

文章编号: 1001-8166(2008)12-1249-11

陆面上总体输送系数研究进展*

王 慧^{1,2}, 李栋梁^{1,2*}, 胡泽勇³, 王介民³

(1. 南京信息工程大学, 江苏 南京 210044; 2. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃 兰州 730020;
3. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:从陆面上总体输送系数的研究历程、计算方法和时空变化特征以及与地面各要素之间的依赖关系等几个方面, 对该领域的研究工作进行了回顾和总结。在此基础上, 探讨了该领域研究中存在的几点科学问题: ①需要解决非均匀下垫面地表参数的计算和观测以及发展适用于非均匀下垫面的相似性理论等难题; ②对我国湿润地区地表总体输送系数的研究需要加强; ③能否对非均匀复杂下垫面陆气相互作用过程进行全面的认识, 地表参数由“点”到“面”的推广是关键也是难题。最后对利用卫星遥感结合地面观测资料估算非均匀下垫面地表特征参数和能量通量的可行方法进行了讨论与展望。

关 键 词:总体输送系数; 陆面过程; 地面要素; 变化特征

中图分类号: P404 **文献标志码:** A

1 引 言

总体输送系数^[1]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)。当风速小于 10 m/s 时, 通常假定 $C_E \approx C_H$ ^[2]。在陆气相互作用和大气数值模拟研究中, 它们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。因此可以说, 获得准确的总体输送系数是陆面过程参数化研究的关键。陆面过程野外试验是陆面过程参数化研究的基础, 自从一些大型野外观测试验的不断开展以来, 对于不同下垫面地表总体输送系数的计算和研究就一直没有间断过, 至今已有三十多年的研究历程。在早期, 由于海面十分平滑, 除了在存在明显的洋流区外, 层结稳定度影响可以略去不计^[3], 因此, 在海气相互作用研

究中, 海面的总体输送系数就受到了很大的关注^[4-6]。而陆面构成是复杂且不均一的, 要考虑变化范围很大的粗糙度, 并且陆地表面层结稳定度也呈现出较大的日变化, 使总体输送系数的研究具有一定的难度。又由于观测资料稀少, 所以这时期对陆面上总体输送系数的研究主要是理论上的估算, 由于不同作者的估算方法很不相同, 最后得到的陆面上的总体输送系数值差别很大, 并且一般比实际值都偏大很多。如 Cressman^[7]利用 Sawyer^[8]的理论估算青藏高原和落基山的 $C_D > 8.0 \times 10^{-3}$; Fiedler^[9]通过计算粗糙度参数 z_0 从而估算 C_D 得出的结果也非常大; 叶笃正等^[10]经过比较估算青藏高原上 C_D 值在 $6 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3}$ 之间, 最后取平均值为 8.0×10^{-3} 等。后来通过一系列的野外科学试验, 才知道高原上由观测资料计算得到的 C_D 值比理论上的估算值小一半左右。由于陆面上 C_D 的取

* 收稿日期: 2008-09-08 修回日期: 2008-10-30

* 基金项目: 国家自然科学基金面上项目“我国干旱区地表感热及对东亚夏季风北边缘带位置的影响”(编号: 40875059); 干旱气象科学研究基金项目(编号: IAM200801)资助。

作者简介: 王慧(1982-), 女, 山东曹县人, 在读博士生, 主要从事陆面过程和气候变化研究。E-mail: jing0517@163.com

* 通讯作者: 李栋梁(1957-), 男, 甘肃通渭人, 教授, 博士生导师, 主要从事青藏高原气象学气候变化和预测、环境动力学等的研究。

E-mail: lid@nuist.edu.cn

值不能统一,所以这一时期不同的大气环流模式中 C_D 值的给定也比较随意^[11-12]。

到了 20 世纪 70 年代后期,随着世界各国陆面过程试验研究的相继实施,陆面上总体输送系数的研究也由理论估算转到了实际观测,取得了实质性的进展。到目前为止,全球开展过的大型陆面过程野外试验总数已超过 50 个^[13-15],表 1 给出了利用各野外试验观测资料计算出的不同下垫面的总体输送系数值,从表 1 中可以发现,我国国内的观测试验多数集中在北方干旱、半干旱区和青藏高原区,现有对陆面上总体输送系数的观测研究已经包括了高原河谷、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、农田和湖滨下垫面等类型。最近的十几年是开展陆面过程野外试验的兴盛时期,大量珍贵的试验观测资料的获得为陆面上总体输送系数的计算和研究以及大气环流模式(GCM)的改进和发展起到了积极的推动作用。现在以计算地表动量、感热和潜热通量为核心的下边界物理过程也已理论化为相对独立的部分,从中小尺度环流模式中分离出来,称为陆面过程模式^[16]。随着新的观测仪器和观测手段的应用,所得到的观测数据的质量和精度也越来越高。同时,对于海面上总体输送系数的研究也一直持续不断,取得了不少研究成果^[38-43]。总体来讲,从 20 世纪 80 年代到目前的二十几年间,对陆面上各典型下垫面总体输送系数的区域分布和时空变化特征及其与影响因子的依赖关系等方面都取得了一定的研究成果,然而由于陆面构成的复杂性和不均匀性,已有的这些对总体输送系数的研究仍然显得很单薄,所以对其进行更为深入、全面的探究以改善数值模式的预报效果以及对青藏高原和我国干旱、半干旱区内地表感热通量较为准确的估算都具有重要的实际意义,这已成为国际上竞相研究的前沿科学问题之一,同时也是地球气候系统科学领域内的一个困难挑战。在我们瞻望未来的同时重新回顾历史,对陆面上总体输送系数的研究做一次较全面、系统的总结是非常必要的,这不仅有利于我们更加客观地认识总体输送系数的研究水平,更加有利于我们意识到其中的不足,更好地凝练下一步的研究目标和创新思路。

2 总体输送系数的计算方法

求解总体输送系数的方法可分为直接法和间接法两种。直接法包括:涡旋相关法、廓线-通量法和经验函数参数化方法等 3 种;间接方法就是倒算法,

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。这些方法在文献中都有详细的介绍,这里就不再赘述。目前大家普遍认为涡旋相关法计算出来的总体输送系数是最精确的,但这种方法对观测仪器要求较高且价格昂贵,一般气象观测站根本不具备条件,所以现在还无法普遍使用。从表 1 中我们可以发现使用不同的方法计算出的同一地区的总体输送系数值会有一些差异,如改则和敦煌等。这说明总体输送系数对计算方法还是具有一定的依赖性。

3 陆面上总体输送系数的特征

3.1 C_D 和 C_H 值的比较

一直以来,大家普遍认为总体输送系数在陆面上会 $C_D < C_H$ 与海面上的特征正好相反^[44]。然而,近来在对陆面上其他下垫面输送系数的研究中却发现了 $C_D > C_H$ 的现象^[28-31-34],具体原因尚不清楚,这也是一直困惑大家的一个难题。在陆面上,到底是动力作用更强还是热力作用更强一些呢?具体原因又是什么?通过对不同地区的 C_D 和 C_H 值的比较分析我们对此可能会有所了解。对表 1 中同一地区 C_D 与 C_H 值的比较可以发现:在青藏高原区除了当雄和北麓河是 $C_D > C_H$ 的(改则由于两种方法计算出的 C_D 和 C_H 值的大小不一致,还有待考证),其它地区均 $C_D < C_H$;在干旱、半干旱区除了张立盛等计算的黑河实验区的沙漠和戈壁地区明显的 $C_D < C_H$ (敦煌还有待考证)以外,其它地区均 $C_D > C_H$;湿润区由于观测站点较少,所以还不好下结论。我们又通过进一步的研究发现,凡 $C_D > C_H$ 的地区下垫面均比较平坦,且周围大的地形作用的影响很少;而 $C_D < C_H$ 的地区多在青藏高原区,地形起伏大且地势崎岖,地形作用影响较大。由此可以知道:在陆面上, $C_D < C_H$ 并不具有普遍性;观测点周围地形作用的影响对 C_D 和 C_H 值的大小有着直接的关系,周围地势崎岖的地区一般 $C_D < C_H$,而下垫面平坦,周围无大的地形作用的地区会与海面上的情形相似 $C_D > C_H$ 。所以文献[44]对天津城区下垫面总体输送系数的研究中发现 $C_D < C_H$ 可能与此次观测站位于城区边缘,且与周围有低矮的建筑物有关,可以看作是地形作用的影响。

总体来看,青藏高原区的 C_D 和 C_H 值要大于干旱、半干旱区内的值,在同类地表植被条件下,青

表 1 不同下垫面的总体输送系数 (C_D, C_H)
Table 1 The surface bulk transfer coefficients (C_D, C_H) of difficult land surface

分区	作者	观测点 (下垫面属性)	试验项目 (资料观测时间)	计算方法	$C_D(\times 10^{-3})$	$C_H(\times 10^{-3})$
青藏高原区	马淑芬 ^[17]	拉萨 (稀疏矮草地)	TIMEX-86(1986.06~07)	通量—廓线法	5.6(平均值)	8.5(平均值)
		那曲 (稀疏矮草地)			5.2(平均值)	7.5(平均值)
	苗曼倩 ^[18]	拉萨 (高寒草原)	QXIMEX(1979.05~08)	通量—廓线法	12(中性值)	
		林芝 (菜地)			10.2(中性值)	
	周明煜 ^[19]	改则 (荒漠沙石)	TPEX(1998.06~07)	涡旋相关法	2.31(中性值)	2.15(中性值)
		当雄 (开阔干河谷)			1.8(中性值)	1.5(中性值)
		昌都 (河谷草地)			4.4(中性值)	4.7(中性值)
	高志球 ^[20]	那曲 (草甸)	GAME-Tbet(1998.06)	通量—廓线法	3.73±0.52(中性值)	
	刘红燕 ^[21]	当雄 (河谷草地)	GAME-Tbet(1998.05~08)	通量—廓线法	1.8~2.0(中性值)	
	李国平 ^[22-23]	拉萨 (稀疏植被)	GAME-Tbet (1993.07~1999.03)	通量—廓线法	4.36(平均值)	
		日喀则 (稀疏植被)			4.32(平均值)	5.79(平均值)
		那曲 (稀疏植被)			4.64(平均值)	5.7(平均值)
		林芝 (稀疏植被)	4.39(平均值)		6.26(平均值)	
		改则 (高寒草甸)	TPEX-GAME/Tbet (1997.11~1998.10)		4.82(平均值)	5.94(平均值)
狮泉河 (高寒草甸)			4.41(平均值)		6.57(平均值)	
钱泽雨 ^[24]	北麓河 (稀疏短草)	青藏高原冻土试验 (2002.05~06)	空气动力学方法 倒算	1.74(中性值)	5.93(平均值) 1.37(中性值)	
干旱半干旱区	左洪超 ^[25]	黑河试验区 (戈壁)	HEFE (1990.08~09)	组合法倒算	1.6(中性值)	1.6(中性值)
		黑河试验区 (沙漠)			2.2(中性值)	2.2(中性值)
	张立盛 ^[26]	黑河试验区 (戈壁)	HEFE (1990.07~11)	组合法倒算	2.3(平均值)	3.3(平均值)
		黑河试验区 (沙漠)			4.4(平均值)	5.4(平均值)
	刘和平 ^[27]	长白山 (阔叶红松林)	(1995.08~09)	Lau's经验公式	6.6(中性值)	6.4(中性值)
	高志球 ^[20]	化音 (戈壁)	HEFE (1990.08)	通量—廓线法	1.48±0.15(中性值)	
		沙漠 (起伏沙丘)			1.54±0.23(中性值)	
		临泽 (小麦地)			1.46±0.25(平均值)	
	任宏利 ^[28]	敦煌 (戈壁)	DLSPE(2000.05~06)	变分法倒算	2.694(平均值)	2.148(平均值)
	张强 ^[29]	敦煌 (戈壁)	DLSPE(2000.05~06)	涡旋相关法	0.92(中性值)	1.81(中性值)
	韦志刚 ^[30]	敦煌 (戈壁)	NWC-AL EX (2000.09~2001.09)	空气动力学 方法倒算		2(中性值)
	王澄海 ^[31]	陇中黄土高原 (麦地)	定西干旱气象与生态 环境试验 (2003.05~07)	空气动力学 方法倒算	5.39(中性值)	0.72(中性值)
		陇中黄土高原 (裸地)			4.46(中性值)	0.89(中性值)
	王慧 ^[32]	鼎新 (戈壁)	金塔试验 (2005.05)	涡旋相关法	2.1(中性值)	1.8(中性值)
涂刚 ^[33]	吉林通榆 (退化草地)	北方干旱化和人类适应 试验 (2003-2005)	涡旋相关法	2.6±1.4(中性值)	2.62±1.6(中性值)	
	吉林通榆 (农田)			4.9±2.1(中性值)	3.59±1.9(中性值)	
黄宝霞 ^[34]	内蒙古奈曼 (沙丘)	MGRASS 2000.07~08)	涡旋相关法	4.83(中性值)	1.34(中性值)	
湿润区	吴祖常 ^[35]	太湖 (湖滨)	(1992.01)	通量—廓线法	5.72(中性值)	19.39(中性值)
	余锦华 ^[36]	常熟 (水稻田)	GAME-HUBEX(1999.05~09)	涡旋相关法	7.08(平均值)	7.14(平均值)
	张述文 ^[37]	淮海流域 (稀疏草地)	中国暴雨试验 (2001.06~07)	变分法倒算	4.83(中性值)	3.81(中性值)

高原近地层大气具有较大的层结不稳定性是导致其地面的总体输送系数较大的主要原因^[45]; 由于湿润区内 3 种下垫面差别较大, 与其它区域还不好比较, 所以还需进一步的研究才能下结论。

3.2 总体输送系数的日、季节及年变化特征

由于陆面上的气候特点和表面性质明显有别于海洋表面, 其总体输送系数也体现出了其特殊的区域特征。在海面上下垫面状态受风速影响, 使总体输送系数的变化主要受风速控制^[3, 39], 而陆面上风速对总体输送系数的影响仅通过大气热力稳定度来

间接作用^[49]。由于大气稳定度日变化显著, 所以总体输送系数也具有明显的日变化特征。但是由于下垫面状况的不同, 不同地区其日变化趋势却有一定的差异。图 1 为夏季青藏高原西部和干旱区荒漠戈壁下垫面总体输送系数合成的日变化趋势的比较^[46], 从图 1 中可以看出: 青藏高原地区白天总体输送系数较大, 但变化幅度较小, 基本保持一常值; 晚上总体输送系数一般较小, 但存在小幅波动特征; 而干旱的荒漠戈壁地区, 由于受到太阳强烈的辐射加热作用, 而地表热容量却很小, 大气的热力稳定度

比高原地区日变化要显著,所以总体输送系数的日变化也更加明显:白天较大且变化剧烈;夜间较小且变化平缓。同时对其它地区^[31, 37, 44]地表总体输送系数的研究也显示其日较差十分明显,夜间 C_D 和 C_H 都很小,日出后随不稳定增强而增加,在中午前后达到最大,然后迅速减弱。这与干旱区内的情形是相同的,也表明陆面上总体输送系数的变化是由下垫面的热力作用引起的。另外,在干旱区内感热输送占主导作用,潜热输送可忽略不计,所以热力总体输送系数非常重要。这不同于绿洲和农田下垫面感热和潜热同等重要,与海洋上感热输送非常小,动量和潜热输送占优势的特征正好相反。李国平等^[47]从高原上合成的 1 月和 7 月的日变化趋势发现:陆面上总体输送系数在冬季和夏季,会呈现出幅度和位相不同的日变化特征;并且冬季的日变幅要大于夏季。

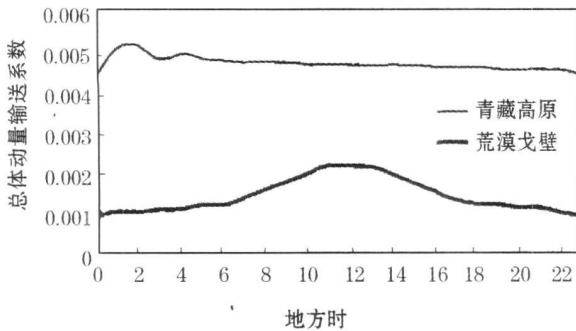


图 1 夏季干旱区荒漠戈壁与青藏高原动量总体输送系数合成的日变化趋势的比较^[46]

Fig 1 The diurnal variation of momentum bulk transfer coefficient (C_D) of the Gobi of arid area and the Qinghai-Xizang plateau in summer^[46]

到目前为止,对陆面上总体输送系数的季节和年际变化特征的研究较少,但是从李国平等^[45]利用 5 年多(1993 年 7 月到 1998 年 12 月)的连续观测资料对青藏高原上林芝、拉萨、日喀则和那曲 4 个观测站的总体输送系数的研究可以知道:陆面上总体输送系数具有明显的季节变化规律,均在夏季出现最大值,春季次之,秋季再次之,冬季最小,这与陆面上辐射平衡各分量的季节平均日总量的变化规律是一样的^[48],这也再次说明总体输送系数的变化与地表的热力作用关系密切;在总体输送系数极值大小和出现的月份等具体特征上会因站而异,如林芝站总体输送系数的最大值出现在 5~6 月,比其它站早 1 个月,但总体特征都是一致的。图 2 给出了拉萨和那曲 5 年多的逐月平均值^[45],从图 2 中可以看出,陆

面上总体输送系数年际变化一般较小,可认为主要是由层结稳定度的年际变化引起的。拉萨总体输送系数的平均年际相对变率为 6.7%,而那曲只有 1.7%。

综合以上讨论可以得出:陆面上总体输送系数具有一定的地域差异,所以不能笼统的取为定值;在利用总体输送系数研究陆面上能量和加热场强度等时间演变问题时,年以内的需要考虑其日变化和季节变化,年以上的一般可不考虑其年际变化。

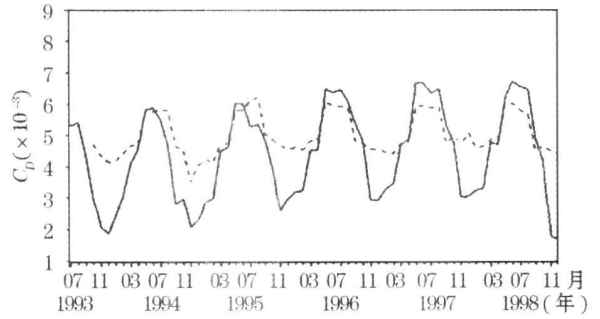


图 2 拉萨(实线)和那曲(虚线)动量总体输送系数 C_D 的逐月平均值^[45]

Fig 2 The mean values of momentum bulk transfer coefficient (C_D) in month by month at Lhasa station (active line) and Naqu station (dotted line)^[45]

3.3 降水天气过程下总体输送系数特征

总体输送系数对降雨过程一般都具有明显的响应^[49],但下垫面不同对应关系并不完全一致,其响应强度存在明显的地域性差异,并且变幅峰值和变化趋势并不一定与降雨量及其变化趋势完全对应。一般来看,总体输送系数与降雨量并不具有规律性的变化关系。但是,有雨时的总体输送系数日平均值要大于没有降雨时的日平均值。故陆面上总体输送系数的极值多出现在夏季,同一季节中又多出现在降雨过程中。但也有例外的情形,对高原上一些站的研究发现有些降雨过程的总体输送系数反而比无降雨(或降雨较小)时的总体输送系数更小,这说明这些降雨过程中近地层的层结不稳定性比无降雨时的还要弱。这主要是因为总体输送系数的大小并不直接取决于降雨量,而是与近地层大气的层结稳定度密切相关。

4 总体输送系数对地面各要素的依赖关系

4.1 总体输送系数与稳定度的关系

大家都知道总体输送系数 $C_{DHE} = C_{DHE}(\%)$

z/L , 它是大气稳定度、地表粗糙度 z_0 和观测高度 z 的函数, 因大气稳定度特征量 z/L 很难确定, 所以在陆面过程参数化中, 通常用总体理查逊数 R_{ib} 来表征大气稳定度。大量研究显示不同下垫面总体输送系数随 R_{ib} 的变化具有共同特征, 即 C_D 和 C_H 均随着 R_{ib} 的增加具有减小的趋势, 并且 C_H 随 R_{ib} 的变化幅度一般要大于 C_D (特别是大气层结不稳定 $R_{ib} < 0$ 时), 而当层结趋于稳定 $R_{ib} > 0$ 时, 两种总体输送系数随 R_{ib} 的变幅趋于一致。图 3 即为陆面上总体输送系数随稳定度变化的整体特征。从图 3 中可以看出, 总体输送系数对总体理查逊数 R_{ib} 的变化有很强的依赖和相关性, 用二次方程拟合的曲线接近线性。为了使单点的观测值对大、中尺度数值模式陆面过程参数化方案具有一定的参考意义, 总体输送系数与各地面要素的相关性及拟合关系式的研究是非常必要的。如左洪超等^[25]对黑河实验区戈壁和沙漠下垫面总体输送系数与 R_{ib} 和 z_0 的拟合关系的研究; 张强等^[46]利用 3 种方法研究了敦煌戈壁总体输送系数特征并给出其在不稳定和稳定大气时与 R_{ib} 的线性关系式。张述文等^[37]对淮河流域 10 m 高度处的总体输送系数与大气稳定度参数 z/L 之间关系的研究等。

4.2 总体输送系数与 z_0 和 Z 的关系

地表粗糙度有动量、热量和水汽粗糙度 3 种, 为了简便起见通常取三者相等并统一用 z_0 表示。 z_0 是影响总体输送系数的重要因子^[49-50], 研究发现: 总体输送系数随 z_0 的增大而增大, 其中 C_H 随 z_0 的变幅大于 C_D , 且中性层结和不稳定层结的总体输送系数随 z_0 的变幅大于稳定层结; $z_0 < 10$ m 时的总体输送系数随 z_0 的变幅大于 $z_0 > 10$ m 的变幅, 并且当 z_0 在 0~5 m 时的变幅

最大; 随着 z_0 的增大, C_D 和 C_H 也由非线性向线性增大转变 (图 4)。因此, 确定出能反映陆面真实状况并具有区域代表性的地表粗糙度 z_0 对陆面上总体输送系数较准确的估算是非常重要的。

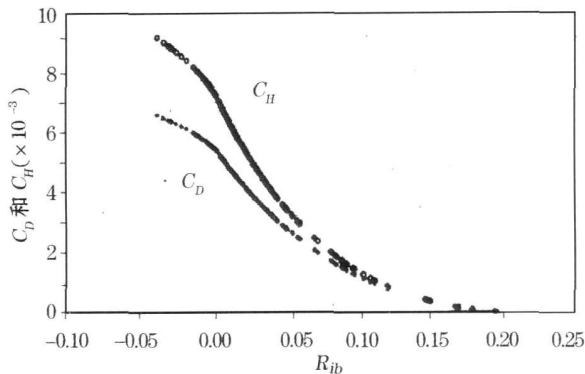


图 3 总体输送系数与总体理查逊数 (R_{ib}) 的关系 (日喀则)^[45]

Fig 3 The relationships between bulk transfer coefficient and R_{ib} at Rikaze station^[45]

在大气边界层研究中, 一般假定“近地层为常通量层”, 根据总体输送理论, 湍流切应力和感热通量可以写为: $\tau = \rho C_D [u(z) - u_s]^2$; $H = \rho c_p C_H [u(z) - u_s] [T_s - T(z)]$ 。其中 ρ 为空气密度; c_p 为干空气的定压比热; u 和 T 分别代表风速和温度, 下标 s 表示地面值, 对于地面 $u = 0$ 。在近地层, 一般情况下风速会随高度的增加而非线性增大, 而温度则非线性减小, 所以通过上面两式可以发现, 要保持通量为常数则 C_D 和 C_H 必会随着高度的增加而减小。苗曼倩等^[44]和张述文等^[37]的研究也证实了这一点。图 5 给出了不同高度总体输送系数的日变化特征以及中性状态下总体输送系数与 $\ln(z/z_0)$ 的关

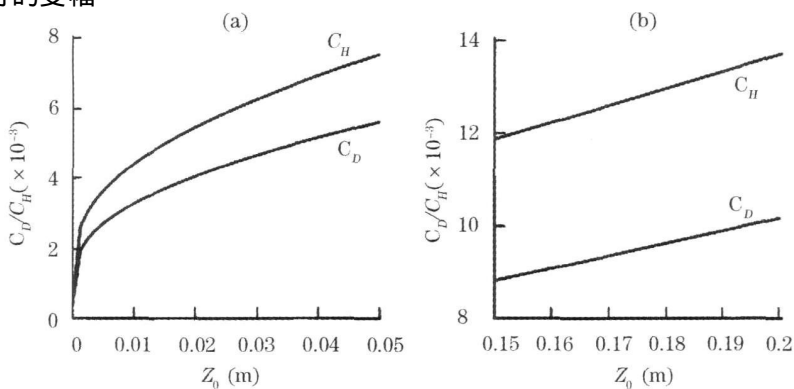


图 4 总体输送系数与地表粗糙度的关系^[49]

Fig 4 The relationships between bulk transfer coefficient and surface roughness length^[49]

(a) $z_0 = 0 \sim 0.05$ m (b) $z_0 = 0.15 \sim 0.2$ m

系^[44],从图 5 a中可以清楚看出 C_D 和 C_H 随高度而减小的特征,图 5 b显示总体输送系数的减小随高度的增加而变缓,20 m以下范围内减小的较快,峰值每升高 10 m减小 3×10^{-3} ,日平均减少为 $1 \times 10^{-3} / 10 \text{ m}$;20 m以上峰值减小速率为 $0.6 \times 10^{-3} / 10 \text{ m}$ 平均减少率约为 $0.3 \times 10^{-3} / 10 \text{ m}$ 故 20 m以上,可近似地认为 C_D 、 C_H 与高度无关,其误差每 10 m不超过 10%。

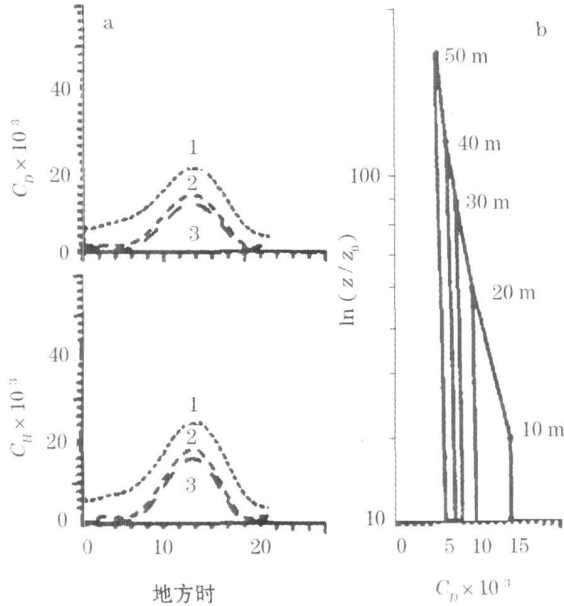


图 5 3个不同层次 C_D 和 C_H 的日变化曲线

(a) 和中性条件层结下 C_D 的变化 (b)^[44]

Fig 5 The diurnal variations of C_D and C_H of three different levels (a) and the changes of C_D at neutral conditions (b)^[44]

“1”线为 10 m 高度,“2”线为 30 m 高度,“3”线为 60 m 高度
One is the values of 10 m, two of 30 m and three of 60 m

4.3 总体输送系数与地面风速和地气温差的关系

在陆地上,当风速较大 ($> 8 \text{ m/s}$) 时,层结趋于中性或近中性^[44],此时总体输送系数趋于常值;在小风速时,无论大气层结是稳定或不稳定的,总体输送系数随风速的变化都非常的敏感,且变化为非线性的。当层结稳定时, C_D 和 C_H 随风速的减小而减小;不稳定时,随风速的减小而增大,并均趋于中性总体输送系数^[45]。这都是因为小风速有利于不稳定对流发展,在近地层中超绝热更强烈,热力湍流变得很大的缘故。陈万隆等^[51]通过对高原测站 C_D 与 10 m 处平均风速 V_{10}^1 的回归分析发现,它们之间的相关系数为 0.82 后经过修正得到 C_D 与 V_{10}^1 的线性拟合关系式: $C_D = 0.00112 + 0.01 V_{10}^1$; 张立盛

等^[26]也得到了黑河地区戈壁和沙漠的总体输送系数与地面风速的线性关系;韦志刚等^[30]研究得到敦煌戈壁地表感热交换系数 C_H 与地面风速之间存在对数关系;刘海涛等^[52]对广州地区总体输送系数与地面风速和地气温差的关系研究,得出它们之间的幂次关系式。

总体输送系数与各地面要素之间的拟合关系式虽然在形式上有所不同,但是本质上都是一样的。通过拟合公式的适用性检验,从而使单点的观测值具有一定的区域代表性。然而,大、中尺度大气模式的网格覆盖范围均很广,且地表一般并不是均匀的,地形影响也比较明显,所以局地观测确定出的总体输送系数的区域代表性一般并不是很理想。

5 存在的主要科学问题

从陆地上总体输送系数的研究历程和现状可以看出,近年来对陆地上总体输送系数的研究虽然取得了很大的进展,但是由于陆面构成的复杂性和不均匀性,该领域的研究仍存在着一些急待我们深入探寻和研究的科学问题。主要有以下 3 个方面:

(1) 现有的对于陆地上总体输送系数的研究均是针对均匀的下垫面状况。但是均匀下垫面只是对陆面状况的一种最粗略的近似,自然界中最普遍的是非均匀下垫面和复杂下垫面^[53],这给大气模式中的边界层参数化造成极大困难。非均匀下垫面地表参数的研究和发展适用于非均匀下垫面的相似性理论都是大气边界层研究中急需解决的问题。

(2) 对我国江淮流域和南方亚热带气候区内地面总体输送系数的研究需要加强。从表 1 看出,国内的野外试验主要在青藏高原和干旱、半干旱区内进行,所以对总体输送系数的研究也大都集中在我国的北方,对于南方湿润区的研究非常少,并且代表性差。这主要是因为湿润区内,动量和潜热输送占优势,而感热通量的作用相对较小,并且南方地区多城市建筑群,像长江和珠江三角洲地区等,这种城市下垫面是比较不均匀的复杂下垫面类型,研究起来难度很大,所以至今这一区域的研究工作一直很少。但是随着城市面积不断扩大,城市边界层的影响也日益重要,所以这方面的研究也应该要加强。

(3) 通过近 30 年来一系列的实验和野外观测使陆地上总体输送系数的研究取得了不少的成果,但是总体上来看,我国的陆面观测站点还是非常稀少的,所以增加地面测站的数量非常必要。现在的地面观测只得到了“点”或局地的水平上的结果,在

我国人烟稀少的干旱和高寒地区,多是复杂的非均匀下垫面类型,对其进行直接观测非常困难,现有的均匀下垫面站点的观测资料,其区域代表性到底有多大是关键问题。要想真正理解地表状况复杂的陆气相互作用的实质,其研究仅仅停留在“点”或局地的水平上是远远不够的,必须把这些结果推广至整个区域。目前在理论上,对如何得出大、中尺度模式非均匀网格点上有效的陆面过程参数还没有比较可行的方法。然而由于卫星遥感具有获取资料范围广、图像直观等特点,在研究非均匀地表能量平衡各分量的区域分布上有其独特的作用^[54-58],所以利用卫星遥感与地面观测资料的结合估算区域内的陆面过程参数成为解决这一问题的一个重要途径。这也成为了目前边界层气象学和陆面过程研究中的热点问题之一。

6 结论与讨论

本文从陆面上总体输送系数的研究现状、计算方法和时空变化特征以及与地面各要素之间的依赖关系等几个方面,对该领域的研究工作进行了回顾和总结。在此基础上,探讨了陆面上总体输送系数研究中存在的几点科学问题,并对总体输送系数由“点”到“面”的研究趋势和可行方法作一展望。通过对陆面上动力拖曳系数 C_D 与感热输送系数 C_H 值大小的综合比较发现,陆面上 C_D 和 C_H 值的大小受下垫面状况和周围地形等多种因素的影响,并不像我们通常认识的那样普遍表现为与海面上的情况相反,即 $C_D < C_H$,而是与观测点周围的地形有着直接的关系。周围地势崎岖或有大地形影响的地区一般表现为 $C_D < C_H$;而下垫面平坦,周围无大的地形作用的地区则会与海面上的情形相似,表现为 $C_D > C_H$ 。

众多的气象学家和多次大型野外试验对总体输送系数研究的重要作用除了表现在对陆气相互作用机理的研究和大气数值模拟的改进和发展方面,另一重要的目的是如何将它与常规气象站资料结合,利用总体输送公式计算地面能量通量的分布^[59-63],这一工作首先就涉及到总体输送系数由单点观测到区域尺度的推广问题。分布在我国西北和华北的干旱、半干旱区面积广阔,下垫面多戈壁和沙漠,地表蒸发能力极强且降水稀少。在春、夏季节,由于缺乏水汽,天空少云并受到太阳强烈的直接辐射,这些地区地面温度非常高,感热极强,被称之为欧亚大陆中的“热垫”。如此强烈的热力作用,其年际、年代际变率对我国气候变化和东亚夏季风环流有可能产生

很大影响,从而产生一系列的未知效应。所以对我国西北干旱、半干旱区内近几十年陆面感热通量较准确的估算,研究其年际、年代际时空变化特征对我国和东亚气候变化成因及预测研究都将具有重要的现实意义。然而由于我国干旱、半干旱区下垫面类型比较复杂,传统的单点观测的总体输送系数与地面要素的拟合公式对其它下垫面地表能量通量的计算将会产生很大的误差,或者根本就没法使用,所以必须寻找其它的可行方法。利用总体输送公式计算感热通量,其中最关键的参数就是热力输送系数 C_H 。要想对我国整个西北干旱区内感热通量进行研究, C_H 由“点”及“面”的推广成为关键问题,贾立等^[64]利用卫星遥感与地面观测资料结合,对地表动量粗糙度 z_0 和标准化植被指数 NDV 之间拟合关系的研究,为解决这一问题提供了思路。通过上面对总体输送系数与地表粗糙度 z_0 的分析知道它们之间有着很密切的关系。由此我们猜想在 C_H 与 NDV 之间是否也存在着一定的关系?通过它们之间的拟合能否使单点观测的 C_H 值推广到一定的区域尺度上呢?这方面尝试性的探索研究即将是下一步工作的研究重点。

参考文献 (References)

- [1] Dearnford JW. Dependence of air-sea transfer coefficients on bulk stability [J]. *Journal of Geophysical Research* 1968, 73, 2: 549-2557
- [2] McBun G A. The planetary boundary layer [J]. *Technical Note—World Meteorological Organization* 1979, 165: 145-159
- [3] Garratt JR. Review of drag coefficients over ocean and continents [J]. *Monthly Weather Review* 1977, 105: 915-923
- [4] Deacon E L, Webb E K. Small Scale Interactions M // Hill M. *ed. The Sea*. New York: Interscience 1962: 43-87.
- [5] Pond S, Fisser D B, Paulson C A. A note on bulk aerodynamic coefficients for sensible heat and moisture fluxes [J]. *Boundary Layer Meteorology* 1974, 6: 333-339
- [6] Franc Y R J, Garratt R. Eddy flux measurements over the ocean and related transfer coefficients [J]. *Boundary Layer Meteorology* 1978, 14: 153-166
- [7] Cressman G P. Improved terrain effects in barotropic forecasts [J]. *Monthly Weather Review* 1960, 88: 327-342
- [8] Sawyer J S. The introduction of the effects of topography into methods of numerical forecasting [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1959, 85: 31-43.
- [9] Fiedler F, Panošky V H A. The geostrophic drag coefficient and the effective roughness length [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1972, 98: 213-220
- [10] Ye Duzhen, Gao Youxi, et al. *Qin Hai Xiang Plateau Meteorology M*. Beijing: Science Press 1979: 2-5. [叶笃正, 高由禧, 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net]

- 等. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 2-5]
- [11] Holloway J L, Manabe S. Simulation of the climate by a global general circulation model hydrological cycle and heat balance [J. Monthly Weather Review, 1974, 99(5): 335-370]
- [12] DeSoto F, Miyakoda K, Clarke R H. Parameterized processes in the surface boundary layer of an atmospheric circulation model [J. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1971, 97(412): 181-208]
- [13] Wang Jieming. Land surface process experiments and interaction study in China: From HEIFE to MGRASS and GAME-TIBET/TPEX [J. Plateau Meteorology, 1999, 18(3): 280-294. [王介民. 陆面过程实验和地气相互作用研究——从 HEIFE 到 MGRASS 和 GAME-TIBET/TPEX [J. 高原气象, 1999, 18(3): 280-294]]
- [14] Yang Xingguo, Niu Shengjie, Zheng Youfei. Advance in land surface process experimental study [J. Arid Meteorology, 2003, 21(3): 83-89 [杨兴国, 牛生杰, 郑有飞. 陆面过程观测试验研究进展 [J. 干旱气象, 2003, 21(3): 83-89]]
- [15] Bao Yaoyi, Li Shihua. Review of land-atmosphere interaction research in arid and semi-arid regions [J. Journal of Desert Research, 2006, 26(3): 454-460 [鲍艳, 吕世华. 干旱、半干旱区陆气相互作用的研究进展 [J. 中国沙漠, 2006, 26(3): 454-460]]
- [16] Zhang Qiang. The study on parameterization of surface turbulent fluxes over gobi underlying surface [J. Science Technology and Engineering, 2003, 3(1): 30-39 [张强. 荒漠戈壁下垫面地表湍流通量参数化的研究 [J. 科学技术与工程, 2003, 3(1): 30-39]]
- [17] Ma Shufen. The characters of the turbulent transports in the surface layer over the eastern Tibet during the summer 1986 [J. Acta Meteorologica Sinica, 1990, 48(2): 210-219 [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]]
- [18] Miao Manqiang, Cao Hong, Ji Jinyun. Analysis of turbulent characteristics in atmospheric boundary layer over the Qinghai-Xizang Plateau [J. Plateau Meteorology, 1998, 17(4): 356-363. [苗曼倩, 曹鸿, 季劲钧. 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]]
- [19] Zhou Mingyu, Xu Xiangde, Bian Lingqin et al. Observational Analysis and Dynamic Study of Atmospheric Boundary Layer on Tibetan Plateau [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2000: 52-56 [周明煜, 徐祥瑞, 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]]
- [20] Gao Zhiqiu, Wang Jieming, Ma Yaoming et al. Study on roughness lengths and drag coefficients over the different underlying surfaces [J. Plateau Meteorology, 2000, 19(1): 17-24. [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]]
- [21] Liu Hongyan, Miao Manqiang. Preliminary analysis on characteristics of boundary layer in Qinghai-Tibet Plateau [J. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2001, 37(3): 348-357. [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]]
- [22] Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuanfei. A composite study of the surface fluxes on the Tibetan Plateau [J. Acta Meteorologica Sinica, 2002, 60(4): 453-460. [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]]
- [23] Li Guoping, Duan Tingyang, Wu Guifeng. The intensity of surface heat source and surface heat balance on the western Qinghai-Xizang Plateau [J. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 13-18 [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]]
- [24] Qian Zeyu, Hu Zeyong, Du Ping et al. Energy transfer of near surface layer and micrometeorology characteristics in Bajulu area of Qinghai-Xizang Plateau [J. Plateau Meteorology, 2005, 24(2): 43-48 [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]]
- [25] Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. The bulk transfer coefficient over desert and gobi in Heife region [J. Plateau Meteorology, 1992, 11(4): 371-380. [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]]
- [26] Zhang Lisheng, Qian Zheng'an, Chen Bomin. Estimation of surface drag coefficients in the Heife region and numerical experiments of their influence [J. Plateau Meteorology, 1994, 13(3): 357-365 [张立盛, 钱正安, 陈伯民. 黑河地区地面曳力系数的估算及其影响的数值试验 [J. 高原气象, 1994, 13(3): 357-365]]
- [27] Liu Heping, Liu Shuhua. Determination of aerodynamic parameters of Changbai mountain forest [J. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 1997, 33(4): 522-528 [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]]
- [28] Ren Hongli, Wang Chenghai, Qiu Chengjian et al. A study of computing the surface flux in the typical arid region of northwest China by a variational method [J. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(2): 269-277 [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]]
- [29] Zhang Qiang, Wei Guowang. Experimental study on bulk drag and transfer coefficients over Gobi [J. Plateau Meteorology, 2004, 23(3): 305-312 [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]]
- [30] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen. Transfer coefficients of sensible heat under the atmospheric stability in near surface layer over Dunhuang gobi [J. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 834-839. [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]]
- [31] Wang Chenghai, Huang Baoxia, Yang Xingguo. Study on surface flux and the bulk transfer coefficients over middle Gansu region of loess plateau under the wheat and bare fields [J. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 834-839. [王成海, 黄宝霞, 杨兴古. 黄土高原小麦和裸地地表通量及曳力系数研究 [J. 高原气象, 2006, 25(5): 834-839]]

- oroLOGY 2007 26(1): 30-38 [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]
- [32] Wang Hui, Hu Zeyong, Gu Lianglei et al. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in near surface layer in Dingshi gobi of lower reach of Heihe river [J]. Plateau Meteorology 2007 26(5): 938-945. [王慧, 胡泽勇, 谷良雷, 等. 黑河下游鼎新戈壁近地层能量输送及微气象特征 [J]. 高原气象, 2007 26(5): 938-945]
- [33] Tu Gang. The researches of land-atmosphere interaction on different surface layer of semi-arid regions [D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Atmospheric Physics) 2007 109-112 [涂钢. 半干旱区不同下垫面地气相互作用研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (中国科学院大气物理研究所), 2007 109-112]
- [34] Huang Baoxia, Wang Chengqiang, Liu Huizhi et al. Energy budget in the surface layer over movable dune at Naiman in Inner Mongolia [J]. Arid Land Geography 2007 30(2): 177-183. [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]
- [35] Wu Zuchang, Li Zhihua, Zhao Ming et al. The calculation and analysis of turbulent flux and transport coefficient over Taihu lakeside [J]. Bulletin of Science and Technology 1999 15(2): 94-98. [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]
- [36] Yu Jinhua, Liu Jingbiao, Ren Jian. Turbulent features near the surface over the Yangtze delta [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology 2001 24(4): 536-544 [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]
- [37] Zhang Shuwen, Qiu Chongjian, Zhang Weidong. Estimating the bulk transfer coefficients in Huaihe river basin by using a variational method [J]. Plateau Meteorology 2004 23(4): 506-511. [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]
- [38] Qu Shaohou. Observation research of the turbulent fluxes of momentum, sensible heat and latent heat over the west Pacific tropical ocean area [J]. Acta Meteorologica Sinica 1988 46(4): 452-461 [曲绍厚. 西太平洋热带海域动量、感热和潜热等湍流通量的观测研究 [J]. 气象学报, 1988 46(4): 452-461.]
- [39] Miao Manqian, Zhang Leming. Flux characteristics of sea level in abnormal weather [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 1990 14(4): 464-474 [苗曼倩, 张雷鸣. 非正常天气海面通量特征 [J]. 大气科学, 1990 14(4): 464-474]
- [40] Ma Yaoming, Wang Jieming, Liu Weci et al. The study of the characteristics of both the atmospheric turbulence structure and the transfer in the lower layer of the atmosphere above the Nansha islands area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences 1997 21(3): 357-365 [马耀明, 王介民, 刘巍, 等. 南沙海域大气湍流结构及输送特征研究 [J]. 大气科学, 1997 21(3): 357-365]
- [41] Ma Yaoming, Wang Jieming, Zhang Qingrong et al. The analysis of turbulent fluxes transfer characteristics over nansha sea region [J]. Plateau Meteorology 1997 16(1): 45-51 [马耀明, 王介民, 张庆荣, 等. 南沙海域大气湍流通量输送特征分析 [J]. 高原气象, 1997 16(1): 45-51.]
- [42] Xu Jinqi, Wei Hui, Gu Haijiao. Stratification modified model of wind temperature and humidity profiles over a smooth sea surface and the air-sea bulk transfer coefficients [J]. Acta Meteorologica Sinica 1998 56(1): 112-119 [徐静琦, 魏皓, 顾海涛. 光滑海面上风、温、湿廓线的层结订正模式及海气整体交换系数 [J]. 气象学报, 1998 56(1): 112-119.]
- [43] Gao Zhiliu, Ma Yaoming, Wang Jieming et al. Studies on roughness lengths, neutral drag coefficients and bulk transfer coefficients over Nansha islands sea area [J]. Tropical Oceanology 2000 19(1): 38-43. [高志球, 马耀明, 王介民, 等. 南沙群岛海域近海面粗糙度、中性曳力系数及总体交换系数研究 [J]. 热带海洋, 2000 19(1): 38-43.]
- [44] Miao Manqian, Qian Junping. Characteristics of bulk transfer coefficient and transport coefficient over the land [J]. Acta Meteorologica Sinica 1996 54(1): 95-101 [苗曼倩, 钱峻屏. 陆面上总体输送系数的特征 [J]. 气象学报, 1996 54(1): 95-101.]
- [45] Li Guoping, Zhao Bangjie, Lu Jinghua. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Tibetan Plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica 2002 60(1): 60-67 [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.]
- [46] Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. The momentum and sensible heat bulk transfer coefficients over desert and gobi in Xi-bei arid regions [J]. Science in China (Series D), 2001, 31(9): 783-792.
- [47] Li Guoping, Duan Tingyang, Gong Yuan. Bulk transfer coefficients and surface fluxes on the western Qinghai-Xizang Plateau [J]. Bulletin of Science 2000 45(8): 865-869 [李国平, 段廷扬, 巩远发. 青藏高原西部地区的总体输送系数和地面通量 [J]. 科学通报 2000 45(8): 865-869]
- [48] Wang Hui. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in near surface layer on Dingshi gobi of lower reach of Heihe River [D]. Lanzhou: Cold and Arid Regions Engineering Research Institute CAS 2007 [王慧. 黑河下游鼎新戈壁下垫面近地层能量输送及微气象特征研究 [D]. 兰州: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 2007.]
- [49] Li Guoping, Tao Hongzhan. Characteristics of bulk transfer coefficient in precipitation processes of Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology 2005 24(4): 577-584. [李国平, 陶红专. 高原降雨天气过程中总体输送系数的变化特征 [J]. 高原气象, 2005 24(4): 577-584]
- [50] Zhang Hongsheng, Du Jinlin, Kang Ling. Bulk transfer coefficients over rice field area of HUBEI [J]. Climatic and Environmental Research 2001 6(2): 209-213. [张宏升, 杜金林, 康凌. 淮河流域水稻田下垫面整体输送系数的确定与讨论 [J]. 气候与环境研究, 2001 6(2): 209-213.]

- [51] Chen Wanlong, Weng Duming. Preliminary study about computing methods of sensible heat and latent heat total quantity in ten-day period over Qinghai-Xizang Plateau [J] // Meteorology Scientific Experiment Treatises about Qinghai-Xizang Plateau (2). Beijing: Science Press, 1984: 35-45 [陈万隆, 翁笃鸣. 关于青藏高原感热和潜热旬总量计算方法的初步研究 [J] // 青藏高原气象科学实验论文集 (二). 北京: 科学出版社, 1984: 35-45]
- [52] Liu Haijiao, Zhu Chaoqun. The preliminary analysis of turbulent transfer characteristics in the surface layer over Guangzhou region [J]. Journal of Tropical Meteorology, 1998, 14(3): 233-238 [刘海涛, 朱超群. 广州地区近地层湍流输送的特征 [J]. 热带气象学报, 1998, 14(3): 233-238]
- [53] Zhang Qiang, Hu Yinqiao. Scientific problems and advance of atmospheric boundary layer physics [J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(4): 526-532 [张强, 胡隐樵. 大气边界层物理学的研究进展和面临的科学问题 [J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 526-532]
- [54] Ma Yaoming, Wang Jieming, Massimo Menenti et al. Estimation of flux densities over the heterogeneous land surface with the aid of satellite remote sensing and field observation [J]. Acta Meteorologica Sinica, 1999, 57(2): 180-188 [马耀明, 王介民, Massimo Menenti 等. 卫星遥感结合地面观测估算非均匀地表区域能量通量 [J]. 气象学报, 1999, 57(2): 180-188]
- [55] Hong Gang, Li Wanbiao, Zhu Yuanjing et al. Methodological study on the estimate of regional surface fluxes over the HuaHe river basin area with satellite remote sensing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(5): 693-700 [洪刚, 李万彪, 朱元竞, 等. 卫星遥感估算淮河流域区域能量通量的方法研究 [J]. 北京大学学报. 自然科学版, 2001, 37(5): 693-700]
- [56] Ma Yaoming, Li Maoshan, Ma Weifang et al. The study of regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape in northwest arid areas and Tibetan Plateau by using satellite remote sensing [J]. Arid Meteorology, 2003, 21(3): 34-42 [马耀明, 李茂善, 马伟强, 等. 西北干旱区及高原上卫星遥感非均匀地表区域能量通量研究 [J]. 干旱气象, 2003, 21(3): 34-42]
- [57] Ma Yaoming, Liu Dongsheng, Su Zhongbo et al. Land surface variables and vegetation variables estimated from satellite remote sensing over inhomogeneous land surface of the northern Tibetan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004, 28(1): 23-31. [马耀明, 刘东升, 苏中波, 等. 卫星遥感藏北高原非均匀陆地表特征参数和植被参数 [J]. 大气科学, 2004, 28(1): 23-31.]
- [58] Chen Tianyu, Chen Qian, Li Baozi. Estimation of land surface energy flux densities over eastern part of northwest China with the aid of satellite remote sensing and field observation [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(3): 7-15. [陈添宇, 陈乾, 李宝梓. 卫星遥感结合地面观测估算中国西北区东部地表能量通量 [J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 7-15.]
- [59] Ji Guoliang, Yao Lancheng, Yuan Fumaq et al. The characteristics of the surface and atmospheric heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau in winter of 1982 [J]. Science in China (Series B), 1986, 2: 214-224.
- [60] Ji Guoliang, Pu Ming, Xi Yunyu. The characteristics of the surface and atmospheric heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau in summer of 1983 [J]. Plateau Meteorology, 1986, 5(2): 155-166 [季国良, 浦明, 席蕴玉. 1983 年夏季青藏高原地区的地面和大气加热场 [J]. 高原气象, 1986, 5(2): 155-166]
- [61] Xu Guochang, Li Dongliang, Chen Liping. The climatic characteristics of surface heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 1990, 9(1): 32-43 [徐国昌, 李栋梁, 陈丽萍. 青藏高原地面加热场强度的气候特征 [J]. 高原气象, 1990, 9(1): 32-43]
- [62] Li Dongliang, Zhang Jijie, Wu Hongbao. A diagnostic study on surface sensible heat flux anomaly in summer over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology, 1997, 16(4): 367-375 [李栋梁, 章基嘉, 吴洪宝. 夏季青藏高原下垫面感热异常的诊断研究 [J]. 高原气象, 1997, 16(4): 367-375.]
- [63] Li Dongliang, Li Weijing, Wei Li et al. A diagnostic study of surface sensible heat flux anomaly over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(1): 71-83 [李栋梁, 李维京, 魏丽, 等. 青藏高原地面感热及其异常的诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 2003, 8(1): 71-83]
- [64] Jia Li, Wang Jieming, Massimo Menenti. Estimation of area roughness length for momentum using remote sensing data and measurements in field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1999, 23(5): 632-640. [贾立, 王介民, Massimo Menenti. 卫星遥感结合地面资料对区域表面动量粗糙度的估算 [J]. 大气科学, 1999, 23(5): 632-640]

A Review of the Study of the Bulk Transfer Coefficients over the Land

WANG Hu^{1,2}, LIDongliang², HU Zeyong, WANG Jiem in

(1. Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

3. Cold and Arid Regions Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: This paper reviewed the recent advance in the bulk transfer coefficients over the land from its research course, computing methods and characteristics of space and time variations as well as relations with some surface factors and so on. On the basis of comprehensive understanding of its present situation, the authors discussed some key scientific problems in this field. Firstly, some difficult problems required to be solved such as the land surface parameters' calculation and observation over inhomogeneous land surface and development similarity theory which can be applicable to the inhomogeneous land surface. Secondly, studies of the bulk transfer coefficients over humid regions of China must be strengthened. Thirdly, whether or not understanding the land-atmosphere interaction process over inhomogeneous and complicated land surface in its entirety, the land surface parameters' expandedness from local to regional scope is a critical and difficult problem. Finally, the feasible method of using satellite remote sensing and field observation data to estimate the land surface parameters and flux densities over the inhomogeneous land surface was discussed.

Key words: Bulk transfer coefficients; Land surface process; Surface factors; Variation characteristics

《地球科学进展》杂志“发展战略论坛”专栏继续征集论文的公告

《地球科学进展》杂志自 2004 年第 4 期起开辟“发展战略论坛”专栏以来,邀请各领域的专家学者,就我国学科发展方向发表自己的见解,主要刊登地球科学(包括地理学、地质学、地球化学、地球物理、空间物理、大气科学和海洋科学等分支学科)、地球系统科学、全球变化科学、环境科学和生态学的发展战略研究成果,包括学科现状分析、发展趋势、中长期发展战略目标、任务、重点发展方向、“十一五”期间优先发展领域以及政策措施,战略研究的建议和看法,国际相关领域的发展战略研究介绍等类文章 33 篇。目前正是各学科执行“十一五”计划期间,为了保证“十一五”计划的顺利执行,《地球科学进展》将继续刊登此未曾刊发过的学科发展战略报告,以供科学研究人员和相关方面的管理者参阅。稿件要求观点明确,文字简捷,论据充足,体例不作统一规定,根据内容可长可短,短文 1 000~2 000 字,长则不要超过 10 000 字,并注明“发展战略论坛”征文。

本专栏旨在宣传和交流国家中长期科学和技术发展规划战略研究和各部门、各行业学科发展战略研究成果,使其成果及时提供给广大读者共享,希望能对“十一五”期间乃至 21 世纪头 20 年我国地球科学及其相关领域的发展方向起到一定的促进作用。为此,向广大读者、作者继续征集这方面的稿件,来稿注意事项可参照《地球科学进展》投稿须知,经审定符合要求的,我们将会尽快刊出,感谢广大读者、作者对我们工作的支持和帮助。

专栏联系人:林海教授 E-mail: linha@mail.nsf.gov.cn; linh@igs.nir.ac.cn