

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2017.01.001

海绵城市建设中若干水文学问题的研讨

夏军^{1,2,3}, 石卫¹, 王强¹, 邹磊¹

(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. 武汉大学水安全研究院, 湖北 武汉 430072;
3. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072)

摘要:针对海绵城市建设面临的问题和挑战,提出了以水循环为纽带、将城市暴雨-径流、水污染治理和城市生态绿地、湿地建设与市政建设(排水、排污)规划管理联系为一体的“城市水系统”的概念与方法。基于水文学原理,分析了目前海绵城市建设中最为关键、也是质疑较多的年径流总量控制率概念,指出现行的年径流总量控制率的计算实质是年降水总量控制率。如果回归到水文学概念,年径流总量控制率就必须与水文系统响应的增益因子,即径流系数建立内在的联系;需要研究径流系数并非常数,而是与土壤湿度、降水强度和下垫面组合的时变非线性理论问题。此外,对比分析了现行海绵城市建设低影响开发措施和改进后的年径流总量控制率之间的关系,深入剖析了“城市看海”发生的条件与风险。最后就海绵城市建设与规划的水文学基础亟待改进的方面:径流系数非线性、区分自然条件和城市化后的蓄水量变化的差别、考虑河湖水系调蓄和陆地蒸散发、与流域大海绵调控结合、风险管理等,进行了研讨,并提出了未来我国海绵城市建设的若干建议。

关键词:海绵城市;城市化;水系统;水文学;总径流控制率;低影响开发

中图分类号:P349 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2017)01-0001-08

Discussion of several hydrological issues regarding sponge city construction

XIA Jun^{1,2,3}, SHI Wei¹, WANG Qiang¹, ZOU Lei¹

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Research Institute for Water Security, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on a review of the problems and challenges of sponge city construction in China, the concept and methodology of an urban water system integrating urban rainstorm-runoff, water pollution control, and an urban ecological greenbelt with wetland and municipal construction (drainage and sewage) are proposed. Based on hydrological theories, the concept of the control rate of total annual runoff, which is the most critical and difficult-to-quantify factor in the construction of a sponge city, is analyzed. It is pointed out that the currently calculated control rate of total annual runoff is actually the control rate of total annual precipitation. Hence, it is necessary to establish an internal relation with the gain factor of the response of the hydrological system, i. e., the runoff coefficient. It also needs to be noted that the runoff coefficient is not a constant, but the time-varying nonlinearity of the combination of soil moisture, precipitation intensity, and the underlying surface. Additionally, the relationship between low impact development (LID) during sponge city construction and the improved control rate of total annual runoff are analyzed, in order to examine the conditions and risks of sea views in cities. Finally, it is suggested that the runoff coefficient nonlinearity, the differences in storage capacity between natural conditions and the conditions after urbanization, river and lake water system storage and land evapotranspiration, basin sponge regulation and control, and risk management should be strengthened on the hydrological basis of sponge city construction and planning. Some suggestions for future sponge city construction in China are put forward.

Key words: sponge city; urbanization; water system; hydrology; total runoff control rate; low impact development

基金项目:国家自然科学基金(41571028,51279140)

作者简介:夏军(1954—),男,中国科学院院士,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:xiajun666@whu.edu.cn

1 研究背景

受气候变化和人类活动因素的影响,城市面临洪涝灾害、水资源短缺、水体黑臭以及生态系统退化与修复的诸多问题。在极端气候变化和城市快速发展共同影响下,我国“城市看海”的城市愈来愈多,城市洪涝灾害造成了巨大的社会经济损失^[1-3]。仅以武汉市为例,截至2016年7月6日,暴雨灾害造成全市12个区75.7万人受灾,共转移安置灾民167897人次,截至发稿前,80207名群众处于转移安置状态,全市布设安置点68个,农作物受损97404 hm²,倒塌房屋2357户5848间,因灾死亡14人,直接经济损失22.65亿元。武汉市对排水系统投资巨大,但依然年年“看海”,城市内涝问题十分突出。城市如何与水和平共处?中国城市陷入的“治水方略”之困境又该如何解开?这成为当前及未来涉及人口最多、经济发展压力最大的中国城市化建设面临的严峻城市化建设战略问题,亟待研究解决。

为了解决城市化导致的一系列负面效应,自20世纪90年代发达国家就提出了一些城市雨洪问题管理体系,如美国的低影响开发(low impact development, LID)^[4]、英国的可持续排水(sustainable urban drainage systems, SUDS)^[5]、澳大利亚的水敏感城市设计(water sensitive urban design, WSUD)^[6]等。LID从源头上对径流调控,通过入渗、过滤和蒸发等方式模拟自然水文条件,实现减少径流、降低污染负荷和保护受纳水体的目标,与城市生态建设有机结合,根本解决城市健康问题,其关键要素见图1^[7-8]。WSUD根据城市水循环系统概念,将城市供水、污水处理以及水的再循环等作为一个整体进行综合管理(图2),促进城市规划设计与建造方式的改变,以维持城市的可持续发展^[10]。SUDS基于城市可持续性发展理念,除了考虑对城市生存环境至关重要的饮用水、水环境外,进一步将

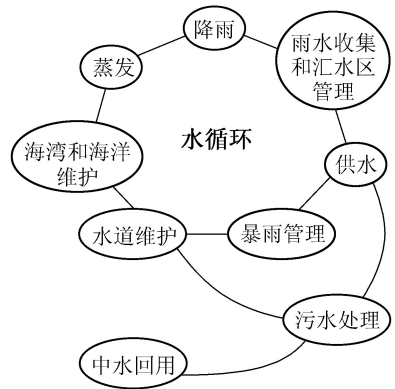


图2 水敏感城市设计中的水综合管理^[10]

地表水功能性价值考虑在内,使城市排水系统更具可持续性^[5]。

近几年,海绵城市建设成为我国城市热点水问题^[3]。2013年12月,在中央城镇化工作会议上首次提出了海绵城市的理念:“在提升城市排水系统时要优先考虑把有限的雨水留下来,优先考虑更多利用自然力量排水,建设自然保存、自然渗透、自然净化的海绵城市”。随后,习近平总书记先后在2014年考察京冀协同发展座谈会、中央财经领导小组第5次会议和2015年中央城市工作会议上多次强调了海绵城市建设工作的部署。2014年10月,住房和城乡建设部颁发《海绵城市建设技术指南(试行)》(以下简称《指南》)^[11],为促进我国海绵城市建设提供技术支撑和理论指导;2014年12月,中央相关部门开展了全国首批海绵城市建设试点城市的申报工作,至2015年4月,全国首批16个试点海绵城市正式确定。国务院办公厅2015年10月印发《关于推进海绵城市建设的指导意见》(以下简称《指导意见》),部署推进我国海绵城市建设工作。

2 海绵城市建设面临的问题和挑战

2030年左右我国的水资源安全将面临严峻的问题与挑战^[12]。以城镇化和供水为例,1981年,我国城镇化率21.16%,到了2011年全国城镇化率已经攀升到51.27%,预计2030年和2050年将分别达到70%和80%。当前我国城市(含县)日供水总规模3.14亿m³,其中城市日供水2.57亿m³。按照传统的供需模式,未来水资源的供给需求和缺口将进一步加大。我国的城镇化速度快,建设速度跟不上城市综合治理的速度,传统的城市建设凸显的城市病愈来愈突出:①城市内涝及洪涝灾害损失愈来愈严重。2016年全国多地,如北京、广州、武汉,发生“城市看海”内涝情景。②城市水环境问题也愈来愈凸显。城市垃圾、生活污水排放、河道水流堵塞导致城市水体黑臭。③城市水生态退化严峻。如有

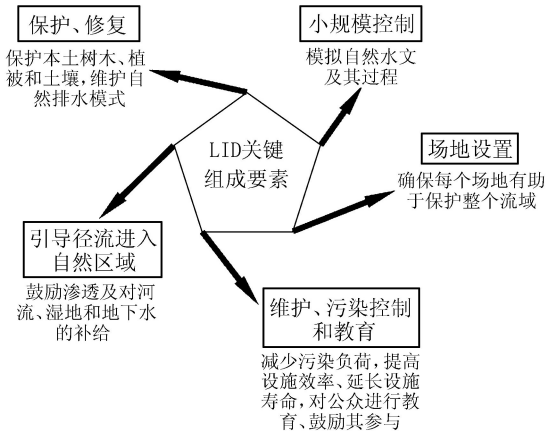


图1 LID关键组成要素^[9]

“百湖”之称的武汉市湖泊退化,2010年武汉市水务局的调查数据显示,近几十年来武汉的湖泊面积减少了228.9 km²,50年来近100个湖泊人间“蒸发”,中心城区仅存的38个湖泊,还面临着继续被侵蚀的危险;④城市人群疾病多发。水污染、废气和雾霾等环境问题凸显,人口膨胀、交通拥堵、住房紧张等,引发市民身心疾病,加剧城市负担,制约城市发展。

国家关于推进海绵城市建设的部署,为彻底改变我国城市建设工作提供了战略性的发展机遇。但是,我国海绵城市建设过程中存在许多挑战性的问题:①一些地方对海绵城市缺乏科学的认识,在没有进行合理规划设计之前就盲目施工建设;②海绵城市建设的核心是水问题,但是海绵城市建设规划、设计、施工、监控与管理过程中缺少以水文学为核心的海绵城市规划建设团队与实体;缺乏涉水的海绵城市建设与管理基础监控系统与体系;缺乏针对海绵城市的“水与气候”、“水与环境”、“水与生态”、“水与社会”联系的城市综合水系统及其交叉学科的先进科研技术支撑,目前存在一系列技术障碍;缺乏必要的海绵城市建设的后评估管理体系和制度建设;③我国海绵城市建设存在“大上快干、急于求成”而实效并不理想等诸多问题。如,2016年南方城市遭受大暴雨,城市洪涝灾害严重,给中国的海绵城市建设带来严峻的挑战。

笔者的观点是:国外的LID等好的经验的确要学,但是要考虑中国独特的自然条件(中国季风气候)和城市经济建设发展现状。如何对症下药,真正解决中国的城市水问题,需要认真思考,科学研究,科学开展城市规划,进行科学管理与正确决策。

3 海绵城市建设的水系统概念

海绵城市建设的核心是一个复杂水系统问题,

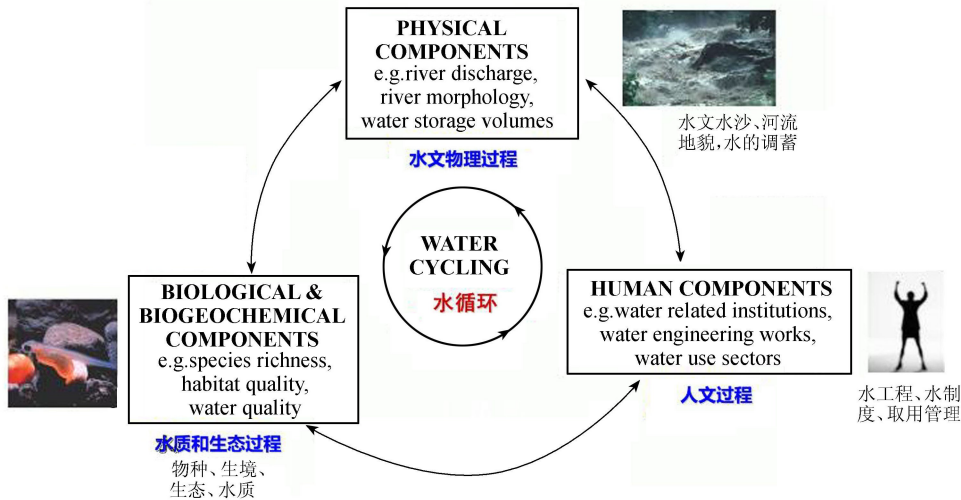


图3 水循环联系的三大过程和水系统^[12]

基本概念是以水循环为纽带,联系降雨-径流物理过程,以水环境水生态表征的生物地球生物化学过程和以城市建设高强度人类活动为特点的人文过程相互作用和反馈的复杂系统^[12](图3)。

国际上全球水系统科学(GWSP)发展前沿^[12]: ①强调水循环联系的三大过程观测与机理研究,揭示水系统演变规律;②强调水循环联系的三大过程作用-反馈的水系统“耦合-解耦”模型研究,认识三大过程的相互作用关系;③强调水系统关键的“调控”,为变化环境下的城市建设与综合治理提供科学支持。

变化环境下的水系统科学涉及“水与气候”、“水与环境”、“水与生态”、“水与社会”多个方面的综合问题^[13],其核心是水文学。因此,我国海绵城市建设的水系统科学基础系统包括城市水文学(城市暴雨洪水-径流形成、径流总量控制率),城市水生态(生态水文、绿地、湿地、河湖),城市水环境(环境水文、面源、水污染控制),海绵城市水系统规划(水量、水质、水环境调控的工程措施和非工程措施,以及海绵城市建设监测与监控,海绵城市建设后评估与管理等)。这是海绵城市建设新的需求。武汉市海绵城市建设的水系统需求为:①需要强调整体水系统规划;②需要建设有效的水系统监测与监控体系;③需要发展基于水与气候、水与环境、水与生态、水与社会相互联系与反馈的城市水系统模型与调控/管理平台;④需要推动海绵城市建设的产业结构调整,海绵城市建设的体制、制度改革,社会伦理教育和公众服务体系。

4 海绵城市建设的水文学问题

国务院办公厅2015年10月印发指导意见,指

出海绵城市建设总体要求为“通过综合采取‘渗、滞、蓄、净、用、排’等措施,最大限度地减少城市开发建设对生态环境的影响,将70%的降雨就地消纳和利用。到2020年,城市建成区20%以上的面积达到目标要求;到2030年,城市建成区80%以上的面积达到目标要求。”2016年3月住房和城乡建设部发出“关于印发海绵城市专项规划暂行规定”的通知,其中第十三条明确了海绵城市建设目标(主要为雨水年径流总量控制率)和具体指标,明确近、远期要达到海绵城市要求的面积和比例,参照《海绵城市建设绩效评价与考核办法(试行)》提出海绵城市建设的指标体系。关于年径流总量控制率定义,《指南》指出,年径流总量控制率指按30年日降雨量排序,占总量70%的年均总量对应的20~30mm的中小降雨事件。目前海绵城市建设主要集中在小区尺度上的LID项目上。

4.1 年径流总量控制率

年径流总量控制率是海绵城市建设中一个最基础的水文学问题。2016年住房和城乡建设部提出的《指南》定义年径流总量控制率为:根据多年日降雨量统计数据计算,通过自然和人工强化的渗透、储存、蒸发(腾)等方式,场地内累计全年得到控制(不外排)的雨量占全年总降雨量的百分比。

《指南》中提出的年径流总量控制率计算方法介于美国的径流总量算法和降雨场次百分点之间。《指南》提出:“选取至少近30年(反映长期的降雨规律和近年气候的变化)日降雨(不包括降雪)资料,扣除小于等于2mm降雨事件的降雨量,将降雨量日值由小到大进行排序,统计小于某一降雨量的降雨总量(小于该降雨量的,按真实雨量计算出降雨总量;大于该降雨量的,按该降雨量计算出降雨

总量,两者累计总和)在总降雨量中的比例,此比例(即年径流总量控制率)对应的降雨量(日值)即为设计降雨量”。由此可见,海绵城市建设中的关键指标之一为年径流总量控制率,实际上是年降水总量控制率。上海某设计院依据《指南》的计算方法,得到了控制径流的雨量占全年全部雨量的百分比。年径流总量控制率计算公式为

$$\text{年径流总量控制率}(\%) = \frac{\text{年雨水入渗量}(\text{m}^3) + \text{年雨水滞留量}(\text{m}^3)}{\text{全年全部雨量}(\text{m}^3)} \times 100\% \quad (1)$$

为了解目前《指南》中提出的年径流总量控制率的概念是否合理以及如何改进和科学计算,首先应该理解以下几个关键的基础问题:①城市径流形成原理;②城市的径流系数分析;③如何科学测算一个城市的年径流总量;④如何科学计算城市的年径流总量控制率。

4.2 径流的形成与转化

降雨在集雨区(流域或城市)形成径流的过程称为径流形成与转化,包括产生多少径流的产流及其运动汇流等复杂流域或城市的水文过程(图4)。降水产生径流量级的大小称为水文系统增益因子G,在水文学有个专有名词,即径流系数。

4.2.1 径流系数 α

径流系数 α 为一定汇水面积内总径流量 Y (mm)与降水量 X (mm)的比值,它说明降水量中有多少水变成了径流,综合反映了流域内自然地理要素对径流的影响。其计算公式为 $\alpha = Y/X$ 。降水量中的其余部分水量则损耗于植物截留、填洼、入渗和蒸发。

径流系数是城市雨洪控制利用系统中的一个重要参数,在雨洪控制利用系统的理论研究、规划、设计计算中应用广泛。径流系数的选择合适与否,对

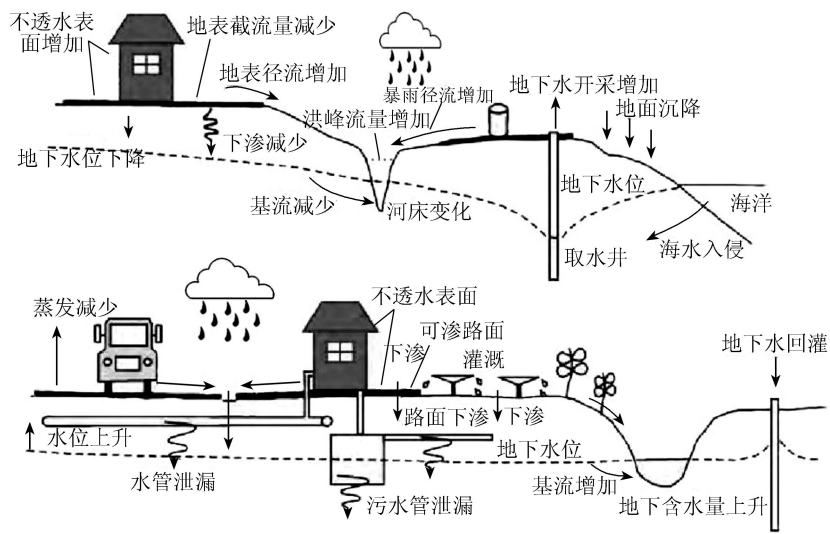


图4 城市水循环示意图^[14]

整个排水系统的排水能力和工程造价有重要影响。然而,目前径流系数的计算基本以线性理论为基础。

4.2.2 径流系数的非线性问题研究

从系统水文学的观点,径流系数亦称为水文系统的增益(gain factor)。在总径流线性系统模型,或简单线性模型(simple linear model, SLM)中,增益因子 G 被假定为一个常数(式(2)),表示流域多年平均径流系数的概念(图5)。然而,许多流域的观测数据表明,系统增益是时变的,并且和流域湿度成正比,如前期降雨量指数,实际蒸散发和降雨的比值^[15-16]。

$$G = \int h(\tau) d\tau = \frac{\int y(t) dt}{\int x(t) dt} \quad (2)$$

系统增益 $G(t)$ 的水文概念为流域的产流系数($0 \leq G(t) \leq 1.0$)。夏军^[17]通过对全球不同气候区域的60多个流域的降雨径流海量数据资料,辨识了降水、土壤湿度等关键性控制因素的时变与非线性特性。由于这些高度非线性,导致了降雨形成径流的系统增益并非定常和平均态。进一步研究发现了径流形成的增益因子 $G(t)$ 与土壤湿度 $A_{PI}(t)$ 、降雨强度 $P(t)$ 和下垫面组合的时变非线性指数规律。如果缺乏土壤湿度资料,流域土壤前期影响雨量是一个较理想的替代指标。如图6所示,水文时变增益因子 $G(t)$ 与流域土壤前期影响雨量(土壤湿度) $A_{PI}(t)$ 之间的非线性关系可以表达为

$$G(t) = \alpha' A_{PI} \{t, P(t)\}^\beta \quad (3)$$

式中: α' 、 β 分别为下垫面参数。

进一步提出了径流计算的新方法与时变增益模型(time variant gain model, TVGM),同样将降雨-径流之间的转化过程分为流域产流模块和汇流模块两部分。在产流模块中,有效净雨 R 表达为毛雨 P 和系统增益 G 之积,计算公式为

$$R(t) = G(t)P(t) = \alpha' A_{PI}(t)^\beta P(t) \quad (4)$$

基于时变增益非线性产流机理:

$$R(t) = G(t)p(t) = \alpha' A_{PI}(t)^\beta p(t) \approx [g_1 + g_2 A_{PI}(t)]p(t) \quad (5)$$

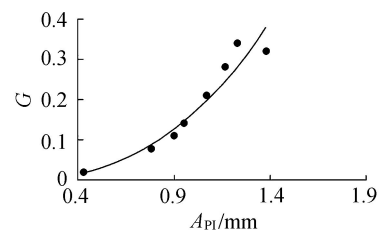


图6 增益因子与土壤湿度的非线性关系

即使流域汇流采用线性响应函数模型 $Y(t) = \int_0^m U(\tau)R(t-\tau) d\tau$, 可以从理论上导出与普适性 Volterra 非线性响应函数式同构的具有物理机制的适用解,过程如下:

$$\begin{aligned} Y(t) &= \int U(t-\tau)[g_1 p(\tau) + g_2 A_{PI}(\tau)p(\tau)] d\tau = \\ &= \int g_1 U(t-\tau)p(\tau) d\tau + \int g_2 U(t-\tau)A_{PI}(\tau)p(\tau) d\tau = \\ &= \int h_1(t-\tau)p(\tau) d\tau + \iint h_2(t-\sigma, t-\tau)p(\sigma)p(\tau) d\tau d\sigma \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $h_1(\tau) = g_1 U(\tau)$, g_1 为流域下垫面相关的线性产流参数, $U(\tau)$ 为流域汇流函数; $h_2(\sigma, \tau) = g_2 U_0(\sigma)U(\tau)$, g_2 为流域下垫面相关的非线性产流参数, $U_0(\sigma) = \exp(-\sigma/K_e)/K_e$, 为与流域土壤水力特性、蒸发相关的参数, τ 和 σ 分别为时间积分变量。

该方面研究的意义和价值是,从理论上解释了径流非线性响应与土壤湿度(A_{PI})、下垫面相关参数(g_1 、 g_2 、 K_e)、降雨强度等之间的内在联系,揭示了复杂关系中能够找到一个简单关系的非线性产流机理,非线性系统能更准确描述降雨-径流形成关系,径流系数为定常的线性系统理论,只是其一阶特例。时变增益模型中关于径流计算新方法,解决了水文线性理论中假定产流增益为常数和为平均态的问题^[17]。

海绵城市建设中需要建立与径流系数及其非线性特性联系的年径流总量控制率的新的计算方法。

4.3 城市化水文效应——对 LID 作用和“看海”问题的认识

任何一个城市都是在原来自然流域/区域/水系

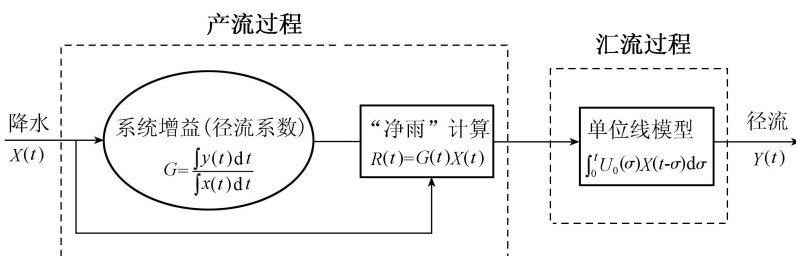


图5 总径流水文线性模型(SLM)与系统增益因子概念示意

的基础上,经历城市不同阶段建设发展起来的。LID 以及我国海绵城市建设的核心理念,是尽可能去城市化的水文效应,回归或等价回归到自然状态^[11]。鉴于当前和未来我国海绵城市建设的热潮,以及面临的严峻“城市看海”困境,对 LID 的作用和“城市看海”的本质的认识亟待深化。

4.3.1 自然条件下区域水文平衡关系与径流系数 α_0

自然条件下,区域蓄水量变化与年降水量、年径流量、年蒸发量的关系如下:

$$\Delta S_0 = P_0 - R_0 - E_0 \quad (7)$$

$$R_0 = P_0 - (E_0 + \Delta S_0) \quad (8)$$

$$\text{其中 } \Delta S_0 = \Delta S_{10} + \Delta S_{20} + \Delta S_{30} + \Delta S_{40} \quad (9)$$

式中: P_0 为年降水量; R_0 为年径流量; E_0 为年蒸发量; ΔS_0 为蓄水量变化; ΔS_{10} 为陆面土壤渗蓄水量变化; ΔS_{20} 为陆面塘堰蓄水量变化; ΔS_{30} 为陆面河湖蓄水量变化; ΔS_{40} 为陆面湿地蓄水量变化。

径流系数 α_0 表示为

$$\alpha_0 = \frac{R_0}{P_0} = 1 - \frac{E_0 + \Delta S_0}{P_0} \quad (10)$$

比较式(1)和式(10)发现,现行的海绵城市年径流总量控制率未考虑陆地蒸散发,雨水滞蓄量只有 LID 概念的雨水入下渗量和年滞蓄量,缺少河湖调蓄量等。

4.3.2 城市化条件下区域水文平衡关系及其蒸散发和蓄水量的变化

城市化条件下,水文平衡关系以及蒸散发和蓄水量的变化分别用式(11)和(12)所示:

$$\Delta S = P'_0 - R_1 - E_1 \quad (11)$$

$$E_1 = E_0 - \Delta E \quad (12)$$

式中: P'_0 为城市化后年降水量; R_1 为城市化后年径流量; E_1 为城市化后年蒸发量; ΔE 为城市化后年蒸发减少量。因此,城市化条件下蓄水量变化 ΔS 则可表示为

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 \quad (13)$$

式中: $\Delta S_1 = \Delta S_{10} - d_1$, $\Delta S_2 = \Delta S_{20} - d_2$, $\Delta S_3 = \Delta S_{30} - d_3$, $\Delta S_4 = \Delta S_{40} - d_4$, 其中 d_1, d_2, d_3, d_4 分别为城市化后土壤渗蓄、塘堰蓄水、河湖蓄水、湿地蓄水减少量。城市化雨水积蓄总减少量 D 则可表示为

$$D = d_1 + d_2 + d_3 + d_4 \quad (14)$$

4.3.3 城市化条件下径流量 R_1 与径流系数 α_1

$$\begin{aligned} R_1 &= P_0 - (E_0 - \Delta E + \Delta S) = \\ &P_0 - (E_0 - \Delta E + \Delta S_0 - D) = \\ &P_0 - (E_0 + \Delta S_0) + (\Delta E + D) \end{aligned} \quad (15)$$

因此,径流系数 α_1 则为

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{P_0} = 1 - \frac{(E_0 + \Delta S_0)}{P_0} + \frac{(\Delta E + D)}{P_0} =$$

$$1 - \frac{[E_0 + \Delta S_0 - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \Delta E)]}{P_0} = \alpha_0 + \frac{(d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \Delta E)}{P_0} \quad (16)$$

从式(16)中可以发现,城市化后与城市化前径流系数存在一定的关系。再次比较式(1)与(16),可知现行海绵城市建设 LID 措施的年径流总量控制率和面向城市化问题的海绵城市建设年径流总量控制率 $M(\%)$ 关系式可以表达为

$$M = \frac{[E_0 + \Delta S_0 - (d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \Delta E)]}{P_0} \quad (17)$$

海绵城市建设目标是通过工程/非工程措施将由于城市化的年雨水土壤入渗量、塘堰雨水滞蓄量、河湖调蓄水量、湿地蓄水量尽可能恢复到自然状态,即 4 个部分下渗和蓄水减少量趋于 0,即 $d_1 \rightarrow 0$, $d_2 \rightarrow 0$, $d_3 \rightarrow 0$, $d_4 \rightarrow 0$ 且 $\Delta E = 0$ 。

$$\alpha_1 \rightarrow \alpha_0 + \min\left(\frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4 + \Delta E}{P_0}\right) \quad (18)$$

由于我国南方、北方的地理与气候条件不同,自然条件下的降雨-径流关系与特性也不一样,因此,海绵城市建设的年径流总量控制率也不能要求一样。变化环境下的海绵城市建设尚不能够彻底告别“城市看海”。

4.3.4 如何减少“城市看海”问题

从水文学的观点和分析,不难看出几个基本途径:

a. 尽可能消除城市化建设带来的不利水文效应。通过工程/非工程措施将城市年雨水土壤入渗量、塘堰雨水滞蓄量、河湖和湿地调蓄量尽可能恢复到自然状态,即: $d_1 \rightarrow 0$, $d_2 \rightarrow 0$, $d_3 \rightarrow 0$, $d_4 \rightarrow 0$ 且 $\Delta E = 0$ 。

b. 客观评估城市基础设施能够抗御洪涝灾害的能力。城市化后最大蓄水总量等于 LID 措施下的下渗雨量、水塘、河湖、湿地的蓄水量之和,即,

$$\Delta S_{\max} = \Delta S_{1\max} + \Delta S_{2\max} + \Delta S_{3\max} + \Delta S_{4\max} \quad (19)$$

当发生超标准大暴雨时,城市的实际产水量近似估计为

$$S_r = p_T T_p A \psi \quad (20)$$

式中: S_r 为实际产水量; p_T 为超标准暴雨, mm/h; T_p 为暴雨历时; A 为暴雨面积; ψ 为折算系数。当城市的 $S_r \geq \Delta S_{\max}$ 且内涝外排能力 $S_d \leq (S_r - \Delta S_{\max})$ 时,城市将发生洪涝灾害风险。因此,当出现超标准暴雨洪水,城市出现“看海”就成为必然,海绵城市建设应有风险管理意识。提高城市的 ΔS_{\max} 需要科学做好海绵城市规划,包括全方位监测与监控系统;雨污分流,河湖联通,修复湿地,恢复洼地,建设源头 LID,建设分散性大型蓄水深隧、多用洼地等工程措

施;暴雨内涝预警预报,科学调度与管理,建设后评估与跟踪系统等非工程措施;绿色城市的发展体制建设与制度创新等。

5 结论与建议

我国海绵城市建设正处于起步阶段,尽管取得了有目共睹的成效,但是在海绵城市建设与规划的水文学基础方面,存在许多薄弱环节亟待改进。

a. 海绵城市建设的水文学理论需要更新,需发展和应用时变非线性变径流系数的方法。径流系数是城市雨洪控制利用系统中的一个重要参数,在雨洪控制利用、规划、设计计算中应用广泛。径流系数选择的合适与否,对整个排水系统的排水能力和工程造价有重要影响。目前需要探讨的是,现行依据的径流系数设计城市排水基本属于线性和定常径流系数的理论范畴。

b. 雨水滞蓄量不仅需要考虑河湖水系调蓄量,也需要考虑陆地蒸散发。年径流总量控制率是海绵城市规划和建设考核最重要和最基本的指标,现行的海绵城市年径流总量控制率计算框架存在需要改进的地方,即要分开自然条件和城市化后的蓄水量变化的差别。

c. 海绵城市建设的本质追求是构建良性的城市水循环体系,而非碎片化的人造景观。

d. 海绵城市需以问题为导向而非以指标为导向,现阶段要缓解的突出问题是“城市看海”与“水体黑臭”,同时,避免新的开发过程对城市水安全构成更大压力。

e. LID 以及我国海绵城市建设的核心理念,是尽可能去城市化的水文效应,回归或等价回归到自然状态。笔者提出了海绵城市建设 LID 措施的年径流总量控制率关系和面向城市化问题的海绵城市年径流总量最大控制率(%)的计算方法。

f. 我国海绵城市建设要有风险管理意识。尽管国家年年投资“海绵城市”建设,但是由于气候变化和人类活动影响,当暴雨超出“海绵”承载能力时,“城市看海”将成为必然。为此需在流域、城市与社区多个尺度上进行海绵城市统筹规划,首先,城市内的海绵功能(LID 调节与河湖库洼调蓄的结合)与城市外流域“海绵”调节功能的有机结合,纳入到社会经济发展的多尺度水系统范畴统一规划与建设;其次,海绵城市建设要有风险管理意识与应对机制,其推进模式是指标的逐步完善与提高,而不是高标准建成区的逐步扩大;最后,海绵城市建设是城建、水务、环保等相关部门间的协同运作、良性互动,而非各自为政。

笔者针对以上几个关键问题提出未来我国海绵城市建设的建议:

a. 统筹规划和重复利用已有的部门资源,建设好多部门协调和有效的遥感、空中、地面、地下为一体的监测监控系统;

b. 重视水文学在海绵城市建设的应用。城建部门应多吸收水文、水利、环保与生态领域专家,发展城市水系统模型与调控/管理平台;

c. 加强海绵城市建设的科学技术创新与支撑,核心是抓好以水循环为核心的海绵城市建设,研究城市防洪安全、供水安全、水质安全、水生态安全等关键的科学技术问题,通过科技创新,全面提升海绵城市水安全的功能与保障能力。

参考文献:

- [1] KAHN M E. Climapolis: how our cities will thrive in the hotter future [M]. New York: Basic Books, 2010.
- [2] 王虹,丁留谦,程晓陶,等. 美国城市雨洪管理水文控制指标体系及其借鉴意义 [J]. 水利学报, 2015, 46(11):1261-1271. (WANG Hong, DING Liuqian, CHEN Xiaotao, et al. Hydrologic control criteria framework in the United States and its referential significance to China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(11): 1261-1271. (in Chinese))
- [3] 车伍,赵杨,李俊奇. 海绵城市建设热潮下的冷思考 [J]. 南方建筑, 2015(4):104-107. (CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi. Considerations and discussions about sponge city [J]. South Architecture, 2015(4):104-107. (in Chinese))
- [4] United States Environmental Protection Agency. Low impact development (LID): a literature review [R]. Washington D C:Office of Water, USEPA, 2000.
- [5] ELLIS J B, SHUTES R B E, REVITT M D. Constructed wetlands and links with sustainable drainage systems [M]. London: Urban Pollution Research Centre, Middlesex University, 2003.
- [6] THOMAS N, ANDREW J R. Stormwater Management [M]. 2nd ed. Boca Raton: Lewis Publishers, 2002.
- [7] 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))
- [8] 车伍,赵杨,李俊奇,等. 海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标 [J]. 中国给水排水, 2015(8):1-5. (CHE Wu, ZHAO Yang, LI Junqi, et al. Explanation of sponge city development technical guide: basic concepts

- and comprehensive goals [J]. China Water & Wastewater, 2015 (8):1-5. (in Chinese))
- [9] 马震. 我国城市雨洪控制利用规划研究 [D]. 北京:北京建筑工程学院, 2010.
- [10] Victorian Stormwater Committee. Urban stormwater-best practice environmental management guidelines [M]. Canberra: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), 1999.
- [11] 住房与城乡建设部. 海面城市建设指南:低影响开发雨水系统构建(试行) [M]. 北京:住房与城乡建设部, 2014.
- [12] 夏军. 我国水资源管理与水系统科学发展的机遇与挑战[J]. 沈阳农业大学学报(社会科学版), 2011, 13(4):394-398. (XIA Jun. Opportunity and challenge: management of water resources and science of water system in China [J]. Journal of Shenyang Agricultural University (Social Science), 2011, 13(4):394-398. (in Chinese))
- [13] 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. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3):292-301. (in Chinese))
- [14] 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. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I: hydrological response to urbanization [J]. Advance in Water Science, 2014, 25(4):594-605. (in Chinese))
- [15] XIA J. Identification of a constrained nonlinear hydrological system described by Volterra Functional Series [J]. Water Resources Research, 1991, 27(9):2415-2420.
- [16] XIA J, O'CONNOR K M, KACHROO R K, et al. A non-linear Perturbation model considering catchment wetness and its application in river flow forecasting [J]. Journal of Hydrology, 1997, 200:164-178.
- [17] 夏军. 水文非线性系统理论与方法 [M]. 武汉:武汉大学出版社, 2002.
- (收稿日期:2016-10-19 编辑:彭桃英)

· 信息播报 ·

自愈式 U 形渠技术体系通过专家评审

日前,水利部科技推广中心组织专家在北京对北京中农精准科技有限公司研发的自愈式 U 形渠技术体系实施方案进行评审。专家们一致认为自愈式 U 形渠构件在结构上采用多层复合防护,用于农田水利和节水工程建设,其一体化设计解决了末端渠系渗漏问题,能有效节水,具有重量轻、糙率低、耐久性好、施工快捷、维护简便等优点。

自愈式 U 形渠系列技术主要利用全渠系无渗漏设计、采用天空地信息采集系统按需供水、尾水处理循环利用等系列技术,使稻区灌溉节水 50%,有利于改变种植结构,增加水稻种植面积,是节水增粮新途径。自愈式 U 形渠产品改变传统混凝土结构,采用多种材料复合而成,其特点有:重量轻,是传统混凝土 U 形槽重量的 5%,非常便于田间搬运和安装;施工速度快,自愈式 U 形渠每节标准长度是 4m、6m 和 8m,接头少能减少漏水,每 10 人每天可施工 6km,施工速度是传统混凝土 U 形槽的 10 倍以上;维修和维护成本低,自愈式复合 U 形渠采用非固态高分子材料,一旦受到损坏可立刻自动愈合,从而减少维修和维护成本,解决了混凝土 U 形槽无任何自我修复能力而导致水大量流失的难题;特别适应高寒区的冻胀土地地区,自愈式复合 U 形渠构件物采用聚氨酯发泡和高分子弹性材料加工而成,耐高低温,无含水率,不存在冻胀问题,特别适应高寒区的冻胀土;即装即用,自愈式 U 形渠产品工厂化生产,不受灌区灌溉季节和农作物生长影响,在灌溉间隙时间即可安装,并且即装即用,打破了传统混凝土 7d 初凝,28d 强度稳定的局限性;不存在漏水现象,自愈式 U 形渠单节长度 4m 以上,本身接头少,同时采用工厂工艺在现场连接,充分发挥了合成橡胶具有的普通橡胶 20 倍延伸率和高恢复力的优点,确保任何接头处不存在漏水现象。

自愈式 U 形渠技术体系能够发挥长效稻田节水灌溉技术和渠系衬砌输配水技术,可提高水资源利用效率,缓解区域水资源分配矛盾,其应用可显著提高经济、社会和生态效益,具有广阔的推广前景。

(程卫国 供稿)