

陈永锋, 李朵, 朱振宇, 等. 烟草火灾危害后果定量评价研究[J]. 灾害学, 2016, 31(1): 50-54. [Chen Yongfeng, Li Duo, Zhu Zhenyu, et al. Quantitative Evaluation Research of Harmful Consequences of Tobacco Fire[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(1): 50-54.]

烟草火灾危害后果定量评价研究*

陈永锋, 李朵, 朱振宇, 杨皎

(西安建筑科技大学, 陕西 西安 710055)

摘要: 为准确评价烟草仓库失火烟气危害, 在借鉴能见度、热辐射、N-GAS 和 FED 模型的基础上, 提出综合考虑热辐射、烟气毒性和能见度的烟气危害评价模型 TVH (Toxicity, Visibility, Heat)。采用 PyroSim 软件模拟的方法, 以某失火烟草仓库为原型, 构建接近于真实的虚拟火灾现场。通过模拟烟气运动规律及烟气危害评价因子随时间变化曲线, 分析得出位置不同, 烟气危害的效果也不同。定量计算三个模型烟气危害指数, 分析得出热辐射是造成人员伤亡的重要原因, TVH 模型比 N-GAS 和 FED 模型多考虑了热辐射和能见度的影响, 更全面评价烟草火灾危害后果, 最后提出 TVH 模型的应用前景。

关键词: 烟草火灾; 能见度; 热辐射; TVH 模型; PyroSim 模拟

中图分类号: TB; X4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)01-0050-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.01.011

烟草作为可燃物, 不仅发生有焰燃烧, 还能发生阴燃, 烟草中的钾元素, 更增强了烟草的阴燃持火力, 加之烟草仓库可燃物多, 堆放集中^[1], 发生火灾后烟气浓度大、毒性高, 所以烟草仓库比其他建筑物更容易发生火灾, 危害性更大。据 2013 年 NFPA 发布的一份报告显示, 2011 年美国烟草引发的火灾事故约 90 000 起, 造成 540 人死亡, 6.21 亿美元的财产损失, 由此可见烟草火灾发生的频繁性和危害后果的严重性。关于火灾危害性的研究, 我国学者主要以商场、住宅楼等^[2]人群密集的场所以为研究对象, 采用概率曲线、模糊评价等方法^[3-5]定性分析火灾造成的人员伤亡和财产损失, 这些研究理论上丰富了火灾危害的研究, 但没有定量计算。相关研究表明, 火灾中高达 70% 的人员死亡是因为吸入大量有毒气体^[6], 烟草的特殊性更加重了烟气的危害。因此, 笔者将烟气作为火灾危害的主要对象, 建立 TVH (Toxicity, Visibility, Heat) 模型, 定量评价烟气的危害后果。

1 常规评价模型

定量评价火灾危害的主要模型有 N-气体模型和 FED 模型, N-气体模型考虑了 CO、CO₂ 等气体及缺氧条件的烟气毒性, 其计算见式(1):

$$N-Gas\ Value = \frac{m\phi(CO)}{\phi(CO_2) - b} + \frac{21 - \phi(O_2)}{21 - LC_{50}(O_2)} + \frac{\phi(HCl)}{LC_{50}(HCl)} +$$

$$\frac{\phi(HCN)}{LC_{50}(HCN)} + \frac{\phi(BCl)}{LC_{50}(BCl)} \quad (1)$$

该模型考虑了 CO₂ 和 CO 的耦合毒性, 使用方便, 但仅适用于气体体积随时间变化很小或恒定的情况。FED 模型在此基础上, 运用换气过度因子 V_{CO_2} 考虑了 CO₂ 对人呼吸的影响, 其计算见式(2):

$$V_{CO_2} = 1 + \frac{\exp[0.14\phi(CO_2)] - 1}{2} \quad (2)$$

FED 模型比 N-气体模型的计算结果更接近实际, 但两模型均只考虑了烟气毒性的作用。火灾烟气是由烟草燃烧产生的气体、固态颗粒和液滴 3 类物质组成的云状混合物^[7], 具有较高温度。一般烟气的危害主要体现在毒性上, 但烟草燃烧产生的大量烟气具有强烈遮光性, 降低了能见度, 烟气热量向周围辐射, 造成灼伤。热辐射和能见度的双重效果延长人群疏散时间, 不利于逃生, 因此有必要将热辐射和能见度纳入烟草火灾危害评价因子, 综合考虑烟气毒性、能见度和热辐射的危害后果。

2 TVH 模型

笔者在能见度模型、热辐射模型、N-GAS 和 FED 模型的基础上建立 TVH 模型, 充分考虑了时间对热辐射、能见度的影响, 更全面地体现了烟

* 收稿日期: 2015-07-10 修回日期: 2015-09-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“陆上油气管线风险评估技术研究”(61271278); 陕西省重点学科建设专项资金资助项目(E08001)

作者简介: 陈永锋(1961-), 男, 陕西乾县人, 教授, 主要从事风险评估理论、建模与方法、企业信息化方面的教学和科研工作。

E-mail: 634971466@qq.com

草火灾危害的后果。

2.1 烟气毒性和能见度模型

烟草燃烧的烟气中有 3 000 多种有毒物质, 谢剑平等^[8]筛选出含 CO 在内的 7 种最具代表性的有毒成分。考虑到 CO 是唯一被证实的造成人员大量伤亡的有毒气体, 也为简化计算, 我们选取 CO 为本次研究的对象。研究毒气的衡量指标, 最常用的有半数致死体积分数 LC_{50} 和半数失能体积分数 IC_{50} 。两指标相比, IC_{50} 相对保守, 适用于常规火灾, LC_{50} 更能体现烟草火灾烟气的毒性及特殊性, 因此选择 LC_{50} 为本次烟气毒性评价指标, 预测更准确。

烟草燃烧产生的大量烟气, 降低了火场能见度。没有火灾烟气存在的情况下, 正常的极限视程是 30 m。在防火性能设计中, 大空间的临界能见度是 10 m。能见度影响被困人员的行走速度和火灾现场的疏散时间。火灾烟气能见度与被困人员行走速度的关系可拟合为:

$$V(D) = \begin{cases} -2.53 \times \exp\left(-\frac{D}{4.22}\right) + 1.126, & (4.7 \leq D \leq 30); \\ 0.3, & (0 \leq D \leq 4.7)。 \end{cases} \quad (3)$$

式中: D 为能见度(m); $V(D)$ 为能见度为 D 条件下人员的行走速度(m/s)。当疏散路径一定, 疏散速度与疏散时间可表示为:

$$t_D = \frac{L}{V(D)}。 \quad (4)$$

式中: L 为疏散路径长度(m)。经计算可知, 不同能见度条件下, 人的行走速度和疏散时间可相差 300 多倍。能见度模型给出能见度随时间变化的定量关系, 用式(4)可计算得出不同能见度条件的疏散时间。

2.2 热辐射模型

烟草燃烧的表面温度达 300 °C, 燃烧中心烟气温度可达 900 °C, 通常的火灾现场温度多高达 600 °C。李山岭等^[9]指出, 距火源半径 10 m 的辐射圈范围内, 120 °C 的环境中人体可忍耐 15 min 左右; 175 °C 的高温环境中, 人体只能忍耐 1 min。高温环境下的人体极限忍耐时间和温度之间存在如下关系:

$$t_c(T) = \frac{3.28 \times 10^8}{T^{3.61}}。 \quad (5)$$

式中: T 为环境温度(°C); $t_c(T)$ 为极限时间(min)。

式(5)表明温度跟人体极限忍耐时间存在负相关关系, 温度升高, 人体极限忍耐时间快速减少。一般采用热通量对热辐射的危害程度进行评价。NFPA59A 标准规定, 人体承受的最大安全辐射热通量为 5 kW/m²。因此, 本次模型以 5 kW/m² 为安全评价标准。热辐射模型给出了高温热辐射随时间变化的定量关系和安全评价指标, 为后续热辐射的定量计算提供依据。能见度模型中的 t_D 和热辐射模型中的 $t_c(T)$, 应取两者中的较小值计算火场疏散时间。

2.3 TVH 模型

基于谢建平等^[8-11]的研究成果, 我们构建

了综合考虑烟气毒性、能见度和热辐射的烟草火灾烟气危害定量评价模型 TVH, 其计算见式(6)。

$$H = \left[\sum_i \frac{\int_0^{t_D} \varphi(i, t) dt}{LC_{50}(i, t_D)} \right] V_{CO_2} + \frac{21 - \varphi(T, t)}{21 - LC_{50}(O_2)} + \frac{\int_0^{t_D} \varphi(T, t) dt}{LC_{50}(T, t_D)}。 \quad (6)$$

式中: H 为火灾烟气危害指数; $\left[\sum_i \frac{\int_0^{t_D} \varphi(i, t) dt}{LC_{50}(i, t_D)} \right]$ V_{CO_2} 为过高 CO_2 存在的情况下 CO 等有毒气体在 0 ~ t 时间内对人体的危害, φ_i 表示气体 i 在 t 时刻的体积分数, $LC_{50}(i, t_D)$ 为暴露时间内气体 i 的半数致死体积分数, 数值可通过实验测得; $\frac{21 - \varphi(T, t)}{21 - LC_{50}(O_2)}$ 表示 O_2 消耗对人的影响, 缺氧是气体中毒的一种特殊形式, 过低的 O_2 会导致窒息, 数字 21 代表 O_2 占空气的百分比; $\frac{\int_0^{t_D} \varphi(T, t) dt}{LC_{50}(T, t_D)}$ 表示热辐射对人的影响, $\int_0^{t_D} \varphi(T, t) dt$ 表示 0 到 t_D 时间段内温度的平均值, $LC_{50}(T, t_D)$ 表示人的极限忍耐温度。在此需指出, 烟气能见度对人的影响体现在时间 t_D 中。

$$V_{CO_2} = 1 + \frac{\exp\left[\frac{0.14\varphi(CO_2)}{t_D}\right] - 1}{2}。 \quad (7)$$

TVH 模型运用环境温度 T 和疏散时间 t_D 将烟气毒性、能见度及热辐射联系起来, 构建了三者共同作用下的烟草烟气危害后果评价模型。研究表明, TVH 的评价值为 0.8, 表示火灾烟气对人的危害较小, 不危及生命安全; TVH 的值为 1.0, 表示火灾烟气有可能危及人的生命安全; TVH 的值为 1.3, 表示人员的生命安全受到严重威胁。

3 实证分析

3.1 背景概况

2014 年 5 月某卷烟公司仓库突发大火, 车间存放的烟草致使火势迅速蔓延, 烟气弥漫, 造成多人受伤。考察得知, 该仓库体积为 50 m × 38 m × 15 m, 共 17 排 37 列货架, 存放 5 700 箱卷烟。南、北、东方向共 3 个门, 且均处于开启状态, 其位置如图 1 所示。

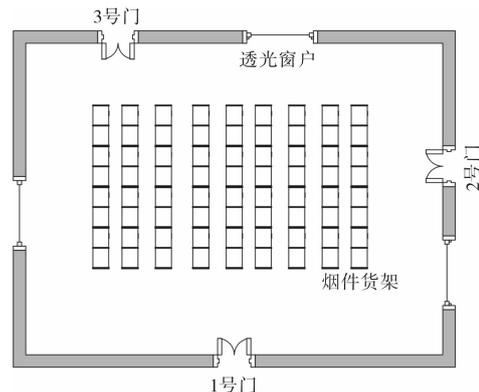


图 1 仓库及门位置平面图

3.2 模型建立及初始化

根据《民用建筑防火排烟技术规程》的规定, 应取仓库火源热释放量为 $4 \text{ MW}^{[12]}$ 。基于火源位于仓库中心最大火灾危险性的考虑, 笔者将火源设置在仓库中心第9排18列货架, 火源尺寸为箱体表面, 开始热释放量为 5 MW 。本次模拟采用均一网格, 确定网格划分为(共计 230 000 个), 门及火源模拟相应的坐标值如表 1 所示。CO、 O_2 、 CO_2 浓度及能见度探测点设置在 3 个出口处, 以便及时获取数据。

表 1 FDS 模拟中相对应的坐标值 m

	X 坐标值	Y 坐标值	Z 坐标值
1 号门	23.1 ~ 26.9	0	3
2 号门	50	23 ~ 26.8	3
3 号门	15 ~ 18.8	38	3
火源	24.7 ~ 25.3	37.75 ~ 38.25	4

根据背景介绍、网格划分及表 1 中的坐标值, 利用 PyroSim 软件模拟出烟草仓库火灾现场的立体图, 如图 2 所示。

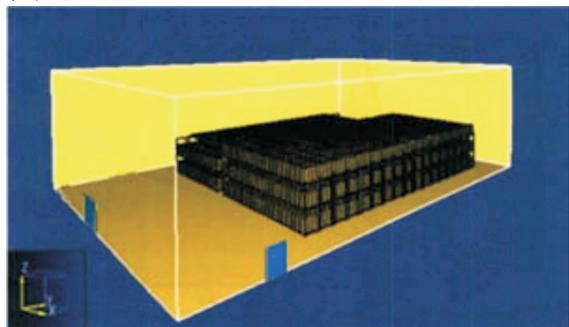


图 2 火灾现场模拟立体图

4 模拟结果分析

4.1 火灾发展过程

火灾模拟过程体现了各物理量随时间的变化, 烟气填充图展示了火灾的蔓延过程, 如图 3 所示。

由图 3 可看出, 热烟气在浮力的作用下形成羽流垂直上升, 在 $t = 35 \text{ s}$ 时撞击顶棚, 受顶棚限制的烟气改变流动方向朝四周蔓延; 在 $t = 61 \text{ s}$ 时撞到两侧的墙壁, 受墙壁限制的对称烟气以相同的速率向仓库下端填充。在 $t = 84 \text{ s}$ 时, 四角的烟气迅速沉降, 受下方冷空气的影响, 烟气动量不足停止下降并在 26 s 后于顶棚上端形成烟气层。不断卷入的空气让烟层逐渐增厚, 在 $t = 225 \text{ s}$ 时烟气填充了房间近 $2/3$ 的空间, 415 s 时整个空间充满烟气。

4.2 烟气毒性和能见度分析

火灾中 CO 致死的人数占死亡总人数的 40% 以上^[13]。黎强等^[14]研究了火灾烟气中有毒气体体积分数的分布与危害。研究指出, 当 CO 体积分数为 0.05% 时, 人在 1 h 内不会有什么症状; 当 CO 体积分数达到 0.1%, 人在 1 h 内会头痛作呕不舒服; 当 CO 体积分数达到 0.5%, 人在 0.5 h 内会窒息

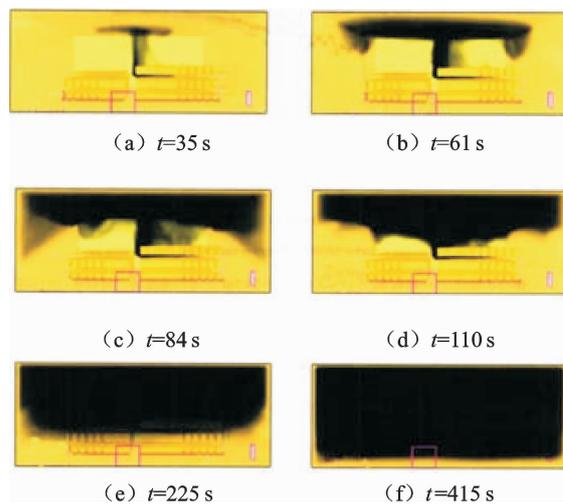


图 3 正常情况下仓库烟气填充图

而亡; 当 CO 体积分数超过 1%, 人在 2 min 内中毒死亡。根据 CO 不同浓度时的危害症状, 笔者取 0.1% 作为危险点进行分析。通过温度分布、能见度分布等重要参数, 模拟出这些参数随时间的变化, 如图 4、图 5、图 6 所示。

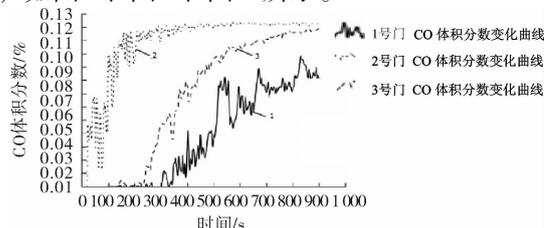


图 4 CO 体积分数时间变化图

由图 4 可知, 前 200 s, 2 号门有少量的 CO, 1、3 号门几乎没有; 200 s 后, 2 号门的 CO 体积分数上涨至 0.12%, 超过 CO 浓度危险点, 1、3 号门的 CO 体积分数分别呈波动性和持续性上涨, 但均没有超过人体危险值, 处于 2 号门附近的人会头疼作呕, 而 1、3 号门附近的人受毒气影响不大, 1 h 内无症状。

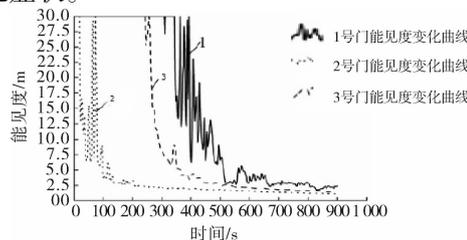


图 5 能见度时间变化图

由图 5 可知, 在 $t = 405 \text{ s}$ 、 95 s 、 297 s 时, 1、2、3 号门的能见度在疏散临界值 10 m 范围内。在 $t = 100 \text{ s}$ 时 2 号门的能见度降至 5 m 以下, 而 1、3 号门的能见度在 275 s 内基本不受影响。在 $t = 400 \text{ s}$ 时, 烟气充满整个空间, $t = 500 \text{ s}$ 时 1、2、3 号门的能见度基本都在 2.5 m 以下。随着时间的推移, 500 ~ 900 s 的观测时间段内烟气遮光效果明显, 能见度趋于 0。结合图 3 和图 5 可知, 在 $t = 400 \text{ s}$ 左右, 烟气充满整个房间, 能见度达到极低

值, 不利于人员疏散。

4.3 热辐射分析

由图 6 可知, 2 号门的温度最先上升, 在 $t = 150$ s 出现峰值, 达到最大热辐射 3.5 kW/m^2 , 随后温度下降并在 2.4 kW/m^2 上下波动; 1、3 号门在 $100 \sim 250$ s 时间内热辐射曲线几乎重合, 随后两条曲线均呈现先上升后稳定的趋势, 两条曲线几乎同时在 $t = 375$ s 时达到峰值, 1 号门的热辐射值始终在 3 号门之上。分析可知, 火灾发生后, 2 号门附近的热辐射伤害最大, 其次为 1 号门和 3 号门, 它们的热辐射平均值分别为 2.4 kW/m^2 , 1.8 kW/m^2 , 1.4 kW/m^2 , 虽没有超过热辐射的安全警戒值, 但长时间高于皮肤平均温度的热辐射容易造成二级烧死。

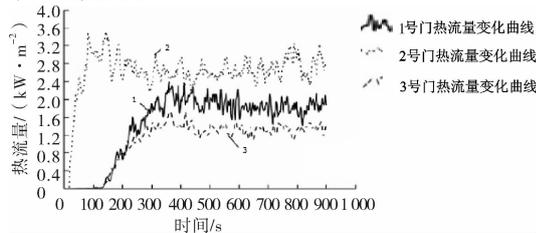


图 6 热流量时间变化图

4.4 H 值分析

从小火发展为大火, 烟气危害指数 (H) 随着时间的推移而变化。笔者取 $t = 35$ s、 225 s、 414 s、 670 s 四个不同的时间作为发现火灾的时刻, 分析不同能见度条件下烟气的危害。在 $t = 35$ s、 225 s、 414 s、 670 s 时, 仓库平均能见度分别 26 m、 21 m、 7 m、 3 m。1、2、3 号门到火源中心的长度分别为 25 m、 26.4 m、 26.4 m, 根据式(4)和式(5), 四种不同能见度下, 1 号门的疏散时间分别为 22 s、 22.5 s、 39 s、 83 s; 2、3 号门的疏散时间分别为 23.6 s、 23.8 s、 41.3 s、 88 s。分析数据可知, 仓库能见度直接影响着疏散时间。 $t = 35$ s 和 $t = 225$ s 的疏散时间差距不大, 但 $t = 414$ s 的疏散时间几乎是 $t = 225$ s 的 2 倍, $t = 670$ s 后的疏散时间呈倍数增长。根据式(6), 表 2 给出了 3 个门不同时间段内热辐射、CO 毒性、能见度及 H 值。

表 2 不同出口各时间段内参数平均值

门	时间/s	热辐射/(kW/m ²)	毒性	能见度/m	H 值
1 号门	35 ~ 45	0.0021	0.0001	30	0.0543
	225 ~ 235	0.6372	0.0952	30	0.1762
	414 ~ 424	1.9764	0.4326	10	1.3354
	670 ~ 680	1.7653	0.6984	4.6	1.3262
2 号门	35 ~ 45	0.2254	0.1354	28	0.1276
	225 ~ 235	2.7132	1.2678	2.6	0.4632
	414 ~ 424	2.0465	1.2197	2.5	1.8344
	670 ~ 680	2.1654	1.2086	1.9	1.8102
3 号门	35 ~ 45	0.0012	0.0001	30	0.0418
	225 ~ 235	0.6201	0.1025	30	0.1753
	414 ~ 424	1.3217	0.8531	4.8	1.2684
	670 ~ 680	1.2876	0.9631	2.6	1.6522

烟气毒性的衡量值是 1.1 ^[15]。由表 2 可知, 2 号门在 225 s 左右时, CO 毒性超过 1.1 并持续增大, 1、3 号门的毒性一直处在安全范围内; 2 号门在 200 s 内高温辐射迅速增大, 能见度急速降低,

1、3 号门在 400 s 后高温辐射增长明显且稳定, 能见度迅速降低至 4.5 m 左右。总体而言, 2 号门的 H 值始终高于同一时间段的 1、3 号门, 2 号门附近的人员受到的烟气危害更大。

基于 N-GAS、FED 和 TVH 模型计算出平均烟气危害指数, 结果如表 3 所示。

表 3 不同模型烟气危害性指数 H 值对比

时间/s	TVH	N-GAS	FED
35 ~ 45	0.0746	0.0334	0.0341
225 ~ 235	0.2716	0.1083	0.1096
414 ~ 424	1.4794	0.6246	0.6458
670 ~ 680	1.5962	0.6472	0.6756

由表 3 可知, TVH 模型计算出的 H 值比 N-GAS 模型和 FED 模型计算的 H 值都大。在 $t = 414$ s 时, TVH 模型的 H 值是另外两个模型的 2.5 倍, 这种差异性主要体现在热辐射上。TVH 模型考虑了热辐射的影响, 而 N-GAS、FED 模型没有考虑, 因此计算的烟气危害指数差异较大。从结果来看, N-GAS 模型和 FED 模型的 H 值一直小于 0.8 , 说明烟气毒性对人体伤害不大, 但 TVH 模型计算出的 H 值在 414 s 后超过 1.3 , 人的生命受到严重威胁, 可见在烟草火灾中, 热辐射是造成人员伤亡的重要原因。

5 结论

利用 PyroSim 软件进行的模拟, 展示了不同时间段烟气的运动, 受烟气运动规律的影响, 距火源位置差异不大的 3 个出口, 烟气危害效果不同, 2 号门的烟气危害指数和热辐射明显高于 1、3 号门, 不利于逃生。火灾发生 200 s 后 CO 的毒性让人头疼作呕, 热辐射在测量时间段内没有超过安全警戒值, N-GAS 模型和 FED 模型计算出的 H 值也一直小于安全值, 说明单独某个因素的作用对人的生命安全不构成威胁。但烟气的遮光性降低能见度, 增加人员的暴露时间, 延长了烟气对人体的危害, $t = 414$ s 时 TVH 模型计算出的 H 值超过 1.3 , 三因素的综合作用对人体生命安全构成严重威胁, 其中热辐射占主要作用, 能见度间接影响热辐射和烟气毒气的作用时间。TVH 模型计算出的烟气危害指数比 N-GAS 模型和 FED 模型计算的伤害指数都大, 更全面地体现了烟草火灾的危害后果。TVH 模型的提出为日后火灾危害研究提供了新的思路。

参考文献

- [1] 罗天德, 梁子瑛, 林丽芝, 等. 高压细水雾灭火系统在烟草仓库中的应用[J]. 消防科学与技术, 2014(10): 1158-1161.
- [2] 韩新, 沈祖炎, 曾杰, 等. 建筑火灾危险性评估性能方法基本框架研究[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(2): 50-57.
- [3] 宋贤生, 陈驰, 刘英学. 概率火灾安全分析方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(1): 39-45.
- [4] 包光宏, 肖正学, 李志勤, 等. 模糊综合评价在地下商场火灾风险评价中的应用[J]. 西南科技大学学报, 2007, 22(3): 38-42.
- [5] 骆正山, 顾建荣, 何宏璧. 陆上长输石油管道泄漏池火灾害

- 分析[J]. 灾害学, 2014, 29(2): 1-3, 53.
- [6] Alarie Y. Toxicity of fire smoke. [J]. *Critical Reviews in Toxicology*, 2002, 32(4): 259-289.
- [7] 陈鑫宏, 毕海普, 邢志祥, 等. 火灾烟气危害评价 HTV 模型的应用与验证[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 20-25.
- [8] 谢剑平, 刘惠民, 朱茂祥, 等. 卷烟烟气危害性指数研究[J]. 烟草科技, 2009(2): 5-15.
- [9] 陈珊珊, 蒋勇, 邱榕, 等. 某商铺火灾热和烟气危害性数值研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(9): 1097-1103.
- [10] 李山岭, 蒋勇, 邱榕, 等. 火灾烟气危害定量评价模型 TH-VCH 及其应用[J]. 安全与环境学报, 2012, (2): 250-256.
- [11] 王小完, 马骥, 骆正山. 基于天然气管线泄漏蒸汽云爆炸危害分析[J]. 灾害学, 2013, 28(3): 16-19.
- [12] 韩如适, 朱国庆, 张国维, 等. 中庭类高层建筑防排烟技术优化设计[J]. 工业安全与环保, 2013, 39(6).
- [13] 杨钧然. 高层建筑火灾预防策略分析[J]. 齐齐哈尔大学学报: 自然科学版, 2014(4): 31-31.
- [14] 黎强, 刘清辉, 张慧, 等. 火灾烟气中有毒气体的体积分数分布与危害[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(3): 69-74.
- [15] 陈鑫宏, 毕海普, 邢志祥, 等. 火灾烟气危害评价 HTV 模型的应用与验证[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(9): 20-25.

Quantitative Evaluation Research of Harmful Consequences of Tobacco Fire

Chen Yongfeng, Li Duo, Zhu Zhenyu and Yang Jiao
(Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to evaluate the fire hazard of flue gas in tobacco warehouse, based on models of visibility, heat, FED and N-GAS, TVH (Toxicity, Visibility, Heat) model is proposed. Using the method of PyroSim software simulation, taking a fire tobacco warehouse as the prototype, the virtual fire scene close to the real is built. Through simulating the movement law of the smoke and the variation curve that hazard evaluation factors of flue gas change with time, it is concluded that the effect of flue gas of different position is different. According to the flue gas hazard index the three models quantitative calculate, the conclusion heat is an important cause of casualties is analyzed. Considered the effect of heat and visibility, the evaluation hazard of TVH model is more comprehensive than that of N-GAS and FED model. Finally, the application of TVH model is put forward.

Key words: tobacco fire; visibility; heat radiation; TVH model; PyroSim simulation

(上接第 32 页)

- [19] 余曼平. 黑潮暖流与洞庭湖区汛期降水和洪涝的关系[J]. 气象, 1999, 25(9): 21-23.
- [20] 毛德华, 夏军. 洞庭湖区洪涝灾害形成的机制分析[J]. 武汉大学学报, 2005, 51(2): 199-203.
- [21] 吴贤云, 丁一汇, 叶成志. 两湖流域盛夏持续性旱涝过程诊断分析[J]. 热带气象学报, 2012, 28(1): 12-22.
- [22] 张强, 邹旭恺, 肖风劲. GB/T20481-2006 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 17.
- [23] 陆魁东, 帅细强, 李文华. DB43/T234-2004 气象灾害术语和等级[S]. 北京: 气象出版社, 2004: 1.
- [24] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 37-40.
- [25] 黄荣辉, 顾雷, 徐子红, 等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 20-36.
- [26] 赵汉光, 张先恭. 东亚季风和我国夏季雨带的关系[J]. 气象, 1996, 22(4): 8-12.
- [27] Zhou Xiuji, Zhao Ping, LIU Ge, et al. Characteristics of decadal-centennial-scale changes in East Asian summer monsoon circulation and precipitation during the Medieval Warm Period and Little Ice Age and in the present day[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(25): 3003-3011.
- [28] 冯晓伟, 孙照渤. ENSO 对东亚夏季风强度的影响[J]. 南京气象学院学报, 1998, 21(2): 196-200.
- [29] Xinyao R, Renhe Z, Tim L. Impacts of Atlantic sea surface temperature anomalies on Indo-East Asian summer monsoon-ENSO relationship[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(14): 2458-2468.
- [30] 王会军, 范可. 东亚季风近几十年来的主要变化特征[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 313-318.

The Weather Causes of the Aggravated Drought and Flood Disaster in Dongting Lake Region

Liao Yufang, Zhao Hui, Peng Jiadong, Wu Xianyun, Zhang Jianming and Duan Lijie
(Hunan Climate Center, Changsha 410118, China)

Abstract: The result of analysis of the weather causes of the aggravated of drought and flood disaster in Dongting Lake Region based on statistic analysis of some indices and the meteorological observation data of Dongting Lake Region, the Four River basin in Hunan, the upper reaches of the Yangtze River show that the wet and dry of rainwater resources in Dongting Lake Region is directly influenced by interdecadal variations of the location of main-belt in China. Further it influenced the tendency of waterlogging-drought variation. Then it influenced the tendency of waterlogging-drought variation. The East Asian summer monsoon and sea surface temperature in the central and eastern equatorial Pacific effected the location of main-belt in China then influence the wet and dry of rainwater resources in Dongting Lake Region. Rainwater resources in Dongting Lake basin synchronously wet or dry under the background of climate warming, which trend to result the flood pile up in Dongting Lake or lead to the origin of water resources exhausted. The increased of the water resources of Dongting Lake Basin at the dry season aggravated the water shortage level.

Key words: Dongting Lake Region; drought and flood disaster; aggravate; climatic warming; rainwater resources