

南亚夏季风爆发前后青藏高原地表热通量的长期变化特征分析*

韩熠哲^{1,2} 马伟强^{1,3} 马耀明^{1,2,3} 孙翠艳⁴
HAN Yizhe^{1,2} MA Weiqiang^{1,3} MA Yaoming^{1,2,3} SUN Cuiyan⁴

1. 中国科学院青藏高原研究所,北京,100101
2. 中国科学院大学,北京,100049
3. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心,北京,100101
4. 民航山东空管分局气象台,济南 250107

1. *Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*
3. *The Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences (CETES) of the Chinese Academy of Sciences (CAS), Beijing 100101, China*
4. *Meteorological Observatory, Shandong Sur-bureau of ATMB, Jñan 250107, China*

2018-04-04 收稿,2018-07-21 改回.

韩熠哲,马伟强,马耀明,孙翠艳. 2018. 南亚夏季风爆发前后青藏高原地表热通量的长期变化特征分析. 气象学报, 76(6): 920-929

Han Yizhe, Ma Weiqiang, Ma Yaoming, Sun Cuiyan. 2018. Long-term variation characteristics of surface heat flux over the Tibetan Plateau before and after the onset of the South Asian summer monsoon. *Acta Meteorologica Sinica*, 76(6):920-929

Abstract As the "Third Pole of the world", the thermal forcing of the Tibetan Plateau is very important for the Asian summer monsoon system; it also has great influences on the atmospheric circulation. In this paper, the European Medium Weather Forecasting Center (ECMWF) ERA Interim monthly mean reanalysis data of surface heat fluxes in the Tibetan Plateau and its surrounding areas is used. The time series of data are for March—October from 1979 to 2016 (data and method). Through the analysis of the above information, the following conclusions are reached. From March to May, the main body of the Tibetan Plateau is occupied by sensible heat flux, which increases rapidly with higher values in the west. The change of latent heat flux is smaller but increases with time. After the onset of the Asian summer monsoon, the sensible heat flux over the Tibetan Plateau decreases and latent heat flux increases rapidly. The distribution of latent heat flux shows higher values in the east and lower values in the west of the Tibetan Plateau. After the Asian summer monsoon is over, the intensities of sensible and latent heat fluxes are close to each other with higher sensible heat flux in the west and lower flux in the east. The surface sensible heat flux of the Tibetan Plateau shows a slightly downward trend, while latent heat shows an increasing trend over the past 38 years. The sensible heat flux in the western part of the Tibetan Plateau shows a weak decreasing trend, whereas the latent heat flux is increasing. In the eastern part of Tibetan Plateau, the sensible heat decreases and the latent heat shows a more obvious upward trend, which is also consistent with the climate change in the Tibetan Plateau. This is the basis for further studies that

* 资助课题:第三次青藏高原大气科学试验——边界层与对流层观测(GYHY201406001)、中国科学院战略性先导科技专项(XDA19070301、XDA20060101)、国家自然科学基金项目(41830650、91637312、91637313、41661144043、91737205)、中国科学院“百人计划”、前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC019)、欧盟第七框架项目“为气候再分析服务的地球观测数据验证”之第三课题。

作者简介:韩熠哲,主要从事青藏高原陆气相互作用和卫星遥感应用研究。E-mail: hanyizhe@itpcas.ac.cn

通信作者:马伟强,主要从事大气边界层过程与卫星遥感应用的研究。E-mail: wqma@itpcas.ac.cn

will use the data from The Third Qinghai-Xizang Plateau Atmospheric Science Experiment to analyze the change of atmospheric heat flux over the Tibetan Plateau and how the surface heating field affects the atmospheric circulation.

Key words Tibetan Plateau, Reanalysis data, Sensible heat flux, Latent heat flux

摘要 青藏高原作为世界第三极,其热力强迫作用不仅对亚洲季风系统的发展和维持十分重要,也会对大气环流场产生深远影响。利用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的ERA-Interim中1979—2016年3—10月青藏高原及其周边地区的地表热通量月平均再分析资料,通过分析得出以下结论:3—5月青藏高原主体由感热占据,感热强度快速上升且呈西高东低的分布态势,潜热强度较小但随时间而增强。季风爆发后的6—8月,青藏高原感热强度减弱,潜热强度迅速增强且呈东高西低的分布特征。季风消退后的9—10月,感热与潜热强度相当,但感热呈现出西高东低的分布特征。过去38年,青藏高原地表感热总体呈现微弱下降趋势,潜热呈较弱上升趋势。青藏高原西部地区感热呈微弱下降趋势,潜热呈上升趋势。东部感热呈较为明显的下降趋势且近年来变化趋势增强,东部潜热通量则呈现较为明显的上升趋势,分析结论与近期全球变暖条件下青藏高原气候变暖变湿这一变化状况一致,通过对青藏高原地表热通量的变化分析为下一步运用第三次青藏高原大气科学试验所获资料分析青藏高原上空大气热源的变化以及地表加热场如何影响大气环流奠定基础。

关键词 青藏高原,再分析资料,感热通量,潜热通量

中图法分类号 P422.4

1 引言

青藏高原作为世界上平均海拔最高的高原,素有“世界屋脊”“世界第三极”之称(Qiu, 2008)。其显著的动力和热力作用不仅直接影响青藏高原地区的环流和气候,同时会对北半球的大气环流系统以及气候格局都产生举足轻重的影响(周秀骥等, 2009)。

叶笃正等(1957)通过对青藏高原热力作用的研究发现青藏高原在夏天为热源。随后,大批学者对青藏高原热力特征及其热力作用的影响进行了研究(Yanai, et al, 1992; 吴国雄等, 2004; 张艳等, 2002; 赵平等, 2001; 马伟强等, 2004, 2005; Ma, et al, 2011)。叶笃正等(1979)发现感热加热在青藏高原地区有重要作用且其热力性质具有明显的季节变化; Yanai等(1992)发现近地层大气的加热作用对青藏高原热力作用的重要性; 仲雷等(2006)发现青藏高原对大气的动力和热力作用主要是通过下垫面与大气的相互作用,并以湍流方式进行物质和能量交换而实现的; 马耀明等(2006)指出,青藏高原的热力、动力作用以及地-气的物质能量交换过程对中国、亚洲乃至全球的气候变化均有着重大影响。通过对青藏高原地表热通量的研究,阳坤等(2010)发现,青藏高原地表感热通量存在着以每10年2%的速率在减弱; Yang等(2014)还发现气候变化和青藏高原风速的下降导致了感热的下降; 吴国雄等(2016)则发现高原主体的感热加热与潜热加热存在

着不同的反馈过程。诸多研究表明,青藏高原地表热源对亚洲季风区的大气环流具有重要影响(段安民等, 2003; Zuo, et al, 2011)。段安民等(2004)发现青藏高原热力作用所造成的经向温度梯度逆转是造成季风爆发的重要因素,故其可被用来预测孟加拉湾季风的爆发; Bao等(2010)研究表明,倘若青藏高原作为大气热源的热力作用被削弱,将会导致亚洲季风强度减弱而造成中国大陆夏季干旱增多。因此,对青藏高原地表感热通量分布及其变化的研究具有重要意义。

季风是盛行风向随季节变化的现象,其中亚洲季风区是全球最显著的季风区。研究表明,青藏高原对大气的加热作用是夏季环流形成和维持以及亚洲季风爆发的重要原因。张艳等(2002)探讨了地面热源的加热作用对于亚洲夏季季风爆发的影响机制; Duan等(2005)采用NCEP/NCAR再分析诊断方法,研究了青藏高原热力强迫影响亚热带亚洲夏季气候模式的机制。结果表明,由于青藏高原是一个巨大的高位热源,导致地表附近出现浅层气旋式环流,并在其上空形成一个较强的反气旋环流。根据大尺度稳定的正压涡度方程,气流在较低层辐合,并在青藏高原的东侧高层辐散。然而,青藏高原的西侧以反转结构为特征,即在较低层发散但在较高层辐合。因此,抽吸过程分别对青藏高原东侧和西侧的大气产生向上和向下的驱动作用。Tamura等(2010)研究了对流加热在亚洲夏季风的季节演变中的重要作用。

以上研究取得了长足的进展,但针对青藏高原地表热通量的长期变化趋势及其影响亚洲夏季风的爆发机制的研究尚显不足。本研究主要关注季风爆发前后青藏高原地表热通量的长期变化特征,以期对日后运用第三次青藏高原大气科学试验所获资料分析地表加热场如何影响季风变化奠定基础。以往的研究主要集中于青藏高原加热场对于亚洲季风的影响,关于季风爆发前、中、后期青藏高原地表热通量的长期变化特征关注较少。同时通过研究季风爆发前、后青藏高原地区地表热通量长期变化特征,不仅有利于预测亚洲季风的爆发及其对中国天气与气候所造成的影响,更有利于预防其所造成的灾害性天气并降低灾害性天气所造成的经济损失,这也与第三次青藏高原大气科学试验的目标一致。

2 资料和方法

由于青藏高原高海拔的特性及复杂的地形导致青藏高原上观测站点稀少且分布不均,故而使得青藏高原热通量观测资料较少,且在时间和空间上均存在很大的局限性,因而许多学者选择再分析资料对青藏高原地区的热力作用进行研究。

大量学者利用几套不同再分析资料进行了对比验证,Yanai 等(1998)曾利用 NCEP/NCAR 的再分析资料对北半球的热源分布进行了研究;蓝光东等(2005)对比了 NCEP2 再分析资料和 ERA 再分析资料所计算的热源;王毅等(2007)则对比分析了 NCEP 和 ERA 再分析资料在青藏高原地区的差异,Annamalai 等(1999)通过对比 ERA 和 NCEP 的再分析资料研究亚洲季风,结果发现在亚洲季风区的非绝热加热方面 ERA 的资料优于 NCEP 资料。这些结果均表明欧洲中期天气预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 资料在青藏高原地区适用性较好且精度较高,更适合计算青藏高原地区的热源状况,故本研究采用了 ERA-Interim 资料中的月平均地表感热通量以及地表潜热通量资料,资料的水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$,时间序列为 1979—2016 年。同时采用了 MK(Mann-Kendall)检验方法对青藏高原地区 1979—2016 年地表热通量的长期变化进行了分析。MK 检验方法为非参数方法,亦称无分布检验,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,更适用于类型变量和顺序变量,计算较简便。

突变作为地球气候系统中的—一个重要现象,可被分为 4 类:均值突变,变率突变,跷跷板突变和转折突变。实际情况则常由两种或两种以上的突变类型复合而成。因 MK 方法对均值突变检验结果相对准确,故选其作为青藏高原地区地表热通量的突变分析方法(符淙斌等,1992)。

3 青藏高原季风前后地表热通量分布

文中主要通过分析青藏高原地表感热和潜热得出青藏高原主体地表热通量分布特征。

3.1 地表感热通量分布

许多研究表明,青藏高原在夏季为强热源,冬季为一弱冷源,其由冷源转变为热源的过程往往发生在每年的 3—5 月,即亚洲季风爆发之前(段安民等,2004;Yanai, et al,2006)。

由 1979—2016 年青藏高原地区地表感热通量 3—10 月的月平均分布(图 1)可以看出,3 月青藏高原主体由感热占据,这是由于春季太阳辐射的增强以及青藏高原地表积雪融化所导致的反照率减小所致,且青藏高原地表风速的增大也会影响青藏高原地表感热的变化。由于青藏高原西部较干旱,植被稀疏,而青藏高原东部植被较茂密,降水量较高,因此青藏高原的感热高值区处于青藏高原西部地区且整体呈现西高东低的分布特征,同时青藏高原东南部有一感热高值区。4 月高原地表感热强度迅速上升且西高东低的分布特征更为明显。青藏高原西部的感热高值区持续扩大且青藏高原北部出现一个新的感热高值区。相反,青藏高原东南部的感热高值区向东南方向收缩。5 月,青藏高原东南部的感热高值区持续向东南方向收缩,青藏高原中部地区感热强度下降,西部感热高值区强度与 4 月相当,但面积持续减小。青藏高原北部感热强度与 4 月相当,但面积呈略微的扩大趋势。

随着南亚季风爆发所带来的暖湿空气和充沛水汽,6 月青藏高原东南部感热高值区消退,青藏高原西部感热高值区面积持续收缩但仍呈现明显的西高东低的分布特征,青藏高原北部的感热高值区维持不变。7 月,受南亚季风影响,青藏高原主体感热强度持续下降,西部地区感热高值区持续收缩,而青藏高原北部感热高值区受季风影响较小,面积与强度维持不变。8 月,受季风影响,青藏高原整体除北部感热高值区外,感热强度均较低,整体维持在 100

W/m² 左右。

随着季风的逐渐消退, 9 月高原西部感热强度逐渐升高, 高原整体又呈现西高东低的分布特征。与季风前相比, 高原地区感热强度整体下降, 北部的感热高值区面积仍维持不变但强度有所下降。10 月, 高原感热呈明显的西高东低的分布态势, 但由于高原地区整体温度的下降, 高原感热的整体强度为 100 W/m² 左右。

综上所述, 青藏高原地表感热在南亚夏季风爆发前的 3—5 月呈现出西高东低的分布特征, 且强度

持续增强并于 5 月达到最大。随着季风的爆发与发展, 地表感热强度迅速减弱, 仅在青藏高原北部存在一个感热的高值区。季风消退后的 9—10 月感热回归到西高东低的分布特征, 但与春季相比其强度大幅度减弱, 仅为 100 W/m² 左右。这也与 Zhao 等 (2000) 利用站点资料所计算的青藏高原地区地表感热通量的分布特征与变化趋势一致, 由此可见, ERA-Interim 再分析资料在青藏高原地区的适用性较为出色。整体来看, 季风前后高原地表感热通量的分布形态与姚檀栋等 (2015) 的结论一致。

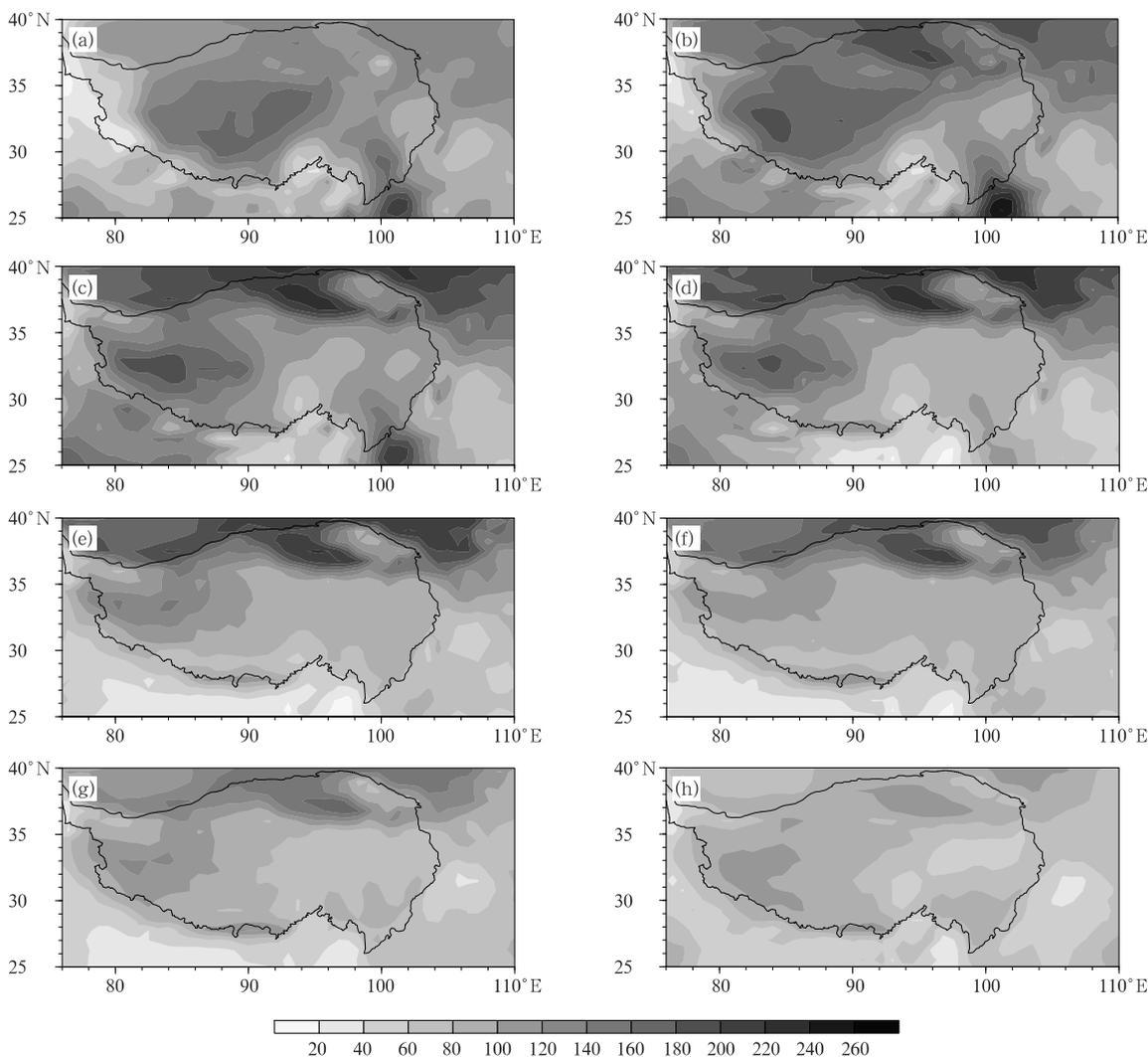


图 1 1979—2016 年青藏高原 3—10 月 (a—h) 平均地表感热通量 (W/m²) 空间分布
 Fig. 1 Distributions of surface sensible heat flux (W/m²) from March to October (a—h) over the Tibetan Plateau during 1979 to 2016

3.2 地表潜热通量分布

青藏高原地表热通量不仅包含感热通量, 潜热

通量也占据了很大一部分。为了更清晰地了解青藏高原 38 年来季风前、后地表热通量的长期变化特

征,需对地表潜热变化进行分析。

由图 1、2 可知,春季青藏高原地区热通量主要以感热为主。3、4 月青藏高原地区地表潜热通量强度较低,整体强度均低于 100 W/m^2 。同时高原东

南部存在一潜热低值区,这与高原东南部感热高值区对应,而高原整体潜热呈东高西低的分布态势。3、4 月青藏高原西部和北部的感热高值区均对应潜热的低值区。

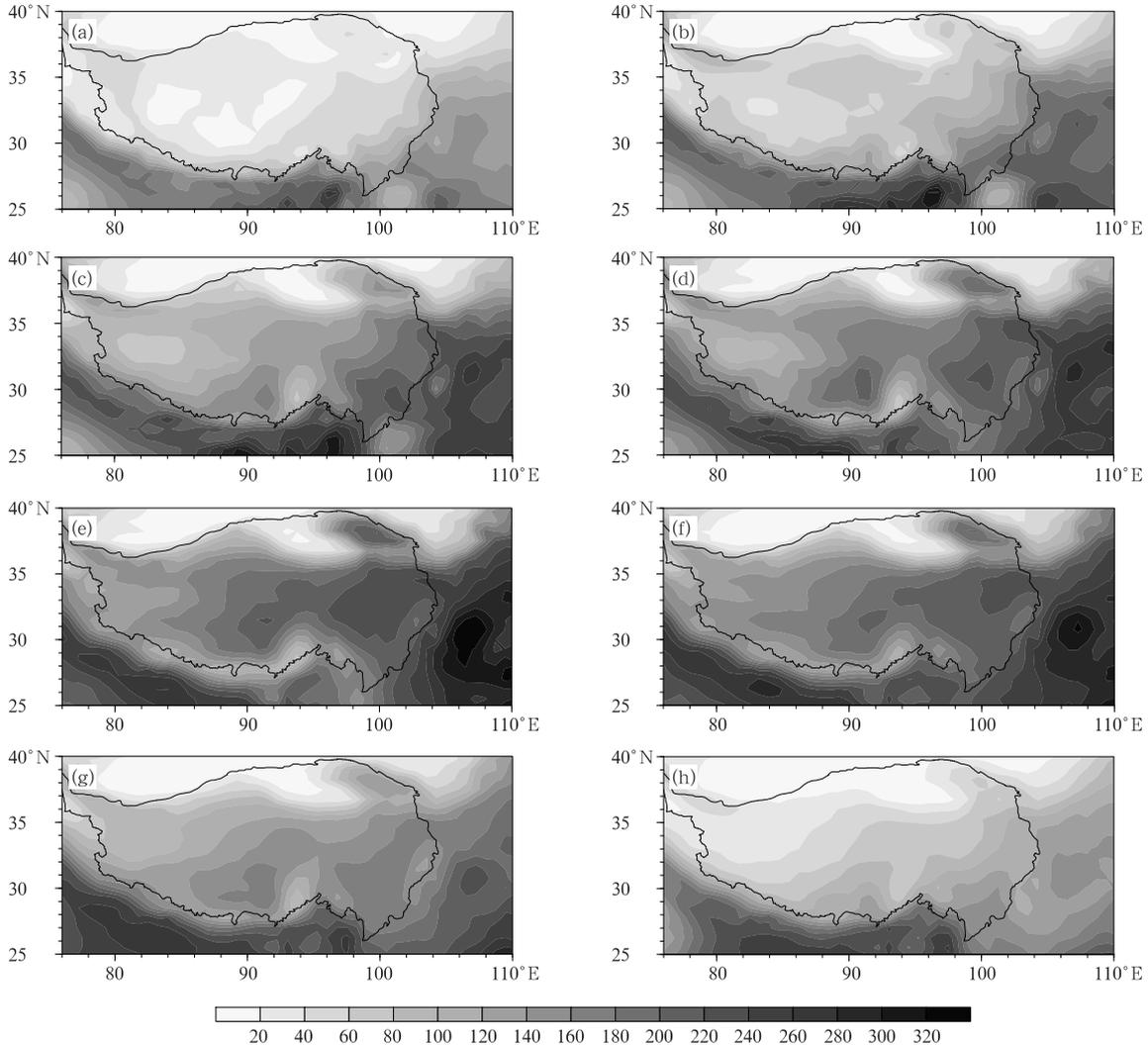


图 2 1979—2016 年青藏高原 3—10 月 (a—h) 平均地表潜热通量 (W/m^2) 空间分布
Fig. 2 Distributions of surface latent heat flux (W/m^2) from March to October (a—h) over the Tibetan Plateau during 1979 to 2016

由于南亚季风的爆发所带来的充沛水汽,5 月青藏高原东部地区潜热强度迅速升高且向西逐步递减,总体呈东高西低的分布态势。与 3、4 月类似,青藏高原西部与北部的感热高值区仍对应着潜热的低值区。随着季风的发展,6 月青藏高原地表潜热的高值区面积由东向西增加且强度持续增强,总体仍呈东高西低的分布特征,同时潜热的低值区与感热高值区相对应。7 月,季风带来的充沛水汽和丰富

降水使得高原地表潜热强度进一步增强,高原的潜热强度自东向西呈逐渐下降的趋势。高原北部存在一潜热低值区与感热高值区相对应。8 月,随着季风的逐渐消散,青藏高原地区地表潜热强度逐渐呈现出下降趋势。潜热虽仍呈现东高西低的分布态势但高值区在逐渐东退。北部仍存在一潜热低值区与感热高值区相对应。

随着季风的消退,9、10 月青藏高原整体的潜热

强度急剧下降, 整体强度均降至 100 W/m^2 左右, 与感热强度相当。同时, 高原地区地面潜热也呈现出向西南方向逐渐消退的倾向, 青藏高原西部地表潜热强度减弱, 但整体而言, 高原地区地表潜热仍然呈现出东高西低的分布特征。

综上所述, 青藏高原地区的地表潜热通量在季风来临前强度偏低且呈现出东高西低的分布态势。同时高原东南部、高原西部及高原北部均存在潜热低值区且与感热的高值区相对应。随着南亚季风的爆发和发展, 青藏高原地表潜热强度迅速增加且呈现出东高西低的分布态势, 同时青藏高原北部仍旧存在一潜热低值区与感热的高值区相对应。随着季风的消退, 青藏高原地表潜热强度骤降至 100 W/m^2 左右, 其强度与感热相当。青藏高原地表潜热整体仍呈现出东高西低的分布态势且潜热低值区与高值区相对应。

通过对青藏高原地区季风前后地表热通量的分析可知, 春季青藏高原地表主要以感热为主, 季风期高原主体以潜热为主, 季风消退后, 高原地表感热与潜热强度相当。

4 青藏高原地表热通量长期变化特征分析

受全球气候变化的影响, 青藏高原地表热通量也会产生变化。为了研究这种变化趋势, 对 1979—2016 年青藏高原地表热通量的变化趋势进行了分析。为了更加明确地分析青藏高原地区地表热通量随时间的变化趋势, 对青藏高原 3—10 月的地表热通量进行平均, 以期得到时间尺度的整体通量变化趋势。

4.1 青藏高原地表热通量变化趋势

通过对青藏高原 3—10 月的地表热通量数据进

行平均, 得到青藏高原过去 38 年地表热通量的变化趋势(图 3)。由图 3 可知, 高原整体的地表感热通量呈较为微弱的下降趋势, 与之相对, 青藏高原的地表潜热通量呈微弱的上升趋势。这也与朱文琴等(2001)发现的青藏高原气候在显著变暖且变暖幅度超过了周围同纬度地区一致。

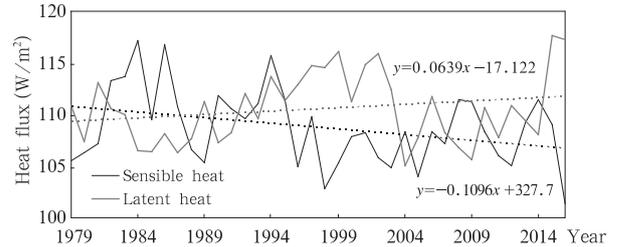


图 3 1979—2016 年青藏高原平均地表热通量变化

Fig. 3 Changes in surface heat fluxes over the Tibetan Plateau from 1979 to 2016

为了更好地了解青藏高原地区地表热通量的年际变化趋势, 对青藏高原地表热通量的年际变化进行了 MK 检验。

MK 检验是一种均值突变检验且结果相对准确, 故选其作为青藏高原地区地表热通量的突变分析方法。图 4 采用 MK 检验方法对青藏高原 38 年地表热通量变化进行了检验。其中黑色实线为 UF 线, 灰色虚线为 UB 线, 纵坐标为显著性水平及其临界值。通过分析统计序列 UF 和 UB 线可以进一步分析序列的变化趋势, 并且可以明确突变的时间以及突变的区域。若 UF 值大于 0, 则表明呈上升趋势, 小于 0 则为下降趋势。当他们超过临界值线时, 则表明上升或下降趋势显著。结果表明, 青藏高原地表感热通量在 1979—1997 年呈现上升趋势, 而

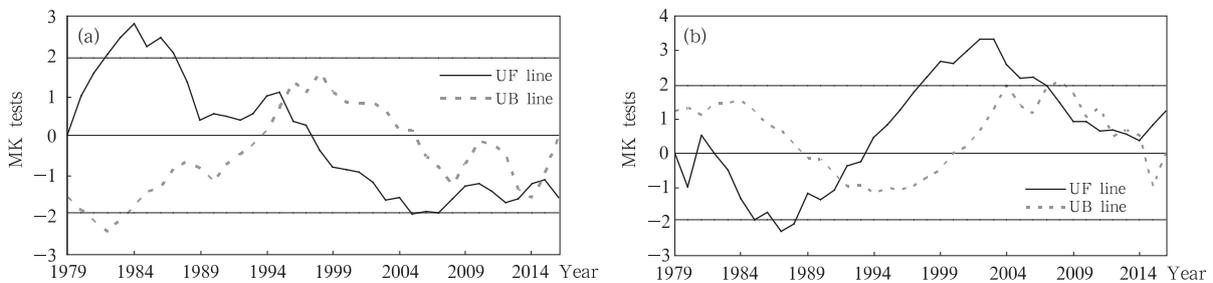


图 4 1979—2016 年青藏高原平均地表感热通量(a)和潜热通量(b)变化 MK 检验

Fig. 4 MK tests of surface sensible heat flux (a) and latent heat flux (b) over the Tibetan Plateau from 1979 to 2016

1997年后则呈现下降趋势。在1982—1987年地表感热超过水平渐近线,说明这些年间地表感热的变化幅度较大。与感热的变化趋势相反,青藏高原地区地表潜热的变化趋势为先下降后上升。UF线于1997—2006年超过了0.05水平显著线,说明这些年份高原地表潜热变化幅度较大。整体来说,青藏高原地区地表感热、潜热通量呈现出相反的变化趋势。

4.2 青藏高原东、西部地表热通量变化趋势

为了更好地分析青藏高原地区地表热通量随时间的变化特征,以 90°E 为界,将高原整体分为东、西

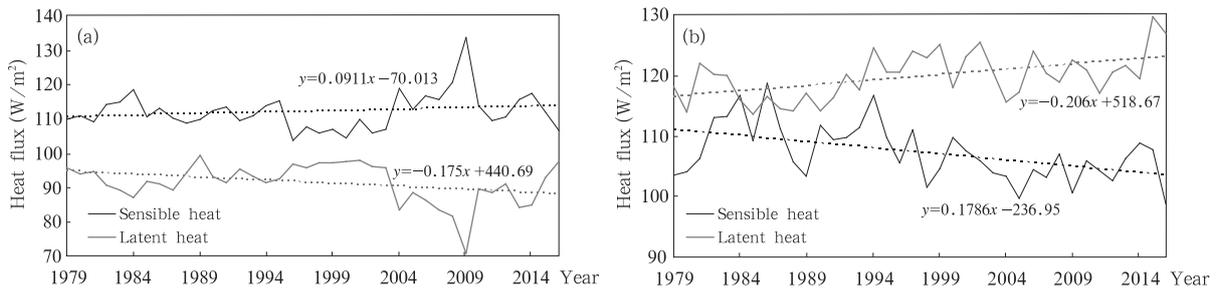


图5 1979—2016年青藏高原西部(a)和东部(b)平均地表热通量变化
Fig. 5 Changes in surface heat fluxes over the western (a) and eastern (b) Tibetan Plateau from 1979 to 2016

通过对青藏高原东、西部的地表热通量进行MK检验(图6,图中各线及纵坐标含义同图4)。可以看出,在西部感热呈先上升后下降最后上升的变化趋势,与之相对,西部地区地表潜热通量呈现先下降再上升最终下降的趋势,两者呈现出一种反向的变化趋势。与之类似,青藏高原东部地区地表感热呈现出先升后降的趋势,且UF线在2005年后超过0.05水平线,这说明2005年后青藏高原地表感热的下降趋势较明显。东部地表感热则呈先下降后上升的趋势,其中UF线在1998年超过了0.05水平线,这说明从1998年起,潜热通量的上升趋势较为明显。

综上所述,青藏高原西部地区地表感热通量在过去38年呈微弱上升趋势,西部潜热通量则呈下降趋势。与西部相比,高原东部地区地表感热呈较明显的下降趋势,而潜热则呈现明显的上升趋势。

5 结论

利用欧洲中期天气预报中心的ERA-Interim

两部分,对其地表热通量的长期变化特征进行分析。

青藏高原地区西部地表感热通量在过去38年呈微弱的上升趋势,与之相对,西部潜热通量呈下降趋势(图5a)。而东部热通量变化情况与西部相反,东部地表感热呈下降趋势,潜热呈上升趋势(图5b)。与西部相比,东部的热通量变化趋势更为明显。这说明青藏高原地区东部变得更为湿润,与青藏高原近年来气候变化趋势相近。而西部则受到气候及地表下垫面等一系列条件的影响,气候朝着热干的方向发展。

中青藏高原及其周边地区1979—2016年3—10月的月平均地表热通量再分析资料,分析探讨了青藏高原地区季风前后地表热通量的变化特征,得到以下的结论:

(1) 季风前的3—5月,高原主体由感热占据且呈西高东低的分布特征且随时间呈下降趋势。与感热相比,潜热强度较低且变化幅度较小但整体呈增强趋势。南亚季风爆发的6—8月,高原西部的感热高值区面积持续收缩且高原整体的感热强度持续下降。与之相对,潜热强度逐渐上升且整体呈较为明显的东高西低的分布态势。季风消退后的9—10月,高原地区地表感热呈现西高东低的特征,但整体强度降低。而潜热也逐渐东退且强度降低,但其整体强度与感热强度相当。这也与Zhao等(2018)利用第三次青藏高原大气科学试验资料所分析的青藏高原地区感热与潜热分布基本一致。

(2) 1979—2016年,青藏高原地区地表感热通量总体呈微弱的下降趋势,而潜热通量则呈微弱的上升趋势。通过对地表热通量进行MK检验可知

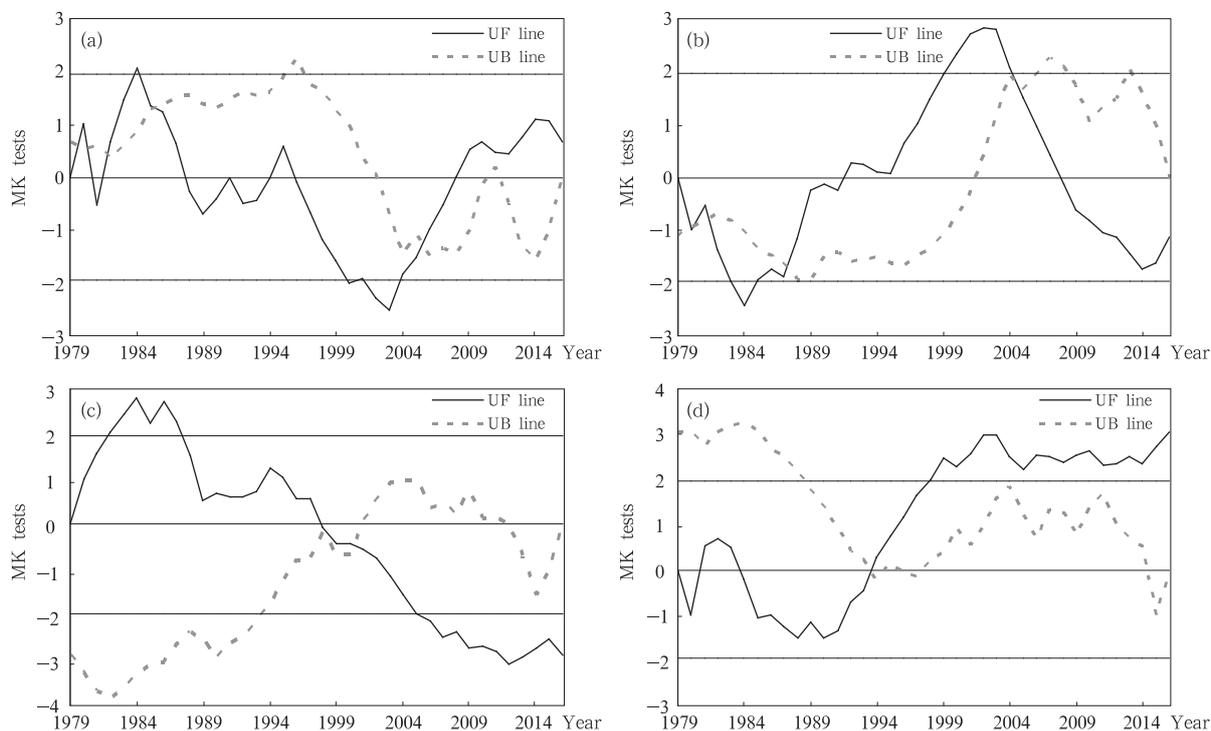


图6 1979—2016年青藏高原地区平均地表热通量变化MK检验

(a. 西部感热, b. 西部潜热, c. 东部感热, d. 东部潜热)

Fig. 6 MK tests of surface heat fluxes over the Tibetan Plateau from 1979 to 2016

(a. sensible heat over the western Tibetan Plateau, b. latent heat over the western Tibetan Plateau, c. sensible heat over the eastern Tibetan Plateau, d. latent heat over the eastern Tibetan Plateau)

青藏高原地表感热通量在过去38年整体呈先上升后下降趋势,与之相对,地表潜热则呈现先下降后上升的趋势,这与青藏高原地区近年来气候变化相符。

(3) 通过对高原东、西部地表热通量分析可知,高原西部地区地表感热微弱上升,而潜热呈下降趋势且与感热相比变化幅度较大。与西部地区相比,高原东部地区地表热通量变化较为明显。东部地区感热呈下降趋势,潜热则有较为明显的上升趋势。这也与近年来青藏高原地区气候变暖变潮湿有关。

(4) 通过对高原东、西部地表热通量进行MK检验,发现西部感热呈现先上升后下降再上升的变化趋势,与之相对,潜热呈先下降后上升再下降的变化趋势。但感热与潜热的UF线整体均未超过0.05水平线,这说明高原西部地表热通量整体变化幅度不大。与西部相比,东部感热通量呈先上升后下降的趋势,潜热呈先下降后上升的趋势。同时东部感热与潜热UF线在近年来均超过0.05水平线,说明近年来青藏高原东部地区地表热通量呈现出较为明显的变化。这说明高原东部地区受气候变化的影响

较为明显,也说明近年来青藏高原东部地区变得更为潮湿,水汽含量更高。

本研究主要关注季风前、后青藏高原地表热通量的长期变化特征,未来会通过研究与对比青藏高原地表与高空热源的时、空分布特征以及变化趋势来研究青藏高原地表加热场与高原上空大气热源的相互作用关系,最终为研究其如何影响亚洲夏季风奠定基础。

参考文献

段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 2003. 4~6月青藏高原热状况与盛夏东亚降水和大气环流的异常. 中国科学(D辑), 33(10): 997-1004. Duan A M, Liu Y M, Wu G X. 2005. Heating status of the Tibetan Plateau from April to June and rainfall and atmospheric circulation anomaly over East Asia in midsummer. Sci China Ser D Earth Sci, 48(2): 250-257

段安民, 毛江玉, 吴国雄. 2004. 孟加拉湾季风爆发可预测性的分析和初步应用. 高原气象, 23(1): 18-25. Duan A M, Mao J Y, Wu G X. 2004. Predictability analysis and preliminary application of the Bay of Bengal summer monsoon onset. Plateau Meteor, 23(1): 18-25 (in Chinese)

- 符宗斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 16(4): 482-493. Fu C B, Wang Q. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change. Scientia Atmos Sinica, 16(4): 482-493 (in Chinese)
- 蓝光东, 温之平, 贺海晏. 2005. ERA 与 NCEP2 大气热源的对比分析以及全球大气热源性质变化规律的研究. 大气科学, 29(1): 154-163. Lan G D, Wen Z P, He H Y. 2005. Comparison of the atmospheric heat sources obtained from ERA and those from NCEP2 and study of the variations in the nature of heating over the global atmosphere. Chinese J Atmos Sci, 29(1): 154-163 (in Chinese)
- 马伟强, 马耀明, 胡泽勇等. 2004. 藏北高原地面辐射收支的初步分析. 高原气象, 23(3): 348-352. Ma W Q, Ma Y M, Hu Z Y, et al. 2004. Analyses on surface radiation budget in northern Tibetan Plateau. Plateau Meteor, 2004, 23(3): 348-352 (in Chinese)
- 马伟强, 马耀明, 李茂善等. 2005. 藏北高原地区地表辐射收支和能量平衡的季节变化. 冰川冻土, 27(5): 673-679. Ma W Q, Ma Y M, Li M S, et al. 2005. Seasonal variation on land surface energy budget and energy balance components in the northern Tibetan Plateau. J Glaciol Geocryol, 27(5): 673-679 (in Chinese)
- 马耀明, 仲雷, 田辉等. 2006. 青藏高原非均匀地表区域能量通量的研究. 遥感学报, 10(4): 542-547. Ma Y M, Zhong L, Tian H, et al. 2006. Study on the regional land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau area. J Remote Sens, 10(4): 542-547 (in Chinese)
- 王毅, 王同美. 2007. 加热率对比及大气加热性质的研究. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 28(3): 47-63. Wang Y, Wang T M. 2007. Comparison of the total heating rate and study of the nature of atmospheric heating. J Graduates Sun Yat-Sen Univ (Nat Sci Med), 28(3): 47-63 (in Chinese)
- 吴国雄, 毛江玉, 段安民等. 2004. 青藏高原影响亚洲夏季气候研究的最新进展. 气象学报, 62(5): 528-540. Wu G X, Mao J Y, Duan A M, et al. 2004. Recent progress in the study on the impacts of Tibetan Plateau on Asian summer climate. Acta Meteor Sinica, 62(5): 528-540 (in Chinese)
- 吴国雄, 卓海峰, 王子谦等. 2016. 夏季亚洲大地形双加热及近对流层顶位涡强迫的激发(I): 青藏高原主体加热. 中国科学: 地球科学, 46(9): 1209-1222. Wu G X, Zhuo H F, Wang Z Q, et al. 2016. Two types of summertime heating over the Asian large-scale orography and excitation of potential-vorticity forcing I. Over Tibetan Plateau. Sci China Earth Sci, 59(10): 1996-2008
- 阳坤, 郭晓峰, 武炳义. 2010. 青藏高原地表感热通量的近期变化趋势. 中国科学: 地球科学, 40(7): 923-932. Yang K, Guo X F, Wu B Y. 2011. Recent trends in surface sensible heat flux on the Tibetan Plateau. Sci China Earth Sci, 54(1): 19-28
- 姚檀栋, 冯仁国, 陈德亮等. 2015. 青藏高原环境变化科学评估. 北京: 中国科学院. Yao T D, Feng R G, Chen D L, et al. 2015. Scientific assessment of environmental changes in the Tibetan Plateau. Beijing: Chinese Academy of Sciences (in Chinese)
- 叶笃正, 罗四维, 朱抱真. 1957. 青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡. 气象学报, 28(2): 108-121. Ye D Z, Luo S W, Zhu B Z. 1957. The wind structure and heat balance in the lower troposphere over Tibetan Plateau and its surrounding. Acta Meteor Sinica, 28(2): 108-121 (in Chinese)
- 叶笃正, 杨广基, 王兴东. 1979. 东亚和太平洋上空平均垂直环流:(一)夏季. 大气科学, 3(1): 1-11. Ye D Z, Yang G J, Wang D X. 1979. The average vertical circulations over the East-Asia and the Pacific Area, (I) In summer. Chinese J Atmos Sci, 3(1): 1-11 (in Chinese)
- 张艳, 钱永甫. 2002. 青藏高原地面热源对亚洲季风爆发的热力影响. 南京气象学院学报, 25(3): 298-306. Zhang Y, Qian Y F. 2002. Thermal effect of surface heat source over the Tibetan Plateau on the onset of Asian summer monsoon. J Nanjing Inst Meteor, 25(3): 298-306 (in Chinese)
- 赵平, 陈隆勋. 2001. 35年来青藏高原大气热源气候特征及其与中国降水的关系. 中国科学(D辑), 31(4): 327-332. Zhao P, Chen L X. 2001. Climatic features of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China. Sci China Ser D Earth Sci, 44(9): 858-864
- 仲雷, 马耀明, 苏中波等. 2006. 珠峰北坡地区近地层大气湍流与地气能量交换特征. 地球科学进展, 21(12): 1293-1303. Zhong L, Ma Y M, Su Z B, et al. 2006. Atmospheric turbulence and land-atmosphere energy transfer characteristics in the surface layer of the northern slope of Mt. Qomolangma area. Adv Earth Sci, 21(12): 1293-1303 (in Chinese)
- 周秀骥, 赵平, 陈军明等. 2009. 青藏高原热力作用对北半球气候影响的研究. 中国科学 D 辑: 地球科学, 39(11): 1473-1486. Zhou X J, Zhao P, Chen J M, et al. 2009. Impacts of thermodynamic processes over the Tibetan Plateau on the northern hemispheric climate. Sci China Ser D Earth Sci, 52(11): 1679-1693
- 朱文琴, 陈隆勋, 周自江. 2001. 现代青藏高原气候变化的几个特征. 中国科学(D辑), 31(S1): 327-334. Zhu W Q, Chen L X, Zhou Z J. 2001. Several characteristics of contemporary climate change in the Tibetan Plateau. Sci China Ser D Earth Sci, 44(S1): 410-420
- Annalai H, Slingo J M, Sperber K R, et al. 1999. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalyses. Mon Wea Rev, 127(6): 1157-1186
- Bao Q, Liu Y M, Shi J C, et al. 2010. Comparisons of soil moisture datasets over the Tibetan Plateau and application to the simulation of Asia summer monsoon onset. Adv Atmos Sci, 27(2): 303-314
- Duan A M, Wu G X. 2005. Role of the Tibetan Plateau thermal forcing in the summer climate patterns over subtropical Asia. Climate Dyn, 24(7-8): 793-807

- Ma Y, Zhong L, Wang B, et al. 2011. Determination of land surface heat fluxes over heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau by using the MODIS and in situ data. *Atmos Chem Phys*, 11(20): 10461-10469
- Qiu J. 2008. China: The third Pole. *Nature*, 454(7203): 393-396
- Tamura T, Koike T. 2010. Role of convective heating in the seasonal evolution of the Asian summer monsoon. *J Geophys Res*, 115(D14): D14103
- Yanai M, Li C F, Song Z S. 1992. Seasonal heating of the Tibetan Plateau and its effects on the evolution of the Asian summer monsoon. *J Meteor Soc Japan*, 70(1): 419-434
- Yanai M, Tomita T. 1998. Seasonal and interannual variability of atmospheric heat sources and moisture sinks as determined from NCEP-NCAR reanalysis. *J Climate*, 11(3): 463-481
- Yanai M, Wu G X. 2006. Effects of the Tibetan Plateau// Wang B. *The Asian Monsoon*. Berlin, Heidelberg: Springer, 513-549
- Yang K, Wu H, Qin J, et al. 2014. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review. *Global Planet Change*, 112: 79-91
- Zhao P, Chen L X. 2000. Study on climatic features of surface turbulent heat exchange coefficients and surface thermal sources over the Qinghai-Xizang Plateau. *Acta Meteor Sinica*, 14(1): 13-29
- Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. 2018. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(4): 757-776
- Zuo Z Y, Zhang R H, Zhao P. 2011. The relation of vegetation over the Tibetan Plateau to rainfall in China during the boreal summer. *Climate Dyn*, 36(5-6): 1207-1219