

在大城市上空大气边界层特征

Н.В.Клепикова等

提要 用大气边界层模式定量地估计城市建筑物的影响,考虑了决定城市大气中杂质扩散的气象参数的动力和热力作用。对莫斯科的边界层的计算,得到了具体日期的粗糙度、大气边界层外部和内部的气象参数以及气象要素和边界层湍流特征的垂直剖面。给出了在城市建筑物的影响下热状况和环流状况参数变化的定量估计。

为了确定人类活动对大城市空气的污染影响,试图利用定常和水平均一条件下的大气边界层模式描述在城市建筑物上空形成的大气边界层特征。以近地层和高空气象的常规观测资料作为输入信息。用粗糙度和近地层温度随地点而变的某种表面来模拟城市,其上形成大气边界层。为了应用文献[3]中的大气边界层模式,将城市区域分成若干子区域,每个子区域都有本身近似一致的近地层温度和建筑物特征(楼层和楼房分布密度)。建筑物的类型确定了该区域的粗糙度大小。

假定按照粗糙度和温度来分区,两者是一致的。根据文献[5],在粗糙度约为1米,且其空间变化也是这样的量级时,单元子区域的线性长度为5—10 km就能于任何气流方向下,使边界层大气结构同该区域的粗糙度和近地层温度相适应。因而可以独立地在通过各子区域中心的垂线上作边界层大气特征的定量估计。以下述方式将这种方法用于莫斯科(城市规模 40×60 km);在每个市区气象测站的周围,确定建筑物的类型,并计算粗糙度。用气象站测量的近地层温度作为站点所在子区域的温度。不受城市建筑物扰动的气流的垂直特征利用最近的无线电探空资料来决定。作为初始信息利用在莫斯科市区范围内的8个气象站和在城市迎风方郊区、处在环形公路外的一个9号站以及长池探空站的测量资料。我们的计算是针对特选

的6天进行的,当时有卫星照片给出的莫斯科空气污染资料。

1. 计算方法

对每个单元子区域的边界层特征的数值计算是根据文献[3,4]叙述的模式进行的,计算中大尺度气流向模拟的莫斯科地区的表面流来。

计算方法包括:

1) 根据相似理论(Обухов-Монин),考虑大气和下垫面的动力和热力相互作用,确定近地层参数的垂直剖面;

2) 计算从近地层上界到边界层上界的风速分量(u, v),方法是求解含有斜压作用、垂直湍流交换和柯氏力的运动方程的数值解;计算湍流强度(b)和湍流耗散(ϵ),其方法是解湍流动能平衡和耗散速率方程,考虑了平均运动能转变为乱流能量,浮力做功和乱流涡旋动能的垂直扩散及其耗散为热能;由 Колмогоров 关系求取乱流交换系数(K_z);根据湍流热通量的内插表达式确定温度(T);

3) 根据外部无量纲参数(罗斯贝数

$$Ro = \frac{|v_{gs}|}{f z_0}, \text{层结参数 } S = \frac{g}{\theta} \delta \theta_h / (f / |v_{gs}|),$$

$$\text{斜压参数 } \lambda_x = \frac{x^2}{f} \frac{\partial v_{gs}}{\partial x}, \lambda_y = -\frac{x^2}{f} \frac{\partial u_{gs}}{\partial x} \text{ 确定}$$

内部无量纲参数(地转摩擦系数 $x = v_* / x$ $|v_{gs}|$, 近地层风向和地转风风向的偏角,

层结参数 ($\mu_0 = -x^2 \frac{g}{\theta} Q_0 / (c_p \rho f \cdot v_*^3)$); 计算中利用多项式关系以及用外部有量纲特征量(地转风速 v_g , 位温降 $\delta\theta$, 粗糙度 z_0 和科氏参数 f) 计算的内部积分值(动力速度 v_* , 近地层乱流热通量 Q_0 , 边界层高度 H)。

需要指出, 上面所说的计算方法已考虑了主要的物理因子并根据常规的气象站和无线电探空观测来计算边界层内部的结构特征。

在按照边界层模式计算之前, 需预先计算以下的输入参数;

- 近地层地转风分量(u_{gs}, v_{gs});
- 边界层上界附近的地转风分量(u_{gH}, v_{gH})和自由大气地转风分量(u_{gf}, v_{gf});
- 近地层的位温降($\delta\theta_k$);
- 边界层的位温降($\delta\theta_H$)。

上述这些参数根据下面高空气象探测初始资料计算:

- 在百叶箱高度(z_s)上的温度, 在风标高度(z_a)上的风速, 风向;
- 在近地层顶附近(z_2)温度($z_2 \approx 50, \dots, 100$ 米);
- 在边界层上界附近(z_3)的温度、风速和大气风向(高度 $z_3 \approx 500, \dots, 1000$ 米)和自由(z_4)的温度、风速和风向(高度 $z_4 \approx 1000, \dots, 1500$ 米)。

在 z_2, z_3, z_4 高度上的气象要素值由长池探空站无线电探测资料选取。

我们来研究如何由初始的高空气象情报作为边界层模式的输入参数。

近地层地转风可由三种方式来确定: 1) 根据近地层气压场; 2) 根据 z_a 高度实测的风; 3) 由实测的 z_3 和 z_4 高度上风速分量外推 z_a 高度上的风。

由近地层气压场计算的地转风速表明, 相邻台站的气压差值与测量精度可比拟, 所以在所研究的尺度内水平气压梯度力计算的误差实际上与地转风的数值相当, 因此按照

近地层气压场计算的地转风与实际风并不符合, 有时得到不真实的地转风速值。这种方法在估算近地层地转风时并不采用。为了根据风标高度(z_a)的风速值来确定地转风, 我们利用小高度上风速的对数变化率

$$|v(z_a)| = x |v_{gs}| \ln \frac{z_a}{z_0} \quad (1)$$

利用文献[4]中得到的地转摩擦系数 x 与罗斯贝数和层结参数的关系, 得到确定地转风速的超越方程

$$|v_{gs}| = |v(z_a)| \left\{ [a_0 + a_1 \lg R_0 + a_2 S + a_3 (\lg R_0)^2 + a_4 (\lg R_0) S + a_5 S^2] \ln \frac{z_a}{z_0} \right\} \quad (2)$$

系数 $a_i (i=1, 2, \dots, 5)$ 的值可从文献[4]中查出。

方程(2)用逐步逼近方法求解。在计算 R_0 和 S 时, 在一级近似情况下, $|v_{gs}|$ 可以用 $|v(z_a)|$ 代替。这个方法对于求风标高度(z_a)的实际风速值有很高的灵敏度, 因此在测量 $V(z_a)$ 时, 要求很高的精度。在城市内测量到的近地层风速与气象观测点附近的建筑物特征有关, 因而第二种方法的应用受到了限制。

在现在我们的工作中, 是用线性外推确定近地层风速。因为自由大气中实际风接近地转风, 因此采用 $u_{gH} = u(z_3), v_{gH} = v(z_3), u_{gf} = u(z_4), v_{gf} = v(z_4)$, 进而从高度 z_3 和 z_4 线性外推到高度 z_a 计算近地层风速分量 u_{gs} 和 v_{gs} 。在该方法中, 假设 $\frac{du_g}{dz}$ 和 $\frac{dv_g}{dz}$ 的数值在 $OT\%$ 层中是不变的, 而且在自由大气中非地转偏差很小。应该指出, 当气压场变化激烈时上述假定可能不满足。在我们研究的例子中, 近地层的计算地转风场和实际的相符, 而此时非地转偏差值与地转风的数值可比拟。

利用百叶箱的温度 $T(z_s)$ 和探空的第一个特性高度的温度 $T(z_2)$ 确定近地层的位温差。很多情况下表明, 高度 z_2 实际上可与近地层上界有显著的差别。当该层的厚度($z_2 -$

z_s)超过300米时,根据 $T(z_2)-T(z_s)$ 计算的层结参数与实际情况是不同的,近地层应取比较稳定的层结。为了避免这一温差,利用下面的式子来计算位温差:

$$\delta\theta_h = T(z_2) - T(z_s) + \gamma_R(z_2 - z_s)$$

式中,当 $(z_2 - z_s) < 300$ 米时, $\gamma_R = \gamma_a$; 当 $(z_2 - z_s) \geq 300$ 米时, $\gamma_R = 0.65 \times 10^{-2} \text{ K} / 100 \text{ 米}$ 。

为验证上述方法的可靠性,我们计算2—100米和2—1000米两层内的位温垂直梯度,并利用 $\gamma_R = \gamma_a$ 。在2—100米层内136例不稳定层结情况中,在2—1000米层内仅出现47例为负位温差,也就是低层的层结特征和整个边界层是相符的。如果在2—1000米层内位温降用 $\gamma_R = 0.65 \times 10^{-2} \text{ K} / 100 \text{ 米}$ 来计算,那么该位温降在136例情况中就有93例是负的,它们在2—100米层中层结是不稳定的。 γ_R 的值作过变动,结果上述数值是最好的。在边界层的上界附近位温降 $\delta\theta_H$ 由 z_3 和 z_4 高度上的温度值来计算。

对粗糙度,可以用下面两种方法综合确定:

——根据城市房屋特征(平均高度、房屋之间的距离等)^[1,5];

——根据低高度上的风速剖面在已知地转风的情况下用(1)—(2)式来计算,此时地转风可以设想为整个城市区域都是相同的。对于莫斯科,采用文献[1,5]中的方法,得到粗糙度 z_0 为米的量级。但当这样的 z_0 代入(1)式中计算时,得到的风速比实测偏低。看来这种大的粗糙度值可以说成是中尺度粗糙度。而风速是由安装风标的场地的粗糙度决定的。因此按照城市建筑物的特征确定的 $\tilde{z}_0$ 。应乘上修正系数 $m < 1 (z_0 = m \tilde{z}_0)$ 。 m 是这样确定的:使风标高度的计算风速和实测风速符合很好。用这种方法确定的粗糙度值反映了城市建筑的作用和风在城区的分布。

在边界层模式中计算:

——积分参数(动力速度、近地层湍流热通量、近地层实际风向和地转风的偏角以

及边界层高度);

——各个风速分量的垂直剖面、湍流强度和交换系数、耗散速度和湍流摩擦应力的各个分量。

因此,研制的边界层模式适于估算城市建筑物对空气来流的动力和热力影响定量特征。

2. 气象资料的分析

在我们研制的方法中,城市对边界层的影响是通过热力和动力作用完成的。热力影响由边界层下部层结变化计算,也就是依据 $\delta\theta_i = T(\tilde{z}) - T_i(z_s) + \gamma_R(\tilde{z} - z_s)$,其中 $i = 1, 2, \dots, 8$ (气象测站号码), $T(z)$ 是在城市热力影响消失了的高度上的温度。此时城市迎风面外部气象站的 $\delta\theta_9$ 的值和城市内部气象站 $\delta\theta_i (i = 1, 2, \dots, 8)$ 之间的差给出了城市对边界层层结影响的定量估计。

在表1中列出 $\Delta T_i = \delta\theta_9 - \delta\theta_i = T_i(z_s) - T_9(z_s)$ 的温度差,其中正值表示层结朝不稳定趋势变化,即减小了稳定度(不稳定度增长)。莫斯科的最大热岛效应是在市中心的5号站。在表1的最后一列引入 $\Delta\gamma = \gamma_9 - \gamma_s$,这是5号站和城市迎风郊外站(9号)的垂直温度梯度差。在文献[2]中利用30年的观测序列,表1是很小的样本,两者相符,证明本文研究所用的资料具有代表性。

在实际的近地层风场中表现了城市建筑物的动力效应,在大多数情况下,城市内部的测站风速比郊外测站的要小。在莫斯科中心Балчуг(5号)站,这种特征更明显,一般的郊外减小2—3米/秒,这与其周围的粗糙度最大是一致的。从图1可见,莫斯科中心粗糙度的最大值是1米左右,郊外减少到0.2米。

从分析得到的结果看出,根据近地层风计算的地转风, v_g 的值在莫斯科地区有较大的波动,我们认为,这些波动主要是由于测风误差和气象测站的代表性所造成的。因此为了确定近地层的地转风,需将探空高度(z_3 和 z_4)的风速线性外推。用这种方法得到

表 1 城市热源效应的定量估计
 $(\Delta T_i = T_i(z_s) - T_g(z_s), i = 1, 2, \dots, 8)$

日 期	时间, 时	ΔT_1	ΔT_2	ΔT_3	ΔT_4	ΔT_5	ΔT_6	ΔT_7	∇T_8	$\Delta \gamma_8$
8.03.85	06	1.5	2.2	-0.1	1.2	1.7	-1.7	2.9	-4.0	0.9
8	18	3.4	4.6	2.6	-1.8	4.8	1.6	3.9	-1.7	2.8
25	00	3.2	2.8	1.0	-0.6	4.3	1.2	3.8	-1.3	1.7
25	12	2.2	2.0	2.2	2.1	1.9	0.6	1.6	1.1	0.6
4.08.85	23	1.4	1.1	1.4	2.1	4.3	1.2	4.2	-1.2	1.7
5	05	1.2	1.4	1.4	1.6	1.3	0.6	1.1	0.6	0.5
5	11	0.3	0.2	0.3	0.5	0.9	-0.2	-0.2	0.0	0.4
5	17	1.1	0.2	1.1	0.8	1.6	0.1	0.6	0.2	0.6
15.05.85	17	2.1	1.2	2.3	2.3	3.5	2.2	2.3	2.6	1.4
19	05	0.8	1.5	0.3	1.4	1.0	0.5	-1.7	1.6	0.5
19	11	-1.1	-0.6	-1.6	0.3	-0.3	-0.9	-1.0	-0.9	-0.1
24.03.82	00	5.5	4.4	3.2	2.5	6.4	0.1	5.4	1.5	3.2
14.05.85	23	2.5	2.3	2.1	1.8	2.7	-0.4	2.3	-0.5	1.1
15	05	0.4	0.3	0.6	0.5	1.3	—	0.3	1.2	0.6
18	23	1.6	1.8	2.1	2.9	3.0	2.8	1.7	1.9	1.2

* 表 $\Delta \gamma = \gamma_5 - \gamma_8, \gamma$ —层结参数

的地转风速与(在Останкина)350米高度上的风速相符。当地转风速为15~25米/秒时,在Останкина气象塔实测的风速值大约减小到1/2~1/3,这是由于边界层顶高度比测量高度高得多;当地转风速为5~10米/秒时,在305米高度气象塔上实测风速接近于地转风速,此时的边界层顶高度也接近于测量高度。利用线性外推方法的合理性也被近地层风速的计算值和测量值的对比所肯定。

3. 分析城市边界层的计算特征

将计算的风速和测量的近地层风速(莫斯科地面站资料)以及垂直剖面(在Останкина塔的资料)作比较来评价模式的可靠性。作为例子,在图1上画出计算的和测量的风速模量的垂直剖面。高于边界层的高度风速的计算模量是根据无线电探空资料用线性内插得到的。对计算结果的分析表明,在边界层范围内,风速模量的计算误差一般不超过2米/秒。

为了阐明城市对风状况的影响,我们来分析城市区内风速的垂直剖面。在计算中发现,多数情况下,城市中心部分(Балчуг站)

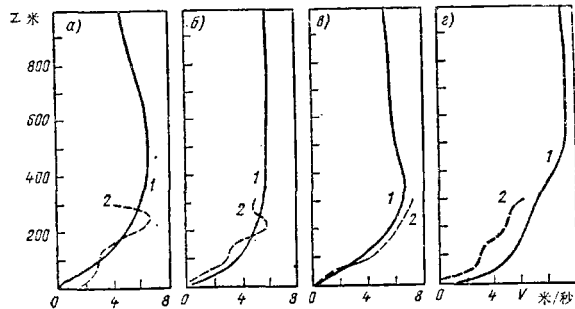


图 1 垂直风速剖面。1—在3号站计算值。2—在气象塔(Останкина)上测量的值。а) 1985年3月8日18时; б) 1985年3月25日00时; в) 1985年8月4日23时; г) 1985年8月5日17时

风速减小,而且一般这种减小一直延伸到边界层的整个高度,但其减小值随高度减小。同时随着气流向城市中心靠近,流线向左偏移。

再来分析城市建筑物对边界层的热力作用。在表2中,对全部分析的例子列出了外部层结参数(S)和内部层结参数(μ)的最大值和最小值以及近地层湍流热通量(Q_0)。比较城市内部和城市外部气象测站计算得到的热力参数可以观测到边界层的结构有实质性差异。从表2可以看出,外部层结参数(S)

表 2 积 分 热 力 学 特 征

日 期	时间	S						μ_0						Q_0 (伏特/米 ²)					
		max	站号	min	站号	迎风站		max	站号	min	站号	迎风站		max	站号	min	站号	迎风站	
85年3月8日	06	38.4	8	8.1	7	54.0		15.3	8	4.5	7	20.7		-48.0	7	-168.0	8	-156.0	
	8	61.6	4	9.9	5	47.4		18.6	4	4.4	5	15.7		-24.0	5	-60.0	8	-48.0	
	25	103.5	8	50.3	5	91.1		20.2	8	12.2	5	18.9		-12.0	5	-24.0	3	-12.0	
	25	6.8	6	-0.9	3	9.8		3.3	6	-0.5	3	4.6		2.4	3	-12.0	8	-12.0	
8月4日	23	74.3	8	30.5	5	64.7		17.2	8	8.9	5	16.0		-12.0	1	-24.0	8	-24.0	
	5	7.3	8	-20.9	4	24.3		2.1	8	-20.9	4	5.0		7.2	3	-1.2	8	-1.2	
	5	3.2	6	-6.6	5	1.4		1.4	6	-3.7	5	0.7		12.0	5	-2.4	6	-1.2	
	5	9.6	6	0.9	5	10.2		4.2	6	0.4	5	4.6		-2.4	5	-12.0	4	-12.0	
5月15日	17	4.4	2	-4.3	5	8.9		2.4	2	-2.3	5	4.6		24.0	5	-24.0	2	-36.0	
	19	26.3	7	-12.2	8	6.4		8.0	7	-9.6	8	2.7		24.0	8	-12.0	7	-5.2	
	19	-0.4	3	-21.5	4	-18.2		-0.2	3	-20.3	4	-16.9		36.0	4	0.5	3	24.0	
82年3月24日	00	54.4	6	-3.2	5	55.4		14.9	6	-1.8	5	15.4		12.0	5	-36.0	6	-24.0	
85年5月14日	23	22.2	8	9.4	5	20.2		9.0	8	4.2	5	8.7		-36.0	5	-72.0	8	-60.0	
	15	05	3.9	2	-1.3	5		5.5	1.8	2	-0.6	5		2.6	12.0	5	-12.0	1	-24.0
	18	23	26.2	1	-12.0	5		70.1	5.4	1	-9.9	5		9.9	3.6	5	-12.0	8	-1.2

的最小值出现在5号站(市中心)或城市中心附近的其它站。最大值出现在城市的迎风面站或城市边界附近。在很多例子中,在5号站出现不稳定层结($S < 0$),而城市郊区站相应地是稳定层结。

层结内参数 μ 也有类似特性。在稳定情况下,城市中心台站的内参数 μ 比城市近郊地带的值小得多,此外在城市中心出现了负的 μ 值,其模量可达20,这是对对应着不稳定

的情况。

在城市中心,大多数情况下,湍流热通量是正确的,这表明了城市向大气传送热量,其量级可达40瓦/米²。

为了确定城市对大气边界层内部结构的动力影响,我们来研究动力速度(V_*)、边界层高度(H)和湍流交换系数最大值($K_{\max}$)的空间变化。城市的建筑物应该引起较强的湍流混合,表现为愈向市中心接近,湍流交换

表 3 积 分 动 力 学 特 征

日 期	时间	V_* (米/秒)						H (米)						$K_{\max}$ (米 ² /秒)					
		max	站号	min	站号	迎风站		max	站号	min	站号	迎风站		max	站号	min	站号	迎风站	
85年3月8日	06	0.79	3	0.64	1	0.72		852	3	481	1	717		18.2	3	10.1	8	15.1	
	8	0.49	3	0.37	4	0.37		538	7	320	4	343		8.2	5	2.7	4	2.9	
	25	00	0.26	5	0.18	8		268	5	156	8	153		2.1	5	0.8	8	0.7	
	25	12	0.47	5	0.41	6		906	3	689	6	597		18.1	3	9.7	6	7.5	
85年8月4日	23	0.31	5	0.23	8	0.22		361	5	218	8	210		3.6	5	1.4	8	1.3	
	5	05	0.12	5	0.10	8		181	5	135	6	111		2.2	4	0.6	6	0.3	
	5	11	0.32	5	0.28	8		595	5	471	6	451		12.8	5	6.6	6	6.0	
	5	17	0.46	5	0.40	2		807	5	614	6	557		15.3	5	8.1	6	6.9	
85年5月15日	17	0.68	5	0.59	2	0.56		618	5	473	2	413		29.8	5	16.1	2	12.6	
	19	05	0.33	5	0.26	7		545	5	316	7	397		12.6	8	2.8	7	4.5	
	19	11	0.29	5	0.26	2		489	5	428	1	438		15.8	4	6.7	3	13.5	
82年3月24日	00	0.38	5	0.29	6	0.27		647	5	281	6	253		11.7	5	2.2	6	1.8	
85年5月14日	23	0.61	5	0.53	4	0.51		658	5	525	4	599		16.3	5	10.4	6	9.1	
	15	05	0.68	5	0.59	4		420	5	330	4	296		25.5	5	15.4	2	12.7	
	18	23	0.13	5	0.10	8		193	5	126	1	85		1.9	5	0.4	1	0.2	

(下转36页)

(上接封三)

愈强。在表 3 中列出了边界层积分动力学特征的变化范围。正如表上见到的, V_* 最大值在城市边界附近和界外出现, 那里的动力速度变化范围可达本身的量级。而动力速度变化范围的基本值是其最大值的 20~30%。

按照模式的估算, 城市建筑物的动力作用和热力作用的共同影响在市中心可达 1 公里高度, 其最小值多数情况出现在郊区。

湍流交换系数的最大值出现在市中心的 Балчуг (5 号) 站, 一般不超 $30 \text{ m}^2/\text{s}$ 。在市区边界上或界外的站该值小于 $10 \text{ m}^2/\text{s}$ 。分析表明, 随着向市中心靠近, 湍流混合明显加

强。

上述模式把城市看作是由不同粗糙度和不同近地层温度的地段组成的表面, 能反映实际城市建筑物的动力和热力影响的基本规律。利用模式计算给出了在城市建筑物上空边界层的热力、动力和风特征分布的一级近似的数量估计, 从而可以利用本文的方法模拟莫斯科上空人为源排放出来的杂质在空气中的扩散情况。

参考文献(略)

曲学实译自 «Метеор. и Гидр.» 1990, No. 7
虞静明、胡志晋校