

绿洲-沙漠复合地表条件下的局地有效粗糙度*

贾立 王介民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州, 730000)

Massimo Menenti

(DLO-Winand Staring Centre, The Wageningen 6700AC, Netherlands)

摘要

地表空气动力学粗糙度是研究水平非均匀条件下陆面过程的基础,文中对黑河试验区各不同下垫面上地表空气动力学粗糙度进行了估算和分析,分别得到了地表空气动力学粗糙度 z_{0m} 的有效值和局地值,发现各不同典型下垫面的局地 z_{0m} 值明显不同,尤其在有作物存在时,绿洲的局地 z_{0m} 值比沙漠、戈壁的值明显要大;而对同一测站,有效空气动力学粗糙度比局地空气动力学粗糙度值明显要大,运用应力分解理论对这种差异进行了解释,认为有效空气动力学粗糙度与复合表面的总应力有关,其代表了较大水平尺度内的表面和较高障碍物的综合作用,当涉及对陆表通量参数化问题时,必须首先确定水平尺度及相应的地表粗糙度参数。

关键词: 空气动力学粗糙度,有效值,局地值,粗糙元,应力分解。

1 引言

在水平均匀陆地上,大气近地面层通常被描述为动量、热量和水汽通量的常通量层,通量与风速、温度和湿度垂直梯度之间的关系由经验的通用函数来表示;而当气流流过非均匀陆表面时,会发生与上述相同的基本过程,但廓线和通量是以一种连续的过程随陆表特征的变化而调整的。

在对陆面-大气相互作用的早期研究中,人们往往采用均匀表面上通用的通量-廓线关系,避免涉及到实际的非均匀性^[1]。最近,人们的注意力已经转移到了对陆表的空间非均匀性进行研究,以期使空间非均匀性对中尺度过程的影响较好地得到反映。在缺乏对不同的长度尺度进行观测的情况下,可通过对地表空气动力学粗糙度 z_{0m} 的估算来说明定义观测多大的长度尺度是合适的,以及对非均匀表面随尺度增加如何来估算 z_{0m} 。

已有的有关空气动力学粗糙度的研究大都是针对完全冠层的^[2-4],最常用的关系是取 z_{0m} 与植被高度 h_v 的比为一常数;而对部分覆盖的冠层 z_{0m}/h_v 相当不同^[5,6]。通过对分布具有较大间距的较高植物和其它障碍物的表面上空气动力学粗糙度的研究表明,表面粗

* 初稿时间: 1997年8月22日; 修改稿时间: 1998年6月11日。

资助课题: 国家自然科学基金项目(49475244, 49790020)。

糙元的几何特征对表面空气动力学特性有较大影响^[1]。使用有效粗糙度对较大尺度的动量通量参数化首先是由 Fielder 和 Panofsky^[7] (1972) 提出的, 其将“有效粗糙度”定义为: 在给定区域上和给定的近表面风, 对应该区域总的表面应力的粗糙度值。文中“有效粗糙度”的概念与之相同, 换言之是代表复合地表条件下总应力(即总的动量通量)的粗糙度值。而“局地粗糙度”是指代表较小水平尺度并与局地表面应力相对应的空气动力学粗糙度。

Beljaars 和 Holtslag^[8]曾提出, 在给定高度处, 总应力的粗糙度参数与水平长度尺度内的陆表粗糙元的关系, 比与高度本身的关系更加密切, 但到目前为止, 在研究随高度的增加陆表元素的水平范围与总应力的空气动力学粗糙度之间的关系方面, 采用直接试验的方法所进行的研究还较少。Menenti 和 Ritchie^[9] (1994) 曾利用激光观测来计算复合地表上的有效空气动力学粗糙度, 在他们的研究中考虑了3种具有不同长度尺度的陆表元素。文中主要是对非均匀绿洲-沙漠复合地表条件下空气动力学粗糙度进行研究, 了解非均匀表面上随观测高度的增大, 相应的水平尺度内总应力与陆表粗糙元之间的关系, 并试图对非均匀地表上的陆面过程参数化问题提供试验基础。

2 资料

文中所用数据是在 HEIFE 试验及其后续项目观测试验 AECMP '95(Arid environment composite monitor plan '95)期间收集的。HEIFE(Atmosphere-land surface processes experiment in Heihe river basin)试验是在中国西部干旱区进行的一次以地气相互作用中水分和能量交换为主要内容的大型野外观测实验研究(Wang, et al^[10], 1993), 实验区地处河西走廊黑河流域中段一个 70 km × 90 km 范围内。实验中设的5个微气象基本站分布在绿洲、戈壁、沙漠以及沙漠与绿洲交界区的不同下垫面上, 这里选用了其中的4个站(沙漠、戈壁、临泽和张掖)。实验区下垫面类型复杂, 各测站下垫面性质明显不同, 即使是在同一测站, 由于季节差异也造成了下垫面类型的不同。图1a-d 分别给出了以上4站表面特征的详细描述。每个基本站设有一个20 m(临泽站为40 m, 但为了与其它各站一致, 用了20 m 以下各高度的资料)高的微气象塔, 观测风、温、湿梯度, 每1 h 一次数据采集。在加强观测期(IOP)内增加了湍流脉动观测, 超声风温仪(海上电机 DAT-300)设在2.9 m 高度处, 每2 h 观测一次, 在每个观测时段内对采集的各分量进行涡旋相关计算, 输出各有关均值、方差和湍流量(Wang, et al^[11], 1990)。AECMP '95, 即干旱区环境综合监测试验研究, 是 HEIFE 的后续试验研究, 着重研究戈壁沙漠至绿洲的内边界层的变化, 于1995年8月在原 HEIFE 试验区的西北部进行了观测, 共有4个地面观测站: 2个沙漠站 D₁和 D₂(图1e), 2个绿洲站 O₁和 O₂(图1f, g), 观测内容包括湍流脉动量和系留气球探空观测等, 其中湍流观测的超声风温仪设在4.9 m 高度处, 每1 h 观测一次, 观测方法与 HEIFE 相同; 系留探空每1 h 进行一次观测。这样, 结合 HEIFE 和 AECMP '95两个实验, 一共用到了8个地面测站, 各测站下垫面性质及观测点周围的环境状况如图1所示。表1给出了各观测站下垫面状况及文中所用的每一测站的资料和观测时段。

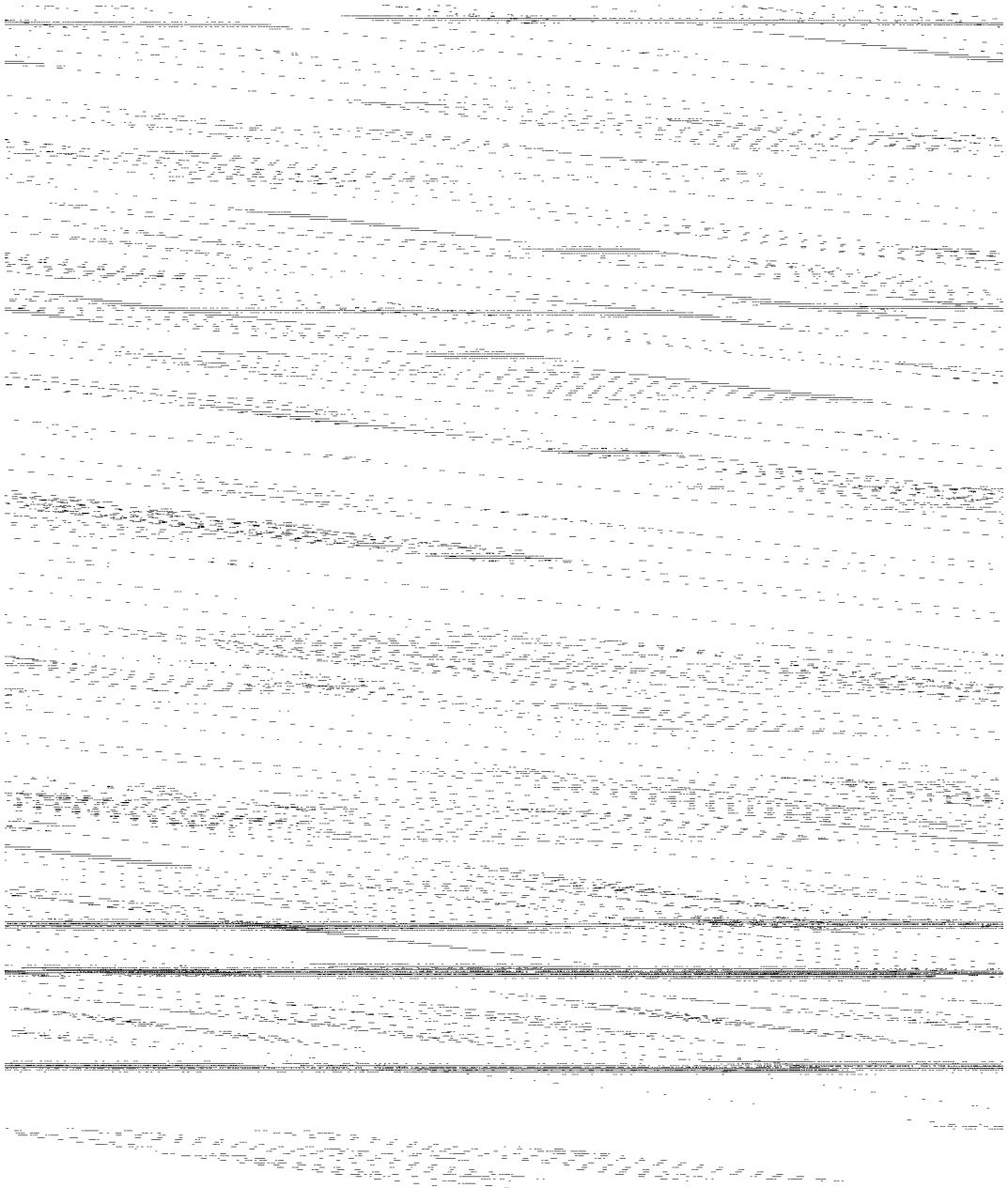


图1 试验区观测站及仪器位置示意图

(为观测仪器, # 为灌木, 点为沙漠, \wedge 为短草, * 为防风林, - - - 为水渠, ——为公路,为铁路)

表1 分析中所用的资料和观测时段

站名	湍流观测高度	塔观测高度	系留探空高度	下垫面类别	时间
沙漠	2.9 m	20 m	-	沙漠: 沙土, 有起伏的沙丘	1991年8月
戈壁(化音)	2.9 m	20 m	-	戈壁: 粗沙, 碎石, 稀疏骆驼刺	1991年8月
临泽	2.9 m	20 m	-	绿洲: 小麦, 高1 m	1991年7月
	2.9 m	20 m	-	茬地	1991年10月
张掖	2.9 m	20 m	-	绿洲: 豆类, 30~40 cm	1991年8月
	2.9 m	20 m	-	小麦, 90 cm	1992年6月
	2.9 m	20 m	-	茬地	1992年10月
D ₁ 站	4.9 m	-	100 m	沙漠: 北侧有沙枣树 间距2~10 m	1995年8月
D ₂ 站	4.9 m	-	100 m	沙漠: 间有稀疏矮草	1995年8月
O ₁ 站	4.9 m	-	100 m	绿洲: 玉米, 1.8 m 高	1995年8月
O ₂ 站	4.9 m	-	100 m	绿洲: 玉米, 1.8 m 高	1995年8月

3 方法

3.1 空气动力学粗糙度估算方法

在均匀地表上, 近地面层最基本的也是最常用的是水平平均风的对数风廓线

$$u(z) = \frac{u^*}{k} \left[\ln \frac{z-d}{z_{0m}} - \Psi_m(\zeta) \right] \quad (1)$$

其中 $k = 0.40$ 为 Von Karman 常数, $u(z)$ 为观测高度 z 处的平均风速, u^* 为摩擦速度, 与动量通量 τ 的关系为 $\tau = \rho u^2$, z_{0m} 为动量空气动力学粗糙度长度, d 为零平面位移高度, 对于均一的植被冠层表面, 由经验关系 $d = \frac{2}{3} h_v$ 来估算 (h_v 为植被的平均高度), 稳定度函数 Ψ_m 为 Monin-Obukhov 长度 L 的函数

$$\Psi_m(\zeta) = \frac{\zeta}{\zeta_0} \frac{(1 - \mathcal{Q}_m)}{\zeta} d\zeta \quad (2)$$

其中 \mathcal{Q}_m 为无因次风速梯度, $\mathcal{Q}_m = \frac{kz}{u^*} \frac{\partial u}{\partial z}$; $\zeta = \frac{z}{L}$, 而

$$L = - \frac{u^3 \rho}{kgH / (c_p T_a)} \quad (3)$$

其中 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 为重力加速度, $c_p = 1005 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 为定压比热, ρ 为空气密度, T_a 为空气温度, H 为表面感热通量。

通常, 可以由中性条件下的对数风廓线(方程(1))来确定地表空气动力学粗糙度 z_{0m} [12], 即在近中性条件下用最小二乘法将不同高度处观测得到的平均风速的对数风廓线(方程(1))拟合成直线, 然后同时得到 z_{0m} 和 u^* , 文中对塔和系留探空观测的风廓线就采用此种方法。陈家宜等 [13] 发展了一个由单一超声风温仪的平均风和湍流测定值确定地

表空气动力学粗糙度的方法, 由方程(1)有

$$\ln \frac{z-d}{z_{0m}} = \frac{ku}{u^*} + \Psi_m(\zeta) \quad (4)$$

由观测的平均风和摩擦速度可以得到无因次风速 ku/u^* , 并用实测的稳定度参数 z/L , 按 Businger-Dyer 的通量-廓线关系

$$\Psi_m(\zeta) = (1 - 16\zeta)^{-1/4}, \quad \zeta < 0 \quad (5)$$

$$\Psi_m(\zeta) = 1 + 5\zeta, \quad \zeta > 0 \quad (6)$$

计算得到方程(4)右边的 $ku/u^* + \Psi_m(\zeta)$, 将其对稳定度参数 ζ 作线性拟合得到中性条件下相对于观测高度处的无因次风速 ku/u^* (中性), 即 $\ln[(z-d)/z_{0m}]$, 则动量粗糙度 z_{0m} 可得。

3.2 复合地表条件下的空气动力学粗糙度

在复合地表上的气流的参数化应遵循: 气流作用于陆表面的总力守恒。边界层中的风廓线是由总应力所控制的, 根据基本的应力分解关系 (Marshall^[14], 1971), 该总应力可表示为

$$F_D + S_D = \tau \quad (7)$$

其中 τ 为总应力, F_D 为障碍物之上的“形式曳力”, S_D 为障碍物之间表面上的“表面摩擦”或“表面切应力”。当涉及到部分冠层和稀疏分布的较高粗糙元的影响时, 总应力一定包括“表面切应力”和“形式曳力”。根据 Wooding 等^[15] (1973) 的研究, 风廓线的形式与粗糙元的大小和高度有关, 低于粗糙元顶在粗糙元之间的表面之上是一个常应力层 (称为内层), 此处的应力是表面上的切应力; 在粗糙元之上 (称为外层), 平均风廓线则与总应力 (即表面与粗糙元的共同作用) 有关。在所研究的复合表面上, 该总应力是以下不同长度尺度的粗糙元对气流的综合作用: 障碍物 (形式曳力), 比如树、沙丘; 表面 (表面摩擦), 比如沙漠、裸土及作物表面——障碍物存在于表面之上。在这样的系统中风廓线可能会有两个常应力层存在 (见图2): 一个是在较高粗糙元顶的某高度处 (图2中的③区), 由于每个粗糙元的个体流带之间的相互作用使得它们之间相互混合, 气流将是水平均匀的, 气流的特征比如平均廓线和湍流量与总的有效粗糙度参数有关, 受到了障碍物及其之间的表面的共同作用, 该区常被称作“混合层”; 而另一个在低于较高粗糙元顶处 (但 $z \gg z_{0m}$) (图2中的①区), 在此区大于粗糙元高度许多倍的距离处 (如10~15倍元高的距离处) 会形成一个“内层”; 此层内的气流逐渐地与下面较光滑的表面达到局地平衡, 气流的特征是由局地应力和相对平坦表面上的空气动力学粗糙度来确定的。对数风廓线在“混合层”和“内层”内皆成立, 不同的是, 前者中对应的是总应力或大尺度的粗糙度参数, 而后者则与障碍物之间的表面的小尺度粗糙度参数有关。图2中的②区为“混合层”和“内层”之间的“过渡层”; ④区为气流遇到障碍物时受到分离的区域。

根据以上的应力分解理论, 在同时含有冠层表面和障碍物的陆表面上, 可将复合表面上总应力的有效空气动力学粗糙度 Z_{0m} 表示为 (Arya^[16], 1975)

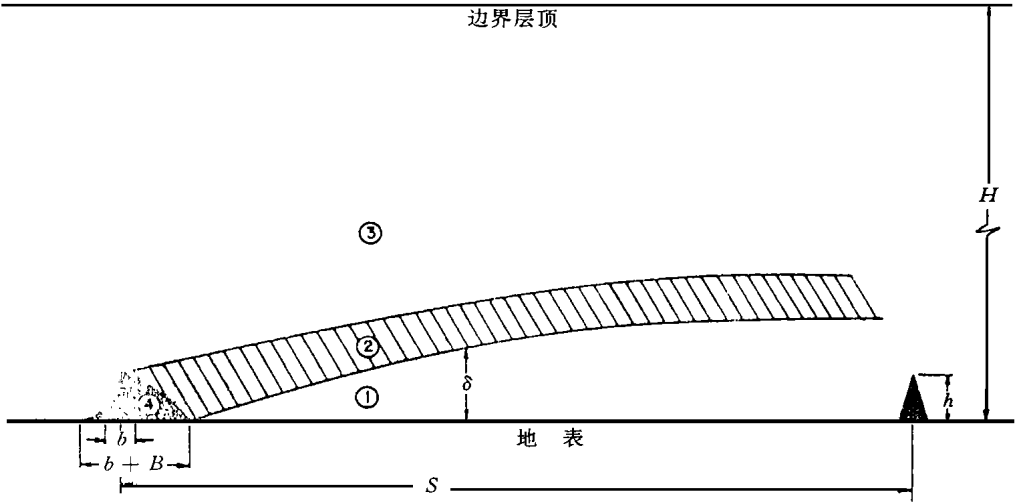


图2 二维粗糙元分布情况下粗糙元后流带的分布(取自 Arya^[16], 1975)

(①区: 内层 ②区: 过渡层 ③区: 混合层 ④区: 气流遇到障碍物后被分离的区域。

b : 障碍物基宽 B : 被分离流宽 s : 障碍物间距 h : 障碍物高 δ : 内层高 H : 边界层高)

$$\ln \frac{z_{0m}}{z_{0n}} = \frac{4}{5} \left[\ln \frac{h}{z_{0m}} + \ln \left[\frac{l}{\lambda} - \frac{b}{h} - \frac{B}{h} \right] \right] \cdot \left\{ 1 - \left[l - m\lambda + \frac{C_{dh}\lambda}{2k^2} \left(\ln \frac{h}{z_{0m}} \right)^2 \right]^{-1/2} \right\} \quad (8)$$

其中, $m = \frac{b}{h} + \frac{B}{h} + \frac{l}{2h}$, b 为障碍物基宽, h 为障碍物高, B 为障碍物后气流被分离区域的宽度, $\lambda = h/s$, s 为障碍物间距, l 为障碍物后廓线恢复的距离(见图 2), 而 z_{0m} 为局地表面粗糙度值, b , h 和 s 由激光观测得到, B 和 l 由文献[16]得到。 C_{dh} 为曳力系数, 根据文献[15], 其值近似取为 0.40。这样复合表面上的有效粗糙度就被表示为较大粗糙元的高度、间距以及障碍物之间的表面的局地粗糙度参数的函数。

因此, 在含有多种长度尺度粗糙元(如表面、障碍物、地形等)的复合地表结构上, 气流也可以由简单的对数风廓线来描述, 然而, 由于不同的观测高度所对应的水平尺度内表面特征不同, 在不同的高度处必须采用不同的表面粗糙度参数。Finnigan^[18](1990)曾经利用中性条件下内层的高度 h_i 定义了一个水平尺度:

$$X = \frac{u}{u^*} h_i \quad (9)$$

其中 $(u/u^*) \sim O(10)$, 这就将垂直尺度和相应的水平尺度联系起来, 风廓线受表面切应力的影响其水平尺度比所考虑的垂直尺度大 1~2 个量级。因此, 为了参数化复合地表上的动量通量, 必须首先确定相应的水平尺度, 该尺度的确定可为如何由小到大在水平和垂直尺度上聚合陆表特征提供线索。

4 结果和讨论

4.1 估算结果

采用上述资料和方法分别在不同下垫面及利用不同高度的观测资料对空气动力学粗糙度进行了估算,结果见表2。对于2.9 m和4.9 m高度处的湍流观测,根据水平尺度和垂直尺度之间的关系(方程(9))其对应几十米的水平范围,所得到的 z_{0m} 值可以认为是局地空气动力学粗糙度。由表2可以发现具有不同表面特征各观测站,所得到的局地空气动力学粗糙度明显不同。除了D₁站由于沙漠表面上分布着骆驼刺,并且测点附近有一些沙枣树而使得其 z_{0m} 值比其它各沙漠站的 z_{0m} 几乎大一个量级外,与各绿洲下垫面的 z_{0m} 相比各沙漠站的 z_{0m} 值相当小,最大差别为绿洲上有作物存在时。而对于各绿洲站,由于不同高度和种类的作物冠层的存在(最高的为玉米冠层,最低的为豆类冠层)也使得 z_{0m} 出现了不同的值。因此,在同为均匀冠层覆盖的表面上,冠层的高度对表面动量通量的分布即对空气动力学粗糙度的大小起着主要的作用。当绿洲上没有作物存在时, z_{0m} 值与有作物冠层存在时相比明显要小,与沙漠D₁站 z_{0m} 的值接近。

塔和系留气球探空的观测具有更高的观测高度,其对应着更大的水平尺度,由此而估算的 z_{0m} 值可认为是有效空气动力学粗糙度。由表2可以明显看出,对于同一测站,有效空气动力学粗糙度比局地空气动力学粗糙度明显要大,尤其是在沙漠、化音(戈壁)、D₁和D₂4个沙漠站,这种差异较为明显。

表2 黑河实验区各站的地表动量粗糙度的估算结果

站名	湍流观测 z_{0m} (m)	塔的风廓线观测 z_{0m} (m)	系留探空观测 z_{0m} (m)	下垫面性质
沙漠	$2.67 \times 10^{-3} \pm 0.0002$	0.04 ± 0.01	-	沙漠、有起伏
化音	$2.80 \times 10^{-3} \pm 0.0003$	0.01 ± 0.01	-	平坦戈壁
临泽	0.17 ± 0.03	0.30 ± 0.10	-	小麦 高1 m
临泽	$0.45 \times 10^{-1} \pm 0.01$	0.10 ± 0.05	-	无作物、附近有树
张掖	0.06 ± 0.008	-	-	豆类 高40 cm
张掖	0.10 ± 0.003	-	-	小麦 高0.9 m
张掖	0.04 ± 0.003	-	-	无作物
D ₁	$0.18 \times 10^{-1} \pm 0.003$	-	0.20 ± 0.1	稀疏灌木
D ₂	$3.88 \times 10^{-3} \pm 0.0007$	-	0.16 ± 0.1	平坦沙漠
O ₁	0.33 ± 0.01	-	0.55 ± 0.2	玉米 高1.8 m
O ₂	0.31 ± 0.04	-	0.40 ± 0.1	玉米 高1.8 m

当使用一个观测高度处的湍流观测来估算 z_{0m} 时,对于某一段时间内的观测数据,通过拟合只能得到唯一的一个中性条件下的无量纲风速值,由此值而估算的 z_{0m} 的精度较高。表2中由湍流观测估算的 z_{0m} 的误差来自于在一个高度处拟合无量纲风速时拟合系数的误差。另外,将塔和系留气球所观测的不同高度处的水平风速拟合成对数风廓线来得到有效粗糙度时,只选用了近中性条件下的廓线。实际上,绝对的中性条件很少出现,尤其对系留气球所观测的廓线来说,很难找到真正中性廓线并得到一个单一的 z_{0m} 值。由塔的风廓线估算的有效粗糙度的估算误差,来自几次近中性条件风廓线估算的 z_{0m} 的平均值的

标准差。需要说明的是, 由系留探空观测的风廓线估算粗糙度会受到观测精度及方法的影响, 为克服此方面的不足, 选择气象条件相近的近中性时次, 将它们进行平均之后再由最小二乘法来拟合得到 z_{0m} 和 u^* , 表2中系留探空风廓线拟合的 z_{0m} 的误差来自所用几个时次的平均。为了检验利用系留探空资料所得结果的合理性, 在4.2节中有进一步的分析。

由于由系留气球廓线观测而估算的 z_{0m} 和 u^* 的精度较低, 而且, 可用的近中性的廓线很少, 在进一步的分析中需包括非中性条件下的廓线。为了检验文中由系留探空廓线估算

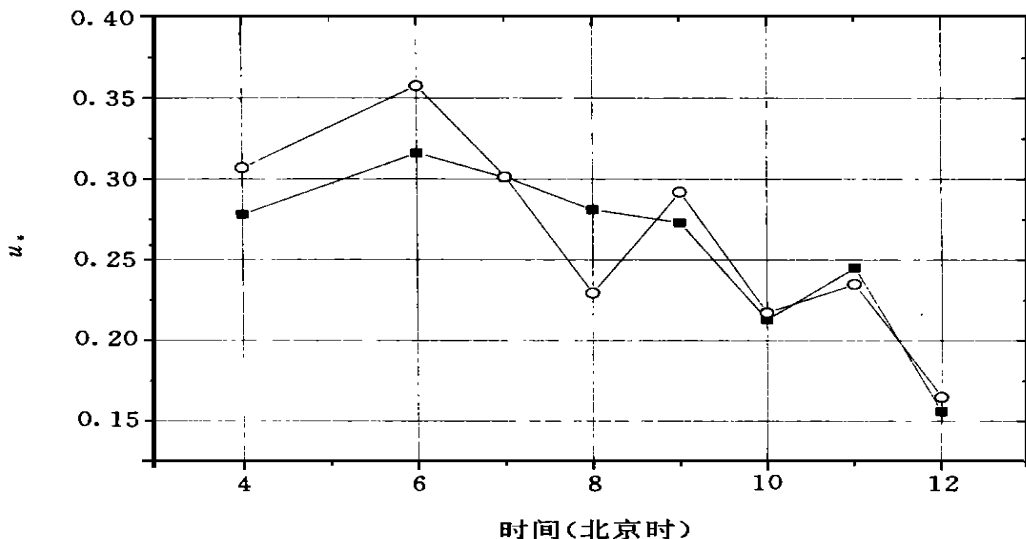


图3 湍流脉动仪观测的5m 高度处 u^* 由凌晨到中午的变化

(O站, D站, 1995年8月18日)

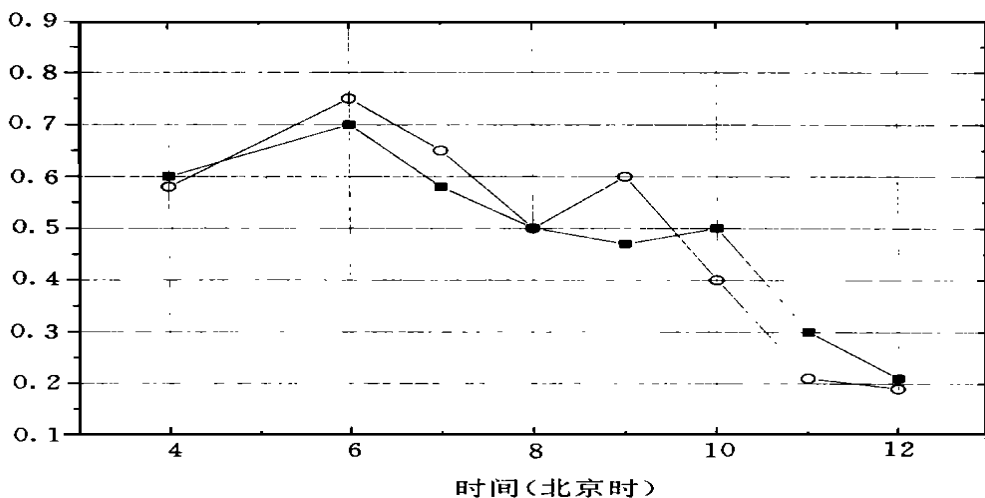


图4 系留探空廓线观测估算的 u^* 由凌晨到中午的变化

(O站, D站, 1995年8月18日)

的 z_{0m} 和 u^* 的结果,将AECMP'95期间(8月18日) O_1 和 D_1 站近5 m高度处由湍流脉动仪测定的 u^* 的日变化与由系留气球风廓线估算的 u^* 的日变化进行了比较,图3表明,由湍流脉动仪直接观测的摩擦速度 u^* 除了在 D_1 站夜间值稍高外,而由日出到中午 D_1 和 O_1 的 u^* 值非常接近。由系留气球观测所估算的结果(图4)可以看出 u^* 的变化趋势与5 m高度处直接观测的结果相似,但其值却明显地比较低高度处的要大,这反映了不同的水平尺度内总应力与相应的陆表粗糙元之间的关系。因此,即使与湍流脉动仪和塔的观测相比,精度相对较低,系留探空的风廓线仍然可以为分析表面的空气动力学特性提供有用的信息。

4.2 对复合地表条件下空气动力学粗糙度的分析

如前所述,表2中在同一测站由不同高度的观测所估算的表面粗糙度 z_{0m} 之间存在差异,即观测高度越高,所估算的粗糙度值越大。假设塔的风廓线(20 m高)和系留探空风廓线(10~100 m高)反映了表面(戈壁、沙漠和短草的表面)和障碍物(较高的树和防风林等)的综合作用,则由塔和系留气球观测的廓线所估算的 Z_{0m} (表3中的 Z_{0m}^- 观测,取自表2中塔及系留探空资料的估算结果)均为复合表面的有效粗糙度。同时我们知道方程(8)描述了大尺度的有效粗糙度参数,并将其作为粗糙元的平均高度和密度、小尺度和局地粗糙度参数的函数,应与较高空气层的风廓线进行比较。因此,为了检验在各测站由于利用了不同观测高度的风廓线而产生的地表粗糙度的差异是否与不同的观测高度所对应的不同(水平尺度)陆表特征有关,采用方程(8)并结合每一个观测站表面粗糙元的大小和空间分布的情况(图1)来进行分析。尽管缺乏8个观测站的陆表面特征的精确描述来满足精确计算的要求,但仍然可以根据各测站的实际情况对计算参数进行假设,从计算结果的大小得到有益的启示。根据图1所示的各测站地表状况,可以估算出方程(8)中所包含的与地表粗糙元有关的各参数,其值列在表3中。利用这些参数及表2中各测站局地粗糙度的值由方程(8)可以计算出各测站的有效粗糙度值(表3中的 Z_{0m}^- 计算)。

表3 用方程(8)对有效粗糙度 Z_{0m} 的估算及所用的参数值

测站	z_{0m}	b	B	l	h	s	Z_{0m}^- 计算	Z_{0m}^- 观测
O_1	0.330	2	3	8	20	400	0.590	0.550 b
O_2	0.310	2	3	15	25	750	0.330	0.400 b
D_1	0.018	0.500	0.200	0.500	2	5	0.230	0.200 b
D_2	0.004	0.200	0.200	2	0.800	4	0.180	0.160 b
临泽	0.170	2	3	1	20	450	0.300	0.300 t
张掖	0.060	3	2	5	20	500	0.400	-
沙漠	0.003	2	1	2	2	50	0.040	0.040 t
戈壁(化音)	0.003	1	1	1	0.500	10	0.015	0.010 t

注: b= 系留气球, t= 塔。

由表3和图1可以看出,无论是处于相对短的水平距离内的较矮障碍物(如沙漠、戈壁上的沙枣树和骆驼刺),还是处于较大的水平距离内的较高障碍物(如绿洲上的树),都使地表粗糙度的有效值 Z_{0m} 与局地值 z_{0m} 之间产生差异。在两个绿洲站 O_1 和 O_2 陆表元素的

分布相对简单: 具有单一农作物的下垫面, 四周的风障距离观测仪器的位置较远。但是, O_1 站风障之间的距离比 O_2 站的明显要小, 这导致了 O_1 站的($Z_{0m} - z_{0m}$)之差较大, 这是因为在具有相同的观测高度时, 两站所对应的水平区域内地表粗糙元的特征是不同的, 所考虑的水平尺度内的表面越粗糙(O_1 站), 则有效粗糙度的值就越大, ($Z_{0m} - z_{0m}$)之差也就越大。在绿洲站的临泽和张掖, 塔周围的情况要复杂一些。所用塔的廓线高度为20 m, 它们代表了200 m 以上的水平尺度, 尽管两站障碍物的特征相当不同, 但 z_{0m} 和 Z_{0m} 之间仍然存在着一致的差异。同样, 在沙漠站, 局地表粗糙度的观测(湍流观测)所涉及的水平尺度内的表面相对较为均匀, 而塔的观测高度相对应的水平尺度内有高度和间距变化较大的沙丘, 这使得 z_{0m} 的局地值和有效值之间相差大约一个量级。在 D_1 和 D_2 站可以发现类似的情况。在较大水平尺度内由于沙枣树的存在, 使得 D_1 站 z_{0m} 的局地值和有效值差别很大, D_2 站在距测点较小水平尺度范围内表面相当均匀, 与较大水平尺度范围内陆表元素分布形成较大的对比, 使得该站 z_{0m} 的局地值和有效值之间相差几乎二个量级。

综上所述, 观测高度所对应的水平尺度范围内粗糙元的高度和分布密度决定了该水平尺度表面上气流的空气动力学性质, 进而影响到了地表空气动力学粗糙度; 在对陆表通量进行参数化研究时, 要采用相应尺度的地表粗糙度参数, 而不可简单地取局地粗糙度值, 此时, 较小尺度下相应的局地 z_{0m} 值已不是计算较大尺度表面通量时的恰当参数。由于在水平范围内较大粗糙元的存在, 使表面空气动力学粗糙度 z_{0m} 产生了量级上的变化。Kustas 等^[19](1994)所做的热通量计算对 z_{0m} 误差的敏感性试验表明, 假设 z_{0m} 由0.01增至0.1, 可在感热和潜热通量的计算中产生10%的误差。因此, 在研究陆面过程问题时, 当涉及由小尺度到大尺度对陆表能量通量进行“聚合”(aggregation)时, 首先要确定相应的可聚合的水平尺度。

5 结 论

本文通过对绿洲-沙漠复合表面上的空气动力学粗糙度的估算和分析可以得出以下结论:

(1) 在黑河实验区这样的含有绿洲和沙漠的复合地表条件下, 各不同下垫面上的局地空气动力学粗糙度表现出明显不同的值, 在绿洲上有作物存在时, 绿洲上的 z_{0m} 值比沙漠、戈壁上的 z_{0m} 值约大2个量级; 对于同一测站, 由于观测高度的不同得到了明显不同的空气动力学粗糙度的值, 有效的 Z_{0m} 比局地的 z_{0m} 明显要大。

(2) 表面粗糙度的局地值和有效值之间的差异可以理解为不同的观测高度对应着不同的水平尺度, 而在各水平尺度范围内的陆表元素的分布存在着明显差异, 从而导致了代表该水平尺度的总应力的有效粗糙度值与局地值之间的差异。

(3) 在含有多种长度尺度粗糙元的复合地表结构上, 气流也可以由简单的对数风廓线来描述, 但在不同的高度处必须采用不同的表面粗糙度参数, 随高度的增加陆表元素的水平尺度与代表该尺度总应力的空气动力学粗糙度密切相关, 当对陆表通量进行参数化时, 必须首先确定与所研究的尺度对应的表面粗糙度参数。

参考文献

- 1 Lettau H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description. *J Appl Meteor*, 1969, 8: 828- 832
- 2 Monteith J L, ed. *Vegetation and the Atmosphere*. vol. I, Academic, San Diego, Calif, 1975
- 3 Monteith J L, ed. *Vegetation and the Atmosphere*. vol. II, Academic, San Diego, Calif, 1976
- 4 Brutsaert W H. *Evaporation into the atmosphere*. Dordrecht in Holland: Reidel D Publishing Company, 1982. 113 - 121
- 5 Kustas W P, Choudhury B J, Kunkel K E, et al. Estimate of the aerodynamic roughness parameters over an incomplete canopy cover of cotton. *Agric Meteor*, 1989, 46: 91- 105
- 6 Hatfield J L, Wanjura D F, Baker G L. Canopy temperature response to water stress under partial canopy. *Trans ASAE*, 1985, 28: 1607
- 7 Fiedler F, Panofsky H A. The geostrophic drag coefficient and the effective roughness length. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1972, 98: 213- 220
- 8 Beljaars A C M, Holtslag A A. Flux parameterization over land surface for atmospheric models. *J Appl Meteor*, 1991, 30: 327- 341
- 9 Menenti M, Ritchie J C. Estimation of effective aerodynamic roughness of walnut gulch watershed with laser altimeter measurements. *Water Resour Res*, 1994, 30(5): 1329- 1337
- 10 Wang J, Hu Y, Sahashi K, et al. Outline of HEIFE field observation. In: *Proceedings of International Symposium on HEIFE*. Japan: Kyoto University. 1993. 22- 29
- 11 Wang J, Liu X, Qi Y. A preliminary study on characteristics of turbulence transfer over gobi desert. *Chinese J Atmos sci*, 1990, 14(4): 495- 505
- 12 Garratt J R. *The Atmospheric Boundary Layer*. New York: Cambridge University Press, 1992. 316pp
- 13 陈家宜, 王介民, 光田宁. 一种确定地表粗糙度的独立方法. *大气科学*, 1993, 17(1): 21- 26
- 14 Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density and distribution. *Agric Meteor*, 1971, 8: 269- 292
- 15 Wooding R A, Bradeley E F, Marshall J K. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary-Layer Meteor*, 1973, 5: 285- 308
- 16 Arya S P S. A drag partition theory for determining the large-scale roughness parameter and wind stress on the arctic pack ice. *J Geophys Res*. 1975, 80(24): 3447- 3454
- 17 Jacobs A F G. *Flow around a Line Obstacle*: [dissertation]. Wageningen, Netherlands: Wageningen Agric Univ, 1983. 105pp
- 18 Finnigan J J, Raupach M R, Bradley E F, et al. A wind tunnel study of turbulent flow over a two-dimensional ridge. *Boundary-Layer Meteor*, 1990, 50: 277- 317
- 19 Kustas W P, Blanford J H, Stannard D I, et al. Local energy flux estimates for unstable conditions using variance data in semiarid rangelands. *Water Resour Res*, 1994, 30: 1351- 1361

THE LOCAL AND EFFECTIVE AERODYNAMIC ROUGHNESS LENGTH OF A COMPLEX LANDSCAPE OF OASIS AND DESERT

Jia Li Wang Jiemin

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, CAS, Lanzhou, 730000)

Massimo Menenti

(DL O-Winand Staring Centre, Wageningen 6700A C, The Netherlands)

Abstract

Aerodynamic roughness length z_{0m} is the basic parameter in research for land surface processes. In this paper, the values of aerodynamic roughness length z_{0m} were estimated with different surface types in experiment field of Heihe river basin. It could be found that the values of z_{0m} were rather different between different surfaces, ones in oasis were larger than in desert, especially during canopy growing. With measurements at different height, local and effective roughness length were obtained at same site. Effective roughness length were realistically larger than local ones due to the relationship between the horizontal extent of landscape elements and aerodynamic roughness parameters of total stress at increasing heights. It could be drawn that the horizontal scale thereby aerodynamic roughness length related to had to be determined when one concerned to the research on the parameterization on land surface processes.

Key words: Local aerodynamic roughness length, Effective aerodynamic roughness length, Rough elements, Drag partition.