辛晓歌, 宇如聪, 周天军. 2009. 中国东南部 4~5 月年代际干旱的南移特征及潜热影响的数值模拟 [J]. 大气科学, 33 (6): 1165-1173. Xin Xiaoge, Yu Rucong, Zhou Tianjun. 2009. Southward movement of the decadal drought in southeastern China during April-May and numerical simulation of the effect of the condensation heating [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1165-1173.

中国东南部 4~5 月年代际干旱的南移特征及 潜热影响的数值模拟

辛晓歌^{1,2} 宇如聪³ 周天军¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京 100029
2 国家气候中心气候系统模式室,北京 100081

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

摘 要利用1958~2000年旬平均中国560站地面观测资料和ERA-40再分析资料,分析了东亚气候在4~5月的年代际变化特征。发现发生在1970年代末的中国东南部干旱出现于4月中旬至5月中旬,干旱带随季节推进逐渐向南移动。这种南移特征与对流层中上层年代际变冷中心的移动是一致的,上层变冷中心所伴随的局地风场异常,即异常下沉运动和对流层低层北风异常,均显著存在于4月中旬至5月中旬,且逐渐南移。中国东南部年代际干旱带在4~5月的南移从一定程度上意味着4月黄淮流域降水异常对5月江南地区的降水多少具有一定的指示意义。由于干旱区位于上层变冷区的南侧,意味着该地区向上输送的潜热通量减少能够使对流层大气进一步冷却,这在一个变网格全球模式的敏感性试验中得到了验证,能够部分地解释大气中的冷信号为何持续存在和南移。

关键词 春季 年代际 变冷 干旱 文章编号 1006-9895 (2009) 06-1165-09 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Southward Movement of the Decadal Drought in Southeastern China during April – May and Numerical Simulation of the Effect of the Condensation Heating

XIN Xiaoge^{1, 2}, YU Rucong³, and ZHOU Tianjun¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Division of Climate System Modeling, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract This study investigates the decadal change of East Asian climate from April to May, using the 10-day mean data of 560 meteorological stations in China and the ERA-40 reanalysis data during 1958 – 2000. Results show that the decadal drought in Southeastern China occurring in the late 1970s exists from mid-April to mid-May, moving southward with time. This southward moving feature is consistent with the decadal cooling in the middle and upper troposphere. Both of the anomalous subsidence and northerlies in the lower troposphere associated with the up-

作者简介 辛晓歌, 女, 1979年出生, 博士, 助研, 研究方向: 气候变化与数值模拟。E-mail: xinxg@cma.gov. cn

收稿日期 2008-08-04, 2009-05-05 收修定稿

资助项目 财政部/科技部公益类行业专项 GYHY200706010、GYHY200806006,国家自然科学基金资助项目 40625014、40821092,国家 科技支撑计划 2007BAC03A01、2007BAC29B03

1166

per cooling occur from mid-April to mid-May and move southward. The southward movement of the decadal drought implies that April precipitation in the Huanghe River-Huaihe River basin is an indicator of the amplitude of southern China precipitation in May. The drought tends to occur in the south of the upper cooling region, which suggests that the decrease of the latent heating in the drought region may in turn cool the upper troposphere. This is verified in a sensitive experiment with a regional model. This partly explains the persistence and southward movement of the cooling signal in the atmosphere in late spring.

Key words spring, decadal change, cooling, drought

1 引言

伴随全球海气系统在 20 世纪 70 年代中后期发 生的年代际气候跃变,东亚气候亦表现出显著的年 代际变化特征。到目前为止,研究较多的就是伴随 东亚夏季风减弱所出现的"南涝北旱"现象,即华 北少雨、长江中下游地区多雨(陈隆勋等,1991; 郭其蕴等,2003;周连童和黄荣辉,2003;王遵娅 等, 2004, Zhai et al., 2005)。对于这种现象发生的 原因已经有了较多的分析和讨论:部分研究认为, 热带太平洋和印度洋海表面温度 (SST) 在 1970 年 代中后期以来的年代际增温,能够改变西太平洋副 热带高压和东亚夏季风的强弱,从而引起我国夏季 雨带位置偏南(黄荣辉和徐予红,1999; Gong 和 Ho, 2002; Hu et al., 2003; Yang and Lau, 2004; Fu et al., 2009), 但最近的研究表明, 印度洋增温 可能不是主要的影响因素 (Li et al., 2008)。一些 研究指出, 青藏高原表面热源降低, 使得青藏高原 南侧温度梯度减弱,造成亚洲夏季风减弱,导致中 国降水出现南多北少的分布格局(赵平和陈隆勋, 2001; 张顺利和陶诗言, 2001)。还有研究表明, 东 亚地区人为气溶胶尤其是黑炭的排放,能够改变东 亚地区局地大气稳定度,造成"南涝北旱"(Xu 2001; Menon et al., 2002)。此外, 也有研究表明, 全球气候变暖对"南涝北旱"可能起一定的作用 (Gao et al., 2008)。近年来,不少研究在分析东亚 各个季节气候的年代际变化时,注意到春季气候同 样具有显著的年代际变化信号,主要表现为中国东 南部地区降水减少(陈隆勋和朱文琴,1998;任国 玉和吴虹, 2000; 赵平和周秀骥, 2006)。Yang and Lau (2004) 探讨了这种变化的原因,指出东亚春季 降水在年代际尺度上与北太平洋 SST 具有较好的 相关关系。通过上述回顾可以看出,无论春季还是 夏季,目前多数研究是从下垫面 (SST、青藏高原)

的角度研究东亚气候年代际异常的原因。

目前,已有少数工作从大气环流的角度研究东 亚气候年代际变化的原因时,发现东亚夏季气候的 "南涝北旱"特征与对流层中上层的年代际变冷具 有很好的对应关系,上层变冷有利于气柱压缩,从 而在对流层下层出现反气旋性异常,使得雨带位置 偏南 (Yu et al., 2004a)。这意味着东亚夏季气候 年代际变化不仅表现在地面, 而是从地面至对流层 中上层呈现出明显的三维结构。除了夏季,这样的 三维结构还存在于春季(Xin et al., 2006), 只不过 位置比夏季偏南,所伴随的少雨区也偏南。对流层 中上层变冷对地面干旱的决定性作用在数值试验中 得到了验证 (Xin et al., 2008)。通过进一步分析东 亚气候年代际变化逐月的季节分布特征,发现东亚 对流层中上层变冷在除 6 月份之外的各个季节均存 在,最强的变冷中心出现在4月和8月,而相应的 风场和降水以及地表温度异常在季节内的分布与上 层变冷非常一致 (Yu and Zhou, 2007: 宇如聪等, 2008)。东亚气候年代际变化三维结构的提出,有 助于科学界从下垫面之外的角度研究东亚气候年代 际变化的原因,也对美国科学家提出的东亚黑炭气 溶胶增多引起"南涝北旱"这一观点提出了疑义。 已有工作发现冬季北大西洋涛动 (NAO) 指数与东 亚春季对流层气温具有显著的负相关关系,意味着 20世纪80年代以来冬季NAO持续位于正位相, 可能是东亚对流层变冷的重要因子之一(Yu and Zhou, 2004; Li et al., 2005; Xin et al., 2006) Li et al. (2008) 研究了北大西洋涛动与东亚气候相关 联的原因,发现了一种联系北大西洋和东亚地区气 候异常的遥相关型,通过这种遥相关型,北大西洋 地区的气候异常信号可以经由欧亚大陆高纬度地区 传播至东亚,并对我国气候产生显著影响。

上述有关东亚地区气候年代际变化三维结构的 研究都是基于月平均尺度的,本文将进一步利用旬 平均资料分析东亚气候年代际变化在 4~5 月的分 布特征。通过研究其在季节内的移动变化特征,以 期对我国气候短期预测给出一定启示。同时,本文 还将利用数值试验探讨春末大气中冷信号持续存在 和移动的可能原因。

2 资料和模式介绍

2.1 资料

本文使用了中国气象局国家气象信息中心提供的中国 560 个站的地面观测资料,站点分布见图 1。 这些站点均在 1958~2000 年期间具有连续的观测 记录,用到的变量包括降水、云量和地表气温。为 了便于分析,所有变量均插值到 1°×1°的水平网格 上。大气环流资料是由欧洲中心提供的 ERA-40 再 分析资料 (Uppala et al., 2005),使用的变量有气 温、经向风和垂直速度。

2.2 模式

本文所使用的模式是一个具有变网格能力的大 气环流模式 LMDZ4。LMDZ4 模式是由法国动力 气象实验室 (LMD)发展的大气环流模式。以该模 式版本为大气分量的气候系统模式 IPSL-CM4 参 加了由世界气候研究计划 (WCRP)为政府间气候 变化委员会 (IPCC) 第四次评估报告 (AR4)组织 的气候变化情景预估试验。Hourdin et al. (2006) 对 LMDZ4 模式进行了详细的介绍,并评估了模式 对全球主要气候特征的模拟能力,指出模式对经圈 环流、热带地区降水、中纬度定常和瞬变行星波以 及高纬地区气温等的气候平均特征都具有较好的模 拟能力。这里仅对模式使用的物理过程参数化方案进行简要介绍,对流参数化使用 Emanuel (1993) 方案;辐射过程的计算采用欧洲中期天气预报中心 (ECMWF)的辐射方案,云的参数化方案采用 LMD实验室发展的一个预报云方案 (Le Trent and Li, 1991)。

LMDZ4 模式的网格距是可变的,所以既能进行全球气候模拟(Li,1999),又能针对某一区域进行加密模拟(Krinner and Genthon,1998;Genthon et al., 2002;Zhou and Li, 2002)。最近,法国动力气象实验室将LMDZ模式发展为一个具有区域气候模拟性能的模式,具体做法为,利用指数松弛的方法使模拟的大气环流向再分析资料靠近,在加密区域以外,松弛过程的时间尺度是半小时,而在加密区内,松弛过程的时间尺度是10天。所以在加密区内模式几乎是独立运行,而在加密区域以外模式完全依赖于强迫场。这样,模式运行起来相当于一个区域气候模式,为了与该模式的大气环流模式版本区别,文中将经过这种设置的模式简称为LMDZ4-RCM。

在本文研究中,LMDZ4-RCM 模式的水平网格 点是 120×91,垂直方向为 19 层。模式的加密区取 在东亚,中心点位于(32°N,102°E),加密区的水 平分辨率约为 60 km。模式在东亚区域的网格点分 布见图 1。所使用的环流强迫场资料是 ERA-40 再 分析资料,强迫变量为纬向风(*u*)、经向风(*v*)、气 温(*t*)和比湿(*q*),强迫值每 6 小时输入一次。海 洋下边界由气候平均 SST 和海冰进行强迫。在陆



图 1 模式在东亚区域的网格点分布图。阴影:地形高于 2500 m;黑圆点:中国地面观测站

Fig. 1 Distribution of model grid points over East Asia. Shaded: topography higher than 2500 m; black dots: gauged surface station in China

地表面,土壤湿度和蒸发的计算采用地表-植被-大 气传输和动态植被模型(ORCHIDEE)中的两层水 文方案(de Rosnay et al., 2002; Krinner et al., 2005)。模式的积分时间步长为180秒。

3 4~5月东亚气候年代际异常的南 移特征

图 2a 给出了中国东部 (110°E~122°E) 降水的 年代际变化 [1981~2000 年均值减去 1958~1977 年均值 (下同)] 在 4~5 月的逐旬演变。可见,黄 淮流域地区于 4 月中旬开始出现较为显著的年代际 干旱,干旱中心位于 33°N 左右,随着时间的推移, 此干旱区逐渐向南移动,在 5 月中旬位于 27°N, 5 月下旬显著干旱区消失。

除了降水,总云量和地表气温也有显著的年代 际变化。如图 2b 所示,中国东部总云量在 20 世纪 80 年代以来显著减少,大部分地区的总云量减少 10%以上。而且总云量减少区在 4 月中旬至 5 月中 旬也有向南移动的特征,4 月中下旬,总云量减少 区覆盖了华北和黄淮大部分地区,而在 5 月中上 旬,少云区位于黄淮流域和江南地区。中国东部地 表气温的变化主要表现为年代际增温(图 2c),增 温幅度在 0.8~1.2℃之间。在 4 月中旬至 5 月中 旬,增温区域也有逐渐南移的现象,由黄淮流域移 至江南。

由此可见,无论是降水、总云量还是地表气 温,其年代际变化均显著存在于4月中旬至5月中 旬,且变化区域随时间具有南移的现象。这种随着 时间移动的气候变化现象,对于气候预测是具有一 定意义的。因此,有必要进一步分析这种南移现象 发生的原因。

由 Xin et al. (2006)的研究可知,春末中国东 南部的年代际干旱区与对流层中上层的显著变冷具 有密切的联系:变冷区位于对流层中上层,上层变 冷意味着气柱压缩,在对流层中上层出现气旋性异 常,对流层下层出现反气旋性异常,上层辐合和低 层辐散有利于在变冷区产生下沉运动,从而在变冷 区东侧形成了一个异常经圈环流。其中低层反气旋 性异常不利于春季中国东部的大气水汽输送(张洁 等,2008),变冷区下方的异常下沉运动抑制了对 流的发展,使得变冷区东南侧的降水量减少,而异 常经圈环流上升支的位置则对应着降水量增多,从



图 2 中国东部 (110°E~122°E) 4~5 月逐旬气候年代际变化 的时间-纬度剖面图: (a) 降水 (单位: mm/d); (b) 总云量 (%); (c) 地表气温 (单位: ℃)。阴影表示通过 10%显著性检 验的区域

Fig. 2 Time (ten days)- latitude cross sections for the decadal changes of (a) precipitation (mm/d), (b) total cloud amount (%), and (c) surface temperature (°C) averaged between $110^{\circ}E-122^{\circ}E$ during Apr – May. Shaded regions are significant at the 10% level

而形成"南涝北旱"降水异常型。那么,由上文分 析得到的地面气候异常在 4~5 月的南移现象在环 流场上是否有体现?

图 3a 给出了 300 hPa 旬平均气温沿经向 90°E~ 120°E 平均的年代际变化,可以看出,年代际变冷 在 4 月至 5 月持续存在,变冷中心存在于 4 月中旬 至 5 月中旬。值得注意的是,变冷中心具有明显的 南移特征,由 4 月中下旬的 40°N 附近移到了 5 月 中上旬的 32°N 左右。由于上层变冷伴随着明显的 风场变化,因此随着上层变冷区的移动,风场异常 也势必出现相应的移动特征。如图 3b 所示,异常 下沉运动显著存在于 4 月中旬至 5 月中旬,且异常



图 3 4~5月逐旬气候年代际变化的时间-纬度剖面图:(a)沿 90°E~120°E 平均的 300 hPa 温度(单位:℃);沿 100°E~ 120°E 平均的(b) 500 hPa 垂直速度(单位:10⁻⁴ hPa/s)和(c) 850 hPa 经向风(单位:m/s)。阴影:通过 5%(a、b)和 10% (c)显著性检验的区域

Fig. 3 Time (ten days)- latitude cross sections for the decadal changes of (a) 300-hPa temperature (°C) averaged between $90^{\circ}E$ -120°E, (b) 500-hPa vertical velocity (10^{-4} hPa/s) and (c) 850-hPa meridional wind (m/s) averaged between $100^{\circ}E$ - 120°E during Apr – May. Shaded regions are significant at the 5% (a, b) and 10% (c) levels

下沉中心在 4 月底由 35°N 移到了 30°N 以南。变 冷区低层东侧 (110°E~120°E) 的北风异常也由 30°N 移到了 25°N 以南 (图 3c)。对比可见, 经向风 和垂直风场的年代际异常在 4~5 月的出现、移动和 消亡与对流层中上层变冷中心的分布非常一致。

通过对比地面要素场(图 2)与环流场(图 3) 的年代际变化特征可知,中国东南部干旱带、总云 量减少区和地表升温区在4月中旬至5月中旬的南 移,与对流层中上层变冷中心的移动非常一致。前 文已经分析了干旱带与上层变冷中心的对应关系,



图 4 4月 (a) 和 5月 (b) 中国降水的年代际变化。阴影: 通过 10% 显著性检验的区域

Fig. 4 Decadal changes of China precipitation in (a) Apr and (b) May. Shaded regions are significant at the 10% level

这里进一步讨论上层变冷与总云量和地表气温的关 系。云的形成需要有两个基本条件:一是较充沛的 水汽条件,二是大尺度上升运动(李昀英等,2003; Yu et al.,2004b)。而伴随对流层中上层变冷的风 场变化,即异常下沉运动和低层北风异常,使得这 两个条件均减弱,有利于总云量减少。另一方面, 异常下沉运动能够引起绝热增温,同时总云量减少 使地表接受的太阳短波辐射增加,从而有利于地层 气温的升高。

上述分析表明,4~5月东亚气候年代际异常 的三维结构出现了整体南移的现象,意味着4月气 候异常对5月气候异常具有一定的指示意义。

这里将针对降水场进行考察。图4给出了4月和5月降水的年代际变化,可以看出,4月干旱区位于黄淮流域,而在5月干旱主要位于江南。将4月干旱区(30°N~35°N,110°E~122°E)和5月干



图 5 1958~2000 年 4 月黄淮流域 (30°N~35°N, 110°E~122°E) 和 5 月江南区域 (26°N~30°N, 110°E~122°E) 平均降水的距平分布 Fig. 5 Anomalous time series of Apr precipitation averaged over the Huanghe River - Huaihe River valley (30°N-35°N, 110°E-122°E) (solid line) and May precipitation averaged over the Jiangnan region (26°N-30°N, 110°E-122°E) (dashed line) during 1958-2000

旱区 (26°N~30°N,110°E~122°E)的降水分别进 行区域平均,得到 4 月和 5 月干旱区的降水指数。 图 5 给出了这两个指数在 1958~2000 年的距平序 列。可见,二者不仅在 1970 年代末的年代际跃变 上具有一致的特征,在年际尺度上也有很好的对应 关系,1958~2000 年间的相关系数 (r) 达到 0.41, 通过了 1%显著性检验,表明 5 月江南降水多少与 4 月黄淮流域降水量具有密切的联系。这在实际业 务预测中是否具有应用价值还有待进一步检验。

4 凝结潜热对上层变冷作用的数值试验

由上文分析可知,对流层中上层变冷的存在和 移动与局地风场和地面气候要素年代际异常的分布 具有密切的联系。因此,有必要进一步探讨对流层 中上层变冷持续存在和移动的原因。

非绝热加热是对流层大气的主要热量来源,它 主要有三种形式:感热输送、潜热输送和辐射。对 于东亚对流层中上层大气来说,潜热加热是一个极 为重要的因素。由刘屹岷等(1999)的研究可知, 潜热加热在整个对流层都非常明显,加热率中心位 于对流层中上层,与本文所得到的变冷中心高度是 一致的。又由本文分析可知,对流层中上层变冷伴 随降水减少,因而由地表向上输送的潜热通量减 少,能够使得对流层大气进一步冷却,这可能是上 层变冷持续存在的一个重要因素。

为了验证这一推测,本文进行了两组试验(表 1):一组为控制试验 CNT1 和 CNT2,分别用 1958

表 1	试	验方案:	设ì	+	
Table	1	Design	of	the	experiments

	控制	试验	敏感性试验		
	CNT1	CNT2	CNT1-L0	CNT2-L0	
强迫场	$1958 {\sim} 1977$	$1981 \sim 2000$	$1958{\sim}1977$	$1981 \sim 2000$	
	年平均	年平均	年平均	年平均	
潜热项	无设置	无设置	设为0	设为0	

~1977 平均环流场和 1981~2000 年平均环流场资料强迫,如 Xin et al. (2008)所述,模式模拟的差异 (CNT2-CNT1)能够再现东亚春末的上层变冷特征和相应的风场变化以及干旱的特征;另外一组试验是为了验证凝结潜热的作用所设计的敏感性试验,强迫场分别同 CNT1和 CNT2,但是模式各层的凝结潜热项均设为 0,分别记为 CNT1-L0和 CNT2-L0。这两组试验均从 3 月 1 日积分至 5 月 31 日。

试验目的是对比这两组试验分别模拟的温度差 异(CNT2减去CNT1和CNT2-L0减去CNT1-L0),即对比有无凝结潜热条件下,模式模拟的上 层变冷有无变化。图6给出了在两组试验中4月中 旬~5月中旬平均温度的差异,从中可见,在无潜 热的条件下,变冷区的垂直分布与控制试验基本一 致,均位于对流层中上层,中心位于300hPa。但 是,二者在强度上明显不同,无凝结潜热时,模式 模拟的冷异常强度比控制试验偏弱1℃左右。

图 7 给出了 4~5 月逐候 300 hPa 温度在两组 试验中的差别。可见,在无凝结潜热的条件下,4~5 月的冷差异仍然存在,但在4月中旬至5月中旬的 6期

No. 6



图 6 4月中旬~5月中旬沿 100°E~120°E 平均温度差异的垂直分布(阴影:温度差异大于 1℃):(a) CNT2-L0 减去 CNT1-L0;(b) CNT2 减去 CNT1

Fig. 6 Latitude – height cross sections for the differences of mean temperature along $100^{\circ}E - 120^{\circ}E$ (a) between CNT2-L0 and CNT1-L0, and (b) between CNT2 and CNT1 from mid-Apr to mid-May (shaded: difference larger than $1^{\circ}C$)



图 7 4~5月逐候沿 100°E~120°E平均 300 hPa 温度差异的时间-纬度剖面图(阴影:温度差异大于 2℃)。其余同图 6 Fig. 7 Same as Fig. 6, except for time - latitude cross sections of the pentad mean 300-hPa temperature differences along 100°E-120°E during Apr - May (shaded: difference larger than 2℃)

降温幅度明显比控制试验偏弱。在无凝结潜热加热时,最大降温幅度为3℃,而在有凝结潜热时,最大降温可达5℃。

上述试验结果表明,在冷异常存在时,由于降 水的减少,使得潜热释放对大气的加热作用减小, 能够使对流层中上层的冷异常增强。由前文分析可 知,上层变冷所伴随的干旱区位于降温中心以南 (图 2a 和图 3a),致使潜热加热减少的区域同样位 于上层变冷区的南侧,有利于上层冷却区的南侧进 一步降温,从而表现为变冷中心南移。所以,干旱 引起的凝结潜热加热减少可能是上层变冷中心逐渐 南移的一个重要因素。

5 结论

本文利用旬平均资料分析了 4~5 月东亚气候 年代际变化的分布特征,发现中国东南部降水在 4 月中旬至5月中旬显著减少,且减少区域具有显著 的南移特征。该地区总云量和地表气温也有明显的 年代际变化,表现为总云量减少,地表气温升高, 且变化区域随着时间的推移呈现出类似的南移现 象。地面气候的这种变化特征与环流系统的变化是 一致的,具体表现为东亚对流层中上层出现年代际 变冷,且变冷中心在4月中旬至5月中旬呈现出明 显的南移特征,伴随上层变冷出现的异常下沉运动 和低层北风异常也逐渐向南推移。正是这样的风场 异常,使得中国东南部降水减少、总云量减少、地 表气温升高,且变化区域随着变冷中心南移。中国 东南部年代际干旱区在4~5月随时间向南移动, 意味着4月黄淮流域的降水异常对5月江南降水异 常具有一定的指示意义。

通过探讨中国东南部气候年代际变化的三维空间结构为何南移,发现凝结潜热加热可能起了重要的作用。在对流层上层变冷的作用下,变冷区东南侧的降水减少,从而由地表向上输送的潜热通量减少,使对流层大气进一步冷却,这在一个变网格全球模式的试验中得到了验证。在具有同样年代际差异的环流场作为侧边界强迫的两组试验中,无凝结潜热释放时,两组试验所模拟的温度差异(变冷)明显偏弱,说明降水减少引起的凝结潜热减小会使上层变冷加强。由于干旱区通常位于上层变冷中心的南侧,凝结潜热加热的作用可能是上层变冷中心向南推移的一个重要因素。

参考文献 (References)

- 陈隆勋, 邵永宁, 张清芬. 1991. 近四十年我国气候变化的初步分析 [J]. 应用气象学报, 2: 164 174. Chen L X, Shao Y N, Zhang Q F, et al. 1991. A preliminary analysis of climate change in China in the last 40 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 2: 164 173.
- 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 1998. 中国近 45 年来气候变化的研究 [J]. 气象学报,56 (3):257-271. Chen L X, Zhu W Q, Wang W, et al. 1998. Study on climate change in China in recent 45 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56:257-271.
- de Rosnay P, Polcher J, Bruen M. 2002. Impact of a physically based soil water flow and soil-plant interaction representation for modeling large-scale land surface processes [J]. J. Geophys. Res, 107, doi: 10.1029/2001JD000634.
- Emanuel K A. 1993. A cumulus representation based on the episodic mixing model: The importance of mixing and microphysics in predicting humidity [J]. A. M. S. Meteorol. Monogr., 24: 185-192.

- Fu J J, Li S L, Luo D H. 2009. Impact of global SST on decadal shift of East Asian summer climate [J]. Adv. Atmos. Sci., 26: 191–201.
- Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. 2008. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM [J]. Meteor. Atmos. Phys., 100: 73-86.
- Genthon C, Krinner G, Cosme E. 2002. Free and laterally nudged Antarctic climate of an atmospheric general circulation model [J]. Mon. Wea. Rev., 130: 1601–1616.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (10), doi: 10.1029/2001GL014523.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中 国气候的影响 [J]. 地理学报, 58: 569 – 576. Guo Q Y, Cai J N, Shao X M, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58: 569 – 576.
- Hourdin F, Musat I, Bony S, et al. 2006. The LMDZ4 general circulation model: Climate performance and sensitivity to parametrized physics with emphasis on tropical convection [J]. Climate Dyn., 27: 787-813.
- Hu Z Z, Yang S, Wu R G. 2003. Long-term climate variations in China and global warming signals [J]. J. Geophys. Res., 108: 4614. doi: 10.1029/2003JD003651.
- 黄荣辉,徐予红,周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华 北干旱化趋势 [J]. 高原气象,18:465-476. Huang R H, Xu Y H, Zhou L T. 1999. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18:465-476.
- Krinner G, Genthon C. 1998. GCM simulations of the last glacial maximum surface climate of Greenland and Antarctica [J]. Climate Dyn., 14: 741-758.
- Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudré N, et al. 2005. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmospherebiosphere system [J]. Global Biogeochem Cycles, 19, doi: 10. 1029/2003GB002199.
- Le Trent H, Li Z X. 1991. Sensitivity of an atmospheric general circulation model to prescribed SST changes. Feedback effects associated with the simulation of cloud optical properties [J]. Climate Dyn., 5: 175 – 187.
- Li J, Yu R C, Zhou T J, et al. 2005. Why is there an early spring cooling shift downstream of the Tibetan Plateau? [J]. J. Climate, 18: 4660-4668.
- Li J, Yu R C, Zhou T J. 2008. Teleconnection between NAO and climate downstream of the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 21: 4680-4690.
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study [J]. J. Climate, 21: 6080-6088

- 李昀英, 宇如聪, 徐幼平, 等. 2003. 中国南方地区层状云的形成和 日变化特征分析 [J]. 气象学报, 61: 733-742. Li Y Y, Yu R C, Xu Y P, et al. 2003. The formation and diurnal changes of stratiform clouds in southern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61: 733-742.
- Li Z X. 1999. Ensemble atmospheric GCM simulation of climate interannual variability from 1979 to 1994 [1]. I. Climate, 12, 986 -1001.
- 刘屹岷,吴国雄,刘辉,等. 1999. 空间非均匀加热对副热带高压形 成和变异的影响 III: 凝结潜热加热与南亚高压及西太平洋副高 [I]. 气象学报, 57: 525-538. Liu Y M, Wu G X, Liu H, et al. 1999. The effect of spatially nonuniform heating on the formation and variation of subtropical height. Part III: Condensation and South Asia high and western Pacific subtropical high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57: 525-538.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297: 2250-2253.
- 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 2000. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报, 11: 322-330. Ren G Y, Wu H, Chen Z H. 2000. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 11: 322-330.
- Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 31: 2961 -3012.
- 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 2004. 近 50 年来中国气候变化特征 的再分析 [J]. 气象学报, 62: 228-236. Wang ZY, Ding YH, He J H, et al. 2004. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62: 228-236.
- Xin X G, Yu R C, Zhou T J, et al. 2006. Drought in late spring of South China in recent decades [J]. J. Climate, 19: 3197-3206.
- Xin X G, Li Z X, Yu R C, et al. 2008. Impacts of upper tropospheric cooling upon the late spring drought in East Asia simulated by a regional climate model [J]. Adv. Atmos. Sci., 25 (4): 555 -562.
- Xu Q. 2001. Abrupt change of the mid-summer climate in central East China by the influence of atmospheric pollution [J]. Atmos. Environ., 35: 5029-5040.
- Yang F, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures [J]. Int. J. Climatol., 24 (13): 1625-1644.
- Yu R C, Zhou T J. 2004. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L12204. doi: 10. 1029/ 2004GL019814.

- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004a. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L22212. doi: 10.1029/2004GL021270.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004b. Climate effects of the deep continental stratus clouds generated by the Tibetan Plateau [J]. J. Climate, 17: 2702-2713.
- Yu R C, Zhou T I. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of the interdecadal change in East Asian monsoon [J]. J. Climate, 20, 5344-5355.
- 宇如聪,周天军,李建,等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特 征的研究进展 [J]. 大气科学, 32: 893-905. Yu R C, Zhou T J, Li J, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32: 893-905
- Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18: 1096-1108.
- 张洁,周天军,宇如聪,等. 2009. 中国春季典型降水异常及相联系 的大气水汽输送 [J]. 大气科学, 33: 121-134. Zhang J, Zhou T J, Yu R C, et al. 2009. Atmospheric water vapor transport and corresponding typical anomalous spring rainfall patterns in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33: 121 - 134.
- 张顺利,陶诗言. 2001. 青藏高原积雪对亚洲夏季风影响的诊断及 数值研究 [J]. 大气科学, 25: 372-390. Zhang SL, Tao SY. 2001. The influences of snow cover over the Tibetan Plateau on Asian summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25: 372-390.
- 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 [J]. 中国科学 (D辑), 31: 327-332. Zhao P, Chen L X. 2001. Climate features of atmospheric heat source/sink over Qinghai-Xizang Plateau in 35 years and its relation to rainfall in China [J]. Science in China (Series D), 44: 858-864.
- 赵平,周秀骥. 2006. 近 40 年我国东部降水持续时间和雨带移动的 年代际变化 [J]. 应用气象学报, 17:548-556. Zhao P, Zhou X J. 2006. Decadal variability of rainfall persistence time and rainbelt shift over eastern China in recent 40 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17: 548-556.
- 周连童,黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可 能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8: 274-290. Zhou L T, Huang R H. 2003. Research on characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8: 274-290.
- Zhou T J, Li Z X. 2002. Simulation of the East Asian summer monsoon using a variable resolution atmospheric GCM [J]. Climate Dyn., 19: 167-180.