

张杰, 张强, 黄建平. 空气动力学阻抗算法在半干旱区的应用比较和遥感反演[J]. 高原气象, 2010, 29(3): 662- 670

空气动力学阻抗算法在半干旱区的应用 比较和遥感反演

张 杰¹, 张 强², 黄建平³

(1. 气象灾害省部共建教育部重点实验室/南京信息工程大学, 江苏 南京 210044;

2. 中国气象局 兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020; 3. 兰州大学 大气科学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 结合 2005 年中国西北半干旱区定西试验站的观测资料, 使用 9 种空气动力学方法, 估算了阻抗和感热通量, 并与涡动相关阻抗结果进行了对比, 分析了 5~ 9 月涡度相关测得阻抗的平均日变化特征, 结果表明: (1) 由于西北干旱、半干旱区和黄土高原的稀疏植被地区在植物生长季节内存在温度高、降水少、空气干燥等特点, 热量和水汽输送具有特殊性; Choudh- 1、Verma- R 空气动力学阻抗方法对热量和动量传输的粗糙度长度、热量和动量及水汽输送的修正函数描述得较好, 空气动力学阻抗估算精度较好, 由此获得的感热效果也较好, 较适用于该地区。(2) 风速对阻抗起主要作用; 植被覆盖度增加和植被密度增大的同时也增加了热量和水汽传输的粗糙度, 有助于空气动力学阻抗降低。(3) 采用 Choudh- 1 方法和遥感资料反演的阻抗效果较好。

关键词: 稀疏植被; 空气动力学阻抗; 风速; 感热通量

文章编号: 1000-0534(2010)03-0662-09 **中图分类号:** P404 **文献标识码:** A

1 引言

空气动力学阻抗是指中性层结时参考高度与植被活动面高度之间的动量传输阻力^[1- 2], 它是影响地表动量、能量及水分交换的重要因素之一^[3- 5]。自 20 世纪 70 年代 Monin- Obukhov 相似理论在遥感反演地表能量方面应用以来, 空气动力学阻抗经历了发展和逐步完善的过程。Monteith^[6- 7]认为, 在一个饱和表面上, 蒸发量由地表面温度、参考高度的空气湿度以及蒸发面与参考高度间水汽输送的空气动力学阻抗所决定, 并建立了空气动力学阻抗估算模型。Brown et al.^[8]根据能量平衡、作物阻抗原理建立的作物阻抗) 蒸发散模型, 成为热红外遥感温度应用到作物蒸发散模型的理论基础。Verma et al.^[9]、Thom^[10]、Hatfield et al.^[11]、Mahrt et al.^[12]、Choudhury et al.^[13- 14]、Xie Xianqun^[15]也先后提出很多计算空气动力学阻抗的模型, 这些模型各有特色^[16]。刘绍民等^[17- 18]应用裸地和玉米地的动力学参数的观测资料验证了这些模

型的应用精度, 发现 Choudhury- 1、Xie Xianqun、Thom 模型与边界层校正模型的一致性较好, 而 Mahrt- Ek 和 Hatfield 模型则较差。究竟是模型的适用范围有限制还是其本身存在问题, 还不是太清楚。值得注意的是, 这些模型的建立大多在玉米或裸地进行试验验证的, 是否同样适用于稀疏植被区, 特别是水汽相对较少、热力作用较强的中国西北地区^[19- 20], 还没有答案。由于热力和水汽交换的空气动力学阻抗影响因素不同, 因此有必要将这些方法在西北稀疏植被区的实用性进行验证和必要的改进^[21]。另外, 本研究试图确定一种合适的空气动力学阻抗模型, 进行遥感参数化, 以获得区域尺度上的阻抗。

本研究结合中国气象局兰州干旱气象研究所设置在黄土高原上雨养农业区定西试验基地的一年地面超声、通量观测及自动站观测资料, 对空气动力学阻抗进行估算和分析, 进而对比分析不同模型的精度和差异, 确定较为适宜的空气动力学阻抗估算模型, 为西北地区陆面过程参数化方案的改进提供

收稿日期: 2009204222; 改回日期: 2010201213

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830957)资助

作者简介: 张杰(1974), 女, 甘肃民勤人, 博士, 副研究员, 主要从事陆面过程、边界层、陆气相互作用的遥感反演研究

E-mail: gs2zhangjie@163.com

表 1 小麦生育期和相关特征

Table 1 Wheat growth stage and correlation characteristic

名称	播种	三叶期	拔节期	孕穗期	抽穗期	开花期	乳熟期	成熟期
发育期/(月日)	0318	0424	0524	0610	0628	0624	0708	0726
高度/cm		13	25	49	55	59	65	65
叶面积指数	-	0.3	1.5	2.2	1.9	1.2	0.4	-
平均每茎干物重/g	0.05	0.26	1.26	1.51	1.82	2.63	2.81	

一些参考依据。

2 试验地概况

中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱气象与生态环境试验基地(104°37'E, 35°35'N)与定西气象站毗邻, 海拔高度 1896.7 m, 试验站占地 0.7 hm²。基地东面是定西气象观测站, 其余三面均是农田, 地势平坦。尤其在当地主导风向(偏南、偏北风)的上下风向上无高层建筑和树木遮挡, 其下垫面过渡区在观测点东南、南东南方向长约 400 m, 西北、北西北方向长有几公里, 代表性较好。试验地建有高 16 m 的气象观测塔, 塔上安装了常规气象梯度、开路涡动相关观测系统及其数据采集器(CR5000, 为美国 Campbell 公司生产), 所有数据采集器通过网线与工作室的 PC 计算机相连, 从而实现数据的实时监视和拷贝。研究应用的主要仪器及其安装高度分别为来自常规气象梯度观测系统的 5 套温度、湿度、水汽压传感器 HMP45C (Vaisala, Inc) 和风速传感器 A100R (Vector Instruments, Inc), 观测高度分别为 1, 2, 4, 10 和 16 m, 采样频率为 0.5 Hz, 每 30 min 自动记录平均值。风速和温度的脉动值来自开路涡动相关观测系统的三维超声风温仪 CSAT3 (Campbell Scientific, Inc), 安装高度为 2.5 m, 采样频率为 10 Hz。

辐射观测系统包括太阳总辐射、反射辐射、地表长波辐射、大气长波辐射, 以及 CO₂ 土壤热通量和地表温度。PIR 短波辐射表和 PSP 长波辐射表为美国 Eppley 公司生产, 地表温度传感器(Pt100)布设在 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 80 cm 深度处, 地面作物为旱地春小麦。

试验区小麦种植采用垄耕集水方式, 以便为小麦生长收集更多的降水, 小麦相关参数由农业气象试验站的常规观测获得。观测发现, 半干旱区(定西)旱地春小麦一般每平方米播种 520~550 粒, 分蘖 8%~10%, 观测得出总株数约 600 株, 夏季最

高植被覆盖度为 0.6~0.8 左右, 叶面积指数达 2.2。

3 资料处理和研究方法

本研究所用资料为 2005 年 3~10 月资料, 为了避免不合理值的出现, 在资料应用之前对数据进行选取与处理, 选取标准为风速 > 1.5 m # s⁻¹, 摩擦速度 > 0.1 m # s⁻¹, 地气温差 > 0K, 显热通量 > 2 W # m⁻², 潜热通量 > 10 W # m⁻² 所用数据为白天 09:30~18:00(北京时, 下同)的数据。3~10 月白天(09:30~18:00)共剔除资料 16 个, 占总样本的 4.5%。

3.1 空气动力学阻抗涡动相关测量方法

除了 Verma - Rosenberg、Thom、Hatfield、Mahrt - Ek、Choudhury、Xie Xianqun 等空气动力学阻抗估算方法外, 有两种空气动力学测量方法, 如: 蒸发皿测量法^[7]和涡动相关观测系统。由于蒸发皿测量的空气动力学阻抗小于涡动相关仪的观测值^[17], 因此, 在本次的测定方法中, 采用涡动相关方法作为上述空气动力学估算模型的验证参考值。根据 Nichols^[3] 热量输送的空气动力学阻抗计算方法:

$$r_a = Q_c p (T_s - T_a) / H, \quad (1)$$

式中, r_a 是空气动力学阻抗(s # m⁻¹), c_p 为空气定压热容量(1004 J # kg⁻¹ # K⁻¹), Q 是空气密度(标准温压下取 1.21 kg # m⁻³), T_a 为空气温度(K), T_s 为热量交换表面的空气动力学温度(K), H 是显热通量(W # m⁻²)。

3.2 9 种热量输送空气动力学阻抗的估算方法

3.2.1 Thom 公式

Thom^[22] 于 1972 年指出水汽和热力传输的空气阻抗可以超过动量输送的空气动力学阻抗(下称 Thom - S), 因此存在剩余阻抗^[23], 表示为

$$r_a = \frac{r_f}{c_m} r_{am} + r_b = \frac{r_f}{c_m} \frac{u_z}{u_*^2} + r_b. \quad (2)$$

Dyer et al.^[24] 将不稳定条件下热量和水汽传输的阻抗表示为

$$\zeta_m = \zeta_h = \left[1 - 16 \left(\frac{z-d}{L} \right)^{-1/2} \right], \quad (3)$$

在稳定条件下:

$$\zeta_m = \zeta_h = 1 + 5.2 \left(\frac{z-d}{L} \right), \quad (4)$$

$$r_b = a \# u_*^{2/3}, \quad (5)$$

式中 r_{am} 是动量输送的空气动力学阻抗 ($s \# m^{-1}$), ζ_m 、 ζ_h 是动量和热量传输的稳定度修正系数, r_b 是剩余阻抗 ($s \# m^{-1}$), u_z 是参考高度 z 的风速 ($m \# s^{-1}$), u_* 是摩擦风速 ($m \# s^{-1}$), L 是 Obukhov 长度, d 是零平面位移 (m), z 是参考高度 (m), a 为常数, 在不饱和表面等于 6.266。

3.2.2 Thom 模式估算法

Thom^[22] 于 1975 年又提出了热量和水汽输送的空气动力学阻抗模型 (下称 Thom- m), 即:

$$r_a = \frac{1}{k^2 u_z} \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right) - \zeta_m \left(\frac{z-d}{L} \right) \right] \# \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0h}} \right) - \zeta_h \left(\frac{z-d}{L} \right) \right], \quad (6)$$

在不稳定条件下^[25]:

$$\zeta_m = 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \arctan(x) + \frac{p}{2}, \quad (7)$$

$$\zeta_h = 2 \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right), \quad (8)$$

在稳定条件下^[26]:

$$\zeta_m = \zeta_h = -5N \quad (9)$$

其中:

$$N = (z-d)/L, \quad (10)$$

$$x = (1-16N)^{1/4}, \quad (11)$$

式中, k 是 Von Karman 常数, z_{0m} , z_{0h} 分别是动量和热力传输的粗糙度长度。

3.2.3 Verma & Rosenberg 模式估算法

在中性条件下, 假定热量和动量交换的粗糙度长度相等, 空气动力学阻抗 r_{aa} 可表示为

$$r_{aa} = \frac{\left[\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right) \right]^2}{k^2 u_z}, \quad (12)$$

后来, Verma et al.^[9] 对该模式进行了稳定度校正 (下称 Verma- R), 即在不稳定条件下,

$$r_a = \frac{\zeta_m}{\zeta_h} r_{aa}, \quad (13)$$

$$\frac{\zeta_m}{\zeta_h} = 1 / (1 - 16 Ri)^{0.25}, \quad (14)$$

$$Ri = \frac{g}{H} \sqrt{z_2 z_1} \ln \left[\frac{z_2}{z_1} \right] \frac{(H-H)}{(u_2 - u_1)^2}, \quad (15)$$

式中, H_1 、 H_2 、 H 分别是高度 1、2 m 处的潜在温度和平均温度 (K), z_1 、 z_2 分别是高度 1、2 m, u_1 、 u_2 分别是高度 1、2 m 处的风速 ($m \# s^{-1}$)。

3.2.4 Monteith- Hatfield 模式估算法

基于 Monteith 稳定度校正函数, Monteith^[7] 和 Hatfield et al.^[11] 提出一种空气动力学阻抗 (下称 Monteith- H),

$$r_a = r_{aa} \left[\frac{1 - n_1 (z-d) \# g \# (T_s - T_a)}{T_a u_z^2} \right], \quad (16)$$

式中, n_1 为经验系数, 等于 5。

3.2.5 Xie Xianqun 模式估算法

根据 Dyer et al.^[24] 对非稳定条件的稳定度校正函数和 Webb^[25] 对稳定条件下的校正函数, 谢贤群等^[15] 提出空气动力学阻抗 (下称 Xie- XQ) 如下:

$$r_a = r_{aa} \left[1 + \frac{\zeta_h}{\ln \left(\frac{z-d}{z_{0m}} \right)} \right], \quad (17)$$

$$\zeta_h = \left[1 - 16 \left(\frac{z-d}{L} \right)^{-1/2} \right] \frac{z-d}{L} < -0.03. \quad (18)$$

在稳定条件下:

$$\zeta_h = 1 + n_2 \frac{z-d}{L},$$

$$\frac{z-d}{L} > 0 \text{ or } -0.03 < \frac{z-d}{L} < 0, \quad (19)$$

其中, n_2 是经验系数, 当 $\frac{z-d}{L} < 0$ 时, $n_2 = 4.5$; 当

$\frac{z-d}{L} > 0$ 时, $n_2 = 5.2$ 。

3.2.6 Mahrt- Ek 模式估算法

根据 Louis et al.^[27]、Mahrt et al.^[12] 给出的计算空气动力学阻抗 (下称 Mahrt- Ek):

$$r_a = \frac{1}{c_q u_z}, \quad (20)$$

$$c_q = \left[\ln \left(\frac{k}{z + z_{0m}} \right) \right]^2 \left(1 - \frac{15 Ri}{1 + c(-Ri)^{-1/2}} \right), \quad (21)$$

$$c = \frac{75k^2 \left(\frac{z + z_{0m}}{z_{0m}} \right)^{1/2}}{\left[\ln \left(\frac{z + z_{0m}}{z_{0m}} \right) \right]^2}. \quad (22)$$

在稳定条件下:

$$c_q = \left[\frac{k}{\ln \left(\frac{z + z_{0m}}{z_{0m}} \right)} \right]^2 \left(\frac{1}{(1 + 15Ri)(1 + 5Ri)^{1/2}} \right). \quad (23)$$

3.2.7 Choudhury- 1 模式估算法

Choudhury et al.^[14] 在 1986 年提出一种空气动力学阻抗的估算法(下称 Choudh- 1):

$$r_a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z - d}{z_{0h}} \right) - U \right] \left[\ln \left(\frac{z - d}{z_{0m}} \right) - U \right]}{k^2 u_2}, \quad (24)$$

$$U = \frac{[b - (b^2 - 4ac)^{1/2}]}{2a}, \quad (25)$$

$$a = 1 + G \quad (26)$$

$$b = \ln \left(\frac{z - d}{z_{0m}} \right) + 2Gn \left(\frac{z - d}{z_{0m}} \right), \quad (27)$$

$$c = Gn \left(\frac{z - d}{z_{0m}} \right)^2, \quad (28)$$

$$G = 5(z - d)g \frac{(T_s - T_a)}{T_a u_z^2}. \quad (29)$$

当 $U < -5$, $U = -5$ 时, 在不稳定和中性条件下:

$$r_a = \frac{\left[\ln \left(\frac{z - d}{z_{0h}} \right) \right] \left[\ln \left(\frac{z - d}{z_{0m}} \right) \right]}{k^2 u^2 (1 + G)^{3/4}}. \quad (30)$$

3.2.8 Choudhury- 2 模式估算法

Choudhury et al.^[13-14] 于 1986 年和 1988 年也提出非中性条件下的空气动力学阻抗模式(下称 Choudh- 2):

$$r_a = \frac{r_{a0}}{(1 + G)^p}. \quad (31)$$

在不稳定条件下, $p = 3/4$; 在稳定条件下, $p = 2$ 。

上述提及的粗糙度长度和零平面位移分别表示为^[28]

$$z_{0m} = 0.13h, \quad (32)$$

$$d = 0.63h, \quad (33)$$

$$\ln \frac{z_{0m}}{z_{0h}} = 0.17u_z (T_s - T_a). \quad (34)$$

在裸地表面, 动量粗糙度长度是 0.01, 零平面

位移是 0, $\ln \frac{z_{0m}}{z_{0h}} = 2^{[29]}$ 。

3.2.9 Liu 方法

选定裸地和玉米地, 刘绍民等^[17] 根据彭曼方法和涡动相关方法测得的空气动力学阻抗(下称 Liu), 发现彭曼方法测得的结果小于涡动相关方法的结果, 并建立了阻抗和风速的关系分别是:

$$r_a = 94.909u_z^{0.9036}, \quad (35)$$

$$r_a = 87.54u_z^{0.4277}. \quad (36)$$

4 结果分析

4.1 不同空气动力学方法与涡动相关方法计算阻抗的对比

涡动相关方法被公认为估算空气动力学阻抗最好的方法, 但由于其观测要素复杂, 不能用于大范围动力学阻抗的估算, 因此, 选取一种较常规的并能应用于较大范围的方法, 显得尤为重要。图 1 是用 9 种不同的空气动力学方法及涡动相关法计算阻抗的比较, 它们分别对同样的 1920 个观测样本计算了阻抗。该 9 种方法分别为 Xie- XQ、Mahrt- Ek、Thom- s、Verma- R、Choudh- 1、Thom- m、Choudh- 2、Monteith- H、Liu。从图 1 散点分布及其趋势线关系上可以看出, Xie- XQ、Mahrt- Ek 和 Choudh- 2 所得结果的关系较差, 相关系数分别为 0.12, 0.14, 0.11; 其次是 Thom- s 和 Thom- m 方法, 相关系数为 0.15 和 0.18; 其它 4 种方法得到的结果与涡动观测结果的关系较好, 相关系数基本都达到 0.2 以上, Verma- R、Choudh- 1、Monteith- H、Liu 与观测结果的相关系数分别为 0.28, 0.30, 0.23, 0.20。对比 9 种方法的理论公式可以看出: Choudh- 1、Thom- m 方法对热、动量传输的粗糙度长度、热量和动量及水汽输送的修正函数描述得较好; Verma- R 主要认为热量传输和动量传输的粗糙度长度相等, Monteith- H 是在 Verma- R 方法基础上进行改进的; Xie- XQ 的方法也是在 Verma- R 基础上对热量传输进行了修正; Mahrt- Ek 主要对动量输送方面进行修正。由于半干旱的稀疏植被地区在植物生长季节内存在温度高、降水少、空气干燥等特点, 所以应充分考虑热量输送和水汽输送的特殊性, 也许这就是 Verma- R、Choudh- 1、Monteith- H 几种方法能够更实际地描述空气动力学阻抗的主要原因。由图 1 还可以看出, 不论采用哪种方法, 得到的空气动力学阻抗变化范围都较大, 在 0

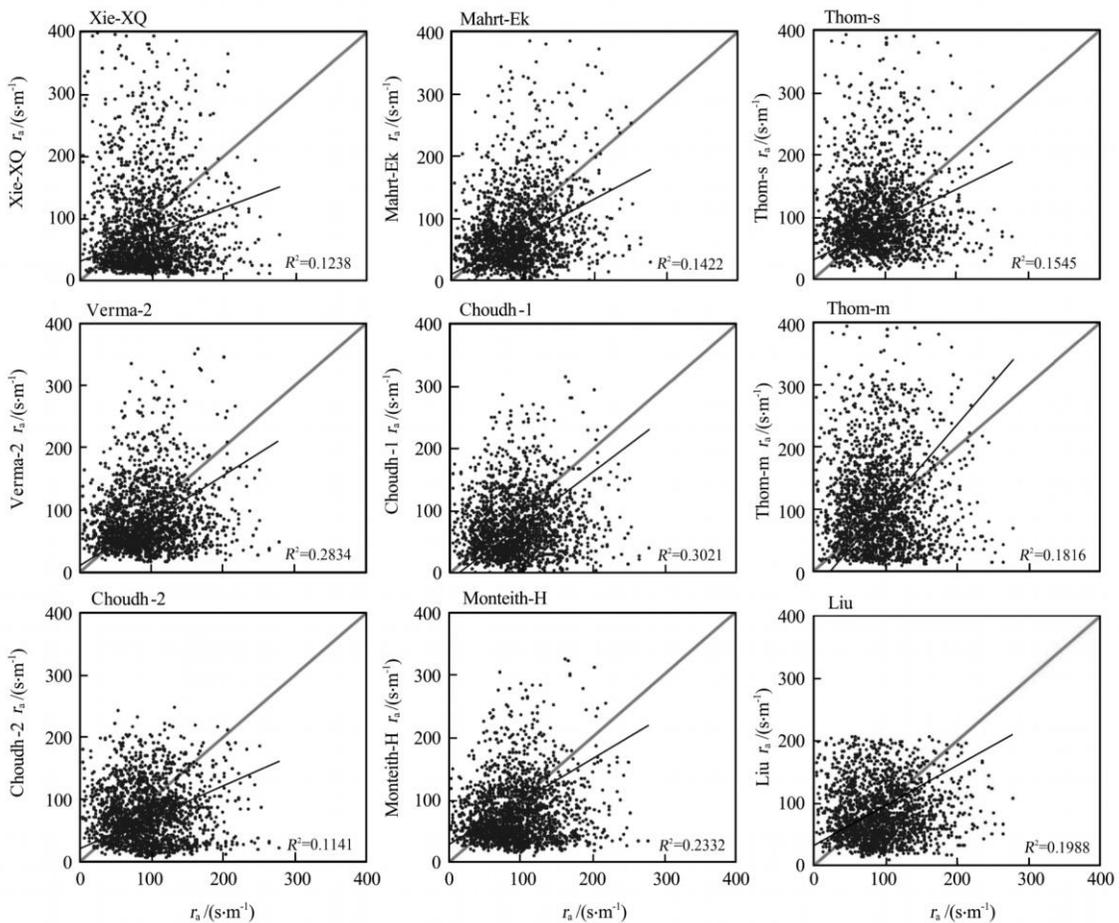


图 1 各空气动力学方法计算阻抗(纵轴)与涡动相关法计算阻抗(横轴)的比较

Fig. 1 Contrasts of resistances calculated by different aerodynamic methods (ordinate) and eddy correlation one(abcissa)

~ 300 $s \# m^{-1}$ 之间, 说明该地区阻抗较大。

4.2 不同空气动力学方法及涡动相关法计算感热通量的对比

图 2 给出基于 9 种计算空气动力学阻抗估算的感热通量结果与涡动相关计算为感热通量的对比。从图中的散点分布及其趋势线关系上可以看出: Xie- XQ 和 Mahrt- Ek 方法所得结果的关系较差, Verma- R 的部分估算结果偏大。

整体来看, Xie- XQ、Mahrt- Ek、Thom- s、Monteith 法所得结果的关系较差, 相关系数分别为 0.23, 0.18, 0.27, 0.28; 其次是 Thom- m、Liu 方法, 相关系数为 0.30, 0.31; 其它 3 种方法 Ver2 ma- R、Choudh- 1、Choudh- 2 得到的结果与涡动观测结果的关系较好, 相关系数基本都达到 0.32 以上。从趋势线与理想趋势线的偏离程度及相关系数可以看出, Verma- R、Choudh- 1、Choudh- 2、Liu 的偏离程度较为接近。如图 1 所示, 由于 Ver2 ma- R、Choudh- 1、Monteith 对空气动力学阻抗

描述得较好, 所以 Verma- R、Choudh- 1 方法能够更实际地反映感热通量特征。说明该方法较其它几种方法好, 得到的空气动力学阻抗和感热通量更接近实际, 适合在干旱区推广使用。

4.3 空气动力学阻抗的日变化特征

选取 2005 年植被生长季节 5~ 9 月 09: 30~ 18: 00 每隔 30 min 的涡动观测系统、温度、风速观测资料, 采用涡动相关方法计算空气动力学阻抗, 用逐月每 30 min 平均资料分析不同生长季节空气动力学阻抗的日变化特征, 代表该年 5 个月不同生长期的空气动力学阻抗变化(图 3)。

空气动力学阻抗的日变化在 5~ 9 月分别在 $80 \sim 160 s \# m^{-2}$, $80 \sim 140 s \# m^{-2}$, $80 \sim 120 s \# m^{-2}$, $70 \sim 100 s \# m^{-2}$ 和 $70 \sim 85 s \# m^{-2}$ 范围内, 随着时间推移, 空气动力学阻抗在波动中呈降低趋势, 除了 8 月以外, 其它月份的阻抗日变化趋势有一致性, 9 月变化幅度相对较小; 阻抗的日变化出现多峰型趋势, 5 个月的日空气动力学阻抗都在

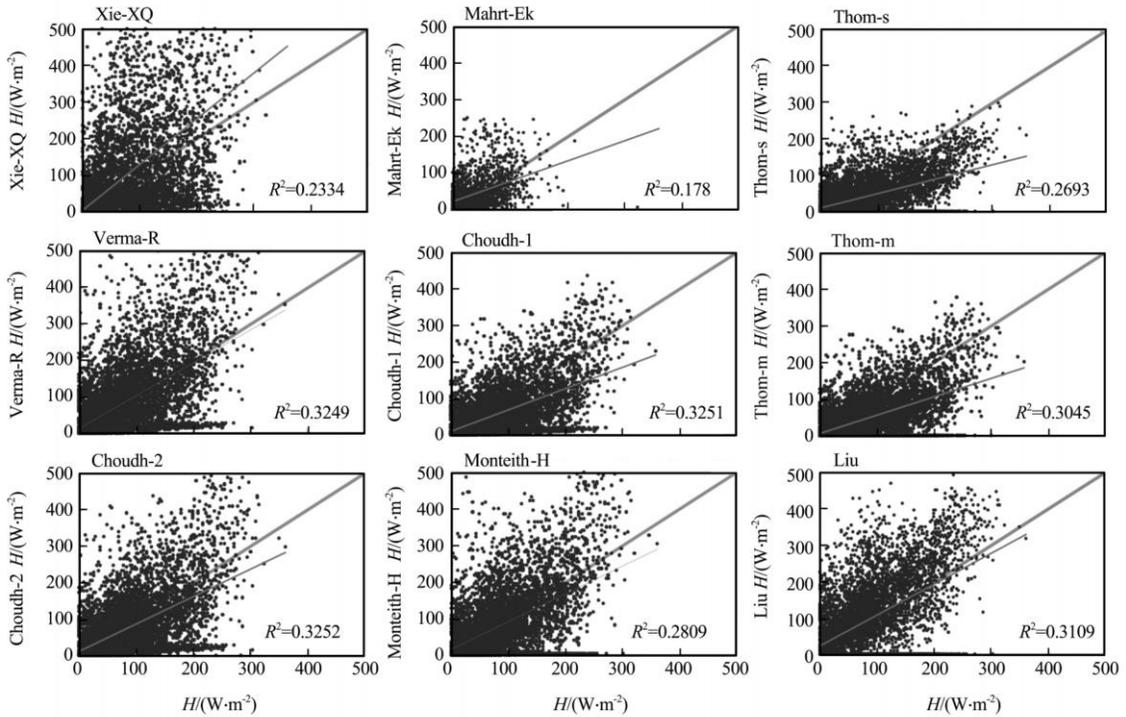


图 2 各空气动力学方法计算的感热通量(纵轴)与涡动相关法计算的感热通量(横轴)的比较
 Fig. 2 Contrasts of sensible heat flux calculated by different aerodynamic methods(ordinate) and eddy correlation one(abscissa)

13:30和18:00左右出现两个波峰,5~6月在早上09:30还存在一个高峰,7~9月在11:00左右存在一个高峰。

从阻抗的月变化可以看出,8月份的阻抗变化略有不同。从日变化特征可看出,在5~9月份空气动力学阻抗在13:30左右出现波峰,这与文献[15]在玉米地或裸地观测结果相反。主要原因之一是6~9月下垫面状况差别较大:6~7月上中旬北方半干旱地区的植被状况和农作物达到最旺盛阶段,叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)、植被覆盖度达到最大,所以冠层湿度较大,水汽密度较大,水汽交换旺盛,阻抗降低。另外,植被覆盖度增加,植被密度增大的同时也增加了热量和水汽传输的粗糙度,使得空气动力学阻抗随着时间从5月向9月份推移而减小。

空气动力学阻抗的另一个影响因素就是风速变化。图3中给出2005年植被生长季节5~9月09:30~18:00每隔30min的风速演变结果。由图可看出,5~9月的风速略有增加趋势,5个月的平均风速分别为2.55, 2.64, 2.57, 2.65, 2.82 m# s⁻¹。从图3中阻抗和风速的日变化趋势来看,大部分时段的风速越小阻抗越大,二者呈反相关关

系。这一结果可以解释阻抗月变化的原因,并且与文献[18]的结果相一致(风速和阻抗呈负指数关系)。当然,有部分时段的风速与阻抗变化趋势相一致,说明风速只是影响阻抗的一个因素,还有其它因素会影响阻抗,这一特征反映了典型半干旱地区的气候特征。

4.4 空气动力学阻抗的遥感反演

不论从空气动力学阻抗对比或是感热通量的对比,都可以得出Verma-R、Choudh-1等几种方法较实用。分析发现Choudh-1方法将冠层与地面的气温差应用到阻抗估算中,并取得了较好的效果。因此,本研究以Choudh-1模型为基础,进行动力学阻抗的遥感参数化,以获取大范围的阻抗特征。

根据动力学阻抗与风速、冠层气温的关系,采用MODIS/Terra和MODIS/Aqua卫星遥感方法反演冠层温度和地表面空气温度,并对空气动力学阻抗进行参数化,估算区域的植被覆盖度和叶面积指数,所有参数的反演方法参见文献[30],所得结果见图4。2007年7月上旬黄土高原空气动力学阻抗分布呈现出南北和东西差异,主要表现在南部和东部区域出现低值区,空气动力学阻抗在90 s# m⁻¹

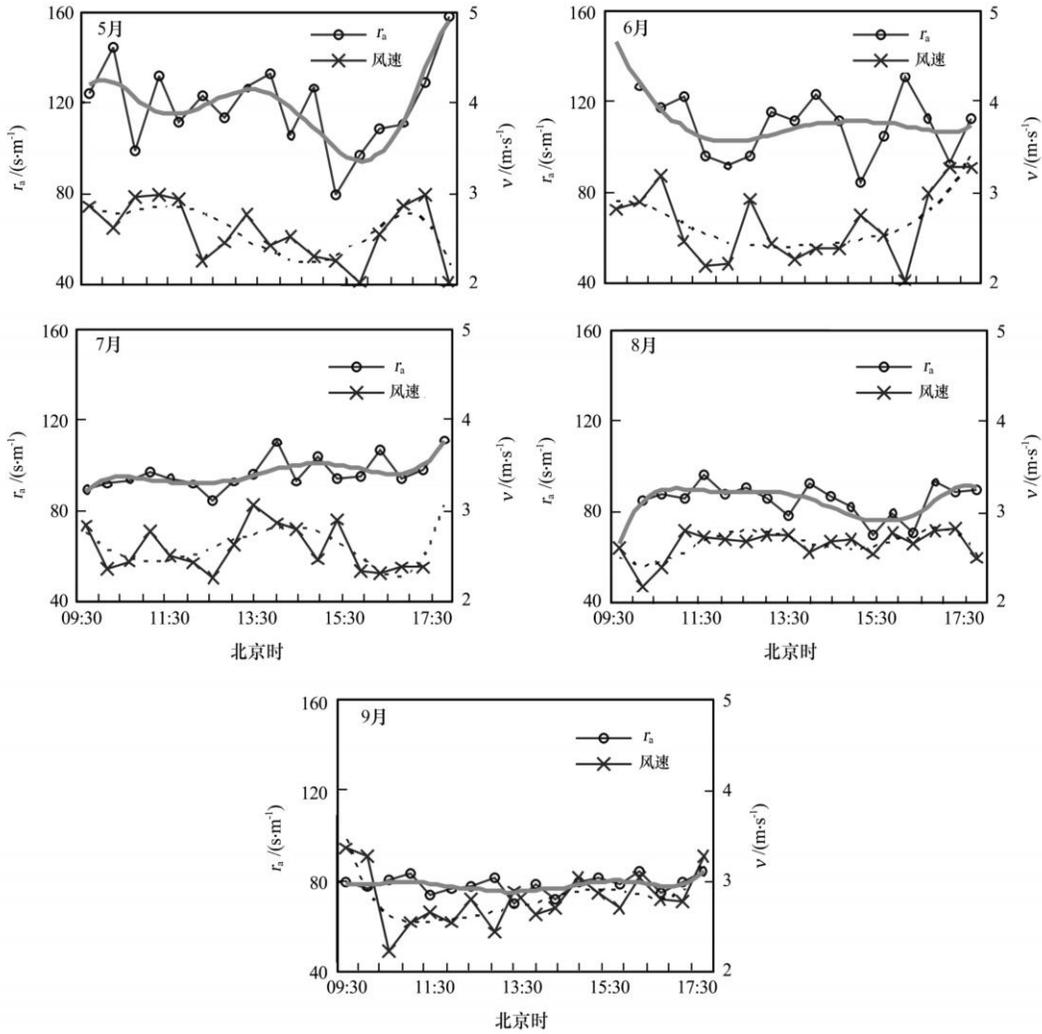


图 3 2005 年 5~ 9 月空气动力学阻抗和风速的日变化特征

Fig. 3 Daily change of aerodynamic resistance and wind speed from May to September 2005

以下，北部区域除了宁夏和河套地区的黄河流域区域的空气动力学阻抗在 $90 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 以上外，其它区域基本在 $90 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ 以下。造成空气动力学阻抗差异的主要原因是黄土高原土壤湿度、植被覆盖度和叶面积指数的空间分布(图略)，使得冠层气温差呈现出南北和东西的差异，在高 LAI 区域，空气动力学阻抗较低；在北部低 LAI 区域，空气动力学阻抗较高。由于风速是影响空气动力学阻抗的重要因素，分析发现，在 2007 年 7 月黄土高原区域的风速较低，基本在 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的范围内，南部山区和东部平原区域风速偏大，所以空气动力学阻抗偏低，风速和空气动力学阻抗空间分布的趋势一致。

4.5 遥感估算空气动力学阻抗的精度检验

为分析遥感反演结果的准确程度，对卫星过境时的黄土高原区域定西实验基地的春小麦、苜蓿地

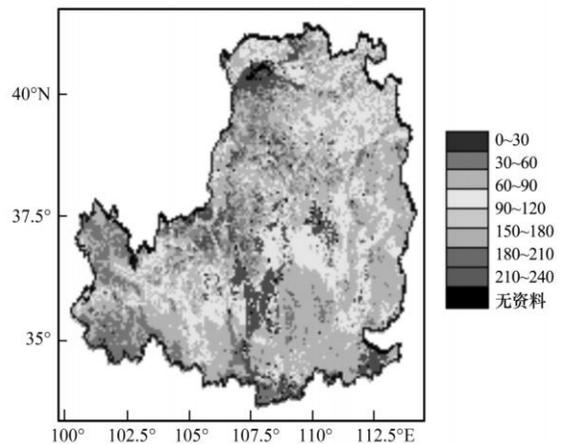


图 4 2007 年 7 月上旬黄土高原空气动力学阻抗的空间分布特征

Fig. 4 Spatial distribution of aerodynamic resistance over Loess Plateau in the first 10 day of July 2007

区域的涡动相关观测和自动观测站资料进行分析, 作为检验反演结果的观测值。由估算值与观测值的关系可见(图 5)。估算结果与观测结果相当接近。观测结果大部分分布在平衡线附近, 最大绝对误差为 $46 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, 平均绝对误差为 $24 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, 最大相对误差为 13%, 平均相对误差为 4.8%。在阻抗较小时, 反演结果误差较小; 在阻抗较大时, 反演结果误差较大。反演结果大部分在平衡线之上, 说明反演结果普遍偏大。不过反演结果平均误差比较小, 说明基于遥感反演的空气动力学阻抗基本上能反映当地的实际空气动力学阻抗状况。

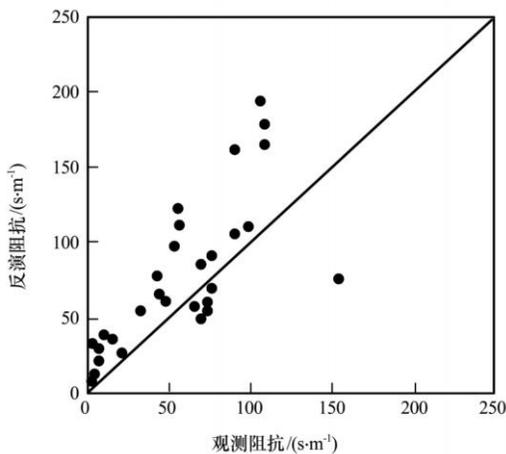


图 5 空气动力学阻抗反演值与观测值比较

Fig. 5 Contrast of retrieval aerodynamic resistance and the observed value

5 结论与讨论

(1) 在半干旱地区, 风速仅仅是影响阻抗的一个因素, 大部分时段的风速越小阻抗越大, 二者呈反相关关系; 当风速变化不大时植被覆盖度增加, 植被密度增大的同时也增加了热量和水汽传输的粗糙度, 使得空气动力学阻抗随着时间从 5 月向 9 月份推移而减小。

(2) Verma- R、Choudh- 1、Thom 方法对热量传输和动量传输的粗糙度长度、热、动量及水汽输送的修正函数描述得较好。由于半干旱的稀疏植被地区在植物生长季节内存在温度高、降水少、空气干燥等特点, 所以热量输送和水汽输送的特殊性不可忽视, 这就是 Verma- R、Choudh- 1 等几种方法能够更实际地描述空气动力学阻抗的主要原因。

(3) Choudh- 1、Verma- R 对空气动力学阻抗描述得较好, 并且能够更实际地反映感热通量特征, 所得的空气动力学阻抗和感热通量更接近实

际, 适合在干旱区推广使用。以 Choudh- 1 模型为基础, 进行动力学阻抗的遥感参数化, 所得参数化结果平均误差较小, 并且反映了不同区域的阻抗特征。

致谢: 感谢项目组刘宏谊提供的观测资料, 并对资料进行质量控制和检验。

参考文献

- [1] Su Z. The surface energy balance system (SEBS) for estimation of turbulence heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002, 6: 85- 99
- [2] 宋小宁, 赵英时. 改进的区域缺水遥感监测方法[J]. 中国科学(D 辑), 2006, 36(2): 188- 194
- [3] Nichols W D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1992, 60: 212- 247
- [4] 陈磊, 田文寿, 王禅. 半干旱区植被减少与城市化对大气的局地和非局地影响的数值模拟[J]. 高原气象, 2009, 28(2): 233- 245
- [5] 张强, 于学泉. 干旱区绿洲诱发的中尺度运动与其主要影响因素的敏感性实验[J]. 高原气象, 2001, 20(1): 58- 64
- [6] Monteith J L. Principles of Environmental Physics[M]. Arnold, Paris, 1973
- [7] Monteith J L. Evaporation and surface temperature[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1981, 107: 12- 27
- [8] Brown K W, H T Rosenberg. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J]. Agronomy J, 1985, 65: 341- 347
- [9] Verma S B, N J Rosenberg, B L Blad, et al. Resistance energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance and evaluation of error effects[J]. Agronomy J, 1976, 68: 776- 782
- [10] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of plant communities[M]// Monteith J L. Vegetation and the Atmosphere Academic Press, London, 1975: 57- 109
- [11] Hatfield J L, A Perrier, R D Jackson. Estimation of evapotranspiration at an arbitrary time of day using remotely sensed surface temperature[J]. Agricultural Water Management, 1983, 7: 341- 350
- [12] Mahrt L, M Ek. The influence of atmospheric stability on potential evaporation[J]. Journal of Applied Meteorology, 1984, 23: 222- 234
- [13] Choudhury B J, J L Monteith. A four-layer model for the heat budget of homogeneous land surfaces[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1988, 11: 373- 398
- [14] Choudhury B J, R J Reginato, S B Idso. An analysis of infrared temperature observations over wheat and calculation of latent heat flux[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1986, 37: 75- 88
- [15] Xie Xiaqun. An improved energy balance aerodynamic resistance model used estimation of evapotranspiration on the wheat field[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 1988, 46: 102- 106
- [16] Chen J M. The main problem with modern remote sensing

- evapotranspiration model and ways of improvement [J]. Chinese Sci Bull (in Chinese), 1988, 6: 454- 457
- [17] Shaomin Liu, L Lu, D Mao, et al. Evaluating parameterizations of aerodynamic resistance to heat transfer using field measurements [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2007, 11(2): 769- 783
- [18] 刘绍民, 卢俐, 毛德发, 等. 空气动力学阻抗的测量研究[J]. 应用气象学报, 2007, 18(2): 247- 250
- [19] 刘远永, 文军, 韦志刚, 等. 黄土高原区地表辐射和热量平衡观测和分析[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 928- 937
- [20] 鲍艳, 左洪超, 吕世华, 等. 干旱区陆面过程参数改进对气候模拟的影响[J]. 高原气象, 2004, 23(2): 220- 227
- [21] 张强, 吕世华. 城市地表大气粗糙度的确定[J]. 高原气象, 2003, 22(1): 25- 31
- [22] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of vegetation [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1972, 98: 124- 134
- [23] Stewart J B, A S Thom. Energy budgets in pine forest [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1973, 99: 154- 170
- [24] Dyer A J, B B Hicks. Flux gradient relationships in constant flux layer [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1970, 94: 318- 332
- [25] Webb E K. Profile relationships: The log-linear range and extension to strong stability [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1970, 96: 67- 90
- [26] Paulson C A. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer [J]. J Appl Meteor, 1970, 9: 857- 861
- [27] Louis J F, M Tiedtke, J F Geleyn. A short history of the operational PBL30 Parameterization of ECMWF [C]. Workshop on planetary boundary layer parameterization, European center for Medium Range Weather Forecasts. Shinfield Park, Reading Berks, UK, 1982: 698
- [28] Kustas W P, B J Choudhury, M S Moran, et al. Determination of sensible heat flux over sparse canopy using thermal infrared data [J]. Agric For Meteor, 1989, 44: 197- 216
- [29] Garratt J, B Hicks. Momentum, heat, and water vapor transfer to and from natural and artificial surfaces [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1973, 99: 680- 687
- [30] 张杰. 干旱-半干旱区陆面过程参数化及遥感反演研究[D]. 兰州大学博士论文, 2009: 167

Application of Aerodynamic Resistance Arithmetic in Semi-Arid Region of China and Retrieval from Remote Sensing

ZHANG Jie¹, ZHANG Qiang², HUANG Jianping³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education and Jiangsu Province/Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

3. College of Atmosphere Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Combined with observed data at Dingxi station in semi-arid region of China, 9 kinds aerodynamic resistance arithmetic are used for estimating aerodynamics resistance, the sensible heat flux is estimated based on these resistance results, the contrasts of eddy correlation results with other arithmetic results are performed, and the seasonal variable is estimated. The conclusions are: (1) Due to higher temperature, less precipitation and lower air humidity during vegetation growing season in sparse vegetation region in Loess Plateau and semi-arid region of northwest China, heat exchange and water vapor exchange are particular and not neglected, the sensible heat flux and aerodynamic resistance arithmetic Choudhury, Verma2R are the same with aerodynamic resistance of these region because of perfect describing of heat, momentum and water vapor exchange. (2) Aerodynamic resistance was mainly influenced not only by wind speed but also by vegetation fraction due to increasing roughness length. (3) Aerodynamic resistance is well retrieved from remote sensing by using Choudhury arithmetic.

Key words: Sparse vegetation; Aerodynamic resistance; Wind speed; Sensible heat flux