

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.

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

孙俊¹⁻², 胡泽勇^{1*}, 陈学龙³, 张敏², 何慧根⁴, 张渝杰²

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所 寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 四川省遂宁市气象局, 四川 遂宁 629000; 3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085;

4. 重庆市气象局, 重庆 401147)

摘 要: 利用廓线法计算了黑河中上游地区盈科农田站、冰沟稀疏草地站、阿柔牧场站和大冬树山垭口积雪观测站的总体输送系数和地表粗糙度。结果表明, 地表粗糙度与植被覆盖度和高度以及下垫面的性质有关, 夏季地表粗糙度大小是农田站最大, 其次是牧场站和稀疏草地站, 高寒草甸站最小。下垫面状况还影响动量总体输送系数对稳定度的依赖程度, 地表粗糙度大的地区强于地表粗糙度小的地区。

关键词: 廓线—通量法; 动量总体输送系数; 地表粗糙度; 稳定度

文章编号: 1000-0534(2012)04-0920-07 **中图分类号:** P404 **文献标志码:** A

1 引言

为了了解和认识西北干旱区水资源和气候变化等问题, 我国先后开展了多次野外观测研究实验: 1988—1992 年我国和日本合作进行了“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究”(HEIFE), 之后又开展了“内蒙古草原试验”(IMGRASS)和“西北干旱区陆气相互作用观测试验”(DHEX)。陆面过程的核心问题是下垫面同大气之间的能量平衡以及物质的输送和交换。在利用常规气象观测资料确定下垫面与大气之间的能量和物质(动量、热量和水汽等)交换时, 通常采用总体输送系数表示的参数化公式^[1], 所以在陆气相互作用和大气数值模拟研究中, 总体输送系数和地表粗糙度是计算陆面与大气之间物质和能量交换的关键参数。近 30 年来, 我国不同下垫面总体输送系数和地表粗糙度的计算和研究就一直没有间断过, 研究涵括北方干旱及半干旱区^[2-10]、湿润区^[11-14]和青藏高原地区^[15-23]的河谷、高寒草甸、半干旱过渡带、沙漠、戈壁、天然草原以及湿润的草地、农田和滨湖下垫面。但以往对

动量总体输送系数的研究多以一到两种不同下垫面的分析为主, 对多种不同下垫面进行分类的讨论不多; 对地表粗糙度的研究往往也是对个别下垫面、个别月份的资料进行分析, 对不同下垫面进行季节分类的讨论亦不多。本文为探索不同下垫面动量总体输送系数的特征、下垫面性质以及植被长势对地表粗糙度的影响, 利用黑河地区野外观测试验数据对农田、牧场、稀疏草地和积雪下垫面进行分析, 从而得出不同下垫面的动量总体输送系数以及各个季节地表粗糙度的不同特性, 以期在黑河地区数值模拟和遥感反演工作提供一定的参考依据。

2 研究区域、资料及方法介绍

2.1 研究区域概况

整个黑河流域下垫面性质较为复杂, 上游为青海、祁连山区; 中游为甘肃河西走廊绿洲区; 下游除了河流沿岸的三角洲外, 大部分为沙漠、戈壁, 以往的研究多集中在黑河下游的沙漠和戈壁地区。表 1 为黑河地区各观测站的地理信息及下垫面情况。

收稿日期: 2010-03-28; 定稿日期: 2011-08-02

基金项目: 中国科学院西部行动计划(二期)项目(KZCX2-XB2-09-04); 国家自然科学基金项目(41175068); 甘肃省科技重大专项计划项目(1001JKDA001); 欧盟第七框架项目(FP7-ENV-2007-1 Grant nr. 212921)共同资助

作者简介: 孙俊(1982—), 女, 四川内江人, 硕士研究生, 主要从事陆气相互作用研究。E-mail: suen_116@163.com

* 通讯作者: 胡泽勇。E-mail: zyhu@lzb.ac.cn

表 1 黑河地区各测站概况

Table 1 Geographic information of different stations in HEIFE area

观测站	经度/E	纬度/N	海拔高度/m	下垫面性质
盈科	100°24'	38°51'	1519.1	农田
冰沟	100°13'	38°04'	3449.4	稀疏草地
阿柔	100°27'	38°02'	3032.8	牧场
垭口	100°14'	38°00'	4146.8	积雪高寒草甸

积雪高寒草甸盈科农田站(下称盈科站)位于黑河中游张掖绿洲南侧的盈科灌区, 试验场周围平坦开阔, 是一个比较理想的绿洲农田观测站, 观测期间种植有育种玉米, 9 月收割; 冰沟稀疏草地站(下称冰沟站)位于黑河上游冰沟子流域的河谷内, 场地四周相对较为平坦, 观测场地表为稀疏草地和河床碎石的混合; 阿柔牧场站(下称阿柔站)位于黑河上游八宝河支流南侧的河谷高地上, 试验场周围地势相对平坦开阔, 夏季牧草长势良好, 高度可达 40~50 cm; 大冬树山垭口积雪观测站(下称垭口站)位于黑河上游大冬树山垭口东侧的高寒草甸上, 试验场周围地势相对平坦开阔, 秋末、冬季和初春期间该试验场常被积雪覆盖, 是一个比较理想的积雪观测站。

2.2 资料选取

本文所用资料来自于中国科学院寒区旱区环境与工程研究所承担的西部行动计划项目(黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设)在黑河中上游地区设立的多个野外观测站, 即 2007 年 12 月—2008 年 11 月盈科站、冰沟站、阿柔站和垭口站的两层(2 m、10 m)风速、温度和气压观测资料, 其中前一年 12 月—当年 2 月代表冬季, 3—5 月代表春季, 6—8 月代表夏季, 9—11 月代表秋季。

2.3 方法介绍

求解总体输送系数的方法分为直接法和间接法两种。直接法包括: 涡旋相关、廓线—通量法和经验函数参数化方法; 间接方法有倒算法, 也即先利用空气动力学方法、组合法、Bowen 比能量平衡法或变分法等方法结合风、温、湿等气象要素的梯度观测资料计算出地面动量、感热和潜热通量, 然后利用总体输送公式反算出总体输送系数。这些方法中普遍认为涡动相关法计算的总体输送系数最为准确, 但涡动相关法对观测仪器要求较高, 价格昂贵, 一般气象观测站不具备该条件, 所以本文采用

廓线—通量法计算动量总体输送系数:

$$u_* = \frac{k \times [u(z_2) - u(z_1)]}{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right) - \psi_M(\zeta)}, \quad (1)$$

$$\theta_* = \frac{k \times [\theta(z_2) - \theta(z_1)]}{\ln\left(\frac{z_2 - d}{z_1 - d}\right) - \psi_H(\zeta)}, \quad (2)$$

$$\zeta = \frac{z - d}{L}, \quad (3)$$

$$L = \frac{u_*^2 \bar{T}}{gk\theta_*}, \quad (4)$$

$$\psi_M\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - 2\arctan x + \frac{\pi}{2}, & \frac{z}{L} \leq 0 \\ -5\frac{z-d}{L}, & \frac{z}{L} > 0 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\psi_H\left(\frac{z}{L}\right) = \begin{cases} 2\ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) & \frac{z}{L} \leq 0 \\ -5\frac{z-d}{L} & \frac{z}{L} > 0 \end{cases}, \quad (6)$$

$$x = (1 - 16\zeta)^{1/4}, \quad (7)$$

$$C_D = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) - \psi_M\left(\frac{z-d}{L}\right)\right]^2}, \quad (8)$$

$$C_{DN} = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)\right]^2}, \quad (9)$$

零平面位移采用 Stanhill^[24] 根据大量实验结果求得高杆作物条件下 d 与 h 的经验关系式:

$$\lg d = 0.9791 \lg h - 0.154, \quad (10)$$

其中: $k=0.4$; ζ 为稳定度; $\psi_M(\zeta)$ 为稳定度修订函数; L 为奥布霍夫长度; \bar{T} 为绝对平均温度; θ_* 为特征位温; g 为重力加速度; $z=10$ m; d 为零平面位移; h 为下垫面植被高度; C_D 为动量总体输送系数; C_{DN} 为中性层结下的动量总体输送系数; z_0 为地表粗糙度。

首先利用式(4)、(5)求得中性层结下的 u_* 和 θ_* , 将得到的 u_* 和 θ_* 代入式(7)求得 L 的初值, 再将 L 的初值代入式(8)和(9)则可以得到 $\psi_M\left(\frac{z}{L}\right)$ 和 $\psi_H\left(\frac{z}{L}\right)$ 的初值; 然后将 $\psi_M\left(\frac{z}{L}\right)$ 和 $\psi_H\left(\frac{z}{L}\right)$ 的初值返回代入式(4)、(5)计算 u_* 和 θ_* , 重复以上步骤, 经过反复迭代得到最终的 u_* , θ_* 和 L 。利用式(10)~(12)可以得到 C_D , C_{DN} 和 z_0 。当下垫面植被高度低于 50 cm 的时候, 可以不用考虑零平面位

移, 因为观测高度远大于植被高度。

3 结果分析

3.1 空气动力粗糙度长度

空气动力粗糙度长度 Z_0 定义为风速为零的高度。 Z_0 依赖于下垫面植被的覆盖度、高度、特征、柔韧性^[25]和下垫面性质等。阿柔站下垫面为密集的牧草, 植被覆盖度四季都大于其余 3 站, 所以它的地表粗糙度明显大于下垫面植被稀疏的冰沟站和垭口站。而盈科站夏季和秋季玉米收割前地表粗糙度大于阿柔站, 这是由于此时的玉米高度远大于牧草高度的缘故。地表粗糙度有明显的季节特征, 夏季植被生长旺盛, 植被高度和覆盖度都达到全年最大, 所以地表粗糙度的最大值多出现在夏季^[26]。

从表 2 中可看到, 冰沟站的地表粗糙度夏季达到最大, 为 3.38 cm, 与李国平等^[22]对高原稀疏植被的研究结果相近。盈科站和阿柔站的地表粗糙度秋季最大, 虽然秋季盈科站和阿柔站下垫面植被高度和稀疏程度都与夏季相同, 但秋季植被枯黄, 植株水分减少、硬度加大, 使得表面粗糙度增大, 进而地表粗糙度也达到全年最大。下垫面性质不同, 地表粗糙度也不相同。盈科站在玉米收割前地表粗糙度达到 25.25 cm, 收割以后下垫面为裸土, 降到 0.48 cm。垭口站由于海拔较高, 全年基本都有积雪覆盖, 而雪面的粗糙度很小, 所以垭口站地表粗糙度很小, 小于沙漠^[27]和戈壁^[28]。因此, 4 个测站夏季地表粗糙度依次为盈科农田站(玉米地) > 阿柔牧场站 > 冰沟稀疏草地站 > 垭口积雪观测站。

表 2 10 m 高度处不同下垫面的空气动力学粗糙度 Z_0
(单位: cm)

Table 2 Surface aerodynamic roughness length Z_0 (unit: cm) derived from different land surfaces at 10 m height

观测站	春季	夏季	秋季	冬季
盈科(玉米收割前)	2.91	13.83	25.25	0.04
盈科(玉米收割后)			0.48	
冰沟(稀疏草地)	0.62	3.38	1.01	0.15
阿柔(牧场)	2.46	5.3	8.41	1.5
垭口(积雪和高寒草甸)	0.01	0.02	0.17	0.42

3.2 不同下垫面夏季动量总体输送系数

动量总体输送系数依赖稳定度和地表粗糙度。同一季节下垫面植被的状态变化不大, 所以把同一季节的地表粗糙度近似地看成一个定值, 这样动量总体输送系数就只与稳定度有关。表 3 是用廓线法

计算的夏季不同下垫面在稳定层结、不稳定层结以及中性层结下的动量总体输送系数。从表 3 中可看到, 同一下垫面在不同层结下的动量总体输送系数是不同的, 不同下垫面在同一层结下的动量总体输送系数也不相同。中性层结和不稳定层结下盈科站的动量总体输送系数最大, 阿柔次之, 垭口站最小。冰沟站中性层结下动量总体输送系数为 0.0049, 与张述文等^[13]用变分法对淮海流域夏季稀疏草地下垫面中性层结动量总体输送系数计算的结果一致。垭口站地处高海拔地区, 四季基本都有积雪覆盖。积雪下垫面的中性层结下动量总体输送系数接近沙漠和戈壁^[2]。

表 3 不同大气状态下夏季不同测站 10 m 高度处的动量总体输送系数

Table 3 Momentum bulk transfer coefficient at 10 m height at different stations under different atmospheric conditions in summer

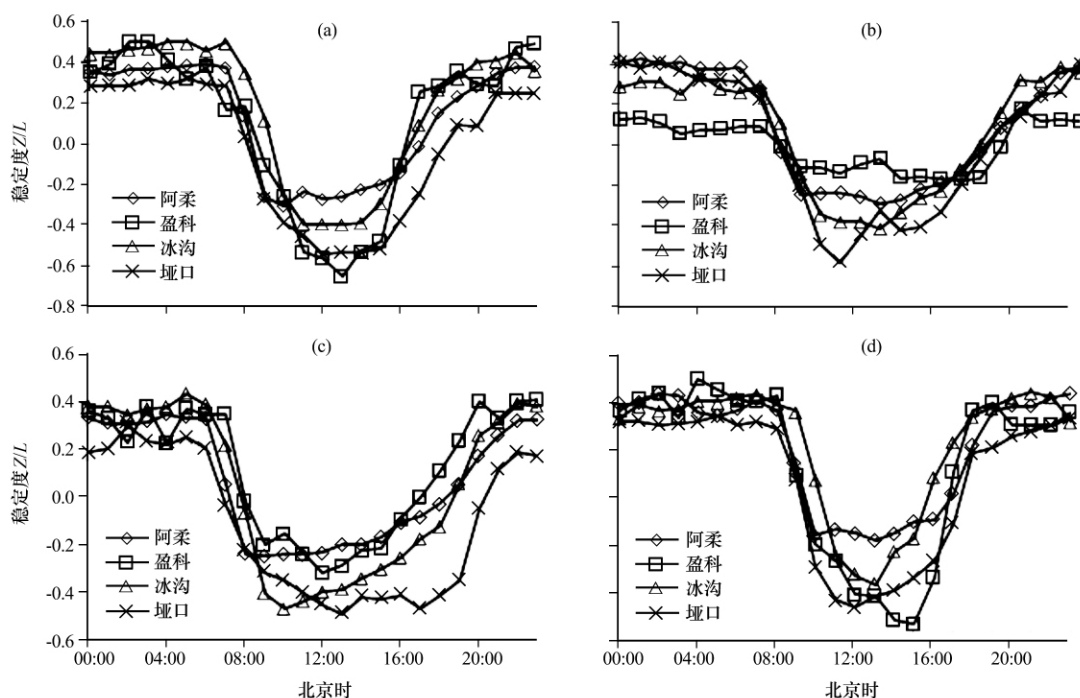
观测站	稳定层结 / $\times 10^{-3}$	不稳定层结 / $\times 10^{-3}$	中性层结 / $\times 10^{-3}$
盈科(玉米地)	3.17	11.75	7.23
冰沟(稀疏草地)	2.26	6.54	4.94
阿柔(牧场)	4.23	9.36	6.14
垭口(积雪和高寒草甸)	0.49	1.87	1.51

3.3 大气稳定度参数 Z/L 的日变化特征

图 1 给出了不同季节下大气稳定度 Z/L 在一天当中随时间的变化曲线。从图 1 中可看出, 01:00—06:00 和 21:00—24:00 大气是稳定的; 08:00—16:00 大气基本是不稳定的; 其余时段大气状态不固定。因此, 白天大气基本上处于不稳定状态, 而夜间则较稳定; 日出和日落前稳定和不定都可能发生。从图 1 中还可看到, 盈科站在夏、秋季的傍晚最早达到大气稳定, 这是绿洲冷岛效应的必然结果^[29]。在离盈科站较近的地方为一荒漠地带, 傍晚荒漠地区上层干热空气被输送到绿洲上空, 与绿洲地表附近的冷湿空气共同作用, 使大气层结达到稳定。4 个测站在夏季大气不稳定的持续时间最长, 明显高于冬季。这是因为夏季气温较高, 湍流输送最易进行, 从而使大气不稳定的持续时间也较长。

3.4 动量总体输送系数的日变化特征

图 2 为利用廓线法计算的夏季 10 m 处阿柔、冰沟、盈科和垭口站的大气动量总体输送系数 C_D 的日变化曲线。从图 2 中可明显地看到, 动量总体

图 1 不同测站不同季节 Obukhov 稳定度参数 Z/L 的日变化

(a) 秋季, (b) 春季, (c) 夏季, (d) 冬季

Fig. 1 The diurnal variation of Obukhov stability parameter at different stations in autumn (a), spring (b), summer (c) and winter (d)

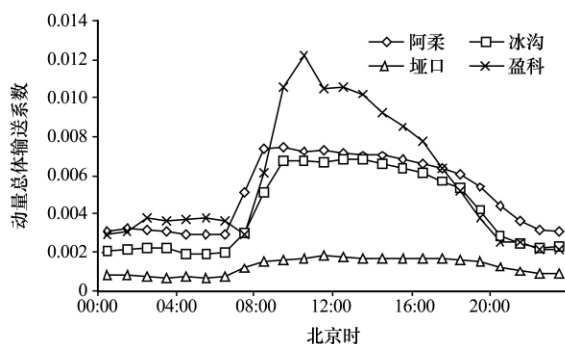


图 2 夏季 10 m 处不同下垫面动量总体输送系数的平均日变化特征

Fig. 2 The seasonal mean diurnal variation of momentum bulk transfer coefficient at 10 m height under different underlying surfaces in summer

输送系数白天变化比夜晚大。06:00—12:00 动量输送系数都持续增大, 下午随着时间增加, 动量总体输送系数又缓慢减小, 而夜间基本没变化。同时从图 2 中还可看到, 不同下垫面动量总体输送系数的日变化表现也不相同, 有植被覆盖的阿柔站、盈科站和冰沟站动量总体输送系数的日变化都比下垫面相对光滑的埡口积雪站变化明显。盈科站日变化最显著, 阿柔站和冰沟站次之, 埡口站最小。这是

由于动量总体输送系数的日变化依赖于稳定性和地表粗糙度的日变化。由前面大气稳定度的日变化分析可以得出, 白天大气基本是不稳定的, 不稳定层结有利于湍流发展, 所以动量总体输送系数的变化较大; 而夜间大气基本处于稳定状态, 稳定层结不利于湍流发展, 所以动量总体输送系数变化不明显。埡口站下垫面相对光滑, 光滑表面减少了曳力和通过表面的输送率, 从而使得动量总体输送系数的日变化不大, 明显小于粗糙度较大的其他测站。

3.5 动量总体输送系数随大气稳定度参数 Z/L 的变化

动量总体输送系数 C_D 是关于地表粗糙度 Z_0 和稳定度 Z/L 的函数(见式(8))。在地表粗糙度为定值的情况下, 总体输送系数简化为只与稳定度有关的函数。通常认为地表粗糙度在同一季节内为一定值, 因此, 本文分别计算了四季动量总体输送系数和稳定度的关系。为了便于分析, 删除了 $Z/L > 1$ 和 $Z/L < -1$ 的值, 以下给出了 10 m 高度处大气动量总体输送系数随大气稳定度参数 Z/L 的变化趋势。从图 3 中可看出, 静力不稳定气流的湍流运动最强, 静力中性气流次之, 静力稳定气流最弱。当大气稳定度参数 $Z/L < 0$ 时, 不同下垫面动量总

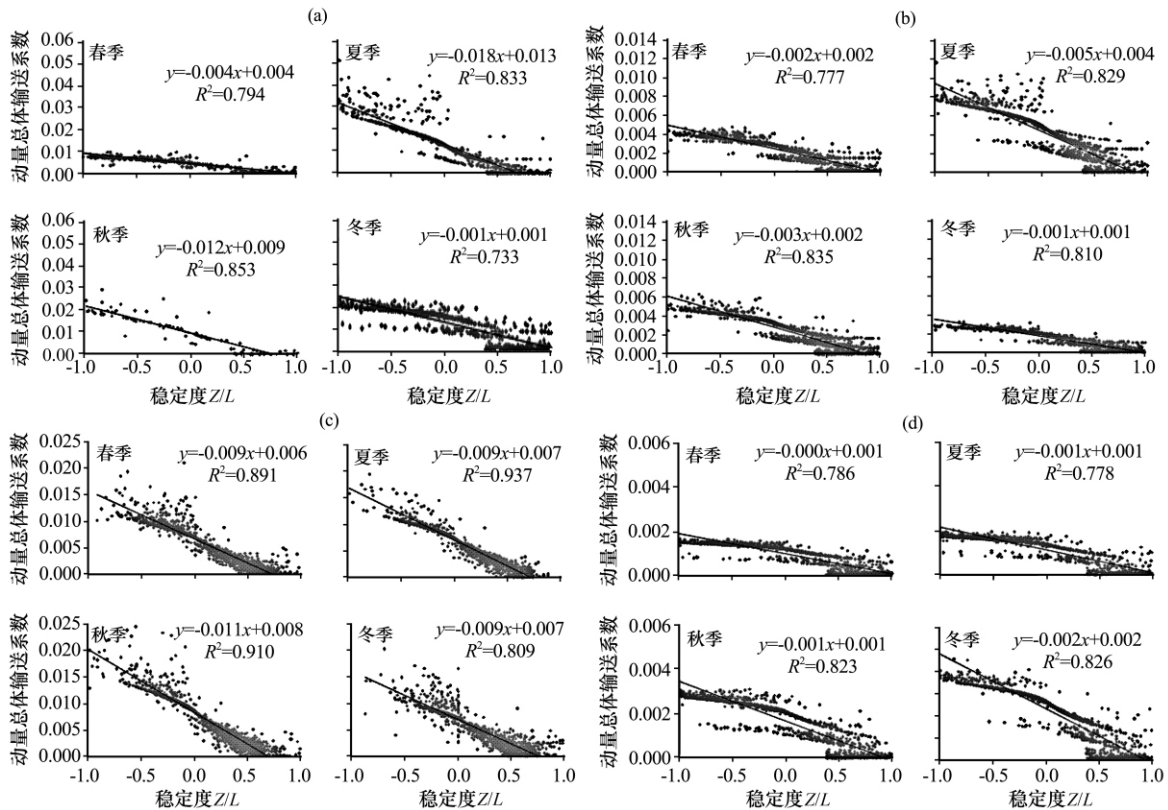


图 3 不同季节不同测站动量总体输送系数随 Obukhov 稳定度参数 Z/L 的变化

(a) 盈科站, (b) 冰沟站, (c) 阿柔站, (d) 垭口站

Fig. 3 The variation of momentum bulk transfer coefficient with Obukhov stability parameter Z/L at Yingke (a), Binggou (b), Arou (c), and Yakou (d) stations in different seasons

体输送系数都随稳定度的增大而减小; 当大气层结趋于稳定时, 湍流输送难以发生, 所以 $Z/L > 0.5$ 时, 动量总体输送系数有向零逼近的趋势。从线性相关方程可以看到, 各测站基本都是夏、秋季的动量总体输送系数随稳定度变化的相关性高于冬、春季; 阿柔站夏、秋季动量总体输送系数随稳定度变化的相关性最高。这说明动量总体输送系数依赖稳定度的程度与地表粗糙度有关, 地表粗糙度大的地区要高于地表粗糙度小的地区。

3.6 动量总体输送系数与地面风速的关系

为了分析动量总体输送系数随风速的变化特征, 排除植被状况对动量总体输送系数的影响, 选取下垫面植被较为均一的阿柔站进行分析。图 4 是夏季阿柔站在两种大气状态 ($Z/L > 0$ 和 $Z/L < 0$) 下动量总体输送系数与 10 m 风速的关系。从图 4 中可看出, 中性层结下总体输送系数随风速无明显变化。这是由于在粗糙度一定的情况下, 中性层结下总体输送系数 C_{DN} 基本为常数, 所以不随风速变

化。而在不稳定层结时, 随着 10 m 风速的增大, 动量总体输送系数减小, 并逐渐趋于中性; 在大气处于稳定层结时, 随着 10 m 风速的增大, 总体输送系数增大, 也逐渐趋于中性。从图 4 中还可看到, 动量总体输送系数主要集中在小风速时, 这是由于小风有利于不稳定对流的发展。

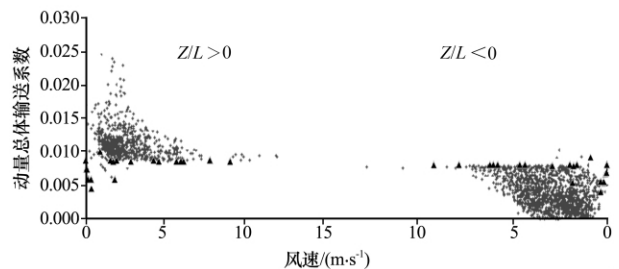


图 4 夏季阿柔站总体输送系数与 10 m 风速的关系

▲表示中性层结下动量总体输送系数

Fig. 4 The relationship of momentum bulk transfer coefficient and 10 m wind speed at Arou station in summer. ▲ is the momentum bulk transfer coefficient under neutral condition

3.7 中性条件下动量总体输送系数和地表粗糙度

表 4 给出了黑河流域(从上游冰沟站到下游鼎新站)不同下垫面中性条件下动量总体输送系数和地表粗糙度。黑河流域上游为祁连山区,中游为河西走廊绿洲,下游多为荒漠和戈壁。由表 4 可见,下垫面植被状况对动量总体输送系数和地表粗糙度的影响很大,计算结果以小麦和玉米地最大,牧场和稀疏草地其次,积雪站最小。总体而言,有植被覆盖的下垫面上地表动力学粗糙度和动量总体输送系数要大于无植被覆盖的下垫面;植被密集且高的下垫面地表动力学粗糙度和动量总体输送系数要比植被稀疏、矮小的下垫面大一个量级,光滑下垫面的动力学粗糙度和动量总体输送系数最小。

表 4 黑河流域不同下垫面的中性条件下动量总体输送系数 C_{DN} 和地表粗糙度 Z_0

Table 4 The momentum transfer coefficients under neutral condition (C_{DN}) and surface aerodynamic roughness length (Z_0) derived from different land surfaces in the Heihe River basin

观测站(下垫面性质)	$C_{DN}/\times 10^{-3}$	Z_0/cm
冰沟(稀疏草地)	4.94	3.38
阿柔(牧场)	5.91	5.30
垭口(积雪和高寒草甸)	1.39	0.02
盈科(玉米地)	9.10	13.83
化音(戈壁) ^[5]	1.48 ± 0.15	0.179 ± 0.016
沙漠 ^[5]	1.54 ± 0.23	0.212 ± 0.019
临泽(小麦) ^[5]	1.46 ± 0.25	15 ± 4
黑河试验区(戈壁) ^[10]	2.2	0.45
黑河试验区(沙漠) ^[10]	1.6	0.17
鼎新(戈壁) ^[17]	2.1	0.144

4 结论

通过对观测资料的计算和分析,得到以下主要结论:

(1) 用廓线法对黑河上中游 4 种典型下垫面的动量总体输送系数和地表粗糙度进行了计算,得出地表粗糙度与下垫面性质以及植被盖度和高度等密切相关。夏季盈科农田站(玉米地)地表粗糙度最大,其次是阿柔牧场站和冰沟稀疏草地站,垭口高寒草甸站最小。

(2) 动量总体输送系数和稳定度都有明显的日变化规律,同一下垫面在不同层结下的动量总体输送系数不同,不同下垫面在同一层结下的动量总

体输送系数也不相同。中性层结和不稳定层结下盈科农田站的动量总体输送系数最大,阿柔牧场站次之,垭口积雪站最小。从盈科站稳定度分析结果得出,绿洲夏季容易出现“冷岛效应”。

(3) 动量总体输送系数对稳定度的依赖程度与下垫面性质密不可分。动量总体输送系数依赖于稳定度的程度与地表粗糙度有关,地表粗糙度大的地区要强于地表粗糙度小的地区。风速通过影响稳定度进而影响动量总体输送系数,微风有利于湍流的发展。

参考文献

- [1] Eageieson P S. Land surface processes in atmospheric general circulation models[M]. London: Cambridge, 1981: 67—111.
- [2] 左洪超, 胡隐樵. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数[J]. 高原气象, 1992, 11(4): 371—380.
- [3] 张立盛, 钱正安, 陈伯民. 黑河地区地面阻曳系数的估算及其影响的数值试验[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 357—365.
- [4] 刘和平, 刘树华. 森林冠层空气动力学参数的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 522—528.
- [5] 任宏利, 王澄海, 邱崇践, 等. 利用变分法计算西北典型干旱区地表通量的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(2): 269—277.
- [6] 张强, 卫国安. 荒漠戈壁大气总体曳力系数和输送系数观测研究[J]. 高原气象, 2004, 23(3): 305—312.
- [7] 韦志刚, 黄荣辉, 陈文. 敦煌戈壁不同近地层大气稳定度下的感热交换系数[J]. 高原气象, 2006, 25(5): 834—839.
- [8] 王澄海, 黄宝霞, 杨兴国. 陇中黄土高原植被覆盖和裸露下垫面地表通量和总体输送系数研究[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 30—38.
- [9] 涂钢. 半干旱区不同下垫面地气相互作用研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007: 109—112.
- [10] 黄宝霞, 王澄海, 刘辉志, 等. 内蒙古奈曼流动沙丘下垫面近地面能量收支研究[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 177—183.
- [11] 吴祖常, 李子华, 赵鸣, 等. 太湖湖滨湍流通量和输送系数的计算分析[J]. 科技通报, 1999, 15(2): 94—98.
- [12] 余锦华, 刘晶淼, 任健. 长江三角洲常熟地区近地层湍流特征的研究[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(4): 536—544.
- [13] 张述文, 邱崇践, 张卫东. 用变分方法估算淮河流域总体输送系数[J]. 高原气象, 2004, 23(4): 506—511.
- [14] 黄鹤, 李英华, 韩素芹, 等. 天津城市边界层统计特征[J]. 高原气象, 2011, 30(6): 1481—1487.
- [15] 尚伦宇, 吕世华, 张宇, 等. 青藏高原东部土壤冻融过程近地层湍流统计特征分析[J]. 高原气象, 2011, 30(1): 30—37.
- [16] 马淑芬. 1986 年夏季西藏东部近地层湍流输送特征的分析[J]. 气象学报, 1990, 48(2): 210—219.
- [17] 苗曼倩, 曹鸿, 李劲钧. 青藏高原大气边界层湍流特征量分析[J]. 高原气象, 1998, 17(4): 356—363.
- [18] 周明煜, 徐祥德, 卞林根, 等. 青藏高原大气边界层观测分析与动力学研究[M]. 北京: 气象出版社, 2000: 52—56.

- [19] 高志球, 王介民, 马耀明, 等. 不同下垫面的粗糙度和中性曳力系数研究[J]. 高原气象, 2000, 19(1): 17—24.
- [20] 刘红燕, 苗曼倩. 青藏高原大气边界层特征初步分析[J]. 南京大学学报(自然科学版), 2001, 37(3): 348—357.
- [21] 李国平, 段廷扬, 巩远发. 青藏高原近地层通量特征的合成分析[J]. 气象学报, 2002, 60(4): 453—460.
- [22] 李国平, 段廷扬, 吴贵芬. 青藏高原西部的地面热源强度及地面热量平衡[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 13—18.
- [23] 钱泽雨, 胡泽勇, 杜萍, 等. 青藏高原北麓河地区近地层能量输送与微气象特征[J]. 高原气象, 2005, 24(2): 43—48.
- [24] Stanhill G. A simple instrument for field measurement of turbulent diffusion flux[J]. J Appl Meteor, 1969, 8: 509—513.
- [25] 李振山, 陈广庭. 粗糙度研究的现状及展望[J]. 中国沙漠, 1997, 17(1): 99—102.
- [26] 李国平, 赵邦杰, 卢敬华. 青藏高原总体输送系数的特征[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 60—67.
- [27] Oke T R. Boundary Layer Climate[M]. New York: London Met huen and COL TD, 1978: 31—60.
- [28] 胡隐樵, 奇跃进. 河西戈壁(化音)小气候和热量平衡特征的初步分析[J]. 高原气象, 1990, 9(2): 113—119.
- [29] 左洪超, 胡隐樵. 黑河地区绿洲和戈壁小气候特征的季节变化及其对比分析[J]. 高原气象, 1994, 13(3): 246—256.

Comparative Analysis on Momentum Bulk Transfer Coefficients and Roughness Length under the Different Underlying Surfaces in Upper and Middle Reaches of Heihe River Basin

SUN Jun¹⁻², HU Ze-yong¹, CHEN Xue-long³, ZHANG Min²,
HE Hui-geng⁴, ZHANG Yu-jie²

(1. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. Bureau of Meteorology of Suining City, Suining 629000, China;

3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China;

4. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China)

Abstract: The momentum bulk transfer coefficient and roughness length are calculated by the profile-flux method at Yingke oasis, Binggou sparse grass, Arou meadow and Dadongshu Mountain Yakou snow stations in upper and middle reaches of Heihe River basin. The results show that the roughness length is related to underlying surface properties and vegetation coverage and height. The maximum and minimum roughness lengths appeared at Yingke oasis station and Yakou snow station, respectively in summer compared with values at Arou meadow station and Binggou sparse grass station. The land cover properties influence the relativity of momentum bulk transfer coefficient on stability. At different stations the big roughness length is the better relativity of momentum bulk transfer coefficient to stability than the little one.

Key words: Profile-flux method; Momentum bulk transfer coefficient; Surface roughness length; Stability