王典, 周德刚, 黄荣辉, 等. 2017. 基于敦煌戈壁站观测对几套再分析产品夏季地表感热通量的评估 [J]. 气候与环境研究, 22 (5): 601−612. Wang Dian, Zhou Degang, Huang Ronghui, et al. 2017. Evaluation of summer sensible heat flux in multi-reanalysis products based on measurements at Dunhuang Gobi site [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (5): 601−612, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16212.

基于敦煌戈壁站观测对几套再分析产品夏季地表感热通量的评估

王典[1,2] 周德刚[2] 黄荣辉[2] 范广洲[1]

1 成都信息工程大学大气科学学院，成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心，北京 100190

摘 要 西北干旱区是欧亚大陆夏季感热输送的高值区，此区域感热输送对东亚季风气候系统的变异有重要影响。然而，再分析资料的感热通量在此区域存在很大的不确定性，影响该地区感热变化对东亚区域气候影响的认识。本文基于敦煌戈壁站2001～2014年夏季的观测数据，评估了NCEP/NCAR、NCEP/DOE、ERA-Interim 和JRA-55这 4 套再分析产品的感热通量。敦煌戈壁站的感热通量是根据敦煌戈壁站常规观测数据和 Y08 方案计算得到，代表敦煌戈壁站的实际感热。结果显示，戈壁站夏季感热多年平均约为 85.7 W m^{-2}，但受局地降水的影响存在较大的波动；再分析资料的感热通量之间存在很大的不确定性，与观测相比，ERA-Interim 的感热通量在大小和变化上好于其他再分析资料，在没有局地性降水的影响时比较接近观测。进一步分析了再分析感热与观测差异的原因。研究表明，再分析资料中的地表风速和地气温差与粗糙度设置和热力参数化方案相关联。各再分析资料均不同程度地低估了敦煌戈壁站的地气温差（观测值约 6.5 °C），这主要是由于再分析系统中对戈壁下垫面的粗糙度设置偏高以及热力参数化方案不太适用于戈壁下垫面造成的。相对而言，ERA-Interim 的参数化方案在戈壁下垫面优于其他再分析产品的参数化方案，使得 ERA-Interim 的地气温差相对其他再分析资料更接近实际观测，感热通量较为合理。

关键词 感热通量 西北干旱区 再分析资料 戈壁下垫面

文章编号 1006-9585（2017）05-0601-12 **中图分类号** P468 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16212

Evaluation of Summer Sensible Heat Flux in Multi-reanalysis Products Based on Measurements at Dunhuang Gobi Site

WANG Dian[1,2], ZHOU Degang[2], HUANG Ronghui[2], and FAN Guangzhou[1]

1 *College of Atmospheric Sciences*, *Chengdu University of Information Technology*, *Chengdu* 610225

2 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190

Abstract The arid region of Northwest China is one of the regions with strong summer surface sensible heat flux transfer in Eurasia. Surface sensible heat flux over this arid region plays an important role in the variation of the East

收稿日期 2016-11-29；**网络预出版日期** 2017-03-07

作者简介 王典，男，1989 年出生，硕士研究生，主要从事气候变化及其数值模拟研究。E-mail: 770134256@qq.com

通讯作者 周德刚，E-mail: zhoudg@mail.iap.ac.cn

资助项目 公益性行业（气象）科研专项项目 GYHY201406001，国家自然科学基金项目 41205055，中国科学院国际合作一带一路专项：气候变化研究及观测计划项目 134111KYSB20160010

Funded by China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grant GYHY201406001), National Natural Science Foundation of China (Grant 41205055), Chinese Academy of Sciences “the Belt and Road Initiatives" Program on International Cooperation: Climate Change Research and Observation Project (Grant 134111KYSB20160010)

Asian monsoon system. However, large uncertainties in summer sensible heat flux over this region have been found in various reanalysis datasets, which hinders our exact understanding of its climatic influence on the East Asian monsoon system. Using the summer measurements from 2001 to 2014 at Dunhuang Gobi site, this paper evaluated summer sensible heat fluxes in four reanalysis datasets including NCEP/NCAR, NCEP/DOE, ERA-Interim, and JRA-55. Sensible heat flux observations at Dunhuang Gobi site were derived from routine meteorological observations combined with a reasonable surface flux parameterization scheme (Y08 scheme). The results indicate that the average summer sensible heat flux at this site is about 85.7 W m^{-2}, while its variation range is large due to the influence of local rainfall. There exist certain differences in the sensible heat flux among different reanalysis datasets. Compared with the observations, the sensible heat flux from the ERA-Interim is the best in both the magnitude and variation, and agrees well with observations when there is no local rainfall influence. The reasons for the uncertainty in sensible heat flux in the four reanalysis products and the differences between reanalysis and observations were investigated. Surface wind speed and differences between surface skin temperature and air temperature are associated with the specification of roughness and surface flux parameterization scheme. The difference between surface skin temperature and air temperature in the reanalysis products was much smaller than the observation (6.5 °C) mainly due to the unrealistically high value of roughness and inappropriate parameterization scheme for the Gobi surface in these reanalysis products. The parameterization scheme of ERA-Interim is relatively better than those of others in that the difference between surface skin temperature and air temperature is close to observations, which results in a relatively reasonable estimation of sensible heat flux.

Keywords Sensible heat flux, Arid region of Northwest China, Reanalysis datasets, Gobi surface

1 引言

我国西北地区由于距离海洋遥远，加之受地形阻挡影响，从海洋来的水汽很难到达，使得该地区降水稀少，故此区域大部分是戈壁、沙漠或是稀疏植被下垫面，是典型的干旱区。许多研究指出，在西北干旱区，由于春、夏季到达地表的太阳辐射强烈，陆—气相互作用也非常强烈，而且地表与大气之间能量输送主要以感热通量输送为主，此区域的感热通量输送在整个欧亚大陆是一个高值区（布和朝鲁等，2002；周连童，2009），因此该地区被称为欧亚大陆的“热垫”（周连童和黄荣辉，2008）。此区域的高感热通量输送不仅可以影响局地的对流边界层特征和天气气候，还能够通过大气环流引起东亚季风区（特别是中国东部）气候的变化（布和朝鲁等，2002；周连童和黄荣辉，2008；黄荣辉等，2013）。然而，由于观测资料的匮乏，关于西北干旱区陆—气相互作用对局地大气和东亚区域气候异常的影响研究，无论是数值模拟还是气候诊断分析，目前还常依赖于大气再分析资料。

大气再分析资料是利用数据同化系统把各种来源的观测资料与数值预报产品进行重新融合和最优集成的“产物”。随着同化技术的不断改进，更合理的数值预报模式的应用，以及更多不同来源观测数据的融合（Kanamitsu et al.，2002；Uppala et al.，2005），再分析资料产品的质量也在不断提高。美国、欧盟和日本等自 20 世纪 90 年代以来先后进行了一系列全球大气再分析计划，相继完成了多套全球再分析资料数据集。目前常用的再分析产品包括：美国环境预报中心和国家大气研究中心再分析资料 NCEP/NCAR、美国环境预报中心和美国能源部的再分析资料 NCEP/DOE、欧洲中期天气预报中心的再分析资料 ERA-Interim、ERA-40、日本气象厅的全球大气再分析资料 JRA-25 和 JRA-55 等，这些再分析资料在气候研究和模式模拟等领域广泛应用，不仅为长时间序列气候变化研究提供了新的手段，同时也为一些观测不足地区的气候研究提供重要的、甚至是不可替代的数据支撑，极大推动了现代大气科学的发展。

然而，作为对历史气候的再现，再分析资料不可避免地包含着多种误差，例如由于观测系统变更而引入的误差、将非均匀下垫面的观测资料融合到格点上带来的误差、数值模式和同化方案引入的误差等（Kistler et al.，2001），特别是观测系统的不断变更引入的虚假气候变化信号，这些均会影响资料的实际应用。而且，由于融合的观测资料不同、数值预报模式和同化技术的差异，不同的再分析资料之间存在着不一致。在再分析资料的各种变量中，主要受融合观测资料影响的变量（例如高空气温和风速等），一般被划分为 A 类变量，其可信度相对较高；由于观测资料的限制而主要依赖于数值预报

模式生成的变量（例如地表通量、降水等），则归类于 C 类变量，可信度相对较低（Kistler et al.，2001），在使用前需要利用实际观测资料进行对比和评估。在我国，利用观测对再分析产品的变量场（如地表温度场、降水场、大气温度和位势高度等）进行了很多评估，得到了许多非常有意义的结论（黄刚，2006；Ma et al.，2008；周顺武和张人禾，2009；李瑞青等，2012；朱智等，2015）。

感热通量是陆—气间热力交换的重要物理量，目前常由涡动相关法进行观测，相对于常规气象观测站点而言，通量观测站相对有限且观测时间较短，使得国内利用观测感热通量对再分析产品进行的评估相对较少（周连童，2009；王澄海和王蕾迪，2010；竺夏英等，2012），而且比较中使用的实际感热资料一般时间较短（一年至几年之间）。再分析的感热通量是由数值预报模式计算生成，属于 C 类变量，不同再分析产品的感热通量资料间还存在很大差异（周连童，2009；竺夏英等，2012）。考虑到我国西北干旱区的感热通量在地表能量分配中处于支配地位，春、夏季的异常变化对局地气候和东亚夏季风环流有重要的影响（周连童和黄荣辉，2008），而不同再分析资料的感热通量在此区域有很大差异，尤以夏季最为显著，因此，为了更准确理解西北干旱区感热输送的异常变化对气候影响的过程和机理，再分析资料在使用前开展与观测或估算的比较十分必要。选取有较长观测历史的野外台站资料有助于更好评估再分析资料的不确定性。“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验（NWC-ALIEX）”在敦煌戈壁站有长时间的连续观测，并且该站对干旱区戈壁下垫面的陆—气相互作用有较好的代表性。为此，本文选取了敦煌戈壁站 2001～2014 年夏季（6、7、8 月）的观测资料，评估不同的再分析资料产品，分析它们之间差异的原因。这不仅为再分析资料的选取和提高气候变化研究结果的可靠性提供参考，而且对于数值模式模拟的改进以及再分析同化系统的改进等也有十分重要的意义。

2 资料和方法

2.1 观测数据

野外观测资料选取了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验”在敦煌戈壁站的观测。敦煌戈壁站（40°10′N，94°31′E；海拔 1150 m）位于我国河西走廊敦煌市郊外的双墩子戈壁滩，距离东部敦煌绿洲约为 7 km，该站在敦煌地区的具体位置见图 1。敦煌地区降水稀少，平均年降水量约为 40 mm，是典型的极端干旱区。敦煌戈壁站周围地表主要由沙、砾石、砾沙和中粗砂组成，该下垫面对于典型干旱区戈壁下垫面具有很好的代表性。本文所用的敦煌戈壁站观测资料包括 2001～2014 年每半小时观测一次的 8 m 风速、2 m 气温、地表温度以及地表气压等。观测资料经过了质量检测和质量评价（王超等，2010），以及缺测数据的插补。另外，使用了该站 2008 年 8 月 7～27 日典型晴天的湍能通量数据，该通量数据由 CSAT3（Campbell）三维超声风温仪观测，并通过了质量控制和质量评价（周德刚等，2012）。考虑到降水前后感热输送存在显著的差异，还参考了敦煌气象站及周边气象台站 2001～2014 年的降水资料。

再分析资料选取美国环境预报中心（NCEP）和国家大气研究中心（NCAR）合作研制的 NCEP/NCAR 再分析资料（Kalnay et al.，1996；Kistler et al.，2001），NCEP/NCAR 可以说是最早发展且时间尺度最长的全球大气再分析资料；美国环境预报中心（NCEP）与美国能源部（DOE）的联合研制的 NCEP/DOE 再分析资料（Kanamitsu et al.，2002），该套资料可以看作是对 NCEP/NCAR 再分析资料的延续和更新；欧洲中期天气预报中心（ECMWF）在同化了更多、更广泛的卫星和地表观测资料的基础上开发的 ERA-Interim 再分析资料数据集（Uppala et al.，2005；Simmons et al.，2007）；以及日本气象局（JMA）研制的更适合亚洲地区天气和气候分析与研究的 JRA-55 全球再分析资料数据集（Onogi et al.，2007；Ebita et al.，2011），各再分析资料介绍如表 1 所示。为了与敦煌戈壁站的观测进行比较，再分析资料选取了 2001～2014 年的相关变量，主要包括感热通量、辐射四分量、以及地表气温和风速等。注意到，尽管在敦煌地区存在有敦煌绿洲，但是再分析资料的水平分辨率在 1.25°（纬度）×1.25°（经度）到 1.875°（纬度）×1.875°（经度），其中最高的水平分辨率也在 100 km 以上，而敦煌绿洲的尺度在 20 km 左右，因此再分析资料中敦煌绿洲的影响是可以忽略不计的。再分析资料的粗糙度设置也显示这一点，在敦煌地区及周围的粗糙度均设置为裸土粗糙度（约 10 mm）。因此，再分析

产品再现的地表感热通量，与敦煌戈壁站观测的一致，均为裸土下垫面的感热通量，这是本文利用敦煌戈壁站的观测数据来评估再分析资料的重要理由。为了避免插值引入新的误差，本文中的再分析资料数据选择最接近敦煌戈壁站的格点数据与观测进行比较。

表 1 各套再分析资料的同化方案及利用实测资料估算感热通量的方案

Table 1 Sensible heat flux parameterization schemes used in the reanalysis datasets and estimation from routine observation

	感热通量参数化方案	同化方案	水平分辨率	时间分辨率
ERA-Interim	$z_{0h}=z_{0m}/10$	4D-Var	1.5°×1.5°	3 h
JRA-55	$z_{0h}=z_{0m}$	4D-Var	1.25°×1.25°	3 h
NCEP/NCAR,	$kb^{-1}=0.1R_{e*}^{0.5}$	3D-Var	1.875°×	6 h
NCEP/DOE			1.875°	
观测估值	$z_{0h}=(\frac{70v}{u_*})\exp(-7.2u_*^{0.5}\lvert T_*\rvert^{0.25})$	无	站点	0.5 h

注：z_{0m} 为动量粗糙度，z_{0h} 为热力粗糙度，kb^{-1} 为附加阻尼项，$R_{e*}=z_{0m}u_*/v$，u_* 为摩擦速度，v 为分子黏性系数，T_* 为摩擦温度。4D-Var、3D-Var 分别表示四维、三维变分资料同化。

2.2 方法

一般情况下，地表感热通量 H 可以通过地表温度 T_g、气温 T_a、风速 u 和地表气压 p 计算得到，公式如下：

$$H=\rho c_p C_h u(T_g-T_a), \quad (1)$$

其中，空气密度 $\rho=p/R(T_0+T_a)$，R 为气体常数（287 J kg^{-1} K^{-1}），T_0=273.15 K；c_p 为空气定压比热容；热力输送系数 C_h 可由下式计算得到：

$$C_h=k^2\Bigg/\left\{Pr\left[\ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right)-\Psi_m(\zeta)+\Psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right)\right]\cdot\left[\ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right)-\Psi_h(\zeta)+\Psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right)\right]\right\}, \quad (2)$$

其中，k 为 von Karman 常数，Pr 为普朗特数（当稳定度 $\zeta\geqslant0$ 时取 1，$\zeta<0$ 时取 0.95），z 为风速（气温）的观测高度，L 为 Monin-Obukhov 长度，ζ 为稳定度 $\zeta=z/L$，$\Psi_m(\zeta)$ 和 $\Psi_h(\zeta)$ 分别为动量稳定度修正项和温度稳定度修正项。

目前，对于干旱区的 C_h 值进行了许多研究（左洪超和胡隐樵，1992；张强等，2001；韦志刚等，2006），除了取常值（张强等，2001）外，也进行了一些参数化拟合（韦志刚等，2006；王慧和李栋梁，2010a）。普遍地，C_h 值常通过参数化方案确定，例如附加阻尼项 kb^{-1}，即利用 z_{0h} 和 z_{0m} 的比值 $kb^{-1}=\ln(z_{0m}/z_{0h})$ 来计算。如 Brutsaert（1982）提出的参数化方案 $kb^{-1}=2.46R_{e*}^{0.25}-2$、Zeng and Dickinson（1998）提出的并应用于 CLM 4.0 模式中的热力参数化方案 $kb^{-1}=0.13R_{e*}^{0.45}$、以及可以看做是对 Zeng and Dickinson（1998）参数化方案进一步改进的 $kb^{-1}=0.36R_{e*}^{0.5}$ 方案（Zeng et al.，2012）等。

再分析资料的感热通量是由同化系统中的陆面过程模式计算得到的，其中，ERA-Interim 使用的是 ECMWF 陆面过程模式，NCEP 再分析资料同化系统中使用了 Noah 陆面过程模式（Kalnay et al.，1996），JRA-55 使用的是 SiB 陆面过程模式（Sellers et al.，1986），它们使用的感热通量参数化方案见表 1。需要特别说明的是，ERA-Interim 的 ECMWF 陆面过程模式对动量和热力输送的计算分为两层考虑（Beljaars and Holtslag，1991），在混合层以下选取局地各实际下垫面的动量粗糙度和热力粗糙度计算动量和感热（裸土的热力参数化方案见表 1），在混合层中根据总的动量通量以及地形计算格点的有效粗糙度，根据总的感热通量和有效粗糙度计算格点的有效热力粗糙度。这意味着，在计算敦煌地区裸土的动量输送时，动量粗糙度为包括了地形在内的有效粗糙度，高于裸土的动量粗糙度，而在计算感热输送时，动量粗糙度选取为裸土粗糙度，计算过程有别于其他再分析资料中对动量通量和感热通量的计算。

在敦煌戈壁站，尽管存在利用涡动相关法对感热通量的直接观测，但主要在几次加强期观测，累计时间相对较短，不足以进行较长时间的比较。因此，这里的感热通量根据近地层风、温、湿的梯度观测资料计算，并与实际观测进行比较。在计算敦煌戈壁站的感热通量时，采用 Yang et al.（2008）提出的参数化方案，这里简称为 Y08 方案。该方案能合理再现高原和西北干旱区裸土、戈壁和稀疏植被下垫面的感热通量（周德刚，2016）。图 2 比较了 2008 年 8 月直接观测的感热通量和利用 Y08 参数化方案计算得到的同期感热通量，结果显示它们具有较好的一致性。在敦煌戈壁站的其他加强期，Y08 方案计算的感热与观测也显示很好的一致性（Chen et al.，2010）。由于实际观测的地表能量通量不闭合，并考虑到涡动相关法观测的感热通量受低频损失等因素的影响略低于真实值，可以认为用 Y08 方案重现敦煌戈壁站的感热通量是基本合理的，因此，可以用其来代表实际观测的感热。

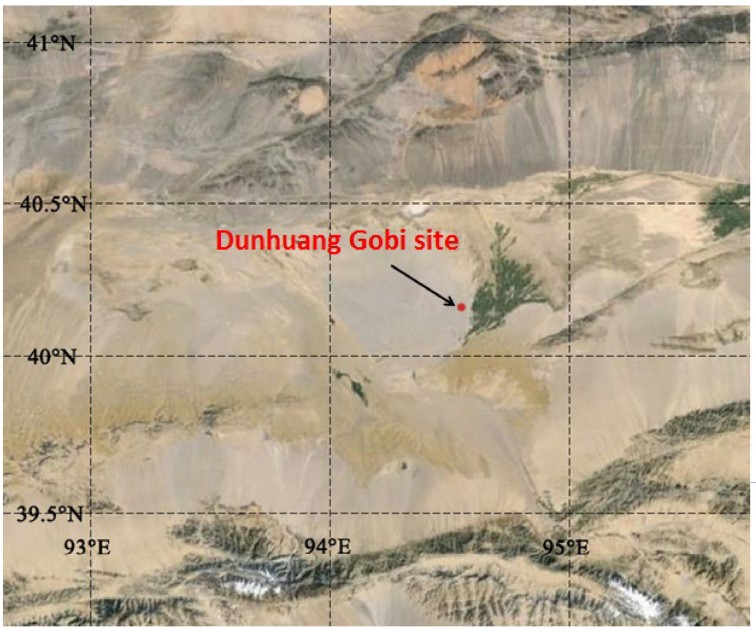

图 1　敦煌戈壁站的地理位置

Fig. 1　Location of the Dunhuang Gobi site in the Dunhuang area

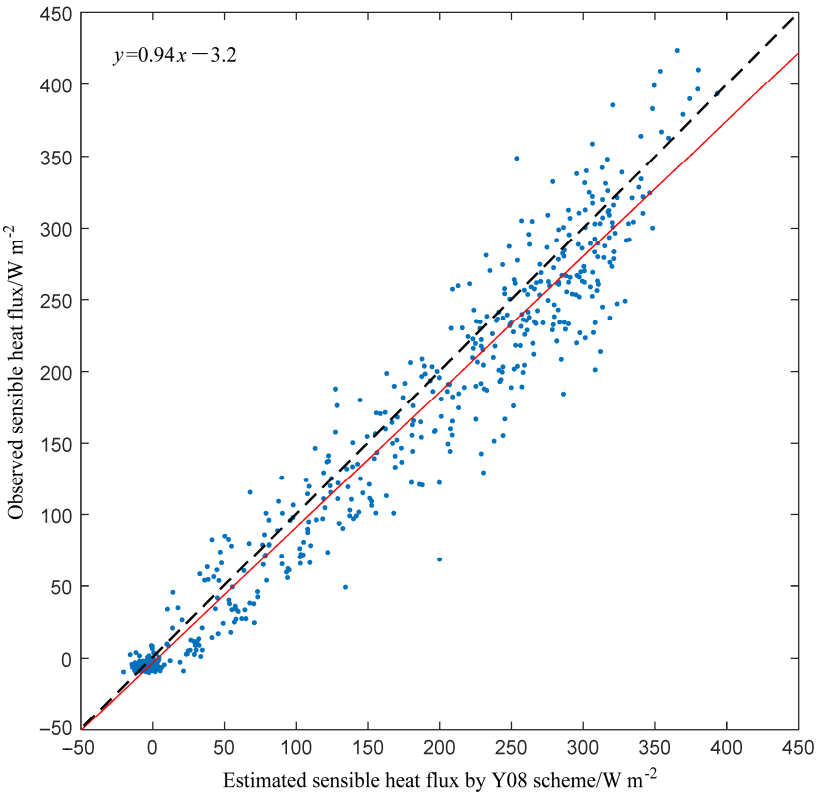

图 2　用 Y08 参数化方案与观测资料得到 2008 年 8 月 7～27 日敦煌戈壁站感热通量的比较

Fig. 2　Comparison of observed sensible heat flux and that estimated by the Y08 scheme at Dunhuang Gobi site during 7−27 August 2008

3 感热通量的比较

图 3 显示了敦煌戈壁站 2001～2014 年夏季逐月的感热变化，该站多年平均的夏季感热通量为 85.7 W m^{-2}，总体来说感热通量在 6 月份较大，在 8 月份相对较小。感热通量存在有较大的年际波动，这和降水的变化基本一致（敦煌地区的夏季逐月降水也见图 3）。敦煌站降水资料显示，在 2002 年 6 月上旬及中旬该地区有较强的降水过程，月降水量达 44.2 mm，与此对应，在 2002 年 6 月的感热通量较常年偏小。相同情况还出现在 2007 年的 6 月及 7 月（两月总降水量达到 34.5 mm），同期的感热通量也相对较低。在 2012 年 7 月中旬以及下旬存在两次明显的降水过程，在 8 月上旬又有降水产生，导致 2012 年 7 月和 8 月的感热偏低。因此，尽管敦煌戈壁站位于极端干旱区，降水稀少，感热输送强烈，但是当有降水事件发生后，潜热会迅速增加，相应地感热输送减弱，从而使得感热表现出较强的年际波动。

图 3 还给出了不同再分析资料在敦煌戈壁站 2001～2014 年夏季逐月的感热通量，可以看出，不同再分析资料的感热通量在量值上有很大的差异，其中，NCEP/NCAR 的感热明显高于其他资料，平均值达 107.6 W m^{-2}；ERA-Interim 的感热平均为 89.4 W m^{-2}，比较接近于敦煌戈壁站的实际值；NCEP/DOE 和 JRA-55 的感热相对较小，平均值分别为 41.3 W m^{-2} 和 35.9 W m^{-2}。各套再分析资料均能显示出敦煌戈壁站夏季逐月感热通量的变化特征，即在 6 月和 7 月感热通量相对较大，8 月感热通量较小。其中，ERA-Interim 资料与观测感热通量的相关系数可达 0.72，其次是 NCEP/NCAR 与观测的相关系数为 0.62，NCEP/DOE、JRA-55 与观测的相关系数分别为 0.60 和 0.59。如果对感热通量取夏季平均后再比较，ERA-Interim 的年际变化呈减弱趋势，与实测基本一致（−0.17 W m^{-2} a^{-1}），JRA-55 减弱趋势偏强，而 NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 略有增大趋势；ERA-Interim 与观测的相关性最高（0.69），其次为 JRA-55（0.51），NCEP/NCAR、NCEP/DOE 与观测的相关较低。

敦煌戈壁站的实际感热通量会明显受到降水事件的影响，而在再分析资料中，降水同属 C 类变量，具有较大的不确定性。如果敦煌戈壁站的降水为局地性的较强降水（例如 2002 年 6 月和 2012 年 7 月）或周围台站有较大降水而敦煌戈壁站降水很少（如 2012 年 6 月），再分析资料对于这种局地性的降水更是难以再现，从而导致观测感热与再分析资料的结果存在明显差异。在 2007 年，观测与再分析资料感热的差异也与局地性降水有关。如果剔除这些时间段，观测的感热与再分析资料的一致性更好，相关系数均有所增加，ERA-Interim 与观测的相关系数最高（达 0.81），NCEP/NCAR、JRA-55 与观测的相关值次之，NCEP/DOE 与观测的相关系数增加不多；而且，观测感热的标准差除了与 NCEP/NCAR 的有较大差异外，与其他 3 种再分析结果比较接近，ERA-Interim 的结果总体上与观测更为接近。本文选取连续 14 年的观测数据进行比较，可以更好评估观测与再分析资料的异同，减少了只取某一年份观测比较的差异随机性。

总之，不同再分析资料的感热通量在敦煌戈壁站无论是值的大小还是变化上均存在很大的差异。敦煌戈壁站实际的感热通量受降水的影响，而局地降水是难以在再分析资料中再现的，如果剔除局地降水事件的时间段，ERA-Interim 的感热通量与观测比较一致，优于其他的再分析资料。

4 感热通量差异的原因分析

图 3 显示出不同再分析感热通量存在有很大的不确定性，特别是在感热值的大小上。是什么原因使得它们存在如此明显的差异呢？从计算感热的公式（1）可以看到，地表风速、地气温差和热力输送系数是影响感热输送大小的直接因子，而在再分析同化系统中热力输送系数是受地表参数和热力参数化方案影响的。为此，下面主要从地表风速、地气温差以及热力参数化方面分析不同再分析资料感热通量差异的原因。

4.1 地气温差和风速的比较

在陆面过程模式中，近地面风速是影响地表能量通量的重要强迫场，风速的大小对感热的输送效率有重要影响；风速也是模式中影响沙尘颗粒向大气输送的重要变量。在敦煌戈壁站，实测 8 m 风速在多年夏季中的峰值在 4.3～5.2 m s^{-1}，而各套资料给出的 10 m 风速的差异较大（图 4a），其中 NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 的风速与实测风速值接近，JRA-55 的风速高于实测风速，ERA-Interim 的风速低于实测风速。再分析资料与观测资料的风速逐月变

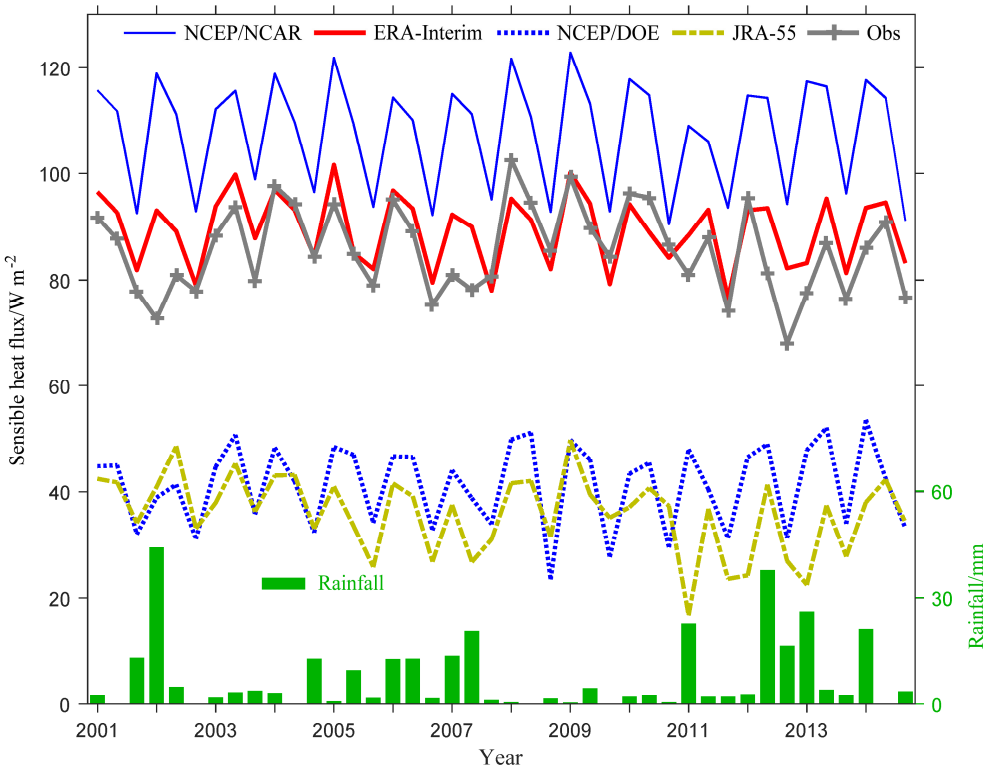

图 3　2001～2014 年敦煌戈壁站观测与再分析资料的夏季逐月感热通量

Fig. 3　Variation of the observed sensible heat flux and comparisons with that in four reanalysis datasets at Dunhuang Gobi site in the summer (JJA) of 2001−2014

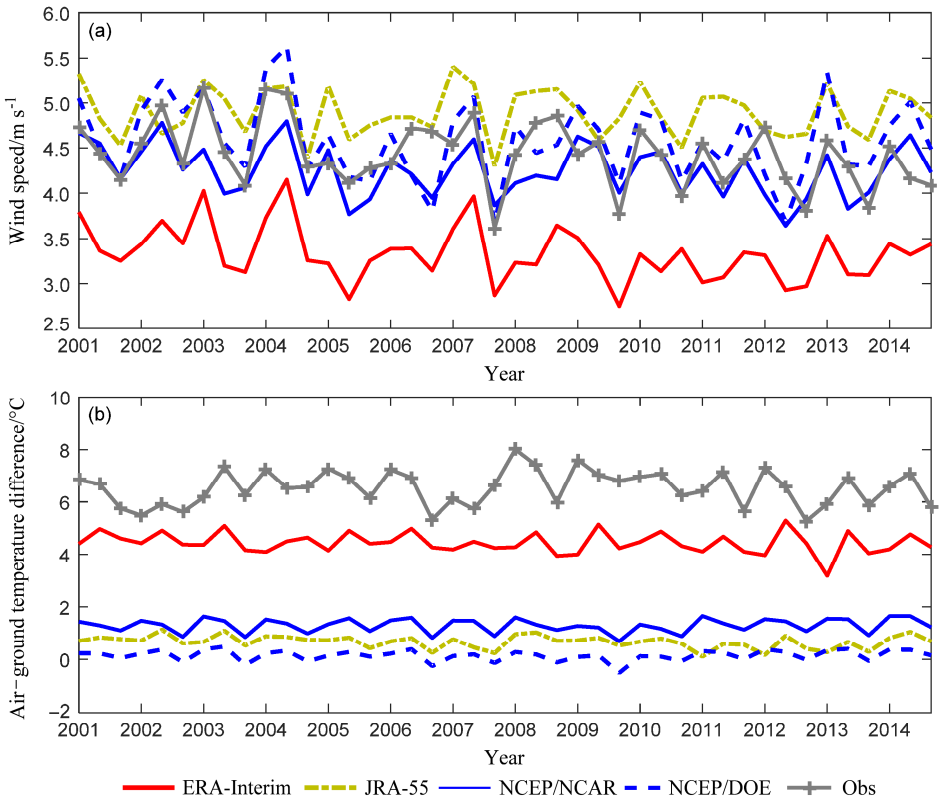

图 4　2001～2014 年敦煌戈壁站观测与再分析资料的夏季逐月（a）风速和（b）地气温差

Fig. 4　Variations of surface meteorological variables from observations and their comparisons with those in four reanalysis datasets at Dunhuang Gobi site in the summer of 2001−2014 (JJA): (a) Wind speed; (b) air−ground temperature difference

化特征基本一致，ERA-Interim 与实测风速的相关系数可达 0.77，其次 NCEP/DOE 与实测风速相关系数为 0.65，JRA-55 和 NCEP/NCAR 与实测风速的相关系数均为 0.60。再分析资料的 10 m 风速与观测资料 8 m 风速存在差异的原因，除了由于高度本身导致的差异外，还包括有同化系统是否融入地表观测风速和融入什么样的观测资料，以及同化系统中对地表粗糙度的设置。如果同化系统融合了气象台站观测的风速，而台站风速可能受城市化的影响低于野外观测（王慧和李栋梁，2010b），使得再分析的风速偏小。而且，敦煌戈壁站的实际粗糙度在 0.6 mm 左右，而在再分析系统中，裸土的粗糙度设置为 10 mm，也会影响再现的风速大小。此外，在 ERA- Interim 的同化系统中，地表有效粗糙度还考虑了地形等的影响，较大的粗糙度可能导致再现的地表风速小于敦煌戈壁站的观测。

各再分析资料的地表气温与观测值在大小上也存在显著差异，但在温度的变化上比较一致，这与目前在我国对再分析资料的 2 m 气温的评估是一致的（赵天保和符淙斌，2006；Ma et al.，2008）。相比较而言，地气温差在量值大小上有明显的差异。从图 4b 中可以看出，各套再分析资料模拟得到的地气温差均小于实际观测的地气温差，其中，ERA-Interim 资料相对接近实测地气温差，比实际观测得到的多年夏季平均的地气温差值（6.5 °C）低 2.1 °C、JRA-55 偏低 5.9 °C、NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 分别偏低 5.2 °C 和 6.4 °C。因此，各套再分析资料均不同程度地低估了敦煌地区的地气温差，或者说不同程度地低估了地表温度，这将影响到再分析资料中对地表长波辐射的估算，进而能够影响地表感热通量。与观测的感热通量受降水的影响相类似，观测的地气温差在在降水较多的年份相对较小，但是在再分析资料中地气温差与降水的这种关系并不明显。

以上分析显示，再分析的地气温差和风速与敦煌戈壁站的观测存在不同的差异：ERA-Interim 的风速低于观测，但地气温差高于其他再分析资料更接近观测；其他再分析资料的风速接近或略高于观测，但是地气温差明显偏低。当然，风速的大小与地气温差存在关联。如果将再分析产品在敦煌区域的动量粗糙度取为实际的戈壁下垫面动量粗糙度，则 ERA-Interim 的风速可能会接近戈壁站观测，而其他再分析资料的风速则进一步增加而高于观测；另一方面，敦煌地区具有较大的地气温差，这是干旱区的一个重要特征，而各套再分析资料均不能很好再现。为此，下面还将对各再分析资料的热力输送参数作进一步的分析。

4.2 热力参数化差异的影响

各套资料的热力输送系数 C_h 可以根据公式（2）反推得到。结果显示，各套资料反推的热力输送系数 C_h 均非定值，其中根据敦煌戈壁站观测和 Y08 方案计算的 C_h 值主要集中在 2.3×10^{-3} 左右，这与张强等（2001）的研究比较接近；ERA-Interim 再分析资料的 C_h 值分布主要在 2.8×10^{-3} 左右；JRA-55 的 C_h 值主要分布在 2.5×10^{-3} 左右；NCEP/NCAR 的 C_h 值主要分布在 5.3×10^{-3} 左右；NCEP/DOE 的 C_h 值主要分布在 3.0×10^{-3} 左右。从值的大小来看，JRA-55 和 ERA-Interim 资料的热力输送系数较为接近敦煌戈壁站。由于各再分析资料中对敦煌地区的粗糙度均取一致的裸土粗糙度，热力输送系数的显著差异必然与各再分析资料所采用的热力参数化方案（见表 1）有关。

为了比较热力参数化方案对感热的影响，这里选取敦煌戈壁站 2001～2014 年夏季观测的风速和地气温差，计算了不同热力参数化方案下的感热通量（见图 5）。为了评估各参数化方案对动量粗糙度的敏感性，分别取 z_{0m} 为 0.6 mm、3 mm 和 10 mm。结果显示，当取 z_{0m} 为实际的戈壁下垫面粗糙度（0.6

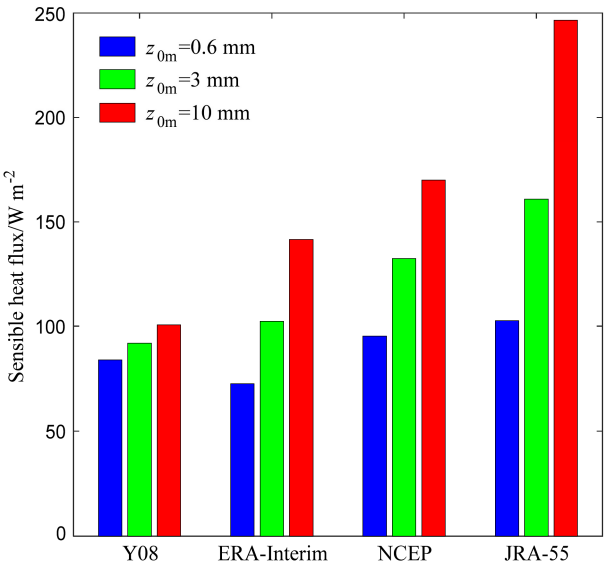

图 5 利用再分析资料中不同热力参数化方案以及敦煌戈壁站实测风速和地气温差在不同动量粗糙度下估算的感热通量，图中 ERA-Interim、NCEP、JRA-55 分别代表 ERA-Interim、NCEP、JRA-55 再分析资料中的参数化方案

Fig. 5 Estimated sensible heat fluxes by various schemes in reanalysis products and that calculated from observed wind speeds and air–ground temperature differences under different settings of z_{0m} at Dunhuang Gobi site (ERA-Interim, NCEP, and JRA-55 denote the schemes used in the ERA-Interim, NCEP, and JRA-55 reanalysis datasets, respectively)

mm）时，ERA-Interim、NCEP 和 JRA-55 预报模式中的参数化方案计算得到的感热通量分别为 72.5 W m^{-2}、95.2 W m^{-2} 和 102.6 W m^{-2}，相对而言，ERA-Interim 中的参数化方案计算的感热较为接近实测值，并且在 z_{0m} 取 3 mm 和 10 mm 时，也有同样的结果。这 3 种再分析资料中的参数化方案不同程度地对 z_{0m} 敏感，感热随着 z_{0m} 的增加有不同程度的增加。特别是 JRA-55 中的参数化方案（即 z_{0h}=z_{0m}），对动量粗糙度非常敏感，当 z_{0m}=3 mm 和 z_{0m} =10 mm 时，分别是 z_{0m}=0.6 mm 时的 1.56 倍和 2.40 倍，因此更需要局地的真实粗糙度。总的来说，ERA-Interim 中的参数化方案要优于 NCEP 和 JRA-55 预报模式中的参数化方案，这和 ERA-Interim 的感热通量更接近实际观测是一致的。

相对而言，Y08 参数化方案对动量粗糙度不太敏感，计算的感热不确定性相对再分析资料间的差异而言较小，其结果在可接受范围之内，因此用 Y08 方案估算的敦煌戈壁站感热是合理的，可以用于陆面过程模式或再分析同化系统对干旱区热力的模拟再现。图 5 也解释了为何再分析的地气温差都小于实际观测，当 z_{0m} 取为 10 mm 时（模式值），可以看出再分析同化系统中各参数化方案计算得到 C_h 值不同程度偏大，感热通量也明显偏大，而同化系统中地表的净辐射能量是有限的，即感热通量也是有限的，这就要求较小的地气温差以保证能量平衡。感热通量与地气温差间并非简单的线性关系，当地气温差减少时，地表温度的降低也使得向上长波辐射降低，例如 2～4 °C 的地表温度差异可以造成再分析系统中 10～15 W m^{-2} 的向上长波辐射不确定（Zhang et al.，2007），从而可以影响地表能量的分配和感热的变化。因此，再分析系统中的地气温差与通量参数化方案是联系在一起的。在 ERA-Interim 再分析系统中，尽管感热通量与实测基本相当，但是粗糙度的值设置较大（10 mm），并不是实际测量值（0.6 mm），如果将其粗糙度参考局地的实际值取值，则在感热通量接近实测值的同时，再现的地表风速也会进一步增大，地气温差也会进一步增加而更接近真实值。因此，模式或再分析系统中参考局地的观测来设置地表参数以及选择合理参数化方案，可以很好改进模拟再现的结果。

此外，再分析感热通量的差异，还与辐射通量及地表的能量分配有关。图 6 比较了各再分析资料

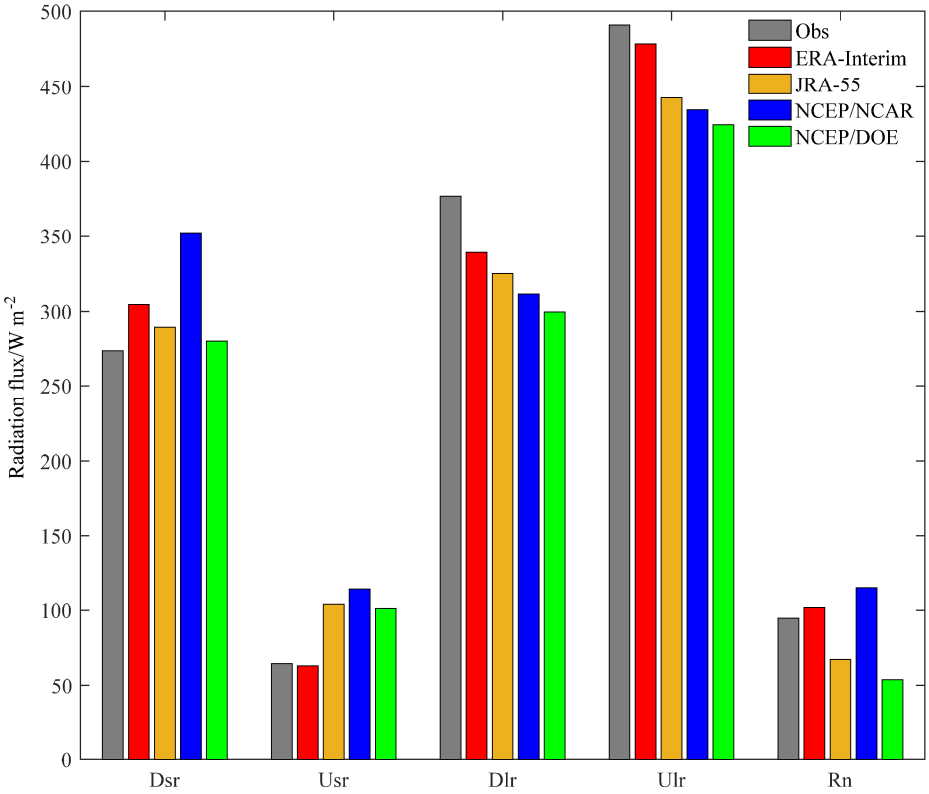

图 6　2001～2014 年敦煌戈壁站观测与再分析资料的夏季辐射通量的比较，Dsr、Usr、Dlr、Ulr、Rn 分别为向下短波辐射、向上短波辐射、向下长波辐射、向上长波辐射、净辐射

Fig. 6　Comparisons of radiation flux from observations and that in four reanalysis datasets at Dunhuang Gobi site during the summer of 2001–2014. Dsr, Usr, Dlr, Ulr, and Rn denote downward solar radiation, upward solar radiation, downward longwave radiation, upward longwave radiation, and net radiation, respectively

在敦煌地区的辐射通量，可以看出，各套再分析资料的向下短波辐射比敦煌戈壁站观测偏高，而向上和向下长波辐射均偏低，向上短波辐射除了ERA-Interim 接近观测外其他均偏高。这是与 Yang et al.（2007）对 GCM 模拟结果的分析是一致的。相对于敦煌戈壁站观测的向下短波辐射，NCEP/DOE 的偏高 6.5 W m^{-2}、JRA-55 偏高 15.6 W m^{-2}、ERA-Interim 偏高 31.2 W m^{-2}、NCEP/NCAR 明显偏高 78.7 W m^{-2}，这与很多研究指出的 NCEP/NCAR 向下短波辐射明显偏高（Xia et al.，2006；Decker et al.，2012；Wang and Zeng，2012）是一致的。而各套再分析资料向上长波辐射均低于实际观测值，这与模式中对地气温差的低估有着重要的关系。从净辐射看，ERA-Interim 的净辐射通量更接近于实测值，JRA-55 和 NCEP/DOE 的净辐射通量低于实测值，而 NCEP/NCAR 则明显高于实测值，再分析资料中净辐射的强弱与感热大小有很好的对应。这种辐射差异与不同的同化系统中的辐射传输模式有关，还需要结合观测进一步加强研究。总体来讲，ERA-Interim 的辐射分量要好于其他再分析资料。

5 结论和讨论

本文利用“NWC-ALIEX”中敦煌戈壁站 2001～2014 连续 14 年的观测资料，评估了四套全球大气再分析资料产品（NCEP/NCAR、NCEP/DOE、ERA-Interim、JRA-55）。相对于前人利用较短时间的观测资料进行的比较（仅加强期或一年至几年之间），本文选取 14 年的观测数据，可以更好评估观测资料与再分析资料的异同，避免了利用短期观测资料比较时存在的不确定性。结果显示，敦煌戈壁站的夏季感热通量多年平均约为 85.7 W m^{-2}，感热输送在有局地性降水事件后明显减弱，这与再分析的结果有明显差异；再分析资料的感热通量之间存在有很大的差异。总体上，ERA-Interim 的感热通量与观测相比无论是在数值还是在变化趋势上都最为接近，因此建议选取该资料用于西北干旱区感热变化气候影响的诊断分析。

不同再分析资料的风速和地气温差也存在较大差异。其中，ERA-Interim 的风速低于其他再分析资料，也比观测偏低，ERA-Interim 的地气温差值平均高于其他再分析资料但四套再分析资料均低估了敦煌地区的地气温差。这些差异与再分析系统中的热力参数化方案密切相关。由于再分析系统对戈壁下垫面的动量粗糙度值设置偏大，而各参数化方案对动量粗糙度又比较敏感，即这些参数化方案不能很好适用于戈壁下垫面，造成热力输送系数 C_h 偏高，通过地表温度进而影响地表长波辐射和感热分配，从而使得再分析感热通量和观测之间存在不同程度的差异。其中，ERA-Interim 同化系统考虑了粗糙度对动量和感热的不同影响因而在计算时分别取不同的值，该方案至少在戈壁下垫面优于 NCEP 和 JRA 的参数化方案，使得 ERA-Interim 的感热通量在敦煌戈壁站较为合理。如果 ERA-Interim 再分析系统能参考戈壁下垫面的实际粗糙度特征，将能够改进对风速、地气温差和感热通量的再现。因此，在对西北干旱区进行数值模拟或数据同化时，需要参考观测试验获得的局地粗糙度特征，并选取适合该下垫面的参数化方案。Y08 参数化方案对粗糙度的设置并不敏感，能较好再现在西北干旱区裸土下垫面的感热输送，因此，在对西北干旱区的陆-气相互作用进行模拟或数据同化时，建议选用 Y08 方案。

此外，各再分析资料中辐射通量与观测资料存在显著差异。ERA-Interim 的辐射通量相对要合理一些，但再分析产品在敦煌戈壁站均高估短波辐射而低估长波辐射，这与 Yang et al.（2007）的研究是一致的，因此还需要加强观测以改进对辐射的模拟再现。净辐射的大小与各再分析产品的感热通量强弱有很好的对应关系，此外，JRA-55 的感热偏弱还因为再分析的潜热通量太强，这也可能与该再分析系统中降水、土壤湿度设置有关。

本文研究选用再分析资料离敦煌戈壁站最近的格点值与观测进行比较，如果将再分析资料插值到敦煌戈壁站的位置进行比较，结论也是一致的。敦煌戈壁站的观测本身难免存在一定的误差以及感热计算方法也会导致误差，但相对于再分析资料的不确定性而言，该误差相对不大，不会对结论产生明显影响。本文的研究只是参考了敦煌戈壁站的观测，如果选取更多代表性野外台站，如在黑河流域的观测资料对再分析资料进行比较，将有助于更好评估再分析产品对西北干旱区热力输送的再现能力以及感热不确定性的原因。

参考文献（References）

Beljaars A C M, Holtslag A A M. 1991. Flux parameterization over land

surfaces for atmospheric models [J]. J. Appl. Meteor., 30 (3): 327–341, doi: 10.1175/1520-0450(1991)030<0327:FPOLSF>2.0.CO;2.

Brutsaert W H. 1982. Evaporation into the Atmosphere: Theory, History, and Applications [M]. Netherlands: Springer, 289pp.

布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 2002. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 61–73. Bueh Cholaw, Ji Liren, Cui Maochang. 2002. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of china and its relation to the regional atmospheric circulation in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 61–73.

Chen Y Y, Yang K, Zhou D G, et al. 2010. Improving the Noah land surface model in arid regions with an appropriate parameterization of the thermal roughness length [J]. Journal of Hydrometeorology, 11 (4): 995–1006, doi: 10.1175/2010JHM1185.1.

Decker M, Brunke M A, Wang Z, et al. 2012. Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations [J]. J. Climate, 25 (6): 1916–1944, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00004.1.

Ebita A, Kobayashi S, Ota Y, et al. 2011. The Japanese 55-year reanalysis "JRA-55": An interim report [J]. Sola, 7: 149–152, doi: 10.2151/sola.2011-038.

黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 310–320. Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 310–320.

黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in studies of air–land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 189–210, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471, doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.

Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (11): 1631–1643, doi: 10.1175/BAMS-83-11-1631.

Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82 (2): 247–267, doi: 10.1175/1520-0477(2001)082<0247:TNNYRM>2.3.CO;2.

李瑞青, 吕世华, 韩博, 等. 2012. 青藏高原东部三种再分析资料与地面气温观测资料的对比分析 [J]. 高原气象, 31 (6): 1488–1502. Li Ruiqing, Lü Shihua, Han Bo, et al. 2012. Preliminary comparison and analyses of air temperature at 2-m height between three reanalysis data-sets and observation in the east of Qinghai−Xiang Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (6): 1488–1502.

Ma L J, Zhang T J, Li Q X, et al. 2008. Evaluation of ERA-40, NCEP-1, and NCEP-2 reanalysis air temperatures with ground-based measurements in China [J]. J. Geophys. Res.-Atmos., 113(D15): D15115, doi: 10.1029/2007JD009549.

Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis[J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85 (3): 369–432, doi: 10.2151/jmsj.85.369.

Sellers P J, Mintz Y, Sud Y C, et al. 1986. A simple biosphere model (SIB) for use within general circulation models [J]. J. Atmos. Sci., 43 (6): 505–531, doi: 10.1175/1520-0469(1986)043<0505:ASBMFU>2.0.CO;2.

Simmons A J, Uppala S M, Dee D P, et al. 2007. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards [J]. ECMWF Newsletter, 110 (110): 25–35.

Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961–3012, doi: 10.1256/qj.04.176.

Wang A H, Zeng X B. 2012. Evaluation of multireanalysis products with in situ observations over the Tibetan Plateau [J]. J. Geophys. Res.-Atmos., 117: D05102, doi: 10.1029/2011JD016553.

王超, 韦志刚, 李振朝. 2010. 敦煌戈壁气象塔站资料的质量控制 [J]. 干旱气象, 28 (2): 121–127. Wang Chao, Wei Zhigang, Li Zhenchao. 2010. A quality control routine for Dunhuang Gobi meteorology tower data [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 28 (2): 121–127.

王澄海, 王蕾迪. 2010. 西北半干旱区感、潜热通量特征及近 50 年来的变化趋势 [J]. 高原气象, 29 (4): 849–854. Wang Chenghai, Wang Leidi. 2010. Characteristics of sensible and latent heat fluxes in semi−arid region of Northwest China and change trend in recent 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (4): 849–854.

王慧, 李栋梁. 2010a. 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. 2010b. 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, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.16.

王慧, 李栋梁. 2010b. 西北干旱区常规气象站与野外试验站观测的气象要素的对比分析 [J]. 高原气象, 29 (2): 514–522. Wang Hui, Li Dongliang. 2010a. Differences of meteorological elements that conventional meteorological and field stations observed in northwest dry area of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (2): 514–522.

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.

Xia X A, Wang P C, Chen H B, et al. 2006. Analysis of downwelling surface solar radiation in China from national centers for environmental prediction reanalysis, satellite estimates, and surface observations [J]. J. Geophys. Res.-Atmos., 111: D09103, doi: 10.1029/2005JD006405.

Yang K, Rasmy M, Rauniyar S, et al. 2007. Initial CEOP-based review of the prediction skill of operational general circulation models and land surface models [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85A: 99–116, doi: 10.2151/jmsj.85A.99.

Yang K, Koike T, Ishikawa H, et al. 2008. Turbulent flux transfer over bare-soil surfaces: Characteristics and parameterization [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 47 (1): 276–290, doi: 10.1175/2007JAMC1547.1.

Zeng X B, Dickinson R E. 1998. Effect of surface sublayer on surface skin temperature and fluxes [J]. J. Climate, 11: 537–550, doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<0537:EOSSOS>2.0.CO;2.

Zeng X B, Wang Z, Wang A H. 2012. Surface skin temperature and the interplay between sensible and ground heat fluxes over arid regions [J]. Journal of Hydrometeorology, 13(4): 1359–1370, doi: 10.1175/JHM-D-11-0117.1.

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. 2002. Bulk transfer coefficients of the atmospheric momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of Northwest China [J]. Science in China (Earth Sciences), 45 (5): 468–480, doi: 10.1360/02yd9049.

Zhang Y C, Rossow W B, Stackhouse P W Jr. 2007. Comparison of different global information sources used in surface radiative flux calculation: Radiative properties of the surface [J]. J. Geophys. Res. -Atmos., 112(D1): D01102, doi: 10.1029/2005JD007008.

赵天保, 符淙斌. 2006. 中国区域 ERA-40、NCEP-2 再分析资料与观测资料的初步比较与分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 14–32. Zhao Tianbao, Fu Congbin. 2006. Preliminary comparison and analysis between ERA-40, NCEP-2 reanalysis, and observations over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 14–32, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2006.01.02.

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参数化比较 [J]. 大气科学, 40 (2): 411–422. Zhou Degang. 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 411–422, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1502.15108.

周德刚, 黄刚, 马耀明. 2012. 中国西北干旱区戈壁下垫面夏季的热力输送 [J]. 大气科学学报, 35 (5): 541–549. Zhou Degang, Huang Gang, Ma Yaoming. 2012. Summer heat transfer over a Gobi underlying surface in the arid region of Northwest China [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 541–549.

周连童. 2009. 比较NCEP/NCAR和ERA-40再分析资料与观测资料计算得到的感热资料的差异 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 9–20. Zhou Liantong. 2009. A comparison of NCEP/NCAR, ERA-40 reanalysis, and observational data of sensible heat in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 9–20, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2009.01.02.

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.

周顺武, 张人禾. 2009. 青藏高原地区上空 NCEP/NCAR 再分析温度和位势高度资料与观测资料的比较分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (3): 284–292. Zhou Shunwu, Zhang Renhe. 2009. Comparison of NCEP/NCAR reanalysis data and radiosonde data about temperature and geopotential height of upper air over the Tibetan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (3): 284–292, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2009.03.05.

朱智, 师春香, 张涛, 等. 2015. 多种再分析地表温度资料在中国区域的适用性分析 [J]. 冰川冻土, 37 (3): 614–624. Zhu Zhi, Shi Chunxiang, Zhang Tao, et al. 2015. Applicability analysis of various reanalyzed land surface temperature datasets in China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 37 (3): 614–624, doi: 10.7522/j.issn.1000-0240.2015.0069.

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.

竺夏英, 刘屹岷, 吴国雄. 2012. 夏季青藏高原多种地表感热通量资料的评估 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (7): 1104–1112. Zhu Xiaying, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2012. An assessment of summer sensible heat flux on the Tibetan Plateau from eight datasets [J]. Science China: Earth Sciences, 55 (5): 779–786, doi: 10.1007/s11430-012-4379-2.