

10公里范围垂直扩散参数的一个估算方法

雷孝恩 贾新媛 杨锦德

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

根据 Monin-Batchelor 相似理论和有效粗糙度长度的概念,本文提出了一个 10 公里范围的经验垂直扩散型,它既可在平坦均匀又可在复杂地形条件下应用。

一、前 言

相似理论^[1]在平坦均匀地形和近距离(2公里以内)的应用,已有了明确的结论^{[2],[3]},但应用到复杂地形和更远的距离(比如远到 10 公里)情况如何呢?这是我们所关心的问题。

本文首先应用相似理论概念导出平坦均匀地形的垂直扩散型(即垂直扩散参数 \bar{z} 随下风方距离 \bar{x} 变化的关系);其次将结果与目前公认的并在平原地区广泛采用的湍流扩散型^[4]作比较,讨论在 10 公里范围内的适用程度;第三是采用有效粗糙度长度^[5]的概念,将扩散型由平原推广到复杂地形,并通过与观测资料的比较,讨论该扩散型在复杂下垫面条件下的有效性和适用程度。

二、 \bar{z} 和 \bar{x} 关系的导出

按 Ito^[6]的方法, \bar{x} 和 \bar{z} 之间的一般表达式为

$$\bar{x} = \frac{1}{k u_*} \int_{\bar{z}} \bar{u}(\bar{z}) f(\zeta) \zeta d\bar{z} + A, \quad (1)$$

其中 $\bar{u}(\bar{z})$ 为平均风速, u_* 为地面层的速度尺度, $\zeta = \frac{\bar{z}}{L}$, L 为地面层的长度尺度,

$f'(\zeta) = \frac{\partial}{\partial \zeta} f(\zeta)$, $f(\zeta)$ 为一普适函数, A 为待定常数, k 为卡门常数,以后均取成 0.36。

中性情况,将对数风廓线的表达式代入(1),经过积分运算后得到

$$\bar{x} = \frac{\bar{z}}{k^2} \left[\ln \frac{\bar{z}}{z_0} + \frac{z_0}{\bar{z}} - 1 \right], \quad (2)$$

其中 z_0 为地面粗糙度长度。

非绝热情况,我们分别将对数线性、BWIB^[7]形式和指数^[8]三类风廓线的表达式代入(1),经过积分整理,最后分别得到

$$\bar{X} = \frac{1}{k^2} \left[\frac{\beta^2}{3L^2} (\bar{z}^3 - z_0^3) + (\bar{z}^2 - z_0^2) \left(\frac{\beta}{4L} - \frac{\beta^2}{2L^2} z_0 \right) - (\bar{z} - z_0) \left(1 + \frac{\beta z_0}{L} \right) + \frac{k\beta z_0^2}{L} + \left(\frac{\beta \bar{z}^2}{2L} + \bar{z} \right) \ln \frac{\bar{z}}{z_0} \right] \quad (3)$$

$$\bar{X} = -\frac{4L}{3k^2 r} \left\{ y^3 \ln \frac{(1+y_0)^2(1+y_0^2)\bar{z}}{(1+y)^2(1+y^2)z_0} + 2y^3(\operatorname{tg}^{-1}y - \operatorname{tg}^{-1}y_0) - 2(y^2 - y_0^2) - \ln \frac{(1+y_0^2)^2\bar{z}}{(1+y^2)^2z_0} \right\} \quad (4)$$

$$\bar{X} = \frac{z_0}{k^2 m} \left\{ \frac{H^{2m+1}}{2m+1} - \frac{H^{m+1}}{m+1} + \frac{m}{(2m+1)(m+1)} \right\} \quad (5)$$

其中 β 为对数线性风廓线的普适常数, 以后计算时均取成 $6^{[9]}$. $y = \left(1 - r \frac{\bar{z}}{L}\right)^{\frac{1}{2}}$, $y_0 = \left(1 - r \frac{z_0}{L}\right)^{\frac{1}{2}}$, r 在计算时均取成 $15^{[7]}$. m 是一与稳定性和地形粗糙度有关的参数, $H = \bar{z}/z_0$.

三、平坦均匀地形的垂直扩散型

要导出垂直扩散型, 关键是要合适选择稳定度参数 L 和 m . 所谓平坦均匀地形, 是指 z_0 为 0.01 米的理想化情况. 下面计算均采用 Pasquill^[4] 稳定度分类法, 其稳定度参数 L 和 m 是根据已有的实测结果^{[4], [10], [11], [12]} 选定的, 其值给在表 1 中.

表 1 稳定度参数

稳定度类	A	B	C	D	E	F
m	-0.19	-0.15	-0.1	-0.02	—	—
L (米)	—	—	—	—	150	35

选定参数后, 分别对(2)—(5)进行计算, 结果比较表明, 对 D-A 类, 用指数规律描述的(5)式最好, 对 E 和 F 类, 用对数线性关系的(3)式最佳. 因此, 我们最后得到如下平坦均匀地形的垂直扩散型.

$$\left. \begin{aligned} \text{A 类: } \bar{X} &= 0.15 + 2.08 \times 10^1 \bar{z}^{0.81} - 1.13 \times 10^1 \bar{z}^{0.62} \\ \text{B 类: } \bar{X} &= 0.13 + 3.02 \times 10^1 \bar{z}^{0.85} - 1.84 \times 10^1 \bar{z}^{0.70} \\ \text{C 类: } \bar{X} &= 0.11 + 5.39 \times 10^1 \bar{z}^{0.90} - 3.83 \times 10^1 \bar{z}^{0.80} \\ \text{D 类: } \bar{X} &= 0.08 + 3.58 \times 10^2 \bar{z}^{0.98} - 3.33 \times 10^2 \bar{z}^{0.96} \\ \text{E 类: } \bar{X} &= 7.69 \bar{z} \ln \bar{z} + 2.77 \times 10^1 \bar{z} + 7.85 \times 10^{-1} \bar{z}^2 + \\ &\quad 1.54 \times 10^{-1} \bar{z}^2 \ln \bar{z} + 4.1 \times 10^{-3} \bar{z}^3 \\ \text{F 类: } \bar{X} &= 7.69 \bar{z} \ln \bar{z} + 2.77 \times 10^1 \bar{z} + 3.37 \bar{z}^2 + \\ &\quad 6.59 \times 10^{-1} \bar{z}^2 \ln \bar{z} + 7.54 \times 10^{-2} \bar{z}^3 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

扩散型(6)能否应用到 10 公里范围呢? 为此, 我们将(6)的计算结果与目前公认的

Briggs^[4]内插公式(适用于10公里)在0.1—10公里范围进行比较分析。在这个范围内,一共选取20个点作统计分析,将每个选定距离上的 σ_z 值(σ_z 为垂直方向烟云质点分布的标准差, \bar{z} 和 σ_z 之间关系,对正态分布情况, $\sigma_z \approx 1.25\bar{z}$,本文均用此关系作换算^[13])与 Briggs 的值进行比较,其比值给在表2中。

表2 0.1—10公里范围公式(6)与 Briggs 扩散型比较

稳定度类	A	B	C	D	E	F
$\sigma_z(\text{本文})/\sigma_z(\text{Briggs})$	1.09 ± 0.261	1.05 ± 0.149	1.06 ± 0.235	0.98 ± 0.313	0.91 ± 0.095	1.11 ± 0.254

从表中清楚看出,在0.1—10公里范围内,扩散型(6)与 Briggs 的内插公式非常一致。

当用相似理论概念经验的估算远到10公里范围的垂直扩散时,会出现一团烟云是否还处在常通量层的问题。关于常通量层的厚度,Monin^[8]指出平均为50米,Thuillier^[14]也明确指出过,在量级为50米厚的地面层内,决定平均风速廓线的相似理论是一有用的工具,因此,我们可以将常通量层至少考虑为50米厚。但这一层的厚度与稳定度有明显关系。中性条件下,一般取成100米已为很多观测资料所证实^[15],而且随粗糙度的加大,其厚度还更高。如Soma指出,对一城市区,其厚度至少200米。Lappe也曾指出,其厚度可达140米。Panofsky^[16]指出:强风情况,直到150米高度, w_* 变化仍相当小,对不稳定大气, w_* 的垂直变化更慢。Sensku^[17]根据日本沿海几个位置上完成的气象观测,发现风和温度的对数线性规律区域常常超过100米,有时高达200米。我们^[18]也曾经发现,对数线性规律到100米高度能很好地满足。因此,对中性情况,常通量层取成100米以上,以至200米的高度,不会造成大的误差。

为了说明水平范围为10公里时,烟云所处的平均高度,我们将10公里处的 \bar{z} 值和 \bar{z}/L 给在表3中。

表3 烟云质点平均垂直位移和 \bar{z}/L

稳定度类	A	B	C	D	E	F
10公里处 \bar{z} (米)	2390	1230	565	190	61	31
\bar{z}/L	—	—	—	—	0.41	0.88

从表中看出,对E和F类,10公里范围内烟云仍可近似看成在常通量层中(50米厚)扩散,而且 \bar{z}/L 的值均小于1,说明对数线性规律直到10公里范围也能较好地满足。D类,10公里处烟云平均高度为190米,我们仍可近似看成在常通量层中扩散,但C-A类,它们就超出常通量层了。

因此,对C-A类,由于受到常通量层假设的限制,扩散型(6)应用到10公里范围时,地面层的相似理论不再满足了。尽管在给出垂直扩散型(6)时,缺乏理论依据,但作为经验地处理,看来还没有造成大的误差,如表2中A-C类的结果与 Briggs 的结果就相当一致,因此,我们这里可作为一个整体推荐垂直扩散型(6),但要记住,A-C类缺乏理论基础。

四、有效粗糙度长度及其计算方法

水平均匀是相似理论的一个重要前提, 但实际地形是相当复杂的, 很难满足这一假设. 对非均匀地形, z_0 的意义就发生了变化^[19]. 通常参数 z_0 是在桅杆和塔上测定的, 它是一个局地参数, 严格讲只能代表测量点的值.

对非均匀地形, Fiedler 和 Panofsky^[5] 提出了“有效粗糙度长度”的概念, 它可由所考虑区域内测得的近地面平均应力, 采用均匀条件下中性风廓线理论导出.

本文后面将要使用的烟云扩散试验资料, 是在各种不同地形条件下取得的^{[18],[20]}, 因而地形很粗糙也很不均匀. 我们采用以下方法导出每个试验地点所考虑范围的有效粗糙度长度 \bar{z}_0 .

由(2)我们可以得到

$$\frac{\bar{X}_m}{\bar{X}_j} = \frac{\bar{z}_m \left[\ln \frac{\bar{z}_m}{\bar{z}_0} - 1 + \frac{\bar{z}_0}{\bar{z}_m} \right]}{\bar{z}_j \left[\ln \frac{\bar{z}_j}{\bar{z}_0} - 1 + \frac{\bar{z}_0}{\bar{z}_j} \right]} \quad (7)$$

其中 \bar{z}_m 和 \bar{z}_j 分别表示在同一烟道中下风距离为 \bar{X}_m 和 \bar{X}_j 处烟云平均垂直位置, \bar{z}_0 表示在 \bar{X}_m 和 \bar{X}_j 之间非均匀地形的平均粗糙度长度, 对每个烟道可计算多个 \bar{z}_0 值, 再求其平均, 然后将多次烟道算出的 \bar{z}_0 值求总平均作为我们所考虑每个地区的有效粗糙度长度.

用上述方法, 一共计算了七个不同地形的 \bar{z}_0 , 其结果见表 4.

表 4 有效粗糙度长度 \bar{z}_0 (米) 计算结果

地 形	次 数	烟 道 数	(7)式计算	(8)式计算	局地粗糙度
A	28	10	0.4	0.35	0.57
B	48	10	0.8	0.99	0.35
C	40	4	0.2	0.22	0.63
D	17	5	0.2	—	—
E	27	10	0.1	—	—
F	13	3	0.2	—	—
G	11	2	0.7	—	—

从中看出, 有效粗糙度长度与局地测量的粗糙度长度(均由塔上测量的平均风速廓线资料导出)是不一致的.

为了进一步说明用(7)式计算 \bar{z}_0 的代表性和可靠性, 我们将 Fiedler 和 Panofsky^[5] 用湍流量表示的形式变成我们能观测的量的如下形式:

$$\bar{z}_0 = z \exp - \left\{ 1.3k \times [1 - 144Fz/\bar{u}(z)] / \left[\frac{\sigma_z}{X} + \frac{7.8Fz}{u(z)} \right] \right\} \quad (8)$$

其中 F 为科氏参数, 用(8)式计算了和(7)式完全相同的三个地形的烟云扩散试验资料, 其结果也给在表 4 中, 从中看出, 这两种计算方法有较好的一致性.

五、均匀粗糙地形条件下的垂直扩散型

前面已经导出了平坦均匀地形的 10 公里范围垂直扩散型。在这一节里,我们试图将以上扩散型利用(四)节讨论的有效粗糙度长度的概念,推广到复杂地形中去。其方法主要是将(2)—(5)中的 z_0 用有效粗糙度长度 \bar{z}_0 代替,也就是将非均匀粗糙地形考虑成具有同一有效粗糙度长度 \bar{z}_0 的均匀地形来处理。

另外,如前指出, m 与粗糙度有关,地面越粗糙, m 越大。为导出 m 与 \bar{z}_0 的关系,我们利用了一个为大量观测证实的事实,即粗糙度突变的影响,随着距离的加大而减小,到很远的距离上,可以忽略地形的影响。则利用公式(5)可导出不同 \bar{z}_0 值所对应的各稳定度类的 m 值,其 $\bar{z}_0 = 1$ 米时的 m 值见表 5。

表 5 $z_0 = 1$ 米时的 m 值

稳定度类	A	B	C	D
m	-0.255	-0.195	-0.114	0.0446

比较表 1 和表 5 中的 m 值表明,地形越粗糙, m 的绝对值明显变大。

为了给出粗糙地形的垂直扩散型,我们以 $\bar{z}_0 = 1$ 米的地形代表粗糙地形,利用表 5 和表 1 中的 L 值,同样可以得到如(6)那样的均匀粗糙地形的如下垂直扩散型

$$\left. \begin{aligned}
 \text{A 类: } \bar{X} &= 2.11 \times 10^1 + 4.05 \times 10^1 \bar{z}^{0.75} - 6.16 \times 10^1 \bar{z}^{0.49} \\
 \text{B 类: } \bar{X} &= 1.57 \times 10^1 + 4.9 \times 10^1 \bar{z}^{0.805} - 6.47 \times 10^1 \bar{z}^{0.61} \\
 \text{C 类: } \bar{X} &= 1.12 \times 10^1 + 7.65 \times 10^1 \bar{z}^{0.887} - 8.77 \times 10^1 \bar{z}^{0.773} \\
 \text{D 类: } \bar{X} &= 6.76 + 1.58 \times 10^2 \bar{z}^{1.09} - 1.65 \times 10^2 \bar{z}^{1.05} \\
 \text{E 类: } \bar{X} &= 7.69 \bar{z} \ln \bar{z} - 8 \bar{z} + 8.04 + 7.08 \times 10^{-2} \bar{z}^2 + \\
 &\quad 1.54 \times 10^{-1} \bar{z}^2 \ln \bar{z} + 4.1 \times 10^{-3} \bar{z}^3 \\
 \text{F 类: } \bar{X} &= 7.69 \bar{z} \ln \bar{z} - 9 \bar{z} + 9.19 + 2.17 \times 10^{-1} \bar{z}^2 + \\
 &\quad 6.59 \times 10^{-1} \bar{z}^2 \ln \bar{z} + 7.54 \times 10^{-2} \bar{z}^3
 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

为了定量地看出地面粗糙度对 σ_z 的影响大小,我们分别对(9)和(6)计算的 σ_z 值作比较分析,在 0.1—10 公里范围内,同一距离和同一稳定度类的 σ_z 比值给在表 6 中。

从表中可看出:(1)地形变粗糙的影响使 σ_z 加大,其影响随 \bar{X} 的增加(\bar{z} 的升高)而减小;(2)从不稳定向稳定变化,粗糙度影响也逐渐增加,稳定情况地形影响最大,影响的范围最远也最厚,使 σ_z 增大的幅度也最大;(3)中性情况,粗糙地形在 1 公里以内的影响,可使 σ_z 增大为平坦地形的 2—3 倍,这个结论与某复杂地形^[10]的实际观测得到的(在 800 米处)扩散参数平均为平原的 1.9—2.5 倍很一致。

为了检验以上结果在复杂地形条件下适用程度,我们分别计算了七个复杂地形的垂直扩散参数^{[10],[10]},并与实测烟云资料作了对比,结果表明:中性条件的 208 次资料中, $\sigma_{z, \text{测}}/\sigma_{z, \text{计}} = 0.97 \pm 0.23$, 非中性条件的 108 次资料中, $\sigma_{z, \text{测}}/\sigma_{z, \text{计}} = 0.96 \pm 0.21$ 。这样的结果还是相当满意的。

表 6 $\bar{Z}_0 = 1$ 米的 σ_z , 与 $\bar{Z}_0 = 0.01$ 米的 $\sigma_{z0.01}$ 之比值

$\sigma_z/\sigma_{z0.01}$ 稳定度类 \bar{x} (米)	A	B	C	D	E	F
100	1.41	1.74	2.14	2.81	2.98	3.18
150	1.26	1.55	1.96	2.48	2.75	2.88
200	1.16	1.46	1.82	2.31	2.61	2.58
500	1.02	1.23	1.48	1.95	2.08	1.96
700	0.98	1.16	1.41	1.78	1.97	1.79
1000	0.95	1.13	1.36	1.66	1.85	1.76
2000	0.91	1.05	1.24	1.45	1.66	1.59
5000	0.92	1.00	1.10	1.26	1.44	1.39
7000	0.92	1.00	1.08	1.20	1.44	1.33
104	0.92	1.00	1.06	1.15	1.39	1.35

以上用来检验的实验资料,其取样的距离范围在 40—520 米之间,由于照相法的局限性,取样距离太短。为了分析更远距离情况下本文结果的适用性,我们对美国圣路易斯城的扩散试验资料^[21](中性条件下的晚上 12 次试验资料,其取样范围为 0.78—7.8 公里)作了对比分析, Pasquill^[21] 用以下公式匹配过一些实验资料:

$$\bar{x} = \frac{\bar{z}}{k^2} \left[\ln \left(\frac{c\bar{z}}{z_0} \right) + \frac{z_0}{\bar{z}} (1 - \ln c) - 1 \right] \tag{10}$$

其中 $c = 0.6$, $z_0 = 3$ 米,我们分别应用公式(2)和(3)作了相应的计算,其计算值与实测值的比值见表 7,为比较,将 Pasquill 计算结果也给在表中。

表 7 中性条件下圣路易斯资料的计算与实测比较

计算公式	(10)	(2) $\bar{z}_0 = 3$ 米	(3) $\bar{z}_0 = 3$ 米 $L = 10^4$ 米	(3) $\bar{z}_0 = 3$ 米 $L = -10^4$ 米
$\bar{z}_{\text{计}}/\bar{z}_{\text{测}}$	1.20±0.38	0.92±0.28	0.98±0.32	0.86±0.27

从中看出,我们采用的三种模型,在 8 公里范围内均比(10)更符合实际。

为了进一步分析(9)的可靠性,我们将结果与 Smith^[22] 的相应结果(由数值求解二维扩散方程导出)作了对比分析,其 0.1—10 公里范围 σ_z 的比值给在表 8 中。

表 8 0.1—10 公里范围(9)与 Smith 结果比较

稳定度类	A	B	C	D	E	F
$\sigma_z(\text{本文})/\sigma_z(\text{Smith})$	1.33±0.566	1.53±0.633	1.42±0.329	1.05±0.094	1.11±0.277	1.35±0.456

从中看出,两者有较好的一致性,除了 B 类以外,两者之比值均在 2 倍以内,中性情况一致性最好,而且离散度也很小,但 C—A 类,本文的结果比 Smith 的要大, E 和 F 类

本文略偏大。总之,这两个用不同方法导出的均匀粗糙地形的垂直扩散型虽然还有些差别,但从实用角度,两者一致性还是相当好的。

六、小结和结论

通过以上分析,可以得到如下几点看法:

1. 对平坦均匀地形,用相似理论概念经验性的估算 10 公里范围的垂直扩散,其效果与目前公认的,且应用较广泛的 Briggs 内插公式相当,而本扩散型便于由平坦均匀地形延伸到均匀粗糙地形。但对不稳定情况,由于受到常通量层的限制,虽可以凭经验外推到 10 公里范围,但仍缺乏理论基础,这要求进一步发展行星边界层的相似理论。

2. 对复杂地形,原则上相似理论不能使用,但在实际里,不可能真正找到完全均匀的地形,实质上就是要考虑这种不均匀性对理论应用的影响程度。本文采用中性条件下 \bar{x} 和 z 之间的关系确定有效粗糙度长度,其结果与 Fiedler 和 Panofsky 方法作了比较,表明本文的方法是可行的。

利用本文计算得到的有效粗糙度长度,将平坦均匀地形的扩散型延伸到粗糙地形,与实际观测资料和 Smith 的有关结果比较,表明有较好的一致性。

3. 不同粗糙度地形的垂直扩散特征比较表明,地形越粗糙扩散参数越大,同样的粗糙度,地形对扩散的影响从不稳定到稳定逐渐加大,稳定情况影响最显著,实际观测资料^{[23],[24],[25]}也支持这一事实。

总之,对平坦均匀地形,从中性到稳定层结,可用相似理论概念经验地估算 10 公里的垂直扩散。对复杂地形,用有效粗糙度长度代替局地粗糙度长度后,相似理论也可以近似应用。由此得到的经验垂直扩散型,在大气污染、环境质量评价以及工程设计等方面的应用,其精度是够用的。

致谢:周明煜和任阵海两位同志对本文的初稿提出过宝贵意见,在此表示谢意。

参 考 文 献

- [1] Pasquill, F., *Lectures on air pollution and environmental impact analyses*, 1975.
- [2] Pasquill, F., *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 97(414), 369—395, 1971.
- [3] Seinfeld, J. H., *Air pollution-physical and chemical fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, 1975.
- [4] Gifford, F. A., *Nuclear Safety*, 17(1), 1976.
- [5] Fiedler, F. and Panofsky, H. A., 同[2], 96, 213—220, 1972.
- [6] Ito, S., *Paper in Meteorology and Geophysics*, 21(2), 142—241, 1970.
- [7] Businger, J. A., *J. Atmos. Sci.*, 28, 181—189, 1971.
- [8] Monin, A. S. and Obukhov, A. M., *Trudy Geofiz. Inst., Akad. Nauk S. S. S. R.*, No. 24, (151), 1954.
- [9] Yaglom, A. M., *Boundary-Layer, Met.*, 11, 89—102, 1977.
- [10] Touma, T. S., *J. Air. Poll. Control. Asso.*, 27, 9, 1977.
- [11] Courtney, F. E., *Joint conference on applications of air pollution meteorology*, November 29—December 2, 1977, pp. 64—67.
- [12] Brennan, P. T., 同[11], pp. 154—159, 1977.
- [13] Pasquill, F., 同[2], No. 392, 1966.
- [14] Thuillier, R. H., *J. Appl. Meteor.*, 3, pp. 299—306.
- [15] Counikan, J., *Atmospheric Environment*, 9(10), 871—905, 1975.

- [16] Panofsky, H. A., 同 [9], 4, 251—264, 1973.
- [17] Sensku, T., *Symposium on Atmospheric Diffusion and Air Pollution*, 180—183, 1974.
- [18] 大气试验技术小组, 大气科学, 1977, 第一期, 26—35.
- [19] Mebean, G. A., WMO, Commission for Atmospheric Science Working Group on Atmospheric Boundary-Layer Problems, First Session, Final Report, Appendix C, 1978.
- [20] 中国科学院大气物理研究所, 山区污染与气象学, 1978, 科学出版社.
- [21] Pasquill, F., *Atmospheric Diffusion*, 1974, Wiley and Sons, London.
- [22] Hosker, R. P., *Physical Behavior of Radioactive Contaminants in the Atmosphere*, Proceedings of a Symposium, Vienna, 291—308, 1973.
- [23] Egan, B. A., 同 [1], 112—135, 1975.
- [24] Houind, E., 同 [17], 214—217, 1974.
- [25] Start, G. E., 同 [17], 226—232, 1974.

A METHOD FOR ESTIMATING THE VERTICAL DISPERSION PARAMETERS IN THE RANGE OF 10 KM

Lei Xiao-en Jia Xin-yuan Yang Jin-de

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Based on Monin-Batchelor similarity theory and the concept of effective roughness length, this paper proposes an empirical vertical dispersion model in the range of 10 km. It is applicable to both flat and complex terrain.