

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.

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

周德刚

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 气象台站观测的气象要素可能受城市化等因子的影响而与野外试验站的观测存在一定的差异, 这影响野外试验获取的热力参数直接应用于西北干旱区台站感热通量的估算。本文选取了一些常用的热力参数化方案 (包括 Z10、B82、Z98、Y08 和 Z12 等方案), 通过敦煌站夏季估算的感热通量与野外观测的比较以及对整个西北干旱区夏季感热通量的估算, 评价了这些热力参数化对动量粗糙度的敏感性和在西北干旱区的适用性。结果显示, 热力输送系数取定值的方案计算西北干旱区的感热通量可能存在较大不确定; 台站的动量粗糙度可能受城市化等因子的影响, 但在感热通量计算时建议取台站下垫面的动量粗糙度; Y08 方案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。

关键词 感热通量 热力参数化 西北干旱区

文章编号 1006-9895(2016)02-0411-12

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1502.15108

Testing of Surface Flux Parameterizations for Estimating Summer Sensible Heat Flux over the Arid Region of Northwest China from China Meteorological Administration Data

ZHOU Degang

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

Abstract Meteorological variables observed at China Meteorological Administration (CMA) stations may differ from those in field stations due to the effects of urbanization and other factors related to CMA observations. This hampers the application of the determined thermodynamical parameters from field experiments in estimating the sensible heat flux over the arid region of Northwest China. This study chooses several broadly used surface flux parameterization schemes (including Z10, B82, Z98, Y08, Z12, etc.) and tests their sensitivities to momentum roughness length. It also tests their application in the arid region of Northwest China by comparing the sensible heat flux estimation at Dunhuang with observations and estimations of summer sensible heat flux over the whole arid region of Northwest China from CMA data. The results indicate that the scheme taking the bulk transfer coefficient for heat as a constant may bring much uncertainty to sensible heat flux estimation over the arid region. It is advised that the momentum roughness length at CMA stations should consider that of the natural underlying surface where the station is located when determining the sensible heat flux, although it may be disturbed by urbanization and other factors. The sensible heat flux estimated by the Y08 scheme seems

收稿日期 2015-01-12; 网络预出版日期 2015-04-01

作者简介 周德刚, 男, 1978 年出生, 副研究员, 主要从事干旱区陆气相互作用的研究。E-mail: degangzhou@163.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41205055、91337104 和 41275003

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41205055, 91337104, and 41275003)

relatively reasonable, and therefore the use of this scheme is advised when analyzing the characteristics of summer surface sensible heat flux over the arid region of Northwest China.

Keywords Sensible heat flux, Flux parameterization, Arid region of Northwest China

1 引言

我国西北干旱区一般指我国 107°E 以西, 35°N 以北的区域。由于地处大陆腹地, 亚洲夏季风很难到达此区域, 年降水量大多在 200 mm 以下。这致使该地区大部分为戈壁和沙漠, 或是稀疏植被, 是典型的干旱区。许多研究(如: 布和朝鲁等, 2002; 周连童, 2010)指出, 此区域春夏季的感热通量在整个欧亚大陆是一个高值区。此区域的高感热通量输送不仅有助于形成局地的深厚对流边界层(Zhang et al., 2011), 还能够影响局地天气气候以及东亚地区特别是华北地区的气候异常(周连童和黄荣辉, 2008; 张强等, 2011; 黄荣辉等, 2013)。

由于在我国西北地区缺乏实测的感热通量气候资料, 对此区域感热通量变化的研究主要依赖于再分析资料或者根据气象台站资料估算的感热通量(如: 布和朝鲁等, 2002; Zhou and Huang, 2010)。然而, 不同的再分析资料给出的西北干旱区感热通量存在着较大的差异, 一个重要原因是不同的同化系统或模式中使用不同的热力参数化方案计算感热通量, 而这些热力参数化方案或某些参数设置不一定适用于西北干旱区。根据气象台站资料对感热通量估算时, 一般参考野外观测试验获得的热力参数特征, 也有研究根据野外观测统计的热力输送系数计算气象台站的感热通量(如: Zhou and Huang, 2010), 但是, 野外观测试验获得的热力参数特征应用于西北干旱区气象台站的感热通量估算时也需要注意其适用性。这些陆面模式中常用的参数化方案以及观测试验获取的单站热力输送参数, 他们对西北干旱区陆—气相互作用的模拟能力如何? 目前这方面的评价还不多。

自 20 世纪 80 年代末以来在我国西北干旱区相继开展了一系列的野外观测试验, 如“黑河地区地—气相互作用野外观测试验研究(HEIFE)”, “中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验(NWC-ALIEX)”等, 在西北干旱区的感热输送、地表参数特征等的认识上取得了许多非常有意义的研究成果, 并用于陆面过程模式的验证和改进(胡隐樵等, 1994; 贾立等, 2000; Zhang et al., 2002a; 朱德琴等, 2006; Zhou and Huang, 2011; 黄荣辉等,

2013)。这些观测试验对西北干旱区感热输送特征的认识基本上是在“点”上的认识。一方面, 在西北干旱区戈壁、沙漠和绿洲等下垫面的野外观测与临近的台站观测存在着一定的差异(王慧和李栋梁, 2010), 因为后者可能受到绿洲、城市化和观测环境变化等因子的影响(刘学锋等, 2012)。另一方面, 野外单站观测的粗糙特征也不同于再分析同化系统或气候模式中格点尺度的特征。这将影响野外试验获取的热力参数在西北干旱区感热通量计算中的直接应用。为此, 本文以台站资料计算西北干旱区夏季感热通量为例, 参照了西北干旱区野外试验观测的感热通量和热力参数特征, 探讨目前一些常用的热力参数化对感热通量估算的敏感性和在西北干旱区的适用性。

2 数据和方法

2.1 观测数据

选取了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验(NWC-ALIEX)”在敦煌双墩子戈壁站 2004~2009 年的观测。敦煌双墩子戈壁站(简称戈壁站, 40°10'N, 94°31'E, 海拔 1150 m)地处敦煌市绿洲西部的双墩子戈壁滩, 测站周围是平坦的沙石戈壁, 距离东部最近的绿洲 7 km。敦煌戈壁站目前已经拥有 10 多年的观测数据, 这里选取了 2008 年 8 月份加强期的超声观测以及 2004~2009 年的常规观测。超声观测仪器包括 CSAT3 (Campbell) 三维超声风温仪和 KH20 (Campbell) 水汽分析仪, 观测频率 10 Hz, 距离地面 3.0 m 高。选取 2008 年 8 月 8~13 日典型晴天的超声观测数据, 在质量控制和质量评价下获得了该下垫面的能量通量数据, 具体可参见周德刚等(2012)。常规观测数据选取每半小时观测一次的 8 m 风速、2 m 气温、地表温度和气压等变量。

根据我国 740 台站气象资料, 选取位于我国西北干旱区且在 1960~2010 年夏季有较完整观测纪录的气象资料, 一共有 57 个气象台站, 他们的分布见图 1。所用气象变量包括每日四次的 2 m 气温、10 m 风速、地表温度和气压。为了便于同敦煌戈壁站的常规观测进行比较, 还选取了敦煌气象站 2004~2009 年每小时观测的 2 m 气温、10 m 风速、

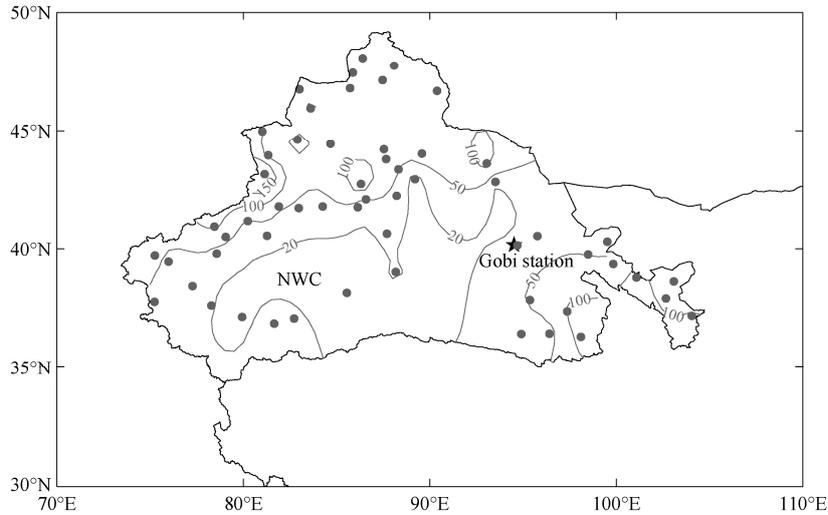


图1 文中选取的我国西北(NWC)干旱区气象台站的分布,等值线表示夏季平均降水量(单位: mm)

Fig. 1 Distribution of the chosen China Meteorological Administration (CMA) stations over the arid region of Northwest China (NWC), isolines display the summer average rainfall amount (units: mm)

地表温度和气压资料。

2.2 感热通量的估算

感热通量 H 可以由地表风速 U 、气温 θ_a 和地表温度 θ_s 计算得到:

$$H = \rho c_p C_h U (\theta_s - \theta_a), \quad (1)$$

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

$$C_h = \frac{\kappa^2}{Pr \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \psi_m(\zeta) + \psi_m\left(\frac{z_{0m}}{L}\right) \right] \left[\ln\left(\frac{z}{z_{0h}}\right) - \psi_h(\zeta) + \psi_h\left(\frac{z_{0h}}{L}\right) \right]}, \quad (2)$$

其中, κ 为 von Kármán 常数, Pr 为 Prantl 数 (当稳定度 $\zeta \geq 0$ 时取 1, $\zeta < 0$ 时取 0.95), z 为风速(气温)的观测高度, z_{0m} 为动量粗糙度, z_{0h} 为热力粗糙度, L 为 Monin-Obukhov 长度, 稳定度 $\zeta = z/L$, $\psi_m(\zeta)$ 和 $\psi_h(\zeta)$ 分别为动量稳定度修订项和温度稳定度修订项。当风速和气温观测高度不一样时, 把风速根据风廓线插值到气温观测高度再进行上述计算。

根据公式 (1) 计算感热通量时, 一般风速、地表温度和气温为几十分钟至小时尺度的观测平均, 并需要满足准定常条件。一般而言, 风速、地表温度和气温存在日变化, C_h 随着 ζ 和 z_{0h} 等的变化也存在着日变化。有时为计算简便, 取 C_h 为定值, 如 Zhang et al. (2002a) 在敦煌戈壁站取 $C_h = 2.10 \times 10^{-3}$, 这里简称为 Z02 方案, Zhou and

Huang (2010) 根据台站资料计算西北干旱区的感热通量时取 $C_h = 3.02 \times 10^{-3}$, 这里简称为 Z10 方案。如果用式 (2) 确定 C_h , 则 z_{0m} 和 z_{0h} 是影响 C_h 的两个重要特征量, z_{0h} 有时也用附加阻尼 $\kappa B^{-1} = \ln(z_{0m}/z_{0h})$ 替代。针对 z_{0h} 或 κB^{-1} , 已经发展出了许多热力参数化, 广泛用于陆面过程模式中。表 1 给出了一些陆面过程模式中常用的热力参数化。其中, B82 方案 (Brutsaert, 1982) 能够描述附加阻尼的平均大小 (Verhoef et al., 1997); Z98 方案 (Zeng and Dickinson, 1998) 用于 CLM 4.0 模式中 (Oleson et al., 2010), 可以认为是对 Noah 模式中热力参数化方案 (Zilitinkevich, 1995) 的升级, 后者用于 NCEP/NCAR 和 NCEP/DOE 产品中; Z12 方案 (Zeng et al., 2012) 是对 Z98 方案的进一步升级, 改善了对干旱区裸土的模拟; Y08 方案 (Yang et al., 2008) 能够较好地适用于高原和干旱区的裸土或稀疏植被 (Chen et al., 2010)。另外, 对裸土有时也简单取 $z_{0h} = z_{0m}/10$ 的简化方案 (如: van den Hurk et al., 2000), 这里简称为 S 方案。

为了比较两站估算的感热通量 (A 与 B) 的差异, 引入平均偏差 B_M 、平均绝对值偏差 B_{MAD} 和均方根偏差 B_{RMSD} , 他们分别计算如下:

$$B_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i), \quad (3)$$

$$B_{MAD} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |A_i - B_i|, \quad (4)$$

$$B_{\text{RMSD}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (A_i - B_i)^2} \quad (5)$$

其中, N 为样本总数。

表 1 陆面模式中一些常用的热力参数化方案

Table 1 Flux parameterization schemes broadly used in land surface models

参数化公式	参考文献	参数化方案简称
$\kappa B^{-1} = 2.46 Re_*^{0.25} - 2$	Brutsaert (1982)	B82
$\kappa B^{-1} = 0.13 Re_*^{0.45}$	Zeng and Dickinson (1998)	Z98
$z_{0h} = (70\nu / u_*') \exp(-7.2u_*'^{0.5} T_s ^{0.25})$	Yang et al. (2008)	Y08
$\kappa B^{-1} = 0.36 Re_*^{0.45}$	Zeng et al. (2012)	Z12
$z_{0h} = z_{0m} / 10$	van den Hurk et al. (2000)	S

注: $Re_* = z_{0m} u_*' / \nu$, u_*' 为摩擦速度, ν 为空气黏性系数, T_s 是摩擦温度。

3 热力参数化在单站的评价

沙漠、戈壁和稀疏植被是西北干旱区的主要下垫面, 气象台站的下垫面基本与台站所在区域代表性下垫面相一致, 观测具有一定的代表性。其中, 一些气象台站附近还有野外观测站点, 野外观测站点不受城市化和绿洲化的影响, 可以作为气象台站观测的一个参照。这里先从附近有野外观测站的单个气象台站来评价热力参数化的适用性。单个气象台站选取为敦煌站, 该站多年平均降水量为 38.3 mm, 即所在区域是非常干旱的, 在干旱区有很好的代表性。野外观测站选用敦煌戈壁站, 用该戈壁下垫面观测的感热通量作为参照, 评价敦煌气象站估算的感热通量的合理性。

3.1 敦煌戈壁站的热力输送特征

观测显示, 敦煌戈壁站在夏季有很强的感热通量输送, 在近中午时平均值可达 250 W m^{-2} 以上; 潜热通量除了有天气过程外一般很小, 相对于感热通量可以忽略; 土壤热通量一般存在明显日变化, 但日平均的土壤热通量基本接近于 0, 因此在日平均尺度上净辐射通量基本转化为感热通量(周德刚等, 2012)。Zhang et al. (2002b) 和 Zhou and Huang (2011) 分析了该下垫面的动量粗糙度, 由于观测的时间不同、观测仪器差异以及研究方法的差异, 结果略有差异, 但基本在 mm 量级上; 而热力粗糙度要比动量粗糙度小一个量级以上。这里取 $z_{0m} = 1 \text{ mm}$, 选取 Z02、S、Z98、Z12、B82 和 Y08 共六

种热力参数化估算敦煌戈壁站 2008 年 8 月 8~13 日的感热通量, 平均日变化见图 2a。同实际观测相比, Z98 方案计算的感热通量在白天明显偏大, 其次是 Z12 方案, 其他方案计算的感热通量相对比较接近于观测, Z02、S、B82、Y08 方案感热通量估算值与观测分别相差 5.0、13.5、3.0、7.5 W m^{-2} 。考虑到涡动相关法观测的感热通量受低频损失等因素影响将略低于真实值(观测期敦煌戈壁站实际观测的能量封闭率为 0.86), 因此这里的感热通量观测值略低于估算值也是合理的, 可以认为 Z02、S、B82 和 Y08 方案均可以较好地再现敦煌戈壁站这段时间的感热通量。

如果对敦煌戈壁站的动量粗糙度 z_{0m} 分别取 20 mm、5 mm 和 1 mm, 分析 S、Z98、Z12、B82 和 Y08 等不同热力参数化方案对动量粗糙度的敏感性, 结果见图 2b。可以看到, 当动量粗糙度取值较小(比较接近于实际值)时, 除了 Z98 和 Z12 方案外, 其他方案估算的感热通量日平均值接近于观测(与观测的差值在 10 W m^{-2} 以下)。Z12 方案相对 Z98 方案有一定的改进, 对动量粗糙度的敏感性明显降低, 但这两个方案均高估戈壁站的感热通量; S 方案对动量粗糙度非常敏感, $z_{0m} = 20 \text{ mm}$ 和 5 mm 时的感热通量值分别为 $z_{0m} = 1 \text{ mm}$ 时的 2.33 倍和 1.56 倍; 而 B82 方案对动量粗糙度基本不敏感, $z_{0m} = 20 \text{ mm}$ 和 5 mm 时的感热通量值分别为 $z_{0m} = 1 \text{ mm}$ 时的 0.99 倍和 1.05 倍, 这显示 B82 方案可能存在缺陷: 当增加 z_{0m} 的值时, 根据风廓线计算的摩擦速度也增加, 粗糙度雷诺数 Re_* 进一步增加, 使得参数化的 z_{0h} 过度减小并导致计算的感热通量反而减小; Y08 方案不是很敏感, $z_{0m} = 20 \text{ mm}$ 和 5 mm 时的感热通量分别为 $z_{0m} = 1 \text{ mm}$ 时的 1.28 倍和 1.13 倍。

3.2 敦煌戈壁站与敦煌气象站感热通量的比较

敦煌气象站和戈壁站均对裸土观测, 其中, 敦煌气象站则位于敦煌市东郊, 台站周围几十米以外就是绿洲农田, 而戈壁站位于敦煌市绿洲西部的戈壁滩, 距离绿洲最近的距离约 7 km, 因此, 敦煌气象站可能会受城市化、绿洲化等因子的影响。为此, 选用两站在 2004~2009 年夏季逐小时的风速、地气温差(由于 2006 年 7~8 月戈壁站风杯故障风速缺测, 取 2006 年 6 月份的平均日变化代表 2006 年夏季), 对比这两站的差异, 见图 3。其中, 风速逐年的平均日变化(图 3a)显示, 戈壁站 8 m 的风速

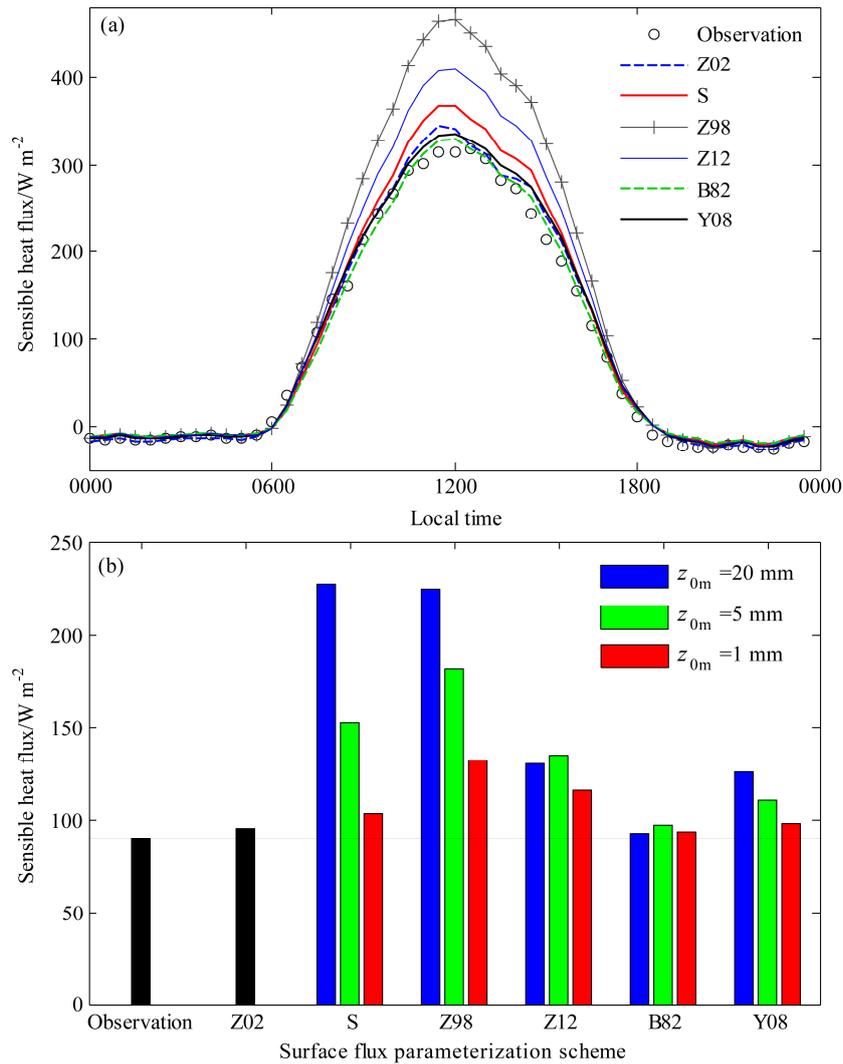


图2 不同热力参数化方案对敦煌戈壁站 2008 年 8 月 8~13 日感热通量 (单位: W m^{-2}) 的估算: (a) 感热通量的平均日变化; (b) 感热通量的日平均值对动量粗糙度的敏感性
Fig. 2 Estimation of sensible heat flux (units: W m^{-2}) at Gobi station during 8–13 August 2008 by different surface flux parameterization schemes: (a) Average diurnal varia heat flux; (b) sensitivity of daily mean sensible heat flux to momentum roughness length

明显大于敦煌气象站 10 m 的风速, 即敦煌气象站的风速会受到城市绿洲的摩擦阻挡。图 3b 对比了地气温差逐年夏季的平均日变化, 敦煌气象站的地气温差在白天总体比戈壁站大, 夜间比戈壁站略小 (即气象站的地温比气温更低), 这与敦煌气象站的风速整体偏小是一致的。这表明, 城市绿洲对动量输送有摩擦阻挡作用的同时使得气象站的热力特征 (如地表温度、地气温差等) 不同于实际野外。

然而, 从能量通量角度看, 敦煌气象站和戈壁站应当具有一定的可比性 (例如在晴好天气或从日平均尺度)。由于两站相距较近 (约 15 km), 在晴好天气下或日平均尺度上这两站的向下短波辐射

和向下长波辐射可以认为基本相同。向上短波辐射主要由反照率的差异造成, 如果假定两站 (均为裸土) 反照率差异小于 0.02, 则夏季短波辐射日平均值相差在 5.2 W m^{-2} 以下 (在典型晴天下相差约在 6.3 W m^{-2} 以下)。向上长波辐射的差异则主要由地表温度的差异引起, 根据长波辐射计算公式 $F = \varepsilon\sigma(T_0 + \theta_s)^4$, 其中 ε 为地表发射率, σ 为玻尔兹曼常数, 如果假定 $\varepsilon = 0.95$, 则向上长波辐射两站日平均差值约为 2.9 W m^{-2} (敦煌气象站高于戈壁站)。在晴好天气下两站土壤热通量有相似的变化过程, 特别是他们的日平均值都很小, 两站日平均值的差异可以忽略, 潜热通量也可以忽略。据此假

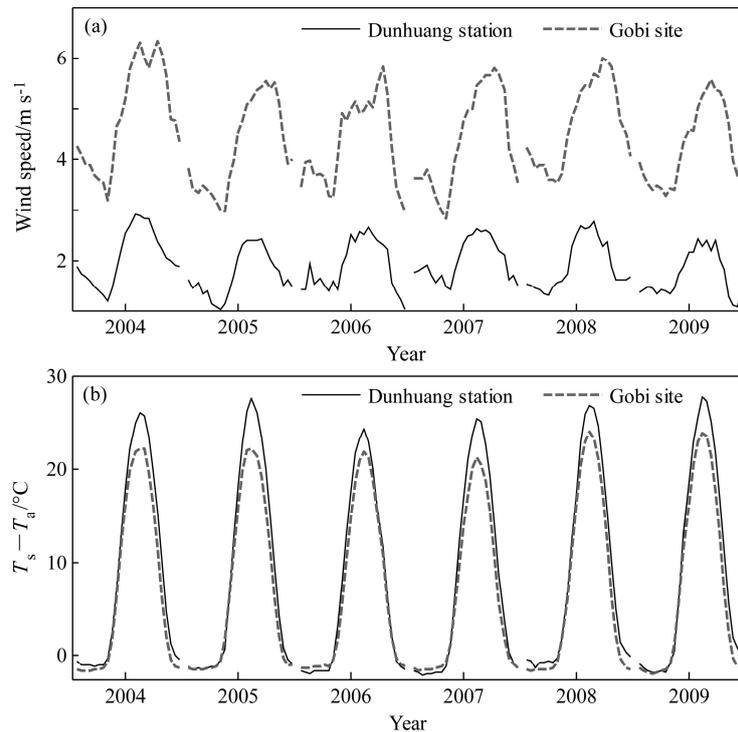


图3 2004~2009年夏季敦煌戈壁站与气象站 (a) 风速 (单位: m s^{-1}) 和 (b) 地气温差 ($T_s - T_a$; 单位: $^{\circ}\text{C}$) 平均日变化的对比

Fig. 3 Comparisons of average diurnal variations at Gobi station with those at Dunhuang meteorological station during summer 2004–2009: (a) Wind speed (units: m s^{-1}); (b) difference between surface temperature and air temperature ($T_s - T_a$; units: $^{\circ}\text{C}$)

定, 两站计算的日平均感热通量相差应在 8.1 W m^{-2} 以下, 因此具有了一定的可比性。

对晴好天气下两站的感热通量变化进行了比较。由于缺乏敦煌气象站的动量粗糙度特征, 这里参考戈壁站的动量粗糙度特征, 在敦煌气象站先假定取 $z_{0m} = 1 \text{ mm}$ 。在2008年8月8~13日在敦煌戈壁站有感热通量观测的时期, 这几天天气总体晴好 (在8月12~13日略有云), 两站的风速、地表温度、气温和地气温差有相似的日变化。根据不同的热力参数化估算了敦煌气象站8月8~13日逐小时的感热通量, 与敦煌戈壁站同期观测的感热通量进行了比较。图4a显示了戈壁站观测与敦煌气象站估算的感热通量多日平均值的差异, 其中Z02方案明显低估敦煌气象站的感热通量, 这意味着适用于敦煌戈壁站的Z02方案不能很好适用于风速相对较小的气象台站; Z10方案选取了比Z02方案更大的 C_h 值, 估算的感热通量较为接近戈壁站观测; S方案、B82方案的估算值与戈壁站观测较为接近; Z12方案估算的感热通量相对Z98方案有所减小, 与Y08方案计算的感热通量均值基本相当, 略高于戈壁站观测。考虑到戈壁站涡动相关法观测的感热通

量本身存在的误差 (能量封闭率为0.86, 观测值比真实值略小) 以及两站感热通量值之间也略有一定差异, Y08方案与Z12方案估算的感热通量值高于观测可以认为在合理范围之内。如果对敦煌气象站取较大的动量粗糙度值, 如 $z_{0m} = 20 \text{ mm}$ 、 $z_{0m} = 5 \text{ mm}$, 则结果与图2b很相似 (图略), 除了B82方案外, S方案、Y08方案、Z98方案和Z12方案计算的感热通量均高于戈壁站的观测, 特别是S方案和Z98方案将不合理地高估感热通量。这表明, 一方面, 从动量输送的角度看, 敦煌气象站周围几十米以外就是绿洲农田, 裸土的动量粗糙度与绿洲农田的粗糙度可能相差2~3个量级以上, 根据Zhong et al. (2011) 对由两种粗糙度特征相差很大的下垫面组成的非均匀下垫面的粗糙特征研究, 敦煌气象站的有效动量粗糙度特征可能会更趋近于较粗糙的绿洲农田粗糙度, 而比戈壁站大的多; 另一方面, 从感热输送的角度看, 只有局地的地面摩擦对感热输送起作用 (Chamberlain, 1968), 敦煌气象站周围的树木农田对该站 (裸土) 的感热输送贡献很弱或没有贡献, 如果取较大的动量粗糙度可能导致不合理的高感热输送, 因而应当选取裸土下垫面的动量

粗糙度。图 4b 显示了戈壁站观测感热通量与敦煌气象站估算感热通量的泰勒图 (敦煌气象站取 $z_{0m}=1\text{ mm}$)。结果显示, 在这几个方案中, Y08 方案相对最好, 估算的感热通量变化与观测最为一致; Z12 方案次之, 该方案相对 Z98 方案有明显改进; S 方案和 B82 方案估算的感热通量略偏弱, Z10 方案相对 Z02 方案增加了感热通量值, 接近于观测, 但相关系数低于其他的方案, 即对感热通量变化的描述能力相对差一些。

另外, 由于敦煌气象站的风速总体比戈壁站小, 相应的摩擦速度也要低于戈壁站, 如果两站同时有大致相近的强感热输送时, 敦煌气象站的大气稳定度更偏离中性 (即更不稳定), 进而影响两站的感热输送特征有所差异。如果对敦煌气象站和戈壁站采用同样的热力参数化来计算, 两站的感热输送有多大的差异? 为此, 假定两站有相同的 z_{0m} , 根据两站逐小时的风速、地表温度和气温计算了 2004~2009 年夏季的感热通量。对两站的感热通量取日平均, 统计了两站感热通量的差异, 表 2 给出了各参数化方案下敦煌气象站感热通量平均值、两站感热通量的平均偏差 (敦煌气象站的减戈壁站的)、平均绝对值偏差和均方根偏差。其中, 考虑到 Z12 方案是对 Z98 方案的改进, 略去了对 Z98 方案的统计。对于 C_h 取定值方案, 如果戈壁站用 Z02 方案而敦煌气象站用 Z10 方案, 两站的感热输送还是存在一些差异, 估算的敦煌气象站的感热通量略偏弱。S 方案和 Z12 方案在 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 时计算的两站感热通量的差异统计值大致相当; 在取较大的 z_{0m} 时, S 方案下两站间的差异明显增加, 而 Z12 方案下两站间的差异略有减小。在 B82 方案下两站感热通量的差异对 z_{0m} 基本不敏感, 差异值在这些方案中较小。Y08 方案在 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 时计算的两站

感热通量的差异相对最小, 在 z_{0m} 增加时差异略有增加。表 2 的结果显示了在这两站各热力参数化对 z_{0m} 的敏感性, 总体上, 当 z_{0m} 取值接近于局地裸土的 z_{0m} 时, 各参数化估算的两站感热通量的差异最小; 并且, Y08 方案可以很好再现这两站的感热通量变化。因此, 在这些方案中, Y08 方案对这两站的模拟能力相对最好; Z12 方案会高估戈壁站的感热通量, 在敦煌气象站可能相对合理 (图 4); B82 方案对动量粗糙度不敏感, 但是 B82 方案及 S 方案在敦煌气象站估算的感热通量偏弱, 可能与该站较小的摩擦速度有关。

4 西北干旱区夏季感热通量的估算

我国气象站在地面观测选址和确定仪器安装位置时充分满足了观测的代表性要求, 在我国西北干旱区气象站的观测场内多是城市绿洲内的一小片戈壁或荒漠, 但是与野外观测相比还是存在一定的差异 (王慧和李栋梁, 2010)。敦煌站的感热通量估算显示, 野外站点观测获取的热力输送系数 C_h 可能并不适用于干旱区气象台站感热通量的估算; 并且, 根据热力参数化方案估算气象站的感热通量时需要设置合理的动量粗糙度。然而, 我们目前尚缺乏整个西北干旱区各气象台站的粗糙度特征; 如果热力参数化方案对动量粗糙度不是很敏感, 则可以较为合理地再现整个西北干旱区感热通量的变化。为此, 这里根据风速、地表温度和气温估算了西北干旱区的夏季感热通量, 探讨各个热力参数化方案对动量粗糙度的敏感性。

气象台站的风速、地表温度和气温长期资料为每日四次观测, 相对于上面所用每小时的观测资料而言时间分辨率较粗。以敦煌气象站为例, 根据 2004~2009 年每日四次的观测资料, 在 $z_{0m}=1\text{ mm}$

表 2 各参数化方案估算的敦煌气象站感热通量 (H_{CMA} , 单位: W m^{-2}) 的平均值, 以及与根据同样参数化方案估算的戈壁站感热通量 (H_{Gobi} , 单位: W m^{-2}) 之间的平均偏差 (B_M)、平均绝对值偏差 (B_{MAD}) 和均方根偏差 (B_{RMSD})

Table 2 Average sensible heat fluxes at Dunhuang meteorological station (H_{CMA} , units: W m^{-2}) estimated by thermodynamic parameterization schemes, as well as mean bias (B_M), mean absolute deviation (B_{MAD}), and root-mean-square deviation (B_{RMSD}) between H_{CMA} and the sensible heat fluxes at Gobi station (H_{Gobi} , units: W m^{-2}) estimated by the same schemes

	Z10/Z02	S 方案			Z12 方案			B82 方案			Y08 方案		
		$z_{0m}=20\text{ mm}$	$z_{0m}=5\text{ mm}$	$z_{0m}=1\text{ mm}$	$z_{0m}=20\text{ mm}$	$z_{0m}=5\text{ mm}$	$z_{0m}=1\text{ mm}$	$z_{0m}=20\text{ mm}$	$z_{0m}=5\text{ mm}$	$z_{0m}=1\text{ mm}$	$z_{0m}=20\text{ mm}$	$z_{0m}=5\text{ mm}$	$z_{0m}=1\text{ mm}$
$H_{CMA}/\text{W m}^{-2}$	56.9	151.5	96.2	62.1	105.5	102.6	79.8	66.9	69.2	65.1	100.2	93.4	87.1
$MB/\text{W m}^{-2}$	-13.5	-41.4	-31.2	-23.3	-14.0	-17.5	-19.7	-15.2	-15.9	-15.5	-13.3	-7.4	-3.3
$MAD/\text{W m}^{-2}$	15.9	42.6	31.7	23.7	16.2	19.0	20.4	16.1	16.7	16.2	15.0	10.1	7.5
$RMSD/\text{W m}^{-2}$	13.5	24.0	16.5	11.6	13.5	13.7	12.2	10.5	10.3	9.8	12.0	10.2	9.4

注: 在敦煌气象站为 Z10 方案, 在敦煌戈壁站为 Z02 方案。 B_M 为敦煌气象站的感热通量减去戈壁站的。

时 Z10、S、Z12、B82 和 Y08 方案估算的感热通量平均值分别为 53.5、58.2、74.6、60.7、80.0 W m^{-2} ，而根据 2004~2009 年逐小时资料计算的感热通量平均值依次为 57.2、62.3、80.0、65.3、87.3 W m^{-2} ，

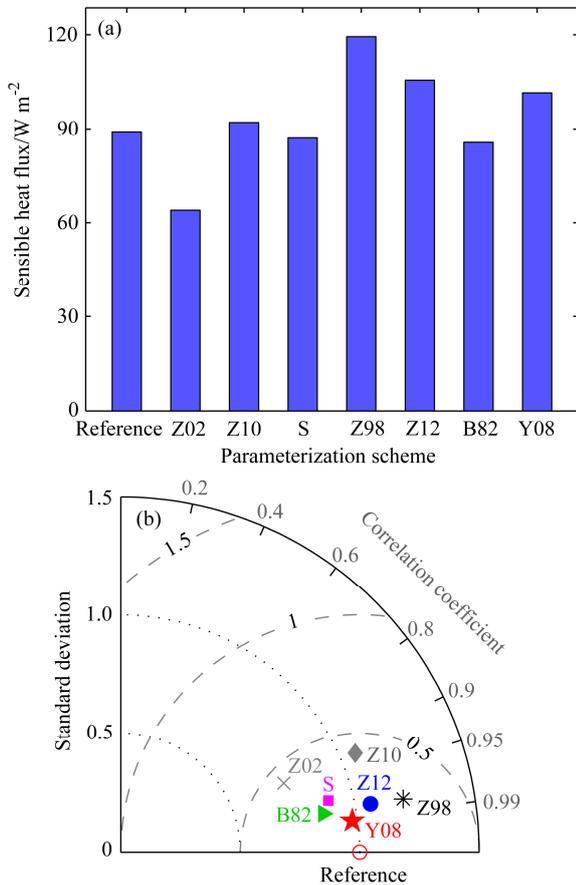


图 4 不同热力参数化方案下估算的敦煌气象站 2008 年 8 月 8~13 日感热通量同敦煌戈壁站观测 (Reference) 的比较: (a) 多日平均值 (单位: W m^{-2}); (b) 泰勒图, 图中圆圈表示观测感热通量的参考点 (Reference), 不同热力参数化方案的估算点到原点的半径距离分别代表其相对于观测感热通量的标准差, 他们在图中的余弦代表估算感热通量与戈壁站观测的相关系数, 他们到参考点的距离代表其相对于戈壁站观测的均方根误差

Fig. 4 Comparisons of estimated sensible heat fluxes at Dunhuang meteorological station during 8–13 August 2008 by different surface flux parameterization schemes with observations at Dunhuang Gobi station (Reference): (a) Comparisons of their multi-day average values (units: W m^{-2}); (b) Taylor diagram, in which the circle denotes a reference point of the observed sensible heat flux (Reference), the radial distance of the estimation point from the origin is proportional to the standard deviation of the estimated sensible heat flux by each surface flux parameterization scheme relative to the observed sensible heat flux, the correlation coefficient between each estimated sensible heat flux at Dunhuang meteorological station and the observed sensible heat flux at Dunhuang Gobi station is shown by the cosine of the azimuthal angle of the estimation point, and their root-mean-square deviation is given by the distance of the estimation point from the reference point

即这两种分辨率资料计算的日感热通量值相对略有差异, 但他们的逐日变化比较一致。分别取 $z_{0m}=20\text{ mm}$ 、 $z_{0m}=5\text{ mm}$ 、 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 计算了不同热力参数化下的西北干旱区各台站的夏季感热通量, 对所有站点取平均作为西北干旱区的区域平均感热通量, 则不同热力参数化下西北干旱区夏季感热通量对动量粗糙度的敏感性见图 5a。结果显示, 在 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 时, Z10 方案、S 方案和 B82 方案计算的感热通量平均值相近, 低于 Z12 方案和 Y08 方案的估算值。并且, B82 方案对动量粗糙度不敏感, 而 S 方案对动量粗糙度很敏感, Y08 方案估算的感热通量随动量粗糙度设定值的增加有一定的增加, Z12 方案在动量粗糙度较小时略敏感而在动量粗糙度较大时变得不敏感。由于西北干旱区的主要下垫面为戈壁、沙漠或稀疏植被, 一些观测试验表明在沙漠和戈壁下垫面的动量粗糙度均在 mm 量级左右 (如: Zhou and Huang, 2011; 陈世强和吕世华, 2013), 这里假定在各站取 $z_{0m}=1\text{ mm}$, 如果各站实际的动量粗糙度与假定值差异不太大的话, 除 S 方案外其它方案估算的感热通量变化应该不会太大。图 5b 显示了取 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 时各热力参数化方案计算的区域平均的感热通量异常。结果表明, 尽管不同方案计算的感热通量在 20 世纪 80 年代初和 2004 年之后均为正异常, 但还是存在有一定的差异。其中, Z10 方案计算的感热通量异常在 1980 年以前高于其他方案, 而在 1985 年之后低于其他方案; Y08 方案计算的感热通量异常则在 1980 年以前低于其他方案, 而在 1985 年之后高于其他方案; 其他方案介于这两种方案估算值的中间。如果同 ERA-40 再分析感热通量资料进行比较, 则在西北干旱区 ERA-40 的感热通量平均值与 Y08 方案和 Z12 方案计算的感热通量值大小比较接近, 并且, ERA-40 在 20 世纪 60 年代的感热通量正距平不同于各方案估算结果, 在 1970~2001 年的变化除了与 Z10 方案存在有一定差异外, 与其他方案估算的年际变化比较相似。

图 6a-e 给出了各热力参数化方案估算感热通量在西北干旱区的空间分布。一般来说, 局地的降水量较多, 则感热通量输送应该偏弱。从图 1 中西北干旱区夏季降水的空间分布可以看出, 降水在 98°E 以东及新疆天山山脉 (约 $42^{\circ}\text{N}\sim 44^{\circ}\text{N}$) 一带相对偏多。图 6 显示, 尽管各方案计算的感热通量值大小存在差异, 但空间分布总体有与降水相似的

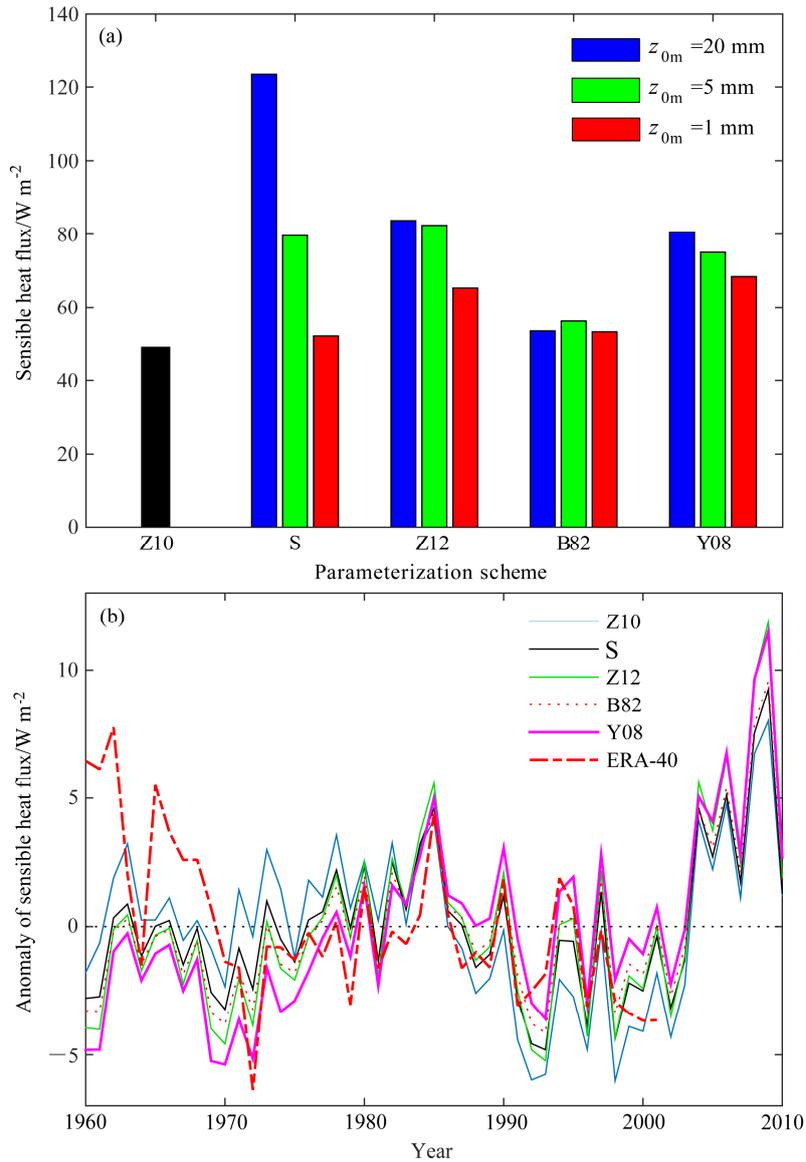


图5 不同热力参数化方案计算的我国西北干旱区区域平均的夏季感热通量(单位: $W m^{-2}$): (a) 对动量粗糙度的敏感性; (b) 在 $z_{0m} = 1$ mm 时的感热通量距平

Fig. 5 Summer sensible heat flux (units: $W m^{-2}$) estimated by several flux parameterization schemes over the arid region of Northwest China: (a) Sensitivity to momentum roughness length; (b) anomaly of sensible heat flux estimated by these schemes, with $z_{0m} = 1$ mm

分布。其中, Z10 方案计算的感热通量在干旱区的西南部也偏小, 与降水分布有一定的差异。这意味着, 将单站的热力输送系数应用于整个西北干旱区可能存在问题。此外, 从图 6 可以看到, 在 ($43.4^{\circ}N$, $88.3^{\circ}E$) 附近即达坂城气象站的感热通量值明显高于周围其他站的感热通量。虽然 Z10 方案计算的干旱区区域平均感热通量总体较小, 但在达坂城站感热通量可以达到 $114.7 W m^{-2}$; Z12 方案计算的区域平均感热通量较大, 在达坂城站平均为 $118.7 W m^{-2}$; 而其他方案计算的达坂城站平均感热通量

均在 $90 W m^{-2}$ 以下。台站风速资料显示, 达坂城气象站夏季的平均风速在 $5.6 m s^{-1}$ 左右, 远远大于周围站的风速。尽管风速的增加有利于提高感热的输送效率, 但不合理的热力参数化可能会高估实际的感热通量。显然, 用其他某个站点确定的 C_h 值直接应用于达坂城站是存在问题的; 王慧和李栋梁 (2011) 考虑了归一化植被指数 (NDVI) 对 C_h 的订正, 感热通量的空间分布有所改进, 但在达坂城站及周边的感热通量分布依然类似于 Z10 方案, 区域平均的感热通量变化也与 Z10 方案相当。Yang et

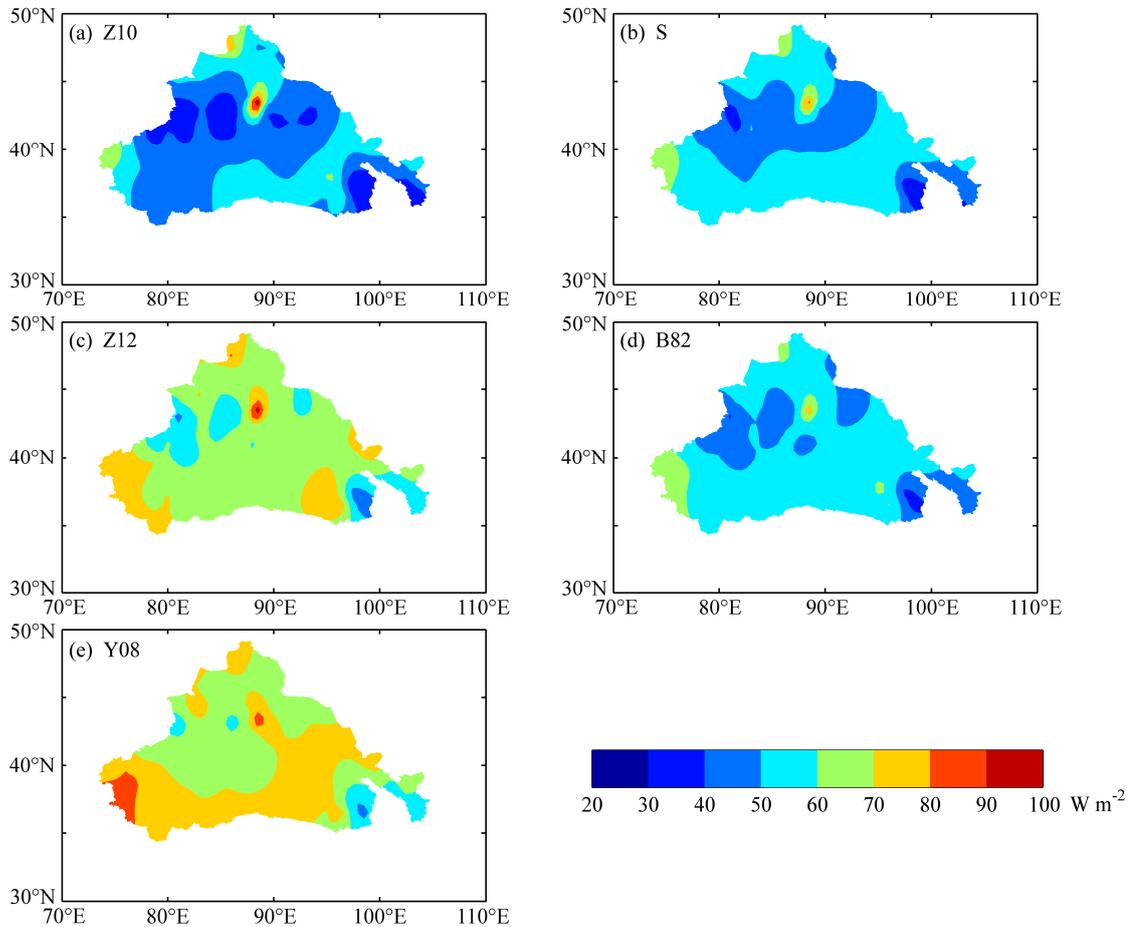


图6 估算的西北干旱区夏季感热通量(单位: W m^{-2})的空间分布:(a-e)分别为在 $z_{0m}=1\text{ mm}$ 时Z10方案、S方案、Z12方案、B82方案和Y08方案的估算

Fig. 6 Spatial distribution of estimated summer sensible heat flux (units: W m^{-2}) over the arid region of Northwest China: (a-e) Estimated by the Z10, S, Z12, B82, and Y08 schemes, respectively, with $z_{0m}=1\text{ mm}$

al. (2011) 对青藏高原上 C_h 取定值或考虑风速订正方案估算感热通量进行了讨论。实际上, 由于 C_h 取定值方案缺乏考虑各站不同气象条件及地表地形的差异, 即使 C_h 的风速订正或 NDVI 订正方案也依然无法考虑大气稳定度及其日变化对感热输送的修订, 应用于整个区域的感热通量估算可能存在着较大的偏差。Z12 方案估算的达坂城站感热通量较大, 该方案在敦煌戈壁站估算的感热通量也大于观测(敦煌戈壁站的风速也较大), 这可能意味着在风速较大的站点 Z12 方案会高估感热通量, 还需要更多站点的观测验证。S 方案、B82 方案和 Y08 方案估算的达坂城站感热通量值也均高于周围, 但相对合理一些。

因此, 在这些热力参数化方案中, 如果综合考虑敦煌站的估算感热通量与观测的比较(图4)、参

数化方案对动量粗糙度的敏感性、我国西北干旱区的主要下垫面类型、估算的西北干旱区区域平均的夏季感热通量年际变化及感热通量的空间分布, Y08 方案是可用于西北干旱区夏季感热通量估算的一个相对较好的热力参数化。

5 讨论和结论

本文讨论了一些常用的热力参数化方案, 包括 Z02 方案、Z10 方案、S 方案、Z98 方案、Z12 方案、B82 方案和 Y08 方案, 在根据气象台站资料估算西北干旱区夏季感热通量时的适用性。通过对敦煌站夏季感热通量的估算及与观测的比较, 及对西北干旱区夏季感热通量的估算, 主要结论如下:

气象站由于受城市化、绿洲化等人类活动的不同程度的影响, 风速和有效动量粗糙度可能不同于

野外台站,但是在感热输送过程中只有局地的地面摩擦起作用,因此,在利用模式中常用的热力参数化估算感热通量时,动量粗糙度可以参考野外台站在同样下垫面的动量粗糙度特征,否则将可能高估实际的感热通量。在陆面过程模拟时,对于动量输送过程可以取用格点尺度的有效动量粗糙度进行计算;而对于热力输送则建议选用代表性下垫面(如裸土)的动量粗糙度特征来计算。这也表明了野外观测试验的重要性,其获得的动量粗糙度特征对台站的感热通量估算和模式模拟具有重要的参考意义。

在本文选取的一些热力参数化中,根据局地观测获得的热力输送系数,其区域代表性一般不是很理想(王慧等,2008),因此不适合应用于整个西北干旱区。Z02 方案较为适用于敦煌戈壁站,但在敦煌气象站估算的感热通量明显偏小,Z10 方案可以用于敦煌气象站,但由于西北干旱区各站的地表与地形等差异,用于整个西北干旱区的感热通量估算可能存在较大的不确定性。S 方案对动量粗糙度比较敏感,在感热通量估算时需要比较准确的局地动量粗糙度。Z12 方案相对 Z98 方案有所改进,减弱了对动量粗糙度的敏感性,对西北干旱区感热通量的估算与 ERA-40 再分析资料比较接近,空间分布也比较合理,但在动量粗糙度值比较小时相对较敏感,并在台站的风速较大时可能高估感热通量。B82 方案对动量粗糙度不敏感,在敦煌气象站的估算显示可能在一定程度上低估了感热通量,应用于整个西北干旱区可能会低估实际感热通量。Y08 方案对动量粗糙度不是太敏感,在敦煌气象站估算的感热通量与观测比较一致,并且在西北干旱区的感热通量估算也相对合理,在这些参数化方案中相对较好。一些研究(如:Chen et al., 2010, 2013; Liu et al., 2012; Zheng et al., 2014)对 B82、Z98、Z12 和 Y08 等参数化方案在我国高原区和西北沙漠区等区域的适用性进行过类似的评估,总的来说,Y08 方案在裸土和稀疏植被下垫面总体要优于其他方案,这与本文的研究也是一致的。考虑到沙漠、戈壁和稀疏植被是西北干旱区的主要下垫面,因此,在上述这些参数化方案中,建议选取 Y08 方案用于西北干旱区的感热通量计算和陆面过程模式的数值模拟。

本文在评价这些热力参数化时,主要基于敦煌戈壁站的观测进行比较,实际上在西北干旱区还存

在一定的稀疏植被和少量的绿洲等其他下垫面,将来的研究中可以考虑选取更多站点(例如黑河流域观测试验在沙漠、戈壁、稀疏植被、玉米地等下垫面)的观测进行更为全面的评价。

致谢 高晓清研究员、韦志刚研究员、李振朝副研究员和侯旭宏高级工程师为敦煌站的观测数据提供支持,谨致谢忱!感谢两位审稿人对本文提出的建议。

参考文献 (References)

- Brutsaert W. 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.
- Chamberlain A C. 1968. Transport of gases to and from surfaces with bluff and wave-like roughness elements [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 94 (401): 318-332.
- 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, Lu S H. 2013. Calculation of roughness length of desert and its application in land surface process model [J]. J. Desert Res. (in Chinese), 33 (1): 174-178.
- Chen X L, Su Z B, Ma Y M, et al. 2013. An improvement of roughness height parameterization of the surface energy balance system (SEBS) over the Tibetan Plateau [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52 (3): 607-622.
- 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]. J. Hydrometeor., 11 (4): 995-1006.
- 胡隐樵, 高由禧, 王介民, 等. 1994. 黑河实验 (HEIFE) 的一些研究成果 [J]. 高原气象, 13 (3): 225-236.
- Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. 1994. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 13 (3): 225-236.
- 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): 189-202.
- Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progresses in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 37 (2): 189-202.
- 贾立, 王介民, 胡泽勇. 2000. 干旱区热力学粗糙度特征及对感热通量估算的影响 [J]. 高原气象, 19 (4): 495-503.
- Jia Li, Wang Jiemin, Hu Zeyong. 2000. The characteristics of roughness length for heat and its influence on determination of sensible heat flux in arid zone [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 19 (4): 495-503.
- 刘学锋, 梁秀慧, 任国玉, 等. 2012. 台站观测环境改变对我国近地面风速观测资料序列的影响 [J]. 高原气象, 31 (6): 1645-1652.
- Liu Xuefeng, Liang Xiuhui, Ren Guoyu, et al. 2012. Impact of the observational environment change on surface wind speed in China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 31 (6): 1645-1652.

- Liu Y Q, He Q, Zhang H S, et al. 2012. Improving the CoLM in Taklimakan desert hinterland with accurate key parameters and an appropriate parameterization scheme [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (2): 381–390.
- Oleson K W, Lawrence D M, Bonan G B, et al. 2010. Technical Description of Version 4.0 of the Community Land Model (CLM), available at http://www.cesm.ucar.edu/models/cesm1.0/clm/CLM4_Tech_Note.pdf [2013-02-22].
- van den Hurk B J J M, Viterbo P, Beljaars A C M, et al. 2000. Offline validation of the ERA-40 surface scheme [R]. European Center for Medium-Range Weather Forecasts, Tech. Memo., 295, 42pp.
- Verhoef A, de Bruin H A R, van den Hurk B J J M. 1997. Some practical notes on the parameter κB^{-1} for sparse vegetation [J]. *J. Appl. Meteor.*, 36 (5): 560–572.
- 王慧, 李栋梁. 2010. 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. 2010. Differences of meteorological elements that conventional meteorological and field stations observed in northwest dry area of China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 29 (2): 514–522.
- 王慧, 李栋梁. 2011. 卫星遥感结合气象资料计算的中国干旱区夏季地面感热特征 [J]. *干旱区地理*, 34 (3): 409–418. Wang Hui, Li Dongliang. 2011. Characteristics of the surface sensible heat flux calculated with the aid of satellite remote sensing and field observations over the arid region of Northwest China in summer [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 34 (3): 409–418.
- 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. A review of the study of the bulk transfer coefficients over the land [J]. *Adv. Earth Sci. (in Chinese)*, 23 (12): 1249–1259.
- Yang K, Guo X F, Wu B Y. 2011. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (1): 19–28.
- 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.
- 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]. *J. Hydrometeorol.*, 13 (4): 1359–1370.
- 张强, 黄荣辉, 王胜. 2011. 浅论西北干旱区陆面过程和大气边界层对区域天气气候的特殊作用 [J]. *干旱气象*, 29 (2): 133–136. Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng. 2011. Discussion about special function of land surface process and atmospheric boundary on regional climate in arid area of Northwest China [J]. *J. Arid Meteor. (in Chinese)*, 29: 133–136.
- Zhang Q, Wei G A, Huang R H, et al. 2002a. Bulk transfer coefficients of the atmospheric momentum and sensible heat over desert and Gobi in arid climate region of Northwest China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 45 (5): 468–480.
- Zhang Q, Cao X Y, Wei G A, et al. 2002b. Observation and study of land surface parameters over Gobi in typical arid region [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 19 (1): 121–135.
- Zhang Q, Zhang J, Qiao J, et al. 2011. Relationship of atmospheric boundary layer depth with thermodynamic processes at the land surface in arid regions of China [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (10): 1586–1594, doi:10.1007/s11430-011-4207-0.
- Zheng D H, van der Velde R, Su Z B, et al. 2014. Assessment of roughness length schemes implemented within the Noah land surface model for high-altitude regions [J]. *J. Hydrometeorol.*, 15 (3): 921–937.
- Zhong Z, Lu W, Song S, et al. 2011. A new scheme for effective roughness length and effective zero-plane displacement in land surface model [J]. *J. Hydrometeorol.*, 12 (6): 1610–1620.
- 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]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 35 (5): 541–549.
- Zhou D G, Huang R H. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations [J]. *Sci. China Earth Sci.*, 54 (5): 753–763.
- 周连童. 2010. 欧亚大陆干旱/半干旱区感热通量的时空变化特征 [J]. *大气科学学报*, 33 (3): 299–305. Zhou Liantong. 2010. Characteristics of temporal and spatial variations of sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 33 (3): 299–305.
- 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.
- Zhou L T, Huang R H. 2010. An assessment of the quality of surface sensible heat flux derived from reanalysis data through comparison with station observations in Northwest China [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (3): 500–512.
- 朱德琴, 高晓清, 陈文. 2006. 陆面模式 (SSiB) 对敦煌荒漠戈壁下垫面陆面过程的模拟及敏感性试验 [J]. *中国沙漠*, 26 (3): 466–472. Zhu Deqin, Gao Xiaoqing, Chen Wen. 2006. Validation of SSiB model over Gobi in Dunhuang and its sensitivity to vegetation parameters [J]. *J. Desert Res. (in Chinese)*, 26 (3): 466–472.
- Zilitinkevich S S. 1995. Non-local turbulent transport: Pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows [M]// Zilitinkevich S S, Air Pollution III. Volume 1 Air Pollution Theory and Simulation. Boston: Computational Mechanics Publications, 53–60.