

对流层物质垂直交换模式中的 参数化处理

雷孝恩

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

张时禹

(美国纽约州立大学, Albany, NY., 12205)

提 要

为了研究对流层(TL)中垂直涡旋扩散系数(K_z)随高度变化的参数化形式对物质垂直交换的贡献,用“高分辨TL物质交换模式”(EM3)对5种不同 K_z 型进行了数值对比模拟,结果表明: K_z 型较好地描述了行星边界层(PBL)内受下垫面影响的高频湍流和PBL以上TL由各种动力学和热力学过程产生的切变湍流;垂直运动和 K_z 对PBL下层的物质输送到TL上层和从源高度向下输送到PBL低层两者均有重要作用;垂直运动的作用具有间隙性,而 K_z 是连续的。

关键词: 垂直扩散系数; 对流层; 物质垂直交换。

一、引 言

从50到上千公里水平尺度范围内,痕量气体的三维分布呈现出大的变化,特别是物质在整个TL内的垂直分布^[1]。TL可细分成与地面接触的PBL和以上的自由TL,受近地面引起的高频湍流控制是PBL的重要特征,PBL以上的湍流主要在急流附近和对流云中发生^[2],强风切变可产生晴空湍流,在局部区域有时大气波动也可增强风切变,这类切变湍流水平范围大,但厚度薄。

长距离输送模式研究的不断发展要求考虑PBL和自由TL两者的湍流扩散过程^[1]。但目前的TL模式, K_z 几乎都是以风垂直切变参数化形式给出的,PBL内和以上TL的湍流产生机制不一样,PBL内主要是由下垫面引起的机械和热力湍流,因而具有连续性,PBL以上TL的湍流则主要由风切变引起的,具有大的间隙性,如何将这一事实参数化,以改善TL内物质交换的模拟效果,是本研究的主要目的。

二、垂直涡旋扩散系数型

本研究采用以下5类 K_z 型同时进行实例的数值模拟。

1991年4月24日收到,9月11日收到修改稿。

1. LoK_z 型

Louis^[4] 提出以下 K_z 参数化模型, 它为美国区域性酸沉积模式(RAPM)^[19] 所采用, 即

$$K_z = l_o^2 \left| \frac{\Delta v}{\Delta z} \right| F(R_{ib}), \quad (1)$$

$$\text{稳定和中性大气} \quad F(R_{ib}) = (1 + 4.7 R_{ib})^{-2}, \quad (2)$$

$$\text{不稳定情况} \quad F(R_{ib}) = 1 - \frac{9.4 R_{ib}}{(1 + C_o |R_{ib}|^{1/2})}, \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad C_o = 49.8 l_o^2 \left\{ \left[\left(\frac{z + \Delta z}{z} \right) \right]^{1/3} - 1 \right\}^{3/2} / (z \Delta z^3)^{1/2}, \quad (4)$$

$$\text{混合长} \quad l_o = 0.4 z / (1 + 0.4 z / 100), \quad (5)$$

这里 $\Delta v \equiv (\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}$ 是两垂直分层间水平风速差, R_{ib} 是总体 Richardson 数.

2. M₄K_z 型

中尺度气象模式(MM4)^[6] 中使用以下 K_z 型. 中性和稳定以及 $z > z_i$ (PBL 厚度) 的不稳定大气, 即

$$K_z = K_{zo} + l_o^2 S^{1/2} \frac{R_{ic} - R_{ib}}{R_{ic}} \quad R_{ib} < R_{ic}, \quad (6)$$

$$K_z = K_{zo} \quad R_{ib} \geq R_{ic}, \quad (7)$$

$$\text{其中} \quad S \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + 10^{-9} \quad (8)$$

$$\text{临界 Richardson 数} \quad R_{ic} = 0.257 \Delta z^{0.175}, \quad (9)$$

式中 $K_{zo} = 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$, $l_o = 40 \text{ m}$, 在近地面层中, K_z 取(6)式和 $0.8 \Delta z^2 / \Delta t$ 的最小值, 地面层以上, K_z 取(6)式和 $100 \text{ m}^2/\text{s}$ 中的最小值. 对 $z < z_i$ 的不稳定大气

$$K_z = \frac{\Delta z^2}{\theta_a - \theta_o} \frac{\partial \theta}{\partial t}, \quad (10)$$

其中 θ_o 和 θ_a 分别是最低网格层和地面位温, $\frac{\partial \theta}{\partial t}$ 是位温随时间变化的趋向项, 计算时将(10)式按地面层、混合层和界面层三层进行参数化, 详细内容见文献[6].

3. KuK_z 型

K_u ^[7] 提出以下 K_z 型. 对稳定大气

$$K_z = 0.4 u_* z \exp \left[-0.91 \left(\frac{z}{L} \right) \mu^{-0.5} \right] / \left(0.74 + 4.7 \frac{z}{L} \right), \quad (11)$$

$$u_* = 0.4u_s / \left\{ \ln \frac{z_s}{z_o} + 4.7 \frac{(z_s - z_o)}{L} \right\}, \quad (12)$$

$$z_i = 0.22 \frac{u_*}{f} (fL/u_*)^{0.5}, \quad (13)$$

其中 $\mu = z_i/L$ 为 PBL 稳定度参数, L 为莫宁-奥布霍夫长度, z_o 为动力学粗糙度长度, u_* 是近地面层速度尺度, 对中性情况

$$K_z = 0.4u_* z \exp\left(-4 \frac{z}{z_i}\right), \quad (14)$$

$$u_* = 0.4u_s / \ln(z_s/z_o), \quad (15)$$

$$z_i = 0.18u_*/f. \quad (16)$$

对不稳定大气条件

$$K_z = 3.39u_* z_i \left(0.4 \frac{z}{z_i}\right)^{4/3} \left(1 - 15 \frac{z}{L}\right)^{1/4} (-\mu)^{1/3} \quad 0 \leq \frac{z}{z_i} < 0.05, \quad (17)$$

$$K_z = 1.36u_* z_i \left[0.02 + 0.41 \left(\frac{z}{z_i}\right) + 1.35 \left(\frac{z}{z_i}\right)^2 - 4.1 \left(\frac{z}{z_i}\right)^3 + 2.56 \left(\frac{z}{z_i}\right)^4 \right] (-\mu)^{1/3} \quad 0.05 \leq \frac{z}{z_i} < 0.6, \quad (18)$$

$$K_z = 0.27 u_* z_i \exp\left(6 - 10 \frac{z}{z_i}\right) (-\mu)^{1/3} \quad 0.6 \leq \frac{z}{z_i} < 1.1, \quad (19)$$

$$K_z = 0.0018 u_* z_i (-\mu)^{1/3} \quad \frac{z}{z_i} \geq 1.1, \quad (20)$$

$$u_* = 0.4u_s / \left\{ \ln \frac{\left(1 - 15 \frac{z_s}{L}\right)^{1/4} - 1}{\left(1 - 15 \frac{z_s}{L}\right)^{1/4} + 1} - \ln \frac{\left(1 - 15 \frac{z_o}{L}\right)^{1/4} - 1}{\left(1 - 15 \frac{z_o}{L}\right)^{1/4} + 1} + 2 \arctg \left[\left(1 - 15 \frac{z_s}{L}\right)^{1/4} \right] - 2 \arctg \left[\left(1 - 15 \frac{z_o}{L}\right)^{1/4} \right] \right\}, \quad (21)$$

$$z_i = 0.25u_*/f, \quad (22)$$

式中 z_s 和 u_s 分别是近地面层某个参考高度和风速, f 为科里奥利参数.

4. Le K_z 型

Lei^[8]综合分析了观测和理论结果, 导出了 PBL 内以下详细的 K_z 型. 中性条件

$$K_z = 0.349 u_* z_i \left(\frac{z}{z_i} \right)^{1.001} / \left\{ \left[1 + 3.775 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{1.493} \right] \left[1 + 1.288 \left(\frac{z}{z_i} \right) \right] \right\}, \quad (23)$$

对稳定大气

$$K_z = u_* z_i \left[\frac{0.0803 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{0.58}}{1 + 1.459 (z/z_i)^{3.155}} - 4.12 \cdot 10^{-4} \left(\frac{z}{z_i} \right)^{0.421} \mu \right], \quad (24)$$

对不稳定状态

$$K_z = 0.256 u_* z_i \left(\frac{z}{z_i} \right)^{0.762} (-\mu)^{1/3} / \left\{ \left[1 + 2.33 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{14.345} \right] \right. \\ \left. \times \left[1 + 2.775 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{2.79} \right] \right\}. \quad (25)$$

当 $z \geq z_i$ 时, 采用 $M_4 K_z$.

5. KK_z 型

为了更好地描述 PBL 以内湍流垂直结构对 K_z 的影响, 使用以下 K_z 的湍流统计量形式

$$K_z = 0.1 \lambda_m \sigma_w, \quad (26)$$

其中 λ_m 为湍流尺度, σ_w 为垂直脉动速度标准差, 不同稳定度类的 λ_m 和 σ_w 廓线由文献 [8] 导出的关系给出. 对稳定大气

$$\sigma_w = u_* \left[1.246 - 1.152 \frac{z}{z_i} + 1.1 \cdot 10^{-3} \left(\frac{z_i}{L} \right) \left(\frac{z}{z_i} \right) \right. \\ \left. - 1.31 \cdot 10^{-3} \left(\frac{z_i}{L} \right) \right], \quad (27)$$

$$\lambda_m = \left\{ 0.385 \left(\frac{z_i}{L} \right)^{-0.679} + \left[2.312 - 0.0863 \ln \left(\frac{z_i}{L} \right) \right] \frac{z}{z_i} \right\} z_i. \quad (28)$$

中性大气

$$\sigma_w = u_* \left(1.282 - 0.797 \frac{z}{z_i} \right), \quad (29)$$

$$\lambda_m = 3z. \quad (30)$$

对不稳定情况

$$\sigma_w = u_* \left\{ 1.282 - 0.797 \frac{z}{z_i} - \left[5.3 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 10^{-2} \frac{z}{z_i} \right] \right\}$$

$$\left\{ \left[1 + 3.862 \left(\frac{z_i}{L} \right)^{5.365} \right] \right\} \quad \mu \geq -30, \quad (31)$$

$$\sigma_s = u_s \cdot \frac{0.61 + 0.487 \frac{z}{z_i}}{1 + 2.06 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{4.764}} \left(-\frac{z_i}{L} \right) \frac{0.33 + 0.0141 \ln(z/z_i)}{1 + 0.138 (z/z_i)^{2.069}} \quad \mu < -30, \quad (32)$$

$$\lambda_m = \left[5.91 \left(\frac{z}{z_i} \right) - 7.56 \cdot 10^{-4} \right] z_i \left\{ \left[1 + 3.25 \left(\frac{z}{z_i} \right)^{1.65} \right] \right. \\ \left. \left[1 - 2.7 \cdot 10^{-8} \exp \left(16.75 \frac{z}{z_i} \right) \right] \right\}. \quad (33)$$

对 $z > z_i$, 采用 M_4K_z 及(5)式的 l_0 .

三、不同 K_z 型之间比较

LoK_z 和 M_4K_z 参数化的理论基础基本一样, 主要受风垂直切变控制, 它们之间差别是: 不稳定大气, PBL 内的 M_4K_z 是由位温随时间变化趋势导出的, 直接与热量交换相联系, 考虑了分层结构; LoK_z 中的 l_0 随高度变化, M_4K_z 则为常数.

KuK_z 是根据近地面层相似理论和统计理论导出的, 不稳定情况考虑了多层结构, 但 PBL 以上为常数, 未能描述切变湍流.

LeK_z 是综合分析 PBL 近 10 多年来 K_z 的野外实测和理论结果得到的, 它的垂直结构不是给成间断的多层形式, 而是一连续的分布函数.

KK_z 是综合了上述四类扩散型的优点而得出的. PBL 以内采用更完善的湍流统计量形式, 它既与 LeK_z 有同样的实验基础, λ_m 和 σ_w 两者又能直接测量. PBL 以上的 TL, 采用较好的 M_4K_z , 又使用 l_0 随高度变化关系. 因此, 从参数化关系的理论和实验基础以及能反映 PBL 以内和以上 TL 两种湍流机制看, KK_z 更完善, 但参数化的效果还得受实测资料的检验.

为了检验 K_z 型在 PBL 内的适用性, 用不同稳定度类、地形(z_0 从 10^{-5} m 变化到 2.5m)和高度(10—1000m)的 213 次实测资料^[8]同时与 5 类 K_z 型比较(表 1).

表 1 PBL 内实测与不同 K_z 型的比值统计特征

扩散型	KK_z	LeK_z	M_4K_z	KuK_z	LoK_z
比值平均	1.07 ± 0.283	1.10 ± 0.466	1.17 ± 0.475	1.40 ± 0.662	1.74 ± 0.628

从表 1 看出, KK_z 最接近实测值, 离散差最小, KuK_z 离散差最大, 平均比值 LoK_z 型最大.

利用 OSCAR4 实例^[9](1981 年 4 月 22—24 日)和 MM4^[6] 预报的每小时三维风

场、温度和湿度资料,对四种不同下垫面(海洋、海岸、森林和农业与森林混合区)的 5 类 K_z 型作了对比分析,研究范围包括加拿大南部和美国东北部及其海域(水平网格数为 30×30 , $\Delta x = \Delta y = 80\text{km}$,垂直范围是 100hPa 以下的整个 TL,垂直网格数 $k = 19$), KK_z 的总体平均随高度分布以及 KK_z 与其它 K_z 比值的统计结果见表 2.

表 2 不同 K_z 型之间 OSCAR4 实例计算比较

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$KK_z(\text{m}^2/\text{s})$	0.043	0.35	0.72	2.78	9.32	19.6	12.9	6.58	19.8	33.0	1.0	1.0	58.0	16.9	24.6	64.8	60.8	1.0	
$KK_z/\text{Le}K_z$	$1.14 \pm 0.108 (k \leq 5)$					$1.09 \pm 0.117 (k \leq 9)$					$1.59 \pm 1.278 (k \leq 13)$					$2.25 \pm 1.735 (k \leq 18)$			
$KK_z/\text{Ma}K_z$	$1.18 \pm 0.098 (k \leq 5)$					$1.21 \pm 0.119 (k \leq 9)$					$1.62 \pm 1.13 (k \leq 13)$					$2.27 \pm 1.656 (k \leq 18)$			
KK_z/KuK_z	$1.11 \pm 0.191 (k \leq 5)$					$1.27 \pm 0.419 (k \leq 9)$					$3.67 \pm 6.91 (k \leq 13)$					$7.69 \pm 11.70 (k \leq 18)$			
$KK_z/\text{Lo}K_z$	$1.88 \pm 1.067 (k \leq 5)$					$8.48 \pm 8.86 (k \leq 9)$					$10.73 \pm 11.79 (k \leq 13)$					$15.6 \pm 16.21 (k \leq 18)$			

从表 2 看出, $k \leq 6$ 时, KK_z 随高度单调增加,很好地反映出 PBL 低层扩散特征; $k \leq 9$ 时, KK_z 随高度不是单调地增加,只有不稳定大气才在 z_i 以内,中性情况处在 z_i 附近,稳定大气则处在 z_i 以上,因此 KK_z 有大的变化范围;在 $k = 11$ 和 12 高度上, KK_z 非常小,这可认为下垫面影响和切变湍流均很小, $k = 13$ 的大 KK_z 则是由切变引起的;在 $k = 18$ 处, KK_z 非常小,而 $k = 14 - 17$ 的 KK_z 大于 z_i 以下的值,说明 PBL 以上 TL 不是整层都有切变湍流. 总之,整个 TL KK_z 随高度分布是非常复杂的,它单调增加只在 PBL 低层,在 PBL 以上或过渡层切变湍流时大时小, KK_z 型能较好地反映这一事实.

KK_z 与其它四类 K_z 型比较(表 2)看出, $k \leq 5$ 的地面边界层, KK_z 、 $\text{Le}K_z$ 、 M_4K_z 和 $\text{Ku}K_z$ 很好地一致, $\text{Lo}K_z$ 明显小于 KK_z ; $k \leq 9$ 的 PBL, $\text{Le}K_z$ 与 KK_z 最接近, M_4K_z 和 $\text{Ku}K_z$ 与 KK_z 平均相差在 30% 以内,但 KK_z 最大, $\text{Lo}K_z$ 变得更小,这与表 1 的结果有好的对应关系; PBL 以上 TL, KK_z 明显大于 $\text{Le}K_z$ 和 M_4K_z ,这主要是由 l_0 选取不同造成的,由 K_z 为常数引起 $\text{Ku}K_z$ 比 KK_z 小很多. 总之, $\text{Lo}K_z$ 最小, KK_z 比其它四类更合理,实例计算,理论分析和实测资料检验均支持这一结果.

四、不同 K_z 型对浓度分布影响

为比较各 K_z 型对 TL 物质垂直交换的影响,将它们应用到 $\text{EM3}^{[9]}$ 对 OSCAR4 作浓度分布的模拟. EM3 在 $\text{RADM}^{[5]}$ 基础上作了 5 个方面的发展:增加垂直网格层次;考虑垂直分层的 K_z 和 K_x (或 K_y)型;采用有植物冠层垂直结构影响的新干沉积速度型;使用数值扩散很小的二阶矩守恒平流格式. EM3 是以求解完善的物质守恒方程为出发点,考虑了化学物质在整个 TL 中经历的三维平流输送、湍流扩散、化学转化、云微物理和干湿迁移全过程,并和目前仍处国际先进水准的 $\text{MM4}^{[6]}$ 进行同步模拟. 因此,和欧洲 1985 年公布的 32 个区域尺度(50—5000 km)的空气污染模式^[1]和 $\text{RADM}^{[5]}$ 相比,它是先进的.

图1的结果看出：两种 K_z 型造成浓度随高度变化有明显差别，5km以下相差很大，最大可达3.5，最小可小于0.5，10km以上，两者差别不大，这很好地反映 LeK_z 和 M_4K_z 只在PBL内有差别的事实，更精细的 LeK_z PBL垂直结构，在浓度模拟中能明显地反映出来；四个不同区域的浓度比差别很大，这说明水平非均匀性的影响在 K_z 中能好的反映出来。

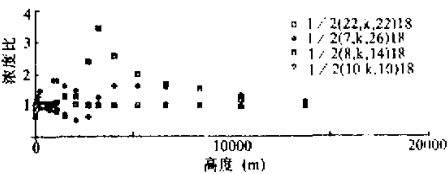


图1 具有 M_4K_z 和 LeK_z 的EM3模拟的 SO_2 浓度比随高度变化

在其它条件一样的情况下（表3），只由 LoK_z 、 M_4K_z 、 LeK_z 和 KuK_z 的不同，可造成浓度有显著差别，比值最大可达17以上，最小为0.49， LeK_z 在 $k \leq 3$ 的低层与其它三类的浓度差别很大，在 $k \geq 7$ 的TL， LoK_z 与其它三类 K_z 的浓度差别也很可观，说明 K_z 廓线对整个TL物质垂直交换是敏感的。

表3 不同 K_z 型模拟的 SO_2 浓度比随高度变化($\psi = 10^\circ$ 、 $T = 30h$)

k	1	2	3	4	5	6	7	9	10	13	16	19
LoK_z/M_4K_z	0.83	0.79	0.66	0.75	0.55	1.74	0.78	0.79	0.52	1.26	1.29	0.77
LoK_z/LeK_z	17.1	3.52	2.07	0.64	0.53	1.73	0.77	0.78	0.51	1.30	1.31	0.76
LoK_z/KuK_z	0.84	0.79	0.67	0.75	0.55	1.73	0.83	0.67	0.49	1.10	1.31	0.67

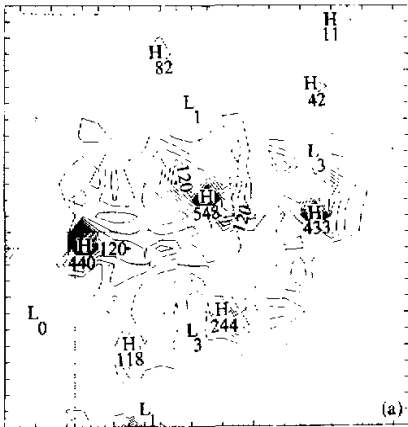


图2a 具有 LoK_z 的EM3模拟的浓度分布

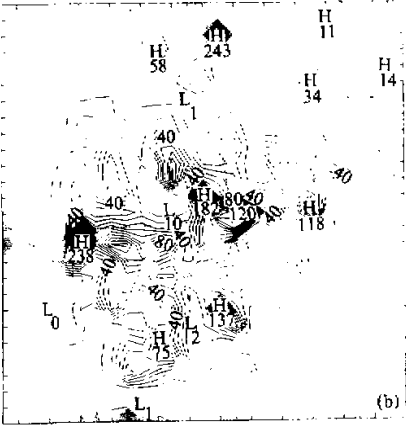


图2b 具有 LeK_z 的EM3模拟的浓度分布

图2a和2b的最大浓度中心比值可大于3，而且 LoK_z 情况基本上都大于 LeK_z 时的值，只是在图2b的 $i = 17$ ， $j = 27$ 附近有一大浓度中心，图2a没有出现，其它的分布

规律基本相同,表明不同 K_z 型对浓度值的大小有明显影响,对分布形状影响不大.

五、垂直运动对物质垂直交换的影响

为了讨论垂直运动对物质垂直交换的作用,分别模拟了有与没有(在物质守恒方程中不考虑垂直速度项)垂直运动时浓度分布.

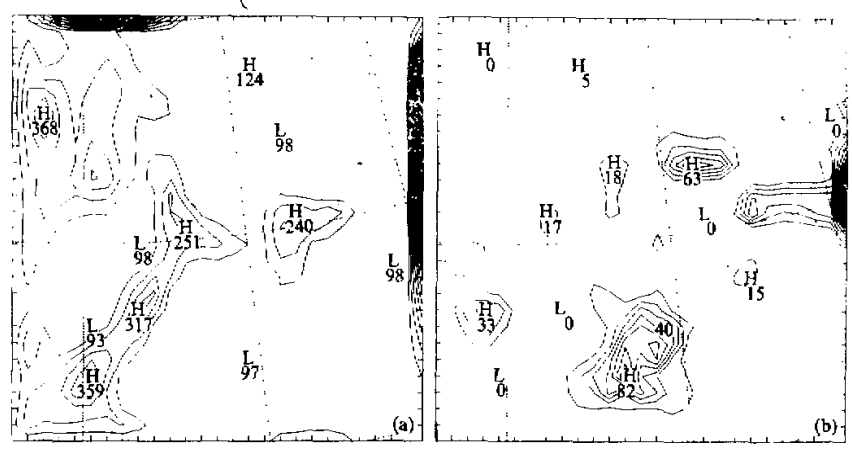


图 3a 垂直运动和 K_z 均为零情况下浓度分布 图 3b 有垂直运动和 K_z 为零情况下浓度分布

图 3a 的最大浓度值为 $0.99 \cdot 10^{-11}$ ppm, 基本上是本底浓度, 增加了垂直运动后的图 3b, 形成彼此独立的浓度中心, 表明垂直运动在水平分布上是间隙的, 最大浓度值已达 $0.16 \cdot 10^{-2}$ ppm, 说明平均垂直运动在物质垂直交换中是重要的.

为进一步分析垂直运动对整个 TL 浓度垂直分布的贡献, 将有与没有垂直运动两情况同一高度上最大浓度的比值给在表 4 中.

表 4 有无垂直运动时最大浓度比值随高度变化

k		1	4	6	9	13	19
$t = 18h$	$C(w)_{\max} \text{ (ppm)}$	$0.34 \cdot 10^{-3}$	$0.96 \cdot 10^{-1}$	$0.64 \cdot 10^{-1}$	$0.14 \cdot 10^{-1}$	$0.54 \cdot 10^{-4}$	$0.36 \cdot 10^{-10}$
	$C(w)/C(o)$	$6.2 \cdot 10^9$	0.86	0.74	0.50	$1.90 \cdot 10^6$	0.9
$t = 30h$	$C(w)_{\max} \text{ (ppm)}$	$0.16 \cdot 10^{-2}$	$0.85 \cdot 10^{-1}$	$0.51 \cdot 10^{-1}$	$0.14 \cdot 10^{-1}$	$0.76 \cdot 10^{-3}$	$0.18 \cdot 10^{-8}$
	$C(w)/C(o)$	$1.62 \cdot 10^8$	0.35	0.35	0.42	$1.48 \cdot 10^7$	25.0

从表 4 看出, $k = 4 - 9$ 之间, 有无垂直运动时浓度接近, 这主要是污染源集中在

这些高度范围内, 但比值小于 1, 表明有垂直运动后, 污染物向上或向下输送, 使源平面上浓度变小, 在 $k=4$ 以下和 $k=9$ 以上, 情况相反, 由垂直运动可使浓度一下增加 8 个量级. 在 $k=19$ 处, $t=18$ 时垂直运动影响不大, 但 $t=30$ 时, 可使浓度增加两个量级.

六、垂直运动和 K_z 对物质交换的相对重要性

PBL 下层的物质通过 K_z 和垂直运动的共同作用输送到整个 TL, 但人们常常将 PBL 以上的 K_z 作用给忽略, 认为只有大面积上升运动才将物质带到 TL 上半部. 本节将探讨这两者在 TL 上部对浓度垂直交换的相对重要性.

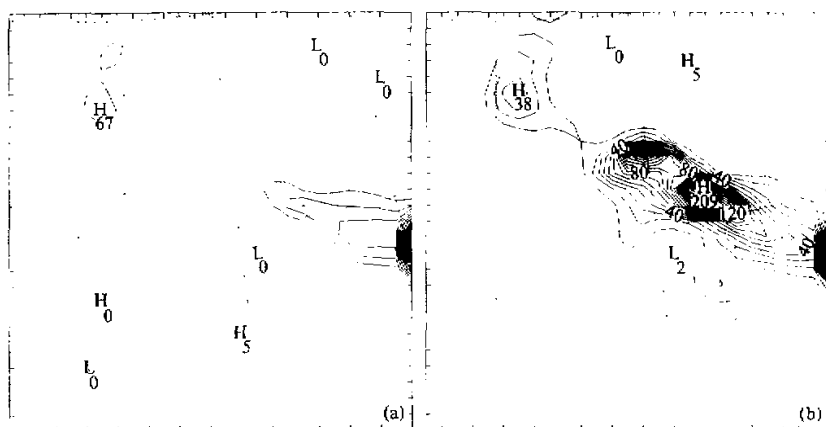


图 4a 有垂直运动和 K_z 为零时浓度分布 图 4b 有垂直运动和 K_z 时浓度分布

表 5 有无 K_z 时最大浓度中心比值随高度变化

k		1	4	6	9	13	19
$t=18h$	$C_{max}(K_z)(ppm)$	$0.17 \cdot 10^{-1}$	$0.19 \cdot 10^{-1}$	$0.18 \cdot 10^{-1}$	$0.72 \cdot 10^{-2}$	$0.23 \cdot 10^{-3}$	$0.4 \cdot 10^{-8}$
	$C(K_z)/C(o)$	50.0	0.20	0.29	0.50	4.26	111.0
$t=30h$	$C_{max}(K_z)(ppm)$	$0.17 \cdot 10^{-1}$	$0.16 \cdot 10^{-1}$	$0.15 \cdot 10^{-1}$	$0.9 \cdot 10^{-2}$	$0.2 \cdot 10^{-2}$	$0.15 \cdot 10^{-5}$
	$C(K_z)/C(o)$	10.6	0.19	0.30	0.63	2.63	850

有(图 4b)与没有(图 4a) K_z 时的浓度中心可有量级上的差别, 分布形状也可大不相同, 图 4b 有四个明显的浓度中心, 而图 4a 只有三个不明显的中心, 图 4b 的最大中心在图 4a 中很不明显, 而且浓度等值线所包围的面积图 4b 远远大于图 4a. 从表 5 看

出,在有源的高度 $k=4.6$ 和 9 处,垂直扩散作用使浓度减小,减小程度随高度增加变慢,这与表 4 结果相比,虽然垂直运动也是使浓度减小,但随高度变化不如 KK_z 作用有规律,在源以上和以下的高度上, KK_z 作用是使浓度增加,而且随高度增加或减小其浓度比值越来越大,表明 TL 上部 KK_z 作用相对比 TL 下半部更重要,TL 上部 KK_z 的作用比垂直运动重要。

七、结 论

五类 K_z 型比较表明, KK_z 比其它四类更合理,能较好地反映 PBL 以下受下垫面影响的高频湍流和 PBL 以上的切变湍流,理论分析,实例计算和实测资料的检验都支持这一事实。

不同 K_z 垂直结构对物质垂直交换有明显影响,它的正确参数化是精确模拟 TL 物质垂直分布的关键之一。

垂直运动对 PBL 下部的污染物输送到 TL 上部和从源向下输送到 PBL 低层均有不可忽略的作用,但空间分布具有间隙性。

垂直扩散对 PBL 低层的污染物输送到 TL 上层具有比垂直运动更重要的作用,而且水平分布是连续的,不能认为 PBL 以上由下垫面影响产生的湍流作用小了,就忽略其扩散的作用。

总之,在区域范围物质分布模拟中,整个 TL K_z 廓线的正确选取,对精确地预测 TL 痕量气体垂直交换是非常重要的。

参 考 文 献

- [1] Van den Hout K. D. and H. Van Dop, 1985, Interregional modelling, *Interregional Air Pollution Modelling, The State of the Art*, Plenum Press, 11—81.
- [2] Panofsky H. A., et al., 1985, *Atmospheric Turbulence, Models and Methods for Engineering Applications*, John Wiley & Sons, 254—260.
- [3] Ching J. K. S., et al., 1984, Observational study of transport in the free troposphere, *Fourth Joint Conference on Application of Air Pollution Meteorology*, AMS, 154—157.
- [4] Louis J. F., 1979, A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-layer Met.*, 17, 182—202.
- [5] Chang J. S., et al., 1987, A three dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and model formulation, *Journal of Geophysical Research*, 92(D12), 14681—14700.
- [6] Anthes R. A. et al., 1987, Description of the Penn State/NCAR mesoscale model version 4 (MM4), NACR/TN-282+STR, NCAR Technical Note, May 1987, 1—66.
- [7] Ku Jia-Yeong et al., 1987, Numerical simulation of air pollution in urban areas: Model development, *Atmospheric Environment*, 21(1), 201—212.
- [8] Lei Xiaoen, 1988, Parameterization of variation of turbulent statistics and wind speed with height in the PBL, *Annual Report, IAP, Academia Sinica*, 7, 248—253.
- [9] Lei Xiaoen and J. S. Chang, 1991, A high resolution model for species exchange within the troposphere and simulation of regional acid deposition process, The 4th Japan-China Symposium of JCSTEA Series, November 27—30, 1991, Tokyo, Japan, *Acta Meteorologica Sinica* (in press).

Parameterization Treatments of Vertical Exchange Model for Chemical Species in the Troposphere

Lei Xiaoen

Julius S. Chang

*Institute of Atmospheric physics, Chinese
Academy of Sciences, Beijing, 100029*

(ASRC, SUNYA, Albany, N. Y., 12205, U.S.A.)

Abstract

In order to study the contributions of the parameterization forms of the variation of vertical eddy diffusivity (K_z) with height in the troposphere (TL) to the vertical exchange of chemical species, comparative numerical simulation for 5 different K_z patterns is carried out with "high resolution model for species exchange within the troposphere" (EM3) and OSCAR 4. The results show that both high frequency turbulence influenced by the relative motion of the earth's surface in planetary boundary layer (PBL) and various shear turbulence derived from dynamical and thermodynamic processes in TL above PBL are better described by KK_z pattern; both vertical motion and K_z play an important role in transporting species from the lower PBL up to the upper TL and from the source level down to the bottom PBL; the vertical motion is intermittent in temporal and spatial distribution, but K_z is continuous in the whole TL. K_z can make greater contribution to vertical exchange of species than the mean vertical motion.

Key words: Vertical diffusivity; EM3; Vertical motion; PBL vertical structure; Vertical exchange for species.