

周连童. 2009. 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 (2): 120-130. Zhou Liantong. 2009. Circulation anomalies pattern causing the persistent drought in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 120-130.

引起华北地区夏季出现持续干旱的环流异常型

周连童

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

摘要 利用中国 160 个台站降水资料和 ERA-40 再分析资料分析了华北地区夏季降水及其对应的大气环流年代际变化特征。分析结果如下: 华北地区夏季降水自 1977 年之后明显减少, 出现持续性干旱。1977~2000 年 500 hPa 高度场出现与 1966~1976 年相反的遥相关波列; 华北地区上空 700 hPa 出现反气旋型环流异常, 并出现明显偏北风异常, 且下沉气流加强, 水汽出现辐散; 此外, 200 hPa 高度上西风带偏南且减弱。相反, 1966~1976 年华北地区上空 700 hPa 出现气旋型环流异常, 并出现偏南风异常, 且上升气流加强, 水汽输送辐合; 此外, 200 hPa 上西风异常偏北加强。

关键词 华北 持续性干旱 大气环流

文章编号 1006-9585 (2009) 02-0120-11 **中图分类号** P463 **文献标识码** A

Circulation Anomalies Pattern Causing the Persistent Drought in North China

ZHOU Liantong

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

Abstract Due to the importance of persistent droughts in North China after 1977, the circulation anomalies pattern causing the persistent droughts in North China are analyzed by using observed data and ERA-40 reanalysis data. The analyzed results show that interdecadal variability of summer precipitation in China is very obvious. From 1977 to 2000, summer precipitation obviously decreased and the persistent droughts occurred in North China and the Yellow River basin. After 1977, a teleconnection wave-train is opposite to that before 1977 occurred in the lower troposphere over Eurasian continent and a altitude-longitude circulation over the arid region of Northwest China. The monsoon region of the eastern China is also opposite to that before 1977. After 1977, a anti-cyclonic anomaly circulation and the northerly wind anomalies obviously appeared at 700 hPa over North China, and the descent flow, divergence of water vapor transports, and the southward shift of the westerly wind over North China. These are not helpful to summer monsoon rainfall and caused the decrease of summer precipitation in North China, and thus, the persistent droughts occurred.

Key words North China, persistent drought, circulation anomalies

收稿日期 2008-03-10 收到, 2008-10-30 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-220、国家自然科学基金资助项目 40730952、国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421405 和中国科学院大气物理研究所青年人才领域前沿项目 IAP07414

作者简介 周连童, 男, 1974 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事气候年代际变化及其机理研究。E-mail: zlt@mail.iap.ac.cn

1 引言

气候年代际变化严重影响气候的年际变化, 因此, 关于气候年代际变化 (Interdecadal variability of climate) 的研究受到越来越多学者的关注 (Ghil et al., 1991; Wang, 1995; Zhang et al., 1997; Torrence et al., 1999; Chao, 2000; Dong et al., 2005)。Hu (1997)、黄荣辉等 (1999)、周连童等 (2003) 和 Ding et al. (2007) 分析了中国夏季降水的年代际变化, 结果表明中国降水也有明显的年代际变化。特别是华北地区从 20 世纪 70 年代后期开始发生了持续性干旱, 引起严重的气候灾害, 导致水资源缺乏, 严重影响了此地区的工农业生产和人民的生活用水。并且, 周连童等 (2006a) 利用 1951~2000 年中国观测站 50 年降水和气温的观测资料, 详细分析了我国华北地区夏季气候的年代际变化特征, 结果表明其变化明显存在着 3 个时段: 华北地区 1951~1965 年为夏季降水偏多期, 1966~1976 年为夏季降水偏多转为偏少的过渡期, 1976 年前后发生了一次明显的跃变, 夏季降水明显减少, 出现持续干旱。许多学者从热带海洋方面分析了中国夏季降水异常的成因 (Chang et al., 2000a, 2000b; Huang, 2001; Yang et al., 2004)。他们指出, 热带中东太平洋海温在 20 世纪 70 年代后期开始偏暖造成我国华北地区夏季降水偏少, 长江流域降水偏多。由于季风是由海陆热力差异所致, 因此, 不仅海

洋的热力变化可以影响我国的气候变化, 陆面过程同样可以影响我国气候变化。欧亚大陆积雪与东亚季风的关系已经有了很多研究 (刘华强等, 2003; Zhang et al., 2004; Wu et al., 2007), 其结果指出欧亚大陆前冬春季雪盖偏多, 该年夏季的长江流域降水也偏多, 华北地区夏季降水则偏少。最近, 周连童等 (2006b) 研究得出中国西北干旱、半干旱区春季感热异常与我国华北地区夏季降水存在反相关关系。大气环流的年代际气候变化也对我国夏季降水有重要影响 (Wang, 2001; 卫捷等, 2003; 张庆云等, 2003; 吕俊梅等, 2004; 黄刚等, 2004; Ren et al., 2004), 其研究指出对流层高、低层的大气环流均发生了年代际变化。并且, 北大西洋涛动、北太平洋涛动和北极涛动等大气环流系统也都发生了年代际变化, 对我国气候有着重要的影响 (Li et al., 1999; 穆明权等, 2000; Ju et al., 2004)。本文将从对流层高、中、低层系统详细分析大气环流在 1977 年前后发生的年代际变化, 并分析其对我国夏季降水的影响, 特别是对华北地区产生持续性干旱的影响。鉴于 NCEP/NCAR 再分析资料的海平面气压和位势高度场的资料夸大了 1977 以前的变化, 特别是蒙古高原及其周围的海平面气压和高层位势高度在 1970 年以前明显与其他资料有差别 (Inoue et al., 2004; 黄刚, 2006), 本文将利用 ERA-40 再分析资料从对流层低、中、高层分析引起华北持续干旱的欧亚大陆及东亚大气环流系统的年代际变化特征, 特别是对华北地区从

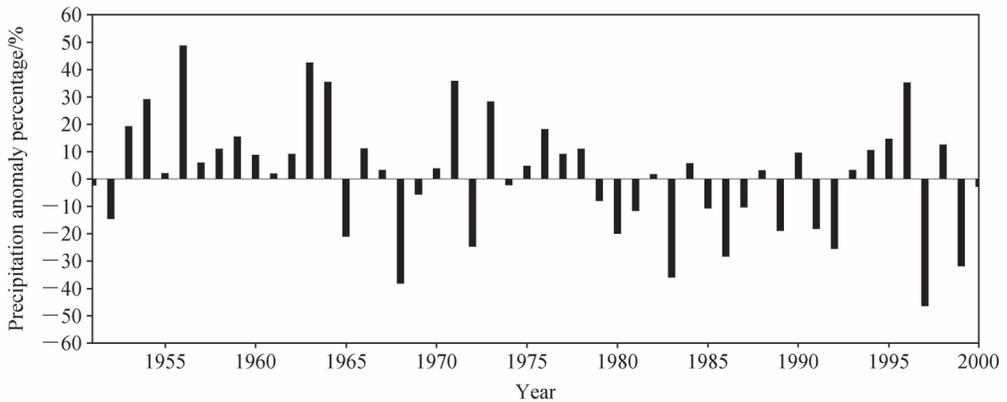


图 1 华北地区夏季降水距平百分率逐年变化。取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值

Fig. 1 Time series variations of summer (JJA) precipitation anomaly in North China. The climatological monthly mean is based on the period 1961—1990

70年代中后期开始迄今持续性干旱的影响。

2 华北地区夏季降水的年代际变化特征

本文选择华北地区的 16 个观测台站 (周连童

等, 2003)。图 1 表示华北地区夏季降水的逐年变化。从图可以看到, 华北地区夏季降水距平在 50 年代基本高于平均值, 但是从 1965 年开始, 降水距平开始减少, 特别是 1977 年后, 降水距平进一步减少。因此说明, 华北地区夏季降水从 1965 年

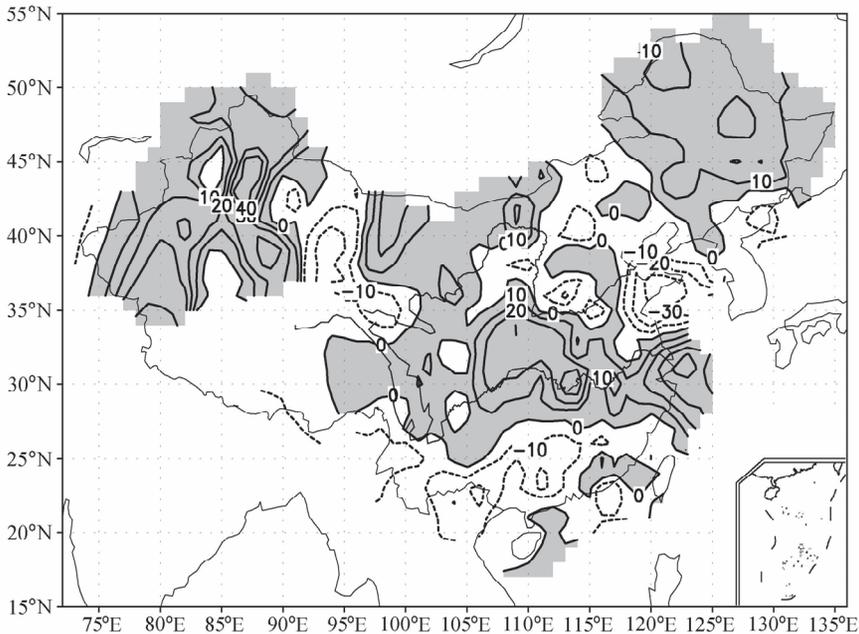


图 2 1977~2000 年与 1966~1976 年平均的中国夏季降水距平百分率之差 (%)。取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值
Fig. 2 Difference between the summer (JJA) precipitation anomalies (percentage) averaged for 1977—2000 and those averaged for 1966—1976 in China (%). The climatological monthly mean is based on the period 1961—1990

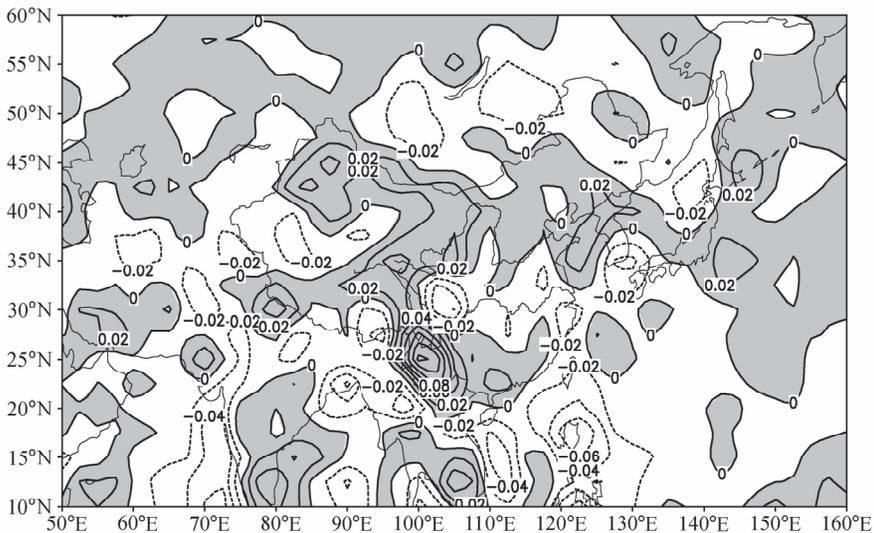


图 3 1977~2000 年与 1966~1976 年平均的东亚夏季风输送水汽通量散度之差 (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。取 1961~1990 年 30 年各月平均值作为气候值

Fig. 3 Difference between the divergence of summer (JJA) water vapor flux averaged for 1977—2000 and those averaged for 1966—1976 in China (units: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$). The climatological monthly mean is based on the period 1961—1990

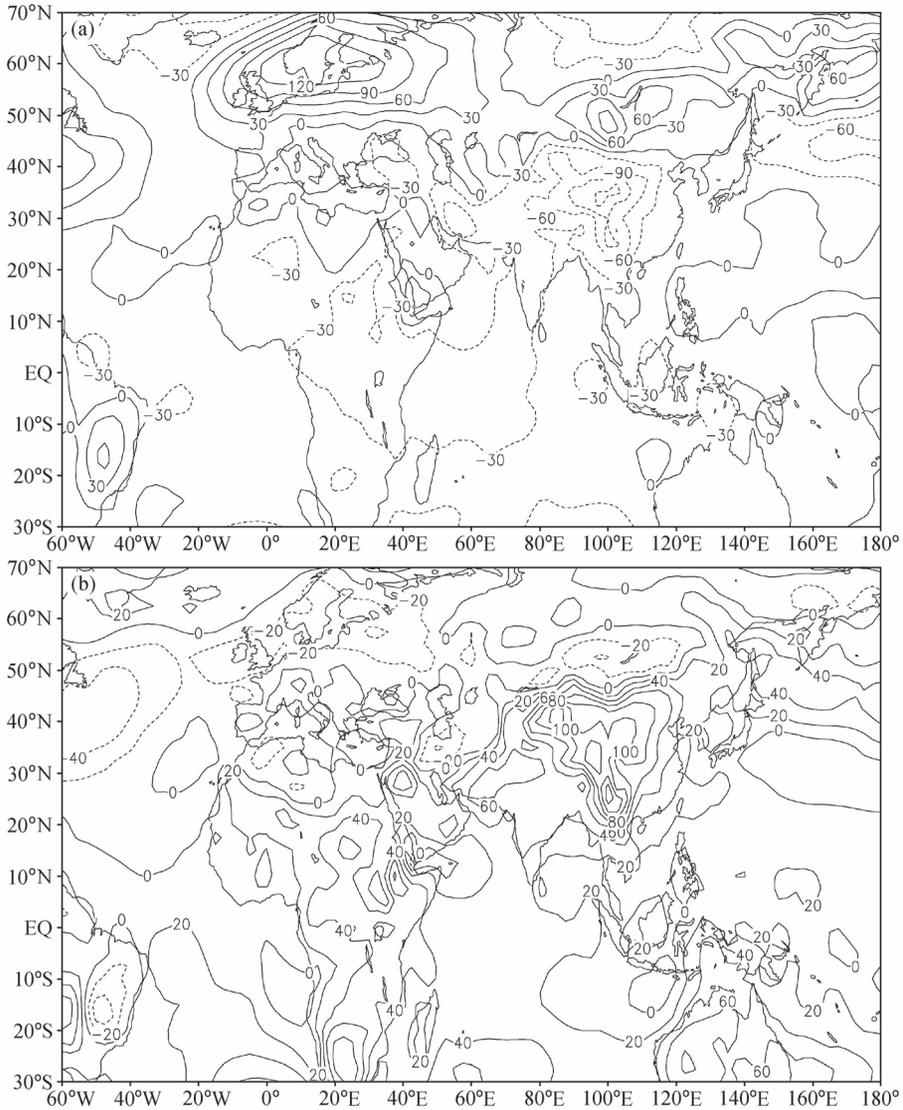


图4 欧亚大陆夏季海平面气压距平分布(单位: Pa): (a) 1966~1976年平均; (b) 1977~2000年平均。取1961~1990年30年各月平均值作为气候值

Fig. 4 Distributions of anomalous SLP in summer (JJA) averaged for 1966—1976 (a) and 1977—2000 (b), respectively (units: Pa). The climatological monthly mean is based on the period 1961—1990

开始减少,特别是1977年之后,明显减少,且在这个时期华北出现持续干旱。由于降水的大幅度减少,造成华北地区1977年后可利用水资源的严重缺乏,给当地工农业生产和人民生活用水带来严重的困难。

为了清楚地显示我国夏季降水在1977年前后的气候跃变,本文分析了1977~2000年与1966~1976年平均的全国夏季降水距平百分率之差(见图2)。从图可以看到:相比于1966~1976年,1977~2000年华北地区夏季降水明显减少,并比气候平均值偏少30%,出现了持续性干旱;华南

地区降水也有一定减少;而长江流域夏季降水明显增多,并比气候平均值偏多20%以上;但西北地区从1977年起降水明显增多,并比气候平均值偏多40%。此外,从图还可以看到我国夏季降水的年代际变化从南到北呈现出一个与东亚-太平洋遥相关型(EAP)相似的波列分布。

Yan et al. (1990)指出我国华北地区夏季气候在1965年前后发生了一次跃变。然而,本文分析结果表明20世纪70年代中后期的气候跃变要比60年代中期的更加明显。华北地区夏季降水,60年代中期开始偏少,70年代中后期持续性偏

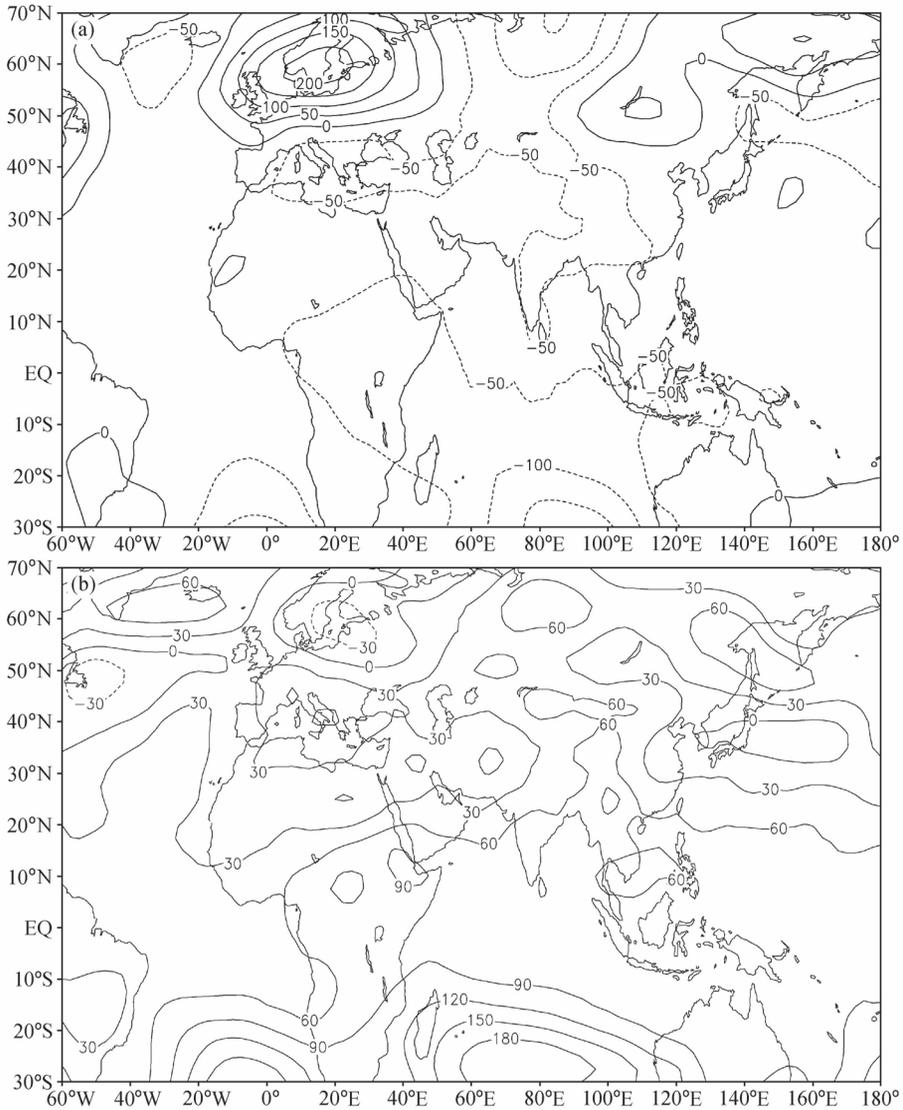


图5 同图4, 但为500 hPa位势高度(单位: gpm)

Fig. 5 As in Fig. 4, but for geopotential height at 500 hPa (units: gpm)

少, 长江流域和江淮流域降水却异常偏多, 同样西北地区降水也增多了。因此, 70年代中后期发生在我国的气候跃变不仅范围广, 而且时间长。

3 水汽输送的年代际变化特征

本文根据水汽矢量公式(周连童等, 2003)进一步计算了水汽通量辐合辐散的年代际变化特征。图3表示1977~2000年与1966~1976年平均的东亚夏季风输送水汽通量散度之差(差值 >0 表示辐散, 差值 <0 表示辐合)。如图3所示, 相比1966~1976年, 1977~2000年华北地区和华南地区的夏季水汽通量辐散, 而江淮流域和西北西

部地区的夏季水汽通量辐合。也就是说1977年之后, 华北地区和华南地区的夏季水汽通量异常辐散造成了这2个地区夏季降水偏少, 而江淮流域、西北西部地区 and 东北北部地区的夏季水汽通量异常辐合造成了这3个区域夏季降水偏多。并且, 从南到北呈现出的波列分布与图2基本一致。

4 欧亚大陆上空对流层中下层大气环流系统的年代际变化特征

4.1 海平面气压的年代际变化特征

下面分析华北夏季降水减少引起持续性干旱的大气环流异常型。

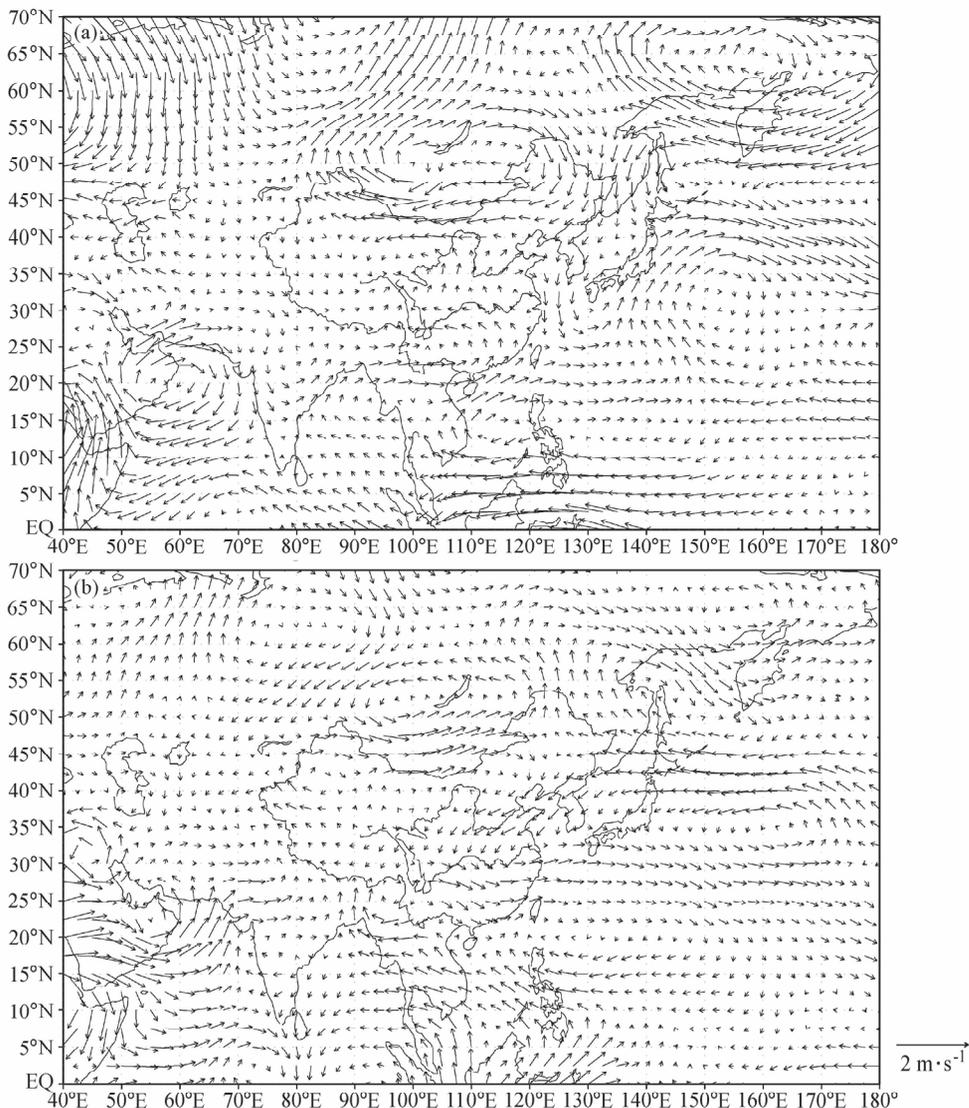


图 6 同图 4, 但为 700 hPa 风场
Fig. 6 As in Fig. 4, but for wind field at 700 hPa

首先分析海平面气压的年代际变化特征。图 4 表示欧亚大陆夏季海平面气压 1966~1976 年平均和 1977~2000 年平均的距平变化特征。从图 4a 中可以看到, 1966~1976 年我国大陆大部分地区的气压为负距平, 低压中心位于我国中部地区, 而东南沿海地区气压为正距平; 1977~2000 年如图 4b 所示, 海平面气压发生了跃变, 我国大陆地区出现明显的海平面气压正距平。

以上分析结果可见, 海平面气压在 1977 年前后发生了明显的跃变, 1977 年之后我国大陆的气压转变为正距平, 气压显著增强。因此, 根据郭其蕴 (1983) 的研究, 1977 年之后西太平洋上空

与我国大陆之间的气压差变小, 导致了东亚夏季风的减弱。

4.2 500 hPa 高度场的年代际变化特征

图 5 表示欧亚大陆上空 500 hPa 夏季高度场 1966~1976 年和 1977~2000 年平均的距平场。从图 5a 可以看到, 1966~1976 年 500 hPa 位势高度出现了“—”“+”“—”“+”“—”的波列结构, 正距平中心出现在欧洲大陆的西部和贝加尔湖, 负距平中心出现在格陵兰和我国中部地区; 从图 5b 可以看到, 1977~2000 年最明显的正距平中心出现在我国大部分地区和格陵兰, 负距平中心出现在欧洲大陆西部和朝鲜半岛和日本海附近。

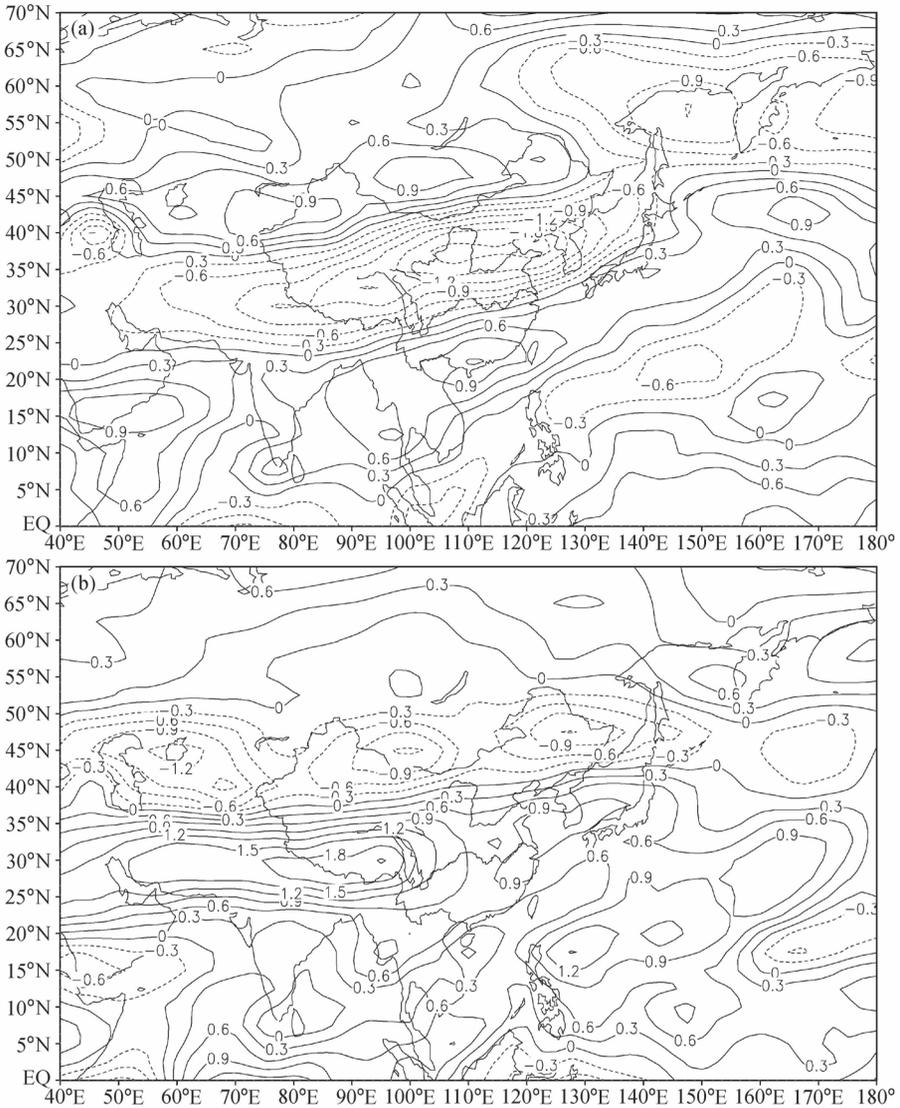


图7 同图4, 但为200 hPa 纬向风场(单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 7 As in Fig. 4, but for zonal wind field at 200 hPa (units: $m \cdot s^{-1}$)

综上所述, 500 hPa 高度场出现明显的年代际跃变。特别是1977年后欧亚大陆上空的高度距平出现明显的跃变, 70年代中后期我国大陆上空的负距平转变为正距平, 而华北以东的朝鲜和日本海附近出现负距平。华北处于脊前槽后, 不利于华北地区夏季的降水。

4.3 700 hPa 风场的年代际变化特征

由于700 hPa 高度上的风场可以很好的表现出季风环流的特征, 因此, 本节将分析对流层低层700 hPa 风场1966~1976年和1977~2000年平均的年代际变化特征。图6表示700 hPa 夏季风场1966~1976年和1977~2000年平均的距平

场。从图6a可以看到, 1966~1976年贝加尔湖和蒙古国上空有明显的反气旋环流距平, 我国华北地区上空有气旋型环流距平, 因此, 在我国华北地区出现了偏南风距平, 孟加拉湾和中国南海也出现了南风距平, 这有利于水汽输送到华北地区, 造成华北地区降水偏多; 1977~2000年如图6b所示, 贝加尔湖出现明显的气旋型环流距平, 华北地区出现反气旋环流距平, 所以我国华北地区出现了明显的偏北风距平, 孟加拉湾和我国东部沿海分别出现了东北风距平和西风距平, 因而暖湿气流不易输送到我国华北地区, 造成该地区降水偏少, 且出现持续性干旱。

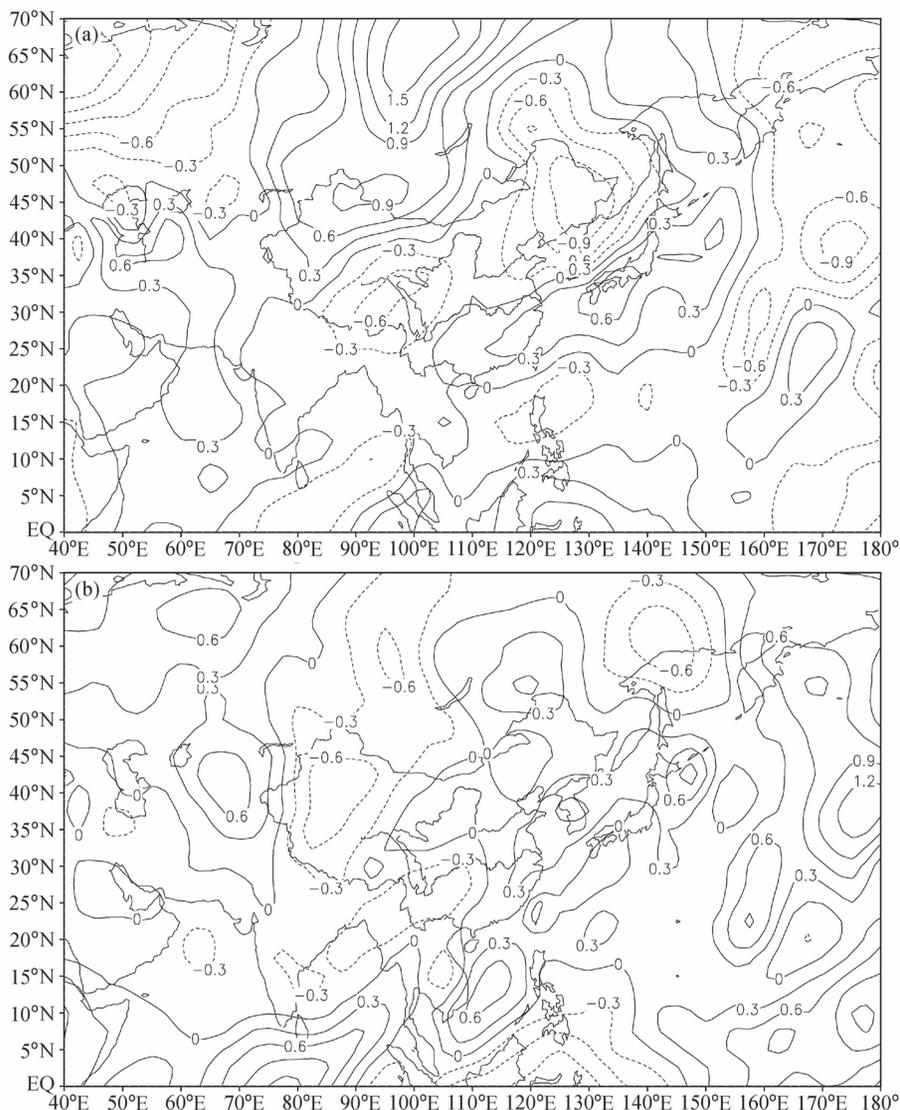


图 8 同图 4, 但为 200 hPa 经向风场 (单位: $m \cdot s^{-1}$)

Fig. 8 As in Fig. 4, but for meridional wind field at 200 hPa (units: $m \cdot s^{-1}$)

综上所述, 欧亚大陆, 特别是东亚上空对流层下层环流场都发生了明显的年代际跃变。1977 年之后, 华北地区 700 hPa 上空由偏南风异常转变为偏北风异常, 因而南方水汽不容易输送到我国华北地区, 造成华北地区夏季降水偏少。

5 欧亚大陆上空对流层上层大气环流的年代际变化特征

5.1 200 hPa 纬向风场的年代际变化特征

图 7 表示欧亚大陆上空 200 hPa 夏季纬向风场 1966~1976 年和 1977~2000 年平均的距平场。1966~1976 年如图 7a 所示, 我国大陆上空 200

hPa 高度上 25°N~40°N 区域出现东风异常, 40°N 以北为西风异常, 即西风急流位置偏北, 有利于华北地区的降水; 1977~2000 年如图 7b 所示, 200 hPa 纬向风场发生了明显的变化, 40°N 以北出现东风异常, 30°N 出现明显的西风异常, 即西风急流位置偏南, 不利于华北地区夏季降水。

上述分析可见, 我国大陆上空 200 hPa 的纬向风场发生了明显的年代际跃变, 特别是 1977 年之后。

5.2 200 hPa 经向风场的年代际变化特征

图 8 表示 1966~1976 年和 1977~2000 年平均的欧亚大陆夏季经向风场距平分布。如图 8a 所

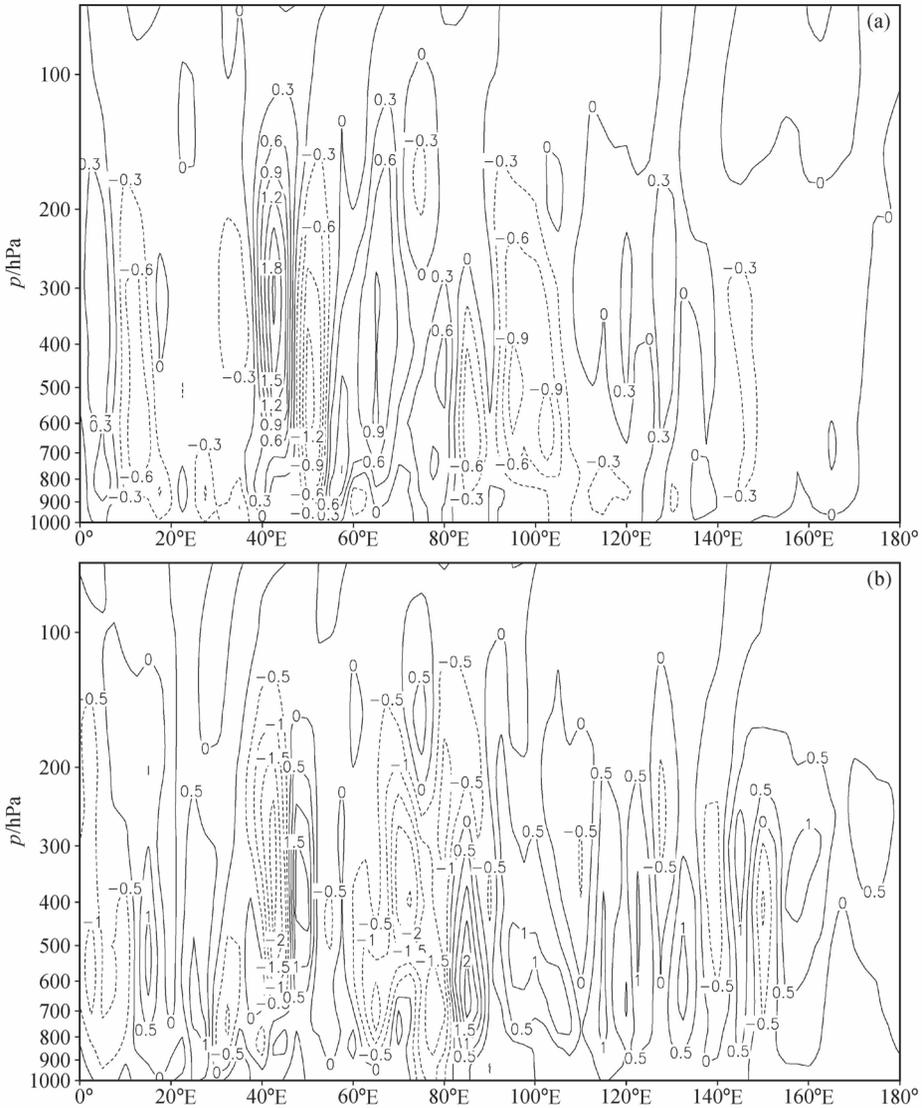


图9 同图4, 但为纬向 35°N~45°N 平均的垂直速度 (单位: Pa · s⁻¹)

Fig.9 As in Fig.4, but for omega averaged over 35°N-45°N (units: Pa · s⁻¹)

示, 1966~1976 年 200 hPa 经向风场自西向东在中纬度出现“-”“+”“+”“+”波列分布; 1977~2000 年如图 8b 所示, 200 hPa 经向风场距平发生了明显的跃变, 自西向东在中纬度出现“+”“-”“+”“-”波列分布。

以上分析结果可见, 欧亚大陆特别是东亚上空 200 hPa 经向风场 1977 年之后发生了明显的年代际跃变。说明了我国华北地区夏季降水的年代际变化不仅与该地区上空对流层下层的环流异常有关, 而且与对流层上层沿西风急流的准定常扰动异常有关。Lu et al. (2002) 指出夏季东亚上空对流层上层沿西风急流存在一个经向风异常遥

相关型。本文分析结果表明, 这个遥相关型存在着年代际变化特征, 对我国夏季气候异常有很大影响。

6 垂直速度的年代际变化特征

前面分析结果表明, 东亚和中亚上空的对流层上层或者下层的环流场都发生了明显的年代际变化, 这势必会引起垂直环流的变化。为此, 本节分析欧亚大陆上空垂直速度 (omega) 的年代际变化特征。图 9 为 1966~1976 年和 1977~2000 年平均的欧亚大陆上空夏季纬向 35°N~45°N 平均

的垂直速度高度-经度剖面 ($\omega > 0$ 表示下沉运动, $\omega < 0$ 表示上升运动)。从图 9a 中可以看到, 1966~1976 年 $100^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ 附近出现垂直速度负距平, 也即华北地区出现上升运动; 然而到了 1977~2000 年如图 9b 所示, 垂直速度发生了明显的跃变, $100^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 从对流层低层到高空都出现垂直速度正距平, 也就是说华北地区上空的下沉气流明显增强。

综上所述, 我国西北和华北地区上空的垂直速度在 1977 年前后发生了明显的跃变, 1977 年之后, 华北地区上空的下沉气流明显增强, 不利于华北地区夏季的降水。

7 结论

本文利用中国台站降水资料分析了华北地区夏季降水的年代际变化特征, 并利用欧洲中心 ERA-40 再分析资料从海平面气压和对流层低层到高层的风场、高度场分析了华北夏季降水对应的环流异常型。这些环流异常型都不利于华北地区夏季的降水。总结如下:

1977~2000 年即华北地区夏季持续干旱时期: 我国大陆海平面气压从负距平跃变为正距平, 海平面气压显著增强, 这造成海陆间气压差减弱, 东亚季风减弱; 欧亚大陆 500 hPa 高度场距平呈现的遥相关波列结构发生明显的转变, 在我国大陆上空由负高度距平跃变为正高度距平; 我国东西部上空 700 hPa 环流发生明显转变, 华北地区上空出现反气旋型环流异常, 且偏北风距平加强; 我国大陆上空 200 hPa 的纬向风场发生了明显的年代际跃变, 华北地区上空西风异常明显偏弱, 而长江流域上空西风异常明显增强; 我国西北地区上空的上升气流增强, 而华北地区上空的下沉气流明显增强, 并且出现水汽辐散。

参考文献 (References)

Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000a. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and the tropical Pacific SSTs. Part I. Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13: 4310-4325.
Chang C P, Zhang Y, Li T. 2000b. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and the tropical

Pacific SSTs. Part II. Meridional structure of the monsoon [J]. *J. Climate*, 13: 4326-4340.
Chao Y, Ghil M, McWilliams J C. 2000. Pacific Interdecadal Variability in This Century's Sea Surface Temperatures [J]. *Geophysical Research Letters*, 27: 2261-2264.
Ding Yihui, Wang Zunya, Sun Ying. 2007. Inter-decadal variability of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1615.
Dong Buwen, Sutton S T. 2005. Mechanism of interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled Ocean-Atmosphere GCM [J]. *J. Climate*, 18: 1117-1135.
Ghil M, Vautard R. 1991. Interdecadal oscillations and the warming trend in global temperature time series [J]. *Nature*, 350: 324-327.
郭其蕴. 1983. 东亚夏季风指数及其变化的分析. *地理学报*, 38 (3): 207-216. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 38 (3): 207-216.
黄刚, 周连童. 2004. 青藏高原西側绕流风系对东亚夏季风和我国华北地区夏季降水的关系 [J]. *气候与环境研究*, 9 (2): 316-330. Huang Gang, Zhou Liantong. 2004. The variability of the wind system circulating round the west side of the Tibetan Plateau and its relation to the East Asian summer monsoon and summer rainfall in North China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (2): 316-330.
黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 310-320. Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in Northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (3): 310-320.
黄荣辉, 徐子红, 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 (4): 465-475. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 465-475.
Hu Zengzhen. 1997. Inter-decadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 102: 19403-19412.
Huang R H. 2001. Decadal variability of the Summer Monsoon rainfall in East Asia and Its Association with the SST Anomalies in the tropical Pacific [J]. *CLIVAR Exchanges*, 6: 7-8.
Inoue T, Matsumoto J. 2004. A comparison of summer sea level pressure over East Eurasia between NCEP/NCAR reanalysis and ERA-40 for the period 1960-99 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*,

82; 951-958.

- Ju Jianhua, Lu Junmei, Cao Jie. 2004. The interdecadal variation of the Arctic Oscillation and its effect on the severity of drought in Northern China [C]// The Forth International Symposium on Asian Monsoon System (ISAM4), Kunming, China, 24-29 May, 2004, 366-372.
- Li Chongyin, Li Guilong. 1999. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (21): 1983-1987.
- 刘华强, 孙照渤, 朱伟军. 2003. 青藏高原积雪与亚洲季风环流年代际变化的关系 [J]. 南京气象学报, 26 (6): 734-739. Liu Huaqiang, Sun Zhaobo, Zhu Weijun. 2003. Relationship of inter-decadal variability of snow over the Tibetan plateau and the Asian summer monsoon circulation [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 26 (6): 734-739.
- Lu R Y, 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.
- 吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 2004. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响 [J]. 热带气象学报, 20 (1): 73-80. Lu Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. 2004. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (1): 73-80.
- 穆明权, 李崇银. 2000. 大气环流的年代际变化 I: 观测资料的分析 [J]. 气候与环境研究, 5 (3): 233-241. Mu Mingquan, Li Chongyin. Interdecadal variations of atmospheric circulation I. Observational analyses [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 5 (3): 233-241.
- Ren baohua, Lu Riyu, Xiao Ziniu. 2004. A possible linkage in the interdecadal variability of rainfall over North China and the Sahel [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (5): 699-707.
- Torrence C, Webster P J. 1999. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon system [J]. J. Climate, 12: 2679-2690.
- Wang B. 1995. Interdecadal changes in El Nino onset in the last four decades [J]. J. Climate, 8: 267-285.
- Wang Huijun. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (3): 376-385.
- Wu R G, Kirtman B P. 2007. Observed relationship of spring and summer East Asian rainfall with winter and spring Eurasian snow [J]. J. Climate, 20: 1258-1304.
- 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2003. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征 [J]. 应用气象学报, 14 (2): 140-151. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. Characteristics of atmospheric circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades [J]. Journal of Applied Meteorological Sciences (in Chinese), 14 (2): 140-151.
- Yan Z W, Ji J J, Ye D Z. 1990. Northern hemispheric summer climate jump in 1960's [J]. Science in Climate (Seri. B), 33 (1): 61-70.
- Yang Fanglin, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: linkage to sea-surface temperatures [J]. International Journal of Climatology, doi: 10.1002/joc.1094.
- Zhang Y, Li T, Wang B. 2004. Decadal change of snow depth over the Tibet Plateau in spring: The associated circulation and its relationship to the East Asian summer monsoon rainfall. Journal of Climate [J], 17: 2780-2793.
- Zhang Yuan, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900-93 [J]. J. Climate, 10: 1004-1020.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 307-318.
- Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the Northern China and association with the circulation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 307-318.
- 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 (3): 274-290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274-290.
- 周连童, 黄荣辉. 2006a. 华北地区降水、蒸发和降水蒸发差的时空变化特征 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 280-295. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006a. Characteristics of temporal and spatial variation of precipitation, evaporation and difference between precipitation and evaporation in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 280-295.
- 周连童, 黄荣辉. 2006b. 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): 1-13. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006b. 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): 1-13.