

中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系

李新周^{1, 2, 3} 马柱国² 刘晓东¹

1 中国科学院地球环境研究所, 西安 710075

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 用 CRU 和 ECMWF 资料分析了近代中国北方干湿变化特征及其与东亚大气环流异常特征的关系。结果表明: 中国北方干旱化具有显著的年际、年代际特征, 20 世纪 70 年代末干湿发生显著转变, 西北东部和华北地区变干趋势明显, 北方大部分地区干旱现象严重; 中国北方地区当前的干旱化时空格局与东亚夏季风异常特征密切相关, 夏季风减弱以及由此造成水汽输送量减少是导致干旱化发展的主要原因, 而低层大气反气旋环流增强和气旋性环流减弱是引起干旱化的异常环流特征。

关键词 干旱化 水汽输送 东亚夏季风 中国北方地区

文章编号 1006-9895(2006)02-0277-08 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Inter-decadal Characteristics of Aridification over Northern China Associated with the Variation of Atmospheric Circulation During the Past 50 Years

LI Xin-Zhou^{1, 2, 3}, MA Zhu-Guo², and LIU Xiao-Dong¹

1 *Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075*

2 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

3 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

Abstract Aridification over northern China is currently one of the most urgent living environmental issues in our country. A lot of studies have been carried out concerning its evolution, causes and prediction, etc. There are different general circulation patterns at each dry/wet stages undoubtedly. In other words, an abrupt adjustment of summer monsoon circulation over East Asia will result in a distinct change of the precipitation pattern. However, up to now, analyses on the relationship between northern China drought and the summer south wind have been very limited. In this paper, inter-decadal characteristics of aridification over northern China and its association with the variation of atmospheric circulation during the past half century are analyzed based on the latest ECMWF and CRU reanalyzed monthly grid data.

To better describe the detailed temporal and spatial features of droughts in northern China, the northern China is divided into 4 sub-regions and the annual Palmer Drought Severity Index (PDSI) is calculated in every unit respectively. It is shown that the annual precipitation and PDSI have decreased significantly in sub-regions B and C over the past 50 years. While in sub-region A, the annual precipitation and PDSI have an increasing trend from the end of 1950s to the mid 1990s followed by a decreasing period. In sub-region D, the annual precipitation and PDSI have a significantly decreasing trend from the end of 1950s to the end of 1970s, and increasing trend from the beginning of 1950s to mid 1990s followed by a decreasing period. As a matter of fact, it should be pointed out that the results in

收稿日期 2004-12-27, 2005-07-04 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400504、2004CB720208 和国家自然科学基金资助项目 40375028、40121303

作者简介 李新周, 男, 1978 年出生, 博士生, 现主要从事干旱区环境变化研究. E-mail: lixz@ieecas.cn

sub-region A may not be reliable enough as Wei Jie et al. suggested that PDSI is not suitable for extreme drought and wet regions. Therefore, the physical mechanism of drought in sub-regions B and C is mainly discussed with focusing on the inter-decadal adjustment of summer monsoon circulation over East Asia.

Multiple data analyses reflect the evident climatic jump at the end of 1970s over northern China. Accordingly, an inter-comparison of summer south wind, water-vapor transport and the 850 hPa anticyclone intensity between two periods is conducted. It is indicated that the south wind had experienced a strong period from 1958 to 1976 and then a weak period from 1977 to present. As a result, the precipitation distribution over northern China during the concerned periods altered obviously due to changes of the water vapor supply. Analyses on the 850 hPa anticyclone intensity present a similar conclusion. All these studies show that the aridification over northern China results from multiple factors; the weakened East Asian summer monsoon, the reduced water-vapor transport, and the increased anticyclone intensity, and so on.

Key words aridification, water-vapor transport, East Asian summer monsoon, northern China

1 引言

关于中国北方干旱化的事实、成因及预测等方面的研究已有不少。叶笃正等^[1]分析近代中国旱涝气候变化并对未来几十年作出预测;戴新刚等^[2]从我国夏季风年代际变化出发,研究华北汛期降水多尺度特征;马柱国等^[3]利用土壤湿度资料分析区域气候变率,指出华北存在明显的干旱化趋势;李新周等^[4]的研究表明,近年来中国干旱、半干旱地区干旱化严重,导致水资源缺乏。在北方干旱化成因方面,符淙斌^[5]分析中国北方干旱化对全球变暖的响应,指出在全球变暖的大背景下,中国北方干旱化明显;Menon等^[6]通过对大气碳黑气溶胶的分析研究,表明植被变化在中国区域气候变化中具有重要作用;龚道溢等^[7]和 Lu^[8]分析了海温异常对中国降水的影响,指出海温异常与中国区域降水异常密切联系;郑益群等^[9]通过分析植被变化对中国区域气候的影响,指出下垫面的改变与中国北方干旱化加剧密切相关。所有这些研究不仅指出近年来中国北方干旱化事实的存在,更显示出中国北方干旱化特征及其成因的多样性、复杂性。

在前人工作的基础上,本文将从年平均 Palmer 干旱指数的年际和年代际变化特征出发,分析近 50 年北方干旱化趋势的时空分布特征及其与东亚夏季风和大气环流异常的联系,初步探讨北方干旱化形成的可能机制。

2 资料及 Palmer 干旱指数介绍

本文使用了欧洲中期天气预报中心(ECMWF) 1958~2001 年 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 再分析资料,包括相对湿

度、位势高度、气压场、风场及温度场等气象要素,垂直方向为 12 个等压面层;降水和气温资料采用英国东安哥拉大学气候研究中心(CRU)整理的全球 1958~2002 年 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点资料。

Palmer 干旱指数(PDSI)是 Palmer^[10]早在 20 世纪 60 年代提出的一种干旱指数,是当前广泛应用于区域和全球尺度干旱检测的重要指标之一。Palmer^[10]将干旱定义为:在数月或数年内,水分供应持续低于气候上所期望的水分供给的一个时段。Palmer 干旱指数综合了水分亏缺量和持续时间因子对于干旱程度的影响,且水分亏缺量是根据水分平衡方法求得,并考虑了前期天气条件,具有较好时空可比性,是评估干旱程度的较好指数^[10~12]。但由于 PDSI 主要基于美国资料提出,各种参数取值具有局限性,因此,本文采用安顺清等^[13]修正的适合于中国区域的 PDSI 计算程序,用 CRU 的降水和气温资料,计算东亚区域年平均 PDSI。PDSI 干旱等级划分如表 1 所示。

表 1 Palmer 干旱指数干湿等级(引自文献[12])

Table 1 The grade of Palmer Drought Severity Index (PDSI) (quoted from Reference [12])

PDSI	等级 Level
≥ 4.00	极端湿润 Extreme wet
3.00~3.99	严重湿润 Severe wet
2.00~2.99	中等湿润 Moderate wet
1.00~1.99	轻微湿润 Slight wet
0.99~-0.99	正常 Normal
-1.00~-1.99	轻微干旱 Slight drought
-2.00~-2.99	中等干旱 Moderate drought
-3.00~-3.99	严重干旱 Severe drought
≤ -4.00	极端干旱 Extreme drought

3 干旱气候异常特征

干旱分析中对降水的研究至关重要。降水量的大小是描述某一区域气候及其变化的重要参量，也是表征干旱的关键指标之一。对于干旱和半干旱地区而言，导致干旱的直接原因就是降水量的减少^[14]。从中国区域年降水量多年(1961~1990年)平均分布(图1)可知，我国年降水的空间分布总体呈东南-西北走向，西北西部年降水量不足200 mm，华北和东北年降水量在500 mm左右，南方大部分地区降水大于800 mm。尽管降水减少是导致干旱和半干旱地区发生干旱化的直接原因，但温度升高对干旱化的产生和发展的影响也不容忽视^[4]。有关研究指出：19世纪末到20世纪末全球平均气温上升了大约0.6℃，以致20世纪90年代成为近百年来最暖的10年^[15]，且中国区域增温明显^[16、17]。因此，本文利用综合考虑降水和气温等因素的Palmer干旱指数，分析中国北方干旱化的时空分布特征。

为了分析中国北方干旱化的时空分布特征及典型区域的差异，将中国北方划分为A、B、C和D四个分区分别进行讨论和对比分析(分布如图1所示)。图2给出了1958~2002年中国北方四个分区年PDSI序列及Mann-Kendall(MK)趋势^[4]检验结果，PDSI正值表示湿润年份，负值表示干燥年份。为了便于区分，将小于-6的PDSI值定为-6，大

于6的PDSI值定为6。从年PDSI序列上看：西北西部除了20世纪80年代末至90年代初相对湿润外，其他年代干旱、极端干旱年份频繁出现，20世纪60年代和90年代中期至今干旱化最为严重，年PDSI值多数小于-4，为极端干旱年份；西北东部20世纪50年代末至70年代末相对湿润，之后相对干旱年份出现频率偏多，1997年为极端干旱年份，PDSI值小于-4，1998年至2001年都为严重干旱年；华北地区20世纪50年代末至70年代末相对湿润，1999年至2002年为严重干旱年；东北地区20世纪60年代初相对湿润，20世纪60年代中期至70年代末相对干旱，80年代初至90年代中期相对湿润，90年代中期以来出现严重干旱时段。由此可见，中国北方干旱化在空间上具有明显的区域特征，在时间上存在显著的年际、年代际变化。

趋势检验结果显示：西北西部20世纪50年代末至90年代初变湿趋势明显，且能通过95%显著性检验，90年代初至今显示为干旱化趋势；西北东部和华北地区20世纪50年代末至今同样为变干趋势，且通过95%显著性检验；东北地区20世纪50年代末至70年代末显示为干时段，且通过95%显著性检验，80年代初至90年代中期变湿，但并不显著，90年代中期至今再度转为变干趋势。

对于西北西部，卫捷等^[18]分析发现，Palmer干旱指数在中国西北地区不适用，需要作进一步的

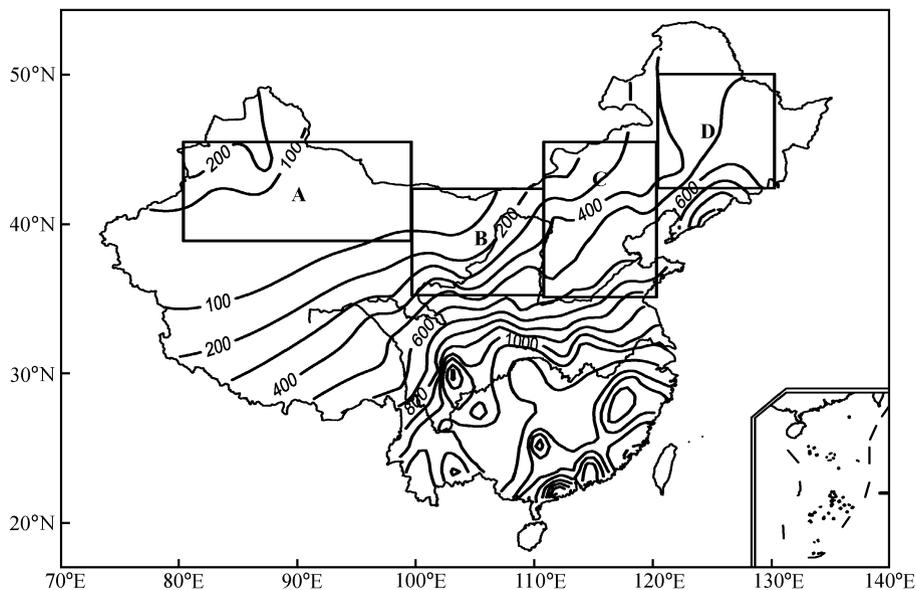


图1 平均年降水量(1961~1990年)分布图(单位: mm)。图中A、B、C和D分别指示西北西部、西北东部、华北和东北地区
Fig.1 The distribution of annual mean precipitation over 30 years (units; mm). There are 4 sub-regions; A: west of Northwest China, B: east of Northwest China, C: North China, and D: Northeast China

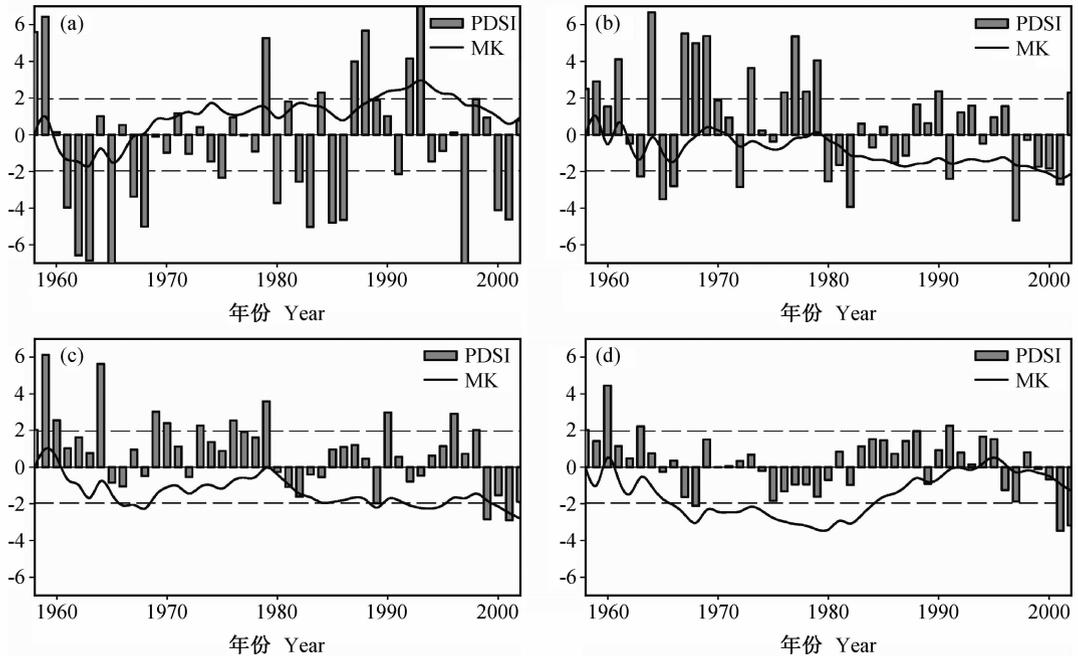


图2 1958~2002年年平均PDSI及Mann-Kendall趋势检验:(a)A区;(b)B区;(c)C区;(d)D区

Fig. 2 Time series of annual mean PDSI and MK trend during the period of 1958–2002: (a) Area A; (b) area B; (c) area C; (d) area D

订正,而在中国东部地区具有较好的代表性。由于本文主要基于西北东部和华北地区多年PDSI变化特征,并探讨其与东亚季风和大气环流的关系,所以关于西北西部干旱化特征及成因将另文讨论。

4 北方干旱化的可能成因

据统计,我国大气降水季节分布极不均匀,降水主要集中在夏季(6~8月),占年降水总量50%以上。因此,研究控制我国夏季降水的东亚季风及夏季水汽输送变化特征具有十分重要的意义。以下着重从近年来影响我国北方夏季降水的水汽输送、风场、涡度场、散度场以及位势高度场等的变化来分析干旱化的发生与东亚季风的联系。

4.1 夏季经向风变化特征与中国北方降水的关系

中国处于东亚季风区,海陆热力差异的变化直接影响到风速大小、风向的变化,对此已有许多学者进行深入研究^[19~26]。但关于夏季风强弱、进退的年代际变化对北方干旱化形成的可能影响的研究却较少,因此这里主要通过对我东部夏季经向风年代际变化的分析,来探讨夏季经向风强弱、进退变化同我国北方干旱化异常特征的可能联系。

夏季风强弱变化可由风速大小或经向风进退所

到达最远位置来定,亦可由某一特定风速值所达位置来定。首先,我们给出夏季中国东部雨带多年变化(图3a)。华北半干旱区年降水量一般在400mm左右(图1中的C区)。从图3a中可见,近年来400mm等值线南北摆动明显,1958年至20世纪70年代末400mm线偏北,而20世纪70年代末开始南退,仅在20世纪90年代中期又开始北进。对应雨带(以400mm等值线变化为例),图3b给出了中国东部(110°E~120°E)夏季(6~8月)经向风强、弱的逐年变化。从年代际尺度上来看,年降水量400mm等值线与夏季经向风1.5m/s等值线变化特征大致吻合,且与郭其蕴等^[26]定义的夏季风指数的年代际变化特征一致。因此,可以认为以1.5m/s代表夏季经向风的变化特征具有一定的可靠性。比较图3a、b,可清楚地看到东亚夏季经向风具有明显的年际和年代际变化特征,夏季经向风在1958年至20世纪70年代末北进明显、强度偏强,之后急速南退、强度偏弱。

4.2 水汽输送特征

水汽通量是指单位时间内通过单位面积所输送的水汽量,其表达式为

$$Q = \frac{1}{g} V q,$$

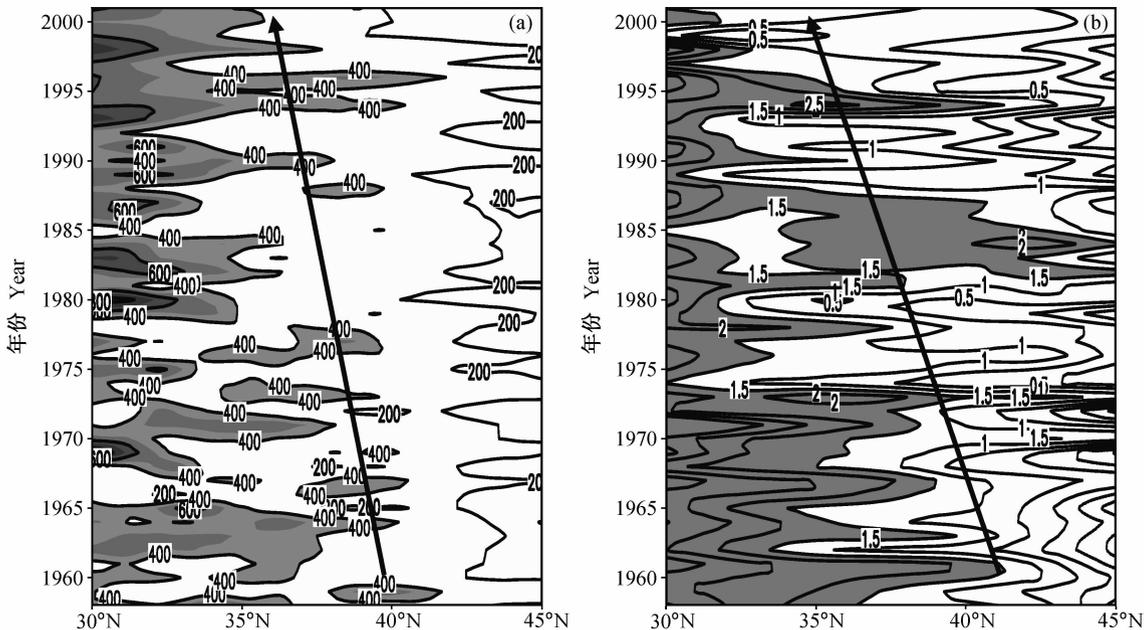


图 3 110°E ~120°E 经度带年降水量(a, 单位: mm)和平均经向风速(b, 单位: m/s)随时间和纬度的变化
 Fig. 3 The characteristics of annual rainfall (a, units: mm) and summer south wind (b, units: m/s) from 110°E to 120°E

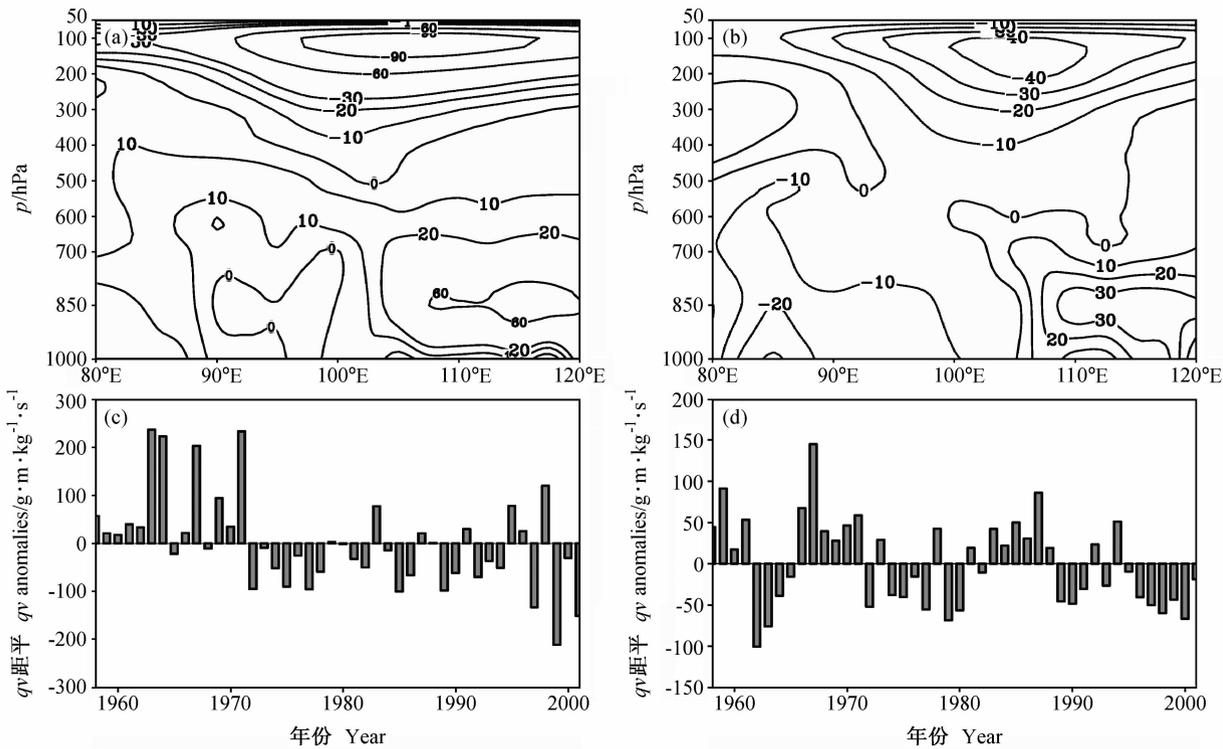


图 4 近 44 年中国区域经向水汽输送变化特征(单位: $g \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$): 30°N (a) 和 35°N (b) 近 44 年 qv 平均值; 近 44 年 850 hPa (30°N, 115°E) (c) 和 (35°N, 115°E) (d) qv 距平序列
 Fig. 4 The characteristics of meridional qv in China during the last 44 years (units: $g \cdot m \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$): Average of qv at 30°N (a) and 35°N (b) during the 44 years; deviation series of qv anomalies at (30°N, 115°E) (c) and (35°N, 115°E) (d) at 850 hPa during the 44 years

其中, g 为重力加速度, \mathbf{V} 为风矢量, q 为比湿。中国东部夏季水汽输送主要以夏季经向风 v 为主, 而向北水汽输送的多少直接决定了北方降水变化的多寡。图 4a、b 分别给出 30°N 和 35°N 垂直剖面多年 (1958~2001 年) 年平均 qv 值, 可以看出, 在中国东部 850 hPa 高度有一强水汽通道向北输送水汽。近 44 年来 30°N 和 35°N 年 qv 的线性趋势系数分布图(图略)显示, 中国东部水汽通道的通量值有明显的减少趋势。图 4c、d 分别给出 850 hPa (30°N , 115°E) 和 (35°N , 115°E) 的年平均 qv 值多年距平序列。同图 2b、c 对比可以看出, 在年代际尺度上, qv 值同中国北方降水以及年 PDSI 变化密切相关, 尤其是西北东部和华北地区变化更为密切, 20 世纪 50 年代末至 70 年代初 qv 值相对较大, 与之对应的是西北东部、华北和东北地区降水偏多, PDSI 表现为湿润、严重湿润年份; 1999 年至 2001 年 qv 值极度偏少, 西北东部区域平均降水较均值偏少

50 mm 左右, 华北地区降水较均值偏少 100 mm, 年 PDSI 趋势检验显示出干旱化趋势明显。

年降水量、年 PDSI 以及夏季经向风变化特征都表明, 中国北方地区 1958 年至 20 世纪 70 年代末相对湿润, 70 年代末至今相对干旱, 这与 Miller 等^[27] 和 Ebbesmeyer 等^[28] 的研究结果相一致; 太平洋气候系统在 1976~1977 年发生转变, 中纬度地区由相对湿润时段过渡为相对干旱时段。为了更清楚地分析典型气候时段干湿变化特征与季风环流强弱变化的联系, 可把 1976 年前后分为两个时段进行对比分析。因此, 以下分析将 1958~1976 年划分为相对湿润时段(强夏季风时段), 1977~2001 年为相对干旱时段(弱夏季风时段)。

统计得出, 强夏季风时段(1958~1976 年), 北方地区水汽通量值偏高、年 PDSI 显示干旱年份比例偏低、年降水量偏大。概率统计为: 两个格点处水汽通量偏低概率分别为 36.8% 和 42.1%, 年

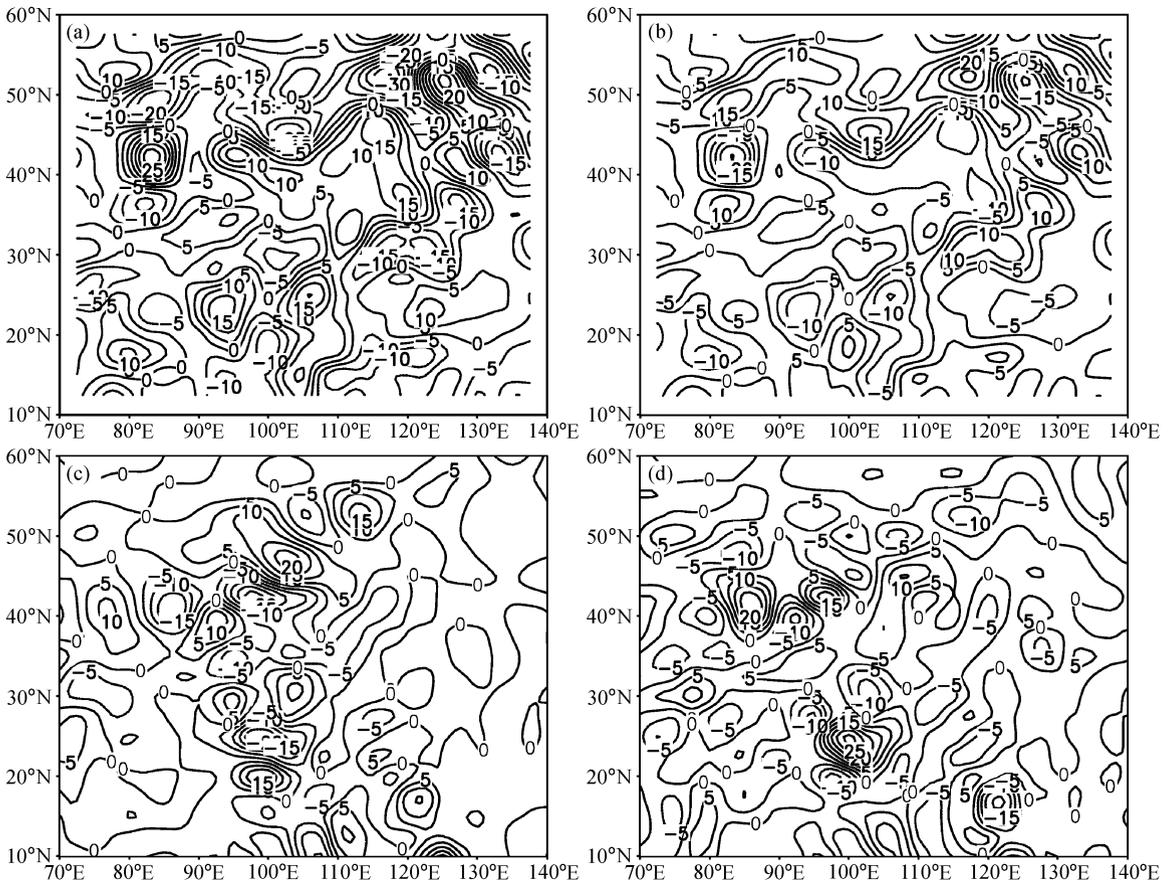


图 5 850 hPa 相对干旱、湿润时段涡度和散度距平场(单位: 10^{-5}s^{-1}): (a) 1958~1976 年涡度距平场; (b) 1977~2001 年涡度距平场; (c) 1958~1976 年散度距平场; (d) 1977~2001 年散度距平场。

Fig. 5 The anomaly fields of 850 hPa vorticity and divergence during the period of dryness and wetness (units: 10^{-5}s^{-1}): Vorticity anomalies during 1958-1976 (a) and 1977-2001 (b); divergence anomalies during 1958-1976 (c) and 1977-2001 (d)

PDSI 显示华北和西北东部地区早年概率分别为 24.1% 和 31.6%，年降水量偏少年概率分别为 31.6% 和 52.6%；而相对弱夏季风时段(1977~2001 年)，水汽通量值偏低、年 PDSI 显示干旱年份概率偏高、年降水量偏小。统计对应为：两个格点水汽通量偏低概率分别为 68% 和 60%，年 PDSI 显示华北和西北东部地区早年概率分别为 44% 和 52%，年降水量偏少年概率分别为 60% 和 52%。

4.3 涡度场、散度场异常特征

图 5a、b 分别给出相对湿润时段(1958~1976 年)和相对干旱时段(1977~2001 年)夏季 850 hPa 涡度距平场，湿润时段中国大部分地区 850 hPa 涡度异常场偏强，北方最为突出，而干旱时段涡度异常场偏弱，华北偏弱最明显。即在中国北方相对湿润时段正涡度偏强，辐合上升气流强盛，而相对干旱时段正涡度偏弱，辐合上升气流减弱。850 hPa 散度距平场(图 5c、d)也有同样结果。显然，在中国北方地区上空相对湿润时段辐合上升气流偏强，有利于降水的形成，而相对干旱时段辐散下沉气流偏强，不利于降水的形成。

5 结论和讨论

(1) 中国北方干旱具有显著的年际、年代际变化特征，西北西部极端干旱、严重干旱年份持续出现；西北东部和华北地区 20 世纪 70 年代末至今干旱化加剧，MK 趋势检验结果显示变干趋势明显，且通过 95% 显著性检验；东北地区 20 世纪 70 年代末至今干旱有所缓和，但 90 年代中期以来又开始变干，2001 年和 2002 年出现严重干旱。

(2) 北方干旱化特征同东亚夏季风以及大气环流异常特征在年代际尺度上密切相关：近年来，东亚夏季风减弱明显，以致向北水汽输送明显减弱，北方干旱化加剧；强夏季风时段，水汽输送量较多，年 PDSI 显示湿润年份偏多；而弱夏季风时段，水汽输送量较少，年 PDSI 显示干旱年份偏多；相对湿润时段(1958~1976 年)850 hPa 涡度场出现正距平，散度场出现负距平，而干旱时段(1977~2001 年)则反之。

当前中国北方干旱化趋势是气候年代际变化的具体表现，温度升高和降水减少是干旱化的直接原因。但是，我们在研究中发现中国北方干旱化与东亚夏季风年际变化的对应关系具有多面性的复杂特

征，表明在年际变化上，中国北方干旱化是多种因子共同作用的结果，这将在另文加以讨论。

致谢 感谢两位审稿人提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

- [1] 叶笃正, 黄荣辉. 旱涝气候研究进展. 北京: 气象出版社, 1990. 1~156
Ye Duzheng, Huang Ronghui. *The Climate Research of Drought and Flood* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1990. 1~156
- [2] 戴新刚, 汪萍, 丑纪范. 华北汛期降水多尺度特征与夏季风年代际衰变. 科学通报, 2003, **48**(23): 2483~2487
Dai Xingang, Wang Ping, Chou Jifan. Multiscale characteristics of the rainy season rainfall and interdecadal decaying of summer monsoon in North China. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2003, **48**(23): 2483~2487
- [3] 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系. 气象学报, 2000, **58**(3): 278~287
Ma Zhuguo, Wei Helin, Fu Congbin. Relationship between regional soil moisture variation and climatic variability over east China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58**(3): 278~287
- [4] 李新周, 刘晓东, 马柱国. 近百年全球主要干旱区干旱化特征分析. 干旱区研究, 2004, **21**: 97~103
Li Xinzhou, Liu Xiaodong, Ma Zhuguo. Analysis on the drought characteristics in the main arid regions in the world since recent hundred-odd years. *Arid Zone Research* (in Chinese), 2004, **21**: 97~103
- [5] Fu Congbin. An arid trend in China in association with global warming. *Climate Biosphere Interaction: Biogenic Emissions and Environmental Effects of Climate Change*. Zepp R G, Ed. New York: John Wiley and Sons, Inc, 1994. 1~7
- [6] Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 2002, **297**: 2250~2253
- [7] 龚道溢, 王绍武. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. 科学通报, 1999, **44**(3): 315~320
Gong Daoyi, Wang Shaowu. The impact of ENSO on the rainfall over China and the earth. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1999, **44**(3): 315~320
- [8] Lu Riyu. Indices of the summertime western North Pacific subtropical high. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 1004~1028
- [9] 郝益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候的影响 I: 初步模拟结果. 气象学报, 2002, **60**: 1~15
Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. The effects of vegetation change on regional climate I: Simulation results. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60**: 1~15
- [10] Palmer W C. Meteorological Drought Research Paper 19,

- No. 45. Weather Bureau, Washington D. C., 1965, 58
- [11] Dai Aiguo, Trenberth K E, Karl T. Global variations in droughts and wet spells; 1900–1995. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(17): 3367~3370
- [12] 卫捷, 陶诗言, 张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用. *地理学报*, 2003, **58**(增刊): 91~99
Wei Jie, Tao Shiyang, Zhang Qingyun. Analysis of drought in northern China based on the Palmer severity drought index. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (Supplement): 91~99
- [13] 安顺清, 邢久星. 帕尔默旱度模式的修正. *气象科学研究院刊*, 1986, **1**(1): 75~82
An Shunqing, Xing Jiuxing. Modification of Palmer drought severity model. *Journal of Chinese Academy of Meteorological Sciences* (in Chinese), 1986, **1**(1): 75~82
- [14] 王宝灵, 孙国武, 张焕儒. 中国西北地区月降水量的年际变化和分区研究. 见: 孙国武主编. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1997. 52~57
Wang Baoling, Sun Guowu, Zhang Huanru. Analysis on the subarea and interannul change of monthly precipitation in northwest of China. *Analysis on Aridity Climate in Northwest of China* (in Chinese), Sun Guowu, Ed, Beijing: China Meteorological Press, 1997. 52~57
- [15] 王绍武, 龚道溢. 对气候变暖问题争议的分析. *地理研究*, 2001, **20**(2): 153~160
Wang Shaowu, Gong Daoyi. On debates concerning the global warming. *Geographical Research* (in Chinese), 2001, **20** (2): 153~160
- [16] 宋连春. 近 40 年我国气温时空变化特征. *应用气象学报*, 1994, **4**(1): 119~124
Song Lianchun. Characteristics of temperature in spatial and temporal variation in China during recent 40 years. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 1994, **4**(1): 119~124
- [17] 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 中国气温的年代际震荡及其未来趋势. *气象科技*, 2003, **31**(3): 136~146
Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. Interdecadal climate oscillation of temperature in China and its future change. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2003, **31** (3): 136~146
- [18] 卫捷, 马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较. *地理学报*, 2003, **58**(增刊): 117~124
Wei Jie, Ma Zhuguo. Comparison of Palmer drought severity index, percentage of precipitation anomaly and surface humid index. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2003, **58** (supplement): 117~124
- [19] 涂长望, 黄土松. 中国夏季风之进退. *气象学报*, 1944, **18**: 81~92
Tu Changwang, Huang Shisong. The advance and retreat of the summer monsoon in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1944, **18**: 81~92
- [20] 谢义柄, 戴武杰. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算. *气象学报*, 1959, **30**(2): 171~185
Xie Yibing, Dai Wujie. Certain Computational results of water vapour transport over Eastern China for a selected synoptic case. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1959, **30** (2): 171~185
- [21] Murakami T. The general circulation and water vapor balance over the Far East during the rainy season. *Geophys. Mag.*, 1957, **29** (2): 131~171
- [22] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦, 等. 东亚季风. 北京: 气象出版社, 1991. 192~244
Chen Longxun, Zhu Qianguan, Luo Huibang, et al. *The Monsoon of East Asia*. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 192~244
- [23] Zeng Q C, Zhang R L, Liang Y L, et al. East Asian summer monsoon—a case study. *Proc. Indian Natri. Sci. Acad.*, 1994, **60A**(1): 81~96
- [24] 叶笃正, 黄荣辉. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科技出版社, 1996. 61~93
Ye Duzheng, Huang Ronghui. *Analysis of the Mechanisms and Rules of Drought and Flood of the Yangtze River and the Yellow River Valleys*. Jinan: Shangdong Technology Press, 1996. 61~93
- [25] 黄刚, 严中伟. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化. *科学通报*, 1999, **44**: 421~424
Huang Gang, Yan Zhongwei. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variation. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 1999, **44**: 421~424
- [26] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究. *大气科学*, 2004, **28**(2): 206~215
Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xunmei. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during AD 1873–2000. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28**(2): 206~215
- [27] Miller A J, Cayan D R, Barnett T P, et al. The 1976–77 climate shift of the Pacific Ocean. *Oceanography*, 1994, **7**: 21~26
- [28] Ebbesmeyer C C, Cayan D R, McLain D R, et al. 1976 step in the Pacific climate: forty environmental changes between 1968–75 and 1977–1984. In: Proc. 7th Ann. Pacific Climate Workshop, Betancourt J L, Tharp V L, Eds. Calif. Dept. of Water Resources. Interagency Ecol. Stud. Prog. Report 26, 1991