

高速公路雾形成预测研究*

张续光¹, 高静如², 高建平¹

(1. 重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074; 2. 同济大学 交通运输学院, 上海 201800)

摘要:雾对高速公路交通运行及行车安全有重要影响,掌握雾天出现的天气特征,有利于提高高速公路雾天管理的有效性和针对性。以重庆高速公路2009~2011年两个雾季的交通数据和天气数据为依据,在分析雾天能见度对高速公路交通影响的基础上,确定影响雾天的能见度阈值为600m。对雾天形成气象条件的时间演变进行的主成分分析与相关性分析表明,最大湿度和昼夜温差对雾的形成有决定性影响,其中相对湿度的对起雾的影响大于昼夜温差影响,将相对湿度大于95%作为起雾的关键因素。建立了雾天出现的预测模型,为高速公路雾天管理提供依据。

关键词:交通工程;高速公路;雾天;预测

中图分类号:X951

文献标志码:A

doi: 10.11731/j.issn.1673-193x.2015.01.029

Study on fog formation prediction of highway

ZHANG Xu-guang¹, GAO Jing-ru², GAO Jian-ping¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201800, China)

Abstract: has a significant impact on traffic operation and safety of highway, and mastering the weather characteristics of foggy weather is a key issue for improving the effectiveness and pertinence of foggy weather management in highway. According to the traffic data and weather data of highways in Chongqing from 2009 to 2011 fog season, and based on the analysis of influence to highway traffic by fog visibility, the threshold of fog visibility influencing the traffic was determined to be 600 m. By the principal component analysis and correlation analysis on the temporal evolution of meteorological conditions in foggy weather formation, it showed that the maximum humidity and temperature difference between day and night have a decisive impact on the formation of fog, and the influence of relative humidity to the formation of fog is larger than that of temperature difference between day and night. The key factor of fog formation is the relative humidity being larger than 95%. A prediction model of fog weather formation was established, which can provide basis for the fog weather management of highway.

Key words: traffic engineering; highway; foggy weather; prediction

0 引言

雾是高速公路上常见的灾害性天气之一,研究

表明,高速公路交通事故中约22%~45%与雾、雨等天气相关^[1]。雾天能见度的降低常导致多车追尾事故发生,人员伤亡和财产损失巨大。Frank等人研究发现,高速公路上发生的群车事故约占事故总数的60%以上,其中追尾事故为40%以上,碰擦事故为20%。对我国高速公路上发生的追尾事故进行统计发现,有85%的群车事故都发生在雾天^[2]。

另外对于雾天高速公路运营管理及事故预防方

收稿日期: 2014-05-26

作者简介: 张续光, 博士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378520);教育部高等学科博士学科点专项科研基金(20125522110001)

面,潘晓东^[3]、刘贺楠^[4]等针对雾环境下高速公路交通事故原因进行研究,发现雾天事故发生概率为晴好天气下 10 倍;齐莹菲^[5]、蒋贤才^[6]等通过雾天高速公路安全保障措施,提出了雾环境下高速公路安全管理系统等一系列安全保障措施;并有学者从仿真模拟角度对雾天生成及影响进行了研究,建立了雾天虚拟场景^[7]。

虽然目前国内外对雾天与交通安全的关系进行了一系列研究,但针对雾情发生与天气条件和天气过程的关系并未涉及,对雾的预测停留在依赖一般天气预测,不能实时的反应高速公路雾情,因此研究对雾环境下高速公路管理及事故预防具有重要现实意义。

1 雾对高速公路运营影响分析

由于交通事故的随机性,现有技术条件下很难证明一起事故是由雾单因素引起的。但是,发生在雾天的多次、多车追尾事故,已对高速公路运营安全造成严重危害^[8-9]。

通过对 1990~2011 年全国 60 起高速公路雾天二次或多次事故的统计,得到雾天高速公路与晴天

平均每起事故的伤亡损失对比情况,如表 1 所示。

表 1 雾天高速公路多车事故严重程度分析表
Table 1 Analysis on severity of multiple car accident in expressway under fog weather

	车辆数 /(辆· 起 ⁻¹)	死亡人数 /(人· 起 ⁻¹)	受伤人数 /(人· 起 ⁻¹)	管制时间 /(小时· 起 ⁻¹)
雾天	20.08	3.34	11.11	8.06
晴天	3.5	0.7	5.9	1.3

由表 1 可以看出,雾天多车事故中死亡人数及受伤人数远高于正常天气,平均管制时间也较长,因此综合判定雾天事故严重程度较高。

2 高速公路沿线雾分布规律分析

受沿线环境条件的差异性影响,高速公路沿线雾区的分布呈现非均匀性特征。对调查的高速公路雾区特征进行聚类,结果如表 2 所示。

表 2 高速公路沿线雾区分布特征
Table 2 Characteristics of fog area distribution along expressway

编号	路段特征	区域特征
1	河流、池塘及水田等水系发达的高速公路路段	沿线多河流、池塘、水田等水系,且加上周围多山,沟壑纵横,风速小,空气流动慢,河流池塘水气蒸发量大、湿度大,空气中的水分易达到饱和。因此,气温大幅下降时容易形成局部团雾
2	桥梁路段	桥梁一般处于常年流动的大江河流之上,产生雾的可能性极大
3	隧道路段	隧道内部空气流动性差,隧道内温度要明显高于相连路段路面温度,在隧道进出口处就会存在冷热空气交汇,由此极易产生局部的雾团和上坡雾等;隧道进出口两侧还可能由于地形、地貌以及植被产生小气候差异
4	人口聚集区路段	人口聚集区的生活生产使该区的气温明显高于非聚集区。山区的地形决定了人口的聚集也造成了聚集区与非聚集区的气温差异。温度的差异加之山区湿度大、海拔高的特点为雾的形成提供了客观自然条件
5	山间洼地路段	山地低洼地带,地面潮湿、水汽蒸发量大,在清晨地面热量散失较多的情况下,再加上地面温度大幅下降,空气中的水分饱和后便会迅速凝结形成小区域的雾团,而且由于低洼地带空气流通性差,较低的风速也促进了雾的形成
6	其它容易产生雾的路段	山区高速公路沿线多具有潮湿多雨的气候条件,在沿线植被繁茂时,就会使得大气中水分含量高,在清晨地面气温较低的情况下,空气中的水分很容易饱和凝结而形成浓雾

利用统计分析法对雾天出现的影响因素进行相关性分析,得出各影响因素与雾天出现的相关系数如表3所示。

表3 雾影响因素相关系数表

Table 3 Correlation coefficient on influence factors of fog

因子	指标	雾出现
温度	相关系数	0.809
	P 值	0.003
湿度	相关系数	0.840
	P 值	<0.001
地形	相关系数	-0.684
	P 值	0.021
地貌	相关系数	0.721
	P 值	0.031
压强	相关系数	0.423
	P 值	0.122
固体颗粒含量	相关系数	0.695
	P 值	0.035
风速	相关系数	-0.642
	P 值	0.025

由表3可以看出相关系数最高的为温度及湿度,分别为0.809及0.840,其次为地形、地貌等。

3 雾形成影响因素主成分分析

除全域性大雾外,高速公路沿线的雾以辐射雾居多,定点分布,形成雾区。研究表明雾的形成包括:冷却条件、水汽条件、凝结条件、天气条件、层结条件和风力条件^[10-12]。对某一雾区,其所在区域地形、地貌等条件固定,在研究影响雾天形成的因素时主要考虑变化较大而又容易采集的大气条件。

根据对重庆高速公路多个雾区路段2009~2011年两个雾季的观测和统计,起雾和消雾的累计频率统计结果如图1所示。

从图1可知起雾和消雾时间的频率与它们各自对应的集中范围。起雾时间主要集中在夜间21:00到凌晨5:00,此后逐渐发展。在此时段与白天的昼夜温差较大,有近地层辐射逆温层产生,并使空气湿度逐渐增大,形成了产生雾的冷却条件和水汽条件。消雾过程多集中在早上7点到11点,主要是日出后随着近地层气温上升,低空逆温层逐渐被破坏,雾滴气化大雾也随之消散。

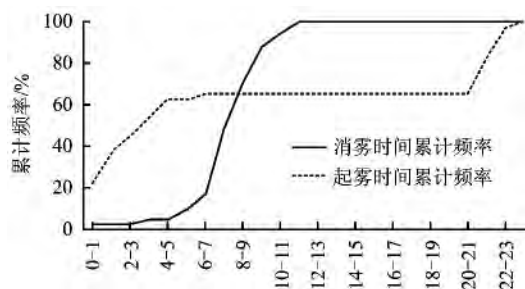
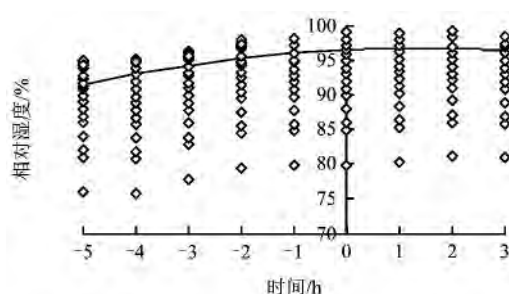


图1 起雾和消雾在各个时间段的累积频率

Fig. 1 Time cumulative frequency diagram of fog appear and dissipation

统计两个雾季248起雾天的起雾前后5小时湿度变化如图2所示。



图中0点为起雾时刻 左边为起雾前时间 右边为起雾后时间

图2 起雾前后小时平均湿度变化散点图

Fig. 2 Variation of the hour average humidity before fog occurred

对于起雾前平均湿度,选取起雾前5小时平均相对湿度变化如图3所示。

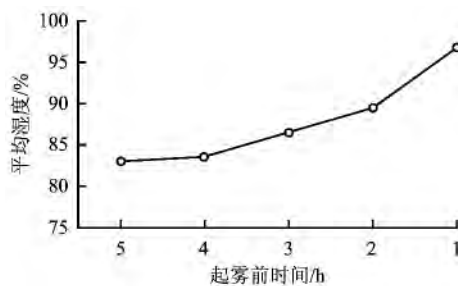


图3 起雾前5小时内平均湿度变化

Fig. 3 Variation of the average humidity in the 5 hours before fog occurred

从图3可以看出,在所有起雾前5小时变化中,在起雾前1小时内斜率最大,平均相对湿度达96。

8% ,对起雾前 1 小时内平均相对湿度与雾出现进行相关性分析得相关系数为 0.932 , P 值为 0 ,相关性极显著 ,因此选取起雾前 1 小时内平均湿度、最大湿度、昼夜温差及起雾时温度进行主成分分析 ,确定影响雾天出现的最相关因子。

经计算得到相关系数矩阵、总方差解释及成分矩阵 ,计算提取两个主成分 ,即 $m=2$,两个主成分的贡献率分别为 :44.187% ,36.636% ,累计贡献率为 80.823% ,累计贡献率 >80% ,即表明两个主成分基本上保留了原数据的方差信息 ,特征值 $\lambda_1 = 1.767$, $\lambda_2 = 1.025$ 。

由表 4 可知 ,第一主成分中前 1 小时平均湿度 ,最大湿度两个指标值大于 0.6 ,表明第一主成分主要说明这两个指标的信息。同理 ,第二主成分主要说明昼夜温差 ,起雾时温差两个指标的信息。两个主成分基本包含了总体的全部信息。

表 4 成分矩阵 β_i Table 4 Matrix elements β_i

因子	主成分	
	1	2
雾前 1 小时平均湿度	0.885	0.000
最大湿度	0.741	-0.337
昼夜温差	-0.140	-0.984
起雾时温度	0.161	0.607

设主成分向量为 β_i ($i=1, 2$) ,则特征向量:

$$\gamma_i = \beta_i / \sqrt{\lambda_i} \quad (i=1, 2) \quad (1)$$

$$\gamma_i = \begin{pmatrix} 0.666 & 0.000 \\ 0.557 & -0.333 \\ -0.481 & -0.972 \\ 0.121 & 0.600 \end{pmatrix}$$

主成分 $F_i = \gamma_i \times ZX$ (ZX 为 X 标准化后所得矩阵 ,因为 X 样本空间太大 ,不引入 X 、 ZX 的原数据矩阵 ,而将直接运算结果) 可以得出:

$$F_1 = 0.666 \times ZX_1 + 0.741 \times ZX_2 - 0.640 \times ZX_3 + 0.161 \times ZX_4 \quad (2)$$

$$F_2 = -0.333 \times ZX_2 - 0.972 \times ZX_3 + 0.600 \times ZX_4 \quad (3)$$

综合主成分:

$$F = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = 0.633F_1 + 0.367F_2 \quad (4)$$

主成分综合模型为:

$$F = 0.421ZX_1 + 0.231ZX_2 - 0.408ZX_3 + 0.236ZX_4 \quad (5)$$

通过对雾天天气是否出现的影响因素进行主成分分析 ,由式(5)可知 ,相对湿度和昼夜温差系数绝对值大于 0.3 ,表明其对雾天天气的影响较大 ,是关键控制因素。

4 高速公路雾形成关键影响因素分析

4.1 雾形成与相对湿度关系分析

1) 雾天相对湿度统计特征分析

雾形成时相对湿度出现频率统计与相对湿度大于 95% 时的雾出现频率统计如表 5 所示。

表 5 雾天天气相对湿度分布范围

Table 5 Distribution of relative humidity under fog weather

相对湿度 $f/\%$	相对湿度出现频数/次	雾天出现频数/次	相对湿度系数 F_h
$f \leq 85$	36	3	0.083
$85 < f \leq 90$	21	9	0.429
$90 < f \leq 95$	85	34	0.400
$f > 95$	223	202	0.906

定义相对湿度系数为:

$$F_h = \text{雾天出现频数} / \text{相对湿度出现频数}$$

F_h 越大表示相对湿度对雾天出现的影响越大 ,反之则越小。

从表 5 及表 6 可以看出 ,雾形成时相对湿度 $f \geq 95\%$ 的相对湿度系数最大 ,表明对雾天出现的影响最大 ,因此 ,将起雾的湿度的分布范围及其在 $f \geq 95\%$ 时的分布范围。

相对湿度大于 95% 时雾天出现频率统计如表 6 所示。

2) 起雾前 1 小时相对湿度统计特征分析

起雾前 1 小时内相对湿度的统计特征如表 7 和表 8 所示。

表 6 雾天天气相对湿度大于 95 % 的分布概率

Table 6 Distribution probability of the relative humidity greater than 95 % under fog weather

相对湿度 $f/\%$	雾天出现频数 / 次	频率 / %
> 95 ~ 96	47	23. 27
> 96 ~ 97	34	16. 83
> 97 ~ 98	45	22. 28
> 98 ~ 99	75	37. 12
> 99	1	0. 5

表 7 起雾前平均湿度气象特征要素

Table 7 Distribution range of equally humidity before fog occurred

平均湿度 $f/\%$	频数	出现频率 / %
$f \leq 85$	5	2. 1
$85 < f \leq 90$	17	6. 7
$90 < f \leq 95$	32	13. 1
$f > 95$	194	78. 1

表 8 雾天天气平均湿度大于 95 % 的出现频率

Table 8 Distribution probability of average humidity witch is greater than 95 % in a foggy day

相对湿度 $f/\%$	频数	出现频率 %
$f = 95$	59	23. 8
$f = 96$	58	23. 5
$f = 97$	43	17. 2
$f = 98$	19	7. 7
$f = 99$	69	27. 8

综合表 5 ~ 8 的统计结果 81. 5% 的雾天出现在相对湿度大于 95% 天气条件下。因此 , 认为相对湿度超过 95% 是起雾的关键因素。

4.2 雾形成与地面温差关系分析

雾天天气出现时昼夜温差分布情况和起雾时温度分布情况如表 9 ~ 10 所示。

同样定义温差系数与温度系数分别为：

$F_t = \text{雾天出现频数} / \text{温差出现频数}$

$F_T = \text{雾天出现频数} / \text{温度出现频数}$

温差系数 F_t 与温度系数 F_T 越大 , 表明温差与

温度对雾天出现的影响越大 , 反之则越小。可以看出 $7 \leq \Delta T < 8$ 及 $10 \leq T < 12$ 时温差系数 , 温度系数最大。

表 9 雾天天气温差气象特征要素

Table 9 Distribution of the range of temperature elements in foggy day

昼夜温差 $\Delta T/^\circ\text{C}$	雾天出现频数 / 次	频率 / %	温差出现频数 / 次	温差系数
$\Delta T < 3$	3	1. 21	33	0. 091
$3 \leq \Delta T < 4$	20	8. 06	36	0. 556
$4 \leq \Delta T < 5$	26	10. 48	41	0. 634
$5 \leq \Delta T < 6$	49	19. 76	58	0. 845
$6 \leq \Delta T < 7$	53	21. 37	61	0. 869
$7 \leq \Delta T < 8$	49	19. 76	52	0. 942
$8 \leq \Delta T < 9$	13	5. 24	25	0. 520
$9 \leq \Delta T < 10$	13	5. 24	23	0. 565
$\Delta T \geq 10$	22	8. 87	36	0. 611

表 10 起雾温度的分布范围

Table 10 Distribution of the temperature under fog weather

温度 $T/^\circ\text{C}$	雾天出现频数 / 次	频率 / %	温度出现频数 / 次	温度系数
$T < 2$	25	10. 08%	33	0. 091
$2 \leq T < 4$	26	10. 48%	36	0. 556
$4 \leq T < 6$	19	7. 66%	41	0. 634
$6 \leq T < 8$	6	2. 42%	58	0. 845
$8 \leq T < 10$	32	12. 90%	61	0. 869
$10 \leq T < 12$	96	38. 71%	52	0. 942
$12 \leq T < 14$	38	15. 32%	25	0. 520
$T \geq 14$	6	2. 42%	23	0. 565

4.3 雾的形成与相对湿度及温差的综合分析

将统计的 248 个雾天的原始数据按昼夜温差及相对湿度绘制成散点图 , 综合相对湿度及温差与雾发生的关系 , 将雾发生时集中范围分为四个区域 , 如表 11 与图 4 所示。

表 11 雾天分布范围分区

Table 11 Partition for range of fog distribution

区域	昼夜温差/℃	相对湿度/%
I	0 ~ 8	95 ~ 99
II	0 ~ 8	80 ~ 95
III	8 ~ 14	95 ~ 99
IV	8 ~ 14	80 ~ 95

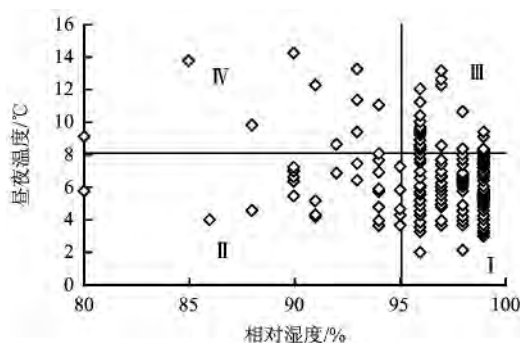


图 4 雾天相对湿度和昼夜温差分布散点图

Fig. 4 Scatter diagram of fog distribution with different relative humidity and diurnal amplitude

可以看出,区域 I 发生雾频数最高,区域 III 次之,区域 IV 最低,即雾发生概率最高的温差及相对湿度范围为:昼夜温差 0 ~ 8℃ 相对湿度 95% ~ 99%,另外可以看出 相对湿度对雾的形成影响较大。

5 高速公路雾形成预测模型

将雾天出现与否进行量化,用函数值 $Y=1$ 表示在该相对湿度和温差条件下有雾天天气出现, $Y=0$ 表示雾天天气没有出现。

对雾天天气数据进行统计,并利用逻辑回归方法分析雾天出现函数 Y ,在变量相对湿度和温差的影响下雾天天气是否出现的相关矩阵及参数估计如表 12 ~ 13 所示。

表 12 相关矩阵

Table 12 Correlation matrixes

因子	常数	温差	相对湿度
常数	1.000	-0.765	-0.996
温差	-0.765	1.000	0.709
相对湿度	-0.996	0.709	1.000

表 13 参数估计值

Table 13 The estimated parameter

变量名	系数	标准误差	卡方值	自由度	量值	期望值	95% 置信区间	
							最小值	最大值
常数	-64.849	16.869	14.340	1	0.002	0		
相对湿度	0.631	0.171	13.856	1	0.002	0	1.352	2.645
温差	1.546	0.399	7.935	1	0.016	0.005	1.407	6.717

进而通过表 12 及表 13 得到高速公路雾情预报模型如下所示:

$$P(Y) = \begin{cases} \frac{\exp(-64.849 + 0.631f + 1.546\Delta T)}{1 + \exp(-64.849 + 0.631f + 1.546\Delta T)} & Y = 1 \\ \frac{1}{1 + \exp(-64.849 + 0.631f + 1.546\Delta T)} & Y = 0 \end{cases} \quad (6)$$

在模型中,当 $Y=1$ 的概率大于 $Y=0$ 时,表明雾出现的概率较不出现的概率大,即认为会产生雾天气,发出雾天预警,提醒各部门做好防范措施。

同时通过表 12 统计量中卡方值的大小可得出,雾天天气出现的影响因素中相对湿度的卡方值大于昼夜温差的卡方值,说明相对湿度对雾天天气的显著性影响高于温差对雾天天气的显著性影响,与雾情出现分区判定相吻合。

6 结论

通过收集重庆某高速三个雾区观测点 2009 ~ 2011 年两个雾季资料,统计雾情出现时影响因素变化,主要有以下研究结论:

1)对雾的形成影响因素进行主成分分析及相关性分析,发现起雾前1小时内平均相对湿度及温差与雾的形成相关性最高,为关键控制因素。

2)通过对相对湿度、温度与雾天形成所进行逻辑回归分析,建立了雾天出现预报模型及影响因素模型,对比影响卡方值发现,相对湿度对雾天的形成具有最显著影响。

3)根据相对湿度和温差对雾天形成的影响特征,划定雾天形成的温度湿度区间。当昼夜温差在 $0\sim 8^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 $95\%\sim 99\%$ 时起雾可能性最大。

4)将温度及湿度指标作为雾天预测指标,有容易采集,便于操作的优势。利用温度及湿度建立雾天预测优势比模型可以为制定高速公路雾天应急管理预案以及高速公路雾区预警提供技术支持。

参考文献

- [1] Julia B Edwards. The relationship between road accident severity and recorded weather[J]. Journal of Safety Research, 1998, 29(4): 249-262
- [2] Frank D. Shepard. Reduced visibility due to fog on the highway[M]. Washington D. C., 1996
- [3] 潘晓东, 蒋宏, 高昂. 雾天高速公路交通事故成因分析及安全对策[J]. 交通标准化, 2006, (10): 200-203
PAN Xiao-dong, JIANG Hong, GAO Ang. Cause and security countermeasures of traffic accident in foggy expressway[J]. Communications Standardization, 2006, (10): 200-203
- [4] 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
QI Ying-fei, LIU Ben-min, GUO Zhong-yin. Safety management system for freeway in fog[J]. Journal of Tongji University(Natural science), 2007, 35(1): 61-66
- [5] 刘贺楠, 吴宏伟. 高速公路雾天事故成因及应急决策研究[J]. 公路交通技术, 2010, (3): 135-138, 141
LIU He-nan, WU Hong-wei. Research on emergency strategies for sudden accidents on expressways in foggy days[J]. Technology of Highway and Transport, 2010, (3): 135-138, 141
- [6] 蒋贤才, 黄科. 雾天道路交通安全保障措施及其成效分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 86-91
TIANG Xian-cai, HUANG Ke. Safeguards and effects of road transportation safety in fog[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(6): 86-91
- [7] 董健康, 刘坤, 王洁宁. 室外自然场景下的雾天模拟生成算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(3): 397-401, 409
DONG Jian-kang, LIU Kun, WANG Jie-ning. Simulation of the foggy scene under outdoor natural scenes[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2013, 25(3): 397-401, 409
- [8] 房曰荣, 沈斐敏. 道路交通事故发展趋势分析与预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(3): 141-146
FANG Yue-rong, SHEN Fei-min. Development trend analysis and prediction of traffic accident[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(3): 141-146
- [9] 陈定秋, 朱德林. 高速公路交通事故的季节变动规律分析及预测[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 9(3): 188-192
CHEN Ding-qiu, ZHU De-lin. Analysis on seasonal variation law and prediction on number of highway traffic accidents. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 9(3): 188-192
- [10] Gazzi M., Georgiadis T and thick haze. Atmospheric valentine distant contrast measurement through fog[J]. Environment, 2001, (35): 5143-5149
- [11] Qi Ying, Mitchell M., Michael J. K. Source Apportionment of visibility impairment using a three-dimensional source-oriented air quality model. Environ[J]. Sci. Technol. 2004, (4): 1089-1101
- [12] Mariusz P., Ismail G., Patrick K. Analysis and modeling of an extremely dense fog even in southern Ontario[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, (1): 3-16