科学通报 2012 年 第 57 卷 第 8 期：647 ~ 655
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

植被下垫面近地层大气动力状态与动力学粗糙度长度的相互作用及其参数化关系

张强[①②④], 曾剑[③], 姚桐[①④]

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, 兰州 730020;
② 甘肃省气象局, 兰州 730020;
③ 北京市气象台, 北京 100089;
④ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000
E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn, qzhang@ns.lzb.ac.cn

2011-09-13 收稿, 2011-11-03 接受
国家自然科学基金重点项目(40830957)和国家公益性行业科研专项(GYHY200806021)资助

摘要 通常人们将表面动力学粗糙度长度看作常数, 但在植被下垫面由于表面粗糙元与近地层大气动力状态的耦合作用, 动力学粗糙度长度具有显著的动态变化性. 本文利用中国北方协同观测试验中森林、农田和草地等不同植被类型下垫面的观测资料, 分析了动力学粗糙度长度随风速和摩擦速度的分布特征, 给出了不同植被类型下垫面动力学粗糙度长度与风速 u 和动力学综合变量 u^2/u_* 的拟合关系式. 研究发现: 植被下垫面动力学粗糙度长度的动态变化与近地面层大气动力状态之间存在复杂的相互作用过程, 动力学粗糙度长度与 u 和 u^2/u_* 的拟合关系不仅与植株高度等植被的粗糙特征有关, 而且还受植株柔软性等动力响应特性影响. 由于近地层大气动力状态能同时改变植被粗糙特征和气流运动特征, 所以动力学粗糙度长度虽然随风速的增加而减小, 但随摩擦速度的变化则比较复杂, 明显依赖植被类型. 在植株较高的森林和玉米农田下垫面动力学粗糙度长度与风速的相关性比较好, 但在植株比较低矮的自然草地下垫面则相关性较差. 不过, 研究的 3 种植被类型下垫面动力学粗糙度长度与 u^2/u_* 的相关性均比较好, 而且试验拟合系数基本反映了不同类型植被的植株高度和柔软性.

关键词
植被下垫面
大气动力状态
动力学粗糙度
相互作用
参数化关系

由于地球表面的摩擦作用, 大气风速在地表会趋于 0.0 m/s. 然而, 从物理上讲, 风速并不是真正在地表才趋于 0.0 m/s, 而是在地表之上的某一高度就已达到了 0.0 m/s, 在地球科学中通常把地表之上 0.0 m/s 风速出现的高度定义为地球表面空气动力学粗糙度长度[1]. 它是最重要的地球表面物理参数之一, 对准确计算地表湍流通量具有十分关键的作用, 是发展大气数值模式参数化方案和改进微气象分析方法必须解决的重要科学问题之一[2,3].

实际上, 对表面动力学粗糙度长度的准确估算并不是一件容易的事情[4]. 人们通常从动力学粗糙度长度与微气象要素之间经典的通量-廓线关系[5]出发, 用野外科学试验观测的风速和温度梯度资料及涡动相关系统观测的湍流通量资料来确定动力学粗糙度长度[6,7], 并且将其作为大气数值模式的陆面过程参数[8,9]. 由于大多数科学家认为动力学粗糙度长度是一个几何参数, 只依赖地表粗糙元的结构和形态[10,11], 因此它常常被当作一个常数来看待. 在以往的野外科学试验中, 科学家主要专注于确定典型陆地下垫面固定不变或仅随季节变化的粗糙度长度参数[11,12]. 然而对柔软性粗糙元而言, 即使在相同的下垫面条件下, 近地层风速也会明显改变表面粗糙元

英文版见: Zhang Q, Zeng J, Yao T. Interaction of aerodynamic roughness length and windflow conditions and its parameterization over vegetation surface. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5000-y

的结构和形态, 从而影响动力学粗糙度长度的大小[13]. 并且, 从理论上讲, 动力学粗糙度长度并不只是一个简单的几何参数, 而在本质上是一个动力学参数[14]. 它不仅依赖表面粗糙元的结构和形态, 而且还在一定程度上依赖近地层气流条件[15,16], 如近地层摩擦速度和大气稳定度等近地层气流特性. 这些因素无疑会引起植被下垫面动力学粗糙度长度的显著动态变化.

目前, 虽然有不少学者对动力学粗糙度长度与近地层风速的关系做过研究[13], 但很少有研究提供能客观反映动力学粗糙度长度动态变化的、可用于大气数值模式的参数化关系式. 而且由于人们对动力学粗糙度长度是一个几何参数的认识根深蒂固[3], 有关动力学粗糙度长度与近地层气流特征相互作用的研究更是少之又少[16]. 国际上的许多野外科学试验确定的表面动力学粗糙度长度也许只能代表典型下垫面动力学粗糙度长度的平均状态, 而并不能描述动力学粗糙度长度的动态变化特征. 这在柔软性特征比较突出和近地层气流状态比较特殊的植被下垫面表现得尤为突出, 由此而带来的问题也更为显著. 这意味着目前大气数值模式中植被下垫面动力学粗糙度长度的参数化存在明显局限性. 鉴于此, 本文试图利用中国北方协同观测试验[17,18]在典型植被下垫面观测的陆面过程资料, 系统分析动力学粗糙度长度与气流动力条件和植被物理特征的关系, 为建立更合理的植被下垫面动力学粗糙度长度参数化关系提供科学参考.

1 观测资料与研究区

1.1 观测试验

本文资料来自中国北方协同观测试验[19], 该试验是由季风亚洲全球变化区域集成研究计划(MAIRS)牵头, 联合国内多家研究机构管理的 18 个以陆面过程为主要观测内容的野外科学试验站, 协同开展的中国北方干旱半干旱区协同试验观测(简称“中国北方协同观测试验”). 参加该试验的观测站均在统一观测标准、统一观测规范、统一仪器标定方式和统一时间下开展观测, 并且进行统一数据质量控制及充分资料共享[17,18].

各观测站的主要观测项目包括地表气压和降水等天气要素、近地层风、温、湿梯度等微气象要素、地表辐射收支分量、地表能量平衡分量及土壤温度和湿度梯度等, 有关文献已给出了这些观测仪器的性能和主要技术指标[17,18]. 本文主要采用 2008 年 7~9 月的观测数据, 这期间的观测资料比较齐全和可靠, 植被高度变化相对较少. 本文选择森林、农田和草地 3 类观测站的资料进行分析, 这 3 类观测站基本可以代表主要植被类型下垫面, 能够用于分析不同植被类型对动力学粗糙度长度与近地层空气动力特征的影响规律. 另外, 选择一个农田观测站和草地观测站的资料来验证和检验试验拟合关系的可靠性.

1.2 观测站点的概况

本文选择了 3 个分别代表森林、农田和草地下垫面的观测站点. 其中森林观测站点以大野口高寒森林观测站为代表站, 该站地处祁连山北坡, 坐落在 38.53°N, 100.25°E, 海拔高度为 2835 m, 年平均降水为 410 mm, 年均地表温度为 6.36℃, 属高寒半干旱气候区. 该站下垫面是以云杉为主的森林, 树高主要在 15~20 m 之间, 观测场周围约 25 hm^2 范围内地势平坦, 超声风速仪架设在林冠的上空, 架设高度为 20.25 m. 农田观测站点以通榆农田观测站为代表站, 该站地处吉林省白城市通榆县, 坐落在 44.88°N, 122.88°E, 海拔高度为 184 m, 年平均降水为 400 mm, 年平均地表温度为 22.0℃, 属中温带半干旱大陆气候区. 该站的下垫面为半干旱区农田, 农作物为玉米(高度约 1.8 m), 土壤为风沙土和黑钙土, 观测场周围大于 50 hm^2 的范围地势开阔平坦, 超声风速仪架设高度为 2 m. 草地观测站点以通榆草原观测站为代表站, 该站地理位置和年降水量与通榆农田观测站基本相同, 年平均地表温度为 22.0℃, 下垫面主要以羽茅、芦苇、麻黄、甘草、蒺藜等野生植被为主, 植被覆盖度约为 60%, 植被高度约为 10 cm, 观测场周围 1000 hm^2 范围内地势平坦, 超声风速仪架设高度为 3.5 m. 图 1 给出了大野口森林站、通榆农田站和通榆草地站的观测场图片. 用于验证拟合关系的农田和草地观测站分别是甘肃省的临泽绿洲农田站和内蒙古的东苏草地站. 其中临泽绿洲农田站位于 39.35°N, 100.13°E, 海拔为 1384 m, 年平均降水为 120 mm, 年平均地表温度为 19.2℃, 属于温带荒漠气候. 该站地表为农作物(玉米、小麦等), 主要靠内陆河径流灌溉, 观测场周围超过 50 hm^2 的范围内地势开阔平坦, 超声风速仪架设高度为 4 m. 东苏草地



图 1　大野口森林(a)、通榆农田(b)和通榆草地(c)观测站的观测场

站位于 44.09°N, 113.57°E, 海拔为 970 m, 年平均降水为 185 mm, 年平均地表温度 23.3℃, 属于温带干旱-半干旱大陆性气候. 该站下垫面为荒漠草原, 优势植物种为弋壁针茅和多根葱, 观测场周围超过 1000 hm^2 的范围内地势开阔平坦, 超声风速仪架设高度为 2.15 m.

1.3　资料处理

由 Monin-Obukhov 相似理论, 近地层风速廓线公式可表示为[20]

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

其中, z_0 和 d 分别为动力学粗糙度长度和零平面位移高度, 单位均为 m; z 为风速观测高度, 单位为 m; $u(z)$ 为高度 z 处风速, 单位为 m/s, u_*为摩擦速度, 单位为 m/s, L 是 Monin-Obukhov 长度, 单位为 m; ψ_m 为稳定度函数, 为无量纲函数. 其中, 风速可直接观测得到, d 可以由植被特征估算, 摩擦速度 u_*和 Monin-Obukhov 长度 L 可用微气象观测资料计算[21], ψ_m可由下列公式计算:

当 $z/L<0$ 时,

$$\psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)=\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right)+2\ln\left(\frac{1-x}{2}\right)-\tan^{-1}(x)+\frac{\pi}{2}, \tag{2}$$

$$x=\left(1-16\left(\frac{z-d}{L}\right)\right)^{\frac{1}{4}}. \tag{3}$$

当 $z/L>0$ 时,

$$\psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)=-5\frac{z-d}{L}. \tag{4}$$

当 $z/L=0$ 时,

$$\psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)=0, \tag{5}$$

因此, 可根据(1)式推导出计算动力学粗糙度长度 z_0 的公式:

$$z_0=(z-d)\mathrm{e}^{-\left(\kappa\frac{u}{u_*}+\psi_m\left(\frac{z-d}{L}\right)\right)}. \tag{6}$$

2　粗糙度长度动态分布特征及其与气流动力状态的相互作用

从理论上讲, 无论影响动力学粗糙度长度的因素有多复杂, 但最关键的决定因素无疑是地表粗糙元特征[10,11]. 由于不同类型植被的植株高度和密度不同, 其粗糙度长度有明显差异. 从图 2(a)可以看出, 森林、农田和草地下垫面平均粗糙度长度分别为 0.5826, 0.2341 和 0.0641 m, 这与最近 Stull[22]综合以往主要研究得出的森林、农田和草地下垫面粗糙度长度分为 0.53, 0.25 和 0.03 m 的结论比较接近, 这说明本文观测计算的植被下垫面动力学粗糙度长度比较可靠.

图 2(a)还表明, 植被的植株越高其平均粗糙度长度就越大, 它们之间相差几倍甚至 1 个量级, 这说明植被高度作为下垫面最基本的粗糙元特征对动力学粗糙度长度具有关键作用, 它决定了粗糙度长度的基本量级.

从图 2(b)可进一步看出, 无论是哪一种类型植被下垫面, 其动力学粗糙度长度标准差与平均值的比值均比较大, 森林、农田和草地的比值分别为 0.30, 0.24 和 0.23. 虽然动力学粗糙度长度存在一定的计算误差, 出现一定离散可以理解, 但这里明显超出了一般的离散程度[21]. 很显然, 植被下垫面动力学粗糙度长度并不是一个常值, 而是一个动态变化量. 造成其动态变化的最可能原因是植被作为一种典型的柔软性粗糙元其粗糙特征随风速的变化而改变.

因此, 在图 3 中给出了不同风速区间森林、农田和草地下垫面动力学粗糙度长度的分布特征. 可以发现, 无论是森林还是农田或草地下垫面, 动力学粗

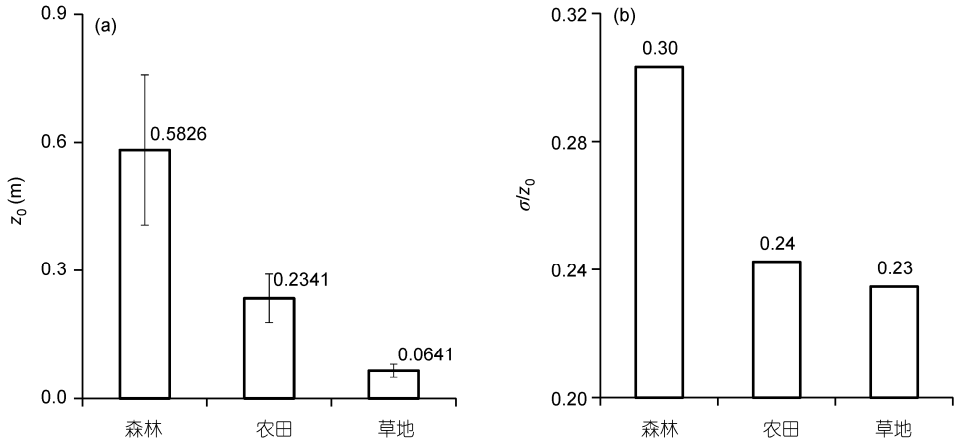


图 2 森林、农田和草地下垫面的平均表面粗糙度长度 z_0 和标准差 σ(a)及其标准差与平均值的比值(b)的比较

糙度长度均在小风速区间较大, 在大风速区间较小, 而且差异比较明显. 所不同的是, 森林下垫面的动力学粗糙度长度在小风速区间对风速变化不太敏感, 而在风速达到 3~4 m/s 以上时才明显变小, 这说明像森林这样的粗干植被, 只有较大风速才能改变其高度和形态. 而农田动力学粗糙度长度在 2~3 m/s 风速区间就有显著变化, 对较小风速比较敏感, 在较大风速区间变化反而不明显, 这与玉米植株比树木更细、更密有关. 对草地而言, 动力学粗糙度长度几乎在所有风速区间均有明显变化, 这符合草本植被低矮、纤细的特点.

植被下垫面动力学粗糙度长度除了受风速影响外, 气流动力特性也会在一定程度上影响其大小[15,16]. 因为近地层风速递减到零的高度是由近地面层动量向下传输过程即地表粗糙元吸收动量的能力所决定[23], 而地表粗糙元吸收动量的能力与气压力大小密切相关, 气压力又受近地层气流与粗糙元之间的相互作用过程影响. 在近地层, 表征气流与粗糙元相互作用的主要动力学特征量就是摩擦速度. 对植被下垫面而言, 气流特征对粗糙度的影响主要表现在摩擦速度与植株群之间的相互作用上. 事实上, 早在 20 世纪 50 年代 Charnock 等人[24]就已经开始考虑动力学粗糙度长度与摩擦速度之间的关系, 此后不断有学者对这方面进行研究[25], 但以往主要是研究洋面粗糙度长度与摩擦速度的关系, 而植被下垫面动力学粗糙度长度与摩擦速度的关系则很少有人关注.

图 4 给出的不同摩擦速度区间内森林、农田和草地下垫面动力学粗糙度长度的分布特征表明, 动力学粗糙度长度与摩擦速度的关系远比其与风速的关系复杂. 无论是在森林下垫面还是在农田或草地下垫面, 动力学粗糙度长度在摩擦速度较小的区间内随摩擦速度的增加而减小, 但当摩擦速度区间大约超过 0.5~0.6 m/s 后反而随摩擦速度增加而增大.

动力学粗糙度长度随摩擦速度变化表现出来的复杂分布特征与摩擦速度的双重角色有关. 一方面, 摩擦速度是近地层气流的主要动力特征量, 另一方面, 它也包含了风速的作用. 如图 5 所示, 摩擦速

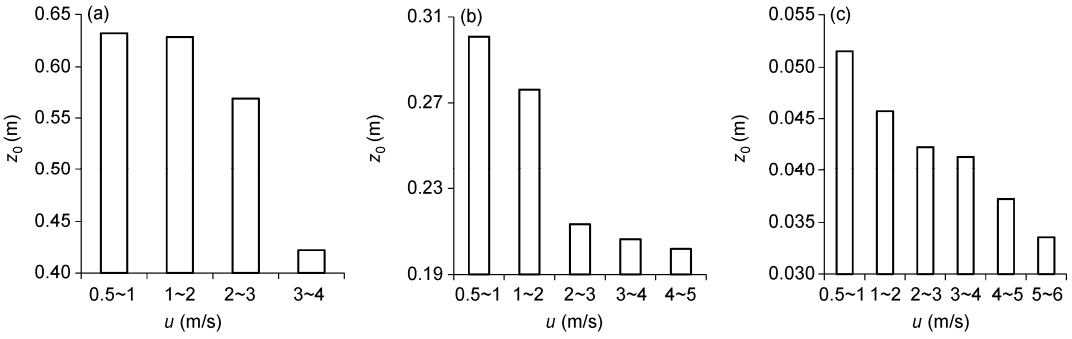


图 3 不同风速区间内森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面动力学粗糙度长度 z_0 的分布特征

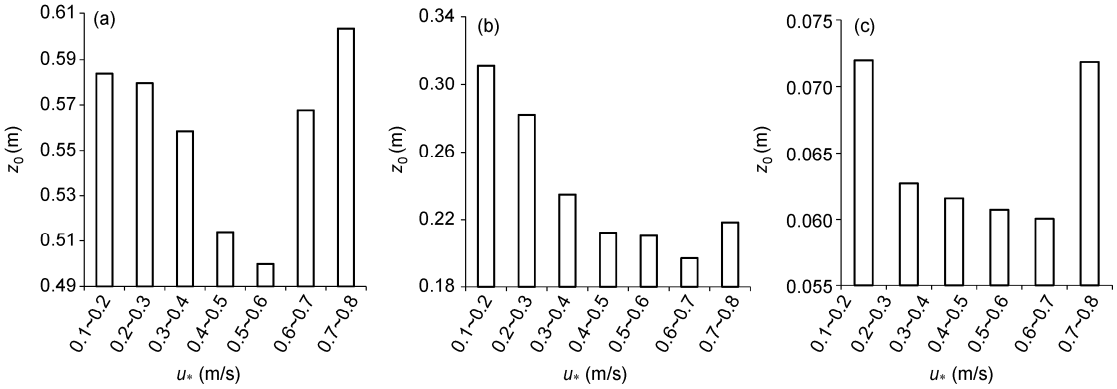


图 4　不同摩擦速度区间内森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面动力学粗糙度长度 z_0 的分布特征

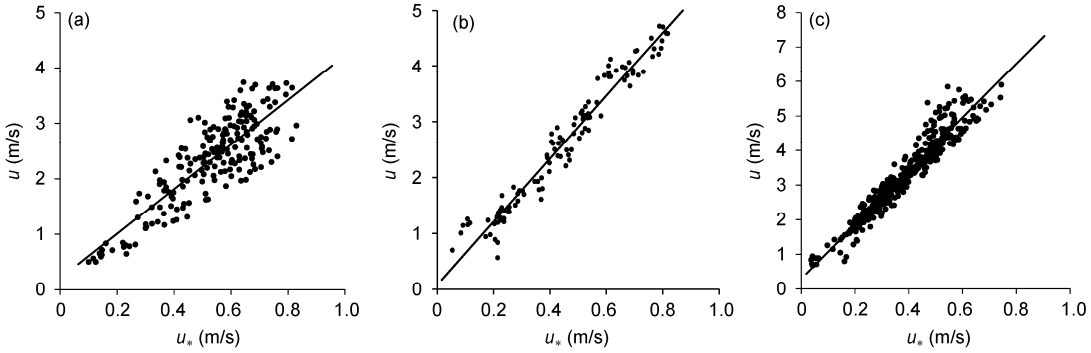


图 5　森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面下风速 u 与摩擦速度 u_* 的关系

度与风速的相关性非常显著. 所以, 在低摩擦速度区间, 主要表现了摩擦速度所包含的风速作用对粗糙度长度的影响; 而在高摩擦速度区间, 则主要表现出了摩擦速度所表征的气流特性对粗糙度长度的影响.

这正如图 6 所示, 与建筑物等刚性粗糙元或沙漠和冰面等裸露地表不同[26], 植被下垫面粗糙元的特点与水面类似, 粗糙元形态和结构受气流动力特征影响比较显著, 再加上气流动力特征对粗糙度长度有直接作用, 气流动力特征与粗糙度长度之间的耦合现象非常突出.

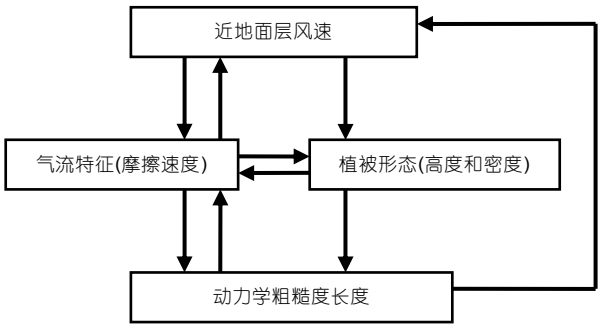


图 6　气流动力特征与动力学粗糙度长度的耦合关系示意图

3　粗糙度长度与大气动力状态的参数化关系及其验证

为了能够参数化表示植被下垫面动力学粗糙度长度的动态变化特征, 需要系统分析动力学粗糙度长度与风速和摩擦速度等动力学变量的关系. 图 7 是森林、农田和草地下垫面动力学粗糙度与风速的相关性散点图及拟合曲线. 从图 7 看出, 这 3 类植被下垫面动力学粗糙度长度与风速均有一定相关性, 且均随风速增大而减小. 相比较而言, 森林和农田下垫面动力学粗糙度长度与近地层风速相关性更好, 相关系数分别达 0.48 和 0.62; 而草地下垫面动力学粗糙度长度与风速的相关性较差, 相关系数仅为 0.22. 这说明植株比较高的植被的动力学粗糙度长度受风速变化影响更显著, 而低矮植被的动力学粗糙度长度受风速影响不太明显.

为了拟合有一定理论依据的动力学粗糙度长度与近地层风速的关系式, 这里基于(6)式的框架给出了植被下垫面动力学粗糙度长度与风速的基本关系

$$z_0 = a\mathrm{e}^{-bu}, \tag{7}$$

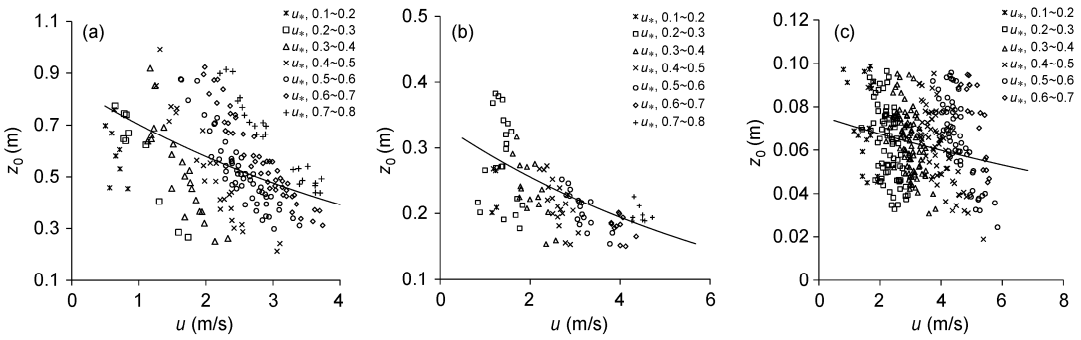


图 7　森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面下动力学粗糙度 z_0 与风速 u 的相关性散点图及其拟合关系

在上式中, z_0 和 u 在前面已作定义, a 和 b 是试验参数. 从公式(7)的函数形式来看, a 和 b 并不是简单的经验参数, 而具有一定的物理意义, 与植被特征有关. a 实际上是静风状态下的动力学粗糙度长度, 仅与植被高度和密度有关. 理论上[11], 植被越高, a 参数就越大. b 是植被动力响应系数, 反映了植被对大气动力影响的敏感度, 主要与植被高度和柔软度有关, 实际上与植被高度关系最密切.

图 7 中给出了由观测资料拟合的公式(7)在森林、农田和草地下垫面的关系曲线. 从表 1 给出的这 3 类植被下垫面拟合关系的统计量看出, 它们的 a 值即静风时的动力学粗糙度长度相差很大, 分别为 0.773, 0.313 和 0.076 m, 虽然与图 2 给出的平均粗糙度长度有很好的对应关系, 但明显要比其大许多, 这充分体现了近地层风速对动力学粗糙度长度的显著影响. 这 3 类植被下垫面的 b 值即动力响应系数也各不相同, 数值由森林、农田和草地依次减小, 这说明它们受近地层风速影响的程度在依次减弱, 这正好与这 3 种植被的植株高度呈正相关, 这在理论上也是合理的. 这也说明植被粗糙特征受动力影响程度主要由植株高度控制.

表 1　动力学粗糙度长度 z_0 与风速 u 的拟合相关性统计量

下垫面类型	a (m)	b	相关系数	标准差 (m)
森林	0.773	0.19	0.48	0.02611
农田	0.313	0.14	0.62	0.00261
草地	0.076	0.06	0.22	0.00027

同时, 从图 7 中以不同符号标注出的摩擦速度区间分类可看出, 植被下垫面动力学粗糙度长度与近地层风速之间的相关性之所以表现出比较明显的离散性, 主要与摩擦速度动态变化有关. 实际上在同一摩擦速度区间内, 动力学粗糙度长度与风速之间的相关性的离散要小得多, 而且表现出摩擦速度越强动力学粗糙度长度越大的分布态势.

因此, 在图 8 中给出了森林、农田和草地下垫面动力学粗糙度长度与摩擦速度相关性散点图. 很显然, 动力学粗糙度与摩擦速度的关系明显弱于其与风速的关系, 而且相关趋势也变得比较复杂, 尤其在草地下垫面已很难看出其相关趋势. 这与上一节的分析吻合, 表明摩擦速度的角色是双重的, 摩擦速度既是与风速密切相关的变量, 又是近地层气流的主要动力特征量. 而且这两种角色对动力学粗糙度长

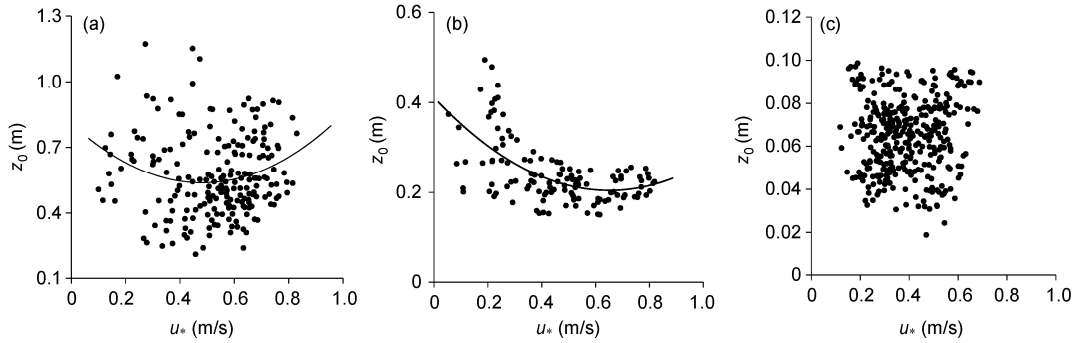


图 8　森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面动力学粗糙度 z_0 与摩擦速度 u_* 相关性散点图

度的作用是相互冲突的, 哪种角色占主导完全依赖动力条件和植被形态的相互作用过程. 对植株比较高的森林和农田来说, 在低摩擦速度时似乎主要表现了其与风速的关系, 而在高摩擦速度时更多体现了其作为气流特征变量的作用.

以上分析表明, 植被下垫面动力学粗糙度与单因子摩擦速度之间的相关性比较差, 与单因子风速之间的离散也不小. 但就其基本特征而言, 植被下垫面动力学粗糙度在摩擦速度变化不大的情况下随风速增加而减小, 在风速变化不大的情况下随摩擦速度增大而增加, 而且随风速变化要比随摩擦速度变化更敏感. 根据这一特征, 本文构建了一个综合性动力量 u^2/u_*, 它能更有效地反映近地层大气动力状态与动力学粗糙度的关系.

从图 9 给出的森林、农田和草地下垫面动力学粗糙度长度与综合性动力量 u^2/u_*的相关性散点图表明, 植被下垫面动力学粗糙度与综合性动力量 u^2/u_*的关系明显比单纯与风速或摩擦速度的关系好, 动力学粗糙度长度随 u^2/u_*增加显著减小, 相关系数分别达到了 0.74, 0.69 和 0.47, 标准差也明显改善, 即使在草地下垫面也有相对比较理想的表现. 并且, 拟合关系式也可由(8)式代替

$$z_0 = c\mathrm{e}^{d\frac{u^2}{u_*}}, \tag{8}$$

上式中, c 和 d 也是试验参数, 与 a 和 b 类似, 与植被特征有关. 从表 2 给出的动力学粗糙度长度与 u^2/u_*的拟合统计量表明, 参数 c 与表 1 的参数 a 很接近, 这是符合其物理意义本身的要求. 因为严格地讲, 参数 c 和参数 a 应该完全一致, 它们均表征静风时植被下垫面动力学粗糙度长度, 但由于受试验资料拟合误差影响, 它们会存在一定差异. 参数 d 与参数 b 相差较大, 这与它们之间的物理意义不完全相同有关,

表 2　动力学粗糙度长度 z_0 与 u^2/u_*的拟合相关性统计量

下垫面类型	c (m)	d	相关系数	标准差 (m)
森林	0.943	0.052	0.74	0.01612
农田	0.347	0.025	0.69	0.00211
草地	0.092	0.012	0.47	0.00023

但它们都不同程度表征了植被对大气动力特征的响应程度, 所以随植株高度降低而减小的趋势是一致的.

为了检验观测试验资料拟合的动力学粗糙度长度参数化关系式的可靠性, 这里用其他站点观测的动力学粗糙度长度分别与关系式(7)和(8)的估算值进行比较. 由于在中国北方协同观测试验中找不到其他合适的森林观测站, 这里仅分别用临泽农田站和通榆草地站的资料来验证关系式(7)和(8)对植被动力学粗糙度长度的估算效果. 图 10 分别是拟合式(7)和(8)计算的植被下垫面粗糙度长度与观测值的比较. 它表明, 这两个关系式均有一定实用性, 但式(8)的估算效果更为理想. 如表 3 所示, 观测的植被动力学粗糙度长度与关系式(7)和(8)估算值的相关系数分别为 0.51 和 0.62, 标准差分别为 0.138 和 0.109 m, 偏差分别为 0.042 和 0.037 m. 式(7)和(8)不仅可在陆面过程模式中定量描述动力学粗糙度长度的动态变化, 而且还有助于在已知植被分布类型的情况下获得区域或模式网格尺度的动力学粗糙度长度[27,28].

4　结论与讨论

与建筑物等刚性地表粗糙元下垫面或沙漠等裸露下垫面不同, 植被下垫面由于其表面粗糙元的柔软性, 动力学粗糙度长度不再只是一个常数, 而是一个动态变化量. 近地层大气动力状态对植株群落结构和形态的改变及对气流物理特征的影响均会引起

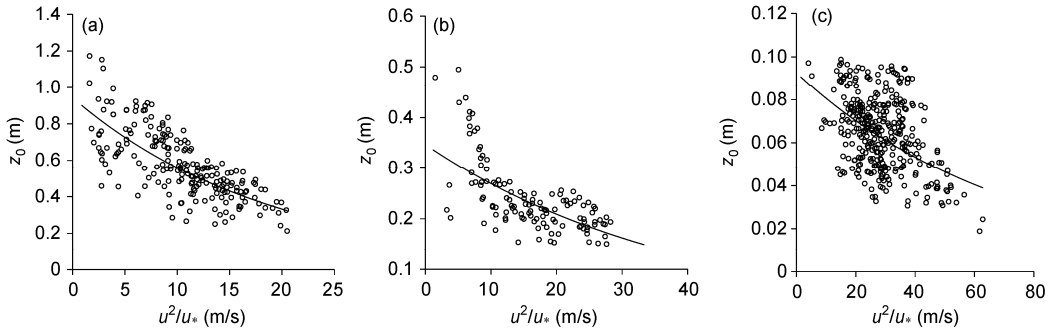


图 9　森林(a)、农田(b)和草地(c)下垫面动力学粗糙度长度 z_0 与 u^2/u_*相关性的散点图及其拟合曲线

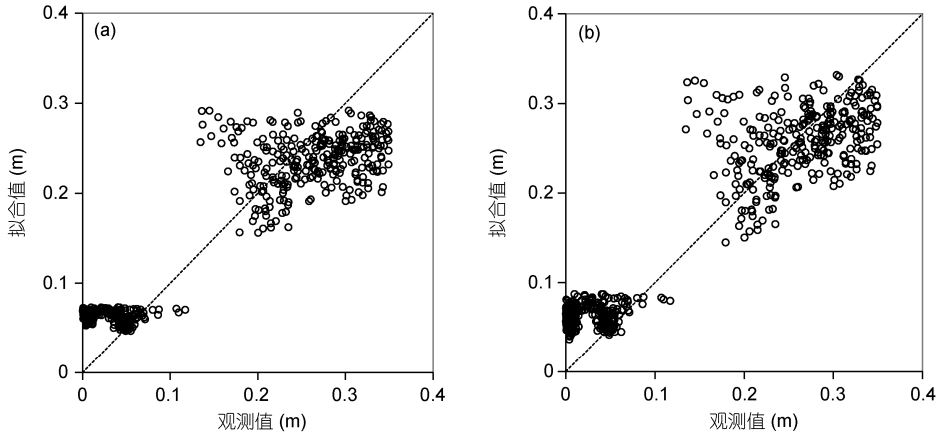


图 10 拟合公式(7) (a)和(8) (b)计算的植被下垫面粗糙度长度与观测值的比较

表 3 植被动力学粗糙度长度拟合关系式的效果检验统计量

粗糙度关系式	相关系数	标准差 (m)	偏差 (m)
$z_0 = a\mathrm{e}^{-bu}$	0.51	0.138	0.042
$z_0 = c\mathrm{e}^{d\frac{u^2}{u_*}}$	0.62	0.109	0.037

动力学粗糙度长度的显著变化, 植被越高受影响越明显, 其动态变化的幅度也就越大.

植被动力学粗糙度长度随近地层风速和摩擦速度的分布规律并不相同. 粗糙度长度在小风速区间较大, 在大风速区间较小; 随摩擦速度分布要更复杂, 动力学粗糙度长度在中等摩擦速度区间较小, 在摩擦速度较小或较大的区间均较大. 而且不同植被类型对近地层风速和摩擦速度的动力敏感性不同, 森林下垫面在 3~4 m/s 以上风速区间动力学粗糙度长度才明显变小, 而农田在 2~3 m/s 风速区间动力学粗糙度长度就已显著变化, 草地下垫面对所有风速区间均比较敏感, 这与不同类型植被的植株的高度和柔软性密切相关.

植被下垫面大气动力状态既影响植被粗糙元特征, 又与近地层气流动力特征密切相关, 因此与动力学粗糙度长度之间存在着复杂的耦合关系. 在森林、农田和草地下垫, 其动力学粗糙度长度与近地层风速的相关系数分别为 0.48, 0.62 和 0.22, 草地下垫面的相关性相对较差; 与综合性动力量 u^2/u_*的相关系数分别高达 0.74, 0.69 和 0.47, 标准差也更为理想, 更好体现了近地层大气动力状态对动力学粗糙度长度的影响特征. 动力学粗糙度长度 z_0与风速 u 和综合性动力量 u^2/u_*的拟合关系式的试验参数几乎主要受植被平均植株高度控制.

拟合关系式(7)和(8)不仅具有较清晰的物理意义, 而且用实际观测资料的检验效果也较好. 但相比较而言, 式(8)在理论上更合理, 检验效果也更为理想. 这两个关系式对陆面过程模式中定量描述植被下垫面动态变化的粗糙度长度具有重要科学参考意义.

虽然, 本文在一定程度上揭示了植被下垫面动力学粗糙度长度与近地层大气动力状态的物理关系, 但由于本文对动力学粗糙度长度的计算难免存在一定误差, 这影响了对动力学粗糙度长度随风速和摩擦速度变化的敏感点和转折点的准确认识. 另外, 在观测期间, 植被高度也会有一定变化, 这在一定程度上也会影响本文分析结果的精确性. 所以, 需要在今后进行更系统的野外科学试验和风洞试验来进一步发展本文研究结果.

致谢 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候环境重点实验室和季风亚洲全球变化区域集成研究计划为本文研究提供了资料, 在此表示感谢.

参考文献

1 Stull R B. An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Netherlands: Kluwer Acad Publishing, 1988

2 Martano P. Estimation of surface roughness length and displacement height from single level sonic anemometer data. J Appl Meteor, 2000, 39: 708–715
3 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望. 中国沙漠, 1997, 17: 99–102
4 张强, 王胜, 张杰, 等. 干旱区陆面过程和大气边界层研究进展. 地球科学进展, 2009, 24: 1185–1194
5 Monin A S, Obukhov A M. Basic laws of turbulence mixing in the surface layer of the atmosphere. Trudy Geofiz Inst Akad Nauk SSSR, 24: 163–187
6 Garratt J R. The Atmospheric Boundary Layer. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1992
7 陈家宜, 王介民, 光田宁. 一种确定地表粗糙度的独立方法. 大气科学, 1993, 17: 21–26
8 Kondo J, Yamazawa H. Aerodynamic roughness over an inhomogeneous ground surface. Bound Layer Meteorol, 1986, 35: 331–348
9 张强, 吕世华. 城市地表大气粗糙度的确定. 高原气象, 2003, 22: 25–31
10 Lettau H. Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness element description. J Appl Meteorol, 1969, 8: 828–832
11 Dickinson R E, Kenney P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model National Center for Atmospheric Research. NCAR Technical Report NCAR/TN-275+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO. 1986
12 Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models. J Atmos Sci, 1986, 43: 505–531
13 周艳莲, 孙晓敏, 朱治林, 等. 几种不同下垫面地表粗糙度动态变化及其对通量机理模型模拟的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, 36: 244–254
14 Monteith J L. Principles of Environmental Physics. London: Edward Arnold, 1973
15 Schmid H P, Bunzli B. The influence of surface texture on the effective roughness length. Quart J Roy Meteorol Soc, 1995, 121: 1–21
16 Zilitinkevich S S, Mammarella I, Baklanov A A, et al. The effect of stratification on the aerodynamic roughness length and displacement height. Bound Layer Meteorol, 2008, 129: 179–190
17 张强, 曾剑, 张立阳. 夏季风盛行期中我国北方典型区域陆面水、热过程特征研究. 中国科学: 地球科学, 2012, 42
18 Zeng J, Shen J, Zhang Q. An overview of the spatial patterns of land surface processes over arid and semiarid regions. Sci Cold Arid Region, 2010, 2: 288–297
19 曾剑, 张强, 王胜. 中国北方不同气候区晴天陆面过程区域特征差异. 大气科学, 2011, 35: 483–492
20 Dyer A J, Bradley E F. An alternative analysis of flux-gradient relationships at the 1976 ITCE. Bound Layer Meteor, 1982, 22: 3–19
21 Zhang Q, Wei G A, Cao X Y, et al. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region. Adv Atmos Sci, 2002, 19: 121–135
22 Stull R B. Meteorology for Scientists and Engineers. 3rd Ed. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole, 2005
23 Thom A S. Momentum absorption by vegetation. Quart J Roy Meteor Soc, 1971, 97: 414–428
24 Charnock H. Wind stress over a water surface. Quart J Roy Meteorol Soc, 1955, 81: 639–640
25 Wu J. On non-dimensional correlation between roughness length and wind-friction velocity. J Oceanogr Soc Jpn, 1988, 44: 254–260
26 张强, 黄荣辉, 王胜, 等. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展. 地球科学进展, 2005, 20: 427–441
27 张强, 王胜. 关于黄土高原陆面过程及其观测试验研究. 地球科学进展, 2008, 23: 167–173
28 张强, 胡向军, 王胜, 等. 黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)有关科学问题. 地球科学进展, 2009, 24: 363–371