

徐保梁, 杨庆, 马柱国. 2017. 全球不同空间尺度陆地年降水的年代尺度变化特征 [J]. 大气科学, 41 (3): 593–602. Xu Baoliang, Yang Qing, Ma Zhuguo. 2017. Decadal characteristics of global land annual precipitation variation on multiple spatial scales [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 593–602, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16174.

全球不同空间尺度陆地年降水的年代 尺度变化特征

徐保梁^{1,2} 杨庆¹ 马柱国^{1,2}

1 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

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 基于 1951~2010 年 GPCP (Global Precipitation Climatology Centre) 的逐月降水数据, 利用集合经验模分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, 简称 EEMD 法) 对全球、东西半球、五个大陆和四个典型干旱半干旱区等不同空间尺度年降水量的年代尺度特征进行了研究, 区分了不同空间尺度上降水的年代际变化及其长期趋势。结果发现: (1) 全球陆地平均降水既存在年代际的周期振荡, 又存在长期变化的趋势, 降水的年代际周期振荡的强度远大于降水的长期趋势, 两者的共同作用使得全球陆地平均降水呈现以年代际周期振荡为主的特征。(2) 在半球尺度, 2000 年以前, 东、西半球具有明显相反的年代尺度变化特征, 东半球变干 (降水减少), 西半球变湿 (降水增加)。(3) 1951~2010 年, 欧亚大陆和非洲大陆与北美、南美和澳洲大陆的年代际振荡和趋势存在着一个近似反位相的关系; 干旱化与干旱时段是完全不同的两个过程, 两者所处的时段也不同; 近 10 年 (2001~2010 年) 全球五个大陆可能将进入一个相对湿润的时段。(4) 四个典型干旱半干旱区降水的年代尺度变化具有明显的区域差异。总体来说, 华北和北非与北美和中亚降水在长期趋势及年代际振荡上具有反位相的特征。华北和北非的年代际振荡具有近似的位相。在最近几十年, 北美和中亚同处于湿润时段, 但前者开始于 1975 年, 后者开始于 1985 年。此外, 中亚的第一个湿润时段 (1959~1968 年) 却对应北美的干旱时段。

关键词 陆地降水 年代尺度 不同空间尺度 EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) 方法

文章编号 1006-9895(2017)03-0593-10 中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16174

Decadal Characteristics of Global Land Annual Precipitation Variation on Multiple Spatial Scales

XU Baoliang^{1,2}, YANG Qing¹, and MA Zhuguo^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on 1951–2010 Global Precipitation Climatology Centre monthly precipitation dataset, decadal

收稿日期 2016-06-05; 网络预出版日期 2016-08-24

作者简介 徐保梁, 男, 1987 年出生, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: xubl@tea.ac.cn

通讯作者 杨庆, E-mail: yangqing@tea.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0600404, 全球变化国家重大研究计划项目 2012CB956201, 国家自然科学基金项目 41275085, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 GYHY201506001-1、GYHY201106028, 江苏省气候变化协同创新中心

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600404), National Basic Research Program of China (Grant 2012CB956201), National Natural Science Foundation of China (Grant 41275085), China Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Grant GYHY201506001-1, GYHY201106028), Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change

characteristics of annual precipitation over the globe, the Eastern and Western Hemispheres, five continents and four typical arid and semi-arid regions were analyzed using the Ensemble Empirical Mode Decomposition (EEMD) method. The results showed that: (1) there exists a decadal oscillation in global land precipitation in addition to a long-term trend. Compared to the long-term trend, the decadal oscillation is more distinct and it is the major phenomenon in global land precipitation. (2) On the hemisphere scale, decadal characteristics of the Eastern and Western Hemispheres are opposite before 2000, with a drying trend over the Eastern Hemisphere and an wetting trend over the Western Hemisphere. (3) The decadal oscillation, long-term trend, drying period and drought period of precipitation over Eurasia and Africa exhibit an opposite variation with that over North America, South America and Australia during 1951–2010. Five continents tend to enter a wet phase in the recent 10 years. (4) The decadal characteristics of precipitation over the four typical arid and semi-arid areas have distinctly differences. Generally, the long-term trend and multi-decadal oscillation of precipitation over North China and North Africa are opposite with that over North America and central Asia. North China and North Africa are approximately in phase. Although North America and central Asia are both in wet period in the recent years, the beginning year for the wet period is 1975 in North America and 1985 in central Asia. Additionally, North America experiences a dry period during the first wet period (1959–1968) in central Asia.

Keywords Land precipitation, Decadal oscillation, Different spatial scales, EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) method

1 引言

尽管全球增暖的原因还有争议,但近 100 年的增暖事实已不可否认 (IPCC 2007; 2013)。全球增暖指全球绝大部分地区近百年的一致增暖现象。然而,作为气候的另一个指标,降水的变化却表现出较大的区域差异。从上个世纪 60 年代开始,西非的半干旱地区降水持续 30 年减少,其中 Sahel 地区的降水量减少了 20%~40%;全球极端干旱区域的面积翻了一倍 (Dai et al., 2004);干旱半干旱地区因干旱造成的沙漠化面积扩张了 10%~20% (Reynolds et al., 2007);大量的事实表明,过去 100 年全球干旱半干旱区变得越来越干 (Nicholson et al., 1998; Nicholson and Grist, 2001; 马柱国和邵丽娟, 2006; Narisma et al., 2007)。Narisma et al. (2007) 发现,20 世纪全球发生的重大年干旱事件(降水的突然减小并持续数年)绝大多数发生在干旱半干旱地区。例如,1920 年代的北美大范围干旱和中国北方的严重干旱,1930 年代的美国中西部的尘暴,前苏联中西部的严重干旱和澳洲东南部的大旱,1950 年代美国西南部和墨西哥大旱,1960 年代、1980 年代的非洲干旱化;始于上个世纪 70 年代末中国北方持续近 30 年的干旱 (马柱国和符淙斌, 2006)。然而,现有对北非、北美、澳洲以及亚洲干旱问题的研究多半是孤立的,或者仅有现象上的联系,缺乏从全球视野来研究区域之间内在的本质联系以及差异的原因。

近百年发生在干旱半干旱地区的重大干旱事

件(持续时间在 10 年以上)均为年代尺度的气候变化。20 世纪 80 年代以来,年代尺度气候变化的研究引起了国内外学者的极大关注,并开展了大量富有成效的研究工作 (Delworth and Manabe, 1993; 符淙斌和黄燕, 1996; 王绍武和朱锦红, 1999; 李崇银等, 2002; 黄荣辉等, 2006; 马柱国和符淙斌, 2007; Fu et al., 2008)。形成年代尺度干旱的主导因子是降水的年代际变化,因此研究降水的年代际变化特征和机理是年代尺度干旱研究的关键问题。近年来,全球增暖的问题得到长足的认识,伴随全球增暖的降水变化特征和机理研究也得到重视 (Lambert and Allen, 2009; Bichet et al., 2011; Dong and Dai, 2015)。在全球增暖背景下,陆地降水发生了显著的变化,且这种变化存在很大的区域差异 (马柱国和符淙斌, 2007; Ault and George, 2010)。一些地区具有明显的干旱化的趋势,而一些地区则具有明显的湿润化的趋势 (施雅风等, 2003; 马柱国和符淙斌, 2006; 2007)。过去的研究在全球和区域降水的变化研究上虽取得了一系列有意义的进展 (Rasmusson and Arkin, 1993; Trenberth, 2011; Gu and Adler, 2015; Gu et al., 2016),但缺乏全球不同空间尺度降水年代际变化的比较研究,对区域间的关联性和差异的认识不够。基于此,本文拟利用全球降水数据,分析不同空间尺度降水的年代际变化特征及其区域差异,从全球视野来探究区域间降水的年代际变化特征。本文的第二部分将简要介绍所用资料和方法;第三部分描述全球不同空间尺度降水的年代际变化特征及区域差异。

2 数据和方法

我们采用了 1951~2010 年 GPCP (Global Precipitation Climatology Center, Schneider et al., 2015) 逐月降水数据, 空间分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间分辨率为月。本文主要关注全球陆地年降水的年代尺度变化特征。这里的年代尺度变化指 10 年以上时间尺度的变化, 既包含了大于 20 年以上的周期振荡, 又包含有长期变化趋势。把全球分为不同空间尺度, 通过对全球、东西半球、北美、南美、欧亚、非洲及澳洲五个大陆、北美、华北、北非及中亚四个典型干旱半干旱区平均年降水的分析, 认识区域间降水的特征差异。

过去对年代尺度降水的变化研究多集中于降水的年代际变化特征或长期变化趋势, 缺乏对两者相对贡献的综合考虑, 因而不能全面认识降水的年代尺度变化过程。为了弥补过去研究的不足和系统的认识降水的年代尺度特征, 这里利用集合经验模分解法 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, 简称 EEMD 方法) 对年降水的时间序列进行分解, 以期系统地认识其年代际振荡及长期趋势, 综合评估年代尺度的变化特征。

EEMD 方法是针对 EMD 方法 (Wu et al., 2007; 2009) 的不足, 提出的一种噪声辅助数据分析方法。EEMD 分解原理为: 当附加的白噪声均匀分布在整个时频空间时, 该时频空间就由滤波器组分割成的不同尺度成分组成。当信号加上均匀分布的白噪声背景时, 不同尺度的信号区域将自动映射到与背景白噪声相关的适当尺度上去 (Wu et al., 2007)。关于 EEMD 方法的详细介绍本文不再赘述。

3 全球不同空间尺度降水的年代际变化及其区域差异

3.1 全球和半球尺度降水的年代尺度变化特征

全球陆地降水存在着多时空尺度的变化。研究发现, 在全球一致增暖的背景下, 降水的变化在空间上表现出极大的不均性, 如非洲和东亚地区的降水显著减少, 北美和欧洲部分地区的降水则为增加趋势 (马柱国和符淙斌, 2007)。过去, 针对全球增暖背景下降水的年代尺度变化, 多数研究主要强调长期趋势的问题, 较少同时考虑年代际振荡和长期趋势, 缺乏对这种不同尺度变化定量贡献的分

析。大家知道, 年代尺度的变化既包括年代际、多年代际的振荡又包括其长期趋势, 因此, 针对降水的长时间尺度变化, 仅分析长期趋势是不够的。为此, 在分析陆地降水的年代尺度变化时, 需要综合分析其年代际振荡和长期趋势。这个问题将是本节分析的重点。

前述年代尺度特征既包括长期趋势又包括周期振荡, 其时间尺度须大于 10 年。干旱化是指降水的长时间减少趋势。在本文中我们把年代尺度干旱定义为降水的负距平持续时间大于 10 年。针对过去半个世纪全球陆地降水的长期趋势已进行了大量的研究, 但结果大多基于 2000 年以前的数据 (马柱国和符淙斌, 2006, 2007)。为此, 在系统分析陆地降水的年代尺度特征之前, 有必要利用最新的数据研究全球陆地降水的长期趋势。

图 1 给出 1951~2010 年全球年降水线性趋势系数的空间分布。由图 1 可以看出, 陆地降水长期趋势的全球分布极其不均匀。与马柱国和符淙斌 (2007) 的工作比较可知, 在非洲和东亚地区仍然维持着明显的干旱化趋势, 而北美和南美大部分地区降水呈显著的增加趋势。降水增加趋势大于 $15 \text{ mm } (10\text{a})^{-1}$ 主要分布在北美和南美的部分地区, 而降水减少趋势最大的地区主要在北非的半干旱区, 达 $-20 \text{ mm } (10\text{a})^{-1}$ 。在欧亚大陆, 北纬 $45^{\circ} \sim 67.5^{\circ}\text{N}$ 之间有一带状的降水增加趋势的区域; 中国东部呈现南涝北旱, 北方呈现西部降水增多, 东部降水减少的空间分布格局; 南美的亚马逊流域部分地区降水有明显减少的趋势。不难看出, 西半球 (北美洲和南美洲) 降水为增加趋势的范围明显大于降水为减少趋势的范围, 东半球 (欧亚大陆、非洲大陆和澳洲大陆) 降水减少的范围大于降水为增加趋势的范围。分别对全球陆地、西半球和东半球 1951~2010 年区域平均的线性趋势进行分析, 其线性趋势分别为 $0.71 \text{ mm } (10\text{a})^{-1}$ 、 $4.35 \text{ mm } (10\text{a})^{-1}$ 和 $-1.23 \text{ mm } (10\text{a})^{-1}$, 均通过 95% 的信度检验。由此看来, 在 1951~2010 年间, 全球陆地平均降水是一个弱的增加趋势, 西半球降水为增加趋势, 东半球为减少趋势, 东西半球陆地降水的趋势相反。与马柱国和符淙斌 (2007) 的结果比较, 长期趋势的空间分布格局基本没有发生大范围的变化, 说明全球目前降水的格局仍基本维持。

前面提到, 单纯的长期趋势分析不能系统认识降水的年代尺度变化特征, 除长期趋势外, 年代际

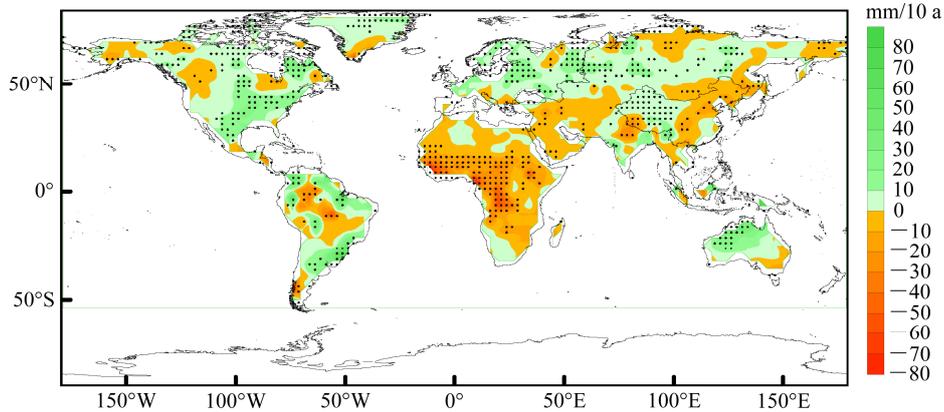


图1 1951~2010年全球陆地年降水量的线性趋势[单位: $\text{mm} (10 \text{ a})^{-1}$]。黑点表示通过95%的信度检验

Fig. 1 Linear trend of global land annual precipitation during 1951–2010. Stippled areas indicate the trend is statistically significant at the 95% confidence level

周期振荡特征的也不容忽视。过去,因方法的限制,对年代尺度降水的研究往往分离了长期趋势和年代际的周期振荡,没有综合系统的认识两者的共同特征,结果不能体现年代尺度变化的总体特征。作为一个用于时间尺度分离的新方法,EEMD法为系统分析降水的年代尺度变化特征提供了一个有效途径(Wu and Huang, 2009; Wu et al., 2009)。该方法的优点在于通过信号分离能清楚给出各种时间尺度的变化特征及其相对贡献。在此,利用EEMD方法分析了1951~2010年全球陆地平均年降水序列,分解的周期分别为2.9年、7.5年、12年和30年。基于本文所研究的时间尺度,保留周期为20年以上的年代尺度信号(图2)。

图2中MDV(Multi-Decadal Variability)为30年左右的周期振荡,TV(Trend Variability)为长期趋势,而MDV+TV为合成的年代尺度变化。从图2的MDV线可以看出,在1951~2010年间,全球陆地平均年降水存在一个明显的30年周期的年代际振荡,经历了两次年代尺度的干旱,分别是1951~1965年、1982~2000年,而湿润时段为1966~1981年,现在正处于另外一个湿润时段,开始于2001年。从趋势线上看(TV),1995年后降水趋势转为正的距平。30年的周期振荡和趋势叠加组成全球陆地平均降水的年代尺度变化(MDV+TV)。比较MDV和TV可知,由于存在强的年代际周期振荡,弱的降水趋势不足以改变年代际周期振荡的特征,如年代际周期最近的一次转折点发生在2000年,而合成的年代尺度干湿转折点

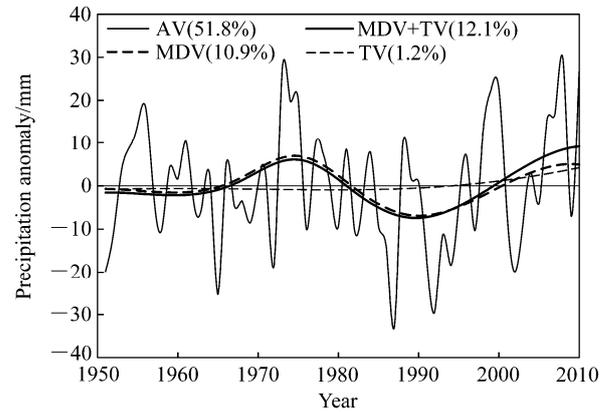


图2 基于EEMD方法分析的全球陆地平均年降水量的变化特征,其中AV(Annual Variability)为降水的年际变化,MDV(Multi-Decadal Variability)为多年代际变化,TV(Trend Variability)为长期趋势的变化,MDV+TV为多年代际变化,括号里的数字为各分量的方差贡献率

Fig. 2 Characteristics of global averaged land annual precipitation. AV, MDV, and TV represent annual variability, multi-decadal variability, and trend variability, respectively; MDV+TV indicates multi-decadal change; numbers in brackets mean variance contributions

的时间点也在2000年。由此说明,在1951~2010年间,全球陆地年降水的年代尺度特征主要以年代际周期振荡为主,而趋势变化相对较弱。趋势表示一个变量的某种倾向,因此干旱和干旱化是两个完全不同的概念,既有区别又有联系,湿润和湿润化也是同样的道理。从图2可以看出,在过去60年,降水的年代尺度特征既存在干、湿的年代际振荡又存在年代尺度的长期趋势,两者既有区别又有联系:干旱时段分别是1951~1966年和1981~2000年,而干旱化的时段为1975~1990年;湿润化的

时段为 1960~1975 年和 1991~2010 年, 湿润的时段为 1966~1980 年和 2001~2010 年。

同理, 对东西半球进行了类似的分析。以 25°W 为界, 把全球陆地分为东西两个半球, 西半球包括北美大陆和南美大陆, 东半球包括欧亚大陆、非洲大陆和澳洲大陆。对东西半球的年降水量进行区域平均, 然后进行 EEMD 分析。图 3 为利用 EEMD 方法所得到的半球平均年降水的年代尺度变化 (包括年代际振荡和长期趋势)。可以看出, 两半球都存在干湿的年代际振荡和长期变化趋势。值得注意的是, 两半球的趋势不是简单的线性递增或线性递减, 而是存在一个非线性的趋势变化, 这正是 EEMD 方法不同于其他时间序列分离方法之处。由图 3 可以看出, 两个半球都存在着一个 30 年左右的周期, 同时长期趋势的振幅与周期振荡的振幅相当。在西半球 (图 3a), 年代际周期振荡存在着两个干旱时段, 一个发生在 1951~1966 年, 另一个是 1984~2003 年。趋势项在 1972~1973 年发生了转折变化, 由降水偏少转为降水增多, 近 60 年总体呈现增加趋势。合成的年代尺度曲线给出了干湿变化的两个重要时段, 一个是 1969 年前的干旱时段, 另一个是起始于 1970 年的持续湿润时段。在

1990~1993 年间出现了一个弱的干旱时段, 这是由于趋势项处于正位相, 而年代际振荡处于负位相, 二者相互抵消了。因这个干旱时段仅持续了 4 年, 故不是本文所关注的问题。在东半球 (图 3b), 同样存在一个 20~30 年左右的周期振荡, 且趋势项是一个明显的非线性趋势, 结果造成干湿期交替出现。大部分时间东半球的年代际振荡与趋势的位向相同, 这使得合成的干湿振荡的振幅明显加强。其中, 干旱时段出现在 1976~2001 年, 两个湿润时段分别出现在 1951~1975 年和 2001~2010 年。

一个重要的事实是, 2000 年以后东西半球无论是周期振荡还是长期趋势, 降水都处于一个异常偏多的时期, 即 2000 年以后降水均为正的异常, 这个现象在东半球尤为明显。

在 1951~2010 年间, 全球陆地平均年降水的年代尺度变化主要是以 30 年左右的年代际周期振荡为主要特征, 而在半球尺度上, 年代际周期振荡和长期趋势均对年代尺度的干湿交替起重要作用。两半球的显著差异出现在其长期变化趋势上, 趋势项的不同决定了合成的年代尺度变化具有显著差异。东半球的长期趋势在 1968~2001 年有一个明显的干旱时段, 而在这个时段, 西半球则为一个明

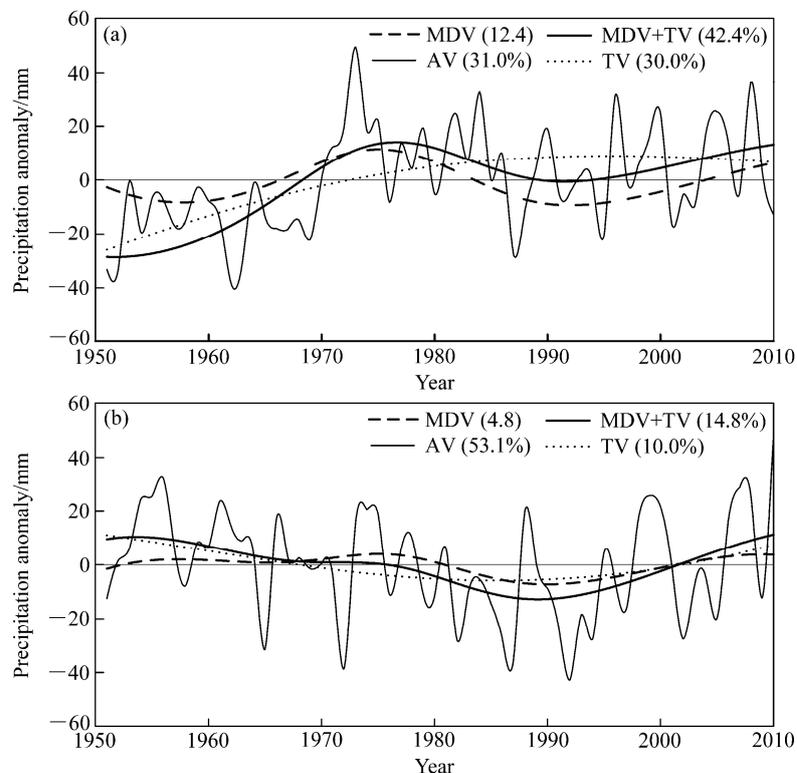


图 3 同图 2, 但为 (a) 西半球和 (b) 东半球陆地平均的年降水量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for (a) the Western Hemisphere and (b) Eastern Hemisphere averaged land annual precipitation

显的湿润化时段。东半球的这个干旱时段是加剧 1976~2001 年干旱时段的重要因素之一。在 2000 年以前,两半球的干湿位相是相反的。2000 年以后,全球和两半球均进入一个多雨时段,这是值得关注的事实,其产生的原因有待于进一步的研究。

3.2 大陆尺度降水的年代尺度变化特征

为了进一步认识区域尺度降水的年代尺度变化及其差异,本节我们分析了北美大陆、南美大陆、欧亚大陆、非洲大陆和澳洲大陆的区域平均年降水的年代尺度变化特征。首先分别对五个大陆的年降水进行区域平均,建立 1951~2010 年五个大陆年降水量的时间序列,然后对降水序列进行 EEMD 分析,提取各大陆降水的年代尺度信号。

图 4 给出了利用 EEMD 方法提取的五个大陆区域平均年降水的年代尺度特征,包括年代际振荡及长期趋势。可以看出,五个大陆都具有明显的年代际周期振荡,但周期的长短具有一定的差异。北美、

南美和澳洲大陆的周期大致相等,约为 30 年左右,且位相基本相同,但发生年代际转化的时间不同(表 1)。相对于上述三个大陆,欧亚和非洲大陆的年代的振荡周期明显较长,约为 60 年。从年代际周期的转折性特征来看,五个大陆在 2000 年前后均发生了转折性变化,且均由干旱变湿润,转折时间分别是,北美大陆为 2006 年,南美大陆为 2002 年,欧亚大陆 2009 年,非洲大陆 2008 年,澳洲大陆为 1997 年。类似的现象在趋势项也存在,分析图 4a、b 和 e 发现,北美和南美及澳洲大陆在上个世纪 70 年代初就发生了由干旱转为湿润的变化,三个大陆的转折时间分别为 1976、1972、1974 年。而欧亚大陆及非洲大陆发生由干旱变湿润的转换时间相对较晚,分别为 1993、2005 年。年代际周期振荡项和趋势项均显示出在近年来五个大陆的降水均处于偏多的阶段。因此,从年代尺度上来讲,五个大陆都进入了一个异常偏湿的时段。

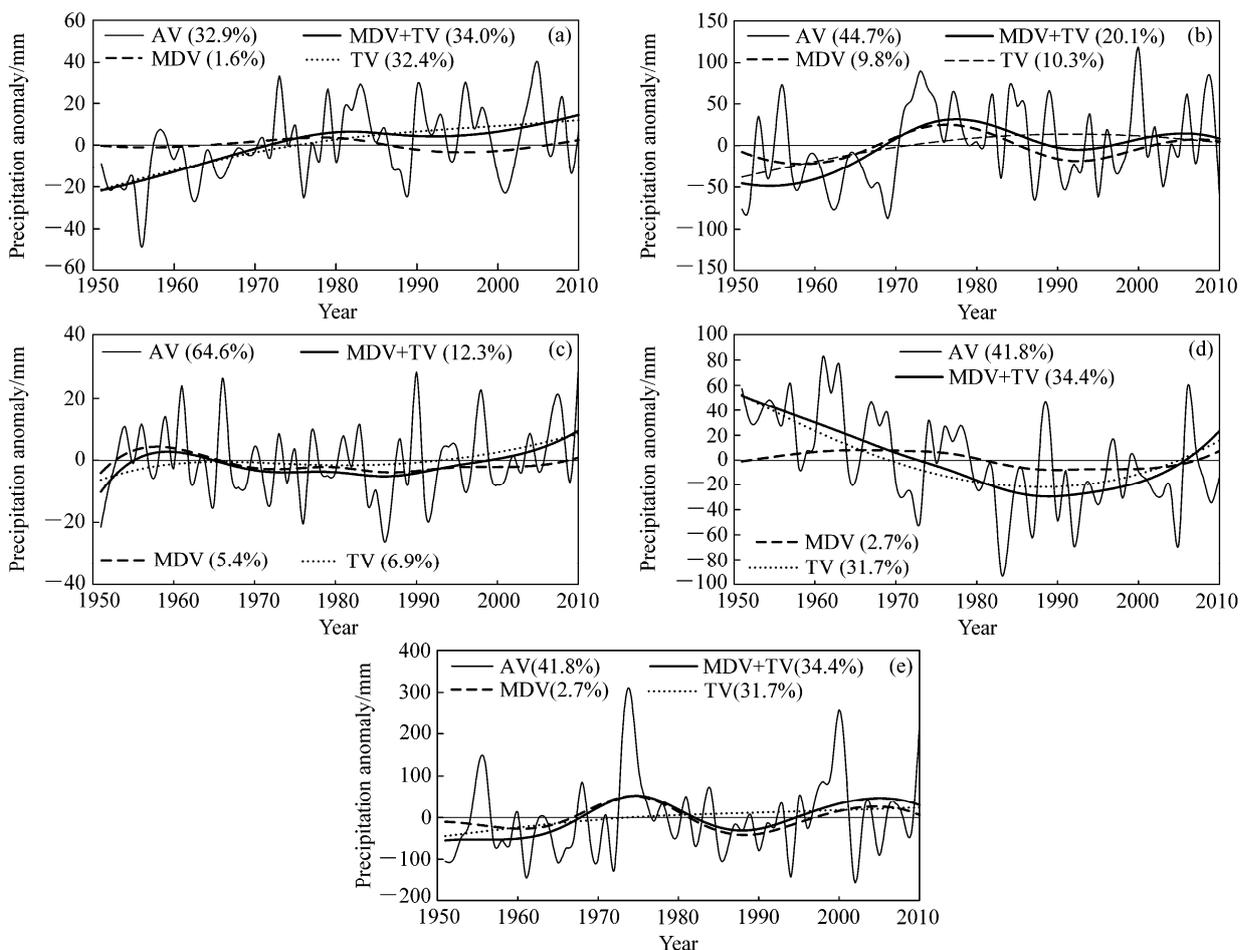


图 4 同图 2, 但为 (a) 北美、(b) 南美、(c) 欧亚、(d) 非洲和 (e) 澳洲大陆平均年降水量

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for (a) North America, (b) South America, (c) Eurasia, (d) Africa, (e) Australia averaged land annual precipitation

表 1 全球五个大陆区域平均年降水量的趋势及年代际干湿振荡的时间统计

Table 1 Statistics of long-term trend and multi-decadal wet and dry oscillation of regional mean annual precipitation over five continents

		时间统计				
		北美大陆	南美大陆	欧亚大陆	非洲大陆	澳洲大陆
趋势	干旱时段	1983~1993	1978~1992	1960~1986	1951~1989	1976~1987
	湿润时段	1951~1982	1951~1977	1951~1959	1990~2010	1954~1975
		1994~2010	1993~2006	1987~2010		1988~2005
年代际 振荡	干旱时段	1951~1971	1951~1968	1965~1999	1973~2005	1951~1967
	湿润时段		1989~1996			1982~1994
		1972~2010	1969~1988	1956~1964	1951~1972	1968~1981
			1997~2010	2000~2010		1995~2010

为了进一步认识五个大陆年降水的年代尺度干湿特征，我们统计了五个大陆的年代际干湿振荡和干湿变化趋势，如表 1 所示。在过去 60 年间，五个大陆均存在一次干旱化趋势（降水持续减少的状态），其中欧亚大陆和非洲大陆的干旱化出现开始于上个世纪 50、60 年代，结束于 80 年代中后期；而北美、南美和澳洲大陆出现的时段大致相同，基本都出现在上个世纪 70 年中后期或 80 年代初期，结束于 80 年代末期或 90 年代初。干旱化持续时间最长的是非洲大陆，达 39 年，其次是欧亚大陆，为 27 年，北美大陆、南美大陆和澳洲大陆干旱化的持续时间分别为 11、15 和 12 年。湿润化（降水的持续增加状态）在过去 60 年间出现的频次较干旱化多，除非洲大陆外，其他大陆均出现了两次湿润化趋势：第一个湿润化时段始于上世纪 50 年代初，但各大陆持续的时间不同，其中北美湿润化持续时间最长为 32 年，南美大陆持续时间为 27 年，澳洲大陆为 22 年，欧亚大陆不足 10 年；第二个湿润化的时段开始于上个世纪 90 年代前后，其中北美和南美分别始于 1993 年和 1994 年，欧亚大陆和澳洲大陆分别出现 1987 和 1988 年，即欧亚和澳洲大陆开始的时间早于北美和南美大陆。过去 60 年非洲大陆仅出现了一个湿润化时段，从 1990 年开始，非洲大陆从干旱化趋势转为一个湿润化趋势，这个湿润化趋势已持续了约 20 年，一些证据也证明了这种湿润化趋势的存在。通过分析年代尺度的干湿特征发现，北美、南美和澳洲大陆从 1951 年开始均出现了一个持续时间在 20 年左右的干旱时段，且南美大陆和澳洲大陆在 1980 年代以后又出现了一个持续时间约 10 年左右的干旱。与北美、南美和澳洲大陆不同，欧亚大陆和非洲大陆均出现

持续时间超过 30 年的干旱时段，欧亚大陆始于 1965 年，结束于 1999 年，非洲大陆始于 1973 年，结束于 2005 年。南美、北美和澳洲大陆的第一个湿润时段都开始于 1970 年前后，但其结束时间却有差异明显，其中北美至今仍然处于湿润时段，而南美大陆和澳洲大陆的湿润时段却结束于 80 年代，在经历了短暂的干旱时段后，在上个世纪 90 年代中期又转入新的湿润时段，持续至今。欧亚大陆的第一个湿润期为 1956~1964 年，第二个湿润期为 2000~2010 年，持续时间均约为 10 年，属于年代尺度的变化。非洲大陆的第一个湿润期出现在 1951~1972 年，但从图 4d 上可以看出，2006 年以后非洲降水已经转为正距平，但持续时间仅为 5 年，没有达到年代变化的时间尺度，故没有计入湿润时段，但这可能是非洲大陆进入一个新的年代尺度湿润时段的开始。

综上所述，三个重要的事实值得注意：首先，在 1951~2010 年间，欧亚大陆和非洲大陆与北美、南美和澳洲大陆的年代际振荡和趋势存在着一个近似反位相的关系；其次，五个大陆降水的年代尺度变化是由年代际振荡与长期趋势相叠加的结果，干旱化与干旱时段是完全不同的两个过程，两者的起止年份也不尽相同；在 2000 年以后全球五个大陆可能将进入一个相对湿润的时段。关于全球五个大陆同时进入一个湿润时段的原因有待于进一步研究。

3.3 全球典型干旱半干旱区的年代尺度特征及其区域差异

干旱半干旱区是对水分变化最敏感的地区，由于降水量无法满足蒸发潜力的需求而造成缺水的状态。在全球增暖背景下，这些地区降水和气温都存在显著的变化。全球重大干旱事件多发生在干旱

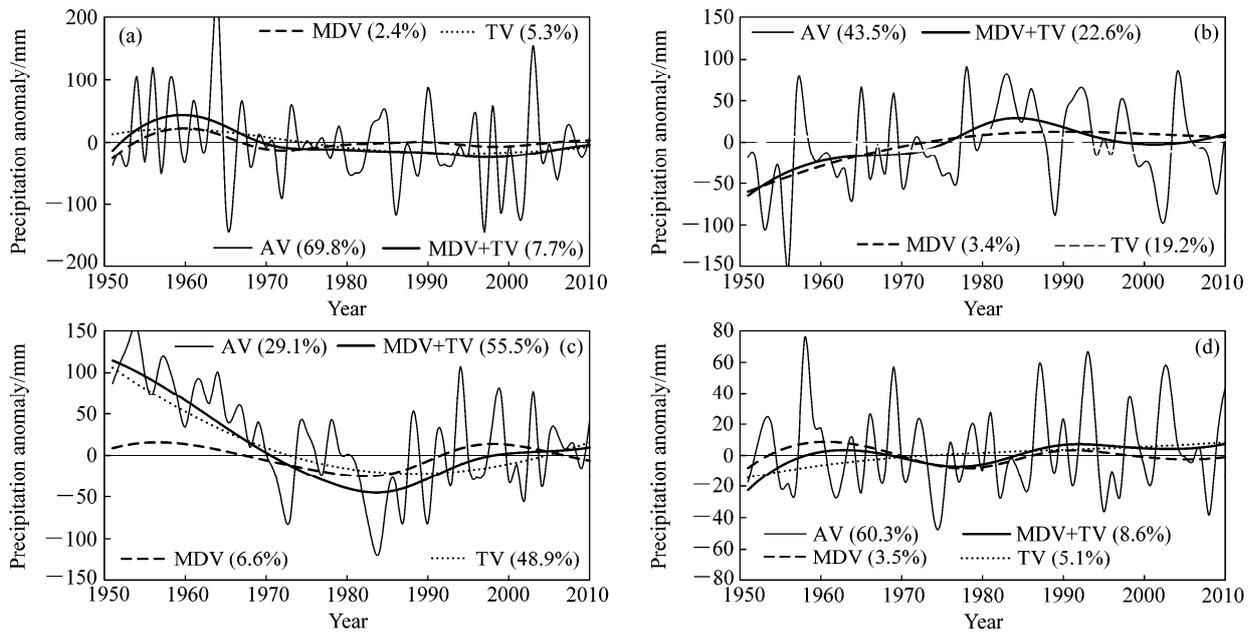


图5 同图2, 但为全球四个典型的干旱半干旱地区区域平均年降水量: (a) 华北; (b) 北美; (c) 北非; (d) 中亚

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for four typical arid and semi-arid areas over the globe: (a) North China; (b) North America; (c) North Africa; (d) central Asia

半干旱区, 因而研究干旱半干旱地区年代尺度干湿特征具有重要意义。本节将分析全球典型干旱半干旱区的年代尺度干湿特征及其区域差异。

在此选取北美、华北、北非及中亚干旱半干旱区为四个典型代表区域, 通过研究这四个区域的年代尺度干湿特征认识全球干旱半干旱区的变化。这四个区的划分范围分别为北美 ($30^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{W}$)、华北 ($32^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$, $105^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)、北非 ($13^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $16^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{E}$)、中亚 ($39^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\sim 100^{\circ}\text{E}$)。图5给出四个区的年代际振荡、趋势和年代尺度合成变化。由图5可以看出, 四个典型区具有不同的年代际振荡周期。北美和中亚都具有约30年的年代际周期且位相基本一致, 二者的趋势项均为上升趋势, 且分别在1971和1975年转为偏湿的时段。华北与北美和中亚的年代际周期基本相等且位相相差不大, 但长期趋势却是反向的。值得指出的是, 北非的年代际周期位相和趋势与其它三个区明显不同, 这也是华北与北非的重要区别。过去的研究发现, 北非与华北的长期变化具有类似的特征(严中伟等, 1990; 马柱国和符淙斌, 2007), 但限于方法无法发现在年代际振荡两个地区所表现出的不同特征。

如表2所示, 华北是干旱化趋势持续时间最长, 达38年, 其次为北非, 为34年, 北美为17年,

中亚尽管持续时间最短, 但在过去60年却出现了两次干旱化趋势, 分别为1964~1977年和1993~2003年。相对于干旱化, 湿润化的持续时间相对较短, 但出现的频次较多。除北非外, 其余三个区域都出现了两次湿润化时段, 第一个湿润化趋势的起始时间均为1951年, 其中北美第一个湿润化的持续的时间最长, 为34年。北非的湿润化出现在1985~2010年, 长达26年。北美、华北第二个湿润化时段的起始时间均为2000年前后, 且都持续到2010年。而中亚的第二个湿润化时段却处在1978~1992年, 这是中亚与其他三个地区不同之

表2 典型干旱半干旱区区域平均年降水量的趋势及年代际干湿振荡的时间统计

Table 2 Statistics of long-term trend and multi-decadal wet and dry oscillation of regional mean annual precipitation over four typical arid and semi-arid areas

		时间统计			
		北美	华北	北非	中亚
趋势	干旱时段	1985~2001	1961~1998	1951~1984	1964~1977 1993~2003
	湿润时段	1951~1984 2001~2010	1951~1960 1999~2010	1985~2010	1951~1963 1978~1992
年代际振荡	干旱时段	1951~1974	1970~2010	1969~2010	1951~1958 1969~1984
	湿润时段	1975~2010	1952~1969	1951~1968	1959~1968 1985~2010

处,也就是说除中亚外,其余三个区近年来都在进入了一个相对湿润时段。相对于长期趋势来讲,年代际尺度的干湿振荡具有明显的区域间反位相关系。如华北和北非具有相同的湿润时段和干旱时段,且这个干旱时段均持续约 40 年,但从合成图上可以看出,这两个地区的干旱时段都即将结束,有进入下一个湿润时段的迹象。此外,北美的湿润时段和中亚的第二个湿润时段相同。

概括起来,四个典型干旱半干旱区年降水的年代尺度变化具有明显的区域差异。首先,华北和北非的年代际振荡具有近似的位相。在最近几十年,北美和中亚同处于湿润时段,但前者开始于 1975 年,后者开始于 1985 年。此外,中亚的第一个湿润时段(1959~1968 年)却对应北美的干旱时段。总体来讲,华北和北非与北美和中亚降水的长期趋势及年代际振荡具有相反位相的特征,这是一个值得注意的事实,对其形成机制的研究将对区域年代尺度降水变化的预测具有重要的借鉴意义。总之,从年代尺度变化来看,全球不同空间尺度的降水变化存在着显著差异,且在区域之间存在着明显的位相相同或相反的现象,那么在全球增暖背景下,年代尺度降水的区域之间异同的原因有待于进一步的研究。

4 结论与讨论

基于 1951~2010 年 GPCC 逐月降水数据,利用 EEMD 方法,对全球陆地不同空间尺度年降水的变化进行了分析,提取全球、东西半球、五个大陆及四个典型干旱半干旱区的年代尺度信号,区分年代际振荡和长期趋势对年代尺度变化的影响,并比较了区域之间的异同点。研究发现:

(1) 在全球尺度:全球陆地平均降水既存在年代际的周期振荡,又存在长期变化的趋势。降水的年代际周期振荡的强度远大于降水的长期趋势,两者的共同作用使得全球陆地平均降水呈现以年代际周期振荡为主的年代尺度特征,其周期振荡为大约 30 年左右。一个重要事实是 2000 年以后,全球陆地处于一个多雨时段,按周期及变化趋势的综合结果推断,在之后的 5~10 年(2001~2010 年)全球陆地降水将持续一个正的异常。

(2) 在半球尺度:2000 年以前,东、西半球具有明显相反的年代尺度变化特征,东半球变干(降水减少),西半球变湿(降水增加)。合成的年代尺

度特征显示,西半球在 1951~1969 年间处于一个干旱时段,而 1970~2010 年是一个湿润时段;东半球干旱时段出现在 1976~2001 年,两个湿润时段分别出现在 1951~1975 年和 2001~2010 年。同样,两个半球在 2000 年以后均进入一个湿润时段。需要指出的是,西半球的年代际振荡在 1984~2003 年出现了一个干旱时段,但由于与趋势项的正距平相当,相互抵消了,所以合成的结果并未出现年代尺度干旱。

(3) 在大陆尺度:在 1951~2010 年间,欧亚和非洲与北美、南美和澳洲大陆在年代际振荡和趋势上存在着一个近似反位相的关系。五个大陆降水的年代尺度变化是由年代际振荡与长期趋势相叠加的结果,干旱化与干旱时段是完全不同的两个过程,两者的起止年份也不尽相同。全球五个大陆可能均将进入一个相对湿润的时段。

(4) 在区域尺度:四个典型干旱半干旱区年降水的年代尺度变化具有明显的区域差异。首先,华北和北非的年代际振荡具有近似的位相。在最近几十年,北美和中亚同处于湿润时段,但前者开始于 1975 年,后者开始于 1985 年。此外,中亚的第一个湿润时段(1959~1968 年)却对应北美的干旱时段。总体来讲,华北和北非与北美和中亚降水在长期趋势及年代际振荡上具有相反位相的特征,这是一个值得注意的事实。

以上结论主要是建立在全球陆地降水实际数据分析的基础上,揭示了全球不同空间尺度陆地降水的年代尺度变化特征,发现了一些重要事实,但没有涉及发生这些事实的机理研究,如为什么东西半球区域平均年降水的年代尺度特征是反位相的关系,全球陆地降水在 2000 年以后降水增加的原因是什么,华北和北非与北美和中亚降水反位相的年代尺度特征的驱动因子是什么?诸如此类问题将是进一步开展年代尺度干旱研究的重要问题。

致谢 感谢两位审稿专家的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Ault T R, George S S. 2010. The magnitude of decadal and multidecadal variability in North American precipitation [J]. *J. Climate*, 23 (4): 842-850, doi:10.1175/2009JCLI3013.1.
- Bichet A, Wild M, Folini D, et al. 2011. Global precipitation response to changing forcings since 1870 [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 11 (18): 9961-9970, doi:10.5194/acp-11-9961-2011.
- Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. 2004. A global dataset of palmer drought

- severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. *J. Hydrometeorol.*, 5 (6): 1117–1130, doi:10.1175/JHM-386.1.
- Delworth T, Manabe S. 1993. Climate variability and land-surface processes [J]. *Adv. Water Resour.*, 16 (1): 3–20, doi:10.1016/0309-1708(93)90026-C.
- Dong B, Dai A G. 2015. The influence of the interdecadal Pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe [J]. *Climate Dyn.*, 45 (9–10): 2667–2681, doi:10.1007/s00382-015-2500-x.
- 符淙斌, 黄燕. 1996. 亚洲的全球变化问题 [J]. *气候与环境研究*, 1 (2): 97–112. Fu Congbin, Huang Yan. 1996. Global change in Asia [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 1 (2): 97–112, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.1996.02.01.
- Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, et al. 2008. Climate of China and East Asian monsoon [M]/Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, et al. *Regional Climate Studies of China*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Gu G J, Adler R F. 2015. Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901–2010 [J]. *J. Climate*, 28 (11): 4431–4453, doi:10.1175/JCLI-D-14-00201.1.
- Gu G J, Adler R F, Huffman G J. 2016. Long-term changes/trends in surface temperature and precipitation during the satellite era (1979–2012) [J]. *Climate Dyn.*, 46 (3–4): 1091–1105, doi:10.1007/s00382-015-2634-x.
- 黄荣辉, 韦志刚, 李锁锁, 等. 2006. 黄河上游和源区气候、水文的年代际变化及其对华北水资源的影响 [J]. *气候与环境研究*, 11 (3): 245–258. Huang Ronghui, Wei Zhigang, Li Suosuo, et al. 2006. The interdecadal variations of climate and hydrology in the upper reach and source area of the Yellow River and their impact on water resources in North China [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 11 (3): 245–258, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2006.03.01.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [M]. Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Lambert F H, Allen M R. 2009. Are changes in global precipitation constrained by the tropospheric energy budget? [J]. *J. Climate*, 22 (3): 499–517, doi:10.1175/2008JCLI2135.1.
- 李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 2002. 年代际气候变化研究 [J]. *气候与环境研究*, 7 (2): 209–219. Li Chongyin, Zhu Jinhong, Sun Zhaobo. 2002. The study interdecadal climate variation [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 7 (2): 209–219, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2002.02.08.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 51 (23): 2913–2925, doi:10.1007/s11434-006-2159-0.
- 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 30 (3): 464–474, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.10.
- 马柱国, 符淙斌. 2007. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系 [J]. *中国科学 (D 辑): 地球科学*, 37 (2): 222–233. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 50 (5): 776–788, doi:10.1007/s11430-007-0036-6.
- Narisma G T, Foley J A, Licker R, et al. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (6): L06710, doi:10.1029/2006gl028628.
- Nicholson S E, Grist J P. 2001. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales [J]. *Int. J. Climatol.*, 21 (14): 1733–1757, doi:10.1002/joc.648.
- Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (5): 815–829, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0815:DDASVA>2.0.CO;2.
- Rasmusson E M, Arkin P A. 1993. A global view of large-scale precipitation variability [J]. *J. Climate*, 6 (8): 1495–1522, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<1495:AGVOLS>2.0.CO;2.
- Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, et al. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development [J]. *Science*, 316 (5826): 847–851, doi:10.1126/science.1131634.
- Schneider U, Becker A, Finger P, et al. 2015. GPCC full data reanalysis version 7.0 at 0.5°: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historic data [DB], doi:10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V7_050.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. *第四纪研究*, 23 (2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 23 (2): 152–164, doi:10.3321/j.issn:1001-7410.2003.02.005.
- Trenberth K E. 2011. Changes in precipitation with climate change [J]. *Climate Res.*, 47 (1–2): 123–138, doi:10.3354/cr00953.
- 王绍武, 朱锦红. 1999. 国外关于年代际气候变率的研究 [J]. *气象学报*, 57 (3): 376–384. Wang Shaowu, Zhu Jinhong. 1999. A review of overseas study on inter-decadal variability [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 57 (3): 376–384, doi:10.11676/qxxb1999.036.
- Wu Z H, Huang N E, Long S R, et al. 2007. On the trend, detrending, and variability of nonlinear and nonstationary time series [J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 104 (38), 14889–14894, doi: 10.1073/pnas.0701020104.
- Wu Z H, Huang N E. 2009. Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method [J]. *Adv. Adapt. Data Anal.*, 1 (1): 1–41, doi:10.1142/S1793536909000047.
- Wu Z H, Huang N E, Chen X Y. 2009. The multi-dimensional ensemble empirical mode decomposition method [J]. *Adv. Adapt. Data Anal.*, 1 (3): 339–372, doi:10.1142/S1793536909000187.
- 严中伟, 季劲钧, 叶笃正. 1990. 60 年代北半球夏季气候跃变—I. 降水和温度变化 [J]. *中国科学 (B 辑)*, 20 (1): 97–103. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990. Northern hemispheric summer climatic jump in the 1960s (I)—Rainfall and temperature [J]. *Science China Chemistry*, 33 (9): 1092–1101, doi:10.1360/zb1990-20-1-97.