

近地层相似理论适用的分析研究*

苗曼倩 朱超群

(南京大学大气科学系, 南京, 210093)

季劲钧

(中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029)

摘 要

利用实测的脉动场与平均场同步梯度观测资料研究近地层相似理论的适用性。结果表明: 理论的核心——近地层为常数通量层的近似假设在有植被陆面上是基本不成立的。 $\overline{W T}$ 随高度明显减小; 摩擦速度 u^* 在30m 高度范围内可增大24%左右。用相似理论关系式(或称作廓线通量法)得到的通量值只代表某高度层以下的平均值。

关键词: 相似理论, 适用性, 资料分析与理论研究。

1 引 言

近地层相似理论被认为是较成熟的理论, 并已广泛应用。当今的区域性或中尺度大气模式中, 铅直分辨率在边界层内都不止一层。于是预报方程组中应包括湍流摩擦力、湍流热通量和水汽通量的散度项, 所以该理论也被用于模式中预测大气下边界的热通量、水汽通量和湍流摩擦力的参数化过程。然而, 近年来实测资料的逐渐丰富和经验的不断积累, 越来越注意到该理论的适用性问题是值得探讨的课题。Haenel(1993)^[1]归纳前人研究指出: (1) 近地层相似理论只适合于以动力驱动为主的湍流运动, 对自由对流状态则无能为力。(2) 相似理论不适用于很靠近地面的层次, 那里单个粗糙元对湍流流场影响很大。一般认为在50—100倍 Z_0 的高度范围内, 该理论是要失败的。此外, 目前很多模式为了避免 Z_0 高度上气温测定的困难, 而以卫星遥感的地面红外温度来取代 Z_0 处的气温而代入近地层相似性公式中, 结果使感热和潜热通量计算值产生较大误差^[2]。可见, 相似理论能否用来真实地描写大气下边界上湍流通量的交换过程以及如何正确地引用相似理论等等, 是值得深入研究的问题。文中利用日本筑波大学水理实验中心的微气象观测资料对此作了初步研究。

* 初稿时间: 1995年11月3日; 修改稿时间: 1996年8月12日。
资助课题: 大气物理与大气化学国家重点实验(LAPC)。

2 资料概况

筑波大学位于东京东北方向60km。水理实验中心观测场位置在36°05'N, 140°06'E。观测场环境见图1所示。气象塔位于C点。以C为中心, 直径为160m的圆形场, 地表平坦, 覆盖着约60cm长的牧草。西南和西南偏西方向较开阔, 在400—500m以远有些农舍。观测场到农舍间也是草地, 但草的密度略稀于场内。粗糙差异不大。

塔上设有3个观测高度: 1.6m, 12.3m 和 29.5m。观测项目包括风向、风速、干湿球温度以及涡度相关矩量 \overline{UW} 和 \overline{WT} (或表示成 UW 和 WT)。此外还有总辐射、辐射平衡、土壤热通量、水面蒸发、降水量、蒸散量和气压。每个观测项目均有每小时一次数据输出。关于使用的仪器及其精度可详见文献[10]。

对1983年9月和11月(暂缺10月份)资料进行分析。这季节下垫面状况基本一致, 降水较少。资料选用原则为晴天, 定常正压大气。考虑到观测场环境, 选用西南或偏西风资料, 目的是尽量排除房屋和树林影响, 共选用19d资料。

3 方法简介

廓线通量法是大家熟知的, 故文中不再列出公式。其中无量纲风、温度梯度 $\Phi_m(Z/L)$ 和 $\Theta(Z/L)$ 采用Dyer^[3]公式。为提高精度, 计算 L 与 u^* , T^* 时采用迭代法。一般4—5次即可收敛(详见文献[4])。

因为筑波试验中, 缺少 Z_0 高度的温度测量或地表温度测量资料。如果用1.6m温度按对数律外推到 Z_0 处温度, 误差较大。尤其在层结转换时段会出现谬误。故在廓线通量法计算中只能采用两层之间的差分, 即3层与1层(记作1—3层)以及2层与1层(记作1—2层)间差分。

4 结果分析

4.1 常数通量层近似的检验

筑波资料给出3个高度上的涡度相关矩量 UW ($m^2 \cdot s^{-2}$)和 WT ($m \cdot s^{-1} \cdot k$)用来分析通量与高度的关系, 检验近地层为常数通量层近似的普适性问题。

通常认为相关矩 UW 和 WT 是正确的, 因为它们是直接用脉动测量值经统计相关计算得到的。并常常用它们来检验其它方法计算结果的正确性, 故以下被简称为观测值。实际上, 它们也存在着10%左右的测量误差。此外, 感热通量 H 和动量通量 τ 分别正比于 WT 和 UW , 所以以下简称这两个相关矩为热通量和动量通量。

任意地选择3个典型个例(1983年11月1日、3日和8日), 3个高度的通量日变化曲线绘于图2中。可见, 热通量随高度变化十分明显。贴近地表的1.6m层最大, 日较差也最大; 其

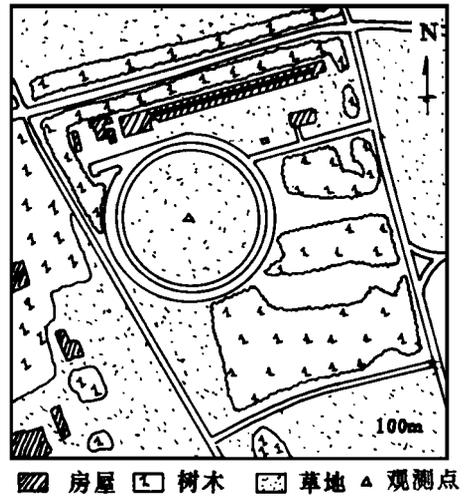


图1 观测场示意图

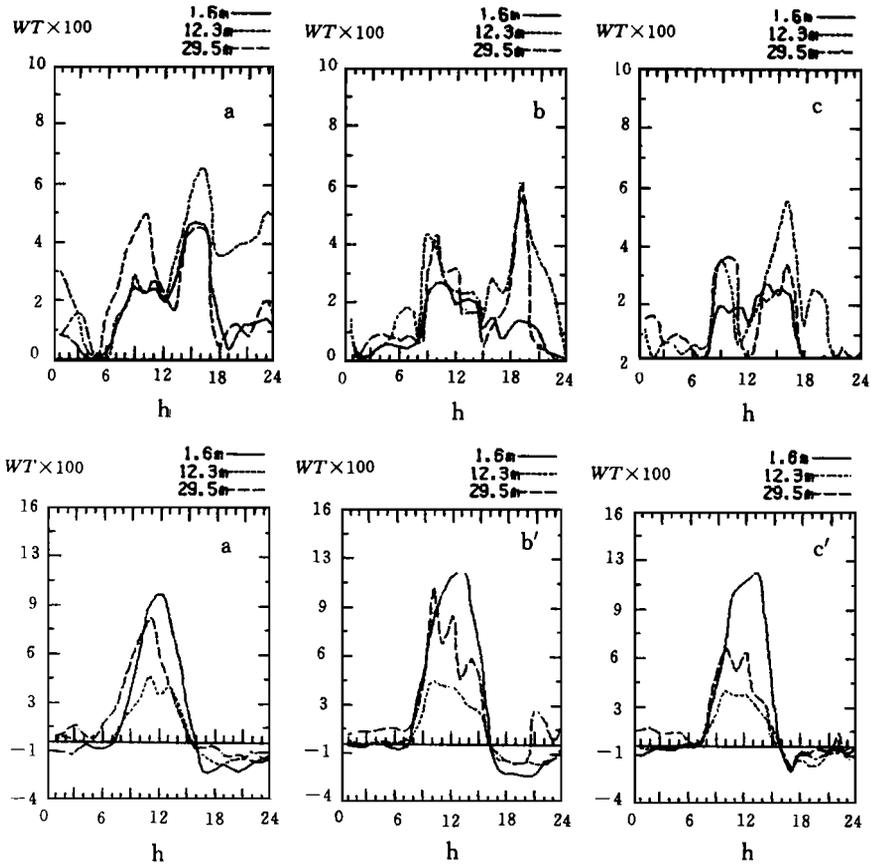


图2 1983年11月1日、3日和8日3个高度上 $Z U W$ 和 WT 的日变化

次是第3层(29.5m);最小是在第2层(12.3m)。换言之,热通量随高度先减少,然后再有所增大。此规律是否具有普适性?只凭筑波资料尚不能作最后结论。因为在风廓线中,第2层风速偏大。且在中性层结条件,3个高度风速不呈对数分布(图略)。是第2层平均风速测量问题还是局地效应?无从断定。但 WT 随高度是减少的事实成立。所以以下平均场分析以1,3层资料为主。

上文提及的上层热通量比贴近地面层小,这与寄崎哲弘(Yarisaki)等人(1983)^[5]研究结果相一致。他们在该铁塔上0.75m和2m两高度安装了新型超声风温仪。于1982年8月1日到8日和9月1日作了逐时观测。将这9d资料进行平均,得出 WT 的平均值为 $0.071\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{k}$ (在0.75m高度)和 $0.070\text{m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{k}$ (在2m高度)。随高度呈减少趋势。为了便于比较,定义:高度每上升1m, WT 的相对变化率 I

$$I = \frac{WT_B - WT_A}{WT_A} \frac{1}{(Z_B - Z_A)} \times 100\% \quad (1)$$

其中下标 A, B 分别代表第1层和第2层, $I < 0$ 意味着向上减少。计算文中19个资料日的 I 值,结果表明 I 值与风速有一定的关系。图3给出了 I 与地面风速 u 的关系。其中 u 取用12.3m的实测平均风速。因为常规观测中是以10m风速作为地面风速。

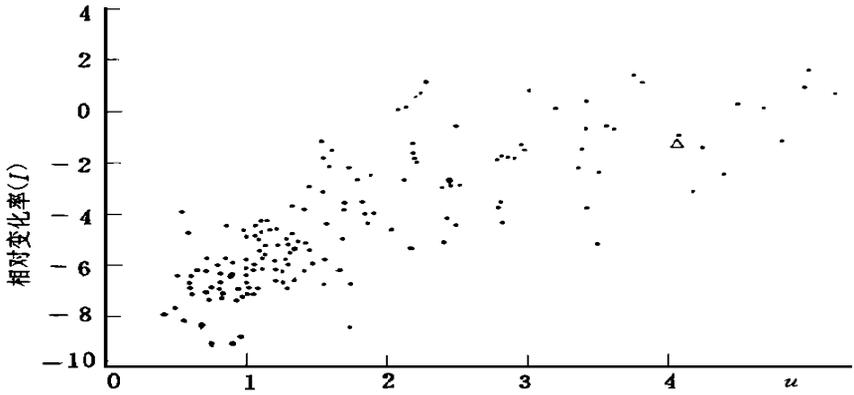


图3 I 值随 u 的变化

由图3可见, 当 $u < 3.0\text{m/s}$ 时, 每上升 1m WT 减小 10% 以上。风速越小减少越剧烈。当 $u > 3.0\text{m/s}$ 时, WT 随高度变化逐渐不明显。原因是在此地面风速条件下, 动力湍流增强, 湍流的垂直交换相应也增强, 而使各物理量的垂直分布趋向均匀化。图3中的三角形点则是用上述寄崎哲弘给出资料推算的 I 值。其中 12.3m 处风速由 2m 处风速外推得到。可见所得结果与其一致。

图2中给出3个高度上的 UW 值之间也存在着差异。上述寄崎哲弘等人(1983)给出了 $u^*(2.0\text{m}) = 1.05u^*(0.75\text{m})$ 关系式。说明 UW 随高度增加。

图4给出了本文19个资料日的 UW_2 与 UW_1 的对比关系。以最小二乘法可得出

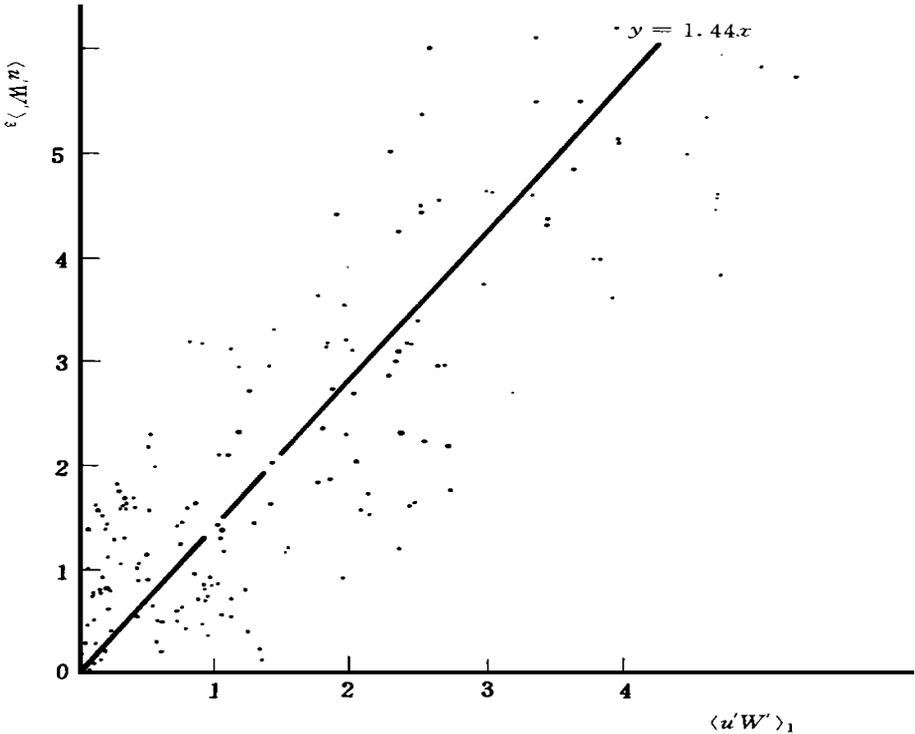


图4 UW_2 与 UW_1 的对比

$UW_2 = 1.55 UW_1$ 。可见 UW 随高度变化也不允忽略,尤其在有植被表面上。两边求平方根,可得 $u^*2 = 1.245u^*1$ 。在约十几米高度范围内摩擦速度改变了24.5%左右。

上述分析表明,近地层为“常数通量层”近似是不严格成立的,尤其对热通量而言。

4.2 廓线通量法的精度

将19个资料日的3个高度上的通量观测值分别加以平均,得到的平均日变化曲线见图5(a)(b)所示。与图2情况类同。其中黑点表示用1—3层资料经廓线通量法计算的结果。由此可见,廓线通量法得到的热通量是代表两高度层内的平均值,并非某具体高度上的热通量值。为清楚起见,再对3层观测值取平均,然后与廓线通量法结果作对比(见图5中(c)和(d))。对于 UW ,廓线通量法计算结果(以下简称计算值)略高于观测的(3层)平均值。而对 WT ,白天计算值高于观测值,而夜间则相反。

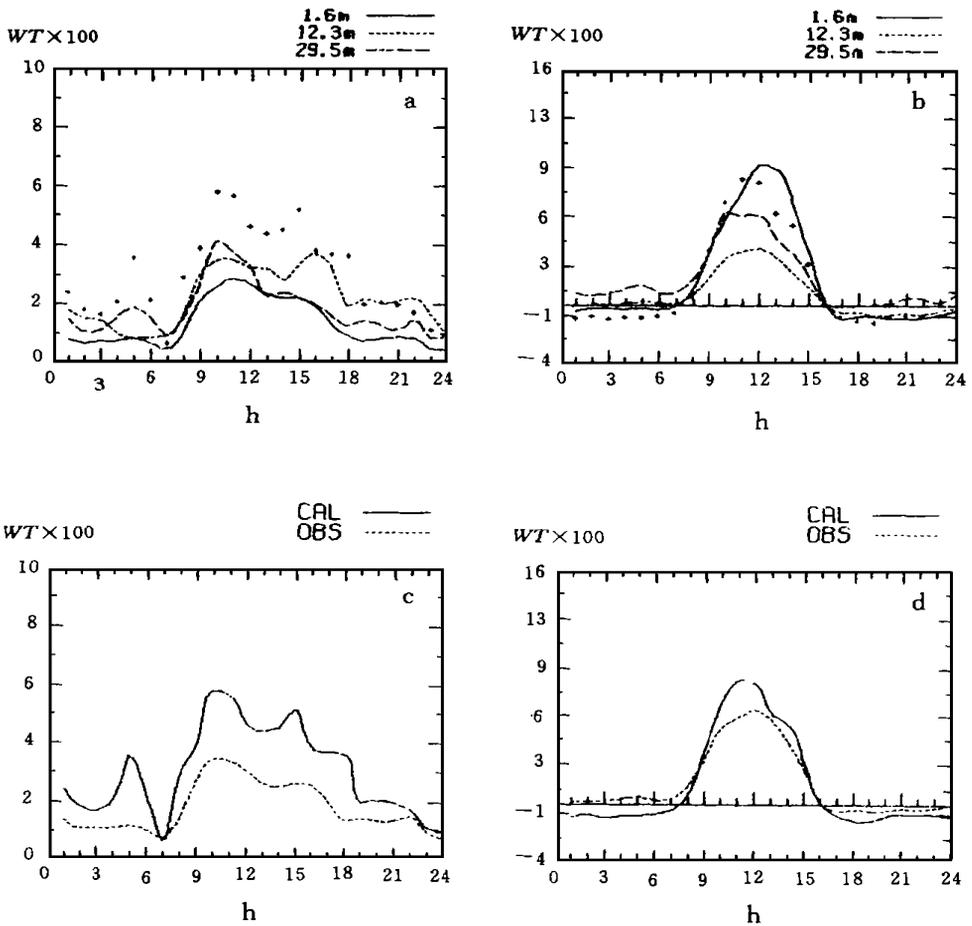


图5 计算值与观测值的比较

考虑到观测值尚有10%的测量误差。因此可认为,如果相对偏差超过10%,说明偏差原因是两种方法之间的差异。这差异部分反映了廓线通量法的精度。为此,定义相对偏差

为

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_{ci} - C_{oi}}{|C_{oi}|} \times 100\% \quad (2)$$

其中 C_{ci} 和 C_{oi} 分别代表计算值和观测值。(2) 式的分子部分即是绝对偏差 E 。计算结果列入表1和表2中。

从表1看, 夜间热通量多数为过低估计, 即计算值低于观测值的平均。白天, 1—2层资料计算为过低估计, 而1—3层资料计算, 则为过高估计。由此可以设想在2层和3层之间是否存在一个最佳层次, 使 E 最小。动量通量也有类似情况。1—3层资料计算结果, 绝大多数是表现为过高估计; 1—2层资料计算, 白天出现过低估计, 似乎也存在一个最佳层次。

表2中列出的 r 值, 绝大多数超过了10%, 说明廓线通量法与涡度相关法之间存在着差异, 或者说是廓线通量法的误差(如果涡度相关法被认为是正确的话)。从相对偏差看, 用1—3层资料略优于用1—2层资料。从而也提醒人们, 廓线通量法不宜用于太靠近地面的层次, 尤其对有植被的陆面上。

对于 UW , 1—3层资料计算, 估计均偏高。这与本文采用29.5m 与1.6m 两层差分也有一定的关系。如果改用29.5m 与 Z_0 两层差分, 则偏差会略小些(见表3)。换言之, UW 值变小了。此变化可以通过对 L 的影响, 使 WT 也有所改变, 但这变化不大。由于筑波资料不包含 Z_0 的温度, 对于 WT 计算无法采用29.5m 与 Z_0 层差分进行类似的试验。虽然, 改用 Z_0 层使公式中 $\ln Z/Z_0$ 值增大而可能使 WT 减小。然而, 公式中两层间的温差值将会非线性增大(因为1.6m 与 Z_0 间的温度变化是超绝热的), 这将使 WT 值增大。所以必须具体情况具体分析。

4.3 动力粗糙度 Z_0 的确定

近地层相似理论中, 动力粗糙度 Z_0 是重要物理量之一。但是, 要正确确定它, 尚有一定难度。除了风洞实验外, 多数是利用近地层相似性公式反推。在中性条件下, Z_0 可以写成

$$\ln Z_0 = \ln Z - ku(Z)/u^* \quad (3)$$

其中 u^* 是摩擦速度, k 为卡门常数。若没有脉动资料, 不能直接给出 u^* 值, 往往采用任意两层风速资料确定之, 即

$$\ln Z_0 = \left(\frac{u_2}{u_1} \ln Z_1 \right) / \left(\frac{u_2}{u_1} - 1 \right) \quad (4)$$

式(4)的推导过程中实际已引进了常数通量层的近似, 从而消去了 u^* 和 k 。

筑波资料既有脉动资料又有平均廓线资料, 可以对式(3)和(4)计算进行对比, 中性条件即 $WT = 0$ 。用式(3)计算结果如下:

$Z_0 = 0.0584$	用1.6m 层的 UW 值计算
$Z_0 = 0.1106$	用12.3m 层的 UW 值计算
$Z_0 = 0.0367$	用29.3m 层的 UW 值计算

表1 计算与观测值的偏差

h	E W T		E U W		h	E W T		E U W	
	1—3层	1—2层	1—3层	1—2层		1—3层	1—2层	1—3层	1—2层
1	-0.0110	-0.0040	0.0106	-0.0076	13	0.0051	-0.0248	0.0177	-0.0280
2	-0.0087	-0.0137	0.0075	0.0049	14	0.0127	-0.0103	0.0203	-0.0202
3	-0.0118	-0.0099	0.0056	0.0098	15	0.0053	-0.0027	0.0257	-0.0226
4	-0.0116	-0.0086	0.0099	0.0076	16	-0.0008	-0.0013	0.0125	-0.0247
5	-0.0132	-0.0117	0.0239	0.0337	17	-0.0048	-0.0036	0.0167	-0.0188
6	-0.0102	-0.0138	0.0114	0.0293	18	-0.0069	-0.0014	0.0227	-0.0120
7	-0.0079	-0.0145	-0.0012	0.0543	19	-0.0071	0.0009	0.0055	-0.0017
8	-0.0067	-0.0062	0.0144	0.0162	20	-0.0033	0.0039	0.0071	0.0176
9	0.0065	-0.0131	0.0120	-0.0229	21	-0.0038	0.0045	0.0062	0.0114
10	0.0176	-0.0142	0.0236	-0.0229	22	-0.0035	0.0009	0.0022	0.0057
11	0.0267	-0.0230	0.0229	-0.0285	23	-0.0044	-0.0004	0.0017	0.0033
12	0.0181	-0.0232	0.0155	-0.0237	24	-0.0069	-0.0039	0.0026	0.0100

表2 计算值与观测值的相对偏差(%)

h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$r(\overline{W T})$	1—3层	-51.9	20.8	33.8	45.3	27.7	8.9	30.4	23.0	-44.4	-100.0	-181.5
	1—2层	-60.0	-46.1	-30.6	-39.6	-34.5	-39.5	-22.9	-11.1	-81.3	-52.1	-24.6
$r(\overline{U W})$	1—3层	97.2	44.2	68.8	67.7	50.3	67.3	80.8	97.7	48.8	82.2	164.4
	1—2层	114.0	-86.7	-74.6	-87.9	-80.0	-99.0	-78.9	-79.8	-86.9	-87.4	-82.7

表3 计算值与观测值的相对偏差(%)

h	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
$r(\overline{W T})$	1—3层	-50.3	23.9	33.6	40.0	27.1	9.8	32.3	23.9	-72.2	-43.7	-110.0
	$r(\overline{U W})$	50.4	8.4	32.6	29.3	30.8	44.4	50.5	57.4	16.7	27.1	78.9

林阳生(Hayashi) (1979)^[6]在同一观测场于1978年8月2—11日观测(2m 高度)。采用式(3)得到 $Z_0=0.037\text{m}$ 。当时观测场上牧草高度约40cm。他还研究了 Z_0 与风速关系,因为风速对牧草的有效几何高度有一定影响。本文1.6m 高度上 Z_0 与之相比大一些。前面已提到9月—11月牧草为50—60cm 高。将3个高度上的 Z_0 作加权平均,得到 $\overline{Z_0}=0.0704\text{m}$ 。Nikuradse (1933)发表的风洞实验结果中,长草(60cm)地上 $Z_0=0.05\text{m}$ (参见文献[7])。与之相比,本文的1.6m 层得到的 Z_0 值比较接近。而 $\overline{Z_0}$ 则偏大。可能因为日本是个岛国,大尺度背景场等压线不平直。其与风洞内的模拟理想流场有一定差别。另外,观测场环境不够均匀。

采用式(4),得出 $Z_0=0.121\text{m}$ 。比式(3)结果大了许多。分析其原因,式(4)在推导中消去了 u^* 和 K 。因为任意两层风速之比可以写成

$$\frac{u_3}{u_1} = \frac{u^*_3/k(\ln Z_3 - \ln Z_0)}{u^*_1/k(\ln Z_1 - \ln Z_0)} \quad (5)$$

若要式(5)与式(4)相同,则条件是 $u^{*3} = u^{*1}$,即“常数通量层”近似必须成立。前面已经得到了 $u^{*2}/u^{*1} = 1.245$ 。所以,式(4)必须修正为

$$\ln Z_0 = \left(\frac{u^{*3}}{cu_1} \ln Z_1 - \ln Z_3 \right) / \left(\frac{u_3}{cu_1} - 1 \right) \quad (6)$$

其中 $c = u^{*3}/u^{*1}$,在此取值为1.245,按照式(6)再计算得 $\overline{Z_0} = 0.0682\text{m}$ 与式(3)得到的 $\overline{Z_0} = 0.0704\text{m}$ 十分接近。再一次说明,廓线法给出是平均效应。利用平均场资料计算 Z_0 值必须注意动量通量随高度变化的订正。否则,得出的 Z_0 值将偏高。

5 讨论

以往,在将近地层相似理论具体应用于实际的过程中,常会遇到一些困惑。例如同样计算HEEIE试验中戈壁地表的 Z_0 值,作者用铁塔梯度资料得出 $Z_0 = 0.0096\text{m}$,其它作者^{8,9}得出 $Z_0 = 0.0045\text{m}$,用湍流统计相关法得到 $Z_0 = 0.0012\text{m}$ (2m高度)。后者与风洞试验中平坦沙漠下垫面上 $Z_0 (= 0.001\text{m})$ 相当,其余例子不一列举。这表明,对近地层相似理论的适用性认识尚不完全。本文利用筑波资料作了初步分析,但仍存在一定的局限性:(1)观测场不够大,四周植被比较复杂;(2)下垫面是较长的牧草,与完全裸地在动力热力条件上都存在差异;(3)流场的代表性问题,为什么12.3m层风速较大?(4)资料的样本数不够多。

分析结果表明:

(1)在有植被的陆面上,尤其对热通量而言,假设近地层为常数通量层基本上是不成立的。

(2)用平均场风、温廓线资料经相似理论公式计算的通量(或参数化)只代某高度层内的平均效果,并非某高度的具体值。另外,适当选择参考层高度会有利于减少误差。这必须引起模式工作者注意,以便得到逼真的大气下边界条件。

(3)在没有脉动资料情况下, Z_0 的正确估算还是一个困难的问题。 Z_0 的误差将影响湍流总体拖曳系数 C_D, C_H, C_E 的正确性,这些系数对于用总体通量法计算湍流通量交换是至关重要的。

参考文献

- [1] Hans-Dieter Haenel. Surface-Layer profile evaluation using a generalization of robinson's method for the determination of d and z_0 . *Boundary-layer meteorology*, 1993, 65: 55- 67.
- [2] L. Mahrt, M. EK, Sun J and Frech M. Marine boundary layer parameterizations for large-scale models, final report, directorate of geophysics air force materiel domm and hanscom air force base. 1994, MA 01731- 3010.
- [3] Dyer A. J. A review of flux-profile relationships, *Boundary-layer meteorology*, 1974, 7: 353- 372.
- [4] 苗曼倩, 张雷鸣. 非正常天气海面通量特征. *大气科学*, 1990, 14(4): 464- 474.
- [5] Akihiro Yorisaki and Kenji Kai. Statistical characteristics of turbulence measured at the two heights in the surface boundary layer. *Bulletin of the environmental research center, the university of TSUKUBA*, 1983, 7: 47- 62.
- [6] Yonsay Hayashi. On zero-plane displacement and roughness length above a grass field. *Bulletin of the environmental research center, the university of TSUKUBA*, 1979, 3: 25- 32.
- [7] 赵鸣, 苗曼倩等. 边界层气象学教程. 北京: 气象出版社, 1991.
- [8] 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数. *高原气象*, 1992, 11(4): 371- 380.

- [9] 苗曼倩. 陆面上总体输送系数特征. 气象学报, 1996, 54(1): 95- 101.
- [10] Kazuo Kotoda, Yasuo sakura, Yosay Hayashi and Kenji Kai. On the observation and data acquisition system for the heat and water balance studies of ERC experimental field. Bulletin of the enviromental research center, the university of TSUKUBA 1978, 2: 65—89.

STUDY ON THE APPLICABILITY OF THE SURFACE LAYER SIMILARITY THEORY

Miao Manqian Zhu Chaoqun

(*Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093*)

Ji Jinjun

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica, Beijing, 100029*)

Abstract

The applicability of the similarity theory in the surface layer is studied by using the gradient observations of fluctuation and mean fields. The study results show that the approximation of constant flux layer can not come into existence basically in the surface layer over vegetation land. The $\langle W T \rangle$ decreases with height significantly. The $\langle U W \rangle$ increases about 50% with height within 12m over surface. The heat flux calculated by the profile-flux method represents the mean value within some height.

Key words: Similarity theory, Applicability, Data analysis and theory study.