

张振东, 黄亮, 于庚康, 等. 宁沪高速公路雾事故特征及雾危险指数研究[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 37-41. [ZHANG Zhendong, HUANG Liang, YU Gengkang, et al. Study on Fog Accident Characteristics and Fog Risk Index of Nanjing Shanghai Expressway[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 37-41. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.007.]

宁沪高速公路雾事故特征及雾危险指数研究^{*}

张振东¹, 黄亮¹, 于庚康¹, 雷正翠², 吴昊³

(1. 江苏省气象服务中心, 江苏 南京, 210008;

2. 常州市气象局, 江苏 常州, 213001; 3. 江苏宁沪高速公路股份有限公司, 江苏 南京, 210049)

摘要:统计了2008-2015年宁沪高速公路上由雾造成的交通事故92起, 分析了雾事故与雾发生频率之间的关系, 研究发现, 雾事故易发生于秋冬季, 而冬季由于路面摩擦系数较低更易出现事故; 经过比较, 能见度低于100 m的条件下雾事故发生概率较大; 早晨6-8时为雾事故发生的高峰期, 这与此时段雾发生频率较高及车流量加大有关; 宁沪高速的西段为雾事故及雾发生频率较高的路段; 分析了雾事故发生时的能见度与湿度、温度和风速的关系; 利用能见度区间, 雾日变化特征, 摩擦系数及雾站点覆盖率制定了宁沪高速雾危险指数NHFI, 并利用Spearman秩相关系数法分别比较了NHFI, 雾日数与雾事故数的相关性, 结果显示NHFI评价路段危险性要比单纯用雾日数更合理和精确。通过利用数值模式计算每段路的NHFI可以预测宁沪高速危险指数及危险路段分布。

关键词:高速公路; 雾事故; 雾危险指数; 宁沪高速公路

中图分类号: X43; P429 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0037-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.007

高速公路事故与气象条件有着密切的关系, 随着江苏省内高速公路里程的不断增加, 高速公路的交通事故率也不断上升。其中因能见度下降而造成的交通事故率呈显著上升的趋势。我国科学工作者和交通管理部门为了减轻雾带来的危害, 对高速公路低能见度进行了长时间的研究和分析。袁成松等^[1]为高速公路设计了低能见度下的临近预警预报制作流程和思路, 并论证了高速公路沿线布设AMW自动气象站的可行性。此后冯民学、顾松山、李子华^[2-4]等对宁沪高速浓雾的预报与监测做出了较多研究, 分析了雾形成过程和特征。齐莹菲等^[5]根据高速公路低能见度安全管理办法, 制定了低能见度天气下的交通安全管制模型。许秀红等^[6]利用黑龙江交通事故资料研制了评定气象环境指数及安全等级。另外一些学者^[7-10]根据雾发生的时间频率分析了雾对交通的潜在危险。但对于雾天气下的危险评估, 特别是预报高速公路雾危险等级方面的研究较少, 也没有可靠的量化标准, 因此研究高速公路量化危险指数是

迫切需要的。

1 宁沪高速公路雾事故分析

宁沪高速公路是江苏省内的重要交通枢纽, 日平均车流量在5万辆左右, 在节假日更是可以达到10万辆之多, 因此保障宁沪高速的安全通行显得尤为重要。为了更好地研究雾与交通事故之间的关系, 本文从2008-2015年的宁沪高速公路有限公司提供的值班笔记中挑选出92起由雾造成的交通事故, 并结合事故发生地点的多种天气要素进一步分析雾事故发生特征。

1.1 雾事故发生的月度分布

从图1中看出, 除了8月外各个月份都有雾事故发生, 其中宁沪高速公路秋季到冬季事故数呈现逐渐增长的态势(11、12、1、2月份), 事故的发生数较多, 而1月份的事故量占全年的16.9%, 2月份次之, 占15.3%, 而8月所占比例最少。分析宁沪高速公路这些年的各个月份大雾发生比例发现宁沪高速公路全年都有雾出现, 但大雾的月

^{*} 收稿日期: 2016-05-02 修回日期: 2016-06-11

基金项目: 中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2014Z02); 江苏省气象局青年科研基金项目(Q201608); 江苏省气象局预报员专项项目(JSYBY201616)

第一作者简介: 张振东(1988-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事交通气象预报研究. E-mail: zzdwt0@126.com

分布不均匀,其中11月最多,8月最少,秋季和冬季是全年的高发季节,其总体趋势与雾事故发生比例相似。从气候上来看,由于江苏南部地区从秋季开始冷空气入侵频繁,夜晚辐射降温明显,近地层受冷高压控制,大气层结稳定,再加上秋冬季节空气易饱和,从而造成雾天频发。

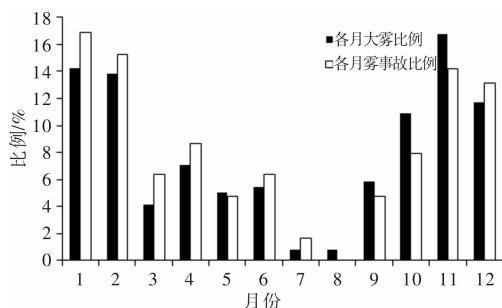


图1 宁沪高速公路各月雾事故比例及大雾比例

同时在对比中发现在秋季雾事故比例要小于大雾发生比例,而在冬季和初春季节雾事故比例要普遍大于大雾发生比例。究其原因主要可能与冬季路面温度较低有关。谢静芳、李长城等^[11-12]研究发现,正常路面摩擦系数在地面温度低于10℃时显著偏低。而统计中超过63.5%的雾事故是在凌晨0-7时之间发生的,此时路面温度为1d中最低的时段,图2为宁沪高速各月0-7时平均路面温度和正常路面条件下的摩擦系数之间的关系,可以看出,由于冬季及初春季节路面温度要明显低于秋季,使得路面摩擦系数下降明显,同样的行驶速度在路面摩擦系数较低的情况下刹车距离更长,更易发生事故。因此虽然冬季的雾发生比例要小于秋季,但是冬季大雾天气更值得交管部门和气象部门关注。

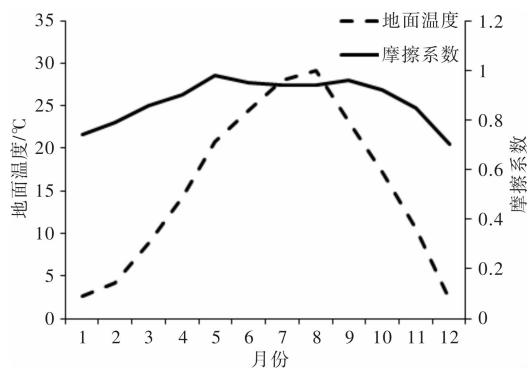


图2 宁沪高速公路0-7时月平均地面温度和摩擦系数曲线图

1.2 雾事故与能见度等级区间的关系

对雾事故发生时能见度区间进行分析,以便得到雾事故的易发区间,从而采取相应的管制手段。目前的交通管制中将低于500 m的能见度管制分为4级,分别为特级管制:能见度<50 m,以时

速不超过20 km/h的速度就近驶离高速公路或进入服务区休息;二级管制:50 m≤能见度<100 m,管制路段临时限速40 km/h,与同一车道的前车保持50 m以上的行车间距;三级管制:100 m≤能见度<200 m,管制路段临时限速60 km/h,与同一车道的前车保持100 m以上的行车间距;四级管制:200 m≤能见度<500 m,管制路段临时限速80 km/h,与同一车道的前车保持150 m以上的行车间距^[19]。根据能见度的管制范围分别统计了各个区间内的雾事故分布(图3a),可以看出200~500 m区间内的事故数最多。而将能见度等区间划分后(图3b),则可以看出0~100 m区间所占事故比例最大,约是其他各区间的2倍,而其余各区间事故比重则基本相似,因此目前的交通管制对能见度区间的划分是合理的,同时对于能见度低于100 m的情况需要重点关注。

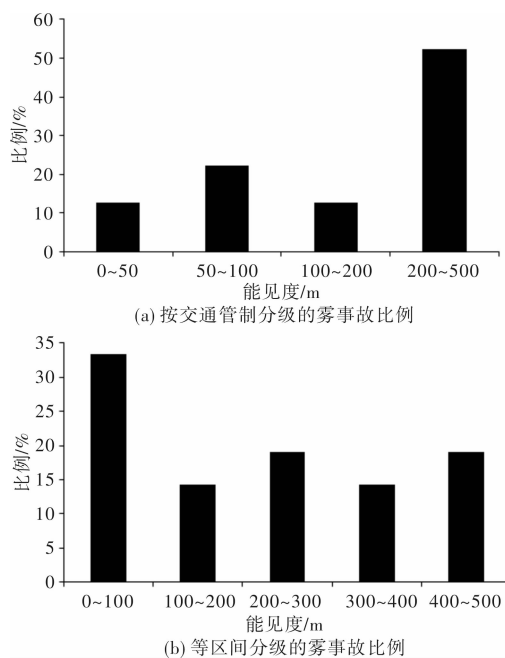


图3 不同等级能见度下事故分布

1.3 雾事故日变化特征

从图4宁沪高速公路雾事故各时次变化图可以看出,事故的高发时段主要集中在06:00-10:00,占总数50%以上,07:00-08:00之间是事故出现的峰值,占有所有事故的20.6%。而在11:00-22:00之间为事故的低发区间,只占9.5%。为了说明雾事故频率分布特征,制作了宁沪高速公路近年来各时次出现大雾的频率变化曲线(图4实线)。可以看到,雾事故频率和大雾频率的变化趋势基本一致,从00:00起雾事故发生几率逐渐增大,07:00达到峰值,然后逐渐减小直到日落后又开始增加。因此可以看出雾事故的发生和出雾时间有着密切的关系。02:00-06:00之间事

故频率变化与大雾频率变化略有不同, 这可能与深夜车流量的减少有关。06:00 以后, 随着车流量增多, 再加上这一时段出雾的频率最高, 导致了高速公路雾事故高发。

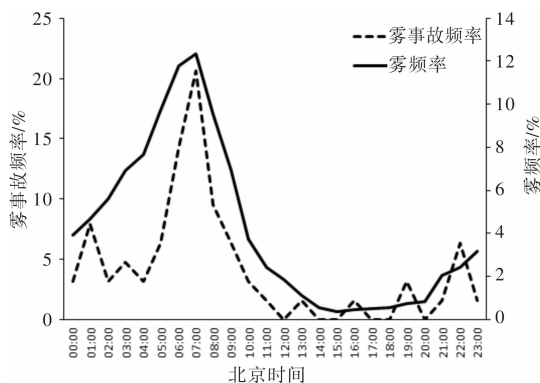


图4 宁沪高速公路雾事故频率与雾频率的日变化特征

因此, 在浓雾多发的秋冬季节后半夜和早晨, 驾驶员如有可能应该尽量减少 06:00 - 08:00 这段时间的出行, 而高速公路管理公司应在此时间段内给出更多提示警示, 包括一定情况下限制车流量。在 08:00 以后, 随着太阳辐射增大, 低层水汽蒸发, 大雾出现的频次迅速降低, 随后一直处于低值区。晚上 20:00 以后, 在满足大气静力稳定、风速偏小和晴空的条件下, 低层水汽逐渐聚集, 浓雾出现的频次随时间的推移逐渐增大。

1.4 雾事故空间分布特征

宁沪高速公路西起南京东至上海, 位于 118.9° ~ 121.2°E, 31.29° ~ 32.07°N 之间, 横穿苏南五市, 其中中部和东部地区地势平坦, 以平原为主, 西部则以丘陵为主, 整个地区气候湿润。

分析沪宁高速公路雾事故发生地区空间分布 (图5), 可以看出雾事故分布具有明显的东少西多的特征。其中常州北以西站点发生的事故数占到总数的 77.17%, 窦庄和河阳段出现的事故数最多占到全部站点的 11.96%, 其次是仙人山段 10.87%。雾事故的频率与该地区的雾发生频率有着密切的关系, 通过统计近年来各站点的雾发生频率 (图5 实线), 可以看出雾发生频率的局地特征与雾事故发生地区基本一致。宁沪高速公路雾发生频率也呈现东少西多态势。位于宁沪高速西段的仙人山站和窦庄站附近为雾发生频率最多的两站, 这可能与这些路段沿线多山、多丘陵地区有关, 由于起伏不平的山区易造成逆温、气流辐合及水汽不易扩散等原因, 导致雾发生频率相对较高, 而东部地区为地势较为平坦的平原, 成雾条件较差, 使得雾事故的发生频率下降。另一方面仙人山段是宁沪高速和宁常扬溧高速的交汇处,

此路段的车辆较多, 同时道路情况也更复杂, 当路段出现大雾天气, 将增加行车难度, 容易出现事故。因此雾天气的交通预报不仅要考虑到气象条件, 还需要考虑到道路状况及地形因素。

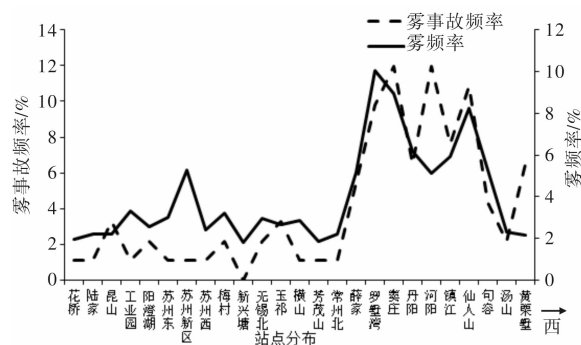


图5 雾事故与雾发生路段分布

2 雾标准化危险指数计算

2.1 基于历史统计资料的雾危险指数计算

在以往的经验中通常是以能见度作为单一的参数衡量雾危险性。通过对宁沪高速公路多年的雾事故及雾发生频率统计后发现, 雾的风险评估可以通过多个参数进行综合衡量。MUSK^[13]利用道路和雾发生的位置计算了雾的潜力指数 FPI ; CHO 等^[14]曾提出雾的危险指数 (HFI) 的计算方法, 主要是利用雾发生频率、雾持续时间以及能见度等级计算了雾的定量危险指数 HFI ; 然而经过对宁沪高速公路雾事故的统计后发现其中的参数利用和划分标准与国内指标存在一定差异和不合理性。王炜^[15]等利用能见度、雾持续时间和雾出现频率计算了雾标准化危险指数 $NHFI$, 计算得到天津地区高速公路 4 个季节雾危险等级, 这样的结果难以满足现在的精细化要求。为了提高高速公路标准化的雾危险性指数的精细化标准, 利用统计出的能见度区间、日变化特征及摩擦系数作为参数, 修正定义了宁沪高速公路气象条件标准化的雾危险性指数 ($NHFI$), 计算表达式为:

$$NHFI = (1 + R) \times W_s \times (1 + \sum_{i=1}^n F_i) \times [2 - f_0(x)] \times Coef. \quad (1)$$

式中: $NHFI$ 反映了整条路中的一段路的危险性指数, 其中 R 为雾影响整条路的百分比, 即雾的覆盖率; W_s 为能见度的权重系数: 根据上文对能见度区间的讨论, 将能见度区间分为四个权重值, 能见度 < 50 m 取 4, 50 m $\leq$ 能见度 < 100 m 取 3, 100 m $\leq$ 能见度 < 200 m 取 2, 200 m $\leq$ 能见度 < 500 m 取 1, 能见度 ≥ 500 m 取 0; F_i 为所在时刻的雾发

生频率, n 是所影响时间段; $f_0(x)$ 为根据温度 x 计算得到的摩擦系数; $Coef$ 为归一化系数 $100/32$ 。根据 $NHFI$ 计算得到值的大小可以客观地评价每段路的雾危险程度, 值越大危险性越高。

为了研究 $NHFI$ 的评估效果, 同时观察是否各路段 $NHFI$ 比雾日数具有更好的代表性。将 $NHFI$ 与雾事故、雾日数和雾事故来分析两组数据之间的相关性, 分析方法采用了描述总体特征、非参数分析即 Spearman 秩相关系数法, 其能够分析非线性相关下的共变趋势, 反映两组变量之间密切程度, 克服总体信息缺乏的缺陷^[16-18]。其计算公式如下:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (2)$$

将研究年份中求得各个路段的 $NHFI$ 和雾日数分别与雾事故进行 Spearman 秩相关分析, 分别得到相关系数 0.89 和 0.65, 同时两组 $P < 0.01$ (远小于 0.05 的显著水平)。说明了 $NHFI$ 值与雾日数都与雾事故有着很好的正相关性, 而 $NHFI$ 与雾事故的相关性更好。将各路段 $NHFI$ 值 (除以 10) 与雾日数、雾事故数同时放在一张图中 (图 6), 按照 $NHFI$ 值从小到大排列可以清楚地评估各路段 $NHFI$ 危险指数, 例如河阳段的雾危险指数排列第 3 位, 而雾日数排列第 13 位, 雾事故数为最多, 说明此段路年发生雾的次数处于中等频率, 但每次雾的时长和能见度较低, 危害性更大。同理苏州新区雾日数排列第 7 位, 而 $NHFI$ 值只排列第 22 位, 雾事故数也较少, 则说明此段路虽然经常出现雾天气, 但雾的浓度及时长有限, 造成的危险性较小。因此通过比较发现, 用 $NHFI$ 指数来描述路段的危险性要比单纯的利用雾日数要更加合理准确。

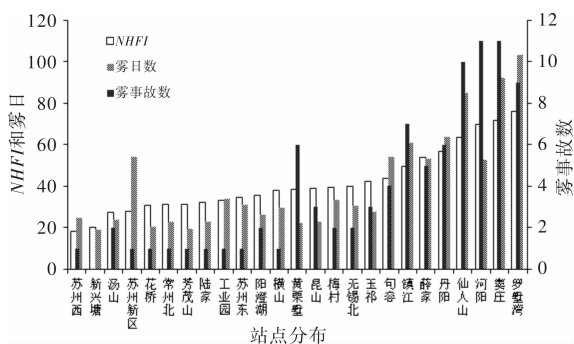


图6 $NHFI$ 值排列和雾日数及雾事故数比较

2.2 雾危险指数的数值预报产品

宁沪高速公路雾危险指数预报可以预报宁沪高速公路不同路段的雾危险程度, 提前给予高速公路管理部门预警服务。本研究采用江苏省气象局已投入业务运行的 WRF 中尺度数值模式计算出的雾数值预报产品。雾产品的时间分辨率为 1 h,

空间分辨率为 $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$, 基本能够满足宁沪高速的 $NHFI$ 计算, 通过处理能够得到雾形成及维持的时间范围, 为 $NHFI$ 的计算提供相关参数。

图 7 是利用数值模式模拟的 2015 年 12 月 21 日及 2015 年 10 月 23 日宁沪高速公路两次雾过程的能见度、持续时间、雾影响范围所计算出的宁沪高速各路段的危险性指数 $NHFI$ 。可以看到 12 月 21 日 (图 7a) 的雾危险性要大于 10 月 23 日 (图 7b), 主要是由于 12 月 21 日的雾持续时间较长, 能见度更低, 影响范围更大, 温度较低造成的。模拟的 $NHFI$ 与实况计算的 $NHFI$ 大小略有偏差, 这与模式自身的精细化程度有关, 不过整体结果与实况一致, 因此能够较好地宁沪高速公路雾预警预报提供危险预警服务。

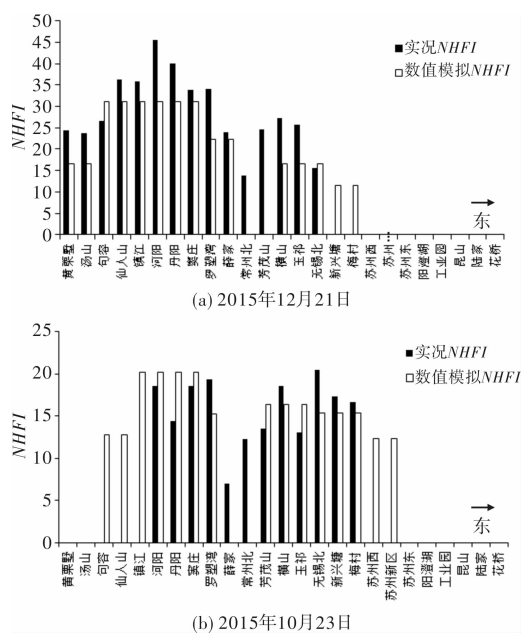


图7 宁沪高速各路段实况及模拟 $NHFI$ 值

3 结论

(1) 全年雾事故的月份发生趋势与月大雾发生频率一致, 其中冬季事故发生频率高于秋季, 这与地表气温相对较低有关。雾事故多发于能见度在 100 m 以下的区间。雾事故日分布特征显示事故多发于日出 06:00 - 10:00 之间, 主要与此时段能见度较低, 车辆增多有关。宁沪高速事故频发地区位于路段的西部, 主要与此地区多丘陵山地造成气流辐合及水汽不易扩散易形成浓雾天气有关。

(2) 利用雾的覆盖率、能见度、摩擦系数及雾发生时间段计算出的雾危险性指数 $NHFI$, 可以综合评价宁沪高速各路段的雾危险程度。利用

Spearman 秩相关系数法分别比较了 *NHFI*、雾日数与雾事故数的相关性, 结果显示 *NHFI* 评价路段危险性要比只用雾日数更合理和精确。利用数值预报产品计算得到各路段 *NHFI* 预报值, 评价效果较好。

参考文献:

- [1] 袁成松, 卞光辉, 冯民学, 等. 高速公路上低能见度的监测与预报[J]. 气象, 2003, 17(7): 92-97.
- [2] 冯民学, 袁成松, 卞光辉, 等. 沪宁高速公路无锡段春季浓雾的实时监测和若干特征[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 435-445.
- [3] 冯民学, 顾松山. 高速公路浓雾监测预警系统[J]. 中国公路学报, 2003, 17(7): 92-97.
- [4] 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 地区性浓雾物理[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [5] 齐莹菲, 柳本民, 郭忠印. 高速公路雾天安全管理系统[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(1): 61-66.
- [6] 许秀红, 润敏慧, 于震宇, 等. 道路交通事故气象条件分析及安全等级标准——以黑龙江省为例[J]. 自然灾害学报, 2008, 17(4): 53-58.
- [7] 王志强, 王静爱. 关于雾灾几个相关问题的探讨[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 134-139.
- [8] 郑祚芳, 张秀丽. 北京极端天气事故及其与区域气候变化的联系[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(3): 55-59.
- [9] 周慧, 解以扬, 高鹰. 京津唐高速公路大雾天气气候特征及其对交通的影响[J]. 灾害学, 2008, 23(3): 48-53.
- [10] 田华, 王亚伟. 京津唐高速公路雾气候特征与气象条件分析[J]. 气象, 2008, 34(1): 66-71.
- [11] 谢静芳, 吕德宝, 王宝书. 高速公路路面摩擦气象指数预报方法[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(6): 18-21.
- [12] 李长城, 刘小明, 荣建. 不同路面状况对路面摩擦系数影响的试验研究[J]. 公路交通科技, 2010, 27(12): 27-31.
- [13] Musk L F. Climate as a factor in the planning and design of new roads and motorways [M]//Perry A H, Symons L J. (eds.) Highway Meteorology. London: E and FN Spon, 1991: 1-25.
- [14] Cho H J, Kim K S. Development of hazardous road fog index and its application [J]. Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005(6): 3357-3371.
- [15] 王伟, 卢雪翠, 解以扬. 雾的标准化危险性指数计算方法及其应用[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(1): 16-20.
- [16] 吴喜之. 非参数统计[M]. 2 版, 北京: 中国统计出版社, 2006.
- [17] 李彦萍, 杨红霞. 非参数统计中相关系数的计算及其应用[J]. 山西农业大学学报, 2003, 23(4): 363-366.
- [18] 陶澍. 应用数理统计方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [19] 张亚军, 马兆有. 恶劣天气条件下高速公路交通管制对策解析[J]. 交通企业管理, 2010, 8(2): 68-69.

Study on Fog Accident Characteristics and Fog Risk Index of Nanjing Shanghai Expressway

ZHANG Zhendong¹, HUANG Liang¹, YU Gengkang¹, LEI Zhengcui² and WU Hao³

(1. Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008, China;

2. Changzhou Meteorological Bureau, Changzhou 213001, China;

3. Jiangsu Expressway Company Limited, Nanjing 210049, China)

Abstract: The paper statistics 92 traffic accidents caused by fog from 2008 to 2015 on Ninghu expressway. The relationship between fog accidents and fog occurrence frequency is analyzed. It's found that the fog accidents often occurred in autumn and winter, and due to the low friction coefficient of road is more prone to accidents in winter. By comparison, when the visibility less than 100m, it has greater probability of occurrence of fog accidents. It is the peak of fog accident in the morning from 6 to 8, which is related to the higher frequency of fog at this time and increase of vehicle flow. Fog accidents and the high frequency of fog occurrence appear on the west of Ninghu expressway. By using the visibility range, characteristics of fog days variation, friction coefficient and fog site coverage on Ninghu make the fog hazard index *NHFI*. And using the Spearman rank correlation coefficient method compares the correlation between the number of fog days and the number of fog accidents with the *NHFI*. The result shows that the *NHFI* evaluate the risk of road sections is more reasonable and accurate than the fog days. By using the numerical model calculates *NHFI* of each section of the expressway could predict the risk index and the distribution of dangerous road sections on Ninghu expressway.

Key words: expressway; fog caused accidents; fog hazard index; Ninghu expressway