

城市雨水管理

基于容积法的地下空间暴雨内涝风险模型及应用

史悦¹, 彭宇欣², 丁艳萍³, 苏林东⁴, 卢金锁¹

(1. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082; 3. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055; 4. 西安益维普泰环保股份有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 通过将地下空间所处的汇水流域简化为倒四棱锥, 基于容积法提出了一种内涝风险模型, 并以西安市小寨地铁站为实例进行模拟分析。结果显示, 输入实测降雨数据时, 模拟结果与实测积水深度基本吻合; 在50年一遇设计暴雨强度下, 该模型的模拟结果与InfoWorks ICM模型的模拟结果基本一致, 表明该模型的模拟结果较为合理。同时, 基于大量实际应用案例, 总结了3类不同地形的汇水流域划分方法, 可为地下空间内涝风险评估提供依据。

关键词: 地下空间; 城市暴雨内涝; 内涝风险模型; 积水深度

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)23-0127-07

Rainstorm Waterlogging Risk Model for Underground Space Based on Volumetric Method and Its Application

SHI Yue¹, PENG Yu-xin², DING Yan-ping³, SU Lin-dong⁴, LU Jin-suo¹

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China; 3. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 4. Xi'an Putai Environmental Protection Co. Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: A waterlogging risk model based on the volumetric method by simplifying the catchment basin in the underground space into an inverted quadrangular pyramid was proposed, and the model was applied for simulation analysis in Xiaozhai Subway Station of Xi'an City. The simulation results were basically consistent with the measured ponding depth when the measured rainfall data was input. The simulation results of the model were basically consistent with those of InfoWorks ICM model under the rainfall return period of 50 years, indicating that the simulation results of the model were reasonable. At the same time, three kinds of catchment basin division methods of different terrains were summarized based on a large number of practical application cases, which could provide a basis for the waterlogging risk assessment of underground space.

Key words: underground space; urban rainstorm waterlogging; waterlogging risk model; ponding depth

随着城市化进程的不断加快,城市暴雨内涝灾害频发,处于“先天弱势”的地下空间被淹没的风险较高且会造成非常大的影响。各类地下空间在设计时都会针对积水倒灌问题采取措施,如出入口等与地面连通点设计高出室外地面 150 ~ 450 mm;在出入口处设置排水沟等。但这些工程措施仅能应对低重现期降雨,一旦发生高重现期降雨,水在重力作用下会迅速向低洼处汇集,地下空间的出入口等与地面连通点处便极易发生积水倒灌,且积水的上升速度比地面快得多^[1]。近年来,国内外各大城市的地下车库、地下商场、地铁站点等地下空间被淹的事故屡见不鲜,给社会带来了巨大的经济损失,并对人类的生命财产造成了严重威胁。2006年1月28日,巴西里约热内卢西北部的佩尼亚商场地下车库涌入大量雨水,最高水位达 2.2 m,导致 6 人不幸身亡;2007年10月7日,受台风影响,杭州华浙大厦地下车库 60 多辆汽车被淹,损失超过 900 万元。

为了解决高重现期降雨情景下的地下空间内涝灾害问题,国内外的一些学者已经开展了相应研究。例如,Zhang 等人^[2]提出了一种基于地理信息系统(GIS)的城市风暴淹没模拟方法(USISM),该方法可以在市区找到淹没位置,并快速计算淹没深度和面积;胡坚等人^[3]在 2015 年采用城市排水管网模拟系统构建了镇江市主城区排水管网模型,根据积水深度等信息对主城区的内涝风险进行了评估;方正等人^[4]采用 ICM 城市综合流域排水模型模拟不同降雨重现期下地铁站点出入口的积水情况,该结果也得到了 SWMM 模型的验证;赵庚润等人^[5]基于 MIKE FLOOD 建立了上海五角场地区的内涝数学模型,计算并分析了不同降雨重现期下路面积水深度与民防站点出入口的高差,从而确定地下空间的受灾概率,为民防站点的防汛应急预案提供依据。采用上述方法对地下空间进行研究时,往往需要针对整个城区或者地区进行建模,研究尺度较大。首先,收集地形图、地下排水管网信息、城市下垫面情况等基础资料具有一定的难度,而且需要大量的实测资料;其次,采用软件模拟时建模过程非常复杂,需要对管网进行概化、对土地利用类型进行统计等。如果仅需要对某一个地下空间进行内涝风险分析时,上述大尺度的建模方法的效率明显较低。为了使城市重要地下空间的内涝风险分析在实际工程应用中更加方便快捷,笔者提出了一种基于容积法的内涝

风险模型,旨在简化建模过程的同时保证模拟结果的准确性。

1 内涝风险模型

1.1 基本假设与构建思路

1.1.1 基本假设

根据暴雨导致城市内涝的原因及积水的形成过程,笔者在提出内涝风险模型时做出以下两点假设:

① 假设各个汇水流域相互独立。首先,忽略上游管网在该汇水流域内的溢流量;其次,各个汇水流域内的降雨径流首先作用在本流域内,地形使得地表径流直接汇入该流域内的最低点,直到该流域内的积水达到一定高度、水位达到平衡状态时,才开始向其他汇水流域溢流,本研究将该临界高度称为“溢流水位”。各个汇水流域的溢流水位即为最高积水水位。

② 忽略地下排水设施的排水能力。城市暴雨内涝是在地形地貌和地下排水设施的共同作用下形成的,老旧城区的雨水管渠设计重现期一般为 1 年以下,设计标准较低,而且大多数旧城区仍然采用合流制排水管网。一旦发生降雨重现期较大的暴雨时,地表径流雨水无法及时通过地下管网排入受纳水体,甚至通过检查井溢流进入市政道路,从而导致不同程度的积水现象。此时,地下排水管网等排水设施的能力远远不够,流域内的积水量远大于地下排水管网的排水量。因此,在本模型中假设地下排水管网的排水量为零,地表积水量等于地表产流量;同时,不考虑下渗量以及蒸发量,即地表积水量等于降雨量。

1.1.2 构建思路

由于城市暴雨内涝积水现象多发于市政道路低洼处及下穿式立交处,根据上述两个假设,本研究将易积水地段概化为一个“碗状”蓄水池,该“碗状”蓄水池的积水过程如下:地表径流雨水在重力作用下,在其对应的汇水流域内向低洼处聚集,并由低到高从流域内最低点向四周蔓延,直至积水水位达到平衡状态或积水到达汇水流域的边界。该积水过程与倒圆锥从底部顶点向上进行积水的过程非常相似,但由于城市内汇水边界多为市政道路,从而汇水流域多为四边形,因此进一步将该“碗状”蓄水池简化为一个倒四棱锥(见图 1)。该倒四棱锥的底部顶点对应流域内的最低点即积水点,倒四棱锥顶部表面积与汇水流域面积相等,倒四棱锥的高与溢流水位

相同。采用类似于水库库容—水深的计算方式,以该倒四棱锥为基础构建地下空间内涝风险模型。

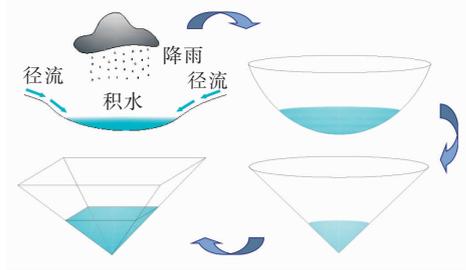


图1 模型简化思路

Fig.1 Simplification of model

1.2 汇水流域划分

在研究城市暴雨内涝积水时,合理的划分汇水流域可以在很大程度上提高模型模拟结果的准确性。城市暴雨内涝积水模拟中的汇水流域,实际是一个独立的雨水汇集的地形单元,该地形单元的划分一般以地表雨水产汇流特点为依据,因此,地形特征决定了汇水流域内雨水的主要汇集方向。同时,马立山等人^[6]的研究指出,道路是城市流域地面径流的集中地,市政道路是雨水的一条汇流路线。因此,城市汇水流域的划分应主要考虑市政道路坡向的影响。

现有的研究指出城市雨水汇水流域的划分应遵循“自大向小,逐步递进”的原则。因此,本研究提出一种汇水流域划分的思路:①首先确定地下空间的位置,然后从地下空间与地面连通点处出发,沿周边相关市政道路确定研究区域的边界,依据市政道路走向及坡向,反映该区域内雨水的主要汇流方向,形成基础汇水流域;②由于城市的建筑特点,在基础汇水流域内,找出影响雨水汇流方向的建筑物、街坊出入口、围墙等因素后,确定实际的汇流边界,完成实际汇水流域的划分。

1.3 积水计算

城市地表积水是指暴雨降落城市区域后,由于城市地表不透水率过大、城市雨水管网排水不畅等原因造成的城市地势低洼处积水。当汇水流域内的产流量大于雨水管网排水能力时就会产生地表积水。地表积水量 Q 的计算公式如下:

$$Q = Q_T - Q_P \quad (1)$$

式中 Q_T ——汇水流域总产流量, m^3

Q_P ——汇水流域雨水管网排水总量, m^3

由于在 1.1.1 节提出假设即不考虑地下设施的

排水能力,因此 Q_P 取零,则有:

$$Q = Q_T \quad (2)$$

1.3.1 汇水流域产流量计算

城市汇水流域产流量遵循水量平衡原则,为累计降雨量与降雨损失量的差值。常用的计算方法主要有径流系数法、蓄满产流法、下渗曲线扣损法、初损后损法和 SCS 曲线法等。其中径流系数法是一种基于经验的统计方法,尤其在缺少城市地表下渗数据时适用,实用性强、应用广泛,因此本次汇水流域产流量计算选用径流系数法。由于城市下垫面状况复杂,很难精确地确定径流系数。本模型中的径流系数参照《城市排水工程规划规范》(GB 50318—2017)中防涝系统综合径流系数的规定。

地表产流量 Q_T 为降雨量与径流系数的乘积,计算公式为:

$$Q_T = CiSt \quad (3)$$

式中 C ——径流系数

i ——设计暴雨强度, mm/min

S ——汇水流域面积, m^2

t ——降雨历时, min

1.3.2 积水深度计算

假设汇水流域面积为 S , 汇水流域的溢流水位为 h ; 降雨后地表的积水面积为 S_j , 积水深度为 h_j , 如图 2 所示。根据 1.1.2 节提出的以倒四棱锥为基础的简化模型估算积水深度。

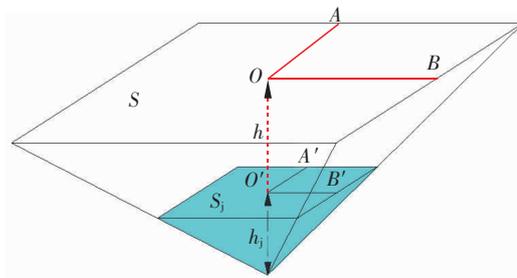


图2 汇水流域积水示意

Fig.2 Ponding in catchment area

将汇水流域地形简化为倒四棱锥后,地表积水量即为相应积水深度的倒四棱锥的体积,即:

$$Q = V = \frac{1}{3}S_j h_j \quad (4)$$

联立式(2)、(3)、(4)得:

$$Q_T = \frac{1}{3}S_j h_j \quad (5)$$

整理得:

$$h_j = \frac{3Q_T}{S_j} \quad (6)$$

由四棱锥截面积之比等于相似比的平方得：

$$\frac{S_j}{S} = \left(\frac{h_j}{h}\right)^2 \quad (7)$$

联立式(6)、(7),整理得到积水深度 h_j 的计算公式：

$$h_j = \sqrt[3]{\frac{3Q_T h^2}{S}} \quad (8)$$

1.3.3 设防高程

由于在建立模型时假设各流域之间相互独立且忽略了地下排水设施的排水量,因此在考虑安全的情况下,建议在积水深度上增加 0.15 m 的安全高度,并将该高度定义为设防高程。

2 模型验证

2.1 研究区域概况

西安市属于东亚暖温带大陆性季风气候,年均降雨量为 537.5 ~ 1 028.4 mm,降雨主要发生在 7 月—9 月,约占全年降雨量的 77%。近年来,西安市在夏季发生了多次暴雨导致城市内涝的事件,其中 2016 年 7 月 24 日晚的暴雨影响最为严重,该场降雨导致城区内多处道路积水、车辆被淹、交通受阻,尤其是小寨地铁站十字路口处积水严重,积水倒灌进入小寨地铁站,导致列车越站通过。本研究以西安市小寨地铁站为例,研究不同降雨情景下该站点各出入口与地面连通点处的积水深度。

2.2 模型建立

2.2.1 汇水流域划分

首先根据小寨地铁站周边 CAD 地形图及卫星影像图确定出汇水流域边界,形成基础汇水流域;然后实地勘察基础汇水流域,找出影响雨水汇流方向的建筑物、街坊出入口、围墙等因素,确定实际的汇流边界,完成小寨地铁站实际汇水流域的划分;最终通过卫星影像图确定出汇水流域的面积。

根据小寨区域 CAD 地形图,绘制小寨地铁站周边道路及地形,见图 3,其中, X 方向道路为东西走向, Y 方向道路为南北走向, Y2 至 Y1 为正北方向。由图 3 可知,小寨地铁站位于道路 X4 与 Y5 相交的十字路口,车站周边地势整体南高北低、东高西低,小寨区域呈碗底状,极易汇水。在道路 X3 与道路 Y1 - Y2 的十字路口处有变坡点;在道路 Y4 与道路 X1 - X2 交叉路口处有变坡点;道路 Y6 及道路 X4

均未出现变坡点。

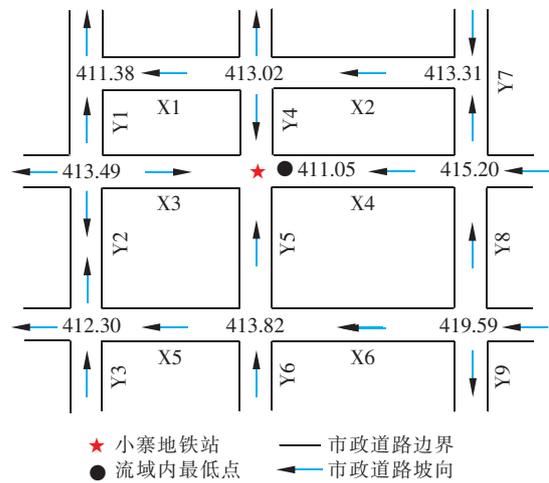


图 3 小寨地铁站周边市政道路及地形

Fig. 3 Municipal roads and terrain around Xiaozhai Subway Station

小寨地铁站汇水流域的具体划分情况如下：

① 由于道路 X3 的纵坡自西向东先“+”后“-”,道路变坡点即分水岭位于与道路 Y1 - Y2 交叉路口处,因此可以确定道路 Y1 - Y2 - Y3 为一条汇水流域边界。

② 由于道路 Y4 - Y5 的纵坡自北向南先“+”后“-”,道路变坡点即分水岭位于与道路 X1 - X2 的交叉路口处,因此可以确定道路 X1 - X2 为一条汇水流域边界。

③ 由于道路 Y6 的纵坡自南向北一直为“-”,道路 Y6 南段产生的径流雨水会不断向北汇集,但道路 X5 - X6 的纵坡自东向西一直为“-”,因此,道路 Y6 北段的径流雨水会首先汇入道路 X5 - X6,然后沿道路 X5 - X6 向西汇集。假设道路 X5 - X6 为汇水流域边界时,该流域的溢流水位不受该条边界影响,从而可以确定道路 X5 - X6 为一条汇水流域边界。

④ 由于道路 X4 的纵坡自东向西一直为“-”,道路 X4 东段产生的径流雨水会不断向西汇集,但靠近道路 X4 附近的道路 Y7 - Y8 的纵坡自南向北一直为“-”,因此,道路 X4 东段的径流雨水会首先汇入道路 Y7 - Y8,然后沿道路 Y7 - Y8 向北汇集。当假设道路 Y7 - Y8 为汇水流域边界时,该流域的溢流水位不受该条边界影响,从而可以确定道路 Y7 - Y8 为一条汇水流域边界。

综上所述,小寨地铁站的基础汇水流域为道路

Y1 - Y2 - Y3、道路 X1 - X2、道路 Y7 - Y8 和道路 X5 - X6 围成的区域;在实地勘察基础汇水流域后,确定小寨地铁站实际汇水流域与基础汇水流域相同;最终通过卫星影像图确定出小寨地铁站的汇水流域面积 S 为 130.88 hm^2 。

2.2.2 参数选取

由于小寨地铁站位于城镇建筑密集区,因此参照 1.3.1 节对防涝系统综合径流系数的规定,小寨地铁站汇水流域的径流系数 C 取 0.9。针对尺度较小的研究区域,可以选择小时间尺度作为降雨历时,同时该降雨历时需要充分克服由洼蓄和入渗产生的峰值流量。根据 2.2.1 节中小寨地铁站汇水流域的划分情况,可以确定该汇水流域的溢流水位 h 为 1.97 m。

2.3 实测暴雨积水模拟结果分析

选取西安市 2016 年 7 月 24 日发生的极端暴雨进行模拟计算,根据气象部门实测降雨资料统计,该次降雨小寨区域的最大小时降雨量达到 66.5 mm。

采用建立的研究区域的内涝风险模型,计算出该次降雨下研究区域内积水深度达到 0.89 m,设防高程为 1.04 m。根据 2016 年 7 月 24 日内涝实际调研情况,小寨地铁站十字路口处局部积水深度高达 1 m,该模型建议的设防高程与实际调研结果较为吻合,表明该模型能够准确模拟内涝积水情况。

2.4 设计暴雨积水模拟结果分析

本次模拟采用的暴雨强度公式是由西安市气象局利用 1961 年—2012 年的降雨资料,以年最大值推求出来的,如下:

$$i = \frac{13.2652 \times (1 + 2.915 \times \lg P)}{(t + 21.933)^{0.974}} \quad (9)$$

式中 i ——降雨强度,mm/min

P ——设计降雨重现期,年

t ——降雨历时,min

2.4.1 不同降雨历时下的积水深度

采用研究区域的内涝风险模型,计算了 50 年一遇降雨强度下研究区域内的积水情况,降雨历时分别采用 60、120 min,具体结果如下:当降雨历时为 60 min 时,暴雨强度为 1.080 7 mm/min,积水深度为 0.88 m;当降雨历时为 120 min 时,暴雨强度为 0.632 8 mm/min,积水深度为 0.93 m。

2.4.2 模拟结果分析

通过内涝风险模型对研究区域在不同降雨重现

期下的模拟,得出小寨地铁站在降雨历时为 120 min、重现期为 50 年时,积水深度达到 0.93 m,该结果通过城市综合流域排水模型 InfoWorks ICM 对小寨区域的模拟得到了验证。当在小寨区域 ICM 模型中输入相同的降雨情景时,小寨地铁站十字路口处内涝积水深度达到了 0.95 m。本研究建立的模型和 ICM 模型的模拟结果基本一致,表明所建立的模型较为合理。但本研究建立的模型模拟结果偏小,分析原因认为是该内涝风险模型在建立时将汇水流域假设为一个独立的区域,未考虑上游管网在该汇水流域内的溢流量,导致模拟得到的汇水流域内积水量小于 ICM 模型模拟得到的积水量。

当降雨历时采用 60 min 时,本研究建立的模型模拟计算出的设防高程为 1.03 m,较 ICM 模型采用 120 min 降雨历时模拟得出的结果安全,因此本研究提出的设防高程是合理的。

3 模型应用情况

3.1 西安地铁站应用实例

本研究提出的地下空间内涝风险模型已在西安市多条地铁线路应用,结果表明,采用该模型模拟出有积水风险的地铁站点与西安市历史上降雨产生的积水点较为吻合,为模型的验证提供了实例。

西安地铁 2 号线南稍门站位于长安路与友谊路的十字路口处,车站周边道路均有明显分水岭,划分汇水流域面积为 21.40 hm^2 ,根据本研究提出的模型模拟计算出 100 年降雨重现期时的积水深度为 0.86 m。

西安地铁 6 号线纺织城站位于纺北路与柳鸣路十字路口东北角城东汽车站前广场前,车站周边地势整体西高东低、南高北低,周边部分道路有明显的分水岭。纺织城站南侧坡度较大,有多种不同的汇水流域划分方法,但由于溢流水位一定,因此,积水高度一致。选取其中一种汇水流域,确定其面积为 25.73 hm^2 ,根据本研究提出的模型模拟计算出 100 年降雨重现期时的积水深度为 0.39 m。

西安地铁 9 号线芷阳五路站位于临潼国家旅游休闲度假区芷阳五路与凤凰大道十字路口东侧,其中芷阳五路坡向为南高北低,坡度很陡,发生降雨时,径流雨水沿芷阳五路迅速向西临高速方向汇集,此时该站点周边几乎不会产生积水。

通过 CAD 地形图及实地踏勘调查,确定南稍门站周边地形类似于“盆地”,极易积水;纺织城站周

边地形类似于“河谷”，积水深度达到溢流水位时保持不变；芷阳五路站周边地形类似于“山地”，由于坡度陡，几乎不会形成积水。

3.2 汇水流域的划分方法

通过总结大量地铁站周边地形特征，根据市政道路的纵坡坡向以及是否具有明显分水岭，提出 3 种常见的城市地形及其基础汇水流域划分方法。

① “盆地”类地形：当城市重要地下空间周边所有道路（ X 轴方向与 Y 轴方向）都具有明显的变坡点，如图 4(a) 所示，针对这种地形，根据道路纵坡确定出每条道路的分水岭，一条分水岭对应一条流域边界，将 4 条分水岭相连形成一个闭合的区域，该区域便是该地形特点下的基础汇水流域，如图 4(b) 所示。通过大量工程实例调研发现，市政道路的变坡点即分水岭通常位于道路十字路口处，因此该地形特点下的流域边界大多为市政道路，从而基础汇水流域与城市的街区划分基本吻合。

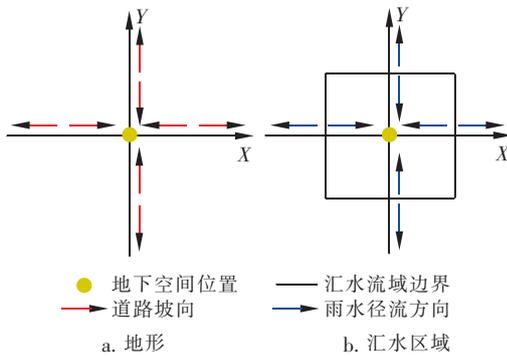


图 4 “盆地”类地形及其汇水流域

Fig. 4 Basin-like topography and its catchment area

② “河谷”类地形：当城市重要地下空间周边一个方向（ X 轴方向）的道路具有明显的变坡点，另一个方向（ Y 轴方向）的道路不具有明显的变坡点或道路纵坡在较大范围内一直为“+”或“-”，如图 5(a) 所示，针对这种地形，首先根据道路纵坡确定出 X 轴方向道路的分水岭，从而得到两条流域边界；由于 Y 轴方向的道路纵坡一直为“-”（或者“+”），因此 Y 轴负半轴方向的道路及街坊产生的径流雨水无法汇入 X 轴道路，从而确定 X 轴道路为一条流域边界；由于 Y 轴正半轴方向的部分街坊的出入口位于 X 轴上，因此以这些街坊 X 方向的边界（非 X 轴）作为一条流域边界。将 4 条流域边界相连形成一个闭合的区域，该区域便是该地形特点下的基础汇水流域，如图 5(b) 所示。

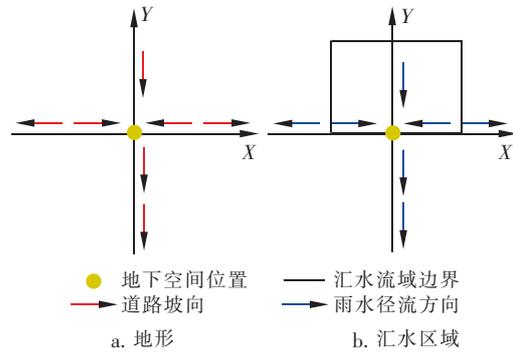


图 5 “河谷”类地形及其汇水流域

Fig. 5 Valley-like topography and its catchment area

③ “山地”类地形：当城市重要地下空间周边所有道路（ X 轴方向与 Y 轴方向）都不具有明显的变坡点，或道路纵坡在较大范围内一直为“+”或“-”，如图 6(a) 所示，在这种地形下产生的径流雨水会在重力作用下不断向低处汇流，地下空间周边几乎不会形成积水。

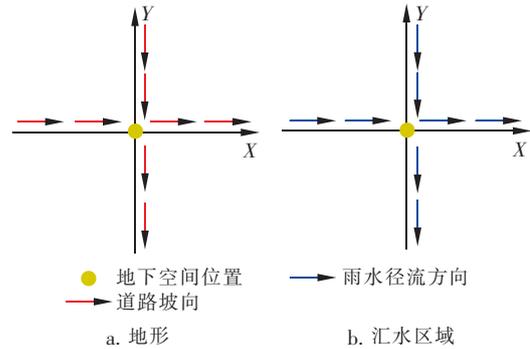


图 6 “山地”类地形及其汇水流域

Fig. 6 Mountain-like topography and its catchment area

综上所述，本研究提出的内涝评估简化模型仅适用于“盆地”类及“河谷”类的地形，对于“山地”类的地形，建议按地下空间相关设计规范处理防淹问题。

4 结论

通过分析城市暴雨积水的过程及特点，将地下空间所处汇水流域简化为倒四棱锥，基于容积法提出一种内涝风险模型。以西安小寨地铁站为实例进行模拟分析，结果表明，输入实测降雨数据时，模拟结果与实测积水深度大致吻合；在 50 年的设计重现期降雨情景下，该简化模型计算得到的积水深度与 InfoWorks ICM 模型的模拟结果基本一致，说明本研究提出的简化模型的模拟结果基本合理，具有一定的工程实际应用价值。同时在大量实际应用的基础

上,总结了3种常见的地形特点,并分别提出了相应的汇水流域划分方法。

但该模型依然存在一定的局限性:①在建立模型时提出“忽略地下排水设施的排水能力”的假设。在发生小重现期降雨时,地下设施的排水能力实际上能够满足地表积水的排放要求,因此,该简化模型在模拟小重现期降雨时可能存在较大偏差,建议在地下空间设计时应满足相关设计规范的基础上,参考本研究模型提出的设防高程。②在建立模型时提出“各个汇水流域相互独立”的假设。当城市发生暴雨形成地面积水时,一部分原因是由于下游管网排水不畅而发生顶托,导致上游管网内的雨水从检查井溢流而出,因此,该模型计算出的积水深度偏小。

参考文献:

- [1] 申若竹. 地下空间洪水入侵的机理及防洪对策研究[D]. 天津:天津大学,2012.
Shen Ruozhu. Study on the Flood Invasion Mechanism and Countermeasures for Flood Control in Underground Space [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012 (in Chinese).
- [2] Zhang S, Pan B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS[J]. Journal of Hydrology, 2014, 517: 260-268.
- [3] 胡坚,赵宝康,刘小梅,等. 镇江市主城区排水能力与内涝风险评估[J]. 中国给水排水,2015,31(1):100-103,108.
Hu Jian, Zhao Baokang, Liu Xiaomei, et al. Assessment of drainage capacity and waterlogging risk in central zone of Zhenjiang City[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(1): 100-103, 108 (in Chinese).
- [4] 方正,刘非,肖雪莲,等. 基于城市综合流域排水模型的地铁站防洪模拟研究[J]. 武汉大学学报:工学版,

2016,49(1):60-65.

Fang Zheng, Liu Fei, Xiao Xuelian, et al. Analysis of inundation of metro station based on integrated catchment management model [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 60-65 (in Chinese).

- [5] 赵庚润,李路,刘新成. 城市民防工程内涝风险研究[J]. 华东师范大学学报:自然科学版,2017(4):160-167,179.
Zhao Gengrun, Li Lu, Liu Xincheng. Study on the local flooding risk in the civil defense projects [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 2017(4): 160-167, 179 (in Chinese).
- [6] 马立山,姚力,张海平,等. 利用DEM划分雨水汇水面积的方法研究[J]. 中国给水排水,2011,27(15):56-59.
Ma Lishan, Yao Li, Zhang Haiping, et al. Research on rainwater catchment area delineation based on DEM [J]. China Water & Wastewater, 2011, 27(15): 56-59 (in Chinese).



作者简介:史悦(1994-),女,陕西咸阳人,硕士研究生,研究方向为城市内涝防治。

E-mail: shiyue_1106@163.com

收稿日期:2019-05-11

节约用水强监管,保护资源补短板