

张海宏,姜海梅,周秉荣,等,2019.玉树隆宝 2014 年冬季冻土积雪对陆气通量关键参数的影响分析[J].气象,45(11):1550-1559. Zhang H H, Jiang H M, Zhou B R, et al, 2019. Impact analysis of frozen soil and snow on key parameters of land atmosphere flux at Longbao, Yushu in winter 2014[J]. Meteor Mon, 45(11):1550-1559(in Chinese).

玉树隆宝 2014 年冬季冻土积雪对 陆气通量关键参数的影响分析*

张海宏¹ 姜海梅² 周秉荣¹ 祁栋林¹

1 青海省气象科学研究所, 西宁 810001

2 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

提 要: 利用玉树隆宝湿地的观测资料, 分析了未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种情况下动量通量和感热通量的日变化情况, 计算了三种情况下动量总体输送系数、感热总体输送系数、动力学粗糙度和热力学粗糙度, 分析了附加阻尼和粗糙度雷诺数的关系, 并将三种附加阻尼的参数化方案进行了比较, 结果表明: 冻结状态下动量通量和感热通量的日变化幅度最大, 冻结有积雪覆盖时, 动量通量和感热通量的日变化幅度最小。动量总体输送系数 C_D 和感热总体输送系数 C_H 的值在冻结时最大, 冻结有积雪覆盖时最小, 动力学粗糙度和热力学粗糙度在冻结状况下最小, 冻结有积雪覆盖时最大。未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态下, 三种附加阻尼 kB^{-1} 参数化方案中, 幂函数型方案较为合适。

关键词: 高寒湿地, 总体输送系数, 粗糙度, 陆面过程参数化

中图分类号: P404

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.11.005

Impact Analysis of Frozen Soil and Snow on Key Parameters of Land Atmosphere Flux at Longbao, Yushu in Winter 2014

ZHANG Haihong¹ JIANG Haimei² ZHOU Bingrong¹ QI Donglin¹

1 Qinghai Institute of Meteorological Science, Xining 810001

2 School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science of Technology, Nanjing 210044

Abstract: Using the observation data from Longbao, Yushu of Qinghai Province, daily variations of momentum flux and sensible heat flux during unfrozen, frozen and frozen with snow covered periods are analyzed, momentum bulk transfer coefficient, sensible heat bulk transfer coefficient, aerodynamic roughness length, thermal roughness length are calculated, relationship between additional damping and roughness reynolds number are analyzed and three kB^{-1} parameterization schemes are compared. The results show that daily ranges of momentum flux and sensible heat flux are the biggest in frozen period and the smallest in frozen with snow covered period. Momentum bulk transfer coefficient C_D and sensible heat bulk transfer coefficient C_H are the biggest in frozen period and the smallest in frozen with snow covered period. Aerodynamic roughness length and thermal roughness length are the smallest in frozen period and the biggest in frozen with snow covered period. Power function type of three kB^{-1} parameterization schemes is the most suitable during unfrozen, frozen, and frozen with snow covered periods.

* 青海省科技厅项目(2018-SF-142)、国家自然科学基金项目(41505006)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001)、青海省气象局科研项目“野外微气象观测数据质量控制及检验”共同资助

2018 年 7 月 5 日收稿; 2019 年 3 月 15 日收修定稿

第一作者: 张海宏, 主要从事青藏高原陆面过程及气候变化影响研究. Email: pkuzhh@163.com

Key words: alpine wetland, bulk transfer coefficients, surface roughness, land surface process parameterization

引 言

总体输送系数包括地表动量拖曳系数(C_D)、热量输送系数(C_H)和水汽输送系数(C_E),当风速 $< 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,通常认为 $C_H \approx C_E$ 。在陆气相互作用和大气数值模拟研究中,总体输送系数是计算不同下垫面地表与大气之间物质和能量交换的关键参数,在大气环流和气候学研究中,也是计算地表热源强度最重要的参数之一,因此得到准确的总体输送系数是陆面过程参数化研究的关键(张强和卫国安, 2004;王慧等,2008)。地表粗糙度亦即空气动力学粗糙度长度,其定义为风速为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高度,与下垫面粗糙元的形态学特征和空间分布密切相关,它不仅是描绘下垫面空气动力学特征的重要物理量,而且是研究陆地与大气之间物质和能量交换过程的重要参数之一,准确获得地表粗糙度是改善陆面模式参数化方案、提升模式模拟效果的迫切需要(尚伦宇等,2010)。粗糙度随下垫面性质变化明显,与稳定度呈正相关,与风速呈负相关,摩擦速度随粗糙度增大而减小(何清等,2008)。非中性大气层结条件下,由地表粗糙度不均匀性所致的平均风速、位温梯度以及近地层大气稳定度的次网格分布都对感热通量计算产生影响(陈斌等,2010)。陆面变量(参数)扰动首先改变地表的潜热通量和感热通量,而地表通量的改变会通过陆气相互作用对局地大气的温、压、湿、风产生较大影响(王洋等,2014)。

目前大气科学界对于总体输送系数和地表粗糙度的研究已经取得了一些成果。李国平等(2002b)利用西藏的4个自动气象站的近地层梯度资料,用最小二乘法确定了各站各季节的地表粗糙度,应用廓线-通量法计算了总体输送系数并分析了其随时间的变化特征,发现青藏高原动量输送系数的多年平均值为 $3.53 \times 10^{-3} \sim 4.99 \times 10^{-3}$,热量输送系数的多年平均值为 $4.67 \times 10^{-3} \sim 6.73 \times 10^{-3}$,还讨论了总体输送系数与近地层大气层结稳定度、地表粗糙度以及地面风速等因子的关系,初步建立了可用常规气象站地面观测资料计算青藏高原总体输送系

数的拟合公式。杨兴国等(2010)利用在陇中黄土高原观测资料,采用空气动力学法计算了动量和感热总体输送系数,发现陇中黄土高原半干旱区动量和感热总体输送系数受下垫面植被的影响,在一年中呈现出双峰型特征,当大气处于不稳定状态时,总体输送系数随着风速的增大而减小,当大气处于稳定状态时,随着风速的增大而增大。岳平等(2015)利用 SACOL 站夏季晴天近地层湍流观测资料确定了大气动力学和热力学粗糙度长度,发现总体输送系数随稳定度的增大而减小。孙俊等(2012)利用廓线法计算了黑河地区的总体输送系数和地表粗糙度,发现地表粗糙度与植被覆盖度和高度以及下垫面的性质有关,下垫面状况影响动量总体输送系数对稳定度的依赖程度。李锁锁等(2010)利用黄河源区湍流观测资料结合单层超声观测资料计算了黄河上游玛曲地区草原下垫面空气动力学粗糙度和零平面位移并应用于陆面过程模式 CoLM 中,改进陆面参数后的模式对感热通量和潜热通量的模拟均有明显改善。陈世强和吕世华(2013)计算了金塔试验区内戈壁和沙漠的动力学和热力学粗糙度长度,代入 Noah 陆面模式,模拟的戈壁、沙漠上的地表温度和感热通量同观测值较为一致,提高了该模式在沙漠、戈壁特殊区域的模拟能力,有利于将耦合了 Noah 模式的中尺度模式更好地应用到绿洲系统的研究中。张果等(2016)针对 Noah 和 Noah MP 两套陆面物理过程参数化方案进行了评估,认为 Noah MP 方案提高了土壤水分和土壤温度,在东亚区域的整体模拟效果。杨耀先等(2014)利用那曲高寒气候与环境观测站的资料,应用一种独立的确定地表动力学粗糙度的方法及两种热力学粗糙度的参数化方案,得出了动力学粗糙度、热力学粗糙度以及附加阻尼的变化规律,发现动力学粗糙度在一定时间尺度上存在着波动,热力学粗糙度在高原季风前、盛行期、衰退期有不同的日变化和季节变化特征。

青藏高原地区冻土分布广泛,冻土中冰的存在极大地改变了土壤的热力性质。土壤冻结和融化时会释放或吸收大量的热量,从而影响能量在土壤层中的分配和地表能量平衡,冻土过程的模拟对于地

气相互作用、区域气候模拟和全球气候变化极为重要(李震坤等,2011)。积雪覆盖地表会阻碍地气之间的能量交换,积雪通过表面不同的反照率和不同的湍流通量形成了陆面与大气间独特的能量交换,影响近地层气象要素特征,反过来其对湍流和能量交换又有重要影响(李丹华等,2017)。由于青藏高原腹地人迹罕至,交通不便,观测资料匮乏,高原地区土壤冻结、积雪覆盖对陆气相互作用的影响研究较少。本文利用青海省气象科学研究所玉树隆宝野外观测站的微气象及涡动相关系统观测数据,通过分析探讨了未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种情况下动量通量和感热通量的日变化情况,计算了三种情况下动量总体输送系数、感热总体输送系数、动力学粗糙度和热力学粗糙度,分析了附加阻尼和粗糙度雷诺数的关系,并将三种附加阻尼的参数化方案进行了比较,为全面认识青藏高原地区陆气相互作用特征提供科学支持。

1 计算方法与观测资料

直接求解总体输送系数的方法主要有三种,分别是涡动相关法、廓线-通量法和经验函数法,其中涡动相关法最为准确(高世仰等,2017)。动量总体输送系数 C_D 和感热总体输送系数 C_H 可分别通过式(1)和式(2)计算而得(岳平等,2013):

$$C_D = \frac{u_*^2}{u^2} \quad (1)$$

$$C_H = \frac{\overline{w'T'}}{u(T_g - T_a)} \quad (2)$$

式中, u_* 为摩擦风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), u 为参考高度的水平风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), $\overline{w'T'}$ 分别为垂直风速脉动量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度脉动量(单位: $^\circ\text{C}$), $T_g - T_a$ 为地气温差(单位: $^\circ\text{C}$)。

动力学粗糙度是近地面本身的一种特性,是指地面上方风速为 $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的高度,当流体流经地表时,不同地表粗糙度对流体的影响程度也不同,常常用来度量地面对气流的粗糙程度(陈金雷等,2017)。长期以来国内外学者对于动力学粗糙度从计算方法和下垫面类型等方面做了一系列工作,主要方法有:风廓线拟合法、牛顿迭代法、TVM (temperature variance method) 法、Martano 法、无因次化风速法等。本文采用 Yang et al(2008)对数风廓线方法,根据 Monin-Obukhov 相似理论,含有层结

稳定度订正函数的近地层风速廓线方程为:

$$\ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) = \frac{ku}{u_*} + \psi_m(\zeta) \quad (3)$$

$$\psi_m(\zeta) = \begin{cases} 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - \\ 2\tan^{-1}x + \frac{\pi}{2}, & \zeta < 0 \\ -5\zeta, & \zeta > 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$x = (1 - 16\zeta)^{1/4} \quad (5)$$

式中, z_{0m} 为动力学粗糙度, k 为冯卡曼常数,取值 0.4, $\zeta = z/L$ 为大气稳定度参数, $\zeta > 0.01$ 时为稳定层结, $\zeta < -0.01$ 时为不稳定层结, L 为 Monin-Obukhov 长度。由式(3)~式(5)可以推出动力学粗糙度对数:

$$\ln z_{0m} = \ln z - \frac{k}{\sqrt{C_D}} - \psi_m(\zeta) \quad (6)$$

进而可计算出动力学粗糙度。

热力学粗糙度是指大气近地层满足 Monin-Obukhov 相似理论时温度廓线外延到空气温度等于地表温度时的高度(陈金雷等,2017)。根据 Monin-Obukhov 相似理论的方程:

$$C_D = \frac{k^2}{\ln^2\left[\frac{z}{z_{0m}} - \psi_m(\zeta)\right]} \quad (7)$$

$$C_H = \frac{k^2}{\ln\left[\frac{z}{z_{0m}} - \psi_m(\zeta)\right] \cdot \ln\left[\frac{z}{z_{0h}} - \psi_h(\zeta)\right]} \quad (8)$$

$$\psi_h(\zeta) = \begin{cases} 2\ln\left(\frac{1+y}{2}\right), & \zeta < 0 \\ -7.8\zeta, & \zeta > 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$y = 0.95(1 - 11.6\zeta)^{1/2} \quad (10)$$

由式(7)~式(10)可以得到热力学粗糙度对数,

$$\ln z_{0h} = \ln z - \frac{k\sqrt{C_D}}{C_H} - \psi_h(\zeta) \quad (11)$$

进而可计算出热力学粗糙度。

青海省气象科学研究所玉树隆宝野外观测站位于玉树州隆宝镇($33^\circ 10' \text{N}$, $96^\circ 34' \text{E}$),海拔高度为 4212 m,下垫面为沼泽性草甸覆盖的高寒湿地区(张海宏等,2017)。图 1 给出了玉树隆宝观测站的位置及照片,建站时间为 2011 年 10 月,2014 年增添了涡动相关和雪深等观测系统。观测的物理量包括空气温度、空气湿度、风速、风向、大气压、短波辐射、长波辐射、三维超声风、超声虚温、土壤温度、土壤湿度、土壤热通量、积雪深度、水汽和二氧化碳通量、甲烷浓度等。观测数据由数据采集器 CR5000

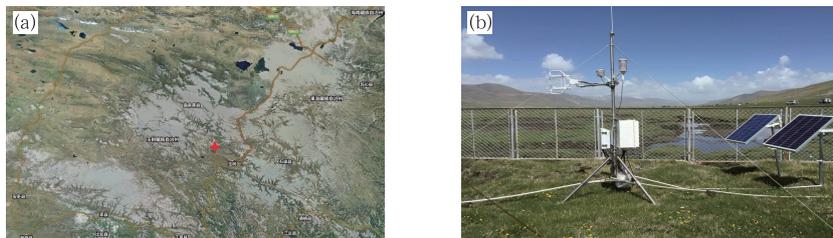


图 1 玉树隆宝观测站位置(a)及照片(b)

Fig. 1 Location (a) and picture (b) of Longbao Observation Station in Longbao, Yushu

处理并存储,所有仪器由 3 块 35 W 的太阳能板和 2 个 120 Ah 的电瓶供电,除仪器拆装和天气原因造成供电短暂中断外,一直连续进行观测。本文所选资料时间段为 2014 年 11 月至 2015 年 1 月,其中未冻结状态所用资料为 2014 年 11 月 8—15 日,期间 5~40 cm 土壤温度 $>0^{\circ}\text{C}$,冻结状态所用资料为 2014 年 11 月 22—29 日,期间 5~40 cm 土壤温度 $<0^{\circ}\text{C}$,冻结有积雪覆盖状态所用资料为 2015 年 1 月 6—13 日,期间 5~40 cm 土壤温度 $<0^{\circ}\text{C}$ 且 SR-50A 雪深仪监测结果显示积雪深度在 4~6 cm。

2 结果与分析

2.1 动量通量和感热通量的日变化

陆面过程研究的核心问题是下垫面与大气之间的能量传输和物质交换。陆面与大气之间的动量、能量和物质交换通过陆气通量反映出来,在大气动力学方程中可被描述为一些与下垫面有关的源、汇项,如决定风速变化的摩擦力项,决定大气温湿变化的感热项和潜热项等(张瑛等,2011)。土壤的热容量远大于空气,土壤的热状况及其变化将会对大气的陆面下边界起重要的作用,在环境相同的条件下,

雪地表面的感热通量比裸地表面的感热通量小很多(单机坤等,2013)。图 2 为玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖情况下动量通量(τ)和感热通量(H)的日变化情况,所用观测资料为典型晴天条件下的 30 分钟数据的平均值。从动量通量的日变化情况来看,在未冻结状态下动量通量的日变化幅度为 $0.27 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,冻结状态下的日变化幅度达到 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,冻结有积雪覆盖时的日变化幅度最小,仅有 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ 。从感热通量的日变化情况来看,未冻结状态下的日变化幅度为 $90 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,冻结状态下的日变化幅度达到 $180 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,冻结且有积雪覆盖时的日变化幅度为 $80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。冻结状态下动量通量和感热通量的日变化幅度最大,冻结有积雪覆盖时动量通量和感热通量的日变化幅度最小,未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种状态下,动量通量和感热通量白天的值差异较为明显,而夜间差异较小。

2.2 总体输送系数

动量总体输送系数和热量总体输送系数分别表征了湍流动力作用和湍流热力作用,是衡量湍流强弱程度的物理量(周明煜等,2000)。通常利用总体输送系数的参数化公式确定陆气之间能量和物质的

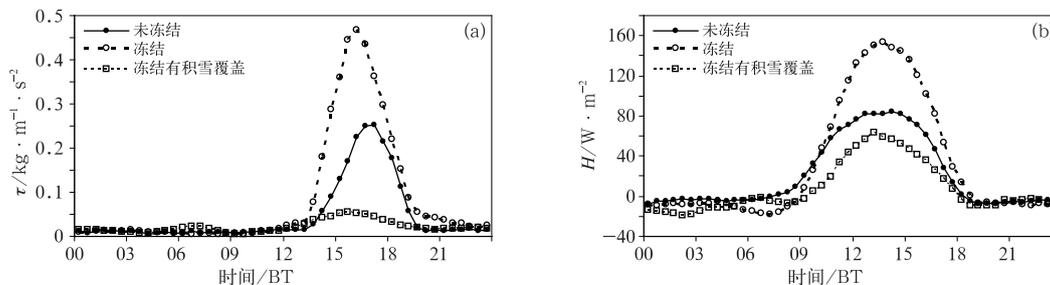


图 2 未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖情况下动量通量(a)和感热通量(b)的日变化

Fig. 2 Daily variations of momentum flux (a) and sensible heat flux (b) during unfrozen, frozen and frozen with snow covered periods

交换。总体输送系数不仅与大气动力状态存在联系，而且与大气热力状态密切相关(岳平等,2013)。总体输送系数对层结稳定度的变化较为敏感(高世仰等,2017)。当地表有植被覆盖时,会导致动量总体输送系数增大,而感热总体输送系数减小(王澄海等,2007)。图 3 为玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态时不稳定层结和稳定层结条件下摩擦速度平方(u_*^2)与水平风速平方(u^2)的关系,回归直线的斜率即代表动量输送系数 C_D 。图 4 为玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态时不稳定层结和稳定层结条件下 $w'T'$ 与 $u(T_g - T_a)$ 的关系,回归直线的斜率即代表感热输送系数 C_H 。

对于青藏高原地区总体输送系数的计算,前人已做过很多研究。李国平等(2002a;2002b;2003)利用通量廓线法计算得到的青藏高原那曲、改则、狮泉

河地区 C_D 为 $4.3 \times 10^{-3} \sim 4.8 \times 10^{-3}$, C_H 为 $5.7 \times 10^{-3} \sim 6.6 \times 10^{-3}$,周明煜等(2000)利用涡动相关法计算出当雄、昌都地区 C_D 为 $1.8 \times 10^{-3} \sim 4.4 \times 10^{-3}$, C_H 为 $1.5 \times 10^{-3} \sim 4.7 \times 10^{-3}$,高志球等(2000)利用涡动相关法计算出那曲地区 C_D 为 3.7×10^{-3} ,钱泽雨等(2005)利用空气动力学方法计算得到的北麓河地区的 C_D 为 1.74×10^{-3} , C_H 为 $1.37 \times 10^{-3} \sim 5.93 \times 10^{-3}$,前人的研究多集中于总体输送系数在不同季节的变化,对于冻结前后和积雪覆盖状态下总体输送系数的差异性研究并不多见。表 1 给出了玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态下 C_D 和 C_H 的值。不稳定层结和稳定层结条件下, C_D 和 C_H 的值均表现为冻结状态下最高,冻结有积雪覆盖状态下最低,这反映了高寒湿地下垫面的湍流作用在土壤冻结之后增强,有积雪覆

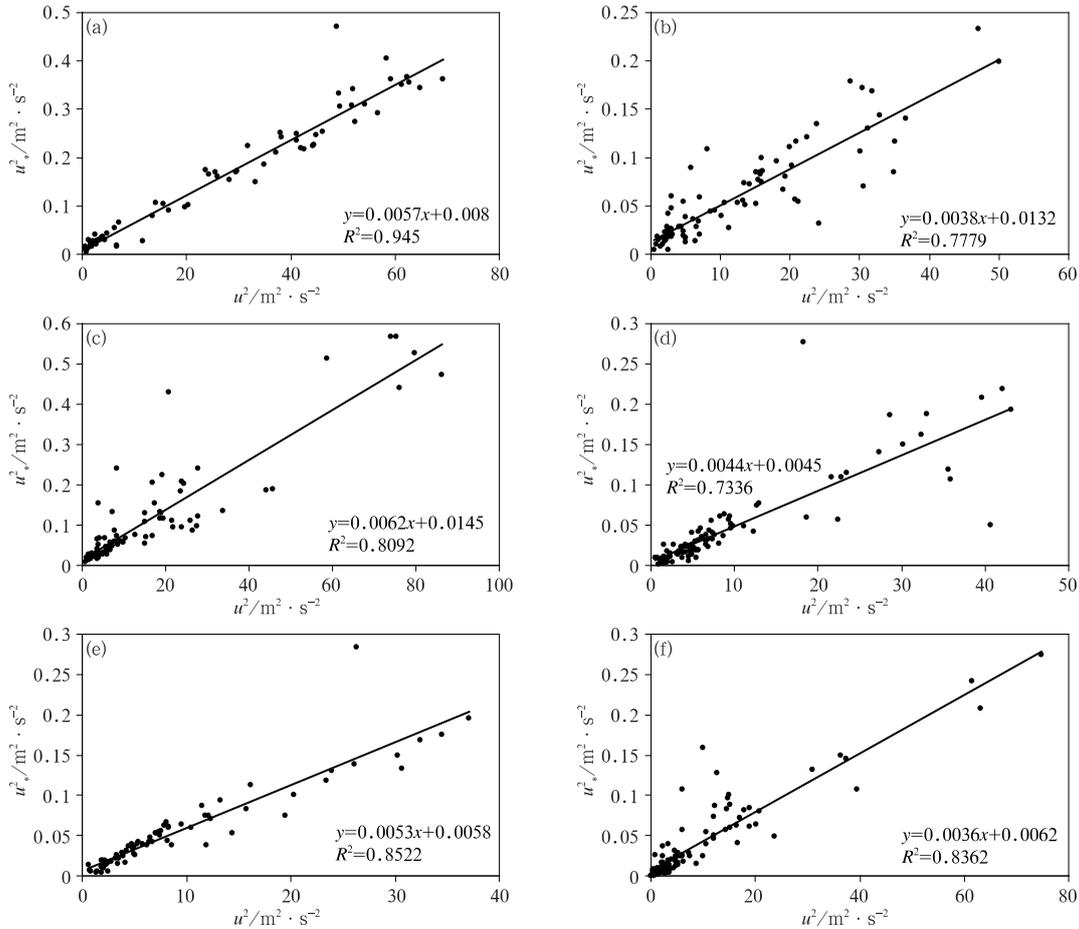


图 3 不稳定层结(a,c,e)和稳定层结(b,d,f)条件下 u_*^2 与 u^2 的关系

(a,b)未冻结,(c,d)冻结,(e,f)冻结有积雪覆盖

Fig. 3 Relationship between u_*^2 and u^2 under unstable stratification (a, c, e)

and stable stratification (b, d, f)

(a, b) unfrozen, (c, d) frozen, (e, f) frozen with snow covered

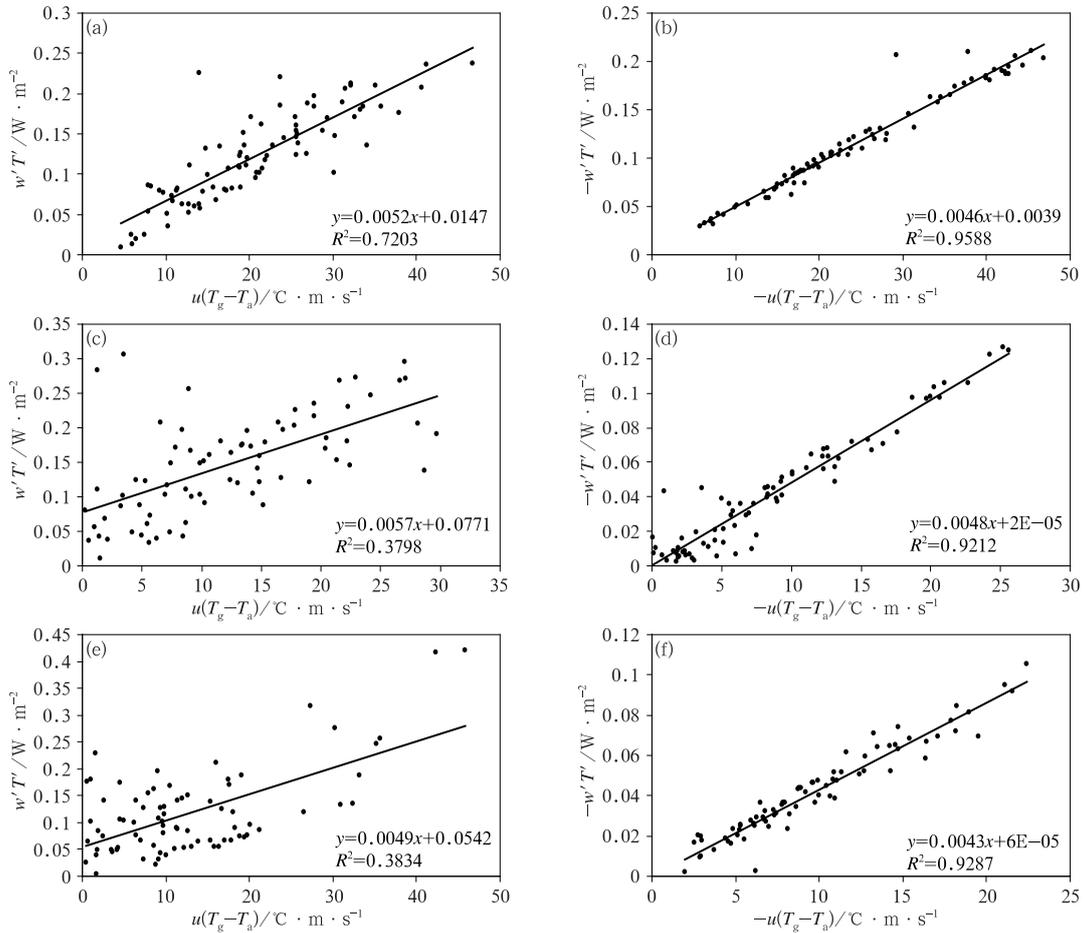


图 4 同图 3, 但为 $w'T'$ 与 $u(T_g - T_a)$ 的关系

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for relationship between $w'T'$ and $u(T_g - T_a)$

表 1 玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖情况下总体输送系数
Table 1 Bulk transfer coefficients during unfrozen, frozen and frozen with snow covered periods at Longbao, Yushu

	$C_D/10^{-3}$			$C_H/10^{-3}$		
	未冻结	冻结	冻结有积雪覆盖	未冻结	冻结	冻结有积雪覆盖
不稳定层结	5.7	6.2	4.3	5.2	5.7	4.9
稳定层结	3.8	4.4	3.6	4.6	4.8	4.3
平均	4.75	5.3	3.95	4.9	5.25	4.6

盖时减弱。

2.3 动力学粗糙度和热力学粗糙度

图 5 为玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖时动力学粗糙度的对数 $\ln z_{0m}$ 和热力学粗糙度的对数 $\ln z_{0h}$ 的频率分布及五点平滑曲线, 根据滑动平均曲线最高点确定的动力学粗糙度 z_{0m} 和热力学粗糙度 z_{0h} 的值见表 2, z_{0m} 和 z_{0h} 在冻结状况下最小, 冻结有积雪覆盖时最大。 z_{0m} 在冻结和积雪覆盖前后变化差异较 z_{0h} 明显。尚伦宇等(2010)通过计

算玛曲地区冻融过程的地表粗糙度并分析变化情况发现, 在从未冻结、冻结至融化后的过程中, 地表粗糙度呈逐渐减小的趋势。王玉玉等(2014)研究结果表明, 当地表有积雪覆盖时, 在风的吹拂下雪粒发生跃移会造成地表粗糙度增大, 当地面积雪融化或者风速不足以吹拂雪粒运动时, 粗糙度相对较小。陈金雷等(2017)计算了黄河源区曲麻莱地区夏季的 z_{0m} 和 z_{0h} , 发现 z_{0h} 小于 z_{0m} 。本文得出的 z_{0m} 和 z_{0h} 的结果与前人研究结论较为一致。

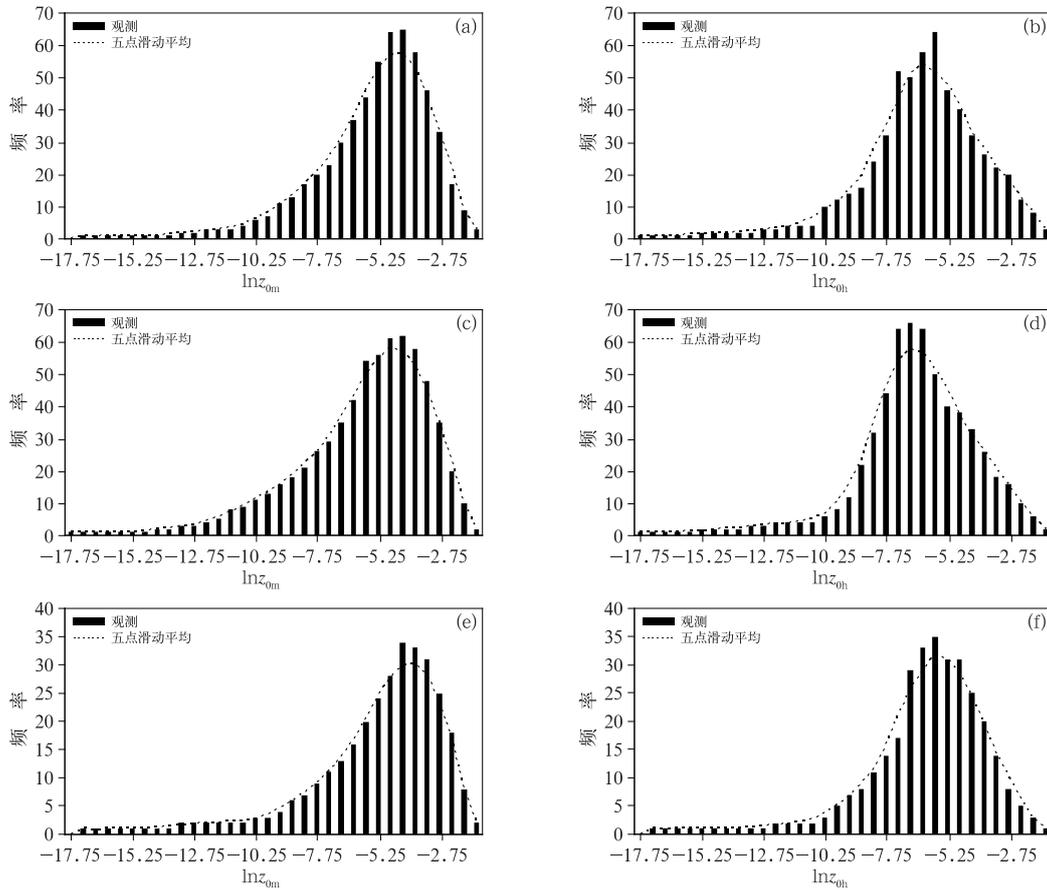


图 5 玉树隆宝湿地 $\ln z_{0m}$ (a, c, e) 和 $\ln z_{0h}$ (b, d, f) 频率分布

(a, b) 未冻结, (c, d) 冻结, (e, f) 冻结有积雪覆盖

Fig. 5 Frequency distribution of $\ln z_{0m}$ (a, c, e) and $\ln z_{0h}$ (b, d, f) at alpine wetland of Longbao, Yushu

(a, b) unfrozen, (c, d) frozen, (e, f) frozen with snow covered

表 2 玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖情况下 z_{0m} 和 z_{0h}

Table 2 Aerodynamic roughness length (z_{0m}) and thermal roughness length (z_{0h}) during unfrozen, frozen and frozen with snow covered periods at Longbao, Yushu

	z_{0m}/m	z_{0h}/m
未冻结	0.0143	0.0076
冻结	0.0086	0.0013
冻结有积雪覆盖	0.0235	0.0096

2.4 附加阻尼的参数化

附加阻尼 (kB^{-1}) 是研究地表与大气之间物质和能量交换过程的基本参数,也是陆面过程模式与地表通量遥感估算模型的重要变量之一,附加阻尼定义为 $kB^{-1} = \ln(z_{0m}/z_{0h})$,影响 kB^{-1} 的因子较

多,如气象条件、植被结构以及下垫面状况等(鞠英芹等, 2014)。Brutsaert (1975; 1982; 1998) 认为 kB^{-1} 依赖于表面性质,与粗糙度雷诺数有关。Troufleau et al (1997) 研究表明, kB^{-1} 和许多因素有关系,包括结构参数和气象条件等。Lhomme et al (1997) 利用 Shuttleworth-Wallace 两层模型,结合对地表辐射温度的线性假设,获得 kB^{-1} 的解析解后得出, kB^{-1} 对于某一类冠层不是一个常数,随叶面积指数、株高、植被覆盖率、水分胁迫以及气象条件的变化而变化。由于 kB^{-1} 不能从观测中直接获得,需要多个要素的观测通过一系列计算得到,这些输入变量在观测中的任何误差都会对 kB^{-1} 产生影响,因此 kB^{-1} 是一个难以确定的量。过去几十年,不同研究者已发展了多个 kB^{-1} 的参数化方案。周德刚 (2016) 选取了一些常用的热力参数化方案,通过敦煌站夏季估算的感热通量与野外观测的比较,评价

了这些参数化方案在西北干旱区的适用性,结果表明 Y08 方案(Yang et al,2008)估算的感热通量相对比较合理,可以用来研究西北干旱区的夏季地表感热输送特征。

在青藏高原地区,由于下垫面类型较为复杂,何种参数化方案对于高寒湿地下垫面较为合适尚无研究结论。本文选取最新的三种 kB^{-1} 参数化方案见表 3。粗糙度雷诺数 $Re_* = u_* z_{0m}/\nu$, ν 为运动学黏性系数,本文取值为 $1.48 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。图 6 给出了玉树隆宝湿地未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖

情况下 kB^{-1} 与 Re_* 的关系,经优选拟合得出二者的关系为幂函数型。

将三种参数化方案计算得到的 kB^{-1} 值与利用观测资料计算得出的 kB^{-1} 值进行误差分析(表 4),未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态下参数化方案 1 计算得到的 kB^{-1} 值与观测值最为接近,这表明青藏高原湿地下垫面在未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态下 kB^{-1} 与 Re_* 之间满足幂函数型关系,第一种参数化方案较为合适。

表 3 kB^{-1} 参数化方案

Table 3 Parameterization schemes of kB^{-1}

序号	参数化方案	出处
1	$kB^{-1} = \alpha Re_*^{0.45}$	Zeng and Dickinson,1998
2	$kB^{-1} = \ln(Re_* / 70) + 7.2u_*^{0.5} t_* ^{0.25}$	Yang et al,2008
3	$kB^{-1} = 10^{-0.4z_{0m}/0.07} \kappa \sqrt{Re_*}$	Chen and Zhang,2009

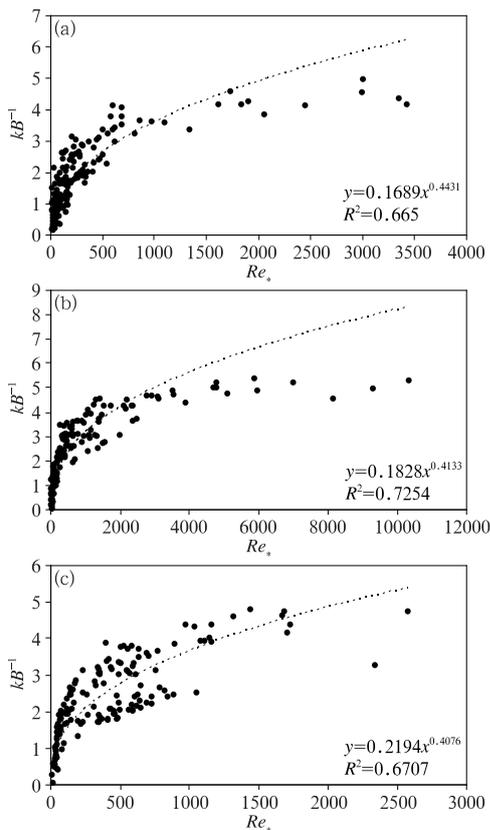


图 6 玉树隆宝地区(a)未冻结,(b)冻结,(c)冻结有积雪覆盖 kB^{-1} 与 Re_* 的关系
Fig.6 Relationship between kB^{-1} and Re_* at alpine wetland of Longbao, Yushu
(a) unfrozen, (b) frozen,
(c) frozen with snow covered

表 4 未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖状态下三种 kB^{-1} 参数化方案比较

Table 4 Three kB^{-1} parameterization schemes comparison during unfrozen, frozen and frozen with snow covered periods

	参数化方案	拟合方程	R^2	RMSE
未冻结	1	$y=0.89x$	0.86	1.3
	2	$y=0.77x$	0.85	1.5
	3	$y=0.69x$	0.84	1.9
冻结	1	$y=1.05x$	0.94	0.7
	2	$y=0.84x$	0.79	1.0
	3	$y=0.89x$	0.86	1.3
冻结有积雪覆盖	1	$y=1.09x$	0.87	0.6
	2	$y=0.79x$	0.65	1.1
	3	$y=0.78x$	0.77	1.3

3 结 论

本文利用玉树隆宝湿地观测站 2014 年 12 月至 2015 年 1 月微气象及涡动相关系统的观测资料,分析了未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种情况下动量通量和感热通量的日变化情况,计算了三种情况下动量总体输送系数、感热总体输送系数、动力学粗糙度和热力学粗糙度,分析了附加阻尼和粗糙度雷诺数的关系,并将三种附加阻尼的参数化方案进行了比较,主要结论有:

(1) 冻结状态下动量通量和感热通量的日变化幅度最大,冻结有积雪覆盖时,动量通量和感热通量

的日变化幅度较小。

(2) 未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种情况下动量总体输送系数 C_D 和热量总体输送系数 C_H 的值在冻结时最大,冻结有积雪覆盖时最小。

(3) 未冻结、冻结和冻结有积雪覆盖三种情况下动力学粗糙度 z_{0m} 和热力学粗糙度 z_{0h} 在冻结状况下最小,冻结有积雪覆盖时最大。

(4) 本文选取的三种附加阻尼 kB^{-1} 参数化方案中,幂函数型方案对高寒湿地下垫面较为合适,得出的 kB^{-1} 值与观测值最为接近。

参考文献

- 陈斌,徐祥德,丁裕国,等,2010. 地表粗糙度非均匀性对模式湍流通量计算的影响[J]. 高原气象,29(2):340-348. Chen B, Xu X D, Ding Y G, et al, 2010. The impact of heterogeneity of land surface roughness length on estimation of turbulent flux in model [J]. Plateau Meteor, 29(2):340-348(in Chinese).
- 陈金雷,文军,王欣,等,2017. 黄河源高寒湿地-大气间暖季水热交换特征及关键影响参数研究[J]. 大气科学,41(2):302-312. Chen J L, Wen J, Wang X, et al, 2017. Characteristics of water and heat exchanges and their crucial influencing factors on the alpine wetland during the warm season in the source region of the Yellow River[J]. Chin J Atmos Sci, 41(2): 302-312 (in Chinese).
- 陈世强,吕世华,2013. 荒漠区粗糙度长度的确定及在模式中的应用[J]. 中国沙漠,33(1):174-178. Chen S Q, Lü S H, 2013. Calculation of roughness length of desert and its application in land surface process model[J]. J Desert Res, 33(1):174-178(in Chinese).
- 高世仰,张杰,罗琦,2017. 青藏高原非均匀下垫面热力输送系数的估算[J]. 高原气象,36(3):596-609. Gao S Y, Zhang J, Luo Q, 2017. Estimation of the heat transfer coefficient over inhomogeneous underlying surface on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Plateau Meteor, 36(3):596-609(in Chinese).
- 高志球,王介民,马耀明,等,2000. 不同下垫面的粗糙度和中性曳力系数研究[J]. 高原气象,19(1):17-24. Gao Z Q, Wang J M, Ma Y M, et al, 2000. Study on roughness lengths and drag coefficients over the different underlying surfaces[J]. Plateau Meteor, 19(1):17-24(in Chinese).
- 何清,缪启龙,张瑞军,等,2008. 塔克拉玛干沙漠肖塘地区空气动力学粗糙度分析[J]. 中国沙漠,28(6):1011-1016. He Q, Miao Q L, Zhang R J, et al, 2008. Analysis on aerodynamic roughness in XiaoTang in the Taklimakan Desert[J]. J Desert Res, 28(6): 1011-1016(in Chinese).
- 鞠英芹,徐自为,刘绍民,等,2014. 农田和草地下垫面上附加阻尼 kB^{-1} 变化特征的分析[J]. 高原气象,33(1):55-65. Ju Y Q, Xu Z W, Liu S M, et al, 2014. Study on kB^{-1} on farmland and grass underlying surfaces[J]. Plateau Meteor, 33(1): 55-65 (in Chinese).
- 李丹华,文莉娟,隆霄,等,2017. 积雪对玛曲局地微气象特征影响的观测研究[J]. 高原气象,36(2):330-339. Li D H, Wen L J, Long X, et al, 2017. Observation study on effects of snow cover on local micro meteorological characteristics in Maqu [J]. Plateau Meteor, 36(2):330-339(in Chinese).
- 李国平,段廷扬,巩远发,等,2002a. 青藏高原近地层通量特征的合成分析[J]. 气象学报,60(4):453-460. Li G P, Duan T Y, Gong Y F, et al, 2002a. A composite study of the surface fluxes on the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteor Sin, 60(4): 453-460 (in Chinese).
- 李国平,段廷扬,吴贵芬,2003. 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,23(1):13-18. Li G P, Duan T Y, Wu G F, 2003. The intensity of surface heat source and surface heat balance on the western Qinghai-Xizang Plateau [J]. Sci Geogr Sin, 23(1): 13-18(in Chinese).
- 李国平,赵邦杰,卢敬华,2002b. 青藏高原总体输送系数的特征[J]. 气象学报,60(1):60-67. Li G P, Zhao B J, Lu J H, 2002b. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteor Sin, 60(1):60-67(in Chinese).
- 李锁锁,吕世华,柳媛普,等,2010. 黄河上游玛曲地区空气动力学参数的确定及其在陆面过程模式中的应用[J]. 高原气象,29(6):1408-1413. Li S S, Lü S H, Liu Y P, et al, 2010. Determination of aerodynamical parameter in Maqu area in the upper reach of Yellow River and its application in land surface process model [J]. Plateau Meteor, 29(6):1408-1413(in Chinese).
- 李震坤,朱伟军,武炳义,2011. 大气环流模式 CAM 中土壤冻融过程改进对东亚气候模拟的影响[J]. 大气科学,35(4):683-693. Li Z K, Zhu W J, Wu B Y, 2011. Impact of improved soil freezing process on climate in east Asia using NCAR CAM model [J]. Chin J Atmos Sci, 35(4):683-693(in Chinese).
- 钱泽雨,胡泽勇,杜萍,等,2005. 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,24(1):43-48. Qian Z Y, Hu Z Y, Du P, et al, 2005. Energy transfer of near surface layer and micrometeorology characteristics in Bailuhe Area of Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteor, 24(1):43-48(in Chinese).
- 单机坤,沈学顺,李维京,2013. 陆气相互作用对中尺度对流系统影响的研究进展[J]. 气象,39(11):1413-1421. Shan J K, Shen X S, Li W J, 2013. Effect of land atmosphere interaction on the process of mesoscale system [J]. Meteor Mon, 39(11): 1413-1421(in Chinese).
- 尚伦宇,吕世华,张宇,等,2010. 青藏高原东部土壤冻融过程中地表粗糙度的确定[J]. 高原气象,29(1):17-22. Shang L Y, Lü S H, Zhang Y, et al, 2010. Determination of surface roughness length during soil freezing and thawing season over eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteor, 29(1):17-22(in Chinese).
- 孙俊,胡泽勇,陈学龙,等,2012. 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,31(4):920-926. Sun J, Hu Z Y, Chen X L, et al, 2012. Comparative analysis on momentum bulk transfer coefficients and roughness length under the different underlying surfaces in upper and middle reaches of Heihe River basin [J]. Plateau Meteor, 31(4): 920-926 (in

- Chinese).
- 王澄海,黄宝霞,杨兴国,2007. 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, 26(1): 30-38.
- Wang C H, Huang B X, Yang X G, 2007. A study on surface flux and the bulk transfer coefficients over middle Gansu Region of Loess Plateau under the wheat and bare fields[J]. Plateau Meteor, 26(1): 30-38(in Chinese).
- 王慧,李栋梁,胡泽勇,等,2008. 陆面上总体输送系数研究进展[J]. 地球科学进展, 23(12): 1249-1259.
- Wang H, Li D L, Hu Z Y, et al, 2008. A review of the study of the bulk transfer coefficients over the land[J]. Adv Earth Sci, 23(12): 1249-1259 (in Chinese).
- 王洋,曾新民,葛洪彬,等,2014. 陆面特征量初始扰动的敏感性及其集合预报试验[J]. 气象, 40(2): 146-157.
- Wang Y, Zeng X M, Ge H B, et al, 2014. Sensitivity simulation of heavy rainfall to land surface characteristics and ensemble forecast test[J]. Meteor Mon, 40(2): 146-157(in Chinese).
- 王玉玉,姚济敏,韩海东,等,2014. 科其喀尔冰川表碛区空气动力学粗糙度分析[J]. 高原气象, 33(3): 762-768.
- Wang Y Y, Yao J M, Han H D, et al, 2014. Analysis of aerodynamic roughness of the debris-covered Keqicar Glacier[J]. Plateau Meteor, 33(3): 762-768(in Chinese).
- 杨兴国,张强,杨启国,等,2010. 陇中黄土高原半干旱区总体输送系数的特征[J]. 高原气象, 29(1): 44-50.
- Yang X G, Zhang Q, Yang Q G, et al, 2010. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Middle-Gansu semi-arid region of Loess Plateau [J]. Plateau Meteor, 29(1): 44-50(in Chinese).
- 杨耀先,李茂善,胡泽勇,等,2014. 藏北高原高寒草甸地表粗糙度对地气通量的影响[J]. 高原气象, 33(3): 626-636.
- Yang Y X, Li M S, Hu Z Y, et al, 2014. Influence of surface roughness on surface-air fluxes in alpine meadow over the northern Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 33(3): 626-636(in Chinese).
- 岳平,张强,李耀辉,等,2013. 半干旱草原下垫面动量和感热总体输送系数参数化关系研究[J]. 物理学报, 62(9): 099202.
- Yue P, Zhang Q, Li Y H, et al, 2013. Bulk transfer coefficients of momentum and sensible heat over semiarid grassland surface and their parameterization scheme[J]. Acta Phys Sin, 62(9): 099202 (in Chinese).
- 岳平,张强,赵文,等,2015. 黄土高原半干旱草地近地层湍流温湿特征及总体输送系数[J]. 高原气象, 34(1): 21-29.
- Yue P, Zhang Q, Zhao W, et al, 2015. Characteristics of turbulence transfer in surface layer over semi-arid grassland in Loess Plateau in summer[J]. Plateau Meteor, 34(1): 21-29(in Chinese).
- 张果,薛海乐,徐晶,等,2016. 东亚区域陆面过程方案 Noah 和 Noah-MP 的比较评估[J]. 气象, 42(9): 1058-1068.
- Zhang G, Xue H L, Xu J, et al, 2016. The WRF performance comparison based on Noah and Noah MP land surface processes on East Asia[J]. Meteor Mon, 42(9): 1058-1068(in Chinese).
- 张海宏,肖宏斌,祁栋林,等,2017. 青藏高原湿地土壤冻结、融化期间的陆面过程特征[J]. 气象学报, 75(3): 481-491.
- Zhang H H, Xiaohao H B, Qi D L, et al, 2017. Features of land surface process over wetland at Tibetan Plateau during soil freezing and thawing periods[J]. Acta Meteor Sin, 75(3): 481-491(in Chinese).
- 张强,卫国安,2004. 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, 23(3): 305-312.
- Zhang Q, Wei G A, 2004. Experimental study on bulk drag and transfer coefficients over Gobi[J]. Plateau Meteor, 23(3): 305-312(in Chinese).
- 张瑛,肖安,马力,等,2011. WRF 耦合 4 个陆面过程对“6.19”暴雨过程的模拟研究[J]. 气象, 37(9): 1060-1069.
- Zhang Y, Xiao A, Ma L, et al, 2011. Simulation of the “19 June 2010” heavy rainfall event by using WRF coupled with four land surface processes[J]. Meteor Mon, 37(9): 1060-1069(in Chinese).
- 周德刚,2016. 关于用台站资料估算西北干旱区夏季感热通量的热力学参数化比较[J]. 大气科学, 40(2): 411-422.
- Zhou D G, 2016. Testing of surface flux parameterizations for estimating summer sensible heat flux over the arid region of northwest China from China Meteorological Administration data [J]. Chin J Atmos Sci, 40(2): 411-422(in Chinese).
- 周明煜,徐祥德,卞林根,等,2000. 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:52-56.
- Zhou M Y, Xu X D, Bian L G, et al, 2000. Observation Analysis and Dynamics Study of Atmospheric Boundary Layer over Qinghai-Tibet Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press: 52-56(in Chinese).
- Brutsaert W, 1975. A theory for local evaporation (or heat transfer) from rough and smooth surfaces at ground level[J]. Water Resour Res, 11(4): 543-550.
- Brutsaert W, 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History and Applications[M]. Netherlands: Springer.
- Brutsaert W, 1998. Land-surface water vapor and sensible heat flux: spatial variability, homogeneity, and measurement scales [J]. Water Resour Res, 34(10): 2433-2442.
- Chen F, Zhang Y, 2009. On the coupling strength between the land surface and the atmosphere: from viewpoint of surface exchange coefficients[J]. Geophys Res Lett, 36(10): L10404.
- Lhomme J P, Troufleau D, Monteny B, et al, 1997. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation II. A model for the kB^{-1} parameter[J]. J Hydrol(188/189): 839-854.
- Troufleau D, Lhomme J P, Monteny B, et al, 1997. Sensible heat flux and radiometric surface temperature over sparse Sahelian vegetation. I. An experimental analysis of the kB^{-1} parameter[J]. J Hydrol(188/189): 815-838.
- Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al, 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: characteristics and parameterization[J]. J Appl Meteor Climatol, 47(1): 276-290.
- Zeng X B, Dickinson R E, 1998. Effect of surface sublayer on surface skin temperature and fluxes[J]. J Climate, 11(4): 537-550.