

邱玉珺, 吴风巨, 刘志. 梯度法计算空气动力学粗糙度存在的问题[J]. 大气科学学报, 2010, 33(6): 697-702.

Qiu Yu-jun, Wu Feng-ju, Liu Zhi. Problem of the gradient method to study aerodynamic roughness[J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33(6): 697-702.

梯度法计算空气动力学粗糙度存在的问题

邱玉珺¹, 吴风巨², 刘志²

(1. 南京信息工程大学 中国气象局大气物理与大气环境重点开放实验室, 江苏 南京 210044;

2. 内蒙古苏尼特左旗气象局, 内蒙古 苏尼特左旗 026000)

摘要:利用2009年春季内蒙古苏尼特左旗风速、空气温湿度野外观测资料,用梯度法研究荒漠化草原区空气动力学粗糙度 Z_0 时发现, Z_0 有明显的日、月分布规律。中性条件下,根据风速对 Z_0 的不同影响可分为3个特征区。梯度法计算 Z_0 有风速条件约束,只有在风速较大时计算的 Z_0 真实可靠,确定可靠风速区域是正确应用梯度法计算 Z_0 的关键。 Z_0 随风速值的增大成指数关系递减,可从指数函数的收敛性确定 Z_0 。

关键词:风速对数廓线;粗糙度;摩擦风速;指数函数

中图分类号:P401 文献标识码:A 文章编号:1674-7097(2010)06-0697-06

Problem of the Gradient Method to Study Aerodynamic Roughness

QIU Yu-jun¹, WU Feng-ju², LIU Zhi²

(1. Key Laboratory of Atmospheric Physics & Environment of China Meteorological Administration, NUIST, Nanjing 210044, China;

2. Sonid Left Banner Meteorological Bureau, Sonid Left Banner 011300, China)

Abstract: Based on the observed wind velocity data, humidity and temperature data from April 20 to June 18, 2009 in the Sonid Left Banner of Inner Mongolia, the aerodynamic roughness (Z_0) is studied and the gradient method calculated Z_0 is discussed. The results show that Z_0 has daily and monthly distribution characteristics obviously. Wind velocity has different effect on the Z_0 . When the wind field is under the neutral stability, there are 3 wind characteristic regions with different effect on Z_0 . Wind velocity is a constraint condition of the gradient method to study Z_0 . Only on the large wind velocity condition, the Z_0 calculated base on wind data is really reliable. Z_0 is exponential descent with the wind velocity increasing. It can be determined by the exponential astringency.

Key words: logarithmic velocity profile; aerodynamic roughness; friction velocity; exponential function

0 引言

空气动力学特征直接影响地—气系统物质与能量输送以及局地气候,计算和分析不同下垫面的空气动力学参数成为研究陆面过程的关键^[1-3],其中,空气动力学粗糙度 Z_0 是研究地球表面各种物质流运动中的一个重要概念^[4-6],也是水土保持科学的一个重要理论与实际问题^[7-10]。

Z_0 表示风速为零的高度,一般通过对中性条件下近地面层两个以上高度风速资料进行对数廓线拟合求解得到^[7,11],或利用弱不稳定层结下多个高度上的实测风廓线和理论风廓线做拟合计算得到^[2-3,12],但因 Z_0 是气流作用于地表表现出的一种性质^[8],所以气流的不同流体特性将对 Z_0 的计算产生影响,这已被野外观测实验^[13-15]和风洞实验^[16-17]所证实, Z_0 是随风速而变的量。如茅宇豪等^[15]对内

收稿日期:2009-01-05; 改回日期:2009-02-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40705005);南京信息工程大学科研基金(20070128);江苏省青蓝工程资助项目

作者简介:邱玉珺(1975—),女,甘肃金昌人,博士,副教授,研究方向为大气物理与大气环境, qyj@nuist.edu.cn.

蒙古 11 种下垫面下 Z_0 的观测研究发现,即使是同一种下垫面,在不同时期的 Z_0 也存在差异,风速、 Z_0 与摩擦风速之间有正相关关系。

我们在观测研究半干旱荒漠化草原 Z_0 时,也发现风速对 Z_0 有显著影响,针对这种情况,本文探讨了利用梯度法计算 Z_0 时存在的问题,并提出了改进的办法,为进一步研究 Z_0 提供参考。

1 资料和方法

本研究观测设在内蒙古锡林郭勒盟苏尼特左旗 (111°24'E, 42°45'N) 荒漠化草原腹地,该旗位于内蒙古锡林郭勒盟西北部,地处蒙古高原东南部,属中温带半干旱大陆性气候。观测场有围栏保护,地表保持原生态,观测期间下垫面植被稀疏,观测时间分 2008 年 4 月 20 日—5 月 18 日、2008 年 5 月 19 日—6 月 18 日两个时段,分别称观测 1 期、观测 2 期。

风速观测使用 010C 风速传感器,分 4 层架设,高度分别为 0.2、0.5、1 和 2 m,因 0.2 m 风速传感器在观测期间运行不稳定,文中 Z_0 的计算只用其他 3 层,计算理查森数 Ri 和稳定度时,缺测的 0.2 m 风速用其他 3 层风速对数拟合插值得到。空气温湿度观测高度分别为 0.2、2 m。资料时间分辨率为 3 s,文中所用分钟和半小时资料均由 3 s 原始资料平均得到。

资料质量控制分 2 步,2 个观测期 1 min 平均风速值用对数分布拟合时,分别有 2.9%、1.3% 没有通过 0.05 的信度检验,这部分资料被剔除。另外,用对数分布拟合风速资料的前提是中性层结,中性层结用 Ri 判断 ($-0.1 < Ri < 0.1$), Ri 的计算方法和稳定度分类参见文献 [18],通过计算发现,中性条件下的 Ri 占全部资料的 91%。湍流交换系数 K_m 是表征近地层湍流发展强弱程度的物理量,是湍流通量与其平均梯度的比例系数,具体计算方法见文献 [19]。

Bagnold^[7] 经过大量室内风洞试验和野外试验研究发现,固定沙质表面上风速与高度的对数之间存在正比关系

$$u = \frac{u_*}{k} \ln \frac{z}{Z_0} \quad (1)$$

其中: z 表示高度; Z_0 是粗糙度; u 表示高度 z 处的风速; u_* 表示摩擦风速; k 为卡曼常数,一般取 0.4。已知两个高度 z_1 、 z_2 处的风速 u_1 、 u_2 时,可通过下式来计算 Z_0

$$\lg z_2 - \frac{u_2}{u_1} \lg z_1 = \frac{\lg z_2 - \frac{u_2}{u_1} \lg z_1}{1 - \frac{u_2}{u_1}} \quad (2)$$

实际计算过程中,只用 2 个高度的风速计算地表粗糙度误差比较大^[17],任何一个风速的变化都会影响到地表粗糙值^[13-17],本文计算 Z_0 的方法与^[11,16-18]相同,用风速对数拟合系数 a 、 b 计算得到, u_* 是通过将计算得到的 Z_0 代入 (1) 式求得,具体公式如下

$$u_1 = a + b \ln z, \quad (3)$$

$$Z_0 = \exp(-a/b), \quad (4)$$

$$u_* = k \cdot \frac{u_1}{\ln(\frac{z}{Z_0})} \quad (5)$$

其中 u_t 表示高度 z 处的 t 时刻风速,因用公式 (3) ~ (5) 计算粗糙度需要知道不同高度风速值,所以把此方法称作梯度法。

2 结果与分析

2.1 影响粗糙度的因子

2 个观测期内中性层结风速资料占总观测资料的比例较高,何清等^[18] 对塔克拉玛干沙漠地区春季的风速资料统计也得到,大部分的风场是中性层结,说明选择春季研究 Z_0 时机较好。

理论上讲,气流接触地面时,接触面上的速度为 0。但实际由于地面起伏不平或有诸多障碍物,风速在离开地面一定距离处才为 0。对特定地表, Z_0 是地表本身的一种特性,它与有无气流存在无关,不随风速、稳定度或应力而发生变化^[8],但本文研究发现, Z_0 有明显的日分布规律 (图 1)。2 个观测期 Z_0 都是白天小、夜晚大,白天相对平稳,夜晚波动较大,这与风速的日分布规律正好相反,说明 Z_0 是随风速而变的量。

另外通过对比发现,2 个观测期 Z_0 不同,说明 Z_0 除了有日分布特征外,还有更长月份分布特征。2 个观测期的时间尺度为月,观测 1 期后期植被开始顶芽,观测 2 期植被开始返青,2 个观测期下垫面状况不同,由图 1 可见,观测 2 期 Z_0 值比观测 1 期大,说明梯度法计算的 Z_0 能反映下垫面粗糙程度。

Z_0 是用对数分布拟合风速廓线得到,其计算结果与风速大小有直接联系。相关分析发现,2 个时期 Z_0 与风速、气温负相关,与相对湿度正相关,都通过了 0.01 的信度检验 (表 1), Z_0 与风速的相关系数

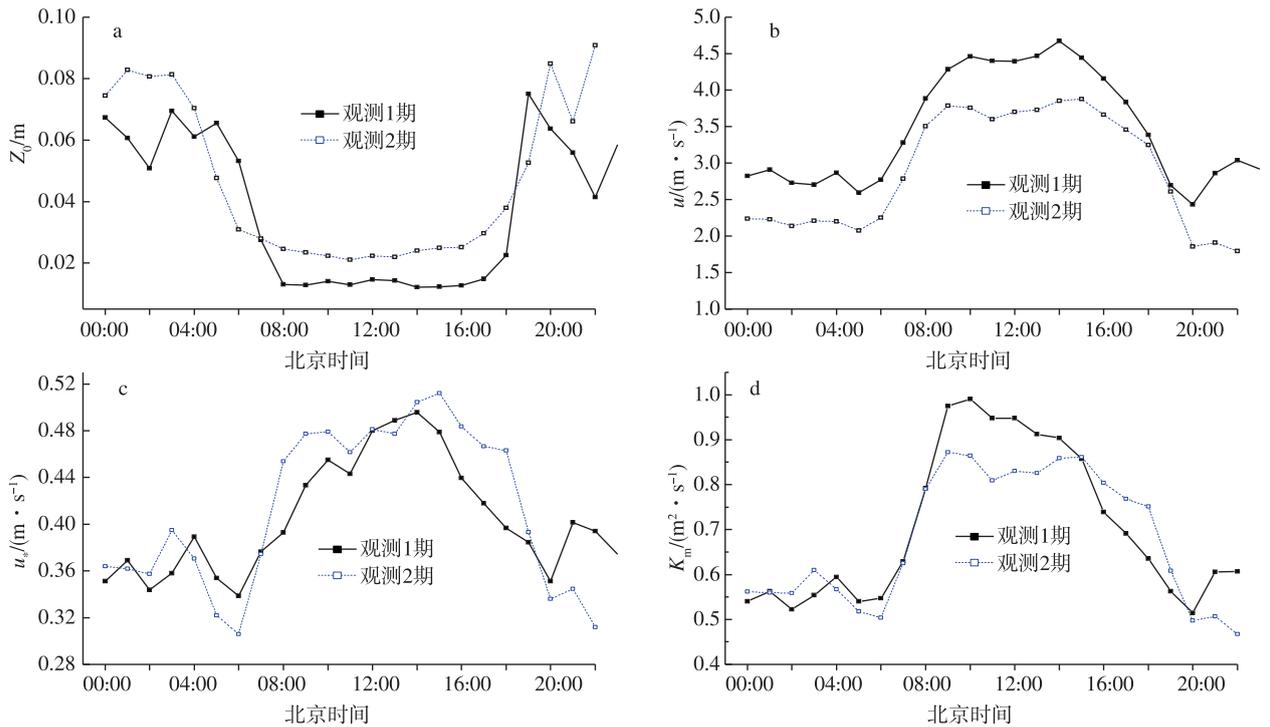


图1 2个观测期粗糙度(a)、风速(b)、摩擦风速(c)、湍流交换系数(d)日分布特征

Fig.1 The daily distributions of (a) Z_0 , (b) wind velocity, (c) friction velocity and (d) turbulent exchange coefficient

表1 2个观测期粗糙度与相关气象要素的相关系数

Table 1 The correlation coefficient between the Z_0 and meteorological elements

	0.5 m 处 风速	1 m 处 风速	2 m 处 风速	0.2 m 处 气温	2 m 处 气温	0.2 m 处 相对湿度	2 m 处 相对湿度	地表温度	0.05 m 土 壤含水量
观测1期 Z_0	-0.422	-0.333	-0.303	-0.208	-0.159	0.175	0.104	-0.114	0.007
观测2期 Z_0	-0.587	-0.337	-0.316	-0.178	-0.125	0.259	0.213	-0.095	0.427

远大于其他气象要素, Z_0 直接受风速影响。其他气象要素如气温、相对湿度与风速的相关系数都比 Z_0 与风速的相关系数高, 这是因气温影响大气稳定性、空气湿度影响空气内摩擦力而直接对风速产生影响。

考虑到各气象要素与风速有显著的相关性, 所以在控制风速不变的情况下, 对各气象要素与 Z_0 进行偏相关分析, 发现地表温度、土壤湿度与 Z_0 的相关系数明显增大, 气温、相对湿度与 Z_0 的相关系数反而减小, 前两者与 Z_0 的相关系数高于后两者, 这是因地表温湿条件影响地表与空气接触面作用力, 从而直接影响 Z_0 。

2.2 风速的影响

由公式(1)得到, 如果 Z_0 是一定值, 那么风速与 u_* 成线性关系, 但从 2 个观测期 u_* 与风速的关系发现(图 2b、图 3b), 二者并不是简单的线性关系,

这说明 Z_0 随风速而变。吴正^[11]曾指出, 早在 20 世纪 60 年代, 前苏联学者康斯坦丁诺夫通过大量的野外考察资料就得到, 随着风速增大, 动力湍流作用加强, 使 Z_0 降低, 且 Z_0 较小; 随着大气稳定性增加, Z_0 增加, 且变化较显著。从图 2、图 3 可看到, 风速越小, Z_0 变化越大, 小风速下的摩擦风速、 K_m 波动大, Z_0 值分布范围较大, 随风速增大, Z_0 趋于一定值, 波动较小。

分析发现, 2 个观测期均有 3 个明显的风速区对 Z_0 产生不同影响, Z_0 都在风速小于 0.5 m/s 时出现较大值, 且以指数形式从 0.6 m 迅速递减到 0.2 m 左右, 此区域的 u_* 、 K_m 随风速均有对数增加趋势, Z_0 的变化区域与二者相对应。普朗特曾估算出野外风速超过 1 m/s 时, 空气流动必然为湍流^[2], 而将此值换算到 0.5 m 高度时, 风速值与 0.5 m/s 接近, 也就是说, 该风速特征区气流是层流运动。

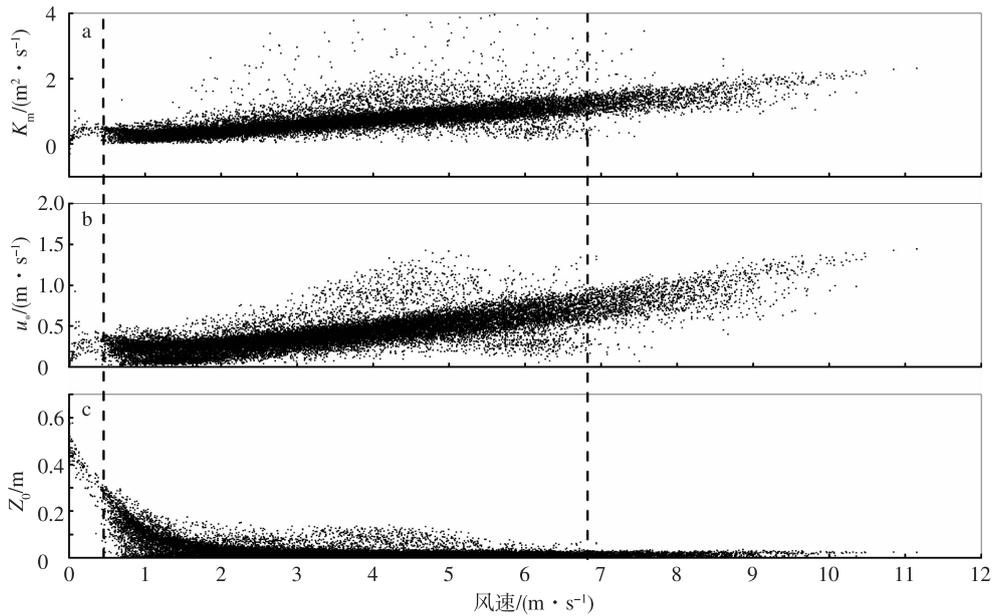


图 2 观测 1 期湍流交换系数(a)、摩擦风速(b)、粗糙度(c)随风速的分布

Fig. 2 The distributions of (a) turbulent exchange coefficient, (b) friction velocity and (c) Z_0 with the wind velocity during observation period 1

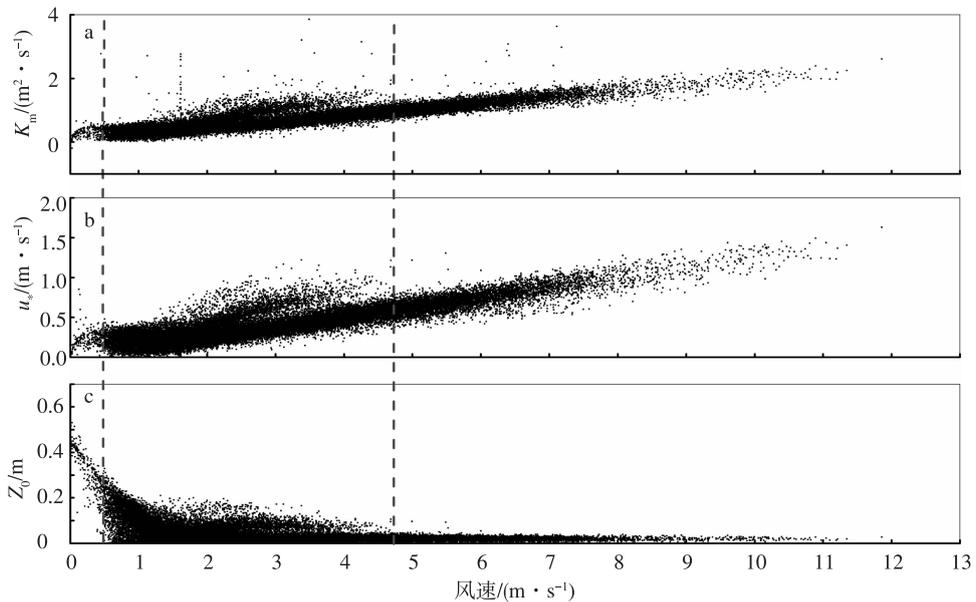


图 3 观测 2 期湍流交换系数(a)、摩擦风速(b)、粗糙度(c)随风速的分布

Fig. 3 The distributions of (a) turbulent exchange coefficient, (b) friction velocity and (c) Z_0 with the wind velocity during observation period 2

观测 1 期的第 2 个风速特征区出现在 $0.5 \sim 6.9 \text{ m/s}$ 范围, 观测 2 期则出现在 $0.5 \sim 4.8 \text{ m/s}$, Z_0 在 $0 \sim 0.2 \text{ m}$ 间波动, 相应的 u_* 、 K_m 也有较大波动。观测 1 期和 2 期的第 3 个风速特征区分别出现在风速大于 6.9 m/s 和大于 4.8 m/s 时, 此区域中的 Z_0 变化较平稳, 逐渐收敛于某一定值, u_* 、 K_m 波动较小, 与风速的线性关系较显著。2 个观测期区域 2、3 的

风速界限值不一致, 可能是受下垫面覆盖条件影响, 观测 2 期地表植被覆盖状况好于观测 1 期, 从而影响了近地面风速流场。

Z_0 与风速的这种分区特征与风速流过地表面时的状态有关^[8], 风速与地表的接触薄层内, 气流运动分为层流流动和湍流流动, 层流流体以平稳、互不混杂的形式运动, 其切应力表现为内摩擦力, 此时的

层流底层完全有可能淹没地表粗糙凸出部分,所以计算的值偏大。当气流速度增加到一定值后,出现许多小涡旋,气流处于湍流运动,湍流发展不充分时,流体中的小涡旋动量不够强,对地表接触层的作用有较大的随机性,表现出风速区域2的变化特征。在风速较大、湍流运动充分发展时,大部分流体处于湍流状态,较强的湍流动能打破了接触层的层流区,而直接与地表凸出部分作用,此时计算出的粗糙度是对地表本身特性的反映,与气流无关,所以用梯度法计算 Z_0 时,较大风速下的结果才真实可靠。

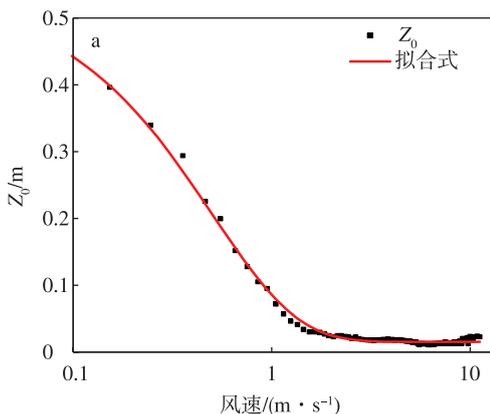
2.3 梯度法计算 Z_0 的改进

同一观测点、不同观测期, Z_0 的3个特征区对应的风速临界值并不相同,说明下垫面任何一个因素的变化都会影响风速与 Z_0 的关系。但通过分析发现, Z_0 随风速值的增大呈指数递减,这与刘小平等^[17]的风洞实验结果一致。指数函数是收敛函数,如果已知 Z_0 与风速的指数函数关系式,那么从此函数的收敛性便可确定出 Z_0 。

虽然 Z_0 随风速有指数递减趋势,但不同风速、尤其是小风速下的 Z_0 高低值波动较大,通过求平均值可以尽可能的消除这种波动。所以对所有观测得到的风速值进行分档,各档间隔大小可根据资料样本量确定,尽可能保证所求平均值的稳定性。求出每个分档中的风速、 Z_0 平均值,然后用此平均值进行指数函数拟合(图4),2个观测期粗糙度 Z_{01} 、 Z_{02} 的拟合式分别为

$$Z_{01} = 0.521\ 07 \exp\left(-\frac{w}{0.499\ 68}\right) + 0.015\ 35, \quad (6)$$

$$Z_{02} = 0.459\ 16 \exp\left(-\frac{w}{0.512\ 33}\right) + 0.021\ 89. \quad (7)$$



其中: w 表示风速值。(6)、(7)式分别收敛于 0.015、0.022,从而确定出2个观测期 Z_0 分别为 0.015、0.022 m。拟合的 Z_0 与何清等^[18]和许多学者^[17,20-24]对不同下垫面下 Z_0 的研究结果相比,略低于灌木沙包,比绿洲小1个数量级,与新墨西哥州草地、灌丛草原过渡区相近,但比沙漠和戈壁高1~3个数量级。

3 结论

1) Z_0 有日分布规律,白天小,夜晚大;同一观测点不同月份 Z_0 也不同, Z_0 受风速、下垫面温湿条件影响较大,风速是影响 Z_0 的主要因素。

2) Z_0 在不同观测期均出现3个风速特征区,风速小于 0.5 m/s 时 Z_0 波动最显著,风速大于 5~7 m/s 时 Z_0 变化较小。

3) Z_0 随风速增加呈指数递减,由指数递减函数的收敛性可确定出 Z_0 。

参考文献:

- [1] Smith S Y. The influence of land surface roughness on Earth's climate[J]. Science, 1982, 215: 1498-1501.
- [2] Stull R B. An introduction to boundary layer meteorology[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 1988: 378-381.
- [3] Verkaik J W, Holtslag A M. Wind profiles, momentum fluxes and roughness lengths at Cabauw revisited[J]. Boundary Layer Meteorology, 2007, 122: 701-719.
- [4] Sud Y C, Smith W E. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation-A numerical study[J]. Appl Meteor, 1985, 33(1): 15-49.
- [5] 鲍艳,吕世华. 干旱、半干旱区陆气相互作用的研究进展[J]. 中国沙漠, 2006, 26(3): 454-460.
- [6] 周艳莲,孙晓敏,朱治林,等. 几种不同下垫面地表粗糙度动态

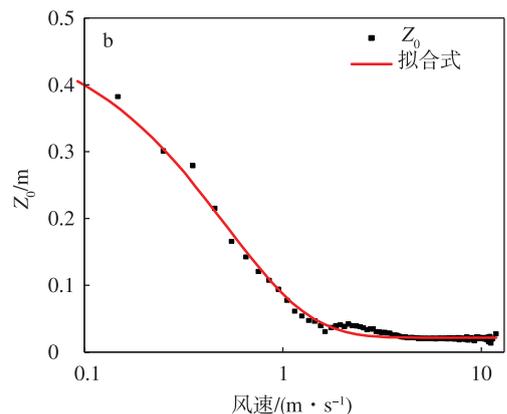


图4 观测1期(a)和观测2期(b)粗糙度与风速的指数函数拟合

Fig. 4 The exponential function fitting between the Z_0 and wind velocity during observation period (a) 1 and (b) 2

- 变化及其对通量机理模型模拟的影响[J]. 中国科学 D 辑, 2006, 36(增刊): 244-254.
- [7] Bagnold R A. The physics of blown sand and desert dunes[M]. New York: Methuen, 1941: 85-95.
- [8] 丁国栋. 地表粗糙度的含义本质[J]. 中国沙漠, 1993, 13(4): 39-43.
- [9] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 337-346.
- [10] 梅凡民, Rajot J, Alfaro S, 等. 平坦沙地的空气动力学粗糙度变化及其物理意义[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3): 325-330.
- [11] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 23-24.
- [12] 张强. 荒漠戈壁下垫面地表湍流通量参数化的研究[J]. 科学技术与工程, 2003, 3(1): 30-39.
- [13] 杨明元. 对地表粗糙度测定的分析与研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 383-387.
- [14] 马士龙, 丁国栋, 罗俊宝, 等. 固定裸沙地粗糙度动力学特性的分析与研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(5): 218-220.
- [15] 茅宇豪, 刘树华, 李婧. 不同下垫面空气动力学参数的研究[J]. 气象学报, 2006, 64(3): 325-334.
- [16] Dong Z B, Gao S Y, Fryrear D W. Drag coefficients and roughness length as disturbed by standing vegetation[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(3): 485-505.
- [17] 刘小平, 董治宝, 王训明. 固定沙质床面的空气动力学粗糙度[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 111-117.
- [18] 何清, 缪启龙, 张瑞军, 等. 塔克拉玛干沙漠肖塘地区空气动力学粗糙度分析[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1011-1016.
- [19] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 170-177.
- [20] Zhang Qiang, Huang Ronghui, Tian Hui. A parameterization scheme of surface turbulent momentum and sensible heat over the gobi underlying surface[J]. Adv Atmos Sci, 2003, 20(1): 111-118.
- [21] 张强, 卫国安. 荒漠戈壁大气总体曳力系数和输送系数观测研究[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 305-312.
- [22] 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数[J]. 高原气象, 1992, 11(4): 371-380.
- [23] 高志球, 王介民, 马耀明, 等. 不同下垫面的粗糙度和中性曳力系数研究[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 17-24.
- [24] Pruegera J H, Kustasb W P, Hippsc L E, et al. Aerodynamic parameters and sensible heat flux estimates for a semi-arid ecosystem [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(1): 87-100.

(责任编辑: 刘菲)