doi:10.11676/qxxb2019.038

夏季风过渡区的陆-气相互作用:述评与展望*

张　强[1,2]　岳　平[1]　张　良[1]　王　胜[1]　张　杰[3]
赵建华[1]　王润元[1]　阳伏林[1]
ZHANG Qiang[1,2]　YUE Ping[1]　ZHANG Liang[1]　WANG Sheng[1]　ZHANG Jie[3]
ZHAO Jianhua[1]　WANG Runyuan[1]　YANG Fulin[1]

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室,兰州, 730020
2. 甘肃省气象局,兰州, 730020
3. 南京信息工程大学大气科学学院,南京, 210044
1. *Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration (CMA); Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province; Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of CMA, Lanzhou* 730020, *China*
2. *Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou* 730020, *China*
3. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing* 210044, *China*

2018-07-09 收稿,2018-12-18 改回.

张强, 岳平, 张良, 王胜, 张杰, 赵建华, 王润元, 阳伏林. 2019. 夏季风过渡区的陆-气相互作用:述评与展望. 气象学报, 77(4):758-773

Zhang Qiang, Yue Ping, Zhang Liang, Wang Sheng, Zhang Jie, Zhao Jianhua, Wang Runyuan, Yang Fulin. 2019. Land-atmosphere interaction over the summer monsoon transition zone in China: A review and prospects. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4): 758-773

Abstract　The summer monsoon transition zone (SMTZ) is one of the most sensitive areas affected by summer monsoon. Land-atmosphere interaction in the transition zone and its response to summer monsoon is an important scientific issue. In this study, we analyze the formation and basic characteristics of the SMTZ, discuss a few main issues of land-atmosphere interaction process in the SMTZ, and preliminarily propose the responding mechanism of land-atmosphere interaction to variations of summer monsoon. It is stated that the land-atmosphere interaction in the SMTZ contains multi-feedback mechanisms, including the water-heat-ecology coupling process on the surface, multi-interface exchanges from near surface to free atmosphere, and multi-scale interaction of summer monsoon and special hydrological cycle of the land surface. Meanwhile, main progresses, key scientific issues, seven research fields that should be focused on, and basic methods of experiments have been preliminarily proposed. The present study provides a guideline for the study of land-atmosphere interaction and its response to summer monsoon in the future.

Key words　Summer monsoon transition zones, Land-atmosphere interaction, Multi-scale responding mechanism, Multi-interface exchange, Water-heat-ecology coupling process

摘　要　夏季风过渡区是受夏季风影响最敏感的区域之一,其陆-气相互作用对夏季风气候动力学过程响应明显,该区域的陆-气相互作用及其对夏季风活动的响应是一个值得关注的重要科学问题。分析了中国夏季风过渡区的形成及其基本特征,讨论了夏季风过渡区陆-气相互作用过程研究的主要关注点,初步推测了该地区陆-气相互作用对夏季风变化的响应机制。指

* 资助课题:国家自然科学基金重点项目(41630426)、国家重点基础研究发展计划(2013CB430206)。
作者简介:张强,主要从事大气边界层、陆面过程、干旱气候与环境等研究。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

出该地区陆-气相互作用研究包含了多重互馈机制、陆面水-热-生过程耦合、近地层到自由大气的多界面交换、季风多尺度作用和特殊的陆面水分循环等一系列重要科学问题。同时,总结归纳了该领域的主要研究进展和关键科学问题,提出了未来应该重点研究的7个方面,并初步给出了研究试验的基本思路。为未来系统深入研究夏季风过渡区陆-气相互作用及其对夏季风活动响应问题提供了科学指导。

关键词　夏季风过渡区,陆-气相互作用,多尺度响应机制,多界面交换过程,水-热-生耦合

中图法分类号　P462.4

1　引　言

从气候系统各圈层相互作用的视角寻求气候变化和气象灾害问题研究的突破已成当前国际前沿的新动向(Tuttle, et al, 2016; Seneviratne, et al, 2006;黄荣辉等,2013;李建平等,2013)。陆-气相互作用作为气候系统各圈层相互作用的关键环节对气候变化和气象灾害问题研究显得尤为重要。具体而言,陆-气相互作用包含了陆面过程、大气边界层过程、大气边界层与自由大气作用及其对气候变化和天气、气候事件的响应和影响等重要内容,能够反映气候系统内动量、能量和物质从陆地表面到自由大气之间的输送和交换特征及其与天气、气候的互馈关系。它不仅是陆面过程和大气边界层响应大气环流调整和气候系统外强迫变化的关键环节,而且也是陆面过程和大气边界层运动影响天气、气候演变的主要途径(黄荣辉,2006;张强等,2000; Ma, et al, 2011)。因此,近年来国际学术界特别强调从陆-气相互作用角度来理解和解释气候变化机理及气象灾害问题(曾庆存等,2003)。

科学观测试验研究作为研究陆-气相互作用的重要手段一直受到国际科学界的高度重视(黄荣辉等,2011; André,1986)。INDOEX试验(Bhat, et al,2003)研究了大气边界层在季风爆发前、后的变化特征和外强迫因素(Mitra,2004)及其对季风降水的响应规律。HAPEX-Sahel试验(Lebel, et al, 1997)则通过观测资料和卫星遥感资料的结合,研究了Sahel地区季节性森林和草地退化对区域蒸发和降水的影响特征。张强等(2008)利用西北干旱区陆-气相互作用试验观测资料,指出夏季西北戈壁荒漠区的地表强通量,在对流运动和湍流运动的作用下,使敦煌荒漠区对流边界层高度可超过4000 m。内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)试验的研究表明,在降水量相差不大情况下,地表类型差异能够导致地表蒸散相差超过30%,进而影响地表水下渗和水平衡关系,导致径流量显著不同,并影响地表向上的通量,从而影响边界层结构特征(吕达仁等,2002a,2002b)。通榆干旱化和有序人类活动观测试验(刘辉志等,2004; 杜群等,2012)研究表明,不同年份地表植被生长状态的差异,对大气碳收支存在显著影响。黄土高原陆面过程观测试验(LOPEX)从陆面过程参数、陆面水分特征和与气候变化关系方面进行了深入探讨(张强等,2008)。应该说,经过40多年中外开展的大量陆-气相互作用野外科学试验研究,对全球和中国典型区域陆-气相互作用特征及其对气候变化的响应特征有了初步的系统认识,也使陆-气相互作用问题逐渐成为全球变化研究的热点领域之一(黄荣辉等,2011)。

科学试验获取的观测资料,还促进了数值模式在陆-气相互作用研究方面的应用。Williams等(2016)的研究表明,在美国大平原南部的季风过渡区,蒸散与大气间的强相互作用过程是导致这一地区灾害性天气频发的重要原因。多模式集合结果分析显示,欧洲中东部气候过渡带是土壤湿度-大气的强耦合区,表现为季节温度的预测主要受陆-气相互作用影响(Seneviratne, et al, 2006)。在非洲撒哈拉地区,土壤湿度对降雨量的贡献甚至超过水汽通量辐合作用(Wei, et al, 2016),且土壤湿度与降水的互馈关系受模式参数和参数化方案影响(Taylor, et al, 2013; Wang, et al, 2008)。东亚地区大尺度地表土地利用/植被覆盖度的改变,通过陆-气相互作用,能够改变地表能量和水分循环特征,引起该区域大气环流异常,从而影响东亚地区春季降水的时、空分布(华文剑等,2013;陈海山等,2015)。Zhang等(2011)的研究发现,当中国黄河流域春季土壤偏湿时,受陆-气相互作用调节影响,中国东部部分区域夏季降水呈偏多态势。Guo等(2006)的研究佐证了土壤湿度-蒸散相互作用是夏季风过渡区陆-气强耦合作用的重要表现。Liu等(2016)的分析显示,

在中国中东部地区,土壤质地不仅直接影响土壤水分流失速度,还进一步影响叶面积指数和蒸散速率,进而影响陆面与大气的能量分配与交换过程。史一丛等(2015)通过模式敏感性试验发现,初始陆地的土壤湿度能够通过改变地面净长波辐射和感热通量来调节对大气的加热程度,进而影响暴雨和高温热浪等极端天气现象的发生(陈海山等,2013)。可以看出,上述研究成果已充分显示出陆-气相互作用对灾害天气发生与气候变化的影响和作用。然而,对于中国夏季风过渡区这一陆-气强耦合区的研究(Seneviratne, et al, 2010),尽管已有所涉及(Guo, et al, 2006),但尚不充分。

由于地球表面海、陆分布的宏观地理格局,使得季风系统在全球大气环流系统中扮演着重要角色,成为全球大气能量和水汽输送的主要动力机制。季风系统活动不仅直接影响着全球大气环流模态和天气、气候格局(汤绪等,2007),而且对陆-气相互作用也有十分重要的影响,特别是夏季风的强弱变化、空间上的进退及其年循环、年际波动和年代际变化与陆面物理特性和辐射收支特征的时空变异密切相关(Webster, et al,1992),并从多个方面对陆-气相互作用产生影响(汤绪等,2007)。这一陆-气相互作用在夏季风过渡区表现得尤为明显。有研究表明,受陆-气相互作用影响,夏季风过渡区变暖速率明显高于其他气候类型区域(Huang, et al, 2012,2017a),是干旱区迅速扩张的主要原因之一(Huang, et al, 2016a),也是导致该区域干旱频次增加的重要因素(Huang, et al, 2016b, 2017b; Cheng, et al, 2017),在中国表现为夏季风过渡区的暖干化趋势。

中国是全球夏季风影响的严重地区,其夏季风边缘摆动带即夏季风过渡区是对夏季风进退过程和强弱变化反应尤为敏感的地区。因此,夏季风过渡区也是中国植被时、空变化最显著的生态脆弱带,表现为该地区陆面特性的时、空变异十分明显。不仅如此,这一区域还是对气候变化响应的敏感区。随着全球变暖的不断加强,气候系统的变化也在加剧,对于中国气候过渡带而言,较其他区域的影响更为显著,并通过改变区域水分和能量平衡过程进而影响区域生态环境。正是由于这种对夏季风活动显著的响应特征,致使该区域气候变暖幅度比其他区域更显著(约大一倍)(Huang, et al,2012)。也使得该区域更容易发生干旱,发生频率为中国最高,而且还呈现随气候变暖不断增大的趋势(马柱国等,2006),这种气候学效应会使得该地区天气、气候事件的表现特征和气候变化的影响机制更为复杂。由此可见,夏季风过渡区陆-气相互作用过程如何响应夏季风的变化是一个比较重要的科学问题。

鉴于此,文中尝试专门讨论夏季风过渡区陆-气相互作用及其对夏季风活动的响应问题,系统了解季风影响过渡区陆-气相互作用及其对夏季风活动响应研究方面的研究进展,深入认识该领域存在的主要科学问题,寻求在该领域突破的思路和主要研究重点。这不仅有利于深化对干旱等极端天气、气候事件形成机理和气候变化成因的认识,而且有助于干旱监测技术改进和区域气候数值模拟能力的提升。

2 中国夏季风过渡区的形成及其重要性

中国是全球夏季风最活跃的区域之一,由于东面和南面均邻近大海,同时受来自太平洋的东南夏季风即东亚季风和来自印度洋的西南夏季风即南亚季风的影响(黄荣辉等,2011),受夏季风影响区域广泛。夏季风的年循环、年际振荡、年代际变化和趋势性突变不仅对中国降水的年、年际、年代际及其更长期的变化规律具有重要作用,而且对中国气候的空间分布特征具有决定性影响(王会军等,2013;丁一汇等,2013)。因此,夏季风活动造就了中国南湿、北干的基本气候格局及旱涝灾害频发的基本气候特征。此外,中国夏季风还具有显著的突变特征,其中发生在 1965 和 1980 年的两次跃变事件,均使中国北方地区遭遇了十分严重的干旱灾害(杨修群等,2005)。事实上,夏季风每年的进退过程形成了中国旱涝的季节变化特征,而夏季风强度的年际、年代际变化及其趋势性突变过程形成了中国旱涝交替的基本气候规律及造成一些重、特大旱涝事件的发生(Fu, 1992;郭其蕴等,2004)。

一般而言,中国夏季风约在 5 月中旬爆发并向西北方向推进,10 月上、中旬向东南撤退而结束,每年活动约 5 个月。其影响程度一般从东南向西北逐渐减弱,最终过渡到西风带影响区。由夏季风影响区向西风带影响区的过渡带就是夏季风活动的边缘线,该边缘线位置的变化很大程度上决定着中国气候旱涝分型。以往,由于对夏季风边缘线的定义不同,确定出的夏季风影响边缘线也有一定程度的差

异。胡豪然等(2007)在综合以往各种定义的基础上,给出了一个用降水(候平均降水≥20 mm)、风场(西南风)和假相当位温场(850 hPa 假相当位温≥335 K)等多要素综合辨别夏季风北边缘线的定义,能够较客观地反映夏季风推进的过程。用该定义给出的近 44 a 中国夏季风边缘的分布特征表明(汤绪等,2009),中国夏季风北边缘线从青藏高原东侧北上经西北地区东部→华北地区北部→东北地区西部→延伸到东北亚地区(图 1),总体呈西南—东北走向,斜穿中国大陆腹地。

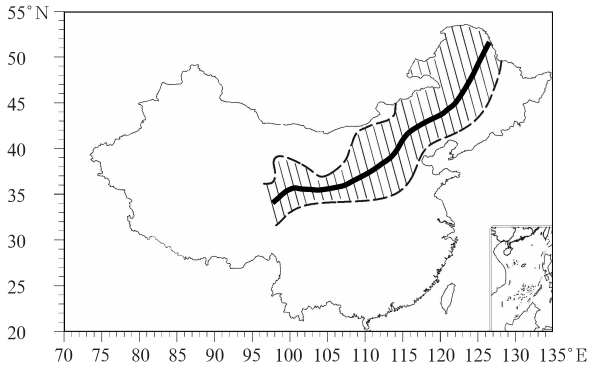


图 1　中国夏季风过渡区空间分布(曾剑等, 2016)
(黑色实线为夏季风过渡区多年平均位置)

Fig. 1　Spatial distribution of the summer monsoon transition zone (SMTZ) in China (Zeng, et al, 2016)
(the black solid line represents the averaged location of SMTZ)

不过,中国夏季风北边缘线并不是一条固定不变的线,一般会表现出明显的年际和年代际摆动甚至趋势性的突变型跳跃(张红丽等,2016),其年际摆动幅度能够达到 11 个纬度,摆动范围在 33°—44°N。即使年代际摆动幅度,也能够达到 1.5 个纬度。相对于夏季风北边缘线的南北摆动,东西向移动的年际、年代际变幅小(李栋梁等,2013),而且年代际变化主要出现在东北地区(富元海等,2007)。文中将夏季风北边缘线的摆动范围称为夏季风边缘线摆动带即"夏季风过渡区",该区域既是夏季风影响的活动边界区(汤绪等,2007),也是夏季风与西风带系统的耦合区,很多时候也是冷、暖空气的交汇区。夏季风降水对这一交汇区内年降水总量具有决定性的贡献,是受夏季风活动影响最敏感、最凸出的区域(汤绪等,2009),也是气候变化响应的重要敏感区,其重要性表现为:

第一,夏季风过渡区是气候与生态的过渡带。由于受特殊的大气环流背景和地理、地貌环境影响,中国夏季风过渡区不仅是由东南湿润区向内陆干旱区的气候过渡带,也是由东南阔叶落叶林区向西北荒漠草原区的生态过渡带。该地区年平均降水量一般为 300—500 mm,处于生态维持和农作物生长的气候临界态附近(Zhang, et al, 2009),这不仅使生态和农业生产系统对夏季风降水变化的依赖性很强,而且也使地表植被等陆面特性对夏季风降水变化十分敏感(张强等,2017)。同时,该地区降水的气候波动性很大(Wang, et al, 2011),陆面特性变异性很显著,陆-气相互作用过程受季风气候动力学影响十分明显、受季风降水的调控也更加突出(Yue, et al, 2015)。

第二,夏季风过渡区是气候变化背景下的显著变暖区。夏季风过渡区的半干旱气候属性和植被与农业生产系统对夏季风降水变化敏感性强的特点(Zhang, et al, 2012a, 2012b),使该区域成为严重依赖于夏季风降水的雨养生态区。同时,降水年际波动性大的特点,使该区域土地利用的更替幅度也大,通过陆-气相互作用(Huang, et al, 2012),并与城市化进程和人类活动作用叠加,成为气候变化背景下的显著变暖区。Huang 等(2012)通过对基于观测的英国东英格利亚大学气候研究所(CRU)百余年温度资料分析显示,在全球范围内,半干旱区的变暖速率明显高于湿润区和干旱区(图 2)。其累计升温幅度高达 1.53℃,显著高于 1.13℃的全球平均水平。而在位于中国的东亚夏季风过渡区,其升温幅度、尤其是冬季升温幅度更大,达 2.42℃,超过欧洲和美国冬季升温的 1.41 和 1.50℃。并且进一步的分析表明,在东亚季风区,夏季风过渡区对该地区的变暖贡献占比为 13.81%。

第三,夏季风过渡区是蒸散对气候变化响应的转折带。从对中国地表蒸散量的分析可以发现(Zhang, et al, 2018),蒸散对气温升高的响应程度与降水气候类型关系密切,地表蒸散量的倾向率呈现出随降水气候类型变化的显著转换特征(图 3)。降水量在 200—400 mm 的气候区是倾向率发生转折的气候敏感区;与位于气候过渡带的半干旱区不同,在更湿润的气候区,气候越湿润,地表蒸散量随气温升高增加就越明显;而在更干燥气候类型区,气候干燥,地表蒸散量反而随气温升高减少。从地表

蒸散量对气候变暖的响应机制来看,气温升高引起的潜在蒸散力增加的过程在湿润地区起主导作用,而气温升高通过蒸散过程造成土壤水分加速流失后又反过来抑制蒸散的这一过程,在干燥地区起主导作用,导致蒸散减弱。

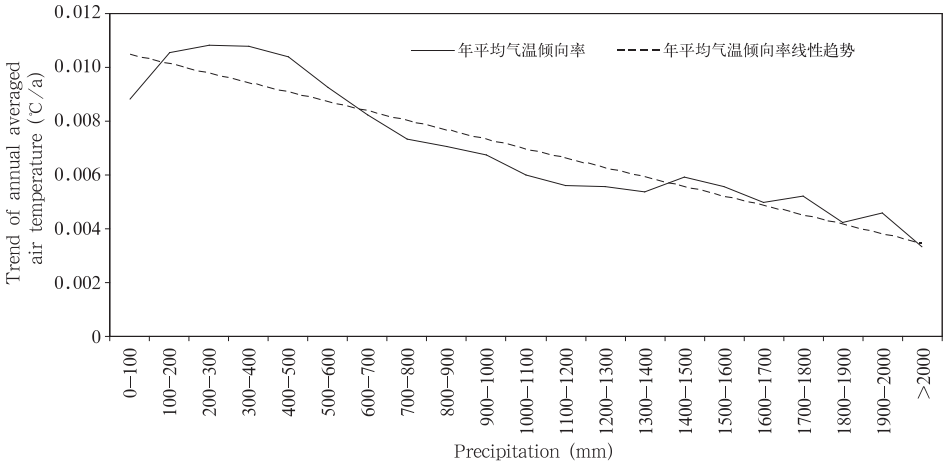


图 2 各降水气候类型区与气温倾向率的关系(Huang, et al, 2012)

Fig. 2 Linear trend of annually and regionally averaged land surface temperature as a function of climatologically mean precipitation (Huang, et al, 2012)

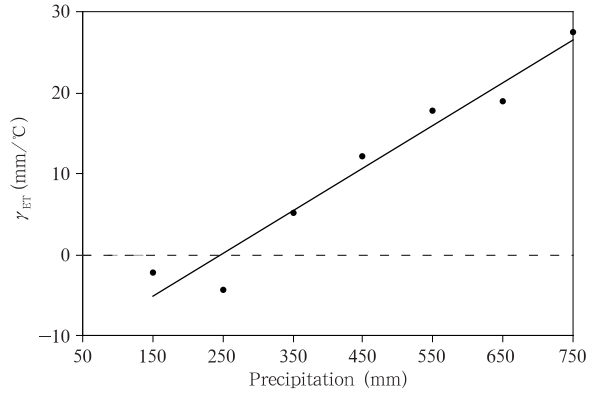


图 3 年平均地表蒸散量的变暖倾向率(γ_{ET})随降水气候类型的变化(Zhang, et al, 2018)

Fig. 3 Variation of warming tendency of ET (γ_{ET}) with different precipitation-based climate types (Zhang, et al, 2018)

第四,夏季风过渡区是干旱灾害频发区。自 20 世纪 50 年代以来,在图 1 所示的 100°E 以东的夏季风过渡区,降水明显减少,而温度显著升高,表现出明显的干旱化趋势(马柱国等,2006;Huang, et al, 2016b)。在这种干旱化趋势背景下,进一步分析发现,过渡区干旱与极端干旱发生次数均呈增加趋势(马柱国等,2006;张红丽,2018),尤其是 90 年代以后,干旱发生次数较之前增加一倍以上,其中极端干旱发生次数增加更为显著。不仅如此,研究还显示,在干旱化趋势背景与干旱事件发生频次增加的双重影响下,中国夏季风过渡区边缘的部分半湿润区转为半干旱区,部分半干旱区转为干旱区。

第五,夏季风过渡区多年平均位置与“胡焕庸线”基本吻合。将中国著名的人口分界线——“胡焕庸线”(图 4)与图 1 对比发现,“胡焕庸线”与中国夏季风过渡区的多年平均位置基本重合。该线是中国人口发展水平和格局的分界线,“胡焕庸线”以东分布着中国 96%的人口,以西分布着 4%的人口。与 1935 年(胡焕庸,1935)相比,经过半个多世纪的发展,夏季风过渡区西部也只增加了 2 个百分点的中国人口——增至 6%,而东部仍居住着中国约 94%的人口(唐博,2011)。从未来气候情景下的人口分布预测来看,至 2040—2060 年,气候变化引起的生产潜力改变会使“胡焕庸线”以西地区人口占比增加约 1 个百分点,并没有从根本上改变“胡焕庸线”划分的中国人口分布格局(王铮等,2016)。因此,中国东、西部人口发展的不协调、不均衡特征仍将长期存在。可见,夏季风过渡区不仅是中国气候的过渡带,还对中国人口分布和区域发展程度具有重要影响。对这一区域陆-气相互作用进行研究,不仅会增进对

夏季风过程这一科学问题的认识,还会促进从自然和生态角度对中国区域发展不均衡这一重大社会问题的认知。

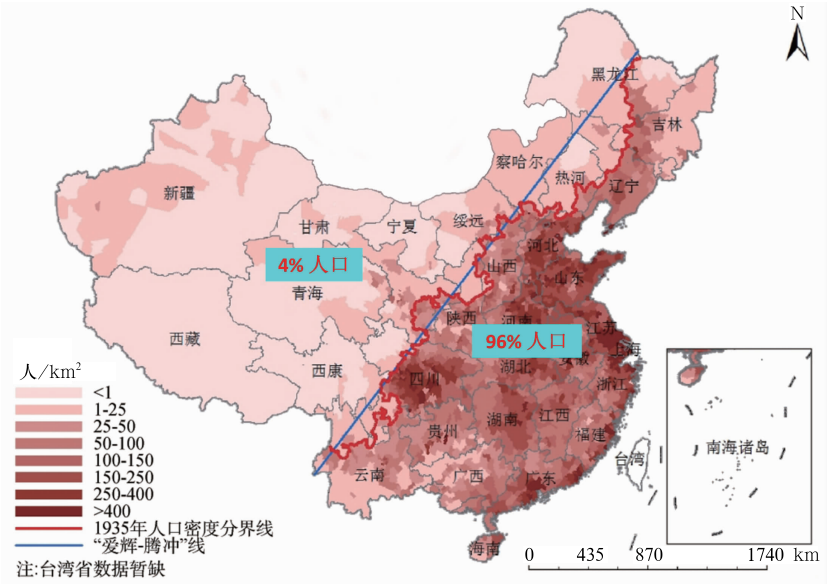


图 4　1935 年中国人口密度分界线

(原绘-胡焕庸,1935;重绘-胡璐璐等,2015)

Fig. 4　Population density boundary in China in 1935

(the original figure was produced by Hu Huanyong in 1935 and replotted by Hu Lulu et al. in 2015)

3　夏季风过渡区陆-气相互作用的几个典型特征

夏季风过渡区对气候变化敏感性强这一特点,引起科学家们越来越多的关注,并且通过研究,已获得了陆-气相互作用的一些基本特征。主要表现在以下几个方面。

3.1　由深厚边界层向常态边界层的过渡特征

夏季风过渡区降水空间变率大的特征会使其陆面特性空间差异明显,表现为陆面过程主要物理量和大气边界层特征空间变化幅度大,如土壤温度、湿度和地表热通量场等陆面过程物理量、边界层厚度和交换系数等大气边界层特征量的水平空间梯度均会很大(李岩瑛等,2012;Huang, et al, 2009)。通过"中国干旱/半干旱区实验观测协同与集成研究"对位于过渡区内的通量资料的初步分析,发现该地区陆-气相互作用过程有一些值得关注的凸出特点。比如,在该区域内,夏季陆面感热通量日峰值可由非夏季风区的 230 W/m^2 左右强感热输送快速降至季风过渡区的 150 W/m^2 和夏季风区 110 W/m^2 左右的弱感热输送(曾剑等,2012),对流大气边界层厚度日峰值更是可由干旱区 4000 m 左右深厚对流大气边界层陡降至季风区 500 m 左右的浅对流大气边界层(图 5)(Zhang, et al,2011)。类似地,稳定边界层和残余层同样呈现这一显著变化特征。从理论上讲,这种独特的陆面过程和边界层空间分布特征极其容易激发图 6 所示的非典型中尺度环流(Segal, et al,1992)或局地大气环流,而且可能还会影响到大气边界层相关结构的形成。这种作用不仅会对陆面能量交换及大气边界层动量、能量和物质传输产生重要贡献,而且还会深刻影响大气边界层与自由大气的相互交换过程,并由此进一步影响到区域干旱、沙尘暴、局地暴雨和冰雹等灾害性天气、气候事件的形成和发展。事实上,有研究(Huang, et al, 2009;Goutorbe, et al,1997)已表明,一些中小尺度天气系统就是陆地表面空间不均匀加热作用和边界层相关结构所诱发的结果,而且这种中、小尺度系统会对区域降水产生明显影响。

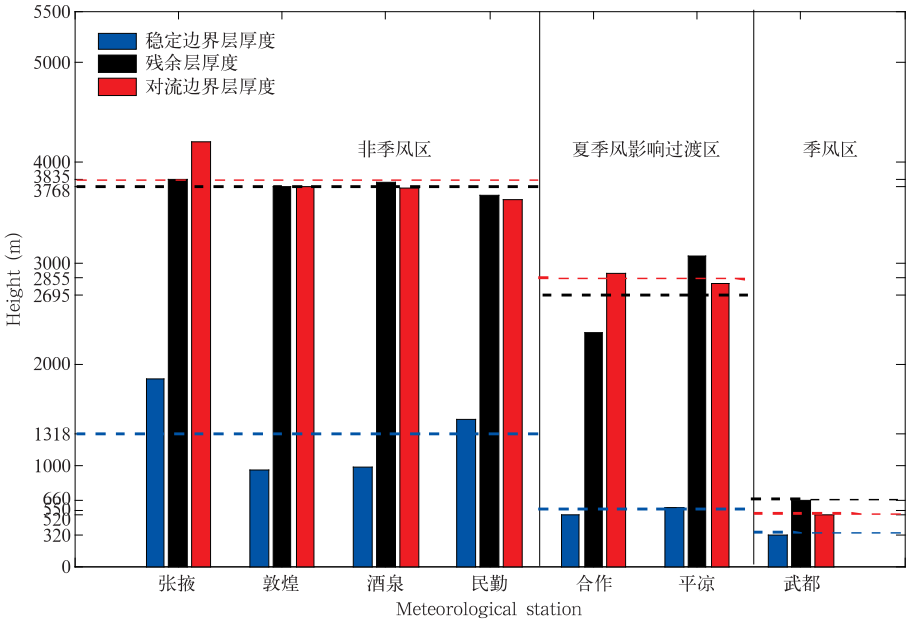


图 5 夏季风过渡区、非夏季风区和夏季风区边界层厚度比较

Fig. 5 Comparison of boundary layer depths between the summer monsoon transition zone, non-summer monsoon zone and summer monsoon zone

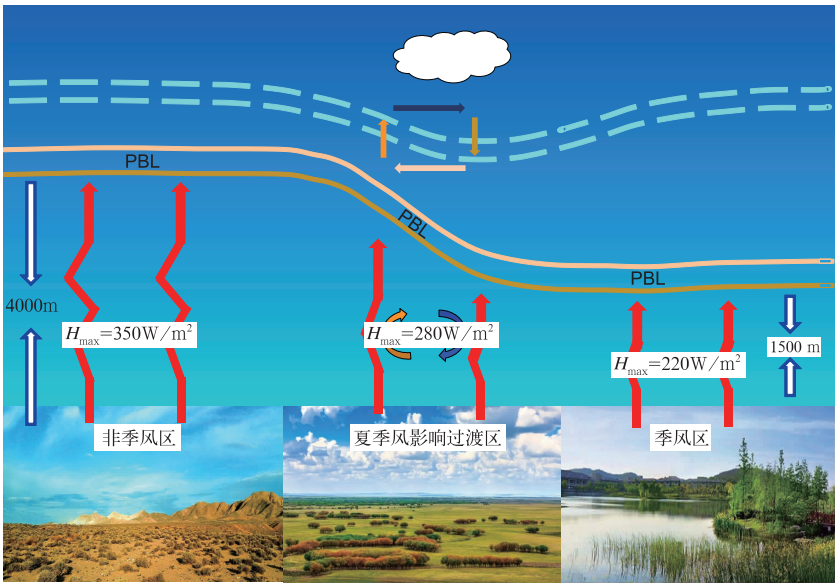


图 6 季风影响过渡区陆面过程和对流大气边界层空间变化对局地大气环流的作用机制示意

(PBL 为大气边界层;H_{max}为最大感热通量)

Fig. 6 A schematic of mechanism on land surface process and impacts of spatial variation of convective boundary layer on local atmospheric circulation over the summer monsoon transition zone

(PBL represents the planetary boundary layer; H_{max} is the maximum sensible heat flux)

3.2 地表能量通量的显著时空变化

夏季风过渡区还表现出显著的地表能量时、空变化特征(图 7)。与过渡区外感热通量变化平缓相比,在较为狭窄的过渡区内,感热通量等值线分布更

为密集,量值变化更快,由东南部的 35 W/m^2 迅速增大至西北部的 50 W/m^2 左右,在过渡区西北边缘地带甚至可以达到 65 W/m^2,是感热通量的梯度变化高值区(图 7a)。与感热通量分布类似,潜热通量在过渡区内同样表现出显著的变化特征(图 7b)。总体来看,潜热通量由夏季风区向过渡区变化时,其量值由东南向西北递减,但是过渡区内的潜热通量空间变化梯度明显增大,由东南部的 40—45 W/m^2 迅速减少至西北边缘的 20 W/m^2 左右,甚至低至 15 W/m^2。与感热通量和潜热通量不同的是,净辐射通量在过渡区内并未表现出明显的梯度变化特征(图 7c),这种差异与夏季风过渡区内陆面的水热特性和海拔高度的空间不均匀性有关(曾剑等,2016)。

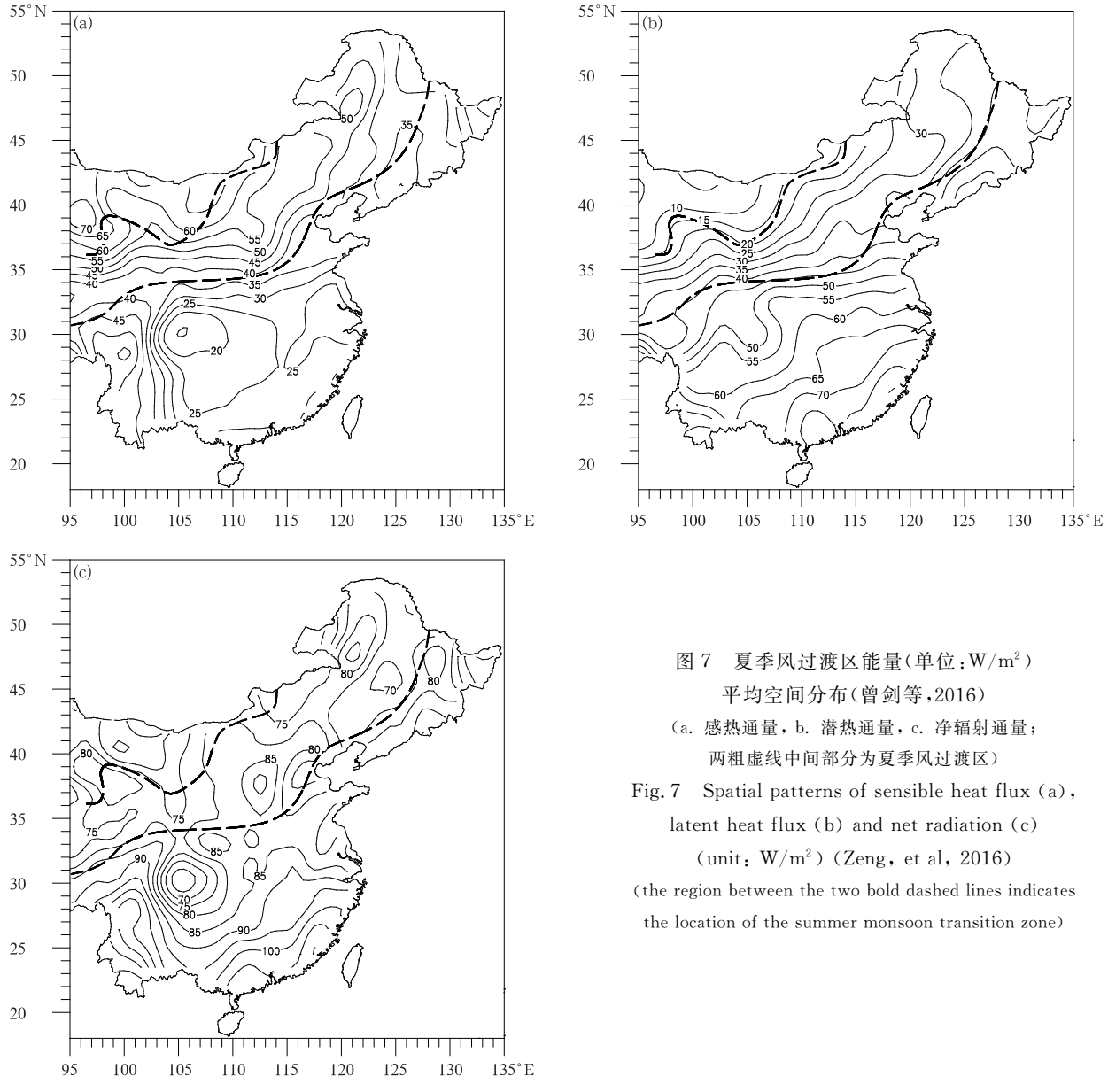


图 7　夏季风过渡区能量(单位:W/m^2)平均空间分布(曾剑等,2016)
(a. 感热通量, b. 潜热通量, c. 净辐射通量;两粗虚线中间部分为夏季风过渡区)
Fig. 7　Spatial patterns of sensible heat flux (a), latent heat flux (b) and net radiation (c) (unit: W/m^2) (Zeng, et al, 2016)
(the region between the two bold dashed lines indicates the location of the summer monsoon transition zone)

3.3　陆-气强耦合

季风过渡区地表蒸散与土壤含水量的线性相关关系(图 8),使这一区域成为陆-气相互作用的强耦合区。在基本呈半干旱区的季风过渡区,土壤含水量与蒸散表现为从干旱区向湿润区陡然增大的关系,且蒸散由土壤含水量控制。而过渡区又是干旱区向湿润区的过渡带,土壤湿度受降水波动影响大,波动幅度也大。地表散失水分的多少影响和调节着

地表通量分配比例。而季风过渡区的地表能量振幅大的特性,使大气状态受其影响显著,表现为陆-气强耦合特征。Koster 等(2004)对全球应用广泛的12个耦合模式结果的分析显示,中国季风过渡区、北美大平原中部、撒哈拉地区、赤道非洲都表现出这一特征。尽管已有的观测结果并非针对观测陆-气耦合而设计,但是已有初步结果显示出过渡区的陆-气强耦合作用。不仅如此,这一陆-气强耦合作用还能够通过土壤湿度-温度相互作用显著影响近地面的气候变化,尤其是极端高温与热浪的发生频率(Zhang, et al, 2009; Jaeger, et al, 2011)。

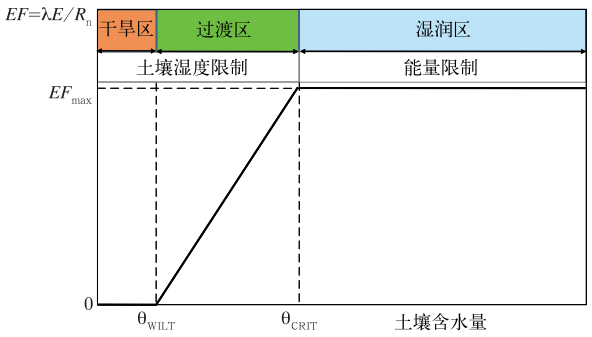


图8 不同气候区蒸散比与土壤湿度的关系(Seneviratne, et al, 2010)

(θ_{WILT}为萎蔫参数,θ_{CRIT}为关键土壤参数,EF_{max}为最大蒸散比,R_n为净辐射)

Fig. 8 Relationship between evaporative fraction and soil moisture in different climate regimes (Seneviratne, et al, 2010)

(θ_{WILT} is the wilting point, θ_{CRIT} is the critical value of soil parameter, EF_{max} is the maximum evaporation fraction and R_n is the net radiation)

3.4 水-热-生密切耦合

由于受特殊的大气环流背景和地理环境影响,中国夏季风过渡区不仅是东南湿润区向内陆干旱区的气候过渡带,也是由东南阔叶落叶林区向西北荒漠草原区的生态过渡带(汤绪等,2009),还是农林草牧交错的生态耦合区(刘维佳,2012)。地表植被的分布类型受降水类型直接影响,而季风过渡区降水梯度大这一特性,形成过渡区多样的下垫面特征。如图9所示(Cho, et al, 2012),下垫面植被种类的多样性,影响和决定着地表的动力和热力因子特性,形成地表空气动力学阻抗(R_a)、气候阻抗(R_i)和冠层阻抗(R_s)的多样性,从而造成地表感热通量和潜热通量分配比例的多样性,影响着近地面气温的空间分布和植被的蒸散特征,并进一步影响土壤的水热特征形成,从而使过渡区形成独特的水文、热力和生态特征(Yue, et al, 2018)。

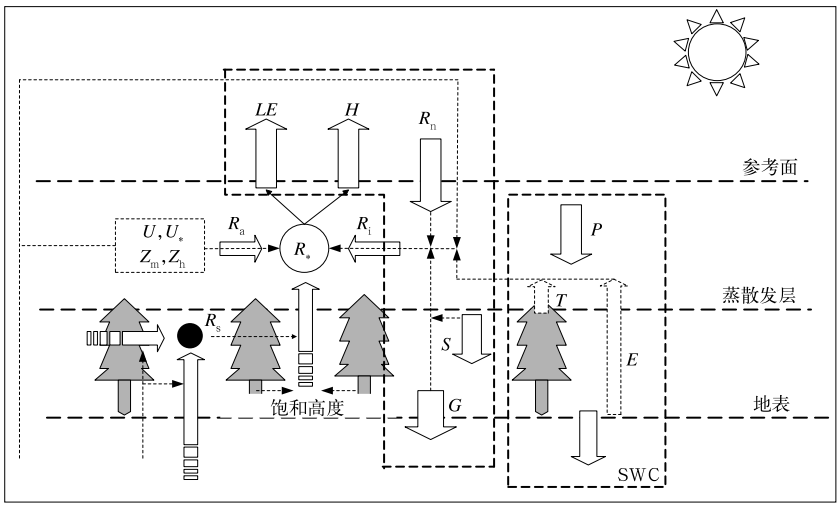


图9 陆面与大气的水分、热量、生态耦合关系

(R_a为地表空气动力学阻抗,R_i为气候阻抗,R_s为冠层阻抗,U为风速,Z_m为动量的粗糙长度,Z_h热通量粗糙度长度,LE为潜热通量,H为感热通量,R_n为净辐射通量,P为降水量,T为冠层蒸散,E为地表蒸发,SWC为土壤水含量,G为土壤热通量)

Fig. 9 Coupling relation between water, heat and ecology of the land surface

(R_a is the aerodynamic resistance, R_i is the climatological resistance, R_s is the bulk surface resistance, U is wind speed, Z_m is the roughness length of momentum, Z_h is the roughness length of heat, LE is latent heat flux, H is sensible heat flux, R_n is the net radiation flux, P is precipitation, T is the canopy evapotranspiration, E is surface evaporation, SWC is soil water content, G is soil heat flux)

4　陆-气相互作用对夏季风变化响应机制的初步科学思考

夏季风过渡区陆-气相互作用最显著的特点之一就是对夏季风变化响应很敏感。一般而言,如图10所示,根据大气动力学和大气物理学的基本原理初步推测出,海-陆热力差异的季节变化及大气环流、海温和高原积雪等因素发生异常会造成夏季风的年循环及其北边缘的年际振荡、年代际摆动和趋势性突变跳跃(徐祥德等,2014;段安民等,2018;李栋梁等,2013)。并且在夏季风年循环及其北边缘线的振荡、摆动或跳跃的驱动下,该区域降水量通常会发生显著变化,地表植被和土壤湿度等陆面特性也会随之发生明显变化,由此会引起该区域地表反照率、粗糙度、土壤热传导率和热容量等陆面过程参数及边界层厚度和边界层输送系数等大气边界层参数发生较大改变(李宏宇等,2012),进而导致陆面物质和能量收支及大气边界层动量、能量和物质传输特征发生较大调整(张强等,2013)。而陆面过程和大气边界层特征的改变又会通过其热力和动力作用影响到非典型中小尺度环流的形成(Segal, et al, 1992)和大气边界层相干结构的特征,也会影响到大气位势高度和散度场的改变,进而反过来影响到季风活动和区域气候(黄荣辉等,2011)。实际上,区域气候模式的模拟研究(Herrmann, et al,2005)已经表明,区域地表植被覆盖/土地利用变化能够改变边界层结构和影响区域中小尺度对流系统的发展特点,在不同季节,通过地表反照率和蒸散等因素影响区域气候分布特征(陈海山等,2015;李婧华等,2013)。可见,在夏季风过渡区不仅陆面过程和大气边界层结构对夏季风年循环、年际波动、年代际变化及其趋势性突变的响应比较明显(Parasnis,1991),而且陆面过程和大气边界层过程的变化可能还会通过陆-气相互作用对区域气候和季风活动产生反馈作用(Lauwaet, et al,2009),从而形成一个不断循环的互馈机制。

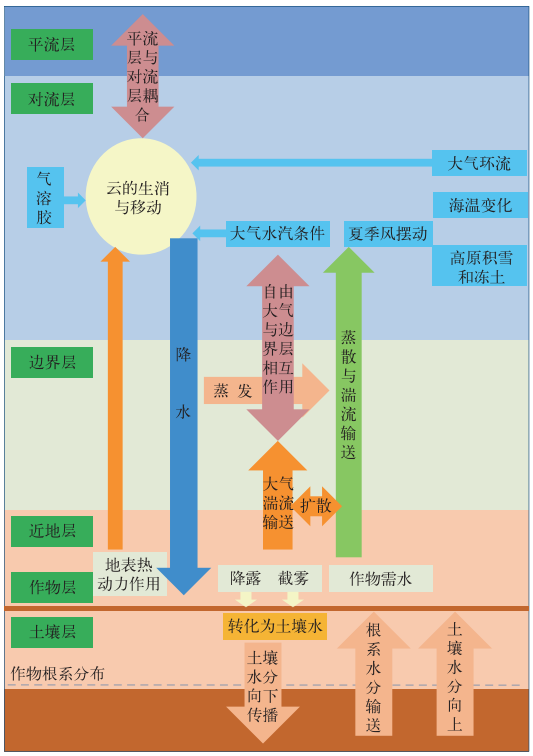


图10　夏季风活动影响过渡区陆-气相互作用

Fig. 10　Map of interaction between the land surface and atmosphere over the summer monsoon transition zone

具体而言(图11),每当夏季风减弱时,夏季风北边缘会南撤,夏季风过渡区的降水会显著减少,土壤湿度会明显降低,地表植被也会明显退化,干旱化和荒漠化趋势比较明显,致使地表反照率增大,地表温度升高,感热交换加强,蒸散量变小(Huang, et al, 2009),进而引起对流大气边界层增厚和边界层

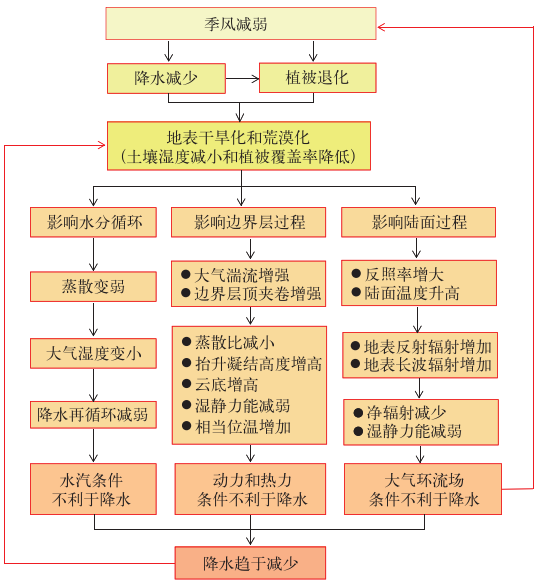


图11　夏季风驱动下区域气候与陆面过程和边界层过程的循环反馈机制

Fig. 11　Mechanisms of feedback loops between regional climate, land surface process and boundary layer forced by summer monsoon

湍流输送增强。由此导致边界层热量输送加强,水分输送减弱,位温升高,而湿静力能降低。同时,地表干旱化和荒漠化还会使地表植被覆盖度和储水能力降低,导致土壤蒸发和冠层蒸散减弱,输送到大气中的水汽减少,不利于云和降水的形成。其结果是:一方面使不利于局地降水的物理条件增强,进一步加剧干旱化和荒漠化趋势,从而形成一个由夏季风活动触发的陆面过程和大气边界层过程与局地气候之间的互馈过程;另一方面,更强的边界层加热作用使该区域大气环流场的位势高度和辐散趋势增强,在一定程度上抑制夏季风边缘向北推进,从而形成陆面过程和大气边界层与夏季风进退的互馈过程。这两个互馈过程使得陆-气相互作用对夏季风变化的响应机制显得更为复杂。

事实上,近几十年来,随着全球气候变暖,中国夏季风指数正处于显著减弱趋势(郭其蕴等,2004),而受夏季风减弱影响最严重的区域正好就是季风影响过渡区(Lebel, et al, 1997;Qian, et al,2007)。夏季风减弱意味着夏季风北边缘会向东南撤退,中国原来受夏季风影响较大的部分半润湿区正逐渐演变为受夏季风影响较弱的半干旱区或不受夏季风影响的干旱区。同时,这种气候带的空间调整会使夏季风过渡区的气候变暖在响应全球温室气体增加因素的基础上,叠加上局地加热增强的贡献,使其升温幅度明显高于周边地区(Huang, et al,2012)。此外,由于夏季风降水的明显减少及更强变暖造成的地表蒸散显著增强,导致干旱灾害更加频繁发生,干旱化和荒漠化趋势进一步加剧,从而造成陆面特性发生显著改变。比如,引起反照率增大、粗糙度降低、热容量减小等。目前,在夏季风变化背景下,夏季风过渡区已成为中国干旱化和荒漠化的核心地带(Fu,1992;张强等,2009),并且这种气候环境变化趋势也正在驱动该地区陆面过程和大气边界层特征发生显著变异。所以,夏季风过渡区陆-气相互作用对夏季风活动的响应机制已经成为一个非常凸出的科学问题。

5 面临的关键科学问题

尽管以往研究对夏季风过渡区内局部区域的陆-气相互作用做过一些初步分析,但总体而言目前对夏季风过渡区这一特殊区域的陆-气相互作用及其对夏季风响应问题基本上还缺乏更加深入的系统研究。以往对夏季风过渡区陆-气相互作用研究大多集中在陆面过程方面(Huang, et al,2012;林纾等,2007;袁仁民等,2002),但对陆面生理、生态、热力和水分过程之间的耦合作用涉及较少,也较少涉及大气边界层及其与自由大气的物质和能量交换,特别是很少将陆-气相互作用与季风等大气环流因素紧密联系起来,还缺乏在研究思路和试验方案中真正从科学角度考虑夏季风过渡区的区域气候变化和大气环流背景调整对陆-气相互作用的影响。因此,有必要对上述存在的问题进行归纳并开展深入而系统的研究。

根据夏季风过渡区突出的气候动力学特征,将该区域陆-气相互作用与夏季风气候动力学过程有机联系起来,应瞄准如下 3 个科学目标:弄清典型夏季风过渡区陆-气相互作用过程的基本特征及其空间分布规律;揭示陆-气相互作用过程对年、年际和年代际等不同时间尺度夏季风气候动力学过程的响应特征及陆面过程和大气边界层等陆-气相互作用主要环节与夏季风变化的作用机制;建立具有夏季风影响机理的陆面过程和大气边界层主要物理量的气候动力学参数化(总体输送系数,动力学粗糙度)关系,给出可用于改进区域气候模式的陆面过程和大气边界层参数化方案(如土壤水热输送和湍流输送方案)。为了实现上述科学目标,总体来看,该领域研究目前存在几个突出的科学问题有待解决:(1)弄清该区域大气边界层动量、能量和物质传输特征及大气边界层与自由大气的相互作用过程;(2)揭示陆面生理生态过程与陆面热力和水分过程的耦合关系;(3)增进对该地区陆面过程和边界层的时、空变化规律及其对夏季风活动响应机理的认识;(4)探讨夏季风驱动下该地区区域气候与陆面过程和边界层过程的循环反馈机制;(5)建立陆面过程和大气边界层的夏季风气候动力学参数化关系。在具体研究过程中,还会面临以下几个方面的技术问题:

第一,区分大气边界层与自由大气相互作用的各种不同物理过程的贡献是首先需要解决的技术问题。可通过趋势剔除法和滤波方法或数值敏感性试验等方法来区分不同物理过程的贡献。

第二,辨别陆-气相互作用对不同时间尺度季风的响应信息是需要解决的第 2 个技术问题。这一问题可借助多维集合经验模态分解技术,对高频变化信号、准周期信号、传播信号和变化趋势信号等进行

有效分离来实现。

第三,准确估算大气边界层厚度是需要解决的第3个技术问题。这一问题一方面可通过对比验证探空得到的不同气象要素识别的大气边界层厚度实现,另一方面通过对L波段雷达、对流层风廓线雷达、GPS(Global Positioning System)探空仪和激光雷达等不同探空手段观测的边界层厚度进行分析和对比来获得相对比较精确的大气边界层厚度。

通过对上述问题的研究,不仅能够弥补目前大气数值模式或天气预报、气候预测和气候变化分析中对陆-气相互作用及其与夏季风关系考虑的不足,还能够在一定程度上改进该区域数值模式模拟能力,提高天气预报和气候预测水平及深化对气候变化机理的认识(Herrmann, et al,2005)。

6　结　语

显然,夏季风过渡区陆-气相互作用及其对夏季风活动响应问题不仅是一个重要的基础科学问题,而且对提高干旱和局地强对流等天气、气候灾害的监测预报能力和中尺度数值模式的模拟能力也具有重要现实意义。通过对这一问题进行科学分析及系统的梳理、归纳和总结,深化对其科学认识水平和准确把握研究方向十分必要。目前,从对夏季风过渡区陆-气相互作用的研究现状来看,以往研究主要从单个界面交换认识陆-气相互作用,缺少从陆面交换延伸到边界层传输,直至边界层与残余层及自由大气等多界面交换来认识陆-气相互作用;以往研究大多主要考虑特定气候条件下的陆面参数的静态特征,缺少考虑陆-气相互作用对夏季风响应的多时间尺度性及其陆面参数的气候动力学特征;以往研究大多对陆面热力过程、水分过程和生理生态过程分别来研究,目前更需要考虑的是陆面生理生态过程对水分和热力过程的敏感性,重点关注陆面生理生态过程与热力和水分过程的耦合特征。

针对上述现状,未来需要重点从以下几个方面开展工作:(1)分析夏季风过渡区陆面过程特征及其与夏季风年循环的关系。(2)揭示夏季风过渡区大气边界层结构、物质和能量输送特征及其与夏季风年循环的关系。(3)研究夏季风过渡区陆面过程与大气边界层及大气边界层与自由大气的相互作用机制。(4)分析夏季风过渡区陆-气相互作用对夏季风年际波动、年代际变化和趋势性突变的响应特征。(5)建立充分考虑夏季风过渡区关键陆面物理参数响应季风活动的气候动力学关系。(6)揭示夏季风变化驱动下陆-气相互作用与区域气候之间的互馈机制。(7)设计针对夏季风活动特点的陆-气相互作用试验。为揭示夏季风过渡区陆-气相互作用与夏季风之间的互馈机制等关键科学问题,主要试验区可选择中国黄土高原核心区域,并根据夏季风从东南向西北推进的活动规律及典型夏季风影响过渡带由西南至东北的分布特征,将所有观测站按照西南—东北轴线(即夏季风影响过渡带走向)与西北—东南轴线(即夏季风进退方向)构成一个空间布局为"十"字型观测试验系统(图12)。这主要是由于该区域的夏季风边缘线摆动特征明显,摆动范围较宽,受青藏高原等大地形影响相对较弱;且该区域夏季风活动的规律性比较强,陆面特性对夏季风进退的响应更敏感。

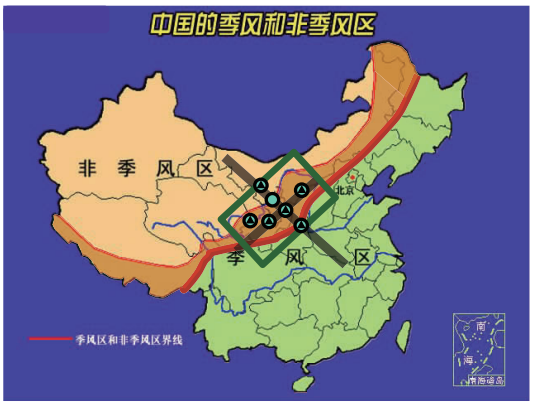


图12　典型夏季风过渡区和观测试验系统分布示意
(两红线之间的带状区域为夏季风过渡区,
绿色方框为典型夏季风摆动区;"▲"表示
高空观测站,"○"表示陆面过程观测站)

Fig. 12　A schematic of observations and experiments over classic summer monsoon transition zone
(the zonal region between the two red lines represents summer monsoon transition zone and the green square frame represents classic summer monsoon swing area;
"▲"represents upper-level observational sites,
"○"represents land surface observational sites)

上述研究的深入开展,不仅可以填补国际上夏季风过渡区陆-气相互作用研究的空白,而且还会对该区域陆-气相互作用与夏季风关系有新认识,对陆面过程和边界层参数化规律有新发展,为区域数值模式及干旱和局地强对流等灾害性天气、气候事件

的监测预警技术发展提供理论支撑。然而,由于本研究侧重讨论夏季风过渡区陆-气相互作用对夏季风活动的响应规律,而对陆-气相互作用反馈至大尺度环流系统中的关注较少,在今后研究中还应当予以关注。

致 谢:本文是在团队全体成员共同讨论的基础上形成,在此一并致谢。

参考文献

陈海山,周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 Ⅱ:敏感性试验分析. 大气科学,37(1):1-13. Chen H S, Zhou J. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part Ⅱ: Sensitivity experiment analysis. Chinese J Atmos Sci, 37(1): 1-13 (in Chinese)

陈海山,李兴,华文剑. 2015. 近20年中国土地利用变化影响区域气候的数值模拟. 大气科学,39(2):357-369. Chen H S, Li X, Hua W J. 2015. Numerical simulation of the impact of land use/land cover change over China on regional climates during the last 20 years. Chinese J Atmos Sci, 39(2): 357-369 (in Chinese)

丁一汇,孙颖,刘芸芸等. 2013. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测. 大气科学,37(2):253-280. Ding Y H, Sun Y, Liu Y Y, et al. 2013. Interdecadal and interannual variabilities of the Asian summer monsoon and its projection of future change. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 253-280 (in Chinese)

杜群,刘辉志,冯健武等. 2012. 半干旱区草原生态系统的碳交换特征. 中国科学:地球科学,42(5):711-722. Du Q, Liu H Z, Feng J W, et al. 2012. Carbon dioxide exchange processes over the grassland ecosystems in semiarid areas of China. Sci China Earth Sci, 55(4): 644-655

段安民,肖志祥,王子谦. 2018. 青藏高原冬春积雪和地表热源影响亚洲夏季风的研究进展. 大气科学,42(4):755-766. Duan A M, Xiao Z X, Wang Z Q. 2018. Impacts of the Tibetan Plateau winter/spring snow depth and surface heat source on Asian summer monsoon: A review. Chinese J Atmos Sci, 42(4): 755-766 (in Chinese)

富元海,刘宣飞. 2007. 中国北方季风边缘区边界位置的年代际变化. 南京气象学院学报,30(1):94-100. Fu Y H, Liu X F. 2007. Interdecadal fluctuations of the monsoon's boundary zone in the northern China. J Nanjing Inst Meteor, 30(1): 94-100 (in Chinese)

郭其蕴,蔡静宁,邵雪梅等. 2004. 1873~2000年东亚夏季风变化的研究. 大气科学,28(2):206-215. Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, et al. 2004. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during 1873-2000. Chinese J Atmos Sci, 28(2): 206-215 (in Chinese)

胡豪然,钱维宏. 2007. 东亚夏季风北边缘的确认. 自然科学进展,17(1):57-65. Hu H R, Qian W H. 2007. Identification of the northern edge East-Asian summer monsoon. Prog Nat Sci, 17(1): 57-65 (in Chinese)

胡焕庸. 1935. 中国人口之分布——附统计表与密度图. 地理学报,(2):33-74. Hu H Y. 1935. The distribution of population in China, with statistics and maps. Acta Geogr Sinica, (2): 33-74 (in Chinese)

胡璐璐,刘亚岚,任玉环等. 2015. 近80年来中国大陆地区人口密度分界线变化. 遥感学报,19(6):928-934. Hu L L, Liu Y L, Ren Y H, et al. 2015. Spatial change of population density boundary in mainland China in recent 80 Years. J Remote Sens, 19(6): 928-934 (in Chinese)

华文剑,陈海山,朱司光等. 2013. 陆面水文循环对气候变化敏感性的热点区域. 科学通报,58(28-29):2987. Hua W J, Chen H S, Zhu S G, et al. 2013. Hotspots of the sensitivity of the land surface hydrological cycle to climate change. Chinese Sci Bull, 58(30): 3682-3688

黄荣辉. 2006. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究. 地球科学进展,21(6):564-575. Huang R H. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China. Adv Earth Sci, 21(6): 564-575 (in Chinese)

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. 北京:气象出版社,240-292. Huang R H, Chen W, Zhang Q, et al. 2011. Air-land Interaction over the Arid Area of Northwest China and Its Impact on East Asia Climate. Beijing: China Meteorological Press, 240-292 (in Chinese)

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. 大气科学,37(2):189-210. Huang R H, Zhou D G, Chen W, et al. 2013. Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of northwest China and its impact on climate. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 189-210 (in Chinese)

李栋梁,邵鹏程,王慧等. 2013. 中国东亚副热带夏季风北边缘带研究进展. 高原气象,32(1):305-314. Li D L, Shao P C, Wang H, et al. 2013. Advances in research of the north boundary belt of East Asia subtropical summer monsoon in China. Plateau Meteor, 32(1): 305-314 (in Chinese)

李宏宇,张强,史晋森等. 2012. 黄土高原自然植被下垫面陆面过程参数研究. 气象学报,70(5):1137-1148. Li H Y, Zhang Q, Shi J S, et al. 2012. A study of the parameterization of land-surface processes over the natural vegetation surface of Loess Plateau. Acta Meteor Sinica, 70(5): 1137-1148 (in Chinese)

李建平,任荣彩,齐义泉等. 2013. 亚洲区域海-陆-气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展. 大气科学,37(2):518-538. Li J P, Ren R C, Qi Y Q, et al. 2013. Progress in air-land-sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change. Chinese J Atmos Sci, 37(2): 518-538 (in Chinese)

李婧华，陈海山，华文剑. 2013. 大尺度土地利用变化对东亚地表能量、水分循环及气候影响的敏感性试验. 大气科学学报，36(2)：184-191. Li J H，Chen H S，Hua W J. 2013. Sensitivity experiments on impacts of large-scale land use change on surface energy balance，hydrological cycle and regional climate over East Asia. Trans Meteor Sci，36(2)：184-191 (in Chinese)

李岩瑛，张强，胡兴才等. 2012. 西北干旱区和黄土高原大气边界层特征对比及其对气候干湿变化的响应. 冰川冻土，34(5)：1047-1058. Li Y Y，Zhang Q，Hu X C，et al. 2012. Atmosphere boundary layer characteristics and their responses to wetness change over arid regions and Loess Plateau in northwest China. J Glaciol Geocryol，34(5)：1047-1058 (in Chinese)

林纾，王毅荣. 2007. 中国黄土高原地区降水时空演变. 中国沙漠，27(3)：502-508. Lin S，Wang Y R. 2007. Spatial-temporal evolution of precipitation in China Loess Plateau. J Desert Res，27(3)：502-508 (in Chinese)

刘辉志，董文杰，符淙斌等. 2004. 半干旱地区吉林通榆“干旱化和有序人类活动”长期观测实验. 气候与环境研究，9(2)：378-389. Liu H Z，Dong W J，Fu C B，et al. 2004. The long-term field experiment on aridification and the ordered human activity in semi-arid area at Tongyu，northeast China. Climatic Environ Res，9(2)：378-389 (in Chinese)

刘维佳. 2012. 黄土高原农林草牧耦合发展战略研究. 中国农业科学，45(21)：4501-4507. Liu W J. 2012. Strategies on integrated development of agriculture-forestry-grass-grazing in the Loess Plateau of China. Sci Agric Sinica，45(21)：4501-4507 (in Chinese)

吕达仁，陈佐忠，陈家宜等. 2002a. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)综合研究. 地学前缘，9(2)：295-306. Lü D R，Chen Z Z，Chen J Y，et al. 2002. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS). Earth Sci Front，9(2)：295-306 (in Chinese)

吕达仁，陈佐忠，王庚辰等. 2002b. 内蒙古半干旱草原气候-生态相互作用问题—IMGRASS计划初步结果. 地学前缘，9(2)：307-320. Lü D R，Chen Z Z，Wang G C，et al. 2002. Climate-ecology interaction in Inner Mongolia semi-arid grassland-preliminary results of IMGRASS project. Earth Sci Front，9(2)：307-320 (in Chinese)

马柱国，符淙斌. 2006. 1951～2004年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报，51(20)：2429-2439. Ma Z G，Fu C B. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. Chinese Sci Bull，51(23)：2913-2925

史一丛，陈海山，高楚杰. 2015. 土壤湿度初始异常对东亚区域气候模拟影响的敏感性试验. 气象科学，35(4)：379-388. Shi Y C，Chen H S，Gao C J. 2015. Sensitivity experiments of impacts of initial soil moisture anomalies on East Asian regional climate simulation. J Meteor Sci，35(4)：379-388 (in Chinese)

唐博. 2011. 胡焕庸与神秘的“胡焕庸线”. 地图，(4)：110-116. Tang B. 2011. Hu Huanyong and the mysterious "Hu Huanyong Line". Map，(4)：110-116 (in Chinese)

汤绪，孙国武，钱维宏. 2007. 亚洲夏季风北边缘研究. 北京：气象出版社，8-32. Tang X，Sun G W，Qian W H. 2007. Study on the Summer Monsoon Northern most Margin over Asia. Beijing：China Meteorological Press，8-32 (in Chinese)

汤绪，陈葆德，梁萍等. 2009. 有关东亚夏季风北边缘的定义及其特征. 气象学报，67(1)：83-89. Tang X，Chen B D，Liang P，et al. 2009. Definition and features of the north edge of Asian summer monsoon. Acta Meteor Sinica，67(1)：83-89 (in Chinese)

王会军，范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. 大气科学，37(2)：313-318. Wang H J，Fan K. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon. Chinese J Atmos Sci，37(2)：313-318 (in Chinese)

王铮，乐群，夏海斌等. 2016. 中国2050：气候情景与胡焕庸线的稳定性. 中国科学：地球科学，46(11)：1505-1514. Wang Z，Yue Q，Xia H B，et al. 2016. China 2050：Climate scenarios and stability of Hu-line. Scientia Sinica Terrae，46(11)：1505-1514 (in Chinese)

徐祥德，赵天良，Lu C G 等. 2014. 青藏高原大气水分循环特征. 气象学报，72(6)：1079-1095. Xu X D，Zhao T L，Lu C G，et al. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau. Acta Meteor Sinica，72(6)：1079-1095 (in Chinese)

杨修群，谢倩，朱益民等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型. 地球物理学报，48(4)：789-797. Yang X Q，Xie Q，Zhu Y M，et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns. Chinese J Geophys，48(4)：789-797 (in Chinese)

袁仁民，孙鉴泞，姚克亚等. 2002. 大气边界层的室内模拟研究:夹卷层温度场结构分析. 大气科学，26(6)：773-780. Yuan R M，Sun J N，Yao K Y，et al. 2002. A laboratory simulation of atmospheric boundary layer analyses of temperature structure in the entrainment zone. Chinese J Atmos Sci，26(6)：773-780 (in Chinese)

张红丽，张强，刘晓云. 2016. 华北河套地区气候干燥度的影响因素研究. 气候变化研究进展，12(1)：20-27. Zhang H L，Zhang Q，Liu X Y. 2016. Study on the main factors of aridity in Hetao area of North China. Climate Change Res，12(1)：20-27 (in Chinese)

张红丽. 2018. 夏季风影响过渡区气候干燥度和气象干旱对夏季风活动的响应研究[D]. 兰州：兰州大学，1-112. Zhong H L. 2018. Research on responses of aridity and drought to the East Asia summer monsoon in monsoon transition zone of China[D]. Lanzhou：Lanzhou University，1-112 (in Chinese)

张强，胡隐樵，曹晓彦等. 2000. 论西北干旱气候的若干问题. 中国沙漠，20(4)：357-362. Zhang Q，Hu Y Q，Cao X Y，et al. 2000. On some problems of arid climate system of northwest China. J Desert Res，20(4)：357-362 (in Chinese)

张强，王胜. 2008. 西北干旱区夏季大气边界层结构及其陆面过程特征. 气象学报，66(4)：599-608. Zhang Q，Wang S. 2008. A study on atmospheric boundary layer structure on a clear day in the arid region in northwest China. Acta Meteor Sinica，66(4)：599-608 (in Chinese)

张强，胡向军，王胜等. 2009. 黄土高原陆面过程试验研究(LOPEX)有关科学问题. 地球科学进展，24(4)：363-372. Zhang Q，Hu X J，Wang S，et al. 2009. Some technological and scientific issues about the experimental study of land surface processes in Chinese Loess Plateau (LOPEX). Adv Earth Sci，24(4)：363-372 (in Chinese)

张强，李宏宇，张立阳等. 2013. 陇中黄土高原自然植被下垫面陆面过程及其参数对降水波动的气候响应. 物理学报，62(1)：019201. Zhang Q，Li H Y，Zhang L Y，et al. 2013. Responses of the land-surface process and its parameters over the natural vegetation underlying surface of the middle of Gansu in Loess Plateau to precipitation fluctuation. Acta Phys Sinica，62(1)：019201 (in Chinese)

张强，张红丽，张良等. 2017. 论我国夏季风影响过渡区及其陆-气相互作用问题. 地球科学进展，2017，32(10)：1009-1019. Zhang Q，Zhang H L，Zhang L，et al. 2017. Study on summer monsoon transition zone and its land-air interaction. Adv Earth Sci，32(10)：1009-1019 (in Chinese)

曾剑，张强. 2012. 2008年7—9月中国北方不同下垫面晴空陆面过程特征差异. 气象学报，70(4)：821-836. Zeng J，Zhang Q. 2008. A comparative study of the characteristics of the clear sky land surface processes over the different underlying surfaces in the northern part of China during July－September 2008. Acta Meteor Sinica，70(4)：821-836 (in Chinese)

曾剑，张强，王春玲. 2016. 东亚夏季风边缘摆动区陆面能量时空分布规律及其与气候环境的关系. 气象学报，74(6)：876-888. Zeng J，Zhang Q，Wang C L. 2016. Spatial-temporal pattern of surface energy fluxes over the East Asian summer monsoon edge area in China and its relationship with climate. Acta Meteor Sinica，74(6)：876-888 (in Chinese)

曾庆存，王会军，林朝晖等. 2003. 气候动力学与气候预测理论的研究. 大气科学，27(4)：468-483. Zeng Q C，Wang H J，Lin Z H，et al. 2003. A study of the climate dynamics and climate prediction theory. Chinese J Atmos Sci，27(4)：468-483 (in Chinese)

André J C，Goutorbe J P，Perrier A. 1986. HAPEX-MOBILHY：A hydrologic atmospheric experiment for the study of water budget and evaporation flux at the climatic scale. Bull Amer Meteor Soc，67(2)：138-144

Bhat G S，Thomas M A，Raju J V S，et al. 2003. Surface characteristics observed over the central tropical Indian Ocean during Indoex IFP99. Bound Lay Meteor，106(2)：263-281

Cheng S J，Huang J P，Ji F，et al. 2017. Uncertainties of soil moisture in historical simulations and future projections. J Geophys Res Atmos，122(4)：2239-2253

Cho J，Oki T，Yeh P J F，et al. 2012. On the relationship between the Bowen ratio and the near-surface air temperature. Theor Appl Climatol，108(1-2)：135-145

Fu C B. 1992. Transitional climate zones and biome boundaries：A case study from China // Hansen A J，Di Castri F. Landscape Boundaries. New York：Springer-Verlag，394-402

Goutorbe J P，Lebel T，Dolman A J，et al. 1997. An overview of HAPEX-Sahel：A study in climate and desertification. J Hydrol，188-189：4-17

Guo Z C，Dirmeyer P A，Koster R D，et al. 2006. GLACE：The global land-atmosphere coupling experiment. Part II：Analysis. J Hydrometeor，7(4)：611-625

Herrmann S M，Anyamba A，Tucker C J. 2005. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. Global Environ Change，15(4)：394-404

Huang J，Li Y，Fu C，et al. 2017b. Dryland climate change：Recent progress and challenges. Rev Geophys，55(3)：719-778

Huang J P，Guan X，Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. Atmos Chem Phys，12(12)：5391-5398

Huang J P，Ji M X，Xie Y K，et al. 2016a. Global semi-arid climate change over last 60 years. Climate Dyn，46(3-4)：1131-1150

Huang J P，Yu H P，Guan X D，et al. 2016b. Accelerated dryland expansion under climate change. Nat Climate Change，6(2)：166-171

Huang J P，Yu H P，Dai A G，et al. 2017a. Drylands face potential threat under 2℃ global warming target. Nat Climate Change，7(6)：417-422

Huang Q，Marsham J H，Parker D J，et al. 2009. A comparison of roll and nonroll convection and the subsequent deepening moist convection：An LEM case study based on SCMS data. Mon Wea Rev，137(1)：350-365

Jaeger E B，Seneviratne S I. 2011. Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. Climate Dyn，36(9-10)：1919-1939

Koster R D，Dirmeyer P A，Guo Z C，et al. 2004. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. Science，305(5687)：1138-1140

Lauwaet D，van Lipzig N P M，de Ridder K. 2009. The effect of vegetation changes on precipitation and mesoscale convective systems in the Sahel. Climate Dyn，33(4)：521-534

Lebel T，Taupin J D，D'Amato N. 1997. Rainfall monitoring during HAPEX-Sahel. 1：General rainfall conditions and climatology. J Hydrol，188-189：74-96

Liu L，Zhang R H，Zuo Z Y. 2016. The relationship between soil moisture and LAI in different types of soil in central eastern China. J Hydrometeor，17(11)：2733-2742

Mitra A P. 2004. Indian Ocean experiment [INDOEX]：An overview. Indian J Geo-Marine Sci，33(1)：30-39

Parasnis S S. 1991. Convective mixing in the monsoon boundary layer. Bound Lay Meteor，56(4)：395-400

Qian W H, Lin X, Zhu Y F, et al. 2007. Climatic regime shift and decadal anomalous events in China. Climatic Change, 84(2): 167-189

Segal M, Arritt R W. 1992. Nonclassical mesoscale circulations caused by surface sensible heat-flux gradients. Bull Amer Meteor Soc, 73(10): 1593-1604

Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. Nature, 443(7108): 205-209

Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. 2010. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review. Earth-Sci Rev, 99(3-4): 125-161

Taylor C M, Birch C E, Parker D J, et al. 2013. Modeling soil moisture-precipitation feedback in the Sahel: Importance of spatial scale versus convective parameterization. Geophys Res Lett, 40(23): 6213-6218

Tuttle S, Salvucci G. 2016. Empirical evidence of contrasting soil moisture-precipitation feedbacks across the United States. Science, 352(6287): 825-828

Wang A H, Li K Y, Lettenmaier D P. 2008. Integration of the variable infiltration capacity model soil hydrology scheme into the community land model. J Geophys Res Atmos, 113(D9): doi: 10.1029/2007JD009246

Wang R Y, Zhang Q. 2011. An assessment of storage terms in the surface energy balance of a subalpine meadow in Northwest China. Adv Atmos Sci, 28(3): 691-698

Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems. Quart J Roy Meteor Soc, 118(507): 877-926

Wei J F, Su H, Yang Z L. 2016. Impact of moisture flux convergence and soil moisture on precipitation: A case study for the southern United States with implications for the globe. Climate Dyn, 46(1-2): 467-481

Williams I N, Torn M S. 2015. Vegetation controls on surface heat flux partitioning, and land-atmosphere coupling. Geophys Res Lett, 42(21): 9416-9424

Yue P, Zhang Q, Zhao W. 2015. Influence of environmental factors on land-surface water and heat exchange during dry and wet periods in the growing season of semiarid grassland on the Loess Plateau. Sci China Earth Sci, 58(11): 2002-2014

Yue P, Zhang Q, Yang Y, et al. 2018. Seasonal and inter-annual variability of the Bowen Smith ratio over a semi-arid grassland in the Chinese Loess Plateau. Agric Forest Meteor, 252: 99-108

Zhang J Y, Wang W C, Wu L Y. 2009. Land-atmosphere coupling and diurnal temperature range over the contiguous United States. Geophys Res Lett, 36(6): L06706

Zhang Q, Li H Y, Zhao J H. 2012a. Modification of the land surface energy balance relationship by introducing vertical sensible heat advection and soil heat storage over the Loess Plateau. Sci China Earth Sci, 55(4): 580-589

Zhang Q, Zeng J, Zhang L Y. 2012b. Characteristics of land surface thermal-hydrologic processes for different regions over North China during prevailing summer monsoon period. Sci China Earth Sci, 55(11): 1872-1880

Zhang Q, Yang Z S, Hao X C, et al. 2018. Conversion features of evapotranspiration responding to climate warming in transitional climate regions in northern China. Climate Dyn, doi: 10.1007/s00382-018-4364-3

Zhang R H, Zuo Z Y. 2011. Impact of spring soil moisture on surface energy balance and summer monsoon circulation over East Asia and precipitation in east China. J Climate, 24(13): 3309-3322