

# 北方地区公交港湾停靠站路段低影响开发研究

孙宝芸<sup>1</sup>,汪子皿<sup>1</sup>,鲁泓麟<sup>1</sup>,董雷<sup>2</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学建筑与规划学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要:**降雨条件下公交港湾式停靠站区域易产生积水,不仅会损害停靠区域路面健康,而且严重影响乘客出行体验与道路通行效率。北方地区城市有其独特的自然地理气候特征,低影响开发措施的设置具有局限性。以分隔带类型的港湾停靠站路段为研究对象,分析了传统港湾停靠站路段雨水处理模式及其存在的问题,结合北方地区道路适用的低影响开发措施,提出了港湾停靠站路段低影响开发设施布局方案,并分析了雨水径流排放机制。通过暴雨洪水管理模型(Storm Water Management Model, SWMM)软件模拟研究路段海绵模式下雨水径流的调控效果,发现研究区域低影响开发设计对雨水径流具有明显的削减和延迟作用。

**关键词:**港湾停靠站;低影响开发;产汇流机制;调控效果

**中图分类号:**U491

**文献标志码:**A

**引用格式:**孙宝芸,汪子皿,鲁泓麟,等. 北方地区公交港湾停靠站路段低影响开发研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(2):185-189.

中国北方地区的国土面积、耕地面积、人口数量分别占全国的64%、60%和46%,但降水总量、水资源总量仅分别占全国的32%和19%。截至2022年10月,中国约有470个城市开展海绵城市建设。通过海绵城市建设,城市抗灾能力显著提高,城市水生态环境明显改善。北方城市有其独特的地理和气候特点,冷热交替,冻融反复,春秋季节风沙较大,雨水较少,因此需要结合地区特征采用适宜的低影响开发设施。

城市道路系统是海绵城市的重要组成部分,也是城市内涝中最脆弱的载体<sup>[1]</sup>。目前,海绵城市建设在北方道路系统中的应用主要集中在低影响开发设施的设置<sup>[2]</sup>、道路径流削减及污染物削减<sup>[3]</sup>等方面。暴雨洪水管理模型(Storm Water Management

Model, SWMM)在城市雨洪模拟中应用广泛。Tsihrintzis等<sup>[4]</sup>运用SWMM模型对南佛罗里达州4块不同土地利用区域的径流量和水质进行了模拟,并通过16场实测降雨事件进行了验证,模拟结果显示了该模型较高的准确性。陈曦等<sup>[5]</sup>利用SWMM模型对咸阳某市政道路采用下沉式绿化带和原状进行了对比分析,结果表明降雨强度不大时,下沉式绿化带对降雨径流和污染物有更好的削减效果。杨利伟等<sup>[6]</sup>构建了透水铺装路面与绿色生态沟渠耦合的灰绿耦合排水系统,提出了排水系统方案并计算了排水能力。李鹏程等<sup>[7]</sup>结合SWMM模型和交通仿真模拟(Simulation of Urban Mobility, SUMO)软件,研究了内涝积水对交通通行能力的影响程度,通过数据分析获得了道路通行最优方案。

目前,城市道路海绵化建设的研究侧重于整体道路低影响开发设施的设置、径流和污染物削减效果分析,而对于北方地区城市道路低影响开发设施的适用性技术与经济合理性分析方面的研究仍需进一步深入。

公交停靠站是城市道路的重要组成部分,也是公交系统与道路系统连接的纽带。港湾式公交停靠站便于公交车停靠,提高了道路通行效率。在降雨情况下,由于港湾式停靠站位于道路横断面的最低处,且缺少单独的排水设计,致使停靠站区域积水严重,影响了公交车的通行效率,且公交车行驶中易造成雨水飞溅,会影响乘客的候车体验。公交车频繁启动与制动既会造成路面疲劳损伤,又会使路面的水损害现象严重,进而影响公交服务质量和道路的服务水平。提高公交运行质量是解决城市交通拥堵和环境污染的重要手段<sup>[8]</sup>。目前,国内外关于公交停靠站的研究主要集中在公交车通行能力、公交服务质量水平、公交可达性及公交与非公交车辆的冲突分析等方面,而对公交停靠站排水系统及其相关影响因素的研究较少。因此,研究以北方地区公交港湾停靠站路段为研究对象,探索一种适用于北方地区海绵城市建设的低影响开发方案。同时,将灰色道路体系与绿色低影响开发设施相结合,为北方地区提供一种精细化的海绵城市建设方案,以解决港湾停靠站区域易积水等问题。

## 一、传统港湾停靠站路段雨水处理模式

公交停靠站的布置有自身几何形式要求,包括停靠站区域平曲线半径、横向坡度及纵向坡度等指标。如果停靠站主体设计和道路坡度二者衔接不足,将导致在停靠站范围内形成道路积水点,致使在降雨过程中产生内涝。因此,停靠站路段建设时要考虑其平面和纵断面等几何形式,以分析是否需要对接停靠站的几何设计做出调整或采取适当的辅助排水措施。

### 1. 平面线形

调查发现,缓和曲线的超高渐变段位置

为平面线形积水路段高发区,《城市道路路线设计规范》(CJJ 193—2012)和《公交专用道系统设计规范》(DG/TJ 08—2172—2015)中规定,为了便于路面排水,超高缓和段的超高渐变率应大于 $1/330$ 。停靠站宜设置在平面线形中的直线段上,停靠站处的圆曲线半径宜大于或等于不设超高的最小半径。若港湾式停靠站设置在具有超高的平曲线上,应尽量避免排水不畅的超高渐变段。

### 2. 纵断面线形

港湾停靠站路段的纵断面线形包括道路纵坡和竖曲线设计两部分。停靠站路段纵坡坡度的大小对停靠站区域排除路面产生的径流量及排除时间有着重要的影响。《城市道路交叉口规划规范》(GB 50647—2011)、《城市道路交叉口设计规程》(CJJ 152—2010)中规定,位于道路交叉口附近的公交停靠站纵坡在非寒冷冰冻区域不宜超过 $2\%$ ,受地形限制时不宜超过 $3\%$ ,在寒冷冰冻区域不宜大于 $1.5\%$ 。《城市道路路线设计规范》(CJJ 193—2012)中规定,为利于道路排水,最小道路纵坡度不应小于 $0.3\%$ ,特殊地形下的纵坡小于 $0.3\%$ 时,应采用专门的排水设施,如锯齿形边沟等。同时,合成坡度过小也会导致停靠站路段排水不畅,进而影响公交车安全行车及停靠。城市道路要求最小合成坡度不宜小于 $0.5\%$ ,故港湾停靠站路段的合成坡度应依据此标准。当停靠站所在路面较平坦时,为了保证在小纵坡情况下路面排水的畅通,可采用加大道路横坡坡度、减小雨水口间距、选择适当的排水口形式、采用透水沥青路面或其他路面排水方式等。

由于相关规范对公交停靠站的纵断面线形没有明确规定,故停靠站可以设置在道路纵断面为竖曲线的路段上。对于大半径凹形竖曲线的底部和凸形竖曲线的顶部会存在道路纵坡小于 $0.3\%$ 的情况,且因路段长度较大,也会引发停靠站路段排水不畅的现象。因此,若停靠站设置在竖曲线上,应避免大半径凹形竖曲线的底部和凸形竖曲线的顶部。

### 3. 港湾停靠站路段与排水系统的衔接问题

目前,港湾式停靠站路段排水多采用

“街沟—雨水口—连接管—市政管网”的灰色雨水排放模式。降雨时路面雨水经过路拱横坡、道路纵坡收集后,通过雨水口排出雨水。雨水口是路面和地下管网之间的重要连通渠道,雨水口的排水效率会直接影响路面的排水效率。同时,雨水口的排水效率又受到道路纵坡、横坡、边沟、路拱形式以及雨水口形式等多方面因素的影响。港湾停靠站路段在建设中,通常与现有道路的平面、纵断面及横向布局保持一致,并未考虑其排水设置相关要求,与现有排水系统的衔接仅依靠雨水口和市政雨水管网的连接。这种单一的排水设计模式在港湾停靠站的规划、设计与施工过程中,经常处于缺失或设置不当的窘境,导致停靠站路段积水现象频发、乘客候车体验不佳等。

二、港湾停靠站路段低影响开发设施布局方案

在海绵城市建设理念下,港湾停靠站路段应将绿色生态低影响开发设施与传统灰色排水系统相耦合,并结合地域性、生态性、人本位等原则,打造独具特色的城市公交港湾停靠站路段雨水排放模式。

1. 低影响开发设施布局方案

低影响开发设施的设置思路是顺应海绵城市建设理念,通过对道路绿地形式、绿植配置、分隔带绿地形式及人行道铺装等道路元素的改变,在自然力量的帮助下排水,形成具有渗透功能的、碎片化的城市道路空间。港湾停靠站路段低影响开发设施设置情况如表 1 所示。

表 1 停靠站路段低影响开发设施设置情况

位置	传统模式	低影响开发模式
人行道	非透水人行道	透水铺装人行道
机动车道	非透水沥青路面	非透水沥青路面
绿化带	普通绿化带	下凹式绿化带
非机动车道	非透水沥青路面	透水沥青路面
公交停靠区	非透水沥青路面	透水沥青路面
路缘石	非开口路缘石	开口路缘石

2. 产汇流分析

降雨发生时,流入公交停靠区域的透水

路面,通过透水路面的渗透作用吸收一部分径流,内部雨水通过路面下的集水沟排入停靠区域两侧设置的下沉式绿化带内。当透水路面蓄水量达到饱和状态时,公交停靠区域产生地表径流,地表径流通过路面坡度作用流向停靠站与站台连接处的边沟里,再由边沟转输至开口式路缘石,流入停靠区域两侧的下沉式绿化带中;非机动车道、人行道降雨通过透水铺装吸收,当路面达到饱和时,同理,雨水会流入人行道与非机动车道之间的下沉式绿化带;当下沉式绿化带土壤蓄水量饱和时,雨水通过绿化带内溢流井流入市政雨水管网系统。

三、雨洪模型的建立

1. 研究区域概况

笔者以沈阳市某主干道港湾停靠站路段为研究区域,路段长度为 100 m,该路段道路机动车道和公交停靠区域横坡为 1.5%、人行道和非机动车道横坡为 1.5%,机动车道、公交停靠区坡度朝向绿化带。停靠站所在路段横断面单侧宽度为 20.5 m,其单侧道路横断面组成包括人行道(宽 3 m)、绿化带(宽 3.5 m)、非机动车道(宽 3.5 m)、公交专用道(宽 3.5 m)及机动车道(宽 7 m)。港湾式公交停靠站组成包括港湾式公交停靠区(宽 3 m、长 35 m)、停靠站站台(宽 2 m、长 35 m)、停靠站减速区(长 25 m)及停靠站加速区(长 30 m)。

2. 子汇水区划分及区域概化

研究仅考虑道路红线范围内的汇水情况,不考虑红线外的雨水环境。根据研究区域的下垫面类型、雨水井和雨水管线的位置以及停靠站横断面组成等因素,经综合分析后分为 5 个子汇水区、1 个节点、1 条管段、1 个出水口。为便于构建与分析 SWMM 模型,需要输入节点部分及连接部分,笔者根据研究区域停靠站的具体规划简化设计了区域的排水管网。子汇水区模型、区域内雨水汇流方向及雨水管道如图 1 所示。

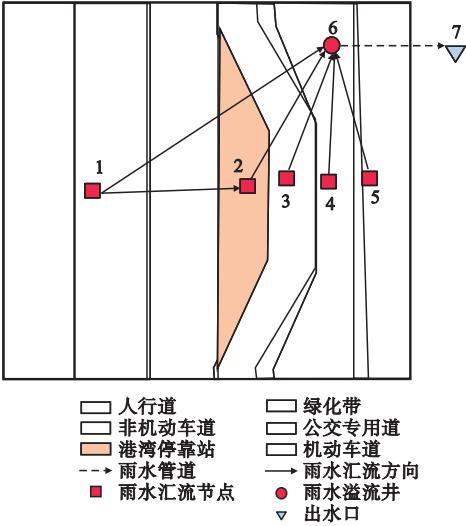


图1 研究区域概化

3. 模型参数设置

(1)降雨参数设置

研究采用芝加哥雨型生成器对设计雨型进行合成,模拟120 min降雨过程,降雨重现期取1 a、3 a、5 a、10 a、20 a,采用沈阳市最新暴雨强度计算公式,得到的降雨量分别为30.306 mm、46.067 mm、53.396 mm、

63.340 mm、73.284 mm。

$$q = \frac{1\,052.768(1 + 1.09\log P)}{(t + 5.9)^{0.667}} \tag{1}$$

式中: $q$ 为平均降雨强度,mm/min; $P$ 为设计降雨重现期,a; $t$ 为设计降雨历时,min。

(2)水文、水力参数设置

基于图1划分的各子汇水区,规划出各子汇水区域的面积、区域长度和宽度等相关参数,得出的子汇水区参数情况如表2所示。

表2 子汇水区参数设置

子汇水区编号	面积/m <sup>2</sup>	长度/m	宽度/m
1	5 250	500	10.5
2	187.5	90	3.5
3	1 800	500	3.5
4	1 200	500	3.5
5	1 500	500	3.0

结合研究区域土壤类别、自然地表特征,并参考SWMM用户手册以及相关文献对曼宁粗糙率系数、地表洼蓄深度参数、Horton下渗模型参数等水文和水力参数进行率定<sup>[9]</sup>,其率定结果如表3所示。

表3 水文、水力参数率定结果

不透水区曼宁系数	透水区曼宁系数	管道粗糙率	不透水洼蓄深度/mm	透水洼蓄深度/mm	无洼地不透水区占比/%	最大入渗率/mm·h <sup>-1</sup>	最小入渗率/mm·h <sup>-1</sup>	衰减系数/h <sup>-1</sup>	排干系数/d
0.012	0.13	0.013	2	7	25	25	1.02	4	7

(3)低影响开发参数设置

研究路段低影响开发设施由下沉式绿化带、透水铺装、透水路面等组成<sup>[10]</sup>,结合研究路段下垫面情况、区位特点、地形和气候条件,根据SWMM模型用户手册和相关研究<sup>[11]</sup>确定参数取值,下沉式绿化带土壤层厚度为500 mm,孔隙率取0.50,产水能力取0.170,枯萎点取0.078,导水率取14.4 mm/h,导水率坡度取9,吸水头取98.92 mm;透水

铺装路面层厚度取100 mm,孔隙率取0.20,渗透率取360 mm/h;透水路面路面层厚度取100 mm,孔隙率取0.25,渗透率取200 mm/h;下沉式绿化带蓄水高度为100 mm,孔隙率取0.15,渗水速率取1.02 mm/h;透水铺装蓄水高度为100 mm,孔隙率取0.15,渗水速率取1.02 mm/h;透水路面排水系数和排水指数分别取3.3和0.5。表面层各项参数率定结果如表4所示。

表4 表面层低影响开发参数率定结果

低影响开发设施	蓄水深度/mm	植被覆盖率/%	曼宁 $n$ 值	表面坡度/%
下沉式绿化带	100	17	0.150	1.5
透水铺装	2	0	0.011	1.5
透水路面	2	0	0.015	1.5



4. 模型结果分析

(1) 停靠站路段整体径流状况分析

根据降雨、水文和水力参数及低影响开发

参数,分别模拟 1 a、3 a、5 a、10 a、20 a 降雨重现期下停靠站传统模式和低影响开发模式下的雨洪情况,其雨洪控制效果如表 5 所示。

表 5 不同方案的雨洪控制效果

降雨重现期/a	总降雨量/mm	地表径流/mm		径流总量控制率/%	
		传统模式	海绵模式	传统模式	海绵模式
1	30.306	27.995	18.687	7.62	38.34
3	46.067	43.743	29.860	5.05	35.18
5	53.395	51.069	35.126	4.36	34.21
10	63.340	61.011	42.388	3.68	33.08
20	73.284	70.953	52.037	3.18	28.99

结果表明:在不同降雨重现期下,与传统建设模式相比,低影响开发模式停靠站路段地表径流分别减少了 33.25%、31.74%、31.22%、30.52%、26.66%,径流总量控制率分别达到了 38.34%、35.18%、34.22%、33.09%、28.99%,这说明在低影响开发模式下,港湾式停靠站路段对于径流总量的控制能起到明显效果。

(2) 停靠站路段出水口径流状况分析

分别模拟 1 a、3 a、5 a、10 a、20 a 降雨重现期下停靠站路段两种开发模式下的径流情况,两种开发模式的不同重现期出水口总流量的情况对比如图 2 所示。

选用不同的降雨重现期对两种方案的

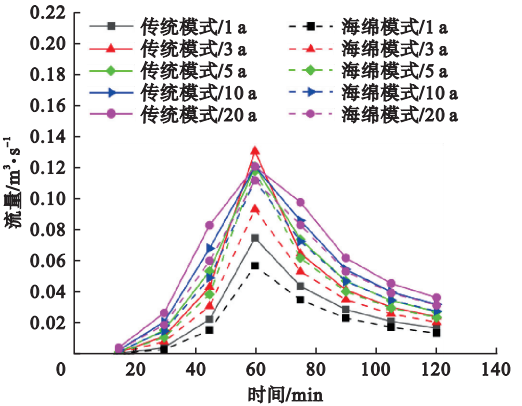


图 2 两种模式的出水口总流量对比  
排水能力进行模拟,得到不同重现期下出水口节点峰值、峰现时间、出流总量指标,具体结果如表 6 所示。

表 6 两种模式下的出水口流量

降雨重现期/a	峰值/ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		峰现时间		出流总量/ $10^6 \text{ L}$	
	传统模式	海绵模式	传统模式	海绵模式	传统模式	海绵模式
1	0.104	0.063	00:54:00	00:55:00	0.277	0.185
3	0.131	0.113	00:56:00	01:04:00	0.402	0.295
5	0.131	0.118	00:59:00	01:08:00	0.444	0.336
10	0.132	0.120	01:06:00	01:11:00	0.496	0.383
20	0.132	0.121	01:10:00	01:15:00	0.543	0.447

经分析,在 1 a、3 a、5 a、10 a、20 a 降雨重现期下,低影响开发模式与传统模式相比,低影响开发模式下水口节点洪峰流量分别减少了 39.42%、13.74%、9.92%、9.09%、8.33%;出流总量分别减少了 33.21%、26.62%、24.32%、22.78%、17.68%。出水口流量峰值出现时间与传统开发模式相比,有一定程度的延迟。

四、结 语

通过分析传统港湾式停靠站路段的几何

形式、排水系统的衔接以及雨水处理模式,提出了港湾停靠站路段低影响设施布局方案并进行了产汇流机制分析。基于 SWMM 模型对传统和低影响开发两种模式下径流总量、出水口峰值流量以及出流总量进行了模拟分析,发现低影响开发模式下的港湾停靠站路段对雨水径流具有明显的削减作用。但随着降雨强度增大,径流削减率会随之降低,这说明雨水径流控制效果会随着降雨强度增大而减弱。根据 SWMM 模型出水口流量的模拟对比结果,在不同降雨重现期下,低影响开发

模式的出水口流量峰值出现时间与传统开发模式相比有所延迟。

参考文献:

[1] ZHOU J, SHEN J, ZANG K, et al. Spatio-temporal visualization method for urban waterlogging warning based on dynamic grading [J]. ISPRS international journal of geo-information, 2020, 9(8): 471.

[2] ZHANG L, LU Q, DING Y, et al. Design and performance simulation of road bioretention media for sponge cities [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2018, 32(5): 04018061.

[3] WEI C, WANG J, LI P, et al. A new strategy for sponge city construction of urban roads: combining the traditional functions with landscape and drainage [J]. Water, 2021, 13(23): 3469.

[4] TSIHRINTZIS V A, HAMID R. Runoff quality prediction from small urban catchments using SWMM [J]. Hydrological processes, 1998, 12(2): 311 – 329.

[5] 陈曦,熊鸿斌,杜浩强,等. 基于 SWMM 的某市政道路降雨径流和水质分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版). 2022(7): 967 – 973.

[6] 杨利伟,王岩松,程舜媛,等. 基于 SWMM 的透水铺装道路与生态沟渠耦合的排水系统削峰控污研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(9): 142 – 151.

[7] 李鹏程,李昊洋. 基于城市雨洪模型的内涝交通影响研究[J]. 水电能源科学, 2017(5): 62 – 65.

[8] ALKHARABSHEH A, MOSLEM S, OUBAHMAN L, et al. An integrated approach of multi-criteria decision-making and grey theory for evaluating urban public transportation systems [J]. Sustainability, 2021, 13(5): 2740.

[9] 冉小青,李元松,卓浩,等. 基于 SWMM 模型的海绵城市道路雨洪控制方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2020, 62(2): 40 – 43.

[10] 初亚奇,王曦,曹晓妍,等. 城市内涝风险模拟与预警研究进展及展望[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2023, 25(2): 180 – 185.

[11] 卓浩,王云,李元松,等. 基于 SWMM 的海绵道路典型 LID 设施布局影响分析[J]. 公路, 2019, 64(7): 1 – 7.

Low-Impact Developments Study for Bus Bay-Style Station Segments in the Northern Regions

SUN Baoyun<sup>1</sup>, WANG Zimin<sup>1</sup>, LU Honglin<sup>1</sup>, DONG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Architecture and Urban Planning, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The bus bay-style station areas are prone to water accumulation under rainfall conditions, which not only damages the pavement’s integrity but also significantly impacts passengers’ travel experience and road traffic efficiency. Cities in the northern region possess unique natural, geographical, and climatic characteristics, imposing limitations on the implementation of low-impact developments. This study focuses on the non-separated belt type of bus bay-style station segments and analyzes the conventional rainwater management practices and associated challenges. By incorporating appropriate low-impact development measures suitable for the road conditions in the northern region, a layout plan for low-impact development facilities in the bus bay-style station segments is proposed, accompanied by an analysis of rainwater runoff discharge mechanisms. Using the SWMM software, the regulatory effects of rainwater runoff under the sponge model in the study area are simulated, revealing that the low-impact development design significantly reduces and delays the flow of rainwater runoff in the research region.

**Key words:** bus bay-style station; low-impact development; runoff generation and confluence mechanisms; regulatory effects