

问题讨论

垂直扩散参数(σ_z)随高度变化规律的探讨

马倩如 李 光 周中平

(清华大学环境工程系)

研究和掌握扩散参数随高度的变化规律,从理论上可以增强对大气边界层的认识,从工程应用的角度,它关系着不同高度层次扩散参数能否互用或怎样利用的问题。长期以来,一些文献报道了这方面研究的进展情况,我们也在不同地区开展了关于垂直扩散参数(σ_z)随高度变化的实验研究。以下通过对这方面研究成果的分析,提出一些参考性的意见。

一、概 述

通常认为,高层的湍流强度低于低层的湍流强度,于是反映物质扩散中浓度分布情况的 σ_z 必然随高度的增加而减小。但从以下粗略分析便可发现,这种结论是片面的。

D. H. 斯莱德曾经证明,在一般情况下气流倾角偏差(σ_ϕ)近似等于垂直方向的湍流度^[1]。

$$\sigma_\phi = \sigma_w / \bar{u} \quad (1)$$

式中 σ_w 为竖向湍流速度涨落的标准差; $\bar{u}$ 为所涉及高度处的平均风速。

Pasquill (1976) 和 Hanna (1977) 在大气扩散理论和实验的基础上都曾给出下式作为推测扩散参数变化的基础。^[2,3]

$$\sigma_z = \sigma_\phi \cdot x \cdot f_z(x) \quad (2)$$

式中的 $f_z(x)$ 是下风距离 x 的函数,同时它还依赖于大气边界层的特征和排放高度。Draxler (1976) 综合若干次野外扩散资料,给出 $f_z(x)$ 的形式^[2]

$$f_z(x) = \frac{1}{1 + 0.9 \left(\frac{x}{500\bar{u}} \right)^{0.5}} \quad z/L \leq 0$$

$$f_z(x) = \frac{1}{1 + 0.945 \left(\frac{x}{100\bar{u}} \right)^{0.886}} \quad z/L > 0 \quad (3)$$

式中 z 为所涉及的高度; L 为 Monin-Obukhov 长度。其中 $f_z(x)$ 总有 $f_z(0) = 1$ 的渐近关系。^[3]由计算可以发现(参见表 5 及分析),除非是在高度

升高时 σ_ϕ 存在微弱递减的特殊情况下, σ_z 与 σ_ϕ 随高度变更,或增加或减小,根本趋势上是一致的。D. H. 斯莱德又曾对 σ_w 随高度的变化作出过一般说明^[1]。因此,根据式(1)、(2),结合对于各种层结下 $\bar{u}$ 随高度变化规律的认识,就可以得到如表 1 的粗略推测^[4]。Hanna (1980) 对昼间行星边界层(实质上就是不稳定和近中性层结下)的计算机模拟研究^[5]还印证了不稳定结下 σ_z 随高度增加而增加的推测。

表 1 粗略推测 σ_z 随高度增高时的变化

层结情况	不稳定	中 性	弱稳定	强稳定
σ_z 的变化	增加	弱递减	递 减	强递减

此结论仍未能十分满意地解释某些实验结果。下面列举我们实验的情况。

二、实 验

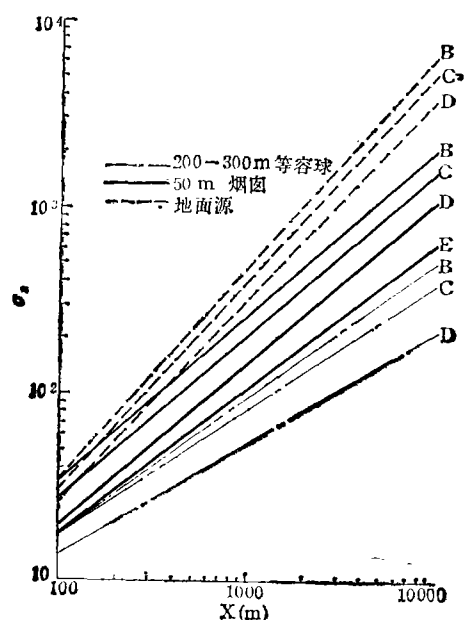
1986 年我们在山西省霍县辛置用照相法研究了地面排放及 50m 烟囱排烟(最大抬升时烟羽轴高度为 150m)的 σ_z , 又用等容气球法获取了 200—300m 层次的 σ_z , 结果如表 2 及图 1。

由以前的实验比较我们曾得到: 用等容气球法获取的 σ_z 与照相法结果相比约低一级稳定度。因此,虽然实测方法不同,从定性的角度是可比的。从图 1 可以清楚地看到;不稳定和中性层结下, σ_z 明显地随高度增加不断降低。不稳定层结与表 1 的期望是相反的。

1983—1984 年我们在株洲市清水塘工业区用照相法研究了 43m 及 100m 两锅炉烟囱排烟的扩散参数, 所得结果如表 3 及图 2。在 $x \leq 1000m$ 时,该地区扩散参数除 D 类稳定度外,基本上不随高度而变更。不稳定层结下的这种结果与表 1 不同,与霍县辛置也不一致。产生这种分歧的原因在下面将详

表 2 霍县地面不同高度上 $\sigma_z = c \cdot x^d$ 的 c, d 值

高度 系数 稳定度	200—300m		50m 烟囱		地面源	
	c	d	c	d	c	d
B	0.61	0.73	0.54	0.90	0.18	1.14
C	0.80	0.67	0.45	0.90	0.18	1.12
D	0.84	0.60	0.35	0.88	0.18	1.08
E			0.50	0.78		

图 1 霍县不同高度层次各稳定度下 σ_z-x 关系图

细分析,但值得注意的是霍县辛置与株州清水塘下垫面特征的不同。辛置是丘陵傍山,平坦地带最多不过 1km 宽,地势起伏较大;而清水塘是座平坦地 ($4 \times 5 \text{ km}^2$) 傍丘陵的小工业城市。

表 3 清水塘工业区不同高度上 $\sigma_z = c \cdot x^d$ 的 c, d 值

高度 系数 稳定度	100m 烟囱		43m 烟囱	
	c	d	c	d
B	0.55	0.93	0.43	0.96
C	0.43	0.95	0.70	0.86
D	0.19	0.98	0.74	0.81
E	0.33	0.87	0.43	0.82

三、分 析

从文献[4] Hanna 给出的表 4 中,已经可以获得这样的信息:不同高度下的 σ_z 比值随粗糙度增加变小,即随粗糙度增加,不稳定层结下 σ_z 随高度增加而增加的趋势减弱了。但由于数据量有限,各种趋势表现不够明显。

表 4 中假设混合层高度 (Z_i) 为 1000m, Z_0 为粗糙度,于是 (a)、(b) 两表在相应位置上一一对应。

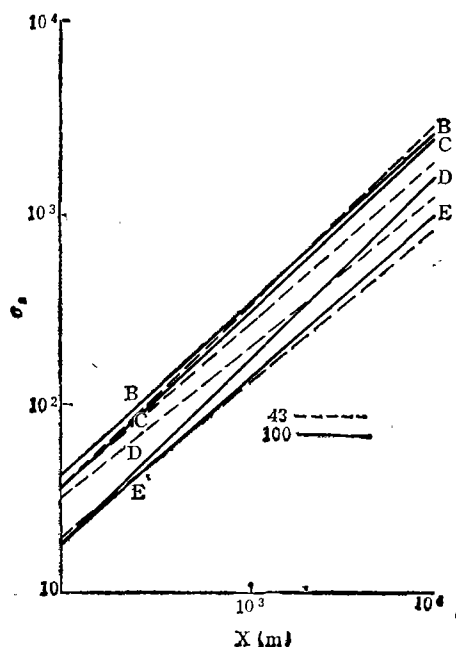
陈家宜(1985)曾用参数化估算的方法,把 σ_φ 的变化绘成图 3 的形式,并附带说明:“ σ_z 的变化尚受式(2)中 $f_s(x)$ 的限制, σ_z 的行为不一定与 σ_φ 的

表 4 不同高度 Z , 时 $\sigma_z(Z/Z_i = 0.5)/\sigma_z(Z/Z_i = 0.1)$ 在 $x/Z_i = 0.1$ 处的值 (a) 和相应稳定度 (b)

Z_i/Z_0	10^6	10^4	10^3	$Z_0(m)$	0.001	0.1	1
Z_i/L				$L(m)$			
-10	1.70	1.83	1.67	-100	D	C	B
-100	2.33	2.33	1.47	-10	B	A	A

(a)

(b)

图2 清水塘 43m、100m σ_{ϕ} - x 关系图

行为相当。”[22]

为了解 $f_z(x)$ 的影响大小, 此处选择计算粗糙度 $Z_0 = 1.0\text{m}$ 时, D类稳定度下的几个 $f_z(x)$ 值, 列于表5中, 同时还给出了相应高度处的 σ_{ϕ} 值. 计算时使用了式(3), 取 10m 高处风速 $\bar{u}_{10} = 2\text{m/s}$, 我们有意把 $\bar{u}_{10}$ 取的较小, 以使 $f_z(x)$ 的变化明显些. 风速幂指数关系用陈家宜的结果.

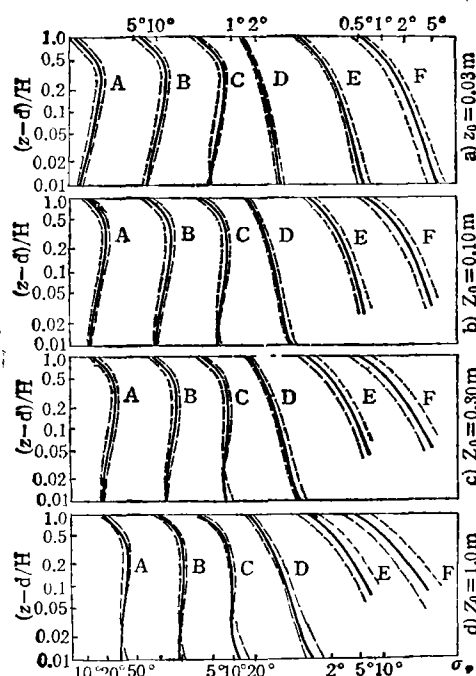
由表5可知, $f_z(x)$ 随高度增加, 虽然值有所上升, 但变化并不明显. 如前所述, 除非是在高度升高时 σ_{ϕ} 存在极微弱递减的特殊情况下, $f_z(x)$ 不会打破 σ_z 和 σ_{ϕ} 在变化趋向上的一致性. 故此, 我们

表5 不同下风距离 x 处 $f_z(x)$ 值随高度 z 的变化 (D类稳定度 $\bar{u}_{10} = 2\text{m/s}$, $Z_0 = 1.0\text{m}$)

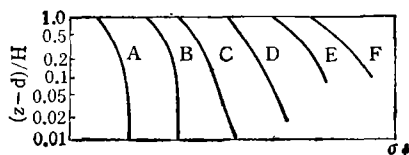
$z(m)$ $x(m)$	35	305	505
100	0.83	0.88	0.89
1000	0.60	0.69	0.71
10000	0.32	0.42	0.44
σ_{ϕ} (度)	6.4	3.3	2.5

不妨从图3 σ_{ϕ} 的变化看 σ_z 变化的定性趋向. 可以发现, 由于边界层顶对大气湍流的抑制作用, 近顶部各种稳定度下 σ_{ϕ} 都有明显的减弱. 并且, 与这种趋

势相连贯, 中性和稳定层结下, σ_{ϕ} 一直是随高度的增加而减小, 且由于地面粗糙度的增加, 这种减小的趋向变得越来越显著. 但对于不稳定层结 (基本上对应于 Hanna 的昼间边界层) 在混合边界层中部以下, $(z-d)/H < 0.4 \sim 0.5$, $Z_0 = 1000\text{m}$ 时约是 500m 以下, 这正包括一般的排烟有效高度) σ_{ϕ} 值随高度增加而增大, 并且这种增大的趋势由于粗糙度的增加而被削弱. 不稳定层结下的这种特性是与 Hanna 的研究相吻合的.

图3 大气边界层中 σ_{ϕ} 随高度的变化

..... $H = 1500\text{m}$ (A, B, C, D类); $H = 500\text{m}$ (E, F类)
 —— $H = 1000\text{m}$ (A, B, C, D类); $H = 250\text{m}$ (E, F类)
 ---- $H = 500\text{m}$ (A, B, C, D类); $H = 100\text{m}$ (E, F类)

图4 对更大粗糙度 Z_0 下 σ_{ϕ} 随高度变化特征的定性推测

Z ——所涉及的高度 H ——混合层高度
 d ——相应粗糙度 Z_0 下的零值位移值

可想而知, D. H. 斯莱德所提到的不稳定层结下使 σ_{ϕ} 明显随高度增加而增加的巨大摩擦力的作用[1]在粗糙度比较小时 (如 $Z_0 = 0.03\text{m}$) 表现得

很明显,使得此时 σ_z 明显地随高度增加而增加;而不断增加的地面粗糙度所作用于上空大气湍流的效应,相当于在整个混合层高度上不断附加了新的气流倾角偏差 σ_z 。由于高度上升时这种下垫面所造成的扰动的穿透作用会渐次减弱,所以附加上的新的 σ_z 值在整个混合层高度上不会均等,而应从地面到高空逐渐减小。以上所描述的这种下垫面作用在图 3 中恰表现为随粗糙度增加, σ_z 普遍在增加,而且近地面层的 σ_z 增加比高空快。

粗糙度增加时,越近地面层 σ_z 增加越快的这种状况最终导致了 $Z_0 = 1.0\text{m}$ 时, C 类稳定度下 σ_z 已经从随高度增加而增加的趋势反转为随高度增加而减小的趋向。预示着在大粗糙度下扩散参数也会反转为随高度增加而减小的变化特征。

陈家宜所用粗糙度值代表的实际情况是: $Z_0 \approx 0.03\text{m}$ ($d \approx 0\text{m}$) 浅草覆盖的平坦草原,耕地或矮杆作物的农田,地形很平坦,上风无障碍物; $Z_0 \approx 0.30\text{m}$ ($d \approx 2.0\text{m}$) 地形稍有起伏的田野,城市近郊区; $Z_0 \approx 1.0\text{m}$ ($d \approx 5.0\text{m}$) 无高层建筑的平原城市,平坦地形的森林。

为保证参数化估算量上的准确性,陈家宜只计算到 $1.0\text{m}(Z_0)$,而没有涉及复杂山区或是热力和机械湍流作用都很强烈的大城市。但设想这种复杂地区热力和机械湍流所造成扰动的综合结果能与具有某粗糙度的下垫面所造成的扰动状况相当,我们不妨从前面得到的 σ_z 变化趋向可能反转的思想,对这种更大粗糙度下 σ_z 的变化作出如图 4 的定性推测。即当粗糙度从 1.0m 增加到某一值 Z_c 时, A、B、C 类稳定度的 σ_z 也开始随高度的增加而减小,使得大粗糙度下垫面时各类稳定度下 σ_z 随高度的变化归为一致,都随高度的增加而降低。这种定性推测正是与较大粗糙度下垫面的霍县实验结果相一致。上海市亦是粗糙度较大的城市,上海气象科学研究所根据实验分析,认为上海市区上空扩散参数随高度升高而减小,与我们推断相符合。

图 3 和图 4 贯穿起来,就是我们推断出的 σ_z 随高度变化的完整形态。按此分析,清水塘下垫面造成扰动情况相近于 $Z_0 = 1.0\text{m}$ 处。所以 B、C 类稳定度下 σ_z 大体不随高度变化的现象是与推断相符的。推断同时认为,此时中性和稳定层结下 σ_z 随高度升高应该减小,而与 B、C 类下趋向相反的清水塘 D 类实测结果恰恰相符。这样看来,清水塘和霍县两处的实验结论并不是相矛盾的。这两处 σ_z 随高度不同的变化,恰反映了下垫面粗糙度(广义还包括热力湍流作用)对 σ_z 随高度变化趋向的直接影

响。

文献[4]转载的 Vogt (1978) 实验结果也部分地支持了我们的推测。较大粗糙度(报道为 $Z_0 = 1.8\text{m}$),图 5 中下风距离 $10^2 - 10^4\text{m}$ 之间, A 类 σ_z 在高度增加时减小的量最少,甚至还保持着增加的趋势;而 B、C 类就依次减小得多了。如果只停留在表 1 的认识,就只能把这种减小当作异例。

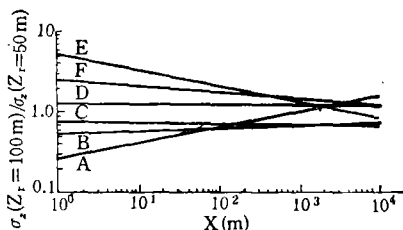


图 5 Vogt (1978) 各类稳定度下 $\sigma_z(Z_r = 100\text{m}) / \sigma_z(Z_r = 50\text{m})$ 的值

四、几点看法

我们的推断还是粗糙的。如果注意,不难发现 E、F 类曾出现了特异情况。这可能是由于实际情况的特殊性,也可能是某些指数的选取造成的^[4]。但从以上相符合的实验结论中,至少可以得到以下有益启示。

1. σ_z 随高度的变化与稳定度类型、下垫面情况、边界层厚度等各种因素有关,那种认为 σ_z 随高度增加而单纯减小的结论是不完善的。

2. 同一地区, σ_z 随高度的变化在不同稳定度下并不一定完全一致。如株洲清水塘的情况,应承认并恰当分析这种不稳定度造成的特殊性。

3. 下垫面粗糙度(广义地讲是下垫面热力、机械湍流综合作用造成扰动的能力)不仅是影响 σ_z 变化程度的参数,而且是一个能影响 σ_z 随高度变化趋向的强烈因素。

最后,把我们的推断整理一下,作为以后研究工作的参考。

σ_z 在高度增加时的变化趋势:大粗糙度下垫面,各类稳定度下均减小。小粗糙度下垫面,稳定层结减小(可能存在某种特殊性);中性层结增加或减小(Hanna 的结论是增加,这可能是问题本身的复杂性或经验公式的准确性和适用性的问题);不稳定层结增加(在向较大粗糙度过渡时有可能大体不变)。

不难看出,前述表 1 只是对应于此处下垫面粗糙度较小的情况。(下转第 71 页)

表 4 α 值 ($\bar{u} = 1\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的排放源强)

项目 季节	SO ₂	CO	$\alpha_{\text{CO}}/\alpha_{\text{SO}_2}$	按 $Q_{\text{CO}}/Q_{\text{SO}_2}$ 算得 $\alpha_{\text{CO}}/\alpha_{\text{SO}_2}$	
				逐日计算	五日计算
春季	—	—	—	—	56
夏季	0.0025	0.40	160	182	200
秋季	0.031	2.80	90	68	83
冬季	0.008	0.23	29	14	16

(1) 矸石山排污量的季节变化异常剧烈,其中 SO₂ 和 CO 不同季节的差异可达两个数量级。四个季节中以秋末冬初居首位, SO₂ 为次高季节(夏季)的 45 倍, CO 为夏季的 17 倍(表 3)。同样风速条件下各季排放强度的差别亦非常显著(表 4),并且以秋季为首。秋、夏之比:二氧化硫为 12 倍,一氧化碳为 7 倍。

(2) 水分能促使矸石的燃烧,在水分较多时,矸石堆内部产生的 CO 反应强于 SO₂, CO 和 SO₂ 排放的相对强度比值以 8 月份为最高,在秋末冬初时,其比值降低一半以上。

(3) 矸石山排放最强的秋季,尘的源强与二氧化硫相近。而在其它时间,矸石山的尘浓度甚至低于周围各点浓度,由此推算尘的排放量远低于 SO₂。

NO_x 的源强即使在秋季也很低。

四、小 结

通过对云岗矿煤矸石自燃的环境影响研究表明:

1. 云岗矿自燃煤矸石山虽然没有进入旺

燃期,但对大气环境的影响已比较严重,应引起重视,采取必要的防治措施。如采用覆盖黄土或石灰乳中和法等进行治理。

2. 自燃煤矸石做为一个不可忽视的污染源,秋末冬初各种有害气体的排放量最强,其它季节显著减弱。CO 和 SO₂ 源强的比值在夏季最高,冬季为最低,初步证实适当的水分补充对矸石自燃强度有关键的促进作用。结果还表明风速能增强矸石堆有害气体逸散,促进排放。

矸石自燃对云岗矿区环境影响的有害物质占第一位的是 CO、依次是 SO₂ 和尘。

大同矿务局监测站参加了采样工作,特向高新建、向英等同志表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 陈家宜,环境科学学报 5(1),85(1985).
- [2] Turner D. B., (中国科学院大气物理所译), 大气扩散手册, 5—36 页, 科学技术出版社, 1978 年.
- [3] Hanna, S. R., 5th Symp. on Turbulence, Diffusion and Air Pollution, pp. 61—62, Am. Met. Soc., 1981.

(上接第 94 页)

主要参考文献

- [1] D. H. 斯莱德,气象学与原子能,张永兴等译, p39, 47 原子能出版社, 1977.
- [2] 李军,环境科学 6(1), p52(1985).

- [3] 陈家宜,环境科学学报 5(1) p85~94(1985).
- [4] Hanna, S. R., Air Pollution Modeling and Its Application I, C. De Wispelaere Ed., pp. 337—356, 1981.