王丽娟，左洪超，杨启东. 对西北地区典型下垫面空气动力学阻抗的估算方法的改进及其验证[J]. 干旱气象,2013,31(4):650-656, doi:10.11755/j. issn. 1006-7639(2013)-04-0650

西北地区典型下垫面空气动力学阻抗估算方法改进及其验证

王丽娟[1]，左洪超[2]，杨启东[3]

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所,甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,甘肃 兰州 730020;
2. 兰州大学大气科学学院,甘肃 兰州 730000;3. 云南大学大气科学系,云南 昆明 650091)

摘 要:利用2010年古浪近地层野外观测试验取得的干旱区典型下垫面(荒滩、沙漠和农田)的观测资料,对常用的3种空气动力学阻抗算法——Verma-R算法、Liu算法、Thom算法进行了适用性检验,并通过分离Thom算法中的动量和热量粗糙度对其进行改进(下称Thom-2算法)。对比不同下垫面空气动力学阻抗估算结果发现:在沙漠和荒滩下垫面,动力因素较热力因素影响大,空气动力学阻抗与风速的指数关系较农田下垫面明显;与其他3种算法相比,考虑了热量粗糙度的Thom-2算法在各种典型下垫面上的估算结果与观测值相比偏差最小,且在较为均匀的荒滩和沙漠下垫面上估算的空气动力学阻抗精度较农田高;通过比较4种算法估算干旱区不同典型下垫面空气动力学阻抗结果,说明干旱区空气动力学阻抗的估算应考虑热力粗糙度的影响。

关键词:空气动力学阻抗;古浪非均匀近地层野外观测试验;风速;非均匀下垫面

文章编号:1006-7639(2013)-04-0650-07 doi:10.11755/j. issn. 1006-7639(2013)-04-0650

中图分类号:P433 **文献标识码**:A

引 言

地表能量平衡一直都是陆面过程研究中的一个热点问题[1-4],而空气动力学阻抗作为影响地表动量、能量及水分交换的重要因素之一[5-7],被定义为中性层结时参考高度与植被活动面之间的动量传输阻力[8-9],是能量平衡研究中的重要内容。自1970年代开始,不少研究者分别从测量和参数化等方面展开了对空气动力学阻抗的研究工作,这使得空气动力学阻抗的估算方法不断发展[10-13]。

空气动力学阻抗的测量方法主要有2种,一种是基于Monteith研究发展起来的蒸发皿测量法[14],另一种是根据Nichols研究提出的涡旋相关仪测量法[15]。经过刘绍明等的比较发现,2种测量空气动力学阻抗的方法具有可比性,但蒸发皿测量法得到的空气动力学阻抗普遍小于涡旋相关仪测量法得到的结果[16]。至今为止,涡旋相关仪测量法是被公认的测量空气动力学阻抗最优的方法,但由于地面观测条件和观测成本的限制,大范围内的空气动力学阻抗测量还比较困难,因而发展易于实现且精度较高的估算空气动力阻抗的方法就显得尤为重要。为此,不少工作者致力于空气动力学阻抗估算的参数化方案研究。这些方案一般可以分为2类,一类是利用实际野外观测资料进行拟合得到的经验公式,如Liu算法等[17]。另一类是考虑动力和热力2种因素,综合稳定条件发展起来的参数化方案,如Verma[18]在假定动量和热量粗糙度相等的情况下,提出了一种估算空气动力学阻抗的方法。随后,Monteith[19]、Xie[20]、Mahrt[21]等在Verma算法的基础上,通过对稳定度函数和动量输送方面的修正,给出不同的空气动力学阻抗估算方法。张杰等[22]利用中国西北干旱半干旱定西试验站的观测资料,对Verma、Hatfield、Xie、Liu等提出的9种空气动力学阻抗估算方法进行了检验,发现其中Verma等提出

收稿日期:2013-08-02;**改回日期**:2013-08-26

基金项目:兰州干旱气象研究所硕士科研启动项目(KYS2012SS03)和中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室开放基金(LPCC201207)共同资助

作者简介:王丽娟(1986-),女,四川广安人,硕士,助理工程师,主要从事陆面及卫星遥感研究. E-mail:wanglijuan01@126.com

的 4 种算法在西北干旱半干旱地区反演效果相对较好,而其他几种算法在该地区的反演精度较差。

空气动力学阻抗作为感热和潜热估算中的重要参数[23-24],其估算结果的精度直接影响了潜热和感热的估算精度。根据已有的分析[25]表明:在地表与空气的温度差为定值,在空气动力学阻抗小于某一阈值时,感热会随着空气动力学阻抗的增大而急剧减小。所以,在研究空气动力学阻抗算法的基础上给出改善其估算精度的方法,有利于提高潜热和感热估算的精度,可以为陆面过程的研究及陆面模式的发展提供依据,为实现更大范围能量通量的精确估算奠定基础,进一步为更大尺度上陆面过程的研究和干旱的监测提供重要的参考。

现有的算法大多都是针对某一地区或特定的下垫面提出的,在具体应用时,需要对其进行适用性检验或做必要的修正。本文结合古浪非均匀近地层野外观测试验取得的资料,对干旱区各种典型下垫面的空气动力学阻抗进行了估算和分析。对比不同算法在不同下垫面的估算精度,通过对现有算法的改进给出一个新的计算西北地区不同类型下垫面空气动力学阻抗的方法,提高空气动力学阻抗的估算精度。

1　研究区概况

古浪试验区设在我国甘肃省武威市古浪县海子镇东新村,经纬度范围为:103°48′E ~ 103°51′E,37°37′N ~ 37°38′N,统称为古浪非均匀近地层观测试验(Gulang Heterogeneous Underlying Surface Layer Experiment,GHUSLE)。试验区地处中国第 4 大沙漠——腾格里沙漠的南缘。绿洲东、西边缘是沙漠,在沙漠中间有一块宽度不超过 10 km 的人工绿洲,主要是农田。试验主要分为基本观测、加强观测和仪器平行对比观测 3 个部分:(1)基本观测时间为 2010 年 5 月 29 日至 7 月 6 日,设农田和东、西沙漠 3 个常规观测站,主要有风、温、湿、土壤温度和含水量、辐射平衡各分量、涡动及相应的植被等观测;(2)加强观测时间为 2010 年 6 月 22 日至 7 月 6 日,主要在 3 个常规观测站增加蒸发观测和系留气球探空观测,农田站还增加雷达观测,另外,在 3 个常规观测站之间加设 4 个长波和蒸发移动观测站。基本观测与加强观测都在古浪的绿洲和沙漠进行;(3)仪器平行对比观测设置在内蒙古阿拉善左旗的沙漠荒滩上(37°45′9″N,103°55′24″E),为典型荒滩下垫面,比较平坦均匀。主要是将前面 2 个阶段所用的仪器全部平行摆在荒滩上进行对比观测,观测时间为 2010 年 7 月 15 日至 7 月 24 日。试验区具体情况如图 1,试验所使用的仪器具体见表 1,试验介绍具体可参见参考文献[25]。

2　资料与方法

2.1　资料处理

为了保证试验数据的有效性,首先利用英国爱丁堡大学发展的 EdiRE 软件(http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/)对涡旋相关仪得出的湍流脉动资料进行相关的处理。对不满足物理条件(选取合理的物理阈值、峰值测试)和湍流特征(稳态测试、整体湍流特征检验[26])的资料进行剔除。而各站点所使用的观测仪器不同,资料可能存在一定的偏差,为减小或消除这种偏差,利用平行对比观测数据对所有的观测资料进行了修正[25]。

所使用的资料为 2010 年 5 ~ 7 月 GHUSLE 试验期间白天 10:00 ~ 17:30(北京时,下同)的观测资料,具体为基本观测和加强观测期间西沙漠和农田站的气温、辐射、风速和显热通量等数据,以及平行对比观测期间荒滩下垫面上观测的气温、辐射、风速和显热通量等资料。为保证数据的可靠性,对数据进行质量控制,具体标准参考刘绍明等[16]提出的指标:(1)风速 $u > 1.0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$,(2)摩擦速度 $u^* > 0.1\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$,(3)地气温差 $|T_s - T_a| > 0.0\ \mathrm{K}$,(4)显热通量 $H_s > 10.0\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$。

图 1　试验区的 3 种典型下垫面

Fig. 1　The three typical underlying surface in the experiment area

表 1 观测仪器简介

Tab. 1 Introduction of instruments

观测项目	西沙漠站仪器 型号及生产厂家	农田站仪器 型号及生产厂家	东沙漠站仪器 型号及生产厂家
LAS 观测		Kipp&Zonen	
EC 观测	CSAT3/LI7500, Campbell	CSAT3/LI7500, Campbell	
风速	014A, metone	010C-1, Metone	05103, RM. Young
风向	05103, RM. Young	W200P, Vector	05103, RM. Young
压强	CS105, Vaisala	CS105, Vaisala	
土壤温度	109, Campbell	107/109, Campbell	109 Campbell
土壤湿度	CS616, Campbell	CS616, Campbell	
土壤热通量	HFP01, Hukeflux	HFP01, Hukeflux	HFP01 HukeFlux
长波/短波辐射	Cn4, RM. Young	Eppley	

根据 Nichols 研究提出的涡旋相关仪测量法,计算得到空气动力学阻抗 r_a 的值,该公式的具体表达形式如下:

$$r_a = \rho c_p (T_s - T_a)/H_s \tag{1}$$

其中,H_s 为涡旋相关仪测得的显热通量($W \cdot m^{-2}$),ρ 为空气密度($kg \cdot m^{-3}$),T_s 为地表温度(℃),T_a 为气温(℃),c_p 为比热容($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)。

2.2 空气动力学阻抗估算方法

(1)Liu 算法

刘绍明等根据 2 种方法测得的空气动力学阻抗结果,直接利用风速进行拟合,得到涡旋相关仪测量法和蒸发皿测量法测量结果与风速的关系为:

$$r_a = 94.909\ u^{-0.9036} \tag{2}$$

(2)Verma-R 算法

Verma 等在考虑了影响空气动力学阻抗的动力和热力 2 种因素情况下,假定动量和热量粗糙度相等,并在此基础上给出在空气动力学阻抗 r_a 的计算式:

$$r_a = \frac{\varphi_m}{\varphi_h} r_{an} \tag{3}$$

$$r_{an} = \frac{\left[\ln\left(\frac{z - d_0}{z_{0m}}\right)\right]^2}{\kappa^2 u} \tag{4}$$

$$\frac{\varphi_m}{\varphi_h} = 1/(1 - 16R_i)^{0.25} \tag{5}$$

$$R_i = \frac{g}{\bar{\theta}} \sqrt{z_2 z_1}\left(\frac{z_2}{z_1}\right) \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(u_2 - u_1)^2} \tag{6}$$

其中,r_{an} 为中性条件下的空气动力学阻抗($s \cdot m^{-1}$);θ 为位温(K);z 为高度(m);1、2 分别为 2 层观测高度;κ 为 Von Karman 常数,取 0.35。

(3)Thom 算法

Thom 等[27]1977 年提出的估算 r_a 的方法(下称 Thom-1 算法)如下:

$$r_a = 4.72 \frac{[\ln((z - d_0)/z_{0m})]^2}{(1 + 0.54\ u)} \tag{7}$$

其中,在有植被覆盖的下垫面动量粗糙度 z_{0m} 和零平面位移 d_0 计算分别如下:

$$z_{0m} = 0.04\ h^{1.417} \tag{8}$$

$$d_0 = \frac{2}{3}h \tag{9}$$

而在裸地,动量粗糙度直接取 0.01,零平面位移为 0.0。

(4)改进后的 Thom 算法(下称 Thom-2 算法)

由于 z_{0h} 和 z_{0m} 存在差异,并且在干旱区热力作用是不可忽略的,因此经过尝试本文作者提出对 Thom 算法进行改进,将 z_{0h} 和 z_{0m} 分开,对公式(7)改进如下:

$$r_a = 4.72 \frac{[\ln((z - d_0)/z_{0m}) \times \ln((z - d_0)/z_{0h})]}{(1 + 0.54\ u)} \tag{10}$$

其中,热量粗糙度 z_{0h} 计算如下:

植被下垫面:

$$z_{0h} = 0.17\ u(T_s - T_a) \tag{11}$$

裸土下垫面:

$$\ln\left(\frac{z_{0m}}{z_{0h}}\right) = 2 \tag{12}$$

3　结果分析

图 2 首先给出利用 4 种算法估算荒滩下垫面空气动力学阻抗结果与实测值之间的比较。图中 $RMSE\left(RMSE = \left[\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(x_i - y_i)^2\right]^{1/2}\right)$ 表示均方根误差,$ARE\left(ARE = \frac{100}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{|x_i - y_i|}{\overline{x_i}}\right)\right)$ 表示平均相对误差,N 表示参与分析的样本数,R 表示相关系数(下同)。从图中可以看出,各算法估算值与实测值的相关性较好,但都还存在一定的偏差。其中,Thom－2 算法估算的空气动力学阻抗与实测值最为接近,均方根误差最小,相关系数最大为 0.91,平均相对误差最小为 12.72%。Verma－R 和 Thom－1 算法估算结果与实测值的偏差也较小,估算精度仅次于 Thom－2 算法,估算的空气动力学阻抗与实测值的相关性较好,相关系数分别为 0.86 和 0.91,均方根误差都在 30.00 s·m^{-1}左右。而 Liu 算法估算的结果精度相对较低,相关系数为 0.80,均方根误差较大,为 44.53 s·m^{-1}。这主要是因为经验公式使用的环境、气象条件等存在差异。

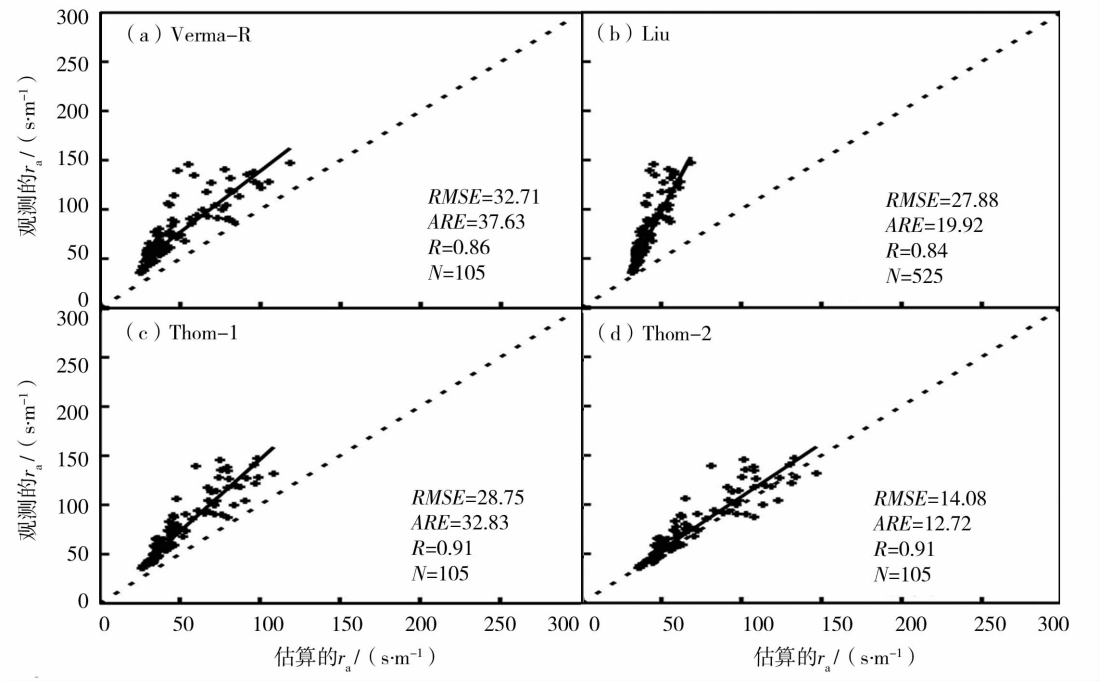

图 2　4 种算法估算的荒滩空气动力学阻抗与实际观测值的比较

Fig. 2　Contrast of aerodynamic resistance between the observed and the retrieved using the four algorithms over the wasteland underlying surface

图 3 为 4 种动力学阻抗算法估算的沙漠下垫面的空气动力学阻抗与实测值之间的比较。各种算法估算的沙漠下垫面空气动力学阻抗相关性较好,除 Verma－R 算法相关系数为 0.73,其他算法的相关系数都达到了 0.84,但数值上普遍偏低。其中,Thom－2 算法的估算值与实测值最为接近,均方根误差为 27.88 s·m^{-1},平均相对误差不超过 20.0%。Verma－R、Thom－1 和 Liu 算法估算精度都较低,均方根误差都超过了 60.0 s·m^{-1},平均相对误差也达到了 50.0% 以上。主要原因是 Liu 算法是在实际观测资料基础上进行拟合得到的,所以直接用来估算古浪地区的空气动力学阻抗难免存在偏差。Thom－1 算法、Verma－R 算法与 Thom－2 算法相比,估算精度较低主要是因为这 2 种算法中假定动量和热量粗糙度相等。而 Thom－2 算法将动量和热量粗糙度进行分离,从而在很大程度上提高了空气动力学阻抗的估算精度,这说明干旱半干旱区在计算空气动力学阻抗时考虑热量粗糙度是很有必要的。

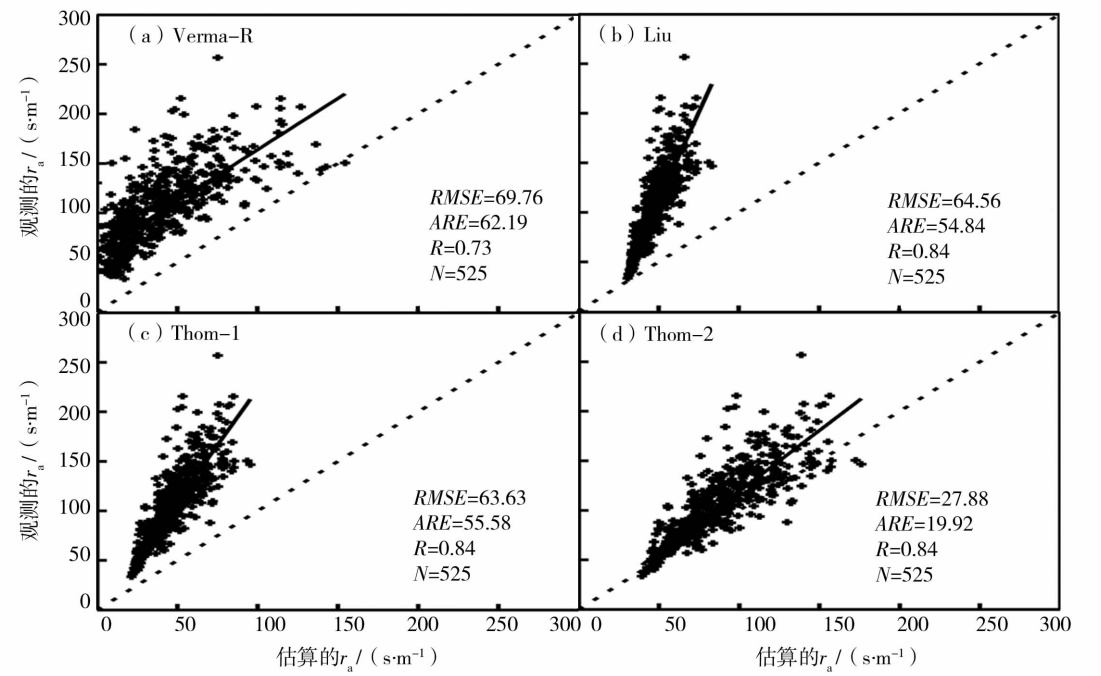

图 3 4 种算法估算的沙漠空气动力学阻抗与实际观测值的比较

Fig. 3 Contrast of aerodynamic resistance between the observed and the retrieved using the four algorithms over the desert underlying surface

利用上述 4 种算法估算的农田空气动力学阻抗与实测值对比如图 4 所示。可见从整体上而言,几种算法估算的结果精度比均一的荒滩和沙漠下垫面估算精度低,估算的结果与实测值的散点分布较为分散,相关性较差,其中 Liu 算法估算结果与实测值之间的相关系数仅为 0.17,其他算法的相关系数也都在 0.30 左右。这主要是因为农田下垫面较沙漠和荒滩下垫面影响空气动力学阻抗估算的因子复杂,空气动力学阻抗除了与风速有关外,还与植被状况 等有关。如图5所示,在较为平坦均一的荒滩和

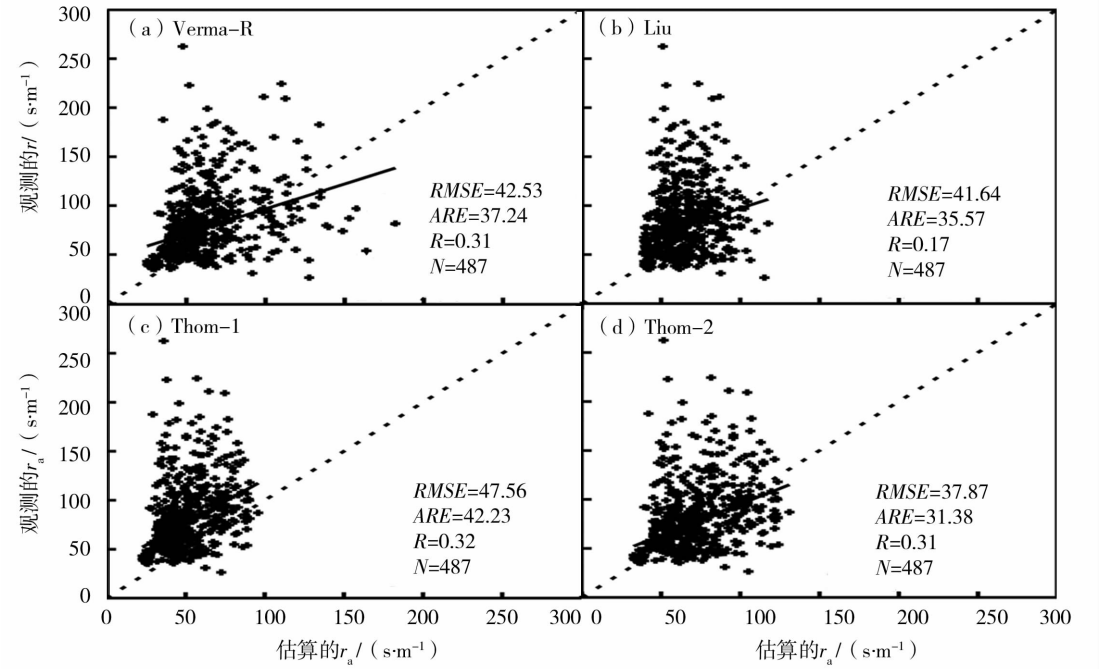

图 4 4 种算法估算的农田空气动力学阻抗与实际观测值的比较

Fig. 4 Contrast of aerodynamic resistance between the observed and the retrieved using the four algorithms over the cropland underlying surface

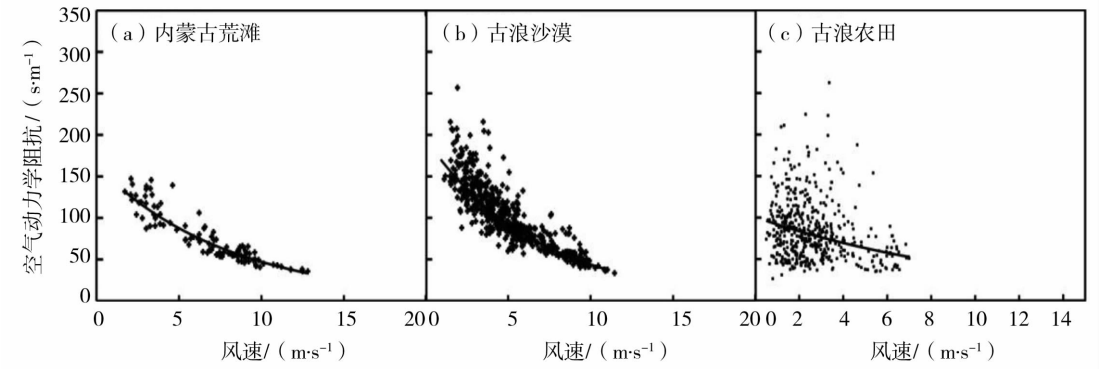

图 5　不同下垫面空气动力学阻抗与风速的关系

Fig. 5　Relationship of aerodynamic resistance and wind speed over the three varies underlying surface

沙漠下垫面,空气动力学阻抗与风速的对数关系表现得非常明显,而农田下垫面由于植被疏密程度和高度不一,热力效应也不相同,空气动力学阻抗与风速的对数关系不太明显。另外还可以看出,在风速较大时($u > 5.0\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$)时,空气动力学阻抗与风速的对数关系更为明显。而植被的存在减弱了风速的影响,增加了空气动力学阻抗的估算难度,在有植被覆盖的复杂下垫面上空气动力学阻抗的精确估算还有待进一步研究。尽管如此,利用 4 种算法估算的空气动力学阻抗结果与实测值进行比较发现,Thom - 2 算法估算的结果精度依然较其他算法更优,估算值与实测值之间的偏差较小,平均相对误差为 31.38%,均方根误差最小,为 $37.87\ \mathrm{s \cdot m^{-1}}$。

4　结论与讨论

(1)在荒滩和沙漠下垫面,由于下垫面比较平坦均一,4 种算法估算的荒滩和沙漠空气动力学阻抗精度普遍较农田高,其中以改进后的 Thom 算法估算结果最优。

(2)在农田下垫面,由于植被疏密程度和植株高度不一等原因,造成下垫面较为复杂。本文所使用的 4 种算法估算的农田空气动力学阻抗结果与实测值相比结果都较荒滩和沙漠差,其中仍以改进后的 Thom 算法估算精度最高。

(3)动力和热力 2 种因素是影响空气动力学阻抗大小的主要因素,在沙漠和荒滩下垫面,动力因素较热力因素影响大,空气动力学阻抗与风速的对数关系较为明显。在农田下垫面,由于植被的存在减弱了风速的影响,空气动力学阻抗与风速的对数关系不太明显,而植被覆盖的非均一性造成农田下垫面空气动力学阻抗的精确估算还存在一定的困难。

改进后的算法对 3 种典型下垫面空气动力学阻抗的估算精度有了明显的改善。但也不难发现,改进后的算法对比较平坦均一的稀疏植被或无植被覆盖的荒滩、沙漠下垫面空气动力学阻抗的估算精度较高,而且改善的程度也较大;而对植被覆盖度较大且高度不一的农田下垫面而言,改进后的算法估算精度提高不是很理想。这主要与影响空气动力学阻抗估算精度的主要因子和 Thom 算法本身适用的条件有关。Thom 算法是在平坦的水面发展起来的,适用于平坦均一、植被较低的下垫面,改进后的 Thom 算法仍然具有这一局限性。

致谢:对为本文提供宝贵野外观测资料的兰州大学大气科学学院左洪超教授团队表示衷心的感谢。

参考文献:

[1] 王胜,李耀辉,张良,等. 张掖戈壁地区土壤热通量特征分析[J]. 干旱气象,2010,28(2):148 - 151.

[2] 杨启国,杨兴国,张旭东,等. 甘肃中部旱作农田地表能量收支特征分析[J]. 干旱气象,2004,22(2):38 - 44.

[3] 张强. 大气边界层气象学研究综述[J]. 干旱气象,2003,21(3):74 - 78.

[4] 胡向军. 利用 ASTER 数据估算西藏纳木错地区夏季地表参数[J]. 干旱气象,2012,30(2):231 - 236.

[5] Nichols W D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland[J]. Agriculture and Forest Meteor, 1992(60):212 - 247.

[6] 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.

[7] 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子的敏感性实验[J]. 高原气象,2001,20(1):58 - 64.

[8] Su Z. The surf ace energy balance system (SEBS) for estimation of turbulence heat fluxes[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2002(6):85 - 99.

[9] 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.

[10] Brown K W, Rosenberg H T. A resistance model to predict evapotranspiration and its application to a sugar beet field[J]. Agronomy J, 1985(65):341 - 347.

[11] Thom A S. Momentum mass and heat exchange of plant communities[M]. Monteith J L. London: Vegetation and the Atmosphere Academic Press, 1975. 57 - 109.

[12] 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):373 - 398.

[13] Choudhury B J, Reginato R J, Idso S B. An analysis of in frared temperature observations over w heat and calculation of latent heat flux[J]. Agric For Meteor, 1986(37):75 - 88.

[14] Monteith J L. Evaporation and surface temperature[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1981(107):12 - 27.

[15] Nichols W D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland[J]. Agriculture and Forest Meteorology, 1992(60):221 - 247.

[16] 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.

[17] Liu S M, Lu L, Mao D, 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] Verma S B, Rosenberg N J, Blad B L, et al. Resistance energy balance method for predicting evapotranspiration: Determination of boundary layer resistance an devaluation of error effects[J]. Agronomy J, 1976(68):776 - 782.

[19] Monteith J L. Principles of Environment al Physics[M]. Arnold, Paris, 1973.

[20] Xiaqun X. An improved energy balance aerodynamic resistance model used estimation of evapotranspiration on the wheat field[J]. Acta Meteor Sin(in Chinese), 1988(46):102 - 106.

[21] Mahrt L, Ek M. The influence of atmospheric stability on potential evaporation[J]. J Clim Appl Meteor, 1984(23):222 - 234.

[22] 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.

[23] 王介民,刘绍民,孙敏章,等. ET 的遥感监测与流域尺度水资源管理[J]. 干旱气象,2005,23(2):1 - 7.

[24] 马耀明,李茂善,马伟强,等. 西北地区干旱区及高原上卫星遥感非均匀地区地表区域能量通量研究[J]. 干旱气象,2003,21(3):34 - 42.

[25] 王丽娟,左洪超,陈继伟,等. 遥感估算绿洲 - 沙漠下垫面地表温度及感热通量[J]. 高原气象,2012,31(3):646 - 656.

[26] Foken T, M G ckede, M Mauder, et al. Post - field data quality control[A]. Lee X, W Massman, B E Law, Eds. Handbook of Micrometeorology[C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. 181 - 208.

[27] Thom A S, Oliver H R. On Penman's equation for estimating regional evaporation[J]. Quart J R Met SOC, 1977(103):345 - 357.

Improvement and Validation of Aerodynamic Resistance About the Typical Underlying Surface in Northwest of China

WANG Lijuan[1], ZUO Hongchao[2], YANG Qidong[3]

(1. *Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disater of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA/Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou* 730020, *China*; 2. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou* 730000, *China*; 3. *Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming* 650091, *China*)

Abstract: Based on the observed data of typical underlying surface (named as wasteland, desert and cropland, respectively) of the Gulang Heterogeneous Underlying Surface Layer Experiment (GHUSLE) in 2010, the applicability of three aerodynamic resistance algorithms (Verma - R algorithm, Liu algorithm and Thom algorithm, respectively) that used commonly was verified, and a modified algorithm was developed (named as Thom - 2 algorithm in this paper), in which the momentum and heat roughness were separated by further thinking about the influence of the heat and momentum roughness in the Thom algorithm. Compared the estimated aerodynamic resistance of the different underlying surfaces by using the four algorithms, the dynamic factor was more important on wasteland and desert than thermodynamic factor about influence of aerodynamic resistance, and the exponentially relationship between aerodynamic resistance and wind speed was obviously better on wasteland and desert than that of cropland underlying surface. Compared with the observed data, the modified algorithm was the best one among the four algorithms for aerodynamic resistance estimating on the all typical underlying surfaces, and the result of modified algorithm had higher accuracy on the wasteland and desert underlying surfaces where were more uniform than that of cropland underlying surfaces. By comparing the result of the four algorithms on the three typical underlying surfaces, the influence of heat roughness should be considered for the aerodynamic resistance estimating in arid areas.

Key words: aerodynamic resistance; GHUSLE; wind speed; heterogeneous underlying surface