

# 辐射熏烟浓度预测研究

魏生生 俎铁林 林学范

(中国气象科学研究院,北京 100081)

## 提 要

讨论了辐射熏烟(以下简称熏烟)过程及其浓度预测中的几个问题。介绍了熏烟地面浓度绝对最大值及其空间分布的正确计算方法。分析了影响它们的各种因素和高浓度区的延伸范围。

**关键词:** 辐射熏烟 地面浓度 绝对最大值 延伸范围

## 引 言

当夜间产生贴地逆温时,日出后将逐渐自下而上地消失,形成一个不断增厚的混合层。原来在逆温层中处于稳定状态的烟羽进入混合层之后,由于其本身的下沉和铅直方向的强扩散作用,污染物浓度在这一方向将接近于均匀分布,出现熏烟污染。形成熏烟污染的气象条件属于常见的不利气象条件,虽然其出现频率有限,持续时间也常在30分至1小时之间,但因其最大浓度有时可高达一般扩散条件下最大地面浓度的几倍,这就不能不引起人们的重视。有关政府部门颁布的环境影响评价或安全技术导则<sup>[1,2]</sup>都推荐了对熏烟地面浓度进行预测的模式。但迄今为止的一些报告中,由于对熏烟机制的理解不同,或得出一些错误的结果,或只给出一个最大值,未考虑浓度分布和下风方的超标范围。为此,本文将主要就熏烟产生的机制、熏烟浓度最大值及其浓度分布进行了讨论,并结合计算结果对影响它们的各种因素进行了分析。

### 1 熏烟浓度的绝对最大值

考虑到熏烟主要是在混合层高度较缓慢增长的条件下发生,为此,采用下述正态模

式。以烟囱的底部中心为原点,下风方为  $x$  轴,则熏烟条件下的地面浓度  $C_f$  为<sup>[1]</sup>

$$C_f = \frac{Q}{\sqrt{2\pi U h_f \sigma_{yf}}} \exp\left(-\frac{Y^2}{2\sigma_{yf}^2}\right) \Phi(p) \quad (1)$$

$$\Phi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^p e^{-t^2/2} dt \quad (2)$$

$$p = (h_f - He) / \sigma_z \quad (3)$$

$$\sigma_{yf} = \sigma_y + He/8 \quad (4)$$

式中:  $Q$  为单位时间排放量;  $U$  为烟囱出口处平均风速;  $h_f$  为逐渐增厚的混合层高度;  $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  是烟羽进入混合层之前处于稳定状态的横向和铅直向扩散参数,它们是  $X$  的函数;  $He$  是烟囱的有效高度,  $He = H + \Delta H$ ,  $H$  和  $\Delta H$  分别是烟囱的几何高度和抬升高度;  $X$ 、 $Y$  是接受点坐标;  $\Phi$  是正态分布函数,在此反映原稳定状态下的烟羽进入混合层中的份额多少。通常认为:  $p = -2.15$  时为烟羽的下边界,  $\Phi \approx 0$ , 烟羽未进入混合层;  $p = 2.15$  时为烟羽的上边界,  $\Phi \approx 1$ , 烟羽全部进入混合层。

熏烟是原位于稳定层结的烟羽进入自地面逐渐增厚的混合层之后所发生的一种污染现象,其过程如图1所示。设混合层高度  $h_f$  升高到烟囱出口处的瞬时为时间原点 ( $t = 0$ , 图1a), 则  $t = t_f$  时, 原处于稳定条件下的

烟羽已向下风方平流扩散,其起始点已从  $X = 0$  平流至  $X_f$ (图 1b,c)。  $0 < X < X_f$  一段的烟羽是  $t > 0$  之后在混合层中排出的,其扩散过程不属于熏烟问题,在  $X \geq X_f$  处,原处于稳定条件下的部分烟羽进入混合层,由于卷挟和下沉作用,迅速在混合层内扩散呈均匀分布状态。随着  $\Phi(p)$  的增加,混合层高度  $h_f$  将增高,同时,  $\sigma_{yf}$  在多数情况下也增大。因此,从式(1)可见  $C_f$  在时间序列上,必有一极大值(参阅图 1d)。

假设  $U$  为常值,则时间为  $t$  时,原稳定状

态下烟羽的起始点从  $X = 0$  向下风方平流至  $X_f$ 。

$$X_f = Ut \quad (5)$$

用  $\Delta h_f$  表示混合层自烟囱出口(几何高度  $H$  处)的净增加高度,则由式(3)可得

$$\Delta H_f = \Delta H + p\sigma_z \quad (6)$$

如果已知混合层净增加高度  $\Delta h_f$  和时间  $t$  的函数关系

$$t = f(\Delta h_f) \quad (7)$$

则由式(5)、(6)有

$$X_f = Uf(\Delta H + p\sigma_z) \quad (8)$$

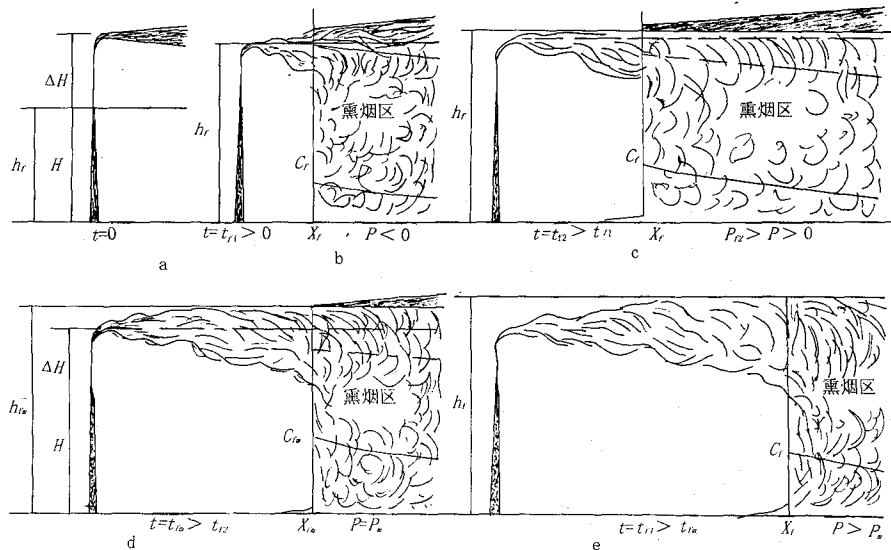


图 1 熏烟随时间变化过程示意图

式中  $\sigma_z$  是下风方距离  $X$  的函数。式(8)可按文献[1,3]推荐的美国 TVA 公式给出。由以上分析可见,  $p$  和  $X_f$  相互不是独立的,不能任意设定。时间  $t$  是  $p$  的函数,给定了  $p$  值相当于给定时间  $t$ 。当  $p$  值给定且已知  $\sigma_z(X)$  的函数形式后,  $X_f$  应由式(6)和式(7)确定。 $C_f$  的具体计算步骤如下:

- ① 设定  $p$  的初值,  $p_0 = 2.15$ ;
- ② 由式(3)和式(8)确定  $X_f$ ;
- ③ 按式(3)和式(4),根据已知的  $\sigma_z(X)$  和  $\sigma_y(X)$  的函数关系,分别计算  $h_f$  和  $\sigma_{yf}$ ;
- ④ 由设定的  $p$  值按式(2)确定  $\Phi(p)$ ;

⑤按式(1)计算  $C_{f_0}$ ;

⑥根据要求的计算精度,设定  $p$  的计算步长  $\Delta p$  (例如 0.05),取  $p_1 = p_0 - \Delta p$ ,再按步骤①~⑤计算  $C_{f_1}$ ,如果  $C_{f_0} > C_{f_1}$ ,则  $C_{f_m} = C_{f_0}$ ,否则再以  $p_2 = p_0 - 2\Delta p$ ,按同样方法计算  $C_{f_2}$ ,直至当  $C_{f_{n-1}} < C_{f_n} > C_{f_{n+1}}$  时,则可得  $C_{f_m} = C_{f_n}$ 。

按上述步骤计算,如发现所设定  $p_0, X_f$  无解,则应依次计算  $p_1, p_2, \dots$  时的  $X_f$ ,直至有解时为止。

## 2 熏烟浓度分布

通常所关心的是  $t = t_m$  时刻出现绝对最大值  $C_{f_m}$  时,  $X \geq X_{f_m}$  区间的空间分布(以下用下标  $m$  表示对应于  $C_{f_m}$  的各有关值)。对于  $0 < X < X_f$  一段的烟羽,可按不稳定条件的一般方法计算,其地面浓度和熏烟浓度相比要小得多。计算  $X > X_f$  一段的熏烟浓度分布时,不能沿用上一节从时间变化过程中求绝对最大值的作法,而应把  $t$  固定在  $t_m$ 。此时,  $h_f$ (或  $\Delta h_f$ ) 为常值,等于  $h_{f_m}$ (或  $\Delta h_{f_m}$ ) ,由式(6)有

$$p\sigma_z = p_m\sigma_{zm}$$

或

$$p = \frac{p_m\sigma_{zm}}{\sigma_z} \quad (9)$$

如将扩散参数表示成幂指数形式,则

$$p = p_m \left[ \frac{X_{f_m}}{X} \right]^\alpha \quad (10)$$

式中  $\alpha$  是稳定状态时  $\sigma_z$  的回归指数。

具体对  $X > X_{f_m}$  区间的熏烟浓度计算时,应按下述步骤进行:

① 给定  $X$  值;

② 分别由式(1)、(2)及(4)计算  $P$ 、 $\Phi(P)$

及  $\sigma_{yf}$ ;

③ 取  $h_f = h_{f_m}$ ;

④ 按式(1)计算  $C_f$ 。

曾出现过的下述几种做法都是不适当的:

① 用上一节求绝对最大值的方法计算浓度分布,所得结果不是同一时刻;

② 用本节中所述令  $h_f = h_{f_m}$ ,但其它点的  $P$  值不变,仍取其为  $P_m$ ,从而使除  $X_{f_m}$  以外的其余下风方各点的  $C_f$  估计过高。

③ 未注意  $0 \leq X \leq X_{f_m}$  区间(时间从 0 至  $t_f$ ) 的烟羽已处于不稳定状态下的混合层之中,不再发生熏烟,而将任何时刻的  $X \geq 0$  区间都按熏烟处理。

### 3 计算结果分析

#### 3.1 绝对最大值

计算结果表明,绝对最大值  $C_{f_m}$  出现在  $P$  在  $0 \sim 2.15$ (时间序列),位于该时刻熏烟区的起始点  $X_{f_m}$  处(图 1d)。只有在原稳定条件下烟羽刚刚进入混合层内不久( $P$  值约为  $-2.15 \sim -0.5$ ) 时的熏烟浓度最大值才出现在大于  $X_f$  的下风方处(图 1a)。表 1 给出一部分代表性的计算结果。

表 1 熏烟浓度绝对最大值 ( $C_{f_m}$ )

序号	输入条件					计算结果			
	$H/m$	$\Delta H/m$	稳定度 (P·S)	$dt/dz$ C/100m	$U/m \cdot s^{-1}$	$X_f/m$	$h_f/m$	$P$	$C_{f_m}/Q$
1	100	10	F	1.5	1.5	57.9	113.2	2.15	$1.43 \times 10^{-4}$
2	100	120	F	1.5	1.5	960.5	238.3	1.35	$1.69 \times 10^{-5}$
						1093.7	251.6	2.15	$1.62 \times 10^{-5}$
3	100	10	E	1.0	1.5	35.6	113.3	2.15	$1.44 \times 10^{-4}$
4	100	10	D~E	0.5	1.5	20.2	112.5	2.15	$1.52 \times 10^{-4}$
5	200	20	F	1.5	1.5	247.9	228.2	1.75	$3.04 \times 10^{-5}$
6	200	200	F	1.5	1.5	3048.2	434.0	1.35	$3.96 \times 10^{-6}$
7	200	200	E	1.0	1.5	1877.3	436.7	1.20	$3.91 \times 10^{-6}$
8	200	200	D~E	0.5	1.5	1148.2	436.0	1.35	$4.75 \times 10^{-6}$
9	200	200	D~E	0.5	2.0	1574.3	440.9	1.20	$2.88 \times 10^{-6}$
10	200	200	D~E	0.5	3.0	2305.3	436.6	0.80	$1.37 \times 10^{-6}$
						4067.4	553.0	2.15	$9.34 \times 10^{-7}$

从表 1 可以看出输入参数对熏烟浓度绝对最大值 ( $C_{f_m}$ ) 及其下风距离  $X_f$  的下述影

响:

① 抬升高度

由序号 1、2 例中可见,其它条件相同时,随着  $\Delta H$  增高,  $X_{f_m}$  增大,  $C_{f_m}$  减小,这和一般条件下的扩散规律是一致的。值得注意的是有效高度  $H_e$  相同,  $\Delta H$  不同时的结果。从序号 2、5 可见,二者的有效高度和气象条件都相同,但所得结果却有明显差别。增加  $\Delta H/H_e$  或  $\Delta H/H$ , 有利于降低熏烟地面浓度和延长其下风距离。

② 稳定度

从序号 1、3、4 及 6~8 的例子可见:随着原稳定层结的稳定程度减弱,  $X_{f_m}$  明显减小;  $C_{f_m}$  开始变化不大,稳定度再减弱,则趋向增大。

稳定程度弱时,烟羽的扩散角相对较大,致使较早地发生熏烟,从而出现上述效果,但随着  $X$  增大,  $C_f$  衰减得较快。

③ 风速

从序号 8~10 例子可见,风速的影响和一般扩散规律是一致的。在假定  $\Delta H$  相同,其它条件不变时,随着风速增加,  $X_{f_m}$  显著增大,  $C_{f_m}$  则明显减小。

表 1 中所列的  $P$  是实际对应于  $C_{f_m}/Q$  的值。在序号 2、10 中还附有假设  $P = 2.15$  的结果,可以看出两者之间有一定差别,对于序号 10 的例子,  $X_{f_m}$  相差可达 80%,  $C_{f_m}$  相差可达 47%。

设稳定度为 B 类,其它条件按表 1 序号 7 选取,用一般扩散条件的最大地面浓度公式(文献[1]中式(7))计算,  $C_m/Q = 8.31 \times 10^{-7}$ ,可见熏烟浓度绝对对最大值  $C_{f_m}$  比一般的最大地面浓度  $C_m$  大 5 倍左右。

3.2 浓度分布

图 2 是粒径为  $30\mu\text{m}$  以下的悬浮颗粒物地面浓度分布的预测实例。颗粒物平均重度为 1.9,烟囱高度为 30m,内径 0.6m,排烟率为  $62500\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ,排放量为  $0.125\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ ,地面风速为  $2.3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

图 2a 是原稳定层结为 E 类出现绝对最大值时的熏烟浓度分布,图 2b、c,分别是一般扩散条件下,稳定度为 E 类和 B 类的浓度分布。上述三种情况的最大地面浓度及其下风距离(图中标记 \* 处)如下:

① 熏烟(图 2a),  $C_{f_m} = 2.6\text{mg}/\text{m}^3, X_{f_m} = 200\text{m}$ ;

② 一般扩散条件,稳定度为 E 类(图 2b),  $C_m = 0.23\text{mg}/\text{m}^3, X_m = 3189\text{m}$ ;

③ 一般扩散条件,稳定度为 B 类(图 2c),  $C_m = 0.38\text{mg}/\text{m}^3, X_m = 546\text{m}$ 。

通常为考虑污染的累积频率,最大地面浓度常按 B(或 C)类稳定度计算,而这一最大地面浓度又常作为制定排放标准最大限制值的依据。为此,图 2 中列入了 B 类稳定度的结果。而 E 类稳定度,由于其后期的扩散规律与原来也处于 E 类稳定度的熏烟有许多相似之处,为便于比较也列入图中。

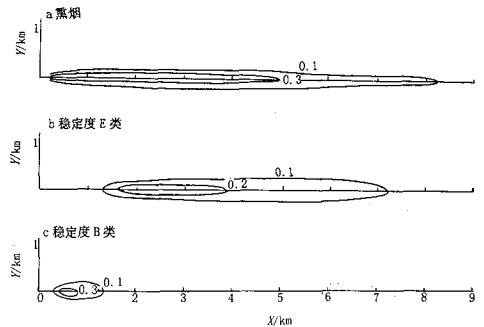


图 2 各种情况下悬浮颗粒物浓度分布图

从图 2 可见,熏烟条件的  $C_{f_m}$  比一般扩散条件的  $C_m$  大 6.8 倍,其影响范围也相差悬殊。熏烟浓度  $C_f$  与一般扩散条件 E 类最大浓度  $C_m$  之比  $C_f/C_m > 1$  的高浓度区可延伸到 5.2km,相当于污染源有效高度的 70 倍,或 E 类  $X_m$  的 1.6 倍。计算结果表明:直到下风方 10km,两者的轴线浓度才一致;10km 以后,熏烟浓度逐渐低于 E 类的浓度。

取  $H = 100\text{m}$ , 烟气热释放率  $Q_h = 2100\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}$ , 污染物为气态。计算结果表明: 烟囱出口处风速  $U$  分别为  $3\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $4\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $5\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,  $X_f$  分别为  $4.7\text{km}$ 、 $6.7\text{km}$  和  $8.8\text{km}$ ; 如果适当加大  $Q_h$ ,  $X_f$  可大至  $15\text{km}$ ; 高浓度区可延伸至  $50\text{km}$  以上, 相当于污染源有效高度的 100 倍。这一结果和美国 TVA 曾经观测到的结果是一致的<sup>[3]</sup>。

#### 4 结语

① 熏烟条件的出现频率虽然有限, 且其浓度随时间变化, 但在某一特定时间和地点出现的地面浓度绝对最大值 ( $C_{fm}$ ) 可比一般扩散条件下的最大地面浓度 ( $C_m$ ) 大几倍,  $C_{fm} > C_m$  的范围可延伸到源有效高度的 70 倍。

② 计算熏烟浓度时应注意: 只有原稳定层结中的烟羽才产生熏烟; 熏烟浓度及其下

风距离以及当时的混合层高度之间存在相互制约的函数关系, 不应随意设定; 浓度分布应为同一时刻。

通常所采用的简化计算熏烟浓度绝对最大值方法 (令  $P = 2.15$ ), 有时可能给计算结果带来明显误差。

③ 有效高度 ( $H_e$ ) 相同时, 抬升高度 ( $\Delta H$ ) 较大的烟羽有利于降低熏烟浓度绝对最大值和延长其下风距离。

#### 参考文献

- 1 国家环境保护总局. 环境影响评价技术导则——大气环境. 北京: 环境科学出版社, 1993.
- 2 国家核安全局政策法规处. 核电厂安全导则汇编. 北京: 法制出版社, 1992.
- 3 李宗恺, 潘云仙, 孙润桥. 空气污染气象学原理及应用. 北京: 气象出版社, 1985.

## A Study on the Prediction of Radiative Fumigation

Wei Shengsheng Zu Tielin Lin Xuefan

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

#### Abstract

The mechanism and some questions in the concentration prediction of radiative fumigation are studied. The correct algorithm for the absolute maximum and the isopleth of the ground level concentration of radiative fumigation (GLCRF) is presented. Various factors and the extent of high GLCRF are analysed.

**Key Words:** radiative fumigation absolute maximum of ground level concentration extent of high concentration