

马柱国, 符淙斌, 杨庆, 等. 2018. 关于我国北方干旱化及其转折性变化 [J]. 大气科学, 42 (4): 951–961. Ma Zhuguo, Fu Congbin, Yang Qing, et al. 2018. Drying trend in northern China and its shift during 1951–2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (4): 951–961, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.18110.

关于我国北方干旱化及其转折性变化

马柱国^{1,2} 符淙斌^{1,2,3} 杨庆¹ 郑子彦¹ 吕美霞¹ 李明星¹
段亚雯^{1,2} 陈亮¹

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

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 南京大学, 南京 210023

摘 要 过去半个世纪, 中国经历了北方的“西湿东干”和东部的“南涝北旱”的降水分布格局。近十几年来, 这种降水长期变化的分布格局是维持还是发生了变化? 针对这个问题, 本文基于年降水观测数据、自校正的帕尔默干旱指数 scPDSI、地表湿润指数 SWI 及 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 卫星数据反演的陆地水储量 (TWS) 对中国区域干旱化问题进行了再分析。结果表明, 近 16 年 (2001~2016 年), 中国东部地区 (100°E 以东) “南涝北旱”的格局正在发生显著的变化, 长江上中游及江淮流域已转为显著的干旱化趋势, 而华北地区的降水已转为增加趋势, 东部“南旱北涝”的格局基本形成; 北方过去的“西湿东干”也转变为“西干东湿”的空间分布特征。显然, 中国区域的降水格局在 2001 年后发生了明显的年代尺度转折性变化, 两种常用干旱指数 scPDSI 和 SWI 的分析也证明了这一点。但 GRACE 的陆地水储量 (TWS) 的分析却显示, 最近 16 年来, 中国东部“南涝北旱”的格局仍未发生变化, 北方大部分地区仍然处于干旱化的时段, 且有加剧的趋势, 其原因有待于进一步研究。

关键词 降水 干旱化 陆地水储量 (TWS) 南涝北旱 转折性变化

文章编号 1006-9895(2018)04-0951-11

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1802.18110

Drying Trend in Northern China and Its Shift during 1951–2016

MA Zhuguo^{1,2}, FU Congbin^{1,2,3}, YANG Qing¹, ZHENG Ziyang¹, LÜ Meixia¹, LI Mingxing¹,
DUAN Yawen¹, and CHEN Liang¹

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Nanjing University, Nanjing 210023

Abstract There are significant changes in precipitation over China under global warming. During 1951–2000, the precipitation experienced a period when its spatial distribution showed a pattern of ‘western wetting and eastern drying, WWED’ in northern part of China and ‘southern flooding and northern drought, SFND’ in eastern part of China. Does this

收稿日期 2018-01-18; **网络预出版日期** 2018-03-13

作者简介 马柱国, 男, 1963 年出生, 博士, 研究员, 主要从事区域气候变化的研究。E-mail: mazg@tea.ac.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2016YFA0600400, 国家自然科学基金项目 41530532, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB956200, 江苏省气候变化协同创新中心资助项目

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2016YFA0600400), National Natural Science Foundation of China (Grant 41530532), National Basic Research Program of China (973 Program) (Grant 2012CB956200), Jiangsu Collaborative Innovation Center for Climate Change

distribution pattern of long-term precipitation change still maintain or change after 2001? Based on observations of monthly mean temperature, monthly mean precipitation, and calculated self-calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI) and surface wetness index (SWI), the drying trend in China has been revisited. Results show that the wet-dry spatial distribution in China has been changing significantly after 2001. Over northern China, the pattern of WWED switched to ‘western drying and eastern wetting, WDEW’; over eastern China, the pattern of SFND changed to ‘southern drought and northern flooding, SDNF’ during 2001 to 2016. In central part of northern China, precipitation trend switched from a decreasing trend to a significant increasing trend; precipitation in the upper and middle reaches of Yangtze River experienced a shift from significant increasing trend to a decreasing trend. However, according to the analysis of Terrestrial Water Storage (TWS) data of The Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE), the wet-dry pattern of SFND over eastern China has not changed during 2001–2016, and the drying trend in northern China has been intensifying since 2001. This is opposite to the results shown in precipitation. The reason will be studied in the future.

Keywords Drought index, Terrestrial Water Storage (TWS), Southern flooding and northern drying, Trend

1 引言

干旱化已经对我国北方的生存环境构成严重的威胁(符淙斌和安芷生, 2002; 符淙斌和温刚, 2002; 符淙斌等, 2006)。过去, 关于我国北方干旱化问题进行了大量的研究。这些研究发现, 在我国北方, 尤其是华北和西北东部, 从上个世纪 70 年代以后发生了严重的干旱化趋势(魏凤英和曹鸿兴, 1998; 黄荣辉等, 1999; 马柱国和符淙斌, 2001; 李庆祥等, 2002; 符淙斌和安芷生, 2002; 张庆云等, 2003), 且半干旱区是干旱化最剧烈的地区(符淙斌和温刚, 2002; Ma and Fu, 2003, 2006; 马柱国和符淙斌, 2005; 马柱国, 2005)。马柱国和符淙斌(Ma and Fu, 2003)的研究就指出, 我国半干旱区的干旱化强度最大(干旱化最剧烈), 并认为除降水的减少外, 区域增暖的影响不可忽视, 升温使得干旱化的强度和范围增加了 4%~7%; 半干旱区范围在部分地区向东南方向扩展了大约 300 km (马柱国和符淙斌, 2005; 马柱国, 2005); 多指标(降水、地表湿润指数、帕尔默干旱指数 PDSI 和土壤湿度)的比较结果也证实了我国半干旱区是干旱化最剧烈的地区(Ma and Fu, 2006)。姜江等(2017)进一步评估了不同气候区的干湿变化特征, 并基于 CMIP5 的模拟结果预估了未来中国将整体干旱化。大量的事实证明我国北方的干旱化不是一个局域的孤立现象, 其与全球其它区域的干湿变化具有关联性。如北非的长期干旱化与我国北方的干旱化具有位相相同的关系(严中伟等, 1990; Ma and Fu, 2007; 符淙斌和马柱国, 2008), 而北美地区的长期干湿变化趋势与我国北方半干旱区恰好为反位相的关系, 这种位相变化的关联性可用大气环流的遥相关理论得到解释(Ma and Fu, 2007;

华丽娟和马柱国, 2009)。增暖背景下全球尺度干湿变化近年来也得到了广泛的关注, 也产生了许多争议, 比如“湿的地方更湿, 干的地方更干(英文中是 dry gets drier, wet gets wetter, 简称 DDWW)”(Held and Soden, 2006; Chou et al., 2009; Seager and Vecchi, 2010; Liu and Allan, 2013; Huang et al., 2016)、“在全球增暖背景下, 全球干旱有加剧的趋势”等(Dai, 2011b, 2013), 但 Sheffield et al. (2012)和 Greve et al. (2014)对上述结论分别提出了质疑。关于这方面研究的讨论本文将不涉及, 主要集中于讨论我国北方干旱化问题。过去的研究发现, 中国区域干湿长期变化趋势的分布为东部的“南涝北旱”和北方的“西湿东干”型的时空分布格局(Ma and Fu, 2003; 马柱国等, 2005; 马柱国和任小波, 2007), 这种格局是否发生变化将对我国未来水资源安全和粮食安全产生重要的影响。

大量的研究证明, 中国北方的干旱化趋势与太平洋海温的年代际异常有关, 特别是与太平洋年代际振荡(PDO)存在显著的位相对应关系。如杨修群等(2005)发现, 华北降水的年代际变化与 PDO 存在着密切关系; 马柱国和邵丽娟(2006)的研究揭示了过去 100 年华北地区的年代尺度干旱与 PDO 的位相有着很好的对应关系, 即 PDO 的暖位相对应着华北的干旱时段, 反之亦然。在最近这 50 多年, 这种年代尺度的对应关系尤为一致(Ma, 2007), 这应该与上个世纪 70 年代季风环流发生的突然减弱有关, 如姜大膀和王会军(2005)、李新周等(2006)的研究均指出, 东亚夏季风从 1975 年以后存在一个减弱的趋势, 这种减弱趋势导致向北输送水汽的减弱, 形成了北方干旱化的趋势, 而东亚夏季风的这个减弱时段也正好与 PDO 的暖位相对应。Yang et al. (2017a)基于数值模拟研究系统

地诠释了 PDO 影响我国东部“南涝北旱”的机制。在 1976~2000 年, 当 PDO 处于暖位相时, 我国东部呈现“南涝北旱”的分布格局, 华北地区持续干旱, 而南方是持续的多雨时期; 当 PDO 处于冷位相时, 对应华北的相对多雨时期, 而南方则为少雨干旱时期 (Ma, 2007; Yang et al., 2017a)。图 1 给出了 1901~2016 年 PDO 年指数的变化曲线, 其中粗实线为 9 年的滑动平均曲线。可以看出, 大约在 2000 年以后, PDO 由暖位相转换为一个冷位相, 那么, 按照上述华北年代尺度干湿变化与 PDO 位相的统计关系, 2000 年以后华北应该转入一个降水偏多的时段, 从变化趋势来讲, 应该是降水由减少趋势转为增加趋势, 事实是不是这样的呢? 我们将分三个不同时段来分析不同时段干湿变化的趋势及其发生转折性变化的特征。目的是回答下面几个问题: (1) 我国降水的长期变化趋势分布格局是否发生改变? (2) 华北在 PDO 转为冷位相后是否会转为湿 (降雨偏多) 的时段? (3) “南涝北旱”和“西湿东干”的空间格局是否发生了变化? 这一系列问题是当前年代际气候变化研究的难点问题, 也是政府制定长期战略的科学需求。

基于此, 本文将利用中国区域 1951~2016 年月降水和气温数据, 通过分析不同时段降水、干旱指数和陆地水储量 TWS 的变化趋势及空间分布特征, 认识中国区域干湿变化时空格局的转折性特征, 特别是东部的“南涝北旱”和北方的“西湿东干”分布格局的转变特征。

2 资料和方法

本文所用数据为中国区域 160 站 1951~2016 年月降水和月平均气温数据, 这套数据是中国气象局国家气候中心进行气候分析的基础数据。另外, 在分析过程中也采用了英国东英吉利大学 CRU (Climate Research Unit) 1901~2016 年的月平均气温和月降水数据, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。由 GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment) 时变地球重力场反演的陆地水储量数据 TWS (Terrestrial Water Storage; Adam, 2002)。该数据空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间长度为 2002 年 4 月至 2016 年 12 月。

文中所采用的干旱指数分别为自矫正的 PDSI (self-calibrating Palmer Drought Severity Index) 和地表湿润指数 SWI (Surface Wetness Index)。下面

就对这两种干旱指数做一简要介绍 (Yang et al., 2017b):

(1) 自矫正帕尔默干旱指数 scPDSI

Wells et al. (2004) 提出了自矫正帕尔默干旱指数 (Self-calibrating PDSI, 简称 scPDSI)。scPDSI, 该指数主要是基于每一个台站的历史观测资料, 计算出该台站所对应的权重系数和持续因子, 弥补了传统帕尔默干旱指数对权重系数和持续因子非均一性描述的缺陷, 因而 scPDSI 具有较好的空间可比性 (Dai, 2011a)。

(2) 地表湿润指数 SWI

地表湿润指数 SWI 定义为年降水量与年潜在蒸散量之比值 (Hulme et al., 1992):

$$SWI = \sum_{i=1}^{12} P_i / \sum_{i=1}^{12} PE_i, \quad (1)$$

其中, P_i 与 PE_i 分别为第 i 月降水与潜在蒸散量。SWI 未进行标准化处理, 所以可用于干湿变化的检测 (Yang et al., 2017b)。

文中各参量的趋势采用线性趋势的计算, 并进行 95% 的信度检验。

3 结果分析

3.1 不同时段降水变化趋势的空间分布格局

为了清楚地认识降水变化趋势空间分布格局的转变特征, 这里把 1951~2016 年分成三个时段进行对比研究, 三个时段分别是 1951~2000 年、2001~2016 年、1951~2016 年。最近一个时段起始年选为 2001 年的原因是为了与 PDO 在 2001 前后年的位相转变相对应 (暖位相转为冷位相, 见图 1 中 PDO 的 9 年滑动平均曲线), 通过事实分析验证过去研究所发现的 PDO 与华北干旱化的位相对应关系 (Ma, 2007)。

为了避免分析过程中因数据不同产生的不确定性, 这里采用了中国区域 160 站的观测数据和 CRU 数据产品进行对比分析。结果发现, 站点观测数据三个时段的变化趋势 (图 2a、b、c) 与 CRU 三个时段变化趋势 (图 2d、e、f) 的空间分布基本一致。为此, 后面的分析主要针对 160 站观测数据三个时段的变换趋势 (图 2a-c)。与 1951~2000 年 (图 2a) 比较, 1951~2016 年 (图 2c) 中国区域年降水线性趋势的空间分布格局总体上没有变化, 即是说, 到 2016 年, 中国区域仍然维持北方的“西

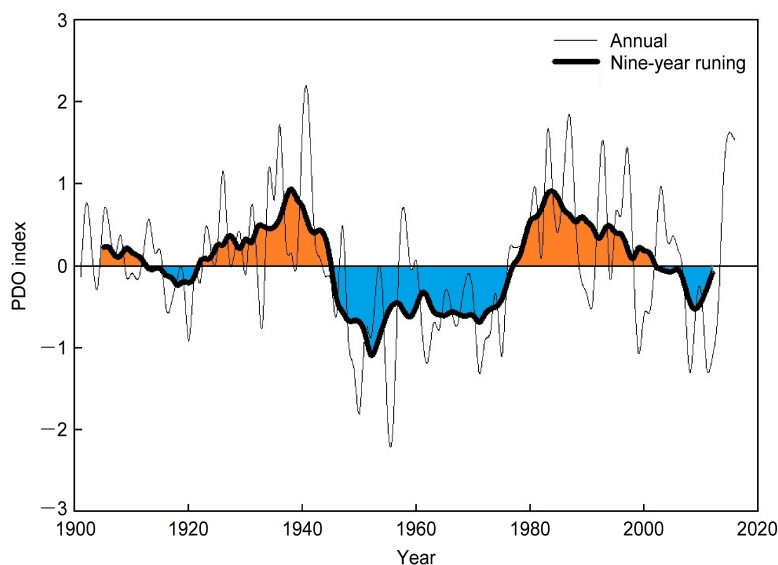


图1 1901~2016年PDO指数的变化, 其中粗实线为9年滑动平均(数据来自 <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt> [2018-01-13])

Fig. 1 The PDO (Pacific Decadal Oscillation) index with a 9-year running average (thick solid line) from 1901 to 2016 (data from <http://research.jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest.txt> [2018-01-13])

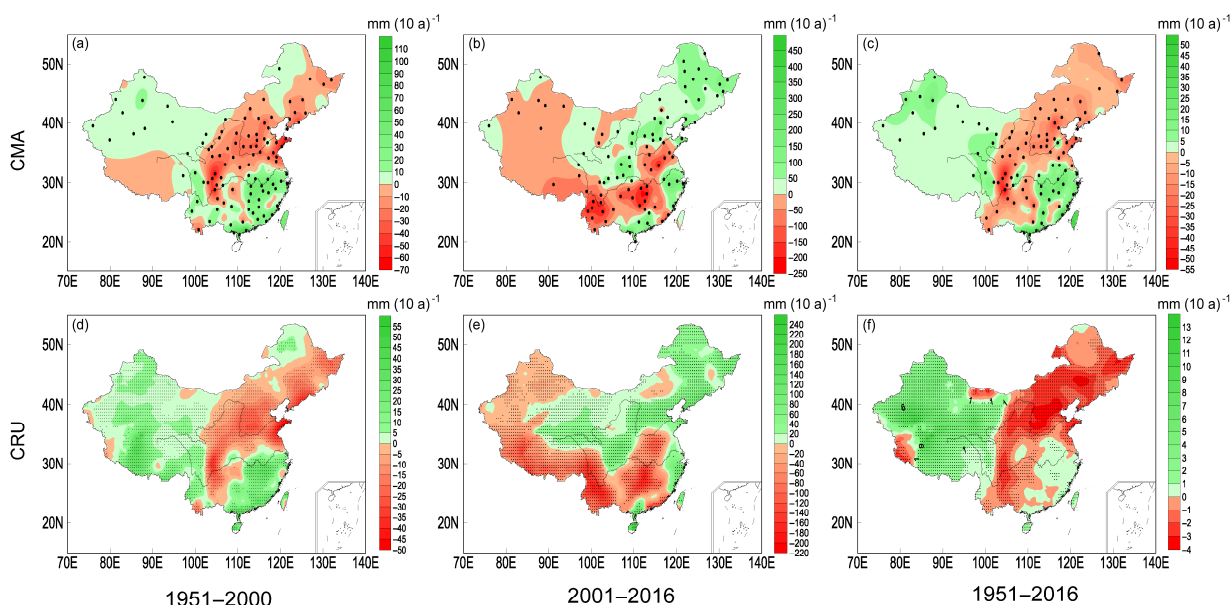


图2 (a, d) 1951~2000年、(b, e) 2001~2016年和(c, f) 1951~2016年不同时段中国区域年降水的线性变化趋势:(a-c) 基于CMA数据计算;(b-f) 基于CRU数据计算。黑点以及阴影区域表示该站点及该区域的发展趋势通过95%的信度检验;红色表示降水减少趋势,绿色表示增加趋势

Fig. 2 Linear trends of annual precipitation over China in (a, d) 1951-2000, (b, e) 2001-2016, and (c, f) 1951-2016 time periods: (a-c) CMA data; (d-f) CRU data. The black dots and dotted areas indicate the 95% confidence level

湿东干”和东部的“南涝北旱”的空间分布格局, 西北东部、华北和东北大部分地区仍维持干旱化的区域, 长江下游及江南大部分地区仍为降水增加趋势。尽管从大的格局来看, 年降水的线性趋势的分布格局没有发生大的改变, 但1951~2016年南方的降水增加区域的强度(图2c)相对于1951~2000

年的(图2a)要弱, 且范围减小, 说明南方的变湿正在减弱。前面提到, 在2001年后PDO由暖位相转为冷位相, 那么, 在PDO发生位相转变时我国的降水格局有没有发生变化? 为此, 这里通过比较图2a和b发现, 近16年中国区域年降水变化趋势的格局发生了显著的变化, 过去北方的“西湿东干”

和东部“南涝北旱”转变为北方的“西干东湿”和东部的“南旱北涝”。比较图 2a（1951~2000 年）和图 2b（2001~2016 年）的趋势分布还发现，长江中下游和江南大部分的变湿区范围明显缩小，仅保留长江下游的小部分区域，长江以南大部分地区已经转为年降水的减小趋势。在 35°N 以北，虽然江淮地区仍然维持干旱化趋势，但总体上已经形成“西干东湿”和“南旱北涝”的空间分布。

以上分析说明，2001 年后中国区域降水变化趋势的空间分布格局已经发生改变。进一步对两种常用的干旱指数 scPDSI 和 SWI 进行了分析（图 3）。分析发现，三个时段的 scPDSI 和 SWI 变化趋势的空间分布格局与同时段降水的分布格局基本一致，只是干湿变化趋势的范围和强度上略有不同。如在 1951~2000 和 1951~2016 年两个时段，三个指标的空间分布格局基本一致（降水见图 2a、c）。所不同的是 scPDSI（图 3a 和 c）和 SWI（图 3d 和 f）所表征的北方干旱化趋势在范围上明显大于降水减小的范围（红色区域），强度也强于降水的变化；而两个指数在南方的湿化范围却比降水增加的范围要小，强度也弱。比较图 2b、图 3b、图 3e 发现，三个指标在 2001~2016 这个时段的变化趋势的空

间分布高度一致，都表现出北方（西北东部、华北和东北）变湿的趋势，而南方大部分地区转为变干趋势。即是说，干旱指数 scPDSI 和 SWI 同样呈现出北方的“东（西北东部、华北和东北）干西（西北西部）湿”向“西干东湿”型，而东部的“南涝北旱”也向“南旱北涝”的转换。

为了进一步说明 2000 年后东部南北方干湿的转折性变化特征，以 100°E 以东为研究区域，把 35°N 以北定义为北方地区，35°N 以南地区为南方地区，且把 1951~2000 年和 2001~2016 年两个时段干湿趋势的面积进行定量化的比较。分析发现，在 1951~2000 年，我国北方降水主要以降水减少为主，降水减少的区域占北方总面积的 77%，降水为增加趋势的区域占 23%；而南方地区恰恰相反，降水减少的区域占总面积的 38%，降水增加的区域占总面积的 62%，这个时段整个东部地区呈现“南涝北旱”的空间分布格局。到了 2001~2016 时段，北方降水为减少趋势的面积仅占 21%，而大部分地区的降水转为增加趋势，范围面积比达 79%，而在南方地区，降水减少区域已上升到总面积的 52%，降水为增加趋势的范围减少到 48%，尽管没有北方地区的转换特征显著，但主导区域干湿趋势

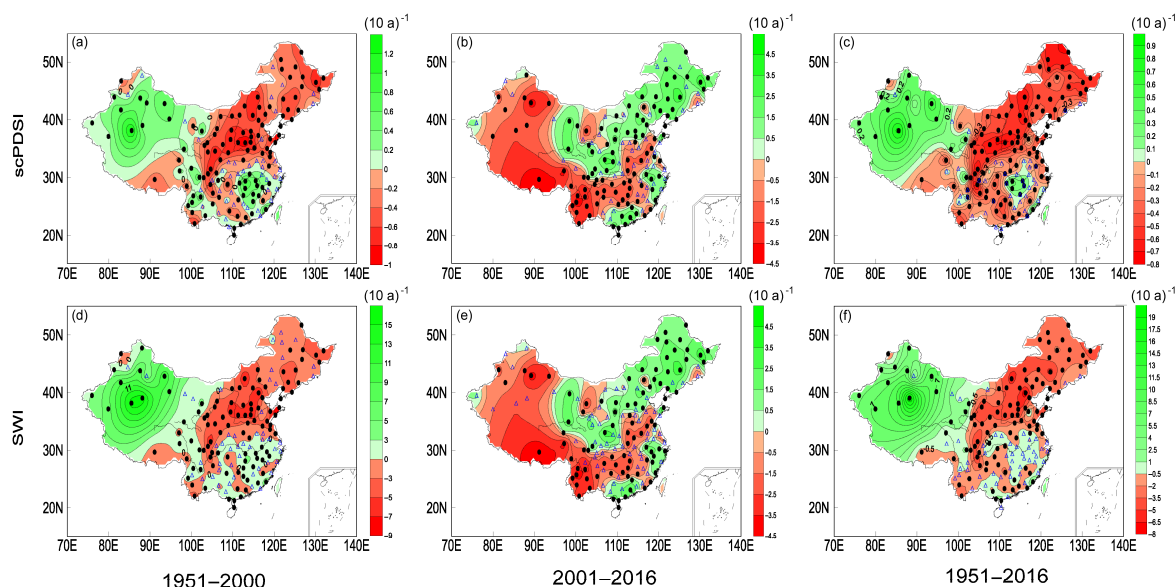


图 3 (a、d) 1951~2000 年、(b、e) 2001~2016 年和 (c、f) 1951~2016 年不同时段中自矫正帕尔默干旱指数 scPDSI（第一行）和地表湿润指数 SWI（第二行）变化趋势。黑点以及阴影区域表示该站点及该区域趋势通过 95% 的信度检验；“△”为未通过显著性检验的站；红色表示干旱化趋势，绿色表示湿化

Fig. 3 Linear trends of scPDSI [Self-calibrating PDSI (Palmer Drought Severity Index), top row] and SWI (Surface Wetness Index, bottom row) over China in (a, d) 1951–2000, (b, e) 2001–2016, and (c, f) 1951–2016 time periods. The black dots and dotted areas indicate the 95% confidence level. Blue triangles indicate stations with insignificant trends. The red colour indicates drought trends, the green colour indicates wetness trends

的特征已经发生了变化。从 scPDSI 和 SWI 也基本可以得到同样的结论,且北方地区的空间转折性变化特征愈加显著,而南方地区转型过程明显弱于北方。比较降水、scPDSI 和 SWI 的变化趋势还发现,尽管降水在干湿变化中起主导作用,但气温等其它环境要素的影响也不可忽视。相对于 1951~2000 年,最近一个时段(2001~2016 年),全国干旱化的面积扩展了约 11%,其中显著干旱化(线性趋势通过 95%的信度检验)的面积增加了 6%,说明整个中国区域干旱化的范围在增大,强度在增强;如果按东西部分区来看(以 100°E 为界),东部地区干旱化面积减少了 26%,且显著干化的面积减少了 23%,而西部干化的面积增加了 65%,显著干旱化的面积增加了 49%,说明“西湿东干”的格局正在向“西干东湿”转换;在东部 35°N 以北地区,过去是我国发生干旱化最剧烈的地区(Ma and Fu, 2003),而在 2001~2016 年时段,这个现象有所缓解,干旱化的面积由 1951~2000 年时段的 44%降到 2001~2016 年时段的 33%,显著干旱化的面积也由原来的 31%降到 15%。值得强调的是,35°N 以南地区干旱化的面积增加达 70%,显著干旱化的面积也占整个区域的一半以上,这也充分说明“南涝北旱”的格局已经发生了转变。比较 1951~2016 年和 1951~2000 年两个时段发现,整个中国区域干旱化面积增加了 10%(从 38%增加到 48%),显著干旱化的面积增加了 9%,而东部从 61%的干旱化面积增加到 75%,西部变化不大,仅增加了 2%。整个北方干旱化面积增加了 8%,但显著干旱化面积却增加了 10%,说明北方干旱化强度增加的速率比范围增加的速率大;南方干旱化的面积也增加了 11%,这说明整个中国东部干旱化面积增大,强度增强,这些结果似乎与前面提到“东干西湿”和“南涝北旱”转为“西干东湿”和“南旱北涝”的转型相矛盾,其实不然,原因是尽管近 16 年(2001~

2016 年)整个降水的格局发生了转变,但从 1951~2016 年这个时段来看,转型的强度还没有完全达到改变其长期趋势空间分布格局的量级,但这并不能否认整个空间格局的转变。

3.2 四个典型区域降水的年代尺度变化

以上分析说明,最近十几年中国区域年降水长期趋势的空间格局发生了转变,为了更深入的认识这种转折性变化的时间特征,参照以 Ma and Fu (2003, 2006)的研究把变化显著的区域分成 4 个典型区域,包括东北(42.5°~50°N, 120°~130°E)、华北(35°~42.5°N, 110°~117.5°E)、西北东部(32.5°~40°N, 100°~107.5°E)、西北西部(40°~47.5°N, 82°~95°E)。为了突出这四个区域的长期变化特征,这里采用近年来发展和广泛应用的 EEMD 方法(Ensemble Empirical Mode Decomposition; Wu et al., 2007; Wu and Huang, 2009)对原始的年降水序列进行多时间尺度分解,提取降水不同周期及长期趋势的信号,分别记为 IMF1、IMF2、IMF3、IMF4 四个周期和趋势项 ST,分离出年代尺度(IMF3+IMF4+ST)的变化信息,以此来认识四个区域过去 66 年的干湿变化特征。

图 4 是四个区域平均年降水量的年代尺度变化特征。图中的三条曲线分别是年代尺度(L1, 大于 20 年周期变化的合成, IMF3+IMF4)变化、与年代尺度周期变化与趋势项的合成(L2, IMF3+IMF4+ST)和单纯的趋势变化(L3, ST),图 4a、b、c 和 d 分别是为东北、华北、西北东部和西北西部。分析图 4 可知,每个区域的趋势项(L3)具有不同的特征。其中,东北和华北都具有类似的趋势特征,即 1951~1981 年为下降趋势,之后均为降水增加趋势,趋势项表现出一定的非线性特征;西北东部为微弱线性减少趋势,西北西部具有显著的降水增加趋势。从年代尺度合成的变化来看,东北地区过去 66 年经历了两个年代尺度的干旱时段,一个是 1967~1981 年,另一个在 1998~2010 年。相对于前者,后者是过去 66 年最强的一次年代尺度干旱(图 4a);华北的年代尺度合成变化特征不同于东北地区,从 1968 年开始持续 43 年的干旱几乎占过去 66 年的三分之二,在 2010 年以后,降水转为正的距平(图 4b);西北东部与东北类似,具有两个干旱时段,同样是后一个强于前一个(图 4c)。值得注意的是,西北西部的年代尺度周期振荡明显弱于它的趋势变化项(图 4d)。比较 4 个不同区域年

表 1 三个时段不同区域发生干旱化面积的统计
Table 1 Percentages of drying areas in different regions during three time periods

	干旱化面积百分比				
	全国	东部	西部	北方	南方
1951~2000 年	38%(25%)	61%(41%)	5%(1%)	44%(31%)	31%(17%)
2001~2015 年	49%(31%)	35%(18%)	70%(50%)	33%(15%)	70%(51%)
1951~2016 年	48%(34%)	75%(54%)	7%(3%)	52%(41%)	42%(23%)

注:面积百分比为占所在区域的面积百分比;括号里的是达到 95%信度检验的面积比。

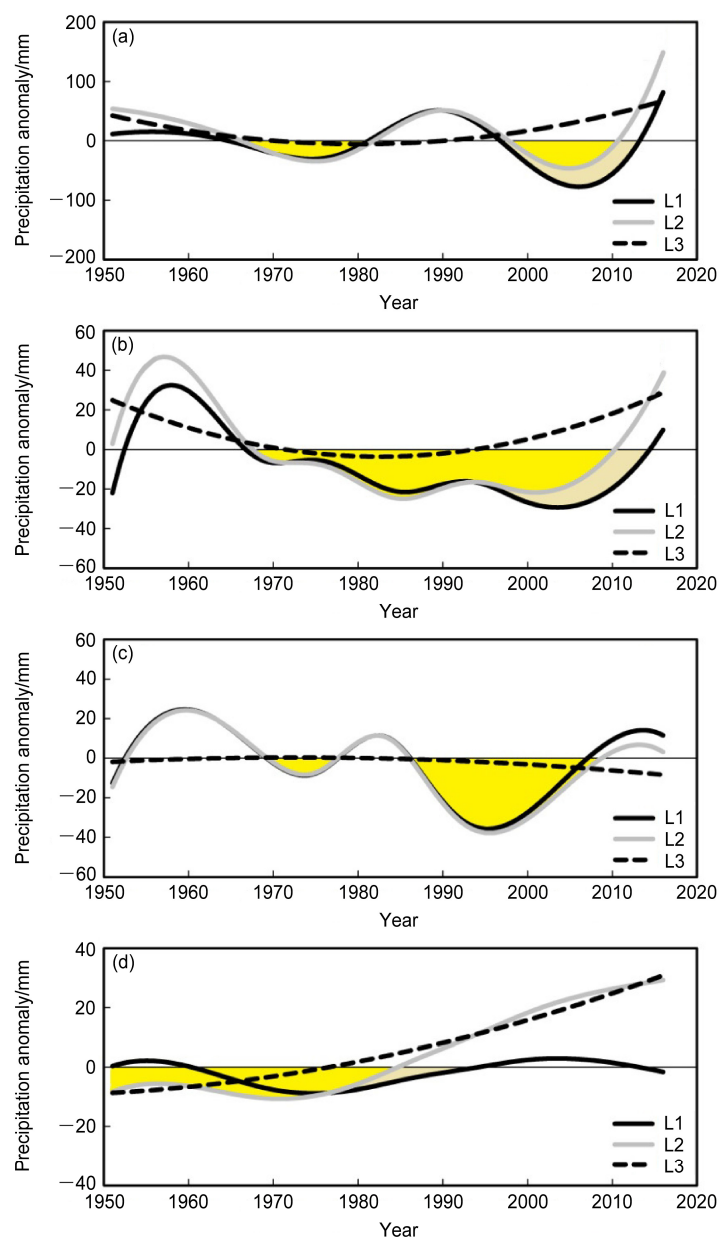


图 4 基于 EEMD 方法得到的 (a) 东北、(b) 华北、(c) 西北东部和 (d) 西北西部区域平均年降水的年代际变化特征。L1: 年代际尺度的周期变化; L2: 周期变化与趋势项的合成; L3: 趋势项

Fig. 4 Interdecadal variations of regionally averaged precipitation over (a) Northeast China, (b) North China, (c) eastern Northwest China, and (d) western Northwest China using EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition) method. L1: interdecadal variation; L2: interdecadal variations plus trend; L3: trend

代尺度变化特征来看, 4 个区域的降水在最近 16 年均均为增加趋势, 只是各个区域转折点的时间不同, 东北地区的转折时间为 2005 年, 华北为 2001 年, 西北东部为 1998 年, 而西北西部最早在 1971 年转为降水逐渐增加趋势。

由上述分析可知, 4 个区域周期变化和趋势项在各自区域的变化中所占的比重不同, 有的区域年代尺度的变化以周期振荡为主, 而有的地区趋势却

占比更大。为了更清楚的认识这一点, 我们利用 EEMD 的结果对东北、华北、西北东部和西北西部四个区域的区域平均年降水不同时间尺度变化的方差贡献进行了计算, 取后三个分量 (IMF3、IMF4 和 ST, 周期超过大于 20 年和趋势项) 的方差贡献进行比较分析。做法是把年代尺度各分尺度的方差贡献相加, 每一个分时间尺度的方差贡献除以年代尺度总方差贡献得到各自分时间尺度方差贡献

比, 结果列于表 2。分析发现, 四个区域都存在着 24~37 年和 64~67 年左右的周期变化, 但方差贡献比的大小却迥然不同。比较不同地区 (IMF3+IMF4) 周期变化与趋势项 (ST) 的方差贡献占比发现, 东北和华北地区相似, 周期变化的方差贡献占比 (超过 70%) 大于趋势项 (20%左右); 而西北东部和西北西部却不同, 在西北东部, 降水周期变化的方差贡献占比 (98%) 远大于趋势项的方差贡献占比 (2%), 但西北西部与之相反, 趋势项的方差贡献比远大于周期变化的方差贡献比。比较两个不同时间尺度周期 (IMF3 和 IMF4) 变化的方差贡献占比发现, 东北地区年代尺度的周期变化主要以 30 年左右的周期变化为主, 而华北地区 60 年左右周期变化方差贡献占比略大于 25 年左右的周期变化占比。还可发现, 华北地区两种周期变化在年代尺度变化所占的比重基本相当, 西北东部也类似, 但 25 年左右的周期变化大于 60 年左右的周期变化; 西北西部两种周期变化的方差贡献占比都很小, 两者之和也仅占 7%。

归纳起来, 东北和华北地区尽管以年代周期振荡为主, 但它们的变化趋势也不容忽视; 西北东部地区降水是微弱的减小趋势, 但与年代尺度周期的方差贡献占比相比可以忽略。特别需要强调的是, 西北西部的趋势变化占主导, 而周期变化在年代尺度变化中贡献却很小。

表 2 东北、华北、西北东部和西北西部区域平均年降水的不同年代尺度分量的周期及方差贡献比

Table 2 Periods and variance contribution of various decadal time-scale components for regionally-averaged precipitation over Northeast China, North China, eastern and western Northwest China

	周期/a (方差贡献比)			
	IMF4	IMF5	趋势项	IMF4+IMF5
东北	32.2 (76%)	64.6 (1%)	— (23%)	— (77%)
华北	25.7 (31%)	63.4 (40%)	— (29%)	— (71%)
西北东部	24.7 (58%)	64.1 (40%)	— (2%)	— (98%)
西北西部	37.0 (6.5%)	67.3 (0.5%)	— (93%)	— (7%)

注: 括号外的数字是周期, “—”表示无数值; 括号内的数字为该周期的方差贡献比。

4 关于我国北方干旱化的讨论

前面分析的干湿趋势及转折性特征都是基于降水量变化和干旱指数所得出的结论, 属于气象干旱的范畴。然而, 干湿的本质是地表水分收支的盈

亏, 因此, 降水和干旱指数还不能从地表水分收支角度表征干湿的特征。目前的各种常规观测变量 (包括降水、径流、土壤湿度和地下水等) 都无法从整体上说明一个地区的干和湿, 原因是观测数据本身的不确定性, 加之所需数据隶属于不同的业务部门, 如降水数据的管理主要归之于气象部门, 而径流数据主要是水利部门, 地下水的观测主要由国土资源部门负责, 这样一种观测管理体制, 使得数据的获取面临诸多困难, 加之不同观测体系从观测方法、数据的质量控制方法等方面都有不同的要求, 就造成数据本身的不确定性, 导致对水分收支的计算存在明显的不闭合问题, 这也是当前从地表水分收支平衡角度研究干旱问题所面临的困难。

近年来, 快速发展的卫星数据产品为进一步从陆地水分收支的角度检测干旱及干旱化提供了新的途径。这里应用近年来发展起来的 GRACE 卫星产品陆地水储量 (TWS) 数据对于干旱化的事实做进一步的检验。该数据已被广泛的应用于区域水循环研究 (Swenson and Milly, 2006; Famiglietti and Rodell, 2013; Ahmed et al., 2014) 和干旱检测问题的研究 (Long et al., 2013; Chen et al., 2013), 在当前的数据条件下, 不失为一个从区域陆地水分收支角度检测干旱或者干旱化的理想指标, 其优点是能够用于估算陆地单位体积内水量的变化。由于 GRACE 卫星数据的有效数据为 2002~2016 年, 这里我们分析了 TWS 在这个时段的线性变化趋势 (图 5)。由图 5 可以清楚地看出, 除东北的东北部外, 我国北方大部分地区的 TWS 在 2002~2016 年时段呈减小趋势, 而南方地区呈现东部 (长江以南) TWS 增加, 西部减少的分布格局。与降水和干旱指数变化趋势的空间分布 (图 2b、e 和图 3b、e) 比较发现, 西部地区除青藏高原北部边缘地区外, 其它地区 TWS 与降水及干旱指数 scPDSI 和 SWI 均一致, 显示整个西部地区近 16 年处于一个变干趋势, 而东部地区仍然维持“南涝北旱”的干湿变化分布格局, 这与前面用气象干旱指数 (降水、scPDSI 和 SWI) 所得出的结论正好相反, 即是说, 在 2001 年以后, 尽管我国东部降水变化的空间分布格局发生了变化 (由“南涝北旱”转变成“南旱北涝”), 但从地表水分收支的角度来讲, “南涝北旱”的格局并未发生变化。为什么两种结果所表示的干湿变化趋势会产生如此大的差异呢? 到底哪个结果能客观指征我国东部的旱涝分布格局呢? 我们需要

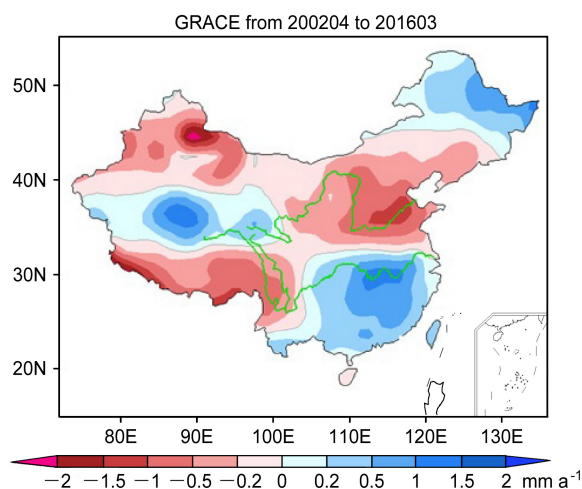


图5 2002~2016年中国地区 GRACE 卫星数据的陆地水储量 TWS 线性趋势（单位： mm a^{-1} ）的空间分布。红色区域为 TWS 减少趋势，蓝色区域为 TWS 增加趋势

Fig. 5 Linear trend of terrestrial water storage (TWS, units: mm a^{-1}) from GRACE satellite data over China from 2002 to 2016. The red zone assumes the reduced tendency, the blue zone assumes increased tendency

从数据本身入手来分析这个问题。我们认为，图 2 和图 3 得出的我国东部地区干湿变化发生转型主要是基于气象数据计算所得，是气象干旱长期趋势的表征，考虑的是自然过程（降水和气温）的影响。仅仅是从自然变化的角度对该地区干湿变化的定性表征，并未从水分收支的角度描述客观的干旱的特征，也不能全面考虑多要素影响干旱化趋势的过程，比如对水分收支有重要影响的人类用水过程就缺乏考虑。而由 GRACE 卫星数据计算得出的 TWS 是多种要素对水分收支影响的一个综合特征量，恰好弥补了这个不足，这也是该数据被广泛应用于干旱检测的一个理由。

上述分析说明，在人类活动影响不断加剧的今天，仅用气象干旱指数难以表征区域环境干湿变化的真实特征。可以断定，尽管我国北方地区，尤其是华北和西北东部地区，降水量从 2001 年以后有一个增加的趋势，但陆地水储量 TWS 却是减小趋势，说明我国北方干旱化仍在加剧，该地区的水资源状况仍不容乐观。

众所周知，影响一个地区陆地水分收支的有几个重要过程：大气降水、地表的蒸发、径流和地下水，还有人类用水的影响，TWS 所代表的是这些要素变化的总体结果，并不能指示各个分过程的变化，因此，我们仍然无法从 TWS 数据分辨出是哪

个过程导致这种差异，这需要通过更多的观测数据对不同的过程进行细致的分析，以便确定当前干旱化不断加剧的关键因素。

5 总结

结合新的数据，本文在系统总结我国北方干旱化问题研究的基础上，对我国北方干旱化问题做了进一步的分析，发现了一些新的事实。主要结论可归纳如下：

（1）从年降水量和常用的干旱指数 scPDSI、SWI 的分析结果来看，1951~2016 年，我国干湿变化趋势的空间分布格局仍未发生变化，北方依然维持“西湿东干”，东部仍维持“南涝北旱”。我国西北部、华北和东北仍然处于干旱化的趋势。

（2）通过对比 1951~2016 年、1951~2000 和 2001~2016 年三个时段年降水量、年平均的 scPDSI 和年 SWI 的变化趋势发现，尽管 1951~2016 年的变化趋势是北方的“西湿东干”和东部的“南涝北旱”的格局，但比较 1951~2000 年和 2001~2016 年两个时段的变化趋势发现，2001 年后，这种“南涝北旱”和“西湿东干”的格局已经发生完全的转变，北方转为“西干东湿”和东部转为“南旱北涝”。这种转型变化与 PDO 的周期位相转变一致。

（3）基于 GRACE 数据的陆地水储量 TWS 分析发现，在 2002~2016 年间，我国东部干湿变化趋势的仍然呈现“南涝北旱”的空间分布，即是说，从陆地水分收支的角度讲，尽管近十几年我国东部干湿趋势已经由“南涝北旱”转为“南旱北涝”，但北方干旱化依然在加剧。

我国北方干旱化形成的原因十分复杂，尤其是人类活动不断加剧的今天，增暖、土地利用变化、地下水和地表水的过度利用和城市群的快速扩张都将对干旱化产生重要影响，我国东部陆地水储量 TWS 的趋势与基于气象干旱指数的趋势相反就说明了这个问题，这有待于系统地从干旱化形成的各要素进行研究，并基于不断完善的观测数据量化的评估各因子的相对贡献，以期了解我国北方干旱化加剧的真正原因。

参考文献 (References)

- Adam D. 2002. Gravity measurement: Amazing grace [J]. Nature, 416 (6876): 10–11, doi:10.1038/416010a.
- Ahmed M, Sultan M, Wahr J, et al. 2014. The use of GRACE data to

- monitor natural and anthropogenic induced variations in water availability across Africa [J]. *Earth-Science Reviews*, 136: 289–300, doi:10.1016/j.earscirev.2014.05.009.
- Chen Y, Velicogna I, Famiglietti J S, et al. 2013. Satellite observations of terrestrial water storage provide early warning information about drought and fire season severity in the Amazon [J]. *J. Geophys. Res.*, 118 (2): 495–504, doi:10.1002/jgrg.20046.
- Chou C, Neelin J D, Chen C A, et al. 2009. Evaluating the Rich-Get-Richer mechanism in tropical precipitation change under global warming [J]. *J. Climate*, 22 (8): 1982–2005, doi:10.1175/2008JCLI2471.1.
- Dai Aiguo. 2011a. 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.
- Dai Aiguo. 2011b. Drought under global warming: A review [J]. *WIREs*, 2 (1): 45–65, doi:10.1002/wcc.81.
- Dai Aiguo. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. *Nature Climate Change*, 3 (1): 52–58, doi:10.1038/nclimate1633.
- Famiglietti J S, Rodell M. 2013. Water in the balance [J]. *Science*, 340 (6138): 1300–1301, doi:10.1126/science.1236460.
- 符淙斌, 安芷生. 2002. 我国北方干旱化研究——面向国家需求的全球变化科学问题 [J]. *地学前缘*, 9 (2): 271–275. Fu Congbin, An Zhisheng. 2002. Study of aridification in northern China—A global change issue facing directly the demand of nation [J]. *Earth Science Frontiers (in Chinese)*, 9 (2): 271–275, doi:10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.004.
- 符淙斌, 温刚. 2002. 中国北方干旱化的几个问题 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 22–29. Fu Congbin, Wen Gang. 2002. Several issues on aridification in the northern China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 22–29, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2002.01.03.
- 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.
- 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 2006. 北方干旱化与人类适应 [J]. *自然科学进展*, 16 (10): 1216–1223. Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. 2006. The aridification in northern China and human adaptation [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 16 (10): 1216–1223, doi:10.3321/j.issn:1002-008X.2006.10.003.
- Greve P, Orlowsky B, Mueller B, et al. 2014. Global assessment of trends in wetting and drying over land [J]. *Nat. Geosci.*, 7 (10): 716–721, doi:10.1038/ngeo2247.
- Held I M, Soden B J. 2006. Robust responses of the hydrological cycle to global warming [J]. *J. Climate*, 19 (21): 5686–5699, doi:10.1175/JCLI3990.1.
- 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 [J]. *地球物理学报*, 52 (5): 1184–1196. Hua Lijuan, Ma Zhuguo. 2009. The evolution of dry and wet periods in Asia and North America and its relationship with SSTA [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 52 (5): 1184–1196, doi:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.05.007.
- Huang J P, Yu H P, Guan X D, et al. 2016. Accelerated dryland expansion under climate change [J]. *Nature Climate Chang*, 6 (2): 166–171, doi:10.1038/nclimate2837.
- 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 [J]. *高原气象*, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 465–476, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.001.
- Hulme M, Marsh R, Jones P D. 1992. Global changes in a humidity index between 1931–60 and 1961–90 [J]. *Climate Res.*, 2: 1–22, doi:10.3354/cr002001.
- 姜大膀, 王会军. 2005. 20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性 [J]. *科学通报*, 50 (20): 2256–2262. Jiang Dabang, Wang Huijun. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (17): 1923–1929, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2005.20.013.
- 姜江, 姜大膀, 林一骅. 2017. 中国干湿区变化与预估 [J]. *大气科学*, 41 (1): 43–56. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2017. Changes and projection of dry/wet areas over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 41 (1): 43–56, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1604.15223.
- 李庆祥, 刘小宁, 李小泉. 2002. 近半世纪华北干旱化趋势研究 [J]. *自然灾害学报*, 11 (3): 50–56. Li Qingxiang, Liu Xiaoning, Li Xiaoquan. 2002. Drought trend in North China in recent half century [J]. *Journal of Natural Disasters (in Chinese)*, 11 (3): 50–56, doi:10.3969/j.issn.1004-4574.2002.03.009.
- 李新周, 马柱国, 刘晓东. 2006. 中国北方干旱化年代际特征与大气环流的关系 [J]. *大气科学*, 30 (2): 277–284. Li Xinzhou, Ma Zhuguo, Liu Xiaodong. 2006. Inter-decadal characteristics of aridification over northern China associated with the variation of atmospheric circulation during the past 50 years [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (2): 277–284, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.02.10.
- Liu Chunlei, Allan R P. 2013. Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850–2100 [J]. *Environ. Res. Lett.*, 8 (3): 034002, doi:10.1088/1748-9326/8/3/034002.
- Long Di, Scanlon B R, Longuevergne L, et al. 2013. GRACE satellite monitoring of large depletion in water storage in response to the 2011 drought in Texas [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (13): 3395–3401, doi:10.1002/grl.50655.
- 马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. *地球物理学报*, 48 (5): 1011–1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 48 (5): 1011–1018, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.05.006.
- 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:10.1007/s11434-007-0284-z.
- 马柱国, 符淙斌. 2001. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析 [J]. *气象学报*, 59 (6): 737–746. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2001. Trend of surface humid index in the arid area of northern China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (6): 737–746, doi:10.11676/qxxb2001.077.
- Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2003. Interannual characteristics of the surface

- hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China [J]. *Global and Planetary Change*, 37 (3–4): 189–200, doi:10.1016/S0921-8181(02)00203-5.
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. *地球物理学报*, 48 (3): 519–525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48 (3): 519–525, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.03.008.
- Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 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 Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (3): 464–474, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.03.10.
- Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2007. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 50 (5): 776–788, doi:10.1007/s11430-007-0036-6.
- 马柱国, 任小波. 2007. 1951–2006 年中国区域干旱化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (4): 195–201. Ma Zhuguo, Ren Xiaobo. 2007. Drying trend over China from 1951 to 2006 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (4): 195–201, doi:10.3969/j.issn.1673-1719.2007.04.002.
- 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. *大气科学*, 29 (5): 671–681. Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of the dryness/wetness over northern China during the last century [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (5): 671–681, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.05.01.
- Seager R, Vecchi G A. 2010. Greenhouse warming and the 21st century hydroclimate of southwestern North America [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107 (50): 21277–21282, doi:10.1073/pnas.0910856107.
- Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. 2012. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 491 (7424): 435–438, doi:10.1038/nature11575.
- Swenson S C, Milly P C D. 2006. Climate model biases in seasonality of continental water storage revealed by satellite gravimetry [J]. *Water Resour. Res.*, 42 (3): W03201, doi:10.1029/2005WR004628.
- 魏凤英, 曹鸿兴. 1998. 华北干旱异常的地域特征 [J]. *应用气象学报*, 9 (2): 205–212. Wei Fengying, Cao Hongxing. 1998. Regional characteristics of drought anomalies in North China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (2): 205–212.
- Wells N, Goddard S, Hayes M J. 2004. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. *J. Climate*, 17 (12): 2335–2351, doi:10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSE>2.0.CO;2.
- Wu Zhaohua, 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. USA*, 104 (38): 14889–14894, doi:10.1073/pnas.0701020104.
- Wu Zhaohua, 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.
- 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*, (1): 97–103. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990. Northern Hemispheric summer climatic jump in the 1960s (I)—Rainfall and temperature [J]. *Science in China Series B*, (1): 1092–1101.
- Yang Qing, Ma Zhuguo, Fan Xingang, et al. 2017a. Decadal modulation of precipitation patterns over eastern China by sea surface temperature anomalies [J]. *J. Climate*, 30 (17): 7017–7033, doi:10.1175/JCLI-D-16-s0793.1.
- Yang Qing, Li Mingxing, Zheng Ziyang, et al. 2017b. Regional applicability of seven meteorological drought indices in China [J]. *Science China Earth Sciences*, 60 (4): 745–760, doi:10.1007/s11430-016-5133-5.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4): 789–797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 48 (4): 789–797, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.009.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. *气候与环境研究*, 8 (3): 307–318. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyang. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (3): 307–318, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2003.03.005.