

基于高逼真驾驶模拟器雾霾天气下跟驰行为分析

时恒, 涂辉招, 高坤

(同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

摘要: 为研究雾霾天气下车辆跟驰行为, 基于八自由度高逼真驾驶模拟器, 设置晴天和雾霾天气两个实验场景, 采集了不同车速跟驰状态下的驾驶行为数据, 分析了车头时距/间距、延迟时距、加/减速度等跟驰行为关键变量。实验结果表明: 雾霾天气显著影响了跟驰行为, 最大车头间距在高速、中速和低速跟驰状态下分别显著增加了 8.7%、19.4% 和 25.6%; 高速跟驰状态下最小车头间距显著减小了 13.0%, 低速跟驰状态下最小车头时距显著减小了 47.9%; 低速跟驰状态下, 延迟时距及其离散性显著增加了 15.5% 和 28.2%; 雾霾天气下后车的加速行为更为谨慎。不同跟驰车速下的跟驰行为存在显著差异, 随着跟驰车速增加, 最大/最小车头间距及其离散性显著增加, 最大/最小车头时距及其离散性则呈先增加后减小趋势, 延迟时距显著增加。研究成果为雾霾天气下交通微观仿真的参数标定以及交通安全预警系统的搭建等提供了借鉴。

关键词: 雾霾天气; 跟驰状态; 跟驰行为;

The analysis of car following behaviors under haze weather condition based on the high fidelity driving simulator

SHI Heng, TU Huizhao, GAO Kun

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, P.R. China)

Abstract: In order to investigate drivers' car following behaviors under haze weather condition, by using the high fidelity driving simulator with motion system of 8 degrees of freedom, two scenarios namely clear weather condition and haze weather condition were setup to collect and analyze the key variables of car following behaviors including the time/distance headway, delay time and acceleration/deceleration rate under different car following stages with different speeds. Compared to the clear weather condition, the results under haze weather condition indicate that, haze weather condition has significant effects on drivers' car following behaviors, the maximum distance headway significantly increased 8.7% under car following stages of low speed, 19.4% of intermediate speed and 25.6% of high speed. The minimum distance headway significantly increased 13.0% under car following stage of high speed, the minimum time headway significantly decreased 47.9% under car following stage of low speed. The mean value and the discreteness of the delay time significantly increased 15.5% and 28.2% respectively.

Drivers become more cautious with accelerating under haze weather condition. There exist significant differences of car following behavior under car following stages with different speed, both the mean value and the discreteness of the maximum/minimum distance headway increased significantly under higher speed, while the time headway decreased from car following stage of low speed to intermediate speed and then increased under car following stage of high speed, furthermore, the delay time significantly increased under higher speed. The results of this research can be consulted by the calibration of parameters in the micro-simulation of traffic and the forewarning system of traffic safety under haze weather condition.

Key words: Haze weather condition; Car following stages; Car following behaviors;

1 引言

近几年, 雾霾几乎已成为中国大部分城市的天气常态。2015年11-12月, 全国连续发生七次大范围、连续性雾霾天气, 持续时间最长达5天, 影响范围达到35.2万 km^2 ^[1]。雾霾对身心健康带来威胁的同时, 也大大影响了交通效率和交通安全, 解析雾霾天气下驾驶行为, 可为分析雾霾天气下交通安全提供理论依据。但由于雾霾天气具有低能见度、影响范围大等特征, 传统数据采集手段难以获取有效的驾驶行为信息。驾驶模拟器利用虚拟现实仿真技术模拟现实驾驶环境, 实现动态的模拟驾驶, 研究驾驶人员在不同的道路交通环境中的驾驶行为特性和驾驶期望机理等^[2]。近年来驾驶模拟器得到了广泛的推广和应用, 如同济大学交通运输工程学院驾驶模拟实验室、公安部交通管理科学研究所、武汉理工大学智能交通系统中心等数家单位的驾驶模拟器已投入使用, 为采集较为准确的第一手驾驶行为数据提供了可能性的同时也将更好地模拟车辆跟驰等驾驶行为, 为研究雾霾天气下驾驶行为提供了可能性。雾霾天气低能见度的特点对驾驶行为有显著影响^[3], 部分学者对不同环境下驾驶行为的差异性进行了研究, 如加减速特性^[4]、车头间距^[5]以及反应时间特性^[6]等。涂辉招等^[3]分析了驾驶员在晴天天气和雾霾天气下的自由驾驶行为差异性, 得出了在低能见度情况下, 驾驶员加减速行为变量和期望速度的平均值及方差较小, 说明驾驶员在能见度较低时会更加谨慎的驾驶车辆, 并且不同驾驶员之间的差异性较小。Evans^[7]在其研究中指出, 由于能见度的影响, 驾驶员在雾霾天气下会减小车头间距使前车在视距范围内, 以更好的判断前车的行驶状态。同时, Cavallo^[8]发现雾霾会降低周围环境对驾驶员的刺激, 使得驾驶员低估前车的行驶速度, 所以驾驶员在雾天天气

跟驰过程中有减小车头间距的趋势。相对于前车速度，后车驾驶员更容易判断车头间距^[5]，从而采取相应的驾驶策略维持期望车头间距。当车头间距与驾驶员期望不符时，后车驾驶员通过调整速度来保持期望车头间距，车流中行驶车辆速度的变化是影响交通流稳定的因素之一^[9]。Hoogendoorn 等^[10]通过驾驶模拟实验分析了雾天下驾驶员跟驰行为，发现在雾天下后车加速度和速度相对晴天较小，雾天下基于 Helly 跟驰模型和 IDM 跟驰模型的仿真结果也显示最大加速度和最大减速度相对于晴天明显减小，并且两个模型中表征车头间距的参数明显变大，说明雾天下驾驶员对车头间距更为敏感。

以往研究对晴天天气和雾霾天气下的驾驶行为差异性进行了分析，而较少关注不同速度跟驰状态下驾驶行为特别是跟驰行为的差异，本研究基于同济大学八自由度高逼真驾驶模拟器，构建晴天天气和雾霾天气两个实验场景，在每个实验场景下分别进行高速、中速和低速跟驰驾驶模拟实验，采集驾驶员在两个场景不同速度跟驰状态下的跟驰行为数据，分析晴天天气和雾霾天气下不同速度跟驰状态下后车延迟时距、车头间距/时距和加速/减速行为等在晴天和雾霾天气下的差异。

2 研究方法

2.1 跟驰行为变量

2.1.1 延迟时距

延迟时距是指后车在前车行驶状态改变后随之改变行驶状态的时间间隔，表征了后车受到前车刺激时改变自身行驶状态的灵敏程度。Zhang 等^[11]在研究中提出了驾驶员延迟时距的标定方法，以 $\pm 0.15\text{m/s}^2$ 作为前后车加/减速度变化的阈值，以前后车加/减速度变化阈值时刻的时间间隔作为跟驰行为延迟时距，本研究前车的加/减速度并非连续变化，借鉴 Zhang 等^[11]提出的研究成果，以前车加速度改变的时刻为 T_f ，后车加速度阈值 0.15m/s^2 出现时刻为 T_b ，根据式（1）确定跟驰行为延迟时距。延迟时距 T 的标定方法如图 1 所示：

$$T = T_f - T_b \quad (1)$$

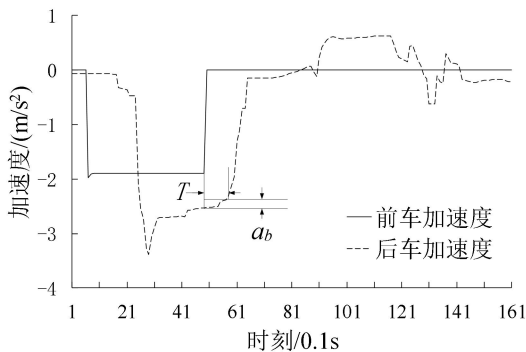


图 1 驾驶员跟驰行为延迟时距标定方法

Fig.1 Calibration method of drivers' delay time in car following process

2.1.2 车头间距/时距

车头时距描述了相同车道上连续的前后两车通过同一道路断面的时间间隔，排除了速度对前后两车空间距离的影响，是描述前后两车时空特性的重要指标。后车驾驶员会通过改变行驶速度以维持理想的车头间距，从而保证一定的车头时距^[5]。跟驰过程中的最大车头间距是后车驾驶员为了维持跟驰状态能够接受的最大距离，最小车头间距是驾驶员能够接受的最小安全距离。分别统计后车驾驶员在高速、中速和低速平稳跟驰状态下能够接受的最大车头间距的车头时距（记为最大车头时距）、最小车头间距时的车头时距（记为最小车头时距）和 T_b 时刻的车头时距，分析雾霾天气对驾驶员车头时距的影响。后车驾驶员在 T_b 时刻的车头间距（记为 D ）、最大车头间距（记为 D_m ）和最小车头间距（记为 D_n ）的标定方法见图 2。

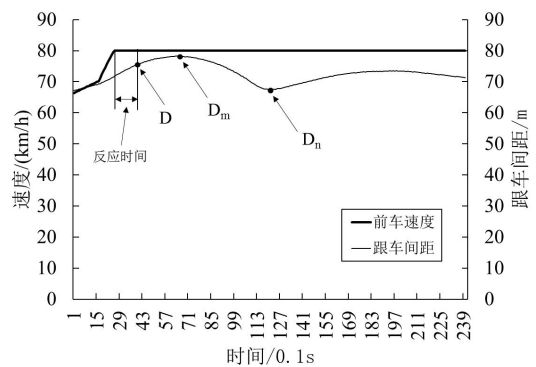


图 2 跟驰过程车头间距标定方法

Fig.2 Calibration method of space headway in car following process

2.1.3 加速/减速行为

后车驾驶员的加/减速行为描述了后车驾驶员跟驰过程中的速度策略，是跟驰行为的重要组成部分，也是影响交通流稳定的重要因素^[9]。后车在平稳跟驰过程中加速/减速度的大小描述了后车驾驶员加速/减速的意愿大小，每 0.1 s 记录一次后车的加速度和减速度，分别统计晴天和雾霾天气下后车在高速、中速和低速平稳跟驰过程中的加速度和减速度，分析晴天/雾霾天气和不同跟驰车速对后车驾驶员加/减速行为的影响。

2.2 高逼真驾驶模拟实验

2.2.1 实验设备

本次实验使用同济大学高逼真度驾驶模拟器，如图 3 所示。该模拟器的驾驶模拟舱中放置了一辆完全真实的车辆，该车设置了真实的力反馈系统，包括方向盘、油门、刹车。车辆前方是一个 250° 的环形屏幕，刷新频率是 60 Hz。通过 SCANer™ 软件来控制整个驾驶模拟器。该驾驶模拟器配备了八自由度的运动系统，此运动系统可以开启和关闭。

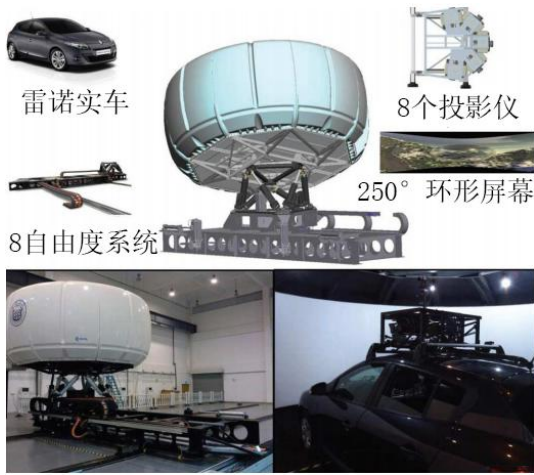


图3 同济大学八自由度驾驶模拟器

Fig.3 High fidelity driving simulator in Tongji University

2.2.2 实验方案

根据雾的等级划分 (GB/T 27964-2011), 能见度为 80 m 时已属于雾霾天气, 需要对高速公路上的车流进行管理与控制以保证交通安全。本实验设置驾驶模拟器实验场景的最大能见度为 80 m 以模拟雾霾天气的驾驶环境, 设置实验场景能见度 > 1000 m 以模拟晴天天气的驾驶环境, 图 4 给出了晴天天气和雾霾天气下跟驰实验的场景设置。



(a) 晴天天气跟驰实验场景



(b) 雾霾天气跟驰实验场景

图4 雾霾天气和晴天天气跟驰实验场景

Fig.4 Scenarios of haze and clear weather conditions

在晴天天气和雾霾天气驾驶模拟实验场景中, 每位驾驶员将分别在双向四车道限速 120 km/h 的高速公路上跟驰前车行驶, 前车由静止加速至低速 (10 km/h), 在低速匀速行驶一段时间后加速至中速 (40 km/h), 之后再中速平稳行驶一段时间后加速至高速 (80 km/h) 并在高速平稳行驶一段时间。记前车加速度改变的時刻为 AP (Action Point), 跟驰过程中前车的速度轨迹将包括图 5 所示的 3 个加速度改变時刻 (AP₁-AP₃) 以标定不同跟驰状态下后车的延迟时距等跟驰行为变量, AP₁-AP₃ 的含义和对应的延迟时距如表 1 所示。

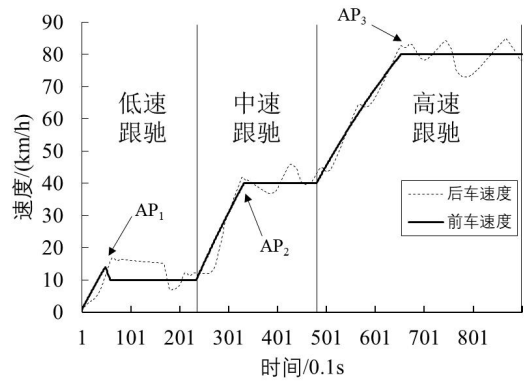


图5 跟驰实验前车速度轨迹设置

Fig.5 Speed as a function of time slides of the leading car

表1 AP 时刻含义及对应延迟时距意义

Tab.1 Action points and the physical Meanings

简称	AP 时刻含义	延迟时距
AP ₁	前车加速至低速时刻	低速跟驰状态延迟时距
AP ₂	前车加速至中速时刻	中速跟驰状态延迟时距
AP ₃	前车加速至高速时刻	高速跟驰状态延迟时距

2.2.3 实验样本

驾驶模拟实验样本量大小主要参考以往研究 (12-32 名驾驶员不等) [12-14], 选定了 32 名驾驶员进行实验。表 2 给出了参与实验驾驶员的基本信息, 他们都拥有合格的驾驶证, 无驾驶模拟症。

表2 参与实验驾驶员基本信息

Tab.2 General information of drivers

	年龄		驾龄
平均值	39.8	平均值	9.4
范围	36-44	范围	6-13
标准差	3.0	标准差	3.3

2.2.4 实验与数据采集

每位驾驶员将被告知应遵守的操作规范, 并熟悉驾驶模拟器。随后驾驶员在实验环境下的一条高速公路上自由驾驶 5 min, 在此过程中, 驾驶员将经历加速、减速、平稳行驶等过程, 同时驾驶员也将熟悉踩踏油门和刹车板的动作, 与此同时, 观察员将确认驾驶员是否有不适反应。若驾驶员一切正常, 休息 5 min 后开始正式实验。在驾驶实验进行的过程中记录下前后车的行驶轨迹数据, 包括速度、加速度、车头间距等跟驰行为变量。

3 实验结果与分析

3.1 雾霾天气对车头时/间距的影响

图 6 给出了晴天和雾霾天气下不同车速跟驰状态下最大/最小车头时距/间距的累积概率分布。最大车头时距在不同车速跟驰状态下存在较大异质性 (图 6-a), 最小车头时距在不同车速跟驰状态下的异质性则较小 (图 6-b)。最大车头间距和最小车头间距在不同车速跟驰状态下存在较大异质性。以 T 检验或秩和检验均值差异性, 以 F 检验判断方差齐性, 表 3 给出了晴天和雾霾天

气下车头间距/时距的差异显著性检验。以 Kruskal-Wallis 检验判断均值差异性，以单因素方差分析判断方差齐性，表 4 给出了不同车速跟驰状态下车头间距/时距的差异显著性检验。

对比不同车速跟驰状态下的车头时距和车头间距特性，从表 4 可以看出，中速跟驰状态下的最大车头时距和最小车头时距相对于高速和低速跟驰状态较小，说明驾驶员在中速跟驰状态具有更大的信心以较小的车头时距跟驰前车行驶。在低速跟驰状态，由于当前车速较低，车头时距较大，随着速度的增加，车头时距随之减小，中速跟驰状态的最大车头时距相对低速跟驰状态在晴天和雾霾天气下分别显著减小了 58.7% 和 56.2%，最小车头时距分别显著减小了 58.5% 和 13.7%。当车速较高时，后车驾驶员为了保证行驶安全以较大的车头间距跟驰前车行驶，此时的车头时距相对于中速跟驰状态显著增加，其中高速跟驰状态下最大车头时距相对于中速跟驰状态在晴天和雾霾天气下分别显著增加了 59.1% 和 82.9%，最小车头时距分别显著增加了 77.0% 和 97.5%。从表 4 还可以看出，随着车速的提高，最大车头间距及其离散性随之显著增加，说明车速越高，车流密度越低且稳定性越差。

对比晴天和雾霾天气下车头间距/时距特性，从表 3 来看，雾霾天气对车头间距影响较大，对不同速度跟驰状态下的最大车头间距都有显著影响，雾霾天气下最大车头间距在高速、中速和低速跟驰状态下分别显著增加了 8.7%、19.4% 和 25.6%；雾霾天气对车头时距的影响较小，主要影响了低速跟驰状态下的最小车头时距，使

表 3 晴天和雾霾天气下最大/最小车头间距/时距差异显著性检验 (* $\alpha = 0.1$, ** $\alpha = 0.05$)

Tab.3 Significant tests for differences of maximum/minimum distance/time headways under clear and haze weather conditions (* $\alpha = 0.1$, ** $\alpha = 0.05$)

检验变量	跟驰状态	最大值			最小值		
		均值差异性检验	方差齐性检验	雾霾-晴天 晴天 (均值/标准差)	均值差异性检验	方差齐性检验	雾霾-晴天 晴天 (均值/标准差)
车头间距	高速跟驰	*显著	不显著	8.7%/5.6%	*显著	不显著	-13.0%/-21.9%
	中速跟驰	*显著	不显著	19.4%/32.1%	不显著	不显著	-6.5%/-11.0%
	低速跟驰	**显著	*显著	25.6%/55.3%	不显著	不显著	-12.7%/9.0%
车头时距	高速跟驰	不显著	不显著	8.9%/4.6%	不显著	*显著	21.0%/49.8%
	中速跟驰	不显著	*显著	-5.3%/-43.6%	不显著	不显著	8.5%/-23.4%
	低速跟驰	不显著	不显著	-10.8%/-13.3%	**显著	**显著	-47.9%/83.2%

表 4 不同速度跟驰状态下最大/最小车头间距/时距差异显著性检验 (* $\alpha = 0.1$, ** $\alpha = 0.05$)

Tab.4 Significant tests for differences of maximum/minimum distance/time headways under car following stages with different speed (* $\alpha = 0.1$, ** $\alpha = 0.05$)

检验变量	跟驰状态	均值差异性检验	方差齐性检验	高速-中速	中速-低速
				中速 (均值/标准差)	低速 (均值/标准差)
最大车头间距	晴天天气	**显著(0.000)	**显著(0.000)	71.3% / 70.7%	17.5% / 26.4%
	雾霾天气	**显著(0.000)	*显著(0.085)	55.9% / 36.5%	11.7% / 7.4%
最小车头间距	晴天天气	**显著(0.000)	**显著(0.007)	76.6% / -3.1%	74.7% / 101.6%
	雾霾天气	**显著(0.000)	**显著(0.003)	64.4% / -15.0%	87.1% / 64.7%
最大车头时距	晴天天气	**显著(0.000)	不显著(0.532)	59.1% / 17.9%	-58.7% / -8.8%
	雾霾天气	**显著(0.000)	**显著(0.024)	82.9% / 118.9%	-56.2% / -40.7%
最小车头时距	晴天天气	*显著(0.053)	**显著(0.013)	77.0% / 64.2%	-58.5% / -83.3%
	雾霾天气	**显著(0.000)	**显著(0.000)	97.5% / 221.2%	-13.7% / -23.8%

得最小车头时距显著减小了 47.9%，同时使得其离散性显著增加了 83.2%。对比结果说明雾霾天气由于其能见度低的特性，会影响后车驾驶员的空间距离感知，但是对驾驶员的时间间隔感知影响较小。

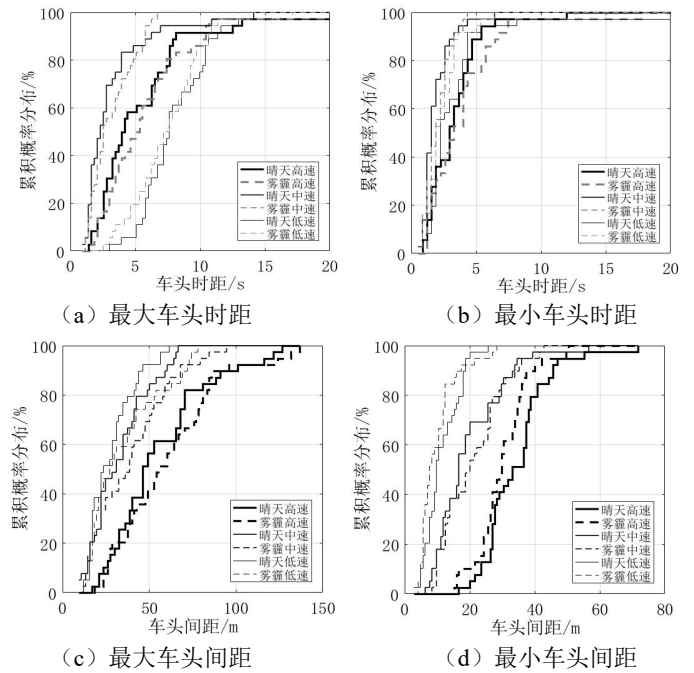


图 6 不同跟驰状态下驾驶员最大/最小车头时距累积概率分布

Fig.6 Cumulative probability distributions of maximum/minimum time headways under different car following stages

3.2 雾霾天气对延迟时距的影响

图 7 给出了不同速度跟驰状态下延迟时距的累积概率分布，随着速度的增加，延迟时距的均值和标准差都

有增加的趋势（图 7-d）。说明在低速跟驰状态下，由于前后车行驶速度较低且车头间距较小，后车驾驶员会更快的对前车的刺激做出反应，随着速度的增加，车头间距随之增大，后车驾驶员判断前车行驶状态的难度增加，其反应变得相对迟缓，导致延迟时距增加。

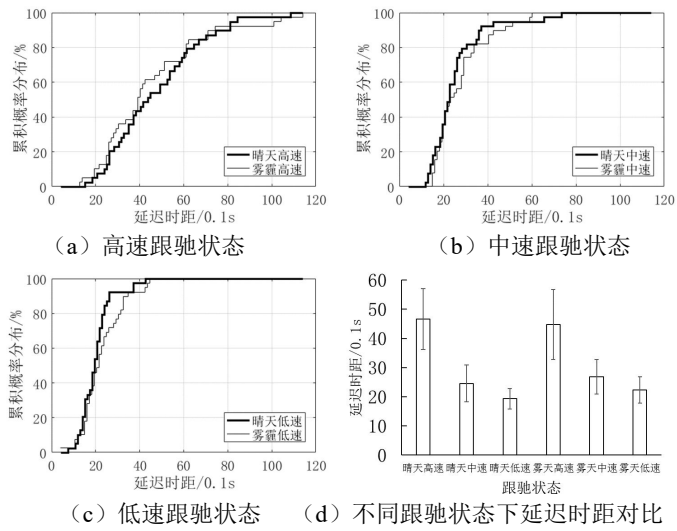


图 7 不同速度跟驰状态下延迟时距累积概率分布

Fig.7 Cumulative probability distributions of delay time under car following stages with different speed

表 5 给出了不同速度跟驰状态下延迟时距在晴天和雾霾天气下的均值和标准差及其差异性检验。高速和中速跟驰状态下，延迟时距在晴天和雾霾天气下的差异性不显著，而低速跟驰状态下存在显著性差异。对比结果说明：当行驶速度较大时，后车驾驶员更期望保持较大的跟车间距，从而避免频繁的对前车的行驶状态做出反应，此时雾霾天气对后车行驶策略的影响较小。而当速度较低时，雾霾天气会显著的影响驾驶员对前车的感知，从而影响后车的行驶策略，使得延迟时距比晴天天气下显著增加了 15.5%，并且其离散性显著增加了 28.2%。

从表 6 可以看出，在晴天和雾霾天气下，不同速度跟驰状态下的延迟时距存在显著性差异，随着速度增加，延迟时距及其离散性显著增加。

表 5 晴天和雾霾天气下延迟时距均值/标准差及其差异性检验 (* $\alpha=0.1$, ** $\alpha=0.05$)

Tab.5 Significant tests for differences of the mean value and standard deviation of delay time under clear and haze weather conditions (* $\alpha=0.1$, ** $\alpha=0.05$)

跟驰状态	晴天 VS 雾霾 (均值差异性)	晴天 VS 雾霾 (方差齐性)	雾霾-晴天 晴天 (均值/标准差)
高速跟驰	不显著(0.706)	不显著(0.630)	-4.3%/14.7%
中速跟驰	不显著(0.429)	不显著(0.642)	8.9%/-6.3%
低速跟驰	*显著(0.092)	*显著(0.085)	15.5%/28.2%

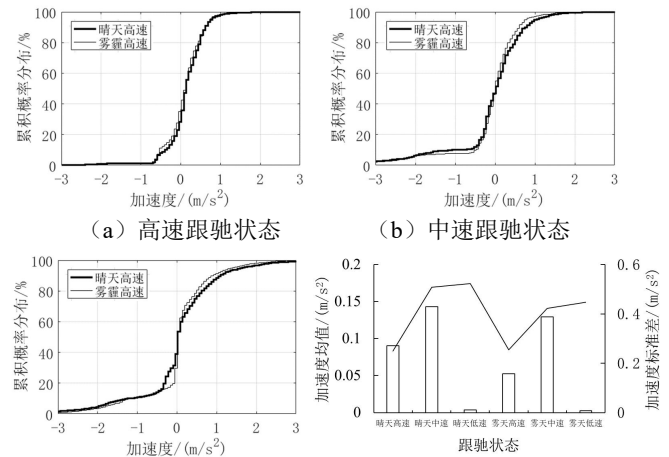
表 6 不同速度跟驰状态下延迟时距均值/标准差及其差异性检验 (* $\alpha=0.1$, ** $\alpha=0.05$)

Tab.6 Significant tests for differences of the mean value and standard deviation of delay time under car following stages with different speed

检验变量	跟驰状态	均值差异性	方差齐性	高速-中速	中速-低速
				中速	低速
				(均值/标准差)	(均值/标准差)
延迟时距	晴天	**显著 (0.000)	**显著 (0.000)	89.8% / 64.9%	27.2% / 79.9%
	雾霾	**显著 (0.000)	**显著 (0.000)	66.7% / 102.7%	20.2% / 31.4%

3.3 雾霾天气对驾驶员加减速行为的影响

图 8 描述了晴天和雾霾天气下驾驶员在不同速度跟驰状态下的加/减速特性。



(c) 低速跟驰状态 (d) 不同速度跟驰状态下加减速差异

图 8 不同跟驰状态下驾驶员加减速行为特征

Fig.8 Features of drivers' acceleration/deceleration behaviors under different car following stages

在高速、中速和低速跟驰状态下后车加速度在雾霾天气下的最大值均小于晴天天气（表 7），说明驾驶员在雾霾天气下的加速行为更为谨慎。后车在整个平稳跟驰过程中的加速度和减速度均值为正值，说明处在跟驰过程中的后车驾驶员存在加速的趋势，并且在低速跟驰状态下的加速趋势大于高速和低速跟驰状态（图 8-d）。从不同速度跟驰状态下的后车加/减速行为的对比结果来看，随着速度的增加，后车加速度和减速度的标准偏差随之减小，说明加速度和减速度离散程度变小，说明随着速度的增加，后车驾驶员会更谨慎的驾驶车辆。

表 7 加/减速度统计描述

Tab.7 Statistical description of acceleration/deceleration rate

跟驰状态	晴天天气			雾霾天气		
	高速	中速	低速	高速	中速	低速
样本长度	17873	11793	15242	16294	10897	14022
均值/(m/s ²)	0.0903	0.1433	0.0034	0.0523	0.1293	0.0025
标准误差	5.05E-06	-1.21E-05	-2.21E-07	3.21E-06	-1.19E-05	1.81E-07
中值	0.087	-0.010	-5.34E-06	0.082	-0.022	1.65E-05
标准偏差	0.501	1.017	1.047	0.510	0.845	0.893
标准方差	0.251	1.035	1.096	0.260	0.714	0.798
最大值	1.888	3.099	4.056	1.779	3.013	3.411
最小值	-4.876	-5.020	-5.505	-4.768	-6.315	-6.381

4 结论

本文基于八自由度高逼真度驾驶模拟器,构建晴天和雾霾天气两个实验场景,分析了高速、中速和低速跟驰状态下的前后车的延迟时距、车头间距/时距和后车的加速/减速行为等跟驰行为关键变量,主要结论:

跟驰车速对车头间距/时距有显著影响。随着跟驰车速的增加,最大/最小车头间距及其离散性随之增加,跟驰车速越高车流密度较低且稳定性越差。中速跟驰状态下的驾驶员具有更大的信心以更小的车头时距跟驰前车行驶,其车头时距及其离散性相对高速和低速跟驰状态较小。

跟驰车速对延迟时距有显著影响。随着跟驰车速的增加,延迟时距随之增加。高速跟驰时车头间距变大且驾驶员更谨慎的驾驶是导致延迟时距增加的重要原因。跟驰车速越大,驾驶员会越谨慎的加速和减速,中速跟驰状态下的加速意愿比高速和低速跟驰状态下大。

雾霾天气显著的影响了驾驶员的空间距离感知,加速行为更为谨慎。相对于晴天,雾霾天气下最大车头间距和最小车头间距存在显著差异,最大车头间距在高速、中速和低速跟驰状态下分别显著增加了 8.7%、19.4%和 25.6%,高速跟驰状态下的最小车头间距显著减小了 13.0%。雾霾天气下低速跟驰状态下的延迟时距及其离散性相对晴天天气分别显著增加了 15.5%和 28.2%。

后续研究中将重点关注雾霾天气下驾驶员跟驰行为异质性及其对交通运行状态的影响,为交通仿真技术提供参考和借鉴。

5 参考文献

[1]袁媛,周宁芳,李崇银,中国华北雾霾天气与超强 El Nino 事件的相关性研究. 地球物理学报, 2017. **60**(1): p. 11-21.
 [1]Yuan, Y., Zhou, N., Li, C., Correlation between haze in North China and super El Niño events. Chinese Journal of Geophysics, 2017. **60**(1): p. 11-21.
 [2]王晶,刘小明,李德慧,驾驶模拟器现状及应用研究. 交通标准化, 2008(11): p. 160-163.
 [2]Wang, J., Liu, X., Li, D., Driving Simulator Status Quo and Application Research. Communications Standardization, 2008(11): p. 160-163.
 [3]涂辉招,李振飞,孙立军,驾驶模拟器运动系统对自由驾

驶行为的影响分析. 同济大学学报: 自然科学版, 2015. **43**(11): p. 1696-1702.
 [3]Tu, H., Li, Z., Sun, L., Effects of Motion System of Driving Simulator on Free Driving Behaviors. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015. **43**(11): p. 1696-1702.
 [4]Tu, H., Li, Z., Li H., et al, Driving Simulator Fidelity and Emergency Driving Behavior. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015(2518): p. 113-121.
 [5]Kang, J.J., R. Ni, G.J. Andersen, Effects of Reduced Visibility from Fog on Car-Following Performance. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board, 2008. **2069**(-1): p. 9-15.
 [6]何莎,闫学东,庞洪涛等,雾天对驾驶行为的影响研究——避撞驾驶行为. 交通信息与安全, 2014. **32**(5): p. 126-129.
 [6]He, S., Yan, X., Pang, H., Effects of Fog Conditions on Driving Behaviors-Crash Avoidance Driving Behaviors. Journal of Transportation Information and Safety, 2014. **32**(5): p. 126-129.
 [7]Evans, Leonard, Traffic safety. 2004: Science Serving Society. 256-256.
 [8]Cavallo, V., Perceptual distortions when driving in fog. in Proc., 2nd International Conference on Traffic and Transportation Studies. 2002.
 [9]周伟,行车间距分析(英文). 东南大学学报(英文版), 2003. **19**(4): p. 378-381.
 [9]Zhou, W., Analysis of distance headway. Journal of Southeast University(English Edition), 2003. **19**(4): p. 378-381.
 [10]Hoogendoorn, R., Tamminga, G., Hoogendoorn, SP., et al., Longitudinal driving behavior under adverse weather conditions: Adaptation effects, model performance and freeway capacity in case of fog. in Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on. 2010. IEEE.
 [11]Zhang, X., G.H. Bham, Estimation of driver reaction time from detailed vehicle trajectory data. MOAS, 2007. **7**: p. 574-579.
 [12]Bella, F., Parameters for evaluation of speed differential: contribution using driving simulator. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2007(2023): p. 37-43.
 [13]Reyner, L., Wells, SJ., Mortlock, V., et al., 'Post-lunch'sleepiness during prolonged, monotonous driving—Effects of meal size. Physiology & behavior, 2012. **105**(4): p. 1088-1091.
 [14]Yang, Q., Overton, R., Han, L., et al., The influence of curbs on driver behaviors in four-lane rural highways—A driving simulator based study. Accident Analysis & Prevention, 2013. **50**: p. 1289-1297.