

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.06.008

气候变化对珠三角地区典型城区流域排水系统的影响

张瀚^{1,2}, 邱静¹, 黄本胜¹, 杨志峰², 蔡宴朋²

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广东 广州 510006)

摘要:以珠三角地区广州市典型城区流域东濠涌流域为研究区,采用 Delta 方法和年最大值法相结合推求未来时期东濠涌流域短历时暴雨强度公式,基于 InfoWorks ICM 构建一二维耦合的东濠涌流域城市雨洪模型,定量评估气候变化对排水系统的影响。结果表明:在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下,未来时期降雨强度峰值以及累积降水量均呈增加的变化趋势,城市排水系统节点溢流量、超载管道比例和淹没深度增大,给排水系统带来更为严重的影响。这一结果表明未来时期珠三角地区可能遭受更为不利的洪涝风险灾害。

关键词:城区流域;城市内涝;排水系统;气候变化;RCPs 情景;短历时暴雨;InfoWorks ICM 模型
中图分类号:TV122;TU992 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)06-0056-08

Impact of climate change on drainage system of typical urban watershed in Pearl River Delta//ZHANG Han^{1,2}, QIU Jing¹, HUANG Bensheng¹, YANG Zhifeng², CAI Yanpeng² (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Institute of Environmental & Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Taking the Donghaochong Watershed in the typical urban area of Guangzhou City in the Pearl River Delta as the study area, the formula for short-duration rainstorm intensity in the Donghaochong Watershed in the future was derived by combining the Delta method and the annual maximum method. Based on InfoWorks ICM, a one- and two-dimensional coupled urban storm flood model of Donghaochong Watershed was constructed to quantitatively assess the impact of climate change on the drainage system. The results show that under the scenarios of RCP4.5 and RCP8.5, the peak rainfall intensity and the cumulative rainfall in the future will increase. The increases of node overflow, proportion of overloaded pipes and submergence depth of urban drainage system will bring more serious impact to the drainage system. This result indicates that the Pearl River Delta region may suffer more unfavorable flood risk disasters in the future.

Key words: urban watershed; urban waterlogging; drainage system; climate change; RCP scenarios; short-duration rainstorm; InfoWorks ICM model

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告第一工作组报告指出,随着进一步的全球变暖,每个地区都将在气候影响驱动下经历更加频繁的变化,例如暴雨会导致城市、道路、农田、地铁隧道和建筑物遭受洪涝灾害,城市交通和雨水排水系统被淹没,给城市适应能力带来更大的挑战^[1]。

城市雨水排水系统是维护城市正常运行的重要基础设施,作为城市区域径流输送的主要方式,一旦降雨强度超过城市雨水排水系统的设计标准,便可能会造成洪涝灾害。中国现行的排水系统通常被设

计为在某一设计暴雨下表现良好,设计暴雨通过对历史降雨进行统计推求后得出,一般总结为强度-历时-频率(intensity-duration-frequency, IDF)曲线或者暴雨强度公式的形式。在市政工程设计中,通常认为设计暴雨服从一致性假设,即在工程使用期间是不变的。气候变化增加了城市地区极端降雨的频率和强度,改变了设计降雨的一致性假设,这将会增加城市地区洪涝灾害的发生频率,带来更为严重的洪涝灾害^[2-3]。因此,研究气候变化条件下,城市极端降雨对排水系统的影响就变得越发迫切^[4-6]。

水文水动力学模型是目前广泛使用的研究洪涝

过程的工具,建立适应城市地区的一二维耦合模型是当今城市内涝风险评估的重要一环^[7-9]。InfoWorks ICM 模型作为优越的城市雨洪模型,在城市内涝模拟中得到了较为广泛的应用^[10-11],罗海婉等^[12]基于 InfoWorks ICM 模型构建了广州市暴雨内涝模型,研究不同降雨条件下城市淹没面积、淹没水深和灾害风险的变化情况;程涛等^[13]基于高分辨率地表数据和 InfoWorks ICM 建立了适用于济南市海绵城市示范区的城市雨洪模型,精细化描述研究区域的洪涝过程;叶陈雷等^[14]以福州市江北城区及东北部山区为例,基于 InfoWorks 在城市尺度下建立水文水动力学耦合模型,提出了考虑水工建筑物及其调度规则的城市暴雨内涝模拟方法。尽管近年来已有不少学者对城市内涝问题进行了相关研究,但对于气候变化对城市区域暴雨和排水系统影响的研究仍然较少^[15-18]。一方面,由于城区地表的高不透水性和排水系统的布设会带给城区特有的区域特性,这要求气候变化的影响研究往往需要聚焦于更小的空间尺度(通常 1~10 km²)和更精细的时间尺度(通常小于 1 h);另一方面,由于对气候系统中复杂的非线性成分认识和描述的不足,对局部区域暴雨事件的描述和预估往往存在着很大的不确定性。

本文选取珠三角地区广州市典型城区流域东濠涌流域为研究区,利用区域气候模式预估未来时期(2030—2050 年)输出的年最大 1 d 降雨,结合 Delta 方法和年最大值法推求气候变化情景下典型城市流域短历时暴雨强度公式,利用 Infoworks ICM 城市雨洪模型分析未来时期城市排水系统承受的压力,研究气候变化可能对城市区域暴雨和排水系统带来的影响,以期对未来城市规划、城市防灾减灾、城市水资源规划管理的科学决策提供依据。

1 研究区概况

东濠涌流域位于广州市越秀区,地势北高南低,海拔高程在 6~40 m 之间,多年平均降水量约 1720 mm,降雨主要集中在 6—8 月,流域面积约 12.39 km²。流域主要水系包括东濠涌和新河涌,其中东濠涌是珠江前航道广州段的重要支流之一,发源于白云山南部山下的麓湖,流经越秀区,在江湾大酒店旁汇入珠江前航道,河段全长约 5 km^[12]。

构建城市洪涝仿真模型需要的资料主要包括管网、DEM 数据、土地利用类型和河道断面等基础资料,率定与验证模型主要需要雨量站数据、检查井水位监测数据和调研淹没水深等^[12]。研究区域雨量站、水位监测点和典型内涝点的分布如图 1 所示。

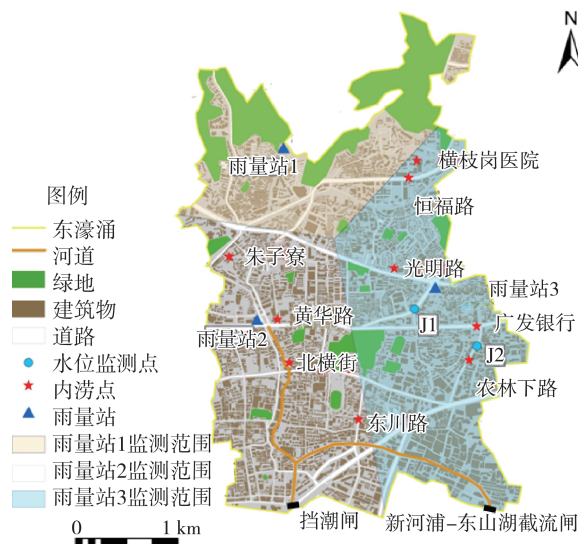


图 1 东濠涌流域位置及典型内涝点

Fig.1 Location of the Donghaochong Watershed and typical waterlogging points

2 研究方法

2.1 未来短历时降雨情景预估

城市设计暴雨是城市室外排水工程设计的重要依据,关系到工程的安全性和经济性,2000 年以来,我国城市建设环境发生了较大变化,加之气候变化对城市降雨特性产生了较大影响,为此本文按照一般的城市设计暴雨制定方法,在气候变化条件下推求未来设计暴雨^[19-21]。

2.1.1 区域气候模式

采用国际理论物理中心发布的区域气候模式 RegCM4.6,该模式对中国区域的模拟能力较好^[22-23]。RegCM4.6 运行所需要的驱动场采用 CMIP5 模式 GFDL-ESM2M 的历史时期(RF)、RCP4.5 和 RCP8.5 情景。模式水平分辨率为 20 km,垂直方向分为 18 层,模拟时间步长为 45 s。历史时期(RF)模拟时间为 1979—2000 年,未来时期模拟时间为 2029—2050 年,模拟第一年为模式预热,不参与后续分析。模式参数化方案采用 NCAR CCM3 辐射传输方案、Grell 积云参数化方案、BAT1e 陆面参数化方案、Holtslag 非局部边界方案、Zeng 海洋通量参数化方案、指数松弛边界条件。

2.1.2 年最大值法

根据 GB 50014—2021《室外排水设计标准》暴雨强度公式编制方法的要求,暴雨强度公式编制采用年最大值法的基础资料年限至少为 20 a,有条件的地区可用到 30 a 以上系列^[24]。本研究采用广州市五山站 1984—2013 年的降水量数据,按照年最大值法,选取 5 min、10 min、15 min、20 min、30 min、

45 min、60 min、90 min、120 min 共 9 个历时作为有效暴雨资料样本,样本数据按从大到小的顺序依次排列,计算每个历时的降雨强度,推求暴雨强度公式。

2.1.3 Delta 方法

Delta 方法是美国全球变化研究计划推荐使用的未来气候变化情景生成方法^[2]。基本原理是首先计算未来情景下预估的降雨相对于基准期情景的改变,通常称为改变因子 (change factor, CF),然后将得到的 CF 叠加到区域观测的降雨序列上,得到区域未来降雨的预估值。CF 和未来降雨的预估值计算公式为

$$P_{Sk} = P_{Ok} C \tag{1}$$

其中 $C = \overline{P_s} / \overline{P_b}$ 式中: C 为改变因子值; $\overline{P_s}$ 、 $\overline{P_b}$ 分别为在指定的时间尺度下 GCM 基准期和预估期降水量的平均值; P_{Sk} 为区域尺度降水量的第 k 个预估值; P_{Ok} 为指定时间尺度下降水量的第 k 个观测值。

根据区域气候模式动力降尺度输出历史时期与未来时期的年最大 1d 降水量结果,分别根据式(1)计算 RCP4.5 与 RCP8.5 情景下的 CF,然后将 CF 值叠加在广州市 1984—2013 年的降水量数据上,得到未来时期降水量的预估值。

2.1.4 P-Ⅲ型分布模型

采用在水文频率计算中广泛应用的皮尔逊Ⅲ型曲线进行水文频率计算^[25],其密度函数为

$$f(x) = \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} (x - a_0)^{\alpha-1} e^{-\beta(x-a_0)} \tag{2}$$

其中 $\alpha = 4/C_s^2$ $\beta = 2/(\bar{x}C_vC_s)$
 $\alpha_0 = \bar{x}(1 - 2C_v/C_s)$ $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$

式中: α_0 为原点与系列起点的距离; $\bar{x}$ 为水文特征值的均值; C_v 为离差系数; C_s 为偏差系数。统计参数可以通过矩法进行确定。

在计算频率时,先由已知 C_s 通过查表得出不同频率 p 的离均系数 Φ_p 值,然后将 Φ_p 及已知的 $\bar{x}$ 、 C_v 带入式(3),即可求出对应于频率 p 的水文特征值 x_p :

$$x_p = \bar{x}(\Phi_p C_v + 1) \tag{3}$$

2.1.5 气候变化条件下暴雨公式参数求解及精度解析

GB50014—2021《室外排水设计标准》暴雨强度公式的编制方法规定,在一般强度的地方,平均绝对方差不宜大于 0.05 mm/min;在强度较大的地方,平均相对方差不宜大于 5%。根据年最大值法及皮尔逊Ⅲ型适线得到的雨强-历时-重现期 ($i-t-P$) 关系表,采用麦夸特优化算法进行非线性回归参数拟合,

得到各情景暴雨公式参数及误差值见表 1。皮尔逊Ⅲ型适线在历史时期 (RF) 和未来时期 RCP4.5、RCP8.5 情景下绝对均方差范围为 0.060 ~ 0.069 mm/min,相对均方差分别为 3.35%、3.55% 和 2.77%,均不超过 5%,总体拟合精度较好^[24]。

表 1 暴雨公式参数值及误差

Table 1 Parameter values and error of rainstorm formula

情景	A	C	b	n	$\sigma_1 /$ (mm · min ⁻¹)	$\sigma_2 / \%$
RF	27.726	0.443	19.721	0.771	0.060	3.35
RCP4.5	31.653	0.447	20.914	0.790	0.065	3.55
RCP8.5	33.283	0.484	18.059	0.759	0.069	2.77

注: A 为雨力参数, C 为雨力变动参数, b 为降水历时修正参数, n 为暴雨衰减指数, σ_1 为绝对均方差, σ_2 为相对均方差。

式(4)(5)(6)分别为 RF、RCP4.5 和 RCP8.5 情景下广州市暴雨强度公式。根据芝加哥雨型,雨峰系数采用 0.415,得到不同重现期下各情景设计暴雨过程见图 2。

$$i = \frac{4630.242(1 + 0.443\lg P)}{(t + 19.721)^{0.771}} \tag{4}$$

$$i = \frac{5286.051(1 + 0.447\lg P)}{(t + 20.914)^{0.790}} \tag{5}$$

$$i = \frac{5558.261(1 + 0.484\lg P)}{(t + 18.059)^{0.759}} \tag{6}$$

由图 2 可见, RCP4.5 情景相对于 RF 情景,不同重现期下降雨强度峰值均呈现出增加的趋势,增幅为 0.073 ~ 0.319 mm/min,累积降水量增加 4.37% ~ 9.19%。RCP8.5 情景相对于 RF 情景,降雨强度峰值在 20 a 重现期下增加 1.591 mm/min,累积降水量在 5 种重现期下增幅为 28.79% ~ 33.15%。结果表明,未来时期在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下短历时设计降雨强度和累积降水量均呈现出不同程度的增加趋势,这将直接给排水系统带来更大的压力,从而导致洪涝灾害损失更为严重。

2.2 城市洪涝仿真模型构建

2.2.1 一维管网构建

利用 InfoWorks ICM 城市雨洪模型构建东濠涌流域排水系统模型时,需要对节点和管道连接进行概化处理^[25]。一维模型主要包括检查井、蓄水池、出水口 3 种,其中窨井、拐点、雨水篦子等概化为检查井节点,湖泊和池塘概化为蓄水池,排水系统的末端出流口概化为出水口。模型概化后共得到 2997 个节点、3009 条管道和 38 个出水口,普通管道的曼宁系数设置为 0.013,河道曼宁系数设置为 0.03。

2.2.2 子汇水区划分

子汇水区通过泰森多边形法进行划分,并根据实际情况调整,共划分 2897 个子汇水区。产流表面

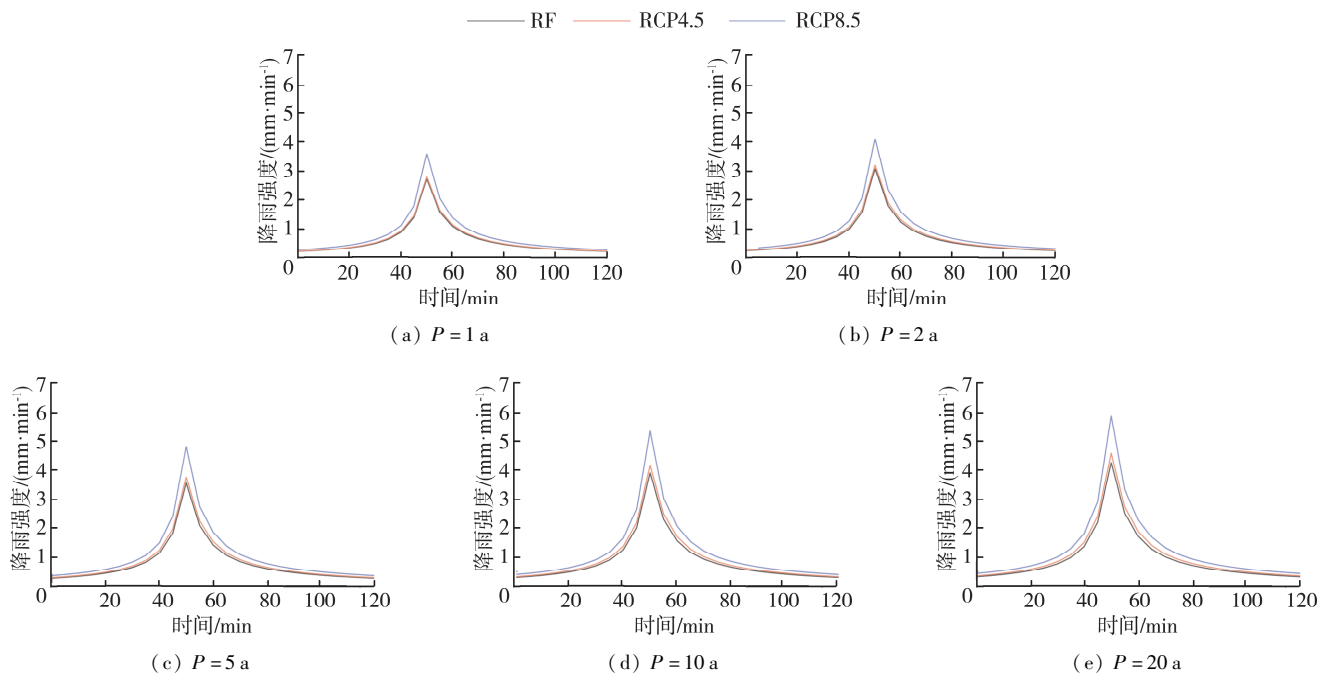


图2 不同重现期下各情景设计暴雨过程

Fig.2 Design rainstorm process of each scenario under different return periods

设定为房屋、道路和其他3种类型,不同类型产流表面相关属性参数参照文献[10]确定。

2.2.3 一二维模型耦合

东濠涌研究区域的一二维模型耦合涉及:
①管道与河道的耦合,InfoWorks ICM 河网模型与排水管网的耦合是将管道出水口移动至河道中心线;②管道与二维地面耦合,将处于2D区间内的节点洪水类型设置为2D,将道路的网格进行加密处理,道路高程下降15 cm,房屋不划分网格;③二维地面与河道的耦合,将2D区间和一维河道进行关联。

2.2.4 模型率定与验证

采用实测降雨数据、检查井水位和淹没数据进行模型的验证。两场实测暴雨的降雨过程见图3。

20170715 场次暴雨的降雨强度较小,调查没有造成大范围的淹没,而20170915 场次暴雨的降雨强度较大,产生的溢流节点较多,因此采用20170715 场次暴雨进行节点水位校核,20170915 场次暴雨进行地面淹没水深校核。

采用纳什效率系数 E_{NS} 对构建的东濠涌城市雨洪模型进行评价。图4为20170715 场次暴雨检查井水位模拟结果,可见J1检查井节点水位的 E_{NS} 为0.690,J2检查井节点水位的 E_{NS} 为0.728,均大于0.6。对于20170915 场次暴雨的地面淹没水深进行模型验证,结果见表2,可见涝点位置除黄华路误差稍大外,其余位置的实测水深和模拟水深较为一致,说明模型的精度和可靠性较好,能够用于后续研究。

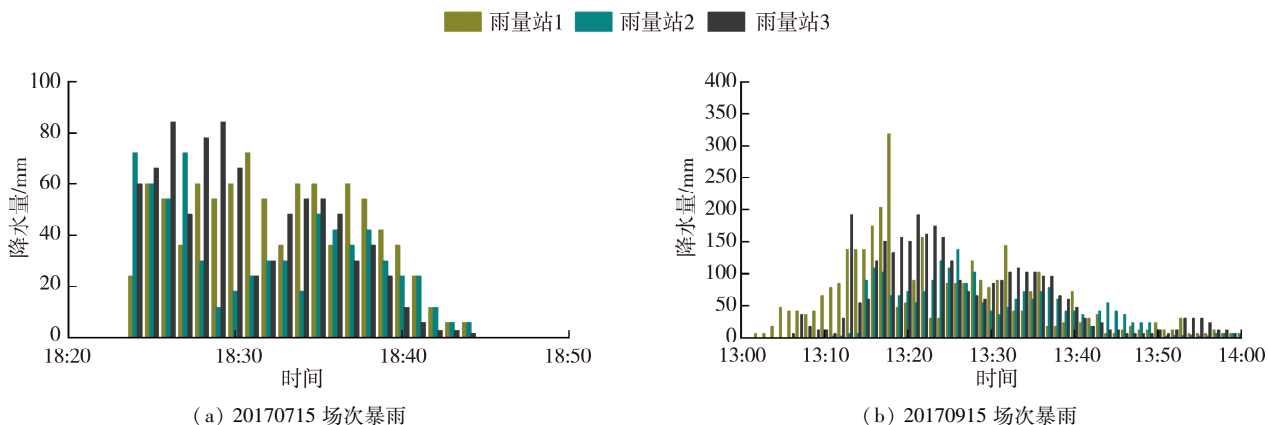
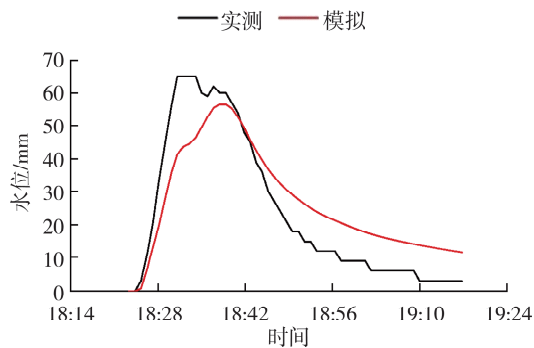
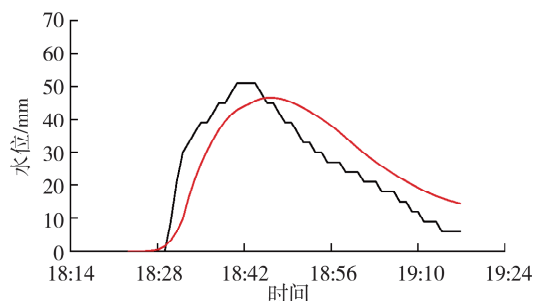


图3 20170715 和 20170915 场次暴雨的降雨过程

Fig.3 Rainfall process of 20170715 and 20170915 rainstorms



(a) J1 检查井



(b) J2 检查井

图4 20170715 场次暴雨检查井水位模拟结果

Fig.4 Simulation results of water level in inspection wells of 20170715 rainstorm

表2 实测与模拟水深对比

Table 2 Comparison of measured and simulated water depth

涝点位置	实测水深/cm	模拟水深/cm	误差/cm
朱子寮	20.0	15.8	-4.2
黄华路	50.0	91.4	41.4
北横街	50.0	63.3	13.3
东川路	60.0	40.0	-20.0
农林下路	50.0	42.7	-7.3
广发银行	50.0	62.9	12.9
光明路	30.0	16.1	-13.9
恒福路	35.0	22.3	-12.7
横枝岗医院	40.0	48.1	8.1

3 结果与分析

3.1 气候变化对溢流节点的影响

图5为重现期为2a和20a条件下RF、RCP4.5和RCP8.5情景下的溢流节点分布情况。可见,相对于RF情景,RCP4.5和RCP8.5情景下东濠涌流域的溢流量和溢流节点数量均呈现出上升趋势。在重现期为2a的RCP4.5情景下,东濠涌流域溢流节点数量增加61个,增幅为2.049%,而在重现期为2a的RCP8.5情景下,溢流节点数量增加330个,增幅为11.085%。由图5(a)(b)(c)可见,重现期为2a时,RF情景下溢流节点主要位于东濠涌东部(农林下路区域),节点溢流量大多在 200 m^3 以下;RCP4.5情景下这一区域的最大溢流量和溢流节点数略有增加,但仍主要位于农林下路区域;RCP8.5

情景下,东濠涌流域普遍呈现出最大溢流量和溢流节点数增加的变化趋势。重现期为20a时,相对于RF情景,RCP4.5和RCP8.5情景下溢流量以及溢流节点数均呈现出显著增加趋势,溢流量节点增加百分比分别为2.217%和13.974%。结果表明,未来时期珠三角地区可能遭受更为不利的洪涝风险灾害,高排放情景会直接增加高风险地区洪涝风险的范围。

节点溢流量/ m^3 ● ≥ 500 ● $>200\sim 500$ ● $>100\sim 200$
● $>10\sim 100$ ● ≤ 10



(a) RF 情景(2年一遇)



(b) RCP4.5 情景(2年一遇)



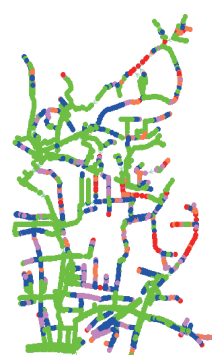
(c) RCP8.5 情景(2年一遇)



(d) RF 情景(20年一遇)



(e) RCP4.5 情景(20年一遇)



(f) RCP8.5 情景(20年一遇)

图5 不同情景下淹没节点溢流量分布

Fig.5 Distribution of submerged node discharge under different scenarios

3.2 气候变化对管道超载的影响

利用管道内水深与管道深度的比值 S 来反映管道的超载状态, $S < 0.5$ 表示管道内的水深小于管道

深度的 50%,处于完全不超负荷状态; $0.5 \leq S < 0.8$ 表示管道内的水深为管道深度的 50% ~ 80%,处于基本不超负荷状态; $0.8 \leq S < 1$ 表示管道内水深为管道深度的 80% ~ 100%; $1 \leq S < 2$ 表示管道为满载,水力坡度小于管道坡度,由于下游管道过流能力的限制而超负荷; $S = 2$ 表示管道为满载,由于管道本身过流能力限制而超负荷。表 3、表 4 分别为 RCP4.5 情景和 RCP8.5 情景相对于 RF 情景下管道不同超负荷状态长度和占管道总长度比例变化的情况。可见,相对于 RF 情景,在重现期为 20 a、RCP4.5 情景下,管网超负荷状态为满载的比例增幅为 1.59%,其中由于自身过流能力限制而超负荷的比例增幅为 0.92%。在 5 种不同重现期、RCP8.5 情景下,由于下游管道过流能力不足而满载的管道增幅比例分别为 3.13%、2%、2.14%、1.63% 和 2.17%,由于自身过流能力不足而导致管道满载运行的比例均超过 6%。这表明气候变化将直接给排水管网带来更大的负担。

3.3 气候变化对内涝的影响

图 6 为不同重现期及气候情景条件下的内涝空间分布,可以看出,在重现期为 2 a 时,RCP4.5 和 RCP8.5 情景下淹没深度增加,RCP8.5 情景相比于 RCP4.5 情景更加显著。在重现期为 20 a 时,内涝事件更加显著,尤其在 RCP8.5 情景下增加了一些新的内涝点。

图 7(a)为 RCP4.5 情景相对于 RF 情景典型内涝点最大积水深度变化情况,重现期为 2 a 时,最大积水深度增加幅度为 0.005 ~ 0.055 m,增幅最大位于横枝岗医院;重现期为 20 a 时,最大积水深度增加

淹没水深/m ■ ≥ 1.50 ■ $>1.00 \sim 1.50$ ■ $>0.50 \sim 1.00$
■ $>0.20 \sim 0.50$ ■ $>0.10 \sim 0.20$ ■ $>0.05 \sim 0.10$

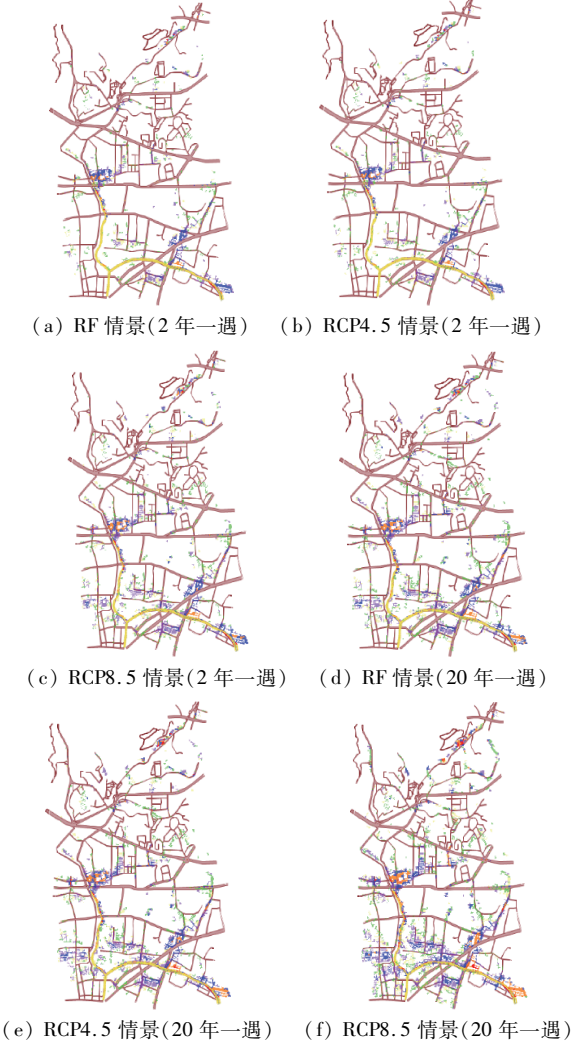


图 6 不同重现期及气候情景条件下内涝空间分布
Fig.6 Spatial distribution of waterlogging under different return periods and climatic scenarios

表 3 RCP4.5 情景相对于 RF 情景管道超负荷状态

Table 3 Pipeline overload status of RCP4.5 scenario compared with that of RF scenario

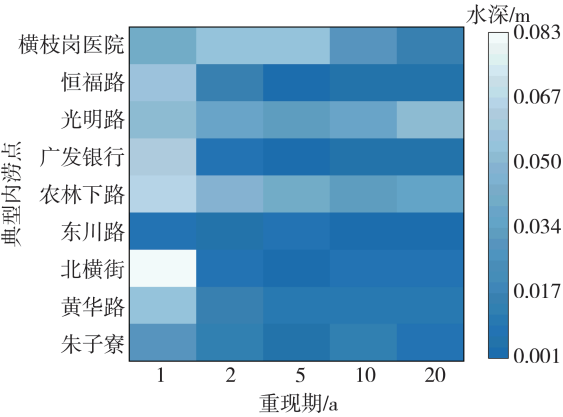
重现期/a	长度/km					比例/%				
	$S < 0.5$	$0.5 \leq S < 0.8$	$0.8 \leq S < 1$	$1 \leq S < 2$	$S = 2$	$S < 0.5$	$0.5 \leq S < 0.8$	$0.8 \leq S < 1$	$1 \leq S < 2$	$S = 2$
1	-0.63	-0.58	-0.26	0.23	1.25	-0.89	-0.82	-0.36	0.32	1.75
2	-0.57	-0.42	-0.12	0.31	0.81	-0.80	-0.60	-0.18	0.43	1.14
5	-0.45	-0.18	-0.46	0.54	0.56	-0.64	-0.27	-0.65	0.75	0.8
10	-0.37	-0.56	-0.22	0.35	0.80	-0.51	-0.79	-0.31	0.49	1.12
20	-0.36	-0.38	-0.39	0.48	0.65	-0.51	-0.54	-0.55	0.67	0.92

表 4 RCP8.5 情景相对于 RF 情景管道超负荷状态

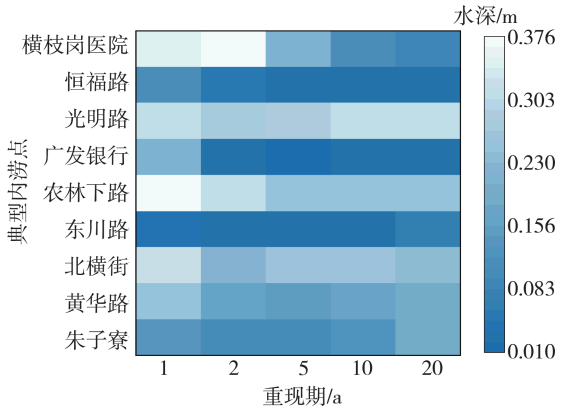
Table 4 Pipeline overload status of RCP8.5 scenario compared with that of RF scenario

重现期/a	长度/km					比例/%				
	$S < 0.5$	$0.5 \leq S < 0.8$	$0.8 \leq S < 1$	$1 \leq S < 2$	$S = 2$	$S < 0.5$	$0.5 \leq S < 0.8$	$0.8 \leq S < 1$	$1 \leq S < 2$	$S = 2$
1	-4.45	-3.17	-0.67	2.23	6.06	-6.26	-4.45	-0.94	3.13	8.52
2	-3.34	-3.12	-0.36	1.42	5.42	-4.70	-4.40	-0.51	2.00	7.62
5	-2.72	-2.8	-0.98	1.53	4.99	-3.83	-3.95	-1.38	2.14	7.02
10	-2.19	-2.65	-1.08	1.16	4.76	-3.07	-3.72	-1.51	1.63	6.68
20	-2.11	-3.21	-0.57	1.54	4.36	-2.97	-4.51	-0.81	2.17	6.12

幅度为 0.003 ~ 0.034 m,增幅最大位于农林下路。图 7(b)为 RCP8.5 情景相对于 RF 情景典型内涝点最大积水深度变化情况,与 RCP4.5 情景相比,RCP8.5 情景下最大积水深度增加更为显著,其中农林下路在重现期为 1 a 时最大积水深度增加最大,达到 0.369 m,广发银行在重现期为 5 a 时最大积水深度增加最小,为 0.020 m。结果表明,在气候变化条件下,东濠涌城市排水系统会遭受更为严重的暴雨过程,由于排水管网过流能力的不足,出水口不能及时将雨水排出,雨水会积存在中下游河道附近,产生洪涝事件,而气候变化造成降雨强度峰值和累积降水量均呈增加趋势,使排水系统节点溢流量增加,超载管道比例增加,从而导致更不利的洪涝影响。



(a) RCP4.5 相对于 RF 情景



(b) RCP8.5 相对于 RF 情景

图 7 典型内涝点最大积水深度变化
Fig.7 Change of maximum ponding depth at typical waterlogging point

4 结 论

a. 利用 Delta 法和年最大值法相结合,导出未来时期短历时暴雨强度公式,结果表明,相对于 RF 情景,未来时期的 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下短历时设计降雨强度和累积降水量均呈现出不同程度的增

加趋势,这将直接给排水系统带来更大的压力,从而导致洪涝灾害损失更为严重。

b. 利用 InfoWorks ICM 构建了东濠涌流域排水系统模型,实现了管网一维水动力过程及地表二维水动力过程的耦合。利用实测降雨数据、检查井水位和内涝点淹没数据对模型进行验证,结果表明模拟的检查井水位和内涝点积水深度与实测较为吻合,模型的精度和可靠性较好,能够反映东濠涌流域的水文过程。

c. RCP4.5 和 RCP8.5 气候变化情景相对于 RF 情景,在 1 a、2 a、5 a、10 a 和 20 a 5 种重现期条件下,溢流节点数量和溢流量呈现显著的上升趋势。气候变化造成降雨强度峰值和累积降水量均呈增加趋势,超载管道比例增加,而高排放情景将更显著地增加溢流节点的数量、溢流量的幅度和超载管道的比例。

d. RCP4.5 和 RCP8.5 情景下最大积水深度增加,RCP8.5 情景相比于 RCP4.5 情景更加显著。RCP8.5 情景在重现期为 2 a 时,最大积水深度增加 0.005 ~ 0.055 m;重现期为 20 a 时,最大积水深度增加 0.003 ~ 0.034 m。这一结果表明未来时期珠三角地区可能遭受更为不利的洪涝风险灾害。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change 2021, the physical science basis: contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

[2] 熊立华, 闫磊, 李凌琪, 等. 变化环境对城市暴雨及排水系统影响研究进展 [J]. 水科学进展, 2017, 28 (6): 930-942. (XIONG Lihua, YAN Lei, LI Lingqi, et al. Advances in analysis of impacts of changing environments on extreme urban rainfall and drainage infrastructure [J]. Advances in Water Science, 2017, 28 (6): 930-942. (in Chinese))

[3] 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]. Advances in Water Science, 2014, 25 (4): 594-605. (in Chinese))

[4] 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))

- [5] 黄华兵,王先伟,柳林. 城市暴雨内涝综述:特征、机理、数据与方法[J]. 地理科学进展,2021,40(6):1048-1059. (HUANG Huabing, WANG Xianwei, LIU Lin. A review on urban pluvial floods: characteristics, mechanisms, data, and research methods[J]. Progress in Geography,2021,40(6):1048-1059. (in Chinese))
- [6] 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))
- [7] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展,2021,32(3):334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science,2021,32(3):334-344. (in Chinese))
- [8] 徐宗学,叶陈雷. 城市暴雨洪涝模拟:原理、模型与展望[J]. 水利学报,2021,52(4):381-392. (XU Zongxue, YE Chenlei. Simulation of urban flooding/waterlogging processes:principle, models and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(4):381-392. (in Chinese))
- [9] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):528-533. (in Chinese))
- [10] 黄国如,王欣,黄维. 基于 InfoWorks ICM 模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学,2017,35(2):66-70. (HUANG Guoru, WANG Xin, HUANG Wei. Simulation of rainstorm waterlogging in urban area based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources and Power, 2017, 35(2):66-70. (in Chinese))
- [11] 黄国如,李碧琦. 基于 InfoWorks ICM 的深圳市内涝灾害居民室内财产损失研究[J]. 自然灾害学报,2021,30(2):71-79. (HUANG Guoru, LI Biqu. Study on indoor property loss of Shenzhen residents caused by waterlogging disaster based on InfoWorks ICM[J]. Journal of Natural Disasters,2021,30(2):71-79. (in Chinese))
- [12] 罗海婉,陈文杰,李志威,等. 基于耦合水动力模型的广州市东濠涌流域洪涝模拟[J]. 水资源与水工程学报,2019,30(3):46-52. (LUO Haiwan, CHEN Wenjie, LI Zhiwei, et al. Flood simulation of Donghaochong Basin in Guangzhou City based on coupled hydrodynamic model [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2019,30(3):46-52. (in Chinese))
- [13] 程涛,黄本胜,邱静,等. 基于 UAV 精细化地表数据的城市洪涝模拟与分析:以济南市海绵城市示范区为例[J]. 水力发电学报,2021,40(5):110-124. (CHENG Tao, HUANG Bensheng, QIU Jing, et al. Urban flood simulation and analysis using UAV-based refined surface data: case study for sponge city pilot area of Jinan City [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2021,40(5):110-124. (in Chinese))
- [14] 叶陈雷,徐宗学,雷晓辉,等. 基于 InfoWorks 的城市水系水文水动力过程耦合模拟:以福州市江北城区及东北部山区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2019,55(5):609-616. (YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks: case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(5):609-616. (in Chinese))
- [15] 陆海明,邹鹰,孙金华,等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming, ZOU Yin, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection,2020,36(1):58-65. (in Chinese))
- [16] 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))
- [17] 朱呈浩,夏军强,陈倩,等. 基于 SWMM 模型的城市洪涝过程模拟及风险评估[J]. 灾害学,2018,33(2):224-230. (ZHU Chenghao, XIA Junqiang, CHEN Qian, et al. SWMM-based urban flood modelling and risk evaluation [J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2):224-230. (in Chinese))
- [18] 冯钊,王云峰,邬炜,等. 城市内涝事理图谱构建方法及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):479-487. (FENG Jun, WANG Yunfeng, WU Wei, et al. Construction method and application of event logic graph for urban waterlogging [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(6):479-487. (in Chinese))
- [19] 侯精明,郭凯华,王志力,等. 设计暴雨雨型对城市内涝影响数值模拟[J]. 水科学进展,2017,28(6):820-828. (HOU Jingming, GUO Kaihua, WANG Zhili, et al. Numerical simulation of design storm pattern effects on urban flood inundation [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(6):820-828. (in Chinese))

(下转第 193 页)

- topographic design of river channels for form-process linkages [J]. Environmental Management, 2016, 57: 929.
- [24] LANE B A, PASTERNAK G B, SANDOVAL SOLIS S. Integrated analysis of flow, form, and function for river management and design testing [J]. Ecohydrology, 2018, 11(5): e1969.
- [25] GIBBINS C, BATALLA R J, VERICAT D. Invertebrate drift and benthic exhaustion during disturbance: response of mayflies (*ephemeroptera*) to increasing shear stress and river-bed instability [J]. River Research and Applications, 2010, 26(4): 499-511.
- [26] HAWLEY R J, WOOTEN M S, MACMANNIS K R, et al. When do macroinvertebrate communities of reference streams resemble urban streams? the biological relevance of Q critical [J]. Freshwater Science, 2016, 35(3): 778-794.
- [27] LOBERA G, MUÑOZ I, LÓPEZ-TARAZÓN J, et al. Effects of flow regulation on river bed dynamics and invertebrate communities in a mediterranean river [J]. Hydrobiologia, 2017, 784: 283-304.
- [28] SAWYER A M, PASTERNAK G B, MOIR H J, et al. Riffle-pool maintenance and flow convergence routing observed on a large gravel-bed river [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 143-160.
- [29] VERBERK W C E P, SIEPEL H, ESSELINK H. Life-history strategies in freshwater macroinvertebrates [J]. Freshwater Biology, 2008, 53(9): 1722-1738.
- [30] ROSENFELD J S, CAMPBELL K, LEUNG E S, et al. Habitat effects on depth and velocity frequency distributions: implications for modeling hydraulic variation and fish habitat suitability in streams [J]. Geomorphology, 2011, 130(3): 127-135.
- [31] GOSTNER W, PARASIEWICZ P, SCHLEISS A J. A case study on spatial and temporal hydraulic variability in an alpine gravel-bed stream based on the hydromorphological index of diversity [J]. Ecohydrology, 2013, 6(4): 652-667.
- [32] SHEARER K, HAYES J, JOWETT I, et al. Habitat suitability curves for benthic macroinvertebrates from a small new zealand river [J]. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 2015, 49(2): 178-191.
- [33] NESTLER J M, MILHOUS R T, PAYNE T R, et al. History and review of the habitat suitability criteria curve in applied aquatic ecology [J]. River Research and Applications, 2019, 35(8): 1155-1180.
- [34] ESCOBAR M, PASTERNAK G. A hydrogeomorphic dynamics approach to assess in-stream ecological functionality using the functional flows model, Part 1: model characteristics [J]. River Research and Applications, 2010, 26: 1103-1128.
- [35] SCHWARTZ J S, NEFF K J, DWORAK F E, et al. Restoring riffle-pool structure in an incised, straightened urban stream channel using an ecohydraulic modeling approach [J]. Ecological Engineering, 2015, 78: 112-126.
- [36] BROWN R A, PASTERNAK G B. Bed and width oscillations form coherent patterns in a partially confined, regulated gravel-cobble-bedded river adjusting to anthropogenic disturbances [J]. Earth Surface Dynamics, 2017, 5(1): 1-20.
- [37] CLARKE S, BURGESSGAMBLE L, WHARTON G. Linking form and function: towards an eco-hydromorphic approach to sustainable river restoration [J]. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 2003, 13: 439-450.

(收稿日期: 2021-08-20 编辑: 王芳)

(上接第 63 页)

- [20] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述 [J]. 科学通报, 2017, 62(33): 3873-3884. (MEI Chao, LIU Jiahong, WANG Hao, et al. Review on urban design rainstorm [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(33): 3873-3884. (in Chinese))
- [21] 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. (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))
- [22] 蔡怡亨, 韩振宇, 周波涛. 对基于 RegCM4 降尺度的中国区域性暴雨事件模拟评估 [J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(4): 420-429. (CAI Yiheng, HAN Zhenyu, ZHOU Botao. Evaluation of RegCM4 downscaling simulations on regional rainstorm events in China [J]. Climate Change Research, 2021, 17(4): 420-429. (in Chinese))
- [23] 张冬峰, 高学杰. 中国 21 世纪气候变化的 RegCM4 多模拟集合预估 [J]. 科学通报, 2020, 65(23): 2516-2526. (ZHANG Dongfeng, GAO Xuejie. Climate change of the 21st century over China from the ensemble of RegCM4 simulations [J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(23): 2516-2526. (in Chinese))
- [24] 戴有学, 王振华, 戴临栋, 等. 山西临汾市城区暴雨强度公式修订分析研究 [J]. 自然灾害学报, 2017, 26(6): 197-206. (DAI Youxue, WANG Zhenhua, DAI Lindong, et al. Study on the revision of rainstorm intensity formula in urban area in Linfen of Shanxi Province [J]. Journal of Natural Disasters, 2017, 26(6): 197-206. (in Chinese))
- [25] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估 [J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Wenjie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652. (in Chinese))

(收稿日期: 2021-09-10 编辑: 王芳)