

面向安全管控的通学关键路段交通流集聚特性研究

戴晓峰^{1,2}, 杨岚^{1,2}, 邓若凡^{1,2}, 关昊天^{1,2}, 李武^{1,2}, 陈方^{2,3}

(1. 昆明理工大学交通工程学院, 云南 昆明 650504; 2. 西南综合交通运输发展研究院, 云南 昆明 650504; 3. 昆明理工大学马克思主义学院, 云南 昆明 650504)

摘要: 为识别学校周边通学关键路段的交通流集聚特性, 选取昆明市典型小学周边路段为研究对象, 基于无人机视频与YOLOv8-DeepSORT目标识别结果, 构建集聚概率、集聚强度与安全阈值指标, 并采用长短期记忆网络(LSTM)模型开展短时交通流预测。结果表明: 空间上, 学校周边呈现高强度交通集聚, 上学时段车流密度均值达放学时段的2.5倍, 而放学时段集聚强度峰值超出安全阈值的幅度分别达140%和134%; 非机动车穿插进一步压缩儿童通行空间, 加剧人车冲突风险。时间维度上, 交通流呈双周期波动: 上学前集聚概率以每5 min约14%的速率递增至饱和; 放学后增长率放缓至约13%, 并呈现双峰脉冲特征, 车辆滞留现象突出, 进一步压缩儿童避险时间。此外, 集聚强度动态演化特征分析显示, 不同时段通学关键路段交通流表现出差异化的集聚与消散模式, 延长了儿童暴露于危险环境的时长。研究发现, LSTM模型预测优势显著, 能够精准捕捉通学交通流的峰谷波动及双阶段峰值特征, 其预测精度优于随机森林(RF)和支持向量机(SVM)。

关键词: 通学安全; 通学交通流; 交通集聚特性; 时间序列分析; 长短期记忆网络(LSTM)

Traffic Flow Aggregation Characteristics of Key School Commuting Routes: A Safety Management Perspective

Ji Xiaofeng^{1,2}, Yang Lan^{1,2}, Deng Ruofan^{1,2}, Guan Haotian^{1,2}, Li Wu^{1,2}, Chen Fang^{2,3}

(1. Faculty of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650504, China; 2. Southwest Institute of Integrated Transportation Development, Kunming Yunnan 650504, China; 3. School of Marxism, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650504, China)

Abstract: To identify the traffic flow aggregation characteristics of key school commuting routes, this paper selects road sections surrounding a typical elementary school in Kunming as the research subject. Based on drone video footage and YOLOv8-DeepSORT object recognition results, indicators of aggregation probability, aggregation intensity, and safety thresholds are established. Additionally, a Long Short-Term Memory (LSTM) model is employed to conduct short-term traffic flow forecasting. The results indicate that, spatially, high-intensity traffic aggregation occurs around schools, with the average traffic density during the morning commute period reaching 2.5 times that of the afternoon dismissal period. Furthermore, during the two afternoon dismissal periods, the peak aggregation intensity exceeds the safety threshold by 140% and 134%, respectively. The weaving of non-motorized vehicles further compresses the space available for children to pass, exacerbating the risk of conflicts between pedestrians and vehicles. In the temporal dimension, traffic flow exhibits a dual-period fluctuation: the probability of aggregation before school increases at a rate of approximately 14% every 5 minutes until saturation; after school, the growth rate slows to about 13%, exhibiting a double-peak pulsation pattern, with prominent vehicle queuing that further compresses children's time to avoid hazards. Furthermore, analysis of the dynamic evolution of aggregation intensity reveals that traffic flow on key school commuting routes exhibits distinct patterns of aggregation and dissipation during different time periods, prolonging the duration of children's exposure to hazardous environments. The findings show that the LSTM model demonstrates significant predictive advantages, accurately capturing peak-trough fluctuations and two-phase peak characteristics of school commute traffic flows, with prediction accuracy superior to that of Random Forest (RF) and Support Vector Machines (SVM).

Keywords: school commuting safety; school commuting traffic flow; traffic aggregation characteristics; time series analysis; Long Short-Term Memory (LSTM)

收稿日期: 2025-03-31

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于行为链与空间公平的城市儿童通学风险交互效应及调控策略”(42571258)、云南省研究生导师团队建设项目“综合交通与物流系统规划”(2024)

作者简介: 戢晓峰(1982—), 男, 湖北随州人, 博士, 教授, 研究方向为交通大数据、交通安全, 电子邮箱 yiluxinshi@sina.com。

引用格式: 戢晓峰, 杨岚, 邓若凡, 等. 面向安全管控的通学关键路段交通流集聚特性研究[J]. 城市交通, 2026, 24(3): 113–122.

Ji Xiaofeng, Yang Lan, Deng Ruofan, et al. Traffic flow aggregation characteristics of key school commuting routes: a safety management perspective[J]. Urban Transport of China, 2026, 24(3): 113–122.

0 引言

随着儿童友好型城市理念的推广, 儿童出行安全备受关注^[1]。安全的通学路不仅是保护儿童的基本需求, 也是城市建设的重要组成部分^[2]。儿童交通事故频发于通学途中^[3], 据统计, 中国每年超1.85万名儿童因交通事故丧生, 其中约半数涉及儿童^[4]。这一严峻现实促使家长亲自接送儿童通学。其中, 采用小汽车接送的家长往往因寻找停车位或等候儿童而产生较长滞留时间。不同接送模式下的滞留差异显著, 导致通学时段交通流集聚效应加剧, 引发交通混乱^[5], 进一步增加通学安全隐患。

近年来, 通学出行机动化引发学区拥堵、家长接送等城市交通与社会问题, 加剧了儿童通学安全风险^[6], 通学研究由此成为新兴热点。例如, 基于学生出行特征、区位及建成环境, 刘阳等^[7]揭示了不同因素对通学方式选择的影响; 融合交通事故、道路运行及学区数据, 戢晓峰等^[8]评估了学区尺度下的通学事故风险; 夏国胜等^[9]梳理通学出行特征与活动特征, 总结了儿童通学路径空间设计要素; 韩治远等^[10]挖掘、集成通学路交通环境数据, 构建了主客观结合的通学路交通环境安全性评估体系。现有研究多关注通学方式选择、通学环境与通学安全之间的关联, 通学时段学校周边交通流集聚现象的关注不足, 而该时段复杂交通流特性对通学安全的影响不容忽视。目前, 针对这一特殊场景的交通流特性研究仍相对匮乏。

鉴于此, 为全面解析通学关键路段的交通流集聚特性, 本文分析其行为及时空特征, 采用集聚概率与强度量化模型, 结合长短期记忆网络(Long Short-Term Memory, LSTM)模型^[11–12], 对集聚交通量进行预测, 揭示其动态特性和安全隐患。

1 研究区域与数据

1.1 研究区域

本文选取云南师范大学附属小学(呈贡

校区)通学关键路段作为具体案例(见图1), 涵盖学校东北门和南门门前两个路段, 分别为双向4车道和双向6车道。该校为六年制完全小学, 共62个教学班, 在校生2 838人。生源主体集中于呈贡区, 学校周边分布有3个住宅小区、2个商业街, 周边2 km辐射区内有3所大学和1所小学, 500 m范围内有4个公共汽车站(6条线路)。数据采集时间为4个教学周的工作日(周一至周五), 每日早晚高峰通学时段(7:00—9:00, 16:00—18:00), 以上统称为“观测期”。使用2架无人机(DJI Mavic 2)以4K分辨率在180 m高空连续采集交通流视频数据。基于无人机视频收集交通量、速度及密度等关键参数, 同步记录时段、通学人数及路段长度等信息。

已有研究及技术规范表明: 城镇完全小学服务半径为500 m^[13]; 路内停车位距服务对象不应大于200 m, 且距路外停车场出入口200 m内不宜设置路内停车位^[14], 故临时停车带宜控制在校门外200 m内^[15]; 规范划定的学校区域为校门所在道路两侧各150 m范围内路段^[16]。因此, 本文中的通学关键路段为校门两侧各150 m(见图1)。

1.2 数据提取及处理

本文采用YOLOv8-DeepSORT算法对通学关键路段视频数据进行深度处理。该算法结合了YOLO系列^[17]的近期优化技术和DeepSORT的特征整合能力, 显著提升目标追踪的精确度^[18]。该算法不仅能进行实时物体检测与分割, 还能精确测量速度和交通量, 从而系统性地收集和分析通学关键路段的交通流数据。

无人机视频数据^[19]处理流程如下: 1)剔除视频中的缺失或无效片段, 并将有效片段按时间顺序拼接为连续序列, 以保持数据的连续性和完整性; 2)采用时间同步技术衔接离散数据, 避免因数据缺失导致分析误差; 3)剔除异常数据, 确保数据集的准确性和可靠性。

2 研究方法

本文聚焦于通学关键路段的交通流集聚

行为,并基于交通流集聚量、最高集聚车辆数、交通流集聚概率和集聚强度^[20]等指标,评估该集聚行为对通学关键路段的影响。

2.1 集聚概率与强度量化模型

1) 集聚概率模型。

集聚概率指交通流在规定的上学或放学时刻之前到达通学关键路段的概率,用以反映交通流提前集聚的可能性大小。其计算公式为:

$$P_{(t_d-t_c)} = \frac{N_{(t_d-t_c)}}{n}, \quad (1)$$

式中: $P_{(t_d-t_c)}$ 为相应统计时段内的交通流集聚概率; t_d 为学校规定的上学或放学时刻; t_c 为交通流实际到达时刻; $N_{(t_d-t_c)}$ 为提前 (t_d-t_c) 时间到达学校通学关键路段的交通量/pcu; n 为通学交通总量/pcu。

2) 集聚强度模型。

① 静态安全阈值模型。

基于格林希尔茨(Greenshields)速度-密度关系模型^[21]:

$$V = V_f \left(1 - \frac{K}{K_j} \right), \quad (2)$$

式中: V 为自由流速度阈值/(km·h⁻¹); V_f 为自由流速度/(km·h⁻¹); K 为实际交通密度/(pcu·km⁻¹); K_j 为阻塞密度/(pcu·km⁻¹)。根据该模型,当交通密度达到临界密度 K_c 时,交通流开始变得不稳定。通常取 $K_c = K_j/2$ 作为理论临界值。据此,可进一步计算管控路段(长度 $L=0.3$ km)的静态安全阈值,即该路段在临界状态下所能容纳的临界车辆数

$$N_s = K_c L N, \quad (3)$$

式中: N_s 为临界车辆数/辆; L 为管控路段长度/km; N 为车道数/条。

② 动态集聚强度模型。

集聚强度指单位时间(以5 min为一个单位)内,通学关键路段上集聚的交通总量,用以反映交通流在空间上的集聚规模。其计算公式如下:



a 北门

$$I_0 = N_r + N_w, \quad (4)$$

式中: I_0 为集聚强度/(pcu·5 min⁻¹); N_r 为该单位时间内新到达该路段的通学交通量/(pcu·5 min⁻¹); N_w 为上一单位时间结束时,仍停留在该路段上等待的车辆数/(pcu·5 min⁻¹)。

2.2 长短期记忆网络模型

本文使用LSTM模型对交通流时间序列进行预测分析。LSTM是一种特殊的循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)^[22],通过输入门、遗忘门和输出门等结构,有效克服传统RNN在长序列训练中的梯度消失问题。该模型在时间序列预测方面^[23],尤其是捕捉长期依赖性方面优势显著,对理解交通流的动态变化至关重要。LSTM的核心计算过程如下。

1) 遗忘门。

$$f_t = \sigma[W_f(h_{t-1}, x_t) + b_f], \quad (5)$$

式中: f_t 为遗忘门输出; σ 为sigmoid激活函数; W_f 为遗忘门的权重矩阵; h_{t-1} 为前一个时间步的隐状态; x_t 为当前时间步的输入; b_f 为偏置项。

2) 输入门与候选记忆细胞。

$$i_t = \sigma[W_i(h_{t-1}, x_t) + b_i], \quad (6)$$

$$C_0 = \tanh[W_c(h_{t-1}, x_t) + b_c], \quad (7)$$

式中: i_t 为输入门的激活值; C_0 为候选记忆细胞值; W_i 和 W_c 为权重矩阵; b_i 和 b_c 为偏置项。

3) 记忆细胞状态更新。

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t C_0, \quad (8)$$

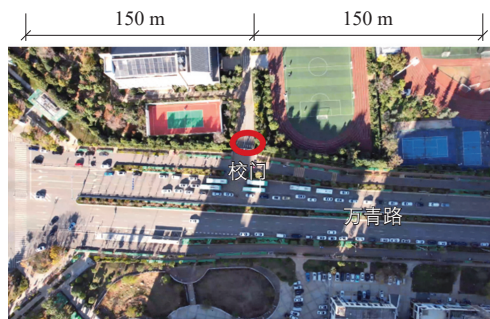
式中: C_t 为当前时间步的记忆细胞状态; C_{t-1} 为前一个时间步的记忆细胞状态。

4) 输出门与隐状态。

$$o_t = \sigma[W_o(h_{t-1}, x_t) + b_o], \quad (9)$$

$$h_t = o_t \tanh(C_t), \quad (10)$$

式中: o_t 为输出门的激活值; W_o 为输出门的权重矩阵; b_o 为输出门的偏置项; h_t 为



b 南门

图1 云南师范大学附属小学(呈贡校区)通学关键路段示意

Fig.1 Key school commuting routes at Yunnan Normal University Affiliated Primary School (Chenggong Campus)

当前时间步的隐状态； $\tanh$ 为双曲正切激活函数。

3 研究结果

3.1 集聚特征结果分析

3.1.1 上学时段

1) 通学交通流时空集聚特性。

由表1可知,上学时段通学关键路段交通流平均速度低于 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的限速值,周一最高为 $27.63\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,周五最低为 $20.71\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ (较周一降幅25%)。上学时段平均车流密度为 $34.6\text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}$,是放学时段(平均 $13.8\text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}$)的2.5倍。这主要是由于学校规模较大,导致早高峰接送车辆集中,交通量持续处于高位。此外,非机动车会占用机动车道并出现穿插移动现象^[24]。周二平均交通量达到周极值 $957\text{ pcu}\cdot\text{h}^{-1}$,此时非机动车占道率升至38.4%;而周五平均交通量骤降26.6%,非

机动车占道率仍达28.5%。这种高密度下的道路空间压缩导致非机动车穿插现象频发,威胁儿童通行安全。学校300 m范围内,商业街早市运营、小区通勤活动与通学时段重合,进一步加剧道路空间拥挤程度。同时,车流密度整体波动较小,但周三平均车流密度为 $37\text{ pcu}\cdot\text{km}^{-1}$ 时,非机动车占道率达36.5%,表明空间压缩效应持续存在。此外,当车速较快且车头时距 $\leq 5\text{ s}\cdot\text{pcu}^{-1}$ 时,伴随非机动车穿插,严重压缩儿童过街的穿插时间,增加了儿童的通学风险。

根据通学交通流参数计算得出,上学时段通学关键路段交通流集聚强度的安全阈值为 $54\text{ pcu}\cdot 5\text{ min}^{-1}$ 。

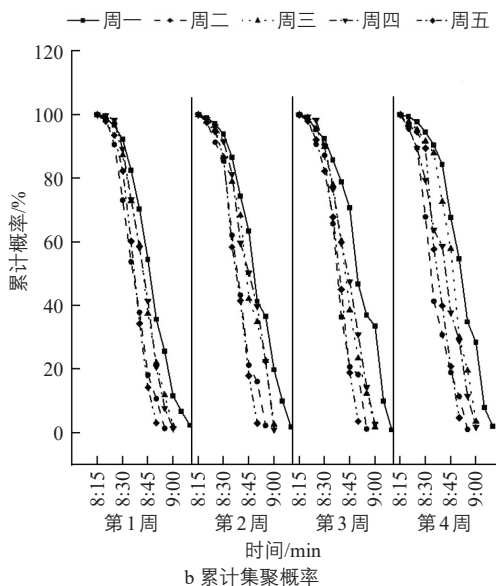
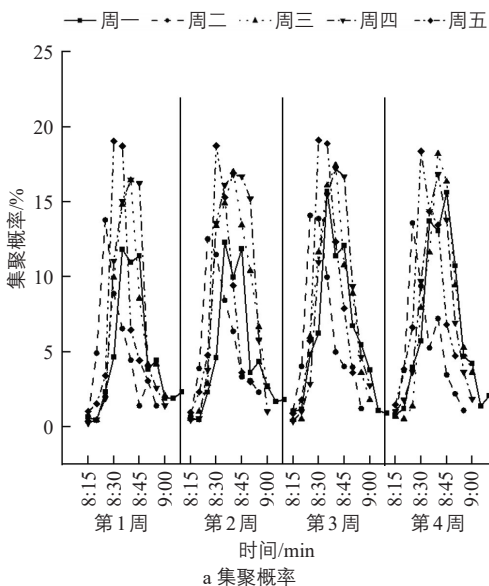
2) 集聚概率时空分布规律。

根据图2和表2可以发现,4周观测期内,上学时段前10~30 min呈现显著集聚效应,集聚概率以每5 min约14%的梯度递增至饱和,上学前越早(如30 min),集聚概率越低;越接近上学时刻(10 min),概率越高;每5 min的累计集聚概率梯度变化均值低于20%,形成交通流稳态集聚特征。在典型异常情况中:周五前30 min集聚概率呈现急剧增长(从18.01%升至93.72%,平均每5 min梯度变化达17.87%),导致车辆滞留量激增,同时儿童频繁进入机动车道,显著增加了与机动车的擦碰风险;而周二集聚概率异常降低时,车流离散且不规律,造成儿童通行预判困难。常态化高峰集聚(即集聚概率 $>38\%$)表明,通学走廊需强化行人物理隔离设施,以阻断非机动车的穿插路径。

表1 上学时段通学关键路段交通流参数统计

Tab.1 Traffic flow parameters on key school commuting routes during the morning commute period

星期	平均速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均交通量/ ($\text{pcu}\cdot\text{h}^{-1}$)	平均车流 密度/ ($\text{pcu}\cdot\text{km}^{-1}$)	平均车头 时距/ ($\text{s}\cdot\text{pcu}^{-1}$)	平均车头 间距/ m	非机动车 占道率/%
周一	27.63	836	30	4	31	29.1
周二	25.18	957	38	4	28	38.4
周三	24.36	893	37	4	27	36.5
周四	21.97	752	34	5	31	26.8
周五	20.71	702	34	5	29	28.5



注:横坐标为以上学时刻为基准的相对时间(0~60 min),并非连续绝对时钟时刻(以下同);累计概率指自上学前30 min起至该时间点的累计集聚概率。

图2 上学时段通学关键路段交通流集聚概率分布

Fig.2 Probability distribution of traffic flow aggregation on key school commuting routes during the morning commute period

3) 集聚强度动态演化特征。

图3展示了通学关键路段在周一至周五各时间点的上学交通流集聚强度。每条线代表一个工作日，反映了集聚强度随时间的动态变化。可以看出，所有工作日上学交通流均在上学前 10~30 min 形成高峰集聚。其中，周二前 30 min 集聚强度达安全阈值的 96.61%，接近安全管控临界值，高强度集聚下大量车辆密集停靠，相互遮挡形成视觉盲区，导致儿童通行时难以准确感知交通危险；周一呈现“陡降撤离”特征，前 5 min 集聚强度骤降 75%并伴有双峰现象，揭示了家长送学车辆在到校时刻前的集中性停车、快速驶离行为，该行为直接增加了儿童避险失败的风险；周五则表现出“大幅震荡”特性(标准差达 22 pcu·5 min⁻¹)，伴随非机动车频繁变道，破坏了儿童通行的连贯性，迫使其频繁停顿避让。

3.1.2 放学时段

1) 通学交通流时空集聚特性。

由表3可知，放学时段通学关键路段交通流呈现低速高密度运行特征，其平均速度(15~18 km·h⁻¹)仅为城市次干路设计速度的 51%~59%，反映出车流连续性较弱，并呈现持续性交通受阻。值得注意的是，尽管处于拥堵状态，平均车头间距却较大(61~84 m)。这可能是由于家长接送车辆在学校附近频繁地停车、启动和等待，导致车流呈现“簇状”分布，即车辆在接送点附近密集聚集(间距小)，而在路段其他部分相对稀疏(间距大)，从而拉大了整体平均车头间距。

在时空分布上，周一呈现“高密度-短

时距”特征，非机动车占道率达到周极值 34%，运行速度较自由流速度(30 km·h⁻¹)骤降

表2 各观测日上学前不同时间点的集聚概率及梯度变化

Tab.2 Changes in aggregation probability and gradient at different time points before school hours on each observation day %

星期	集聚概率			每 5 min 集聚概率梯度变化
	上学前 10 min	上学前 20 min	上学前 30 min	
周一	96.68	86.31	64.04	11.65
周二	90.55	55.74	19.81	15.28
周三	96.01	79.42	43.99	13.35
周四	95.63	73.78	44.28	13.62
周五	93.72	61.04	18.01	17.87

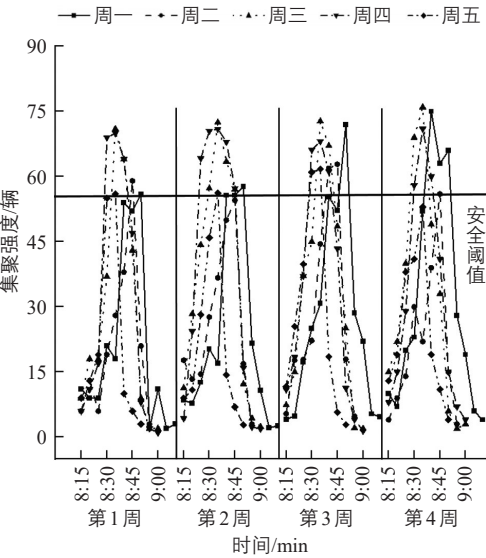


图3 上学时段通学关键路段交通流集聚强度变化曲线

Fig.3 Curve of aggregation intensity changes in traffic flow on key commuting routes during the morning commute period

表3 放学时段通学关键路段交通流参数统计

Tab.3 Traffic flow parameters on key commuting routes during the afternoon dismissal period

	时间	平均速度/ (km·h ⁻¹)	平均交通量/ (pcu·h ⁻¹)	平均车流 密度/ (pcu·km ⁻¹)	平均车头 时距/ (s·pcu ⁻¹)	平均车头 间距/m	非机动车 占道率/%
第1次 放学	周一 16:00—17:00	17.18	217	13	17	81	26.4
	周二 16:00—17:00	15.31	212	14	17	72	28.7
	周三 16:00—17:00	17.26	261	15	14	67	31.8
	周四 16:00—17:00	17.29	232	13	16	77	25.9
	周五 16:00—17:00	16.84	198	12	18	84	26.2
第2次 放学	周一 17:15—18:00	16.76	283	17	13	61	34.0
	周二 17:15—18:00	18.14	239	13	15	76	28.6
	周三 17:15—18:00	15.19	221	15	16	68	29.7
	周四 17:15—18:00	16.03	201	13	18	80	26.4
	周五 17:15—18:00	17.57	237	13	15	73	28.0

注：学校实施分时放学制度，将学生分为两批，分别于 16:30 和 17:30 离校。

44.1%，叠加学校300 m范围内临时停车位被占用且与邻近高校跨校区通勤时段重合，师生往返不同校区需频繁横穿周边道路，导致冲突加剧。同时，低车速与增大的车头时距使儿童在机动车流中的暴露时间大幅增加。该现象构成周一“首尾双高峰叠加”特征，即两次放学时段均出现高强度集聚，风险叠加效应显著。周五出现反常参数组合：平均车流密度降至周内最低值 $12 \text{ pcu} \cdot \text{km}^{-1}$ ，车头时距则增至 18 s (较周平均值增加 10.4%)，但非机动车占道率仍达 26.2% 。这表明行为干扰和非连续车流引发通行秩序紊乱，儿童穿行被迫中断的频率增加。

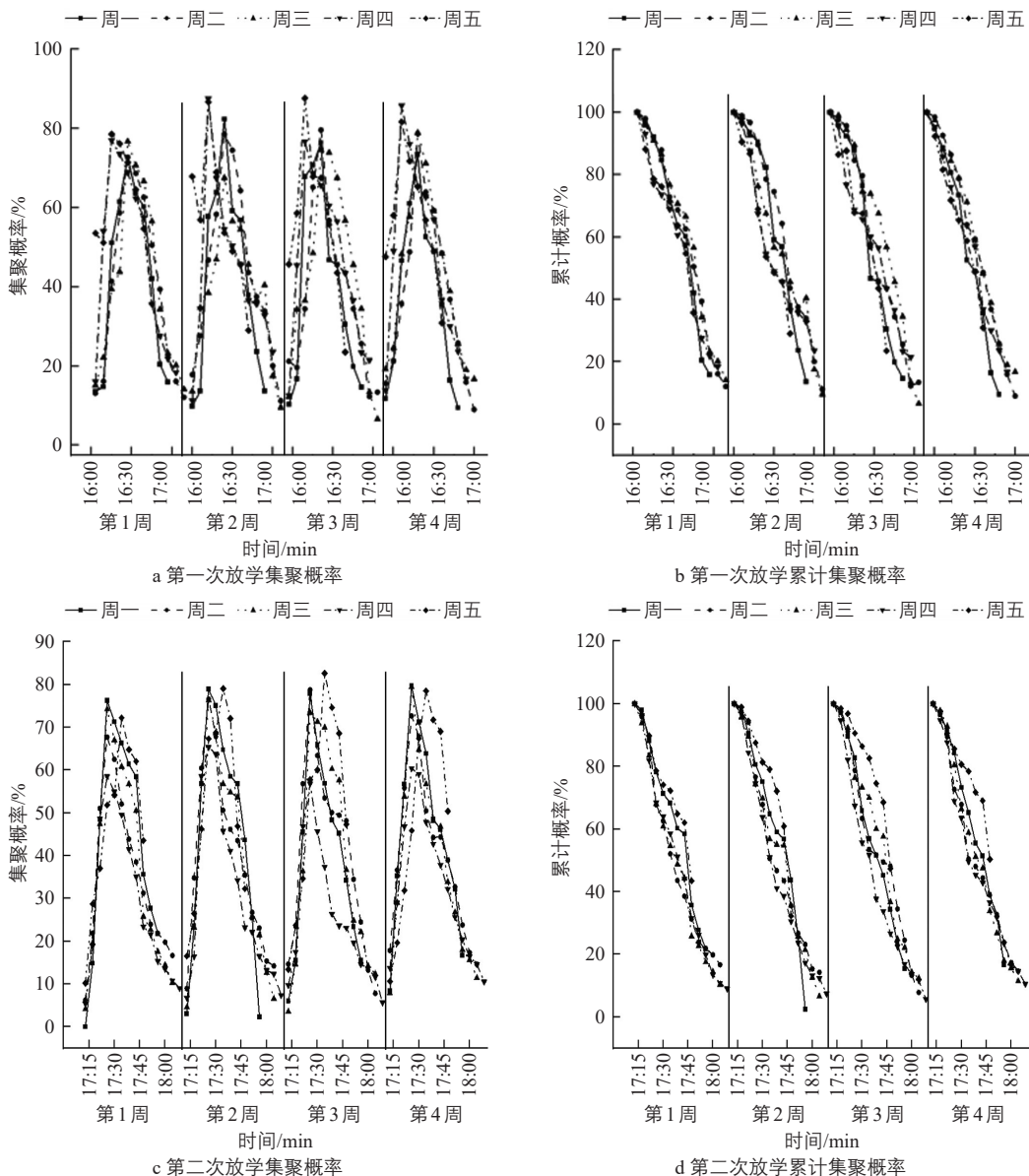
根据通学交通流参数计算得出，两次放学时段通学关键路段交通流集聚强度的安全阈值分别为 $30 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$ 和 $32 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$ 。

2) 集聚概率时空分布规律。

放学时段的通学关键路段交通流集聚概率呈现显著波动性，家长集中到校引发集聚概率短时高峰。

由图4和表4可知，第1次放学时段形成“急增-饱和”型集聚模式：放学前 10 min 集聚概率快速攀升至峰值 78.71% ，放学前 5 min 时累计集聚概率平均达 95.28% 。此阶段，变道车辆截断儿童穿行路径，导致穿行风险达峰值，同时非机动车穿插频率高，进一步加剧了穿行中断风险。

第2次放学时段则呈现显著差异化特征：周五放学前 25 min 累计集聚概率高达 65.13% (较周平均值增加 28.7%)，周平均每 5 min 集聚概率梯度变化为 13.04% 。放学时段整体呈双峰脉冲特征，集聚概率梯度较上



注：累计概率指自放学前 25 min 起至该时间点的累计集聚概率。

图4 放学时段通学关键路段交通流集聚概率分布

Fig.4 Probability distribution of traffic flow aggregation on key commuting routes during the afternoon dismissal period

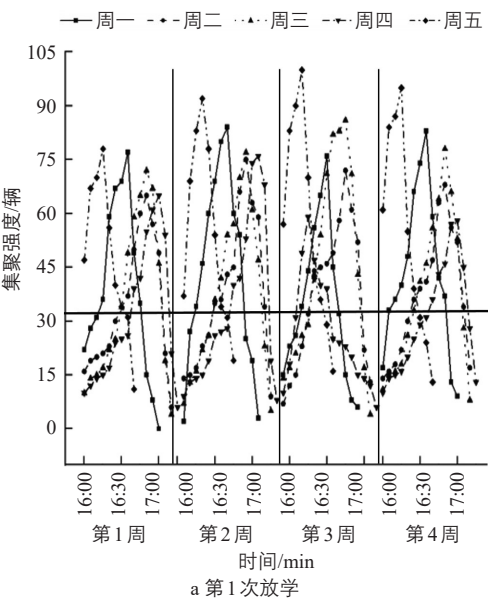
学时段放缓,印证了分时放学策略对家长接送行为的调节效果。周五第2次放学则呈典型的“脉冲式单峰”集聚,强度陡升且消散滞后,为周内最突出的单峰风险时段。

在空间维度上,“核心节点主导型”集聚模式在两次放学中持续显现,关键节点范围内集聚概率密度达通学关键路段均值的1.6倍,儿童通行受阻风险增加,非机动车穿梭进一步延长儿童的风险暴露时间,导致事故隐患叠加。

3) 集聚强度动态演化特征。

为进一步分析放学时段通学关键路段交通流的动态变化,图5展示了集聚强度变化曲线。可以看出,第1次放学呈现“脉冲式单峰集聚”模式,周平均峰值强度为72 pcu·5 min⁻¹(超出安全阈值140%)。这种高强度集聚挤占人行空间,使儿童通行安全风险增加。除周五外,其他工作日通学交通流在10 min内快速回落至安全阈值以下,这表明存在短时超饱和和风险,需要采取动态管控响应措施。

第2次放学则表现为“滞留型集聚”模式,其强度峰值超出安全阈值134%,消散时间延长至20 min,形成持续性拥堵隐患。同时,在拥堵环境中,非机动车穿插与机动车滞留的双重压力导致儿童暴露于危险环境的时间增加。此外,周间对比发现,周五第2次放学呈现异常的“陡升缓降”特征——峰值强度较周均值增加21.3%,集聚增速较周均值提升77.78%,且消散耗时22 min。这反映了通行空间竞争激化,儿童通行安全风险进一步加剧。



3.2 时间序列预测结果分析

本文使用不同预测模型对通学集聚交通量进行分析与预测。以5 min为一个单位,上学时段以12个单位为周期,放学时段以24个单位为周期进行数据处理,并综合评估各模型的预测效能以甄选最优模型。结果表明,LSTM模型能精准捕捉通学交通流的峰谷波动特征(上学时段为单峰陡涨陡落,放学时段为双阶段峰值交替),其预测拟合度显著优于对比模型。选取均方根误差(RMSE)和决定系数(R^2)作为衡量预测精度的指标(见表5)。结果表明,基于LSTM算法的预测模型性能最优,能够有效捕捉数据的动态变化,且具有较高的预测准确性和可靠性。

表4 各观测日放学前不同时间点的集聚概率及梯度变化
Tab.4 Changes in aggregation probability and gradient at different time points before school dismissal on each observation day %

时间		集聚概率			每 5 min 集聚概率 梯度变化
		放学前 5 min	放学前 15 min	放学前 25 min	
第 1 次放学	周一 16:00—17:00	96.03	76.24	36.51	16.64
	周二 16:00—17:00	98.24	77.44	46.59	13.63
	周三 16:00—17:00	97.75	74.45	51.85	12.12
	周四 16:00—17:00	95.02	63.62	38.11	14.23
	周五 16:00—17:00	89.37	64.50	29.80	13.04
第 2 次放学	周一 17:15—18:00	97.63	81.43	52.95	11.55
	周二 17:15—18:00	97.08	73.93	43.97	12.94
	周三 17:15—18:00	96.30	74.78	51.05	12.67
	周四 17:15—18:00	95.64	69.82	39.82	12.64
	周五 17:15—18:00	97.83	85.58	65.13	10.89

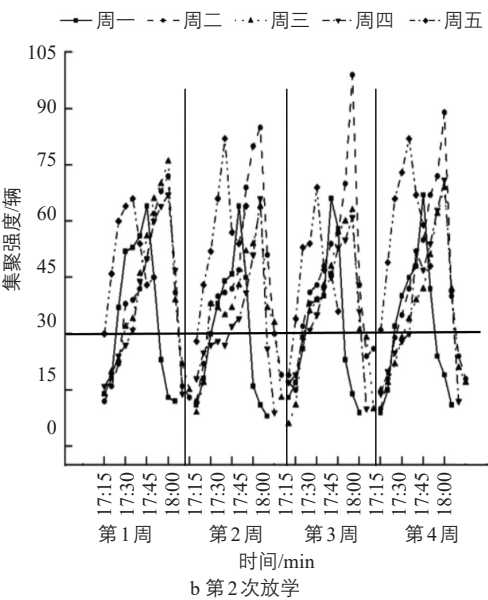


图5 放学时段通学关键路段交通流集聚强度变化曲线

Fig.5 Curve of aggregation intensity changes in traffic flow on key commuting routes during the afternoon dismissal period

上学高峰期交通流集聚上升阶段,集聚交通量呈单峰型“缓升-急增”波动,接近高峰时平均达 $47 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$ (峰值 $68 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$),形成当日首个显著波峰;下降阶段则快速回落,周一集聚交通量 5 min 内骤降 75% 。波峰时段的高强度集聚压缩儿童通行空间,加之非机动车在车流中频繁穿插,进一步增加了儿童与机动车擦碰的风险。这种集聚趋势导致步行空间被挤压,使儿童通行区域压缩至道路边缘。与此同时,非机动车频繁穿插,增加了儿童与变道车辆擦碰的风险。在

表5 不同模型对通学关键路段集聚交通量的预测精度

Tab.5 Prediction accuracy of aggregated traffic volume on key school commuting routes for different models

模型	上学集聚交通量预测精度		放学集聚交通量预测精度	
	R^2	RMSE/ ($\text{pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$)	R^2	RMSE/ ($\text{pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$)
LSTM	0.92	7.93	0.91	5.97
随机森林 (Random Forest, RF)	0.82	12.91	0.83	8.73
支持向量机 (Support Vector Machine, SVM)	0.79	14.01	0.81	12.16

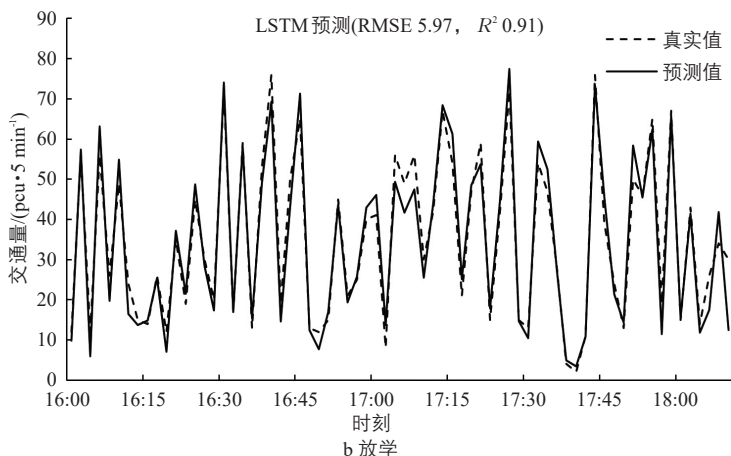
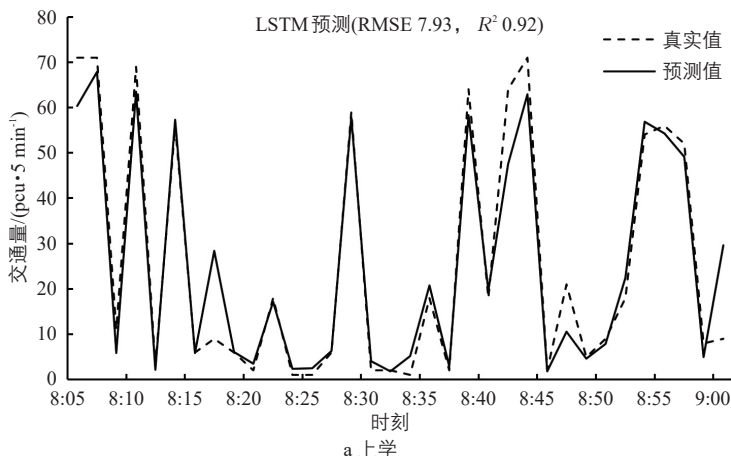


图6 LSTM模型对通学关键路段集聚交通量的拟合与预测结果

Fig.6 Fitting and prediction results of aggregated traffic volume on key school commuting routes using the LSTM model

交通流集聚下降阶段,集聚交通量呈“急降-缓降”特征,周一集聚交通量骤降幅度显著,反映出家长快速驶离时易忽视儿童的通行安全。高峰时非机动车穿插与儿童通行在时空上高度重叠,加剧人车冲突。因此,对于学校门口、人行横道上游等监测断面,当集聚交通流预测值接近或超过安全阈值时,应设置物理隔离,阻断非机动车穿插路径,以保障儿童安全(见图6a)。

放学交通流呈双峰波动特征:第1次放学交通流上升期形成首个波峰(脉冲式单峰),周一和周五的集聚时长显著缩短,接送点儿童密度骤增,儿童群体安全风险上升;第2次放学交通流上升期呈现规律性差异,形成次高峰(滞留型集聚),周五第1次放学后的下降阶段出现异常回弹。两次放学交通量波动极大(集聚峰值 $77 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$,低谷 $3 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$),造成道路空间重新分配,引发不同流向车辆间的冲突,同时车辆变道和非机动车穿插现象频发,迫使儿童穿行过程中断,导致其暴露于危险环境的频率增加。平均集聚交通量为 $54 \text{ pcu} \cdot 5 \text{ min}^{-1}$,超过安全阈值,导致非机动车穿插行为为进一步加剧,从而致使儿童丧失基本安全缓冲空间(见图6b)。

3.3 通学安全管控措施

针对学校周边通学时段交通流集聚现象,为有效缓解交通流集聚并提升通学安全水平,本文提出以下管控措施。

1) 基于LSTM模型的动态调控措施。

基于LSTM模型的预测分析,在上学前 30 min 和放学后 15 min 的高风险时段构建交通实时调控方案。通过智能交通系统优化信号配时,协调机动车、非机动车与儿童通行的时空路权分配。当预测交通流集聚加剧时,系统自动启动交通协同优化。此外,深度融合预测模型与实时数据,实现动态响应与调整,缓解人车冲突,为儿童创造安全的通学环境。

2) 针对特殊日期的交通管控措施。

针对周一和周五的特殊交通压力,建议基于历史数据分析实施临时交通管理措施。例如可考虑设置临时单向通行、限制特定方向左转等措施,减少交通冲突点,降低儿童过街风险。在非机动车穿插热点路段增设物理隔离设施,同时结合错峰放学制度优化接送区布局,缩短儿童暴露于高风险环境的时长。

3) 多部门协同的源头治理措施。

为减少儿童在通学关键路段的通行风

险,建议与周边商业区联合制定错时管理方案,减少外部车流对通学环境的干扰;同时在通学关键路段设置智能计时接送区(超时自动警示),通过“即停即走”管理提升车辆消散效率,缩短儿童暴露于高风险环境的时长。

4 结论

本文分析了小学周边通学关键路段的交通流集聚特性,通过时空数据提取、统计建模与短时交通流预测,揭示了通学高峰期的交通流特征,并据此提出有针对性的安全优化措施,以切实提升通学安全水平。

研究发现,交通流集聚特性呈现显著的峰值集聚效应,且时空异质性突出,其动态演化与家长接送模式、学校分时放学策略高度关联。其中,周一“首尾双高峰叠加”现象使接送点周边人群密度陡增,增加了儿童的碰撞风险;而周五“脉冲式单峰”集聚引发非机动车与接送车辆的空间冲突增强。基于此,建议实施分层动态管理,并结合路网优化与错峰管理,切实保障儿童通学安全。

此外,LSTM模型的高精度预测能力为通学安全风险防控提供了关键技术支持。其精准捕捉的交通流变化规律可有效预警儿童通行安全隐患,包括:上学高峰车流集聚加剧儿童通行空间压缩;放学时段非机动车穿插激增导致儿童穿行受阻;特殊日期家长接送行为的突变,可预判由此诱发的儿童避险失败风险。基于此,采取动态交通管控措施,如优化信号配时以协调路权、定向疏导非机动车等,能降低人车冲突概率,构建儿童通学安全防线。

综上,综合交通流特性与预测模型制定的交通管理措施,对于有效降低儿童通学风险、提升学校周边交通效率和安全性至关重要。未来应进一步优化模型对儿童安全风险的预警能力,持续完善通学安全防护体系,构建更可靠的儿童友好型通学环境。

参考文献:

References:

- [1] 马丹,裴玉龙,田昆.基于文献计量分析的行人交通安全研究综述[J].中国安全科学学报,2020,30(8):101-108.
Ma Dan, Pei Yulong, Tian Kun. Literature review of pedestrian traffic safety research based on bibliometric analysis[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 101-108.
- [2] Mackett R L. Are we making our children car

dependent?[M]. London: University College London, 2001.

- [3] 王雪松,王丽,林仁鑫,等.上海市小学生交通行为观测与特征分析[J].中国安全科学学报,2010,20(12):122-129.
Wang Xuesong, Wang Li, Lin Renxin, et al. Traffic behavior observation and characteristic analysis for Shanghai primary school students [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20 (12): 122-129.
- [4] Humphreys J, Wheeler D J, Box P, et al. Safety aspects of curb parking[R]. Report DOT-FH-11-8879. Washington, DC: Department of Transportation, 1978.
- [5] 郑舒文,姚雨昕,张鹤鸣,等.北京市紫竹院地区儿童友好型街道设计[J].城市交通,2022,20(2):111-119.
Zheng Shuwen, Yao Yuxin, Zhang Heming, et al. Child-friendly street design: a case study in Zizhuyuan area, Beijing[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(2): 111-119.
- [6] 焦健.促进儿童步行与骑车通学:欧美安全上学路计划的成功经验与启示[J].上海城市规划,2019(3):90-95.
Jiao Jian. Promoting children's walking and cycling to school: enlightenment from safe routes to school program in Euramerican cities [J]. Shanghai Urban Planning Review, 2019 (3): 90-95.
- [7] 刘阳,季彦婕,何民,等.基于地铁刷卡数据的通学模式影响机理研究[J].交通运输系统工程与信息,2019,19(1):132-137.
Liu Yang, Ji Yanjie, He Min, et al. Influence mechanism of school commute pattern using metro smart card data[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2019, 19(1): 132-137.
- [8] 戴晓峰,张琪.学区尺度下小学生通学事故风险评估及影响因素[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(1):221-226.
Ji Xiaofeng, Zhang Qi. Risk assessment and influencing factors of pupils' school commute accident risk in school district scale[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(1): 221-226.
- [9] 夏胜国,周晓,吴泽宇.儿童友好的通学路径设计[J].城市交通,2022,20(3):73-82.
Xia Shengguo, Zhou Xiao, Wu Zeyu. Design of child-friendly routes to school[J]. Urban Transport of China, 2022, 20(3): 73-82.
- [10] 韩治远,费晨仪,陈宇琳,等.基于新技

- 术手段的通学路交通环境安全性评估:以北京市为例[J]. 城市交通, 2020, 18(2): 58-66.
- Han Zhiyuan, Fei Chenyi, Chen Yulin, et al. Safety environment assessment of school route with new technologies: a case study of Beijing[J]. Urban Transport of China, 2020, 18(2): 58-66.
- [11] 熊晓夏, 刘擎超, 沈钰杰, 等. 基于LSTM-BF的高速公路交通事故风险模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 170-176.
- Xiong Xiaoxia, Liu Qingchao, Shen Yujie, et al. Study on risk model of highway traffic accidents based on LSTM-BF[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 170-176.
- [12] 郝其春, 张伟健, 沈富鑫, 等. 基于变分模态分解和LSTM的短时交通流预测[J]. 重庆理工大学学报, 2023, 37(10): 169-177.
- Bing Qichun, Zhang Weijian, Shen Fuxin, et al. Short-term traffic flow prediction based on variational modal decomposition and LSTM[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2023, 37(10): 169-177.
- [13] GB 50099—2011 中小学校设计规范[S].
- GB 50099—2011 Code for design of school [S].
- [14] GA/T 850—2009 城市道路路内停车泊位设置规范[S].
- GA/T 850—2009 Code for setting of on-street parking spaces[S].
- [15] 魏丹妮, 罗奎. 成都中心城区中小学临时停车措施与模式研究[J]. 四川建筑, 2016, 36(4): 22-26.
- Wei Danni, Luo Kui. Research on temporary parking measures and modes of primary and secondary schools in Chengdu central city [J]. Sichuan Architecture, 2016, 36(4): 22-26.
- [16] GB 5768.8—2018 道路交通标志和标线 第8部分: 学校区域[S].
- GB 5768.8—2018 Road traffic signs and markings—part 8: school zone[S].
- [17] Zhao Yazhou, Zhao Hongdong, Shi Jianfeng. YOLOv8-MAH: Multi-attribute recognition model for vehicles[J]. Pattern Recognition, 2025, 167: 111849.
- [18] Ngeni F, Mwakalonge J, Siuhi S. Solving traffic data occlusion problems in computer vision algorithms using DeepSORT and quantum computing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2024, 11(1): 1-15.
- [19] 戢晓峰, 王健, 徐迎豪, 等. 基于驾驶风格的山区公路穿村镇段行车风险场灵敏度分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(6): 316-325.
- Ji Xiaofeng, Wang Jian, Xu Yinghao, et al. Driving style-based sensitivity analysis of driving risk field in mountain highway sections passing through villages and towns[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2024, 24(6): 316-325.
- [20] 左微, 戢晓峰, 陈方, 等. 考虑群体差异的公路客运站旅客集聚行为分析[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(2): 42-50.
- Zuo Wei, Ji Xiaofeng, Chen Fang, et al. Analysis on passengers' agglomeration behavior at highway passenger stations considering group difference[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(2): 42-50.
- [21] 潘义勇, 管星宇. 基于分位数回归的交通流速度-密度关系随机基本图模型[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(7): 20-26.
- Pan Yiyong, Guan Xingyu. Stochastic fundamental diagram model of traffic flow speed-density relationship based on quantile regression[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2022, 41(7): 20-26.
- [22] 蒲悦逸, 王文涵, 朱强, 等. 基于CNN-ResNet-LSTM模型的城市短时交通流量预测算法[J]. 北京邮电大学学报, 2020, 43(5): 9-14.
- Pu Yueyi, Wang Wenhan, Zhu Qiang, et al. Urban short-term traffic flow prediction algorithm based on CNN-ResNet-LSTM model[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020, 43(5): 9-14.
- [23] 周新民, 金江涛, 鲍娜娜, 等. 基于注意力卷积长短时记忆模型的城市出租车流量预测[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(7): 153-162.
- Zhou Xinmin, Jin Jiangtao, Bao Nana, et al. Urban taxi traffic flow prediction based on attentive ConvLSTM-ResNet model[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(7): 153-162.
- [24] Ren Gang, Jiang Hang, Chen Jingxu, et al. Heterogeneous cellular automata model for straight-through bicycle traffic at signalized intersection[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2016, 451: 70-83.