

稀疏植被区空气动力学粗糙度特征及遥感反演

张杰^{1,3}, 黄建平³, 张强^{2,3}

(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, 南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020;
3. 兰州大学大气科学院, 兰州 730020)

摘要: 应用中国西北半干旱区定西试验站 2005 年观测资料, 估算了典型的稀疏农作物区空气动力学粗糙度, 结合空气动力学模型分析了稀疏植被区空气动力学粗糙度的时间变化及其与风速、植株密度的关系, 并得出空气动力学粗糙度的参数化方案; 结合卫星遥感得到的植被叶面积指数资料, 模拟了区域空气动力学粗糙度, 得出: (1) 空气动力学粗糙度的时间变化与风速变化规律有相反的特点; 在稀疏植被区, 粗糙单元分布密度对流场有一定影响, 随粗糙单元密度的增加, 空气动力学粗糙度将逐渐增大。(2) 植株高度超过 0.2m 时, 植被高度和植株密度、叶面积指数对空气动力学粗糙度的影响较大, 当植株高度低于 0.2m 时, 风速的影响较大。(3) 结合遥感反演的叶面积指数, 采用空气动力学粗糙度和叶面积指数及风速的关系, 反演了空气动力学粗糙度, 反演结果空间分布和误差都反映了实际空气动力学粗糙度的特征, 证明空气动力学粗糙度遥感参数化比较成功。

关键词: 稀疏植被; 空气动力学粗糙度; 风速; LAI; 植株密度; 空气动力学模型

Retrieval of Aerodynamic roughness length character over sparse vegetation region

ZHANG Jie^{1,3}, HUANG Jianping², ZHANG Qiang^{2,3}

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

2 College of atmospheric sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

3 Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China

Abstract: Based on observed data in 2005 over Dingxi station in semi-arid region of Northwest China, aerodynamic roughness length is estimated, the temporal variable and the relations with wind speed and vegetation density are also analyzed. Combined with LAI from remote sensing, aerodynamic roughness length is simulated by using aerodynamic model. The results show that: (1) Aerodynamic roughness length is on the contrary to wind speed trend. With vegetation density increasing, roughness length will be increased. (2) The effect of vegetation density and LAI on aerodynamic roughness length is large with individual plant height more than 0.2m, and wind speed effect on aerodynamic roughness length is large when individual plant height is less than 0.2m. (3) The relation and the model of aerodynamic roughness length with LAI, vegetation density and wind speed is put forward by combining with LAI from remote sensing, the model can reflect real status, and equivalent vegetation density is presented by using LAI in the model, which is an available means to parameterize aerodynamic roughness length from remote sensing.

Key Words: sparse vegetation; aerodynamic roughness length; wind speed; LAI; vegetation density; aerodynamic model

空气动力学粗糙度是从多相流体力学上反映物体表面对流经流体的流型、流态及阻滞力影响的一个综合力学参数。表征近地表气流与下垫面之间的物质与能量交换、传输强度以及它们之间相互作用特征, 反映地

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40830957)

收稿日期: 2009-04-10; 修订日期: 2009-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gs-zhangjie@163.com

表对风速消减作用的影响, 并已被广泛应用于表征各种地表类型(如沙地、植被、冰雪面、海洋)的空气动力学性质^[1-4]。空气动力学粗糙度定义为中性稳定大气条件下, 地表上方风速为零的高度^[5]。其大小不但取决于地表粗糙性质(粗糙元种类、大小、形状、高度、密度、植被盖度、排列方式以及运动与否等), 而且决定于流经地表的流体的性质^[6-7]。

由于对空气动力学粗糙度应用的领域及认识不同, 所以产生了很多估算方法。如对数廓线拟合法、质量守恒法、压力中心法、无因次法和阻力法等等^[8]。其特点可概括为: (1) 是空气动力学特征的函数, 采用风速廓线拟合出空气动力学粗糙度的变化规律^[9]; (2) 是几何参数的函数, 根据土地覆盖分类和植被高度确定不同植被的空气动力学粗糙度参数^[10-11]; (3) 空气动力学粗糙度估算的前提条件是中性大气^[12]。这些方法的局限性表现为: 第一, 很多研究把粗糙单元看作钢体, 忽略了风速对粗糙单元的影响^[13]; 第二, 在植被区, 空气动力学粗糙度是动力因子和植被性质共同作用的结果^[14], 单一用风速和植被高度表示空气动力学粗糙度是不够的; 第三, 在稀疏植被区, 植被区的流场存在绕流, 植株密度对流场的影响较大。为了得到大尺度上不同植被区空气动力学粗糙度的特征性息, Yang^[15]根据中性和非中性条件下的空气动力学阻抗进行分析, 并进行了优化处理; 有学者提出遥感参数化的方法, 其中, Gupta^[16]等采用 NDVI 反映植被信息($z_0 = \exp(-5.5 + 5.8NDVI)$)。Schaudt^[17]针对阔叶和针叶林提出了‘frontal area index’概念, 并表示为叶面积指数(LAI)、植株高度和植被覆盖度的函数。遥感资料的应用对大尺度、稀疏植被区空气动力学粗糙度参数化奠定了基础, 但目前很少在遥感资料应用时考虑流场特征。

鉴于现有空气动力学粗糙度模型存在的不足, 本研究结合稀疏植被区黄土高原的一个观测站点的资料, 对低秆农作物的空气动力学粗糙度进行估算, 进而分析其与现有估算模型得出结果的差异, 提出空气动力学粗糙度的参数化方案, 为稀疏植被的陆面过程遥感参数化方案的改进提供一些参考依据。

1 试验站观测

本试验资料来自中国气象局兰州干旱气象研究所在定西的干旱气象与生态环境试验基地(104°37'E, 35°35'N), 基地与定西气象站相毗邻。海拔高度为 1896.7m, 试验站占地 3hm²。东面是定西气象观测站, 其余三面均是农田, 地势平坦。尤其在主导偏南、偏北风向的上下风向附近无高层建筑物和树木, 其下垫面过渡区在观测点东南、南南东方向长约 400m, 西北、北北西方向长有几公里, 代表性较好。实验地建有 16m 高的气象观测塔, 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, 美国 Compbell 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控和拷贝。研究应用的主要仪器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 和风速传感器 A100R, 观测高度分别为 1、2、4、10 m 和 16 m, 采样频率为 0.5Hz, 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, 安装高度为 2.5m, 采样频率为 10Hz。

表 1 小麦生育期和相关特征

Table 1 Wheat growth stage and correlation character

项目 Item	播种 Seeding stage	三叶期 Trefoil stage	拔节期 Shooting stage	孕穗期 Booting stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	乳熟期 Milk stage	成熟期 Ripening stage
发育期 Growth stage(Month-day)	03-18	04-14	05-24	06-10	06-18	06-24	07-08	07-26
高度 Height/cm		13	25	49	55	59	65	65
叶面积指数 LAI	-	0.3	1.5	2.2	1.9	1.2	0.4	-
平均每茎干物重/g Average weight per stem	0.05	0.26	1.26	1.51	1.82	2.63	2.81	

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。该区域小麦植株在

900—1000 株/m²左右时, 夏季植被覆盖度接近 1。根据旱作农业区植株数(n)与叶面积指数的关系, 得出二者关系为: $n = LAI \times 300 \pm 50$, 以此公式可以推断春小麦不同叶面积所对应的植株数, 以及其它区域植被的 LAI 所对应的等效植株数。其中 LAI 资料来自 2005 年不同时间的 MODIS 资料估算^[18], LAI 的遥感估算精度经过实地观测检验, 相对误差平均为 7.6%。植被的分类采用 MOD 产品^[19], 遥感资料表明, 我国黄土高原以农作物为主, 个别地方出现牧草、针叶林、阔叶林等。在遥感资料应用时, 将这些类型进行淹没处理。所以 LAI 在一定程度上反映了我国北方农作物的植株密度。

2 结果分析

2.1 空气动力学粗糙度与风速的时间变化

用观测资料获取空气动力学粗糙度时, 本研究采用变步长的拟合迭代法确定地表空气动力学粗糙度和零平面位移, 即利用中性层结下近地面层风温廓线外推^[20]。

$$u = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中, u 为风速; z_0 为空气动力学粗糙度; d 为零平面位移; u_* 为摩擦速度, z 为参考高度。大气层结的状态判断方式有里查逊数法、Monin-Obukhov 参数以及二者衍生出的一些方法^[21-26]。本研究采用里查逊数法。

首先给定 d 的估计值 d_0 , 同时给出 $\Delta = 10^{-5}$, 使:

$$\begin{aligned} d_1 &= d_0 - \Delta \\ d_2 &= d_0 \\ d_3 &= d_0 + \Delta \end{aligned} \quad (2)$$

对 d_1 , d_2 , d_3 的 (1) 式分别进行线性化, 即设

$$\begin{aligned} u_* / k &= A \\ (-u_* / k) \ln z_0 &= B \\ \ln(z - d_i) &= x_i \quad (i = 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (3)$$

则 (1) 式变为

$$u = A + Bx_i \quad (4)$$

用最小二乘法容易求出相应的 u_* , z_0 。

在计算 d_1 , d_2 , d_3 对应的 3 对 u_* , z_0 的同时, 计算出对应的三个误差平方和 S_1 , S_2 和 S_3 。如果 S_1 或 S_3 最小, 则 Δ 扩大 1 倍, 得到新的 d_1 , d_2 , d_3 。重新计算 S_1 , S_2 , S_3 , 当 S_2 最小时, 则 Δ 减半。重复计算, 直到满足 $\Delta < 10^{-7}$ 为止(根据目的不同可给定不同的值), 这时得到的最后一组 d , z_0 , u_* , 即为给定误差下的最优解。

选取 2005 年的开路涡动相关观测系统的三维超声风温仪观测资料, 将计算的每 2d 时隔半小时白天的空气动力学粗糙度和 2m 高度观测的风速进行平均, 得到空气动力学粗糙度(图 a)和风速(图 b)的时间序列, 其中在 1—3 月份、10—12 月份为无植被时间段, 由于有秸秆存在, 植被高度取 0.05m, 其它时间段的植被高度取试验站小麦和苜蓿的观测高度。根据植被高度、叶面积指数和风速的时间变化, 大概将时间段分为 4 段。可见, 空气动力学粗糙度的时间变化特征明显, 波动在 0.10h 值的两边, 空气动力学粗糙度具有明显的季节性波动, 在 80—160d 之间, 空气动力学粗糙度的平均值为 0.04h, 在 160—220d 之间, 空气动力学粗糙度的平均值为 0.12h, 在 220—280d 之间, 空气动力学粗糙度的平均值为 0.035h, 在 280—365d 之间, 空气动力学粗糙度的平均值为 0.05h。也就是说, 空气动力学粗糙度季节波动比较复杂。在春季和秋季, 空气动力学粗糙度相对较低, 在夏季和冬季, 空气动力学粗糙度相对较高。空气动力学粗糙度的时间变化与风速变化规律有相反的特点, 夏季和冬季风速较小, 春秋季节风速相对较大, 在空气动力学粗糙度波段的 4 个时间段里, 风速的平均值分别为 2.6、1.8、2.4、1.5m/s。空气动力学粗糙度随着流速增大而逐渐减小, 这被董治宝和 Fryrear 的实验^[27]所证实。另外, 在夏季, 地表植被盖度相对较大, 植被株数较多, 所以粗糙单元分布密度相对较大, 空气

动力学粗糙度将随着流场阻力的增大而增大。图 a 进一步表明,在稀疏植被区,空气动力学粗糙度与流场流速、植被密度、植被盖度有紧密关系。

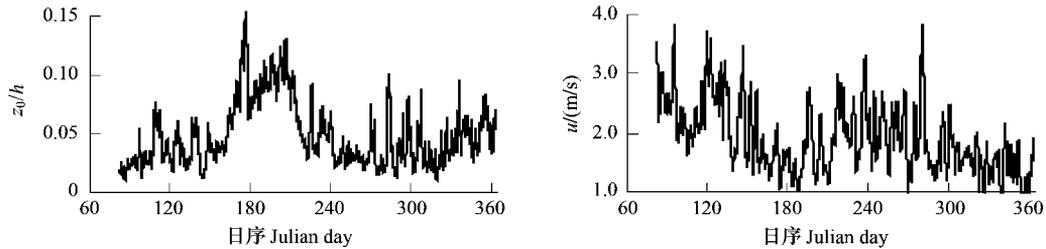


图 1 2005 年观测的半干旱区空气动力学粗糙度与风速的时间变化

Fig. 1 Temporal variable between aerodynamic roughness length and wind speed over semi-arid region in 2005

2.2 空气动力学粗糙度与风速和植被特性的关系

由图 1 空气动力学粗糙度和风速的时间变化可以看出,空气动力学粗糙度与风速有很紧密的关系。图 2 给出摩擦速度和空气动力学粗糙度随风速变化的散点关系,区域内风速变化在 0.8—4m/s 之间,大部分时间的风速在 4m/s 以下;摩擦速度变化在 0.0—0.6m/s 之间。当风速在 3m/s 以下时,摩擦速度基本小于 0.3m/s,风速较大时,摩擦速度基本大于 0.3m/s。从二者的趋势线可以看出,随着风速的逐渐增加,摩擦速度有明显增加的趋势,二者的关系为 $u_* = 0.0677u + 0.088$ ($R^2 = 0.5211$)。图 2 给出空气动力学粗糙度随风速变化的散点关系,空气动力学粗糙度变化在 0.01—0.15h 之间,风速较大时,空气动力学粗糙度基本小于 0.07h;风速在 2.8m/s 以下时,部分空气动力学粗糙度大于 0.08h,这部分主要反映了高植被的影响特征。从二者的趋势线可以看出,随着风速的逐渐增加,空气动力学粗糙度有明显降低的趋势,二者的关系为: $z_0/h = 0.0875 \exp(-0.3741u)$ ($R^2 = 0.2393$)。空气动力学粗糙度与风速关系较离散,说明除风速以外,植被和其它因子对空气动力学粗糙度影响也比较大。

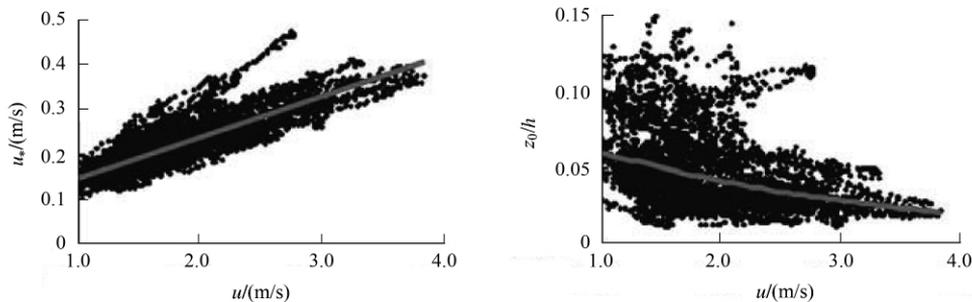


图 2 摩擦速度和空气动力学粗糙度随风速的关系

Fig. 2 The relations between friction speed and aerodynamic roughness length with wind speed

植株属性可以用植株密度、高度、叶面积指数以及植被覆盖度等因子表示,本研究用 LAI 反映等效植株密度。由图 3 可知,当植株高度在 0.2m 以下时,空气动力学粗糙度基本在 0.05h 左右波动,波动幅度较大,当植株高度从 0.2m 逐渐增加时,空气动力学粗糙度线性递增,说明植株高度较小时,影响空气动力学粗糙度的主要因素不是高度,风速的影响较大;当植株高度增大时,空气动力学粗糙度的主要影响因素是高度。对于低秆农作物,随着株高的增加,植株发生分蘖,植株密度增加,叶面积指数增加,对流场的阻力增大,空气动力学粗糙度变得更大。图 3b 给出风速变化不大的一段时间内(拔节至抽穗期),空气动力学粗糙度和叶面积指数的关系,当风速一定时,随着叶面积指数的增加,空气动力学粗糙度有所增加。图 3 进一步说明除风速之外,空气动力学粗糙度与植株高度、密度以及叶面积指数之间的关系比较密切。

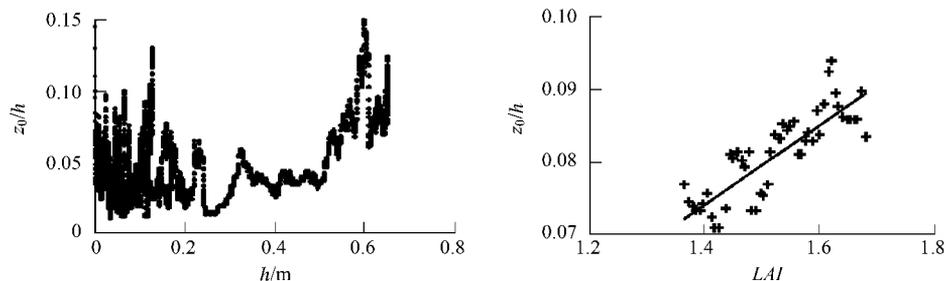


图3 空气动力学粗糙度随株高和 LAI 的关系

Fig. 3 The relations between aerodynamic roughness length with individual plant height and LAI

2.3 理论计算的流体力学参数与相关因子之间的关系

在有关研究中,空气动力学粗糙度一直被认为是一个几何参数,董治宝和 Fryrear 等^[27]对布置于风洞底部实验盘上不同密度均匀分布的直立原木进行试验研究,证明了空气动力学粗糙度是一个与流场有关的流体力学参数。慕青松等建立了空气动力学粗糙度的流体力学特征模型,为稀疏植被区流体力学参数的研究奠定了基础。取粗糙单元的竖向尺度为 h ,迎风横向尺度为 Δ ,根据 Thom, Jackson, Schlichting^[23, 28-29]等学者的量纲分析法,定义一个粗糙单元对气流的阻力 F 为:

$$F = \frac{1}{2} C_D H h \Delta \rho u_0^2 \quad (5)$$

式中 C_D 为阻力系数, A 为粗糙单元迎流面积系数, u_0 是粗糙单元的绕流速度,由于从粗糙单元底部到顶部,流场速度逐渐增大,可以取粗糙单元上任一个位置的绕流速度作为 u_0 ,而通过 C_D 的调整得到相应的 F 。结合风廓线对数方程 Marshall^[22], Schlichting^[23]等人的研究给出:在粗糙单元的分布不是十分稀疏,即侧影盖度超过阈值(0.003—0.1)时,粗糙单元的形状阻力起主要作用,于是可简化空气动力学粗糙度为:

$$z_0 = (h - d) \exp\left(-\sqrt{\frac{2k^2}{C_D n A h \Delta}}\right) \quad (6)$$

根据普朗特混合长理论得到的湍流层动量方程及其积分形式((7) — (9))的简析表达式形式,得到各离散点的风速,忽略单元之间裸露的光滑面对风的摩擦力,结合零平面位移和空气动力学粗糙度的积分形式,得到摩擦速度、零平面位移和空气动力学粗糙度的离散点:

$$\rho u_0^2 = n \int_0^h \frac{1}{2} C_D \zeta \rho u^2 dz \quad (7)$$

$$d = \rho^{-1} u_*^2 \cdot n \int_0^h \frac{1}{2} C_D \zeta \rho u^2 dz \quad (8)$$

$$z_0 = (h - d) \exp\left(-\frac{u(h)k}{u_*}\right) \quad (9)$$

式中 n 为植株数, ζ 为粗糙面的直径($\zeta < h$), C_D 阻力系数是雷诺数 Re 的函数,由于雷诺数是变化的,阻力系数也是不同的,假定 $Re \leq 1$,取 Tomotika 和 Aoi 将拖曳力系数公式^[16]: $C = 8\pi Re^{-1} (0.5 - \Gamma + \ln(8/Re))^{-1}$, Γ 为减额系数;当 $Re > 1$ 时, $C = 1 + 10Re^{-2/3}$ 。

本研究采用该模型及思路,取植株分别为 25, 100, 200, 400, 800, 1000 共 6 种,将该区的风速设定为 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5, 5.5, 6 m/s, 模拟出空气动力学粗糙度及相关的因子,并建立了各因子的参数化模型,为间接估算流体力学参数提供参考,关系式如下:

$$C_D = 0.2843 \times \exp(1.736954 - 0.04296 \times u + 0.0114 \times LAI) \times 10^{-2}$$

$$t_* = C_D \times \rho \times u^2$$

$$u_* = (t_* / \rho)^{1/2}$$

$$z_0/h = -0.0722 + 1.97283 \times \exp(-u/u_*) + 0.023923 \times \ln(n) \quad (10)$$

$$n = 300 \times LAI + 50$$

式中 n 为植株数, u 为风速, d 为零平面位移, z_0 为空气动力学粗糙度, C_D 为阻力系数, t_* 为拖曳系数, u_* 为摩擦速度, h 为植被高度, LAI 为叶面积指数, ρ 为空气密度。

结合黄土高原定西试验站观测的风速、植株密度和 LAI , 应用动力学模型, 模拟该区域的摩擦阻力、切应力、摩擦速度等, 进而模拟空气动力学粗糙度。摩擦速度模拟结果的趋势和观测结果比较接近(图4), 在3月下旬至5月上旬之间, 摩擦速度的平均值约为 0.32m/s , 在5月上旬至7月下旬之间, 摩擦速度的平均值约为 0.22m/s , 在7月下旬至10月下旬之间, 摩擦速度的平均值约为 0.3m/s , 在10月下旬至12月之间, 摩擦速度的平均值约为 0.15m/s 。由图4可见, 夏季和冬季摩擦速度较小, 春、秋季节摩擦速度相对较大。夏季摩擦速度模拟得偏低, 冬季部分结果模拟得偏高, 其他区域的摩擦速度模拟得都比较好。模拟结果和观测结果二者的关系还是比较好的(图5), 大部分散点在平衡线附近, 部分模拟结果偏低, 主要对应图3夏季的摩擦速度。

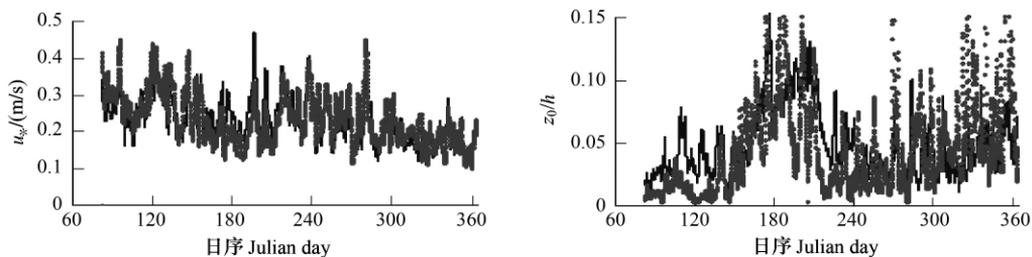


图4 摩擦速度和空气动力学粗糙度的模拟结果(浅灰色点线)和2005年观测结果(深灰色虚线)的时间序列

Fig. 4 Temporal variable of model friction speed and aerodynamic roughness length with observed result in 2005

空气动力学粗糙度的模拟结果的趋势和观测结果比较接近(图4), 都在6月上旬至8月上旬之间有较高的空气动力学粗糙度, 在6月上旬之前和8月上旬至11月下旬之间空气动力学粗糙度较低。模拟结果低估了6月以前高空气动力学粗糙度值和高估了10月以后的空气动力学粗糙度, 主要原因是: 在这两个时间段, 该地区植被较稀疏, 风速的影响占主导地位, 也说明对风速影响的修正还是存在一定误差, 另外, 风向不同变化也是一个可能的原因。在6月上旬至8月上旬之间的空气动力学粗糙度模拟得比较好, 略偏低, 说明该模型对植被生长季节的空气动力学粗糙度较好。由于试验区域采用垄耕集水方式种植小麦, 增加了地表的粗糙程度和流场的阻力, 使得区域内观测和模拟的空气动力学粗糙度偏大。模拟结果的总体趋势表明, 模型可以较好地反映稀疏植被区的空气动力学粗糙度。模拟结果和观测结果二者的关系还是比较好的, 大部分散点在平衡线附近, 部分模拟结果偏高, 二者的趋势线关系为: $z_{0_m} = 0.8328z_{0_o} + 3 \times 10^{-5}$ ($R^2 = 0.72$)

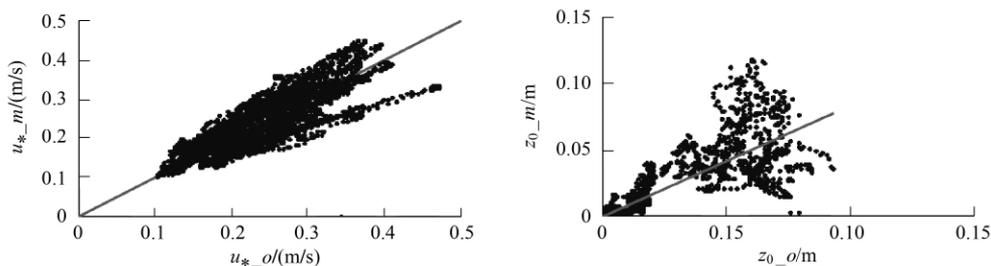


图5 摩擦速度和空气动力学粗糙度的模拟结果(纵轴)和观测结果(横轴)的关系

Fig. 5 The relations between modeling friction speed and aerodynamic roughness length with observed value

另外, 将遥感获取的植被叶面积指数引入到参数化模型中反映空气动力学粗糙度有很重要的意义, 这证明了结合遥感资料模拟空气动力学粗糙度方法的可行性。

2.4 空气动力学粗糙度的遥感反演研究

根据空气动力学粗糙度与风速和植被密度和 LAI 的关系, 采用遥感方法反演叶面积指数 LAI 和 NCEP 每日 4 次的风速, 估算了空气动力学粗糙度, 结果见图 6。黄土高原 2007 年 7 月上旬空气动力学粗糙度分布呈现出南北和东西差异, 主要在南部和东部区域出现高值区, 空气动力学粗糙度在 0.06h 以上, 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粗糙度在 0.06h 以上外, 其它区域基本在 0.06h 以下。造成空气动力学粗糙度差异的主要原因是黄土高原植被 LAI 的空间分布, 在南部和东部高 LAI 区域, 空气动力学粗糙度较高, 在北部低 LAI 区域, 空气动力学粗糙度高度比较低。另外, 风速是影响空气动力学粗糙度的另一因素, 分析发现, 在 2007 年 7 月上旬, 黄土高原区域的风速较低, 基本在 1—2m/s 的范围内, 并且空间差异不大, 所以风速对空气动力学粗糙度空间分布的影响较小。

2.5 遥感估算空气动力学粗糙度的精度检验

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、苜蓿地的湍度相关观测和自动观测站资料进行分析, 作为反演结果的检验真值。估算值与观测值的关系见图 7。可见, 估算结果与观测结果十分接近。观测结果都分布在平衡线附近, 最大绝对误差为 0.03h, 平均绝对误差为 0.005h, 最大相对误差为 12.1%, 平均相对误差为 7.8%。平均误差在 10% 范围内, 说明基于遥感反演的空气动力学粗糙度能够反演当地的实际空气动力学粗糙度状况。

3 结论与讨论

采用观测资料和动力学模型相结合的方法, 对我国半干旱地区植被稀疏的农作物区空气动力学粗糙度特征进行分析研究。得出空气动力学粗糙度对植被区域植株的密度、高度、叶面积指数、覆盖度、郁闭度、风速等的响应很敏感。空气动力学粗糙度的时间变化与风速变化规律有相反的特点。粗糙单元分布密度对流场影响较大, 随粗糙单元分布密度的增大, 空气动力学粗糙度将逐渐增大。当农作物的植株高度超过 0.2m 高度时, 植被高度和植株密度、叶面积指数对空气动力学粗糙度的影响较大, 当植株高度低于 0.2m 高度时, 风速的影响较大。

空气动力学粗糙度与阻力系数一样, 是由各参数影响的一个极其复杂的函数, 而且它们都是非定常和非线性的, 是时间和空间的四维函数。结合遥感资料反演等叶面积指数资料, 采用空气动力学粗糙度和叶面积指数及风速的关系, 反演了空气动力学粗糙度, 反演结果空间分布和误差都反映了实际空气动力学粗糙度随时间和空间的变化特征, 说明空气动力学粗糙度遥感参数化比较成功。

叶面积指数代替等效植株密度在低杆农作物中应用较好, 如果在森林等其它植被类型中使用, 需要做进

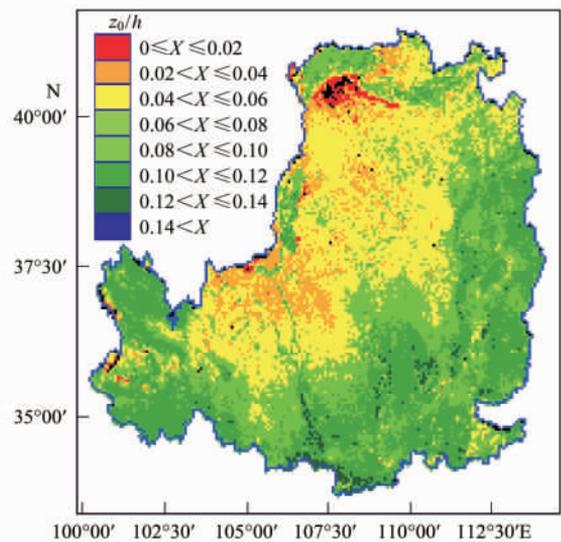


图 6 黄土高原 2007 年 7 月上旬空气动力学粗糙度空间分布特征
Fig. 6 Aerodynamic roughness length distribution over loess plateau in the first ten days of July in 2007

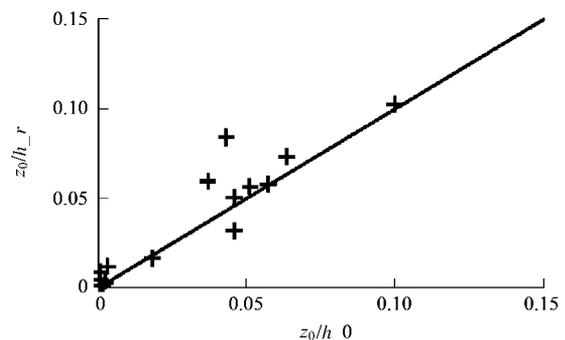


图 7 反演的空气动力学粗糙度(纵坐标)与观测空气动力学粗糙度(横坐标)比较
Fig. 7 contrast of retrieval aerodynamic roughness length (vertical coordinate) with observed value (cross coordinate)

一步研究。另外 植株高度是目前遥感参数化中较为困难的问题,也是影响对大范围空气动力学粗糙度客观评估的主要原因。

致谢:感谢项目组刘宏谊等提供观测资料,并对资料进行质量控制和检验。

References:

- [1] Chamberlain A C. Roughness length of sea, sand and snow. *Boundary Layer Meteorology*, 1983, 25: 405-409.
- [2] Li S, Liu X W, Li H C, Zheng Y H, Wei X H. A wind tunnel simulation of the dynamic processes involved in sand dune formation on the western coast of Hainan Island. *Journal of Geographical Sciences*, 2007, DOI: 10.1007/s11442-007-0453-7.
- [3] Tsai J L, Tsuang B J. Aerodynamic roughness over an urban area and over two farmlands in a populated area as determined by wind profiles and surface energy flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 132: 154-170.
- [4] Clarke M A, Walsh R P D. Long-term erosion and surface roughness change of rain-forest terrain following selective logging, Danum Valley, Sabah, Malaysia. *Catena*, 2006, 68(2/3): 109-123.
- [5] Yu T X, Wang W, Yu Q, Zhu Z L, Wang Y A, Zhang S H, Du Z P, Zhang R H, Sun X M. Simulation of vertical wind profile and its relevant parameters under neutral condition. *Resources Science*, 2006, 28(1): 136-144.
- [6] Zhang Y J, Shen X D. Simulation analysis of vegetation covered surface's aerodynamics roughness length and zero displacement. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 21-26.
- [7] Zhu C Y, Zhang Y H, Wang J F, Sun X M, Zhu Z L. Retrieval of 2D distributing of aerodynamics roughness length from SAR and TM image. *Science in China Ser. D. Earth Sciences*, 2004, 34(4): 385-393.
- [8] Liu J, Zhuo M N, Hu Y G. Discussion on the terrain aerodynamic roughness. *Ecology and Environment*, 2007, 16(6): 1829-1836.
- [9] Hu Z B, Yu B F. Review on methods calculating aerodynamic parameters over urban underlying surface. *Journal of Meteorology and Environment*, 2008, 24(5): 55-61.
- [10] Delage Y, Verseghy D. Testing the effects of a new land surface scheme and of initial soil moisture conditions in the Canadian Global Forecast Model. *Monthly Weather Review*, 1995, 123: 3305-3317.
- [11] Garratt J. R. *The atmospheric boundary layer*. London: Cambridge University Press, 1992.
- [12] Hu Y Q, Qi Y J, Yang X L. Analysis of microclimate and quantity of heat balance over Heihe Gobi. *Plateau Meteorology*, 1990, 29: 113-119.
- [13] Lu P, Dong Z B. Determination of Roughness Length on Gobi Deflation Plane and Vegetated Surface. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(3): 279-285.
- [14] Liu X P, Dong Z B. Review of aerodynamic roughness length. *Journal of Desert Research*, 2003, 23(4): 337-346.
- [15] Yang, K, Koike T, Ishikawa H, Kim J, Li X, Liu H Z, Liu S M, Ma Y M, Wang J M. Turbulent flux transfer over bare soil surfaces: Characteristics and parameterization. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2008, 47: 276-290.
- [16] Gupta, R K, Prasad T S, Viiayan D. Estimation of roughness length and sensible heat flux from WiFS and NOAA AVHRR data. *Adv. Space Res.* 2002, 29(1): 33-38.
- [17] Schaudt, K J, and Dickinson R E. An approach to deriving roughness length and zero-plane displacement height from satellite data, prototyped with BOREAS data. *Agricultural and Forest Meteorology* 2000, 104: 143-155.
- [18] https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products_table/leaf_area_index_fraction_of_photosynthetically_active_radiation/8_day_l4_global_1km/v5/combined.
- [19] https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_product_table/land_cover/yearly_l3_global_500m/v5/combined <http://edcdaac.usgs.gov/modis/mod12q1v4.asp>.
- [20] Nichols W D. Energy budgets and resistances to energy transport in sparsely vegetated rangeland. *Agriculture and Forest Meteorology*, 1992, 60: 221-247.
- [21] Mu Q Y, Wang J C, Miao T D. On the dynamical characteristic of the roughness in the turbulent boundary layer. *Acta Mechanica Sinica*, 2003, 35(2): 129-134.
- [22] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying density. *Agricultural Meteorology*, 1971, 8: 269-292.
- [23] Schlichting H. Experimentelle untersuchungen zum rauhgkeitsproblem. *Archive of Applied Mechanics*, 1936, 7(1): 1-34.
- [24] Morris H M. Flow in rough conduits. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1955, 120: 373-398.
- [25] Wooding R A, Bradley E F, Marshall J K. Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry. *Boundary layer Meteorology*, 1973, 5: 285-308.
- [26] Wolfe S A, Nicking W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17: 50-68.

- [27] Dong Z B, Fryrear D W, Gao S Y. Modeling the roughness effect of blown-sand-controlling standing vegetation in wind tunnel. *Journal of Desert Research*, 2000, 20(3): 260-263.
- [28] Thom A S. Momentum absorption by vegetation. *Quart J Roy Met Soc*, 1971, 97: 414-428.
- [29] Jackson P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile. *J Fluid Mech*, 1981, 111: 15-25.

参考文献:

- [5] 岳天祥, 王薇, 于强, 朱治林, 王英安, 张时煌, 杜正平, 张仁华, 孙晓敏. 中性条件下垂直风速廓线及其参数模拟分析. *资源科学*, 2006, 28(1): 136-144.
- [6] 张雅静, 申向东. 植被覆盖地表空气动力学粗糙度与零平面位移高度的模拟分析. *中国沙漠*, 2008, 28(1): 21-26.
- [7] 朱彩英, 张仁华, 王劲峰, 孙晓敏, 朱治林. 运用 SAR 图像和 TM 热红外图像定量反演地表空气动力学粗糙度的二维分布. *中国科学 D 辑, 地球科学*, 2004, 34(4): 385-393.
- [8] 刘静, 卓慕宁, 胡耀国. 初论地表空气动力学粗糙度. *生态环境*, 2007, 16(6): 1829-1836.
- [9] 胡张保, 俞炳丰. 城市下垫面空气动力学参数确定方法综述. *气象与环境学报*, 2008, 24(5): 55-61.
- [12] 胡隐樵, 奇跃进, 杨选利. 黑河戈壁小气候和热量平衡的初步分析. *高原气象*, 1990, 29: 113-119.
- [13] 吕萍, 董治宝. 戈壁风蚀面与植被覆盖面地表性质空气动力学粗糙度长度的确定. *中国沙漠*, 2004, 24(3): 279-285.
- [14] 刘小平, 董治宝. 空气动力学粗糙度的物理意义与实践意义. *中国沙漠*, 2003, 23(4): 337-346.
- [16] 慕青松, 王建成, 苗天德. 空气动力学粗糙度动力学特性的初步研究. *力学学报*, 2003, 35(2): 129-134.
- [17] 董治宝, Fryrear D W, 高尚玉. 直立植物防沙措施空气动力学粗糙度特征的模拟实验. *中国沙漠*, 2000, 20(3): 260-263.