

鞠英芹, 徐自为, 刘绍民, 等. 农田和草地下垫面上附加阻尼  $kB^{-1}$  变化特征的分析[J]. 高原气象, 2014, 33(1): 55–65, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00015.

# 农田和草地下垫面上附加阻尼 $kB^{-1}$ 变化特征的分析

鞠英芹<sup>1-3</sup>, 徐自为<sup>1</sup>, 刘绍民<sup>1</sup>, 卢 俐<sup>4</sup>, 徐同仁<sup>1</sup>, 刘寿东<sup>3</sup>

(1. 北京师范大学 遥感科学国家重点实验室/地理学与遥感科学学院, 北京 100875;  
2. 湖北省气象培训中心, 武汉 430074; 3. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044;  
4. 北京市气象局气象信息中心, 北京 100089)

**摘要:** 利用2010年阿柔站(草地)和馆陶站(农田)的观测资料, 运用阻尼法估算不同下垫面的热传输附加阻尼( $kB^{-1}$ ), 分析日变化特征, 探讨用一个固定  $kB^{-1}$  值来估算感热通量, 最后将估算值与 M\_1958、M\_1963、M\_1982、M\_1989、M\_1998、M\_2002 和 M\_2007 七种参数化方案进行比较。结果表明, 在不同下垫面上,  $kB^{-1}$  变化明显。除玉米下垫面、玉米和裸地混合下垫面外, 其余下垫面  $kB^{-1}$  均有抛物线型日变化, 与地气温差具有相关性。在植被下垫面, 可用中值或均值的  $kB^{-1}$  计算感热通量。将不同参数化方案计算的感热通量与观测值之间进行比较发现, 在裸地下垫面, 与观测值最接近的参数化方案是 M\_1998 方案; 在混合地表则为 M\_1958、M\_1963 和 M\_2007 方案。

**关键词:** 热力学附加阻尼; 涡动相关仪; 参数化方案; 感热通量

**文章编号:** 1000-0534(2014)01-0055-11 **中图分类号:** P404 **文献标志码:** A

**doi:** 10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00015

## 1 引言

热力学粗糙度 (Thermal Roughness Length,  $z_{oh}$ ) 是指大气近地层满足莫宁—奥布霍夫相似理论时温度廓线外延到空气温度等于地表温度的高度。该量影响因子复杂, 也缺乏确切的物理意义。在近地层的粗糙副层中, 动量的传输同时受到分子扩散和气压梯度的作用(气压梯度占主导), 而热量的传输仅依靠分子扩散的作用<sup>[1]</sup>。相对而言, 动量输送比热量输送更有效<sup>[2]</sup>, 因此热力学粗糙度  $z_{oh}$  小于空气动力学粗糙度  $z_{om}$ 。由于热力学粗糙度的数量级很小, 不易测量, 一般用动力学粗糙度与热力学粗糙度的比值——热量传输附加阻尼  $kB^{-1} = \ln(z_{om}/z_{oh})$  (这里  $B$  为 Stanton 数,  $k$  为卡曼常数)<sup>[3]</sup> 来表征。 $kB^{-1}$  是研究地表与大气之间物质和能量交换过程的基本参数, 也是陆面过程模式与地表通量遥感估算模型的重要变量之一<sup>[4-6]</sup>。

在均匀地表,  $z_{oh}$  一般认为是  $z_{om}$  的  $1/10$ <sup>[1]</sup>; 而在非均匀地表,  $z_{oh}$  更小<sup>[7-10]</sup>。影响  $kB^{-1}(z_{oh})$  的因子较多, 如气象条件、植被结构以及下垫面状况等。Kustas et al<sup>[7]</sup> 指出, 灌丛和裸土组成的下垫面上,  $z_{oh}$  随着地表辐射温度的升高而降低。Blyth et al<sup>[11]</sup> 研究表明,  $z_{oh}$  与植被结构、气象条件、植被和土壤的表面阻抗有关。Troufleou et al<sup>[12]</sup> 研究表明,  $kB^{-1}$  和许多因素有关系, 包括结构参数和气象条件等。Lomme et al<sup>[13]</sup> 用 Shuttleworth — Wallace 两层模型, 结合对地表辐射温度的线性假设, 获得  $kB^{-1}$  的解析解后得出,  $kB^{-1}$  对于某一类冠层不是一个常数, 随叶面积指数、株高、植被覆盖率、水分胁迫以及气象条件的变化而变化。

许多研究表明<sup>[14-19]</sup>,  $kB^{-1}$  并不是一个固定值, 呈早晚小、中午大的抛物线形日变化。例如, Verhoef et al<sup>[14]</sup> 研究了大草原、葡萄园和裸地的  $kB^{-1}$ , 指出  $kB^{-1}$  随时间有明显变化。一般在中午出现最

收稿日期: 2012-07-05; 定稿日期: 2013-01-22

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划(91125002); 中央高校基本科研业务费专项资金

作者简介: 鞠英芹(1985—), 女, 山东威海人, 硕士研究生, 主要从事大气边界层研究。E-mail: juyingqin@126.com

通讯作者: 徐自为。E-mail: xuzw@bnu.edu.cn

大值,早晨出现最小值,但也有些天的趋势相反或无变化趋势,尤其是对于大草原,这种情况更明显;Sun<sup>[15]</sup>通过对均匀的干枯草地的数据分析指出, $z_{0m}$ 基本上不随时间而变化,而 $z_{0h}$ 即使在相对均匀的地表也有日变化;Ma et al<sup>[16]</sup>在西藏高原的安多和 NPAM 两个站点(草地)发现, $kB^{-1}$ 呈明显抛物线型的日变化;Yang et al<sup>[17]</sup>通过分析西藏高原的安多站数据表明, $kB^{-1}$ 有明显日变化;Jia<sup>[18]</sup>计算的稀疏草地和冬小麦田的 $kB^{-1}$ 也有抛物线型的日变化。Yang et al<sup>[19]</sup>发现,在裸土下垫面上, $kB^{-1}$ 有明显的日变化特征,即:中午大、早晚小。

$kB^{-1}$ 在不同下垫面上的值有较大的差异。均匀植被地表的 $kB^{-1}$ 约为一个定值<sup>[1, 20-21]</sup>,裸地和沙漠戈壁的 $kB^{-1}$ 有负值出现<sup>[14, 19]</sup>,而在植被与裸地的混和地表 $kB^{-1}$ 值大,且有明显变化范围<sup>[7, 9, 11, 22]</sup>。Troufleou et al<sup>[12]</sup>指出,在同一稀疏作物地表上不同年份得到的 $kB^{-1}$ 是不同的,所以对该地表类型设定一个具体值既不准确也不实用。同时,其瞬时值变化很大,在稀疏植被地表给 $kB^{-1}$ 设定一个定值计算瞬时的感热通量会带来较大误差。

$kB^{-1}$ 不能从观测中直接获得,需要多个要素的观测通过一系列计算得到。这些输入变量在观测中的任何误差都会对 $kB^{-1}$ 产生影响,因此 $kB^{-1}$ 是一个难以确定的量。近几十年,不同的研究者发展了多个 $kB^{-1}$ 的计算模型<sup>[1, 3, 7, 23-27]</sup>,力求简单且可靠地计算出 $kB^{-1}$ 。但是大部分的 $kB^{-1}$ 经验表达式经常与观测值不一致,或者表达式之间的差异较大<sup>[14]</sup>。所以到目前为止,还没有一个 $kB^{-1}$ 模型能完全描述 $kB^{-1}$ 的实际变化特征<sup>[12, 14]</sup>。因此,本文利用2010年阿柔站(草地)和馆陶站(农田)的观测数据,运用阻尼法估算农田和草地下垫面的热传输附加阻尼 $kB^{-1}$ ,分析在不同下垫面上的变化范围及其日变化特征,并探讨用一个固定 $kB^{-1}$ 值来估算地表通量,最后对M\_1958、M\_1963、M\_1982、M\_1989、M\_1998、M\_2002和M\_2007七种 $kB^{-1}$ 的参数化方案进行比较,为优化模型的相关参数化方案<sup>[28-29]</sup>提供参考依据。

## 2 观测站概况和数据处理

### 2.1 观测站概况

阿柔站(100°27′53.1″E、38°02′39.8″N)位于黑河流域上游青海省祁连县阿柔乡草大板村,包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪和自动气象站的观测。观测场下垫面为草地,周围地势相对平坦开阔,自东

南向西北略倾斜下降,南北两侧约3 km外是连绵的山丘和高山。盛行风向为东风和西风。涡动相关仪(CSAT3, Campbell, 美国; Li7500, Licor, 美国)架设高度为3.15 m。自动气象站的观测项目有:风温湿梯度(2 m, 10 m)、气压、降水量以及向下(上)长(短)波辐射(1.5 m)、2层(0.05 m, 0.15 m)土壤热通量、6层(0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 m)土壤温度与水分等。

馆陶站(115°07′39″E、36°30′54″N)位于海河流域河北省馆陶县河寨村,包括大孔径闪烁仪、涡动相关仪及气象站的观测。试验场为农田下垫面,包括小麦/玉米、棉花,其中玉米与小麦为轮作,棉花为一季。整个试验场较为平坦。盛行风向为南风 and 北风。涡动相关仪(CSAT3, Campbell, 美国; Li7500, Licor, 美国)架设高度为15.6 m,自动气象站的观测项目包括:风(12.7 m)、温度和湿度梯度(12.7, 15.6 m)、降水量、气压以及向下(上)长(短)波辐射(15.7 m),同时还有地表辐射温度(15.7 m)、土壤热通量(0.02 m)、8层(0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 m)土壤温度以及7层(0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0 m)土壤水分等。

### 2.2 观测数据处理

利用涡动相关仪测量的原始10 Hz数据,采用英国爱丁堡大学发展的EdiRe软件(<http://www.geos.ed.ac.uk/research/micromet/EdiRe>)对观测数据进行后处理,处理步骤主要包括:野点值的剔除、延迟时间的校正、超声虚温转化为空气温度<sup>[30]</sup>、坐标旋转(采用平面拟合<sup>[31]</sup>)、空气密度效应的修正(即WPL修正<sup>[32]</sup>)和频率响应订正等,同时对观测数据进行了严格的质量控制<sup>[33]</sup>。根据本文的研究目标,避免奇异值的出现,对观测数据作如下限制:①地—气温差( $T_s - T_a$ )>0.1 K<sup>[34]</sup>;② $z_{0h} < 0.1z$ <sup>[19]</sup>, $z$ 为观测高度;③整体湍流特征系数(Internal Turbulence Characteristics, ITC)<sup>[35-36]</sup>:0%~50%;④风速>0.5 m·s<sup>-1</sup>;⑤感热通量 $H > 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[19]</sup>;⑥仅采用白天不稳定时段(08:00—16:00,北京时);⑦非降水时刻<sup>[34]</sup>。通过上述筛选标准最终得到6752组有效数据。所用数据均来自于2010年馆陶站和阿柔站的涡动相关仪和自动气象站,其中摩擦速度 $u_*$ 、风速、感热通量 $H$ 和奥布霍夫长度 $L$ 来自涡动相关仪;空气温度 $T_a$ 来自自动气象站;地表温度 $T_s$ 是利用自动气象站地表向上长波辐射 $L_R^\uparrow$ 和大气向下长波辐射 $L_R^\downarrow$ 观测数据推算

得到的。

利用原始 10 min 的气象要素观测数据平均得到 30 min 的平均值。

本文使用了 MODIS 陆地产品中 2 ~ 3 级的 V005 版标准数据产品 (<https://wist.echo.nasa.gov>), 包括归一化植被指数 NDVI、叶面积指数 LAI 等(表 1), 均以 HDF-EOS 格式存储, 读取数据时采用 Albers 投影。

表 1 MODIS 数据产品  
Table 1 MODIS data products

| MODIS 标准产品           | 地表参数 | 空间分辨率/m | 时间分辨率/d |
|----------------------|------|---------|---------|
| MCD15A2(阿柔站)         | LAI  | 1000    | 8       |
| MOD15A2/MYD15A2(馆陶站) |      |         |         |
| MOD13A2/MYD13A2      | NDVI | 1000    | 16      |

注: 馆陶站的 LAI 是采用 MOD15A2 和 MYD15A2 产品的平均值

### 3 热传输附加阻尼 $kB^{-1}$ 的估算方法及其参数化方案

#### 3.1 $kB^{-1}$ 的估算方法

利用涡动相关仪与自动气象站的观测数据, 从空气动力学阻抗  $r_{ah}$  的表达式出发, 可间接推算出  $kB^{-1}$ , 即:

$$r_{ah} = \frac{1}{ku_*} \left[ \ln \frac{z-d}{z_{0m}} + \ln \frac{z_{0m}}{z_{0h}} - \psi_h \left( \frac{z-d}{L} \right) \right]. \quad (1)$$

而  $r_{ah}$  又是感热通量整体输送方程中的一个参数:

表 2  $kB^{-1}$  的参数化方案  
Table 2 Parameterization schemes of  $kB^{-1}$

| 公式   | 出处及表示                                | 备注   | 类型           | 所需观测数据         |
|--|--------------------------------------|--|--------------|----------------|
| $kB^{-1} = \ln(ku_* z_{0m}/\kappa_\theta)$                                       | Sheppard <sup>[23]</sup> , M_1958    | $\kappa_\theta = 2.06 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$                    | 理论 $kB^{-1}$ | $u_*$          |
| $kB^{-1} = \kappa\alpha(8Re^*)^{0.45}Pr^{0.8}$                                   | Owen et al <sup>[3]</sup> , M_1963   | $\alpha = 0.52, Pr = 0.7, Re^* = u_* z_{0m}/\nu$   | 理论 $kB^{-1}$ | $u_*$          |
| $kB^{-1} = 2.46(Re^*)^{0.25} - 2$  | Brutsaert <sup>[1]</sup> , M_1982    | $Re^* = u_* z_{0m}/\nu$  | 理论 $kB^{-1}$ | $u_*$          |
| $kB^{-1} = Au(T_s - T_a)$  | Kustas et al <sup>[7]</sup> , M_1989 | $A = 0.17$   | 经验 $kB^{-1}$ | $u, T_s - T_a$ |
| $kB^{-1} = B(Re^*)^{0.45}$   | Zeng et al <sup>[24]</sup> , M_1998  | $B = 0.13$   | 理论 $kB^{-1}$ | $u_*$          |
| $kB^{-1} = \frac{kC_d}{4C_t \frac{u_*}{u(h)}(1 - e^{-\frac{n_{ec}}{2}})} f_c^2$  | Su et al <sup>[25]</sup> , M_2002    | $n_{ec} = \frac{C_d \cdot LAI}{2u_*^2/u(h)^2}, C_d = 2, C_t = 0.01$                      |              | LAI            |
| $+ 2f_c f_s \frac{k \frac{u_*}{u(h)} \frac{z_{0m}}{h}}{C_t^*} + kB_s^{-1} f_s^2$ |                                      | $hs = 0.01,$<br>$f_c = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}, f_s = 1 - f_c$ |              | NDVI           |
|  |                                      | $kB_s^{-1}$ 为裸地情况时采用 M_1982 方案   |              | $u$            |
| $z_{0h} = \frac{70\nu}{u_*} \exp(-\beta u_*^{0.5}  T_* ^{0.25})$                 | Yang et al <sup>[26]</sup> , M_2007  | $\beta = 7.2 \text{ s}^{1/2} \cdot \text{m}^{-1/2} \cdot \text{K}^{-1/4}$                | 经验 $kB^{-1}$ | $u_*$<br>$T_*$ |

3.2  $kB^{-1}$ 的参数化方案

过去几十年期间,不同研究者已发展了多个 $kB^{-1}$ 的参数化方案。早期的方案一般是根据实验结果与粗糙雷诺数 $Re^*$ 或常规气象参数建立简单的关系<sup>[1, 3, 7, 24]</sup>。后来的计算模型考虑到包括冠层结构、冠层内风廓线等。在此,选用如下七个常用的模型(表 2),分别计算 $kB^{-1}$ 和感热通量来进行研究。M\_2002 参数化方案中的 LAI、NDVI 数据采用 MODIS 陆地产品数据,而其他参数化方案均用地面观测数据。如果公式(2)中 $T_s$ 取空气动力学温度时,则计算的 $kB^{-1}$ 是空气动力学 $kB^{-1}$ (理论

$kB^{-1}$ );而 $T_s$ 取地表辐射温度时,则计算出的 $kB^{-1}$ 为辐射 $kB^{-1}$ (经验 $kB^{-1}$ )。

4 结果分析

4.1 不同下垫面的 $kB^{-1}$

馆陶站和阿柔站在每年植被的整个生长过程中,地表状况会发生变化,各种下垫面组合类型包括:小麦、玉米、牧草、裸土、小麦和裸土混合地表、玉米和裸土的混合地表、牧草和裸土混合地表,具体见表 3。

馆陶站和阿柔站下垫面 $kB^{-1}$ 的统计结果见表

表 3 两个站点下垫面类型的分类情况  
Table 3 Underlying surfaces classification at the two sites

| 下垫面类型     | 日期/(月-日)      | 地点  | 下垫面     | 备注               |
|-----------|---------------|-----|---------|------------------|
| 植被        | 04-11 ~ 06-20 | 馆陶站 | 小麦      | 封垄后的小麦           |
|           | 08-06 ~ 10-15 | 馆陶站 | 玉米      | 封垄后的玉米           |
|           | 06-11 ~ 09-30 | 阿柔站 | 牧草      | 牧草抽穗、开花与成熟期      |
| 裸地        | 06-20 ~ 30    | 馆陶站 | 裸土 1    | 玉米播种期            |
|           | 10-15 ~ 31    | 馆陶站 | 裸土 2    | 小麦播种期            |
|           | 01-01 ~ 04-30 | 阿柔站 | 裸土 3    | 牧草黄枯             |
|           | 10-01 ~ 12-31 | 阿柔站 | 裸土 4    | 牧草黄枯             |
| 裸地与植被混合地表 | 01-01 ~ 02-15 | 馆陶站 | 小麦/裸土 1 | 小麦越冬期            |
|           | 02-16 ~ 04-10 | 馆陶站 | 小麦/裸土 2 | 小麦返青与拔节期(封垄前)    |
|           | 07-01 ~ 08-05 | 馆陶站 | 玉米/裸土 1 | 玉米出苗、三叶与拔节期(封垄前) |
|           | 11-01 ~ 12-31 | 馆陶站 | 小麦/裸土 3 | 小麦出苗、三叶与越冬期      |
|           | 05-01 ~ 06-10 | 阿柔站 | 牧草/裸土   | 牧草返青             |

表 4 两个站点不同下垫面 $kB^{-1}$ 的统计情况  
Table 4 The statistical result of  $kB^{-1}$  in different underlying surfaces at the two sites

| 下垫面类型     | 地点  | 下垫面     | 数据量/个 | 平均值  | 中值   | A 值  | 标准差  | 最小值   | 最大值   |
|-----------|-----|---------|-------|------|------|------|------|-------|-------|
| 植被        | 馆陶站 | 小麦      | 798   | 1.60 | 1.09 | 0.39 | 2.72 | -2.55 | 23.51 |
|           | 馆陶站 | 玉米      | 532   | 0.90 | 0.67 | 0.55 | 1.60 | -2.23 | 10.86 |
|           | 阿柔站 | 牧草      | 968   | 0.87 | 0.75 | 0.60 | 1.20 | -2.21 | 6.79  |
| 裸地        | 馆陶站 | 裸土 1    | 166   | 3.98 | 3.22 | 2.78 | 2.70 | -1.04 | 12.26 |
|           | 馆陶站 | 裸土 2    | 107   | 2.20 | 1.85 | 1.68 | 1.59 | -1.03 | 11.73 |
|           | 阿柔站 | 裸土 3    | 998   | 6.18 | 5.62 | 5.89 | 3.62 | -1.69 | 33.97 |
|           | 阿柔站 | 裸土 4    | 807   | 0.23 | 0.23 | 0.12 | 0.77 | -2.04 | 8.15  |
| 裸地与植被混合地表 | 馆陶站 | 小麦/裸土 1 | 255   | 5.80 | 4.94 | 2.36 | 4.55 | -0.92 | 28.26 |
|           | 馆陶站 | 小麦/裸土 2 | 698   | 5.93 | 5.09 | 3.29 | 4.37 | -4.27 | 27.56 |
|           | 馆陶站 | 玉米/裸土 1 | 419   | 3.29 | 2.63 | 2.10 | 2.97 | -2.08 | 15.53 |
|           | 馆陶站 | 小麦/裸土 3 | 609   | 5.99 | 5.28 | 5.39 | 4.61 | -3.60 | 27.68 |
|           | 阿柔站 | 牧草/裸土   | 395   | 3.09 | 2.94 | 1.98 | 2.33 | -2.22 | 10.22 |

注: A 表示频率最大对应的 $kB^{-1}$

4. 从表 4 中可看出, 在不同下垫面  $kB^{-1}$  变化明显, 变化范围从负值到正值, 标准差存在差异。植被下垫面变化范围小, 尤其是牧草下垫面 ( -2.21 ~ 6.79 )。无论是平均值、中值还是 A 值, 植被下垫面的  $kB^{-1}$  最小, 裸地次之, 混合地表最大。

从不同下垫面  $kB^{-1}$  的频率分布 ( 图 1 ) 中可看出, 裸地和混合地表的瞬时  $kB^{-1}$  可以达到很大,  $kB^{-1}$  变化不稳定, 瞬时极值出现频率小。混和地表的  $kB^{-1}$  主要在 0 ~ 10 范围变化, 与 Kustas et al<sup>[7]</sup>、Stewart et al<sup>[9]</sup>、Troufleou et al<sup>[12]</sup> 在同类地表得到

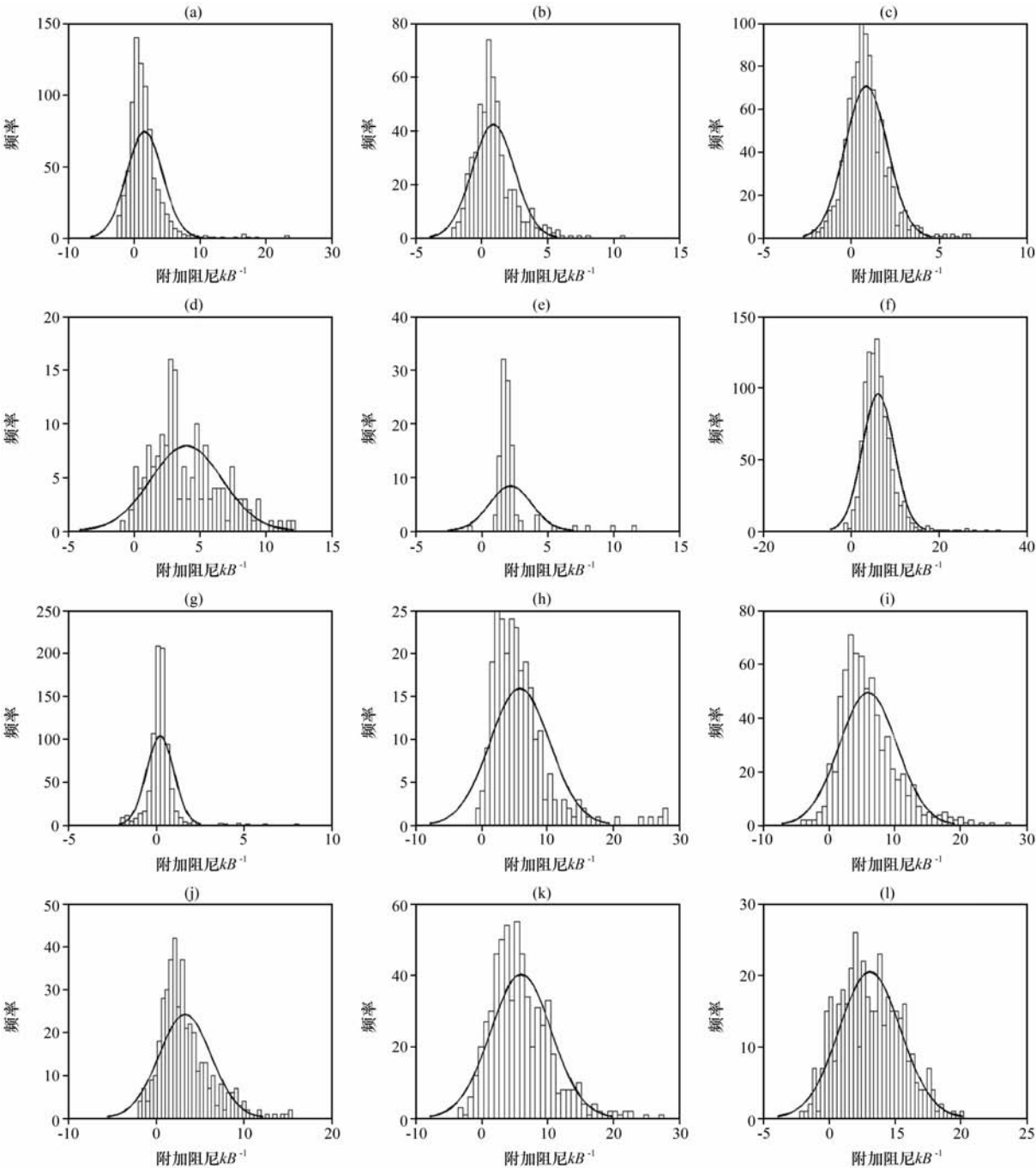


图 1 不同下垫面  $kB^{-1}$  的统计频率分布

(a) 小麦, (b) 玉米, (c) 牧草, (d) 裸土 1, (e) 裸土 2, (f) 裸土 3, (g) 裸土 4, (h) 小麦/裸土 1, (i) 小麦/裸土 2, (j) 玉米/裸土, (k) 小麦/裸土 3, (l) 牧草/裸土

Fig. 1 Statistical histogram of  $kB^{-1}$  in different underlying surfaces. (a) wheat, (b) maize, (c) grass, (d) bare soil 1, (e) bare soil 2, (f) bare soil 3, (g) bare soil 4, (h) wheat/bare soil 1, (i) wheat/bare soil 2, (j) maize/bare soil, (k) wheat/bare soil 3, (l) grass/bare soil

的结果接近<sup>[7, 9, 12]</sup>。将频率分布(图 1)分为 40 等份,取频率最高时所对应的  $kB^{-1}$  值为  $A$  值。将平均值、中值、 $A$  值作为描述该下垫面的  $kB^{-1}$  值,植被下垫面三者均较为接近,而其他下垫面平均值  $>$  中值  $> A$  值,说明植被下垫面  $kB^{-1}$  呈正态分布,而其他下垫面呈负偏态分布(图 1)。

混合地表的  $kB^{-1}$  的统计值大于植被地表,说明混合地表的  $z_{0m}$  明显大于  $z_{0h}$ 。此混合地表的粗糙元呈散乱式、块状或不连续分布,其对风的拖曳作用大于当这些粗糙元紧密排列时(当其紧密排列时,形成了一个抬高层,零平面位移会比较大),这时气流进入到植被内部而不是越过植被的顶部,  $z_{0m}$  偏高。而  $z_{0h}$  主要与分子的热扩散有关,下垫面粗糙

元对其影响甚小,因此,  $kB^{-1}$  在混合地表较大。

**4.2  $kB^{-1}$  的日变化特征**

$z_{0m}$  一般与气象条件没有关系,而  $z_{0h}$  则受气象条件的影响,因此  $kB^{-1}$  值应有日变化。不同下垫面  $kB^{-1}$  与地气温差的日变化见图 2,其中数据缺失点是数据质量控制时删除了不合格数据造成的。

从图 2 中可看出,除了玉米下垫面、玉米和裸地混合下垫面(图 2b、j)外,其余下垫面  $kB^{-1}$  的日变化呈抛物线形,即早晚小、中午大,与相关研究结论较为一致<sup>[14, 16-19, 42]</sup>。  $kB^{-1}$  在早晚出现负值,即  $z_{0h} > z_{0m}$ ,这表明在早晚(空气动力学阻抗较大)时候,热传输效率可以超过动量传输。

不同下垫面  $kB^{-1}$  日变化与地气温差的相关性

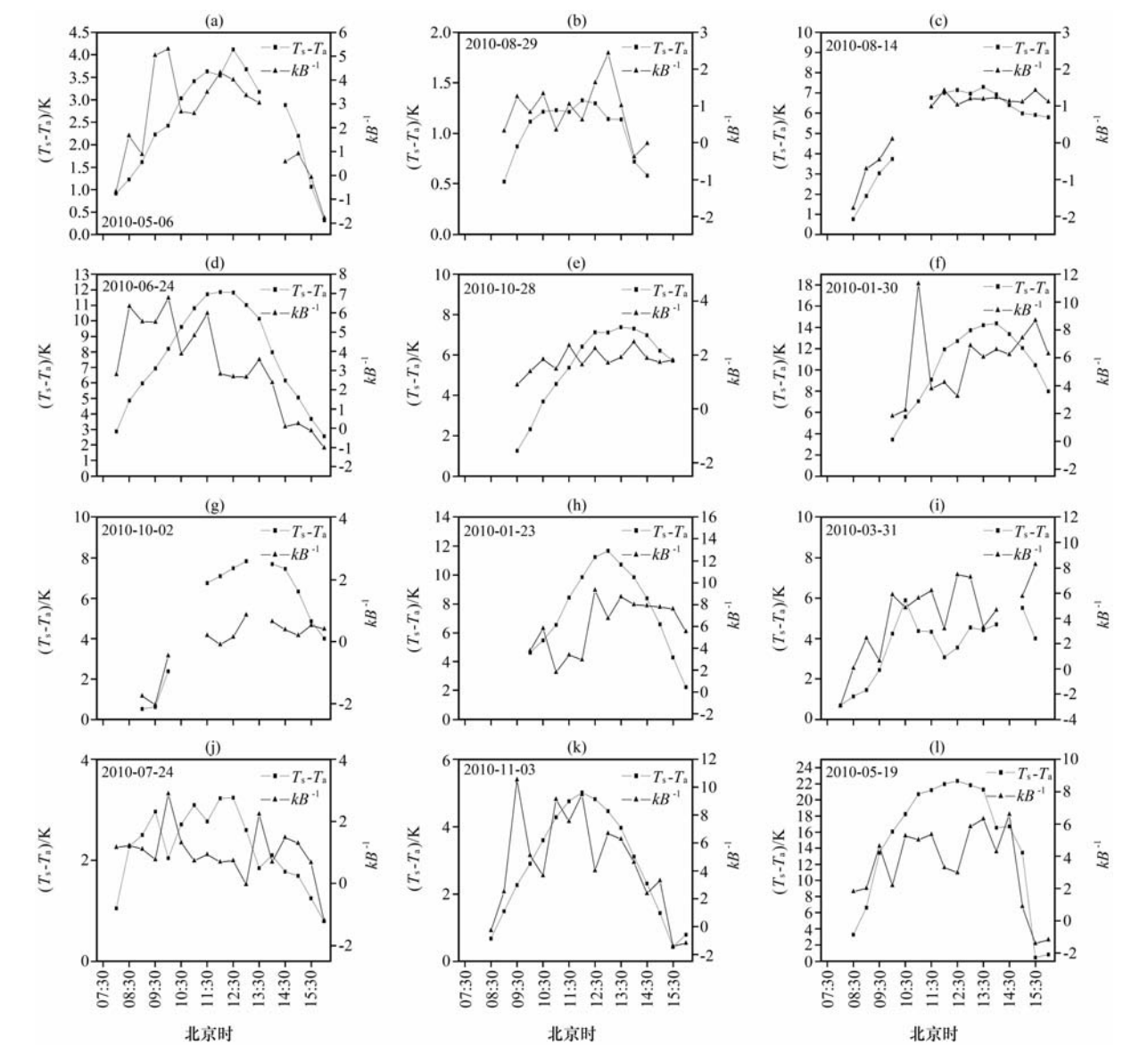


图 2 不同下垫面  $kB^{-1}$  的日变化  
其余说明同图 1

Fig. 2 Diurnal variation of  $kB^{-1}$  in different underlying surfaces. Others are the same as Fig. 1

不一致,主要是由于:

(1) 植被地表中小麦和草地(图 2a、c)的  $kB^{-1}$  日变化与地气温差有较好的相关性,而玉米的这种特征不明显。可能原因是由于封垄后的玉米植被密度较高,其  $kB^{-1}$  值接近一个固定值,波动较小,与 Garratt et al<sup>[43]</sup>、Brutsaert<sup>[1]</sup> 结论相似。

(2) 裸地下垫面的  $kB^{-1}$  日变化与地气温差也有较好的相关性,与 Yang et al<sup>[17, 19]</sup> 结论相同。

(3) 混合地表中小麦和裸土下垫面、牧草和裸土下垫面(图 2h、i、k、l)的  $kB^{-1}$  日变化与地气温差有较好的相关性,而玉米和裸土下垫面(图 2j)这种特征不明显。可能原因是封垄前玉米处于出苗、三叶与拔节期,相当于稀疏混合地表,地气温差波动较大,此时  $kB^{-1}$  不仅受温差影响,而且风的拖曳力影响增强,致使中午出现低值。由此可见,  $kB^{-1}$  受下垫面状况的影响很大。

#### 4.3 $kB^{-1}$ 与感热通量的关系

$kB^{-1}$  作为研究地表与大气垂直热量交换时的重要参数之一,主要用于感热通量计算时确定剩余阻抗,因此对利用整体输送方程计算感热通量是一个关键因子。 $kB^{-1}$  具有明显的日变化特征,不是固定值,且在不同下垫面差异大。而目前的  $kB^{-1}$  参数化方案有向复杂化发展的趋势,有些复杂模型的输入参数难以确定。因此,下面利用 12 个下垫面  $kB^{-1}$  的统计值(均值、中值、A 值)计算感热通量,再与观测值比较,结果见表 5。

从表 5 中可看出,对于不同的下垫面类型,利用  $kB^{-1}$  统计值计算出的感热通量与观测值相关统计结果差异明显。具体表现在:

(1) 在植被下垫面,利用均值、中值计算的感热通量与观测值的拟合效果要比 A 值计算的好,  $R$  达到 0.85, RMSE 均在  $25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  左右,相对误差在 2% 左右。因此,可用均值或中值直接表示植被下垫面的  $kB^{-1}$  值。

(2) 在裸地和混合下垫面,  $R$  达到 0.80, 相关程度较高,但利用均值、中值和 A 值计算的感热通量均比测量值高估 10% 左右, RMSE 较大,精度较低。

总之,均匀植被地表的拟合效果较好。在均匀植被下垫面,  $kB^{-1}$  的变化值呈正态分布,用均值、中值的  $kB^{-1}$  计算感热通量的估算误差在 2% 左右,因此可以参考已有研究成果,将该类下垫面的  $kB^{-1}$  赋予一个常数进行研究。而在其他下垫面,  $kB^{-1}$  都是一个难以确定的变化量,需要建立适合的  $kB^{-1}$  参

数化模型。

#### 4.4 不同 $kB^{-1}$ 参数化方案的比较

在裸地和混合地表,不能用  $kB^{-1}$  统计值来估算感热通量,需要建立适合的  $kB^{-1}$  参数化模型<sup>[14]</sup>。M\_1958、M\_1963、M\_1982、M\_1998 方案都是根据实验结果与粗糙雷诺数  $Re^*$  或摩擦速度  $u_*$  建立简单的关系,这些参数化方案均具有一定的理论依据,适合于非均一下垫面。M\_1989 和 M\_2007 两种参数化方案均能较好地解释  $kB^{-1}$  的日变化特征,前者将风速应用到表达式中,主要是考虑到当风速增加时,与热量传输相比,动量传输更加有效<sup>[7]</sup>;后者则是因为青藏高原的热力粗糙度( $z_{0h}$ )有显著的日变化<sup>[16-17]</sup>,比低海拔地区明显<sup>[19]</sup>,在感热通量计算中必须考虑。M\_2002 方案是基于 Localized Near-Field(LNF)理论 Massman 模型<sup>[44]</sup>,参考了 Choudhury et al 的植被冠层模型<sup>[45]</sup>和 Brutsaert 的裸土模型<sup>[1]</sup>,并且根据植被覆盖度采用了二次权重因子,替代了原模型中的经验因子,从理论上更完备。利用七种不同  $kB^{-1}$  参数化方案计算感热通量与观测值的比较结果见表 6。

RMSE 越小,  $R$  越大,表明与观测值越接近。从表 6 中可看出,在裸地下垫面,与观测值最接近的参数化方案是 M\_1998 方案。M\_1998 方案是 Zeng et al<sup>[24]</sup> 在 1998 年提出的,已用在 CoLM(Common Land Model)模式中,适用于本研究的裸地下垫面。

在混合地表,与观测值最接近的参数化方案是 M\_1958、M\_1963 和 M\_2007 方案。M\_1958、M\_1963 方案是考虑将  $kB^{-1}$  与  $Re^*$  建立关系式,具有一定的理论依据。M\_2007 方案是根据青藏高原稀疏低矮的短草地表测量数据得到,适用于混合地表下垫面。

综上所述,在七种参数化方案中, M\_1982 方案不管在裸地地表还是混和地表,计算结果与观测值相差较多,感热通量被低估。这可能由于 M\_1982 方案的系数存在局限性,并不适用于本文中的相应下垫面。

## 5 结论与讨论

利用 2010 年馆陶站(农田)和阿柔站(草地)涡动相关仪和自动气象站观测资料,运用阻尼法估算了不同下垫面的  $kB^{-1}$ ,分析了其变化范围及日变化特征,并探讨了用一个固定的  $kB^{-1}$  统计值来估算感热通量,最后对七种  $kB^{-1}$  的参数化方案进行了比

表 5 利用  $kB^{-1}$  统计值计算出的感热通量( $y$ )与观测值( $x$ )的拟合关系

Table 5 The relationship of sensible heat flux using different  $kB^{-1}$  statistical values and the observed values

| 下垫面组合   | 站点    | 下垫面类型     |     | $kB^{-1}$ | 拟合公式          | 相关系数        | 均方根误差                       |       |       |
|---------|-------|-----------|-----|-----------|---------------|-------------|-----------------------------|-------|-------|
|         |       |           |     |           |               |             | RMSE/(W · m <sup>-2</sup> ) |       |       |
| 植被      | 馆陶站   | 小麦        | 均值  | 1.60      | $y = 0.98x$   | 0.87        | 28.04                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 1.09      | $y = 0.98x$   | 0.87        | 27.86                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 0.39      | $y = 1.15x$   | 0.88        | 34.49                       |       |       |
|         |       | 玉米        | 均值  | 0.90      | $y = 0.94x$   | 0.87        | 19.03                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 0.67      | $y = 1.02x$   | 0.87        | 20.54                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 0.55      | $y = 1.06x$   | 0.86        | 22.28                       |       |       |
|         | 阿柔站   | 草地        | 均值  | 0.87      | $y = 0.96x$   | 0.85        | 23.98                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 0.75      | $y = 1.00x$   | 0.84        | 26.00                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 0.60      | $y = 1.06x$   | 0.8         | 32.76                       |       |       |
| 裸地      | 馆陶站   | 裸土 1      | 均值  | 3.98      | $y = 0.92x$   | 0.79        | 49.20                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 3.22      | $y = 1.03x$   | 0.80        | 51.88                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 2.78      | $y = 1.09x$   | 0.81        | 56.41                       |       |       |
|         |       | 裸土 2      | 均值  | 2.20      | $y = 0.89x$   | 0.94        | 27.72                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 1.85      | $y = 1.06x$   | 0.90        | 36.34                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 1.68      | $y = 1.17x$   | 0.84        | 58.47                       |       |       |
|         | 阿柔站   | 裸土 3      | 均值  | 6.18      | $y = 0.92x$   | 0.83        | 28.67                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 5.62      | $y = 0.98x$   | 0.84        | 29.05                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 5.89      | $y = 0.95x$   | 0.83        | 28.70                       |       |       |
|         |       | 裸土 4      | 均值  | 0.23      | $y = 1.02x$   | 0.92        | 26.10                       |       |       |
|         |       |           | 中值  | 0.23      | $y = 1.01x$   | 0.92        | 26.08                       |       |       |
|         |       |           | A 值 | 0.12      | $y = 1.07x$   | 0.89        | 34.23                       |       |       |
|         |       | 裸地与植被混合地表 | 馆陶站 | 小麦/裸土 1   | 均值            | 5.80        | $y = 0.90x$                 | 0.83  | 27.58 |
|         |       |           |     |           | 中值            | 4.94        | $y = 0.98x$                 | 0.84  | 27.97 |
|         |       |           |     |           | A 值           | 2.36        | $y = 1.33x$                 | 0.85  | 47.82 |
| 小麦/裸土 2 | 均值    |           |     | 5.93      | $y = 0.97x$   | 0.88        | 38.83                       |       |       |
|         | 中值    |           |     | 5.09      | $y = 1.05x$   | 0.88        | 41.71                       |       |       |
|         | A 值   |           |     | 3.29      | $y = 1.26x$   | 0.89        | 59.75                       |       |       |
| 玉米/裸土   | 均值    |           |     | 3.29      | $y = 0.88x$   | 0.84        | 27.81                       |       |       |
|         | 中值    |           |     | 2.63      | $y = 0.97x$   | 0.85        | 27.73                       |       |       |
|         | A 值   |           |     | 2.10      | $y = 1.07x$   | 0.86        | 30.01                       |       |       |
| 小麦/裸土 3 | 均值    |           |     | 5.99      | $y = 0.93\ x$ | 0.80        | 22.35                       |       |       |
|         | 中值    |           |     | 5.28      | $y = 1.00x$   | 0.81        | 23.22                       |       |       |
|         | A 值   |           |     | 5.39      | $y = 0.99x$   | 0.81        | 23.01                       |       |       |
| 阿柔站     | 草地/裸土 |           |     | 均值        | 3.09          | $y = 1.05x$ | 0.87                        | 37.70 |       |
|         |       |           |     | 中值        | 2.94          | $y = 1.07x$ | 0.87                        | 38.85 |       |
|         |       |           |     | A 值       | 1.98          | $y = 1.25x$ | 0.87                        | 52.03 |       |

注：RMSE =  $\left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H_e - H_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ ， $H_m$  和  $H_e$  分别表示感热通量的测量值和估算值， $n$  表示样本数



表 6 利用不同  $kB^{-1}$  参数化方案计算的感热通量与观测值的比较

| Table 6 Comparison of sensible heat flux between different $kB^{-1}$ parameterization schemes and the observed values |     |         |          |               |              |        |              |              |              |              |
|---|-----|---------|----------|---------------|--------------|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 下垫面类型   | 站点  | 下垫面     | 统计量      | M_1958        | M_1963       | M_1982 | M_1989       | M_1998       | M_2002       | M_2007       |
| 裸地  | 馆陶站 | 裸土 1    | RMSE     | 59.35         | 92.54        | 100.23 | 52.94        | <b>42.68</b> | 75.98        | <b>45.62</b> |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.8           | 0.82         | 0.79   | 0.69         | 0.83         | 0.77         | 0.79         |
|   |     | 裸土 2    | RMSE     | <b>101.68</b> | 126.45       | 128.37 | 266.11       | <b>83.86</b> | 112.27       | 104.06       |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.86          | 0.86         | 0.82   | 0.21         | 0.92         | 0.9          | 0.66         |
|   | 阿柔站 | 裸土 3    | RMSE     | 28.16         | <b>23.98</b> | 37.52  | 65.13        | 83.43        | <b>27.06</b> | 43.65        |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.87          | 0.87         | 0.86   | 0.45         | 0.86         | 0.85         | 0.7          |
|   |     | 裸土 4    | RMSE     | 96.75         | 106.78       | 116.66 | <b>55.75</b> | <b>66.19</b> | 105.13       | 96.27        |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.9           | 0.93         | 0.9    | 0.85         | 0.95         | 0.85         | 0.8          |
| 裸地与植被<br>混合地表   | 馆陶站 | 小麦/裸土 1 | RMSE     | <b>27.81</b>  | <b>24.86</b> | 31.8   | 46.32        | 58.06        | 28.38        | 29.89        |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.85          | 0.86         | 0.85   | 0.71         | 0.87         | 0.87         | 0.79         |
|   |     | 小麦/裸土 2 | RMSE     | 41.22         | <b>34.38</b> | 43.1   | 50.7         | 84.56        | <b>40.3</b>  | 46.22        |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.89          | 0.9          | 0.89   | 0.73         | 0.89         | 0.88         | 0.85         |
|   |     | 玉米/裸土   | RMSE     | 39.26         | 55.58        | 59.71  | 30.97        | <b>28.57</b> | 52.5         | <b>28.33</b> |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.83          | 0.83         | 0.82   | 0.84         | 0.85         | 0.84         | 0.83         |
|   |     | 小麦/裸土 3 | RMSE     | <b>21.4</b>   | 28.39        | 32.7   | 48.56        | 32.67        | 26.97        | <b>22.55</b> |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.81          | 0.74         | 0.77   | 0.64         | 0.81         | 0.77         | 0.79         |
|   | 阿柔站 | 草地/裸土   | RMSE     | <b>34.94</b>  | 35.79        | 41.09  | <b>30.68</b> | 76.29        | 46.07        | 85.86        |
|   |     |         | <i>R</i> | 0.87          | 0.86         | 0.86   | 0.84         | 0.88         | 0.81         | 0.71         |

注:  $RMSE = \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (H - H_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$ ,  $R = \frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})(H_{mi} - \bar{H}_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_i - \bar{H})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{mi} - \bar{H}_m)^2}}$ ,  $H_m$  表示感热通量的测量值,  $H$  表示利用不同参数化方案计算的感热通量,  $n$  表示样本数, 加黑数字表示不同参数化方案计算结果与观测值最接近的前两种方案

较。主要结论如下:

(1) 各种下垫面的  $kB^{-1}$  值变化明显, 变化范围从负值到正值, 具有一定的频率分布规律。混合地表的  $z_{0m}$  明显大于  $z_{0h}$ , 其对风的拖曳作用大于这些粗糙元紧密排列的状况, 导致  $z_{0m}$  偏高。而  $z_{0h}$  主要与分子的热扩散有关, 下垫面粗糙元对其影响甚小, 因此,  $kB^{-1}$  在混合地表较大。

(2) 不同下垫面  $kB^{-1}$  日变化与地气温差的相关性不一致。除玉米下垫面、玉米和裸地混合下垫面之外, 其余下垫面  $kB^{-1}$  日变化呈抛物线形, 即早晚小、中午大。 $kB^{-1}$  在早晚出现负值, 即  $z_{0h} > z_{0m}$ , 表明在早晚(空气动力学阻抗很大)时候, 热量传输效率可以超过动量传输。

(3) 在均匀植被下垫面,  $kB^{-1}$  值的变化呈现正态分布, 用均值、中值的  $kB^{-1}$  计算感热通量的估算误差在 2% 左右, 因此可以参考前人的研究成果, 将该类下垫面的  $kB^{-1}$  赋予一个常数进行研究。而在其他下垫面,  $kB^{-1}$  都是一个难以确定的变化量,

需要建立适合的  $kB^{-1}$  参数化模型。

(4) 通过对七种参数化方案计算的感热通量与观测值之间的比较发现, 在裸地下垫面, 与观测值最为接近的参数化方案是 M\_1998 方案; 在混合地表下垫面, 与观测值最为接近的参数化方案是 M\_1958、M\_1963 和 M\_2007 方案。

总之, 为了寻求更充足的理论依据和更完善的计算热传输附加阻尼  $kB^{-1}$  的方法, 仍需进一步深入探索和研究。

参考文献:

[1] Brutsaert W. Evaporation into the Atmosphere[M]. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1982: 352.

[2] Garratt J R. The atmospheric boundary layer[M]. Combridge: Cambridge University Press, 1992: 89.

[3] Owen P R, Thomson W R. Heat transfer across rough surfaces [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1963, 15(3): 321-334.

[4] 孙俊, 胡泽勇, 陈学龙, 等. 黑河中上游不同下垫面动量总体输送系数和地表粗糙度对比分析[J]. 高原气象, 2012, 31(4): 920-926.

- [5] 潘小多, 李新, 冉有华, 等. 下垫面对 WRF 模式模拟黑河流域区域气候精度影响研究[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 657-667.
- [6] 张杰, 张强, 黄建平. 2007 年 5-10 月黄土高原陆面能量通量特征研究[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 855-863.
- [7] Kustas W P, Choudhury B J, Moran M S, et al. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1989, 44(3-4): 197-216.
- [8] Sugita M, Brutsaert W. Regional surface fluxes from remotely sensed skin temperature and lower boundary measurement[J]. Water Resources Research, 1990, 26(12): 2937-2944.
- [9] Stewart J B, Kustas W P, Humes K S, et al. Sensible heat flux-radiometric surface temperature relationship for eight semi-arid areas[J]. J Appl Meteor, 1994, 33(9): 1110-1117.
- [10] Kohsiek W, De Bruin H A R, The H, et al. Estimation of the sensible heat flux of a semi-arid area using surface radiative temperature measurements[J]. Bound-Layer Meteor, 1993, 63(3): 213-230.
- [11] Blyth E M, Dolman A J. The roughness length for heat of sparse vegetation[J]. J Appl Meteor, 1995, 34(2): 583-585.
- [12] Troufleou D, Lhomme J P, Monteny B, et al. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation I. An experimental analysis of the parameter[J]. J Hydrol, 1997, 188-189(1-4): 815-838.
- [13] Lomme J P, Troufleou D, Monteny B, et al. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation II. A model for the  $kB^{-1}$  parameter[J]. J Hydrol, 1997, 188-189(1-4): 839-854.
- [14] Verhoef W, De Bruin H A R, Van Den Hurk B J J M, et al. Some practical notes on the parameter for sparse vegetation[J]. J Appl Meteor, 1997, 36(5): 560-572.
- [15] Sun J L. Diurnal variations of thermal roughness height over a grassland[J]. Bound-Layer Meteor, 1999, 92(3): 404-427.
- [16] Ma Y M, Tsukamoto O, Wang J M, et al. Analysis of aerodynamic and thermodynamic parameters on the grassy marshland surface of Tibetan Plateau[J]. Progress in Natural Science, 2002, 12(1): 36-40.
- [17] Yang K, Koike T, Yang D W. Surface flux parameterization in the Tibetan Plateau[J]. Bound-layer Meteor, 2003, 116(2): 245-262.
- [18] Jia L. Modeling heat exchanges at the land-atmosphere interface using multi-angular thermal infrared measurements[D]. Wageningen University, 2004, ISBN 90-8504-041-8: 199.
- [19] Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. Turbulent flux transfer over bare soil surfaces: Characteristics and parameterization[J]. J Appl Meteor Clim, 2008, 47(1): 276-290.
- [20] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities[M]//Monteith J L, ed. Vegetation and the Atmosphere Principles. New York: Academic Press, 1975, 1: 57-109.
- [21] Garratt J R, Hicks B B. Momentum, heat and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1973, 99(422): 680-687.
- [22] 贾立, 王介民, 胡泽勇, 等. 干旱区热力学粗糙度特征及对感热通量估算的影响[J]. 高原气象, 2000, 19(4): 495-503.
- [23] Sheppard P A. Transfer across the earth's surface and through the air above[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1958, 84(361): 205-224.
- [24] Zeng X B, Dickinson R E. Effect of surface sublayer on surface skin temperature and fluxes[J]. J Climate, 1998, 11(4): 537-550.
- [25] Su Z B. The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes[J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2002, 6(1): 85-99.
- [26] Yang K, Watanabe T, Koike T, et al. Auto-calibration system developed to assimilate AMSR-E data into a land surface model for estimating soil moisture and the surface energy budget[J]. J Meteor Soc, 2007, 85: 229-242.
- [27] Kanda M, Kanega M, Kawai T, et al. Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models[J]. J Appl Meteor Climatol, 2007, 46(7): 1067-1079.
- [28] 李燕, 刘新, 李伟平. 青藏高原地区不同下垫面陆面过程的数值模拟研究[J]. 高原气象, 2012, 31(3): 581-591.
- [29] 胡文超, 张文煜, 张宇, 等. 河西走廊下垫面粗糙度实测值与模拟值的差异性分析[J]. 高原气象, 2010, 29(1): 51-55.
- [30] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, De Bruin H A R. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes[J]. Bound-Layer Meteor, 1983, 26(1): 81-93.
- [31] Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms[J]. Bound-Layer Meteor, 2001, 99(1): 127-150.
- [32] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1980, 106(447): 85-100.
- [33] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. J Hydrol, 2013, 487: 24-38.
- [34] Lu L, Liu S M, Xu Z W, et al. The characteristics and parameterization of aerodynamic roughness length over heterogeneous surfaces[J]. Adv Atmos Sci, 2009, 26(1): 180-190.
- [35] Foken T, Göckede M, Mauder M, et al. Post-field data quality control[M]//Lee X, Massman M, Law B, eds. Handbook of micrometeorology. A guide for surface flux measurement and analysis. Boston: KluwerAcademic, 2004: 181-208.
- [36] 李茂善, 杨耀先, 马耀明, 等. 纳木错(湖)地区湍流数据质量控制和湍流通量变化特征[J]. 高原气象, 2012, 31(4): 875-884.
- [37] Paulson C A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer[J]. J Appl Meteor, 1970, 9(6): 857-861.
- [38] Webb E K. Profile relationships: the log-linear range and extension to strong stability[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1970, 96

- (407) : 67 – 90.
- [39] Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. J Atmos Sci, 1971, 28(2) : 181 – 189.
- [40] Liu S M, Lu L, Mao D F, et al. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements [J]. Hydrol Earth Syst Sci, 2007, 11(2) : 769 – 783.
- [41] Xu T R, Liu S M, Liang S L, et al. Improveing predictions of water and heat fluxes by assimilating MODIS land surface temperature products into common land model [J]. J Hydrometeor, 2011, 12(2) : 227 – 244.
- [42] Su Z B, Schmugge T, Kustas W P, et al. An evaluation of two models for estimation of the roughness height for heat transfer between the land surface and the atmosphere [J]. J Appl Meteor, 2001, 40(11) : 1933 – 1951.
- [43] Garratt J R, Francey R J. Bulk characteristics of heat transfer in the unstable baroclinic atmospheric boundary layer [J]. Bound – Layer Meteor, 1978, 15(4) : 399 – 421.
- [44] Massman W J. A model study of  $kBH^{-1}$  for vegetated surfaces using ‘localized near-field’ Lagrangian theory [J]. J Hydrol, 1999, 223(1) : 27 – 43.
- [45] Choudhury B J, Monteith J L. A four – layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1988, 11(480) : 373 – 398.

## Study on $kB^{-1}$ on Farmland and Grass Underlying Surfaces

JU Yingqin<sup>1-3</sup>, XU Ziwei<sup>1</sup>, LIU Shaomin<sup>1</sup>, LU Li<sup>4</sup>,  
XU Tongren<sup>1</sup>, LIU Shoudong<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, School of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
2. Hubei Province Meteorological Training Center, Wuhan 430074, China;  
3. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;  
4. Beijing Meteorological information center, Beijing 100089, China)

**Abstract:** Based on the data of Eddy Covariance (EC) system and Automatic Weather Station (AWS) collected at Guantao (farmland) and A’rou (grass) sites in 2010, the method of estimating  $kB^{-1}$  is impedance method. The results have been used to analyze the daily variation characteristics of  $kB^{-1}$  and to explore the possibility of using a fixed value to estimate sensible heat flux. And then, the estimates are compared with the values from the value of using seven parameterization schemes of M\_1958, M\_1963, M\_1982, M\_1989, M\_1989, M\_2002, and M\_2007. The result shows that the values of  $kB^{-1}$  have a obvious range on different underlying surfaces.  $kB^{-1}$  has a diurnal variation and also a good correlation with surface-air temperature difference, except maize and maize/bare soil. On the vegetation, the sensible heat flux is estimated with a median or mean value of  $kB^{-1}$ . Comparing sensible heat flux using different parameterization schemes with the observed values, results of M\_1998 are most close to the observe value on bare soil while in mixed terrain surface, M\_1958, M\_1963, and M\_2007 are close to the observe value.

**Key words:**  $kB^{-1}$ ; Eddy Covariance(EC) system; Parameterization schemes; Sensible heat flux