

自由大气的扰动对地形大气边界层内参数的影响

何建中

(南京气象学院)

摘要 用大气边界层运动方程的数值积分方法,研究了自由大气(边界层顶)风水平非均匀、非定常扰动对地形边界层的内参数 u_* / G (u_* 为摩擦速度, G 为自由大气风速)的影响。结果表明:在大尺度模式边界层参数化问题中,由于大尺度风压场的非定常与水平非均匀性,直接引用定常、水平均匀的经典阻力定律有误差,应考虑非定常、非均匀性及地形作用的修正。

关键词 扰动,内参数,边界层,地形

在大尺度模式中,一般由参数化引入边界层的影响,将边界层的内参数即各种湍流通量(动量通量以摩擦速度 u_* 表之)用大尺度模式中的参数表示。然而,已有的结果对于边界层上界的处理都是把在边界层顶的物理量认为是一个固定的值,实际上作为边界层以上的自由大气也是非定常,水平非均匀的,它也要影响边界层的结构及其内参数。正如 Bussinger⁽¹⁾ 所说:“大尺度系统的变化对边界层的作用是很重要的。”文献[2—4]考虑了自由大气风作非定常扰动时对边界层内参数的影响,但局限于一维模式,不能考虑自由大气风速的水平非均匀性及地形的影响。

本文利用包含地形的二维边界层模式,进一步讨论自由大气风水平非均匀、非定常扰动及地形对中性、正压边界层内参数 u_* / G 的影响,并讨论它们与经典理论⁽⁵⁾ 的区别,从而改进对边界层内参数及参数化的认识。

1 基本方程与数值积分

1.1 基本方程

设大气中性,大气运动南北均匀。为引入地形作用,对垂直坐标 z 进行变换

$$\bar{z} = H[z - z_g(x)]/[H - z_g(x)] \quad (1)$$

其中, $z_g(x)$ 为地形海拔高度, H 为模式顶高度。在 Boussinesq 流体假定下,变换后 $\bar{z}$ 坐标系中的边界层运动控制方程组可简化为

$$(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial \bar{z}})u = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + f v + \frac{g(\bar{z} - H)}{H} \frac{\partial z_g}{\partial x} + (\frac{H}{H - z_g})^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} (K \frac{\partial u}{\partial \bar{z}}) \quad (2)$$

$$(\frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + \bar{w} \frac{\partial}{\partial \bar{z}})v = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - f u + (\frac{H}{H - z_g})^2 \frac{\partial}{\partial \bar{z}} (K \frac{\partial v}{\partial \bar{z}}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (\frac{H - z_g}{H} u) + \frac{\partial}{\partial \bar{z}} (\frac{H - z_g}{H} \bar{w}) = 0 \quad (4)$$

$\bar{w}$ 为 $\bar{z}$ 坐标下的垂直速度,有下列关系成立

$$\bar{w} = \frac{wH}{(H - z_g)} + (\frac{\bar{z} - H}{H - z_g}) u \frac{\partial z_g}{\partial x} \quad (5)$$

方程组中 K 为湍流交换系数,其他为通用符号。为闭合方程组, K 用下述常用形式^[6]

$$K = l^2 [(\frac{\partial u}{\partial \bar{z}})^2 + (\frac{\partial v}{\partial \bar{z}})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$l = K_0 (\bar{z} + \bar{z}_0) / [1 + K_0 (\bar{z} + \bar{z}_0) \lambda^{-1}] \quad (7)$$

$$\lambda = 0.0063 u_* / f \quad (8)$$

$$u_* = (K | \frac{d v}{d \bar{z}} |)^{1/2}_{\bar{z}=\bar{z}_0} \quad (9)$$

K_0 为卡门常数,取 0.4; $\bar{z}_0$ 为近地层某高度; $\bar{z}_0$ 为地面粗糙度,取 0.01μ 。

气压梯度力采用如下方式求得:因为在自由大气中认为摩擦力消失,所以方程(2)与(3)式变成

$$(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x})^H = \frac{\partial u^H}{\partial \bar{z}} + u^H \frac{\partial u^H}{\partial \bar{z}} - f v^H \quad (10)$$

$$(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y})^H = \frac{\partial v^H}{\partial \bar{z}} + u^H \frac{\partial v^H}{\partial \bar{z}} + f u^H \quad (11)$$

式中上标“H”表示边界层顶的量,垂直平流项比其他项小得多^[7],故略。

考虑正压边界层,即有气压梯度力不随高度变化,故由(10)、(11)两式可将边界层内任意高度上的气压梯度力表示为上界风速的函数,以得正压边界层的运动方程。

1.2 边界条件与初始条件

$$1) \text{ 下边界: } \bar{z}=0 \quad (z=z_g(x)) \quad u=v=\bar{w}=0 \quad (12)$$

$$2) \text{ 上边界: } \bar{z}=H \quad (z=H) \quad u=u^H=10\text{m/s}$$

$$v = v^H = A \cos 2\pi (\frac{x}{L} \pm \frac{t}{T}) \text{m/s} \quad (13)$$

(13)式中, A 、 L 、 T 分别代表扰动振幅、波长和周期。(13)式既可用作上边界条件,也可以代入(10)、(11)式计算气压梯度力,即对边界层而言,气压场为已知。

3)侧边界: $x=0$, u 、 v 满足(2)、(3)式去掉平流项时的闭合方程组。

1.3 差分与计算方法

因边界层下部物理量变化比较剧烈,故取下密上疏的非等距网格,其网格距高度大致为对数加线性分布(如表 1)。

表 1 各网格距高度的位置

No(J)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
$\bar{z}(m)$	0.0	0.25	0.5	1	2	6	16	32	64	100	200	300	400	500	600	800	1000	1200

水平网格间距取等间距 $\Delta x = 20\text{km}$

地形 $z_g(x)$ 如图 1 所示,即将区域分为:山前 ($0 < x < x_1$)、上坡 ($x_1 < x < x_2$)、山顶 ($x_2 < x < x_3$)、下坡 ($x_3 < x < x_4$) 及山后平地 ($x_4 < x < x_5$),取上、下坡坡度一致。差分格式:时间导数用前差, $\Delta t = 5\text{min}$ 。显见时、空步长满足线性计算稳定性条件。垂直平流项和扩散项采用隐式差分,水平平流项采用显式迎风差分格式。

用追赶法求解差分方程组。

取(2)一(4)式的定常解作为初始风场,其相应边界条件令(13)式中 $t=0$ 时即可得。用逐次逼近的迭代法求其定常解,取精度为前后两次迭代的 K 相对误差不大于 10^{-5} 。

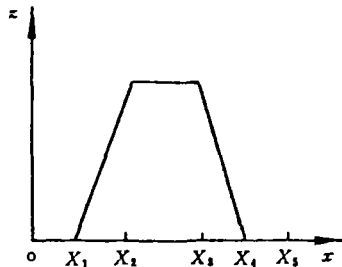


图 1 地形 $z_g(x)$ 的分布

2 结果与分析

2.1 无地形时的结果

为突出自由大气风水平非均匀、非定常扰动对内参数 u_*/G 的影响,暂不考虑下垫面地形的影响,即设 $z_g(x)=0$,此时, $\bar{z}=z$, $\bar{w}=w$ 。

2.1.1 水平非均匀对 u_*/G 的影响

图 2、图 3 分别为上界风速扰动与上界风速的涡度空间分布。图 4、图 5 则是定常条件下,不同扰动的波长与振幅下 u_*/G 的空间分布(定常条件排除了非定常扰动的影响)。

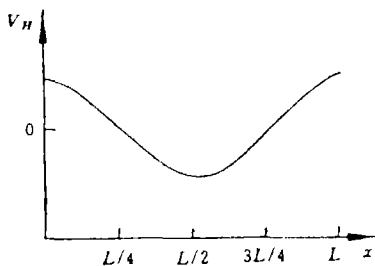
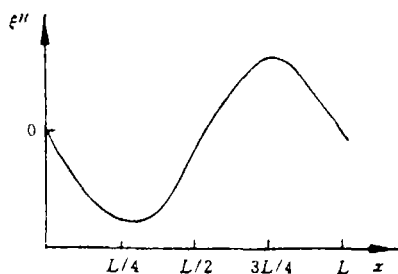
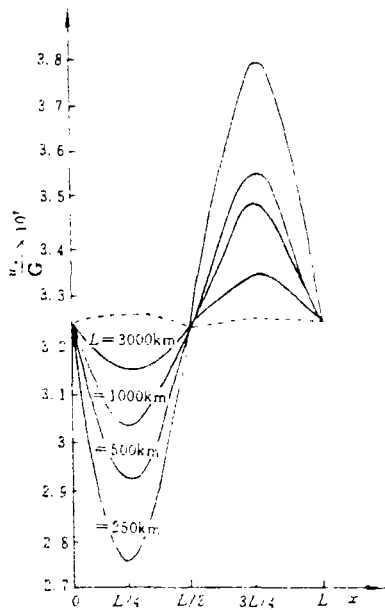
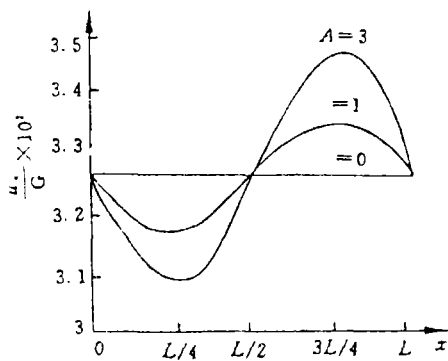
图2 上界风速 V_H 扰动的空间分布

图3 上界风速涡度的空间分布

图4 $\frac{u_*}{G}$ 在一个波长内的水平变化虚线为均匀扰动,实线为非均匀扰动 ($A=3$)图5 $\frac{u_*}{G}$ 在不同振幅 A 时的水平分布 $L=1000\text{km}$

由此可见:(1) $\frac{u_*}{G}$ 随空间分布与上界风速扰动一样为波动状态,但位相与上界风速扰动位相差 $\pi/2$,其位相与上界风速的涡度一致。正涡度区的 u_*/G 值(对应波峰区)比负涡度区的 u_*/G 值(波谷区)大。且正涡度最大处, u_*/G 最大;负涡度最大处, u_*/G 值最小。(2)在正涡度区,波长 L 大或振幅 A 小(G 小)时, $R_0(G/fL)$ 数小,其 u_*/G 值小;波长 L 小或振幅 A 大(G 大)时, $R_0(\frac{G}{fL})$ 数大,其 $\frac{u_*}{G}$ 值大。即在正涡度区, $\frac{u_*}{G}$ 随 G 增加而增加,而负涡度区则相反。由经典的水平均匀条件下的阻力规律知, $\frac{u_*}{G}$ 随 $\frac{G}{fz_0}$ 增加而减小,即随 G 增加而减小^[35]。由此可见,考虑了水平非均匀影响后,由于平流作用,经典的阻力规律是不适用

的,必须考虑水平非均匀影响的修正。(3)在上界风速 G 相同处,其 $\frac{u_*}{G}$ 值并不相同(正涡度区值大些,负涡度区则小些)。而经典的阻力规律⁽⁵⁾是在相同的 G 下 $\frac{u_*}{G}$ 值不变。由此再次说明了均匀条件下所得结果应考虑其水平非均匀影响修正的重要性。(4)当考虑水平非均匀影响后, $\frac{u_*}{G}$ 的变化不仅仅是 $\frac{G}{fz_0}$ 数或 G 所决定的,而是风压场共同变化综合作用的结果。由于上界风速与气压梯度力随空间变化,并且两者的增减都会造成近地处风速及 u_* 的增减,而两者的增减是非同步的,故 u_* 的增减是气压梯度力增减程度与上界风速增减程度及方程中各力(包括惯性平流项)产生的综合结果, $\frac{u_*}{G}$ 还取决于 u_* 与 G 变化的相对程度。由于本文中风速扰动引起的总风速 G 变化不大,故相对而言, $\frac{u_*}{G}$ 的变化主要受 u_* 的变化(特别是气压梯度力)所控制。从均匀时的结果也可以看出 G 变化引起 $\frac{u_*}{G}$ 的变化较小。非均匀与均匀条件下相比气压梯度力的差异主要体现在扰动方向上增加了一项非均匀项($u'' \frac{\partial v''}{\partial x}$),即由(11)知, $-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = fu''(1 + \frac{\xi''}{f}) = fu''(1 + Ro\xi')$ 。其中 ξ' 为无量纲涡度。由此可见,气压梯度力正涡度区($\xi' > 0$)大于负涡度区($\xi' < 0$)。故正涡度区相应风速及风速垂直切变比负涡度区大,从而自上向下的动量输送大, u_* 就大。而 G 变化不大,故 u_*/G 大,且其 $\frac{u_*}{G}$ 大小与 Ro 数、 ξ' 有关。而 Ro 数作用依赖于不同的涡度区(ξ'),故反映在波长 L 及振幅 A 上,正、负涡度区的结果是相反的。而以往经典理论则在 $Ro=0$ 条件下,即上界风速无扰动条件下成立,故 $\frac{u_*}{G}$ 仅与 G 的大小有关,而与平流及风速 G 的水平变化无关。

2.1.2 非定常扰动对 $\frac{u_*}{G}$ 的影响

图 6、图 7 给出了 $x=0$ 处,不同扰动振幅、周期下 $\frac{u_*}{G}$ 的时间变化($x=0$ 处排除了水平非均匀的影响)。可见:

(1) $\frac{u_*}{G}$ 也随时间呈周期变化,周期同上界风速扰动 V_H 的周期,但与上界风速扰动位相差 $\frac{\pi}{2}$,与上界风速的时变项($\frac{\partial v''}{\partial x}$)位相一致。 $\frac{u_*}{G}$ 变化在 $(0, \frac{T}{4})$ 与 $(\frac{3T}{4}, T)$ 中随时间减小,在 $(\frac{T}{4}, \frac{3T}{4})$ 中则增加。而 G 在 $(0, \frac{T}{4})$ 与 $(\frac{T}{2}, \frac{3T}{4})$ 中减小,在 $(\frac{T}{4}, \frac{T}{2})$ 与 $(\frac{3T}{4}, T)$ 中增加(图略)。即在 $(0, \frac{T}{2})$ 中 G 与 $\frac{u_*}{G}$ 同增减;在 $(\frac{T}{2}, T)$ 中则非同步增减。而定常条件阻力规律⁽⁵⁾下 $\frac{u_*}{G}$ 随 G 增加而减小,即两者非同步增减。由此可见,考虑了非定常扰动,其经典阻力规律不适用(至少在 $(0, \frac{T}{2})$ 中)。

(2) $\frac{u}{G}$ 的波动振幅与扰动周期成反比, 与扰动振幅 A 成正比。即振幅大 (G 大) 时, $\frac{u}{G}$ 大。与定常条件下的阻力规律 (G 大, $\frac{u}{G}$ 小) 显然是不一致的。另外, 当扰动时风向顺时针开始转动, $\frac{u}{G}$ 开始减小, 而当扰动时风向逆时针转动时, $\frac{u}{G}$ 开始增加。这一结果与文献[2] 风速不变, 风向变化结果类似。但由于文献[2] 的风速不变, 故 u 不随时间变化, 而本文中 风速、风向均变化, u 也随时间变化, 比文献[2] 更有普遍意义。

(3) 考虑了非定常扰动影响后, 在相同风速 G 的不同时刻中, 其 $\frac{u}{G}$ 也是不一样的, 与定常条件下阻力规律 (G 相同, $\frac{u}{G}$ 也同) 是不一致的。由此说明了定常条件下的阻力规律 不适用于非定常情形。

(4) 类似于水平非均匀对 $\frac{u}{G}$ 的影响, 非定常扰动下 $\frac{u}{G}$ 的变化取决于风压场随时间的 变化以及两者相对变化程度。非定常与定常时气压梯度力的差异主要是在扰动方向上增 加了非定常项 ($\frac{\partial u}{\partial t}$)。故气压梯度力的增减也是随时间变化的, 即 $\frac{\partial}{\partial t}(-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}) = \frac{-A4\pi^2}{T^2} \cos 2\pi(\frac{t}{T})$, 故变化率大致与 T^2 反比, 与 A 成正比。且在 $(0, \frac{T}{4})$ 及 $(\frac{3T}{4}, T)$ 中随时间减小, 故相应 $\frac{u}{G}$ 减小; 而在 $(\frac{T}{4}, \frac{3T}{4})$ 中气压梯度变化率为正, 故 $\frac{u}{G}$ 增加。这大致解释了图 6、图

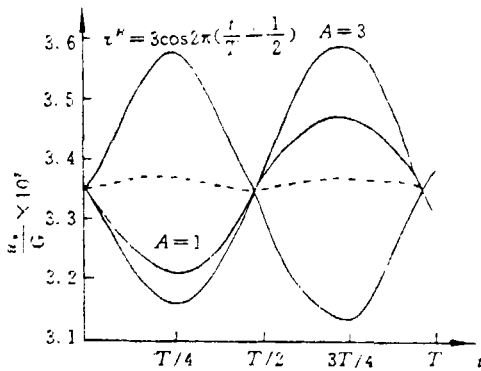


图 6 $\frac{u}{G}$ 在不同振幅 A 时的时间变化
虚线为定常结果, 实线为非定常结果 ($T=1$ 天)

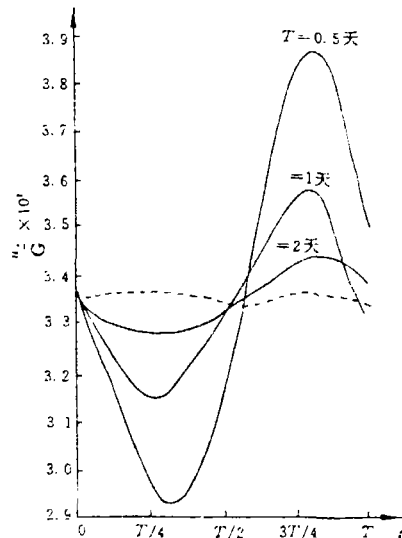


图 7 $\frac{u}{G}$ 随周期 T 的时间变化
虚线为定常结果, 实线为非定常结果 ($A=3$)

7 结果。从结果也看到非定常扰动下的 $\frac{u_*}{G}$ 数值与定常时上界风速取该时刻的 $\frac{u_*}{G}$ 的数值有一定差别,波幅在 10% 以上。故必须考虑非定常扰动对 $\frac{u_*}{G}$ 的影响作用。

2.1.3 非均匀、非定常扰动对 $\frac{u_*}{G}$ 的影响

为了分析方便,我们选取了 t 为一个周期的瞬时结果(图 8)进行分析,其他时刻可类

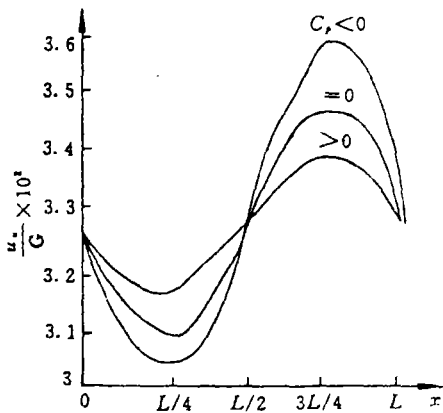


图 8 $t=T$ 时刻, $\frac{u_*}{G}$ 在一个波长内的水平变化

$L=1000\text{km}, A=3$

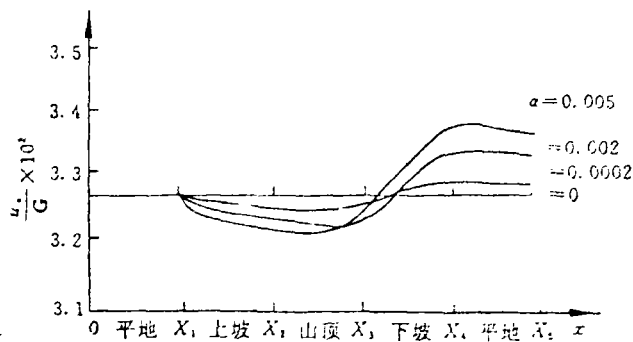


图 9 地形对 u_*/G 的影响, α 为地形坡度大小

似推论。当考虑非均匀、非定常扰动的影响后, $\frac{u_*}{G}$ 值不仅仅由 $\frac{G}{fz_0}$ 决定,而且由风压场时、空变化的综合结果决定。由于两者时、空变化增减非同步,即非均匀引起的平流作用与非定常引起的局地时变作用不一定一致。因此一般来说, $\frac{u_*}{G}$ 的变化规律比较复杂。本文中由于风场扰动变化引起的总风速 G 变化不大。相对而言, $\frac{u_*}{G}$ 的变化主要决定于 u_* 变化(特别是气压梯度力所控制)。而非定常、非均匀与定常、均匀条件的差异在扰动方向上增加了惯性力,即 $\frac{\partial u^H}{\partial t} + u^H \frac{\partial u^H}{\partial x} = \frac{\partial u^H}{\partial x} c_p + u^H \frac{\partial u^H}{\partial x} = (u^H - c_p) \xi^H$ 。其中, $c_p = (\frac{dx}{dt})_H$ 为波动相速, $\xi^H = \frac{\partial u^H}{\partial x}$ 。可见,扰动方向上气压梯度力随时、空均是变化的。总的效果取决于非均匀产生的气压梯度力 $u^H \xi^H$ 与非定常产生的气压梯度力 $-c_p \xi^H$ 的总效应,即 $(u^H - c_p) \xi^H$ 。当 $c_p > 0$, 即波动向东传播时,非均匀与非定常对 u_*/G 的作用相互抵消,当 $c_p < 0$, 即波动向西传播时,两者作用相互促进。另外,由于非定常性, ξ^H 也随时间变化,不同的涡度区 ($\xi^H > 0$ 或 < 0) 两者总的作用是相反的。即使在同一上界风速 G 下,非定常、非均匀条件下与定常、均匀条件下相应的内参数 u_*/G 值相差量级为 20% 以上。由此可见,当我们用大尺度模式参数求内参数时,精确地说,即使不考虑地形作用也不能直接应用定常、均匀条件下的结

果,而要考虑大尺度参数非均匀、非定常的影响。

2.2 有地形时的结果

2.2.1 地形作用对 u_*/G 的影响

为突出地形作用,暂不考虑非均匀、非定常扰动的影响。设 $u^H=10\text{m/s}$, $v^H=0\text{m/s}$ 。由于地形作用,使气流沿上坡坡面有上升趋势,这样受到重力沿坡面方向分力作用,使气流减弱;而在下坡处则相反。因此,上坡处风速及风速垂直切变减小,从而自上而下的动量输送小, u_* 小,即 u_*/G 变小(G 不变);下坡处正好相反, u_*/G 相应变大。山顶上及山后平地上 u_*/G 变化较小(主要是平流作用)。坡度不大时地形的作用很微弱,但地形坡度大时,这种差别必须考虑(图 9)。因此,地形作用对内参数的影响也是必须加以考虑的。

2.2.2 地形与非均匀、非定常扰动的作用

上述的共同作用基本上是地形作用与非均匀、非定常扰动作用的综合结果。通常由位涡守恒定律知,山后为正涡度区,故其 u_*/G 更大些,而山前则 u_*/G 小些。另一方面,由于地形造成背风坡,往往加深了自由大气的水平非均匀性,从而使 u_*/G 变化更大些(图、表略)。

3 结 语

考虑自由大气风作非均匀、非定常扰动后,边界层内参数 u_*/G 将不满足均匀、定常条件下的经典阻力规律,必须考虑其非均匀性、非定常扰动的修正作用。当考虑地形作用后,则应进一步考虑地形的影响,而且地形往往使自由大气的风水平非均匀。

最后需指出的是,本文仅讨论了自由大气中风场非均匀、非定常扰动分布为一种理想波形,且仅仅对中性、正压边界层讨论,有一定局限性。但本文分析方法可以推广到自由大气风速扰动为任意扰动情形。正压、中性边界层可以看成边界层大气的一个平均状态,所以本文结果仍具有一定的代表性。

参 考 文 献

- 1 Businger JA. *JAS*, 1968, 25, 1021—1025
- 2 赵 鸣. 气象学报, 1987, 45, 385—393
- 3 赵 鸣等. 气象学报, 1988, 46, 210—218
- 4 何建中等. 气象科学, 1991, 11, 239—249
- 5 DA 豪根编, 李兴生等译. 微气象学, 北京, 科学出版社, 1984
- 6 Blackadar AK. *Advances in Environ Sci and Engineering*, 1979, 1, 50—85
- 7 Mak MK. *JAS*, 1974, 31, 475—483

INFLUENCE OF THE FREE ATMOSPHERIC DISTURBANCE ON THE INTERNAL PARAMETER IN THE TOPOGRAPHIC ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER

He Jianzhong

(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract By numerical integration of the equation of the atmospheric boundary layer motion, a study is conducted of the influence of the horizontally nonhomogeneous, non-stationary disturbance of the free atmospheric (at the top of the boundary layer) wind on the internal parameter u_* / G (u_* is the friction velocity and G the wind velocity of the free atmosphere). Results indicate that in the parameterization of the large-scale model boundary layer, owing to the non-stationariness and horizontal non-homogeneous of the large-scale wind pressure field there exist errors when the classic stationary, horizontally homogeneous resistance law is directly used. It is, therefore, necessary to consider a revision of non-stationariness and non-homogeneous as well as topographic forcing.

Key words disturbance, internal parameter, boundary layer, topography