中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 6 期: 895 ~ 912
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

进 展

海洋对干旱半干旱区气候变化的影响

管晓丹[1], 马洁茹[1], 黄建平[1*], 黄瑞新[2,3], 张镭[1], 马柱国[4]

1. 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;
2. Woods Hole Oceanographic Institution, Woods Hole MA 02543, USA;
3. 中国科学院南海海洋研究所热带海洋环境国家重点实验室, 广州 510301;
4. 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
* 通讯作者, E-mail: hjp@lzu.edu.cn

收稿日期: 2018-08-16; 收修改稿日期: 2018-10-24; 接受日期: 2018-12-07; 网络版发表日期: 2019-03-06
国家自然科学基金项目(批准号: 41722502、41521004、41575006、91637312)和高等学校学科创新引智计划项目(编号: B13045)资助

摘要 干旱半干旱区约占全球陆地总面积的41%, 由于增温显著、降水稀少, 导致生态脆弱、生存环境恶化, 对全球气候变化的响应相对敏感. 海洋作为地球气候系统的重要调节器, 在干旱半干旱区气候变化过程中发挥着至关重要的作用; 尤其在现代气候变化, 海洋活动对干旱半干旱区气候变率的影响不可忽视. 文章回顾了近百年干旱半干旱地区的气候变化特征, 总结了海洋活动对其变化影响的研究进展, 重点归纳了太平洋年代际振荡(PDO)、大西洋多年代际振荡(AMO)以及El Niño和La Niña等对干旱半干旱地区气候变化的影响; 概述了不同海洋振荡因子协同影响干旱半干旱气候变化的机制. 研究表明: 全球干旱半干旱区在近百年来表现出显著的强化增温现象, 呈现出明显的年代际干湿变化特征; 该变化特征与海洋年代际尺度振荡因子有密切关系, 由于海洋振荡因子的不同位相组合显著改变海陆热力差, 进而影响西风急流、行星波及阻塞频率, 导致干旱半干旱区温度及干湿特征发生改变. 随着干旱半干旱地区气候变化的加剧, 未来的海洋活动变化对其影响将出现新的特征, 这将增加干旱半干旱地区未来气候变化的不确定性, 加剧干旱半干旱区对全球气候的影响.

关键词 海洋活动, 干旱半干旱区, 气候变化, 年代际干湿变化

1 引言

干旱半干旱区是指年降水量(P)远小于年潜在蒸散量(PET)的地区, 通常将干燥指数(aridity index, AI)小于0.65的地区划分为干旱半干旱区(Hulme, 1996; Feng和Fu, 2013; Huang等, 2016), 其中包含极端干旱、干旱、半干旱以及半湿润干旱区(Feng和Fu, 2013; Spinoni等, 2015). 干旱半干旱区约占陆地总面积的41%(White和Nackoney, 2003), 承担了超过38%的全球人口(Reynolds等, 2007), 其中90%的人口生活在发展中国家(GLP, 2005; Armah等, 2010; Huang等, 2017a). 这些干旱半干旱地区存在人口多、土壤肥力低等问题, 导致其对气候变暖和人类活动等引起的全球变化异常敏感(Scheffer等, 2001; Rietkerk等, 2004; Maestre等, 2013; Li等, 2016; Zhou等, 2016). 在现代气候变化过程中, 干旱半干旱区是全球增温最为显著的

中文引用格式: 管晓丹, 马洁茹, 黄建平, 黄瑞新, 张镭, 马柱国. 2019. 海洋对干旱半干旱区气候变化的影响. 中国科学: 地球科学, 49: 895–912, doi: 10.1360/N072018-00233
英文引用格式: Guan X, Ma J, Huang J, Huang R, Zhang L, Ma Z. 2019. Impact of oceans on climate change in drylands. Science China Earth Sciences, 62: 891–908, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9317-8

© 2019 《中国科学》杂志社

地区(Huang等, 2012, 2017b), 而且历史观测和模式模拟都表明全球干旱半干旱区在过去60年持续扩大, 并将在21世纪加速扩张(Huang等, 2017c). 气候变暖、干旱加剧和人口增长将增加发展中国家发生荒漠化风险. 由于气候变化和人类活动引起的土地荒漠化扩大将进一步造成土地生产力下降、人口迁移、生态环境恶化等, 对社会经济造成深远的影响. 因此, 加强全球干旱半干旱区气候变化特征的理解对于延缓荒漠化、保护区域可再生资源以及制定合理政策至关重要.

干旱半干旱区气候变化是一个多因子作用的影响结果, 其中不仅受海洋活动、大气环流等自然因子的影响, 还包括温室气体、土地利用变化等人为因素的作用. 海洋作为地球气候系统中重要的组成部分, 其对干旱半干旱区气候变化的影响研究是深刻认识干旱半干干旱区气候变化及其机理的重要内容. 已有的研究表明海洋活动, 特别是太平洋、大西洋及印度洋盆地的海温对全球干旱半干旱区的降水、温度、干湿变化等存在不同时间尺度的影响(Hu等, 2018; Wang等, 2018; 符淙斌和马柱国, 2008); 并且海洋与大气相互作用决定了全球年代际尺度上的干湿变化(Guan等, 2017). 此外, 大量研究从海洋振荡因子不同位相变化及组合、海陆热力差异等角度出发, 研究了海洋对干旱半干旱地区气候变化的影响及可能机制(Huang等, 2017a, 2017b). 但仍然存在许多尚未解决的问题, 例如不同海域如何相互作用影响干旱半干旱区气候变化, 以及量化海洋活动在干旱半干旱区气候演变中的相对贡献及其响应过程等. 本文针对目前国内外学者的已有工作, 系统总结了现代气候变化过程中, 海洋对干旱半干旱区气候变化影响的最新研究进展, 并对其未来发展趋势进行了讨论, 以期加深我们对干旱半干旱区气候变化机理以及荒漠化预防的认识和把握. 准确评估海洋活动对荒漠化的可能影响, 以便为进一步防治荒漠化、减轻沙尘暴危害、制定适应与减缓全球气候变化的对策提供科学依据.

2 干旱半干旱区气候的变化特征

干旱半干旱地区作为全球陆地的重要组成部分, 在全球气候变化过程中发挥着不可忽视的作用. 在近几十年全球增温背景下, 干旱半干旱地区面积持续扩张(Huang等, 2016, 2017c), 极端干旱事件频发. 同时, 气候变化的年代际信号也造成了半干旱区年代际特征显著——例如北半球80年代的快速增温时期和21世纪初的增温减缓阶段, 半干旱地区气候表现出明显的年代际变化特征. 对于未来的半干旱区气候变化特征, 已有研究表明未来情景中半干旱区域面积扩张存在明显被低估的情况, 指出未来情景中半干旱地区的气候变化特征存在突出的不确定性.

2.1 现代干旱半干旱区分布及演变

全球干旱半干旱区主要分布在北半球中低纬度地区(图1). 其中极端干旱地区(AI<0.05)集中在撒哈拉沙漠中北部地区、阿拉伯半岛东部的鲁卡哈利沙漠、中国西北部的塔克拉玛干沙漠和阿塔卡马沙漠地区; 干旱地区(0.05≤AI<0.2)主要位于撒哈拉沙漠南部、非洲南部、西阿拉伯半岛、中亚、蒙古和中国北部地区, 以及澳大利亚的大部分地区; 半干旱(0.2≤AI<0.5)和半湿润干旱区(0.5≤AI<0.65)主要位于美国西部、南美西海岸、中亚和东亚以及澳大利亚中部沙漠以外的大部分地区.

干旱半干旱区的总面积在过去六十年里持续的扩张(图2). 极端干旱、干旱、半干旱和半湿润干旱区的面积分别增加了0.6×10^6、0.1×10^6、1.6×10^6和0.5×10^6 km^2(图2). 其中, 最大的面积扩张发生在半干旱区, 自20世纪60年代初以来半干旱区的扩张已经占总干旱半干旱区面积扩张的一半以上(图2c). 在20世纪80年代以前, 半湿润干旱区面积几乎不变, 80年代初减少, 80年代后期明显扩张(图2b). 干旱区的面积表现出强烈的年代际振荡变化, 70年代面积减少, 80年代初恢复面积扩张; 1990~2004年的面积与70年代以前的面积相当(图2d). 由于20世纪70年代南半球大面积的降水异常, 导致干旱地区的面积减小, 半干旱区面积增加(Feng和Fu, 2013).

根据Huang等(2016)的研究结果, 干旱半干旱地区不是一个固定的分布, 而存在动态的改变(如图3所示). 半湿润干旱(半干旱)到半干旱(干旱)的转变主要发生在东亚、东澳、非洲北部和南部. 由半干旱(干旱)向半湿润/湿润(半干旱)过渡区域主要分布在澳大利亚中部/西部, 美国中部和南美洲南部. 结果表明, 除澳大利亚中部/西部以外, 东半球主要为干旱化, 而北美和南美中纬度则变的湿润. 此外, 北美和东亚的两个温带半干旱地区呈现出不同的变化特征, 北美更多的干旱和

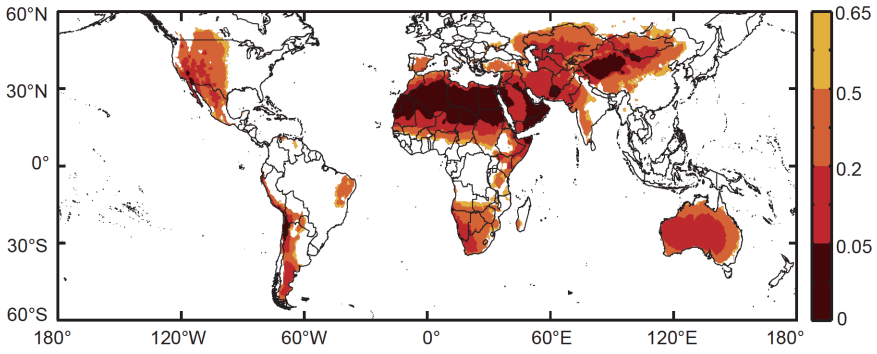


图 1　**基于1961~1990年气候态干燥度指数(AI)划分的全球干旱半干旱区分布**

引自Feng和Fu(2013)

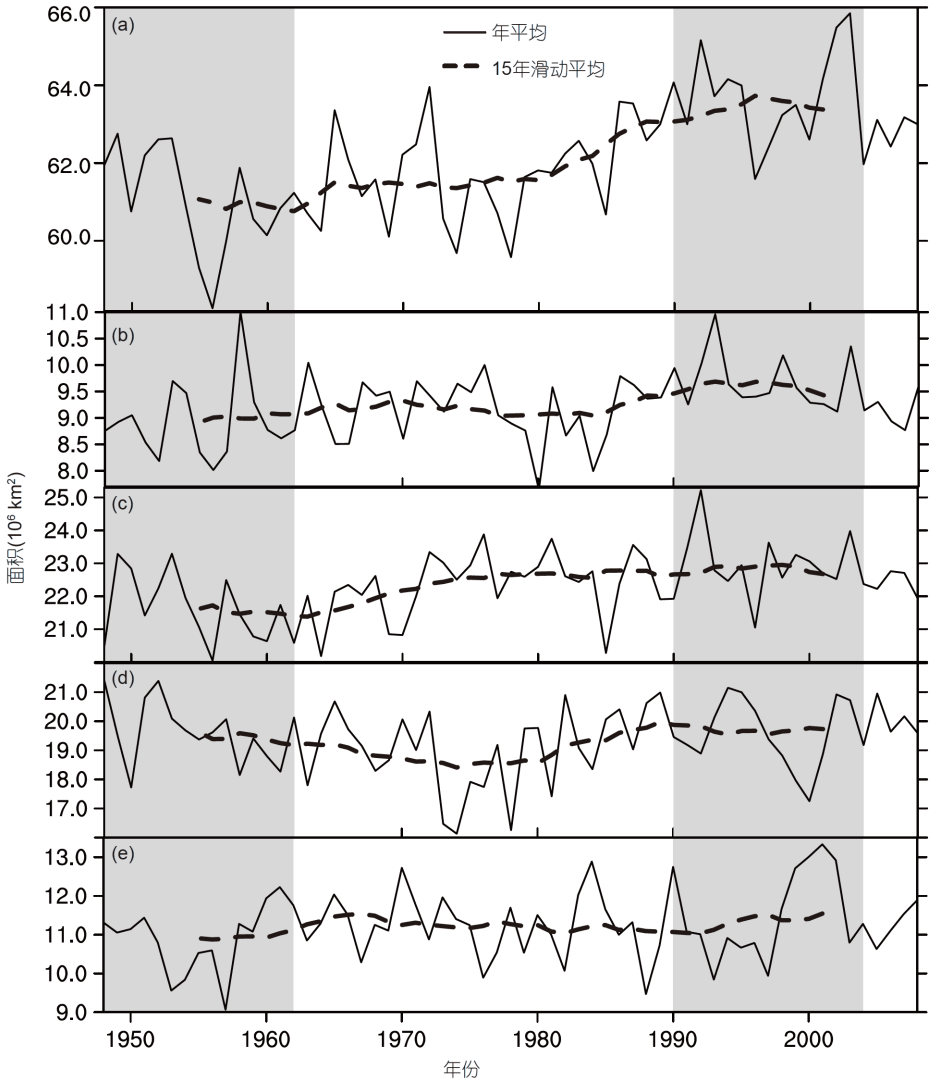


图 2　**1948~2008年总的干旱区(a)、半湿润干旱区(b)、半干旱区(c)、干旱区(d)和极端干旱区(e)面积的时间变化**

虚线为15年滑动平均的结果, 引自Huang等(2016), 单位: 10^6km^2

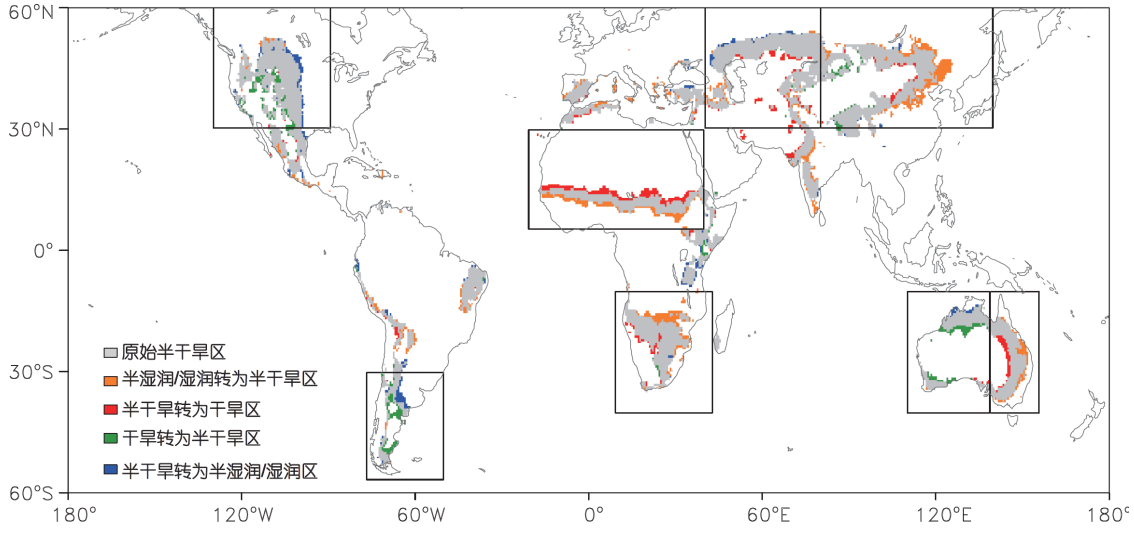


图 3　半干旱地区的全球分布及1990~2004年相对于1948~1962年半干旱区发生气候类型转变的空间分布

引自Huang等(2016)

半干旱地区变得更加潮湿，而亚洲半干旱和半湿润干旱区则变得更加干旱. 此外，这种干旱化趋势在河流流量记录中以及基于观测的帕尔默干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)中都很明显(Dai和Zhao, 2017)，与AI干燥度指数的变化一致. 全球干旱半干旱区面积的增加主要是由非洲、南欧、东亚和澳大利亚东部的干旱化导致的(Dai, 2011a, 2011b, 2013a; Dai和Zhao, 2017; Huang等, 2017c; Fu和Mao, 2017). 这种干旱化趋势很大程度上与太平洋年代际振荡导致的降水量减少和20世纪80年代以来的迅速升温有密切关系(Dai, 2013a; Dai和Zhao, 2017).

2.2　温度变化特征: 强化增温

干旱半干旱区作为全球陆地的特殊组成部分，对全球气候变化有着重要影响. 在全球增温的背景下，过去近百年干旱半干旱区表现出最为显著的增暖；同时，不同干旱半干旱区的气候变化存在显著区域差异. Huang等(2012)的研究表明，1901~2009年间北半球中高纬地区的全年、暖季、冷季增温分别为1.33、0.85和1.89℃，其中欧洲、亚洲和北美中高纬度半干旱区的暖季增温分别为0.95、0.68和1.05℃，北美半干旱区的增温大于亚洲半干旱区. 冷季增温分别为1.41、2.42和1.50℃，亚洲半干旱区的增温大于北美半干旱区，表现出最显著的增温趋势. 进一步量化北半球中高纬度不同干旱半干旱区增温对全球增温的贡献(图4)后发现干旱半干旱区增温对全球增温贡献了近60%. 其中，欧洲、亚洲和北美的干旱半干旱区分别对全球增温贡献了8.76%、5.65%和0.64%，半干旱区分别对全球增温贡献了6.29%、13.81%、6.85%，亚洲半干旱区对全球增温贡献最大(表1).

2.3　典型干旱半干旱区年代际尺度降水变化特征

尽管全球增温的原因还存有争议，但近100年的增温事实已不可否认(IPCC, 2007, 2013). 在全球增温的背景下，作为另一个重要指标，干旱半干旱区降水的变化却表现出较大的区域差异，伴随着全球增暖降水变化特征和机理的研究也得到重视(Lambert和Allen, 2009; Bichet等, 2011; Dong和Dai, 2015). 大量事实表明，过去100年全球干旱半干旱区变得越来越干(Nicholson等, 1998; Nicholson和Grist, 2001; 马柱国和邵丽娟, 2006; Narisma等, 2007). 全球增暖背景下干旱半干旱区的降水变化存在显著的区域差异(马柱国, 2007; Ault和George, 2010; 施雅风等, 2002). 过去的研究在全球和区域降水的变化研究上取得了一系列有意义的进展(Huang等, 2011; Rasmusson和Arkin, 1993; Trenberth, 2011; Gu和Adler, 2013, 2015)，但缺乏对全球不同尺度降水年代际变化的比较研究. 同时，近百年发生在干旱半干旱地区的重大干旱事件多为年代尺度的气候变化，有关年代尺度气候变化的内容已开展了大量富有成效的研究工作(Delworth和Manaba, 1993;

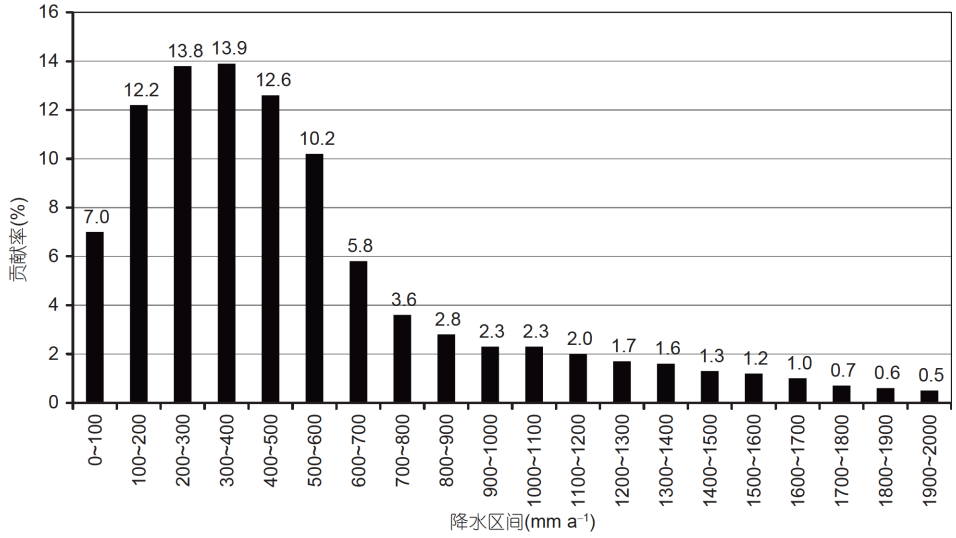


图 4　**1901~2009年冷季不同降水区地表温度趋势对全球温度变化趋势的贡献(%)**

引自Huang等(2012)

表 1　**1901~2009年不同中高纬地区地表温度趋势对全球温度趋势的贡献(%)**[a)]

	欧洲	亚洲	北美
干旱	8.76	5.65	0.64
半干旱	6.29	13.81	6.85
半湿润	3.23	2.48	3.54
湿润	0.73	3.11	2.20

a) 引自Huang等(2012)

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等, 2008), 降水作为年代际尺度干旱形成的主导因子之一, 在干旱半干旱地区年代际尺度气候研究过程中具有重要意义.

图5给出了北美、华北、北非及中亚干旱半干旱区四个典型代表区的年代际振荡、趋势和年代尺度合成降水变化(徐保梁等, 2017), 通过分析其演变特征, 认识全球典型干旱半干旱区的年代际尺度降水演变特征及其区域差异. 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年和1975年转为偏湿的时段. 华北与北美及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他三个区明显不同, 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, 无法揭示两个地区在年代际尺度的特征差异. 如表2所示, 华北的干旱化趋势持续时间最长, 达38年, 其次为北非(34年)、北美(17年); 尽管中亚干旱化持续时间最短, 但在过去60年却出现了两次干旱化趋势. 相对于干旱化, 中亚湿润化的持续时间相对较短, 但出现的频次较多.

2.4　干湿变化特征及区域差异

全球干旱半干旱区自1950年左右开始表现出变干趋势, 历史记录的降水、径流和基于观测的PDSI数据也证明了这种趋势. 全球干旱半干旱区的变干受海洋振荡因子的影响, 由全球增温主导, 并在不同干旱半干旱区表现出不同的时空特征. 从全球角度来看, 东半球陆地整体表现为变干趋势而美洲大陆整体表现为变湿趋势(Greve等, 2014). 符淙斌和马柱国(2008)指出北美大陆在20世纪50年代中后期由干转湿, 而非洲大陆从1979年开始由湿转干, 亚洲地区的干旱起始于1975年. Huang等(2016)将由其他气候区转变而来的新半干旱区和存在多年的半干旱区进行对比, 结果表明降水在东亚半干旱区减少, 但在北美半干旱区增加; PET在东亚半干旱区上升, 但在北美半干旱区下降; AI与降水的结果一致. 这说明东亚半干旱区呈变干趋势, 北美半干旱区呈变湿趋势. Cai等(2012)指出自20世纪

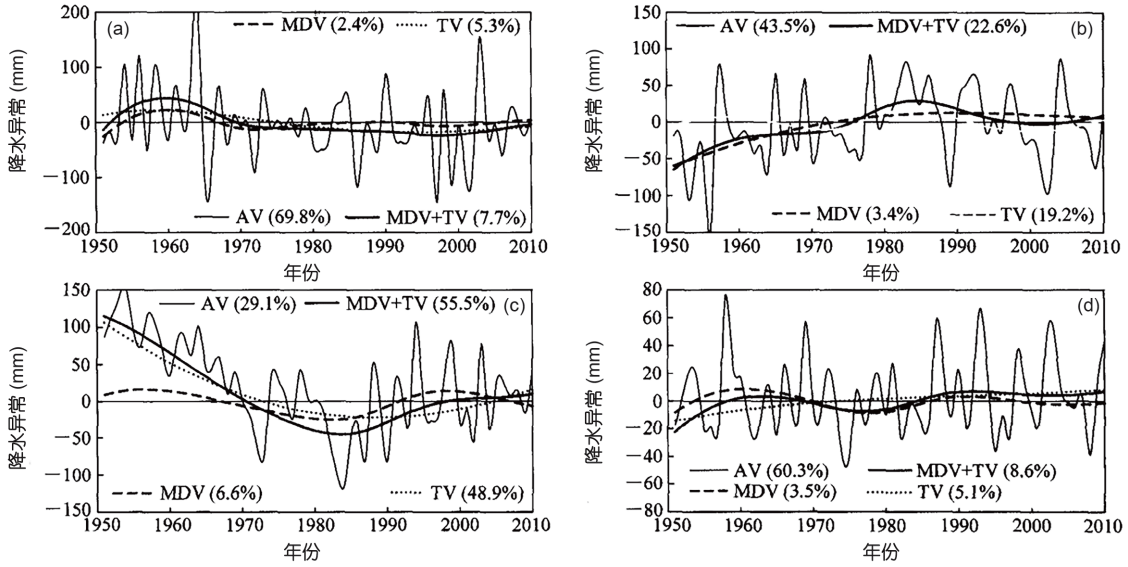


图 5　利用EEMD方法提取的全球四个典型干旱半干旱区平均年降水量的多时间尺度变化特征

(a) 华北, (b) 北美, (c) 北非, (d) 中亚. AV(Annual Variability), 降水的年际变化; MDV(Multi-Decadal Variability), 多年代际变化; TV(Trend Variability), 长期趋势的变化; MDV+TV, 多年代尺度变化, 括号中数字为各分量的方差贡献率, 引自徐保梁等(2017)

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[a)]

		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

a) 引自徐保梁等(2017)

70年代后期开始, 南半球半干旱地区, 如智利南海岸、南非和南澳大利亚, 在秋季表现为变干趋势, 尤其是四月到五月期间变干最为显著.

干旱半干旱区的变干导致了全球干旱区的大幅扩张(Dai, 2011a, 2011b, 2013a; Dai和Zhao, 2017). Huang等(2016)分析了不同气候区的面积变化特征, 发现大部分半干旱区都出现了面积扩张. 比较不同时间段各个半干旱区的面积, 发现与1948~1962年间相比, 1990~2004年间干旱化扩张的程度更为明显. 干旱化扩张的主要原因是湿润、半湿润区向半干旱区的转变, 其中最显著的干旱化扩张出现在东亚, 对全球干旱化扩张贡献了将近50%(图6). 符淙斌和马柱国(2008)指出对于中国西北的东部和华北在20世纪70年代发生明显的由湿转干的年代际转折性变化, 这两个地区和东北东南部呈现出显著的干旱化趋势. 此外, 自20世纪80年代以后, 西北东部、华北和东北地区的极端干旱发生频率明显增加, 其中东北增加的幅度最大. Li等(2015)对中国北方干旱化的研究同样发现中国的半

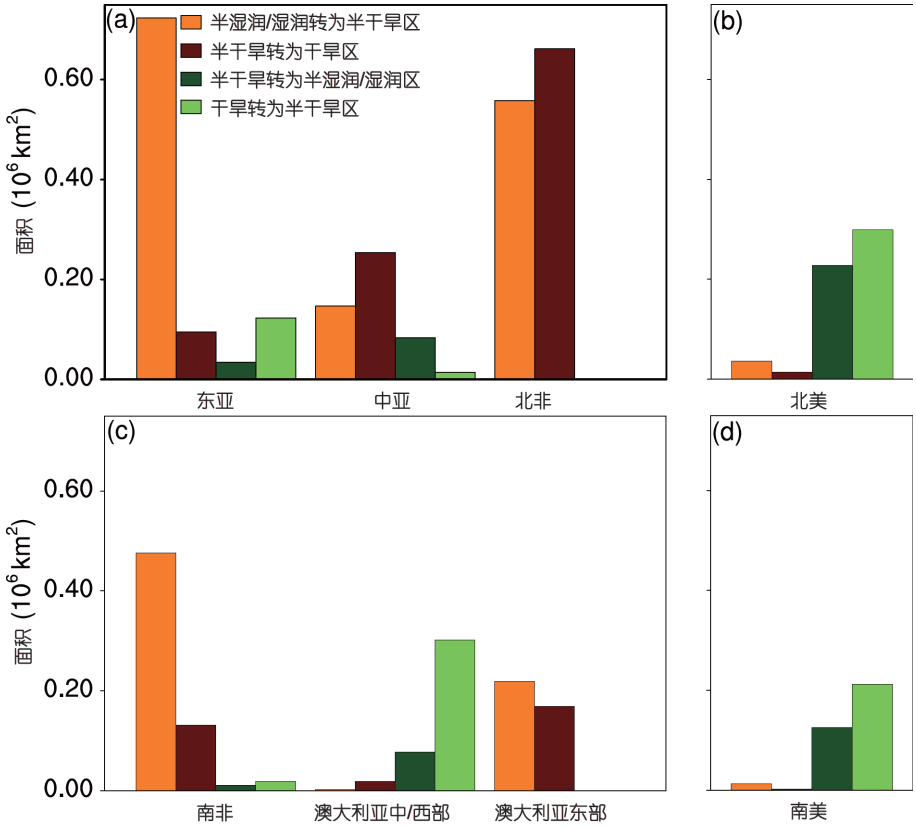


图 6　八个典型区域在1990~2004年与1948~1962年间不同气候区的面积转换

(a) 东亚、中亚及北非, (b) 北美, (c) 南非、澳大利亚中/西部及其东部, (d) 南美. 黄色代表从半湿润/湿润到半干旱, 棕色代表从半干旱到干旱, 深绿色代表从半干旱到半湿润/湿润, 浅绿色代表干旱到半干旱地区, 引自Huang等(2016)

干旱扩张主要出现在黄河中下游、黑龙江省和甘肃省.

3　海洋活动对干旱半干旱气候变化的影响

3.1　海洋振荡因子及海温异常影响干旱半干旱区温度变化

在长期变化趋势的背景下, 干旱半干旱地区具有明显的年代际变化特征. 研究表明, 不同海盆海表温度(SST)的年代际信号会造成大气环流异常, 从而影响到不同地区的气候(Huang等, 2017a), 尤其是温度变化, 海表温度变化会导致其年代际信号加强或者减弱(全球增温速率加快或减缓).

在过去的一百多年里, 由于太平洋年代际振荡(Pacific decadal oscillation, PDO)、北大西洋涛动(North Atlantic oscillation, NAO)、大西洋多年代际振荡(Atlantic multidecadal oscillation, AMO)等振荡指数正负相位的转变, 全球曾出现过两次增温减缓的时期, 分别是1940~1975年以及从20世纪末开始的阶段(Kosaka和Xie, 2013; Huang等, 2017b). 其中, 20世纪末出现的增温减缓引发了广泛关注, Huang等(2017b)对这一现象做了大量研究. 研究表明, 在增温减缓时期的冷季, 北半球陆地对于北半球的降温贡献可达到66%, 其中拥有大面积干旱半干旱区域的欧亚大陆与北美为最主要降温区. Huang等(2017b)利用EEMD分解得出了温度的年代际调制振荡(decadal modulated oscillation, DMO)与温度变化的长期趋势, 如图7所示, 表明温度变化的长期趋势一直持续上升, 而DMO则呈现出振荡的变化特征. 在加速增温期间DMO呈现上升趋势, 上升的DMO与温度的长期上升趋势作用相叠加使得这一时期北半球呈现出迅速升温的现象; 而在增温减缓期间DMO呈现出下降趋势, 抵消了温度的长期上升趋势, 从而造成了全球增温减缓. 此外, Guan等(2015a)利用动力调整法将原始温度变化分解为辐射

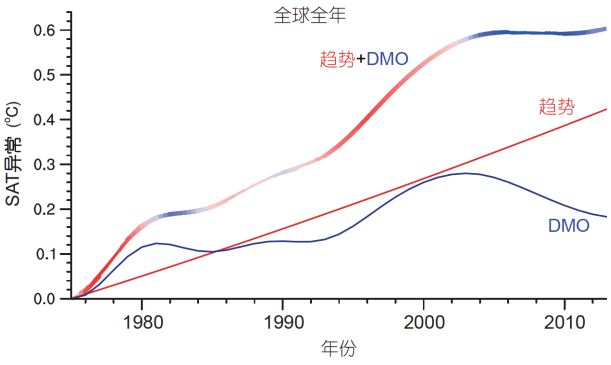


图 7　EEMD分解得出的全球平均温度长期趋势、DMO以及二者之和的时间序列

引自Huang等(2017b)

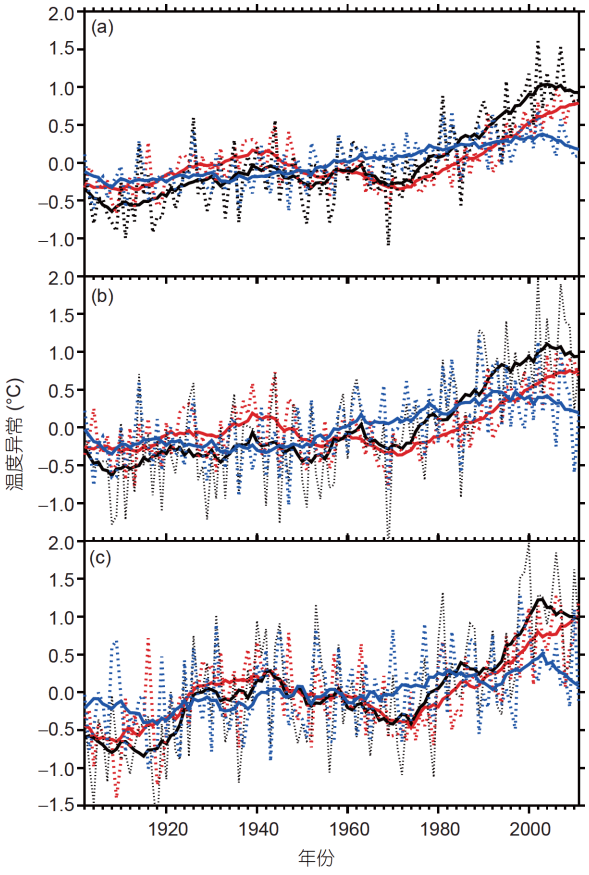


图 8　北半球(a)、欧亚(b)和北美(c)原始温度、动力温度、辐射温度区域平均时间序列

黑线，原始温度；蓝线，动力温度；红色，辐射温度．引自Guan等(2015a)

与动力温度变化，如图8所示，其中辐射温度变化是指由于CO_2排放等人为原因引发的温度变化，动力温度变化则是由气候系统内部变率主导的．在加速增温时期，动力温度呈现出上升的趋势，动力增温与辐射增温相叠加造成这一时期加速增温，而增温减缓是由动力降温抵消辐射增温所致，动力降温主要是由NAO、PDO、AMO的共同作用导致的．Guan等(2015a, 2015b)和Huang等(2017b)的研究均表明年代际信号是造成加速增温和增温减缓阶段性转变的原因．

3.2　海洋振荡因子及海温异常影响干旱半干旱区降水变化

NAO、PDO、AMO等年代际信号通过引起大气环流异常, 进而造成全球增温减缓, 进一步影响干旱半干旱地区降水, 从而导致不同地区的干湿变化. 将SST作为强迫场进行模拟后，发现海洋在萨赫勒地区的半干旱气候变化中扮演极其重要的作用，萨赫勒地区在20世纪70~80年代的严重干旱主要是由于热带大西洋和印度洋的变暖造成的(Giannini等, 2003, 2008; Bader和Latif, 2003; Lu和Delworth, 2005; Hoerling等, 2006, 2010)．针对北美地区的许多研究发现，太平洋与大西洋持续的海温异常通过影响大气环流而强烈影响到美国本土的降水(Ting和Wang, 1997; Dai和Wigley, 2000; Schubert等, 2009; Mo等, 2009; Hu和Feng, 2012; Dai, 2013b; Dong和Dai, 2015), 尤其是太平洋对于美国西部的干旱半干旱区的降水发挥了关键作用，超过一半的美国本土年代际干旱是由PDO与AMO位相变化所致(McCabe等, 2004)．此外，亚洲地区的干旱半干旱区气候变化与PDO联系密切, 在中国北部的半干旱区, PDO的暖相位时期会更易于出现干旱现象(Ma和Fu, 2003, 2006; 马柱国和邵丽娟, 2006; 马柱国, 2007; Qian和Zhou, 2014)．另外，Dai(2013b)计算的原始Niño3.4指数、高通滤波后的Niño3.4指数和年代际太平洋振荡(inter-decadal Pacific oscillation, IPO)指数与全球降水的相关系数，结果显示在陆地上三种相关图反映的空间分布基本一致，且与全球陆地降水的主模态近似，表明海洋振荡因子厄尔尼诺南方涛动(El Niño Southern oscillation, ENSO)(年际)和PDO(年代际)是影响全球陆地降水空间分布格局的主要因素．

已有的试验表明，模式能够很好地再现观测中全球干旱半干旱区降水变化与PDO的关联性(Schubert等, 2009; Dong和Dai, 2015)．徐保梁(2016)利用Niño3.4、PDO和AMO指数构建了降水的多元线性回

归方程, 同时挑选5个典型干旱半干旱区进行降水的时间拟合, 如下所示:

$$\mathrm{Pre}(t) = b_0 + b_1 \times \mathrm{Niño3.4}(t) + b_2 \times \mathrm{AMO}(t) + b_3 \times \mathrm{PDO}(t).$$

Pre代表拟合降水, 结果表明北非降水对SST的响应更为敏感, 其拟合降水与原降水时间序列的相关系数为0.66(图9). 同时1951~1985年北非降水的持续减少主要源于AMO的下降趋势和PDO的上升趋势, 二者造成的降水减少占原降水趋势变化的57%. 1985年以后, 北非降水转为上升趋势, 主要由于AMO的上升趋势和PDO的下降趋势共同作用. 基于多元回归方程的系数及相关统计表3, 发现El Niño(b_1)对北非降水的长期贡献小于AMO(b_2)和PDO(b_3)的贡献. 因此, 对于北非降水的长期趋势变化, AMO与PDO贡献的量值相当但符号相反.

针对华北地区, 虽然降水的拟合曲线通过了F检验, 但是仅有PDO的回归系数(表3中的b_3)通过了显著性检验, 且回归系数b_3(PDO)是b_1(El Niño)和b_2(AMO)的5倍左右. 1961~1985年华北降水呈现减少趋势, 并在20世纪70年代末降水出现负距平, 这主要是源于PDO的下降趋势(图9). 随着20世纪90年代以后PDO由暖向

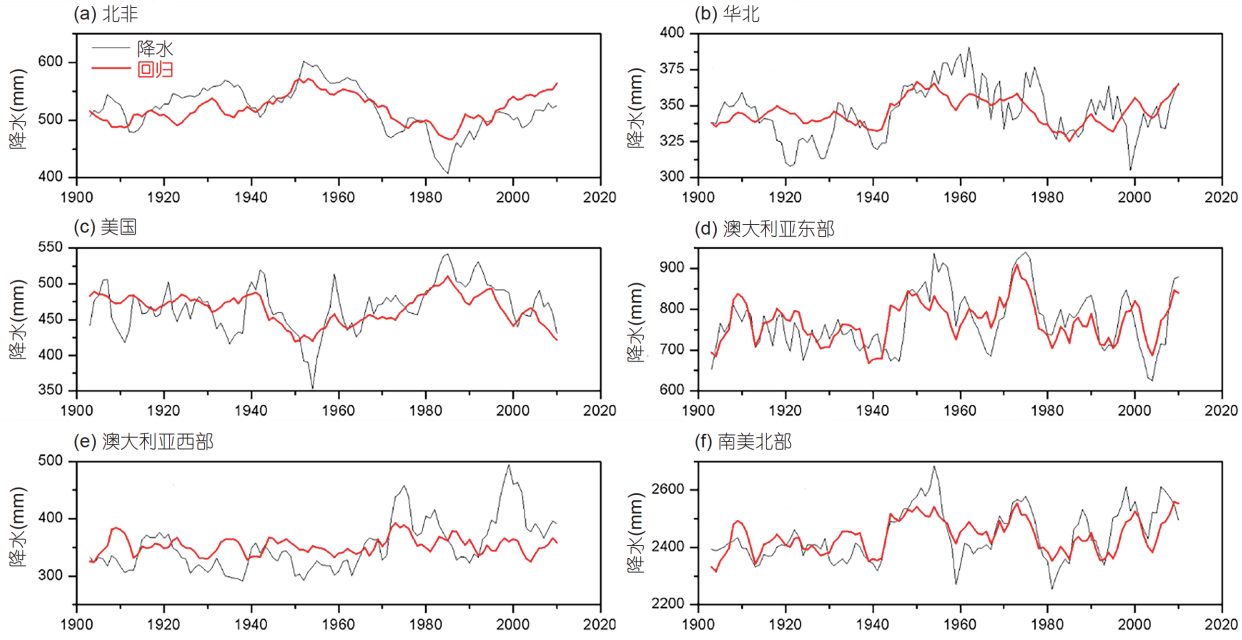


图 9　全球典型地区降水及其拟合降水的时间序列

引自徐保梁(2016)

表 3　多元回归方程的系数(b_0、b_1、b_2、b_3)与相关统计量[a)]

	b_0	b_1	b_2	b_3	R^2	F	MSE
北非	520.3*	18.31*	22.55*	−26.53*	0.44	28.04*	870.28
华北	346.0*	−2.59	2.55	−12.27*	0.27	13.37*	260.22
美国	464.8*	3.79	−10.95*	24.89*	0.36	20.24*	832.96
澳大利亚东部	770.5*	−79.67*	−18.13*	−34.51*	0.46	30.73*	2924.14
澳大利亚西部	352.2*	−35.65*	−9.21	5.09	0.11	4.58*	1779.95
南美北部	2439.7*	−92.90*	9.83	−39.87*	0.44	28.43*	4560.01
南美南部	1432.9*	−2.74	−1.76	9.79	0.01	0.27	6382.14

a) * 表示回归系数与方程通过α=0.05的信度检验, R^2代表相关系数的平方, F代表检验回归方程是否显著, MSE代表均方根误差, 引自徐保梁(2016)

冷的位相转变，华北降水的负距平呈现出弱的上升趋势. 这里需要指出的，虽然北非(Nicholson等, 1998, 2000)与华北的干旱化具有一定的相似性(黄刚, 2006; 严中伟等, 1990; 张庆云和陈烈庭, 1991; 黄荣辉等, 1999)，但主导二者的SST信号明显不同. 北非降水同时受AMO和PDO影响，且二者的贡献相当，而华北降水主要由PDO主导, AMO的影响较弱. 此外, 美国与华北降水对应的回归系数符号相反, 且b_3(PDO)的值远大于b_1(El Niño)和b_2(AMO), 表明美国降水也基本由PDO所主导，AMO的影响次之(表3). 研究也指出PDO暖位相时华北降水减少而美国降水增多，反之亦然(马柱国, 2007; Dai, 2013b). McCabe等(2004)指出PDO和AMO对美国年代际干旱频率的空间和时间方差贡献超过52%. 这些结果表明华北和美国降水主要受PDO所主导.

由于澳大利亚和南美的降水对SST异常信号的响应存在显著区域差异，将其分为东西两部分分别讨论. 相比澳大利亚西部，澳大利亚东部回归降水对原降水的方差贡献更大，达到46%. 同时，El Niño(b_1)对澳大利亚东、西部降水的方差贡献要远大于PDO和AMO的方差贡献(表3). 此外，南美北部拟合的降水对原降水的方差贡献主要来自于El Niño(b_1)和PDO(b_3)，而AMO(b_2)的贡献较弱.

3.3 海洋振荡因子及海温异常影响干旱半干旱区干湿变化

全球海洋是形成全球干湿分布的一个重要强迫源(华丽娟和马柱国, 2009)，同时干旱半干旱区降水稀少、生态脆弱，对全球海洋调节器的响应异常敏感. 众多研究表明海洋活动，尤其在太平洋、大西洋盆地的海温异常会显著影响干旱半干旱区的干湿变化(Ting和Wang, 1997; Ting等, 2011; Zhang和Delworth, 2006; Dai, 2013a; Trenberth和Hurrell, 1994; Trenberth等, 2014). 因不同海盆的年际及年代际尺度SST异常信号可引起相应时间尺度上大气环流异常，从而通过遥相关影响干旱半干旱区干湿变化特征(Trenberth等, 1998). 该部分主要针对太平洋、大西洋海洋振荡因子及海温异常对干旱半干旱区干湿变化的影响进行概述.

作为全球最显著的太平洋年际变化信号，ENSO信号能强迫上层大气环流、激发并维持大气环流异常, 进而引发全球范围的干湿变化现象. 发生在赤道太平洋的El Niño是导致热带干旱发生最关键的影响因素(Hoerling和Kumar, 2003; Coelho和Goddard, 2009; Trenberth等, 2014). 在强El Niño时, 全球发生干旱的陆地范围是弱El Niño时的2倍(Lyon, 2004). 不同的地区和季节，ENSO对全球干旱半干旱区造成的干湿变化强弱程度也存在一定差异(Ropelewski和Halpert, 1987; Dai和Wigley, 2000). 研究发现, 当El Niño出现时, 南非往往会发生干旱；而东非干旱半干旱地区则会在当年末到第二年初多雨；对于东亚地区，由于赤道东太平洋SST升高、哈得莱环流加强，导致太平洋副热带高压增强、位置偏南，夏季风偏弱，暖湿气流北上势力不强、冷空气南下，因此冷暖空气交汇产生的季风雨带在长江中下游地区停滞，造成东亚地区夏季连续多雨和洪涝灾害(黄荣辉, 2006). PDO(Mantua等, 1997; Mantua和Hare, 2002)是一种发生于中北太平洋的类El Niño海温振荡型, 其持续时间在20~30年, 又被称为“年代际El Niño现象”. 一般认为PDO是IPO在北太平洋的部分. 两者作为太平洋的年代际信号同样影响干旱半干旱区的干湿变化，研究指出中国华北地区从20世纪70年代中后期至今发生持续性的干旱，与1976年PDO由冷位相向暖位相的转变密切相关(马柱国和邵丽娟, 2006; 马柱国, 2007). IPO的冷、暖位相分别对应美国中部和西部降水偏少与偏多(Dai, 2013b).

大西洋SST异常对全球气候干湿变化的影响也不容忽视(Sutton和Hodson, 2005; Knight等, 2006; Zhang和Delworth, 2006). 赤道太平洋与大西洋的SST异常都会影响南美洲东南部降水, 但作用的时间尺度不同. 其中, 赤道太平洋主要作用于年际时间尺度上, 而赤道大西洋则作用于年代际或更长的时间尺度. 对应于20世纪AMO的冷位相，南美洲东南部持续变湿(Seager等, 2010). Ting等(2011)指出, AMO处于暖位相时, 大西洋赤道辐合带向北移动，导致非洲萨赫勒西部、赤道北大西洋以及美国中部降水增加，而南非西部、赤道南大西洋以及南美东部降水减少. Yang等(2017)指出当AMO正位相时，东半球大部分地区降水偏多，除去中美洲和南美洲北部外，西半球降水偏少；而在AMO负位相时, 则东半球降水偏少, 西半球降水偏多. 与PDO相比，AMO所造成的全球陆地降水异常的幅度较小，且高影响区主要集中于非洲和南美北部.

Huang等(2016)的研究显示，由于全球变暖，在过

去的60年, 全球干旱半干旱区面积一直在扩张. Dai等(2004)研究发现, 自20世纪70年代以来, 全球极端干旱区面积增加超过一倍, 并且极端湿润地区有所减少, 这主要与20世纪80年代ENSO造成的降水减少以及全球变暖有关. 但在Guan等(2017)的最新研究中发现, 增温减缓时期, 北半球中高纬度地区的长期干旱出现了缓解, 主要包括欧亚与北美的干旱半干旱区. 这一变化主要通过AI来衡量, 在增温减缓期间, 由于温度依然处在高位, 蒸发变化不显著, 但年代际指数相位转变造成的大气环流异常导致了降水的增加, AI也随之增加, 如图10所示. Guan等(2017)进一步利用动力调整法将AI分解为动力诱导的AI(DAI)与辐射强迫的AI(RAI), 分析发现AI的反转是由DAI的下降趋势减缓主导的, DAI的下降趋势减缓同样与NAO、PDO、AMO的相位变化密不可分. 同时Guan等(2017)还指出, 虽然在增温减缓期间北半球中高纬度地区的长期干旱出现了缓解, 但这只是暂时的, 一旦NAO、PDO、AMO相位发生改变, 全球将继续转向加速增温, 现有的变干减缓现象亦会随之消失.

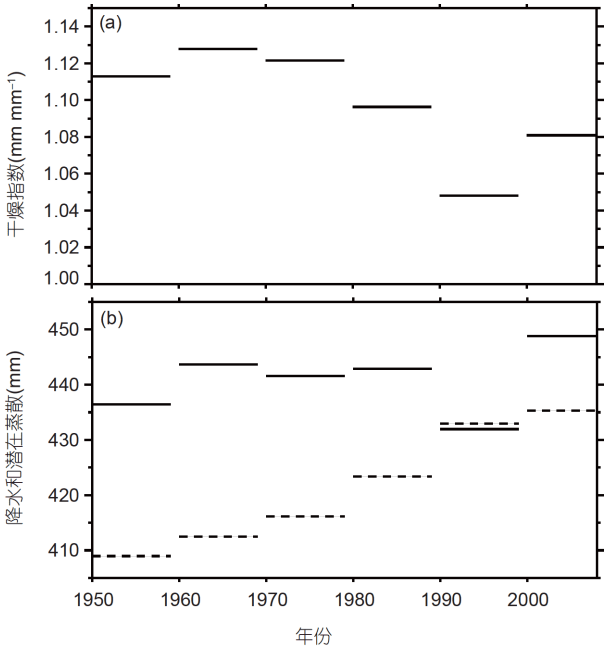


图 10　不同变量的年代际变化

(a) AI; (b) 降水(实线)与潜在蒸发(虚线). 引自Guan等(2017)

4　海洋振荡因子影响干旱半干旱气候变化的机制

相对大气运动而言, 海洋的运动和变化较为缓慢并具有明显的持续性, 它能通过海气相互作用把大气环流变化的异常信号贮存于海洋中, 然后再把这种异常信号传递给大气, 造成环流异常, 进而影响干旱半干旱区气候变化(Wu等, 2007, 2008). 海温异常在年代际降水变化中扮演着重要的角色, 全球不同海盆区域的海温异常通过诱导海陆热力差异以及南北向热力差异发生变化, 从而影响西风急流、行星波, 阻塞高压、亚洲季风(Huang等, 2017a); 同时, 这些异常的大气环流与海温异常相互作用进而影响区域降水、温度等气候因子(Huang等, 2010; Hu等, 2018). 例如, 类ENSO模型的暖位相对中国东南部春季降水的增加和北部降水的减少起着重要的作用(Yang和Lau, 2004). 20世纪的后半期热带海温异常主导了亚洲夏季风的年代际减弱趋势. 当El Niño事件发生时, 赤道中东太平洋出现大范围的海水异常增温现象, 传统的东南信风和赤道洋流大大减弱, 导致全球大气环流形势发生变化. 其中, 最直接的现象就是东南太平洋与印度洋及印尼地区之间的反相气压距平"跷跷板"现象——当东南太平洋上气压变高(低)时, 印度洋及印尼地区气压变低(高), 即南方涛动(Southern oscillation, SO)现象(Halpert和Ropelewski, 1992). 这种气压异常直接导致赤道东、西太平洋的气压梯度减小, 东南信风和赤道洋流减弱, 沃克环流减弱并且上升支东移, 从而影响澳大利亚干旱半干旱区气候变化.

厄尔尼诺消退年的夏季, 印度洋海温异常可以通过"电容器效应"将El Niño的暖信号储存到夏季, 在大气中激发出开尔文波, 造成西北太平洋的反气旋异常, 从而影响东亚夏季风(Xie等, 2009, 2016). Nitta(1986, 1987)和Huang等(2004)发现热带西北太平洋对流活动与东亚夏季降水存在振荡关系, 因此, ENSO信号还可以通过印度洋的"电容器"在夏季激发出遥相关型, 进而通过影响季风摆动而影响中国西北干旱半干旱地区特别是季风边缘区的夏季降水(Huang和Wu, 1989; Huang和Sun, 1992). 此外, 西北太平洋的局地海气反馈机制也能将El Niño信号维持到初夏(Wang等, 2000). 这两种机制并不矛盾, 西北太平洋局地反馈机制在春季存在, 并造成北印度洋海温增暖, 到了夏季北印度洋海温增暖又激发了遥相关异常, 即热带西北太平洋局地反馈过程和印度洋电容器机制是相互联系及反馈

的, 这被称为印太电容器效应(Kosaka和Nakamura, 2006, 2010; Kosaka等, 2009, 2011).

此外, El Niño事件发生时, 赤道中东太平洋SST异常增暖导致该地区对流活动加强, 加之遥相关的作用, 使得北半球中高纬度环流异常, 激发太平洋-北美遥相关型(Pacific/North American, PNA)(Horel和Wallace, 1981; Shukla和Wallace, 1983; 吴仁广和陈烈庭, 1992; Straus和Shukla, 2002). 其中El Niño激发正的PNA环流型, 而La Niña往往对应负的PNA型, 从而对北美地区的气候尤其是其西部干旱半干旱地区的气候产生影响. 当PNA处于正位相时, 在偏强高压脊的影响下, 北美西部干旱半干旱地区的气温显著偏高, 对降水量的影响不大, 但降水偏少的几率要大一些. 反之, La Niña事件发生时, 北美西部干旱半干旱地区的气温偏低, 降水偏多的几率稍大一些.

ENSO与NAO也存在一定联系(Huang等, 1998), 早在1984年, Rogers就指出NAO与SO在准6年时间尺度上通过Rossby波建立联系(Rogers, 1984). Huang等(1998)进一步研究发现NAO与ENSO在准6年时间尺度上的联系并不是稳定不变的, 1910~1960年二者具有较好的关系, 之后这种关系逐渐减弱甚至消失. 在强El Niño事件发生时, 赤道中东太平洋的热源异常通过遥相关在北半球中高纬度激发PNA型的同时, 还会在大西洋地区激发出一个正的NAO型环流异常, 即NAO与ENSO的相关性较好, 进而影响欧洲地区和地中海周边地区包括北非干旱半干旱地区的气候; 弱El Niño事件发生时, NAO与ENSO的相关性则较弱.

Ding等(2009)也指出热带太平洋中部和东部海温与中国长江流域及华南大部分地区降水存在正相关, 与华北降水存在负相关. 作为太平洋主要模态, PDO和IPO对于区域降水影响显著(Trenberth和Hurrell, 1994; Dai, 2013a; 马柱国, 2007; Duan等, 2013). PDO的正负位相也会对干旱半干旱区的降水产生较大影响, 当PDO正位相时, 赤道中东太平洋的暖SST异常会增加从海洋到大气的感热通量, 加热整个热带对流层, 使其出现正的温度异常(图11a). 与此同时, 北半球中纬度的对流层温度会异常变冷, 从而改变北太平洋及周边地区的经向温度梯度. 导致副热带到中纬度地区(15°N~45°N)的经向温度梯度增加, 根据热成风原理,

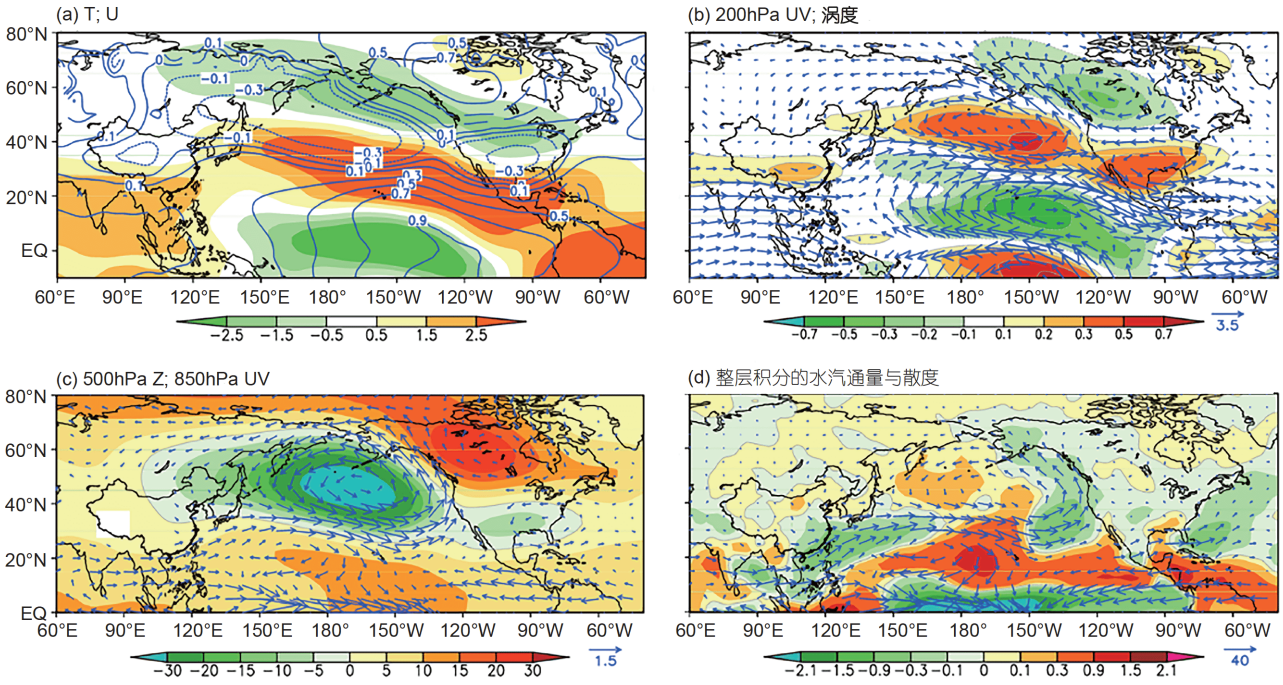


图 11　大气环流对PDO正位相的响应

(a) 对流层温度(200hPa, K, 等值线)与200hPa纬向风(m s^{-1}, 填色), (b) 200hPa风场(m s^{-1}, 矢量)与相对涡度(1×10^{5}, s^{-1}, 填色), (c) 500hPa位势高度(m, 填色)与850hPa风场(m s^{-1}, 矢量), (d) 整层积分的水汽通量(g cm^{-1} s^{-1}, 矢量)与散度(mm day^{-1}, 填色), 引自Yang等(2017)

该地区的西风增强; 而热带和高纬度的经向温度梯度减弱, 相应的出现东风异常. 这种风场异常使得北太平洋对流层上层出现“南负北正”的涡度切变, 即在北太平洋北部出现异常的气旋, 而在北太平洋南部出现异常的反气旋(图11b). 由此造成, 阿留申低压增强, 副高亦增加(图11c). 相对应的对流层底层, 北太平洋北部出现了一个大范围的气旋性风场, 西北太平洋出现了一个反气旋性风场. 长江以南地区出现异常的西南风, 华北地区则出现异常的西北风. 这种异常风场会削弱东亚夏季风, 阻止热带水汽和雨带的向北推进(图11d), 使得中国华北地区降水减少, 而降水更多的集中在长江以南地区, 中国东部出现“南涝北旱”. Huang等(2016)也指出东半球的变干趋势与东亚夏季风减弱相关. 当PDO负位相时, 大气环流的响应则反向, 中国东部出现“南旱北涝”.

此外, 作为大西洋海温的多年代际变化, AMO通过遥相关波列调制PDO影响中国东部降水的年代际变化(Si和Ding, 2016), Zhu等(2016)表明当PDO处于暖位相而AMO处于冷位相时, 长江下游地区降水为正异常, 反之亦然. Yang等(2017)利用年代际海温影响气候变化的数值模式发现, 当PDO处于中性模态, 且AMO处于暖位相时(图12a), 将激发出一个向东传播的波列, 北太平洋出现异常高压, 即阿留申低压被减弱, 相应的副高减弱. 对流层低层太平洋北部出现反气旋性异常, 导致华北地区出现异常的西南风, 而长江以南出现异常东风, 这种异常风场会加强东亚季风, 中国东部出现“南旱北涝”, 反之亦然. 相比之下, AMO暖位相诱导的异常高压强度(图12a)大约是PDO冷位相诱导异常高压强度的一半(Yang等, 2017), 表明大气环流对于AMO和PDO同位相的响应正好相反, 但大气环流对AMO响应的强度更弱一些, 这与Zhu等(2016)的结果一致. 此外, Si和Ding(2016)指出AMO暖(冷)位相时将通过一个北半球的静止斜压波列, 即从北大西洋到欧亚大陆, 并延伸至北美的遥相关波列, 引起中纬度太平洋西部和热带太平洋中部的海温暖(冷)异常, 诱导黄河流域位势高度场正(负)异常以及长江流域高度场

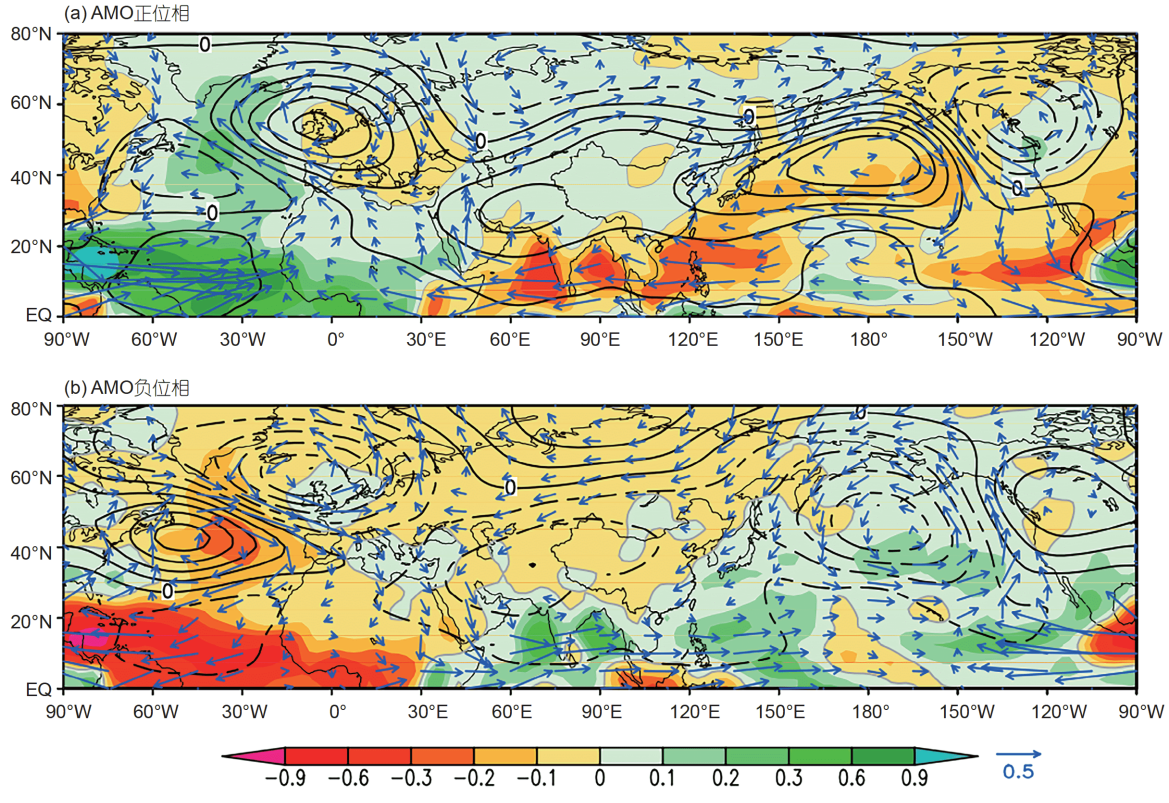


图 12　大气环流对AMO(a)正位相与(b)负位相的响应

降水(mm day^{-1}, 填色), 500hPa位势高度(m, 黑色等值线)与850hPa风场(m s^{-1}, 蓝色矢量), 引自Yang等(2017)

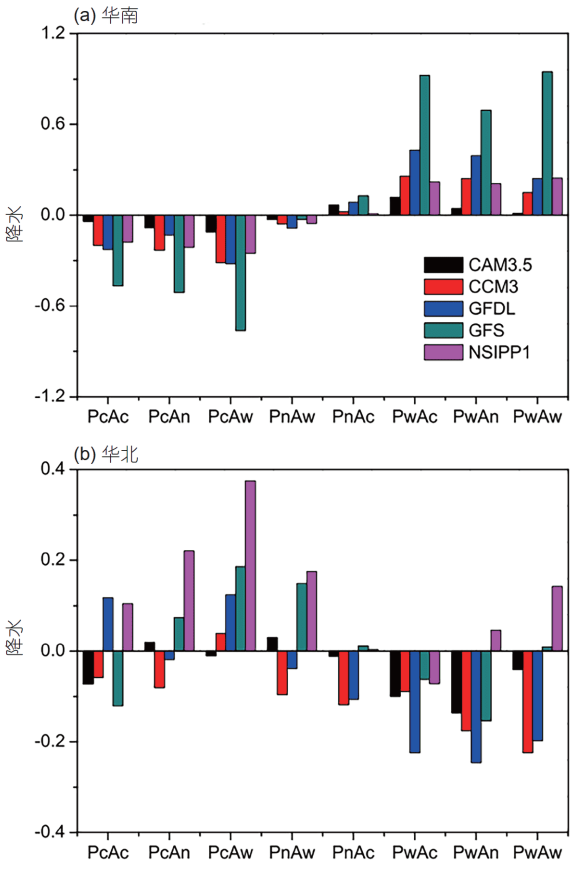


图 13　所有5个参与的AGCMS在八个试验中华南(a)和华北(b)平均年降水相对于控制实验(PnAn)的差异

Pc/Pw分别代表PDO的冷/暖异常; Ac/Aw分别代表AMO的冷/暖异常; Pn/An分别代表PDO和AMO的中性异常, 引自Yang等(2017)

负(正)异常, 最终这些异常的大气环流场引起华北地区降水正(负)异常和华南地区降水负(正)异常. 根据图13a的数值模拟结果表明, 当AMO处于中性模态下, PDO冷位相下长江以南降水减少0.24mm day^{-1}, 且PDO暖位相时长江以南降水增加0.31mm day^{-1}. 反过来, 当PDO处于中性条件下, AMO暖位相时长江以南降水减少0.04mm day^{-1}, 但AMO冷位相长江以南降水增加0.07mm day^{-1}. 因此, 长江以南降水对于AMO暖(冷)位相的响应强度约为PDO冷(暖)位相贡献的1/5. 表明降水对于AMO和PDO的响应是相反的, 说明PDO主导长江以南降水变化, AMO的贡献相对较小. 此外, AMO和PDO不同位相组合将影响中国东部年代际降水的分布格局(图13), 即当PDO处于暖位相时, "南涝北旱"格局形成, 这时, 若AMO与PDO反位相会加强这种格局, 而AMO与PDO同位相则会起到削弱作用(Yang等, 2017).

5　总结

综上所述, 干旱半干旱区气候变化在全球变化中的作用不可忽视, 全球增温背景下, 干旱半干旱区面积扩张显著, 极端干旱事件频发. 在近百年的气候变化过程中, 半干旱区呈现出显著的强化增温和干旱化过程, 并存在突出的空间差异性, 导致局地环境恶化. 对此, 海洋作为地球系统的主要组成部分, 对干旱半干旱区气候变化的影响主要体现在年代际尺度上的温度、降水、干湿的变化特征中. 不同海域盆地的海温异常会显著影响干旱半干旱区的气候变化, 海洋振荡因子通过不同的位相转变使年代际调制振荡处于上升或下降趋势, 叠加在温度的长期上升趋势上, 从而使干旱半干旱区温度出现加速增温或增温减缓的年代际变化特征. 同时, ENSO、PDO、AMO和NAO等海洋振荡因子通过不同的位相转变使海陆热力差发生变化, 引起大气环流异常, 造成全球温度变化, 进而影响干旱半干旱区降水及干湿变化.

针对海洋对干旱半干旱区气候变化的影响问题, 已开展了上述的大量研究, 取得了一系列进展, 但缺乏对全球不同尺度温度、降水、干湿年代际变化的比较研究, 对区域间的关联性和差异性的认识还不够深入. 此外, 针对不同海域如何相互作用影响干旱半干旱区气候变化的研究相对较少, 目前尚不能定量区分不同海洋振荡因子在干旱半干旱区气候演变中的相对贡献及其响应过程. 同时对于海气相互作用影响干旱半干旱区气候演变机理的认识不够深入, 未来需结合多种观测资料和数值模拟对其进行全面系统的机理性研究. 气候变暖和干旱加剧将增加发生荒漠化的风险, 而在未来情景中干旱半干旱区的气候变化也存在突出的不确定性. 所以, 未来需进一步深入研究海洋对干旱半干旱区气候变化及生态环境的影响, 加深干旱半干旱气候演变机理的认识, 为预测未来干旱半干旱气候变化和预防荒漠化加剧提供可靠的科学依据.

参考文献

符淙斌, 黄燕. 1996. 亚洲的全球变化问题. 气候与环境研究, 1: 97–

112
符淙斌, 马柱国. 2008. 全球变化与区域干旱化. 大气科学, 32: 752–760
黄刚. 2006. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象. 气候与环境研究, 11: 28–37
黄荣辉. 2006. 我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究. 地球科学进展, 21: 565–575
黄荣辉, 韦志刚, 李锁锁, 周连童. 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. 气候与环境研究, 11: 245–258
黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势. 高原气象, 18: 465–476
华丽娟, 马柱国. 2009. 亚洲和北美干湿变化及其与海表温度异常的关系. 地球物理学报, 52: 1184–1196
李崇银, 朱锦红, 孙照渤. 2002. 年代际气候变化研究. 气候与环境研究, 7: 209–219
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. 科学通报, 52: 1199–1206
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. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 222–233
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. 大气科学, 30: 464–474
施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景的初步探讨. 冰川冻土, 24: 219–226
王绍武, 朱锦红. 1999. 国外关于年代际气候变率的研究. 气象学报, 57: 376–384
吴仁广, 陈烈庭. 1992. PNA流型的年际变化及温热带太平洋海温的作用. 大气科学, 16: 583–591
徐保梁. 2016. 全球及区域陆地降水的多时间尺度变化特征及其与海温的联系. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学
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. 大气科学, 41: 593–602
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. 中国科学B辑, 1: 97–103
张庆云, 陈烈庭. 1991. 近30年来中国气候的干湿变化. 大气科学, 15: 72–81
Armah F A, Odoi J O, Yengoh G T, Obiri S, Yawson D O, Afrifa E K A. 2010. Food security and climate change in drought-sensitive savanna zones of Ghana. Mitig Adapt Strateg Glob Change, 16: 291–306
Ault T R, George S S. 2010. The magnitude of decadal and multidecadal variability in North American precipitation. J Clim, 23: 842–850
Bader J, Latif M. 2003. The impact of decadal-scale Indian ocean sea surface temperature anomalies on Sahelian rainfall and the North Atlantic oscillation. Geophys Res Lett, 30: 2169
Bichet A, Wild M, Folini D, Schär C. 2011. Global precipitation response to changing forcings since 1870. Atmos Chem Phys, 11: 9961–9970
Cai W J, Cowan T, Thatcher M. 2012. Rainfall reductions over Southern Hemisphere semi-arid regions: The role of subtropical dry zone expansion. Sci Rep, 2: 702
Coelho C A S, Goddard L. 2009. El Niño-induced tropical droughts in climate change projections. J Clim, 22: 6456–6476
Dai A G. 2011a. Drought under global warming: A review. Wires Clim Change, 2: 45–65
Dai A G. 2011b. Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900–2008. J Geophys Res, 116: D12115
Dai A G. 2013a. Increasing drought under global warming in observations and models. Nat Clim Change, 3: 52–58
Dai A G. 2013b. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923–2010. Clim Dyn, 41: 633–646
Dai A G, Trenberth K E, Qian T. 2004. A global dataset of Palmer drought severity index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. J Hydrometeorol, 5: 1117–1130
Dai A G, Wigley T M L. 2000. Global patterns of ENSO-induced precipitation. Geophys Res Lett, 27: 1283–1286
Dai A G, Zhao T B. 2017. Uncertainties in historical changes and future projections of drought, Part I: Estimates of historical drought changes. Clim Change, 144: 519–533
Delworth T, Manaba S. 1993. Climate variability and land-surface processes. Adv Water Resour, 16: 3–20
Ding Y, Sun Y, Wang Z, Zhu Y, Song Y. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon Part II: Possible causes. Int J Climatol, 29: 1926–1944
Dong B, Dai A G. 2015. The influence of the interdecadal Pacific oscillation on temperature and precipitation over the globe. Clim Dyn, 45: 2667–2681
Duan W, Song L, Li Y, Mao J. 2013. Modulation of PDO on the predictability of the interannual variability of early summer rainfall over south China. J Geophys Res-Atmos, 118: 13008–13021
Feng S, Fu Q. 2013. Expansion of global drylands under a warming climate. Atmos Chem Phys, 13: 10081–10094
Fu C B, Jiang Z H, Guan Z Y, He J H, Xu Z F. 2008. Climate of China and East Asian Monsoon. Berlin: Springer-Verlag. 1–48
Fu C B, Mao H T. 2017. Aridity Trend in Northern China. Singapore: World Scientific
GLP. 2005. Global Land Project: Science Plan and Implementation Strategy. IGBP (International Geosphere Biosphere Program)

Report No. 53. In: International Human Dimensions Programme Report No. 19. Stockholm: IGBP Secretariat

Giannini A, Saravanan R, Chang P. 2003. Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. Science, 302: 1027–1030

Giannini A, Biasutti M, Verstraete M M. 2008. A climate model-based review of drought in the Sahel: Desertification, the re-greening and climate change. Glob Planet Change, 64: 119–128

Greve P, Orlowsky B, Mueller B, Sheffield J, Reichstein M, Seneviratne S I. 2014. Global assessment of trends in wetting and drying over land. Nat Geosci, 7: 716–721

Gu G J, Adler R F. 2013. Interdecadal variability/long-term changes in global precipitation patterns during the past three decades: Global warming and/or pacific decadal variability? Clim Dyn, 40: 3009–3022

Gu G, Adler R F. 2015. Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901–2010. J Clim, 28: 4431–4453

Guan X D, Huang J P, Guo R X, Yu H P, Lin P, Zhang Y T. 2015a. The role of dynamically induced variability in the recent warming trend slowdown over the Northern Hemisphere. Sci Rep, 5: 12669

Guan X D, Huang J P, Guo R X, Yu H, Lin P, Zhang Y. 2015b. Role of radiatively forced temperature changes in enhanced semi-arid warming in the cold season over east Asia. Atmos Chem Phys, 15: 13777–13786

Guan X, Huang J, Guo R. 2017. Changes in aridity in response to the global warming hiatus. J Meteorol Res, 31: 117–125

Hulme M. 1996. Recent climatic change in the world's drylands. Geophys Res Lett, 23: 61–64

Halpert M S, Ropelewski C F. 1992. Surface-temperature patterns associated with the southern oscillation. J Clim, 5: 577–593

Hoerling M, Hurrell J, Eischeid J, Phillips A. 2006. Detection and attribution of twentieth-century northern and southern African rainfall change. J Clim, 19: 3989–4008

Hoerling M, Eischeid J, Perlwitz J. 2010. Regional precipitation trends: Distinguishing natural variability from anthropogenic forcing. J Clim, 23: 2131–2145

Hoerling M, Kumar A. 2003. The perfect ocean for drought. Science, 299: 691–694

Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation. Mon Weather Rev, 109: 813–829

Hu K M, Huang G, Wu R G, Wang L. 2018. Structure and dynamics of a wave train along the wintertime Asian jet and its impact on East Asian climate. Clim Dyn, 51: 4123–4137

Hu Q, Feng S. 2012. AMO- and ENSO-driven summertime circulation and precipitation variations in North America. J Clim, 25: 6477–6495

Huang G, Hu K, Xie S P. 2010. Strengthening of tropical Indian Ocean teleconnection to the Northwest Pacific since the Mid-1970s: An atmospheric GCM study. J Clim, 23: 5294–5304

Huang G, Liu Y, Huang R. 2011. The interannual variability of summer rainfall in the arid and semiarid regions of Northern China and its association with the northern hemisphere circumglobal teleconnection. Adv Atmos Sci, 28: 257–268

Huang J P, Guan X D, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. Atmos Chem Phys, 12: 5391–5398

Huang J P, Ji M X, Xie Y K, Wang S S, He Y L, Ran J J. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. Clim Dyn, 46: 1131–1150

Huang J P, Li Y, Fu C B, Chen F H, Fu Q, Dai A, Shinoda M, Ma Z, Guo W, Li Z, Zhang L, Liu Y, Yu H, He Y, Xie Y, Guan X, Ji M, Lin L, Wang S, Yan H, Wang G. 2017a. Dryland climate change: Recent progress and challenges. Rev Geophys, 55: 719–778

Huang J P, Xie Y K, Guan X D, Li D D, Ji F. 2017b. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere. Clim Dyn, 48: 429–446

Huang J P, Yu H P, Dai A, Wei Y, Kang L T. 2017c. Drylands face potential threat under 2°C global warming target. Nat Clim Change, 7: 417–422

Huang J P, Higuchi K, Shabbar A. 1998. The relationship between the North Atlantic oscillation and El Niño-Southern oscillation. Geophys Res Lett, 25: 2707–2710

Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism. Adv Atmos Sci, 6: 21–32

Huang R H, Sun F. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian Summer Monsoon. J Meteorol Soc Jpn, 70: 243–256

Huang R H, Chen W, Yang B L, Renhe Z. 2004. Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoons and ENSO cycle. Adv Atmos Sci, 21: 407–424

IPCC. 2007. Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

IPCC. 2013. Climate Change. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change

Knight J R, Folland C K, Scaife A A. 2006. Climate impacts of the Atlantic multidecadal oscillation. Geophys Res Lett, 33: L17706

Kosaka Y, Nakamura H. 2006. Structure and dynamics of the summertime Pacific-Japan teleconnection pattern. Q J R Meteorol Soc, 132: 2009–2030

Kosaka Y, Nakamura H. 2010. Mechanisms of meridional teleconnec-

tion observed between a summer monsoon system and a subtropical anticyclone. Part I: The Pacific-Japan pattern. J Clim, 23: 5085–5108

Kosaka Y, Nakamura H, Watanabe M, Kimoto M. 2009. Analysis on the dynamics of a wave-like teleconnection pattern along the summertime Asian jet based on a reanalysis dataset and climate model simulations. J Meteorol Soc Jpn, 87: 561–580

Kosaka Y, Xie S P, Nakamura H. 2011. Dynamics of interannual variability in summer precipitation over East Asia. J Clim, 24: 5435–5453

Kosaka Y, Xie S P. 2013. Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. Nature, 501: 403–407

Lambert F H, Allen M R. 2009. Are Changes in global precipitation constrained by the tropospheric energy budget? J Clim, 22: 499–517

Li J W, Liu Z F, He C, Tu W, Sun Z X. 2016. Are the drylands in northern china sustainable? A perspective from ecological footprint dynamics from 1990 to 2010. Sci Total Environ, 553: 223–231

Li Y, Huang J, Ji M, Ran J. 2015. Dryland expansion in Northern China from 1948 to 2008. Adv Atmos Sci, 32: 870–876

Lu J, Delworth T L. 2005. Oceanic forcing of the late 20th century Sahel drought. Geophys Res Lett, 32: L22706

Lyon B. 2004. The strength of El Niño and the spatial extent of tropical drought. Geophys Res Lett, 31: L21204

Ma Z G, Fu C B. 2003. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of Northern China. Global Planet Change, 37: 189–200

Ma Z, Fu C. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004. Chin Sci Bull, 51: 2913–2925

Maestre F T, Escolar C, de Guevara M L, Quero J L, Lázaro R, Delgado-Baquerizo M, Ochoa V, Berdugo M, Gozalo B, Gallardo A. 2013. Changes in biocrust cover drive carbon cycle responses to climate change in drylands. Glob Change Biol, 19: 3835–3847

Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, Wallace J M, Francis R C. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. Bull Amer Meteorol Soc, 78: 1069–1079

Mantua N J, Hare S R. 2002. The Pacific decadal oscillation. J Oceanogr, 58: 35–44

McCabe G J, Palecki M A, Betancourt J L. 2004. Pacific and Atlantic Ocean influences on multidecadal drought frequency in the United States. Proc Natl Acad Sci USA, 101: 4136–4141

Mo K C, Schemm J K E, Yoo S H. 2009. Influence of ENSO and the Atlantic multidecadal oscillation on drought over the United States. J Clim, 22: 5962–5982

Narisma G T, Foley J A, Licker R, Ramankutty N. 2007. Abrupt changes in rainfall during the twentieth century. Geophys Res Lett, 34: L06710

Nicholson S E, Tucker C J, Ba M B. 1998. Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. Bull Amer Meteorol Soc, 79: 815–829

Nicholson S E, Some B, Kone B. 2000. An analysis of recent rainfall conditions in West Africa, including the rainy seasons of the 1997 El Niño and the 1998 La Niña years. J Clim, 13: 2628–2640

Nicholson S E, Grist J P. 2001. A conceptual model for understanding rainfall variability in the West African Sahel on interannual and interdecadal timescales. Int J Climatol, 21: 1733–1757

Nitta T. 1986. Long-term variations of cloud amount in the western Pacific region. J Meteorol Soc Jpn, 64: 373–390

Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation. J Meteorol Soc Jpn, 65: 373–390

Rietkerk M, Dekker S C, de Ruiter P C, van de Koppel J. 2004. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems. Science, 305: 1926–1929

Qian C, Zhou T J. 2014. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900–2010. J Clim, 27: 1210–1222

Rasmusson E M, Arkin P A. 1993. A global view of large-scale precipitation variability. J Clim, 6: 1495–1522

Reynolds J F, Smith D M S, Lambin E F, Turner B L, Mortimore M, Batterbury S P J, Downing T E, Dowlatabadi H, Fernández R J, Herrick J E, Huber-Sannwald E, Jiang H, Leemans R, Lynam T, Maestre F T, Ayarza M, Walker B. 2007. Global desertification: Building a science for dryland development. Science, 316: 847–851

Rogers J C. 1984. The association between the North Atlantic oscillation and the Southern oscillation in the Northern hemisphere. Mon Weather Rev, 112: 1999–2015

Ropelewski C F, Halpert M S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern oscillation. Mon Weather Rev, 115: 1606–1626

Scheffer M, Carpenter S, Foley J A, Folke C, Walker B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. Nature, 413: 591–596

Schubert S, Gutzler D, Wang H, Dai A, Delworth T, Deser C, Findell K, Fu R, Higgins W, Hoerling M, Kirtman B, Koster R, Kumar A, Legler D, Lettenmaier D, Lyon B, Magana V, Mo K, Nigam S, Pegion P, Phillips A, Pulwarty R, Rind D, Ruiz-Barradas A, Schemm J, Seager R, Stewart R, Suarez M, Syktus J, Ting M, Wang C, Weaver S, Zeng N. 2009. A US CLIVAR project to assess and compare the responses of global climate models to drought-related SST forcing patterns: Overview and results. J Clim, 22: 5251–5272

Seager R, Naik N, Baethgen W, Robertson A, Kushnir Y, Nakamura J, Jurburg S. 2010. Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in Southeast South America

over the past century. J Clim, 23: 5517–5539

Shukla J, Wallace J M. 1983. Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies. J Atmos Sci, 40: 1613–1630

Si D, Ding Y. 2016. Oceanic forcings of the interdecadal variability in East Asian summer rainfall. J Clim, 29: 7633–7649

Spinoni J, Vogt J, Naumann G, Carrao H, Barbosa P. 2015. Towards identifying areas at climatological risk of desertification using the Köppen-Geiger classification and FAO aridity index. Int J Climatol, 35: 2210–2222

Straus D M, Shukla J. 2002. Does ENSO force the PNA? J Clim, 15: 2340–2358

Sutton R T, Hodson D L R. 2005. Atlantic Ocean forcing of North American and European summer climate. Science, 309: 115–118

Ting M, Wang H. 1997. Summertime U.S. precipitation variability and its relation to Pacific Sea surface temperature. J Clim, 10: 1853–1873

Ting M F, Kushnir Y, Seager R, Li C H. 2011. Robust features of Atlantic multi-decadal variability and its climate impacts. Geophys Res Lett, 38: L17705

Trenberth K. 2011. Changes in precipitation with climate change. Clim Res, 47: 123–138

Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, Kumar A, Lau N C, Ropelewski C. 1998. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. J Geophys Res, 103: 14291–14324

Trenberth K E, Dai A, van der Schrier G, Jones P D, Barichivich J, Briffa K R, Sheffield J. 2014. Global warming and changes in drought. Nat Clim Change, 4: 17–22

Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. Clim Dyn, 9: 303–319

White R P, Nackoney J. 2003. Drylands, People and Ecosystem Goods and Services. Washington: World Resources Institute

Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? J Clim, 13: 1517–1536

Wang L, Huang G, Chen W, Zhou W, Wang W Q. 2018. Wet-to-dry shift over Southwest China in 1994 tied to the warming of tropical warm pool. Clim Dyn, 51: 3111–3123

Wu G X, Liu Y M, Wang T M, Wan R J, Liu X, Li W P, Wang Z Z, Zhang Q, Duan A M, Liang X Y. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian climate. J Hydrometeorol, 8: 770–789

Wu G X, Liu Y M, Yu J J, Zhu X Y, Ren R C. 2008. Modulation of land-sea distribution on air-sea interaction and formation of subtropical anticyclones. Chin J Atmos Sci, 32: 720–740

Xie S P, Hu K, Hafner J, Tokinaga H, Du Y, Huang G, Sampe T. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño. J Clim, 22: 730–747

Xie S P, Kosaka Y, Du Y, Hu K, Chowdary J S, Huang G. 2016. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: A review. Adv Atmos Sci, 33: 411–432

Yang F, Lau K M. 2004. Trend and variability of China precipitation in spring and summer: Linkage to sea-surface temperatures. Int J Climatol, 24: 1625–1644

Yang Q, Ma Z G, Fan X G, Yang Z L, Xu Z F, Wu P L. 2017. Decadal modulation of precipitation patterns over Eastern China by sea surface temperature anomalies. J Clim, 30: 7017–7033

Zhang R, Delworth T L. 2006. Impact of Atlantic multidecadal oscillations on India/Sahel rainfall and Atlantic hurricanes. Geophys Res Lett, 33: L17712

Zhou L, Chen H, Hua W, Dai Y, Wei N. 2016. Mechanisms for stronger warming over drier ecoregions observed since 1979. Clim Dyn, 47: 2955–2974

Zhu Y L, Wang T, Ma J H. 2016. Influence of internal decadal variability on the summer rainfall in Eastern China as simulated by CCSM4. Adv Atmos Sci, 33: 706–714

(责任编委: 陈文)