

周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系. 大气科学, 2008, **32** (6): 1276~1288
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi-arid regions of Northwest China and its relation to summer precipitation in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (6): 1276~1288

中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征 及其与中国夏季降水的关系

周连童 黄荣辉

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 1951~2000 年我国西北干旱、半干旱区地温、气温和表面风场逐日 4 个时次 (02、08、14 和 20 时) 的台站观测资料, 计算并分析了我国西北干旱、半干旱区春、夏季感热的年代际变化特征。分析结果表明: 中国西北干旱、半干旱区春、夏季感热输送出现相反的年代际变化特征, 春季感热从 20 世纪 70 年代中期开始增强, 而夏季感热却减弱了。并且还分析了中国西北干旱、半干旱区 4 月感热与中国夏季降水的相关关系, 其结果表明了中国西北干旱、半干旱区的春季感热输送与中国夏季降水有很好的相关关系, 其中正相关区分别位于东北地区 and 长江中下游地区, 而负相关区分别位于华北地区和西南地区。作者还利用欧洲中心 (ECMWF) 1958~2000 年再分析资料分析水平和垂直环流的年代际变化特征, 在 1977~2000 年期间, 中国西北地区春季感热增强, 使此地区上升气流增强, 华北地区上空下沉气流增强, 不利于华北地区夏季降水偏多, 并出现持续性干旱, 而长江流域的上升气流增强有利于长江中下游地区夏季降水增多, 出现洪涝。因此, 西北地区春季感热异常可以作为我国夏季降水的一个预报因子。

关键词 干旱、半干旱区 感热 年代际变化 纬圈环流 经圈环流

文章编号 1006-9895 (2008) 06-1276-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

Interdecadal Variability of Sensible Heat in Arid and Semi-Arid Regions of Northwest China and Its Relation to Summer Precipitation in China

ZHOU Liantong and HUANG Ronghui

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

Abstract The characteristics of interdecadal variability of sensible heat are analyzed by using the observed daily data of surface temperature, surface air temperature and surface wind field from 1951 to 2000. The analysis results show that an obvious interdecadal variability of the sensible heat appears in Northwest China. Before the late 1970s, spring (MAM) sensible heat anomalies were negative, but its anomalies became largely positive from the late 1970s to 2000. Summer (JJA) sensible heat anomalies were positive before 1977, but its anomalies became largely negative from the late 1970s to 2000. The correlations between summer precipitation in whole China and the April sensible heat averaged for 38 stations show that the positive correlation regions are in Northwest China, Northeast China and the Yangtze River basin, but the negative correlation regions are in the east of North China and Southwest China.

收稿日期 2007-03-19, 2007-05-22 收修定稿

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规划项目 2004CB418303, 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, 主要从事气候年代际变化及机理研究。E-mail: zlt@mail.iap.ac.cn

Moreover, the characteristics of interdecadal variability of zonal and meridional circulation are analyzed by using the ERA-40 reanalysis data from ECMWF from 1958 to 2000. The analysis results show that the descent flow occurred over North China, but ascent flow occurred over Northwest China and the middle and lower reaches of the Yangtze River. The results also show that enhanced sensible heat causes ascent flow strengthening over Northwest China, and descent flow strengthening over North China, which maybe resulted in summer precipitation decreasing and persistent drought occurring in North China and summer precipitation increasing and flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River. Therefore, the spring sensible heat anomalies in Northwest China may be a forecast factor for summer rainfall in North China.

Key words arid and semi-arid regions, sensible heat, interdecadal variability, zonal circulation, meridional circulation

1 引言

年代际气候变化 (interdecadal climate variability) 是国际气候学研究的热门课题之一, 也是气候变化与可预测性研究计划 (CLIVAR) 的重要研究内容之一。为此, 世界许多科学家对于全球大气和海洋的年代际变化做了许多研究^[1~6], 指出由于太平洋从 20 世纪 70 年代中后期迄今的 PDO 处于正位相, 导致 ENSO 事件频繁发生和北半球气候异常频繁发生。气候年代际异常也严重影响着我国的气候变化, 导致我国旱涝灾害频繁发生。黄荣辉等^[7, 8]和周连童和黄荣辉^[9]的研究表明, 从 1976 年后华北地区夏季降水减少, 发生了持续性干旱, 而长江、淮河流域降水增多, 洪涝灾害频发发生; 我国夏季降水的年代际变化主要是由于包括海-陆-气的东亚气候系统的异常所造成, 特别是赤道中东太平洋 SST 在 20 世纪 70 年代后期出现类似于 ENSO 循环的年代际变化, 它严重地影响我国夏季降水, 这表明热带东太平洋出现了“类似于厄尔尼诺型”分布的年代际海温距平。这不仅引起东亚和西太平洋上空 EAP 型遥相关环流异常分布的年代际变化, 使得从 1976 年后迄今东亚夏季风变弱、西太平洋热带高压偏南、偏西, 而且引起热带 Walker 环流的变化。由于热带 Walker 环流的年代际变化, 引起从 20 世纪 70 年代中后期到现在北非上空下沉气流的加强, 从而使得萨赫勒以东地区上空反气旋环流异常增强, 且由于遥相关波列的传播, 从而导致我国华南上空反气旋环流距平的增强。此外, 中高纬度欧亚型遥相关环流异常分布也发生了年代际变化, 使得 1976 年之后我国华北地区上空出现反气旋环流异常。这些使得到达华北的偏南季风气流减弱和长江、淮河流域水汽输送的辐合, 从

而导致我国旱涝的年代际变化。张庆云等^[10]、卫捷等^[11]和李新周等^[12]从大气环流方面分析华北地区干旱的可能成因; 黄刚和周连童^[13]从青藏高原西侧绕流方面分析绕流减弱, 造成夏季风在 1977 年之后减弱, 使华北地区上空自 1977 出现北风距平, 造成华北地区降水偏少; 吕俊梅等^[14]指出东亚夏季风从 20 世纪 70 年代中期左右由强变弱。这种大气环流背景的年代际变化造成 20 世纪 70 年代中期以后我国华北地区干旱少雨。Ren 等^[15]分析华北地区与萨赫勒 (Sahel) 地区夏季降水年代际变化的可能联系, 指出萨赫勒地区是从 1965 年之后出现明显的干旱, 华北地区从 20 世纪 70 年代后期之后出现明显干旱, 并且他们从高低层大气环流的年代际变化特征来说明华北地区和萨赫勒地区干旱的可能成因及其联系。

上述研究都表明热带太平洋热力状况的年代际变化影响北半球环流和东亚季风的年代际变化, 从而影响中国气候的年代际变化, 特别是影响华北地区夏季降水的年代际变化。然而, 季风是海陆热力差异所造成, 它不仅与海洋热力变化有关, 而且也与陆地热力状况的变化有关。因此, 本文将分析我国西北干旱、半干旱区陆面感热输送异常及其对我国夏季降水的影响。我国西北地区, 它包括内蒙古西部、甘肃、宁夏、青海和新疆等省和自治区, 位于 107°E 以西, 35°N 以北, 它地处干旱、半干旱气候区, 这里大部分地区的年降水量不足 200 mm, 有的地区甚至不足 50 mm。在春、夏季, 我国西北和中亚由于缺乏水汽, 天空经常少云并受到强太阳辐射的直接辐射, 地面温度很高, 加上这里大片陆地不是沙漠就是戈壁, 对太阳辐射的吸收很强, 有的地方中午地面温度可达 60℃。布和朝鲁等^[16]利用 NCEP/NCAR 再分析资料研究夏季欧亚大陆的

陆面感热通量分布,指出夏季我国干旱、半干旱区在整个欧亚大陆上是陆面感热通量最强的区域之一,而潜热通量最弱。根据国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的形成机理与预测理论研究”所进行的“我国西北典型干旱区陆-气相互作用观测试验”四年多的观测结果^[17],在夏季中午,敦煌戈壁区经常可观测到 1000 W/m^2 的太阳辐射,最大可达 1038.1 W/m^2 ,白天地表净辐射可达 600 W/m^2 ,夏季这个区域的感热通量经常可达到近 400 W/m^2 ,为潜热的 50 倍。这些都表明在我国西北干旱区热量输送通量主要是感热。

上述研究表明我国西北干旱、半干旱区成为整个欧亚大陆上陆面感热最强的地方之一,可称为欧亚大陆中的“热垫”。因此,它的热力变化肯定对东亚夏季风环流也有很大影响。然而,目前有关这方面的研究还比较少,沈学顺和本本昌秀^[18]分析了欧亚大陆春季表地气温的变化对我国江南初夏梅雨的影响。周连童和黄荣辉^[19]分析了我国西北干旱、半干旱区地气温差 ($T_s - T_a$) 的年代际变化对我国夏季降水的影响。由于地气温差仅仅是感热的一个变量,它不能完全反映感热的变化,因此有必要进一步研究中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化及其对我国气候年代际变化的影响。为此,本文利用地表风场、地表温度和气温观测资料,根据观测实验所得到的热量输送系数计算分析我国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化以及对我国夏季降水年代际变化的影响。

2 中国西北干旱、半干旱区感热输送的年代际变化特征

为了分析我国西北干旱、半干旱地区感热的年代变化特征,本文利用中国西北干旱、半干旱区 38 个台站的地温、气温和地面附近风场等要素的观测资料来计算感热输送值(38 个台站的位置如图 1c 所示)。

地表感热输送计算可采用下列总体输送公式:

$$S = c_p \rho C_h V (T_s - T_a), \quad (1)$$

其中, S 为地表感热, c_p 是空气的定压比热常数, ρ 是地面空气密度, V 是地面 10 m 风场矢量, T_a 是地面 2 m 气温, T_s 为地面 0 cm 土壤温度, C_h 是地面湍流热量交换系数。对于本节的感热计算,我们取 $c_p = 1004.67 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\rho = 1.2928 \text{ kg/m}^3$,

$C_h = 2.10 \pm 0.92 \times 10^{-3}$ (张强等^[20]根据敦煌戈壁地区计算得到 C_h ,此种计算假定 38 个气象站下垫面为类似敦煌戈壁,采用戈壁下垫面的感热交换系数,由此计算的感热也只能作为参考值), T_a 、 T_s 和 V 利用 38 个台站的逐日四个时次 (02、08、14 和 20 时) 观测资料。

下面,利用公式 (1) 和地温、气温和风场资料计算每日 4 个时次的感热输送数据,然后由每日 4 个时次的感热输送值计算出月平均资料。图 1a、b 虚线表示我国西北干旱、半干旱地区 38 个台站平均的春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月) 感热输送距平的逐年变化,实线是利用 2 次多项式拟合而成的趋势线。如图 1a 虚线所示,我国西北干旱、半干旱区春季感热输送在 20 世纪 60 年代到 70 年代初大多数年为负距平,从 20 世纪 70 年代中期开始,感热输送出现持续性的正距平。从趋势线 (图 1a 实线) 可以更显著地看到,此地区春季感热输送从 1977 年开始明显增强。这说明我国西北地区春季感热输送从 20 世纪 70 年代中后期开始明显增强。

然而,西北干旱、半干旱区夏季感热输送的变化与春季有所不同。如图 1b 虚线所示,在 20 世纪 60 年代到 70 年代感热输送距平大多数年为正值,但是从 20 世纪 70 年代末开始,夏季感热输送大多数年出现负距平,特别是 20 世纪 80 年代后期到 90 年代,感热输送减弱得更加显著。这个变化可以更清楚地从夏季感热输送的变化趋势 (图 1b 实线) 看到,我国西北干旱、半干旱区夏季感热输送从 20 世纪 70 年代末开始明显减弱。这与文献^[19]所计算的地气温差有所不同,文献^[19]计算的春、夏季地气温差均从 20 世纪 70 年代后期开始增强。这主要是由于西北地区夏季地表风场从 20 世纪 70 年代开始明显减弱 (图略),春季地表风场没有明显变化 (图略),所以造成春季感热输送从 20 世纪 70 年代中期开始增强,夏季感热输送开始减弱。西北地区夏季感热减弱的原因也可能是由于西北地区 1977 年之后夏季降水偏多造成的,文献^[9 和 19]都分析了我国西北地区夏季降水明显增多。

综上所述,西北干旱、半干旱区春季感热输送存在明显的年代际变化特征,春季感热输送从 20 世纪 70 年代后期开始显著增强;而夏季感热输送却从 20 世纪 70 年代末开始明显减弱,它与春季感

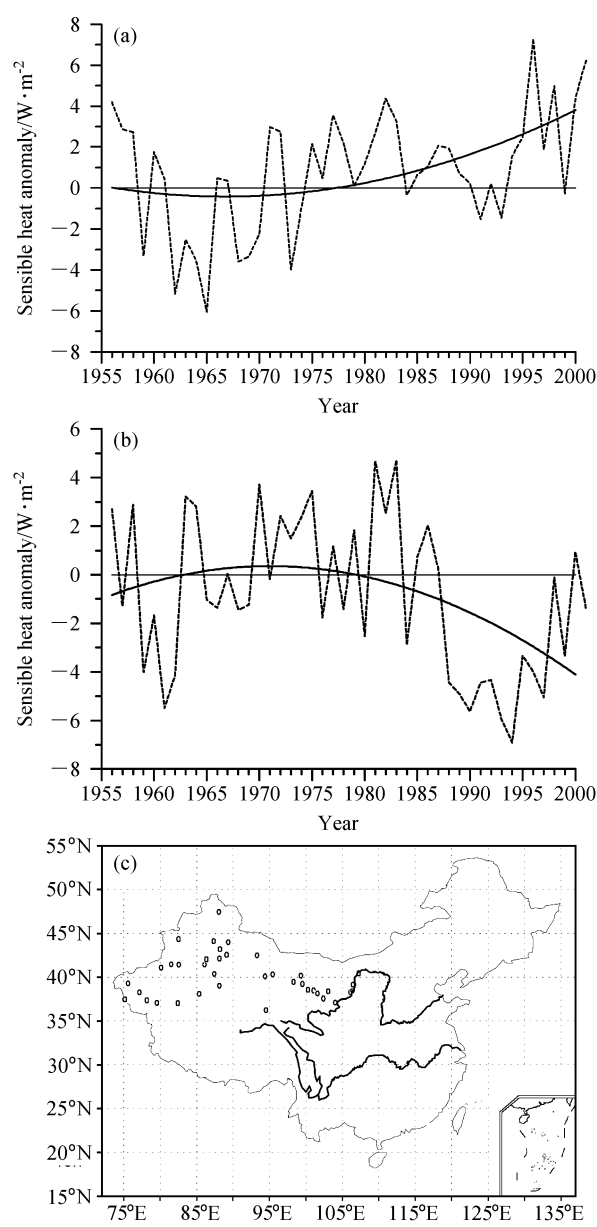


图1 我国西北干旱、半干旱地区38个台站平均的春季(a)、夏季(b)感热输送距平逐年变化(虚线)和趋势线(实线);(c)38个台站的分布位置。取1961~1990年30年各月平均值作为气候值(下同)

Fig. 1 Interannual variations (dashed line) and the trends (solid line) of sensible heat anomaly in (a) spring (MAM) and (b) summer (JJA) averaged for 38 stations in the arid and semi-arid regions of Northwest China and (c) location of 38 stations. The 30-year (1961 - 1990) climatological means of sensible heat in various months are taken as their normals (the same below)

热输送变化有着相反的年代际变化趋势,这可能是由于夏季表面风场减弱造成的。

为了更清楚地看到我国西北干旱、半干旱区感

热输送的年代际变化,下面分析我国西北干旱、半干旱区春、夏季感热输送在20世纪50~90年代的分布。图2表示我国西北干旱、半干旱地区38个台站春季感热输送在1950~1990年代的变化(1950年代资料不足10年)。如图2a所示,我国西北干旱、半干旱区春季感热输送在1950年代总体偏强,大部分地区的感热输送距平高于平均值;到了1960年代(图2b),春季感热输送在西北地区开始偏弱,在西北地区的中北部和东部的感热输送高于平均值,西北地区的西部已经低于平均值;到了1970年代(图2c),春季感热输送在西北地区的中部低于平均值,而在西北地区的东西部却高于平均值;在1980年代(图2d),西北地区感热输送又开始增强,大部分地区感热输送距平高于平均值。这种增强的趋势在1990年代得到进一步加强(如图2e所示),春季感热输送距平基本高于平均值。

下面分析夏季西北地区感热输送的年代变化特征,图3表示我国西北干旱、半干旱地区38个台站夏季感热输送在1950~1990年代的变化。如图3a所示,在1950年代,我国西北干旱、半干旱区感热输送总体偏弱,大部分地区感热输送距平低于平均值;1960年代和1970年代夏季感热输送的变化和春季类似,但是相比夏季1950年代的感热输送变化却开始增强了(图3b、c);然而,到了1980年代(图3d),西北地区夏季感热输送区发生了很大的改变,感热输送距平大部分地区都低于平均值。到了1990年代这种减弱的趋势继续持续(图3e)。

综上所述,我国西北干旱、半干旱区感热输送存在明显的年代际变化特征,且我国西北地区感热输送在春季和夏季存在着几乎相反的年代变化特征。我国西北干旱、半干旱区春季在1950年代偏强,到了1960年代、1970年代有所减弱,但到了1980年代和1990年代,感热输送又开始增强;而夏季感热输送则从1950年代偏弱,相比1950年代,1960年代、1970年代开始增强,但从1980年开始,又开始减弱,一直到1990年代继续偏弱。并且可以看到,夏季感热输送增强区域从1950年代到1990年代存在向东转移。

为了分析感热输送在20世纪70年代中后期的跃变,本文还分析了西北地区感热输送在1977年前后的变化特征。图4a、b表示我国西北干旱、半干旱地区38个台站春季感热输送在1966~1976年

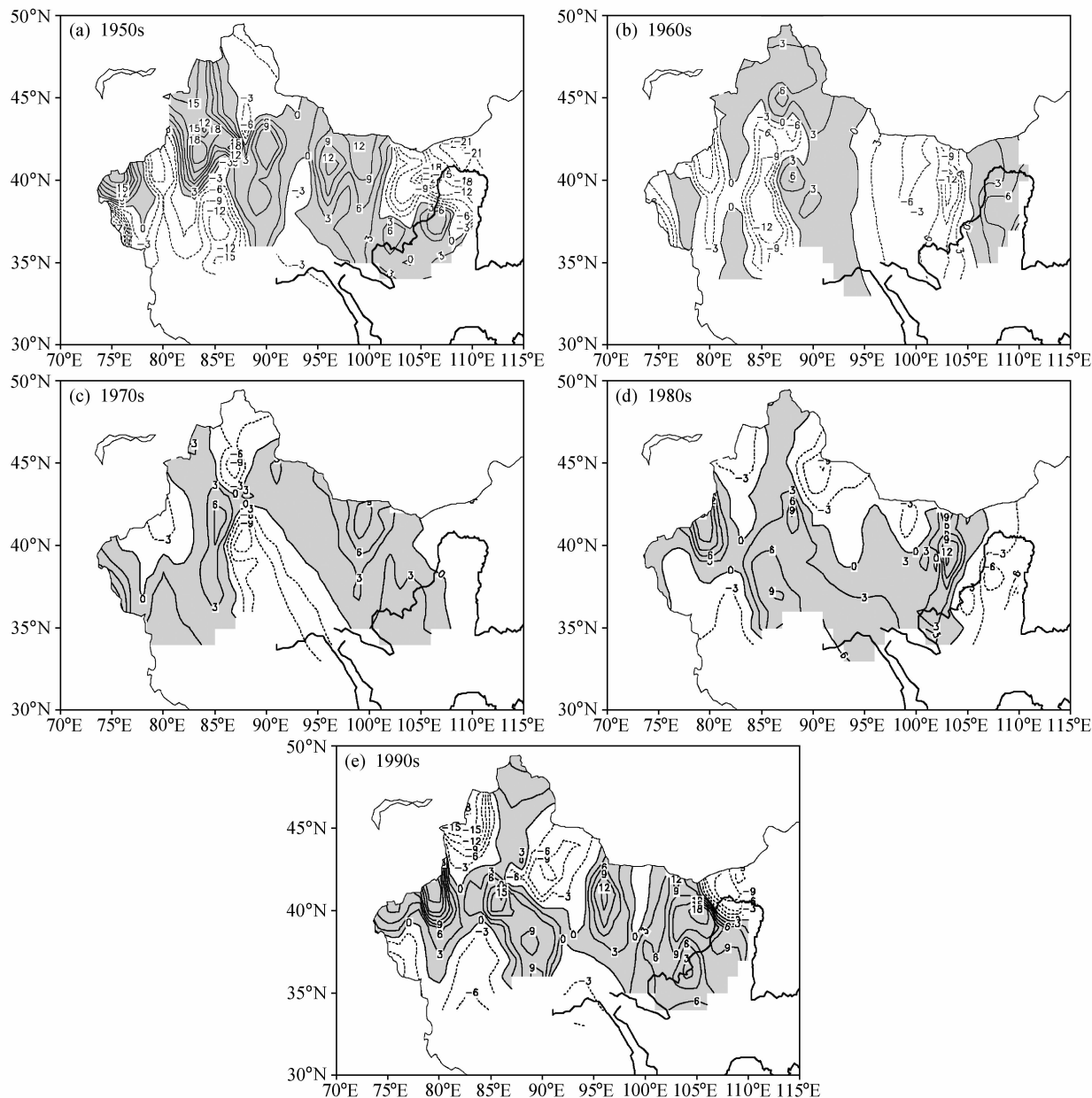


图2 我国西北干旱、半干旱地区春季(3~5月)感热输送距平分布图(单位: W/m^2)。实线: 正距平; 虚线: 负距平
Fig. 2 Distributions of spring (MAM) sensible heat anomalies (W/m^2) in the arid and semi-arid regions of Northwest China. Solid lines: positive anomalies; dashed lines: negative anomalies

和1977~2000年的年代际变化特征。在1966~1976年期间(图4a),西北地区感热输送总体偏弱,大部分地区的感热输送距平低于平均值;然而在1977~2000年期间(图4b),西北地区感热输送总体偏强,大部分地区感热输送距平都高于平均值。图5a、b表示我国西北干旱、半干旱地区38个台站夏季感热输送在1966~1976年和1977~2000年的年代际变化特征。在1966~1976年期间(图5a),

我们看到西北地区夏季感热输送总体偏强,大部分地区的感热输送距平高于平均值;在1977~2000年期间(图5b),西北地区夏季感热输送总体偏弱,大部分地区感热输送距平都低于平均值。
综上所述,我国西北干旱、半干旱地区春季和夏季感热输送出现相反的年代际变化趋势。西北地区春季感热输送从1977年之后显著增强,而夏季却从1977年之后,感热输送明显减弱了。

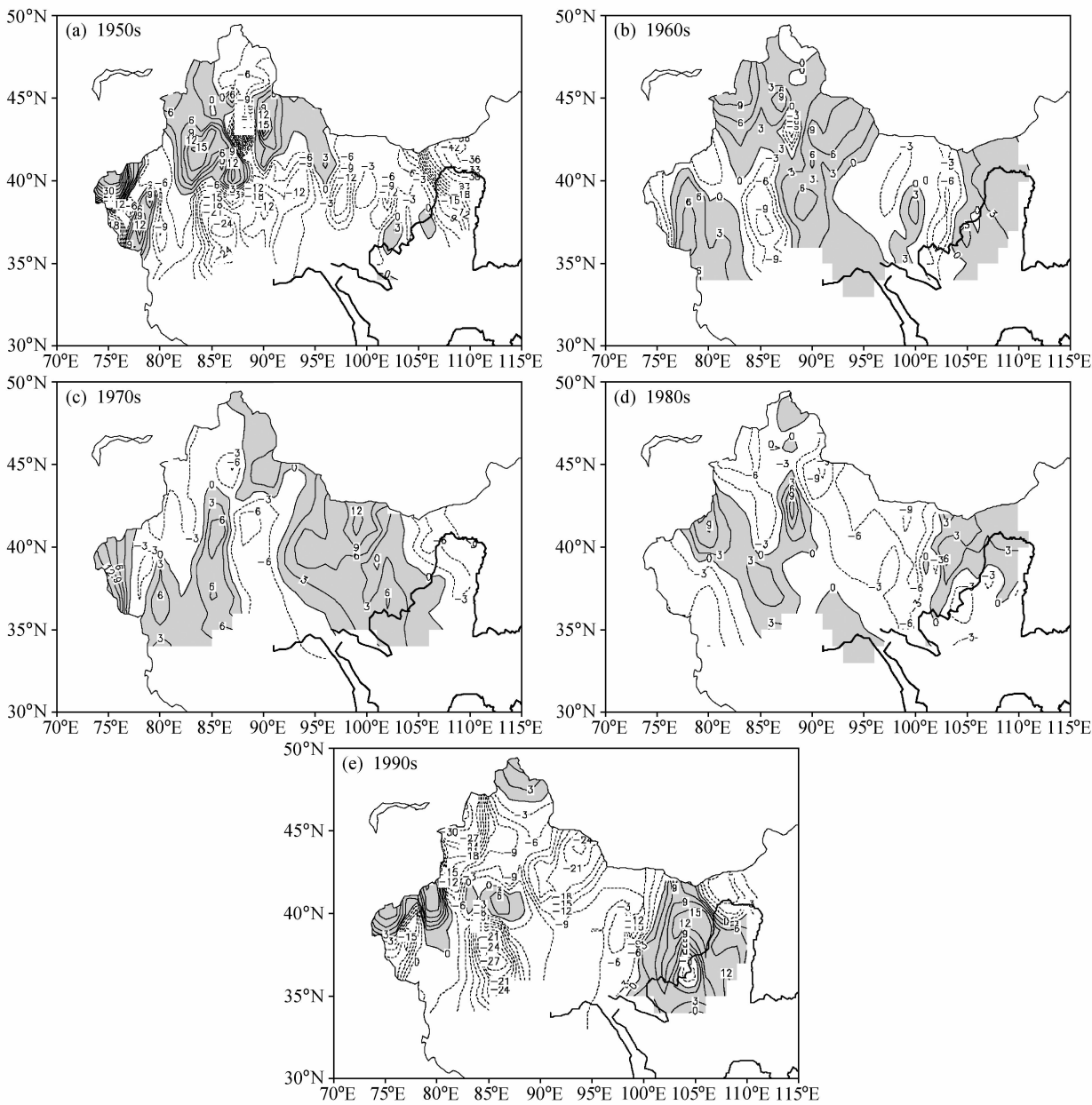


图 3 同图 2，但为夏季（6~8 月）
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for summer (JJA)

3 我国西北地区春季感热输送与中国夏季降水的相关分析

已有研究表明，陆面过程影响着我国夏季降水异常。赵平和陈隆勋^[21]分析 4 月青藏高原热源和我国夏季降水的相关分析；段安民等^[22]也分析了 4~6 月青藏高原感热异常对我国夏季降水的影响，并利用热力适应理论分析高原前期感热异常对我国夏季降水影响的机理。周连童和黄荣辉^[19]的研究

表明，我国西北地区春季地气温差与我国夏季降水有很好的相关关系，西北地区春季地气温差与华北地区夏季降水出现明显的负相关，而与长江中下游地区夏季降水有明显的正相关，即春季地气温差增强，华北地区夏季降水偏少，而长江流域夏季降水偏多。Wei 等^[23]也得出了相类似的结果。由于地气温差不能完全反映感热输送的变化，地表附近的感热输送与地表风场有关系，为此，本节将分析西北干旱、半干旱区春季感热异常对我国夏季降水异

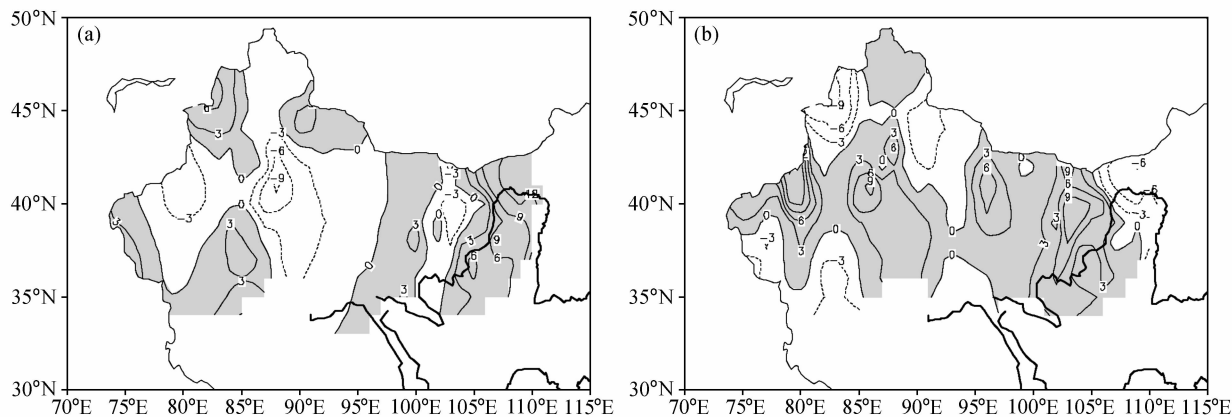


图 4 我国西北干旱、半干旱地区春季 (3~5 月) 感热输送在 1966~1976 年 (a) 和 1977~2000 年 (b) 的年代际变化特征 (单位: W/m^2)。实线: 正距平; 虚线: 负距平

Fig. 4 Distributions of spring (MAM) sensible heat anomalies (W/m^2) in the arid and semi-arid regions of Northwest China averaged for (a) 1967–1976 and (b) 1977–2000. Solid lines: positive anomalies; dashed lines: negative anomalies

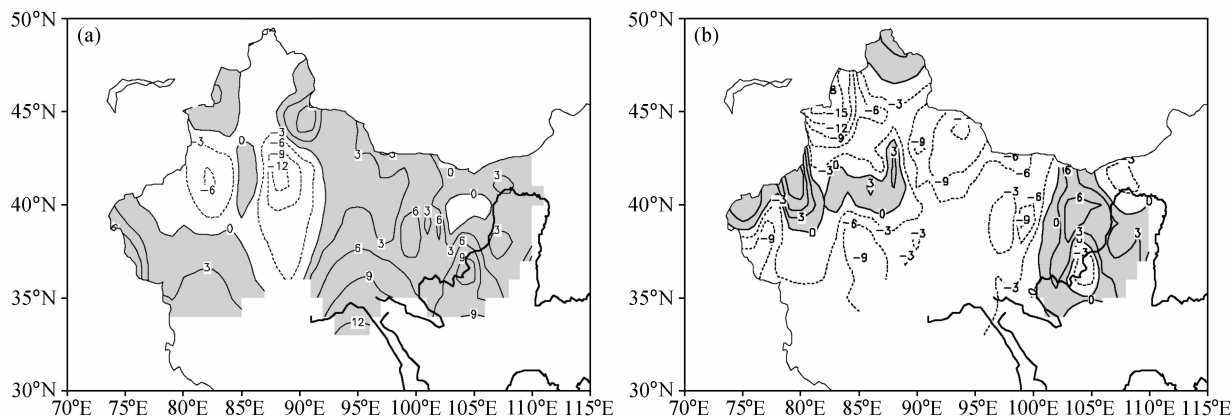


图 5 同图 4, 但为夏季 (6~8 月)

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for summer (JJA)

常的影响。

下面将分析我国西北地区春季感热输送与我国夏季降水的相关关系。由于西北地区春季中 4 月的感热输送距平最强 (图略), 故本研究选取我国西北干旱、半干旱区 38 个站平均的 4 月份感热异常与我国夏季 (6~8 月) 降水的相关分析。从图 6 中可以看到, 在我国华北及黄河下游地区和西南地区出现负相关区域, 最大的负相关区位于黄河下游地区, 而在长江流域和东北地区出现正相关区域, 最显著的正相关区位于长江中、下游地区。这表明: 当我国西北地区春季感热输送增强时, 我国华北地区夏季降水偏少, 而长江流域夏季降水偏多。正如文献[7, 9, 19]所指出, 我国夏季降水有明显的年代际变化特征, 在 1977~2000 年期间, 华北地区

夏季降水明显偏少, 且出现持续性的干旱, 而长江中下游地区在这个时期夏季降水偏多, 且经常发生洪涝。因此, 西北地区在 1977~2000 年春季感热输送增强, 有利于华北地区夏季降水持续偏少和长江流域降水偏多。从年代际变化的时间尺度上来看, 西北地区春季感热输送年代际变化是华北地区夏季降水年代际变化的重要因子之一。

4 我国西北地区春季感热输送的年代际变化对我国夏季降水的影响过程

根据前面的分析可知, 我国西北干旱、半干旱地区感热输送存在着明显的年代际变化特征。春季感热输送自 20 世纪 70 年代后期开始明显增强, 并且与我国华北地区夏季降水存在负相关的关系, 而

与长江中下游地区夏季降水有明显的正相关，即西北地区春季感热输送增强，华北地区夏季降水减少；长江中下游地区夏季降水增多。但是，西北干旱、半干旱地区感热输送的变化是如何影响我国夏季降水变化的？这是值得进一步研究的问题。为此，本节将利用欧洲中心（ECMWF）再分析资料分析欧亚大陆上空 850 hPa 水平风场和我国东西部上空的垂直环流，即分析 35°N~45°N 平均的夏季纬圈环流和 107.5°E~122.5°E 平均的夏季经圈环流的年代际变化特征，也就是纬向风场与垂直速度（乘-100）和经向风场与垂直速度（乘-100）的合成矢量距平在高度-经度的剖面图，用来分析春季感热输送异常如何影响水平环流和垂直环流的年代际变化特征。

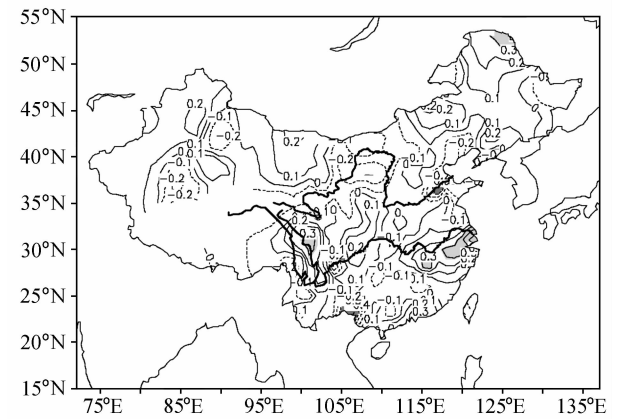


图 6 我国西北干旱、半干旱区 38 个测站平均 4 月感热输送与我国夏季（6~8 月）降水的相关系数分布图。实线：正相关，虚线：负相关；阴影：相关系数的信度达到 95%
Fig. 6 Distribution of the correlation coefficients between the April sensible heat averaged for 38 stations and the summer (JJA) precipitation in China. Solid lines: positive correlations; dashed lines: negative correlations; shading: above the 95% significance level

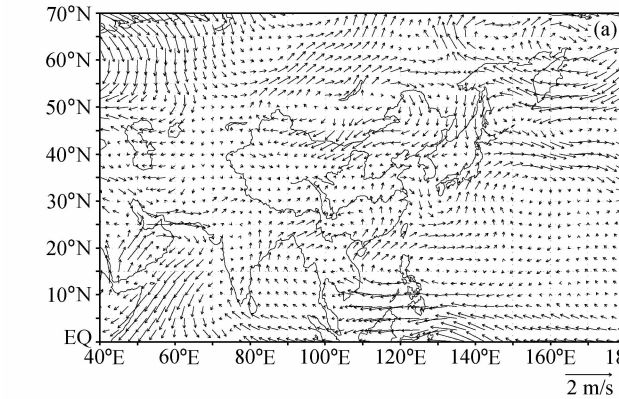


图 7 (a) 1966~1976 年平均和 (b) 1977~2000 年平均的夏季 850 hPa 环流距平的年代际变化特征

4.1 水平环流

下面将分析 850 hPa 环流的年代际变化特征，图 7 表示 850 hPa 夏季环流距平在 1966~1976 年期间平均和 1977~2000 年期间平均的分布特征。在 1966~1976 年期间（图 7a），在我国西北地区的北部包括蒙古国地区，有明显的顺时针环流距平，也就是说在我国西北地区上空受反气旋环流异常控制；而在华北地区上空出现逆时针环流距平，即我国华北地区上空受气旋环流异常控制；长江中下游地区也有反气旋环流距平控制。在 1977~2000 年期间（图 7b），西北地区上空 850 hPa 的环流发生了明显的转变，已经变为逆时针环流距平，即我国西北地区上空受到气旋型环流异常控制；而华北地区上空出现顺时针环流距平，也就是我国华北地区上空受反气旋环流距平控制；长江中下游地区出现气旋型环流异常。

综上所述，我国西北和华北地区上空 850hPa 的环流异常发生了明显的转变，在 1977~2000 年期间西北地区上空受到气旋环流距平控制，华北地区上空受反气旋环流距平控制，这样在西北地区上空易产生辐合上升气流，有利于西北地区夏季降水增多；在华北地区上空易造成辐散下沉运动，不利于华北地区夏季降水增多。长江流域上空辐合上升运动增强，有利于该地区夏季降水增多。

4.2 垂直环流

下面，分析垂直环流的年代际变化特征，图 8 表示纬圈环流在 1966~1976 年期间和 1977~2000 年期间分布特征。从图 8a 可以看到，1966~1976 年期间，在 80°E 附近出现明显的下沉气流异常；而在 120°E 附近却出现显著地上升气流异常。在

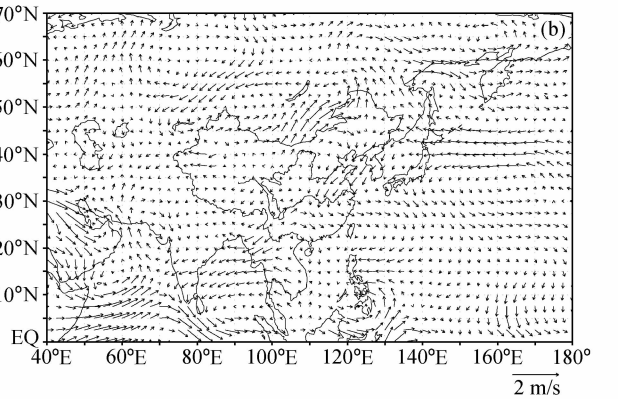


Fig. 7 Interdecadal variability of summer circulation anomalies at 850 hPa averaged for (a) 1966 - 1976 and (b) 1977 - 2000

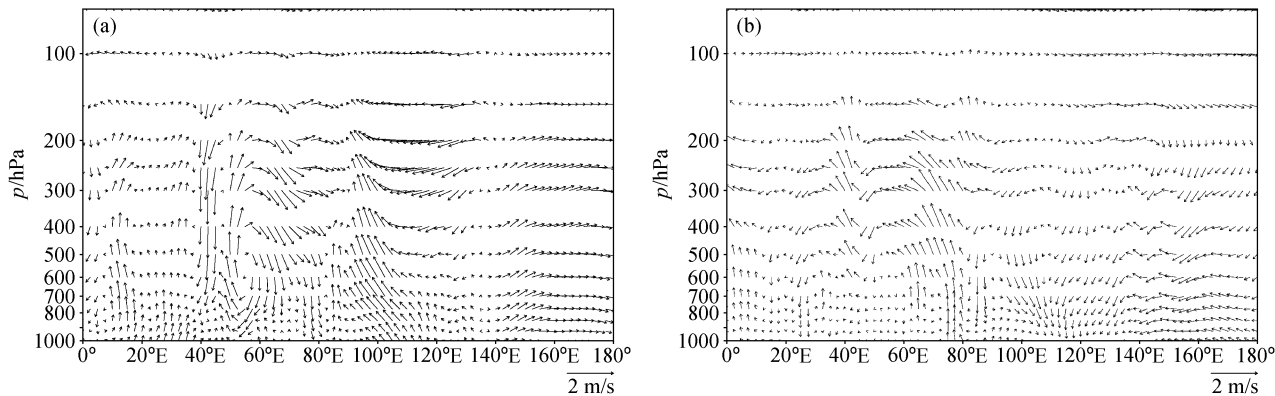


图 8 纬圈环流距平在 (a) 1966~1976 年和 (b) 1977~2000 年平均的夏季 (6~8 月) 高度-经度的剖面图

Fig. 8 The height - longitude cross sections of summer (JJA) zonal circulation anomalies averaged for (a) 1966 - 1976 and (b) 1977 - 2000

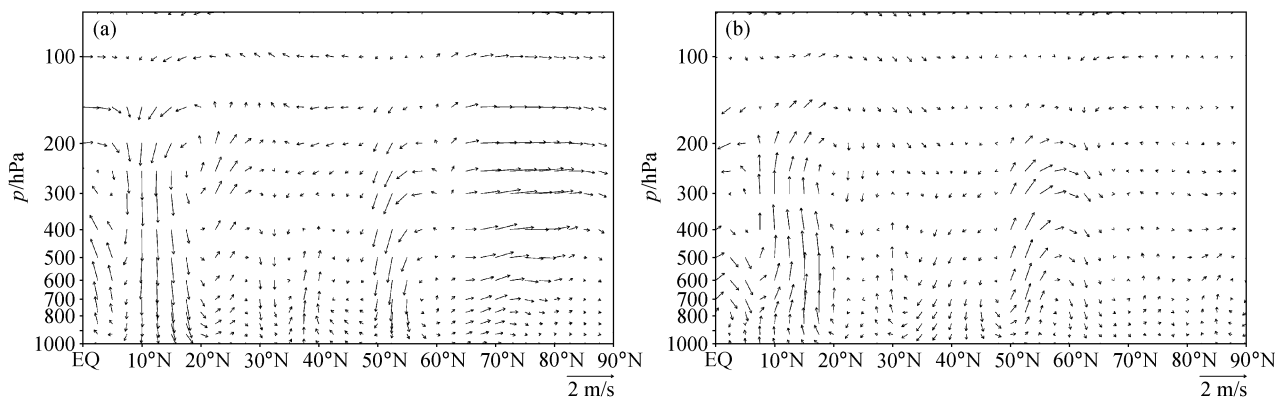


图 9 同图 8, 但为经圈环流

Fig. 9 The same as Fig. 8, but for meridional circulation

1977~2000 年期间 (图 8b), 纬圈环流发生了明显的改变, 在 80°E 附近出现明显的上升气流异常, 在 120°E 附近却出现明显的下沉气流异常。

综上所述, 我国东西部纬圈环流在 1977 年前后发生明显的年代际跃变。在 1966~1976 年期间, 华北地区上空的上升气流异常加强, 即在华北地区出现辐合上升气流异常, 易造成华北地区在这个时期降水偏多。在 1977~2000 年, 由于西北地区表面感热输送增强, 辐合上升气流异常加强, 布和朝鲁等^[16]的分析也说明西北地区感热输送增强, 造成此地区呈上升运动。西北地区在这个时期降水偏多^[9, 19]。在华北地区上空出现明显下沉气流异常, 即在华北地区上空出现辐散, 所以造成华北地区夏季降水偏少, 出现持续性干旱。黄刚和周连童^[13]的研究也表明从 1977~2000 年期间, 华北地区上空的低压槽不断减弱, 即反气旋环流加强, 这个反气旋环流的加强使得从 20 世纪 70

年代后期到 2000 年期间华北地区夏季经常出现干旱少雨。

下面分析经圈环流的年代际变化, 图 9 表示经圈环流在 1966~1976 年期间和 1977~2000 年期间分布特征。从图 9a 可以看到, 1966~1976 年期间, 在 40°N 附近出现明显的上升气流异常; 而在 30°N 附近却出现显著地下沉气流异常。在 1977~2000 年期间 (图 9b), 经圈环流发生明显的改变, 在 40°N 附近出现明显的下沉气流异常, 而在 30°N 附近却出现显著的上升气流异常。

综上所述, 我国东部地区上空经圈环流也存在明显的年代际变化, 在 1966~1976 年期间, 华北地区上空的上升气流偏强, 而长江中下游地区出现下沉气流偏强, 这不利于这个时期长江中下游地区夏季降水偏多。在 1977~2000 年期间, 华北地区上空出现辐散, 有利于下沉气流加强, 而在长江中下游地区上空出现辐合并造成上升气流加强, 这有

利于长江中下游地区夏季降水偏多，且经常发生洪涝^[9]。

4.3 春季感热异常对夏季纬圈环流的影响过程

为了说明我国西北地区春季感热输送对华北地区夏季降水的影响过程，本节将分别合成分析西北地区春季感热输送偏高和偏低年的5~8月的纬圈环流，从图1a中，选取感热输送距平大于3 W/m²和小于-3 W/m²的年份，偏高年有1955、1970、1976、1981、1982、1995、1997、1999、2000年，由于欧洲中心ERA-40再分析资料从1958年开始，所以去掉1955年；感热输送偏低年份有1958、1961、1963、1964、1967、1968、1972年。图10表示春季感热输送偏低年对应5~8月的纬圈环流。如图10a所示，在5月份，西北地区和华北地区上空都出现明显的上升气流异常。到了6月份（图10b），西北地区上空开始出现下沉气流异常，而华北地区上空仍然维持上升气流异常。到了7、8月份（图10c、d），西北地区上空的下沉气流异常继续加强，华北地区上空的上升气流异常也继续加强。

下面将合成分析感热输送偏高年份5~8月的

纬圈环流（图11）。如图11a所示，在5月份，西北地区上空出现上升气流异常，而华北地区上空也有明显的上升气流异常；到了6月份（图11b），西北地区上空的上升气流异常更加明显，而华北地区上空的明显的下沉气流异常；到了7月份（图11c），西北地区上空的上升气流异常和华北地区上空的明显的下沉气流异常仍然维持；到了8月份（图11d），西北地区上空的上升气流异常和华北地区下沉气流异常开始有所减弱。

综上所述，我国西北地区春季感热输送异常对夏季的纬圈环流有明显的影 响，即当西北地区春季感热输送增强时，西北地区上空夏季出现明显的上升气流异常，而华北地区上空从6月份才开始出现明显的下沉气流异常，并且一直维持到8月，这不利于华北地区夏季降水偏多，且发生了持续性干旱。也就是说，西北地区春季感热输送增强，并没有立刻引起华北地区上空垂直环流的变化，而是到了夏季，垂直环流才开始发生变化。所以，西北地区春季感热输送异常可以作为我国夏季降水的一个预报因子。

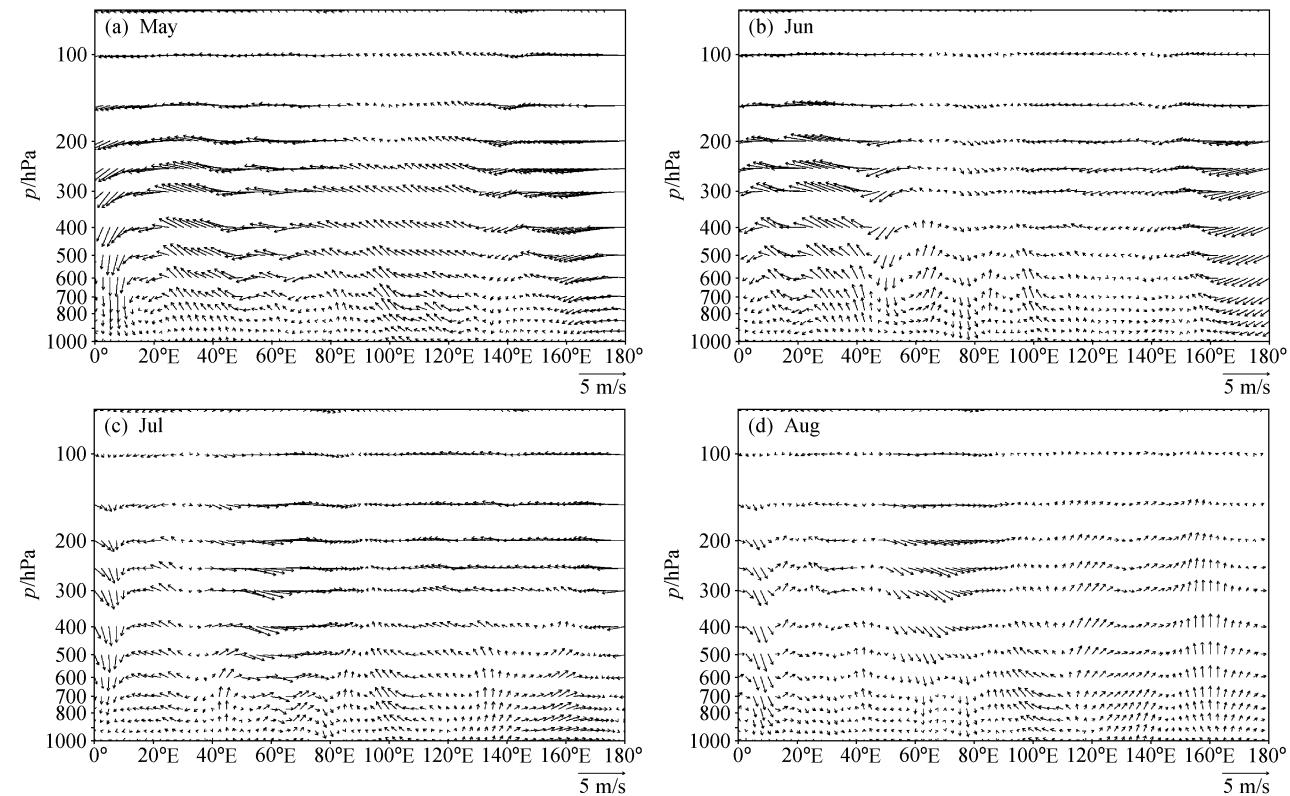


图10 我国西北地区春季感热输送偏低年对应5~8月的纬圈环流
Fig. 10 Height-longitude cross sections of composite May-Aug zonal circulation anomalies for the years of low sensible heat in Northwest China

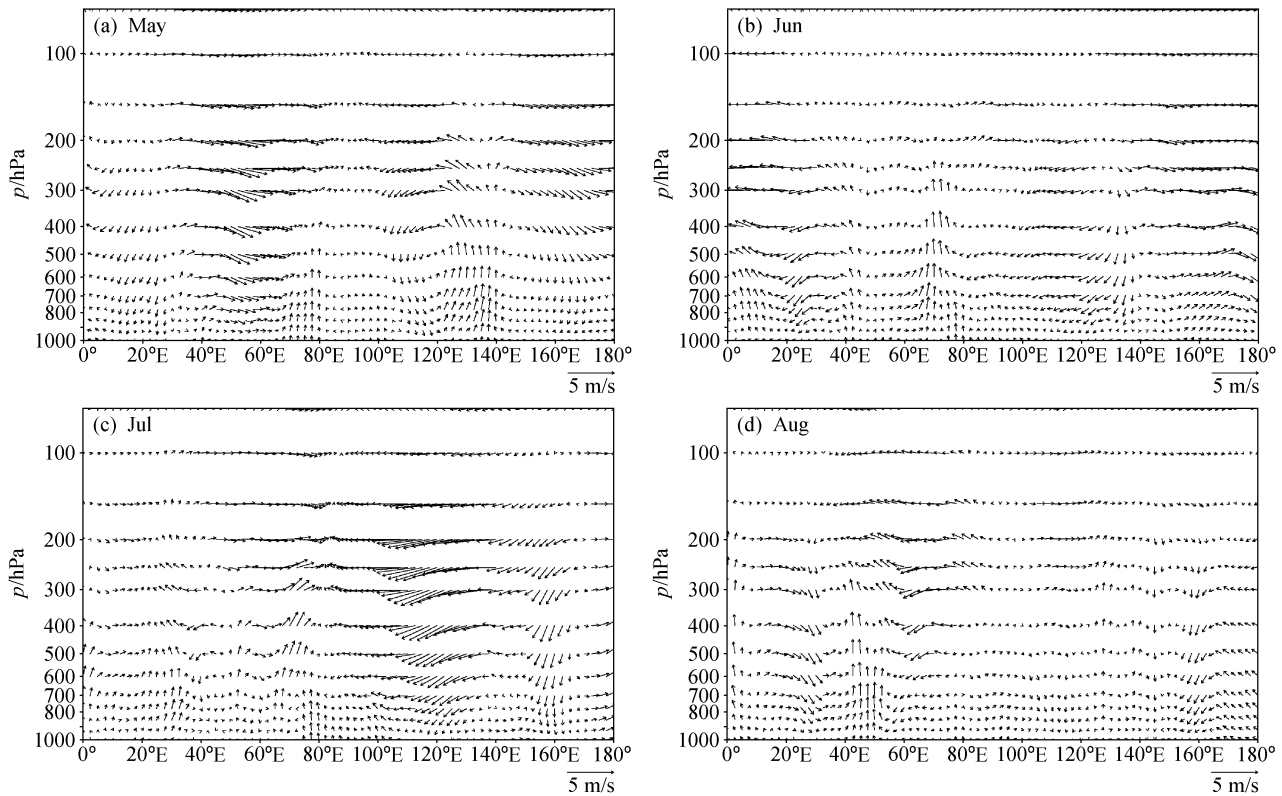


图 11 同图 10, 但为感热偏高年

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the years of high sensible heat

5 结论和讨论

本研究利用 1951~2000 年我国西北干旱、半干旱区地温、气温和表面风场逐日 4 个时次 (00、06、12 和 18 时) 的台站观测资料, 分析我国西北干旱、半干旱区春、夏季感热输送的年代际变化特征, 研究表明, 我国西北干旱、半干旱区春、夏季感热输送出现相反的年代际变化特征, 春季感热输送从 20 世纪 70 年代中期开始增强, 而夏季感热输送却减少了, 这或许是由于西北地区夏季风场减弱或者降水增多的缘故。此外, 本文还分析我国西北干旱、半干旱区 4 月感热输送和我国夏季降水的相关关系, 其中正相关区分别位于东北地区 and 长江中下游地区, 最显著的正相关区位于长江中下游地区。而负相关区分别位于华北地区和西南地区, 最显著的负相关区位于黄河下游地区。也就是说当西北地区春季感热增强时, 华北地区降水偏少, 长江流域降水偏多。本文还利用欧洲中心 (ECMWF) 1958~2000 年再分析资料分析水平和垂直环流的年代际变化特征, 表明了 1966~1976 年, 华北

地区上空有明显的气旋型环流距平, 有利于上升气流加强, 西北地区上空有明显的反气旋环流异常, 有利于下沉气流加强, 长江中下游地区也出现下沉气流增强, 而到了 1977~2000 年, 华北地区上空出现反气旋环流距平, 有利于下沉气流增强, 西北地区上空出现气旋环流距平, 有利于上升气流增强, 长江中下游地区的上升气流也明显加强。这说明 20 世纪 70 年代后期开始我国西北地区感热输送增强, 有利于此地区上升气流增强, 有利于此地区降水偏多; 华北地区上空下沉气流加强, 这不利于华北地区夏季降水增多, 并出现持续性干旱; 而长江中下游地上空的上升气流明显增强, 这有利于造成长江中下游地区夏季降水偏多, 且经常发生洪涝。

西北地区春季感热输送增强, 并没有立刻引起华北地区上空垂直环流的变化, 而是到了夏季, 垂直环流才开始发生变化。所以, 西北地区春季感热输送异常可以作为我国夏季降水的一个预报因子。

然而, 应该指出, 由于华北地区夏季降水的年代际变化是由多因子引起, 它是与东亚气候系统的各成员的变化及其相互作用引起的^[24]。本文不能

一一阐述其他因子对华北地区夏季降水的影响。因此，西北地区感热输送的变化是我国华北地区出现持续性干旱的可能成因之一。今后，我们还将利用数值模式来模拟西北干旱、半干旱区的感热输送对华北地区夏季降水影响的物理过程。

参考文献 (References)

[1] Nitta T, Yamada S. Recent warming of the tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulations. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**: 375~383

[2] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 1069~1079

[3] Li Chongyin, Li Guilong. Variation of the NAO and NPO associated with climate jump in the 1960s. *Chinese Sci. Bull.*, 1999, **44** (21): 1983~1987

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

[5] Chang C P, Zhang Y, Li T. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and the tropical Pacific SSTs. Part II. Meridional structure of the monsoon. *J. Climate*, 2000, **13**: 4326~4340

[6] Ju Jianhua, Lu Junmei, Cao Jie. The interdecadal variation of the Arctic Oscillation and its effect on the severity of drought in northern China. The Forth International Symposium on Asian Monsoon System (ISAM4), Kunming, China, 24 - 29 May, 2004. 366~372

[7] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. *高原气象*, 1999, **18**: 465~475
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **18**: 465~475

[8] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系. *大气科学*, 2006, **30**: 730~743
Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al., Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 730~743

[9] 周连童, 黄荣辉. 关于中国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究. *气候与环境研究*, 2003, **8**: 274~290
Zhou Liantong, Huang Ronghui. Research on the character-

istics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 274~290

[10] 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化大气环流特征. *气候与环境研究*, 2003, **8**: 307~318
Zhang Qinyun, Wei Jie, Tao Shiyan. The decadal and interdecadal variations of drought in the Northern China and association with the circulation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8**: 307~318

[11] 卫捷, 张庆云, 陶诗言. 近 20 年华北地区干旱早期大气环流异常特征. *应用气象学报*, **14**: 140~151
Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. Characteristics of atmospheric circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 2003, **14**: 140~151

[12] 李新周, 马柱国, 刘晓东. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系. *大气科学*, 2006, **30**: 277~284
Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. Inter-decadal characteristics of aridification over Northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30**: 277~284

[13] 黄刚, 周连童. 青藏高原西侧绕流风系的变化及其与东亚夏季风和我国华北地区夏季降水的关系. *气候与环境研究*. 2004, **9**: 316~330
Huang Gang, Zhou Liantong. 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. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9**: 316~330

[14] 吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响. *热带气象学报*, 2004, **20**: 73~80
Lü Junmei, Ren Juzhang, Ju Jianhua. The interdecadal variability of East Asia monsoon and its effect on the rainfall over China. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2004, **20**: 73~80

[15] Ren baohua, Lu Riyu, Xiao Ziniu. A possible linkage in the interdecadal variability of rainfall over North China and the Sahel. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, **21**: 699~707

[16] 布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流. *气候与环境研究*, 2002, **7**: 61~73
Bueh Cholaw, Ji Liren, Cui Maochang. Energy balance of land surface process in the arid and semi-arid regions of China and its relation to the regional atmospheric circulation in summer. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7**: 61~73

[17] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 西北干旱区敦煌戈壁区局地陆面过程野外试验研究. “我国重大气候灾害的形成机理和预测理

- 论研究”论文集(三), 青藏高原与西北干旱区对气候灾害的影响. 吴国雄, 孙菽芬, 陈文等编, 北京: 气象出版社, 2003. 157~177
- Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. The field experiment on local surface process of Dunhuang in arid region. *Collected Papers of the Project “Research on the Formation Mechanism and Prediction Theory of Severe Climatic Disasters in China” III, Influence of the Tibetan Plateau and Arid Region on Climatic Disasters* (in Chinese). Wu Guoxiong, Sun Shufen, Chen Wen, et al., Eds. Beijing: China Meteorological Press, 2003. 157~177
- [18] 沈学顺, 木本昌秀. 春季欧亚大陆地表气温变化特征的气候意义. 大气科学, 2007, **31**: 19~27
- Shen Xueshun, Masahide Kimoto. Studies of the interannual variability of springtime Eurasian surface air temperature. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31**: 19~27
- [19] 周连童, 黄荣辉. 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. 气候与环境研究, 2006, **11**: 1~13
- Zhou Liantong, Huang Ronghui. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air-temperature ($T_s - T_a$) in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11**: 1~13
- [20] 张强, 卫国安, 黄荣辉. 西北干旱区荒漠戈壁动量和感热总体输送系数. 中国科学(D辑), 2001, **31**: 783~792
- Zhang Qiang, Wei Guoan, Huang Ronghui. Momentum and bulk sensible heat transfer coefficient over Gobi in Northwest China. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2001, **31**: 783~792
- [21] 赵平, 陈隆勋. 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), 2001, **31**: 327~332
- Zhao Ping, Chen Longxun. Climatic characteristics of atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and its relation to precipitation in China since 35 years. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2001, **31**: 327~332
- [22] 段安民, 刘屹岷, 吴国雄. 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), 2003, **33**: 997~1004
- Duan Anmin, Liu Yimin, Wu Guoxiong. Thermal state of Tibetan Plateau in April-June and association with East Asian summer precipitation and atmospheric circulation anomalies. *Science in China (Series D)* (in Chinese), 2003, **33**: 997~1004
- [23] Wei Zhigang, Fan Lijun, Huang Ronghui, et al. The correlation Analysis between the spring ($T_s - T_a$) in the arid region in northwest China and Chinese summer rainfall. Interactional Workshop on the Air-Land Interaction in Arid and Semi-Arid Areas and Its Impact on Climate (IWALI), Dunhuang City, Gansu Province, China, 17-21 August, 2002. 182~185
- [24] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. 大气科学, 2003, **27**: 770~787
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Zhou Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and East Asia climate system. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27**: 770~787