

王小完, 南庆宾, 骆济豪, 等. 基于大孔模型的天然气管道泄漏火灾模拟分析 [J]. 灾害学, 2022, 37(2): 49-53. [WANG Xiaowan, NAN Qingbin, LUO Jihao, et al. Fire Simulation Analysis of Natural Gas Pipeline Leakage Based on Large Hole Model[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 49-53. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.02.009.]

基于大孔模型的天然气管道泄漏火灾模拟分析*

王小完¹, 南庆宾¹, 骆济豪², 骆正山¹

(1. 西安建筑科技大学 管理学院, 陕西 西安 710055; 2. 北京理工大学 睿信学院, 北京 102488)

摘要:为探究天然气管道泄漏规律并界定天然气喷射火热辐射、爆炸超压的影响程度, 基于高斯烟羽大孔泄漏模型确定了天然气泄漏量和泄漏速率, 采用 SHELL 喷射火模型与 TNT 当量爆炸模型模拟分析了不同工况下喷射火热辐射强度半径和晚期爆炸超压半径。通过对实例模拟结果分析可知: 天然气泄漏孔径的大小与大气环境稳定程度, 前者对天然气火灾的影响作用较为显著。参照火灾伤害阈值表能够界定火灾伤害等级与环境破坏程度。PHAST 平台能全面、直观的模拟天然气泄漏火灾的强度与范围, 其结果能够为现场安全评价、制定管道火灾应急预案提供相应的参考。

关键词: 天然气泄漏; 喷射火; 蒸汽云爆炸; 模拟仿真

中图分类号: X932; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2022)02-0049-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2022.02.009

天然气是一种高效、清洁的能源, 管道是天然气输送的生命线工程^[1]。天然气管道的建设规模越来越大, 随之而来的问题也越来越多, 管道由于腐蚀、老化或第三方的破坏会导致天然气泄漏, 气体在一定条件下遇明火会发生火灾或爆炸, 严重影响人类生命安全和社会稳定性, 对大自然也造成了巨大的破坏。探究天然气泄漏规律并界定火灾影响程度, 能有效削弱此类事故造成的影响。

目前, 国内外学者对天然气管道泄漏规律做出了一定的探究, 并模拟研究了相应的火灾后果。EBRAHIMI Moghadam 等^[2]拟合了天然气管道内外部压力、管径、泄漏孔径和气体泄漏量之间的数值模型, 吴峰^[3]等量化评估了可燃燃气云爆炸、火球热辐射的伤害强度和伤害范围。李又绿^[4]、向素平^[5]等建立模型量化评价了喷射火, 蒸汽云火灾后果; 刘自亮^[6]运用 FLACS 软件模拟仿真了天然气管道泄漏引起的爆炸和喷射火事故后果; 陈国华^[7]基于经验公式并利用 FLUENT 软件数值模拟了全尺寸喷射火事故; 邓汉猛^[8]运用 PHAST 软件模拟分析了油田老旧管道泄漏火灾后果。

学者们对灾害后果进行相应的模拟仿真, 但缺乏对其影响因素的探究。天然气泄漏火灾的实

验成本较高, 难以实现, 较多的学者广泛使用仿真软件进行模拟, PHAST 平台模型集成度高、评估的结果能够以直观的图片或数值形式呈现, 可有选择性的设定变量和提取数据来分析火灾影响因素, 为制定风险防控措施提供相应参考。

1 理论分析

(1) 泄漏理论分析。在有关气体泄漏扩散过程的理论模型研究中, 常用基于流体状态方程、质量守恒方程、能量方程和动量方程的高斯(Gaussian)模型和 Sutton 模型, 根据泄漏孔口的直径, 泄漏扩散模型又分为孔隙模型、大孔模型和管道模型。孔隙模型将管道等价代替为一个内部压力恒定大容器, 但其只适用于泄漏孔径不大于 20 mm 的情况; 管道断裂模型只适用于管道完全破裂的情况, 管道模型只考虑气体流量, 不考虑管道内外压力、孔径、温度等因素; 大孔模型适用于介于前两者之间的情况, 在高压和低中压条件下, 计算更为精准^[8]。大孔模型适用于分析天然气管道气体泄漏的大多数情况。

(2) 管道泄漏火灾分析。天然气泄漏引起的火

* 收稿日期: 2021-11-16 修回日期: 2022-03-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“在役海底油气输送管道风险评估与管理研究”(41877527); 陕西省社科基金项目“大数据背景下城市天然气管道风险评估与管理研究”(2018S34)

第一作者简介: 王小完(1975-), 女, 汉族, 陕西韩城人, 副教授, 主要从事管道风险评估理论、建模与方法等教学和科研工作。

E-mail: 445124246@qq.com

通讯作者: 南庆宾(1997-), 男, 汉族, 河南安阳人, 硕士研究生, 主要从事油气风险评估研究. E-mail: 780204230@qq.com

灾主要有喷射火、爆炸、闪火三种。天然气泄漏时，在立即点燃的条件下可形成闪火或喷射火，若游离的气云在狭窄密集的区域，云团内形成较高的爆炸压力波，延迟点燃会造成爆炸。PHAST、FLACS、ALOHA 是目前用来模拟气体泄漏事故的常用软件，PHAST 专门用于油气安全风险定量计算分析，通过设置油气管道压力、温度、大气环境等参数，模拟计算泄漏扩散、火灾影响程度，能很好的评估事故影响范围，为管道设计和制定应急预案提供相应的参考数据^[9]。

2 模型建立

基于天然气泄漏理论和天然气泄漏火灾类型，建立高斯烟羽大孔泄漏模型、SHELL 喷射火模型、TNT 当量气云爆炸模型，运用 PHAST 软件模拟分析天然气火灾后果。

2.1 泄漏模型选择

基于天然气大孔泄漏模型理论，建立如下大孔泄漏模型^[8]：

$$CPB = \frac{P_a}{P_2} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (1)$$

式中：CPB 为临界压力比， P_a 为大气环境的压力 (MPa)； P_2 为管道轴心处气体压力 (MPa)； γ 为钢管泊松比。

(1) 当 $P_2/P_a < CPB$ 时，判定为临界泄漏，其泄漏速率为：

$$m = C_d A_h P_2 \sqrt{\frac{W_g}{ZRT_2} \gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}}} \quad (2)$$

式中： m 为气体泄漏速率 (kg/s)； C_d 为流量系数； A_h 为泄漏口面积 (m^2)； W_g 为气体摩尔质量 (kg/mol)； Z 为压缩因子； R 为理想气体常数； T_2 为气体在点轴心处的温度 (K)。

(2) 当 $P_2/P_a \geq CPB$ 时，判定为亚临界泄漏，其泄漏率为：

$$m = C_d A_h P_2 \sqrt{\frac{2W_g}{ZRT_2} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{P_a}{P_2} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma}} \right]} \quad (3)$$

表 1 不同热辐射入射通量伤害阈值表

入射通量/(kW/m ²)	对设备的损坏	对人的伤害
37.5	操作设备全部损坏	1% 死亡/10 s; 100% 死亡/1 min
25.0	在无火焰, 长时间辐射下, 木材燃烧	重大损伤/10 s; 100 死亡/1 min
12.5	有火焰时, 木材燃烧, 塑料融化	1 度烧伤/10 s; 1% 死亡/1 min
4.0		20 s 以上感觉疼痛, 未必起泡
1.6		长期辐射无不舒服感

表 2 超压对人员的危害情况

超压/bar	对人的危害
>0.75	当场死亡
0.45 ~ 0.75	重伤
0.25 ~ 0.45	中伤
0.1 ~ 0.25	轻伤

表 3 超压对建筑物的损坏

超压/bar	建筑物的影响
>0.76	房屋倒塌
0.5 ~ 0.76	门窗全部破坏
0.3 ~ 0.5	门窗大部门破坏
0.12 ~ 0.3	门窗部分破坏
0.02 ~ 0.12	玻璃窗破坏
<0.2	基本无破坏

2.2 火灾后果分析模型

(1) 喷射火模型。加压天然气泄漏射流后若立即点燃会形成喷射火，其伤害形式为火焰热辐射，目前规则化计算火焰热辐射强度的模型分为两类：点源模型和固体模型，固体模型又分为 SHELL 锥模型和 API RP521 香蕉模型。SHELL 模型适用于不大于 180° 的喷射角度，适用场景广泛，能突破其它热辐射模型的局限。SHELL 模型将火焰假设为固体，且有表面热辐射率，其模型如图 1 所示。

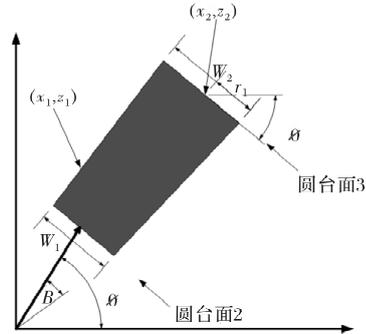


图 1 SHELL 模型示意图

(2) 蒸汽云爆炸模型。TNT 当量模型、Bake - Strehlow - tang 模型和 TNO 多能模型是常用于计算气云爆炸的模型。其中，TNT 当量爆炸模型将气云爆炸效果等效转化为 TNT 爆炸效果^[10]，较其他两种模型不需要精确参数且其模型简便，能有效评估近距离爆炸伤害后果，很好的计算事故周围的破坏强度，实用性较强，其模型计算式如下：

$$m_{TNT} = \frac{H_e m E f}{H_{TNT}} \quad (4)$$

式中： m_{TNT} 为 TNT 的当量 (kg)； H_{TNT} 为 TNT 的爆热 (kJ/kg)； H_e 为气云燃烧热 (kJ/kg)； m 为可燃物质质量 (kg)； E 为爆炸效率； f 为地面反射系数。

(3) 伤害阈值表。PHAST 模拟结果结合火灾伤害阈值表，能界定火灾强度及影响范围。表 1 为不同热辐射入射通量伤害阈值表^[11]，表 2、表 3 分别为爆炸超压冲击波伤害阈值表^[12]。

3 实例计算

3.1 工程概况

广西省某管道发生天然气泄漏燃烧事故后经现场勘查发现, 管道规格为 API 5L - L360, 其运行的轴心压力为 0.8 MPa, 正常运行的温度为 50 °C, 其运行于正常大气压环境下^[8]。

3.2 计算过程

根据钢管规格可知, 此钢管最大含碳量 0.28%, 为中碳钢, 弹性模量为 206 GPa, 切变模量为 79.4 GPa, 故取 γ 泊为 0.28。其所处环境大气压力 $P_a = 0.101$ MPa, 轴心处压力 $P_2 = 0.8$ MPa, 则参照公式 (1), $P_a/P_2 = 0.126$, $CPB = 0.354$, 因为 $P_a/P_2 < CPB$, 故该气体按临界泄漏模型计算, 雷诺系数取 1.0, 理想气体常数取 $8.314(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$, 假设泄漏口处的气体流速为音速 420 m/s^[8], 依据公式 (2), 分别计算 25 mm、50 mm 和 100 mm 泄漏孔径的气体泄漏量, 计算结果如表 4 所示。

表 4 不同泄漏孔径泄漏量

孔径/mm	泄漏量/kg
25	7.01
50	9.06
100	10.72

已知泄漏量的基础上, 运用 PHAST 软件将压力容器代替管道进行甲烷泄漏模拟, 模拟计算其喷射火, 蒸汽云爆炸火灾后果。模拟参数设定如表 5 所示。

表 5 PHAST DNV 7.2 参数设定

容器模型	压力容器参数
物料	甲烷
温度/°C	10
风速/(m/s)	1.5、5
帕斯奎尔大气稳定度	F、D
压力/MPa	0.38
泄漏孔径/mm	25、50、100
测量浓度/ppm	22 000
喷射火模型	SHELL 锥模型

为了比对泄漏孔径与大气环境对火灾范围的影响程度, 选取了 50 mm 和 100 mm 的泄漏孔径、风速为 1.5 m/s、帕斯奎尔大气稳定度为 F 的晚期爆炸最坏破坏半径结果(图 2); 50 mm 泄漏孔径在 3 种不同大气条件下晚期爆炸破坏半径结果(图 3); 50 mm 泄漏孔径、风速为 1.5 m/s、帕斯奎尔大气稳定度为 F 时晚期爆炸与超压距离情况(图 4); 泄漏孔径分别为 25 mm、50 mm 和 100 mm、风速为 1.5 m/s、帕斯奎尔大气稳定度为 F 时喷

射火热辐射水平与距离关系(图 5); 50 mm 泄漏孔径下不同大气条件喷射火热辐射水平与距离关系(图 6)。

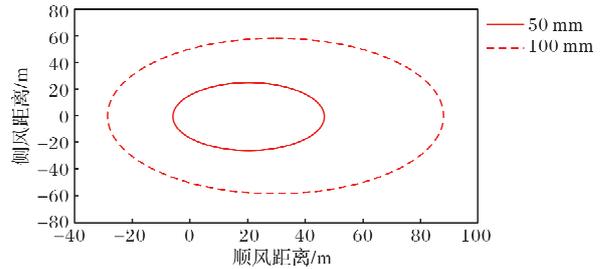


图 2 不同泄漏孔径晚期爆炸最坏破坏半径

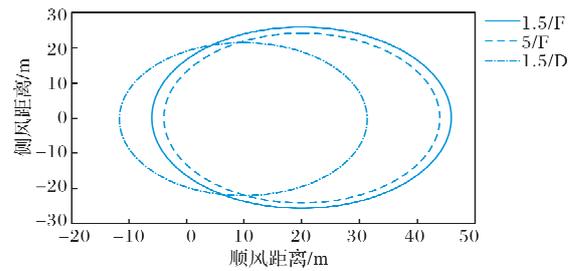


图 3 不同大气环境下晚期爆炸最坏破坏半径

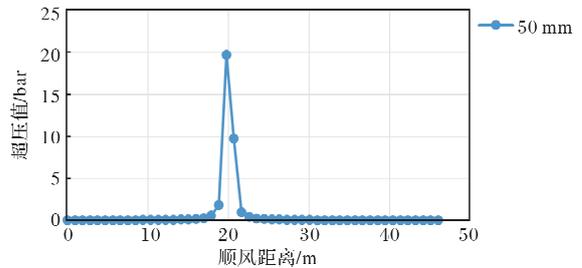


图 4 50 mm 泄漏孔径爆炸超压与距离

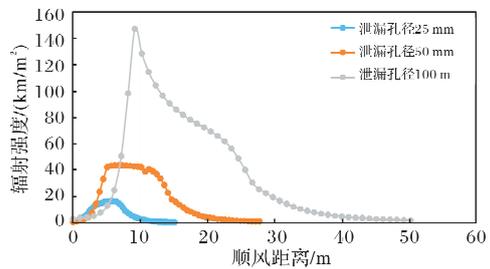


图 5 不同泄漏孔径下热辐射水平与距离

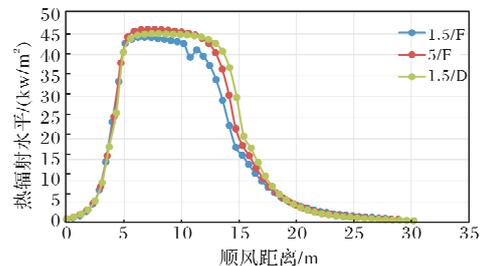


图 6 不同大气环境下喷射火热辐射与距离

表6 不同孔径和大气环境影响表

孔径/mm	风速/ (m/s)	帕斯奎尔大气 稳定度	最大辐射量/ (kW/m ²)	最大顺风影响 距离/m	爆炸最坏情况 半径/m
25	1.5	F	16.82	15.12	/
25	5.0	F	15.82	15.13	/
25	1.5	D	13.81	15.37	/
50	1.5	D	44.17	27.72	45.96
50	5.0	F	46.09	28.86	45.91
50	1.5	D	45.01	30.23	31.29
100	1.5	F	149.02	50.21	88.28
100	5.0	F	155.38	53.57	85.23
100	1.5	D	161.90	57.17	87.70

4 讨论

PHAST 侧重于界定火灾后果范围及强度, 基于集成的计算模型, 其结果可呈现为示意图, 如图2-图6所示, 也可导出计算结果, 结合 PHAST 7.2 计算数据(表6)与火灾伤害阈值表(表1-表3)能界定火灾影响程度及范围。

(1)依据表1数据, 界定喷射火热辐射强度和伤害程度。以泄漏孔径50 mm、风速为1.5 m/s、帕斯奎尔大气稳定度F为例(图5), 顺风0~1.69 m内, 热辐射水平介于1.6~4.0 kW/m², 长时间辐射也不会感到明显的不舒服; 顺风距离1.69~2.82 m内, 热辐射水平介于4.0~12.5 kW/m², 处于此环境中20 s以上会感觉到疼痛, 但未必起泡; 顺风距离2.82~3.96 m内, 辐射水平介于12.5~25 kW/m², 此范围有火焰时会造成塑料融化、木材燃烧, 人员每10 s会造成1度烧伤, 每1 min就会有1%的人死亡; 顺风距离3.96 m~5.09 m内, 辐射水平介于25~37.5 kW/m², 在长期辐射, 没有火焰的情况下会造成木柴燃烧, 人员10 s就会造成重大损伤, 每1 min就会有100人死亡; 顺风距离5.09~11.88 m内, 辐射水平大于37.5 kW/m², 会损坏事故周围所有设备, 人员每10 s就会有1%的致死概率, 达到1 min时会造成100%的致死率。

(2)提取爆炸超压距离结果, 结合表2和表3界定伤害范围及强度。以50 mm泄漏孔径和1.5/F大气环境下为例(图4), 在顺风距离0~14.08 m和27.23~46.01 m内, 超压小于0.1 bar, 基本上不造成人员伤害, 对建筑物基本无影响; 在顺风距离14.08~16.90 m和22.53~27.23 m内, 超压介于0.1~0.25 bar, 会造成人员轻伤, 破坏部分建筑物门窗; 在顺风距离16.90~18.78 m内, 超压介于0.45~0.75 bar, 会造成人员重伤, 且建筑物门窗会全部破坏; 在顺风距离18.78~22.53 m内, 超压大于0.75 bar, 范围内人员当场死亡, 房屋全部倒塌。

(3)通过控制变量对比分析可知, 在保持泄漏孔径一致的情况(图3, 图6)时, 受大气环境影响下, 最大热辐射量的浮动为8%~18%、最大顺风

距离浮动为2%~13%、爆炸最坏情况半径浮动在4%~32%; 在保持大气环境一致的情况时(图2, 图5), 受管道泄漏孔径大小的影响, 最大辐射量的浮动为89%~92%、最大顺风距离浮动为70%~74%、爆炸最坏情况半径浮动在47%~65%。由此可见, 泄漏孔径的大小较大气环境对天然气泄漏引发的火灾影响作用更明显。

5 结论

基于大孔泄漏模型计算天然气泄漏泄漏量和泄漏速率, 模拟不同工况下天然气火灾后果, 可得出以下结论:

(1)天然气泄漏孔径大小与大气环境稳定程度相比, 前者对天然气泄漏引起火灾的影响作用更显著。

(2)选择性的对模拟结果提取分析, 参照火灾伤害阈值表能界定火灾伤害等级与环境破坏程度, 验证了PHAST火灾模拟的科学性。PHAST平台能全面、直观的模拟天然气火灾强度与范围, 具有鲜明的科学价值及现实意义, 其结果能为现场安全评价、制定管道火灾应急预案提供相应参考。

参考文献:

- [1] 彭善碧, 廖文, 徐明军, 等. 滑坡对埋地天然气管道的作用机理分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 59-67.
- [2] EBRAHIMI Moghadama, FARZANEH Gordm, ARABKOOHSAR A, et al. CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: correlation development for leakage estimation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 199: 257-271.
- [3] 吴峰, 王锐. 天然气管道泄漏事故后果量化评价分析[J]. 煤气与热力, 2012, 32(5): 88-90.
- [4] 李又绿, 姚安林, 李永杰. 天然气管道泄漏扩散模型研究[J]. 天然气工业, 2011(8): 102-104.
- [5] 向素平, 冯良, 周义超. 天然气管道泄漏模型[J]. 天然气工业, 2014(7): 100-102, 143.
- [6] 刘自亮, 熊思江, 花争立, 等. 埋地输氢管道泄漏爆炸事故后果模拟分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019, 15(12): 94-100.
- [7] 陈国华, 周志航, 黄庭枫. FLUENT 软件预测大尺寸喷射火特性的实用性[J]. 天然气工业, 2014, 34(8): 134-140.
- [8] 邓汉猛. 基于大孔模型理论的国外某油田天然气管道泄漏事

- 故后果模拟分析[J]. 化学工程与装备, 2020(5): 254 – 255, 253.
- [9] 黄杰, 杨圆鉴, 宋江, 等. 基于 PHAST 的天然气管道火灾事故后果模拟[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(17): 140 – 141, 143.
- [10] 张桂瑞, 王慧, 纪蕻, 等. 事故后果分析软件(PHAST)在天然气管道泄漏评价中的应用[J]. 油气田环境保护, 2016, 26(5): 51 – 54, 62.
- [11] 李章安. 加油站环境风险识别及影响预测探讨[J]. 农业灾害研究, 2016, 6(8): 47 – 49.
- [12] 杨媚. 天然气管道环境风险评价方法探讨[J]. 绿色科技, 2014(10): 214 – 218.

Fire Simulation Analysis of Natural Gas Pipeline Leakage Based on Large Hole Model

WANG Xiaowan¹, NAN Qingbin¹, LUO Jihao² and LUO Zhengshan¹

(1. School of Management, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Ruixin Institute of Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

Abstract: In order to explore the leakage law of natural gas pipelines and define the influence of natural gas jet fire radiation and explosion overpressure, the natural gas leakage amount and leakage rate were determined based on the Gaussian plume large – hole leakage model, and the SHELL jet fire model and TNT equivalent explosion model were used to simulate and analyze. Radiation intensity radius of jet fire and overpressure radius of late explosion under different working conditions. Through the analysis of the simulation results of the example, it is shown that the size of the natural gas leakage aperture and the stability of the atmospheric environment, the former has a more significant effect on the natural gas fire. The fire damage level and the degree of environmental damage can be defined by referring to the fire damage threshold table. The PHAST platform can comprehensively and intuitively simulate the intensity and scope of natural gas leakage fires, and the results can provide corresponding references for on – site safety assessment and the formulation of pipeline fire emergency plans.

Key words: natural gas leakage; jet fire; steam cloud explosion; simulation

(上接第 48 页)

Research on High – speed Railway Meteorological Disaster Risk Analysis Method based on Monitoring Data Mining

BAO Yun¹, GAO Ge², LI Yaqun³, MA Zhen¹ and CHEN Zhonglei³

(1. Institute of Electronic Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Group Co. , Ltd, Beijing 100081, China; 2. China Meteorological Administration, National Climate Centre, Beijing 100081, China; 3. Beijing Jingwei Information Technologies Co. Ltd. , Beijing 100081, China)

Abstract: Meteorological disaster risk assessment plays an important guiding role in high – speed railway meteorological disaster prevention. Based on the analysis of the main meteorological factors affecting the operation of high – speed railway, the index system of high – speed railway meteorological disaster risk analysis is studied, including the risk of disaster causing factors, the sensitivity of disaster pregnant environment, the exposure and vulnerability of disaster bearing body, and the ability of disaster prevention and mitigation. The risk assessment methods of high – speed railway meteorological disasters with multiple and single disasters are discussed. Taking the wind disaster risk evaluation as an example, the risk assessment index system of wind disaster is established, and the wind risk is studied based on entropy weight method. On this basis, the wind risk is analyzed by weighted comprehensive evaluation method. Combined with the wind monitoring data of specific lines, the wind risk of corresponding lines is studied, and the risk zoning is carried out. Compared with the railway meteorological disaster risk assessment based on the data of meteorological department, the risk assessment based on the monitoring data of railway meteorological elements reflects the temporal and spatial characteristics of meteorological elements more carefully, and can better represent the characteristics of meteorological disasters along the railway. The research can provide reference for the prevention and control of high – speed railway meteorological disasters.

Key words: meteorological disaster; high – speed railway; safety; risk; evaluation