

# 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系

马柱国<sup>1</sup> 邵丽娟<sup>2</sup>

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

2 中国民航西北空中交通管理局气象中心, 西安 710082

**摘 要** 利用 CRU (Climate Research Unit) 1901~2002 年全球  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  网格点月降水和月平均气温资料, 利用一个能够用于检测地表干湿变化的湿润指数, 对中国北方四个典型地区干湿演变特征及与北太平洋年代际振荡的关系进行了初步的分析。结果发现: 降水和湿润指数在表征干湿变化的特征时有明显的差别, 特别是在干旱和半干旱地区, 增暖也是影响干湿变化的一个重要因素。相关分析表明, 华北和西北东部的年干湿变化与同期太平洋年代际振荡 (简称 PDO) 指数有密切的关系, PDO 指数的正位相对应两个地区的干旱时段, 负位则对应两个地区的湿润时段, 而新疆南部与 PDO 指数同期呈显著的正相关关系, 即当 PDO 为正位相时, 该地区为湿的时段, 负位相对应干的时段。以  $100^\circ\text{E}$  为界, 北方的东部干湿变化与太平洋年代际振荡指数呈反相关, 而西部则相反, 与 PDO 呈正相关关系。

**关键词** 中国北方 干湿变化 湿润指数 太平洋年代际振荡 相关关系

**文章编号** 1006-9895(2006)03-0464-11

**中图分类号** P461

**文献标识码** A

## Relationship Between Dry/Wet Variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in Northern China During the Last 100 Years

MA Zhu-Guo<sup>1</sup> and SHAO Li-Juan<sup>2</sup>

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

2 Meteorological Center, Xi'an Administration of Civil Aviation Administration of China (CAAC), Xi'an 710082

**Abstract** The 1901-2002 global  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  grid data of monthly precipitation and monthly mean air temperature are used to establish a humid index to detect the dry/wet variation at the surface. The relationship between dry/wet evolution of four subregions in northern China and the Pacific Decade Oscillation (PDO) is studied using the index. The precipitation analysis shows that the precipitation of the western part of Northwest China in the last 100 years is markedly increasing during the two periods of 1925-1955 and 1962-1992 including the 2-3 year periodic change, and a decreasing trend occurs after 1992. In the eastern part of Northwest China, the precipitation in last 100 years presents 2-3 year periodic change without obvious variation trend and the precipitation range decreases after 1970. The decreasing trend has shown in North China since 1950. In Northeast China, the 25-year periodic change is very obvious, and a dropping trend is superimposed upon the periodic oscillation after 1950. The analysis result from the humid index is different from that of precipitation variation, especially in the two subregions of Northwest China. In the western part of Northwest China, the humid index does not show the increasing trend despite the enlarging trend of precipitation, but the dropping trend (not in precipitation) of humid index occurs in the eastern part of Northwest

**收稿日期** 2005-01-10, 2005-07-10 收修定稿

**资助项目** 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB400504, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX3-SW-229, 国家自然科学基金资助项目 40375028

**作者简介** 马柱国, 男, 1963 年出生, 研究员, 主要从事气候变化研究。E-mail: mazg@tea.ac.cn

China. The decreasing trend of humid index is more obvious than that of precipitation in North China and Northeast China. This accounts for the temperature variation as one of the important reasons inducing and enhancing aridification in addition to the precipitation variation, especially in arid and semi-arid regions. In North China and Northeast China, the dry/wet variation at interannual and interdecadal scales is obvious.

PDO is closely related to the dry/wet variation of northern China. The correlation is significant in North China, the eastern part of Northwest China and the western part of the Tibetan Plateau south of the Tianshan Mountain. The correlation between dry/wet variation and PDO in Southwest China and South China is also significant. The negative correlation is shown in North China and the eastern part of Northwest China. The positive correlation exists between the surface humid index and PDO in the western part of the Tibetan Plateau. The reverse sign of correlation coefficients between PDO and humid index occurs in eastern and western China with the boundary of 100°E. The anomaly analysis shows that the interdecadal anomaly phase of PDO is contrary to the phase of humid index in North China and the eastern part of Northwest China, and the same phase duration is about 20–30 years. According to the interdecadal periodic calculation, the pattern shifts will occur possibly in future in North China and the eastern part of Northwest China, which means the wetting shifts for the two subregions. But the temperature increase enlarges the uncertainty for the calculation, and warming may delay or prevent this kind of shift.

**Key words** northern China, the dry/wet change, humid index, the Pacific decade oscillation, correlation

## 1 引言

数值模拟结果表明<sup>[1~4]</sup>, 在全球增暖背景下, 中纬度地区将会变干, 但这种变化具有明显的区域差异。在中国北方, 西北西部(主要是新疆北部)降水量在 1987 年以后明显增加, 而西北东部、华北和东北大部分地区降水量近 20 年却严重偏少, 这造成当前在北方东、西部降水趋势相反的空间分布格局<sup>[5, 6]</sup>。干湿检测说明: 西北东部、华北和东北过去 50 年为明显的干化趋势, 尽管新疆北部降水量增加, 但却没有明显的变湿趋势, 原因是该地区的异常增暖可能导致地表蒸散增加<sup>[6]</sup>。造成这种异常气候时空分布格局的原因是什么? 目前仍没有令人信服的解释。

过去的研究指出, 赤道中太平洋地区年代际变化与中国东部旱涝 36 年周期密切相关; 黄荣辉等<sup>[7]</sup>发现 ENSO 及其不同的发展过程对中国夏季降水具有不同的影响, 华北地区的少雨与 ENSO 的发展有关。于淑秋等<sup>[8]</sup>指出: 1976/1977 年的北太平洋海温转型前后所对应的中国区域降水是不同的, 转型前东北地区降水偏少, 华北地区偏少, 长江流域偏少, 华南偏多, 转型后则相反。黄荣辉等<sup>[9]</sup>进一步研究指出, 中国夏季降水的年代际变化可能与赤道中东太平洋的海温变化有关。朱益民等<sup>[10]</sup>的研究表明, 中国区域降水和气温的变化与太平洋年际振荡(Pacific Decadal Oscillation, 简称 PDO)有关, 不同区域气候变化与 PDO 的相关关系

具有较大的差异。这些研究从不同方面说明我国年际及年代际气候变化与海洋的变化有密切关系。

太平洋年代际振荡(PDO)最早由 Mantua 等<sup>[11]</sup>在 1997 年提出, 也有一些研究称之为年代际太平洋涛动(Interdecadal Pacific Oscillation, 简称 IPO)或北太平洋涛动(the North Pacific Oscillation, 简称 NPO)。太平洋年代际振荡是北太平洋海温年代际循环的海洋现象, 关于它的特征及作用已在文献<sup>[12]</sup>中进行了全面的概括和总结。简单地讲, PDO 的暖位相在海温上表现为中北太平洋异常低温, 而北美洲的西海岸是显著的高温带, 类似于 El Niño 的海温分布, 但位置在中北太平洋; 在气压图上, 对应 11 月到 3 月北太平洋异常低的气压, 从而加强了该地区的反气旋风, 副热带太平洋对应高的海平面气压, 赤道西太平洋是异常高的海平面气压, 而赤道东太平洋是异常低的海平面气压, 这恰好与一个相对弱的南方涛动(SO)负位相对应。冷位相的 PDO 特征则反之。研究表明, PDO 存在 15~25 年<sup>[13]</sup>和 50~70 年<sup>[14]</sup>的年代际周期变化。大量的研究还揭示了 PDO 和年代际气候变率及太平洋生物的年代际变率有关<sup>[15~17]</sup>。

近年来, 作为人类生存环境变化研究的一个重要方面, 年际及年代际气候变化问题也受到了广泛的关注<sup>[18]</sup>, 特别是对全球或者区域尺度干湿演变规律的研究<sup>[19, 20]</sup>。地表干湿的年际及年代际变化在特定时段往往表现为一种变化趋势(如干旱化),

在另一段时间呈现另一种变化趋势,而干湿变化的特征则是由气候变化决定,即由地表的降水和气温决定。过去的许多研究表明,中国区域气候变化与 ENSO、NAO(北大西洋涛动)、PDO 等年际和年代际现象密切相关,但以前的研究多针对降水和气温等的分别研究上,而对于这些年际及年代际变化的强信号与中国区域干湿变化(降水和气温长期变化的综合效应)的关系还知之甚少,特别是对当前中国北方干湿变化的趋势与 PDO 的关系。鉴于此,本文拟在过去研究的基础上,通过分析 PDO 和我国北方干湿变化的相互联系来揭示太平洋年代际振荡(PDO)对我国环境长期变化的综合效应,为进一步进行环境的年际及年代际变化的研究及预测提供证据。

## 2 资料和分析方法

本文所用资料为 Climate Research Unit (CRU)<sup>[21]</sup>1901~2002 年全球  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$  网格点月降水和月平均气温资料(关于这个资料在文献[6]中已有详细的说明)。为了进一步考察这套资料在中国区域的质量,我们用 160 个观测站点的月降水和平均气温资料对我国区域的网格点资料进行了检验,结果表明:除青藏高原西部外,大部分地区格点资料都和实测资料吻合得很好(详细的检验结果将另文<sup>①</sup>发表)。太平洋年代际振荡(PDO)指数取自 <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest>。

有关湿润指数的建立,文献[22]已有详细的介绍,在此只简单地说明这个指数的物理意义。控制地表干湿状况变化的两个主要影响因子是降水和地表蒸发,而地表蒸发大小和地表蒸发潜力有比较一致的关系,且受温度的影响(特别在北方地区)。降水增多有利于地表变湿,而地表蒸发潜力增大可使地表变干。基于这些考虑,我们把年湿润指数  $H$  定义为

$$H = P - \sum P_{ei}, \quad (1)$$

其中,  $P$  为年降水的观测值,  $P_{ei}$  为第  $i$  个月的潜在蒸发,可由经过改进的 Thomthwaite 方法<sup>[23]</sup>求得,其表达式如下:

$$P_{ei} = \begin{cases} 0, & T_i \leq 1^{\circ}\text{C}, \\ 1.6d\left(\frac{10T_i}{I}\right)^a \times 10, & 1^{\circ}\text{C} < T_i \leq 26.5^{\circ}\text{C}, \\ a_1 + a_2 T_i + a_3 T_i^2, & T_i > 26.5^{\circ}\text{C}, \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $d$  为每月天数除以 30,  $a=0.49239+1.792\times 10^{-2}-7.71\times 10^{-5}I^2+6.75\times 10^{-7}I^3$ ,

$$I = \sum_{i=1}^{12} i$$

为月总加热指数,  $i = (T_i/5)^{1.514}$  为月平均加热指数,其中  $T_i$  为第  $i$  个月的月平均温度,  $a_1 = -415.8547$ ,  $a_2 = 32.2441$ ,  $a_3 = -0.4325$ 。Thomthwaite 方法的优点在于计算简单,且仅依赖于月平均气温,根据(1)和(2)式即可计算出年地表湿润指数。地表湿润指数( $H$ )的意义就在于既考虑降水变化又考虑温度变化对地表湿润状况的影响,弥补了仅用降水变化研究地表干湿变化的缺陷。

对突变的检测采用常用的 Mann-Kendall 方法<sup>[24]</sup>(简称 M-K 法),这个方法是一种无参数检验方法,它的优点是样本不必遵从某一特定的分布,同时也不受个别极端值的影响,能够较客观地表征样本序列的整体变化趋势,计算方便,因此经常被用来分析时间序列的变化趋势及其突变点的检测(该方法已在文献[24, 25]中详细介绍)。另外,采用离散功率谱分析方法进行时间序列的周期分析。

## 3 结果分析

### 3.1 北方典型干旱区干湿变化特征

为了表征干湿变化的区域特征,把中国北方分为四个典型区域(见图 1),分别称为西北西部[分区 1: ( $40^{\circ}\text{N}\sim 47.5^{\circ}\text{N}$ ,  $82^{\circ}\text{E}\sim 95^{\circ}\text{E}$ )]、西北东部[分区 2: ( $32.5^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{E}\sim 107.5^{\circ}\text{E}$ )]、华北区

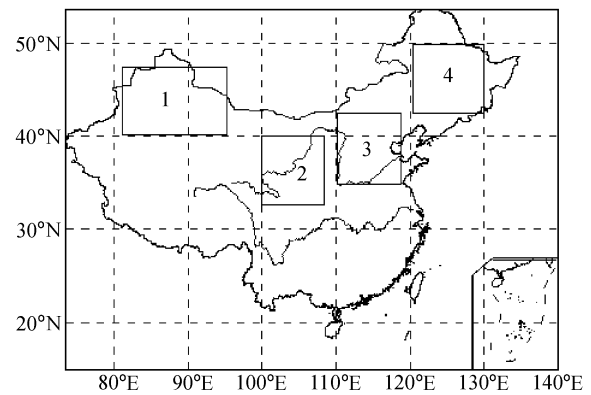


图 1 北方四个分区示意图  
Fig. 1 Diagram of four subregions of northern China

① 马柱国, DRU (Climate Research Unit) 网格点资料在中国区域和站点资料的对比(未发表)

[分区 3: (35°N~42.5°N, 110°E~117.5°E)]和东北[分区 4: (42.5°N~50°N, 120°E~130°E)], 分别计算其湿润指数的区域平均值, 以此分析四个区各自区域平均状况的变化特征。

图 2 为 1901~2002 年四个区域平均湿润指数 5 年滑动的变化曲线。可以看出, 在西北西部, 40 年代以前, 湿润指数有一个明显的减小趋势, 说明这个时段该区域是明显的变干趋势, 到 40 年代初达到 20 世纪最干, 从 40 年代末以后干湿呈现波动变化的特征, 而变差明显增大; 1999 年为历史干旱的第二低。在西北的东部, 最强的两次干旱发生在 20 年代末和 1940 年, 1930 年以前为明显的干化(湿润指数减小)趋势, 从 1940 年开始, 转为明显的变湿(湿润指数增大)趋势, 这种变湿趋势在 60 年代中期达到最湿, 以后湿润指数明显减小, 为一个干化时段, 近 100 年该地区的干湿变化趋势可大致分为三个时段, 1901~1940 年为第一阶段, 是变干趋势; 第二阶段是 1940~1965 年, 为变湿趋势;

1965 年以后直至现在为第三阶段, 是弱的变干趋势。华北和西北东部类似, 20 年代末和 40 年代初期为两个极端干旱的时期, 之后为一个湿润指数增加的趋势, 而 60 年代以后又转为一个下降趋势, 其中 80 年代为一个干旱时段, 在 90 年代中期以后又出现一个明显的下降趋势, 2001 年湿润指数达到历史最低值。总体来看, 华北从 50 年代后期也是一个湿润指数下降的趋势, 也就是说, 这个时段为一个干化趋势, 而最近的 2001 年为极端干旱时段, 与 20 世纪 20 年代的干旱相当, 但降水却多了 23 mm, 两者的湿润指数差为 7 mm, 这与该地区温度的升高有关, 温度变化加剧了干旱的程度, 在后面将进行详细的估算和分析。在东北, 湿润指数存在明显的周期变化, 其中 1923 年的湿润指数最小, 干旱的程度最强, 2001 年次之。仔细分析图 2d 发现, 从 1930 年以后, 湿润指数波动变化的峰值和谷值呈波动式下降, 说明在波动式干湿变化上叠加有一个干旱化趋势。

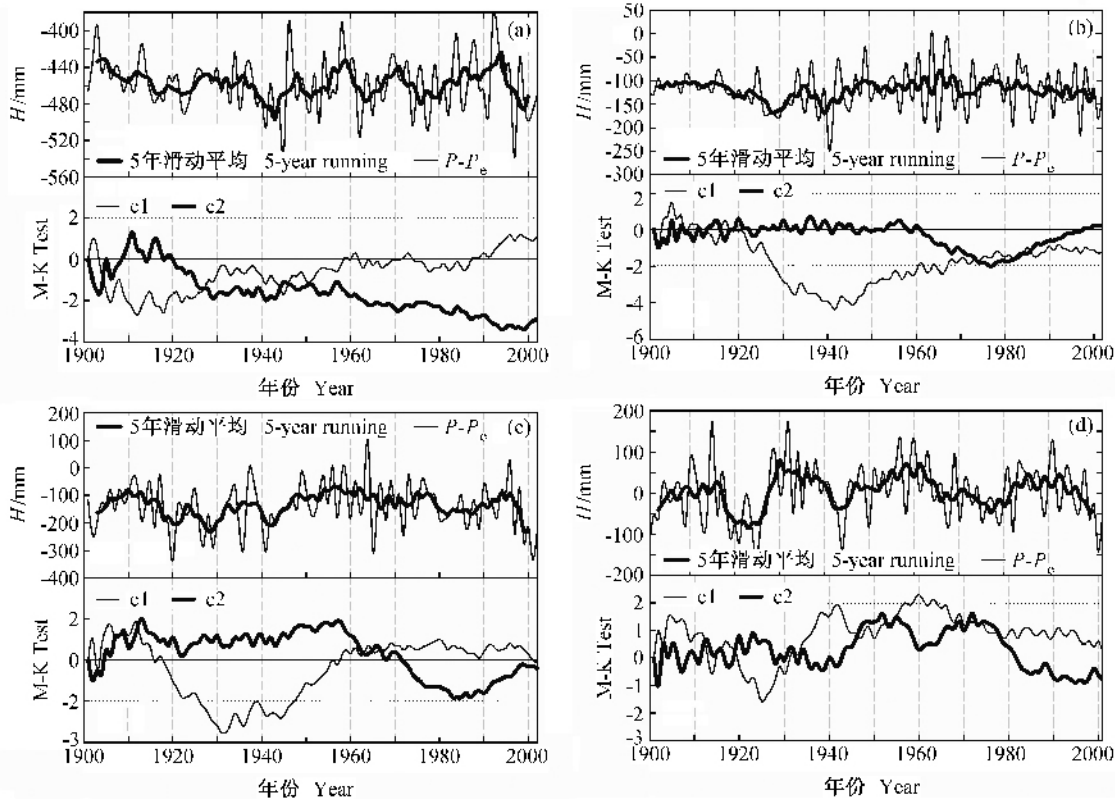


图 2 1901~2002 年区域平均湿润指数( $H$ )的变化: (a)西北西部; (b)西北东部; (c)华北; (d)东北。c1 和 c2 曲线为 M-K 方法的检验曲线, 两者在  $-1.96$  和  $+1.96$  之间的交点即为突变点

Fig. 2 Variation of area mean surface humid index ( $H$ ) in (a) the western part of Northwest China, (b) the eastern part of Northwest China, (c) the central part of northern China, and (d) Northeast China from 1901 to 2002 (c1 and c2 are the curves of M-K testing values, the cross points of c1 and c2 between  $-1.96$  and  $+1.96$  are the abrupt variation of dry/wet index)

利用 Mann-Kendall 方法对四个区的区域平均湿润指数的突变特征进行了检测(图 2a、b、c、d 的下图)。分析发现,在西北西部,1901~2002 年间共出现两次突变,一次出现在 20 世纪的初期,另一次出现在 20 世纪 20 年代的后半期;在西北东部,第一个突变点出现在 20 世纪开始 10 年的后期,第二突变点在 20 世纪 70 年代的中期;在华北,同样存在两个突变点,第一个突变点和上述两个地区的第一突变点相似,也出现在 20 世纪的初期,而第二突变点出现在 20 世纪 60 年代的中期;在东北,突变点一个在 20 世纪的第二个十年里,而另一个在 20 世纪 20 年代。这与符淙斌<sup>[26]</sup>的研究所发现的三个气候突变(20 世纪初、20 世纪 20 年代、20 世纪 60 年代)是一致的,但在同一个地区三个突变不一定都出现,在北方这四个地区,没有一个地区三个突变都出现。比较四个区域的干湿突变点可以发现,在两个高纬度地区,突变点一般发生在 20 世纪的初期,多在 20 世纪第二个十年和 20 世纪 20 年代出现,然而中纬度的两个地区的两次突变一个在 20 世纪 20 年代,另一个在 20 世纪 60 年代或者在 20 世纪 70 年代。

上面分析提到,各个区域都存在着周期性的干湿变化,从图 2 可直观地看出,不同区域周期的大小不同。为了更清楚地了解四个典型区干湿的周期性变化,利用功率谱方法进行了分析。分析发现:在西北西部,干湿变化的主要周期为 5.7 年、3.8 年和 2.9 年;西北东部主要为 3 年和 2.1 年的周期变化;华北主要为 3.1 年和 51 年的周期变化;东北地区存在 25.5 年、3.6~3.8 年和 2.8 年的周期变化。总体来看,2.8~3.8 年周期变化是四个地区所共有的特征。

以上用年湿润指数给出我国北方四个典型地区干湿变化的年际及年代际特征,这个指数的特点是考虑了温度变化对干湿特征的影响,弥补了单一用降水量变化表征干湿变化的不足。因为温度变化特别是当前增暖也是一个重要的影响因素<sup>[22]</sup>,以下的分析充分说明了这一点。

### 3.2 降水和干湿变化的比较

关于中国北方地区的气候变化特征过去已有许多研究,这里不再作详细分析。为了比较湿润指数和降水在表征干湿变化时的差异,我们用类似图 2 的分析,给出了四个区域平均降水的变化(图 3)。

比较图 3a 和图 2a 发现,在 1960 年以后,西北西部降水有一个明显的上升趋势,而在图 2a 上,这种上升趋势不存在,只是干湿振荡的振幅增大(变率增大)。表 1 统计了年湿润指数、降水距平异号的年份。可以看出:在西北两个区,1999~2002 年四年间,其中三个年份的降水距平为正,而湿润指数为负值,说明在这些年份,尽管降水多于正常值,但仍然表现为干旱特征,这说明在增暖背景下,降水量的少量增加还不能改变干旱的特征,而温度的增加将形成或者加剧干旱化程度。分析温度距平发现,西北西部的增暖发生在 1977 年以后,西北东部起始于 1978 年,华北开始于 1975 年,东北开始于 1988 年。对比降水和湿润指数距平可知,在增暖时段,当降水量距平为负值的年份,湿润指数距平值小于降水距平,说明增温加剧了由降水减少所引起的干旱,这样的现象在西北西部有 8 年,西北东部为 7 年,华北为 10 年,东北为 8 年;降水距平为正时,湿润指数为正值但小于降水距平的,西北西部有 6 年,西北东部 5 年,华北为 6 年,东北为 5 年;降水距平为正而湿润指数距平为负的年份西北西部有 4 年,西北东部 4 年,东北 1 年。看来在西北干旱和半干旱区,温度的升高更容易引起干旱的发生,这种现象主要发生在增暖幅度比较大的最近几年(1999、2001 和 2002 年),而在东部,增暖年份多为降雨偏少的年份,在华北,少雨年份占增暖时段的 63%,在东北占 53%,而温度升高使得地表蒸发潜力增大,不利于地表水分的保持,加剧了由降水所引起的干旱化的强度。总体来看,除降水外,温度升高是引起和加剧干旱的一个重要原因,因此在干旱检测时必须考虑温度的影响。

在 20 世纪,降水的突变基本上与湿润指数的特征类似(图 3a、b、c、d 的下图),所不同的是西北东部的第二个突变点出现在 20 世纪 60 年代,早于湿润指数突变发生的时间,这与该时段温度的变化有关。

综合以上分析,在 20 世纪,湿润指数存在着几次明显的突变特征,在北方的高纬度地区,突变多发生在 20 世纪初,在 20 世纪 20 年代以后无突变发生;在纬度相对较低的地区(西北东部和华北地区),20 世纪初和 20 世纪 60、70 年代的突变均比较明显,而高低纬的这种差别是否具有普遍性还有待于进一步的分析。从趋势分析来看,过去一个

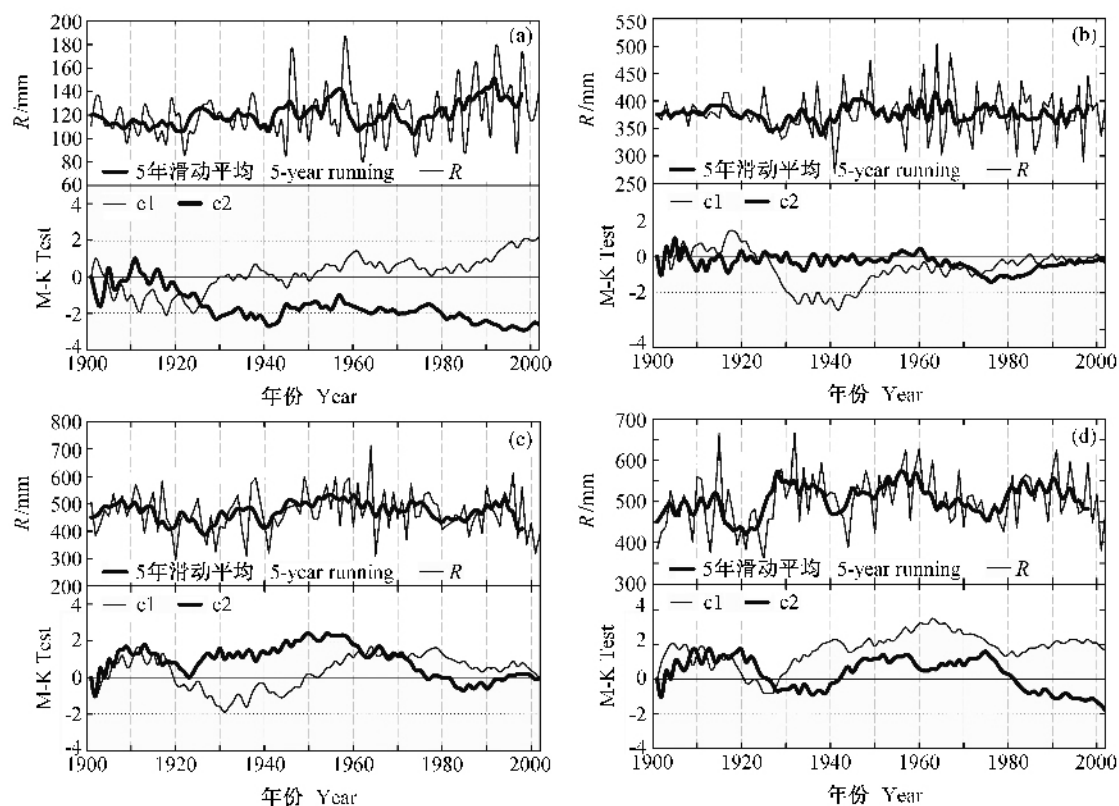


图 3 1901~2002 年区域平均降水量( $R$ )的变化:(a)西北西部;(b)西北东部;(c)华北;(d)东北。其他说明同图 2

Fig. 3 Variation of regional mean precipitation ( $R$ ) in (a) the western part of Northwest China, (b) the eastern part of Northwest China, (c) the central part of northern China, and (d) Northeast China (Others are the same as Fig. 2)

表 1 1901~2002 年降水和湿润指数异号的年份统计

Table 1 Difference of sign between precipitation and  $H$  from 1901 to 2002[illegible]

世纪四个区的湿润指数尽管都存在着不同的变化趋势：西北东部和华北存在干化趋势，西北西部和东北有微弱的变湿趋势，但这些趋势都没有通过显著性检验，说明在过去百年尺度上，我国北方没有明显的变化趋势，只是在干湿振荡的基础上叠加了一个微弱的变化趋势。

### 3.3 北方干湿变化与太平洋年代际振荡的关系

以上分析说明，中国北方典型区域干湿变化既存在周期变化，也存在着长期的变化趋势。西北东部、华北和东北地区都存在着不同程度的干化趋势，这些现象的发生是降水和温度变化综合影响的表现。那么，是什么原因导致干湿变化具有这些特征？近 50 年的资料分析说明<sup>[10]</sup>，不同位相的太平洋年代际振荡对中国区域气温和降水的影响不同，暖位相对应中国北方大部分地区高温和少雨，冷位相结果相反。从过去的研究<sup>[6]</sup>可知，温度升高引起和加剧了北方许多地区的干旱化趋势，由于干湿变化是温度和降水变化等因素共同作用的结果，因此，干旱化趋势的分布既不同于温度的变化又与降水变化有差异。尽管过去的工作已经分析了中国区域气候变化与海温(SST)的年际、年代际变化，但中国北方干湿变化与这些因素的关系尚不清楚。由于 PDO 是年代际变化的强信号，所以，为了探寻两者之间的联系，我们对年湿润指数和年 PDO 指数的关系进行了分析。

图 4 给出了中国区域降水、表面气温和湿润指数与 PDO 的同期相关分布。可以看出，降水和 PDO 同期相关的显著地区主要分布在 35°N 和 45°N 之间，几个强的相关中心分布在华北、西北东部和天山的南部地区，另外一个显著的地区在西南地区。在华北和西北东部，年降水和 PDO 指数呈显著的反相关关系；而在青藏高原的西部却呈现正相关关系。年降水和年 PDO 指数相关的另一个显著特点是东西部(以 100°E 为界)相关系数反号，其形成原因将有待于进一步研究。图 4b，年平均温度与年 PDO 指数在中国大部分地区均为正的相关，只有青藏高原的西南部和横断山脉及其周围为负相关，相关显著的地区分布在东部地区，北方主要在华北和中原地区，南方主要分布在湖南、贵州和广西的部分地区。概括起来，PDO 暖的位相对应我国东部高温少雨，特别是华北和西北东部，这与澳大利亚的情况类似<sup>[11, 12]</sup>；而青藏高原却相反，PDO

的暖位相对应低温多雨。可以看出，中国气候变化与 PDO 有密切的关系，那么由此引起的干湿变化与 PDO 的关系是什么？图 4c 给出了 PDO 指数与中国区域年湿润指数的同期相关系数分布。由图 4c 可以看出，年湿润指数与年 PDO 的相关空间分布与图 4a 的特征大致相似，只是显著相关的范围明显增大，特别是在天山以南和西南地区，西南地区的反相关和天山以南的正相关范围均较图 4a 的显著性相关范围大，对比图 4a、b 还发现，PDO 对中国区域干湿变化的影响远大于对某个单一的气候要素的作用，同时也说明了温度变化对干湿变化的影响。这些结果启发我们可以利用两者的密切相关关系进行我国北方地区干旱变化的预测，也就是说，可以把 PDO 作为一个预报干湿变化的一个重要指标。

为了更进一步地分析中国北方地区干湿变化与 PDO 的关系，我们对两个和 PDO 显著相关的地区西北东部和华北进行区域平均，然后计算出各个区域平均湿润指数、降水和气温，进一步对各序列进行 11 年滑动平均，计算出序列相对于 1961~1990 平均值的距平，并与年 PDO 距平对照比较。图 5 为华北和西北东部区域平均湿润指数、PDO 指数、降水和气温的 11 年滑动距平。可以看出，在华北和西北东北，年代际时间尺度 PDO 的变化和干湿变化存在显著的反相关关系。在 20 世纪 20 年代末期以后，年 PDO 指数存在明显的负位相和两个显著的正位相，每个位相的持续时间大约在 25~30 年，时间分布为正、负、正，而湿润指数对应是负、正、负，湿润指数异常的持续时间与 PDO 指数异常的持续时间相当，也在 25~30 年之间，这说明我国西北东部和华北的干湿存在 50 年左右的周期，与 PDO 指数的变化相吻合<sup>[17]</sup>。如果按这个周期规律来推算，未来年 PDO 指数将向负位相转变，对应这两个地区将应该转湿，但温度在近 20 年是明显的上升趋势，这种升温趋势不利于转湿<sup>[22]</sup>，增加了转型预测的不确定性，特别是在干旱少雨的地区，增温的影响不可忽视。

表 2 给出四个区区域平均年湿润指数与逐月及年 PDO 指数的同期相关系数。可以看出，逐月和年相关最好的是西北东部，其中冬春和夏初(6 月)的相关最好，且都达到 99% 的信度检验，而 7~11 月的相关系数的信度也在 95% 以上。其次相关较好的是华北，除 6~10 月，其他月份相关系数都达

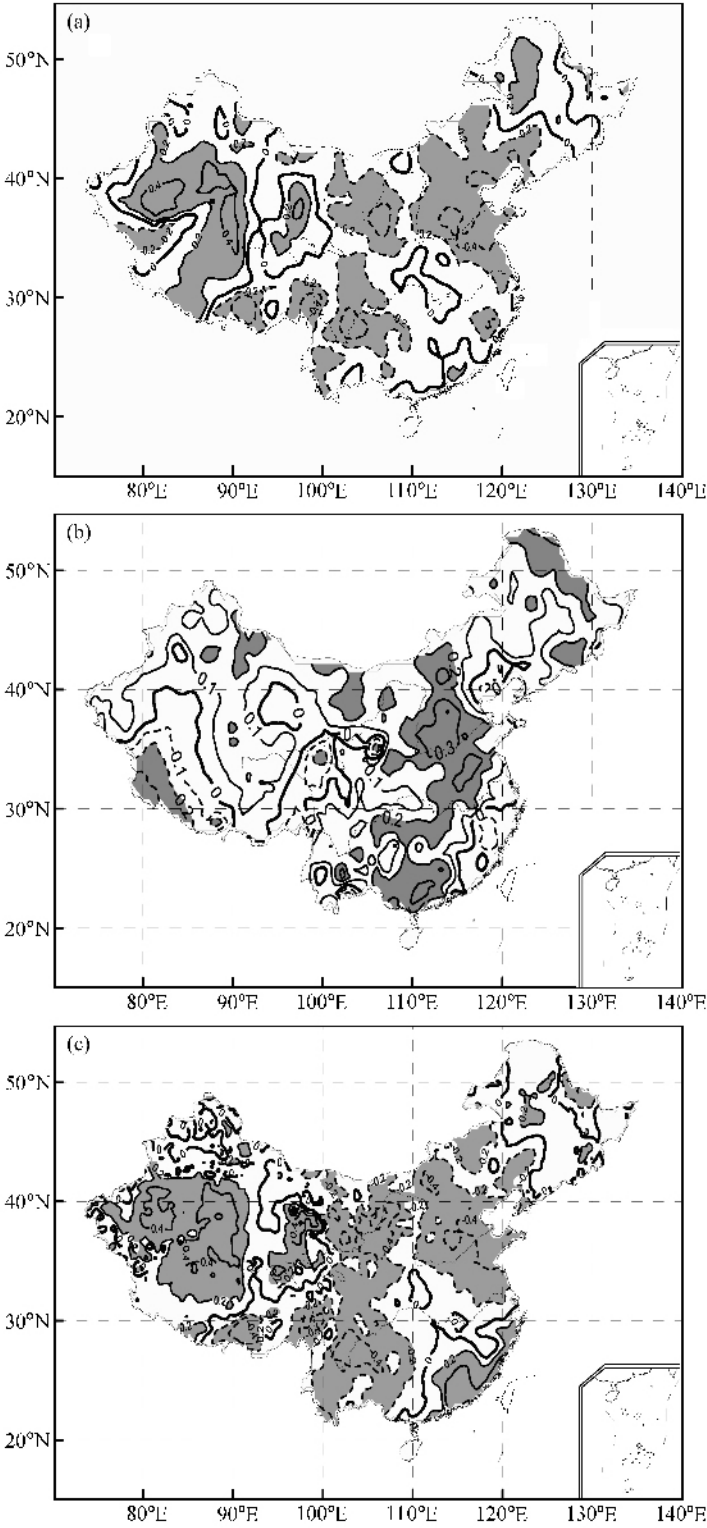


图 4 1901~2002 年中国区域降水、气温和湿润指数和 PDO 的同期相关：(a) 降水与 PDO；(b) 气温与 PDO；(c) 湿润指数与 PDO。阴影区为达到 95% 的信度检验

Fig. 4 Synchronous correlation between PDO and (a) precipitation, (b) surface air temperature, and (c)  $H$  (Shaded areas: the significance of 95%)



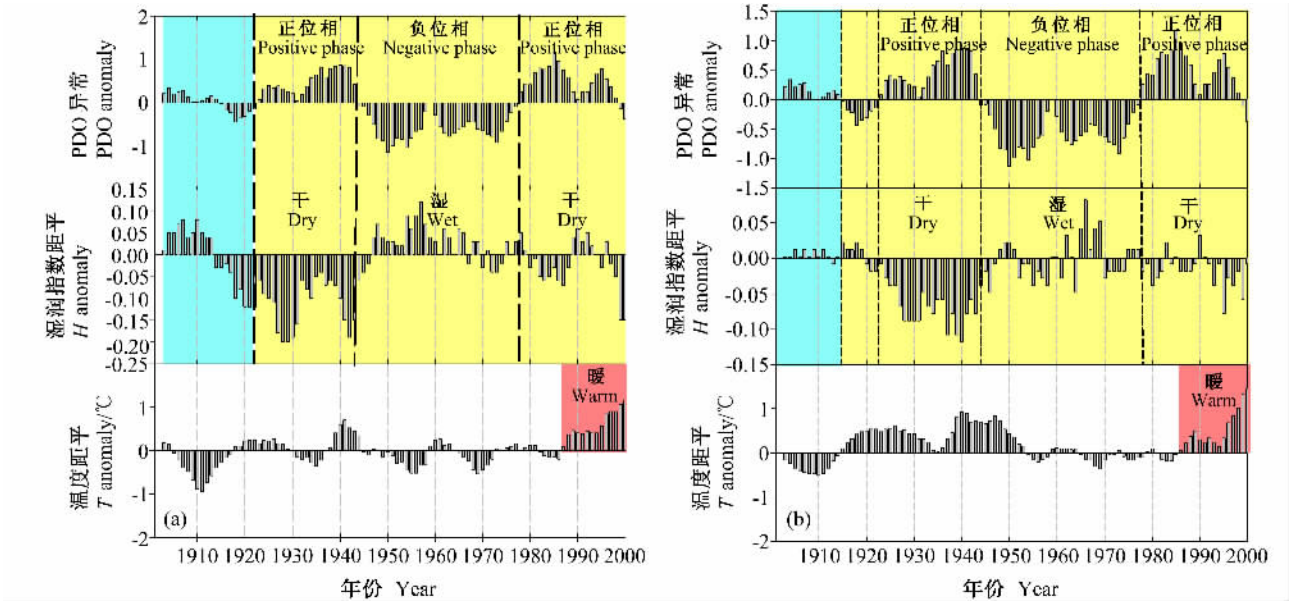


图 5 华北 (a) 和西北东部 (b) 年湿润指数、年 PDO 指数和气温距平的 11 年滑动平均

Fig. 5 Variation of 11-year running mean  $H$ , PDO and surface air temperature anomalies in (a) the central part of North China and (b) the east part of Northwest China

表 2 年湿润指数与逐月及年 PDO 的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between annual  $H$  and monthly PDO index or annual PDO index

|                  | 相关系数 Correlation coefficient               |                                            |                                      |                       |
|------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
|                  | 西北西部<br>Western part<br>of Northwest China | 西北东部<br>Eastern part<br>of Northwest China | 华北<br>Central part<br>of North China | 东北<br>Northeast China |
| Jan              | 0                                          | −0.49                                      | −0.46                                | 0.01                  |
| Feb              | 0                                          | −0.39                                      | −0.47                                | −0.09                 |
| Mar              | 0.12                                       | −0.39                                      | −0.39                                | −0.07                 |
| Apr              | 0.08                                       | −0.45                                      | −0.45                                | 0.01                  |
| May              | 0.26                                       | −0.52                                      | −0.36                                | 0.13                  |
| Jun              | 0.15                                       | −0.55                                      | −0.31                                | 0.14                  |
| Jul              | 0.22                                       | −0.28                                      | −0.18                                | 0.06                  |
| Aug              | 0.24                                       | −0.3                                       | −0.14                                | 0.12                  |
| Sep              | 0.16                                       | −0.27                                      | −0.12                                | 0.03                  |
| Oct              | −0.01                                      | −0.28                                      | −0.16                                | 0.01                  |
| Nov              | −0.1                                       | −0.29                                      | −0.36                                | −0.03                 |
| Dec              | −0.19                                      | −0.48                                      | −0.54                                | −0.06                 |
| 年 PDO Annual PDO | 0.09                                       | −0.46                                      | −0.39                                | 0.02                  |

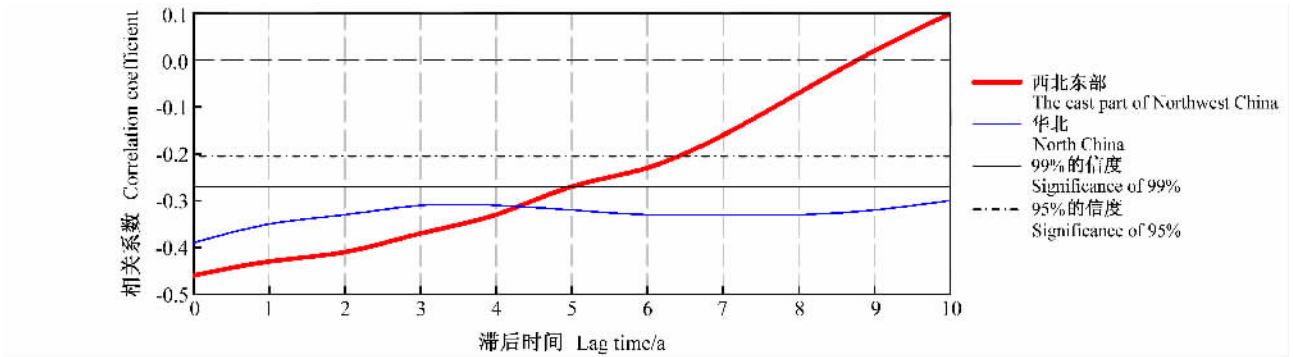


图 6 西北东部和华北区年湿润指数与 PDO 指数的时滞相关系数变化

Fig. 6 Lag-correlation coefficient between annual  $H$  and annual PDO index

到了 99% 的信度检验, 7~11 月不能通过显著性检验。西北西部仅有 5、7、8 三个月的相关系数能够达到 95% 的信度检验。东北地区两者的相关性最差, 无一个月能达到信度检验。从这些结果可以断定, 冬春夏初及秋末的 PDO 指数与华北及西北东部的关系密切。

以上给出了湿润指数与太平洋年代际变化(PDO)指数的同期相关关系。那么, 前期的 PDO 指数对后期的湿润指数是否有影响? 为此, 我们分析了四个区区域平均年湿润指数和年 PDO 指数的时间滞后关系, 发现东北和西北西部年湿润指数与年 PDO 指数的时滞相关较差, 不能通过较高的信度检验; 而西北东部和华北两者的相关性较好。图 6 给出了西北东部和华北两个地区年湿润指数和年 PDO 指数的时间滞后相关系数分布, 从图中可以看出, 在滞后时间为 6.5 年以下, 西北东部的时间相关系数均达到了 95% 的信度检验, 当时滞时间为 5 年时, 两者的时滞相关系数能够达到 99% 的信度检验; 在华北, 滞后时间在 0~10 年的范围内, 相关系数都能达到 99% 的信度检验。由此可见, PDO 指数可作为中国西北东部和华北年代际干湿变化预测的一个重要指标。

## 4 结语与讨论

降水分析表明, 在中国西北西部, 近百年降水量除 2~3 年左右的周期变化外, 在 1925~1955 年和 1962~1992 年两个时段都存在着明显的增加趋势, 1992 年以后, 这个地区的降水呈减小趋势; 西北东部近百年降水存在 2~3 年的周期变化, 但没有明显的变化趋势, 只是 1970 年以后降水的变差减小; 华北地区降水从 1950 年至今为一个减小的趋势; 在东北, 25 年左右的周期变化非常明显, 但从 1950 年以后, 周期波动叠加了一个减小的趋势。湿润指数的分析结果揭示了与降水量变化不同的特征, 特别是西北两个地区。在西北西部, 降水量的增加趋势并未引起湿润指数的增加趋势, 而西北东部湿润指数却出现了降水量未曾有的减小趋势; 华北和东北湿润指数的减小趋势比降水量的减小趋势更加明显。这说明, 除降水量变化外, 温度变化也是引起和加剧干旱化的一个重要原因, 特别是干旱和半干旱地区。另外, 在东北和华北, 干湿的年际和年代际变化明显。

PDO 与我国北方地区干湿变化关系密切。相关显著的地区分别是华北、西北东部和天山南侧青藏高原西部; 西南和华南的干湿变化也与 PDO 有着显著的相关性。在华北和西北东部, 两者呈负相关, 青藏高原的西部地表湿润指数和 PDO 呈正相关。我国东西部(以 100°E 为界)PDO 与湿润指数的相关系数反号。距平分析表明, 华北及东北东部年代际距平与 PDO 指数位相相反, 相同位相的持续期大致在 20~30 年之间。按年代际周期估算, 华北和西北东部未来可能出现转型, 也就是说这两个地区可能转湿, 但温度的持续升高增加了这种估算的不确定性, 增温可能会延缓或者阻止这种转型。

本文仅从资料初步分析了中国北方干湿变化和北太平洋年代际振荡(PDO)的相互关系, 并未涉及它们之间联系的机理, 对这方面问题的进一步研究将有助于深入了解中国北方干湿年际和年代际变化的形成机理。

## 参考文献 (References)

- [1] Manabe S, Wetherald R T, Stouffer R J. Summer dryness due to an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. *Climate Change*, 1981, **3** (4): 336~376
- [2] Manabe S, Wetherald R T. Large scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44**: 1211~1235
- [3] Wetherald R T, Manabe S. Detectability of summer dryness caused by greenhouse warming. *Climatic Change*, 1999, **43**: 495~511
- [4] Wetherald R T, Manabe S. Simulation of hydrologic changes associated with global warming. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107** (D19): 4379~4702
- [5] 施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估. 北京: 气象出版社, 2003. 124pp  
Shi Yafeng, *An Assessment of the Issues of Climatic Shift from Warm-Dry to Warm-Wet in Northwest China* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 124pp
- [6] 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征. *大气科学*, 2005, **29**(5): 671~681  
Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China in last century. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29**(5): 671~681
- [7] Huang Ronghui, Wu Yifang. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**: 21~32

- [8] 于淑秋, 林学椿. 北太平洋海温的气候跃变及其对中国汛期降水影响. 热带气象学报, 1997, **13**(3): 265~275  
Yu Shuqiu, Lin Xuechun. Climatic jump of North Pacific SST and its effect on precipitation of floods season in China. *J. Trop. Meteor.* (in Chinese), 1997, **13** (3): 265~275
- [9] 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 中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**(4): 465~476  
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 1999, **18** (4): 465~476
- [10] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, **61**(6): 641~654  
Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (6): 641~654
- [11] 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**: 1069~753
- [12] Mantua N J, Hare S R. The Pacific decadal oscillation. *J. Oceanography*, 2002, **58**: 35~44
- [13] Tourre Y M, Rajagopalan B, Kushnir Y, et al. Patterns of coherent decadal and interdecadal climate signals in the Pacific Basin during the 20th Century. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**: 2069~2072
- [14] Minobe S. A 50 - 70 year climate oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **24**: 683~686
- [15] Power S, Tseitkin F, Torok S, et al. Australian temperature, Australian rainfall and the Southern Oscillation, 1910 - 1992: Coherent variability and recent changes. *Austr. Meteor. Mag.*, 1997, **47**: 85~101
- [16] Gershunov A, Barnett T P. Interdecadal modulation of EN-SO teleconnections. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1998, **79**: 2715~2726
- [17] Power S, Tseitkin F, Mehta V, et al. Decadal climate variability in Australia during the twentieth century. *Int. J. Climatol.*, 1999, **19**: 169~184
- [18] 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 年代际气候变化研究. 气候与环境研究, 2002, **7**(2): 209~219  
Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. The study interdecadal climate variation. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (2): 209~219
- [19] Qian W. Dry-wet alternation and global monsoon. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**: 3679~3682
- [20] Qian W, Hu Q, Zhu Y, et al. Centennial-scale dry-wet variations in East Asia. *Climate Dynamics*, 2003, **21**: 77~89
- [21] Mitchell T D, Jones P D. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 2005, **25**: 693~712
- [22] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China. *Global and Planetary Change*, 2003, **37**: 189~200
- [23] Thomthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Reviews*, 1948, **38**: 55~94
- [24] Snyers R. On the statistical analysis of series of observations. Technical Note, 143, WMO, Geneva, 1990, 11
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 69~72  
Wei Fengying. *Technology of Modern Climate Statistic Diagnosis and Prediction* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 69~72
- [26] 符淙斌. 气候突变现象的研究. 大气科学, 1994, **18**(3): 373~384  
Fu Congbin. Studies on the observed abrupt climatic change. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (3): 373~384