

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2026.0102

## 大雨时高速公路隧道路段车辆延误成因分析

陈 施<sup>1</sup>, 胡麟峻<sup>2</sup>, 祝会兵<sup>1\*</sup>, 陈 磊<sup>2</sup>

(1. 宁波大学 土木工程与未来城市学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙江信电工程技术有限公司, 浙江 宁波 315021)

**摘要:** 利用交通视频提取雨天高速公路车辆的行驶特征, 结合隧道路段交通流的固有特点, 构建适用于大雨环境下隧道路段的元胞自动机交通流模型。将模拟得到的流量、速度与实测数据进行对比, 两者吻合度较高。进而分析大雨与正常天气时隧道路段车速随车辆密度的变化趋势, 结果表明, 当密度  $\rho < 0.4$  时, 大雨天气下隧道路段的车速普遍下降, 隧道入口前和出口前, 车速下降至更低值, 且隧道内部左车道更容易发生交通拥堵。通过计算车辆延误比, 分析大雨天气下隧道路段车辆延误的深层原因, 研究结果有望为雨天高速公路隧道路段交通管控和运营优化提供理论指导。

**关键词:** 大雨; 高速公路隧道路段; 车辆延误; 交通流模型; 元胞自动机

**中图分类号:** U491

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-5132 (2026) 02-0103-10

## Cause analyses of vehicles' delay in tunnel section of highway during heavy rain

CHEN Shi<sup>1</sup>, HU Linxun<sup>2</sup>, ZHU Huibing<sup>1\*</sup>, CHEN Lei<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering and Future Cities, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Zhejiang Xindian Engineering Technology Co., Ltd., Ningbo 315021, China)

**Abstract:** By extracting vehicles' driving characteristics on highways during heavy rain from traffic videos, a cellular automaton traffic model suitable for tunnel section of highway under heavy rain is proposed, in which the particular properties of traffic flow in the tunnel section are taken into account. Through numerical simulation, the obtained traffic flows and speeds are compared with the measured data, resulting with good agreements. By analyzing the variance trend of vehicles' speeds with vehicles densities under two situations, i.e., heavy rain and normal weather, it is demonstrated that when the density is  $\rho < 0.4$ , vehicles' speeds in the tunnel section are lower during heavy rain, and vehicles' speeds decrease to lower values before the tunnel entrance and exit. Furthermore, traffic congestions are more prone to occur in the left lane inside the tunnel. Besides, the underlying causes of vehicles' delay during heavy rain are analyzed by calculating the delay time proportion of vehicles. The research results are expected to provide theoretical guidance for traffic management and operational optimization on the highway with tunnel sections during heavy rain.

**Keywords:** heavy rain; tunnel section of highway; vehicles' delay; traffic model; cellular automaton

大雨等恶劣天气时, 能见度下降、路面湿滑等原因会导致车辆紧急制动能力下降, 直接影响车辆

的驾驶性能, 不仅会造成交通拥堵, 还有可能造成交通运输中断, 给社会经济和人身安全带来严重影

收稿日期: 2026-01-02

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journal.nbu.edu.cn/>

基金项目: 宁波市自然科学基金 (2023J086)

第一作者: 陈 施, 硕士研究生, 主要研究方向为交通流建模与交通优化。E-mail: naomie\_na@163.com

\*通信作者: 祝会兵, 教授, 主要研究方向为交通流建模与交通优化。E-mail: zhuhuibing@nbn.edu.com

响<sup>[1]</sup>。高速公路隧道路段作为山区道路的基础设施,在为交通运输提供快捷和便利的同时,因其有限的空间和复杂的环境条件,如隧道入口的黑洞效应和出口的白洞效应,对交通顺畅乃至交通安全会造成负面影响。因此,研究恶劣天气时隧道路段交通流特征具有重要的理论意义和实际意义。

在交通流特性研究中,交通流建模是一种有效方法,而元胞自动机模型更是因为其离散性、多样性等优点,具有独特的优势。自1992年Nagel和Schreckenberg提出单车道NaSch模型<sup>[2]</sup>以来,涌现了许多改进的交通流模型<sup>[3-4]</sup>,并结合实际道路情况,提出了双车道模型<sup>[5-6]</sup>,甚至多车道模型<sup>[7]</sup>。

针对隧道路段交通流,Zhang等<sup>[8]</sup>通过建模分析光线对隧道内车辆追尾冲突的影响。Li等<sup>[9]</sup>建立三车道隧道交通流模型,研究不同限速值对隧道交通流的影响。Lu等<sup>[10]</sup>考虑隧道各段的行车特点,细致模拟了隧道路段的交通流特性,揭示了隧道路段交通拥堵的成因。Shang等<sup>[11]</sup>研究不同长度隧道及隧道内各区段交通流特性的差异。Wang等<sup>[12]</sup>提出并模拟了实施隧道路段大车限道策略时的交通流特征,表明大车限道策略有利于提高隧道路段的平均车速和道路通行能力。然而,目前隧道路段的交通流研究通常只考虑隧道对交通流的影响,而通过综合考虑天气因素来研究隧道路段交通流特性的成果还不多见。

对于恶劣天气时高速公路交通流也有许多学者展开了研究。Imran等<sup>[13]</sup>通过建模分析了不同降雨强度对高速公路上车辆行驶时间和速度的影响。Peng等<sup>[14]</sup>引入车辆安全速度和安全距离参数,建立雨雪天气下混合交通流模型,分析交通流的稳定性。Fu等<sup>[15]</sup>在雪天交通流模型中引入安全预警距离,用于判断车辆纵向和横向冲突,进而来评估雪天道路交通安全。Li等<sup>[16]</sup>建立冰雪天气下车辆的安全跟驰模型,研究表明道路摩擦系数和速度感知

误差的下降增加了交通安全风险。为缓解恶劣天气条件下高速公路的拥堵问题,Guo等<sup>[17]</sup>提出可变限速控制策略,确定了不同天气下最优限速值。但多数这些研究只是针对普通高速公路,但对恶劣天气下高速公路隧道路段交通流特性的研究成果还鲜见报道。

本文考虑大雨环境对车辆驾驶行为的影响,兼顾隧道路段交通流的独特性,建立隧道路段元胞自动机交通流模型,并展开相应数值模拟,旨在通过揭示大雨天气隧道路段的交通流特性,为开展积极有效的交通管理提供理论基础。

## 1 大雨天气隧道路段交通场景

隧道因其半封闭结构,不受降雨直接干扰,而隧道外路段处于降雨环境,这种差异使隧道路段交通流具有独特性。图1为隧道路段交通流示意图。

首先,正常天气时,在隧道研究路段MN上,顺着车辆行驶方向,普通路段MA上可自由换道,车辆限速为 $v_g$ 。在隧道接近段AT,B点处设有隧道内限速 $v_t$ 的提示牌和禁止换道标志, $v_t < v_g$ ,因此,从B点起司机通常会减速;同样,从B点开始至隧道出口E点,禁止车辆换道。

另一方面,在隧道入口后的TC段,司机受“黑洞效应”影响<sup>[18]</sup>,车辆一般会继续减速。在隧道内的基本段CD,司机逐渐适应隧道内光线,开始加速至限速值 $v_t$ 。在隧道出口前段DU,司机受“白洞效应”影响<sup>[18]</sup>,通常会主动减速。另外,在隧道内存在一些单侧换道路段,如GH和IJ,允许车辆从左车道换道至右车道。车辆驶出隧道出口U后,从E点开始恢复自由换道,F点设立恢复高速公路限速 $v_g$ 的提示牌,车辆行驶自由度有提升,行驶方式与隧道内有明显区别。

雨天时,露天环境下路面湿滑,车辆容易发生滑行或侧滑,同时能见度下降,导致司机反应时间

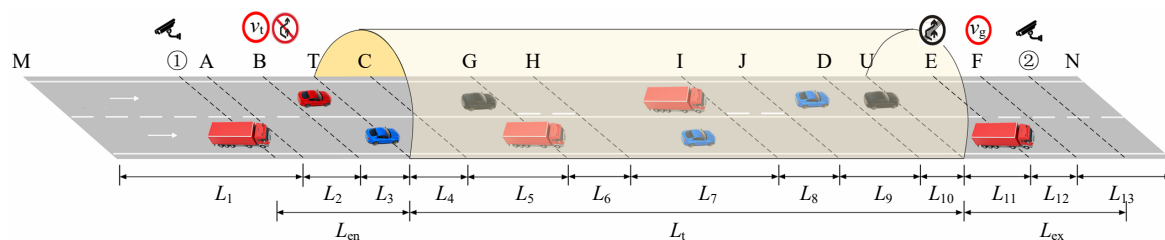


图1 隧道路段交通流场景示意图

延长 0.3~1 s, 甚至更长<sup>[19-21]</sup>。因此, 车辆行驶特点与正常天气时有所不同。通过实际交通视频的观察, 发现大雨时车辆间会保持更大车间距, 车速也比正常天气时更低。尽管隧道 TU 段不受降雨直接影响, 但是路面同样湿滑, 司机仍须谨慎驾驶, 导致隧道内平均车速也低于正常天气时的车速。

因此, 大雨时隧道路段车辆既保留了一些正常天气时的行驶特点, 如隧道入口前速度降低现象, 又增加了大雨时车辆普遍低速、车间距增大的现象, 由此引起的车辆集簇、交通拥堵的产生和传播也有了不同的特征。

## 2 大雨天气隧道路段交通流模型

结合图 1 所示的道路交通场景, 建立大雨天气下隧道路段交通流模型。道路 MN 段为单向双车道, 总长为  $L$ , 各路段长度参数如图 2 所示。

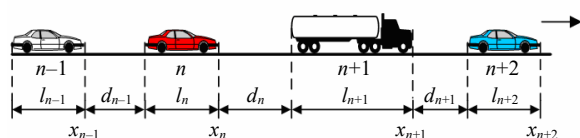


图2 交通流模型中同车道前后车辆各参数说明

在模型中, 采用开放式边界条件, 每个元胞长度为 1 m, 1 个时间步长  $\Delta t$  对应 1 s。考虑两种不同尺寸和不同性能的车辆, 即小车和大车, 小车一般加速快、速度更高, 大车车身更长、加速慢且速度低, 它们车身分别占据 7 个元胞和 14 个元胞, 对应实际车身长度为 7 m 和 14 m。同时根据司机不同性格分为谨慎型和激进型。谨慎型司机驾驶风格比较保守, 不轻易换道, 而激进型司机追求更快速度, 频繁换道和超车<sup>[22]</sup>。这里将全部大车司机归为谨慎型司机, 而小车司机中激进型司机占 25%<sup>[23]</sup>, 其余则为谨慎型司机。

### 2.1 大雨天气交通流特殊参数

针对大雨天气车辆行驶特点, 需明确一些特殊的交通流参数, 分别为可视距离、车辆速度和加减速、司机反应时间以及车辆缓冲距离  $d_0$ 。

可视距离  $L_v$  指司机行驶过程中, 能够准确判断前方车辆运动状态的最大距离<sup>[24]</sup>, 与能见度有关, 但对目标物体的辨识要求高于能见度<sup>[25]</sup>。

一般情况下, 雨天时能见度随着降雨量增大而下降, 而司机的可视距离  $L_v$  随能见度下降而逐渐

减小。

模型中可视距离  $L_v$  计算公式<sup>[26]</sup>如下:

$$L_v = 0.6 \times \frac{\ln K + 3.912}{3.912} \times q \quad (1)$$

式中:  $K$  为物体固有对比度, 取 0.5<sup>[27]</sup>;  $q$  为能见度<sup>[24]</sup>, 文中取 400 m。

当可视距离  $L_v$  大于车间距时, 车辆行驶不会受到影响, 但当  $L_v$  小于实际车间距时, 就会影响司机对前车位置的判断。为确保行车安全, 在低能见度情况下, 司机对车间距做出保守估计:

$$d_n = \begin{cases} L_v, L_v \leq d_n \\ d_n, d_n \leq L_v \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $d_n$  表示当前车辆(第  $n$  辆车)与前车(第  $n+1$  辆车)的车间距, 即  $d_n = x_{n+1} - x_n - l_{n+1}$ ,  $x_n$ 、 $x_{n+1}$  分别为第  $n$  辆车和第  $n+1$  辆车的位置, 即车辆前保险杠所处位置;  $l_{n+1}$  为前车车身长度; 同一车道上前后车辆之间位置、车间距如图 2 所示。

按照高速公路限速规定, 隧道内限速值  $v_i$  和隧道外限速值  $v_g$  分别为 80、100 km/h。正常天气时, 在隧道外路段 MB 和 FN 上, 小车和大车的最大速度  $v_{\max}$  分别取 28 和 20, 对应实际车速 100、80 km/h; 在路段 BF 上, 遵循隧道内限速要求, 小车和大车最大速度都取 22, 对应实际车速 80 km/h。

通过对实测车速数据的分析, 大雨时车速普遍低于正常天气时车速。因此, 在隧道外路段 MB 和 FN, 大雨时小车和大车的最大速度  $v_{\max}$  分别取 25 和 21, 对应实际车速 90、75 km/h; 在路段 BF 上, 遵循隧道内限速要求, 小车和大车最大速度分别为 21 和 20, 对应实际车速 75、70 km/h。同时, 考虑到路面湿滑和积水会导致路面摩擦系数减小, 因此司机会更加谨慎, 倾向于更小加速度, 以避免车辆发生打滑或失控。

另外, 在正常天气下, 司机反应时间即为时间步长  $\Delta t$ , 取为 1 s。但是在低能见度的大雨环境下, 司机反应延迟, 这里取  $2\Delta t$ , 即为 2 s<sup>[20-21]</sup>。在数值计算时, 大雨环境下车辆速度每  $2\Delta t$  更新 1 次, 但车辆位置每  $\Delta t$  更新 1 次。

通过交通视频的观察, 发现雨天时车辆会与前车保持更大间距, 以避免由路面湿滑、能见度降低和司机反应延迟带来的安全隐患。因此, 模型中的车辆之间除保持必要车间距以外, 需增加一个缓冲

距离  $d_0$ , 表示大部分司机与前车刻意保持更大的间距。通过实测数据和模拟数据的拟合, 得到大雨时大致缓冲距离  $d_0$  为 7, 对应实际距离 7 m。

## 2.2 车辆纵向前进规则

激进型司机驾驶过程中会考虑动态车间距, 其纵向前进规则采用 DHD 模型<sup>[4]</sup>中的规则, 而谨慎型司机相对保守, 遵循 NaSch 模型<sup>[2]</sup>中的规则, 但由于本模型采用的元胞格子长度为 1 m, 而原模型中元胞格子长度为 7.5 m, 因此, 加速度项都发生改变, 不再是“1”, 而用  $a$  表示。考虑雨天时不同路段车辆行驶特征差异, 分别提出隧道内部、隧道外露天道路及交接路段的车辆纵向前进规则。

### 2.2.1 隧道内部

车辆位于隧道内部时, 如图 1 所示 CD 区域, 不会直接受到大雨影响, 司机反应时间为  $\Delta t$  (1 s), 即车辆速度和位置更新的时间步长都为  $\Delta t$ , 相当于正常天气时的驾驶行为。

(1) 激进型司机采用修正后 DHD 模型, 规则如下:

(a) 加速:  $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + a, v_{\max})$

(b) 减速以避免碰撞:

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t+1), d_n(t) + v_{n+1}^e(t+1))$$

$$v_{n+1}^e(t+1) = \max(\min(v_{n+1}^e(t) + a, v_{\max}, d_{n+1}(t)) - a, 0)$$

(c) 以概率  $p$  随机慢化:

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t+1) - a, 0)$$

(d) 位置更新:  $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

这里,  $v_n(t)$  和  $v_n(t+1)$  分别表示当前车辆在当前时刻和下一时刻的速度。 $a$  表示车辆加速度, 分为起步加速度和行驶加速度, 正常天气时小车和大车的起步加速度分别取  $3 \text{ m/s}^2$  和  $2 \text{ m/s}^2$ , 行驶加速度均为  $1 \text{ m/s}^2$ <sup>[28]</sup>。结合大雨时交通视频中观察到的现象, 司机驾驶行为普遍谨慎, 因此, 小车和大车的起步加速度分别取  $2 \text{ m/s}^2$  和  $1 \text{ m/s}^2$ , 行驶加速度取为  $1 \text{ m/s}^2$ 。 $v_{\max}$  表示车辆能达到的最大速度, 各路段  $v_{\max}$  见 2.1 节中的规定。 $v_{n+1}^e(t)$  和  $v_{n+1}^e(t+1)$  分别表示前车在当前时刻和下一时刻的预期速度, 体现了激进型司机追求更快速度的特点。 $p$  为随机慢化概率, 取为 0.25<sup>[28]</sup>。 $x_n(t+1)$  表示车辆在下一时刻的位置。

(2) 谨慎型司机采用修正后 NaSch 模型, 规

则如下:

(a) 加速:  $v_n(t+1) = \min(v_n(t) + a, v_{\max})$

(b) 减速以避免碰撞:

$$v_n(t+1) = \min(v_n(t+1), d_n(t))$$

(c) 以概率  $p$  随机慢化:

$$v_n(t+1) = \max(v_n(t+1) - a, 0)$$

(d) 位置更新:  $x_n(t+1) = x_n(t) + v_n(t+1)$

### 2.2.2 隧道外露天道路

当车辆在 MA 段或 UN 段时, 处于露天环境下, 雨天能见度降低导致司机反应延迟, 反应时间为  $2\Delta t$ , 即  $2 \text{ s}$ <sup>[20-21]</sup>。假设前 1 个  $\Delta t$  后, 车辆保持速度不变, 但位置得到更新, 后 1 个  $\Delta t$  结束时, 速度和位置都得到更新。具体规定如下:

(I) 第 1 个  $\Delta t$ , 司机处于反应延迟状态, 速度不变, 参照 2.2.1 节隧道内部激进型和谨慎型司机的纵向前进规则, 此时只有三个步骤: (a) 保持速度,  $v_n(t+1) = v_n(t)$ ; (b) 随机慢化; (c) 位置更新。

(II) 第 2 个  $\Delta t$ , 司机处于正常反应状态, 但判别车间距时考虑缓冲距离  $d_0$ , 以保证行车安全。

(i) 激进型司机: 与 2.2.1 节隧道内部激进型司机前进规则类似, 但第 (b) 步的减速规则修改为  $v_n(t+1) = \min(v_n(t+1), d_n(t) - d_0 + v_{n+1}^e(t+1))$ 。

(ii) 谨慎型司机: 与 2.2.1 节隧道内部谨慎型司机的前进规则类似, 但第 (b) 步的减速规则修改为  $v_n(t+1) = \min(v_n(t+1), d_n(t) - d_0)$ 。

### 2.2.3 接近段、入口段和出口前段

当车辆进出隧道区域时, 受到隧道“黑洞效应”和“白洞效应”影响, 常出现主动减速现象<sup>[10]</sup>; 同时在大雨天气下, 这些区域又是雨天环境与封闭环境的交界处, 车辆行驶具有特殊性。

(1) 接近段 AT 车辆纵向前进规则

当车辆行驶至隧道入口前 A 与 T 之间时, 处于露天环境, 司机反应时间为  $2\Delta t$ , 同时, 司机也受隧道内更小限速的影响。具体规则如下。

(I) 第 1 个  $\Delta t$ , 司机处于反应延迟状态, 车辆纵向前进规则与 MA 和 UN 处相同, 同样分为三个步骤: (a) 保持速度; (b) 随机慢化; (c) 位置更新。

(II) 第 2 个  $\Delta t$ , 司机处于正常反应状态, 基于上述隧道外 MA、UN 激进型与谨慎型司机的纵

向前进规则, 即四个步骤: (a) 加速; (b) 减速; (c) 随机慢化; (d) 位置更新, 但由于接近隧道, 当司机发现速度超过隧道限速要求时,  $v_n(t) > v_{ap}$ , 就会主动减速, 这样在第 (a)、(b) 步骤之后, 以概率  $p_{ap}$  增加“(s)主动减速步:  $v_n(t+1) = v_n(t) - a$ ”。根据交通流实测数据, 接近段的临界速度取  $v_{ap} = 14$ , 对应实际速度为 50 km/h, 减速概率则取  $p_{ap} = 0.7$ 。

由此, 隧道接近段 AT, 车辆纵向前进遵循五步的前进规则。

(2) 隧道入口段 TC、出口前段 DU 的车辆纵向前进规则

当车辆行驶在隧道入口段 TC 或隧道出口前段 DU 时, 处于隧道内部, 司机反应时间恢复为  $\Delta t$ , 即 1 s, 分别考虑隧道入口的“黑洞效应”和出口的“白洞效应”, 司机可能出现主动减速行为, 因此, 对于激进型司机和谨慎型司机, 依据 2.2.1 节中隧道内部各自的四步纵向前进规则, 在第 (a)、(b) 步之后, 分别以概率  $p_{en}$ 、 $p_{ex}$  增加“(s)主动减速步:  $v_n(t+1) = v_n(t) - a$ ”。

根据交通流实测数据, 入口段的临界速度取  $v_{en} = 14$ , 对应实际速度为 50 km/h, 取减速概率  $p_{en} = 0.7$ 。出口段的临界速度取  $v_{ex} = 17$ , 对应实际速度为 60 km/h, 取减速概率  $p_{ex} = 0.5$ 。由此, 也构成包含五步的车辆纵向前进规则。

### 2.3 车辆横向换道规则

由于小车能在两条车道上自由换道, 因此采用对称换道规则, 区分激进型和谨慎型司机, 激进型司机占小车司机比例 25%<sup>[23]</sup>, 分别基于 MR-STCA 模型<sup>[7]</sup>和 STCA 模型<sup>[5]</sup>中的横向换道规则实施换道。大车主要在右车道上行驶, 且全部为谨慎型, 所以基于 ATCA 模型的非对称横向换道规则<sup>[5]</sup>实施换道。由于本模型采用 1 m 长的元胞格子, 而非原模型中的 7.5 m, 使得模拟过程更加细致。

在隧道外露天道路, 考虑司机反应延迟, 反应时间增加至  $2\Delta t$ , 即 2 s。第 1 个  $\Delta t$ , 司机处于反应延迟状态, 车辆不换道; 第 2 个  $\Delta t$ , 司机处于正常反应状态。此外, 大雨环境下考虑缓冲距离  $d_0$ 。

#### 2.3.1 小车

(i) 激进型小车司机

换道动机:

$$d_n(t) - d_0 + v_{n+1}^e(t+1) < \min(v_n(t) + a, v_{\max}) \quad (3)$$

$$d_{\text{pred}}(t) + v_{\text{pred}}(t+1) > d_n(t) + v_{n+1}^e(t+1) \quad (4)$$

安全条件:

$$d_{\text{succ}}(t) - d_0 > \min(v_{\text{succ}}(t) + a, v_{\text{succ}, \max}) - \min(v_n(t) + a, v_{\max}) \quad (5)$$

式中:  $d_{\text{pred}}(t)$ 、 $d_{\text{succ}}(t)$  分别表示当前车辆与目标车道前车、后车的车间距;  $v_{\text{pred}}(t+1)$  表示目标车道前车在下一时刻的速度。式 (3) 考虑了雨天车辆预留的缓冲距离  $d_0$  和前车预期车速  $v_{n+1}^e(t+1)$ , 当车间距小于当前车辆可达速度时, 车辆将无法加速行驶。式 (4) 表示目标车道的驾驶条件比当前车道更好。 $v_{\text{succ}}(t)$ 、 $v_{\text{succ}, \max}$  分别为目标车道后车的速度和最大速度。式 (5) 则表示当前车辆与目标车道后车车间距大于后车在下一时刻可达速度时, 确保换道时不会发生碰撞。取换道概率  $p_{lc} = 1$ 。

(ii) 谨慎型小车司机

换道动机:

$$d_n(t) - d_0 < \min(v_n(t) + a, v_{\max}) \quad (6)$$

$$d_{\text{pred}}(t) > d_n(t) \quad (7)$$

安全条件:

$$d_{\text{succ}}(t) - d_0 > d_{\text{safe}} \quad (8)$$

式中:  $d_{\text{safe}}$  表示当前车辆与目标车道后车需要保持的安全距离, 这里取目标车道上后车的最大速度。当车辆满足式 (6) 和 (7) 时, 就有了换道意愿; 对于谨慎型司机, 不考虑前车预期速度, 以获得更安全的换道方式。式 (8) 中预留了雨天车辆间的缓冲距离  $d_0$ , 表示当前车辆与后车的间距大于安全距离。取换道概率  $p_{lc} = 0.7$ 。

此外, 由于大车尺寸大、速度慢, 并且在雨天环境下, 大车溅起的水花会阻挡后方司机视线, 为了行车安全, 小车会选择避免跟随大车行驶, 具体规则见文献[29]。

#### 2.3.2 大车

基于 ATCA 模型中的非对称横向换道规则<sup>[5]</sup>, 左车道上的大车不论当前车道驾驶条件如何, 只要满足式 (7) 和 (8), 下一时刻就换道至右车道, 换道概率  $p_{lc} = 1$ 。当右车道上的大车满足换道动机 (式 (6)~(7)) 和安全条件 (式 (8)) 时, 换道至左车道, 取换道概率  $p_{lc} = 0.5$ , 以体现大车更多在右车道上行驶的特点。

此外, 当车辆位于隧道内单侧换道路段 GH 和

IJ 时, 小车按照上述横向换道规则单向换道, 换道概率  $p_{lc} = 0.5$ , 而大车一般不换道。

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 交通流模型的验证

选取甬莞高速宁波境内象山方向的角洞岙隧道路段, 其道路特征与模型中路段相似, 因此, 对此处雨天交通流的实测数据分析, 来验证上述交通流模型的有效性。

2024 年 11 月 1 日 8 时至 11 时 30 分, 该路段降雨量超过  $8 \text{ mm/h}$ , 属大雨天气<sup>[25]</sup>。利用隧道入口处①断面设置的雷视一体机获取各车道 5 min 的流量与车速数据, 该断面与隧道入口距离  $L_{en} = 245 \text{ m}$ , 如图 1 所示。经过对实测数据的统计分析, 得到各车道流量与速度的时间序列, 分别如图 3 (a)、(b) 所示, 图中左、右车道流量分别为  $Q_1$ 、 $Q_2$ , 平均速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ 。

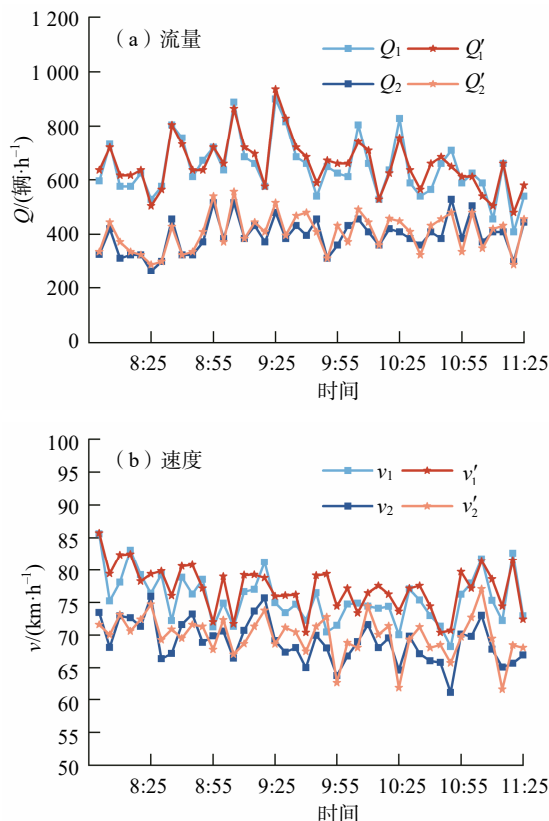


图 3 大雨时隧道入口处各车道模拟流量和速度结果与实测数据对比

另一方面, 利用建立的雨天隧道路段交通流模型, 参照图 1, 整个模拟路段 MN 总长度为  $4\,200 \text{ m}$ ,

其余隧道路段各具体长度见表 1。

表 1 隧道路段各长度参数的含义

| 参数       | 含义                 | 实际长度/m |
|----------|--------------------|--------|
| $L_t$    | 隧道 TU 长度           | 2 185  |
| $L_1$    | 普通段 MA 长度          | 1 300  |
| $L_2$    | 接近段 AT 中 AB 段长度    | 150    |
| $L_3$    | 接近段 AT 中 BT 段长度    | 50     |
| $L_4$    | 隧道入口段 TC 长度        | 50     |
| $L_5$    | 隧道内禁止换道段 CG 长度     | 650    |
| $L_6$    | 隧道内单侧换道段 GH 长度     | 100    |
| $L_7$    | 隧道内禁止换道段 HI 长度     | 750    |
| $L_8$    | 隧道内单侧换道段 IJ 长度     | 100    |
| $L_9$    | 隧道内禁止换道段 JD 长度     | 335    |
| $L_{10}$ | 隧道出口前段 DU 长度       | 200    |
| $L_{11}$ | E 处限速提示牌与隧道出口的距离   | 50     |
| $L_{12}$ | F 处恢复换道提示牌与 E 处的距离 | 50     |
| $L_{13}$ | 普通段 FN 长度          | 415    |

采用开放式边界条件, 输入由实测数据分析得到的进车率、出车率和大车比例, 模拟得到隧道入口断面①处 5 min 流量  $Q_1'$ 、 $Q_2'$  和平均速度  $v_1'$ 、 $v_2'$ 。其中, 大雨环境下左车道进车率  $\alpha_1$  和右车道进车率  $\alpha_2$  的关系为  $\alpha_2 = 0.62\alpha_1$ , 大车比例  $R$  为 0.2。小流量时, 出车率  $\beta$  为 1, 当流量增大时, 出车率  $\beta$  小于 1, 在一定进车率下, 调整出车率  $\beta$  的大小, 使模拟得到的流量符合实测值的变化趋势, 从而得到与各进车率  $\alpha$  匹配的出车率  $\beta$ , 这也为后续开展各项数值模拟标定了基本参数。相应模拟结果同样如图 3 (a) 和 (b) 所示。

从图 3 中可以看到, 隧道入口处各车道的流量、速度模拟值与实测值吻合良好, 说明所提出的模型能够真实再现大雨天气下各车道的交通特性。同时, 可以看到左车道速度大于右车道速度, 这是因为左车道的小车数量较多, 右车道大车比例较高, 而小车速度大于大车。在图 3 (a) 中表现出左车道流量大于右车道流量, 说明该路段存在车道利用不均衡现象。

#### 3.2 雨天隧道路段车辆延误成因分析

对于每一个进车率  $\alpha$ , 可以计算得到小车和大车数量  $N_c$ 、 $N_t$ , 从而得到无量纲车辆密度  $\rho$ , 计算公式如下:

$$\rho = \frac{N_c L_{car} + N_t L_{truck}}{WL} \quad (9)$$

式中:  $L_{\text{car}}$  与  $L_{\text{truck}}$  分别为小车、大车车身长度,取值分别为 7 和 14,对应实际车辆长度 7 m 和 14 m;  $L$  为车道长度;  $w$  为车道数量,双车道取值为 2。

### 3.2.1 车辆速度特征

为研究大雨天气时不同道路位置处车速随密度变化的情况,将模拟路段分为以 50 m 为单位的局部路段,分别计算正常天气和大雨时各单元路段的平均车速随密度的变化情况,结果如图 4 所示。图中,上方 T、U 表示隧道入口和出口, M、N 表示模拟路段的起点和终点,右侧列出 12 种密度情况,大车比例  $R$  为 0.2。

首先,正常天气时左、右车道上车速沿道路长度变化情况如图 4(a)、(b) 所示。当密度  $\rho \leq 0.10$  时,在隧道入口前的普通路段,左车道上速度接近限速 100 km/h,明显大于右车道上速度,这是由于右车道上大车比例较高。接近隧道入口 T 处,左右车道上车速均骤降至约 69 km/h,这是受隧道内更小的限速要求与隧道入口“黑洞效应”共同影响造成的。隧道内,左右车道速度回升至接近隧道内限速 80 km/h 左右。在隧道出口 U 处前方,受“白洞

效应”影响,两条车道车速再次下降至约 73 km/h。驶出隧道后,由于限速恢复为 100 km/h,左右车道上车速各自提升,左车道速度大于右车道速度,与隧道入口前车速相仿。可以看到,此时左车道上车辆在隧道外基本处于自由流状态,右车道上由于大车比例较高,车速未能达到道路限速值。

当  $0.10 < \rho \leq 0.22$  时,在隧道入口前普通路段,左右车道沿道路长度速度逐渐下降。随着密度增加,接近隧道入口 T 处,骤降后的速度更小,隧道内速度还能保持限速值,但隧道出口前速度骤降幅度更大。在隧道出口后普通路段,左右车道上提升后的速度减小,但是大于隧道入口前车速。

当  $0.22 < \rho \leq 0.40$  时,在隧道入口前普通路段,车速低于 65 km/h,入口处车速骤降现象不再明显,但进入隧道后车速先提升后沿程下降,越接近隧道出口,速度越小。这是由于车辆间相互作用增强以及隧道出口“白洞效应”引起的减速,造成拥堵向上游传播。在隧道出口后,车速略低于入口前车速。

当  $0.40 < \rho \leq 0.60$  时,车速沿道路长度都较

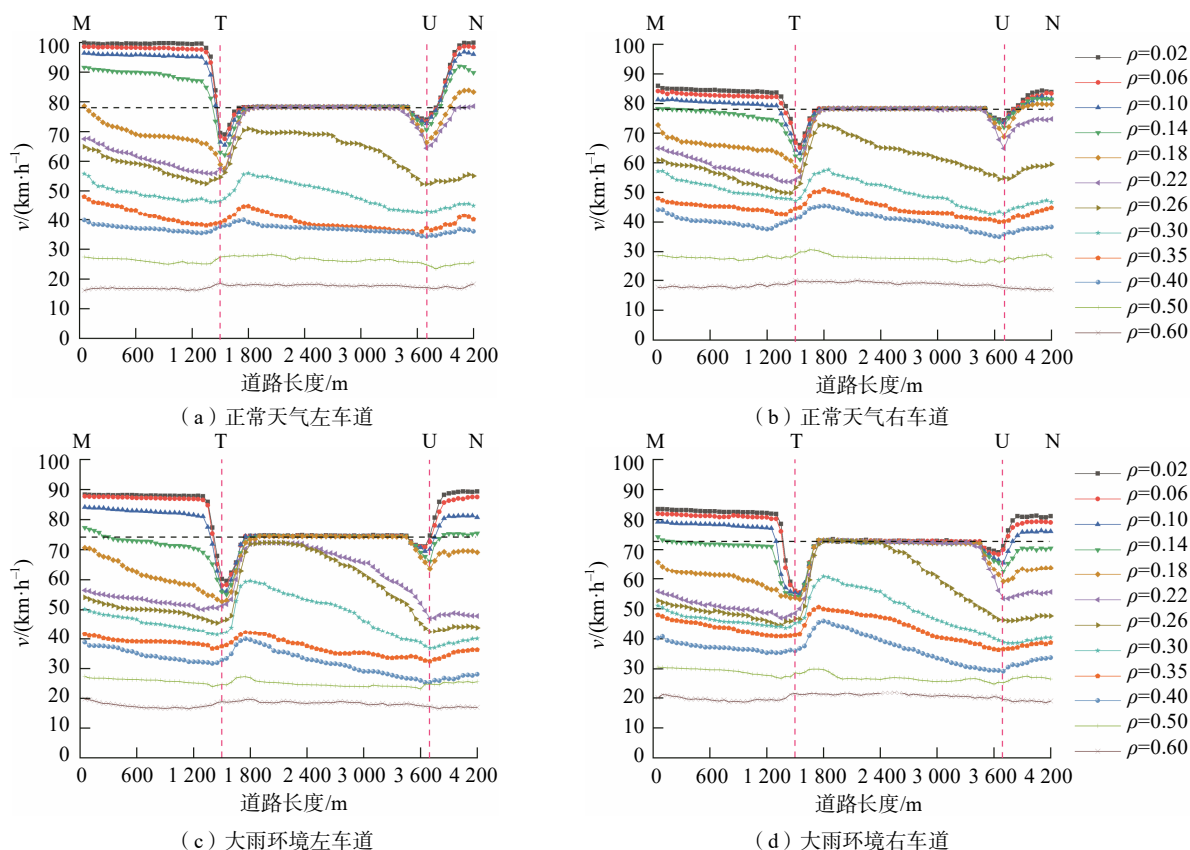


图 4 大雨时道路不同位置处的速度分布与正常天气时的比较

低, 低于 30 km/h, 表明整个路段出现严重拥堵, 隧道对交通的影响已很微弱。

如图 4 (c)、(d) 所示, 观察大雨环境下速度沿道路长度的变化情况。当  $\rho \leq 0.06$  时, 相比正常天气, 左右车道沿程车速都有下降。这是受能见度降低、路面湿滑等因素影响, 司机通常会减速并增加与前车间距所导致的。同时, 由于小车速度下降幅度更大, 缩小了左右车道的速度差。在隧道入口附近, 受“黑洞效应”与司机保持更大间距的共同影响, 车速降低至更小值。

当  $0.06 < \rho \leq 0.22$  时, 在隧道入口前露天路段, 左右车道上速度沿道路长度逐渐减小。隧道内, 当  $\rho=0.22$  时, 左车道出现正常天气密度达到 0.26 时才发生的车速沿程下降现象, 隧道出口后车速都小于正常天气。左车道上减速现象更明显, 这是受到隧道出口附近的“白洞效应”以及司机反应延迟、保持更大间距的影响, 而左车道以小车为主, 车速更快, 受露天车辆减速带来的阻滞影响更大, 隧道出口后的拥堵向上游传播, 导致隧道内左车道速度更容易下降, 也更容易引发交通拥堵。

当  $0.22 < \rho \leq 0.40$  时, 速度沿道路长度的变化趋势与正常天气时的情形相似, 但各路段的平均速度更小, 隧道内左右车道上速度沿程下降更快, 左车道速度还是比右车道更低。

当  $0.40 < \rho \leq 0.60$  时, 大雨时车速沿道路长度变化与正常天气趋于一致, 沿程都处在 20~30 km/h, 这是由于车辆密度较大, 道路发生严重拥堵, 此时隧道和大雨对交通的影响都不明显。

可以看到在大雨环境下, 当  $\rho \leq 0.22$  时, 各路段的速度都普遍低于正常天气时的速度, 与实际交通视频展示的现象一致。同时, 隧道外左右车道的速度差均小于正常天气, 隧道入口和出口处的速度骤降达到的速度值也更低, 隧道内左车道上速度受大雨的影响更严重, 易引发交通拥堵。当密度继续增加, 隧道内车速沿程下降幅度比正常天气时大。当  $\rho > 0.40$  以后, 车速沿程都较低, 道路上已经出现了严重拥堵, 此时雨天对交通流的影响也已不再明显。

### 3.2.2 车辆延误成因分析

上述分析得出, 当密度  $\rho < 0.4$  时, 大雨对车速产生负面影响, 为此, 可进一步计算大雨时车辆的

延误时间。为消除道路长度的影响, 采用延误时间比值 DTP 来分析降雨对交通的影响, 下面简称延误比  $D$ , 具体计算公式<sup>[30]</sup>如下:

$$D = \frac{T - T_f}{T} \quad (10)$$

式中:  $T$  表示所有车辆通过所选路段的平均时间;  $T_f$  表示自由流状态下车辆平均通行时间。延误比  $D$  范围为 0~1, 其数值越大, 表示车辆延误越严重, 交通运行状况越差。

从图 4 中可以看到, 正常天气情况下, 当密度  $\rho \leq 0.06$  时, 左车道车辆除了在隧道出入口处有速度降低现象, 其余都能满速行驶, 因此, 将此时的交通流视为自由流, 当大车比例  $R$  为 0.1 和 0.2 时, 分别得到自由流时车辆通行时间  $T_{f1}$  和  $T_{f2}$ 。同时, 针对  $R=0.1$  和  $R=0.2$ , 分别计算正常天气和大雨条件下不同密度时左车道上车辆的通行时间  $T$ , 得到不同密度时的延误比  $D_1$  (正常天气) 和  $D_2$  (大雨条件), 结果如图 5 所示。

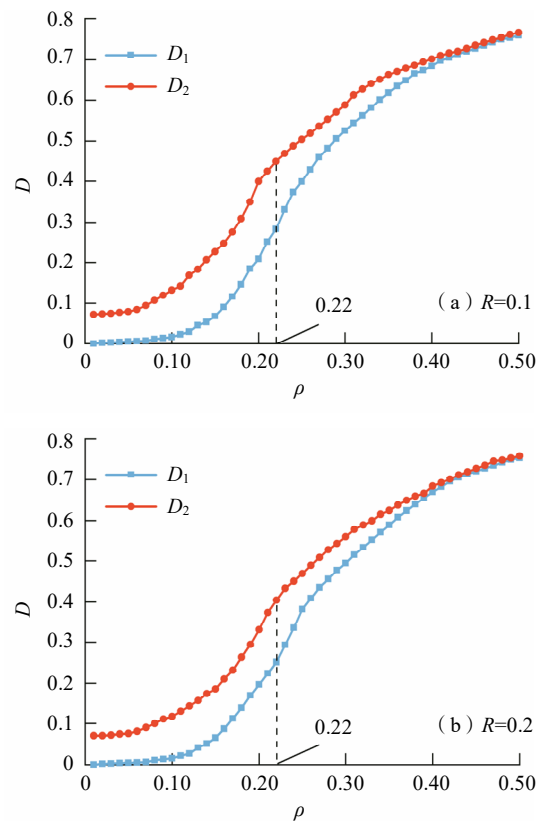


图 5 正常天气和大雨时左车道车辆的延误比  $D_1$  和  $D_2$

从图 5 (a) 中看到, 当大车比例  $R=0.1$ ,  $\rho \leq 0.06$  时, 正常天气时延误比  $D_1$  保持为 0, 而大雨时

延误比  $D_2$  约为 0.06~0.08。说明即使密度较小,大雨也已造成了车辆的延误。

当  $0.06 < \rho \leq 0.22$  时,  $D_1$  和  $D_2$  都随着密度增加而上升,但两者差距明显;当  $\rho=0.22$  时,  $D_2$  比  $D_1$  高约 0.15,差距最大。此时,雨天时车辆延误的原因一部分来自能见度降低、路面湿滑等因素,另一部分则来自密度增加带来的车速下降,而  $D_1$  仅反映车辆间相互作用引起的延误。此现象与图 4 中表现出的速度随密度增加而下降,以及大雨时速度更低的现象相一致。

当  $0.22 < \rho \leq 0.40$  时,随着密度增加,正常天气时  $D_1$  和大雨时  $D_2$  的差距逐渐缩小,正如在图 4 中展现出的此时两种天气时的速度差异缩小。表明随着密度增加,车辆间相互作用逐渐成为延误的主要原因,但大雨的影响仍存在。

当  $0.40 < \rho \leq 0.50$  时,  $D_1$  和  $D_2$  趋于一致,均大于 0.65。这是由于整个道路上都发生交通拥堵,即使不下雨,车速也很低,正如图 4 中速度所表现出来的特征,此时大雨的影响已不明显。

当大车比例  $R=0.2$  时,结果如图 5(b) 所示。当  $\rho \leq 0.06$  时,两种天气车辆延误比与  $R=0.1$  时的情况基本一致,表明在小密度情况下,大雨天气是车辆延误的主要原因,大车对车辆延误的影响可以忽略。

当  $0.06 < \rho \leq 0.22$  时,对应相同的密度,  $D_1$  和  $D_2$  均大于  $R=0.1$  时的值,并且两者差距更大,其中  $\rho=0.22$  时,  $D_2$  比  $D_1$  增加了 0.17。此时大车比例加剧了车辆间相互作用,叠加大雨影响以后,车辆延误严重程度增大。

当  $0.22 < \rho \leq 0.40$  时,与  $R=0.1$  时比较,车辆延误比  $D_1$  与  $D_2$  更大,大雨时  $D_2$  与正常天气时  $D_1$  的差距也更大。说明在此密度区间,大车使车辆延误加剧,而叠加大雨影响后,通行效率更低。

值得注意的是,当  $0.40 < \rho \leq 0.50$  时,与  $R=0.1$  的情况相同,  $D_2$  与  $D_1$  趋于一致,且随着密度增加而增大,其值稍大于  $R=0.1$  时的值,说明此时车辆间相互作用是产生车辆延误的主要因素,大车比例增加,交通延误加剧,而此时大雨影响减弱。

综上,大雨天气和车辆间相互作用都是产生车辆延误的原因,只是在不同的密度区间,两者对车辆延误所产生的影响有强弱之分。

## 4 结论

(1) 考虑大雨时司机反应延迟及刻意增加车间距的驾驶行为,结合隧道路段车辆行驶特点,提出了大雨环境下隧道路段的交通流模型。验证了模型有效性,表明模型能再现大雨时隧道路段的交通流特征,也标定了大进车率时的出车率  $\beta$ 。

(2) 通过数值模拟,分别得到正常天气和大雨时不同道路位置处车速随密度的变化趋势,发现当密度  $\rho < 0.40$  时,大雨天气下各路段车辆速度普遍低于正常天气,并揭示了大雨时隧道内左车道比正常天气更容易发生交通拥堵的原因。

(3) 通过计算正常天气和大雨时车辆的延误比,分析得出大雨天气和车辆间相互作用都是产生车辆延误的原因。在密度较小时,大雨是造成车辆延误的主要原因,并随着密度增大,增加大车比例会加剧车辆延误,尤其是大雨天气,车辆延误更加严重。因此在高速公路隧道路段,要加强大雨天气时大车的管理,在必要时采取限道、限速等管控措施以缓解交通拥堵。

## 参考文献:

- [1] YADAV S. Impact of visibility on car-following considering traffic jerk in adverse weather conditions[J]. The European physical journal plus, 2024, 139(6):553.
- [2] NAGEL K, SCHRECKENDERG M. A cellular automaton model for freeway traffic[J]. Journal de physique I, 1992, 2(12):2221-2229.
- [3] LÁRRAGA M E, ALVAREZ-ICAZA L. Cellular automaton model for traffic flow based on safe driving policies and human reactions[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 2010, 389(23):5425-5438.
- [4] 张柠溪,祝会兵,林亨,等.考虑动态车间距的一维元胞自动机交通流模型[J].物理学报,2015,64(2):303-309.
- [5] CHOWDHURY D, WOLF D E, SCHRECKENBERG M. Particle hopping models for two-lane traffic with two kinds of vehicles: effects of lane changing rules[J]. Physica A: statistical mechanics and its applications, 1997, 235(3/4):417-439.
- [6] GUZMÁN H A, LÁRRAGA M E, ALVAREZ-ICAZA L. A two lanes cellular automata model for traffic flow considering realistic driving decisions[J]. Journal of cellular automata, 2015, 10(1/2):65-93.
- [7] ZHU H B, CHEN G Y, Lin H, et al. The impact of

- aggressive driving behaviors on multi-lane highway traffic flow[J]. *International journal of modern physics C*, 2018, 29(7):1850056.
- [8] ZHANG F, LU J N, HU X J, et al. Investigating safety impact of sun glare in urban tunnels based on cellular automata approach[J]. *Accident analysis and prevention*, 2020, 148:105821.
- [9] LI Z M, SMIRONVA M N, ZHANG Y L, et al. Tunnel speed limit effects on traffic flow explored with a three lane model[J]. *Mathematics and computers in simulation*, 2022, 194:185-197.
- [10] LU X Y, ZHU H B, WANG J G, et al. Modeling impacts of the tunnel section on the mixed traffic flow: a case study of Jiadong'ao tunnel in China[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2022, 603: 127840.
- [11] SHANG T, LU J X, LUO Y, et al. Understanding the traffic flow in different types of freeway tunnels based on car-following behaviors analysis[J]. *Tunnelling and underground space technology*, 2024, 143:105494.
- [12] WANG Z K, ZHU H B, WU Q H, et al. Analysis of optimization strategy for trucks in highway traffic with a long tunnel[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2025, 658:130290.
- [13] IMRAN W, KHAN Z H, KHAN D, et al. On the practical utility of a continuum traffic flow model on curvy highways in adverse weather conditions[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, 25:101108.
- [14] PENG G H, XU M Z, TAN H L. Phase transition in a new heterogeneous macro continuum model of traffic flow under rain and snow weather environment[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, 637: 129585.
- [15] FU C Y, LU Z Y, DING N K, et al. Distance headway-based safety evaluation of emerging mixed traffic flow under snowy weather[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2024, 642:129792.
- [16] LI L H, ZHOU C, HUANG J P, et al. Car-following safety modeling and risk assessment of autonomous vehicle in icy and snowy weather[J]. *Accident analysis & prevention*, 2025, 214:107982.
- [17] GUO J, MAC X, XU X C, et al. Investigation on variable speed limit control strategy of expressway under adverse weather conditions[J]. *Physica A: statistical mechanics and its applications*, 2022, 602:127616.
- [18] MEHRI A, SAJEDIFAR J, ABBASI M, et al. Safety evaluation of lighting at very long tunnels on the basis of visual adaptation[J]. *Safety science*, 2019, 116:196-207.
- [19] CAO C, LIU Z C, LI W L. Design of advanced emergency braking system based on vehicle-road cooperation[C]//Seventh International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics. Kunming, China. SPIE, 2023:784-790.
- [20] PANG M B, REN B N. Effects of rainy weather on traffic accidents of a freeway using cellular automata model[J]. *Chinese physics B*, 2017, 26(10):108901.
- [21] HOU G Y, CHEN S R. Study of work zone traffic safety under adverse driving conditions with a microscopic traffic simulation approach[J]. *Accident analysis & prevention*, 2020, 145:105698.
- [22] CHANDR R, BERA A, MANOCHA D. Using graph-theoretic machine learning to predict human driver behavior[J]. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, 2022, 23(3):2572-2585.
- [23] 吴胜春, 郑贤清, 郭明旻, 等. 国内典型大城市快速路交通流实测[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2011, 41(6):791-800.
- [24] MORDEN J N, CARAFFINI F, KYPRAIOS I, et al. Driving in the rain: a survey toward visibility estimation through windshields[J]. *International journal of intelligent systems*, 2023, 2023(1):9939174.
- [25] The Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research. Federal meteorological handbook No.1: surface weather observations and reports[M]. Washington D C, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration, 2019.
- [26] 任福田, 刘小明, 孙立山, 等. 交通工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2017.
- [27] CHECALIER P A G J. On the specification of the DRI requirements for a standard NATO target[EB/OL]. [2025-11-20]. <https://www.researchgate.net/publication/27497162>.
- [28] 李江, 傅晓光, 李作敏. 现代道路管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [29] 吴权浩, 逮星宇, 颜星, 等. 长隧道路段货车限道措施的数值模拟[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2024, 37(3): 71-79.
- [30] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市交通运行状况评价规范: GB/T 33171—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.

(责任编辑 章践立)