王洁,曲晓黎,张金满,等.2020.基于序关系分析法的河北省交通事故天气条件分析[J].暴雨灾害,39(4):427-432
WANG Jie, QU Xiaoli, ZHANG Jinman, et al. 2020. Analysis of the relationship between adverse weather conditions and traffic accidents in Hebei Province based on order relationship [J]. Torrential Rain and Disasters,39(4):427-432

基于序关系分析法的河北省交通事故天气条件分析

王洁[1],曲晓黎[12],张金满[1],张娣[1]
(1. 河北省气象服务中心,石家庄 050021;2. 河北省气象与生态环境重点实验室,石家庄 050021)

摘　要:选取2013—2017年河北高速公路逐日发生的一般等级以上交通事故起数、伤亡人数、经济损失及同期气象要素资料,基于序关系分析法将事故量及等级量化为事故指数,分析了对高速通行高影响的雾天、雨天和雪天事故的年际、月际及日变化特征,并构建日均交通事故指数与气象要素的非线性回归模型。研究表明:(1) 交通事故发生时不利天气条件下交通事故总起数、死亡事故起数及人数、经济损失为雾天>雨天>雪天,而伤人事故及人数为雨天>雾天>雪天。(2) 雨天、雪天交通事故峰值与当年雨雪极端天气事件有关,雾天单起交通事故的直接经济损失呈上升趋势;事故月、日分布有显著性差异,表现为雾天事故高发月份在9月至翌年2月、雨天事故多发于在5—10月、雪天事故多发于1—2月、12月;05—08时和00时为事故高发时段。(3) 分别针对不同等级日雨量和能见度与日均交通事故指数建立了一般等级以上交通事故模型,非线性回归效果显著。

关键词:高速公路;不利天气条件;交通事故指数;序关系分析法;非线性回归模型
中图法分类号: P49　　**文献标志码:** A　　**DOI:** 10.3969/j.issn.1004-9045.2020.04.013

Analysis of the relationship between adverse weather conditions and traffic accidents in Hebei Province based on order relationship

WANG Jie[1], QU Xiaoli[1,2], ZHANG Jinman[1], ZHANG Di[1]

(1. *HebeiProvincial Meteorology Service Center, Shijiazhuang* 050021; 2. *Key Laboratory for Meteorology and Ecological Environment of Hebei Province, Shijiazhuang* 050021)

Abstract: Based on the data of traffic accident number, casualty number, economic loss and meteorological elements in the Hebei Expressway from 2013 to 2017, the number and grade of accidents were quantified into accident index. The interannual, interlunar and diurnal variation characteristics of the fog, rain and snow days with high impact on highway traffic are analyzed. The daily average traffic accident index and the nonlinear regression model of meteorological factors are constructed. The results show that: (1) The total number of traffic accidents, fatalities and economic losses under bad weather conditions at the time of traffic accidents are in the order of foggy, rainy, and snowy, while the number of injuries and casualties are in the order of rainy, foggy, and snowy. (2) The peak value of traffic accidents in rainy and snowy days is related to the extreme weather events in that year, and the direct economic loss of single traffic accident in foggy days is on the rise. There are significant differences in the month and day distribution of accidents. The month with the highest incidence of foggy accidents is from September to February of the next year. The month with the highest incidence of accidents in rainy days is from May to October. The snow days are mostly in January-December, and the time between 05:00-08:00 BT and 00:00 BT is the high incident time period. (3) Using precipitation, visibility and traffic accident index, higher-than-normal traffic accident prediction models are established, and their effect as judged by non-linear regression is very significant.

Key words: highway; adverse weather conditions; traffic accident index; order relationship analysis method; nonlinear regression model

引　言

河北内环京津,其特殊的地理位置对京津冀协同发展的交通保障至关重要,截至2018年底,河北省高速公路通车总里程达7 279 km,升至全国第二位。在高效、高速、便捷的交通方式给出行和运输提供保障

收稿日期: 2019-02-28;**定稿日期:** 2020-03-13
资助项目: 河北省重点研发计划项目"高速公路复杂路面高分辨率恶劣天气精准预警技术研究"(19275413D)
第一作者: 王洁,主要从事交通气象服务预报和研究工作。E-mail:1107834478@qq.com
通信作者: 曲晓黎,主要从事交通气象应用技术研究。E-mail: hebqx_quxiaoli@126.com

同时，极端天气频发造成的交通运输事故伤亡惨重、损失巨大(李岚等，2010；田华等，2019)。暴雨、低能见度、道面结冰、积雪等灾害性天气已经成为威胁高速公路安全运营的最大非人为因素。因此，研究不利天气与高速公路交通事故的关系意义重大，开展交通高影响天气预报预警及服务工作，是保障交通安全的重要举措(李盾等，2000；尹凤春等，2005；邓长菊等，2012；王丽娟等，2018)。

国内外学者开展了很多气象条件对公路交通安全影响及交通气象预报方法等相关研究。Symons等(2010)研究发现，降雨是引起道路交通事故增加的重要原因之一，其比率高达70%。Julia等(1998)分析了英格兰、威尔士交通事故与大雾、降雨等灾害性天气的关系，分别找出不同天气条件对交通影响程度比率。李迅等(2014)选取G2京津唐高速公路为研究对象，应用经验概率密度分级法将交通气象风险、交通气象安全指数划分成四个等级，并用WRF-RUC数值预报产品对交通气象安全指数进行模拟预报。夏敏洁等(2014)采用多因子时间序列分析微量降水、低能见度与交通事故量关系，发现两者存在着显著相关，并构建了南京地区道路日交通事故量的AR气象影响模型。王博妮等(2016)对江苏省沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征、气象要素变化及主要环流形势背景进行综合分析，为高速公路低能见度的预报提供了科学参考。钱莉等(2014)通过分析甘肃乌鞘岭高速公路一般等级以上交通事故个例与气象条件的关系，指出高速交通事故中不利天气的排序依次为结冰、雨天、雪天、积雪、雾天。由于不同地区的气候差异很大，影响高速公路交通事故量的气象要素重要性不同。本文在河北省已有的研究基础上，以造成经济损失和人员伤亡严重的一般等级及以上交通事故为研究对象，分析了2013—2017年河北省高速公路雨、雪、雾三种天气条件下交通事故、伤亡人数及直接经济损失的时间特征，构建不同天气条件下日交通事故指数与气象要素的预报模型，以期降低高速公路交通事故的发生率，为京津冀高速路网安全运行提供科学参考。

1 资料与方法

1.1 资料说明

根据公安部颁布的《关于修订道路交通事故等级划分标准的通知》，依据伤亡程度、人数和财产损失等，高速管理部门将交通事故划分为轻微、一般、重大及特大四类事故。本文选取2013—2017年发生在河北省境内高速公路上的一般等级及以上交通事故(以下简称高速交通事故)作为研究对象，包括事故类型、发生时间、事故地点所属公路段桩号、死亡人数、受伤人数、直接经济损失和事故原因等信息，事故资料来源于河北省高速交警总队。气象数据采用2013—2017年河北省内气象站逐小时观测资料，包括日雨量、气温、能见度、地温、天气现象等。

1.2 分析方法

1.2.1 序关系分析法确定权重

若评价指标集 $\{x_1, x_2, \cdots x_n\}$ 各指标之间相对于某评价准则具有关系式 $y_1 \succ y_2 \succ \cdots \succ y_n$ 时，这里 y_i 表示 $\{x_i\}$ 按序关系“$\succ$”排定顺序后第 i 个评价指标 $(i=1,2,\cdots,n)$，则称评价指标 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ 之间按“$\succ$”确立序关系，称 $\{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$ 为序关系指标集，各指标间满足关系式 $y_1 \succ y_2 \succ \cdots \succ y_n$ (香赵政等，2009；陈午等，2014；曾甜甜等，2017)。

本文采用序关系分析法求取河北高速交通事故等级的权重系数，设专家关于相邻的评价指标 y_{k-1} 与 y_k 之间重要性程度之比 ω_{k-1}/ω_k 的理性判断分别为

$$r_k = \omega_{k-1}/\omega_k, \quad k=2,\cdots,n \tag{1}$$

r_k 的赋值可参考表1(郭亚军，2007)，序关系指标集 $\{y_1, y_2, \cdots, y_n\}$ 的 r_{k-1} 与 r_k 之间必需满足

$$r_{k-1} > \frac{1}{r_k}, \ k=3,4, \cdots, n \tag{2}$$

$$\omega_n = 1 + \sum_{k=2}^{n}\prod_{i=k}^{n} r_i^{-1} \tag{3}$$

其中

$$\omega_{k-1} = r_k\omega_k, \ \sum_{k=1}^{n}\omega_k = 1, \ k=n,\cdots,3,2 \tag{4}$$

当相邻的评价指标 y_{k-1} 与 y_k 具有同样的重要性时，r_k 的赋值为1；当指标 y_{k-1} 比 y_k 稍微重要时，r_k 的赋值为1.2；当指标 y_{k-1} 比 y_k 明显重要时，r_k 的赋值为1.4；当指标 y_{k-1} 比 y_k 强烈重要时，r_k 的赋值为1.6；当指标 y_{k-1} 比 y_k 极端重要时，r_k 的赋值为1.8。

1.2.2 基于权重的高速事故指数

根据式(3)和式(4)求得河北高速交通事故序关系指标集各指标的权重，其中，一般、重大、特大三类等级事故的权重系数分别为0.192、0.269、0.377，随后根据某日高速公路发生不同等级事故数量和该等级事故的权重，可得出某日高速交通事故指数 I_{TA} 计算公式(贺芳芳等，2004；白永清等，2015)

$$I_{TA}=0.192Q_1+0.269Q_2+0.377Q_3 \tag{5}$$

式(5)中，Q_1 表示某日高速公路发生一般等级交通事故量，Q_2 为发生重大等级交通事故量，Q_3 为发生特大等级交通事故量，I_{TA} 值代表事故灾害程度。

2 河北省交通事故发生时不利天气条件特征

2.1 高速交通事故及经济损失特征

高速交通事故包括死亡事故、伤人事故及财产损失事故三类。由表1可知，雾天交通事故量占总交通事故量的46.22%，位居诱发交通事故不利天气条件的第一位，而雪天仅为8.79%；雾天交通事故的直接财产损失占交通事故总损失的五成以上，为50.09%，是雪天交通事故财产损失的8.1倍；死亡事故占总死亡事故百分比、死亡人数占事故总死亡人数百分比位居首位的依然是雾天，分别为49.68%和53.39%；可见，不利天气条件下的死亡事故占总死亡事故百分比、死亡人数占总死亡人数百分比、交通事故占总交通事故量百分比、直接财产损失占总财产损失百分比的排序较为一致：雾天 > 雨天 > 雪天。而伤人事故百分比及受伤人数百分比则为雨天 > 雾天 > 雪天，雨天在伤人事故及受伤人数方面超过雾天，分别占49.41%和44.40%，雪天则相对雾天、雨天的伤人事故及受伤人数较少，为10.59%和11.49%。

表1 2013—2017年不利天气条件下河北高速交通事故情况统计表(单位：%)

Table 1 Statistics of high-speed traffic accidents in Hebei under adverse weather conditions from 2013 to 2017(unit: %).

事故情况	百分比/%		
	雨天	雾天	雪天
死亡事故	42.41	49.68	7.91
伤人事故	49.41	40.00	10.59
总交通事故	44.99	46.22	8.79
死亡人数	39.58	53.39	7.03
受伤人数	44.40	44.11	11.49
直接财产损失	43.74	50.09	6.17

2.2 高速交通事故年分布特征

图1为不利天气条件下高速交通事故起数、经济损失及伤亡人数变化，分析可知，雨天交通事故起数、经济损失、死亡和受伤人数百分比最大值均出现在2016年，其中，2017年雨天交通事故造成的直接经济较2016年的减少124.7万元。这与2016年汛期的“7·19”特大暴雨洪涝事件密切相关。2016年汛期河北雨量显著偏多，强对流天气频发，全省共出现暴雨275个站日，较常年偏多54.8%，为1997年以来最多，降雨强度大，损失严重。7月18—21日河北全省平均日雨量为156 mm，高于1996年8月3—5日特大暴雨洪水的122.4 mm，仅次于1963年1—10日华北历史罕见的特大暴雨的321.4 mm，其中赞皇的嶂石岩最大达817.8 mm，全省共有2 594个观测站点出现大暴雨，范围超过“1963·8”暴雨，其中20日一天就有119个县(市)降雨量达到暴雨量级，为有气象记录以来单日暴雨范围之最。

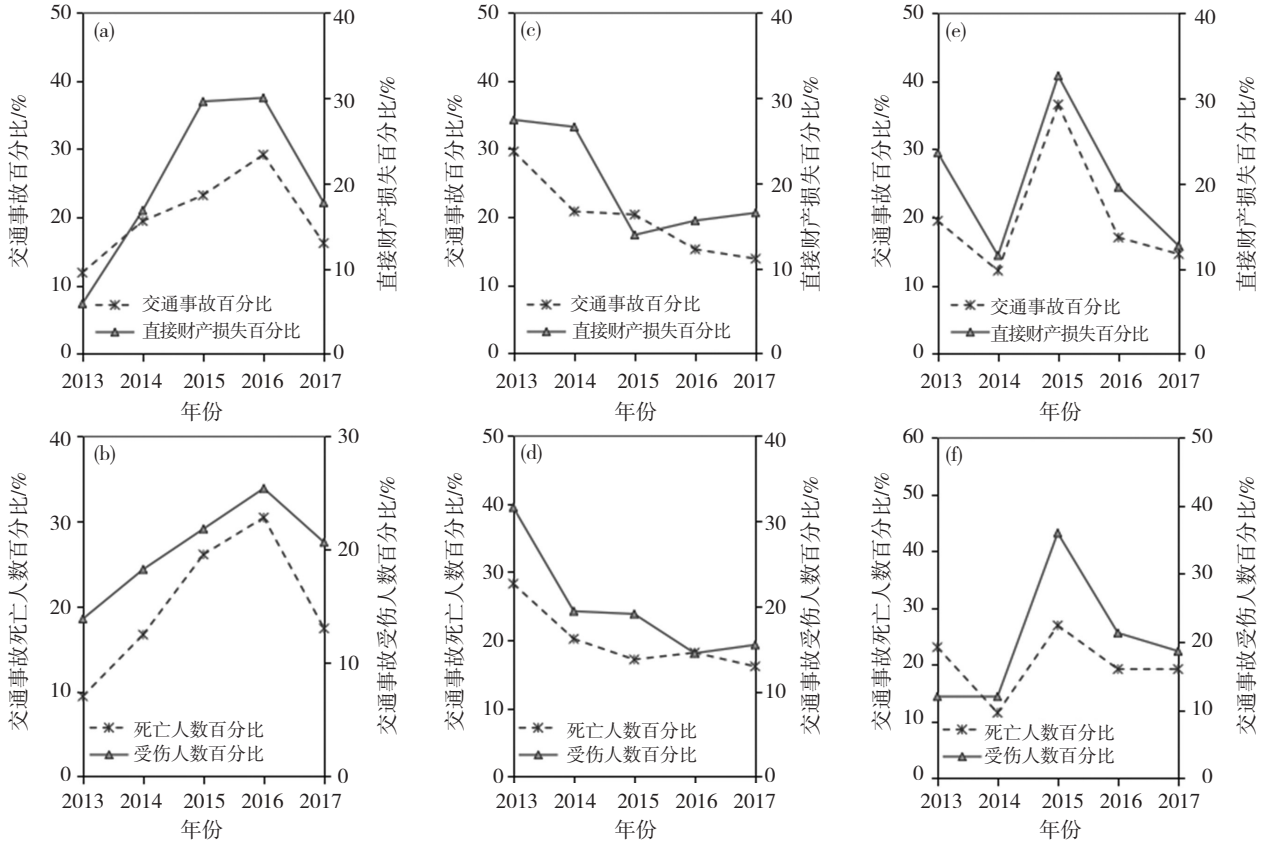

图1 2013—2017年雨天(a, b)、雾天(c, d)、雪天(e, f)交通事故起数和直接财产损失(a, c, e)以及死亡人数和受伤人数(b, d, f)百分比变化

Fig.1 The percentage of (a, c, e) accidents, direct property damage and (b, d, f) deaths, injuries in (a, b) rainy, (c, d) foggy and (e, f) snowy days from 2013 to 2017.

随着河北交通气象服务水平提升及产品丰富，高速管理部门对雾天采取封闭、限行等交通管制措施更为严格，雾天事故起数及伤亡人数呈逐年下降趋势，但直接财产损失百分比在2015年达到最低值，随后逐年上升，2017年比2015年增长62.4万元，说明相比雨天和雪天，虽然雾天发生的事故呈下降趋势，但每起事故造成的直接经济损失呈上升趋势。根据高速管理部门事故伤亡的记录数据发现，2016年起雾天死亡人数超过雨天，成为三种不利天气条件下致人死亡的首位。

雪天交通事故起数、经济损失、死亡和受伤人数最大值均出现在2015年，2015年雪天事故造成的直接经济损失是2014年的2.8倍，比2016年多20.4万元，为2013—2017年雪天事故经济损失最严重年。这与2015年11月雨量大幅偏多有关，雨雪天气频繁发生，26个地区日最大降雪量突破11月历史极值，同时受持续降雪和能见度影响，11月全省日平均日照时数为1.8 h，较常年同期偏少69%。

2.3 高速交通事故月和日分布特征

从河北省高速公路雨天、雾天、雪天交通事故月分布(图2a)来看，雾天事故高发月份在9月至翌年2月，占全年的78.7%，其中10月为雾天交通事故峰值，占21.3%，其次是12月为14.8%，这由于秋冬季节为河北省雾霾高发时期，易引发交通事故；雨天事故高发月份在5—10月，占全年82.7%，进入汛期，河北强对流天气高发，降雨量大且集中、灾害性天气频发，道路湿滑对行车安全产生影响，同时5月处于春夏过渡时期，降雨天气增多，较4月交通事故量明显提高；雪天事故总起数多发于1—2月、12月，占事故总数的78.0%，发生最多的是1月，占雪天事故总数的36.6%。3月是雾天、雨天、雪天发生交通事故最少月份。

由图2b为事故日分布可见，河北高速交通事故在一天内的各时段均有发生，且存在明显的日变化特征。交通事故日发生率呈“双峰型”变化，多发时段在05—08时和00时，占交通事故总数的43.7%，05时后交通事故比例大幅上升，至07时达到最高峰值，08时后缓慢下降，00时出现次峰。这与致高速公路事故的不利天气条件有密切相关，雾天多发生后半夜，致使能见度降低，特别是团雾天气，对高速路段安全运行有极大影响；雨雪天气时，夜间气温较低，高速路段易形成道路结冰及冰水混合路面，路面摩擦系数减小，此外雨(雪)天会引起视程变短和障碍。该特征可使气象部门更有针对性的发布预警预报产品。

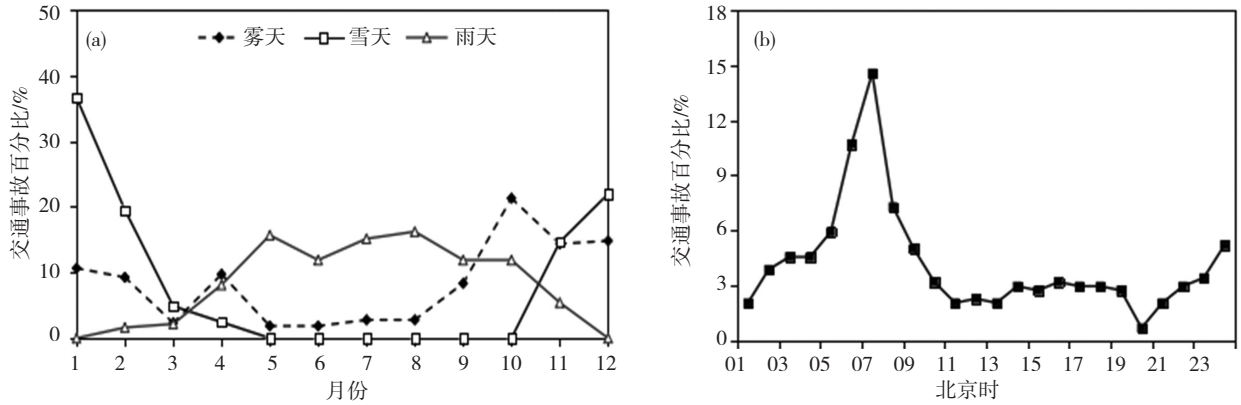

图2 2013—2017年河北省高速公路不利天气条件下发生交通事故比例月(a)和日(b)分布

Fig.2 (a) Monthly and (b) daily distribution of traffic accidents under adverse weather conditions of expressways in Hebei province from 2013 to 2017.

3 不利天气与高速公路事故关系分析

日均交通事故指数为某段时间内日事故指数I_{TA}的平均值，可反映高速事故严重程度。本文利用SPSS 22.0分别对雾天、雨天、雪天与日均交通事故指数做非线性回归分析，构建河北省高速公路一般等级及以上交通事故模型，定量分析事故与不利天气条件关系，为高速管理部门交通管理进行针对性气象服务提供一定参考意义。

3.1 能见度与交通事故相关性分析

当能见度小于50 m时，交管理部门会对高速公路采取封闭、限行等交通管制措施，一定程度上降低交通事故发生。故以能见度大于50 m时交通事故为研究对象，将最低能见度分为(50, 100]、(100, 200]、(200, 500]、(500, 1 000]、(1 000, 2 000]、(2 000, 5 000]六个等级(图3)。由交通事故发生点的同期能见度资料，分别计算出各等级能见度的日均交通事故指数，将不同等级能见度与日均交通事故指数进行拟合，结果表明：随着能见度的增大，日均交通事故指数大体呈下降趋势，不过能见度(1 000, 2 000]等级的轻雾天日均交通事故指数却比(500, 1 000]中雾天高，比(200, 500]雾天日均交通事故指数略低，超过了5 a来高速交通事故指数0.451。其原因是近年来河北加强对高速公路通行影响较大的1 000 m以下低能见度的天气服务，使

交通事故指数有所降低。另一方面，可能是在轻雾天司机不易提高警惕，出车率比中雾天多且车辆行驶速度快，在能见度略差的情况下，易引发交通事故。

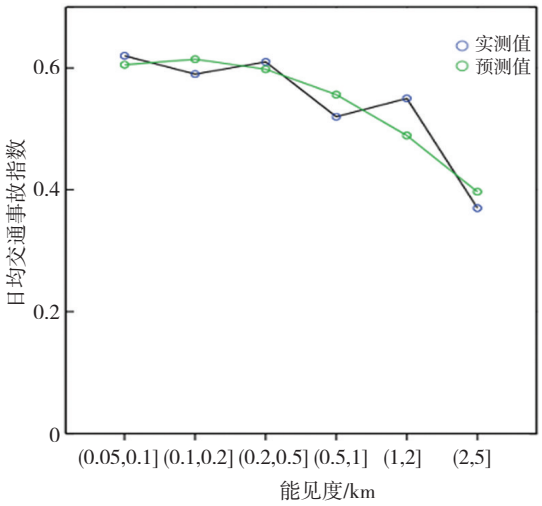

图3 不同等级能见度与日均交通事故指数的拟合曲线(黑线为能见度与日均交通事故指数实测曲线，绿线为能见度与日均交通事故指数拟合曲线)

Fig.3 Fitting curve between visibility of different grades and daily average traffic accident index (The black line is the measured curve of visibility and daily average traffic accident index, and the green line is the fitting curve of visibility and daily average traffic accident index).

由于不同能见度对交通事故指数影响程度不同，可通过非线性回归分析法计算出不同等级能见度与日均交通事故指数之间的统计方程

$$y=-0.013x^2+0.047x+0.571 \tag{6}$$

式(6)中，y为日均交通事故指数，x为不同等级能见度，方程的复相关系数R=0.919。采用F检验来检验回归效果，服从自由度为$(M, N-M-1)$的统计量

$$F=R^2(N-M-1)/M(1-R^2) \tag{7}$$

式(7)中，F为统计量，M为自变量因子数，N为样本个数。求得统计量F=21.81，选定显著性水平为0.01，对其进行检验，得到$F_{0.01}$=21.2，$F>F_{0.01}$说明不同等级能见度与日均交通事故指数之间非线性回归效果明显，模型成立的统计学意义显著。因此通过某日能见度等级预测出与之对应的日均交通事故指数，可对今后进行高速公路雾天气象服务提供一定参考。

3.2 日雨量等级与交通事故相关性分析

选取高速交通事故发生点的同期日雨量资料，根据日雨量分级标准将雨量分为七个等级。分别计算出各等级日雨量的日均交通事故指数，由于不同等级日雨量对交通事故指数影响程度不同，将各等级日雨量与日均交通事故指数作图(图4)，发现两者数值关系近似二次函数关系，用非线性回归分析法计算出日雨量等级与日均交通事故指数的统计方程为

$$y=0.034x^2-0.132x+0.467 \tag{8}$$

式(8)中，y为日均交通事故指数，x为不同等级日雨量，方程的复相关系数R=0.958。采用F检验来检验回归效果，服从自由度为$(M, N-M-1)$的F统计量，由式(7)求得F=55.98，选定显著性水平为0.01，对得到的统计方程进行检验，得到$F_{0.01}$=16.3，$F>F_{0.01}$，说明不同等级日雨量与日均交通事故指数之间非线性回归效果明显，模型成立的统计学意义显著。因此通过某日雨量等级预测出与之对应的日均交通事故指数，对今后进行高速公路雨天气象服务提供一定参考。

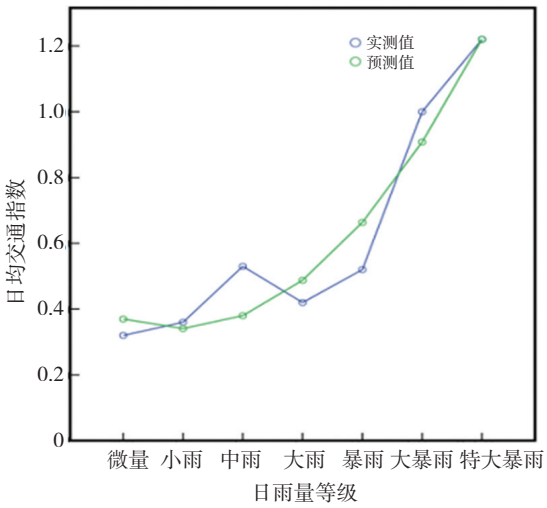

图4 不同等级日雨量与日均交通事故指数的拟合曲线(蓝线为日雨量与日均交通事故指数实测曲线，绿线为日雨量与日均交通事故指数拟合曲线)

Fig.4 Fitting curves of daily precipitation and daily average traffic accident index of different scales (The blue line is the measured curve of daily rainfall and daily average traffic accident index, and the green line is the fitting curve of daily rainfall and daily average traffic accident index).

3.3 降雪、冰冻、积雪与交通事故相关性分析

统计发现(表略)，5 a来河北省高速公路特大交通事故占21.0%，重大事故占58.1%，日均事故指数在0.192~0.838之间，近5 a雾天交通事故最多、损失总量最大，而雪天交通事故总量较雾天、雨天少，但事故等级高、影响恶劣，其中雪天的平均单次损失为5.98万，雾天3.87万，可见雪天事故一旦发生会造成巨大损失，对高速公路的安全运行有非常重要的影响。从表2可知，事故日天气现象以雨夹雪和降雪为主，且82.6%交通事故发生在降雪过程中。路面结冰与气象观测结冰均由温度和降水等条件决定，两者原理相似，因此利用天气现象中的结冰观测代表高速公路道路结冰(白永清等，2016；林毅等，2018)。发现87%的事故发生时刻路面出现结冰，69.6%高速交通事故发生时路面有积雪，且多发生在雪深小于1 cm。究其原因，降雪过程中及降雪3 h内高速路段经碾压路面摩

擦系数减小，由于气温低易发生道路结冰，致使车轮打滑，同时当降雪发生时，水平能见度将迅速降低，雪后晴天的积雪引起的雪盲现象也会使影响驾驶员判断能力，从而导致了交通事故上升(王喆，2007)。

表2 2013—2017年雪天河北省高速公路交通事故发生百分比(单位:%)

Table 4 The percentage of highway traffic accidents in Hebei Province in snow weather from 2013 to 2017 (unit: %).

W_t		R_t				S_d/cm			H_t	
雨夹雪	雪	未结冰	结冰	无积雪	积雪	<1	=1	>1	A	B
13.0	87.0	13.0	87.0	30.4	69.6	82.6	4.3	13.1	17.4	82.6

注：W_t表示高速交通事故发生日的天气现象，R_t表示事故发生时路面情况，S_d表示雪深，H_t表示事故发生时距降雪过程时间，A表示降雪后3 h内，B表示降雪过程中。

4 结论与讨论

(1) 2013—2017年河北交通在三种不利天气条件下的死亡事故占总死亡事故百分比、死亡人数占总死亡人数百分比、交通事故占总交通事故量百分比、直接财产损失占总财产损失百分比的排序较为一致，为雾天>雨天>雪天，其中雾天造成交通事故的直接财产损失占交通事故总损失的五成以上，为50.09%，是雪天交通事故财产损失的8.1倍；而伤人事故百分比及受伤人数百分比则为雨天>雾天>雪天。

(2) 在2013—2017年河北高速交通事故中，雨天、雪天交通事故起数、经济损失、伤亡人数峰值分别出现在2016、2015年，其原因与当年雨雪极端天气有关。雾天事故起数及伤亡人数呈逐年下降趋势，而经济损失在2015年降到最低值后逐年上升，说明虽然雾天发生的事故呈下降趋势，但每起事故造成的直接经济损失呈上升趋势，2016年起，雾天死亡人数超过雨天，成为三种不利天气条件下致人死亡的首位。高速交通事故存在明显的月、日变化特征，表现为雾天事故高发月份在9月至翌年2月、雨天事故高发月份在5—10月、雪天事故总起数多发于1—2月、12月；日变化呈“双峰型”变化，多发时段在05—08时和00时。

(3) 采用序关系分析法对不同等级事故进行加权处理，将高速交通事故数量及等级量化为事故指数，定义日均交通事故指数为某段时间内日事故指数I_{TA}的平均值，来表征当日发生高速交通事故的严重程度，分别对三种不利天气与日均交通事故指数进行非线性回归分析，构建出河北高速交通事故的预报模型，均通过显著性水平为0.01的F检验，说明日雨量、能见度与日均交通事故指数之间非线性回归效果明显，模型成立的统计学意义显著。

然而在计算高速日事故指数I_{TA}时，没有考虑交通流量、节假日效应等，当有在类似天气条件下，I_{TA}值存在差异，如何综合考虑多种因素对I_{TA}的影响，将有待进一步深入探讨，以便更精确分析交通事故与气象条件的关系，为高速管理部门指挥调度提供服务参考。

参考文献：

白永清,何明琼,刘静,等.2015.高速公路交通事故与气象条件的关系研究[J].气象与环境科学,38(2):66–71

白永清,陈城,何明琼.2016.利用Logistic回归方法的高速桥(路)面结冰风险等级预警模型[J].气象科技,44(2):336–340

陈午,许新宜,王红瑞,等.2014.基于序关系法的北京市水资源可持续利用模糊综合评价[J].水利经济,32(2):19–24

邓长菊,甘璐,尤焕玲,等.2012.北京城市浓雾特征及其与交通预报服务的关系[J].暴雨灾害,31(2):189–192

郭亚军.2007.综合评价理论、方法及应用[M].北京:科学出版社:192–197

贺芳芳,房国良,吴建平,等.2004.上海地区不良天气条件与交通事故之关系研究[J].应用气象学报,15(1):126–128

李盾,万蓉.2000.武汉地区雾的特点及其对交通的影响[J].暴雨灾害,19(3):21–23

李岚,唐亚平,孙丽,等.2010.辽宁省高速公路不良气象条件分析及服务探讨[J].气象与环境学报,26(1):49–53

李迅,甘璐,丁德平,等.2014. G2京津塘高速公路交通气象安全指数的预报研究[J].气象,40(4):466–472

林毅,李倩,张凯,等.2018.气象条件对辽宁省高速公路交通安全的影响研究[J].气象与环境学报,34(3):106–111

钱莉,安颖颖,赵德强.2014.乌鞘岭高速公路路段多发交通事故的气象条件分析[J].干旱气象,32(2):286–291

田华,郜婧婧,李蔼恂,等.2019.江苏高速公路局地团雾气象特征分析[J].沙漠与绿洲气象,13(6):39–46

王博妮,濮梅娟,田力,等.2016.江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J].气象,42(2):192–202

王喆.2007.高速公路灾害性天气研究[J].交通运输研究,32(1):104–108

王丽娟,王俊超,何明琼,等.2018.基于微波辐射资料的一次高速公路段强浓雾过程监测分析[J].暴雨灾害,37(4):330–336

夏敏洁,曹杰,周文君.2014.气象条件与南京地区道路交通事故量的分析[J].气象科学,34(3):305–309

香赵政,廖开际,刘其辉.2009.基于序关系确定成熟度评价指标权重的简易法[J].广西大学学报(自然科学版),34(6):823–826

尹凤春,朱锦萍.2005.对提高公路交通气象保障服务质量的若干思考[J].暴雨灾害,24(4):12–14

曾甜甜,王晓峰,李尧.2017.基于序关系分析法的暴雨灾害游客风险感知测评—以秦岭太平国家森林公园为例[J].河南科学,35(5):829–836

Edwards J B. 1998. The Relationship Between Road Accident Severity and Recorded Weather [J]. Journal of Safety Research, 29(4):249–262

Symons L, Perry A. 2010. Predicting road hazards caused by rain,freezing rain and wet surfaces and the role of weather radar [J]. Meteorological Applications, 4(1):17–21

（责任编辑　唐永兰）