

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.261

引用格式:邵知宇,任宇亭,孙卓,等.道路大排水交叉口流场高精度降维表征模型[J].重庆大学学报,2025,48(6):1-13.



道路大排水交叉口流场高精度降维表征模型

邵知宇^{1a,1b},任宇亭^{1a,1b},孙卓^{1a,1b},徐雷^{1a,1b},冯旺^{1a,1b},
张琦^{1a,1b},龚华凤²,柴宏祥^{1a,1b}

(1. 重庆大学 a.三峡库区生态环境教育部重点实验室;b.环境与生态学院,重庆 400044;
2. 林同棧国际工程咨询(中国)有限公司,重庆 400045)

摘要:极端降雨情况下,城市道路作为地表行泄通道联合雨水管道有组织地高效排放洪涝,是一种经济高效的内涝防治技术。但道路交叉口的分流缺乏可用计算工具,难以确定下游路段排涝流量而导致该技术应用存在障碍。本研究以城市道路T型交叉口为对象,分别针对自由出流、主路顶托、两端顶托3种下游边界条件,开展了水工试验和计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟试验,使用所获取数据构建了高精度低阶的交叉口流量分配模型,计算误差在±15%以内。该模型可为工程应用提供简明计算工具,而且可以与国内外广泛应用的一维城市雨洪模型(stormwater management model, SWMM)耦合提高其对交叉口节点计算精度以进行道路大排水设计。

关键词:内涝防治;极端降雨;道路大排水;交叉口;计算流体力学

中图分类号:TU997

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2025)06-001-13

A high-precision low-order intersection flow distribution model for road major drainage

SHAO Zhiyu^{1a,1b}, REN Yuting^{1a,1b}, SUN Zhuo^{1a,1b}, XU Lei^{1a,1b}, FENG Wang^{1a,1b}, ZHANG Qi^{1a,1b},
GONG Huafeng², CHAI Hongxiang^{1a,1b}

(1a. Key Laboratory of Ecological Environment of Ministry of Education of Three Gorges Reservoir Area;
1b. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. T. Y. Lin
International Engineering Consulting (China) Co., Ltd., Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: During extreme rainfall events, urban roads can function as surface runoff conduits when integrated with drainage systems, providing a cost-effective flood mitigation solution. However, the lack of reliable computational tools for modeling flow diversion at road intersections makes it challenging to accurately estimate drainage flow, limiting broader application of this technique. This study focuses on T-shaped intersections in urban road networks and conducts both hydraulic experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations under three distinct downstream boundary conditions: free outflow, backwater at the main road end, and

收稿日期:2024-01-07 网络出版日期:2024-05-09

基金项目:国家自然科学基金(面上)资助项目(52070027)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (General Program) (52070027).

作者简介:邵知宇(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事城市排水防涝、雨洪模型等方面研究,(E-mail)shaozhiyu@cqu.edu.cn。

backwater at both road ends. Based on the obtained data, a high-precision, low order flow diversion model for intersections is developed, with a calculation error basically within $\pm 15\%$. The proposed model provides a simple and practical tool for engineering applications and can be seamlessly integrated into the widely used one-dimensional urban hydrological model SWMM (storm water management model). This integration significantly enhances the accuracy of flow distribution calculations at intersection nodes, enabling more precise design of the large-scale road major drainage system.

Keywords: waterlogging prevention; extreme storm; road major drainage system; intersections; CFD

近年来,受城镇化及全球气候变化的影响,极端降雨事件频繁发生^[1],严重威胁人员生命安全和经济发展,成为中国如北京^[2]、郑州^[3-4]等城市存在的通病之一^[5]。城市道路大排水系统是利用道路的较大过水断面,在极端暴雨下排放洪涝流量以提高城市内涝防治重现期的排水系统^[6-7]。国务院文件^[8]及行业标准^[9-10]均明确提出合理规划利用次要道路等构建雨洪行泄通道,提高城市排涝能力。

如果道路所承担的流量超过其安全流量阈值,将可能造成行人失稳、车辆翻转等危害^[11-12]。为保障道路安全排涝,需要精确预测道路交叉口的流量分配,而目前对道路交叉口的分流计算缺乏高效快速精准的工具,其瓶颈在于如何将交叉口处的复杂三维流场用一种高精度的低阶计算方法表征。

交叉口流场的强三维结构与交叉口的设计参数相关,还与入流流量、下游水深边界条件等运行参数相关,例如 Nanía 等^[13]的研究表明渠道纵坡和入流流量对交叉口流量分配有巨大影响;Wang 等^[14]发现转弯半径将显著改变交叉口内的流线分布;Feng 等^[15]发现入流流量、下游边界条件及道路交叉口转弯半径、宽度比、纵坡等均影响交叉口流量分配结果。

现有的二维、三维水力模型包括 DHI MIKE21、Ansys FLUENT 等存在建模过程复杂、不能满足极端降雨情境下及时快速反馈的应急需求等问题。美国环保局 (Environmental Protection Agency, EPA) 研发的 Stormwater Management Model (SWMM) 模型是国内外城市洪涝最常用的计算软件^[16],可以对单个道路路段以及城市管道同步进行快速精确的水力计算^[17]。然而,SWMM 是一维模型,对于道路交叉口节点的强三维流场计算误差大,影响道路排涝安全性^[18]。工程应用迫切需要高精度低阶的交叉口流量分配计算工具。

因此,笔者以城市“一进两出”T 字型道路交叉口为研究对象,开展水工试验及三维计算流体力学 (CFD) 数值试验,试验融入了道路横坡、纵坡、转弯半径等道路交叉口的三维物理特征。基于试验结果构建了道路大排水交叉口高精度低阶流量分配模型。所构建的交叉口节点模型可单独应用,或者与一维 SWMM 道路路网模型进行耦合,可显著提高现有流量分配计算方法在交叉口节点处的精度。

1 材料与方法

开展水工试验及三维计算流体力学数值试验,如图 1 所示,试验融入了道路横坡、纵坡、转弯半径等道路交叉口的三维物理特征以研究 T 型道路交叉口的流量分配。水工试验以及 CFD 数值试验的结果用于构建高精度低阶流量分配模型。

1.1 交叉口水工试验

以城市最常见的双向两车道单幅路为原型,搭建了具有道路横坡和转弯半径的 T 型道路交叉口试验装置,开展了水工试验,装置如图 1(a) 所示。原型道路宽 7 m、道路横坡 1.5%。试验装置基于弗劳德数相似准则,将原型道路交叉口按比例缩放,比例为 70/9。装置主体由 1 个交叉口及 3 条道路组成,分别为主路上游、主路下游及支路。整个道路框架由 PVC 板制作,道路底部由水泥平滑敷设而成。试验装置 3 条道路长度均为 1 m,宽度为 0.9 m,交叉口转弯半径设置为 0.6 m。各条道路均可单独调整其纵坡,调整范围为 0%~5%。流量采用电磁流量计进行测量,测量精度为 0.5%,水深采用钢尺测量,在内选取若干断面,布设水深监测点 (见图 1),测量精度 1 mm。

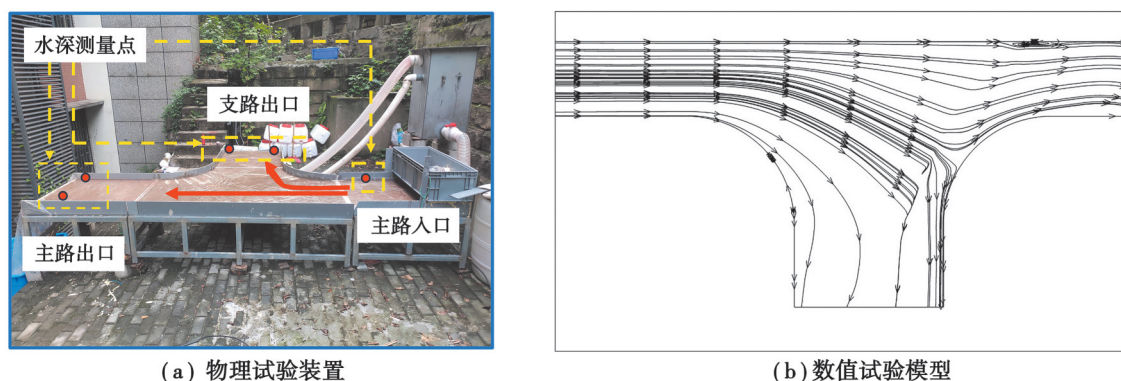


图1 物理及数值试验

Fig. 1 Hydrodynamic setting up and numerical model

根据Feng等^[15]的研究结果,道路下游边界条件可能改变道路交叉口内的流场,从而影响交叉口的分流情况。因此,考虑了3种典型的边界条件(自由出流、主路顶托、两端顶托),各边界条件定义如下。

- 1)自由出流边界条件:主路及支路下游自由出流,下游边界条件对交叉口流场不产生影响;
- 2)主路顶托边界条件:支路下游自由出流,主路下游积水,针对不同的水深,对交叉口流场产生影响;
- 3)两端顶托边界条件:主路及支路均下游积水,针对不同的水深,对交叉口流场产生影响。

水工试验有效数据76组,如表1所示,其中包括自由出流工况39组(坡度1%、3%和5%时,分别调整入流流量各获得13组)、主路顶托工况13组(主路末端堰板高30 mm和25 mm时,分别调整入流流量各获得5组和8组)、两端顶托工况24组(两端末端堰板高40 mm和60 mm时,分别调整入流流量各获得12组)。

表1 水工试验变量设计

Table 1 Independent variables design for hydrodynamic experiment

边界条件	自变量	取值
自由出流	主路、支路道路坡度/%	1、3、5
主路顶托	主路下游积水深度/mm	25、30
两端顶托	主路、支路下游积水深度/mm	40、60

1.2 交叉口CFD数值试验

由于水工试验所测试的工况有限,故构建了计算流体力学模型,如图1(b)所示,以覆盖更加完整的设计参数及运行工况范围。采用Ansys FLUENT 19.0,求解三维RANS Navier-Stokes方程

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}), \quad (2)$$

式中: u_i 为微原点在 x_i ($i=1,2,3$)方向上的平均速度; p 为微原体压强; ρ 为流体密度; ν 为流体运动黏度; $\overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺平均应力。

在CFD模型构建过程中,采用了鸿业市政道路进行交叉口高程计算线的设计,使用SCDM进行道路交叉口三维模型的构建。道路交叉口网格的划分采用ICEM实现,网格数量约为20万~50万。计算网格导入FLUENT中,进行了流场的计算。入流边界划分为空气入口和水入口边界,空气入口设置为压力入口,水入口设置为速度入口。出口边界设置为压力边界,无回流。初始计算时间步长0.001 s,待计算稳定后进行调整为0.01 s。

CFD数值试验总计获得644组数据,如表2所示。在自由出流工况下,当主路支路宽度比 b 为0.5和1时,析因试验结果表明道路横坡对流量分配作用不显著,因此,对主路入流流量、转弯半径、道路纵坡3因素采用4水平进行全因次试验各获得64组;当宽度比为2时,由于道路横坡交互作用显著,对主路入流流量、转弯半

径、道路纵坡、道路纵坡4因素采用3水平进行全因次试验获得81组,总计获自由出流工况数据209组。在主路顶托工况下,析因试验结果表明坡度已无影响,试验在3个宽度比下分别对主路入流流量、转弯半径、主路下游相对堰高3因素采用4水平进行全因次试验各获得64组,总计获得主路顶托工况192组;在两端顶托工况下则将各水平减少为3个,对宽度比、主路入流流量、转弯半径、道路下游相对堰高4因素进行全因次试验获得81组,总计获得两端顶托工况243组。

表2 水工试验变量设计

Table 2 Independent variables design for hydrodynamic experiment

边界条件	自变量	取值
自由出流	主路:支路宽度比	0.5、1、2
	主路入流流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	10、20、30、40
	转弯半径/m	1.3、2、2.6、3.2
	道路纵坡/%	0.3、1、3、5
	道路横坡/%	1、1.5、2
主路顶托	主路:支路宽度比	0.5、1、2
	主路入流流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	10、20、30、40
	转弯半径/m	1.3、2、2.6、3.2
	主路下游相对堰高	0.25、0.5、0.75、1
两端顶托	主路:支路宽度比	0.5、1、2
	主路入流流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	10、20、40
	转弯半径/m	1.3、2、3.2
	道路下游相对堰高	0.25、0.35、0.5

1.3 流量分配模型构建方法

半经验模型的构建采用了多元线性及非线性回归2种方式。各流动状态下的数据采用八二原则,其中80%作为训练集用于模型拟合,20%用作验证集进行模型校验。首先,在不同的边界条件下,对不同的道路设计参数及水力参数组合首先进行变量显著性分析,以确定具有显著影响的变量组合,使用的软件为IBM SPSS Statistics。其次,针对各边界条件下具有显著影响的变量组合,在SPSS中进行多元线性回归,在Python中进行多元非线性回归,以获得具有最佳效果的模型。最后,采用20%的验证集数据对模型进行检验,分析模型的误差情况。

1.4 模型评价指标

模型的拟合效果采用纳什系数(NSE)和均方根误差(RMSE)2个指标进行衡量。

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (Y_{\text{预测值}} - Y_{\text{实际值}})^2}{\sum (Y_{\text{实际值}} - \bar{Y}_{\text{实际值}})^2}, \quad (3)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (Y_{\text{预测值}} - Y_{\text{实际值}})^2}, \quad (4)$$

式中: $Y_{\text{预测值}}$ 为所提出模型的预测值; $Y_{\text{实际值}}$ 为实测数据值; N 为试验工况数。对NSE指标,其范围为负无穷到1,NSE越接近1表明模型可信度越高;对RMSE指标,其范围为0到正无穷,RMSE越接近0表明预测值与实测值越接近,误差越小。

2 结果与讨论

2.1 自由出流边界条件下流量分配模型

2.1.1 参数组合选取

道路交叉口分流比 R_q 会受到道路设计参数及水力参数两类参数的作用。道路的常用设计参数包括道路

纵坡 i 、道路横坡 s 、道路宽度比 $b=B_s/B_u$ (B_s 为支路宽度, B_u 为主路宽度, 单位为 m), 转弯半径 R_t (单位为 m), 而水力参数包括入流流量 Q_u (单位为 m^3/s)、入流水深 H_u (单位为 m)、入流流速 V_u (单位为 m/s)、入流弗劳德数 Fr 。

在相关参数的选取上, 道路设计参数应当被全部考虑, 而水力参数之间则往往可以被互相表示, 因此可以采用有代表性的水力参数作为影响分流比的相关水力参数。比较典型的水力参数是入流水深 H_u 和入流流量 Q_u 这两类参数, 前者包含了水力现象在空间尺度上的特征, 而后者包含了水力现象在时间尺度上的特征, 可以通过这两类参数推算其他水力参数, 并且在水工试验中, 这两类参数也是较为容易测量获得的实际值。

根据曼宁公式, 在明渠流中道路坡度、糙率以及流速之间存在以下关系

$$v = \frac{1}{n} \cdot R_d^{\frac{2}{3}} \cdot i^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

式中: n 为道路糙率; R_d 为道路水力半径; i 为道路纵坡; v 为道路水流流速。

根据连续性方程, 流量和流速之间存在以下关系

$$Q = v \cdot h \cdot B, \quad (6)$$

式中: Q 为道路水流流量; v 为道路水流流速; h 为道路平均水深; B 为过水断面平均宽度。

根据明渠流理论, 表示流动状态的流速和水深可以通过弗劳德数计算进行归一化。

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gh}}, \quad (7)$$

式中: Fr 为入流弗劳德数; v 为道路水流流速; g 为重力加速度, 取 9.81 m/s^2 ; h 为道路平均水深。

利用这些已有变量关系, 可减少后续分析中变量因素数量。综合考虑, 采用了入流水深 H_u 、入流流量 Q_u 以及水工试验中常用的弗劳德数 Fr 3 种参数作为代表性的水力参数。最终影响道路流量分配的独立因素包括: b 、 i 、 s 、 R_t 、 Q_u 、 H_u 、 Fr 。

为构建标准化模型, 使用主路宽度 B_u 及重力加速度 g (值为 9.81 m/s^2) 对模型涉及的各个变量进行无量纲化。以式(8)~(11)对宽度比 b 、转弯半径 R 、上游无量纲水深 H 、上游无量纲流量 Q 进行无量纲化。

$$b = \frac{B_s}{B_u}, \quad (8)$$

$$R = \frac{R_t}{B_u}, \quad (9)$$

$$H = \frac{H_u}{B_u}, \quad (10)$$

$$Q = \frac{Q_u}{\sqrt{gB_u^5}}, \quad (11)$$

式中: B_u 为入流主路宽度, m ; B_s 为侧流支路宽度, m ; R_t 为交叉口转弯半径, m ; H_u 为入流主路水深, m ; Q_u 为入流主路流量, m^3/s ; g 为重力加速度, 9.81 m/s^2 。弗劳德数 Fr 已无量纲, 保留了原有形式。此外, 考虑到工程上的使用习惯, 对道路横坡 s 及纵坡 i 保留了百分制下的形式, 如 1% 的坡度在构建的流量分配模型时直接写作 1 而非 0.01。最终得到关于流量分配比 R_q 的无量纲方程为

$$R_q = f(b, i, s, R, H, Q, Fr). \quad (12)$$

2.1.2 影响因子显著性分析

在 2.1.1 节中选择的自变量可能存在实际影响不显著的情况, 构建的交叉口流量分配模型精度将受到制约。为研究各个自变量实际对交叉口流量分配的影响情况, 将自由出流下的流量分配数据 248 组 (水工试验 39 组, CFD 试验 209 组) 导入 SPSS 中, 利用方差分析对参数变量进行显著性分析, 筛选出对流量分配比具有显著影响的参数。

对公式(12)的参数进行的多因素方差分析系数表如表 3 所示。由表 3 可以看出, 宽度比 b 、纵坡 i 、横坡 s 、转弯半径 R 和入流流量 Q 的显著性 P 值均小于 0.05, 说明上述几个变量对流量分配比 R_q 产生显著影响; 而入流水深 H 和入流弗劳德数 Fr 显著性 P 值分别为 0.082 和 0.168, 显著性 P 值大于 0.05 说明入流水深 H 和入流弗劳德数 Fr 对 R_q 不产生显著影响, 因此, 在构建分流模型时应当对这些参数予以剔除, 直到模型中所包含的所有自变量均能够对 R_q 产生显著影响。

表3 方差分析系数表
Table 3 ANOVA coefficient table

模型	未标准化系数		显著性
	系数	标准错误	
常量	0.311	0.041	0.000
b	0.221	0.012	0.000
i	-0.042	0.010	0.000
s	-0.057	0.021	0.006
R	0.080	0.006	0.000
H	-4.208	2.412	0.082
Q	-28.434	8.902	0.002
Fr	0.022	0.016	0.168

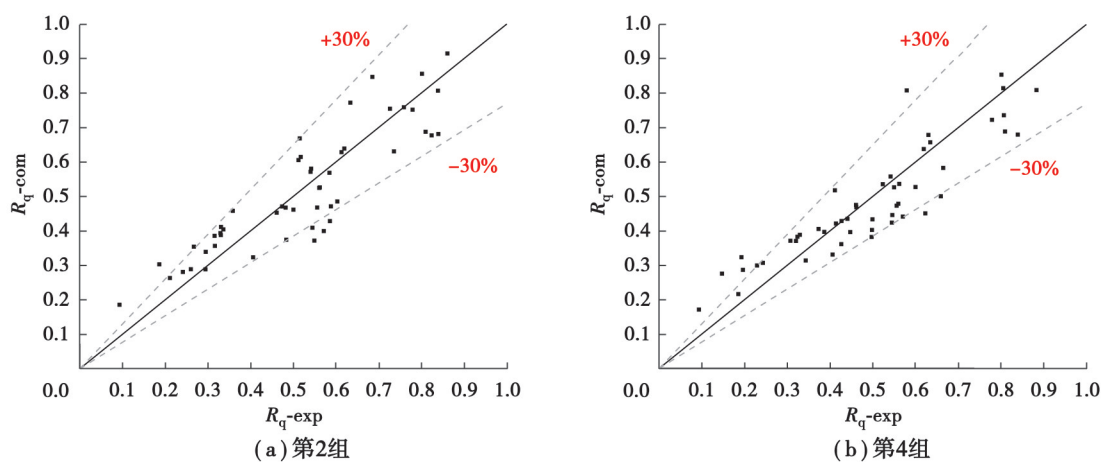
通过对式(12)中的所有参数进行组合,可以得到7组包含道路设计参数及水力参数的组合(见表4),而上述方差分析对应表4中的组合1。对7种参数组合均进行显著性分析后,可以确定第2组、第4组、第5组、第6组变量组合会显著影响流量分配。

表4 自由出流边界下的无量纲参数组合
Table 4 Combinations under free flow boundary

序号	参数组合	显著性
1	$f(b, i, s, R, H, Q, Fr)$	不显著
2	$f(b, i, s, R, H, Q)$	显著
3	$f(b, i, s, R, H, Fr)$	不显著
4	$f(b, i, s, R, Q, Fr)$	显著
5	$f(b, i, s, R, H)$	显著
6	$f(b, i, s, R, Q)$	显著
7	$f(b, i, s, R, Fr)$	不显著

2.1.3 流量分配模型构建

将自由出流下248组数据进行乱序随机组合,以具有显著性影响的4组参数组合分别构建198组训练集数据和50组验证集,进行多元线性回归和多元非线性回归,最终各组合的验证结果如图2及图3所示。



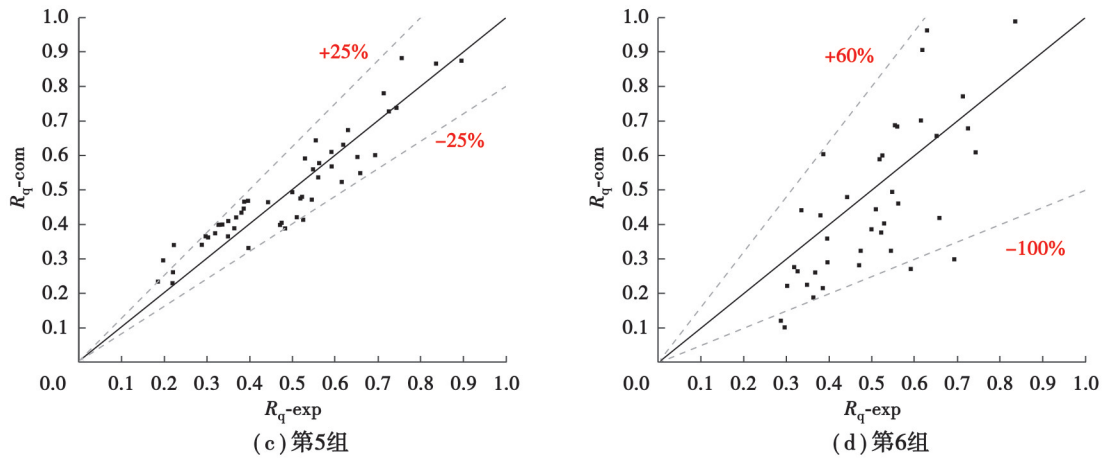


图2 自由出流边界条件下多元线性回归结果

Fig. 2 Multiple linear regression results under free outflow boundary

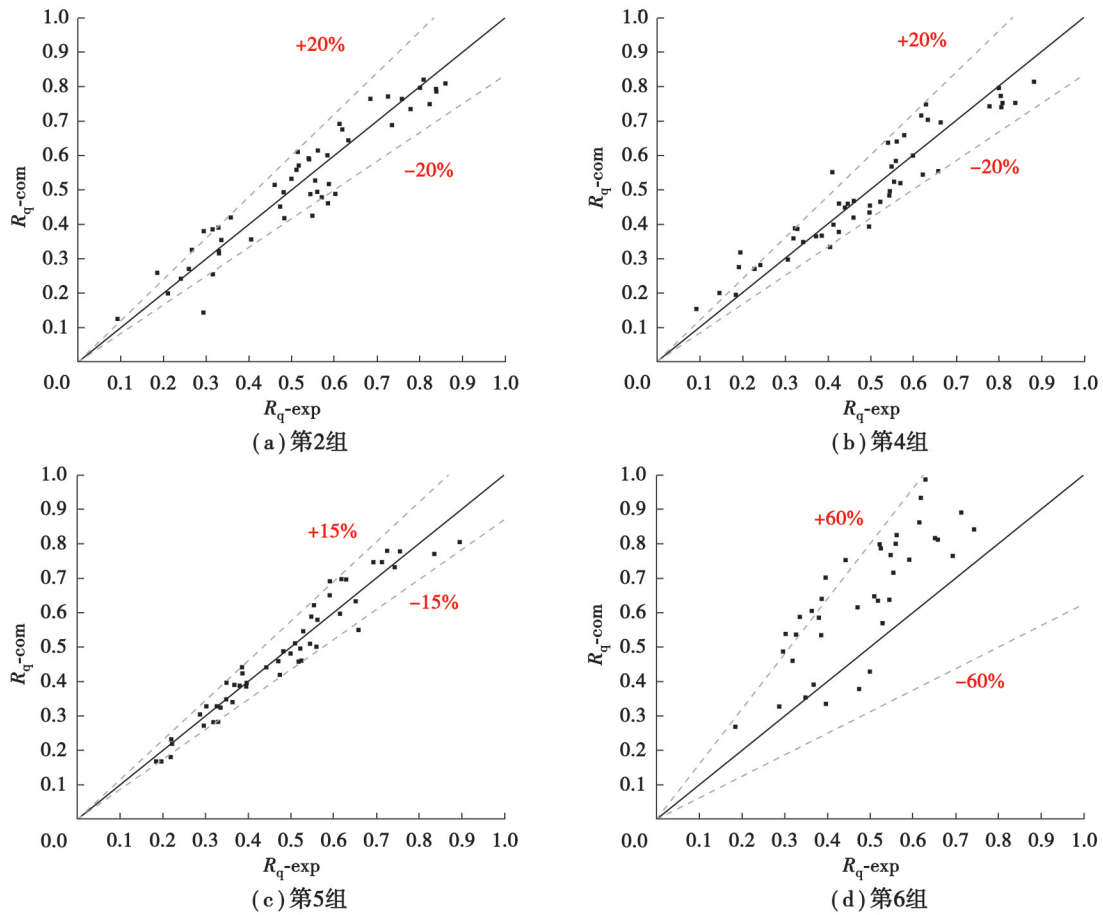


图3 自由出流边界条件下多元非线性回归结果

Fig. 3 Multiple nonlinear regression results under free outflow boundary

由于道路交叉口的各个参数之间存在着广泛的交互作用,其对交叉口流量分配的影响并非简单的线性关系,多元线性回归的效果较差。通过图3的拟合结果也可以看到,无论是哪种变量组合,其多元非线性回归处理后的模型精度均优于多元线性回归处理。

由表5可得,第5组变量组合在多元非线性回归处理后的模型NSE为0.934, RMSE为0.04,计算精度最高,构建自由出流下的流量分配模型为

$$R_q = 0.005 - 0.041bR - 2.997iH + 0.574b + 0.244R + 9.818bH - 0.148b^2 - 0.024R^2 - 20.496H - 0.015is。 \quad (13)$$

表5 自由出流边界条件下流量分配模型误差
Table 5 Model errors under free outflow boundary

编号	参数组合	多元线性		多元非线性回归	
		NSE	RMSE	NSE	RMSE
2	$f(b, i, s, R, H, Q)$	0.781	0.090	0.897	0.06
4	$f(b, i, s, R, Q, Fr)$	0.801	0.080	0.894	0.06
5	$f(b, i, s, R, H)$	0.861	0.060	0.934	0.04
6	$f(b, i, s, R, Q)$	-0.070	0.180	-2.610	0.32

2.2 主路顶托边界条件下流量分配模型

2.2.1 参数组合选取

根据试验结果发现,在主路顶托边界条件下,交叉口内流场呈亚临界流态,道路坡度此时已经对分流无显著影响,而由下游积水导致的相对堰高影响较大。

$$\text{相对堰高} = \frac{\text{交叉口出口堰高}}{\text{交叉口入口高程} - \text{交叉口出口高程}} \quad (14)$$

与自由出流下的处理一致,先将参数变量进行无量纲化,得到关于流量分配比 R_q 的无量纲方程

$$R_q = f(b, R, W_d, H, Q, Fr) \quad (15)$$

2.2.2 影响因子显著性分析

在主路顶托边界条件下,部分数据由于 R_q 已经达到1而被舍弃,故流量分配数据共计205组,包括13组水工物理试验实测数据和192组三维CFD模型模拟数据。同样按照2.1.2节方法处理,对式(15)中无量纲自变量进行重组,得到7组参数组合(见表6),对各参数组合分别在SPSS中进行显著性分析,确定第3组、第5组、第6组、第7组变量组合会显著影响流量分配。

表6 主路顶托边界下的无量纲参数组合
Table 6 Combinations under backwater at main road end boundary

序号	参数组合	显著性
1	$f(b, R, W_d, H, Q, Fr)$	不显著
2	$f(b, R, W_d, H, Q)$	不显著
3	$f(b, R, W_d, H, Fr)$	显著
4	$f(b, R, W_d, Q, Fr)$	不显著
5	$f(b, R, W_d, H)$	显著
6	$f(b, R, W_d, Q)$	显著
7	$f(b, R, W_d, Fr)$	显著

2.2.3 流量分配模型构建

将主路顶托下148组数据进行乱序随机组合,以具有显著性影响的4组参数组合分别构建118组训练集数据和30组验证集,进行多元线性回归和多元非线性回归,验证结果如图4及图5所示。可以看到,无论是哪种变量组合,其多元非线性回归处理后的模型精度均优于多元线性回归处理。对各参数组合下的NSE和RMSE计算如表7所示。

通过表7可以看到,第3组变量组合在多元非线性回归处理后的模型NSE为0.965, RMSE为0.04,计算精度最高。因此构建主路顶托下的流量分配模型如式(16)所示。

$$R_q = 1.039 + 0.104bW_d - 0.144R - 6.729HFr + 0.259W_dR + 0.197bFr - 0.138b^2 + 0.422W_d^2 - 29.259W_dH + 0.154RFr - 0.045bR + 0.331b - 0.65Fr \quad (16)$$

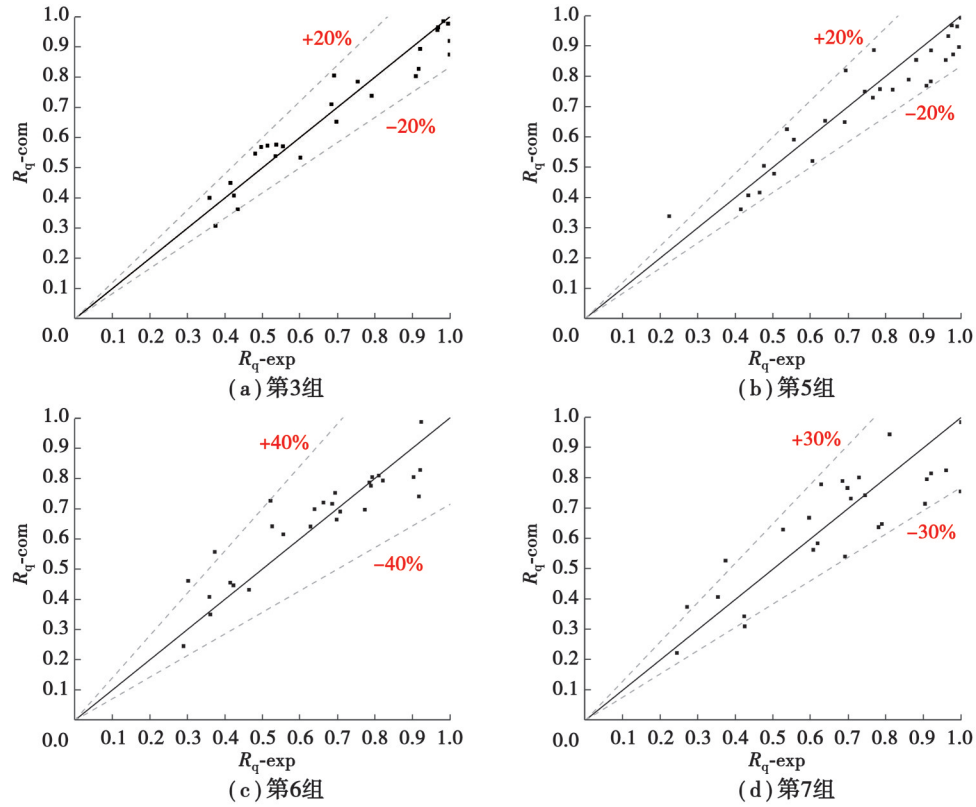


图 4 主路顶托边界条件下多元线性回归结果

Fig.4 Multiple linear regression results under backwater at main road end boundary

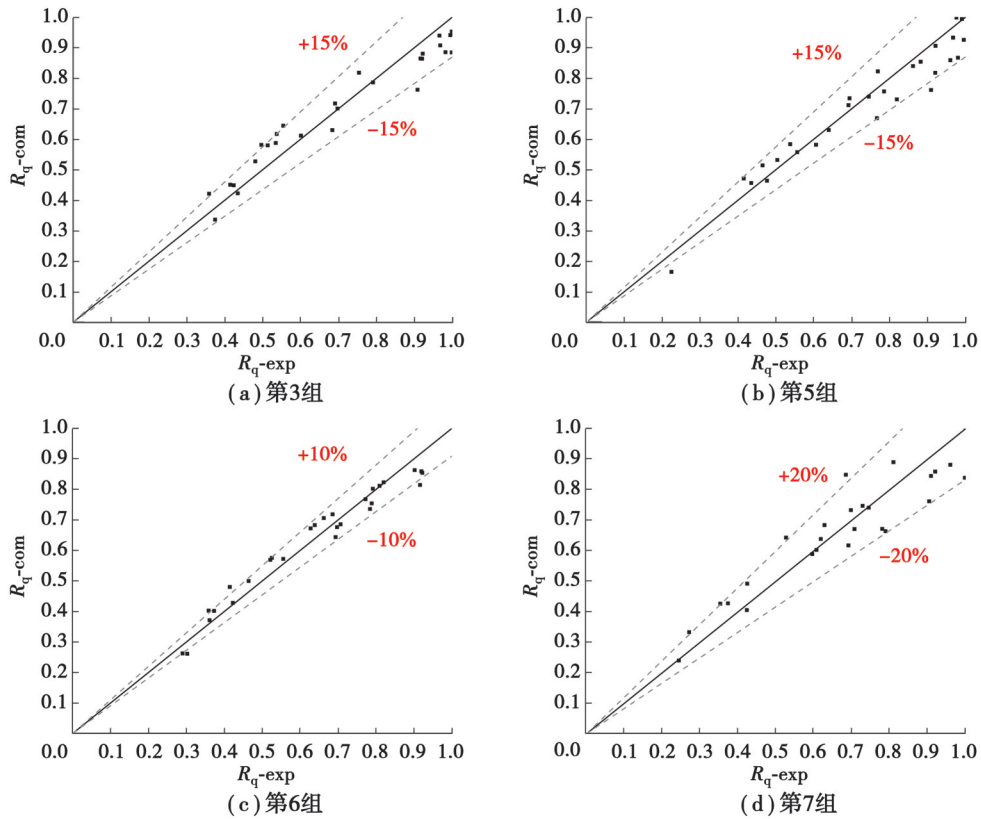


图 5 主路顶托边界条件下多元非线性回归结果

Fig.5 Multiple nonlinear regression results under backwater at main road end boundary

表7 主路顶托边界条件下模型误差

Table 7 Model errors under backwater at main road end boundary

序号	参数组合	多元线性回归		多元非线性回归	
		NSE	RMSE	NSE	RMSE
3	$f(b, R, W_d, H, Fr)$	0.858	0.09	0.965	0.04
5	$f(b, R, W_d, H)$	0.889	0.07	0.923	0.06
6	$f(b, R, W_d, Q)$	0.834	0.08	0.959	0.04
7	$f(b, R, W_d, Fr)$	0.748	0.11	0.826	0.09

2.3 两端顶托边界条件下流量分配模型

2.3.1 参数组合选取

与2.2.1节中主路顶托条件下流量分配影响因素无量纲化一致,在交叉口积水顶托条件下不考虑纵坡 i 和横坡 s 对流量分配比 R_q 的影响,考虑下游通道积水高度对流量分配比 R_q 的影响。最终影响道路流量分配的独立因素包括: b, R, W_d, W_1, Q, H, Fr 。将参数无量纲化后进行重组,得到关于流量分配比 R_q 的无量纲方程

$$R_q = f(b, R, W_d, W_1, H, Q, Fr)。(17)$$

2.3.2 影响因子显著性分析

统计T型道路交叉口两端顶托条件下流量分配数据共计267组,包括24组水工物理试验实测数据和243组三维CFD模型模拟数据。最终对公式(17)中无量纲自变量进行重组,得到7组参数组合(见表8),对各参数组合分别在SPSS中进行显著性分析,确定第2组、第3组、第4组、第5组、第6组、第7组变量组合会显著影响流量分配。

表8 两端顶托边界下的无量纲参数组合

Table 8 Combinations under backwater at both road ends boundary

序号	参数组合	显著性
1	$f(b, R, W_d, W_1, H, Q, Fr)$	不显著
2	$f(b, R, W_d, W_1, H, Q)$	显著
3	$f(b, R, W_d, W_1, H, Fr)$	显著
4	$f(b, R, W_d, W_1, Q, Fr)$	显著
5	$f(b, R, W_d, W_1, H)$	显著
6	$f(b, R, W_d, W_1, Q)$	显著
7	$f(b, R, W_d, W_1, Fr)$	显著

2.3.3 流量分配模型构建

将两端顶托下267组数据进行乱序随机组合,以具有显著性影响的6组参数组合分别构建214组训练集数据和53组验证集,进行多元线性回归和多元非线性回归,验证结果如图6及图7所示。可以看出,无论是哪种变量组合,其多元非线性回归处理后的模型精度均优于多元线性回归处理。

对各组合的NSE和RMSE进行计算发现(见表9),第2组变量组合在多元非线性回归处理后的公式NSE为0.939、RMSE为0.06,计算精度最高。构建两端顶托下的流量分配公式如式(18)所示。

$$R_q = 0.076 + 0.46b + 0.32W_dR - 0.61W_1R + 12.13RQ - 0.108b^2 + 0.43bW_d - 0.39bW_1 + 257W_1Q - 170.5W_dQ + 3.75bH - 80.44Q + 0.15R - 1293HQ - 0.018bR。(18)$$

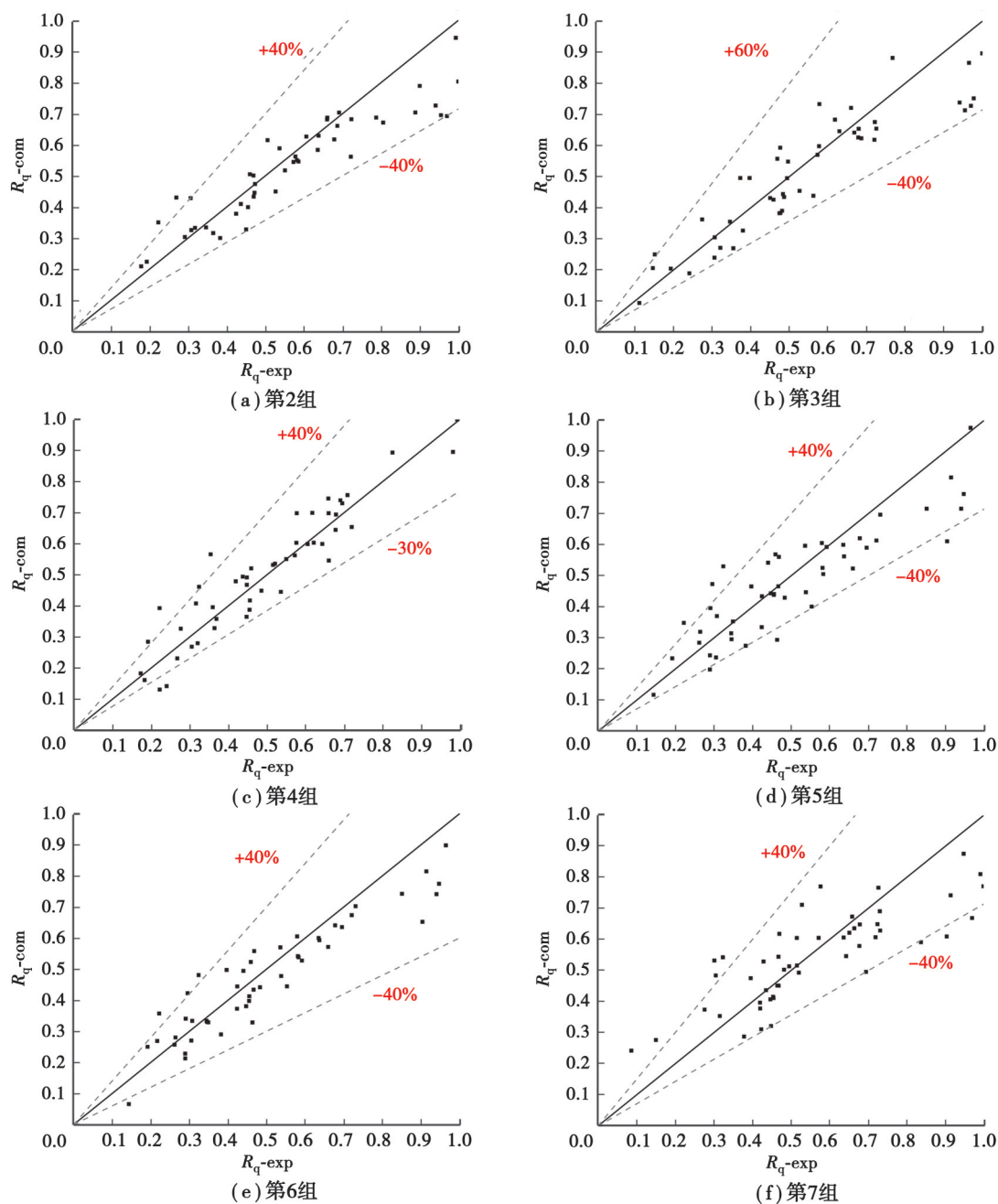
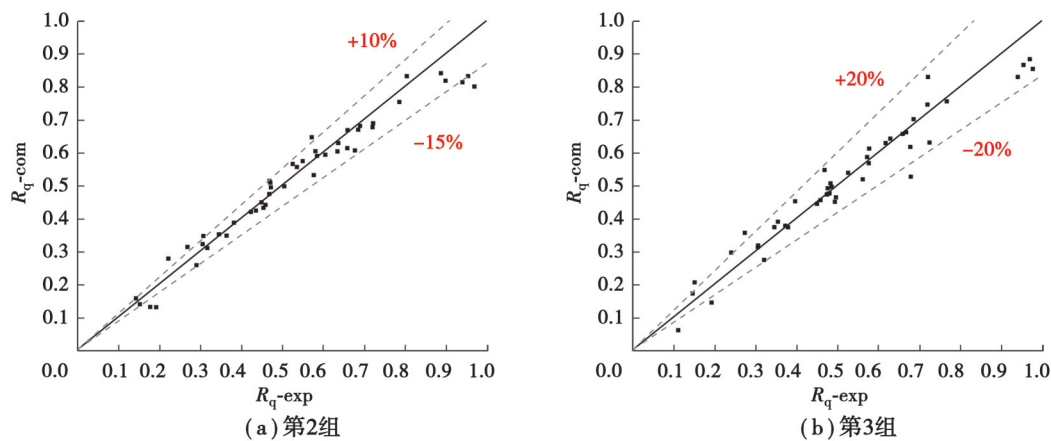


图 6 两端顶托边界条件下多元线性回归结果

Fig. 6 Multiple linear regression results under backwater at both road ends boundary



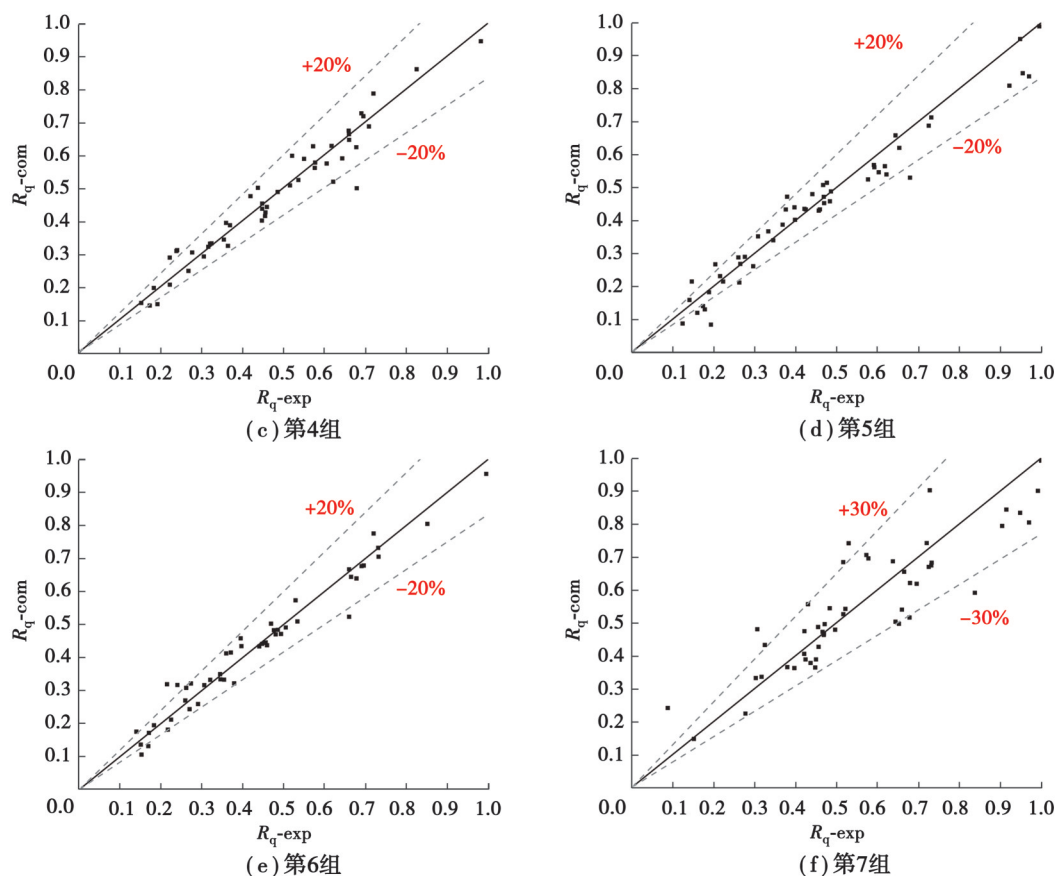


图7 两端顶托边界条件下多元非线性回归结果

Fig. 7 Multiple nonlinear regression results under backwater at both road ends boundary

表9 两端顶托边界条件下模型误差

Table 9 Model errors under backwater at both road ends boundary

序号	参数组合	多元线性回归		多元非线性回归	
		NSE	RMSE	NSE	RMSE
2	$f(b, R, W_d, W_p, H, Q)$	0.759	0.12	0.939	0.06
3	$f(b, R, W_d, W_p, H, Fr)$	0.812	0.10	0.921	0.07
4	$f(b, R, W_d, W_p, Q, Fr)$	0.681	0.12	0.912	0.06
5	$f(b, R, W_d, W_p, H)$	0.640	0.14	0.926	0.07
6	$f(b, R, W_d, W_p, Q)$	0.699	0.12	0.932	0.06
7	$f(b, R, W_d, W_p, Fr)$	0.617	0.14	0.776	0.11

3 结 论

1)模型对道路交叉口的复杂的三维流量分配特征进行了降维表征。构建的低阶流量分配模型是一个非线性的计算公式,不仅包含了道路的横坡、纵坡、转弯半径这些交叉口关键三维物理特征参数,同时融入了弗劳得数这些影响交叉口三维流动特征的运行参数。

2)比较了多元线性及非线性回归两种统计方法,相比之下,非线性回归所得到的交叉口流量分配模型具有更高的精度。

3)在自由出流边界条件下,交叉口分流比使用道路宽度比 b ,道路纵坡 i ,道路横坡 s ,转弯半径 R ,道路上游水深 H 的组合具有最高的精度;在主路顶托边界条件下,交叉口分流比使用道路宽度比 b ,转弯半径 R ,主路下游堰高 W_d ,道路上游水深 H ,道路上游弗劳得数 Fr 的组合具有最高的精度;在两端顶托边界条件下,分流比使用道路宽度比 b ,转弯半径 R ,主路下游堰高 W_d ,支路下游堰高 W_p ,道路上游流量 Q ,道路上游水深 H 的组合具有最高的精度,3个边界条件下的模型误差基本在 $-15\%\sim+10\%$ 以内。

参考文献

- [1] Kotz M, Levermann A, Wenz L. The effect of rainfall changes on economic production[J]. *Nature*, 2022, 601: 223-227.
- [2] 王海芝, 许冰, 翟淑花, 等. 北京市暴雨-突发地质灾害量化关系分析[J]. *人民长江*, 2023, 54(10): 81-89.
Wang H Z, Xu B, Zhai S H, et al. Study on quantitative relationship between rainstorms and emergency geological disaster in Beijing City[J]. *Yangtze River*, 2023, 54(10): 81-89. (in Chinese)
- [3] Lu Y, Wang Y H, Zhang L Y. System dynamic modeling of the NGO post-disaster relief contribution in the 2021 Henan flood in China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2023, 89: 103626.
- [4] Dong B L, Xia J Q, Li Q J, et al. Risk assessment for people and vehicles in an extreme urban flood: case study of the “7.20” flood event in Zhengzhou, China[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 80: 103205.
- [5] 马金明, 张义斌, 何婷, 等. 新形势下城市排水防涝规划编制与实施探讨[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(14): 32-37.
Ma J M, Zhang Y B, He T, et al. Discussion on the compilation and implementation of urban drainage and waterlogging prevention plan in the new era[J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(14): 32-37. (in Chinese)
- [6] 李俊奇, 王耀堂, 王文亮, 等. 城市道路用于大排水系统的规划设计方法与案例[J]. *给水排水*, 2017, 53(4): 18-24.
Li J Q, Wang Y T, Wang W L, et al. Urban roads for major drainage system planning-design methods and cases[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(4): 18-24. (in Chinese)
- [7] 周玉文. 城市排水(雨水)防涝工程的系统架构[J]. *给水排水*, 2015, 51(12): 1-5.
Zhou Y W. System architecture of urban drainage (rainwater) flood control project[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2015, 51(12): 1-5. (in Chinese)
- [8] 国务院办公厅. 关于加强城市内涝治理的实施意见[EB/OL]. (2021-04-25) [2023-01-06]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-04/25/content_5601954.htm.
General Office of the State Council. Implementation opinions on strengthening urban waterlogging management[EB/OL]. (2021-04-25) [2023-01-06]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-04/25/content_5601954.htm. (in Chinese)
- [9] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇内涝防治技术规范: GB 51222—2017[S]. 北京: 中国计划出版社, 2017: 24-25.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Technical code for urban flooding prevention and control: GB 51222—2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017: 24-25. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 室外排水设计标准: GB 50014—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021: 28-33.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of outdoor wastewater engineering: GB 50014—2021[S]. Beijing: China Planning Press, 2021: 28-33. (in Chinese)
- [11] David L M, de Carvalho R F. Designing for People's safety on flooded streets: uncertainties and the influence of the cross-section shape, roughness and slopes on hazard criteria[J]. *Water*, 2021, 13(15): 2119.
- [12] Dong B L, Xia J Q, Zhou M R, et al. Integrated modeling of 2D urban surface and 1D sewer hydrodynamic processes and flood risk assessment of people and vehicles[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 827: 154098.
- [13] Nanía L S, Gómez M, Dolz J. Experimental study of the dividing flow in steep street crossings[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2004, 42(4): 406-412.
- [14] Wang P, He L, Liu Y Z. Acoustics-driven vortex dynamics in channel branches with round intersections: flow mode transition and three-dimensionality[J]. *Physics of Fluids*, 2020, 32(2): 025101.
- [15] Feng W, Shao Z Y, Gong H F, et al. Experimental and numerical investigation of flow distribution pattern at a T-shape roadway crossing under extreme storms[J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 2286-2300.
- [16] Yang L H, Li J Z, Kang A Q, et al. The effect of nonstationarity in rainfall on urban flooding based on coupling SWMM and MIKE21[J]. *Water Resources Management*, 2020, 34(4): 1535-1551.
- [17] 徐雷, 吴正松, 邵知宇, 等. 基于SWMM耦合模型的道路行泄通道设计方法与应用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(1): 114-120.
Xu L, Wu Z S, Shao Z Y, et al. Design method and application of roadway drainage path based on coupled hydraulic SWMM model[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(1): 114-120. (in Chinese)
- [18] Chen S, Garambois P A, Finaud-Guyot P, et al. Variance based sensitivity analysis of 1D and 2D hydraulic models: an experimental urban flood case[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2018, 109: 167-181.

(编辑 郑洁)