

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303. 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.

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

黄荣辉¹ 周德刚¹ 陈文¹ 周连童¹ 韦志刚² 张强³ 高晓清²
卫国安² 侯旭宏²

¹ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

² 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000

³ 中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020

摘 要 本文综述了中国西北干旱区陆—气相互作用及其对气候影响研究的最近进展。文中不仅回顾了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验”经过连续 12 年的观测和多次加强期观测所取得的干旱区陆面过程参数的分析以及边界层和陆—气相互作用特征等的分析和研究, 而且综述了应用这些参数来优化有关陆面过程模式的参数化方案和改进有关陆面过程模式的研究; 并且, 本文还综述了关于中国西北干旱区感热输送特征以及西北干旱区陆—气相互作用对中国东部气候的影响及其机理, 并揭示了中国西北干旱区春、夏季具有高感热输送特征, 此高感热对中国东部夏季气候变异有重要影响。此外, 本文还指出今后在此方面应进一步观测和深入研究的科学问题。

关键词 干旱区 陆—气相互作用 辐射 感热输送 气候

文章编号 1006-9895(2013)02-0189-22

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12303

Recent Progress in Studies of Air–Land Interaction over the Arid Area of Northwest China and Its Impact on Climate

HUANG Ronghui¹, ZHOU Degang¹, CHEN Wen¹, ZHOU Liantong¹, WEI Zhigang²,
ZHANG Qiang³, GAO Xiaoping², WEI Guoan², and HOU Xuhong²

¹ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

² Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000

³ Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou 730020

Abstract We review the recent progress in studies of air–land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate. The paper examines the analyses of the data observed continuously during the Field Experiment on Air–Land Interaction in the Arid Area of Northwest China (NWC-ALIEX) for 12 years and during many Intense Observation Periods of this project. The analyses of the land-surface parameters and studies of the characteristics of the boundary layer and air–land interaction in the arid area from continuous observations were reviewed as well as applications of these parameters to optimize the parameterization scheme in land surface models and to improve related land surface models. Moreover, we examined the characteristics of sensible heat transfer in the arid area of Northwest

收稿日期 2012-09-13, 2012-10-19 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421400、2013CB430201、2010CB950403, 国家自然科学基金资助项目 41205055, 中国科学院资源与环境科学技术局“野外观测试验站运行费”

作者简介 黄荣辉, 男, 1942 年出生, 中国科学院院士, 主要从事季风和气候动力学及灾害气候的研究。E-mail: hrh@mail.iap.ac.cn

China and the impact of the air–land interaction in this area on climate variability in eastern China and its physical mechanism. We found a feature of high sensible heat transfer in spring and summer in the arid area of Northwest China, which has a strong impact on climate variability in eastern China. Finally, the issues that need further study and evaluation are also pointed out in this paper.

Keywords Arid area, Air–land interaction, Radiation, Sensible heat transfer, Climate

1 引言

从 20 世纪 70 年代中期开始, 大气科学家对气候的认识有一个飞跃, 认识到气候不仅仅是大气中动力、热力过程所形成, 而且是地球系统中大气圈、水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈相互作用的结果, 甚至与人类活动也有一定关系。而能量与水分循环是联系这个气候系统中各圈层的两个重要过程, 它与地球气候系统各成员的变化紧密关联在一起的。

由于水分和能量循环对于气候变化与异常起着十分重要作用, 因此, 在世界气候研究计划 (WCRP) 之下特别制定了全球能量和水分循环试验计划 (Global Energy and Water Cycle Experiment, 简称 GEWEX)。GEWEX 计划是全球最大的气候和环境科学试验, 它在全球有代表性的下垫面开展了陆—气相互作用以及能量和水分循环观测试验 (世界气象组织, 2006)。

从 20 世纪 80 年代中期起, 在国际上进行了许多大型陆—气相互作用观测试验, 如: (1) 湿润区水分收支和蒸发通量的水文—大气试验 (Hydrologic Atmospheric Experiment for the Study of Water Budget and Evaporation Flux at the Climatic Scale, 简称为 HAPEX/MOBILMY), 它主要研究湿润地区陆面过程的特征, 在大、中、小三种尺度方面, 关于湿润区的水汽和蒸发通量与气候变异之间的关系的研究取得进展 (André et al., 1986); (2) 在 20 世纪 90 年代初, 在欧洲进行了欧洲干旱化区域野外观测试验 (European Field Experiment in a Desertification-threatened Area, 简称 EFEDA), 此计划的完成不仅对欧洲半干旱地区陆面特征有了新的认识, 而且在干旱化过程及机理方面取得进展 (Bolle et al., 1993); (3) 在 90 年代, 在加拿大进行了为期 4 年的北半球生态系统—大气研究计划 (The Boreal Ecosystem-Atmosphere Study, 简称 BOREAS), 此计划对加拿大北部森林与大气之间的相互影响及其对气候变化的影响进行了深入研究 (Sellers et al., 1995, 1997)。通过这些大型的野外观测试验获取了大量

有关不同下垫面陆—气相互作用的观测资料, 同时也发展了一系列陆—气相互作用模式, 如 Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (简称 BATS) 和 Simple Biosphere Model (简称 SiB) 等著名的陆面过程模式。

鉴于我国西北干旱区陆—气相互作用对东亚季风系统有严重影响 (Huang et al., 2002), 并且目前干旱区陆面过程有关参数还远远满足不了此区域能量和水分循环特征分析和气候数值模式的需要, 为此, 在“国家重大基础研究发展规划”首批启动项目“我国重大气候灾害的形成机理与预测理论研究”的资助下, 继西北干旱区黑河地区地—气相互作用试验 (胡隐樵, 1994) 之后, 我们在我国西北干旱区进行陆—气相互作用的野外观测试验, 并开展了有关分析研究。在此项目的资助下, 在敦煌的双敦子戈壁下垫面、临泽的巴丹吉林沙漠下垫面, 以及在五道梁的高寒地区分别建立了干旱区陆—气相互作用观测试验站 (图 1), 并于 2000~2003 年在这三个观测试验站同时进行了“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验” (The Field Experiment on Air–land Interaction in the Arid Area of Northwest China, 简称为 NWC-ALIEX) (黄荣辉, 2006)。近几年来, 在国家自然科学基金委员会重点基金项目“我国西北干旱区陆—气相互作用特征及其对气候影响机理研究”、中国科学院知识创新工程项目“干旱/半干旱地带陆—气相互作用及模型设计机理和数值模拟”、国家重大基础研究发展规划另一项目“全球变暖背景下东亚能量和水分循环变异及其对我国极端气候的影响”等的资助下, 以及中国科学院资源与环境科学技术局“野外观测试验站运转费”的支持下, 于 2004~2012 年相继在敦煌戈壁下垫面又进行了较长期的干旱区陆—气相互作用观测试验, 把 NWC-ALIEX 计划延续至今。

通过此观测试验 10 多年的连续观测, 积累了大量有关西北干旱区陆—气相互作用和陆面过程参数的原始观测资料, 经过多年的分析研究, 得到



图1 中国西北干旱区陆—气相互作用试验观测站分布图

Fig. 1 Distribution of observational stations of the Field Experiment on Air-Land Interaction in the Arid Area of Northwest China (NWC-ALIEX)

了许多有关干旱区陆面过程参数、陆—气相互作用特征及其对气候影响方面很有意义的科学成果。由于有关此试验早期一些观测成果，张强等（2005）已作了全面总结，并且有关此试验的科学意义、试验方案和数据整编以及早期的观测、分析和数值模拟的科学成果已有著作进行了系统总结（黄荣辉等，2011），因而，此文重点是综述近几年来利用此试验 10 多年来的连续观测和近几年的加强期观测资料所得的部分科学成果，其中部分结果是至今还没有公开发表过的研究成果。

2 敦煌干旱区的陆面过程参数及陆—气相互作用特征

由于西北干旱区人烟稀少，缺乏饮用水，不利于野外观测，因此在广阔的沙漠和戈壁上缺乏气象参数。这不仅给分析中国西北气候特征带来困难，而且也造成干旱区气候数值模式中陆面过程参数的不确定性。为此，最近王超等（2010a）以及 Zhou and Huang (2011) 对 NWC-ALIEX 连续 12 年的观测试验资料以及对加强期观测试验资料的质量问题进行了详细分析。分析结果表明：此观测试验的资料质量是比较好的，正常数据占总数据的

91.2%。非正常数据只占总数据的 8.8%（王超等，2010a）。因此，可利用此野外观测试验所取得资料来分析敦煌典型干旱区一些重要的陆面过程参数并揭示西北干旱区一些重要陆面过程特征。

2.1 敦煌干旱区地表附近动量总体输送系数和热力总体交换系数

Huang et al. (2005) 和张强等 (2005) 利用 NWC-ALIEX 早期 1 年的观测数据，提出敦煌干旱地表动量粗糙度长度为 $1.9 \pm 0.7 \text{ mm}$ ，而感热粗糙度长度为 $0.43 \pm 0.32 \text{ mm}$ ，地表附近总体动量和热量输送系数分别为 $(1.63 \pm 1.68) \times 10^{-3}$ 和 $(1.49 \pm 1.08) \times 10^{-3}$ （组合法）。最近，周德刚等（2012）利用 NWC-ALIEX 的多年观测试验资料，剔除人工物对观测的干扰后确定了敦煌干旱区动量粗糙度 z_{0m} 大约为 $0.61 \pm 0.02 \text{ mm}$ ，而热力粗糙度 z_{0h} 在白天平均约在 0.05 mm 左右。因此，用多年观测试验资料所确定的敦煌干旱地表动量粗糙度要比用 1 年的观测资料计算值要小一些，但它们量级都是一致的，也比黑河试验观测所得结果（ $1.7 \sim 4.5 \text{ mm}$ ）也要小一些（左洪超和胡隐樵，1992）；而热量粗糙度用多年观测试验资料所确定的值要比用 1 年的观测资料所计算的值（ $0.43 \pm 0.32 \text{ mm}$ ）也要小一个量级。并且，

从超声探测仪观测的感热等资料和地—气温差资料计算的敦煌干旱区热力总体交换系数 C_h 大约为 $(2.3 \pm 0.2) \times 10^{-3}$; 而动量总体输送系数 C_D 大约为 $(3.0 \pm 0.2) \times 10^{-3}$ 。由于受超声仪器的更换、资料处理方法的差异以及观测本身误差的影响, 用后期多年观测试验资料所计算的动量输送系数要比应用 1 年的观测资料所计算的值要小一些, 而热量输送要大一些, 但两者量级相当, 并与黑河观测试验所得结果也较接近。

这些参数对于优化陆面过程模式中有关参数化方案起到重要作用, 从而对有关陆面过程的改进起到重要作用。

2.2 敦煌干旱区到达地表总辐射、净辐射和地表反照率的变化特征

为了说明NWC-ALIEX所测得的辐射具有代表性, 首先把此观测试验在敦煌干旱区所得的 12 年辐射各分量与西北干旱区及北半球各地的辐射各分量求相关, 结果表明: 敦煌干旱区辐射各分量与北半球同纬度地区 (特别是西北干旱区) 的辐射各分量有很好的正相关, 这说明敦煌测得的辐射各分量对于西北干旱区有较好的代表性。

(1) 不同地表状况辐射各分量的日积分值

Huang et al. (2005) 和张强等 (2005) 利用NWC-ALIEX在敦煌干旱区 2002 年 5~6 月加强期观测试验资料研究了敦煌戈壁和绿洲地表的热量和辐射平衡特征, 不仅指出了敦煌戈壁区 5~6 月份在晴天时有很大的总辐射, 最大可达 1000 W m^{-2} , 这是其它区域较少观测到的, 而且指出了敦煌戈壁地表和绿洲农田辐射平衡中各辐射分量的日积分值有很大不同。最近, 王超等 (2012) 又利用NWC-ALIEX在敦煌稀疏植被 2009 年 7~9 月加强期观测资料分析了敦煌稀疏植被地表辐射平衡中各辐射分量的日积分值。表 1 比较了在敦煌不同地表辐射平衡中各辐射分量的日积分值。从表 1 可以看到: 敦煌戈壁地表的总辐射、大气长波辐射和地表向上长波辐射的日积分值大于绿洲农田

地表的总辐射、大气长波辐射和地表向上长波辐射, 而戈壁地表的反辐射和净辐射日积分值要小于绿洲农田的地表反辐射和净辐射; 并且从表 1 所列的敦煌稀疏植被辐射各分量的日积分值也可以看到, 敦煌在 7~9 月总辐射和净辐射日积分值比 5~6 月份的总辐射和净辐射值小, 这可能是由于夏至之后, 日照时间变短, 但稀疏下垫面大气的大气长波辐射、地表向上的长波辐射的日积分值比戈壁下垫面的大气长波辐射和地表向上长波辐射的日积分值小, 但比绿洲下垫面的相应辐射分量的日积分值大。因此, 上述结果不仅表明了西北干旱区辐射平衡中各分量因地表植被状况不同而有很大不同, 而且也表明了植被是有利于地表温度的保持, 地表植被愈少, 地表向上的长波辐射愈大。

(2) 戈壁区总辐射通量和净辐射通量的季节变化

从敦煌戈壁区 2001~2007 年的 7 年辐射各分量观测资料的分析结果表明: 敦煌干旱区各年总辐射通量在夏季最大, 约 760 W m^{-2} , 春季略小于夏季, 秋季次之, 冬季最小 (图 2a); 并且, 净辐射也是在夏季最大, 约 370 W m^{-2} , 春季略小于夏季, 秋季次之, 冬季最小 (图 2b)。

把敦煌干旱区所观测的太阳总辐射和反射辐射与NCEP/NCAR再分析的敦煌附近地表总辐射和反射辐射通量资料 (Kalnay et al., 1996) 相比较, 如图 3a 和图 3b 所示, NCEP/NCAR 再分析的总辐射和反射辐射通量要比敦煌干旱区观测试验实际测得的总辐射和反射辐射通量偏大, 而实际观测到的总辐射和反射辐射通量的波动要比NCEP/NCAR再分析总辐射和反射辐射通量的波动大。

(3) 戈壁区地表反照率及其日变化和季节变化特征

Huang et al. (2005) 和张强 (2005) 利用NWC-ALIEX观测试验早期 1 年的观测资料, 提出敦煌戈壁地表反照率大约为 0.255 ± 0.021 。最近, 从NWC-ALIEX的多年辐射资料的分析结果提出敦煌

表 1 夏季敦煌三种地表的辐射各分量的日积分值

Table 1 Diurnal integrated value of various components of summertime radiation at three kinds of Dunhuang's surface

	总辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	大气向下长波辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	地表向上长波辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	地表反辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
戈壁 (2000 年 5~6 月)	32.43	29.38	44.06	7.42	10.33
稀疏植被 (2009 年 7~9 月)	25.28	29.31	39.92	6.13	8.57
绿洲农田 (2000 年 5~6 月)	31.17	27.51	36.15	8.08	14.54

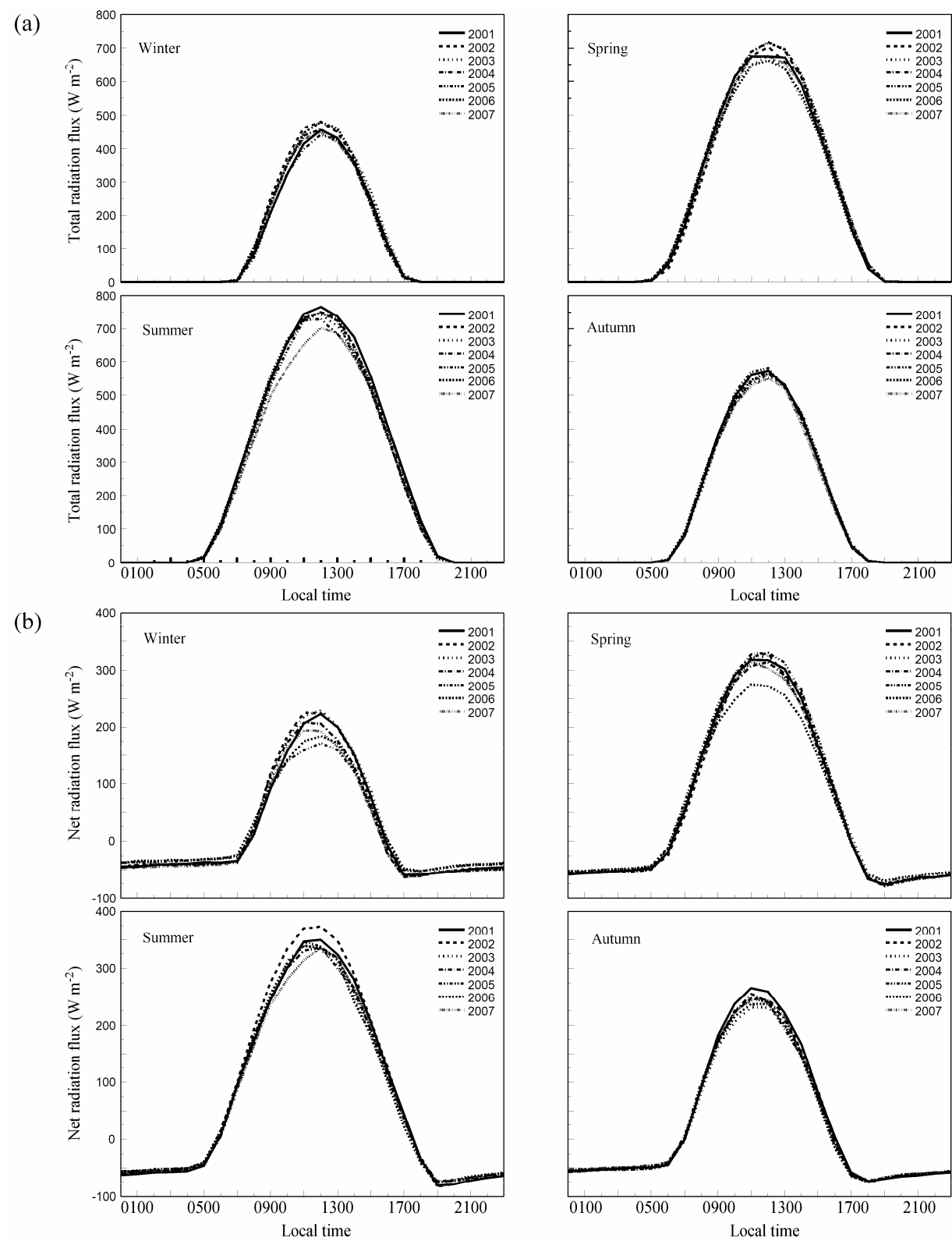


图2 敦煌戈壁地表总辐射通量 (a) 和净辐射通量 (b) 在四季的平均日变化. 单位: W m^{-2}
Fig. 2 Average diurnal variations of four-seasonal (a) total radiation fluxes and (b) net radiation fluxes at the surface of Dunhuang Gobi area. Units: W m^{-2}

戈壁区地表反照率在夏季的白天大约为 0.255 ± 0.002 , 这与应用 1 年的观测试验资料所得的结果很一致, 但比黑河试验在戈壁地表测得的地表反照率 (0.228) (邹基玲等, 1992) 要大一些. 并且, 利

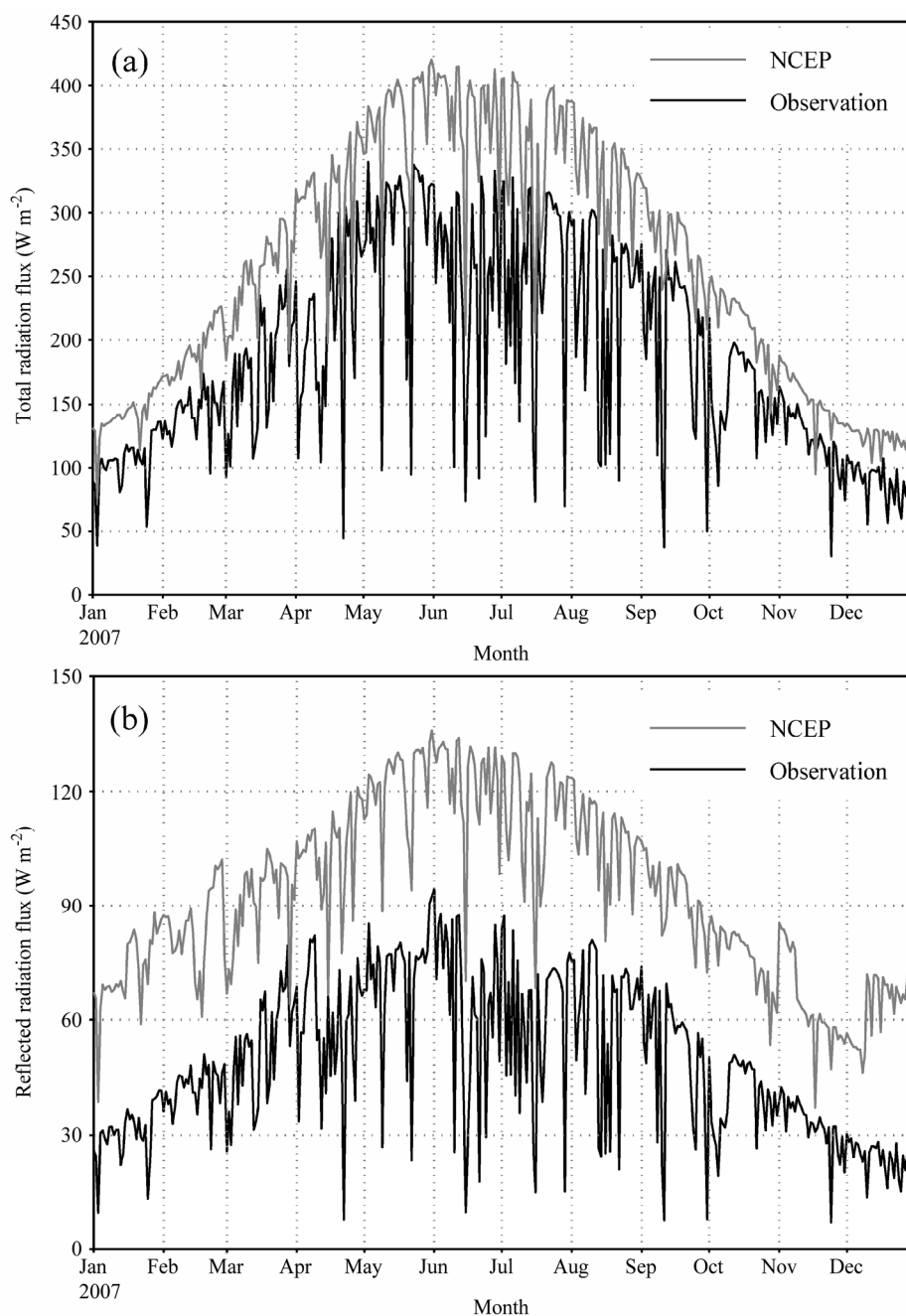


图3 敦煌戈壁观测站测得的戈壁区地表总辐射通量 (a) 和反射辐射通量 (b) 与 NCEP/NCAR 再分析的总辐射和反射辐射通量比较

Fig. 3 Comparisons between (a) total radiation flux and (b) reflected radiation flux at the surface of Gobi area observed from Dunhuang Gobi observation station and those from NCEP/NCAR reanalysis (e.g., Kalnay, et al., 1996). Units: W m^{-2}

用NWC-ALIEX的多年辐射资料所得的敦煌干旱区地表反照率的日变化呈“U”字型。如图4所示,它一般在当地时间11时到13时最小,而在上午11时之前及下午13时之后呈现增大趋势;此外,分析还表明,它有一定的季节变化,一般在冬季最大(由于有雪的缘故),而夏季最小,春、秋比夏季稍大一些。

最近,王超等(2012)利用NWC-ALIEX 2009

年夏季加强期观测资料分析了敦煌稀疏植被下垫面的反照率,提出了敦煌稀疏植被下垫面的反照率为0.24,比戈壁下垫面的反照率小,这个结果是合理的。

2.3 敦煌戈壁区的边界层特征及边界层结构

敦煌干旱区由于水汽含量很低,水汽凝结高度高,因此,一般对流边界层都比较高,NWC-ALIEX的观测结果充分证明了这点。

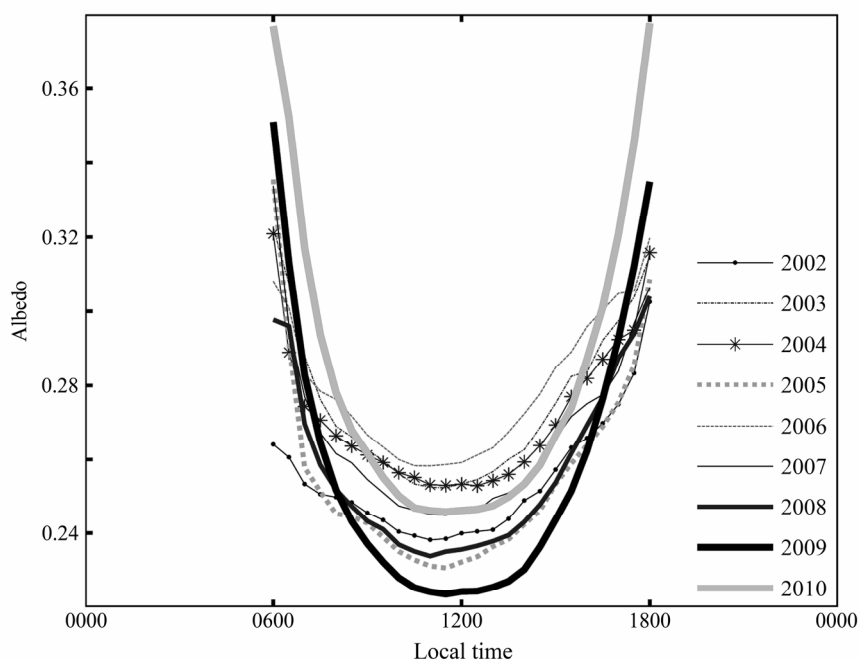


图4 敦煌戈壁观测站观测的2002~2010年夏季典型晴天下戈壁地表反照率的日变化。图中时间是敦煌当地时间

Fig. 4 Diurnal variation of albedo at the surface of Gobi area in typical clear summer day observed from Dunhuang Gobi station during the period 2002–2010. The time in Fig. 4 is the local time of Dunhuang station

(1) 对流边界层特征

张强等(2004)以及张强和王胜(2009)利用NWC-ALIEX早期观测资料,指出敦煌戈壁区具有高边界层特征。最近,韦志刚等(2010)和惠小英等(2011)从NWC-ALIEX 2008年加强期观测所测得资料的分析结果,也揭示了敦煌戈壁区边界层具有高对流边界层及明显的日变化特征。如图5a所示,在北京时10时(地方时约08时)敦煌戈壁区对流边界层已有所发展,对流边界层从北京时12时到14时发展很快,新发展的对流与残留层的对流相混合,使对流边界层迅速增厚,在北京时16时到23时(地方时14时~21时),对流边界层高度可达最高高度,它可达距地4200 m高度。这表明了在敦煌戈壁区边界层具有高对流边界层特征;并且,从图5a还可看到,敦煌戈壁区稳定边界层从北京时19时(地方时约17时)左右开始发展,高度可达距地面1300 m高度,稳定边界层一般在北京时12时到14时消退。这些表明利用最近敦煌戈壁区边界层观测资料的分析结果与以前利用敦煌气象站加强探空资料分析的结果(张强等,2004)较为一致。

最近,Wei et al.(2009)还利用平凉黄土塬半干旱区陆—气相互作用的观测试验资料分析了西

北半干旱区的对流边界层厚度,结果表明:黄土塬的对流边界层厚度可达1000 m高度,而稳定边界层厚度达650 m高度。这说明黄土高原的对流边界层厚度比敦煌戈壁区和青藏高原对流边界层高度(可达2700 m)都低。

上述结果表明了夏季敦煌戈壁区的对流边界层厚度确实较厚,它比青藏高原和黄土高原的边界层的高度都高,具有高对流边界层特征。这可能是由于敦煌戈壁区十分干旱,年降水量不足50 mm,而年蒸发能力达3400 mm,地表感热输送很强,而水汽含量很低,水汽不易在较低高度凝结所致。

(2) 边界层结构

韦志刚等(2010)从NWC-ALIEX的2008年8月加强期观测资料的分析结果揭示了敦煌戈壁区对流边界层结构。如图5b所示,敦煌戈壁区也具有五层结构,即近地层、混合层、逆温层、中性层、次逆温层。

2.4 敦煌戈壁区地—气温差的平均日变化、季节变化和典型天气下的日变化特征

(1) 平均的日变化

王超等(2010b)利用敦煌戈壁观测试验站2008年12月1日至2009年12月31日的观测资料,分析敦煌戈壁区地—气温差的变化,结果表明:敦煌

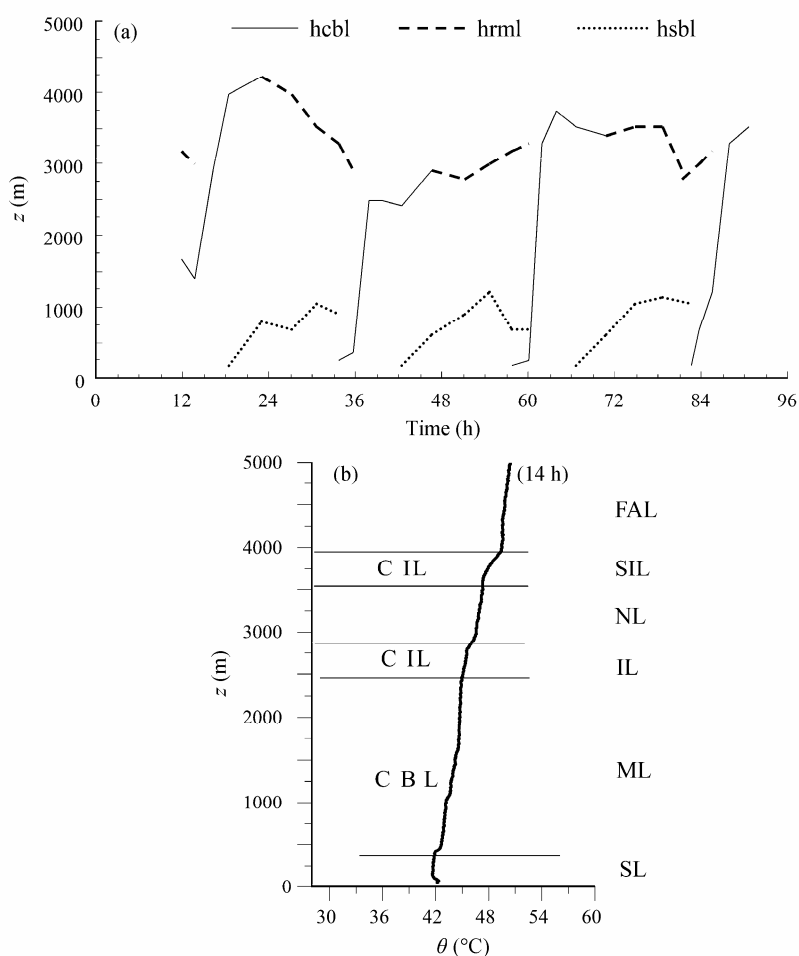


图5 敦煌戈壁观测站测得2008年8月15~18日戈壁区边界层高度的变化(a)和8月11日14时测得的边界层结构(b)。图中时间为北京时间; hcb1、hrml和hsbl分别表示对流边界层高度、残留混合层高度和稳定边界层高度; FAL、SIL、NL、IL、ML和SL分别表示自由大气层、次逆温层、中性层、逆温层、混合层和近地层

Fig. 5 (a) The variation of boundary layer with time during August 11–15, 2008 and (b) the structure of boundary layer of Gobi area at 1400 BT (Beijing time) in August 11, 2008 observed from Dunhuang Gobi station. The time in Fig. 5 is Beijing time; hcb1, hrml, and hsbl indicate the heights of convective boundary layer, residual mixed layer, and stable boundary layer, respectively; FAL, SIL, NL, IL, ML, and SL indicate free atmosphere layer, second inversion layer, neutral layer, inversion layer, mixed layer, and surface layer, respectively

戈壁区地—气温差不仅有很大的日变化,而且有很明显的季节变化;并且,分析结果还表明:敦煌戈壁地表地—气温差变化幅度较地温和气温小,它的分布在 -1°C 附近有一个非常明显的峰值,观测期间出现的最小地—气温差为 -13.8°C ,它出现在夜间,而最大地—气温差为 35°C ,它出现在白天,平均地—气温差为 4.1°C 。此外,如图6a所示,敦煌戈壁地表地—气温差的日变化规律性强,白天为正,夜间为负,以12时(当地时间)大致对称,夜间变化幅度小,白天温差变化幅度大。

(2) 季节变化

如图6b所示,不同季节敦煌戈壁区地—气温差的日变化趋势大致相同,但变化幅度、温差大小

和温差正负转变的时间有所不同。此区域地气温差在12月份最小,6月份最大。若按季节划分,则夏季最大,为 25.8°C ,冬季最小,为 10.2°C 。

(3) 不同天气条件下的地—气温差

不同天气条件下敦煌戈壁区地—气温差的日变化有所不同。如图6c所示,虽然在晴天(2009年4月3日)、阴天(4月11日)和沙尘暴(4月23日)天气下,敦煌戈壁区地—气温差的变化趋势是一致的,但变化幅度、峰值和温差正负转换的时间都有所不同。在晴天,地—气温差值最大,出现在当地中午12时(北京时间14时);在阴天,地—气温差值次之,出现在当地时间午后14时(北京时间16时)比晴天天气条件下地—气温差最大值出

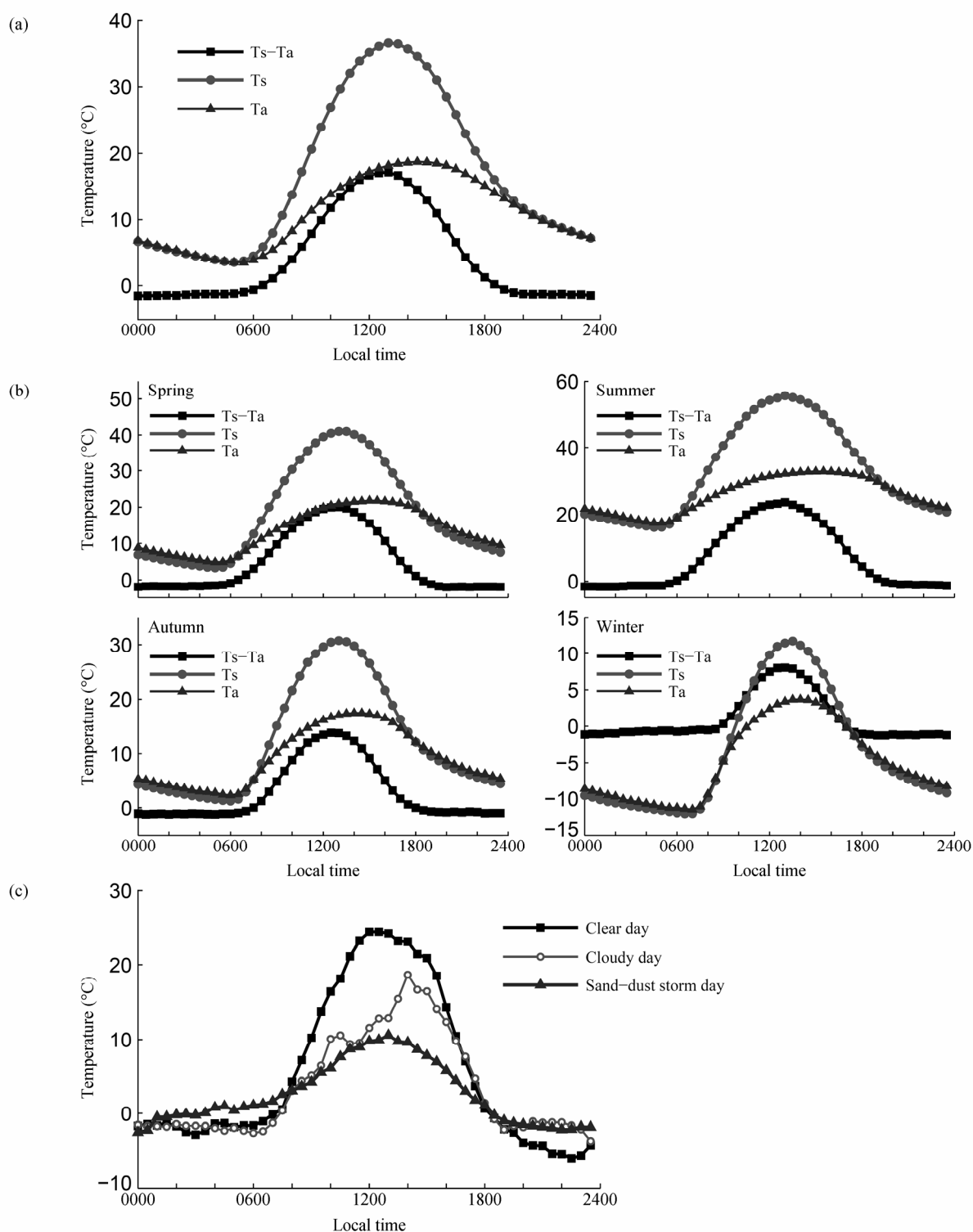


图6 敦煌戈壁观测站所观测的戈壁区地—气温差 ($T_s - T_a$) 的平均的日变化 (a), 季节变化 (b) 和不同天气条件下的日变化 (c), 单位: °C。图c 中晴天是2009年4月3日, 阴天是4月11日, 沙尘暴天气是4月23日

Fig. 6 (a) Diurnal and (b) seasonal variations of difference between surface temperature and surface air temperature ($T_s - T_a$), (c) diurnal variation of ($T_s - T_a$) under different weather conditions in the Gobi area observed from Dunhuang Gobi observational station. Units: °C. In Fig. 6c, the sunny day was on April 3, 2009, the cloudy day was on April 11, 2009, and the day of sand-dust storm was on April 23, 2009

现的时间晚 2 h; 在沙尘暴天气时, 地—气温差最小, 出现在当地时间午后 13 时 (北京时 15 时),

比晴天地—气温差最大值出现时间稍晚, 而比阴天地—气温差最大值出现时间偏早。

2.5 敦煌干旱区表层和次表层土壤温度

张强等(2005)从NWC-ALIEX早期1年的观测资料分析了敦煌戈壁干燥土壤热力参数,特别是推算出戈壁干燥土壤的热容量、热传导率和热扩散率。NWC-ALIEX连续多年对敦煌戈壁区近地面4层(1 m、2 m、8 m、18 m)的大气风温湿分量、4层土壤湿度(5 cm、10 cm、20 cm、80 cm)以及7层土壤温度(0 cm、5 cm、10 cm、20 cm、40 cm、80 cm、180 cm)进行了观测,取得了大量观测资料。最近,我们利用此资料,分析了敦煌戈壁干燥土壤表层、80 cm和180 cm土壤温度的年际变化趋势。如图7所示,夏季敦煌戈壁区表层、次表层温度有微弱的逐渐下降趋势,而深层土壤温度有微弱的升高趋势。由于从敦煌干旱区土壤温度的变化可以推算敦煌戈壁干燥土壤热容量的变化,因此上述结果表明了敦煌戈壁土壤表层和次表层热容量有微弱的下降趋势,但深层土壤热容量都有微弱的上升趋势。

此外,我们还利用在敦煌戈壁区连续多年所测

得干燥土壤5 cm、10 cm、20 cm、80 cm深度四层土壤含水量资料分析了敦煌戈壁干燥土壤表层和次表层土壤体积含水量(图略),结果表明了敦煌戈壁干燥土壤含水量与降水量有很好的正相关,但由于敦煌干旱区年降水量很少,因此,它并没有明显的年际变化。

上述表明了通过分析NWC-ALIEX所得的多年观测资料,提出了许多敦煌干旱区陆面过程的重要参数,这些参数不仅对于优化陆面过程模式中的有关参数化方案及改进干旱区陆面过程模式有直接的应用,而且在关于中国西北干旱区陆—气相互作用对气候影响的研究也是非常重要的。

3 观测的陆面过程参数在陆面过程模式中参数化方案的优化及模拟结果改进的应用及作用

Henderson-Sellers et al. (1993)比较了国际上流行的25个陆面过程模式,表明了不同陆面过程模式对地表附近感热和潜热的模拟结果相差甚大。

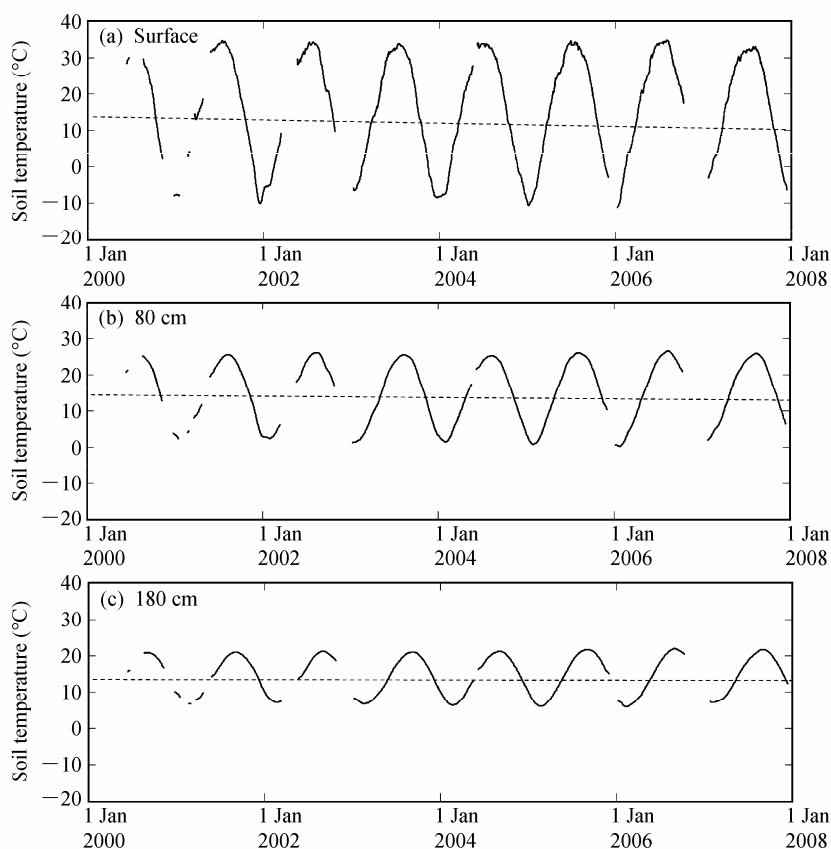


图7 敦煌戈壁观测站所测得夏季(6~8月)表层、80 cm和180 cm深度的干燥土壤温度的年际变化。单位: °C

Fig. 7 Interannual variability of the summertime (June–August) dry-soil temperature at surface, 80-cm and 180-cm depths observed from Dunhuang Gobi observational station. Units: °C

其中部分原因是模式中一些陆面要素的参数化方案不恰当所造成的。为此，我们近几年来利用 NWC-ALIEX 所测得的干旱区陆面过程参数对有关陆面过程模式中的陆面参数化方案进行优化，从而改进了这些陆面过程模式对陆面过程的模拟结果。

3.1 观测的陆面过程参数在干旱区陆面过程模式参数化方案的优化及其模拟结果改进的作用

上述总结了根据 NWC-ALIEX 观测试验结果，提出了许多干旱区重要陆面过程参数，这些参数对于陆面模式中参数的优化有着重要作用。Chen et al. (2009) 利用 NWC-ALIEX 连续 8 年的观测数据以及近年来关于陆面过程参数化方案的最新研究结果，对 BATS 陆面过程模式 (Dickinson et al., 1993) 中反照率、粗糙度长度、土壤体积热容量和土壤热传导率 4 个参数进行优化。并且，他们还利用改进过的陆面过程模式按照不同的参数优化方案组合形式设计了典型干旱区地气交换过程的控制试验

和重要陆面过程参数影响的敏感性试验方案，对敦煌 2000 年 5 月~2004 年 7 月的陆面过程进行了离线 (off-line) 数值模拟分析。在此基础上，通过对比各数值试验的模拟结果，细致地分析了不同参数在不同时段对地—气相互作用中感热通量、潜热通量和地表温度模拟的影响 (朱德琴, 2006)。

经参数优化的 BATS 陆面过程模式可以显著提高模式的模拟能力。如图 8a 所示，对地表温度而言，参数优化后的模式能更准确地模拟地表温度的日变化特征。这主要是由于在陆面模式中改进了反照率参数，从而改进了模式对净短波辐射和净长波辐射的模拟，改进后的模式在净短波辐射和净长波辐射的模拟上均比原模式的模拟结果有了一定程度的改善，可以比较好地模拟出它们的日变化和季节变化特征。并且，经参数优化后的模式可以比较好地模拟深层土壤温度的季节性变化特征，全年各季节土壤温度的模拟对反照率和粗糙度长度都比较敏感，尤其是夏半年更明显，而在冬半年它对

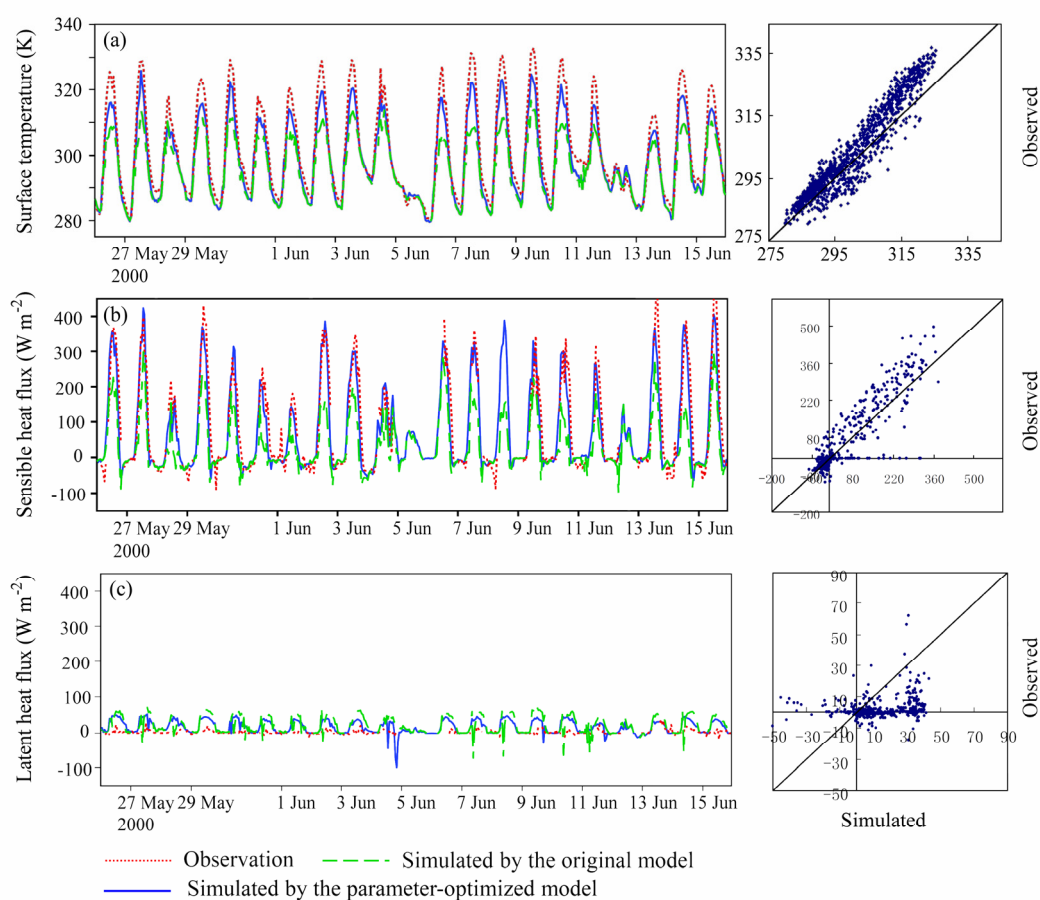


图 8 利用 NWC-ALIEX 观测试验得到的干旱区陆面参数对 BATS 陆面过程模式中有关参数进行优化后所模拟的 (a) 地表温度 (单位: K) 以及地表附近 (b) 感热输送通量 (单位: W m^{-2}) 和 (c) 潜热输送通量 (单位: W m^{-2}) 的日变化 (朱德琴, 2006)

Fig. 8 Diurnal variations of (a) surface temperature (unit: K), (b) sensible heat transfer flux (unit: W m^{-2}), and (c) latent heat transfer flux (unit: W m^{-2}) simulated by using the parameter-optimized BATS land surface model, where the related parameters were observed from the NWC-ALIEX (Zhu, 2006)

于土壤体积热容量和热传导率更为敏感,在夏季对此两参数的影响比较小。此外,如图 8b 和图 8c 所示,与加强观测期的感热通量观测值对比,参数优化后的陆面过程模式能比较好地模拟感热通量的日变化特征,并对潜热通量的模拟也有一定的改进。

3.2 观测的陆面过程参数在国际常用陆面过程模式的参数化方案优化及其模拟结果改进的作用

为了更好验证上述从观测试验所得的参数在陆面过程参数化方案的优化及其模拟改进的作用,房云龙等(2010)选取目前国际上较为常用的四个陆面过程模式——BATS (Dickinson et al., 1993)、SSiB (Xue et al., 1991)、NCAR-LSM (National Center for Atmospheric Research, Land Surface Model) (Bonan, 1996) 以及 CoLM (Common Land Model) (Dai et al., 2001, 2003), 并根据 NWC-ALIEX 的观测资料对这四个模式中的地表反照率和粗糙度长度两个参数的参数化方案进行统一改进和优化;在此基础上对敦煌干旱区陆面过程进行单站离线 (off-line) 数值试验,并对比各模式的模拟性能。结果显示:经反照率和粗糙度长度参数化方案优化之后,各模式对地表温度的日变化和感热通量的季节变化等的模拟能力均有较大程度的提高(图 9、10)。

并且,如表 2 所示,各模式对感热通量模拟的均方根误差和平均偏差都有显著的减小,这说明改进这四个模式中两个参数就可以更好地模拟干旱区地表特征;此外,优化参数后,模式之间模拟性能的差异也有所减小。这个结果说明了对于干旱区陆面过程模式中参数化方案的正确选取与物理过程的方案选取可能同等重要。

表 2 BATS、SSiB、NCAR-LSM 和 COLM 陆面过程模式经参数优化后与未经优化对感热通量模拟结果的比较

Table 2 Comparisons between sensible heat fluxes simulated by using the parameter-optimized surface land models of BATS, SSiB, NCAR-LSM, and CoLM and those simulated by using original models. Units: W m^{-2}

模式	均方根误差 (W m^{-2})		平均偏差 (W m^{-2})	
	未优化	优化后	未优化	优化后
BATS	7.95	5.55	6.41	4.34
SSiB	7.46	4.61	6.77	4.05
NCAR-LSM	15.99	8.64	13.44	7.36
CoLM	5.05	2.29	4.08	1.80

3.3 经参数化方案优化后陆面过程模式对气候模拟的改进

朱德琴(2006)利用参数优化后 BATS 陆面过程模式和 RegCM 区域气候模式 (Dickinson et al., 1989; Giorgi, 1990) 对我国夏季降水进行了数值模拟。如图 11 所示,改进后的陆面过程模式不仅可以较好地模拟干旱区陆面过程,而且能较好地模拟周边的气候变化,特别是改进了对我国东部夏季季风降水的数值模拟。把图 11a 和图 11b 分别与图 11c 相比较可以明显看到,经陆面参数化方案优化以后区域气候模式对我国夏季降水有很大改进,所模拟的我国夏季降水与实况较接近。

上述结果说明了通过利用 NWC-ALIEX 所测得的多年资料对陆面过程参数进行优化,经参数优化后的陆面过程模式不仅大大改进了干旱区的地表温度和感热输送的模拟结果,而且应用到区域气候模式中,可以改进我国东部夏季季风降水的数值模拟结果。这表明了我国干旱区陆面过程参数的优化和陆面过程模式的改进对于我国气候数值模拟是相当重要的。

4 中国西北干旱区感热输送特征的研究

中国西北地区由于山脉的阻挡,水汽输送到这里很少,云量很少,故在春、夏季的净短波辐射大,这就导致此区域在春、夏季地—气温差很大,从而造成感热输送很大。然而,中国西北干旱区,一方面由于对地表感热输送的直接观测的站点很少,即便有少数观测站,但观测的时间也较短;另一方面,由于气象台站只有常规气象要素的观测,并没有感热通量的直接观测。为了估算我国西北地区的地表感热通量, Zhou and Huang (2010a) 利用 NWC-ALIEX 在干旱下垫面观测试验所取得的地表能量通量湍流输送,并评价了利用该输送参数来计算一般气象台站感热通量的可行性,从而利用气象台站四个时次(02 时、08 时、14 时、20 时)观测资料估算了西北干旱区感热输送(周连童, 2009a)。

4.1 感热通量在敦煌地区地表能量平衡中的作用

干旱区地表能量平衡方程如下:

$$R_n = H + L + G, \quad (1)$$

式中, R_n 为净辐射, H 是地表附近的感热通量, L 是潜热通量, G 是地表土壤热通量。(1) 式表明:干旱地表所得太阳的净辐射与地表向大气输送的

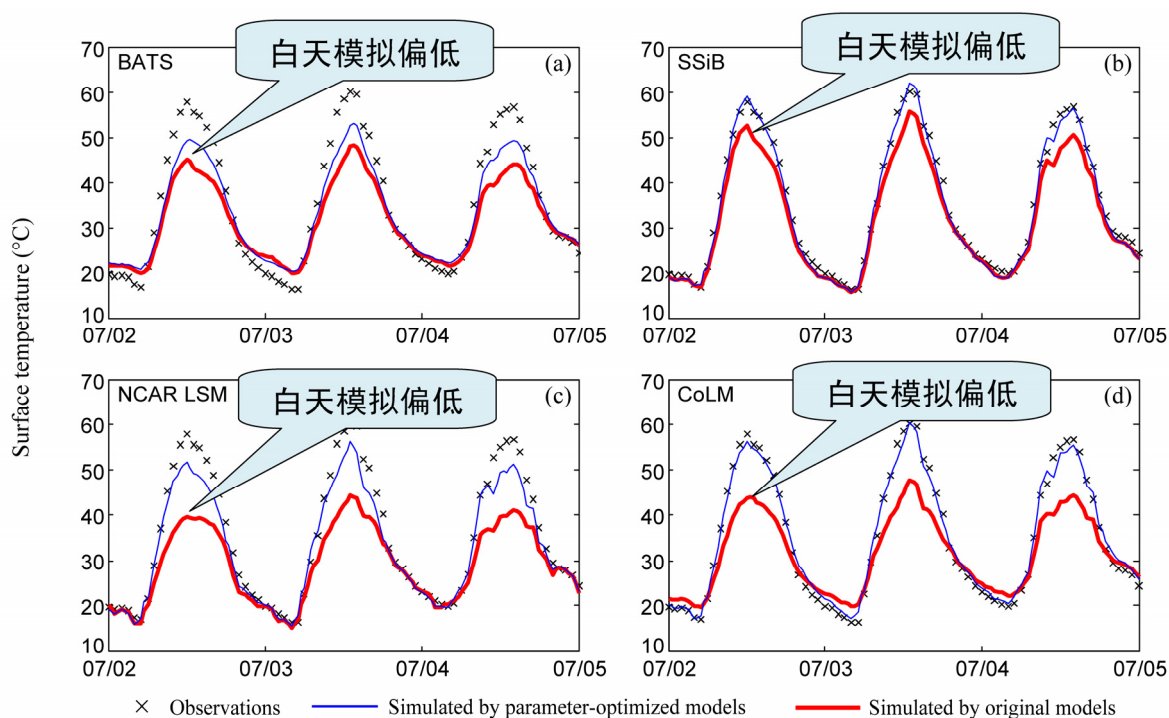


图9 BATS (a)、SSiB (b)、NCAR-LSM (c) 和 CoLM (d) 陆面模式经参数化方案优化与未优化对地表温度日变化模拟结果的比较。单位: °C

Fig. 9 Comparisons between the diurnal variations of surface temperature simulated by using the parameter-optimized surface land models of (a) BATS, (b) SSiB, (c) NCAR-LSM, and (d) CoLM and those simulated by original models. Units: °C

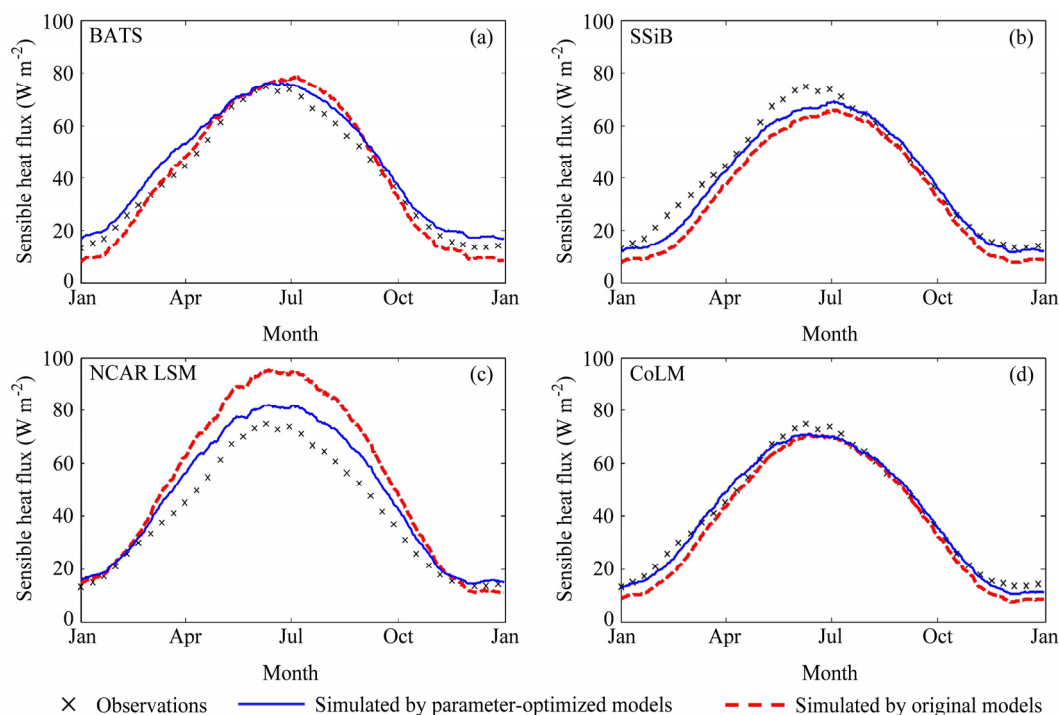


图10 同图9, 但为感热通量的季节变化。单位: W m⁻²

Fig. 10 As in Fig. 9, except for the seasonal variations of sensible heat flux. Units: W m⁻²

感热、潜热以及土壤向下或向上的热通量相平衡。通过NWC-ALIEX的加强期观测可以测得敦煌干旱区的感热通量、潜热通量和地表土壤热通量; 并且,

由于敦煌是典型干旱区, 潜热输送通量很小, 因此还可利用地表能量平衡方程以及土壤热通量和净辐射的观测数据计算出敦煌戈壁区地表的感热通

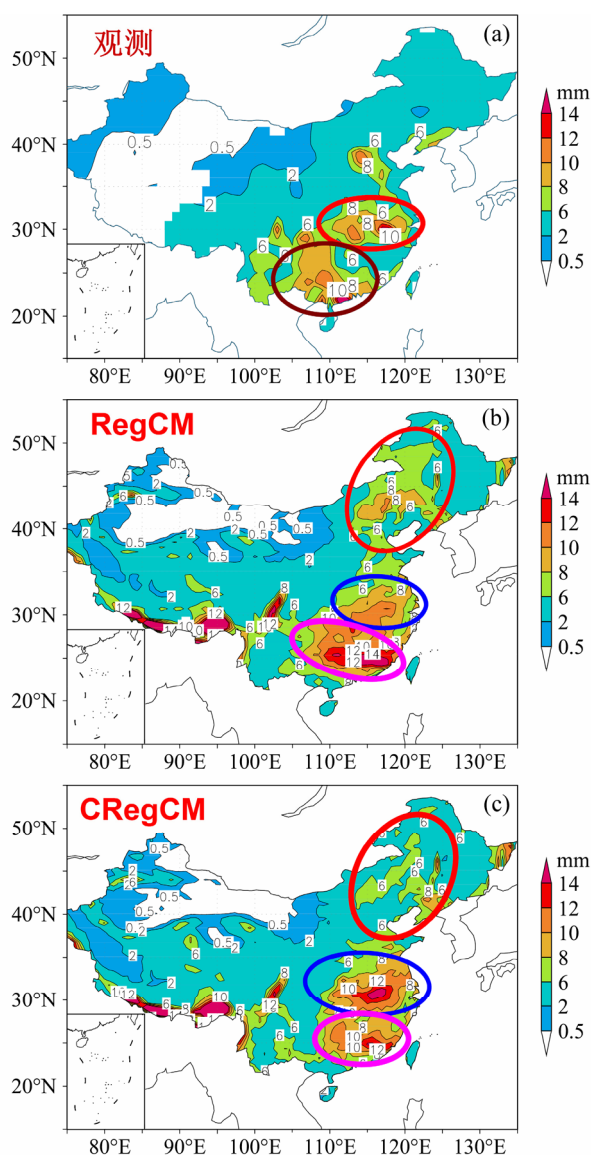


图 11 观测的我国 1996 年夏季 (6~8 月) 降水距平的分布 (a) 及与经参数化方案优化后 BATS 陆面过程模式和 RegCM 区域气候模式相耦合的模拟结果 (b) 和与原模式模拟结果 (c) 的比较。单位: mm。(朱德琴, 2006)

Fig. 11 (a) Observed anomaly distribution of 1996 summertime (Jun–Aug) precipitation in China, and its comparisons with (b) the anomaly distribution simulated by using the RegCM regional climate model coupled with the parameter-optimized BATS land surface model and (c) the one simulated by original BATS model. Units: mm. (Zhu, 2006)

量, 或者利用感热输送通量和净辐射的观测数据计算出地表土壤热通量。通过与加强观测期的观测值对比, 表明了利用 (1) 式所计算的感热通量或地表土壤热通量与观测值对应较好 (图 12a、12b)。

图 12a 为典型夏季敦煌戈壁地表能量平衡的日变化。从图 12a 可见, 地表能量平衡主要以感热通量为主, 而潜热通量很小, 感热通量、潜热通量、

地表热通量日积分值分别占净辐射日积分值的 95.7%、3.1%和 1.1%, 感热通量是潜热通量的 30 倍左右, 这也说明了敦煌地区地表呈现出极端干旱的特征。胡隐樵等 (1994) 根据黑河流域戈壁下垫面观测的结果也指出, 在黑河流域干旱区潜热通量比感热通量约小一个量级, 这表明了 NWC-ALIEX 观测试验结果与黑河流域试验的结果也比较吻合。并且, 从图 12a 还可以看到, 敦煌戈壁观测站夏季 12 d 平均的感热通量的极值大约在 300 W m^{-2} , 而个别观测日的极值可以接近 500 W m^{-2} , 感热通量极值出现的时间大概在当地时间 13~14 时, 比净辐射极值出现的时间晚 1~2 h, 夜间的感热通量比较平稳, 基本维持在 -20 W m^{-2} 。此外, 从图 12a 还可以看到: 地表热通量在 04~14 时为正, 表示在这段时间内热量由大气向土壤传导, 此时土壤为升温过程; 而其他时间, 地表热通量为负, 表示热量由土壤向大气传导, 土壤为降温过程。地表热通量的日积分值为 $0.086 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 这说明在夏季有净的热量进入土壤, 所以从季节变化的角度来看, 整个夏季 (或者夏半年) 是中国西北干旱区土壤的升温时期。

图 12b 为典型冬季地表能量平衡的日变化。从图 12b 可以明显看到, 与夏季不同的是冬季净辐射峰值出现的时间比夏季略提前, 为当地时间 11:30, 数值略大于 150 W m^{-2} , 感热通量和地表热通量的峰值分别约为 100 W m^{-2} 和 120 W m^{-2} , 比夏季小得多。感热通量在 09 时之后开始为正, 14 时达到最大值, 最低值出现在日出之前, 为 $-30 \text{ W m}^{-2} \sim -20 \text{ W m}^{-2}$ 。由于冬季的日出时间较晚, 因此, 直到 06:30 地表热通量才开始大于 0, 并一直维持到 14 时左右, 这段时间为地表温度的升温时段, 升温时间比夏季大约少了 2 h。在冬季敦煌地表净辐射、感热通量和地表热通量的日积分值分别为 0.84 、 1.21 和 $-0.35 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。这说明在冬季西北干旱区地表热通量的积分值为负, 这也就是说, 在冬季西北干旱区地表得到太阳的净辐射的能量不足以平衡感热通量, 需要地表热通量来补充净辐射不足的能量, 这就造成土壤处于降温状态。因此, 冬季西北干旱土壤为热源。

4.2 中国西北干旱区春、夏季地表感热输出特征

周连童 (2009a, 2010) 以及 Zhou et al. (2010) 从 NCEP/NCAR 和 ERA-40 的感热输送再分析资料, 并结合 NWC-ALIEX 所观测的结果, 分析了欧

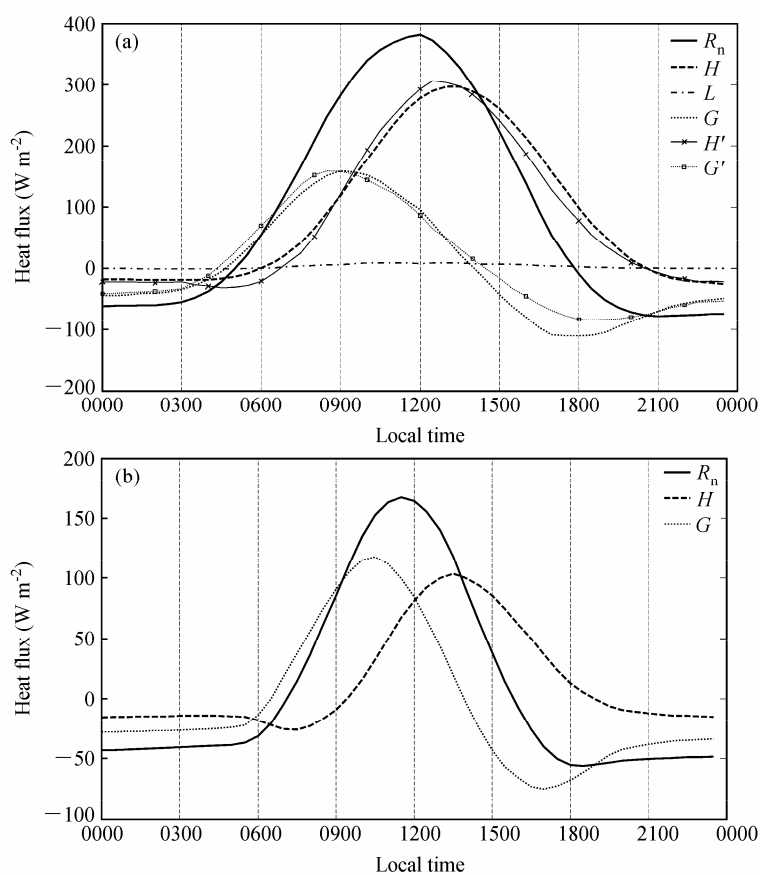


图 12 夏季 (a) 和冬季 (b) 敦煌戈壁地表能量平衡的日变化。单位: W m^{-2} 。 R_n : 净辐射; H : 感热输送通量观测值; L : 潜热输送通量观测值; G : 地表土壤热通量观测值; H' : 感热输送通量计算值; G' : 地表土壤热通量计算值

Fig. 12 Diurnal variation of surface energy balance at Dunhuang Gobi site in boreal (a) summer and (b) winter. Units: W m^{-2} . R_n : net radiation; H : observed sensible heat flux; L : observed latent heat flux; G : observed surface soil heat flux; H' : calculated sensible heat flux; G' : calculated surface soil heat flux

亚大陆春、夏季的感热分布。如图 13a 和图 13b 所示: 中国西北干旱和半干旱区是欧亚大陆上最高的感热中心之一, 中国西北干旱和半干旱区除了南部和西部外, 大部分区域感热输送通量在夏季可达 120 W m^{-2} 以上。并且, 他们还由 ERA-40 再分析的感热资料计算了我国各区域 1958~2002 年气候平均感热输送及其季节变化 (图 14)。从图 14 可以明显看到, 中国西北干旱区气候平均的春、夏季感热输送在中国各区域感热输送中都是位居第一, 在夏季高达 75 W m^{-2} , 它比东北、华北、青藏高原的感热都大, 特别是它比我国东部季风湿润区的感热输送要大得多。

4.3 中国西北干旱区感热时空变化特征及与中亚干旱区感热变化的关联

最近, 周连童 (2009a) 比较了 NCEP/NCAR 和 ERA-40 感热再分析资料, 并与利用实测资料计算得到的感热做比较, 相对而言, 敦煌干旱区 ERA-

40 的感热再分析资料与应用实际观测资料所计算的敦煌干旱区的感热变化趋势更接近。因而, 周连童 (2010) 利用 1958~2002 年 ERA-40 再分析的春、夏感热输送资料做了 EOF 分析, 结果显示: 无论春季或夏季, 欧亚大陆干旱/半干旱区的感热输送都有三个主模态。如图 15a 所示, 第一模态表示中国西北干旱区与中亚地区春季感热变化在空间分布上的一致性, 并从图 15b 可看到, 从 20 世纪 70 年代中期开始, 欧亚大陆干旱/半干旱区的春季感热输送明显增强。第二、三模态 (图略) 显示出中国西北干旱和半干旱区中亚地区感热变化在空间分布的不一致性, 且存在着年际、年代际变化特征。并且, 夏季中亚和中国西北干旱区感热 EOF 分析的第 1 主模态在空间分布和时间系数的变化也与春季感热 EOF 分析的空间分布较一致, 即西北干旱区与中亚夏季感热变化具有一致性, 但时间系数两者呈相反变化趋势, 即夏季无论中亚或中国西北干旱

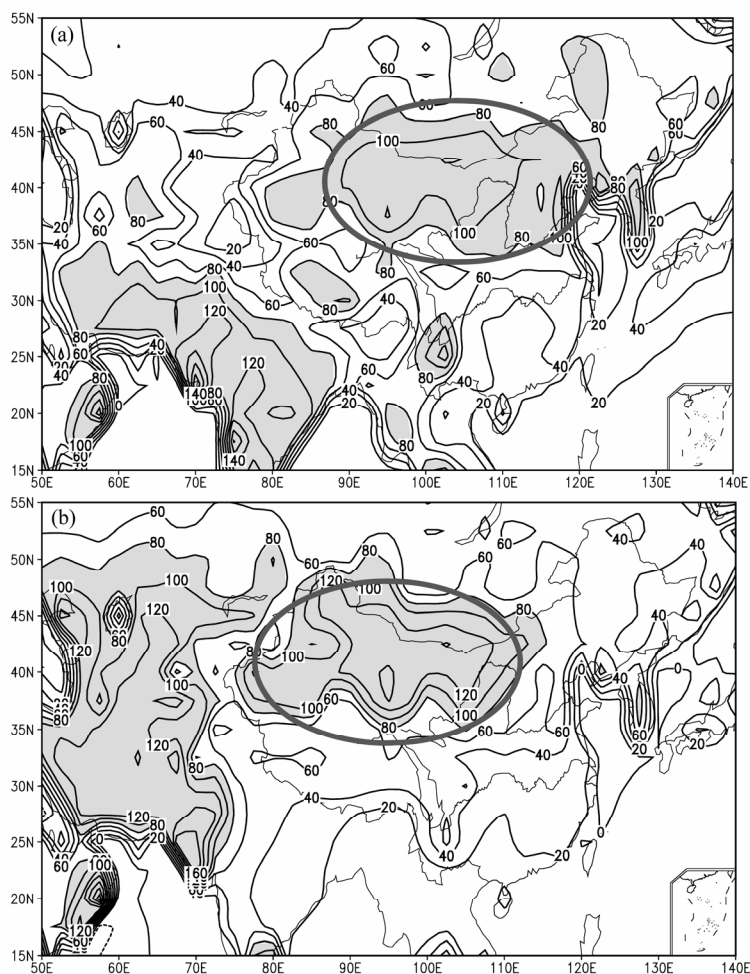


图 13 1958~2002 年气候平均的欧亚大陆春季 (a) 和夏季 (b) 感热输送通量分布。单位: W m^{-2} 。阴影区表示大于 80 W m^{-2} , 资料取自 ERA-40 再分析的感热资料 (Uppala et al., 2005)

Fig. 13 Distributions of climatological mean sensible heat flux for boreal (a) springs and (b) summers of 1958–2002 over the Eurasian continent. Units: W m^{-2} . The areas of sensible heat flux over 80 W m^{-2} are shaded, and data of sensible heat flux are from the EAR-40 reanalysis (e.g., Uppala et al., 2005)

区感热输送呈减少趋势。因此, Zhou et al. (2010) 指出: 在中国西北干旱区春季感热的年代际变化与夏季感热的年代际变化趋势是不同的。此外, 小波分析结果也显示出欧亚大陆春、夏季感热输送存在着明显的年际、年代际变化, 其年代际变化信号要强于年际变化的信号。

这些结果揭示了在春、夏季中国西北干旱区具有高感热输送特征, 它是欧亚大陆地表附近最大感热输送中心之一, 并与中亚地区感热变化有重要关联。

5 中国西北干旱区陆—气相互作用对中国东部气候变异的影响及其机理

上述分析表明了中国西北干旱区是欧亚大陆

春、夏季最大感热中心, 这表明此地区也是陆—气相互作用相当强的区域。由于中国西北干旱区十分广阔, 因此, 此区域的陆—气相互作用过程的变化不仅会引起此区域气候的变化, 而且会引起东亚季风区 (特别是中国东部) 气候的变化 (周连童和黄荣辉, 2006, 2008)。因而, 本节分析中国西北干旱区地表热状况和陆—气相互作用的变化对中国东部夏季降水的年代际跃变的影响。

5.1 中国西北干旱区春季感热对中国东部华北和长江流域夏季降水的影响

周连童和黄荣辉 (2006)、Zhou (2009) 分析了西北干旱区 49 站 1961~2000 年地温、气温和地—气温差的时空演变特征以及春、夏季感热的年代际变化, 指出: 中国西北干旱区春、夏季地—气温差和春季感热在 1976 年前后发生了明显增强的

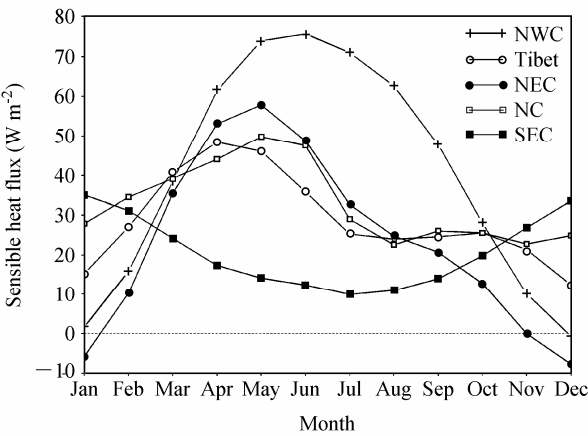


图 14 中国不同区域 1958~2002 年气候平均的感热通量随月份的变化。单位： W m^{-2} 。资料取自 ERA-40 再分析资料 (Uppala et al., 2005)

Fig. 14 Monthly variation of climatological mean sensible heat flux for 1958–2002 in various regions of China. Units: W m^{-2} . Data are from the ERA-40 reanalysis (e.g., Uppala et al., 2005)

年代际变化特征；并且，他们还指出了此区域春季地—气温差和感热的增强对于中国东部的夏季降水具有重要影响。周连童和黄荣辉（2006，2008）以及 Zhou and Huang（2010b）根据实测的气象观测值所计算的感热与全国夏季降水进行相关分析，指出：西北干旱区春季感热与长江流域和东北地区夏季降水有正相关，而与华北和西南地区夏季降水有负相关（图略）。并且，他们分析了西北和华北地区实测的夏季降水的年际和年代际变化，指出了西北与华北地区夏季降水的年代际变化的异同。如图 16 所示，西北干旱区夏季降水与华北地区的夏季降水有相反的年代际变化，中国华北地区从 20 世纪 70 年代中后期起夏季降水具有明显的减少趋势（除 90 年代中期），而中国西北干旱区夏季降水从 70 年代中后期起却有明显的增加趋势。

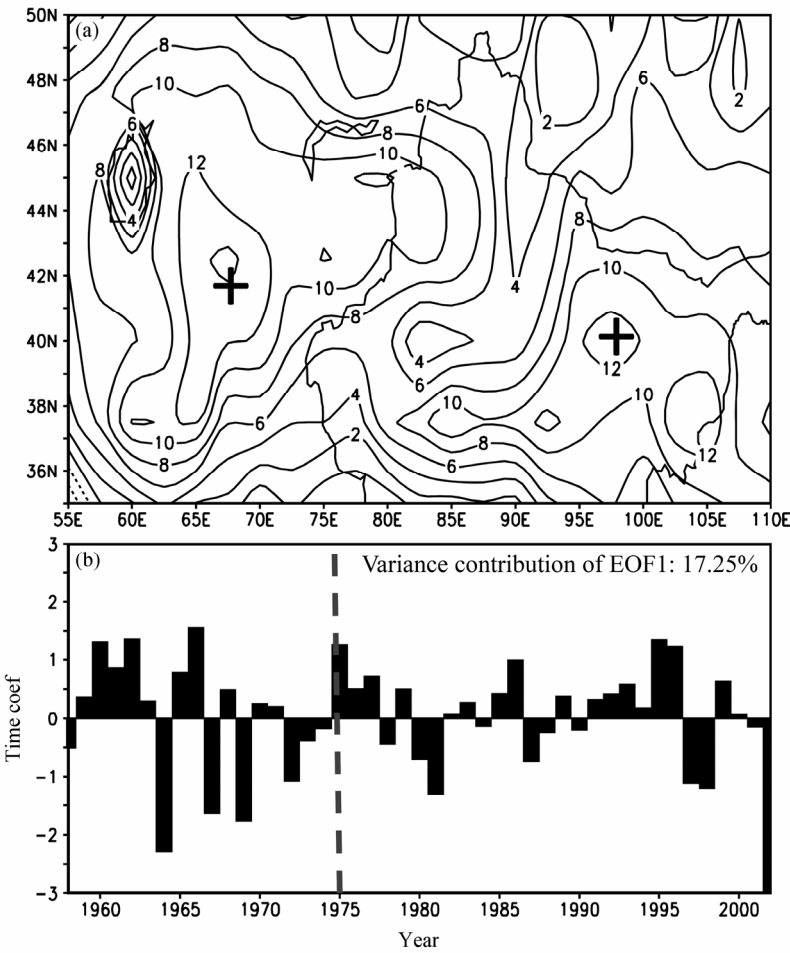


图 15 中亚和中国西北干旱区春季感热输送 EOF 分析第 1 主分量的空间分布 (a) 和时间系数 (b)。图 15a 中实、虚线分别表示正、负信号，EOF1 占总方差的 17.25%

Fig. 15 (a) The spatial distribution and (b) corresponding time coefficients of the first component of EOF analysis (EOF1) of spring sensible heat flux in Central Asia and the arid area of Northwest China. The solid and dashed lines in Fig.15a indicate positive and negative signals, respectively, and EOF1 explains 17.25% of the variance

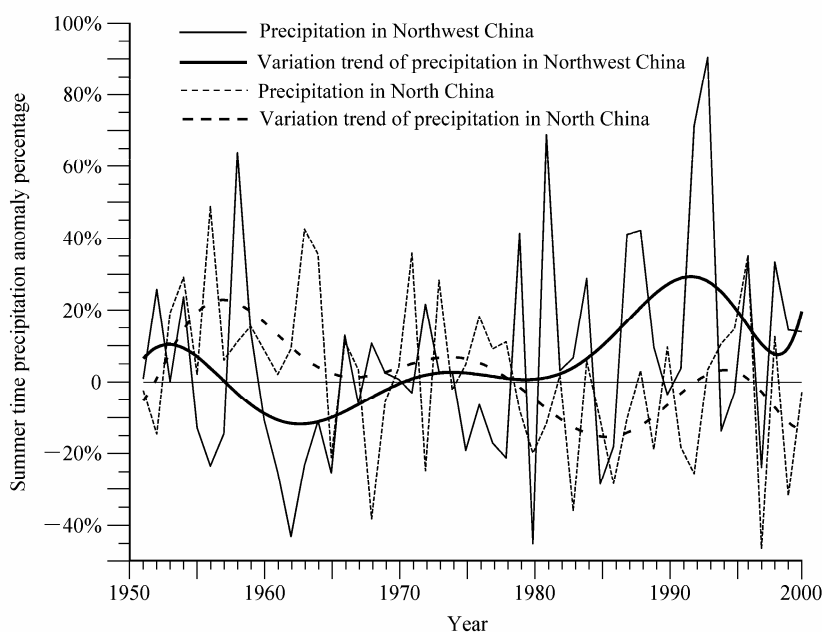


图 16 中国西北干旱区夏季(6~8 月)降水距平百分率的年际变化(细实线)和变化趋势(粗实线)及其华北地区夏季降水距平的年际变化(细虚线)和变化趋势(粗虚线)

Fig. 16 Interannual variation of summertime (Jun–Aug) precipitation anomaly percentage in the arid area of Northwest China (thin solid line) and its variation trend (heavy solid line) and interannual variation of summertime precipitation anomaly in North China (thin dashed line) and its variation trend (heavy dashed line)

5.2 中国西北干旱区陆—气相互作用变化对中国东部季风区夏季降水的影响过程

周连童和黄荣辉(2008)以及周连童(2009b)指出了中国西北干旱区春季地—气温差从 20 世纪 70 年中后期开始的年代际增强及其对华北地区持续性干旱的影响过程。他们的研究表明:从 20 世纪 70 年代中后期起西北干旱区春季地—气温差显著增强,致使该地区春季感热增强和上升气流异常增强,并且这种上升气流异常可维持到夏季,造成西北地区上空对流层低层在春、夏季出现气旋性环流异常型,这有利于西北地区降水偏多。由于受西北干旱区上升气流异常的影响,夏季在华北地区上空出现下沉气流的异常且出现年代际的反气旋性环流异常型,从而造成华北地区夏季降水偏少。并且, Zhou and Huang (2010b) 利用位涡理论揭示西北干旱区春季感热对华北夏季降水影响的动力过程,指出:由于在夏季西北地区上空对流层高层温度从 20 世纪 70 年代中后期起出现显著的降低,而西北干旱区上空对流层低层温度明显升高,这种温度差异造成该地区垂直对流不稳定性增强,而在华北地区上空出现垂直对流不稳定性减弱,因而引起从 20 世纪 70 年代中后期开始西北地区降水增多,而华北地区降水减少。他们从上述结果提出了中国西北干旱区春季感热增强对华北夏季降水影

响的概念图(见图 17)。

5.3 中国西北干旱区与东部季风区夏季降水相关联的机理

黄荣辉等(2012)从欧亚上空整层水汽输送通量距平的分布,说明了西北干旱区和中国东部季风区水汽输送异常是通过沿欧亚上空副热带急流传播的“Silk Road”型遥相关波列而相关联的。Chen and Huang (2012) 还利用行星波传播理论从动力学上论述了中国西部干旱区和高原区与中国中、东部夏季降水异常的相关联是通过沿欧亚地区上空副热带急流传播的“Silk Road”型遥相关波列(Lu et al., 2002; Enomoto et al., 2003; Enomoto, 2004)。正如图 18 所示,欧亚大陆对流层上层环流(特别是副热带急流)的变化不仅影响我国西北干旱区夏季降水的年际变化,而且通过“Silk Road”型遥相关波列影响我国东部季风区的夏季降水的年际变化,从而进一步揭示了我国西北干旱区与东部季风区夏季降水异常相关联的机理。

5.4 中国西北干旱区植被退化对区域气候的影响

Li and Xue (2010) 利用耦合了陆面过程模型 SSiB (Xue et al., 1991) 的 NCEP GCM (Kalnay et al., 1990; Kanamitsu et al., 2002) 全球大气环流数值模式(NCEP GCM/SSiB)模拟了西北地区及青藏高原植被退化对周围夏季气候的可能影响。在模拟试验

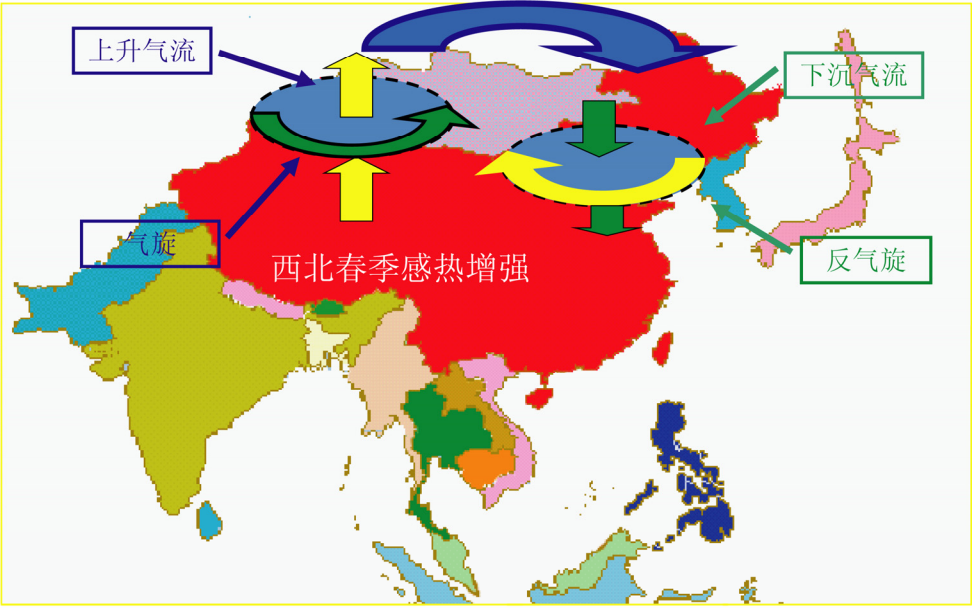


图 17 中国西北干旱区春季感热增强对华北夏季降水影响的示意图

Fig. 17 Schematic map of the impact of intensification of spring sensible heat in the arid area of Northwest China on summertime precipitation in North China

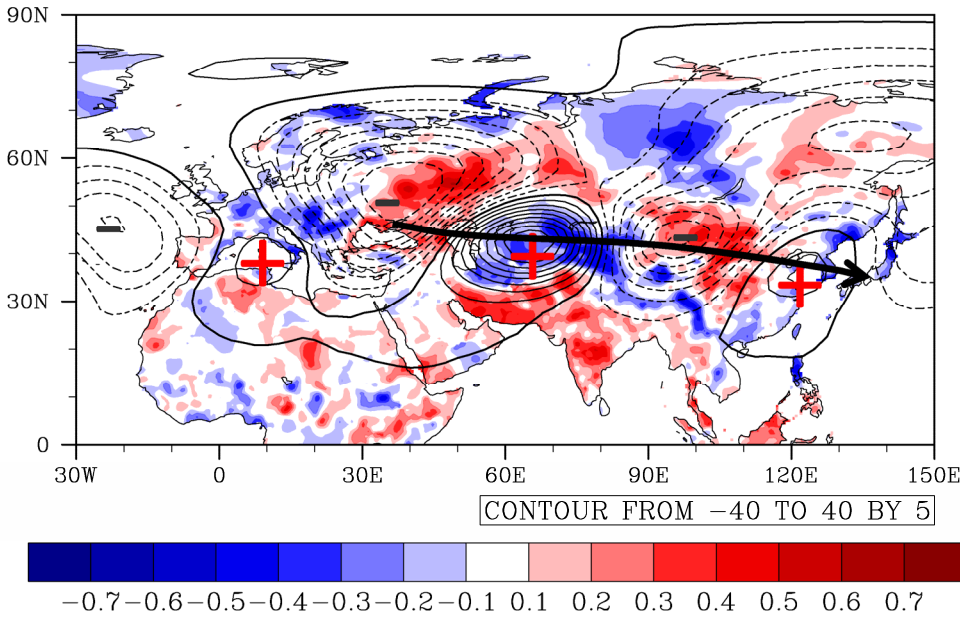


图 18 欧亚上空 7 月 200 hPa 经向风 EOF1 时间系数与欧亚大陆降水相关系数（阴影区）分布图。图中实、虚线表示欧亚大陆上空 200 hPa 高度场对 EOF1 时间系数的回归分布，欧亚大陆降水数据来自 NOAA 的全球陆地降水资料 (PREC/L)，风场数据来自 ERA-40 再分析资料 (e.g., Uppala et al., 2005).

Fig. 18 Distributions of the correlation coefficients between the first component of EOF analysis of the 200-hPa wind fields and precipitation anomalies in the Eurasian continent in July (shading areas) and the regression of 200-hPa geopotential height field over the Eurasian continent to its corresponding time coefficients of EOF1 (solid and dashed contours). The data of precipitations in the Eurasian continent are from NOAA's Precipitation Reconstruction over Land (PREC/L), and the data of wind fields are from the ERA-40 reanalysis (e.g., Uppala et al., 2005)

中利用了两个完全不同的陆面植被覆盖并输入大气环流模型中的 SSiB 模型，通过对比来得到一些较为明显的气候信号。其中的一个试验是植被覆盖情况来源于反演的卫星资料 (Case S1)，另一个试验是西北地区大部分地区为裸土(Case S2)。数值模

拟结果表明：中国西北地区植被的退化（从植被覆盖到裸土）将减少地表吸收的辐射，并引起较弱的地表热力作用，这使得中国西北干旱区大部分区域上空对流层中层有反气旋异常环流，会导致此区域大部分地区降水减少。然而，中国西北干旱区植被

退化会使高原东北侧上空对流层上层产生反气旋异常,在高原的东北部上空对流层中层会产生气旋环流异常,从而引起了高原东北侧上空产生垂直上升运动的异常,这些环流的变化导致了青藏高原东北部的降水增多。这个数值模拟表明:当西北干旱区植被退化,会导致此区域大部分地区降水减少,但也会引起高原东北侧局部地区降水反而增多。因此,某区域一旦植被破坏导致干旱,总体来说,如 Charney (1975) 所指出该区域会变得愈来愈干旱,但还存在区域差异,甚至某一局部区域降水反而增多。

上述分析结果表明了中国西北干旱区陆—气相互作用(特别是春季感热)对东部季风区夏季降水变异有很大影响;并且,还表明了这两区域夏季降水异常之间有很大关联,这个关联不仅通过垂直纬向环流,而且通过“Silk Road”遥相关波列。此外,区域气候数值模式的模拟结果也表明了西北干旱区植被减少所引起陆—气相互作用的变化会使中国西北大部分干旱地区变得更干旱,但它也会造成青藏高原东北部上空反气旋环流和下沉气流的减弱以及中层气旋环流异常,因而会使得青藏高原东北部的降水增多。

6 总结及需进一步研究的问题

本文的重点是综述进行了 12 年之久的“中国西北干旱区陆—气相互作用观测试验(NWC-ALIEX)”最近几年所取得的观测和研究进展,特别是综述了近几年关于敦煌干旱区一些重要陆面过程参数的提出,干旱区陆—气相互作用特征的分析以及这些参数在陆面过程模式中参数化方案的优化和陆面过程数值模式改进应用的研究进展。并且,本文还系统地综述了中国西北干旱区春、夏季的高感热输送特征以及高感热对中国东部夏季降水影响及其过程和机理。这些研究结果也是近年来国际上关于全球气候变化方面研究所关注的内容。但必须指出,这些研究成果还是初步的,许多问题还有待于利用更长时间的观测试验资料以及更多典型下垫面的长时间观测资料的分析以及利用更好的陆面过程模式的数值模拟进一步做深入研究。特别是以下几个问题今后还需进一步研究:

(1) 本文所综述的西北干旱区陆面过程参数主要是针对戈壁典型干旱下垫面,这也是目前国内许多有关陆—气相互作用观测试验所缺少的。然而,应该看到,西北干旱区还有大片的稀疏植被和

绿洲区域,目前还未能在这类区域对陆面过程坚持较长时间观测以及很好地分析总结其观测结果,这可能是今后应加强观测试验研究的一个问题。

(2) 利用卫星对地表状况的遥感资料并与观测试验所观测的陆面参数相结合来反演区域陆面过程参数,这可以把单站测得的陆面过程参数推广到面上或区域尺度。但由于费用较大,目前还未能接收和反演更多有关干旱区陆面过程的卫星遥感资料,因此,今后应大力发展利用卫星遥感资料给出时间尺度较长并有区域代表性的我国西北干旱区陆面过程参数的动态变化情况。

(3) 西北干旱区沙尘暴频繁发生,这也是我国西北干旱区主要的天气气候特征之一。一方面沙尘暴发生与我国西北干旱区多沙漠有关,这里干旱而少雨造成了陆面干燥而松软,因此,只要气旋锋面或中尺度天气系统经过就容易引起此区域沙尘暴的发生;另一方面,沙尘暴发生或过境时由于大量沙尘会散射太阳辐射,故会给此区域的陆面过程或陆—气相互作用带来很剧烈的影响。因此,西北干旱区沙尘暴与陆面过程是相互作用的。NWC-ALIEX 所设的观测站中敦煌和临泽观测站都是沙尘暴高发区,在这 12 年中曾观测到多次沙尘暴发生或沙尘暴过境时的陆面过程变化情况。然而,很多沙尘暴发生和过境对陆面过程的影响及其“阳伞效应”还有待于进一步分析总结。

(4) 水分能以气、液、固三种形态参与气候系统中各圈层相互作用的物理过程、生物过程,甚至化学过程,因此,水分循环过程是导致气候系统变化的重要过程。然而,干旱区由于降水稀少,土壤和空气十分干燥,再加上春、夏季高温,蒸发能力很大,而实际蒸发却很小;并且,在干旱区能量循环由于缺乏水分,主要靠地表向大气的感热输送,潜热输送十分小。因此,在干旱区水分和能量循环不同于半干旱区和半湿润区,更不同于我国东部季风湿润区。目前,在水分十分缺乏的典型干旱区,陆面过程中地表蒸发和土壤水分输送的计算在理论上还存在不少困惑,因此,在本文综述中涉及西北干旱区水分循环很少。关于这一方面迫切需要进一步深入观测和研究。

参考文献 (References)

- André J C, Goutorbe J P, Perrier A. 1986. HAPEX-MOBLIH: A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and

- evaporation flux at the climate scale [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 67 (2): 138–144.
- Bolle H J, André J C, Arrue J L, et al. 1993. EFEDA: European field experiment in a desertification-threatened area [J]. *Ann. Geophys.*, 11 (2–3): 173–189.
- Bonan G B. 1996. A Land Surface Model (LSM version 1.0) for Ecological, Hydrological, and Atmospheric Studies: Technical Description and User's Guide [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-417+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 150pp.
- Charney J G. 1975. Dynamics of desert and drought in the Sahel [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101 (428): 193–202.
- Chen Guosen, Huang Ronghui. 2012. Excitation mechanisms of the teleconnection patterns affecting the July precipitation in Northwest China [J]. *J. Climate*, 25: 7834–7851.
- Chen Wen, Zhu Deqin, Liu Huizhi, et al. 2009. Land–air interaction over arid/semi-arid areas in China and its impact on the East Asian summer monsoon. Part I: Calibration of the land surface model (BATS) using multicriteria methods [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (6): 1088–1098.
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E. 2001. Common Land Model: Technical Documentation and User's Guide [M/OL]. <ftp://159.226.119.9/model/CoLM/clmdoc.pdf>. [2012/10/25]
- Dai Yongjiu, Zeng Xubin, Dickinson R E, et al. 2003. The common land model [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84 (8): 1013–1023.
- Dikinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. 1989. A regional climate model for the western United States [J]. *Climatic Change*, 15 (3): 383–422.
- Dikinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. 1993. Biosphere–atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR, 72pp.
- Enomoto T. 2004. Interannual variability of the Bonin high as associated with the propagation of Rossby waves along the Asian Jet [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (4): 1019–1034.
- Enomoto T, Hoskins B J, Matsuda Y. 2003. The formation mechanism of the Bonin high in August [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 129: 157–178.
- 房云龙, 孙菽芬, 李倩, 等. 2010. 干旱区陆面过程模型参数优化和地气相互作用特征的模拟研究 [J]. *大气科学*, 34 (2): 290–306.
- Fang Yunlong, Sun Sufeng, Li Qian, et al. 2010. The optimization of parameters of land surface model in arid region and the simulation of land–atmosphere interaction [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 290–306.
- Giorgi F. 1990. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model [J]. *J. Climate*, 3: 941–963.
- Henderson-Sellers A, Yang Z L, Dickinson R E. 1993. The project for intercomparison of land-surface parameterization scheme [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74: 1335–1349.
- 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: 225–236.
- Hu Yinqiao, Gao Youxi, Wang Jiemin, et al. 1994. Some achievements in scientific research during HEIFE [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 13: 225–236.
- 黄荣辉. 2006. 我国在气候灾害的形成机理和预测理论研究 [J]. *地球科学进展*, 21: 564–575.
- Huang Ronghui. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 21: 564–575.
- 黄荣辉, 陈文, 张强, 等. 2011. 中国西北干旱区陆—气相互作用及其对东亚气候变化的影响 [M]. 北京: 气象出版社, 356pp.
- Huang Ronghui, Chen Wen, Zhang Qiang, et al. 2011. Land–Atmosphere Interaction over Arid Region of Northwest China and Its Impact on East Asian Climate Variability (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 356pp.
- Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2012. Characteristics and internal dynamic causes of the interdecadal jump of summer monsoon rainfall and circulation in eastern China occurred in the end of the 1990s [J]. *Chinese Science Bulletin*, (accepted)
- Huang Ronghui, Wei Guoan, Zhang Qiang, et al. 2002. The Field Experiment on Air–Land Interaction in the Arid Area of Northwest China (NWC-ALIEX) and the preliminary scientific achievements of this experiment [C]// *Proceedings of the International Workshop on the Air–Land Interaction in Arid and Semi-Arid Areas and Its Impact on Climate*. 17–21 August, 2002, Dunhuang, Gansu Province, China.
- Huang Ronghui, Wei Guoan, Zhang Qiang, et al. 2005. The preliminary scientific achievements of the Field Experiment on Air–Land Interaction in the Arid Area of Northwest China (NWC-ALAEX) [C]// *Proceedings of the 4th CTWF International Workshop on the Land Surface Models and Their Applications*. 15–18 Nov., 2005, Zhuhai, China.
- 惠小英, 高晓清, 韦志刚, 等. 2011. 利用探空气球升速判定敦煌夏季白天边界层高度的分析 [J]. *高原气象*, 30: 614–619.
- Hui Xiaoying, Gao Xiaoqing, Wei Zhigang, et al. 2011. Analysis on the determination of boundary layer height in daytime of Dunhuang summer using ascent rate of sounding balloon [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30: 614–619.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Baker W E. 1990. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71: 1410–1428.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Kanamitsu M, Kumar A, Juang H M H, et al. 2002. NCEP dynamical seasonal forecast system 2000 [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1019–1037.
- Li Qian, Xue Yongkang. 2010. Simulated impacts of land cover change on summer climate in the Tibetan Plateau [J]. *Environ. Res. Lett.*, 5: 015102, doi:10.1088/1748-9326/5/1/015102.
- Lu Riyu, Oh J H, Kim B J. 2002. A teleconnection pattern in upper-level meridional wind over the North African and Eurasian continent in summer [J]. *Tellus*, 54A: 44–55.
- Sellers P, Hall F, Ranson K J, et al. 1995. The Boreal Ecosystem–Atmosphere Study (BORES): An overview and early results from the 1994 field year [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 76: 1549–1577.
- Sellers P J, Hall F G, Kelly R D, et al. 1997. BOREAS in 1997: Experiment overview, scientific results, and future directions [J]. *J. Geophys. Res.*, 102(D24): 28731–28769. doi:10.1029/97JD03300.
- 世界气象组织 (WMO). 2006. 世界气候研究计划 2005–2015 年战略框架: 地球系统的协调观测和预报 (COPES) [M]. 李建平, 刘屹岷, 周天军, 等译. 北京: 气象出版社, 109pp.
- World Meteorological Organization (WMO). 2006. The World Climate Research Programme (WCRP) Strategic Framework 2005–2015: Coordinated Observation and Prediction of the Earth System (COPES) (in Chinese) [M]. Li Jianping, Liu Yimin, Zhou

- Tianjun, et al., translated. Beijing: China Meteorological Press, 109pp.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 reanalysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2061–3012.
- 王超, 韦志刚, 李振朝. 2010a. 敦煌戈壁塔站资料的质量控制 [J]. *干旱气象*, 28 (2): 121–127. Wang Chao, Wei Zhigang, Li Zhenchao. 2010a. A quality control routine for Dunhuang Gobi meteorology tower data [J]. *Journal of Arid Meteorology (in Chinese)*, 28 (2): 121–127.
- 王超, 韦志刚, 李振朝, 等. 2010b. 敦煌戈壁地区地气温差变化特征分析 [J]. *干旱区环境与资源*, 25 (11): 72–78. Wang Chao, Wei Zhigang, Li Zhenchao, et al. 2010b. The variation characteristics of differences between surface and air temperature in Dunhuang Gobi [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese)*, 25 (11): 72–78.
- 王超, 韦志刚, 高晓清, 等. 2012. 夏季敦煌稀疏植被下垫面物质和能量交换的观测研究 [J]. *高原气象*, 31: 622–628. Wang Chao, Wei Zhigang, Gao Xiaqing, et al. 2012. An observation study of surface air exchanges and energy budget at a sparse vegetation site of Dunhuang in summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 13: 622–628.
- 韦志刚, 陈文, 黄荣辉. 2010. 敦煌夏末大气垂直结构和边界层高度特征 [J]. *大气科学*, 34: 905–913. Wei Zhigang, Chen Wen, Huang Ronghui. 2010. Vertical atmospheric structure and boundary layer height in the summer clear days over Dunhuang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34: 905–913.
- Wei Zhigang, Wen Jun, Li Zhenchao. 2009. Vertical atmospheric structure of the late summer clear days over the east Gansu Loess Plateau in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 381–389.
- Xue Y K, Sellers P J, Kinter J L, et al. 1991. A simplified biosphere model for global climate studies [J]. *J. Climate*, 4: 345–364.
- 张强, 王胜. 2009. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征 [J]. *气象学报*, 66: 599–608. Zhang Qiang, Wang Sheng. 2009. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in Northwest China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 66: 599–608.
- 张强, 卫国安, 侯平. 2004. 初夏敦煌荒漠戈壁大气边界结构特征的一次观测研究 [J]. *高原气象*, 23: 587–597. Zhang Qiang, Wei Guoan, Hou Ping. 2004. Observation studies of atmosphere boundary layer characteristic over Dunhuang Gobi in early summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23: 587–597.
- 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: 427–441. Zhang Qiang, Huang Ronghui, Wang Sheng, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances [J]. *Advances in Earth Sciences (in Chinese)*, 20: 427–441.
- 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.
- Zhou Degang, Huang Ronghui. 2011. Characterization of turbulent flux transfer over a Gobi surface with quality-controlled observations [J]. *Science China Earth Sciences*, 54: 753–763.
- 周连童. 2009a. 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: 9–20. Zhou Liantong. 2009a. 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: 9–20.
- 周连童. 2009b. 引起华北地区夏季出现持续干旱的环流异常型 [J]. *气候与环境研究*, 14: 120–130. Zhou Liantong. 2009b. Circulation anomalies pattern causing the persistent drought in North China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 14: 120–130.
- Zhou Liantong. 2009. Difference in the interdecadal variability of spring and summer sensible heat fluxes over Northwest China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2: 119–123.
- 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: 299–306. Zhou Liantong. 2010. Characteristics of temporal and spatial variations of sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33: 299–306.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 中国西北干旱、半干旱区春季地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: 1–13. 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: 1–13.
- 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: 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: 1276–1288.
- Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2010a. An assessment of the quality of surface sensible heat flux derived from reanalysis data through comparison with station observations in Northwest China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27: 500–512, doi: 10.1007/s00376-009-9081-8.
- Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2010b. Interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes [J]. *Int. J. Climatol.*, 30: 549–557, doi:10.1002/joc.1923.
- Zhou Liantong, Wu Renguang, Huang Ronghui. 2010. Variability of surface sensible heat flux over Northwest China [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3: 75–80.
- 朱德琴. 2006. 我国干旱/半干旱地区陆面过程及其对区域气候影响的数值模拟研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 133pp.
- Zhu Deqin. 2006. Land surface process over arid/semi-arid areas in China and the simulations study of its impacts on regional climate [D]. Ph. D dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 133pp.
- 邹基玲, 候旭宏, 季国良. 1992. 黑河地区夏末太阳辐射特征的初步分析 [J]. *高原气象*, 11: 381–388. Zou Jiling, Hou Xuhong, Ji Guoliang. 1992. Preliminary study of surface solar radiation properties in “HEIFE” area in late summer [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 11: 381–388.
- 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: 371–380. Zuo Hongchao, Hu Yinqiao. 1992. The bulk transfer coefficient over desert and Gobi in Heihe region [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 11: 371–380.