

六种近地层湍流动量输送系数计算方案对比分析^{* 1}

胡艳冰¹⁾²⁾ 高志球²⁾ 沙文钰¹⁾ 肖涛³⁾ 高超⁴⁾

¹⁾(中国人民解放军理工大学气象学院,南京 211101)

²⁾(中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室,北京 100029)

³⁾(94514 部队气象保障室,济南 250002) ⁴⁾(中国科学院大气物理研究所竺可桢-南森国际研究中心,北京 100029)

摘 要

选取 30 多年来近地层湍流通量研究中具有代表性的六种参数化方案,应用 GAME/Tibet 试验中那曲通量观测站的实测资料,对比分析了各方案计算所得的湍流动量输送系数(C_M)之间的差异。结果表明:六种参数化方案计算得到的湍流动量输送系数之间存在较大差异。对于那曲观测站稀疏短草下垫面而言,稳定条件下当理查逊数小于 0.1 时,除 Businger71 方案存在显著低估以外,其他各方案均能较好估算湍流动量输送系数;不稳定条件下,Dyer74 方案对湍流动量输送系数的估算效果最好,其次为 Wang02,Launiainen95 和 Louis82 方案,Businger71 方案误差较大。

关键词: 空气动力学粗糙度;湍流动量输送系数;参数化方案

引 言

气候和中尺度数值模拟结果对近地层动量和热量通量极为敏感^[1-2]。因此,发展可应用于数值模式的近地层湍流通量参数化方案已经成为一个十分重要的研究领域^[3,4]。半个多世纪以来,作为近地层研究的基础,Monin-Obukhov^[5]相似理论被广泛地应用于估算地气之间的湍流通量交换。在这一理论基础之上,众多学者依据不同试验资料和分析方法,相继提出了一系列参数化方案。其中,1971 年 Businger 等^[6]分析了 Kansas 试验观测资料进而提出一组湍流通量廓线关系(以下简称 Businger71)。1974 年 Dyer^[7]对之前二十多年不同学者所做的工作进行了总结分析(Dyer74)并修正了 Businger71 中的部分参数。1979 年 Louis^[8]提出了适用于中尺度数值模式中无需循环迭代的新型参数化方案(Louis79),这一方案的提出对数值计算湍流通量产生了深远的影响。1982 年,Louis 等^[9]对 Louis79 中部分参数和表达式进行了改进(Louis82)。到目前为止,Louis79 和 Louis82 因为其公式简单且无需循环迭代的特点而

被广泛应用于气象模式中^[10],包括美国海军全球和区域模式以及欧洲中心中尺度天气预报 GCM 模式等^[1,3,11]。1988 年 Holtslag 等^[12]提出了应用于夜间近地层陆面模式中的参数化方案(Holtslag88),1991 年 Beljaars 等^[13]给出了新的热量普适函数(B&H91)。1995 年 Launiainen^[14]给出了稳定度参数的解析式(Launiainen95),从而避免了循环迭代。针对 Louis82 存在的不足并结合 Holtslag88,2002 年 Wang 等^[10]提出了新的参数化方案(Wang02)。显而易见,由于区域模式对湍流通量参数化方案的极端敏感性,当这些不同的湍流通量参数化方案应用到气候和中尺度模式中可能使模拟结果产生重大差异。然而在模式中测试这些参数化方案存在一定困难:无法区分模拟结果的偏差是由于近地层参数化不足还是由模式其他部分引起的;近地层以上的大气性质随着近地层通量的变化而变化。所以,独立于模式之外,对比分析这些参数化方案具有重要的意义^[15]。

因此,本文将利用 GAME/Tibet 试验的观测资料,对比分析对于陆面下垫面而言在一定的近地层层结稳定度变化范围内,由这些方案计算所得的湍

* 国家自然科学基金重点项目“北极苔原和海冰地区边界层物理过程的观测研究”(40333032)和国家自然科学基金面上项目“土壤水分垂直运动对不同陆地表面能量平衡的影响”(40575007)共同资助。

2006-06-06 收到,2007-01-04 收到再改稿。

流动量输送系数之间的差异,以期为近地层湍流流动量通量的数值计算提供参考依据。

1 对比分析

选取1998年5—9月GAME/Tibet试验研究组在青藏高原上进行的加强观测中那曲通量观测站的观测资料,对Businger71, Dyer74, Louis82, B&H91, Launiainen95和Wang02等六种参数化方案进行深入的对比分析,其中各参数化方案的具体表达式详见相关文献[6-10, 12-14]。其中Businger71, Dyer74和B&H91三种方案在计算中必须通过循环迭代求解, Louis82和Wang02方案则是以Businger71方案为基础,直接将湍流通量输送系数参数化为整体理查逊数和粗糙度的函数,有效避免了循环迭代;而Launiainen95方案则是通过给出稳定度参数与整体理查逊数之间的近似计算关系而避免循环迭代。

那曲站地处 $31.379^{\circ}\text{N}, 91.9^{\circ}\text{E}$, 海拔4580 m^[16]。那曲通量观测资料中有超声观测的时间区间为1998年7月15日至9月15日。其中由于天气影响以及仪器维护等原因,观测资料不连续。为提高观测资料的可信度,对其进行简单的质量控制。首先,为保证风速观测值能够完全真实地反映大气流动性质,避免由于绕流等因素所造成的影响,首先从观测资料序列中挑选出风向来向朝着风速测量仪的那部分资料。另外,当超声观测的瞬时风速本身较小,计算得到的摩擦速度也很小时,仪器误差将变得非常显著,从而容易导致在计算 C_{Mobs} 时产生较大误差,因此,进一步挑选出其中摩擦速度 ≥ 0.2 m/s,同时超声观测风速 ≥ 2.5 m/s的观测资料。最后,得到可供应用于方案验证的样本总数为69,其中稳定条件下共有39个资料点,不稳定条件下共有30个资料点。

整体理查逊数 R_{IB} 和湍流动量输送系数观测值 C_{Mobs} 可根据式(1)和(2)计算得到, C_{Mobs} 随 R_{IB} 的变化如图1所示。

$$R_{\text{IB}} = \frac{g(z_2 - z_1)(\theta_2 - \theta_1)}{\theta(u_2 - u_1)^2} \quad (1)$$

$$C_{\text{Mobs}} = u_*^2 / u^2 \quad (2)$$

其中,下标2表示观测高度 z_2 为3.5 m,下标1表示观测高度 z_1 为1.3 m。 θ_2, θ_1 分别表示对应高度上的虚位温。 $\bar{\theta}$ 为平均值。 u_2, u_1 分别为对应高度上慢响应风速观测值。 u_* 和 u 分别为2.9 m处超声观测得到的摩擦速度和风速。下垫面为稀疏短草草

原,空气动力学粗糙度 z_0 和热力粗糙度 z_{0h} 的取值见参考文献[16], $kB^{-1} = 4.62$,即 $z_{0h} = z_0 / e^{4.62}$,其中应用Louis82方案计算时取 $z_{0h} = z_0$ 。观测高度 z 取为超声观测高度2.9 m。各方案计算得到的 C_{M} 与 C_{Mobs} 之间的1:1比例图如图2所示。

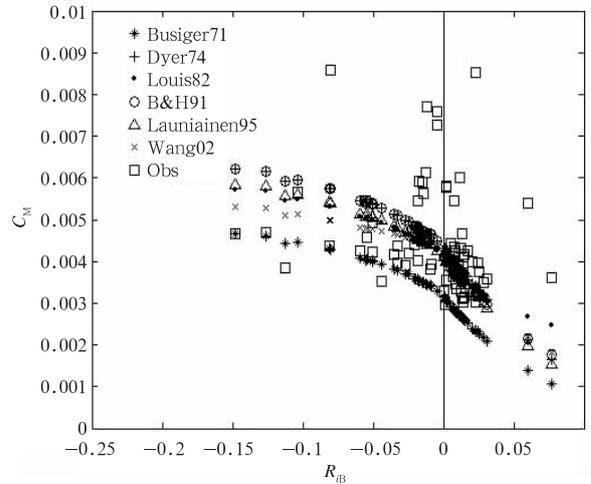


图1 利用那曲站观测资料,应用六种方案计算得到的湍流动量输送系数 C_{M} 和观测得到的 C_{Mobs} 随 R_{IB} 变化散点分布图

Fig. 1 Plot of the turbulent momentum flux transfer coefficient (C_{M}) calculated by six parameterization schemes with Naqu flux measurements and the coefficient by observations (C_{Mobs}) varies according to R_{IB}

参考Gao等^[9]给出的误差分析方法,分别计算了对应不稳定和稳定条件下各方案估算的 C_{M} 相对 C_{Mobs} 的归一化标准差(E_{N}),见表1。 E_{N} 定义为:

$$E_{\text{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - C_i)^2}{\sum_{i=1}^n C_i^2}} \quad (3)$$

式(3)中, L_i 表示应用参数化方案计算得到的湍流动量输送系数 C_{M} , C_i 表示根据观测资料直接得到的湍流动量输送系数 C_{Mobs} , n 表示样本总数,对应稳定和稳定条件下分别为39和30。

从表1中可以看出,稳定条件下,Launiainen95方案误差最小,其后依次为Wang02, Dyer74, B&H91和Louis82方案, Businger71方案的计算误差最为显著。Launiainen95方案和Wang02方案在计算中均采用了B&H91方案所给出的普适函数,

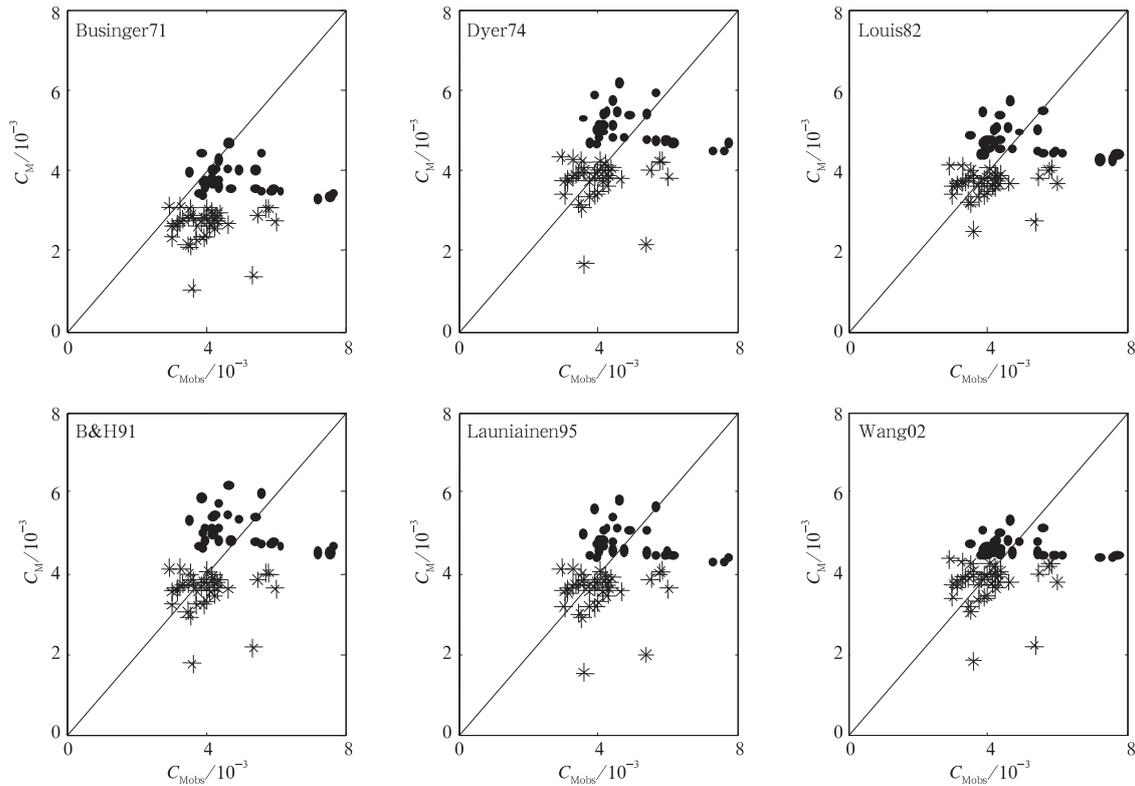


图2 利用那曲站观测资料,应用六种参数化方案计算得到的湍流动量输送系数 C_M 与观测得到的 $C_{M_{obs}}$ 之间的 1:1 比例图 (*表示稳定条件,●表示不稳定条件)

Fig. 2 The plot of the turbulent momentum flux transfer coefficient calculated by six parameterization schemes versus transfer coefficient determined by observation directly (“*” means stable condition and “●” means unstable condition)

表1 六种方案分别应用那曲观测资料计算得到的 C_M 相对 $C_{M_{obs}}$ 的归一化标准差 (E_N)

Table 1 The normalized standard error of the estimation (E_N) compared the C_M calculated by six schemes to the $C_{M_{obs}}$ determined by direct measurements

	Businger71	Dyer74	Louis82	B&H91	Launiainen95	Wang02
稳定条件 E_N	0.402	0.265	0.284	0.272	0.253	0.265
不稳定条件 E_N	0.382	0.269	0.278	0.269	0.279	0.271

因而,这一误差分析结果表明:稳定条件下, B&H91 方案针对夜间稳定层结状况所提出的普适函数对于湍流动量输送系数有较好的计算效果;同时,在这一理查孙数范围内, Dyer74 方案也能够较好的估算湍流动量输送系数;应用 Louis82 方案计算时,取热力粗糙度等于空气动力学粗糙度,这和实际情况不符,因而误差相对较大;当理查孙数小于 0.1 时, Businger71 方案计算的湍流动量输送系数存在显著误差。不稳定条件下, Dyer74 方案的估算误差最小, Wang02 方案其次,随后是 Louis82 和 Launiainen95 方案, Businger71 方案的估算误差最大,这说明不稳定条件下,当理查孙数绝对值小于 0.2 时, Dyer74 方案对湍流动量输送系数的估算效果最好。

结合以上计算结果,给出以上六种方案在稀疏短草下垫面状况下对湍流通量的估算效果以及各方案的特性(表 2)。

表2 六种方案特性以及计算效果对比

Table 2 Contrast of the six parameterization schemes on characters and evaluation

方案	是否采用 循环迭代	稳定 ($0 < R_{iB} < 0.1$)	不稳定 ($-0.2 < R_{iB} < 0$)
Businger71	是	偏差较大	偏差较大
Dyer74	是	好	好
Louis82	否	好	较好
B&H91	是	好	较好
Launiainen95	否	好	较好
Wang02	否	好	较好

2 小 结

通过对 Businger71, Dyer74, Louis82, B&H91, Launiainen95 以及 Wang02 这六种参数化方案的对比分析,得到以下几点主要结论:

1) Businger71, Dyer74 和 B&H91 方案依据普适函数通过循环迭代来计算湍流通量整体输送系数,如直接应用于数值模式中,需要耗费大量 CPU 计算时间。

2) 应用以上六种参数化方案计算得到的湍流动量输送系数之间存在较大差异,且这种差异的大小受近地层稳定度和下垫面空气动力学粗糙度的影响十分显著。

3) 通过资料验证发现,对于稀疏短草下垫面而言,稳定条件下当理查孙数小于 0.1 时,除 Businger71 方案存在显著低估以外,其他各方案均能较好估算湍流动量输送系数。不稳定条件下当理查孙数绝对值小于 0.2 时, Dyer74 方案对湍流通量整体输送系数的估算效果最好,其次为 Wang02, Launiainen95 和 Louis82 方案, Businger71 方案误差较大。

参 考 文 献

- [1] Gao Z, Bian L G, Zhou X J. Measurements of turbulent transfer in the near-surface layer over a rice paddy in China. *J Geophys Res*, 2003, 108(D13): 4387-4399.
- [2] 丁一汇. 地表通量的计算问题. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 29-35.
- [3] European Centre for Medium-range Weather Forecasts. Proceedings of ECMWF Workshop on Parameterization of Fluxes over Land Surfaces. European Centre for Medium-range Weather Forecasts, Reading, England, 1988: 1-392.
- [4] Garratt J R, Pielke R A. On the sensitivity of mesoscale models to surface-layer parameterization constants. *Boundary-Layer Meteorol*, 1989, 48: 377-387.
- [5] Monin A S, Obukhov A M. Basic regularity in turbulent mixing in surface layer of the atmosphere. *Akad Nauk SSSR Geofiz Inst*, 1954, 24: 163-187.
- [6] Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J Atmos Sci*, 1971, 28: 181-189.
- [7] Dyer A J. A review of flux-profile relationships. *Boundary-Layer Meteorol*, 1974, 7: 363-372.
- [8] Louis J F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol*, 1979, 17: 187-202.
- [9] Louis J F, Tiedtke M, Geleyn J F. A Short History of the Operational PBL-parameterization at ECMWF. Workshop on Planetary Boundary Layer Parameterization, Shinfield Park, Reading, Berkshire, UK, European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1982: 59-79.
- [10] Wang S P, Wang Q, Doyle J. Some Improvements to Louis Surface Parameterization. Paper Presented at 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence, Am Meteor Soc, Wageningen, Netherlands, 2002.
- [11] Miller M J, Beljaars A C M, Palmer T N. The sensitivity of the ECMWF model to the parameterization of evaporation from the tropical ocean. *J Climate*, 1992, 5: 418-434.
- [12] Holtslag A A M, De Bruin H A R. Applied modeling of the nighttime surface energy balance over land. *J App Meteorol*, 1988, 27: 689-704.
- [13] Beljaars A C M, Holtslag A A M. Flux parameterization over land surfaces for atmospheric models. *J App Meteorol*, 1991, 30: 327-341.
- [14] Launiainen J. Derivation of the relationship between the Obukhov stability parameter and the bulk Richardson number for flux-profile studies. *Boundary-Layer Meteorol*, 1995, 76: 165-179.
- [15] Gao Z, Chae N, Kim J, et al. Modeling of surface energy partitioning, surface temperature and soil wetness in the Tibetan prairie using the Simple Biosphere Model 2 (SiB2). *J Geophys Res*, 2004, 109, D06102, doi:10.1029/2003JD004089.
- [16] Yang K, Koike T, Yang D. Surface flux parameterization in the Tibetan Plateau. *Boundary-Layer Meteorol*, 2003, 116: 245-262.

The Comparison of Six Methods to Calculate Turbulent Momentum Transfer Coefficient of Near-surface Layer

Hu Yanbing¹⁾²⁾ Gao Zhiqiu²⁾ Sha Wenyu¹⁾ Xiao Tao³⁾ Gao Chao⁴⁾

¹⁾ (Meteorology Institute of the PLA Science and Engineering University, Nanjing 211101)

²⁾ (State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029) ³⁾ (Weather Guarantee Room of Troop 94514, Jinan 250002)

⁴⁾ (Nansen-zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029)

Abstract

The momentum bulk transfer coefficient (C_M) is calculated by using six typical parameterization schemes and verified by the data of Naqu flux observation station of GAME (Global Energy and Water Cycle Experiment, Asian Monsoon Experiment)/Tibet Plateau Experiment. The results show obvious difference exists between results of the six schemes and the degree of difference is decided by the type of undersurface and the near surface stability. Wherein, schemes of Businger 71, Dyer 74 and B&H91 must calculate the turbulent flux transfer coefficient by iteration and waste CPU time for numerical simulation. For flux data of Naqu observation station which is covered by sparse grass is considered, when the Richardson number is less than 0.1, all the other five schemes can do better estimation on the C_M except the scheme of Businger in 1971 which has an obvious underestimation. Under unstable conditions, the scheme of Dyer in 1974 has the best estimation on the momentum bulk transfer coefficient (C_M), the schemes of Wang et al. in 2002, Launiainen in 1995 and Louis et al. in 1982 can also be used with gradually increasing error, and the scheme of Businger in 1971 has serious underestimation.

Key words: aerodynamics roughness length; the momentum bulk transfer coefficient; parameterization scheme