从靖,赵天保,马玉霞. 2017. 中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 气候与环境研究, 22 (6): 643-657. Cong Jing, Zhao Tianbao, Ma Yuxia. 2017. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation index [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (6): 643-657, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036.

# 中国北方干旱半干旱区降水的多年代际变化 特征及其与太平洋年代际振荡的关系

## 从靖<sup>1,2</sup> 赵天保<sup>3</sup>马玉霞<sup>2</sup>

1 天津市气象台,天津 300074
 2 兰州大学大气科学学院,半干旱气候变化教育部重点实验室,兰州 730000
 3 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室,北京 100029

**摘 要** 基于最新版本的全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre Version 7, GPCC\_V7)资料与欧洲中期数值预报中心 20 世纪再分析资料(ERA-20C)融合的百年尺度逐月降水资料(1901~2012年),运用集合经验模态分解方法(EEMD)、合成分析等方法系统分析了我国北方干旱半干旱区降水多年代际变化特征及与太平洋年代际振荡(PDO)之间的相互关系。结果表明:北方干旱半干旱区大多数区域降水都具有 50~60 年的平均变化周期,而 PDO 对大多数地区降水多年代际变化特征具有明显的调制作用;其中新疆北部和内蒙古北部的降水与 PDO 呈现出显著的正相关,而河套东西部地区的降水则与 PDO 的变化呈现显著负相关。进一步分析表明,当 PDO 为暖相位时,径向环流增强使得北冰洋水汽南下,当遇到低空北上的阿拉伯海域暖湿气流时,会造成新疆中南部的降水增多;另一方面,PDO 暖相位时赤道西太平洋及印度洋区域通过对流加热的作用激发了太平洋一日本/东亚—太平洋(PJ/EAP)遥相关型的产生,这有利于渤海湾暖湿水汽输送至干旱半干旱区北部区域,增大降水概率;同时,当偏北和偏西气流在河套北部区域相遇时会形成降水中心。当 PDO 位于冷位相时,结论则反之。

 关键词
 降水
 干旱半干旱区
 多年代际变化
 太平洋年代际振荡
 集合模态经验分解(EEMD)

 文章编号
 1006-9585 (2017)
 06-0643-15
 中图分类号
 P467
 文献标识码
 A

 doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16036

## Multi-decadal Variability of Precipitation in Arid and Semi-Arid Region of Northern China and Its Relationship with Pacific Decadal Oscillation Index

CONG Jing<sup>1, 2</sup>, ZHAO Tianbao<sup>3</sup>, and MA Yuxia<sup>2</sup>

1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074

2 College of Atmosphere Sciences, Lanzhou University, Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, Lanzhou 730000 4 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** Based on GPCC\_V7 (Global Precipitation Climatology Centre Version 7) and ERA-20C (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts atmospheric reanalysis of the 20th century) monthly precipitation data, multi-decadal

收稿日期 2016-02-06; 网络预出版日期 2016-08-17

作者简介 从靖,女,1990年出生,硕士,助理工程师,主要从事气候变化及其影响、天气预报技术研究。E-mail: congjing2016@126.com

通讯作者 赵天保, E-mail: zhaotb@tea.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0600402,国家自然科学基金项目 41675094、91425304、91525101

Funded by National Key Research and Development Plan Program of China (Grant 2016YFA0600402), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675094, 91425304, and 91525101)

variability (MDV) of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and the relationship between MDV and Pacific Decade Oscillation (PDO) are analyzed using ensemble empirical mode decomposition (EEMD) and composition analysis methods. The result shows that precipitation in arid and semi-arid region of northern China has a multi-decadal variability with an average period of about 50–60 years, which may be modulated by PDO. Precipitation in northern Xinjiang and the Inner Mongolia are significantly positively correlated with PDO, while that in eastern and western Ordos Loop region is significantly negatively correlated with PDO. Further study shows that meridional circulation intensifies during positive PDO phase, leading to more southward water vapor transport from the Arctic Ocean. As a result, precipitation in Xinjiang increases due to the convergence of cold, moist northwesterly flow from the Arctic Ocean and warm, moust southwesterly flow from Arabian Sea in southern Xinjiang. On the other hand, convective heating over the equatorial western Pacific Ocean and Indian Ocean leads to the Pacific Japan/East Asia–Pacific(PJ/EAP) pattern of teleconnection. It is favorable for the transport of moist airmass from Bohai Sea to its northern area and increases precipitation there during positive PDO phrase. Besides, the moist northerly flow from Bohai and westerly flow converges in the northern Ordos Loop area, where a maximum precipitation center forms. The situation is opposite during negative PDO phrase.

Keywords Precipitation, Arid and semi-arid region, Multi-decadal variability, Pacific decadal oscillation, Ensemble empirical mode decomposition

## 1 引言

全球陆地约有30%的区域为干旱、半干旱地区 (黄建平等, 2013),这里气候干燥,降水变率大, 土地覆盖率低(翟盘茂和章国材, 2004; Rotenberg and Yakir, 2010; Huang et al, 2012), 水资源匮乏, 生态系统非常脆弱(Narisma et al., 2007; 黄建平 等,2013),对全球气候变化异常敏感(吕妍等, 2009)。我国北方干旱半干旱区是全球典型干旱半 干旱区之一,约占国土总面积 52% (王涛, 2007)。 该区域主要受下沉气流控制,太阳辐射强度大, 地表蒸发极强。这里降水较少,降水的微小变化 都可能会引起区域气候系统和生态环境的剧烈变 化(冉津江等, 2014)。近 30 年来, 我国北方, 尤其是东北、华北、西北东部地区,在不合理的 人类活动作用下,水土流失严重,从而影响到夏 季风强度,减少内陆的水汽输送(Fu, 2003),干 旱化不断持续,严重威胁当地生态环境(符淙斌 和马柱国,2008)。在全球变暖的背景下,我国降 水空间格局已经发生改变,已有研究表明,我国 北方有从干旱到湿润的转变迹象,西北地区降水 变化表现为西升东降,而西北东部、华北地区、 东北南部仍处于持续的干旱期(王英等,2006; 冉津江等,2014)。

太平洋年代际振荡(PDO)是指北太平洋海温 年代际循环的自然现象。简单讲,PDO暖(冷)相 位表现为北太平洋中部海温异常偏冷(暖),北美

西岸海温异常偏暖(冷),且北太平洋海平面气压 异常偏低(高)(马柱国和邵丽娟, 2006)。PDO不 仅对北美乃至整个北半球大气环流有重要影响 (Gershunov et al., 1999; Bond and Harrison, 2000; Gutzler and Kann, 2002),还可以通过调制 ENSO 事件来间接影响气候(唐民和吕俊梅, 2007)。如: Power et al. (1999) 指出 PDO 不同相位阶段 ENSO 事件对澳洲降水影响不同;朱益民和杨修群(2003) 发现ENSO对中国不同阶段夏季气候异常影响明显 受到 PDO 调制。中国区域降水、气温变化都与 PDO 有关,且不同区域气候变化与 PDO 的相关关系也 具有较大差异。在年代际尺度上,海温变化对华北 干旱形成作用至关重要, PDO 暖相位时华北降水偏 少,气温显著偏高(朱益民和杨修群,2003;马柱 国和邵丽娟, 2006; 马柱国, 2007)。马柱国和邵 丽娟(2006)研究表明,我国北方以100°E为界, 北方的东部干湿变化与 PDO 呈反相关关系,而西 部则相反,与 PDO 呈正相关关系。这些研究从不 同方面揭示了我国气候年际及年代际以上的气候 变化与海洋变化的密切关系,但没有深入探讨 PDO 对我国北方干旱半干旱区多年代际气候变化的影 响和调制作用。

近年来,随着全球变化科学的发展,有关干旱 半干旱区的气候变化,特别是年代际和多年代际干 旱的形成机理成为研究热点问题之一(黄建平等, 2013;赵天保等,2014)。但目前对于中国北方干 旱半干旱区气候的多年代际变化及其机理的研究 还比较少。已有研究发现,华北地区(35°N~ 42.5°N,110°E~117.5°E)降水具有约56年的多年 代际变化,这与帕尔默干旱指数(PDSI)在多尺度 上呈同位相变化,PDSI与PDO呈现出显著的负相 关,尤其是在50~70年多年代际尺度上(Qian and Zhou,2014)。而作为降水变率较为敏感的干旱半 干旱区,还未有研究关注整个区域降水的多年代际 变化特征。本文运用1901~2012年融合了欧洲中 期数值预报中心20世纪再分析资料(ERA-20C) 的全球降水气候中心最新版本(GPCC\_V7)降水数 据,系统分析我国北方干旱半干旱区降水的多年代 际变化特征及与PDO多年代际变化的相关性,旨 在探究影响干旱半干旱区降水多年代际变化的自 然影响因子,为该区多年代际尺度气候预测提供一 定的科学借鉴。

## 2 资料与方法

#### 2.1 资料

#### 2.1.1 降水资料

基于观测资料而研制最新的百年尺度降水序 列目前主要有德国全球降水气候中心 GPCC\_V7 (简称 GPCC)(ftp://ftp.dwd.de/pub/data/gpcc/ html/fulldata\_v7\_doi\_download.html [2016-01-15])

(Schneider et al., 2013) 和英国东英吉利大学气候 研究中心 CRU TS3.23(简称 CRU)(http://www.cru. uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru ts 3.23/cruts.1506241137. v3.23/pre/[2016-01-15]) (Jones and Harris, 2011) 两套逐月降水分析资料。文中选取的两套资料的最 高空间分辨率为 1°,时间长度分别为 1901~2013 年和 1901~2014 年,均是基于全球近 65000 多个 台站、至少 10 年以上的观测记录研制而成, 可用 于全球和区域的水循环、卫星遥感资料的订正以及 气候模式的验证等研究。此外,欧洲中期天气预报 中心最近也发布了一套百年尺度(1900~2010年) 的大气再分析资料(ERA-20C)。该再分析产品是 基于一个先进的全球海洋大气陆面系统模式,采用 的是 24 h 4 维同化变分方案 (4D-Var),除了同化 海温(SST)、海冰等观测资料外,主要同化的观测 资料是地表和平均海平面气压资料以及海表风资 料,分析场的水平空间分辨率为 T95(约 210 km)

(Poli et al., 2013)。该数据产品的详细介绍请参考 相关网页(http://www.ecmwf.int/en/research/climatereanalysis/era-20c[2016-01-15])。本文首先将在 3.1 节中对这三套降水资料在中国干旱半干旱区可信 度作一初步的评估,进而选出一种或两种融合起来 的资料对干旱半干旱区降水的多年代际变化特征 及其 PDO 的关系做进一步的分析和探讨。

### 2.1.2 太平洋年代际振荡指数

太平洋年代际振荡(PDO)是揭示的一种年代 际时间尺度上的气候变率强信号(Mantua et al., 1997; Zhang et al., 1997),它是通过对北太平洋 20°N 以北的月平均海表温度异常(SSTA)进行经 验正交分解(EOF)所得到的第一模态时间系数。 本文所用的 PDO 指数来自华盛顿大学的大气海洋 研究联合中心(http://jisao.washington.edu/pdo/PDO. latest [2016-01-15]),时间长度为1901~2012年。 2.1.3 大气环流场和海温数据

为了进一步探讨 PDO 对我国干旱半干旱区降 水多年代际变化特征的影响机制,本文还采用了美 国国家大气海洋局(NOAA)的 20 世纪再分析资 料 (20CR) (Compo et al., 2011) 以及 ERA-20C 再分析资料用于合成分析 PDO 的暖、冷相位时北 半球中高纬度大气环流背景场的特征。除了海温 外,这两套再分产品同化的观测资料主要是海平面 气压和地表气压,因而可免受到其他观测资料非均 一性的影响,使其长期变化趋势在空间分布上具有 更好的一致性。文中选取的再分析数据包括 500 hPa 高度场、850 hPa 的风场 (u 和 v)、相对湿度场以 及 1000~300 hPa 风场 (u 和 v) 和比湿资料。其中, 20CR的水平空间分辨率为2°(纬度)×2°(经度), 时间长度为1871~2012年;而 ERA-20C 的空间分 辨率为1°(纬度)×1°(经度),时间长度为1900~ 2010年。通过对比发现,尽管两套再分析产品所描 述的对流层下层环流变化特征较为一致,均能较好 的反映出 PJ/EAP(太平洋一日本/东亚一太平洋) 遥相关型,但 20CR 再分析产品对 500 hPa 高度场, 尤其西太平洋副热带高压位置、强度等变化特征的 描述较为符合实际观测结果(图略),这与已有研 究结论具有更高的一致性(Zhou and Yu, 2005)。 综上所述,本文选取 20CR 再分析产品进行 PDO 暖 冷相位的合成分析。

此外,本文还用到了英国 Hadley 环流中心的月 平均海温资料(http://apps.ecmwf.int/webmars/ request/job/5636f5c0f7414d1547e8b13a/[2016-01-15])

(HadISST1.1)(Rayner et al., 2003)用于合成分 析,水平分辨率为 1°(纬度)×1°(经度),时间 长度为1871~2012年。

#### 2.2 方法

2.2.1 数据处理与分区

为文章前后统一,本文分析时段统一为1901~2012年。首先将不同来源、不同空间分辨率的数据处理成相对于1961~1990年多年平均值的逐月距平时间序列,再将逐月距平处理成年平均距平序列,最后将不同变量、不同分辨率年平均距平时间序列采用双线性插值方法统一转化为水平分辨率为1°(纬度)×1°(经度)的空间格点上。

为了进一步分析和比较降水多年代际变化特征的区域差异,本文参照赵天保等(2014)定义, 首先基于 GPCC\_V7 降水资料,将中国区域1961~ 1990年年平均总降水量小于 500 mm 的区域定义为 北方干旱半干旱区。并参照马柱国和邵丽娟(2006) 的定义,将北方分成 5 个典型子区域以便分区讨论: 第 1 区为新疆北部(39.5°N~47.5°N, 81.5°E~ 95.5°E),第 2 区为青海地区(32.5°N~38.5°N, 90.5°E~99.5°E),第 3 区为河套以西(34.5°N~ 40.5°N, 100.5°E~107.5°E),第 4 区为河套以东 (36.5°N~42.5°N, 109.5°E~117.5°E),第 5 区为 内蒙古东北部(45.5°N~50.5°N, 115.5°E~ 126.5°E),如图 1 所示。

#### 2.2.2 分析方法

除了应用经验正交函数(EOF)分析方法和 合成分析方法外,本文运用集合经验模态分解法

(EEMD)(Wu and Huang, 2009) 对降水多年代 际变化的特征进行提取。该方法是一种基于数据 本身,不需引用基函数的尺度分离方法。它适用 于非平稳、非线性时间序列的分解,即在原序列 中加入一定比例的白噪音后进行经验模态分解 (EMD),经过多次计算后取集合平均,使加入的 白噪音相互抵消,这样可以将序列不同尺度的振 荡信息逐级从原序列 x(t)中分离出来,逐一得到由 高频到低频的本征模函数 (Intrinsic Mode Function, IMF) 和残差项 Ri, 这样不仅保留了原 序列信号信息,而且在在更大程度上克服了模态 混淆问题, 使之在物理上得到唯一, 具体流程图 详见陈隽和李想(2011)中图 1。目前该方法已广 泛应用于提取气候要素时间序列中多时间尺度变 化信号的研究中(李慧群和付遵涛, 2012; 李春 香等, 2014; 裴琳等, 2015)。本文在使用 EEMD 过程中,加入的白噪音振幅标准差为原序列的 0.2, 集合次数为1000次。

## 3 结果分析

#### 3.1 百年降水资料的对比评估

分析两种基于观测事实的长期降水资料可以 看出: 1901~1950 年 GPCC 与 CRU 两组数据差异 较大,区域西南部青海及青藏高原区降水量均方根 误差较大,基本在 40 mm/month 以上,尤其青海中



图 1 我国北方干旱半干旱区(基于 1961~1990 年 GPCC 年平均总降水而定义)及其分区。其中:1区为新疆北部,2区为青海地区,3区为河套以西,4区为河套以东,5区为内蒙古东北部

Fig. 1 Semi-arid region in northern China [defined by annual mean precipitation from GPCC\_V7 (Global Precipitation Climatology Centre Version 7) data during 1961–1990] and five sub-regions in the semi-arid region. Region 1 is northern Xinjiang; region 2 is Qinghai area; region 3 is the area to the west of the Ordos Lopp; region 4 is the area to the east of the Ordos Loop; region 5 is northeastern Inner Mongolia

(图略); 而 CRU 数据降水在西部表现为时增时减

的零散分布型,但仍能表征出西部的变干趋势。分

析原因一方面由于 1950 年前站点监测较少,加之

西藏、青海海拔高,基本在 3000 m 以上,降水受

地形控制较大,观测降水在插值过程中会出现很大

的不确定性。而 1951~2010 年 GPCC 与 GRU 两组

数据差异很小,区域大部分地区均方根误差都在15

mm/month 以下,降水年平均距平的线性趋势空间

南部高达 100 mm/month 以上,这种分布与地形吻 合较好,说明高原区域的降水资料受地形控制较 大,数据质量较差;而其他区域均方根误差都在 30 mm/month 以下(图略),差异相对较小。从线性 变化趋势分布看,在区域东北部较为一致(图 2a、 2c), 表现为变湿的趋势, 线性增长率主要集中在 0~20 mm/10 a。区域西部差别较大, GPCC 主要表 现为较大范围的变干趋势,但西南部,线性减少率 异常偏大,最大可达-120 mm/10 a,这主要是由于 20世纪30年代以前,西南部降水异常偏大造成的

55°N

50°N

45°N

40°N

35°N

30°N

55°N

50°N

45°N

40°N

35°N

30° N

55°N

50°N

45°N

40°N

35°N

30°N

分布基本一致,主要表现为西湿东干的空间分布型 (西南部及新疆中部地区的变湿趋势及内蒙古偏 80°E 90°E 100°E 110°E 120°E 130°E 80°E 90°E 100°E 110°E 120°E 130°E 55°N (b) GPCC\_V7 (a) GPCC\_V7 50°N 45°N 40°N 35° N 30° N 1901-1950 1951-2010 80°E 90°E 100°E 110°E 120°E 130°E 80°E 90°E 100°E 110°E 120°E 130°E 55°N (c) CRU ts3.23 (d) CRU\_ts3.23 50°N 45°N 40°N 35°N 30°N 1901-1950 1951-2010 100°E 110°E 120°E 80°E 90°E 100°E 80°E 90°E 130°E 110°E 120°E 130°E 55°N (e) ERA\_20C (f) ERA\_20C 50°N 45°N 40°N 35°N 30°N 1901-1950 1951-2010

-100 - 80 - 60 - 40 - 20 - 15 - 10100 mm/10 a -5图 2 (a、b) GPCC、(c、d) CRU、(e、f) ERA-20C 资料年平均降水距平的线性趋势空间分布(斜线区为通过 0.05 显著性检验区):(a、c、d)

0 5 10 15 20 40 60 80

1901~1950年; (b、d、f) 1951~2010年 Fig. 2 Spatial patterns of the annual precipitation anomaly linear trend of (a, b) GPCC (GPCC V7), (c, d) CRU (CRU ts3.23), and (e, f) ERA-20C data

during (a, c, e) 1901-1950 and (b, d, f) 1951-2010. The black slant lines indicate the area with values statistically significant at 0.05 level

北部的变干趋势通过了 0.05 的显著性检验),其中 西藏东部、青海中部地区增长率在 10 mm/10 a 以上 最大可达到 15 mm/10 a (图 2b、2d),这与前人研 究较为一致(冉津江等,2014;王英等,2006)。 分析区域平均降水变化情况(图 3),可以看到两种 资料在 20 世纪 40 年代以前相差较大,GPCC 表现 为降水异常偏高,而 CRU 基本无波动变化,这主 要是观测站点的缺失及高原地区插值过程误差较 大造成的;自 20 世纪 30 年代末期开始,两种资料 差异明显减小,50 年代开始,随着观测站点的逐渐 增多,两种数据变化曲线基本重合。

欧洲中期天气预报中心 ERA-20C 逐月降水资 料对该区域降水预报较好,尽管 1901~1950 年 ERA-20C 东部降水线性趋势与 GPCC、CRU 数据得 到的结果相反, 表现为变干趋势, 但其在区域西部 尤其在青藏高原中、东部地区与两种基于观测的数 据分布较为一致,主要表现为变干的趋势(图 2e)。 而 1951~2010 年降水线性趋势分布与 GPCC、CRU 分析结果很接近(图 2f),也表现为西升东降变化 趋势,其中青藏高原东部及青海西南部线性增长率 可达 15 mm/10 a (通过 0.05 显著性检验), 与两 套基于观测的资料相符。就区域平均来看(图3), 1940年以前, ERA-20C在 GPCC 与 CRU 之间波动 变化,自 1940年开始,其与 GPCC、CRU 数据在 大部分时段的增减变化较吻合,尤其20世纪70年 代后期开始,三者变化基本重合。从相关分析来看 (图 3),前半世纪(1901~1950年)由于 GPCC 西南高原地区降水的异常偏高, 使得 ERA-20C 与 其的相关较差(R=0.27,未通关显著性检验),而 ERA-20C 与 CRU 呈现出显著的正相关关系 (R=0.34, 通过 0.05 的显著性检验); 而 1951~2010 年 ERA-20C 与两种基于观测数据都表现为显著的 正相关关系(相关系数分别为 0.55、0.66,均通过 0.05 的显著性检验), 其与 GPCC 的相关性高达 0.66。

综合上述分析,1951~2010年 GPCC 与 CRU 线性趋势分布非常一致,但 GPCC 在北方干旱半干 旱区所采用的观测站点远多于 CRU,尤其 20 世纪 60 年代到 21 世纪初观测站点可达 220 个以上,基 本覆盖了整个区域,因此可以认为 GPCC 降水资料 更基于观测事实。而 1950 年前降水数据质量主要 问题是由于观测站点较少及高原地区自身高海拔 地形影响造成,但 GPCC 所用的观测站点仍多于 CRU, 在区域内仍有观测事实, 观测站点最多可达 35 个左右(图略);从线性趋势来看,GPCC降水 在青藏高原西北部及青海具有显著的变干趋势(图 2a),从而使得整个干旱半干旱区区域平均降水在 1930年以前过于夸大(图3);而CRU对于缺测区 域是采用气候背景场(多年气候平均态)来填补, 这样就使得整个干旱半干旱区西部的降水几乎没 有变化趋势(图 2c),造成区域平均降水序列在 1940 年以前的几乎没有年际变化特征。同时欧洲中心 ERA-20C 模拟资料能够较好地再现 GPCC 和 CRU 在1951~2010年期间长期趋势的空间分布特征(图 2f), 1970 年以后的年际变化特征与两套分析资料 也非常吻合。尤其从整个 100 多年来看(1900~ 2010年), ERA-20C 时间序列的变化也比较平稳, 没有出现极端的转折变化。因此,为了尽可能的保 留更多的观测事实, 文中以 GPCC 为基准资料, 而 对于1901~1950年青藏高原西北部及青海地区(亦 即 GPCC 在 1900~1950 年期间出现剧烈增加虚假 趋势的区域)数据用 ERA-20C 来替代 GPCC。在替 代时,我们参考 Dai (2011)的方法,首先分别计 算每个格点上 GPCC 和 ERA-20C 月距平时间序列 (相对于1961~1990年气候平均值),然后在相应 的格点上用 ERA-20C 的距平值来替代 GPCC。这样 处理可以有效地减小平均气候态差异、地形差异等 引入的系统性误差。拼接后的数据消除了 GPCC 高 原异常值的影响,从融合后距平时间序列来看(图 3), 融合序列与 CRU 在 20 世纪前半叶(1901~ 1950年)、20世纪后半叶至21世纪初(1951~2013 年)及整个时段(1901~2013年)均呈现出显著 的正相关性,相关系数达0.7以上(依次为0.723、 0.865、0.715); 而由于 GPCC 资料在 20 世纪早期 西南高原区域的异常偏大值, 使得融合序列与 GPCC 在 20 世纪前半叶及整个时段显著正相关性 较低(依次为 0.344、0.438)。可见融合后的降水 序列在整个时段的变化也显得更为合理, 而且与 GPCC 的趋势空间分布,融合结果趋势的空间分 布更为均一合理。

#### 3.2 多年代际变化的时空分布特征

本文首先对每个格点的112年(1901~2012年) 年平均降水距平序列进行 EEMD 分解,得到 5 个 IMF 本征模函数和一个残差 Ri 项,其中:将 IMF1、 IMF2 作为年际变率分量,平均周期小于 10 年;将 IMF3、IMF4 作为年代际变率分量,平均周期在 10~ 45年之间;将IMF5为多年代际变率分量,平均周 期主要集中在 50~60 年之间; 残差 Ri 作为非线性 长期趋势项。从多年代际变化方差贡献的空间分布 可以看出(图 4a),除内蒙古中部外,大部分地区 多年代际的方差贡献都可达 6%以上,区域西部地 区及区域边缘东部地区,其方差贡献最大可达14% 以上,可见区域内多年代际降水变化不可忽视。文 中定义了比率 R=S<sub>MDV</sub>/(S<sub>MDV</sub>+S<sub>ST</sub>)(其中 S<sub>MDV</sub>表示 多年代际变化方差,Sst 表示非线性变化趋势的方 差)来衡量多年代际变化对非线性长期变化的影响 (Gao et al., 2015)。比率 *R* 的大小可能反映出多 年代际变化在降水线性变化中所起到的作用。当 R 大于 0.5 时,即多年代际分量的标准差大于长期趋 势的标准差,表示多年代际分量是控制该区的降水 变化趋势的主要因子。从图 4b 比率 R 的空间分布 可以看到,新疆中南部至青海西南部及内蒙古中部 地区, *R* 值相对较小在 0.4 以下, 其他区域比率 *R* 都在 0.4 以上, 尤其新疆北部、河套西北部, *R* 最 大可达 0.8 以上, 可见该区降水多年代际变化对区 域长期变化起到了主导作用。分析几个典型区域的 比率 *R* 值, 可以看出新疆北部及河套以西多年代际 变化的比重相对较大, 在 0.4 左右, 而其他 3 个区 相对较小, 尤其青海地区, 比率 *R* 值仅为 0.21, 说 明该区域降水多年代际变化对长期变化并无明显 主导作用。

为了考察不同区域降水多年代际变化的差异, 本文对整个区域及其5个典型区域的区域平均的年 降水距平也分别作了 EEMD 分解。从图5f 可以看 到,整个区域在多年代际变化上呈现出增减增的一 峰一谷分布型,波峰波谷的位置依次为1943年和 1976年。整个研究时段基本表现为一个周期的变 化:20世纪初至20世纪40年代呈现出弱增长趋势



图 3 GPCC、CRU、ERA-20C 及融合资料(ERA+GPCC) 1900~2010 年北方干旱半干旱区区域平均年平均降水距平的线性趋势 Fig. 3 Annual precipitation anomaly series of semi-arid region in northern China during 1900-2010 using GPCC, CRU, ERA-20C, and converaged data of ERA-20C and CPCC (ERA+GPCC)





(线性增长率并不显著);随后至 20 世纪 70 年代 末呈现出显著的下降趋势,线性递减率为-0.8 mm/a (通过 0.05 显著性检验);此后,至 21 世纪 初,降水再次呈现出增加趋势且较 20 世纪初增长 幅度大。整体而言,区域平均降水呈现出先减后增 的非线性长期变化趋势。从不同典型区域来看(图 5a-5e),5个区域平均周期依次为 54.4 a、55.8 a、 53.3 a、50.6 a、58 a。新疆北部与内蒙古东北部多 年代际变化自 20 世纪 20 年代开始变化比较一致且 新疆北部变化振幅较大,一致表现为增减增的变 化,其波峰和波谷位置依次出现在 1935 年和 1967 年左右(图 5a、5e)。河套以西与河套以东地区两 地位置相邻,其多年代际变化较为一致但东部变化 较为明显,两地主要表现先增后减的趋势,最大波 峰位置都在 1956 年前后(图 5c、5d)。而青海地区 与其他四个区变化无明显一致性,自 20 世纪 20 年 代以来表现为增减增的多年代际变化,波峰和波谷 的位置依次为 1943 年和 1992 年,但是由于该区的 前 50 年数据是由模式数据 ERA-20C 替代的,所以 该区的多年代际变化不确定性较大(图 5b)。



图 5 (a)新疆北部、(b)青海地区、(c)河套以西、(d)河套以东、(e)内蒙东北和(f)整个区域降水距平序列(蓝线)、多年代际变化序列(绿线)、长期非线性趋势序列(红线)及多年代变化与非线性趋势的叠加序列(黑线)

Fig. 5 Time series of original annual mean precipitation (blue line), MDV (Multi-Decadal Variability) variation (green line), secular variation (red line), and superimposed series of MDV and secular variation (black line)

## 3.3 干旱半干旱区降水多年代际变化与太平洋年 代际振荡(PDO)的关系

为了分析 PDO 与我国北方干旱半干旱区的降水多年代际变化的关系,文中同样利用 EMMD 方法 对年平均 PDO 指数进行了分解。如表 1 所示,IMF1、 IMF2 为年际变量,IMF3 为年代际变量,IMF4、IMF5 为多年代际变量,ST 为残差项,表示非线性变化趋势(Secular trend)。其中,IMF4 和 IMF5 两个分量 的累积解释方差大 33%左右,其平均周期(50~60 年)也与以前的研究较为一致(Minobe, 1997, 1999),故将 IMF4、IMF5 叠加到一起作为多年代 际变量(MDV),用于分析其与我国北方干旱半干 旱区降水多年代际变化的关系。

#### **表1** 年平均 PDO 指数 EEMD 分解得到的各分量平均周期 及解释方差

Table 1Mean periods and their variance contributions ofIMFs and secular trend derived from EEMD analysis ofannual mean PDO index

	平均周期/a	解释方差
IMF1	2.8	24.3%
IMF2	5.8	18.6%
IMF3	17.7	15.0%
IMF4	51.6	23.6%
IMF5	59.6	11.0%
ST		7.6%

然而, PDO 的 MDV 直接与区域平均降水距平 的 MDV 作对比,发现二者并没有很好的相关关系。 本文进一步对整个区域年平均距平多年代际变量 场(MDV)进行了 EOF 分解,结果发现第一特征 向量(解释方差为 42.8%)能够很好地表征降水多 年代际变化的时空特征,其空间模态的特征是,区 域大部分地区为正、甘肃中南部至内蒙古中南部狭 长区域为负的分布型(图 6a)。结合时间系数可以 看出,标准化的第1特征向量与 PDO 多年代际变 化呈现出较好的一致性,虽然在 20 世纪初,两者 出现了一定的相位差,但自20世纪30年代开始, 两者呈现出很好的同正同负变化趋势,相关系数可 达 0.53 (通过了 0.05 的显著性检验),表明 PDO 是 调制我国北方干旱半干旱区降水多年代际变化重 要自然因子(图 6c)。EOF分解第二模态解释方差 高达 30%, 空间分布上主要表现为同正的分布型, 两个主要的正中心分别位于新疆北部和区域东北 部且东北部强度较大(图 6b);从时间演变上来看, 标准化的 PC2 与区域平均多年代际变化(虚线)具 有较高的吻合度,两者标准化变化曲线基本重合, 主要表现为一峰(20世纪40年代前后)一谷(20 世纪80年代前后)的变化趋势,两者的相关系数高 达0.93(通过了0.05的显著性检验),这说明第二特 征向量主要表征区域降水平均变化特征(图6d)。

由前边的分析可以得知, PDO 具有 50~60 年 尺度的多年代际变化为原始信号中的强信号,其平 均周期与北方干旱半干旱区大部分地区降水多年 代际变化较为一致,说明 PDO 可能是调制北方干 旱半干旱区降水多年代际变化的重要因子。下面利 用合成分析方法系统的分析 PDO 与干旱半干旱区 降水之间的相互关系。具体做法是,对 PDO 多年 代际变化分量进行标准化处理,选取绝对值大于1 的年份为异常年份,其中正异常年份为1932~1940 年、1981~1996年;负异常年份为1950~1969年、 2011~2012年。由于北方干旱半干区降水主要集中 在夏季 (6、7、8 月), 1901~2012 年区域平均夏 季降水贡献率高达 63%,约占年总降水的 2/3,故 做合成分析时,主要选取夏季降水及物理场因子进 行分析。从夏季降水距平的合成分析差值图上来看 (图 7a),整个区间主要以正值区为主:新疆及内 蒙古大部分地区表现为正值区,尤其西部 35°N 以 北,100°E 以西的新疆、青海北部及甘肃西北部的 正值区域通过了 0.05 的显著性检验,说明这些地区 在 PDO 暖相位时,降水呈显著偏多趋势,冷相位 时相对偏少;而西藏、青海西南部、河套以西的甘 肃南部地区及辽宁以北地区出现负值区,说明 PDO 对这些区域降水的调制作用恰好相反。对原降水距 平进行滤波处理,可以看出 PDO 与区域降水的这 种关系分布在 50~60 年多年代际变化上更加显著 (图 7b),新疆、内蒙古北部降水与 PDO 呈现出显 著正相关关系,且相关系数基本在 0.6 以上,而在 西藏西南、青海西部,甘肃中部至内蒙河北交汇区 的狭长区域内两者呈现出显著的负相关,相关系数 主要分布在 0.4~0.6。分析几个典型区域, 新疆北 部及内蒙古北部,两者呈现出显著正相关,相关系 数在 0.4~0.5; 河套以西及华北地区, 两者呈现出 显著负相关,相关系数在 0.8 左右;而青海地区西 部为负东部为正,就区域平均而言,两者无显著相 关关系。值得注意的是从合成分析来看,区域中部 (主要是内蒙古中部)的负调制作用似乎并未很好 的表现出,这可能与区域中部多年代际变化不显著 有关(多年代际变量方差贡献小)有关。



图 6 降水距平多年代际变化 (MDV) 的 EOF 分解 (a、c) 第一特征向量、(b、d) 第二特征向量: (a、b) 空间模态; (c、d) 时间系数 Fig. 6 The first two leading modes (PC1, PC2) of the MDV component of the annual mean precipitation: (a, b) Spatial patterns; (c, d) time coefficients



图 7 (a) PDO 正、负异常年夏季降水距平合成差值; (b) PDO 与降水距平多年代际变化相关分析。斜线区为通过 0.05 显著性检验区 Fig. 7 (a) Composite difference in summer (JJA) precipitation anomaly (positive PDO minus negative PDO); (b) correlation between PDO and MDV variability of precipitation anomaly. The black slant lines indicate areas with values statistically significant at 0.05 level

#### 3.4 PDO 对降水多年代际变化调制的可能物理机制

中纬度亚洲地区存在着主要受季风环流影响 的东南部湿润地区(简称季风区)和主要受西风流 系统影响的内陆干旱区(简称西风区)(陈发虎等, 2009;冉津江等,2014);而文中研究的干旱半干 旱经度横跨整个中国,纬度范围自西向东逐渐缩 小,其西部身居亚洲内陆,且主要位于高原北侧及 东北侧,夏季受高原阻挡,暖湿西南气流及西太平 洋副热带高压带来的暖湿气流很难到达,区域降水 主要靠西风系统输送作用;区域偏东部地区位于东 亚季风环流的外边缘,而东亚季风环流对水汽输送 有重要作用(陈发虎等,2009)。因此分析北方干 旱半干旱区降水时主要从西风系统和东亚季风环 流系统两方面讨论。 图 8 是 PDO 暖和冷位相时, 夏季 SSTA、500 hPa 高度距平场、850 hPa 风场距平和湿度距平场、整 层大气垂直积分水气通量距平场以及夏季地面气 压距平场的合成差值图。从夏季海温距平合成差值 图(图 8a)上可以看到, 北太平洋中部为一显著的 负值区域,最大中心位置位于北纬 35°N~40°N; 太平洋及印度洋其他海域主要表现为正值区域, 尤 其印度洋至赤道西太平洋区域海温是显著增高的, 最大正中心可达 0.3 ℃。因此,可以说明, PDO 暖 (冷)相位时, 北太平洋中部海温异常偏冷(暖), 与已有研究结论相符(马柱国和邵丽娟, 2006; 马 柱国, 2007)。

从 500 hPa 高度场距平(图 8b)合成图差值图 上可以看到,中高纬度主要表现出3个显著性差异 的正负闭合中心:欧洲西岸出现闭合的正中心(最 大达 20 gpm)、黑海附近出现负中心(最小值为 -12 gpm) 以及新疆北部贝加尔湖以西出现的东北-西南走向的负中心(低于-12 gpm),此外北冰洋出 现大范围显著高度负值区域。这表明:当 PDO 暖 相位时,位于新疆北部、贝加尔以西的槽得到发展, 北冰洋大部分区域位势高度较低,从而使得北冰洋 水汽随西北气流南下到达新疆乃至整个北方干旱 半干旱区,为降水提供有利的水汽条件。值得注意 的是差值图中渤海区域出现了正值中心,说明 PDO 暖相位时位势高度偏高有利于该区地面反气旋的 发展,这为东亚夏季 120°E 经度形成 PJ/EAP (太平 洋一日本/东亚—太平洋)(Qian and Zhou, 2014) 的遥相关型提供了有利的环流背景条件。结合日本 海以东太平洋地区出现的正值高度中心(图 8a)以 及负值海温差值中心(图 8b),可以推断出 PDO 可 能通过调整 500 hPa 高度场槽脊发展来控制来自北 冰洋的水汽输送:暖相位时,北太平洋中部海温异 常偏低,盛行下沉气流,气流下沉增温使高层等压 面增高,从而对中高纬西风带进行了调整。

从 850 hPa 水平风场距平合成差值图上可以明 显看到(图 8c),当 PDO 暖相位时,在新疆及其北 部有显著的偏北风及正相对湿度区域,有利于高纬 度水汽输送至新疆地区;另一方面由于阿拉伯海域 及孟加拉湾海域暖性洋面作用(图 8b),使得这些 区域空气相对湿度显著偏高,由于高原阻挡的作 用,孟加拉湾的暖湿水汽无法输送至北方内陆地 区;而阿拉伯海域上空显著的西南气流(图 8c)则 有利于暖湿水汽向北输送;最终在新疆偏南部,较 弱的西南暖湿气流与西北偏湿气流汇合,出现显著 的降水正中心区域。

整层大气水汽输送通量及散度距平合成差值 图(图 8d)与 850 hPa 风场距平合成差值图(图 7c) 分布基本一致,都在120°E上出现比较显著的太平 洋一日本/东亚一太平洋(PJ/EAP)遥相关型: 菲 律宾海域(10°N, 135°E)反气旋辐散、中国东南 沿海(20°N, 120°E)气旋性辐合, 渤海区域(40°N, 120°E)的反气旋辐散,而这种分布恰好与水汽通 量散度正负异常中心相对应(辐合对应负中心,辐 散对应正中心)。这种遥相关起源于赤道西太平洋 地区及印度洋地区暖性洋面的对流加热作用(Qian and Zhou, 2014)。这表明, 在 PDO 暖相位时, 热 带西太平及印度洋海域海温显著偏高, 尤其印度洋 海域海温出现显著的正异常中心(最大可达 0.3 ℃ 以上)。由于印度洋面强烈的对流加热作用,使得 此海域上空大气出现显著的气旋性辐合和水汽通 量散度负中心(中心值达 $-0.2 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上),这 种强烈的对流加热作用激发了赤道地区开尔文波 的响应。在此作用下,抑制了菲律宾海域气旋性辐 合的发生,使得在菲律宾海域产生较强的反气旋环 流(Wu, et al., 2009)。菲律宾海域的反气旋产生, 激发了局地 hadley 环流发生,在中高纬度 Rossby 波强迫下,在 120°E 出现了 PJ/EAP 这种遥相关分 布型(Hoskins and Karoly, 1981; Hu and Huang, 2009),这种激发机制证明了印度洋海域对东亚夏 季风气候的影响作用(Hu, 1997)。可见, 北方华 北区域主要受到了 PJ/EAP 一个分支渤海区域的反 气旋影响。在 PDO 暖相位时,河套以东的内蒙古 区域受到反气旋外边缘向北气流影响,有利于渤海 湾水汽的向北输送,使得内蒙古及其北部区域空气 相对湿度明显增大,水汽通量散度呈现出负异常, 利于辐合,增加降水概率,而辽宁以北的内蒙古小 部分区域由于受到反气旋外围偏西的发散气流(较 弱的正水汽通量异常)影响降水减少。另外在河套 偏北部地区出现显著的偏西气流与渤海反气旋外 缘的偏北微暖湿气流汇聚,形成水汽通量负异常中 心 ( $-0.2 \text{ g m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 以上), 使得该区域出现了较大降 水中心。

地面气压距平合成差值图(图 8e)与850 hPa 风场差值图及整层大气水汽通量差值图对应性较 好。从地面气压场合成分析差值图(图 8e)中可以 看出,以贝加尔湖以西为中心出现一个东北一西南



图 8 PDO 暖、冷位相背景下大气环流背景场差异分布特征 (PDO 正、负异常年合成差值):(a) 夏季 SST 距平;(b) 夏季 500 hPa 高度距平;(c) 夏季 850 hPa 水平风场距平及相对湿度距平(填充色);(d) 夏季整层大气(1000~300 hPa) 垂直积分水汽通量距平及水平通量距平散度距平(填充 色);(e) 地面气压距平(单位: hPa, 等值线间隔 0.1 hPa)。a、b 中的斜线阴影区为通过 0.05 显著性检验区; c、d 中黑点区为相对湿度距平及水汽 通量散度距平通过 0.05 显著性检验区, 红色斜线区为风场距平及水汽通量距平通过 0.05 显著性检验区; e 中的填充色区为通过 0.05 显著性检验区 Fig. 8 Differences in summer (JJA) mean atmospheric circulation between different PDO phases (positive PDO minus negative PDO): (a) SSTA; (b) 500-hPa geopotential height anomaly; (c) 850-hPa wind anomaly and relative humidity anomaly (shaded); (d) vertically integrated atmospheric water vapor flux anomaly (1000-300hPa) and water vapor flux divergence (shaded); (e) surface pressure anomaly (hPa). The slant lines in (a)-(d), the black dots in (c) and (d), and the shaded in (e) indicate areas where the values are statistically significant at 0.05 level

走向"人"型分布的显著负值区域,其中两个闭合 负中心分别位于贝加尔湖以西(中心-1.3 hPa)和 华南地区(中心达-0.8 hPa)。而华南地区的低值中 心与菲律宾海域的高值中心和渤海湾区域的高值 中心恰好构成了太平洋—日本/东亚—太平洋 (PJ/EAP)遥相关型。同时可以看到在孟加拉湾南 部地区出现闭合的负中心,这再次证实了这种遥相 关型可能起源于印度洋暖性洋面的对流性加热。因 此可以得出,PDO暖相位时,北方干旱半干旱区大 部分区域气压相对偏低,利于空气辐合上升,有利 于降水。而青藏高原、华北偏东区域气压相对偏高, 盛行下沉气流,不利于降水。

## 4 结论

本文通过分析对比 GPCC\_V7、CRU\_TS3.23、 ERA-20C 三种百年尺度的逐月降水资料,选取拼接 出能够反映出北方干旱半干区降水演变的最佳资 料,运用集合经验模分解方法(EEMD)等方法分 析了我国北方干旱半干旱区降水多年代际变化特 征,并运用 20CR 再分析高度场、风场及水汽场等 资料探讨了太平洋年代际振荡(PDO)对该区降水 多年代际变化调制特征和物理机制,主要结论如 下:

(1)过去百年,我国北方干旱半干区大多数地 区(青海地区除外)降水平均的多年代际变化周期 都集中在 50~60 年之间(多年代际的方差贡献为 6%~14%),但具有一定的区域差异,其中:河套 以西及以东多年代际变化特征较为一致,主要表现 为 20 世纪初期至中期先增随后下降的整体变化趋 势,最大波峰出现在 20 世纪 50 年代末;而新疆北 部及内蒙古北部地区多年代变化基本一致,20 世纪 20 年代开始,两者都呈现出增、减、增的变化,其 波谷和波峰位置依次出现在 1935 年和 1967 年左 右。而青海地区周期较短,振幅较小,多年代际变 化特征并不显著。

(2) 通过 EOF 和合成分析来看,干旱半干旱区 降水多年代际变化主要受 PDO 的调制,但这种调 制具有明显的区域差异。就整个区域而言,降水多 年代际变化主要与 PDO 呈显著正相关(降水多年 代际主分量第一模态的时间系数与 PDO 的相关系 数可达 0.53),而分析典型子区,区域西部和东北 部(新疆北部、内蒙东北)两者主要表现为显著正 相关,区域的中部青海、河套以西、河套以东两者 表现为显著正相关。从合成分析来看,这种区域性 差异似乎变得模糊,区域中部的负调制作用并未很 好的表现出,这可能与区域中部多年代际变化不显 著有关(多年代际变量方差贡献小)有关。

(3) PDO 与北方干旱半干旱区降水在多年代际 尺度上存在一定的遥相关关系,为了分析其内在的 一些联系,文中基于 PDO 多年代际变化的暖冷位 相对原始的夏季平均距平进行了合成分析,旨在探 讨这种调制机理的可能性,虽一些结论与文献中相 符,但由于目前研究较少,不确定性仍然相对较大, 望今后研究能进一步证实文中的结论。从物理机理 上来看, PDO 可能通过调整西风带及东亚季风系统 影响我国北方干旱半干旱区降水。一方面, PDO 可 能通过调整高空的环流背景影响到整个区域降水 的多年代际变化,即: PDO 暖相位时,新疆北部、 贝加尔以西的东北—西南走向的高空槽区加深,经 向环流加强,有利于北冰洋湿冷气流南下;而低空 在暖性洋面的作用下,阿拉伯海域暖湿气流向北输 送显著,在新疆南部地区遇上西北冷气流,使得该 区域降水显著。另一方面,PDO 暖相位时赤道西太 平洋及印度洋区域通过对流加热的作用激发了太 平洋—日本/东亚—太平洋(PJ/EAP)遥相关型的 产生,这有利于渤海湾暖湿水汽输送至内蒙古中、 北部地区,当与偏北气流与偏西气流相遇时,会使 该区域降水增加。当 PDO 位于冷位相时,分析结 果则相反。

由于受资料质量和长度等客观原因限制,本文 的一些结论尚需进一步探讨。特别是 1950 年代以 前,干旱半干旱区降水观测资料非常稀疏,而且主 要集中东部地区,这可能是目前研究干旱半干旱区 降水多年代际变化及其成因的最大障碍。将来在资 料进一步得到完善的情况下,我们会对本文研究的 内容作进一步的探究和拓展。

#### 参考文献(Referencese)

- Bond N A, Harrison D E. 2000. The pacific decadal oscillation, air-sea interact ion and central north Pacific winter atmospheric regimes [J]. Geophys. Res. Lett., 27: 731–734, doi: 10.1029/1999GL010847.
- Compo G P, Whitaker J S, Sardeshmukh P D, et al. 2011. The twentieth century reanalysis project [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137: 1–28, doi: 10.1002/qj.776.
- 陈发虎,陈建徽,黄伟. 2009. 中纬度亚洲现代间冰期气候变化的"西风模式"讨论 [J]. 地学前缘, 16 (6): 23–32. Chen Fahu, Chen Jianhui, Huang Wei. 2009. A discussion on the westerly-dominated climate model in mid-latitude Asia during the modern interglacial period [J]. Earth Science Frontiers (in Chinese), 16 (6): 23–32, doi: 10.3321/j.issn:1005-2321.2009.06.003.
- 陈隽, 李想. 2011.运用总体经验模态分解的疲劳信号降噪方法 [J]. 振 动、测试与诊断, 31 (1): 15–19. Chen Juan, Li Xiang. 2011.The method of reducing noise signal-EEMD [J]. Journal of Vibration, Measurement &Diagnosis (in Chinese), 31 (1): 15–19.
- Dai A G. 2011. Characteristics and trends in various forms of the palmer drought severity index during 1900–2008 [J]. J. Geophys. Res., 116 (D12): D12115, doi: 10.1029/2010JD015541.
- Fu C B. 2003. Potential impacts of human-induced land cover change on East Asia monsoon [J]. Global & Planetary Change, 37: 219–229, doi:

10.1016/S0921-8181(02)00207-2.

- 符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化 [J]. 大气科学, 32 (4): 752-760. Fu Congbin, Ma Zhuguo. 2008. Global change and regional aridification [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 752-760, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.05.
- Gershunov A, Barnett T P, Cayan D R. 1999. North Pacific in terdecadal oscillation seen as fact or in ENSO-related north American climate anomalies [J]. EOS, 80: 25–30, doi: 10.1029/99EO00019.
- Gutzler D S, Kann D, Thornbrugh C. 2002. Modulation of ENSO-based long-lead outlooks of southwestern U.S. winter precipitation by the pacific decadal oscillation[J]. Wea. Forecasting, 17: 1163–1172, doi: 10.1175/1520-0434(2002)017<1163:MOEBLL>2.0.CO;2.
- Gao L H, Yan Z W, Quan X W. 2015. Observed and SST-forced multidecadal variability in global land surface air temperature[J]. Climate Dyn., 44: 359–369, doi: doi:10.1007/s00382-014-2121-9.
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. J. Atmos. Sci., 38: 1179–1196, doi: 10.1175/1520-0469(1981)038<1179:TSLROA>2.0.CO;2.
- Hu Z Z. 1997. Interdecadal variability of summer climate over East Asia and its association with 500 hPa height and global sea surface temperature [J]. J. Geophys. Res., 102 (D16): 19403–19412, doi: 10.1029/97JD01052.
- Hu Z Z, Huang B H. 2009. Interferential impact of ENSO and PDO on dry and wet conditions in the U.S. Great Plains [J]. J. Climate, 22: 6047–6065, doi: 10.1175/2009JCLI2798.1.
- Huang J P, Guan X, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions [J]. Atmos Chem Phys, 2012, 12: 5391–5398.
- 黄建平,季明霞,刘玉芝,等. 2013. 干早半干旱区气候变化研究综述 [J]. 气候变化研究进展,9 (1): 9–14. Huang Jianping, Ji Mingxia, Liu Yuzhi, et al. 2013. An overview of arid and semi-arid climate change [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (01): 9–14, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.01.002.
- Jones P D, Harris I. 2011. CRU Time Series (TS) High Resolution Gridded data Version 3.10 [M]. Oxford: NCAS British Atmospheric Data Centre.
- 李慧群, 付遵涛. 2012. 基于 EEMD 的中国地区 1956-2005 年日照变化 的趋势分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 48 (3): 393-398. Li Huiqun, Fu Zuntao. 2012. Sunshine duration's trend behavior based on EEMD over China in 1956-2005 [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 48 (3): 393-398.
- 李春香,赵天保,马柱国. 2014. 基于 CMIP5 多模式结果评估人类活动 对全球典型干旱半干旱区气候变化的影响 [J]. 科学通报, 59 (30): 2972–2988. Li Chunxiang, Zhao Tianbao, Ma Zhuguo. 2014. Impacts of anthropogenic activities on climate change in arid and semiarid areas based on CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 59 (30): 2972–2988, doi: 10.1360/N972014-00039.
- 吕妍, 王让会, 蔡子颖. 2009. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响 [J]. 干旱区资源环境, 23 (11): 65–71. Lü Yan, Wang Ranghui, Cai Ziying. 2009. Climatic change and influence in arid and semi-arid area of China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 23 (11): 65–71.
- Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. Bull. Amer. Meteor.

Soc., 78: 1069–1079, doi: 10.1175/1520-0477(1997)078<1069:APICOW> 2.0.CO;2.

- Minobe S. 1997. A 50–70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America [J]. Geophys. Res. Lett., 24: 683–686, doi: 10.1029/97GL00504.
- Minobe S. 1999. Resonance in bidecadal and pentadecadal climate oscillations over the North Pacific: Role in climatic regime shifts [J]. Geophys. Res. Lett., 26: 855–858, doi: 10.1029/1999GL900119.
- 马柱国. 2007. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 科学通报, 52 (10): 1199–1206. Ma Zhuguo. 2007. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (15): 2130–2139, doi: 10.3321/j.issn:0023-074X.2007.10.018.
- 马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 大气科学, 30 (3): 464–474. Ma Zhuguo, Shao Lijuan. 2006: Relationship between dry/wet variation and the pacific decade oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 464–474, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.10.
- Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century [J]. Geophys. Res. Lett., 34: L06710, doi: 10.1029/2006GL028628.
- 裴琳, 严中伟, 杨辉. 2015. 400 多年来中国东部旱涝型变化与太平洋年 代际振荡关系 [J]. 科学通报, 60 (1): 97–108. Pei Lin, Yan Zhongwei, Yang Hui. 2015. Multidecadal variability of dry/wet patterns in eastern China and their relationship with the Pacific decadal oscillation in the last 413 years [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 60 (1): 97–108, doi: 10.1360/N972014-00790.
- Power S, Casey T, Folland C, et al. 1999. Inter-decadal modulation of the impact of ENSO on Australia [J]. Climate Dyn., 15: 319–324, doi: 10.1007/s003820050284.
- Poli P, Hersbach H, Tan D G H, et al. 2013. The data assimilation system and initial performance evaluation of the ECMWF pilot reanalysis of the 20th-century assimilating surface observations only (ERA-20C) [R]. ERA Report Series.
- Qian C, Zhou T J. 2014. Multidecadal variability of north china aridity and its relationship to PDO during 1900–2010 [J]. J. Climate, 27: 1210–1222, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00235.1.
- Rayner N A, Parker D E, Horton E B, et al. 2003. Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century [J]. J. Geophys. Res., 108 (D14): 4407, doi: 10.1029/2002JD002670.
- 冉津江,季明霞,黄建平,等. 2014. 中国北方干旱区和半干旱区近 60 年气候变化特征及成因分析 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版),50 (1):
  46-53. Ran Jinjiang, Ji Mingxia, Huang Jianping, et al. 2014. Characteristics and factors of climate change in arid and semi-arid areas over northern China in the recent 60 years [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 50 (1): 46-53.
- Rotenberg E, Yakir D. 2010. Contribution of semi-arid forests to the climate system [J]. Science, 327: 451–454, doi: 10.1126/science.1179998.

Schneider U, Becker A, Finger P, et al. 2013. GPCC's new land surface

precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle [J]. Theor. Appl. Climatol., 115: 15–40, doi: 10.1007/s00704-013-0860-x.

- 唐民, 吕俊梅. 2007. 东亚夏季风降水年代际变异模态及其与太平洋年 代际振荡的关系 [J]. 气象, 33 (10): 88–95. Tang Min, Lü Junmei. 2007. The inter-decadal mode of the summer monsoon rainfall in East Asia and its association with Pacific decadal oscillation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33(10): 88–95, doi: 10.3969/j.issn.1000-0526. 2007.10.013.
- 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 2006. 全球气候变化背景下中国降水量空间格 局的变化特征 [J]. 地理研究, 25 (6): 1031–1040, 1148. Wang Ying, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. 2006. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change [J]. Geographical Research (in Chinese), 25 (6): 1031–1040, 1148, doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.2006.06.010.
- 王涛. 2007. 干旱区主要陆表过程与人类活动和气候变化研究进展 [J]. 中国沙漠, 27 (5): 711–718. Wang Tao. 2007. Research progress on interaction between development of land surface system and climate change and human activity [J]. Journal of Deserters Research (in Chinese), 27 (5): 711–718.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. J. Climate, 22: 2992–3005, doi: 10.1175/2008JCLI2710.1.

- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 1: 1–41, doi: 10.1142/S1793536909000047.
- 翟盘茂,章国材. 2004. 气候变化与气象灾害 [J]. 科技导报, (7): 11-14. Zhai Panmao, Zhang Guocai. 2004. Climate change and meteorological disasters [J]. Science & Technology Review (in Chinese), (7): 11–14, doi: 10.3321/j.issn:1000-7857.2004.07.004.
- 赵天保, 陈亮, 马柱国. 2014. CMIP5 多模式对全球典型干旱半干旱区气候 变化的模拟与预估 [J]. 科学通报, 59 (12): 1148–1163. Zhao Tianbao, Chen Liang, Ma Zhuguo. 2014. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 59 (4): 412–429, doi: 10.1007/s11434-013- 0003-x.
- Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. 1997. ENSO-like interdecadal variability: 1900–93 [J]. J. Climate, 10: 1004–1020, doi: 10.1175/1520-0442(1997)010<1004:ELIV>2.0.CO;2.
- Zhou T J, Yu R C. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. J. Geophys. Res., 110 (D8): D08104, doi: 10.1029/2004JD005413.
- 朱益民,杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J].
  气象学报,61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003.
  Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorological Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001.