c. 建立健全应急管理机制。城市暴雨内涝事件突发性强、预见期短,作为突发自然灾害事件,其应急管理预案体系机制应受到相关部门的重视,郑州“7·20”特大暴雨给相关决策者敲响了警钟。城市暴雨内涝的应急管理涉及多个部门,各部门间统一协调显得尤为重要。目前暴雨内涝灾害应急管理实践中,暴露出应急管理意识较弱、应急处置协调机构不统一、应急预案不充分、部门间联动体系不完善等问题,城市暴雨内涝应急预警机制与联动管理水平亟待提高。未来应重点完善城市防洪排涝法律法规,建立健全防洪排涝应急管理体制机制,强化城市暴雨内涝预警监测能力建设,开展暴雨内涝应急管理知识培训以提高人们防洪防涝意识,努力将暴雨内涝灾害损失控制到最低程度。

5 结 语

快速城市化对水循环规律产生了剧烈影响,使城市水管理面临着更为严峻的挑战,城市化水文效应以及科学的应对措施成为水文科学领域的热点问题。在气候变化及复杂的城市人类活动背景下,如

何科学解析城市化对水文效应的影响机理是目前水文科学研究的重点与难点。本文以城市化引发的水文效应为主线,梳理了国内外对于城市化水文效应研究的现状及水文效应特征,整理了开展城市化水文效应研究的方法。另外,总结了应对城市化水文效应的措施,包括先进的城市水管理理念以及整合绿色、灰色基础设施。今后研究中,需在研究方法方面整合 3S 技术、无人机遥感技术,将模型与试验有机结合,在学科基础方面需融合水文学、水动力学、气象学、环境科学、土壤学、生态学等。针对目前研究暴露的一些问题,从城市化水文效应的机理解析、城市水文监测系统与智慧水务建设、建立健全应急管理机制 3 个方面展望了未来需重点关注的方向,为缓解快速城市化带来的负面水文效应,建设生态文明城市,保障城市水安全等提供一定的理论基础。

参考文献:

- [1] UN-HABITAT. World urbanization prospects: the 2019 revision[R]. New York: UN-HABITAT, 2019.
- [2] UN-HABITAT. World cities report 2020: the value of sustainable urbanization[R]. New York: UN-HABITAT, 2020.
- [3] CHEN G Z, LI X, LIU X P, et al. Global projections of future urban land expansion under shared socioeconomic pathways[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 537.
- [4] 张建业, 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. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HE Ruimin, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485-491. (in Chinese))
- [5] 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): 53-61. (XU Zongxue, CHENG Tao. Basic theory for urban water management and sponge city: review on urban hydrology[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(1): 53-61. (in Chinese))
- [6] RIEDEL T, WEBER T. Review: the influence of global change on Europe's water cycle and groundwater recharge[J]. Hydrogeology Journal, 2020, 28(6): 1-21.
- [7] 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): 153-165. (SONG Xiaomeng, ZHANG Jianyun, HE Ruimin, et al. Urban flood and waterlogging and causes analysis in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2): 153-165. (in Chinese))
- [8] SALVADORE E, BRONDERS J, BATELAAN O. Hydrological modelling of urbanized catchments: a review

- and future directions[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 62-81.
- [9] WING O, BATES P D, SMITH A M, et al. Estimates of present and future flood risk in the conterminous United States [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13 (3): 034023.
- [10] PICKETT S, CADENASSO M L, GROVE J M, et al. Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress [J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(3): 331-362.
- [11] 王浩, 王佳, 刘家宏, 等. 城市水循环演变及对策分析 [J]. *水利学报*, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))
- [12] 廖朝轩, 高爱国, 黄恩浩. 国外雨水管理对我国海绵城市建设的启示 [J]. *水资源保护*, 2016, 32(1): 42-45. (LIAO Chaoxuan, GAO Aiguo, HUANG Enhao. Enlightenment of rainwater management in foreign countries to sponge city construction in China [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(1): 42-45. (in Chinese))
- [13] 徐宗学, 任梅芳, 程涛, 等. “城市看海”: 城市水循环是基础, 流域统一管理是根本 [J]. *中国防汛抗旱*, 2020, 30(4): 20-24. (XU Zongxue, REN Meifang, CHENG Tao, et al. Managing urban floods: the urban water cycle is the foundation; the unified management of river basins is the fundamental [J]. *China Flood & Drought Management*, 2020, 30(4): 20-24. (in Chinese))
- [14] JACOBSON C R. Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: a review [J]. *Journal of environmental management*, 2011, 92(6): 1438-1448.
- [15] 王辉, 吴文俊, 王广, 等. 昆明市极端降水事件演变特征及城市效应 [J]. *水资源保护*, 2021, 37(4): 61-68. (WANG Hui, WU Wenjun, WANG Guang, et al. Evolution characteristics of extreme precipitation events and its urban effect in Kunming City [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(4): 61-68. (in Chinese))
- [16] WESTRA S, FOWLER H J, Evans J P, et al. Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall [J]. *Reviews of Geophysics*, 2015, 52 (3): 522-555.
- [17] 李鹏, 徐宗学, 张瑞, 等. 济南市极端降水特性与雨岛效应分析 [J]. *北京师范大学学报 (自然科学版)*, 2020, 56(6): 822-830. (LI Peng, XU Zongxue, ZHANG Rui, et al. Extreme precipitation and rainfall island effect in Jinan City [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2020, 56(6): 822-830. (in Chinese))
- [18] 朱秀迪, 张强, 孙鹏. 北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因 [J]. *地理学报*, 2018, 73 (11): 2086-2104. (ZHU Xiudi, ZHANG Qiang, SUN Peng. Effects of urbanization on spatio-temporal distribution of precipitations in Beijing and its related causes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(11): 2086-2104. (in Chinese))
- [19] SOUMA K, TANAKA K, SUETSUGI T, et al. A comparison between the effects of artificial land cover and anthropogenic heat on a localized heavy rain event in 2008 in Zoshigaya, Tokyo, Japan [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20): 11600-11610.
- [20] GOLROUDBARY V R, ZENG Y J, MANNAERTS C M, et al. Response of extreme precipitation to urbanization over the Netherlands [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58(4): 645-661.
- [21] WANG X Q, WANG Z F, QI Y B, et al. Effect of urbanization on the winter precipitation distribution in Beijing area [J]. *Science in China*, 2009(2): 108-114.
- [22] ROSENFELD D. Suppression of rain and snow by urban and industrial air pollution [J]. *Science*, 2000, 287 (5459): 1793-1796.
- [23] KAUFMANN R K, SETO K C, SCHNEIDER A, et al. Climate response to rapid urban growth: evidence of a human-induced precipitation deficit [J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(10): 2299-2306.
- [24] 唐婷, 冉圣宏, 谈明洪. 京津唐地区城市扩张对地表蒸散发的影响 [J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(2): 233-240. (TANG Ting, RAN Senghong, TAN Minghong. Urbanization and its impact on the evapotranspiration in Beijing-Tianjin-Tangshan area [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2013, 15 (2): 233-240. (in Chinese))
- [25] 詹云军, 章文, 严岩, 等. 长江流域实际蒸散发演变趋势及影响因素 [J]. *生态学报*, 2021, 41(17): 6924-6935. (ZHAN Yunjun, ZHANG Wen, YAN Yan, et al. Analysis of actual evapotranspiration evolution and influencing factors in the Yangtze River Basin [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(17): 6924-6935. (in Chinese))
- [26] 敬书珍. 基于遥感的地表特性对地表水热通量的影响研究 [D]. 北京: 清华大学, 2009.
- [27] 杨凯, 唐敏, 周丽英. 上海近 30 年来蒸发变化及其城郊差异分析 [J]. *地理科学*, 2004(5): 557-561. (YANG Kai, TANG Min, ZHOU Liying. Variation of evaporation and evaporation differences between proper and suburb in Shanghai in recent 30 years [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004(5): 557-561. (in Chinese))
- [28] 曹润祥, 李发文, 李建柱, 等. 天津平原区城市化地区蒸散发特征 [J]. *水科学进展*, 2021, 32(3): 366-375. (CAO Runxiang, LI Fawen, LI Jianzhu, et al. Exploring evapotranspiration characteristics in urbanized areas of Tianjin plain [J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32 (3): 366-375. (in Chinese))
- [29] 周琳. 北京市城市蒸散发研究 [D]. 北京: 清华大

- 学,2015.
- [30] OUDIN L, SALAVATI B, FURUSHO-PERCOT C, et al. Hydrological impacts of urbanization at the catchment scale[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559: 774-786.
- [31] GUAN M, SILLANPÄÄ N, KOIVUSALO H. Storm runoff response to rainfall pattern, magnitude and urbanization in a developing urban catchment [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(4): 543-557.
- [32] EBRAHIMIAN A, WILSON B N, GULLIVER J S. Improved methods to estimate the effective impervious area in urban catchments using rainfall-runoff data[J]. Journal of Hydrology, 2016, 536: 109-118.
- [33] 许有鹏, 石怡, 都金康. 秦淮河流域城市化对水文水资源影响[C]//首届中国湖泊论坛论文集. 南京: 东南大学出版社, 2011: 14-23.
- [34] 冯雷. 气候变化背景下城市化对济南市水文要素的影响研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2020.
- [35] 王军辉, 周宏磊, 韩煊, 等. 北京市地下空间运营期主要水灾水害问题分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 224-229. (WANG Junhui, ZHOU Honglei, HAN Xuan, et al. Analysis of the primary water disasters and water harms in Beijing underground space during operation period[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(2): 224-229. (in Chinese))
- [36] BRUWIER M, MARAVAT C, MUSTAFA A, et al. Influence of urban forms on surface flow in urban pluvial flooding[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124493.
- [37] WANG J, QIN Z, SHI Y, et al. Multifractal analysis of river networks under the background of urbanization in the Yellow River Basin, China [J]. Water, 2021, 13(17): 2347.
- [38] MILLER J D, KIM H, KJELDSEN T R, et al. Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover [J]. Journal of Hydrology, 2014, 515: 59-70.
- [39] MUIS S, GÜNERALP B, JONGMAN B, et al. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: a probabilistic analysis using global data[J]. Science of the Total Environment, 2015, 538: 445-457.
- [40] MCGRANE S J. Impacts of urbanization on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review [J]. Hydrological Sciences Journal, 2016, 61(13): 2295-2311.
- [41] SHRUTIDHARA K, RATUL M. Vulnerability aspects of urban flooding: a review[J]. Indian Journal of Economics and Development, 2018, 14(3): 578-586.
- [42] 王艳君, 高超, 王安乾, 等. 中国暴雨洪涝灾害的暴露度与脆弱性时空变化特征[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(6): 391-398. (WANG Yanjun, GAO Chao, WANG Anqian, et al. Temporal and spatial variation of exposure and vulnerability of flood disaster in China [J]. Climate Change Research, 2014, 10(6): 391-398. (in Chinese))
- [43] 王雪. 暴雨内涝灾害对城市化的响应[D]. 上海: 上海师范大学, 2018.
- [44] KISHTAWAL C M, NIYOGI D, TEWARI M, et al. Urbanization signature in the observed heavy rainfall climatology over India [J]. International Journal of Climatology, 2010, 30(13): 1908-1916.
- [45] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(2): 81-88. (in Chinese))
- [46] 张炜, 李思敏, 孙广垠. 我国城市暴雨内涝形成的影响机制研究[J]. 城市发展研究, 2013, 20(1): 120-122. (ZHANG Wei, LI Simin, SUN Guangyin. Effect mechanism of urban rainstorm waterlogging formation in China [J]. Urban Development Studies, 2013, 20(1): 120-122. (in Chinese))
- [47] 吴息, 王晓云, 曾宪宁, 等. 城市化效应对北京市短历时降水特征的影响[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 68-72. (WU Xi, WANG Xiaoyun, ZENG Xianning, et al. The effect of urbanization on short duration precipitation in Beijing [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2000, 23(1): 68-72. (in Chinese))
- [48] 陈其幸, 武传号, 黄国如, 等. 广州市城区短历时暴雨特征分析[J]. 水电能源科学, 2013, 31(8): 4-6. (CHEN Qixing, WU Chuanhao, HUANG Guoru, et al. Study on characteristics of short duration rainstorm in Guangzhou City [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(8): 4-6. (in Chinese))
- [49] GIRI S, QIU Z. Understanding the relationship of land uses and water quality in twenty first century: a review [J]. Journal of Environmental Management, 2016, 173: 41-48.
- [50] 朱晓琳, 李一平, 许益新, 等. 时间尺度对平原感潮河网水动力水质模拟精度的影响[J]. 水资源保护, 2020, 36(3): 67-75. (ZHU Xiaolin, LI Yiping, XU Yixin, et al. Effects of time scale on simulation accuracy of hydrodynamic water quality of plain tidal river network [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(3): 67-75. (in Chinese))
- [51] 李思远. 合流制管网污水溢流污染特征及其控制技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [52] CHO J, BARONE V A, MOSTAGHIMI S. Simulation of land use impacts on groundwater levels and streamflow in a Virginia watershed [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 1-11.
- [53] PAUL, M J, MEYER J L. Streams in the urban landscape [J]. Annual Review of Ecology & Systematics, 2001, 32: 333-365.

- [54] RAZALI A, ISMAIL S S, AWANG S, et al. Land use change in highland area and its impact on river water quality: a review of case studies in Malaysia [J]. Ecological Processes, 2018, 7: 19.
- [55] REN W, ZHONG Y, MELIGRANA J, et al. Urbanization, land use, and water quality in Shanghai [J]. Environment International, 2003, 29(5): 649-659.
- [56] LOKHANDE S, TARE V. Spatio-temporal trends in the flow and water quality: response of river Yamuna to urbanization [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(3): 117.
- [57] 齐苑儒, 李怀恩, 李家科, 等. 西安市非点源污染负荷估算[J]. 水资源保护, 2010, 26(1): 9-12. (QI Yuanru, LI Huaen, LI Jiake, et al. Estimation of Xi'an urban non-point source pollution load [J]. Water Resources Protection, 2010, 26(1): 9-12. (in Chinese))
- [58] KOU C, QI Y, KANG A, et al. Spatiotemporal distribution characteristics of runoff-pollutants from three types of urban pavements [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 292(11): 125885.
- [59] VAZE J, CHIEW F. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface [J]. Urban Water, 2002, 4(4): 379-389.
- [60] 东阳. 城市非点源污染逐日排放特征及控制策略研究: 以昆明市北部排水片区为例 [J]. 环境污染与防治, 2019, 41(2): 246-251. (DONG Yang. Study on daily emission characteristics and control strategies of urban nonpoint source pollution: a case study in the northern drainage area of Kunming [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41(2): 246-251. (in Chinese))
- [61] CAREY R O, HOCHMUTH G J, MARTINEZ C J, et al. Evaluating nutrient impacts in urban watersheds: challenges and research opportunities [J]. Environmental Pollution, 2013, 173: 138-149.
- [62] 王龙, 黄跃飞, 王光谦. 城市非点源污染模型研究进展 [J]. 环境科学, 2010, 31(10): 2532-2540. (WANG Long, HUANG Yuefei, WANG Guangqian. Review of urban nonpoint source pollution models [J]. Environmental Science, 2010, 31(10): 2532-2540. (in Chinese))
- [63] BURNS D, VITVAR T, MCDONNELL J, et al. Effects of suburban development on runoff generation in the Croton River Basin, New York, USA [J]. Journal of Hydrology, 2005, 311: 266-281.
- [64] RESS L D, HUNG C J, JAMES L A. Impacts of urban drainage systems on stormwater hydrology: Rocky Branch Watershed, Columbia, South Carolina [J]. Journal of Flood Risk Management, 2020, 13(3): e12643.
- [65] 郑璟, 方伟华, 史培军, 等. 快速城市化地区土地利用变化对流域水文过程影响的模拟研究: 以深圳市布吉河流域为例 [J]. 自然资源学报, 2009, 24(9): 1560-1572. (ZHENG Jing, FANG Weihua, SHI Peijun, et al. Modeling the impacts of land use change on hydrological processes in fast urbanizing region—a case study of the Buji Watershed in Shenzhen City, China [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(9): 1560-1572. (in Chinese))
- [66] 郝晓丽, 穆杰, 喻海军, 等. 城市洪涝试验研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2021, 41(1): 80-86. (HAO Xiaoli, MU Jie, YU Haijun, et al. Advances in experimental research of urban flooding [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2021, 41(1): 80-86. (in Chinese))
- [67] 华亚, 汪志荣, 韩志捷, 等. 城市典型下垫面降雨产汇流特性模拟实验研究 [J]. 天津理工大学学报, 2016, 32(6): 48-53. (HUA Ya, WANG Zhirong, HAN Zhijie, et al. Simulation experiment study on runoff generation and confluence characteristics of rainfall on typical urban underlying surface [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2016, 32(6): 48-53. (in Chinese))
- [68] 杨玉龙, 唐正光, 曾飞凡, 等. 城市路面微流域产汇流特点分析研究 [J]. 中国水运 (下半月), 2018, 18(12): 59-60. (YANG Yulong, TANG Zhengguang, ZENG Feifan, et al. Analysis on the characteristics of runoff generation and confluence in urban pavement micro-watershed [J]. China Water Transport, 2018, 18(12): 59-60. (in Chinese))
- [69] 刘慧娟, 卫伟, 王金满, 等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验 [J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2219-2227. (LIU Huijuan, WEI Wei, WANG Jinman, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process [J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2219-2227. (in Chinese))
- [70] VELICKOVIC M, ZECH Y, SOARES-FRAZAO S. Steady-flow experiments in urban areas and anisotropic porosity model [J]. Journal of Hydraulic Research, 2017, 55(1): 85-100.
- [71] SINGH V P, WOOLHISER D A. Mathematical modeling of watershed hydrology [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2002, 7(4): 270-292.
- [72] 徐宗学, 程磊. 分布式水文模型研究与应用进展 [J]. 水利学报, 2010, 41(9): 1009-1017. (XU Zongxue, CHENG Lei. Progress on studies and applications of the distributed hydrological models [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(9): 1009-1017. (in Chinese))
- [73] BRONSTERT A, BARDOSSY A, BISMUTH C, et al. Multi-scale modelling of land-use change and river training effects on floods in the Rhine Basin [J]. River Research and Applications, 2010, 24(3): 1102-1125.
- [74] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(5): 55-64. (ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: case study for Liangshui River Basin

- [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35 (5): 55-64. (in Chinese))
- [75] 陈莹, 许有鹏, 陈兴伟. 长江三角洲地区中小流域未来城镇化的水文效应[J]. 资源科学, 2011, 33 (1): 64-69. (CHEN Ying, XU Youpeng, CHEN Xingwei. Hydrological response to future urbanization in small or medium basins in the Yangtze River Delta Region [J]. Resources Science, 2011, 33 (1): 64-69. (in Chinese))
- [76] 徐宗学, 赵捷. 生态水文模型开发和应用: 回顾与展望[J]. 水利学报, 2016, 47 (3): 346-354. (XU Zongxue, ZHAO Jie. Development and applications of eco-hydrological models: past and future [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (3): 346-354. (in Chinese))
- [77] 刘江, 陈国鼎, 曾继军, 等. 基于 MIKE 对流扩散和生态耦合模型的鸭子荡水库水质模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16 (1): 118-122. (LIU Jiang, CHEN Guoding, ZENG Jijun, et al. Water quality simulation of Yazidang reservoir based on Ecolab in MIKE software [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16 (1): 118-122. (in Chinese))
- [78] 杨劲松, 彭湃, 赵芳. 国内外城市雨水资源化利用与管理体制比较[J]. 山西建筑, 2012, 38 (11): 123-125. (YANG Jinsong, PENG Pai, ZHAO Fang. Compare urban rainwater utilization and management system between domestic and abroad [J]. Shanxi Architecture, 2012, 38 (11): 123-125. (in Chinese))
- [79] 黄国如, 赵晓莺, 麦叶鹏. 低影响开发措施对雨水径流的控制效应[J]. 水资源保护, 2021, 37 (4): 29-36. (HUANG Guoru, ZHAO Xiaoying, MAI Yepeng. Control effect of low impact development measures on rainwater runoff [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (4): 29-36. (in Chinese))
- [80] 雷向东, 赖成光, 王兆礼, 等. LID 改造对城市内涝与面源污染的影响[J]. 水资源保护, 2021, 37 (5): 131-139. (LEI Xiangdong, LAI Chengguang, WANG Zhaoli, et al. Influence of LID adaptation on urban flooding and non-point source pollution [J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (5): 131-139. (in Chinese))
- [81] SOHN W, KIM J H, LI M H, et al. The influence of climate on the effectiveness of low impact development: a systematic review [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 236: 365-379.
- [82] ECKART K, MCPHEE Z, BOLISSETTI T. Performance and implementation of low impact development: a review [J]. Science of the Total Environment, 2017, 607: 413-432.
- [83] 侯精明, 李东来, 王小军, 等. 建筑小区尺度下 LID 措施前期条件对径流调控效果影响模拟[J]. 水科学进展, 2019, 30 (1): 45-55. (HOU Jingming, LI Donglai, WANG Xiaojun, et al. Effects of initial conditions of LID measures on runoff control at residential community scale [J]. Advances in Water Science, 2019, 30 (1): 45-55. (in Chinese))
- [84] CHAN F K S, GRIFFITHS J A, HIGGITT D, et al. "Sponge City" in China: a breakthrough of planning and flood risk management in the urban context [J]. Land Use Policy, 2018, 76: 772-778.
- [85] 房亚军, 于川淇, 金鑫, 等. 基于 SWMM-CCHE2D 单向耦合模型的山地海绵城市内涝管控效果研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2021, 54 (10): 898-906. (FANG Yajun, YU Chuanqi, JIN Xin, et al. Research on waterlogging control effect of mountain sponge city based on SWMM-CCHE2D unidirectional coupling model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54 (10): 898-906. (in Chinese))
- [86] 褚俊英, 王浩, 周祖昊, 等. 流域综合治理方案制定的基本理论及技术框架[J]. 水资源保护, 2020, 36 (1): 18-24. (CHU Junying, WANG Hao, ZHOU Zuhao, et al. Basic theory and technical framework for formulation of integrated watershed management plan [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (1): 18-24. (in Chinese))
- [87] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化 LID 模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报, 2016, 31 (5): 719-731. (LIU Changming, ZHANG Yongyong, WANG Zhonggen, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: a preliminary study of planning and techniques for sponge city [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31 (5): 719-731. (in Chinese))
- [88] ALVES A, GERSONIUS B, KAPELAN Z, et al. Assessing the co-benefits of green-blue-grey infrastructure for sustainable urban flood risk management [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 239: 244-254.
- [89] DONG X, GUO H, ZENG S Y. Enhancing future resilience in urban drainage system: green versus grey infrastructure [J]. Water Research, 2017, 124: 280-289.
- [90] 王虹, 李昌志, 李娜, 等. 绿色基础设施构建基本原则及灰色与绿色结合的案例分析[J]. 给水排水, 2016, 52 (9): 50-55. (WANG Hong, LI Changzhi, LI Na, et al. Green infrastructure design principles and cases on integrating gray and green infrastructures [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 52 (9): 50-55. (in Chinese))
- [91] 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. (WANG Hao, JIA Yangwen. Theory and study methodology of dualistic water cycle in river basins under changing conditions [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47 (10): 1219-1226. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-10-29 编辑: 彭桃英)