

王慧, 李栋梁. 2010. 卫星遥感结合地面观测资料对中国西北干旱区地表热力输送系数的估算 [J]. 大气科学, 34 (5): 1026–1034. Wang Hui, Li Dongliang. 2010. Estimation of the surface thermal transfer coefficients over the arid region of Northwest China with the aid of satellite remote sensing and field observations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 1026–1034.

# 卫星遥感结合地面观测资料对中国西北干旱区 地表热力输送系数的估算

王慧<sup>1</sup> 李栋梁<sup>1,2</sup>

1 南京信息工程大学, 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044

2 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020

**摘 要** 本文利用黑河野外试验 (HEIFE) 地面观测资料, 采用空气动力学方法计算了干旱区内不同下垫面的地表热力输送系数  $C_H$ , 结合由美国国家海洋和大气局 (NOAA) 系列卫星遥感观测的反映地表植被特征的归一化差值植被指数 (NDVI) 资料, 经拟合得到了针对我国西北干旱区不同下垫面的  $C_H$ -NDVI 参数化关系式, 并对此关系式进行了合理性检验。结果表明: 对于区域尺度而言, 在缺乏用其他方法获得较准确的区域  $C_H$  值的情况下, 利用卫星遥感结合地面观测资料对其估算是较为可靠的方法。

**关键词** 干旱区 热力输送系数 NDVI 地面感热 黑河野外试验

**文章编号** 1006-9895 (2010) 05-1026-09

**中图分类号** P468

**文献标识码** A

## Estimation of the Surface Thermal Transfer Coefficients over the Arid Region of Northwest China with the Aid of Satellite Remote Sensing and Field Observations

WANG Hui<sup>1</sup> and LI Dongliang<sup>1,2</sup>

1 *Nanjing University of Information Science & Technology, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing 210044*

2 *Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020*

**Abstract** The surface thermal transfer coefficients ( $C_H$ ) of different underlying surfaces over the arid region of Northwest China are calculated using the air dynamics method with the Heihe field experiment (HEIFE) observations, and the  $C_H$ -NDVI parametric relational expressions are obtained by fitting method with the aid of the normalized difference vegetation index (NDVI) data observed by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) remote sensing satellites, and then the authors make the reasonableness test to them. The results show that estimation of the surface thermal transfer coefficients with the aid of satellite remote sensing and field observations is a credible way under the circumstances of the absence of other accurate methods.

**Key words** arid region, thermal transfer coefficient, NDVI, surface sensible heat flux, HEIFE

**收稿日期** 2009-11-05, 2010-03-16 收修定稿

**资助项目** 国家自然科学基金资助项目 40875059, 干旱气象科学研究基金项目 IAM200801, 江苏省 2009 年度普通高校研究生科研创新计划 (CX09B\_218Z)

**作者简介** 王慧, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事陆面过程和气候变化研究。E-mail: jinger0517@163.com

**通讯作者** 李栋梁, E-mail: lidl@nuist.edu.cn

## 1 引言

我国的干旱区面积广阔, 约占到国土面积的 49% (张林源和苏桂武, 1993), 主要分布在  $110^{\circ}\text{E}$  以西,  $35^{\circ}\text{N}$  以北的广大区域, 其地表面多是戈壁和沙漠, 蒸发能力非常强且降水稀少。在春、夏季节, 这些地区由于缺乏水汽、少云并受到太阳强烈的直接辐射, 一些地方的地表温度可高达  $60^{\circ}\text{C}$  (张强等, 2005), 感热极强, 而相应的潜热却非常弱, 所以被称之为欧亚大陆中的“热垫” (周连童和黄荣辉, 2008)。如此强的热力作用, 其年际、年代际变率可能会对东亚夏季环流和我国气候产生一系列的未知影响。所以对于干旱区地表能量平衡的研究感热输送是较重要的关键问题之一。在大、中尺度数值模式和气候变化研究中, 大都通过总体输送法计算地表感热, 其中一个关键参数就是地表热力输送系数  $C_H$ , 它在陆气相互作用参数化研究中占有重要的地位, 能否对其准确估算直接影响到地气之间能量交换过程的刻画和描述能力。在我国的干旱和高寒地区, 由于资料的稀少和研究的不足, 至今对这些地区感热的计算, 大多数还是将  $C_H$  取定值 (李振朝等, 2007; 周连童和黄荣辉, 2008), 或者以地气温差的变化特征来表征感热的变化 (周连童和黄荣辉, 2006; 符睿等, 2008)。通过对不同下垫面  $C_H$  值的比较发现, 它的大小受多种因素的制约, 不同地区的值存在着一定的差异, 特别是在我国地表特征较复杂的西北干旱地区 (王慧等, 2008)。所以, 在这些地区将  $C_H$  取定值计算出的感热, 存在很大的不确定性。

但是到目前为止,  $C_H$  只有一些通过野外科学试验得到的单点值 (王慧等, 2008), 所以较难准确估算区域上的感热通量。为了使单点的  $C_H$  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, 很多人从总体输送系数与大气稳定性和地面风速之间的相关性着手 (陈万隆和翁笃鸣, 1984; 左洪超和胡隐樵, 1992; 张立盛等, 1994; 张强等, 2001; 张述文等, 2004; 韦志刚等, 2006), 给出了一些它们之间的经验关系式。这些关系式虽然形式上有所不同, 但是都是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。由于青藏高原区多高寒草甸下垫面, 所以总体输送系数与地面风速的拟合关系式能够得到普

遍的应用 (季国良等, 1986; 徐国昌等, 1990; 李栋梁等, 1997)。然而, 在干旱地区由于下垫面物理结构的复杂性和不均一性, 并且大、中尺度大气模式的网格覆盖范围均很广, 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在这些地区一般并不是很理想, 有时还会产生很大的误差, 或者根本就无法使用。所以, 区域尺度地表能量通量的估算问题长期以来都是大家试图对此研究却迟迟未能解决的难题之一。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总体输送系数等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, 所以利用卫星遥感结合地面观测资料估算区域尺度上的地表参数成为解决这一问题的一个重要途径 (贾立等, 1999; 马耀明等, 1999, 2004; 洪刚等, 2001; 陈添宇等, 2006), 为此, 我们采用了卫星遥感的归一化差值植被指数 (NDVI) 资料与黑河地区地气相互作用野外观测实验研究 (HEIFE) 取得的地面观测资料相结合的研究方案, 对我国西北干旱区内  $C_H$  值由“点”及“面”的估算方法进行了探索研究, 由  $C_H$  与 NDVI 值之间的拟合分析, 得到了针对我国西北干旱区不同下垫面类型的区域尺度  $C_H$  值的估算公式, 并对此进行了合理性检验, 从而为我国西北干旱区区域尺度地表感热通量较准确的估算研究打下了基础, 同时也为我国干旱区陆-气相互作用参数化研究和气候模式预报能力的提高提供一些参考依据。

## 2 所用资料

### 2.1 地面观测资料

地面资料选用了“黑河地区地气相互作用野外观测实验研究 (HEIFE)”五个基本站的近地层微气象和湍流观测资料, 各观测站具体位置和观测项目介绍见黑河试验核心小组 (1991)。表 1 给出了各站的下垫面状况和资料观测时间。HEIFE 试验野外观测从 1990 年 6 月正式开始, 1992 年 10 月结束, 实验区位于青藏高原同其北部戈壁沙漠之间的黑河流域中段, 属于欧亚大陆腹地典型干旱地区, 对全球陆面特征有其特殊的代表性。它是亚洲第一次国际合作和国际上野外连续观测时间最长的一次干旱区陆面过程实验, 直接列入了世界气候研究计划 (WCRP) 和国际地圈生物圈计划 (IGBP), 经过

表 1 地面各站下垫面性质和资料观测时间

Table 1 Land surface conditions and observation time of the data for all field stations.

站名	下垫面状况	微气象资料观测时间	湍流资料观测时间
张掖 (38°51'N, 100°22'E)	夏季为春小麦、玉米套种, 冬季为裸露耕地	1990 年 10 月~1992 年 10 月	1991 年 8、10、12 月, 1992 年 5、6 月
临泽 (39°07'N, 100°10'E)	同张掖	1990 年 7 月~1991 年 12 月	1991 年 6、7 月
沙漠 (39°27'N, 100°11'E)	起伏的沙丘和沙沟	1990 年 9 月~1992 年 12 月	1991 年 6、8、10 月和 12 月, 1992 年 6、7 月
化音 (39°04'N, 100°05'E)	戈壁: 粗沙和碎石组成的水平、均匀地面, 间有稀疏骆驼刺植被	1990 年 7 月~1991 年 12 月	1990 年 8 月, 1991 年 8、10 月
平川 (39°20'N, 100°08'E)	绿洲和沙漠过渡带: 夏季多数种西瓜, 少数为春小麦、玉米套种, 冬季为裸露沙地	1990 年 9 月~1991 年 12 月	无

几年的观测, 取得了欧亚大陆腹地典型干旱地区黑河流域内沙漠、戈壁、绿洲等不同下垫面的太阳辐射、大气边界层以及绿洲生物气象和干旱地区降水云资料, 并收集了该地区常规气象和水文资料, 为中纬度干旱地区陆面过程的理论研究奠定了丰富的观测实验基础。

## 2.2 卫星资料

选用美国 NOAA 系列卫星遥感的 1981 年 7 月~2006 年 12 月的每半月合成的 NDVI 数据集 (来源: ftp://ftp.glc.f. umiacs. umd. edu/glc/f/GIMMS/Geographic [2008-10-02]), 分辨率为 8 km×8 km, 采用地理投影坐标系, 空间范围截取了我国 110°E 以西、35°N 以北的广大区域。由于植被具有较明显的年际变化和季节变化特点, 对植被的动态监测可以从一定程度上反映气候变化的趋势, 因此监测植被动态变化以及分析这种变化与气候的关系已经成为全球变化研究的一个重要领域。NDVI 是植被生长状态和植被覆盖度的最佳指示因子, 它定义为近红外波段和可见光波段行星反照率数值之差和这两个数值之和的比值, 计算公式为:  $I_{NDV} = (b_2 - b_1) / (b_2 + b_1)$ , 其中  $b_1$ 、 $b_2$  为先进高分辨率辐射仪 (AVHRR) 的第 1、2 通道行星反照率数值。它的优势为长时间序列上的较高分辨率, 能够很好地反映地表植被的季节和年变化特征, 并且制作过程中采用了经过辐射校正和几何粗校正的 NOAA-AVHRR 数据源, 再进一步对每日、每轨的图像进行几何精校正、除坏线、除云等处理, 进而进行 NDVI 的计算及合成, 计算完成后再对结果影像两两比较, 选出 NDVI 最大的值作为最终的 NDVI 结果。

## 3 方法

### 3.1 局地表面热力输送系数的计算

由于 HEIFE 试验各地面观测站均有较长时间序列的风、温梯度观测资料, 本文采用空气动力学方法直接计算  $C_H$  值。

利用空气动力学方法计算地表热力输送系数的研究已有很多 (刘树华和刘和平, 1996; 高志球等, 2000; 张强等, 2001; 李国平等, 2002; 韦志刚等, 2006), 参考文献中对这一计算方法的原理和所使用的理论都进行了详细的介绍, 在这里就不再赘述, 只给出了具体的计算过程。

首先, 根据塔站观测的风速和气温资料计算大气层结稳定度参数梯度 Richardson 数  $Ri$ , 公式为:

$$Ri = \frac{g}{T} \left[ \frac{T_2 - T_1}{\sqrt{z_1 z_2} \ln(z_2/z_1)} + \gamma_d \right] \left[ \frac{\sqrt{z_1 z_2} \ln(z_2/z_1)}{V_2 - V_1} \right]^2 \quad (1)$$

式中,  $z$ 、 $T$ 、 $V$  为高度 (单位: m)、气温 (单位: K) 和风速 (单位: m/s), 下标 1、2 代表不同的观测层,  $T$  为绝对温度,  $g$  为重力加速度,  $\gamma_d$  为干绝热递减率。在计算中, 张掖绿洲、沙漠站和化音戈壁以及平川站选择的两个高度层都为 2 m 和 8 m, 由于临泽站冬半年没有 2 m 和 8 m 的观测, 所以选择了 4 m 和 10 m 两个高度。Monin-Obukhov 大气稳定度参数  $\zeta = z/L$ ,  $L$  为 Monin-Obukhov 大气稳定度长度, 一般常用 Businger-Dyer (Dyer and Hicks, 1970; Dyer, 1974; Businger et al., 1971) 关系近似确定  $\zeta$ , 公式如下:

$$\zeta = \begin{cases} Ri, & Ri \leq 0, \zeta \leq 0, \\ \frac{Ri}{1 - 5Ri}, & Ri > 0, \zeta > 0. \end{cases} \quad (2)$$

在 $|\zeta| \leq 2$ 范围内(盛裴轩等, 2003), 由 $\zeta$ 确定风速和温度 Monin-Obukhov 相似性函数的积分形式 $\psi_m$ 、 $\psi_h$ , 其计算公式为(Paulson, 1970):

$$\psi_m = \begin{cases} \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+x}{2}\right) - 2\tan^{-1}x + \frac{\pi}{2}, & \zeta \leq 0, \\ -5\zeta, & \zeta > 0, \end{cases} \quad (3)$$

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

其中,  $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$ 。最后, 得到 $C_H$ 的计算公式如下:

$$C_H = \frac{k^2}{\left[\ln\left(\frac{z-d}{z_{0T}}\right) - \psi_h(\zeta)\right] \left[\ln\left(\frac{z-d}{z_{0m}}\right) - \psi_m(\zeta)\right]}, \quad (5)$$

其中,  $k$ 为 Karman 常数, 取 0.4 (盛裴轩等, 2003);  $z$ 为高度, 取 10 m;  $d$ 为零平面位移高度, 在绿洲的生长季节(4月下旬~9月上旬), 对于高度为 $h_c$ 的植被,  $d = 2h_c/3$ , 在较平坦的戈壁、沙漠和绿洲非生长季, 可认为 $d = 0$ ;  $z_{0m}$ 、 $z_{0T}$ 分别为地表的空气动力学粗糙度和热力学粗糙度, 在绿洲和戈壁地区 $z_{0m}$ 的计算取经验关系式:  $z_{0m} = \exp(-7.13 + 9.33I_{NDVI})$  (贾立等, 1999), 沙漠地区取 $z_{0m} = 0.0045$  m (左洪超等, 1992)。一般, 通过 $z_{0T}$ 与 $z_{0m}$ 之间的比例关系来近似确定 $z_{0T}$ , 目前对 $z_{0m}/z_{0T}$ 的取值问题, 国内外的气象专家利用不同地区的野外观测资料进行了大量的研究, 得到的 $z_{0m}/z_{0T}$ 值也不尽相同, Chen et al. (1997) 对此进行了较系统的总结和讨论。研究表明 (Chen et al., 1997; Beljaars and Viterbo, 1994), 在大部分情况下, 取 $z_{0m}/z_{0T} = 10$  计算得到的地面通量与用 Zilitinkevich 公式 ( $C = 0.1$ ) 得到的结果一致。Braud et al. (1993) 研究指出, 对于较均匀的空地和植被地表面, 将 $z_{0m}/z_{0T}$ 近似取为 10 是合适的, 而对于非均匀地表面,  $z_{0m}/z_{0T}$ 的值可能要更大一些 (Hopwood, 1995)。由于本文所研究的三种下垫面均为较平坦、均质地表面, 所以暂取 $z_{0T} = 0.1z_{0m}$ 。

### 3.2 区域表面热力输送系数 $C_H$ 值的估算

我国西北干旱区地表既有戈壁、沙漠和绿洲, 也分布着绿洲与沙漠的过渡带及山体等, 为典型的非均匀下垫面, 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, 只能得到“点”或局地的研究结果, 其区域代表性到底有多大是关键问题。为了对我国西北干旱区内地表热力输送系数 $C_H$ 的分布特征有一个全面的了解, 其研究仅仅停留在“点”或局地的水平上是远远不够的, 而需要将代表着不同下垫面种类的局地结果扩展到整个区域范围, 这也是较准确而合理地估算西北干旱区内感热通量分布的必要基础。在陆面过程参数化研究中, 当由局地值进而推算区域值时, 利用卫星的观测手段是比较直观且方便的方法 (贾立等, 1999; 马耀明等, 1999, 2004; 洪刚等, 2001; 陈添宇等, 2006)。贾立等 (1999) 利用卫星遥感观测的 NDVI 资料与野外地面观测资料相结合, 得到了 $z_{0m}$ 和 NDVI 之间的指数关系:  $z_{0m} = \exp(-7.13 + 9.33I_{NDVI})$ , 从而可以对区域表面的地表粗糙度 $z_{0m}$ 进行估算。在中性条件下,  $C_{DN} = C_{HN} = k^2 / \{\ln[(Z-d)/z_0]\}^2$  (左洪超和胡隐樵, 1992)。通过对野外试验观测资料计算得到的不同下垫面 $C_H$ 值的比较也发现, 虽然 $C_H$ 值的大小受多种因素的制约, 不同地区的值存在着一定的差异, 但是它的大小与地表粗糙度 $z_{0m}$  (地表植被状况和覆盖程度) 关系密切 (王慧等, 2007, 2008; Chen and Zhang, 2009)。研究表明总体输送系数会随 $z_{0m}$ 的增大而增大, 它们之间有着几乎线性的关系 (王慧等, 2008)。由此可以知道地表感热输送系数 $C_H$ 与 NDVI 之间也应该存在着一定的关系, 所以本文采用了卫星遥感的归一化差值植被指数 (NDVI) 资料与 HEIFE 野外科学试验取得的地面观测资料相结合的研究方案, 对我国西北干旱区内 $C_H$ 值由“点”及“面”的估算方法进行了探索研究, 具体步骤为: 首先, 选取西北干旱区戈壁、沙漠和绿洲三种最主要下垫面的地面观测资料, 利用空气动力学方法求出不同下垫面上逐时的 $C_H$ 值, 然后求其半月平均; 其次, 利用 ENVI 遥感软件读出各下垫面 $C_H$ 值对应时期的 NDVI 值, 以保证 $C_H$ -NDVI 之间时空的匹配; 再次, 求这两组数据之间的拟合关系式; 最后, 对拟合公式进行合理性检验, 使所得结果可信, 从而达到区域尺度推广应用的要求。

## 4 结果分析

将空气动力学方法计算得到的张掖绿洲、沙漠和化音戈壁三站的 $C_H$ 值代入总体输送公式:

$$H = \rho_s c_p C_H |V| (T_0 - T) \quad (6)$$

计算地表感热通量, 并与由超声湍流脉动仪观测得到的实测值进行比较。公式(6)中  $\rho_s$  为干空气密度, 由干空气状态方程  $\rho_s = p / (R_d T_a)$  确定,  $p$  为本站气压(单位: Pa),  $R_d = 287.04 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 为干空气比气体常数,  $c_p = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , 为干空气定压比热;  $T_0$  为地面 0 cm 土壤温度(K);  $T$  和  $V$  分别为测站某一观测高度处温度(单位: K)和风速(单位: m/s), 这里取湍流观测高度处(2.9 m)的风速和温度, 以便于与由湍流观测得到的感热进行比较。图 1 给出了绿洲、沙漠和戈壁上一日变化相对完整的时段: 绿洲上选取了 1991 年 8 月 13~19 日, 沙漠上为 1992 年 6 月 5~11 日, 戈壁为 1990 年 8 月 20~26 日连续 7 天的 2 小时平均的感热计算值和实测值的比较。从图 1 中可以看出由空气动力学方法得到的  $C_H$  值计算出的地表感热通量与实测值在大多数时刻基本接近, 变化趋势也相对一致。可以认为, 由空气动力学方法计算出的  $C_H$  值基本可以满足将局地的结果进行区域尺度推广的要求。

在已知地面观测站的地理位置(经纬度)之后, 使用 ENVI 遥感图像处理软件可从 NDVI 遥感图像资料中读出各站  $C_H$  计算值对应时期的 NDVI 值。图 2 给出了不同下垫面条件下  $C_H$ -NDVI 拟合关系和表达式。从图 2 中可以看出, 在绿洲和戈壁上其地表热力输送系数  $C_H$  与卫星遥感的 NDVI 之间均具有极好的二次函数关系, 相关系数( $R$ )分别达到 0.953 和 0.984, 绿洲和戈壁总体的  $C_H$  值与 NDVI 值之间的二次函数关系也有很好的连续性, 总体的相关系数为 0.940, 两种下垫面条件下地表热力输送系数均随 NDVI 值的增大而增大; 在沙漠上, 由于植被非常稀少, 所以  $C_H$  值与 NDVI 之间的相关系数相对差一些, 但也达到了 0.01 的信度检验, 通过两年多的样本数据可以看到, 沙漠上  $C_H$  值的大小在一个很小的范围内变化, 所有样本数据的平均值为 0.00344, 这个值比戈壁上的要大, 这是合理的, 因为沙漠内充满了起伏的沙丘和沙沟, 地表粗糙度长度  $z_{0m}$  要大于较平坦的戈壁地区, 这与以前的一些研究结果(张立盛等, 1994; 王慧等, 2008)也是一致的。

图 3 给出了 1982~2006 年不同下垫面的 NDVI 的变化特征, 三个地区选取了 HEIFE 试验的张

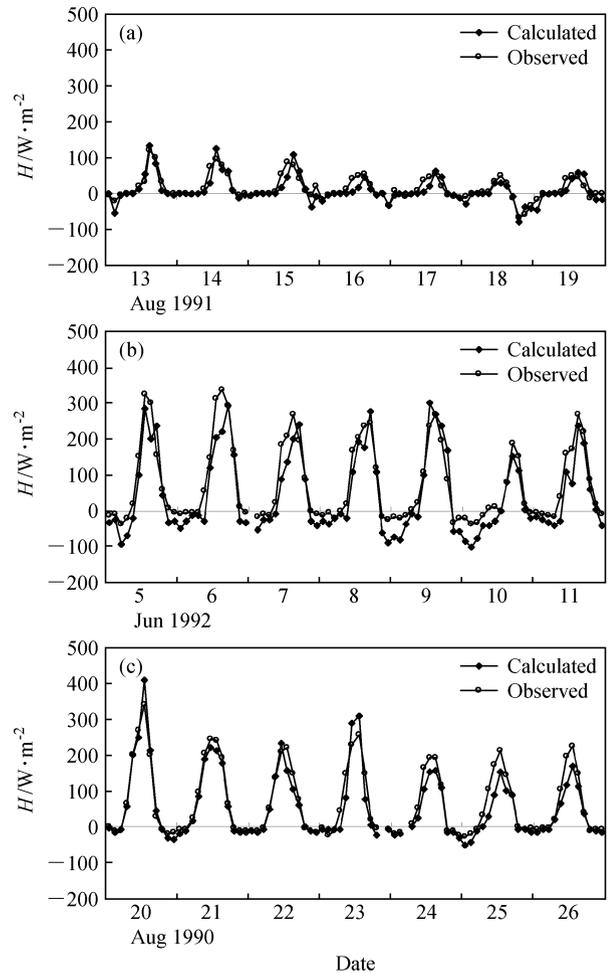


图 1 不同下垫面地表感热通量计算值与观测值的比较: (a) 绿洲; (b) 沙漠; (c) 戈壁

Fig. 1 Comparisons between calculated and observed sensible heat fluxes on different land surfaces: (a) Oasis; (b) desert; (c) gobi

掖绿洲、化音戈壁和沙漠观测站点所在区域的 NDVI 值, 代表了三种典型的下垫面类型。从图 3 中可以看出, 绿洲和戈壁地区的 NDVI 具有非常明显的季节变化, 且绿洲上的 NDVI 值要大于戈壁地区, 植被越密集, NDVI 值的季节变化就越大; 而沙漠下垫面由于几乎无植被覆盖, NDVI 值比绿洲和戈壁地区的都要小很多, 几乎都在 0.1 以下且全年变化不大。由此可以知道, NDVI 值的大小可以直接反映其下垫面的状况, 并且不同下垫面上的 NDVI 值均在每年的 6、7 月份达到最大。对图 3 中不同下垫面野外站 1982~2006 年 NDVI 最大值的多年变化进行分析得到: 绿洲、戈壁和沙漠三种下垫面 NDVI 最大值的变化区间分别为 0.489~

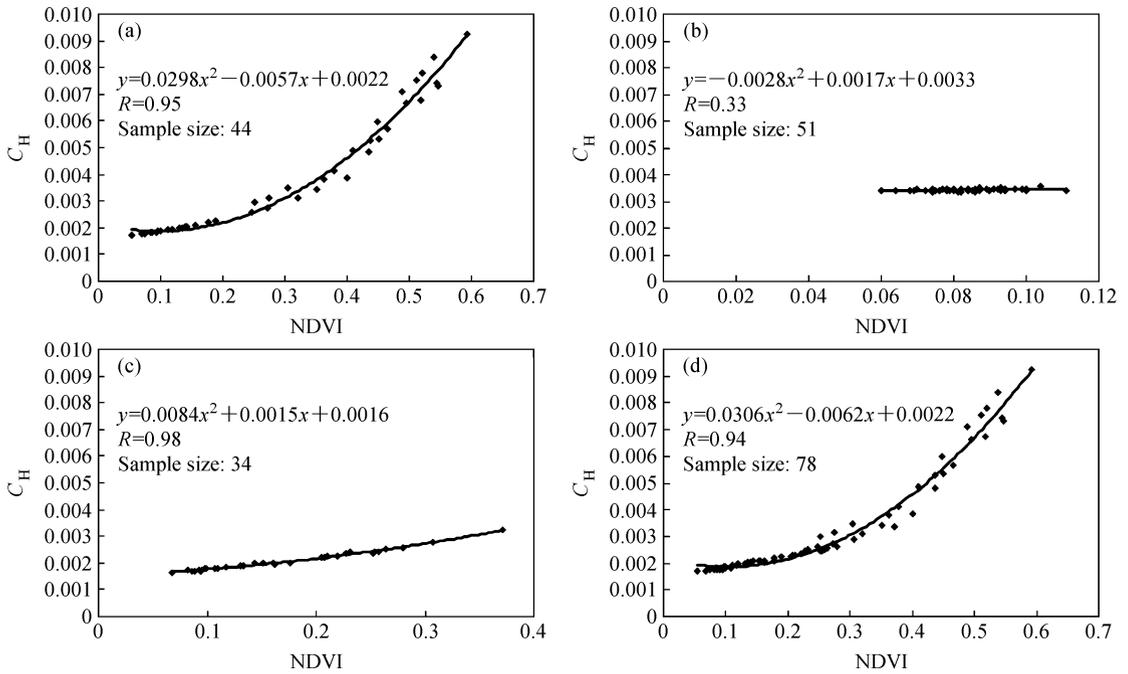


图 2 不同下垫面  $C_H$ -NDVI 的拟合关系：(a) 绿洲；(b) 沙漠；(c) 戈壁；(d) 绿洲和戈壁总体

Fig. 2 Fitting relations between  $C_H$  and normalized difference vegetation index (NDVI) of different land surfaces: (a) Oasis; (b) desert; (c) gobi; (d) all data of oasis and gobi

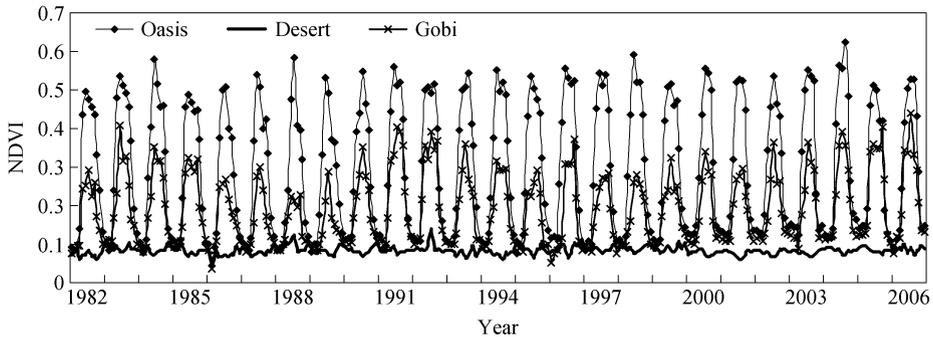


图 3 不同下垫面 NDVI 的变化

Fig. 3 Variations of NDVI on different land surfaces

0.625、0.228~0.439 和 0.084~0.141，NDVI 的多年平均最大值分别为 0.559、0.334 和 0.100。接着我们对西北地区各气象站所在区域 1982~2006 年 NDVI 的多年平均最大值 ( $I_{max}$ ) 进行计算，并参照野外站不同下垫面 NDVI 多年最大值的变化区间，给出一个判定气象站所在区域下垫面类型的标准， $0.45 \leq I_{max} < 1$  时为绿洲； $0.20 \leq I_{max} < 0.45$  时，为半干旱稀疏植被区或戈壁区（简称半干旱—戈壁区）； $0 < I_{max} < 0.20$  时，为干旱无植被区或沙漠区（简称干旱—沙漠区）。通过这个标准得到不同下垫面区域尺度  $C_H$ -NDVI 参数化关系式：

$$y = \begin{cases} 0.0298x^2 - 0.0057x + 0.0022, & 0.45 \leq I_{max} < 1, \\ 0.0084x^2 + 0.0015x + 0.0016, & 0.20 \leq I_{max} < 0.45, \\ -0.0028x^2 + 0.0017x + 0.0033, & 0 < I_{max} < 0.2, \end{cases} \quad (7)$$

其中， $x$  为 NDVI 值； $y$  为  $C_H$  值。

### 5 合理性检验

HEIFE 野外观测试验共有五个地面观测站，

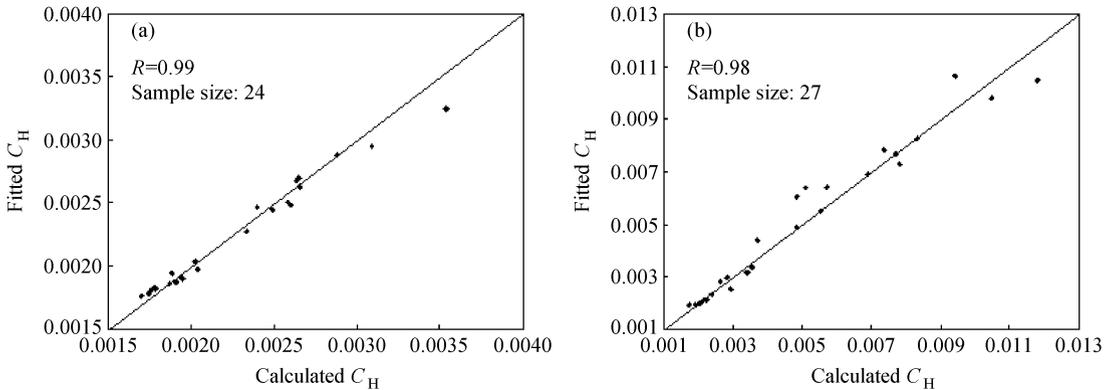


图4 (a) 平川和 (b) 临泽两站  $C_H$  计算值与拟合值的比较

Fig. 4 Comparisons between calculated and fitted values of  $C_H$  at (a) Pingchuan and (b) Linze stations

已经选取了其中三个站的数据进行了  $C_H$ -NDVI 关系式的拟合分析, 这里选取其它两个站 (平川和临泽) 的数据对拟合关系式进行合理性检验。先是利用空气动力学方法计算了两站的  $C_H$  值, 并与由 (7) 式计算得到的拟合值进行比较 (如图 4 所示)。从图 4 中可以看出, 两站得到的  $C_H$  计算值与拟合值都具有很好的相关。由于参加  $C_H$ -NDVI 拟合分析的  $C_H$  是由 2 m 和 8 m 的梯度资料计算的, 而临泽站的  $C_H$  计算值是由 4 m 和 10 m 的梯度资料计算的, 所以此站的  $C_H$  计算值和拟合值之间有所偏差, 对应关系不如平川站好。上面也提到  $C_H$  值的大小是受多种因素制约的, 虽然作者在计算  $C_H$  时考虑了稳定度的影响, 但是这里只给出了  $C_H$  值与 NDVI 之间的单一关系, 显得过于简单, 对于我国西北干旱区这样复杂的下垫面, 仅仅依靠这样简单的参数公式, 所得到的计算结果可能不会十分精确, 但对于区域尺度来说, 在缺乏用其他方法获得较准确的区域地表热力输送系数的情况下, 由方程 (7) 得到的结果还是很有意义的。

## 6 结论

利用 HEIFE 野外试验地面观测资料采用空气动力学方法计算了西北干旱区内不同下垫面的地表热力输送系数, 后代入总体输送公式计算感热通量, 并与超声仪器观测的实测值进行比较分析, 认为所得结果是可信的。然后, 结合由 NOAA 系列卫星遥感得到的反映地表植被特征的归一化植被指数 (NDVI) 资料, 经拟合得到了针对不同下垫面类型的区域地表热力输送系数  $C_H$  与 NDVI 之间的经

验关系式, 通过临泽和平川站的观测资料对所得到的  $C_H$ -NDVI 关系式进行了合理性检验, 结果表明: 对于区域尺度来说, 在缺乏用其他方法获得较准确的区域地表热力输送系数  $C_H$  的情况下, 利用卫星遥感资料对其估算是较为可靠的方法。HEIFE 实验区位于青藏高原同其北部的黑河流域中段, 地表既有戈壁、沙漠和绿洲, 也分布着绿洲与沙漠的过渡带, 几乎囊括了干旱区内所有的下垫面类型, 属于欧亚大陆腹地典型干旱地区。本文得到了针对我国西北干旱区不同下垫面的区域尺度 10 m 处  $C_H$  值与 NDVI 的拟合关系式, 主要是为了配合常规气象站的风速观测也在 10 m 高度处。通过此关系式, 就可以将干旱区内单点观测的地表热力输送系数  $C_H$  值进行一定的区域尺度的推广应用, 这为利用总体输送法对西北干旱区区域尺度地表感热通量较准确的估算研究打下了基础, 同时也为我国干旱区陆-气相互作用参数化研究和气候模式预报能力的提高提供一些参考依据。

**致谢** HEIFE 资料下载于国家自然科学基金委员会“中国西部环境与生态科学数据中心, <http://westdc.westgis.ac.cn> [2008-05-05]”。

## 参考文献 (References)

- Beljaars A C M, Viterbo P. 1994. The sensitivity of winter evaporation to the formulation of aerodynamic resistance in the ECMWF model [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 71: 135-149.
- Braud I, Noilhan J, Bessemoulin P, et al. 1993. Bare-ground surface heat and water exchanges under dry conditions: Observations and parameterization [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 66: 173-200.
- Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. 1971. Flux profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28:

181-189.

- Chen F, Janjić Z, Mitchell K. 1997. Impact of atmospheric surface layer parameterizations in the new land-surface scheme of the NCEP mesoscale Eta model [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 185: 391-421.
- 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, L10404, doi: 10.1029/2009GL037980.
- 陈添宇, 陈乾, 李宝梓. 2006. 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*, 24 (3): 7-15.
- Chen Tianyu, Chen Qian, Li Baozi. 2006. Estimation of land surface energy flux densities over eastern part of Northwest China with the aid of satellite remote sensing and field observations [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas (in Chinese)*, 24 (3): 7-15.
- 陈万隆, 翁笃鸣. 1984. 关于青藏高原感热和潜热旬总量计算方法的初步研究 [M]//青藏高原气象科学实验论文集 (二). 北京: 科学出版社, 35-45.
- Chen Wanlong, Weng Duming. 1984. Preliminary study about computing methods of sensible heat and latent heat total quantity in ten-day period over Qinghai-Xizang Plateau [M]//*Meteorology Scientific Experiment Treatises about Qinghai-Xizang Plateau (II) (in Chinese)*. Beijing: Science Press, 35-45.
- Dyer A J, Hicks B B. 1970. Flux-gradient relationships in the constant flux layer [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 96: 715-721.
- Dyer A J. 1974. A review of flux-profile relationships [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 7: 363-372.
- 符睿, 韦志刚, 文军, 等. 2008. 西北干旱区地气温差季节和年际变化特征的分析 [J]. *高原气象*, 27 (4): 844-851.
- Fu Rui, Wei Zhigang, Wen Jun, et al. 2008. Analyses on characteristic of seasonal and interannual variation of difference between surface and air temperature ( $T_s - T_a$ ) in arid region in northwest China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 844-851.
- 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 Zhiqiu, Wang Jiemin, Ma Yaoming, et al. 2000. Study on roughness lengths and drag coefficients over the different underlying surfaces [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 19 (1): 17-24.
- 黑河试验核心小组. 1991. 黑河地区地气相互作用观测试验研究 (HEIFE) [J]. *地球科学进展*, 6 (4): 34-38.
- The core working group of the HEIFE. 1991. Atmosphere-land surface processes experiment at HEIFE River basin (HEIFE) [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 6 (4): 34-38.
- 洪刚, 李万彪, 朱元竞, 等. 2001. 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)*, 37 (5): 693-700.
- Hong Gang, Li Wanbiao, Zhu Yuanjing, et al. 2001. Methodological study on the estimate of regional surface fluxes over the Huaihe River basin area with satellite remote sensing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese)*, 37 (5): 693-700.
- Hopwood W P. 1995. Surface transfer of heat and momentum over an inhomogeneous vegetated land surface [J]. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 121: 1549-1574.
- 季国良, 浦明, 席蕴玉. 1986. 1983年夏季青藏高原地区的地面和大气加热场 [J]. *高原气象*, 5 (2): 155-166.
- Ji Guoliang, Pu Ming, Xi Yunyu. 1986. The characteristics of the surface and atmospheric heating fields over the Qinghai-Xizang plateau in summer of 1983 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 5 (2): 155-166.
- 贾立, 王介民, Massimo Menenti. 1999. 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*, 23 (5): 632-640.
- Jia Li, Wang Jiemin, Massimo Menenti. 1999. Estimation of area roughness length for momentum using remote sensing data and measurements in field [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (5): 632-640.
- 李栋梁, 章基嘉, 吴洪宝. 1997. 夏季青藏高原下垫面感热异常的诊断研究 [J]. *高原气象*, 16 (4): 367-375.
- Li Dongliang, Zhang Jijia, Wu Hongbao. 1997. A diagnostic study on surface sensible heat flux anomaly in summer over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 16 (4): 367-375.
- 李国平, 赵邦杰, 卢敬华. 2002. 青藏高原总体输送系数的特征 [J]. *气象学报*, 60 (1): 60-67.
- Li Guoping, Zhao Bangjie, Lu Jinghua. 2002. Characteristics of bulk transfer coefficients over the Tibetan Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 60 (1): 60-67.
- 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 2007. 河西地区地表感热特征分析 [J]. *高原气象*, 26 (2): 293-299.
- Li Zhenchao, Wei Zhigang, Lü Shihua, et al. 2007. Analyses on surface sensible heat characteristics over Hexi region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (2): 293-299.
- 刘树华, 刘和平. 1996. 不同下垫面湍流输送计算方法的研究 [J]. *应用气象学报*, 7 (2): 229-237.
- Liu Shuhua, Liu Heping. 1996. A study on the calculation method of turbulent transfer from different underlying surfaces [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 7 (2): 229-237.
- 马耀明, 王介民, Massimo Menenti, 等. 1999. 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*, 57 (2): 180-188.
- Ma Yaoming, Wang Jiemin, Massimo Menenti, et al. 1999. Estimation of flux densities over the heterogeneous land surface with the aid of satellite remote sensing and field observation [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 57 (2): 180-188.
- 马耀明, 刘东升, 苏中波, 等. 2004. 卫星遥感藏北高原非均匀陆表地表特征参数和植被参数 [J]. *大气科学*, 28 (1): 23-31.
- Ma Yaoming, Liu Dongsheng, Su Zhongbo, et al. 2004. Land surface variables and vegetation variables estimated from satellite remote sensing over inhomogeneous land surface of the northern Ti-

- betan Plateau [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (1): 23-31.
- Paulson C A. 1970. The mathematical representation of wind speed and temperature profiles in the unstable atmospheric surface layer [J]. J. Appl. Meteorol., 9: 857-861.
- 盛裴轩, 毛节秦, 李建国, 等. 2003. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 247-250. Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, et al. 2003. Atmospheric Physics [M] (in Chinese). Beijing: Beijing University Press, 247-250.
- 王慧, 胡泽勇, 谷良雷, 等. 2007. 黑河下游鼎新戈壁下垫面近地层能量输送及微气象特征 [J]. 高原气象, 26 (5): 938-945. Wang Hui, Hu Zeyong, Gu Lianglei, et al. 2007. Characteristics of energy transfer and micrometeorology in near surface layer in Dingxin Gobi of lower reach of Heihe River [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (5): 938-945.
- 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 Hui, Li Dongliang, Hu Zeyong, et al. 2008. Review of study on the bulk transfer coefficients over the land [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 23 (12): 1249-1259.
- 韦志刚, 黄荣辉, 陈文. 2006. 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, 25 (5): 834-839. Wei Zhigang, Huang Ronghui, Chen Wen. 2006. Transfer coefficients of sensible heat under the atmospheric stability in near surface layer over Dunhuang Gobi [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (5): 834-839.
- 徐国昌, 李栋梁, 陈丽萍. 1990. 青藏高原地面加热场强度的气候特征 [J]. 高原气象, 9 (1): 32-43. Xu Guochang, Li Dongliang, Chen Liping. 1990. The climatic characteristics of surface heating fields over the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 9 (1): 32-43.
- 张立盛, 钱正安, 陈伯民. 1994. 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, 13 (3): 357-365. Zhang Lisheng, Qian Zheng'an, Chen Bomin. 1994. Estimation of surface drag coefficients in the HEIHE region and numerical experiments of their influences [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 13 (3): 357-365.
- 张林源, 苏桂武. 1993. 中国西北干旱区的成因、特征与环境优化 [J]. 干旱区资源与环境, 7 (3, 4): 1-10. Zhang Linyuan, Su Guiwu. 1993. Geneses, characteristics and environmental optimization of northwestern China's arid area [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 7 (3, 4): 1-10.
- 张强, 卫国安, 黄荣辉. 2001. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数 [J]. 中国科学 (D辑), 31 (9): 783-792. Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. 2001. The study of the atmospheric bulk transfer coefficient over Desert and Gobi in arid region of northwestern China [J]. Science in China (Series D) (in Chinese), 31 (9): 783-792.
- 张强, 黄荣辉, 王胜等. 2005. 西北干旱区陆-气相互作用试验 (NWC-ALIEX) 及其研究进展 [J]. 地球科学进展, 20 (4): 427-441. Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. Advances in Earth Science, 20 (4): 427-441.
- 张述文, 邱崇践, 张卫东. 2004. 用变分方法估算淮河流域总体输送系数 [J]. 高原气象, 23 (4): 506-511. Zhang Shuwen, Qiu Chongjian, Zhang Weidong. 2004. Estimating the bulk transfer coefficients in Huaihe River basin by using a variational method [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (4): 506-511.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 中国西北干旱、半干旱区春季气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 1-13. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air temperature in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 1-13.
- 周连童, 黄荣辉. 2008. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. 大气科学, 32 (6): 1276-1288. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2008. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi-arid regions of northwest China and its relation to summer precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1276-1288.
- 左洪超, 胡隐樵. 1992. 黑河试验区沙漠和戈壁的总体输送系数 [J]. 高原气象, 11 (4): 371-380. Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. 1992. The bulk transfer coefficient over desert and Gobi in Heihe region [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 11 (4): 371-380.