

文章编号: 1000-5641(2017)04-0160-08

## 城市民防工程内涝风险研究

赵庚润, 李 路, 刘新成

(上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海 200061)

**摘要:** 为研究上海五角场区域地下民防工程对城市内涝积水的防御能力, 本文建立了内涝模型, 计算得出了该区域在不同降雨重现期下的积水范围和深度, 并对区域内50个民防站点在不同降雨重现期下的内涝进水情况进行了分析. 结果表明, 城市地下空间的进水重现期除受自身的高程、高差影响外, 还与周围地势和排水条件密切相关. 不考虑安全余量的情况下, 五角场区域民防站点进水重现期普遍较高. 随着安全余量的增加, 民防站点进水重现期普遍有所下降, 不同站点对安全余量增加的敏感程度有一定差异.

**关键词:** 民防工程; 内涝模型; 内涝风险; 受涝重现期

**中图分类号:** TU99 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2017.04.014

## Study on the local flooding risk in the civil defense projects

ZHAO Geng-run, LI Lu, LIU Xin-cheng

(Shanghai Water Engineering Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 200061, China)

**Abstract:** In order to evaluate the defense capability of civil defense projects around the Shanghai Pentangle Square under urban local flooding, an urban local flooding model was built to determine the inundated areas and water depth under different rainfall return periods, and the pluvial flooding risk map was achieved. The inundated return periods of the 50 civil defense projects around the study area were calculated. The results showed that the inundated return period was connected not only with the elevation difference but also the topography and drainage condition. The inundated return periods were generally high and decreased as the freeboard increasing, but they showed different sensitivities to the increased freeboard.

**Key words:** civil defense project; local flooding model; local flooding risk; inundated return period

## 0 引 言

随着我国城市化的快速发展, 城市地面空间日益紧缺, 各类城市地下空间正以惊人的速度快速发展, 大型地下商场、地下车库、越江隧道、地铁、民防设施等地下设施数量与日

收稿日期: 2016-10-17

基金项目: 2015 年上海市青年科技英才扬帆计划(15YF1411000)

第一作者: 赵庚润, 男, 工程师, 硕士, 主要从事防洪除涝及区域排水方面研究.

E-mail: zhaogengrun@163.com.

俱增. 2016年,上海地下空间中民防工程使用面积已达到1 322万 $\text{m}^2$ <sup>[1]</sup>. 同时在全球气候变化的大趋势下,近年来极端暴雨事件和内涝灾害频发,给人民群众带来了严重的生命财产损失,严重影响了城市安全运行. 据统计,2007—2015年,全国超过360个城市遭遇了不同程度的内涝灾害<sup>[2]</sup>. 在各大城市遭遇严重内涝时,地下空间出现进水受灾的情况也时有发生. 2005年“麦莎”台风期间上海市78处地下空间被淹;2008年7月4日北京地铁5号线崇文门站因暴雨导致进水,造成部分线路停运;2010年5月16日广州地铁2号线磨碟沙站附近因连续暴雨导致隧道进水,造成整条线路停运6 h<sup>[3]</sup>. 相对于地面建筑,地下空间进水受淹失效的概率虽然相对较低,但一旦受灾损失大、灾后恢复难. 目前我国正处于地下空间开发利用的初步阶段,系统的研究地下空间应对极端降雨的防御能力,并针对薄弱环节进行科学有效的改进,可大大提高地下空间应对内涝的防御能力,减轻和控制内涝灾损,对保障社会经济安全和持续发展具有十分重要的意义.

日本是开发城市地下空间较早、技术较为成熟的国家之一,其对地下空间的内涝灾害研究及防治方面处于国际领先地位. Komaki<sup>[4]</sup>, Nishimura<sup>[5]</sup>分别针对日本地铁和地下商场提出了对应的防洪措施. Tachi等<sup>[6]</sup>对地下空间进水过程中楼梯处水流进行了物理实验. Dutta等<sup>[7]</sup>分析了日本福冈地区地下空间洪水特点,采用2D洪水扩散模型模拟了地下空间进水量并得出了进水速度与地面积水深度的关系. 我国对地下空间防汛风险的研究正处于起步阶段,对地下空间的防汛风险的分析主要采用指标体系法,研究了地下空间灾害评价的理论与方法<sup>[3,8]</sup>,并针对地下空间提出了防汛减灾措施建议<sup>[9-10]</sup>. 水文水力学模型与仿真模拟法基于明确的物理机理,能模拟内涝成灾的整个过程,计算精度高、结果合理,但此方法对数据量要求较大,计算较为复杂,一般应用于小尺度范围的研究. 城市内涝导致地下空间进水受灾是一个十分复杂的过程,包括降雨、地表汇流、排水系统排水、路面积水、地下空间进水等过程,其中对路面积水位置和积水深度的准确把握是研究的关键. 单独的路面积水模型只能反映地坪高程的高低导致的积水<sup>[11]</sup>,且单独的排水系统模型仅能模拟积水点的位置,不能考虑管道溢流到路面后积水向低洼路段输运的过程,因此完整的内涝模型应将上述两个模型进行耦合. 解以扬等基于平面二维非恒定流的基本方程和无结构不规则网格模拟道路积水情况,采用一维非恒定流方程计算地下排水管网内的水流,并通过连续方程的源汇项控制实现地下排水管网与地面单元的水量交换,研制了模拟城市暴雨内涝积水的数学模型<sup>[12]</sup>.

本文基于DHI的MIKE FLOOD建立了上海五角场地区的内涝数学模型,计算得出了在不同降雨重现期下路面的积水范围和深度. 并根据研究区域典型地下空间出入口与路面的高差,确定地下空间进水对应的降雨重现期,得到地下空间受涝的概率.

## 1 研究区域和方法

### 1.1 研究区域

本研究以上海市商业中心之一五角场地区为例,研究民防工程地下空间进水受涝的概率. 选取五角场附近北至虬江南至东走马塘形成的封闭水系区域作为研究区域,暴雨期除降雨外无外界水进入研究区域. 该区域排水系统为雨、污合流制,由五角场、营口、四平、复旦大学和二军大5个强排系统组成. 五角场系统雨水设计标准为3年一遇(单小时降雨51 mm),其余排水系统设计标准均为1年一遇(单小时降雨36 mm). 区域内雨水管干管管径为 $\Phi 200 \sim \Phi 700$ ,建有五角场泵站、四平泵站和国顺东泵站3座雨水泵站,总流量为41.20  $\text{m}^3/\text{s}$ . 鉴于研究区域内复旦大学系统为独立系统,营口系统内黄兴公园的降雨均汇入公园内

湖, 因此研究区域将该两处区域予以扣除. 研究范围如图1所示, 研究区域面积为  $6.29 \text{ km}^2$ .

根据 2013 年实测地面高程资料(测点密度为  $20 \sim 30 \text{ m}$ )<sup>[13]</sup>, 研究区域地形高程如图 1 所示. 平均高程约  $3.5 \text{ m}$ (吴淞高程, 下同), 西南侧区域的地势总体上相对较低, 部分区域的路面高程不足  $2.5 \text{ m}$ . 东侧和南侧部分区域地势相对较高, 路面高程在  $4 \text{ m}$  以上.

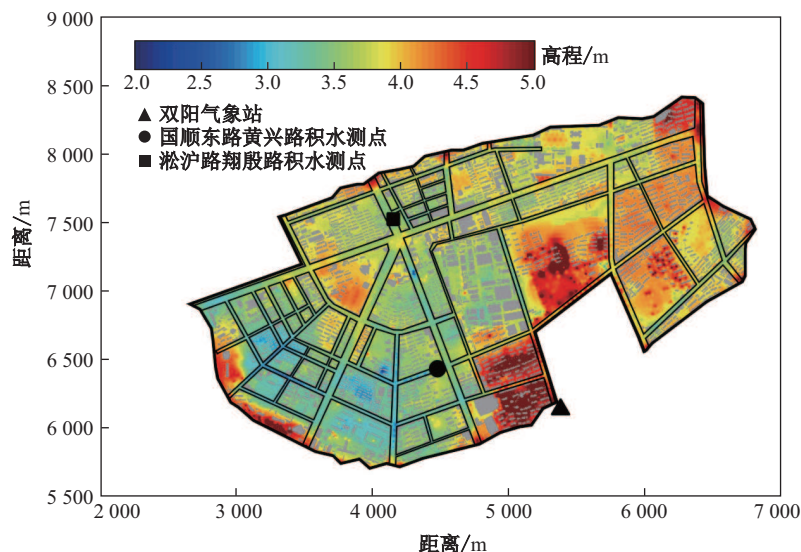


图1 区域地形图及区域地表汇流模型范围

Fig. 1 Topography and concentration range of the study area

研究区域内共有 50 个民防站点, 位置分布如图 2 所示. 每个站点共有人行、通风井、机动车和非机动车 4 种类型出入口若干个, 共计 277 个. 除个别站点位于地势较高的区域路面高程超过  $4.4 \text{ m}$  外, 其他大部分民防站点所在道路的地坪高程集中在  $3.4 \sim 4.0 \text{ m}$ . 各站点出入口最小高差均超过  $30 \text{ cm}$ , 大部集中在  $35 \sim 45 \text{ cm}$ .

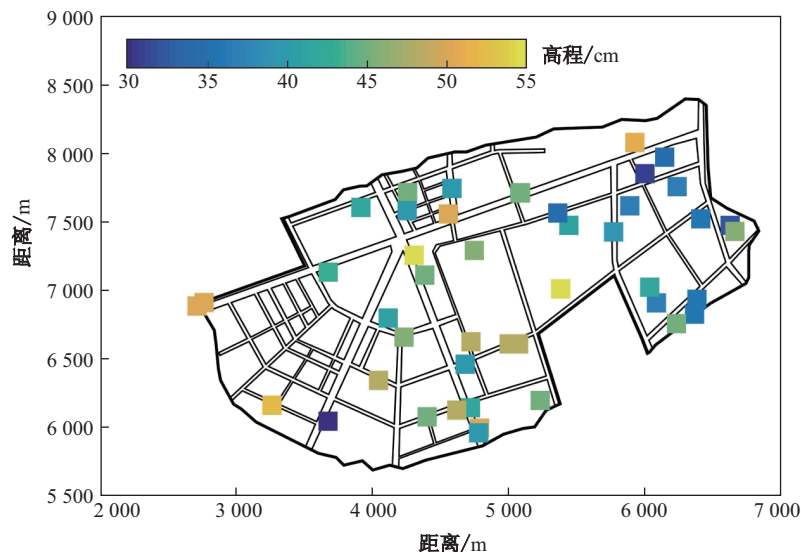


图2 研究区域民防站点位置和现状出入口最小高差

Fig. 2 Locations and minimum elevation differences of the civil defense projects

## 1.2 研究方法

本文中地形数据采用2013年实测地形数据,测点间隔为20~30 m;管网数据采用2011—2012年排水系统普查资料,管网数据信息包括各个雨水检查井坐标底高程和顶高程,以及雨水管管径和进出口高程。基于上述基础资料,采用MIKE URBAN和MIKE 21模型分别建立了五角场区域的雨水管网模型和区域地表汇流模型,利用MIKE FLOOD平台将两个模型进行耦合计算。

鉴于现阶段该区域实测积水资料相对较为匮乏,本文仅收集到了2013年“913”暴雨期间实测五角场附近双阳气象站降雨过程,以及国顺东路黄兴路和淞沪路翔殷路积水测点的实测积水过程(站点位置见图1),具体如图3所示。从率定结果可以看出,在国顺东路黄兴路积水测点处,模型计算的过程最大积水深度为20 cm,与实测结果一致,且模拟的最大积水的出现时间也与实测数据符合良好(图3(b)),计算值与实测值的均方根误差为0.061。在淞沪路翔殷路积水测点处,整个计算过程中均未出现积水,与实测资料一致。这表明建立的数学模型可较好地反映研究区域的积水变化过程,可用于研究区域的内涝积水模拟。

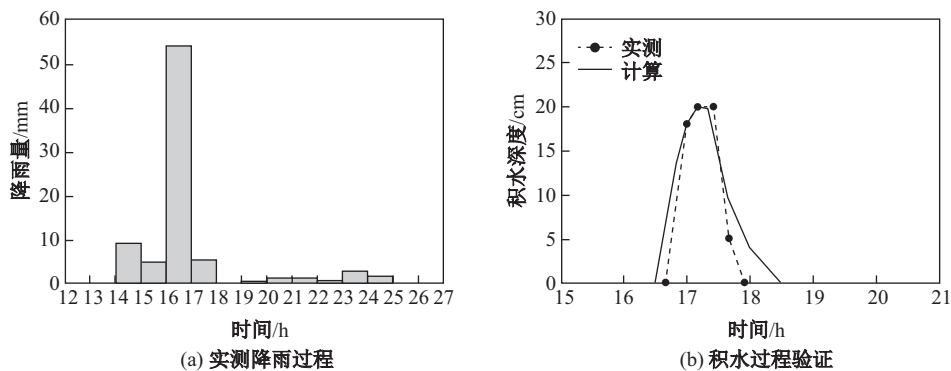


图3 2013年“913”暴雨期间双阳气象站实测降雨过程(a)和国顺东路黄兴路积水过程验证(b)  
Fig. 3 The observed rainfall distribution at the Shuangyang Station (a) and the comparison of the observed and modeled water depth at the East Guoshun Road and Huangxing Road (b) during the “913” rainstorm in 2013

设计暴雨雨量采用上海水务局发布的《上海市城镇雨水排水设施规划和设计指导意见》中提出的修编后的上海市短历时暴雨强度的公式,具体见公式(1)。1963年9月12日至13日,上海市普降暴雨,24 h降雨总量约200 mm,该暴雨在全市层面上均造成了严重的涝灾,因此上海市将“1963.9”暴雨作为区域除涝的设计雨型。本研究的设计雨型基于上海除涝设计雨型(“1963.9”雨型)最大3 h降雨分布,采用同频放大法分配降雨过程。即将根据公式(1)得出的不同重现期的3 h降雨总量做如下分配:同频1 h降雨量居中做为峰值,剩余雨量根据“1963.9”雨型峰值前后2 h降雨量比例进行分配。重现期1—1 000年的设计暴雨过程雨量分布见表1。

$$i = \frac{9.581(1 + 0.846 \log_{10}(T))}{(t + 7.0)^{0.656}} \quad (1)$$

其中, $i$ 为暴雨强度(mm/min), $T$ 为重现期(年), $t$ 为降雨历时(min)。

表 1 不同重现期下降雨量分布

类别	Tab. 1 The rainfall distribution of different return periods										
	1年 一遇	3年 一遇	5年 一遇	10年 一遇	30年 一遇	50年 一遇	100年 一遇	300年 一遇	500年 一遇	1 000年 一遇	
最大 1 h 降雨量/mm	36.4	51.2	58.0	67.3	82.0	88.8	98.1	112.8	119.7	128.9	
3 h 降雨总量/mm	55.8	78.3	88.7	102.9	125.4	135.9	150.1	172.6	183.1	197.3	

## 2 结果分析和讨论

### 2.1 积水区域及积水重现期

采用建立的研究区域内涝数学模型, 分别计算了 1 年、3 年、5 年、10 年、30 年、50 年、100 年、300 年、500 年和 1 000 年 10 种重现期降雨强度下研究区域内道路积水情况, 其中 5 年、10 年、50 年、100 年、500 年和 1 000 年 6 种重现期下道路积水范围和深度见图 4 所示。

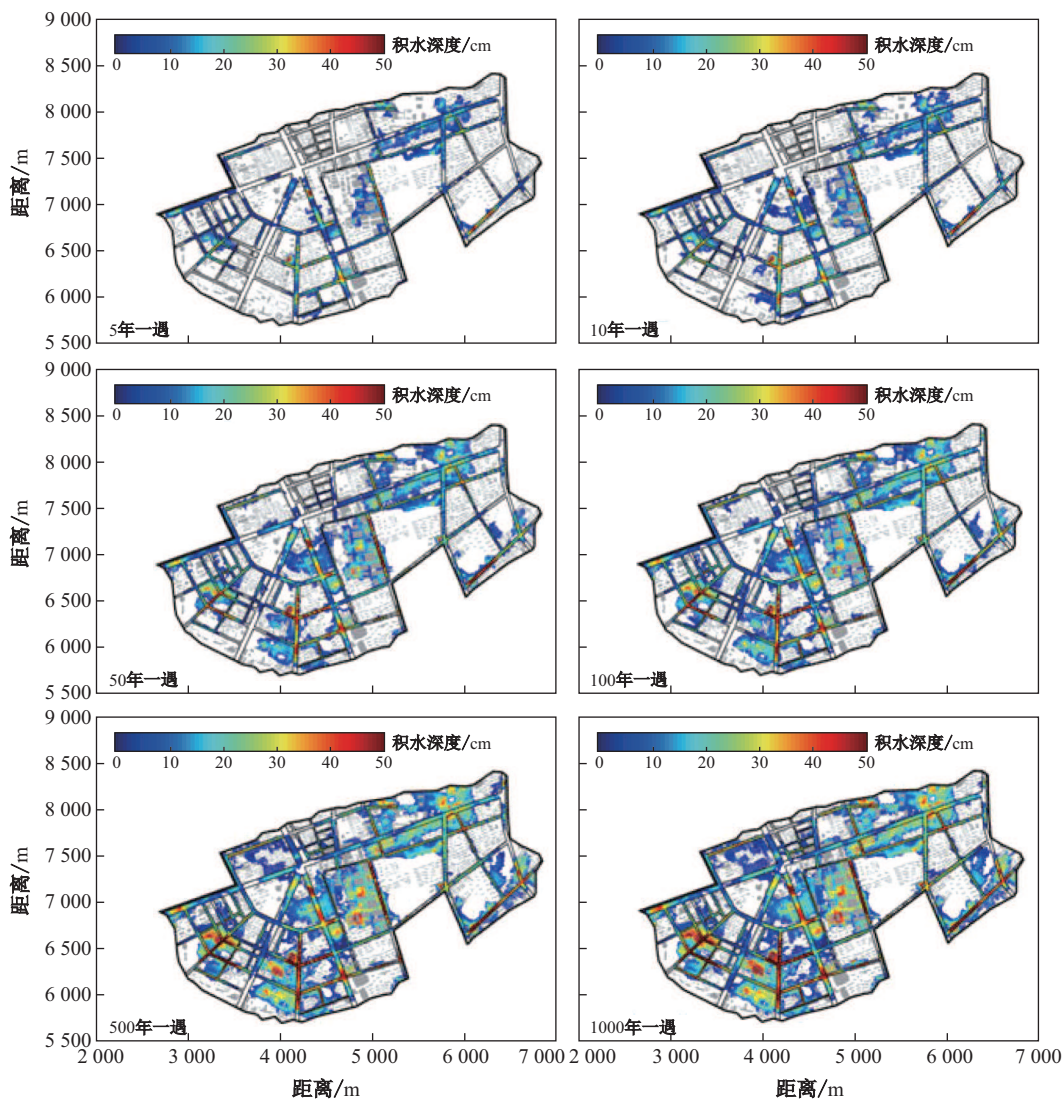


图 4 不同降雨重现期下研究区域道路积水范围和积水深度

Fig. 4 Ponding locations and depth of different return periods in the study area

暴雨重现期从 1 年一遇增至 1 000 年一遇, 积水总面积从 0.13 km<sup>2</sup>增至 2.65 km<sup>2</sup>; 积水深度超过 15 cm 的区域面积从 0.02 km<sup>2</sup>增至 1.44 km<sup>2</sup>; 积水深度超过 30 cm 的区域面积从无增加至 0.48 km<sup>2</sup>; 积水深度超过 50 cm 的区域面积从无增加至 0.07 km<sup>2</sup>; 平均积水深度从 8 cm 增至 19 cm (见表 2)。

表 2 不同设计暴雨重现期下积水面积和平均积水深度统计

Tab. 2 Statistics of the ponding locations and depth of different return periods in the study area

重现期/年	总积水面积/km <sup>2</sup>	积水>15 cm 的面积/km <sup>2</sup>	积水>30 cm 的面积/km <sup>2</sup>	积水>50 cm 的面积/km <sup>2</sup>	平均积水深度/cm
1	0.13	0.02	0.00	0.00	8
3	0.73	0.18	0.02	0.00	10
5	0.97	0.27	0.05	0.00	11
10	1.29	0.40	0.08	0.01	12
30	1.67	0.64	0.14	0.01	14
50	1.82	0.75	0.18	0.02	15
100	2.05	0.93	0.23	0.03	16
300	2.34	1.17	0.34	0.04	17
500	2.48	1.28	0.39	0.05	18
1 000	2.65	1.44	0.48	0.07	19

根据《室外排水设计规范》(2016 年版), 内涝防治标准下地面积水应满足: ① 居民住宅和工商业建筑物的底层不进水; ② 道路中一条车道的积水深度不超过 15 cm<sup>[14]</sup>。根据上述模型计算结果, 对区域内路面积水深度超过 15 cm 的区域进行了统计, 具体结果见图 5 和表 3。总体上地势低的区域以及地下管线管径较细的路面内涝风险高; 地势较高的区域以及地下管径较粗和泵站附近的路段内涝风险低。

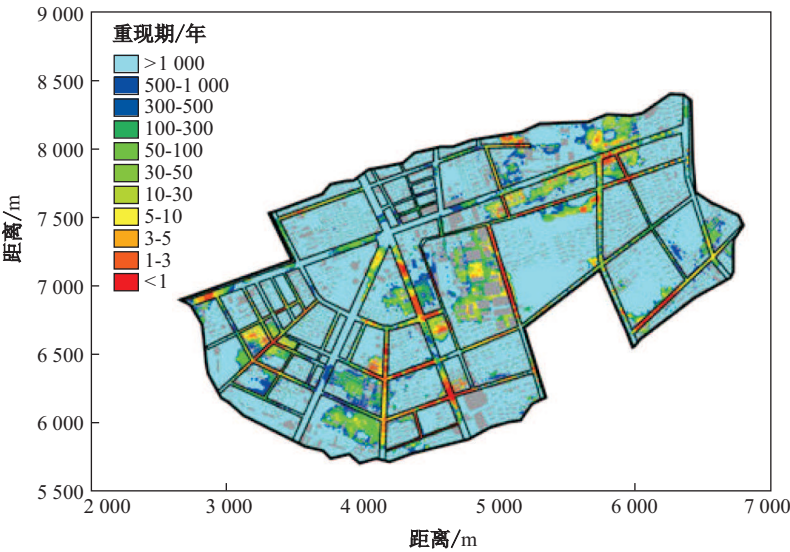


图 5 研究区域内涝重现期分布图

Fig. 5 Different return periods of local flooding in the study area

2.2 民防工程进水概率

根据研究区域不同暴雨重现期下路面积水的计算结果, 对各民防站点进水重现期进行了统计, 具体统计结果如图 5 和表 3 所示. 在所有 50 个民防站点中, 仅有 4 个民防站点的进水重现期不足 1 000 年, 占有站点总数的 8%. 其中杨镇 QP1416 及 QR1395 站点进水重现期均低于上海市 100 年一遇的城市内涝标准, 应采取适当措施保障防汛安全. 杨镇 QR1428 和 QR1404 站点的道路地坪标高接近全部站点的平均值, 但由出入口高差较小, 且位于积水严重路段, 导致其进水重现期也较小. 因此地下空间的进水重现期除了与自身的高程、高差相关外, 还与周围地势和排水条件密切相关.

表 3 研究区域不同重现期下内涝路段面积及其占路面总面积的百分比

Tab. 3 Areas and proportions of local flooding in the study area					
重现期/年	<1	<3	<5	<10	<30
积水面积/km <sup>2</sup>	0.020	0.176	0.266	0.401	0.639
百分比	0.4%	3.7%	5.5%	8.4%	13.3%
重现期/年	<50	<100	<300	<500	<1 000
积水面积/km <sup>2</sup>	0.759	0.932	1.167	1.291	1.446
百分比	15.8%	19.5%	24.4%	26.9%	30.2%

近年来城市化的加剧导致城市地面发生一定程度的不均匀沉降, 同时考虑到路面积水受车辆等的扰动会出现一定幅度的波动, 往往在路面积水深度还未到达出入口高差时, 地下空间已经出现进水. 分别给予 5 cm、10 cm、20 cm 安全余量, 对各站点失效重现期进行敏感性分析, 具体见图 6 和表 4. 其中表 4 仅列出了几种安全余量下重现期低于 1 000 年一遇的站点, 共 21 个.

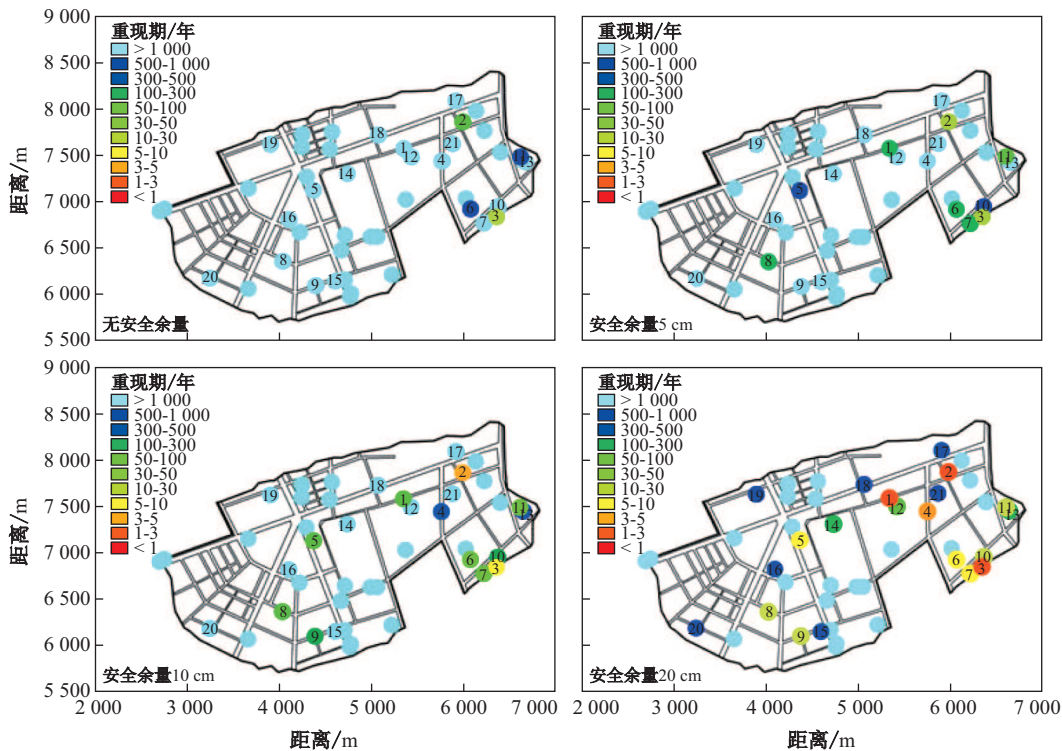


图 6 各民防站点在不同安全余量下的进水重现期

Fig. 6 Inundated return periods of the civil defense projects with different freeboard magnitudes

表 4 各民防站点在不同安全余量下的进水重现期

Tab. 4 Inundated return periods of the civil defense projects with different freeboard magnitudes					
编号	站点	无安全余量/年	5 cm 安全余量/年	10 cm 安全余量/年	20 cm 安全余量/年
1	杨镇 QR1348	>1 000	100—200	30—50	1—2
2	杨镇 QR 1395	50—100	10—20	3—5	1—2
3	杨镇 QP1416	20—30	10—20	5—10	2—3
4	杨镇 QP1277	>1 000	>1 000	300—500	3—5
5	杨五 QR1484	>1 000	500—1 000	30—50	5—10
6	杨镇 QR1404	500—1 000	100—200	30—50	5—10
7	杨镇 QR1514	>1 000	100—200	50—100	5—10
8	杨五 QR1482	>1 000	100—200	50—100	10—20
9	杨五 QR1524	>1 000	>1 000	100—200	10—20
10	杨镇 QP1366	>1 000	500—1000	100—200	10—20
11	杨镇 QR1428	300—500	50—100	30—50	10—20
12	杨镇 QP1513	>1 000	>1 000	>1 000	50—100
13	杨镇 QR1540	>1 000	>1 000	500—1 000	100—200
14	杨五 QR1451	>1 000	>1 000	>1 000	200—300
15	杨五 QP1483	>1 000	>1 000	>1 000	300—500
16	杨五 QR1452	>1 000	>1 000	>1 000	300—500
17	杨镇 QR1388	>1 000	>1 000	>1 000	300—500
18	杨五 GR1074	>1 000	>1 000	>1 000	500—1 000
19	杨五 QP1450	>1 000	>1 000	>1 000	500—1 000
20	杨五 QR1345	>1 000	>1 000	>1 000	500—1 000
21	杨镇 QR1350	>1 000	>1 000	>1 000	500—1 000

总体上安全余量越高, 民防站点的进水重现期就越小. 安全余量从无分别增至 5 cm、10 cm 和 20 cm 时, 区域内进水重现期 1 000 年以内的民防站点个数从 4 个分别增至 9 个、12 个和 21 个, 所占百分比分别从 8% 增至 18%、24% 和 43%. 部分站点进水重现期对安全余量增加的敏感性较强, 如杨镇QR1348, 当安全余量从无增至 5 cm、10 cm 和 20 cm 时, 站点进水重现期迅速从 1 000 年以上分别降至 100—200 年、30—50 年和 1—2 年.

3 结 论

本文建立了上海五角场区域雨水管网模型和区域地表汇流模型, 并将其耦合计算, 得到了不同降雨重现期下该区域积水范围和深度, 同时计算分析了区域内 50 个民防地下空间在不同降雨重现期下的内涝进水情况.

计算结果表明:

- (1) 城市地下空间的进水重现期除受自身的高程、高差影响外, 还与周围地势和排水条件密切相关, 这些因素在地下工程选址过程中应予以重视.
- (2) 五角场区域内民防站点的进水重现期普遍较高, 绝大部分在 1 000 年以上, 但杨镇 QP1416 及 QR1395 两个站点进水重现期低于 100 年, 需采取一定的措施保障防汛安全.
- (3) 部分地下空间站点对安全余量较为敏感, 随着安全余量的增加, 进水重现期迅速降低, 在后续养护管理中应重视这些站点的防汛安全并做好防汛应急预案.

[参 考 文 献]

[1] 江帆, 张仰斐. 上海城市地下空间开发利用的实践与展望[J]. 上海城市规划, 2011(2): 62-67.  
[2] 万汉斌. 解读城市内涝灾害筑牢城市安全基础[J]. 城市住宅, 2016(7): 6-8.

- [60] VENUGOPAL N, ROMESH T R S L. Effects of cadmium on antioxidant enzyme activities and lipid peroxidation in freshwater field crab *barytelphusa guerini* [J]. Bulletin of Environment Contamination Toxicology, 1997, 59: 132-138.
- [61] SOEGIAN TO A, CHAMANTIER-DAURES M, TRILLES J P, et al. Impact of cadmium on the structure of gills and epipodites of the shrimp *Penaeus japonicus* (Crustacea: Decapoda) [J]. Aquatic Living Resources, 1999, 12(1): 57-70.
- [62] LIU X, ZHOU Z, CHEN L. Effect of Cadmium on antioxidant enzyme activities of the juvenile *Eniocheir sinensis* [J]. Marine Sciences, 2003, 27(8): 59-63.
- [63] LEE S M, KIM H L, LEE S, et al. Toxicogenomic and signaling pathway analysis of low-dose exposure to cadmium chloride in rat liver [J]. Molecular & Cellular Toxicology, 2013, 9(4): 407-413.
- [64] YANG Y, JIA X. Joint toxicity of  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , and  $\text{Cd}^{2+}$  to tadpole of *Bufo bufo gargarizans* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2006, 12(3): 356-359.
- [65] GOBE G, CRANE D. Mitochondria, reactive oxygen species and cadmium toxicity in the kidney [J]. Toxicology Letters, 2010, 198(1): 49-55.
- [66] LIU D, YAN B, YANG J, et al. Mitochondrial pathway of apoptosis in the hepatopancreas of the freshwater crab *Sinopotamon yangtsekiense* exposed to cadmium [J]. Aquatic Toxicology, 2011, 105(3-4): 394-402.
- [67] CASALINO E, CALZARETTI G, SBLANO C, et al. Molecular inhibitory mechanisms of antioxidant enzymes in rat liver and kidney by cadmium [J]. Toxicology, 2002, 179(1-2): 37-50.
- [68] LIU D H, WANG M, ZOU J H, et al. Uptake and accumulation of cadmium and some nutrients by roots and shoots of maize (*Zea mays* L.) [J]. Pakistan Journal of Botany, 2006, 38(3): 701-709.
- [69] WANG L, SUN H. Effect of cadmium on ultrastructure of myocardial cell of freshwater crab, *Sinopotamon yangtsekiense* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2002, 26(1): 8-13.

(责任编辑: 张 晶)

(上接第167页)

## [参 考 文 献]

- [3] 陈峰. 城市地下空间防汛风险综合评估研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(3): 621-629.
- [4] KOMAKI S. Flood control measures of subway[J]. Journal of Japan Society for Natural Disaster Science, 2009, 19(2): 148-151.
- [5] NISHIMURA S. Flood control measures of underground town[J]. Journal of Japan Society for Natural Disaster Science, 2009, 19(2): 151-156.
- [6] TACHI K, TAKEDOMI K, MIZUKUSA K, et al. An experiment study on inundation flow over stairs into underground space[J]. Civil Engineering Journal, 2001, 43(2): 22-27.
- [7] DUTTA D, TAKAMURA H, HERATH S. Understanding flood behavior in underground facilities for urban flood risk management [C]// The Second International Symposium on New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia. Tokyo, 2003.
- [8] 杨远. 城市地下空间多种灾害安全综合评价指标体系与方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [9] 郑建吾. 地铁工程的防洪对策与措施研究[J]. 城市道桥与防洪, 2004, 5(3): 6-8.
- [10] 卢伟华, 陈峰, 田利勇, 等. 上海市地下空间防汛能力调查分析[J]. 上海水务, 2015, 35(1): 67-70.
- [11] 张丽佳. 上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2010.
- [12] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390.
- [13] 卢永金, 陈峰, 田利勇, 等. 中心城区易涝内涝防治技术研究[R]. 上海: 上海市水利工程设计研究院有限公司, 2016.
- [14] 住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 室外排水设计规范(2016年版): GB 50014-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

(责任编辑: 李万会)