

中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望*

张强^{1,2} 姚玉璧³ 李耀辉¹ 黄建平⁴ 马柱国⁵ 王芝兰¹

王素萍¹ 王莺¹ 张宇¹

ZHANG Qiang^{1,2} YAO Yubi³ LI Yaohui¹ HUANG Jianping⁴ MA Zhuguo⁵ WANG Zhilan¹

WANG Suping¹ WANG Ying¹ ZHANG Yu¹

1. 中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州, 730020
2. 甘肃省气象局, 兰州, 730020
3. 兰州资源环境职业技术学院, 兰州, 730021
4. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000
5. 中国科学院大气物理研究所, 北京, 100029

1. Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Gansu Province Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, China Meteorological Administration Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020, China

2. Gansu Provincial Meteorological Service, Lanzhou 730020, China

3. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech College, Lanzhou 730021, China

4. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

5. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2019-08-15 收稿, 2020-02-11 改回.

张强, 姚玉璧, 李耀辉, 黄建平, 马柱国, 王芝兰, 王素萍, 王莺, 张宇. 2020. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望. 气象学报, 78(3): 500-521

Zhang Qiang, Yao Yubi, Li Yaohui, Huang Jianping, Ma Zhuguo, Wang Zhilan, Wang Suping, Wang Ying, Zhang Yu. 2020. Progress and prospect on the study of causes and variation regularity of droughts in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(3):500-521

Abstract Droughts are one of the most serious and extensive natural disasters in the world. As a typical monsoon climate area, China is particularly affected by drought disasters. A great deal of researches on droughts have been carried out in the world, and studies have been evolved from qualitative and presentative understandings to quantitative descriptions of objective characteristics and in-depth exploration of the formation mechanism. Since the founding of the People's Republic of China, considerable progresses have been made in the field of drought research from sporadic studies of some major drought events to gradual integration with international drought studies. However, there is no objective and clear understanding of scientific progresses of drought research and the insight of the development direction of drought research is insufficient. Based on comprehensive understanding of the current status of international drought research, this paper systematically reviews the history of drought research in China since the founding of the People's Republic of China, summarizes important progresses on drought research in China, and divides the progress into four major stages: Characteristics and spatial and temporal distributions of drought events, formation mechanisms and change regularities of droughts, drought disaster risks, and occurrences of flash droughts. This paper also summarizes important achievements of drought researches in China in view of the characteristics of drought events, the spatial and temporal distribution of droughts, the change rules

* 资助课题: 国家自然科学基金重点项目(41630426)、公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-6)、国家自然科学基金项目(41575149)。

作者简介: 张强, 主要从事干旱与干旱环境、大气边界层、陆面过程研究。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

通信作者: 姚玉璧, 主要从事气候变化对农业、生态的影响研究。E-mail: yaoyubi@163.com

of droughts, the causes of droughts, the influencing mechanisms of droughts, the formation process of drought risks, the response of droughts to climate warming and the particularity of sudden droughts. Moreover, in combination with the international cutting-edge studies and hotspot issues and development trend of drought research, this paper scientifically analyzes the weaknesses and problems of drought researches in China, and proposes that China needs to make breakthroughs on six major scientific issues in the future, including the multi-factor synergetic effect on drought formation, the effect of land-atmosphere interaction on drought formation and development, the identification, monitoring and prediction of flash droughts, the transmission rules and non-uniform characteristics among various types of droughts, the effect of critical impacting period on agricultural drought development, the complexity of drought response to climate warming, and the scientific assessment of drought disaster risks on the basis of strengthening the comprehensive drought science experiment research in typical areas frequently affected by droughts.

Key words Drought events, Formation mechanism, Change rules, Progress and prospect, China

摘要 干旱是世界上危害最广泛、最严重的自然灾害之一。中国地处典型季风气候区,干旱灾害的影响尤为突出。国际上对干旱问题已经进行了大量研究,逐渐由对干旱的定性和表象的认识发展到对干旱客观特征的定量认识和形成机理的深入揭示。自新中国成立以来,中国从以往仅对一些重大干旱事件的零散认识逐步发展到与国际干旱研究的完全接轨,干旱研究取得了长足进展。但是,目前对干旱研究取得的科学进展缺乏客观全面的整体认识,对干旱研究的发展方向尚未能充分洞察。为此,基于国际干旱研究现状,系统回顾了新中国成立以来中国干旱研究的历程,总结了我国干旱研究的重要进展,划分出了干旱事件的现象特征和时空分布、干旱形成机理及变化规律、干旱灾害风险和骤发性干旱研究兴起等中国干旱研究的4个主要发展过程。并从干旱事件特征、干旱时空分布、干旱变化规律、干旱成因、干旱影响机制、干旱风险形成过程以及干旱对气候变暖的响应、骤发性干旱的特殊性等方面归纳凝练了中国干旱研究的主要成果。同时,结合干旱研究的国际前沿、热点问题和发展趋势,科学分析了我国干旱研究的不足和问题,提出了中国未来干旱研究需要在加强典型干旱频发区综合性干旱科学试验研究的基础上,对干旱形成的多因子协同影响、陆-气作用对干旱形成发展的作用、骤发性干旱的判别及监测预测、各类干旱之间转换规律及其非一致性特征、关键影响期对农业干旱发展的作用、干旱对气候变暖响应的复杂性、干旱灾害风险的科学评估等重点科学问题上取得突破。

关键词 干旱事件, 形成机理, 变化规律, 进展与展望, 中国
中图法分类号 P461

1 引言

干旱气象是气象学的一个重要分支,也是一个深受社会各界广泛关注的学科。一般而言,干旱气象研究主要包括两个范畴,它既指对干旱半干旱气候区的形成和演化以及发生在该区域的天气、气候事件的研究,又指对发生在全球任何区域的气象干旱的研究(张强等, 2011b)。对于前者的研究最近已有一些文献做了系统总结(张强等, 2012a; 钱正安等, 2017a, 2017b; Huang, et al, 2019; 管晓丹等, 2019; 闫昕昉等, 2019),文中主要聚焦于后者即气象干旱(简称干旱)方面的研究工作。

全球自然灾害中气象灾害约占到70%,而在全球气象灾害中干旱灾害又占到50%(秦大河等, 2002)。1980—2009年全球因干旱造成的经济损失年平均为173.3亿美元,而2010—2017年的年平均损失增长到231.25亿美元,远超其他气象灾害损失的增速(Wilhite, 2000; Buda, et al, 2018)。气候

变暖背景下,全球水循环进一步加快,植物蒸腾和地表蒸散等水分平衡随之调整,干旱风险增高,农业生产的不稳定性和风险进一步增大(张强等, 2011a, 2015a; Zhang, et al, 2018; Zhang, et al, 2019b)。并且,干旱灾害发生的频率和强度均呈增加态势,特大干旱事件更加频繁发生,干旱灾害的表现特征愈加异常,对人类生产、生活的危害日益加剧(IPCC, 2012)。

中国是干旱灾害发生频率最高且影响最严重的国家之一。20世纪70年代以来,影响中国大部分区域的东亚大气环流系统从对流层到平流层均发生了明显的年代际转折,中国旱涝格局呈现为北方易受旱灾影响、南方旱涝并发的特征,大范围的干旱灾害连年发生,农作物每年平均受旱 2.09×10^7 hm²,最高年份达 4.05×10^7 hm²,平均干旱成灾 8.87×10^6 hm²,最高年份达 2.68×10^7 hm²。每年造成的粮食减产从数百万吨到3000多万吨,干旱的直接经济损失高达440亿元/a(Buda, et al, 2018)。干旱灾害严重威胁着粮食和生态安全,已成为制约

社会经济可持续发展的重要因素之一。

中外对于干旱问题均做了大量研究工作(Tannehill, 1947; Charney, 1975; Wilhite, 1985; Wilhite, et al, 2000; Gao, et al, 2009; Dezfuli, et al, 2010; Ummenhofer, et al, 2011; Belayneh, et al, 2014), 已逐渐由对干旱的定性和表象认识, 发展到对干旱客观特征的定量认识和形成机理的深入揭示。自新中国成立成立以来, 中国的干旱研究取得了长足进展, 从只对一些重大干旱事件的零散研究逐步发展到与国际干旱研究的完全接轨。

干旱灾害的形成和发展过程不仅包含着复杂的动力学过程及多尺度的水分和能量循环机制, 而且还涉及气象、农业、水文、生态和社会经济等多个领域(张强等, 2015b)。中国大部分区域既处于东亚季风的两类子系统——“东亚热带季风(南海季风)”和“东亚副热带季风”重叠影响区, 又同时受西风环流、青藏高原季风的共同影响, 再加之生态系统的敏感性以及高强度人类活动影响等因素, 干旱气象灾害具有十分明显的区域性和复杂性, 对其成因和变化规律的认识还不够深入, 诸多新的科学问题还有待进一步研究(钱正安等, 2001; 丁一汇等, 2003, 2014, 2016; 黄荣辉等, 2003a, 2005; Ding, et al, 2014a, 2014b, 2015)。

目前, 干旱事件的相关研究很多, 但研究结果比较分散, 许多观点各异甚至相悖, 缺乏系统性梳理, 权威性凝练。尚未对干旱问题形成整体科学认识和系统宏观理论概念。鉴于此, 文中试图回顾总结新中国成立以来中国干旱研究的主要进展, 科学划分干旱事件研究的主要发展历程, 系统归纳凝练中国干旱研究的重要成果, 并以此为基础剖析干旱研究存在的问题和挑战, 提出解决问题的途径及未来研究方向和突破口。

2 干旱研究的发展阶段及其取得的主要科学认识

中国对于干旱问题的认识已经有很长的历史, 但比较系统地对于干旱进行研究分析应该是新中国成立之后的事。从新中国成立开始, 中国干旱事件的研究历程大致可以分为4个主要发展阶段。

2.1 干旱事件的现象特征和时、空分布规律研究进程

20世纪30年代美国发生了持续性干旱事件,

造成美国中、北部大平原区5个州的严重旱灾, 约250万人流离失所。该事件引发了全球对于干旱灾害的关注。1955年美国在新墨西哥州召开干旱会议, 明确了要以干旱灾害为重点研究方向(Hodge, et al, 1963; Dregne, 1970)。新中国成立之初, 中国自然灾害频发, 为了稳定农业生产, 力争旱涝保丰收, 开展了大规模干旱灾害调查(杨鑑初等, 1956; 萧廷奎等, 1964)。起初, 干旱研究工作受实测降水量资料的限制, 多以史料记载、群众经验及少量降水量记录为依据, 从干旱事件的现象特征入手, 分析干旱灾害特征及其危害。随着观测站网的完善和探测手段的不断进步, 逐步发展到对干旱时、空分布规律的认识。在这一发展过程中主要取得了如下几个方面的科学认识:

第一, 区域干旱事件年发生频率高、影响大, 大范围干旱事件虽然年发生频率不高, 但危害尤为严重。中国最严重的干旱是明朝崇祯年间的大旱, 从崇祯元年(1628年)陕北干旱起, 至1638年旱区扩及陕、晋、冀、豫、鲁和苏等省, 中心区连旱17 a。赤地千里, 民不聊生, 爆发了明末农民大起义。20世纪分别在1900、1928—1929、1934、1956—1961和1972年出现了大范围干旱。大范围干旱事件年发生频率为11%(任瑾等, 1989)。元、明、清三朝河南省共有654 a发生干旱, 以夏旱最多, 春旱次之, 冬旱最少, 季节连旱中以夏秋旱、春夏旱居多(萧廷奎等, 1964)。河北省在1368—1900年共有379 a发生了干旱, 其中夏旱最多, 次为春旱。1640、1641、1832和1877年河北省发生受旱范围广, 持续时间长的干旱事件(唐锡仁等, 1962); 1951—1980年黄土高原春旱频率最高的是宁夏北部(75%), 陇中与晋中紧随其后, 分别为57%和56%; 关中最少(30%), 其余大部分地区为37%—52%。随后, 黄土高原大部分区域夏旱形势更加严峻, 干旱频率比以往增大, 大旱几率明显增大。黄河流域以春旱为最严重(杨鑑初等, 1956; 任瑾等, 1989)。可见, 中国区域干旱事件年发生频率大多在50%以上, 黄土高原区域春季干旱年发生频率更高达75%; 华北、中原区域以夏旱为最。虽然大范围干旱事件年发生频率不高(11%), 但危害非常重, 应予以高度关注。

第二, 北方地区属干旱频发区, 但近年来南方地区干旱频次也明显增多。中国干旱的空间分布

存在显著的区域差异,东北地区西部、华北、黄淮、西北地区东部、内蒙古中东部、西南等区域年平均干旱日数普遍在 40 d 以上,华北中南部、黄淮东北部、西北地区东部以及吉林西部等年干旱日数甚至超过 60 d,北方地区总体属于干旱多发区域(Wang, et al, 2011; 钱维宏等, 2012; 廖要明等, 2017; 韩兰英等, 2019)。进入 21 世纪后,北方干旱仍然频繁发生的同时,南方地区干旱频次明显增多,季节性干旱事件增加尤为明显(黄晚华等, 2010; Sun, et al, 2012; Chen, et al, 2015)。其中,西南地区的四川南部、云南和贵州西部等地 2011—2014 年干旱频率达到了 50%(韩兰英等, 2014, 2019),重大干旱事件频发(黄荣辉等, 2012; 钱维宏等, 2012),2006 年重庆、四川遭受百年一遇的特大干旱,2009 年西南出现有气象记录以来最严重的秋—冬—春连旱;2009—2012 年云南发生连旱等。2002 年广东也发生罕见的冬—春连旱;2004 年整个华南地区遭遇了 1951 年以来最严重的秋—冬连旱;2007 年一场五十年一遇的特大干旱波及江南、华南及西南等区域。

第三,北方发生持续性干旱事件的概率大于南方地区,3 个月以上的较长干旱事件多发生在北方半干旱半湿润区及西南地区。干旱的形成和发展是地表水分亏缺不断积累的过程,干旱持续时间越长,产生的危害越重。中国北方区域发生持续性干旱事件的概率要大于南方地区,北方半干旱半湿润区常发生持续时间 3 个月以上的干旱事件,其发生

概率大部分区域大于 51.7%,燕山—太行山—秦岭—巫山—横断山脉一线的山地区域甚至高于 77.6%,持续 6 个月以上的干旱主要发生在西北地区及东北地区东部的半湿润区,发生概率通常高于 17.2%,局部区域会高于 31%,持续 12 个月以上的干旱主要发生在西北地区大部分区域以及华北、东北、黄淮的小部分区域,发生概率小于 15%。南方区域持续性干旱事件发生概率相对较低,主要出现在西南和华南局部区域(李明星等, 2015; Yu M X, et al, 2014; Wang, et al, 2018)。另外,中国持续性干旱事件起、止时间具有一定的区域差异,西南地区及华南地区的持续性干旱事件在秋季和初冬季频次最高,且大部分在春季结束(李忆平等, 2014; 李韵婕等, 2014);而西北中西部的大部分地区秋季开始的持续性干旱事件明显比其他季节多,在冬、春季结束的频次明显高于夏、秋季,夏季发生概率最小;东北区域秋季持续性干旱事件较少,其他季节出现频率均比较高(李忆平等, 2014)。

第四,旱灾受灾面积总体呈增大趋势,农作物因旱受灾面积和成灾面积趋于增大。从中国历年干旱灾害受旱和成灾面积的变化曲线(图 1)可见,20 世纪 50 年代以来,中国旱灾总体呈加重趋势,农作物因旱受灾和成灾面积趋于增大。尤其是华北、东北、西北地区东部、西南以及华南等显著干旱化(见马柱国等(2018)的图 3c),干旱程度加重,频次增多,旱区范围显著扩大(马柱国等, 2007; 邹旭恺

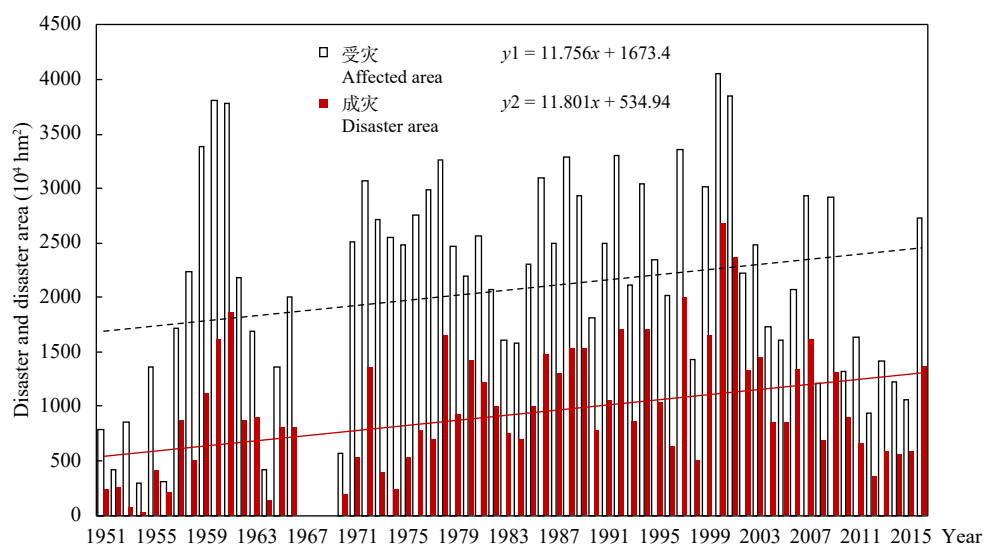


图 1 1951—2016 年中国因旱受灾和成灾面积变化

Fig. 1 Variations of areas affected and damaged by droughts in China from 1951 to 2016

等, 2008; Chen, et al, 2015; Li, et al, 2015; 李明星等, 2015; Huang, et al, 2016; 黄庆忠等, 2018)。进入 21 世纪后, 重大干旱事件明显增多(Wang, et al, 2011; 韩兰英等, 2019), 重旱到特旱面积每 10 a 增加 3.72%(Yu M X, et al, 2014)。

2.2 干旱形成机理及变化规律研究进程

引起干旱的因素很多, 包括气候波动、气候异常、气候变化和外强迫及水资源供需变化等及其协同作用。而且, 即使在同样的环流异常背景下, 干旱也往往是从生态环境相对脆弱的地区开始暴发而后再向周边扩展。干旱的发生和发展还往往表现为不同的时、空尺度, 干旱的多时、空尺度性及尺度之间交叉耦合问题使干旱的形成机制变得更加复杂。对干旱事件成因的认识远没有对干旱气候成因认识得清楚, 很多结论还比较定性甚至模糊(王绍武等, 1979)。为此, 中国学者从 20 世纪 80 年代起对中国干旱形成机理及变化规律开始逐步进行深入研究, 在这一发展过程中主要取得了如下几个方面的科学认识:

第一, 大气环流异常导致降水量时、空分布变异, 部分区域降水量减少, 形成区域干旱事件。中国气象灾害的发生主要由于东亚气候系统变化所引起(叶笃正等, 1996), 干旱气象灾害亦不例外, 主要受东亚气候系统变化影响。东亚气候系统成员主要有 3 类: (1) 在大气圈中有东亚季风(包括冬、夏季风)、西太平洋副热带高压、中纬度扰动; (2) 在海洋圈中有热带太平洋的厄尔尼诺和南方涛动循环(NESO 循环)、热带西太平洋暖池热力状态和印度洋的热力状态; (3) 在陆面与岩石圈有青藏高原的动力和热力作用、北冰洋海冰、欧亚积雪以及陆面过程, 特别是干旱和半干旱区的陆面过程(黄荣辉等, 2003b; 张庆云等, 2003a)。中国华北地区每当东亚夏季风弱年, 西太平洋副热带高压位置偏南, 华北地区夏季降水可能偏少, 这也是干旱事件发生的主要成因(张庆云等, 2003a, 2003b)。同时, 华北夏季旱年, 中高纬度地区以纬向环流为主, 华北地区处于“西高东低”的环流形势下, 受控于异常的偏北气流以及贝加尔湖高压脊的下沉气流, 且西太平洋副热带高压脊线位置偏南, 西伸脊点位置稍偏东, 这些环流形势均不利于华北地区夏季降水, 比较容易引发干旱事件(沈晓琳等, 2012; 邵小路等, 2014)。而西北干旱的环流场特征为 500 hPa 中

纬度(40°N)新疆高压脊强, 东亚槽深, 东亚中纬度北风强。高度距平场上, 新疆为正距平, 日本海为负距平, 形成“西正东负”的态势。西北区东部旱年夏季常盛行“上高(西部型南亚高压)下高(新疆高压脊或伊朗高压东伸上青藏高原)”形势。而西北区西部旱年夏季也常盛行“上高(西部型南亚高压)下高(中亚或新疆高压脊或伊朗高压东伸)组合流型”(钱正安等, 2001)。另外, 当西太平洋副热带高压脊线位置偏南, 脊线以北 8—9 个纬度的雨带位置也偏南, 雨带位于西北地区东部以南, 即夏季雨带不能北上影响西北地区东部时, 西北地区东部会出现干旱。脊线位置越偏南, 干旱程度越严重(钱正安等, 2001; 蔡英等, 2015; Zhang, et al, 2019a)。西北地区为正距平, 东亚沿海附近为负距平时形成偶极型的热力强迫异常, 也将导致西北地区东部夏季干旱。

进入 21 世纪以来, 西南地区也逐渐成为中国干旱发生频率较高的地区之一, 引起了社会各界广泛关注。例如, 2006/2007 和 2009/2010 年两次特大干旱及 2012/2013 年秋、冬、春季持续干旱, 均影响范围广, 经济损失严重。南支槽强度弱、孟加拉湾水汽输送少以及弱极涡背景下, 异常波活动造成的北极涛动(AO)负异常引起的冷空气路径偏东是西南地区持续干旱的共同特点(黄荣辉等, 2012; 胡学平等, 2014, 2015)。同时, 北大西洋年代际尺度振荡(AMO)通过激发全球尺度的斜压型遥相关(AMO-Northern Hemisphere teleconnection, ANH), 不但可以影响东亚地区的降水, 还可以影响从大西洋、欧亚直至北美地区的整个北半球降水的年代际变化。在东亚地区, ANH 遥相关引起的环流异常通常会使长江以北地区低层气旋式环流异常和长江流域反气旋式环流异常, 导致淮河流域降水多而长江流域降水少。另外, AMO 的正位相始终有利于长江以南的干旱(丁一汇等, 2018)。

第二, 植被退化、积雪增多或土地利用等陆面因子改变造成地表反照率增大, 会导致下沉运动加强, 抑制降水发生, 导致干旱。中国西北地区植被的退化(从植被覆盖到裸土)将减少地表吸收的辐射, 并引起较弱的地表热力作用, 这使得西北干旱区大部分区域上空对流层中层出现反气旋异常环流, 导致该区域大部分地区降水减少(Li, et al, 2010)。然而, 西北干旱区植被退化也会使青藏高原东北侧

上空对流层上层产生反气旋异常,在对流层中层产生气旋环流异常,从而引起青藏高原东北侧上空产生垂直上升运动,这些环流的变化会导致青藏高原东北部的降水增多(黄荣辉等,2012)。同时,积雪通过激发大气遥相关以及通过影响土壤湿度、温度分布及辐射状况,对同期和后期大气环流和东亚夏季风降水产生影响,进而对中国旱涝的发生及发展产生影响(张人禾等,2016)。有研究通过数值模拟表明:青藏高原南部冬、春积雪异常多,长江及其以北地区夏季降水较多,华南大部分地区夏季降水较少;而当青藏高原北部冬、春积雪异常多,华北及东北地区夏季降水多,长江下游南部地区夏季降水少,雨带更偏北(Wang C H, et al, 2017)。另外,欧亚大陆地面感热异常低(高),冷源作用强(弱),伴随夏季阻塞形势和蒙古气旋较强(弱),暖湿空气易(难)深入到北方,有利于北方干旱缓解(加重)(Jin, et al, 2015)。

第三,青藏高原从多个方面影响东亚干旱事件。第一方面是青藏高原通过屏障、侧边界力和下沉运动带等作用影响中国的干旱事件。首先,青藏高原阻碍了南亚西南季风的北上,其动力抬升作用的异常变化直接影响下游干旱的形成;同时,在夏季高原北侧对流层中,干旱年高层有比常年更强的经圈环流,下沉运动也更强。另外,青藏高原冬、春季地面感热异常变化也会影响中国干旱的形成。第二方面是大地形的动力和热力过程影响区域尺度的环流及干旱形成。青藏高原隆升不仅是新生代固体地球演化的重大事件之一,也被认为是地球气候和环境演化的重要驱动力,不仅改变了它本身的地貌和自然环境,而且对亚洲季风、亚洲内陆干旱至新生代全球气候变化都有深刻的影响(叶笃正等,1979;徐国昌等,1983)。青藏高原热力抬升作用影响到亚洲大部分区域,夏季高原的加热作用通过激发异常的大气环流,使得中亚、西北和华北的干旱事件加剧(Wu, et al, 1998, 2007, 2012; Liu, et al, 2007; 王同美等,2008)。当青藏高原冬、春季地面感热异常偏强时,造成后期对流层中上层高度场异常偏高,且高度场异常偏高的响应随时间从低层向高层传递,导致夏季副热带高压偏强、偏西,南亚高压偏强,使得中国南方夏季偏干;而当青藏高原冬、春季地面感热偏弱时,中国北方夏季偏干(Wang, et al, 2008, Wang C H, 2017)。第三方面

是在青藏高原北侧边界层中盛行西风,形成了一条东—西向的负涡度带。由此造成南疆东部、宁夏和甘肃中部一带由于气流过山的绕流和辐散,加大了那里的负涡度,并且使下沉运动增强,加剧该区域的干旱事件。第四方面是在青藏高原及邻近地区多年夏季平均的垂直运动场上,夏半年(4—9月)青藏高原上盛行较强的上升运动,而绕高原西、北和东北侧分布着下沉运动带,带中的3个下沉中心大体分别与中亚、西北和华北3个干旱及半干旱区对应,其下沉运动的异常变化和3个区干旱事件的强、弱显著相关。第五方面是由于青藏高原夏季为热源作用,500 hPa高度场形成暖高压脊,而西太平洋沿海区域相对较冷,是热汇区,在500 hPa高度场东亚中纬度沿海形成冷槽,500 hPa高度距平场上,西北地区为正距平,东亚沿海附近为负距平,造成西北地区东部上空偏北气流加强。这个偶极型强迫由一个区域热汇和一个区域热源构成。热汇位置对应西太平洋沿海区域,热源位置对应青藏高原。这种西高东低的高空形势会导致西北的干旱事件(罗哲贤,2005)。

第四,海温和海洋引起的环流异常是导致干旱事件的重要因子。海洋环境条件尤其是太平洋、大西洋或印度洋等海域的海表温度(SST)对全球各地降水量的分布有重要的影响(Ting, et al, 1997; Seager, et al, 2005; Mo, et al, 2009; Dai, 2013)。海表温度异常对1998—2002年发生在欧洲南部、非洲西南部及美国等地的大范围干旱影响较大(Hoerling, et al, 2003);伊朗西南部气象干旱与南方涛动指数(SOI)和北大西洋涛动(NAO)相关,6—8月的SOI与秋季降水呈显著负相关,春旱与10—12月的NAO相关系数超过0.5,但是冬旱不滞后于SOI和NAO(Dezfuli, et al, 2010);澳大利亚东南部干旱的归因是印度洋偶极子(IOD)和ENSO的共同影响(Ummenhofer, et al, 2011);冬季全球海表温度与欧洲夏季干旱存在明显的滞后关系(Findell, et al, 2010; Ionita, et al, 2012)。在全球变暖背景下,当北太平洋年代际变化减弱,太平洋年代际振荡(PDO)频率向高频移动,黑潮延伸体和副极地海洋西部的海表温度年代际变率振幅减弱最明显。北太平洋年代际变化减弱导致东亚夏季风强度减弱,会直接导致华北地区夏季降水量的减少。ENSO是热带海-气相互作用的主要模态,厄尔尼诺年冬季东

亚冬季风偏弱,西太平洋副热带高压偏强、偏北,水汽输送多,有利于东亚季风降水,拉尼娜年水汽输送则少,不利于华北地区降水(陶诗言等, 1998; 龚道溢等, 2003; 琚建华等, 2004; 陈文等, 2006; 林大伟等, 2018)。ENSO 事件对华北地区的干旱起主要的促进和加强作用(杨修群等, 2005; Gao, et al, 2009; 邵小路等, 2014)。例如, 2010 年秋、冬季发生在华北地区的持续性干旱即是叠加在降水减少气候趋势之上的极端干旱事件, 这次极端干旱事件主要成因是受到同期较强的北极涛动负位相和拉尼娜事件共同的影响(沈晓琳等, 2012)。ENSO 事件的不同阶段, 对中国夏季华北地区、江淮流域以及黄河流域干旱的影响不同(黄荣辉, 2006; 黄荣辉等, 2012)。5 月北太平洋涛动与华北夏季旱涝有较好的正相关, 北太平洋涛动指数(NPOI)正(负)位相异常年, 一般帕尔默干旱指数(PDSI)偏大(小), 华北地区夏季涝(旱)。北大西洋涛动与西北夏季降水第一模态降水相关较好, 北太平洋涛动与第二模态相关较好(郑秋月等, 2014)。

同时, 海洋作为水汽的重要源地, 可通过改变影响东亚地区季风(东亚季风和南亚季风)、西风带等气候系统水汽输送的强弱、路径、来源及汇合地等, 从而影响东亚地区干旱事件的发生(黄荣辉, 2006; Zhang H L, et al, 2016; Xing, et al, 2017)。东亚夏季风减弱导致季风携带的水汽在长江流域汇合, 输送到华北的水汽减少, 导致华北地区夏季降水减少, 发生干旱(丁一汇等, 2014; Zhu, et al, 2012; Zuo, et al, 2012)。南亚季风通过影响孟加拉湾水汽输送, 从而影响中亚及东亚夏季的干湿状况(Zhang, 2001; Zhao, et al, 2014)。自 20 世纪 80 年代以来, 南亚季风的增强和西风环流的减弱, 导致更多的水汽从印度洋经孟加拉湾和阿拉伯海输送到中亚, 这是近年来中亚干旱区降水增多的重要原因之一(Staubwasser, et al, 2006; Liu, et al, 2018)。西北干旱区夏季干、湿与东南沿海水汽输送密切相关, 来自孟加拉湾、中国南海等海域的水汽借助西行台风、西伸的西太平洋副热带高压及柴达木低压等多个天气系统和西太平洋副热带高压西南侧东南风急流、西侧南风低空急流及河西偏东风等 3 支气流输送到达西北内陆旱区, 影响着该区域干旱的形成(蔡英等, 2015)。

第五, 人类活动改变地表状况, 进而改变地-气

能量、动量和水分交换, 对区域干旱产生显著影响。人类活动已经并将继续改变地表状况。人类活动通过改变土地利用/覆盖, 进而改变地-气的能量、动量和水分交换, 对区域干旱产生显著影响(Findell, et al, 2007; Van Loon, et al, 2016; Huang, et al, 2017a, 2017b)。土地过垦、过牧及过采地下水等过度开发使得土地退化和生态环境恶化。尤其在半干旱地区, 退化的土地与区域干旱形成正反馈作用, 导致干旱不断加剧(Charney, 1975; Taylor, et al, 2002; Olson, et al, 2008; Sherwood, et al, 2014; Huang, et al, 2017c)。在东非的干旱/半干旱地区也发现了类似的正反馈机制。在研究美国 20 世纪 30 年代沙尘暴及北非大旱与人类活动的关系时, 也模拟检验了陆-气相互作用的正反馈致旱机制(Charney, 1975)。另外, 气溶胶即大气中颗粒物浓度增加不仅通过散射和吸收太阳辐射直接影响地表的辐射平衡、感热和潜热通量的输送, 而且通过对云的催化作用, 改变云的微物理量和降水效率, 进一步间接影响大气中的热量和水汽以及陆面水文和生态过程。一般在较干旱地区, 颗粒物增加抑制降水, 加速干旱进程, 加重了干旱强度(Fu, et al, 2014; Lin, et al, 2018; Zhao, et al, 2015; Huang, et al, 2016)。

第六, 开展了综合性的干旱气象科学研究和综合观测试验。为了提升北方干旱频发区防灾、减灾能力, 中国于 2015 年启动了“干旱气象科学研究(DroughtEX_China)”重大项目。该项目由中国气象局牵头实施, 在中国北方干旱半干旱地区通过常规、加密与特种观测以及野外模拟试验, 开展跨学科、综合性、系统性的干旱气象科学研究和综合观测试验(图 2), 在干旱灾害形成和发展过程、多尺度的大气-土壤-植被水分和能量循环机理、大气、农业、水文等相互关系方面取得了明显进展, 在干旱的准确监测、风险评估以及干旱早期预警等技术方面也取得了重要进步(李耀辉等, 2017; Li, et al, 2019)。

2.3 干旱灾害风险研究进程

为了适应对自然灾害从应急管理向风险管理的转变, 从 20 世纪 80 年代初开始, 国际上开展了自然灾害风险研究探索, 灾害学家试图从系统论角度认识自然灾害风险要素及相互作用(Burton, et al, 1993; Blaikie, et al, 1994)。中国的干旱灾害风险

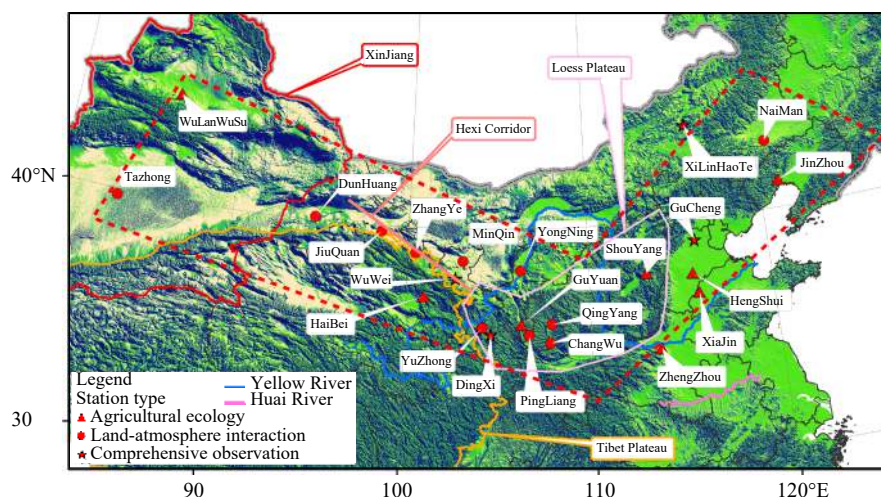


图 2 干旱气象科学研究外场观测试验站网布局

Fig. 2 The field observational experiment station network layout of drought meteorological scientific research

研究兴起于 21 世纪初,从干旱灾害风险机制、干旱灾害风险评估方法和中国干旱灾害风险特征等方面做了研究。在这一发展过程中主要取得了如下几个方面的科学认识:

第一,提出了干旱灾害风险形成的概念模型。干旱灾害风险形成机制主要有“二因子说”“三因子说”和“四因子说”等(张继权等, 2013)。IPCC 认为灾害风险是致灾因子、暴露度和脆弱性的函数(IPCC, 2014)。张强等(2017a)在灾害风险形成机理的基础上,引入了气候变化和人类活动的影响并考虑到孕灾环境的敏感性,提出了一个新的干旱灾害风险形成机理概念模型(图 3)。该概念模型能全面、客观地表征干旱灾害风险的形成机理,反映干旱灾害风险的可变性与动态过程特征。其形成的干旱灾害风险特征更加科学,更接近干旱灾害风险的本质。

第二,建立了分别基于风险因子、灾害损失概率统计分析和风险机理的干旱灾害风险评估方法。干旱灾害风险评估方法的建立是进行风险评估的基础。目前主要有基于风险因子的评估、基于灾害损失概率统计分析的评估和基于风险机理的评估等 3 种方法(尹占娥, 2012)。基于风险因子的评估方法是以风险影响因子为核心的风险评估体系,在方法上侧重于灾害风险指标的选取、优化以及权重的计算,具有全面和灵活的优点,但是只开展定性分析,评估结果的主观性较强(Huang, et al, 2014; Zhang Q, et al, 2016; Murthy, et al, 2015; 王

莺等, 2015; Thomas, et al, 2016)。基于灾害损失概率数理统计的干旱灾害风险建模与评估是指利用数理统计方法,对以往的干旱灾害实况数据进行统计分析,并找出干旱灾害风险分布演化规律,从而达到预测、评估未来干旱灾害风险的目的(张峭等, 2011; Belayneh, et al, 2014; 王文祥等, 2014; Wang Y, et al, 2017)。基于物理模型的风险评估方法是通过评估区域的自然灾害过程进行仿真建模,并以此进行风险分析评估,属于灾情预测或模拟,即通过借助于分布式水文模型、作物生长模型等系统平台对致灾因子的致灾过程进行仿真模拟,对各情景下的不利后果进行量化综合分析,最终获得不同气象灾害情景下的承灾体灾害风险情况。该方法的优点是可以细致描述灾害系统要素间的反馈机理,缺点是仿真建模的边界条件难以设定,涉及的许多参数难以获取,一般比较适合于较小区域或重点地区的灾害风险精细化分析评估(王志强等, 2012; Yu C Q, et al, 2014; Yue, et al, 2015)。

第三,干旱灾害风险主要呈现北高南低的分布格局,随着气候变暖干旱灾害风险明显升高。中国干旱灾害危险性主要呈现北高南低的分布格局(费振宇等, 2014)。张强等(2017a)对南方干旱灾害风险研究发现,重旱高风险区主要集中于西南。受气候变化影响,干旱灾害的形成和发展过程将变得更加复杂(Neelin, et al, 2006; Lu, et al, 2007; Kam, et al, 2016),全球农业产量波动幅度增大,粮食供给的不确定性增加。以往的观测及模拟结果

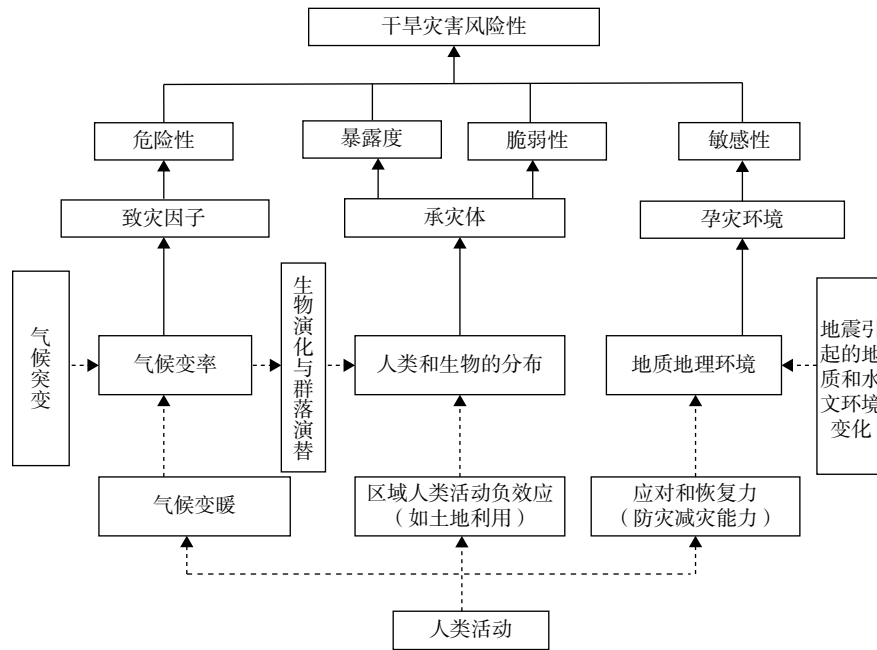


图3 干旱灾害风险形成机理概念模型(张强等, 2017a)

Fig. 3 Conceptual model of formation mechanism of drought disaster risk (Zhang, et al, 2017a)

(Wheeler, et al, 2013; Myers, et al, 2017; 刘立涛等, 2018; 姚玉璧等, 2018)表明, 气候变化已经对许多区域的主要粮食作物产量产生不利影响, 少量的正面影响一般见于高纬度地区。由此导致干旱灾害及其风险形成过程也出现了一些新的特征(张强等, 2014; 秦大河, 2015; Cheng, et al, 2016)。随着气候变暖, 干旱灾害发生频率、强度和受旱面积均增大, 干旱灾害风险增大; 高干旱风险区明显扩大(张强等, 2017a)。并且, 导致干旱灾害风险高值区向华北中部、东北西部、内蒙古东部扩展, 西北西部收缩(廖要明等, 2017)。Su等(2018)发现在全球升温 1.5℃ 条件的可持续发展途径下, 中国干旱损失将比 1986—2005 年高 10 倍, 比 2006—2015 年高 3 倍, 干旱风险显著提高(见 Su 等(2018)图 4)。中国的小麦干旱风险水平在 RCP8.5 情景下明显升高, 甘肃省的干旱灾害风险也同样明显增大(Wang Y, et al, 2017; Yue, et al, 2018)。

2.4 骤发性干旱事件研究进程

骤发性干旱是一种不同于传统慢过程的快速发展的短期干旱, 其突发性强、发展迅速、强度高, 对作物产量形成和水资源供给有严重影响, 在气候变暖背景下这类干旱日益突出, 引起了广泛关注。目前, 对骤发性干旱的定义尚未有广泛共识, 有学

者提出应以由于降雨亏缺、高温热浪或人类活动导致在半月或 1 个月内作物耕作层土壤水分出现异常偏低的干旱事件为骤发性干旱(Sun, et al, 2015; Mo, et al, 2015; Otkin, et al, 2018)。相对传统的缓慢发展干旱, 骤发性干旱具有发生迅速的显著特征, 对社会经济影响严重, 对其监测和预测提出了更高的要求。在目前所知的尺度上, 只有在气象干旱情况下才会出现骤发性干旱, 其他类型干旱情况下不一定会出现。中国骤发性干旱的研究兴起于 2010 年之后, 在这一发展过程主要取得了如下几个方面的科学认识:

第一, 揭示了两类骤发性干旱的主要特征。I 型骤发性干旱主要受高温驱动, 并伴随蒸散发作用增强和土壤湿度的降低; II 型骤发性干旱主要由严重的水分亏缺引起, 从而引发土壤快速变干和植被蒸散发能力的减弱(Mo, et al, 2015; Wang, et al, 2016, Wang P Y, et al, 2017)。I 型骤发性干旱多发生在湿润和半湿润区(见 Wang 等(2018)的图 1a), 中国南方是这类骤发性干旱的高发区, 平均每 10 a 发生 12—18 次, 平均持续 6—7 d, 其次是华北和东北地区, 平均每 10 a 发生 3—9 次, 平均持续 5 d; 而 II 型骤发性干旱较易发生在半干旱地区(如中国北方, 见 Wang 等(2018)的图 1b), 平均每

10 a 发生 9—15 次,持续 7—8 d。生长季(4—9 月)内, I 型骤发性干旱在南方出现次数是北方的 2—3 倍,多发生在 7 月,而 II 型骤发性干旱在北方出现次数是南方的 2 倍,多发生在春末夏初。近几十年来,中国两类骤发性干旱均呈现显著增多的趋势(Wang, et al, 2016, 2018; Zhang, et al, 2017; 张翔等, 2018),仅 1979—2010 年 I 型骤发性干旱的发生次数就增加了 129%, II 型骤发性干旱次数也增加了 59%(Wang, et al, 2018)。通常情况下,反气旋环流异常为骤发性干旱的发生提供有利条件,但由于不同地区气候、植被和土壤条件的不同,两类骤发性干旱的分布存在较大差异。中国南方,由于水汽较为充足,蒸散发主要受到能量控制,温度升高极易引发蒸散发快速增加并导致干旱,正因为如此, I 型骤发性干旱更易发生在南方等湿润地区,并且约有 15% 的骤发性干旱发生在季节性干旱的爆发阶段。相反,北方由于长期水分供给不足,发生降水短缺时更易导致土壤湿度的快速降低从而引发 II 型骤发性干旱,且该地区骤发干旱较易发生在季节干旱的爆发阶段和恢复阶段,其中, 19% 的骤发性干旱发生在季节干旱的爆发阶段, 18% 的骤发性干旱发生在季节干旱的恢复阶段(Wang, et al, 2018; 张翔等, 2018)。

第二,长期气候变暖导致骤发性干旱显著增加。长期变暖是造成骤发性干旱增加的主要原因,其贡献可达 50.1%,其次是土壤湿度下降和蒸散发作用增强的影响,贡献分别为 37.7% 和 13.8%(Wang, et al, 2016)。中国湿润和半湿润区水分较为充足,蒸散发主要受能量控制,高温极易导致蒸散发增大,进而使得土壤水分迅速降低,一般在 I 型骤发性干旱发生前约 10 d 存在土壤湿度的快速降低。而在干旱和半干旱地区,受地表水分和植被条件的限制,土壤水分亏缺引起蒸散发降低,进而使地表温度上升、土壤水分迅速降低引发 II 型骤发性干旱。一般在 II 型骤发性干旱爆发前 10 d 已有一定的土壤水分亏缺,若 II 型骤发性干旱出现后降水仍持续偏少,则有可能引发季节性干旱(Zhang, et al, 2017; Wang, et al, 2018)。

第三,骤发性干旱与传统持续性干旱既有共性又有显著差异(表 1)。共性主要为:气候特征均表现为气候异常,前提条件均是降水亏缺,空间尺度均会出现局地干旱、区域干旱甚至洲际干旱,陆-气

互馈关系演变均由能量约束型转化为水分约束型,危害性均强,监测、预测难度均较大。其差异主要为:就发展而言,前者发展速度快,而后者缓慢;就发生频率而言,前者发生频率较低,而后者发生频率较高;就持续的时间尺度而言,前者一般为季节内时间尺度,而后者一般可持续到季节、年际、年代时间尺度;就主导因子而言,前者是多气象要素异常所致,而后者主要是降水亏缺造成;就发生的时间而言,前者多在春、夏季,而后者全年均可发生;就发生的区域而言,前者多发生在农田或植被茂盛区,而后者在任何区域均可能出现;就干旱程度而言,前者一般为严重或极端干旱,而后者轻旱、重旱、极端干旱均有;就涉及的干旱类型而言,前者多以气象干旱、农业干旱、生态干旱为主,而后者气象干旱、农业干旱、生态干旱、水文干旱、社会干旱均会出现;就影响程度而言,前者往往影响严重、破坏性强,而后者影响深远而广;就孕育过程而言,前者突发性强、猝不及防,而后者具有隐蔽性、觉察到为时已晚;就需要监测的主要要素而言,前者包括蒸散、饱和水汽压差、水分供需平衡值、气温,而后者则以监测降水为主;就先兆特征而言,前者蒸散量由快速增大转为减小,而后者蒸散量低且无显著变化。

关于中国干旱事件研究发展进程的标志性成果和主要事件在表 2 中进行了简要归纳,基本反映了中国干旱事件研究的历史脉络。

3 干旱研究的科学问题与展望

自新中国成立以来,中国已在干旱气象灾害形成机理、时空变化特征、干旱风险特征及减灾防灾技术等方面取得了较大进展,并已逐渐融入国际干旱研究的主流体系。但由于干旱气象科学问题的广泛性、复杂性及中国干旱问题的特殊性、区域差异性,加之中国社会经济发展对干旱防灾、减灾要求的不断提高,中国干旱研究仍存在许多问题和挑战需要解决。比如,支撑干旱研究的针对性强的综合性野外科学试验仍然比较缺乏,对干旱形成的多因子协同作用机理及多尺度叠加效应缺乏深入认识,涉及陆-气相互作用对干旱形成影响的研究仍然很少,干旱判别及监测、预测技术明显缺乏对骤发性干旱的针对性,对气象、农业、生态和水文干旱的转变规律和非一致性特征认识不足,在干旱影响

表 1 骤发性干旱与传统干旱的对比
Table 1 Comparison between flash drought and Traditional drought

属性	骤发性干旱	传统干旱
发展速度	快速	缓慢
发生频率	不常发生	频发
时间尺度	季节内	月到年际、年代尺度
主导因子	多气象要素异常	降水亏缺
多发时间	春、夏季	全年都有可能
多发地区	农田或植被茂盛区	任何区域
干旱程度	严重或极端干旱	轻旱到极端严重干旱
涉及干旱类型	以气象干旱、农业干旱、生态干旱为主	气象干旱、农业干旱、生态干旱、水文干旱、社会干旱
影响方式	影响严重、破坏性强	影响深远而广
预防难度	突发性、猝不及防	隐蔽性、觉察到为时已晚
监测要素	蒸散、饱和水汽压差、水分供需平衡值	降水和温度
先兆特征	蒸散量由快速增加转为减弱、减少	蒸散量低并没有显著变化

气候表现	气候异常	
前提条件	以降水亏缺为前提	
空间尺度	局地、区域甚至洲际尺度	
陆-气互馈关系及演变	由能量约束型转化为水分约束型	
危害性	危害性强	
监测预测	难度大	

评估模型中对干旱关键影响期特征考虑不够, 干旱对气候变暖的响应规律也缺乏深入理解, 干旱灾害风险评估模型的科学严谨性还有待提高等。不过, 随着观测技术的快速进步以及多源数据和再分析资料的不断丰富与提高, 加之气候数值模拟技术的不断发展, 对这些问题的解决逐渐成为可能, 未来干旱研究有望在一些关键科学问题上取得新的突破。

第一, 典型干旱频发区综合性干旱科学试验研究。虽然国际上已相继展开过一些与干旱有关的科学观测试验, 但以往许多试验在陆-气能量、水分和物质循环等方面的长时间、多要素的系统观测明显不足。目前刚刚完成的“干旱气象科学研究——我国北方干旱致灾过程及机理”在中国北方构建了干旱气象综合观测试验体系, 形成了从新疆—西北中部—华北广大范围的“V”字型观测布局, 并对该区域干旱发生、发展过程中陆-气相互作用机理、干旱的致灾和解除过程特征、干旱指数的区域改进等方面进行了连续观测试验研究, 在区域多时间尺度干旱形成的物理机制、重大干旱形成、发展的概念模型、农业干旱灾害风险评估模型及干旱风险区划等方面取得了一些新的研究进展(李耀辉等, 2017;

Li, et al, 2019)。但是目前的干旱试验研究还明显缺乏专门聚焦干旱频发区的工作, 而且试验设计和布局也缺乏与干旱形成机理和分布特征的科学针对性, 观测试验与气候模拟研究的结合还不够充分。尤其在中国夏季风影响过渡区分布着北方干旱频发带和西南重旱多发区, 这些区域的干旱事件还呈现出在气候变暖背景下不断增加的趋势(黄荣辉等, 2012; 钱维宏等, 2012; 韩兰英等, 2014, 2019)。当前, 特别需要在这些典型区域开展明确针对干旱形成机理和发展特征的综合性干旱科学试验, 对干旱事件的形成和发展进行解剖式分析和机理性研究, 深入认识干旱环流的精细化动力和热力结构及发展过程的气候动力学特征, 以彻底揭示干旱发生、发展的深层次内在规律。

第二, 干旱形成的多因子协同作用及多时间尺度叠加效应。中国干旱的形成和发展有其特殊性和复杂性, 它不仅受季风环流和西风带环流的共同影响, 而且季风系统本身也存在东亚季风和印度季风等季风分支的各自不同影响及其相互协同作用。不仅有青藏高原大地形的积雪和植被变化造成的热力异常影响, 也有局地陆-气相互作用的显著

表 2 中国干旱事件研究发展过程的标志性成果和主要事件
Table 2 The landmark achievements and major events for the research stages of drought events in China

阶段	兴起时间	主要成果	重要项目	重要会议及重要奖励	备注
干旱事件的现象特征和时空分布研究发展过程	新中国成立以来(1949年)	<ul style="list-style-type: none"> •区域干旱事件年发生频率高、影响大;大范围干旱事件虽然年发生频率不高,但危害尤为严重。 •北方是干旱多发区域。进入21世纪后,北方干旱仍然频繁发生的同时,南方地区干旱频次明显增加。 •北方发生持续性干旱事件的概率大于南方地区,3个月以上的干旱过程多发生在北方半干旱和半湿润区及西南。 •旱灾受灾面积总体呈加重趋势,农作物因旱受灾面积和成灾面积趋于增加。 	<ul style="list-style-type: none"> •1958年中国科学院在甘肃省委支持下成立工作组率领7个小分队共2000余人分赴祁连山区进行大面积雪面黑化、融冰化雪的调查和研究,试图缓解西北干旱问题。 •20世纪60年代中期,中国科学院兰州高原大气物理研究所和甘肃省气象局协作进行河西干热风的野外观测、预报和防御研究。 •国家科委“八五”攻关项目(85-006)增补专题“华北农业干旱监测预报与影响评估技术研究”。 	<ul style="list-style-type: none"> •2003年“短期气候预测系统的研究”获国家科技进步一等奖。 	<ul style="list-style-type: none"> •1958年成立了“中国科学院改变西北干旱面貌组”,同年底成立了“中国科学院兰州地球物理研究所”开始干旱研究工作。
干旱形成机理及变化规律研究发展过程	改革开放以来(1980年前后)	<ul style="list-style-type: none"> •大气环流异常导致降水量时、空分布变异,部分区域降水量减少,形成该区域干旱事件。 •植被退化、积雪增加或土地利用等陆面因子改变造成地表反照率增大,会导致下沉运动加强,抑制降水发生,导致干旱。 •青藏高原的动力和热力过程影响东亚干旱事件。 •海洋条件尤其是太平洋、大西洋或印度洋各海域的海表面温度对全球降水的产生有重要的影响,海温异常是形成干旱事件的重要因子。 •人类活动改变地表状况,进而改变大气和地表之间的能量、动量和水分交换,对区域干旱显著影响。 	<ul style="list-style-type: none"> •1998年启动国家重点基础研究发展计划(973计划)“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论研究”。 •2011年启动国家重点基础研究发展计划(973计划)“全球气候变化对气候灾害的影响及区域适应研究”。 •2015年启动行业重大专项“干旱气象科学研究——我国北方干旱致灾过程及机理”。 	<ul style="list-style-type: none"> •2004、2007、2010年分别在兰州举办了“干旱气候变化与可持续发展国际学术研讨会”。 •2013年“中国西北干旱气象灾害监测预警及减灾技术”获国家科技进步二等奖。 	<ul style="list-style-type: none"> •1986年,中国气象局批准成立“兰州干旱气象研究所”。 •2002年,成立“中国气象局兰州干旱气象研究所”,作为中国气象局“一院八所”之一。 •丁一汇.2008.《中国气象灾害大典·综合卷》 •宋连春,邓振镛,董安祥.2002.《干旱》。 •张书余.2008.《干旱气象学》。 •张强,潘学标,马柱国.2009.《干旱》。
干旱灾害风险研究发展过程	进入21世纪以来(2000年前后)	<ul style="list-style-type: none"> •提出了干旱灾害风险形成机理新的概念模型。 •开展了基于风险因子、灾害损失概率统计分析和风险机理等评估方法的干旱灾害风险评估。 •干旱灾害危险性主要呈现北高南低的分布格局。 	<ul style="list-style-type: none"> •2013年启动国家重点基础研究发展计划(973计划)“气候变化背景下我国南方旱涝灾害风险评估与对策研究”。 		<ul style="list-style-type: none"> •张强,王劲松,姚玉璧.2017.《干旱灾害风险及其管理》。 •张强,尹宪志,王胜.2017.《走进干旱世界》。
骤发性干旱研究发展过程	近10年以来(2010年前后)	<ul style="list-style-type: none"> •中国有两类突出的骤发性干旱。 •骤发干旱的增加主要是长期变暖造成的。 •骤发性干旱与传统持续性干旱既有共性又有显著差异。 			

热力和水分贡献。既有关键海洋区海温异常的影响,又有全球不同大陆区域陆面过程的遥相关作用。因此,如果只从单个因素或某几个因素去认识干旱形成和发展的机理是不够的,基于这样的认识

所建立的预测方法也会在很多时候失去效用。更不用说干旱事件还具有多时间尺度特征,它可以包括从旬到年代甚至更长时间尺度范围,有些较轻的干旱也许只是单一时间尺度的干旱事件,而重大干

旱大多都是多个时间尺度叠加或转换形成的(张强等, 2017d), 一般至少会包含具有一定规律性的季节尺度干旱和规律性较差的年际或年代尺度干旱, 或者由季节性干旱发展转换为长时间尺度的干旱。所以, 应该对干旱形成的多因子协同作用及多时间尺度叠加和转换效应进行深入研究, 把握多因子协同作用规律和多尺度叠加转换特征, 建立能够同时考虑多因子协同组合作用和多尺度干旱变化规律的干旱预测系统, 以提高对重大干旱事件的监测、预测能力。

应该充分重视干旱发生与结束具有显著的非对称性特征。这主要是由于地表实际蒸散受蒸发潜力约束, 干旱发展过程一般比较缓慢, 而降水在理论上没有极限约束, 一场大雨就可能会使干旱结束, 出现旱涝急转(封国林等, 2012)。所以, 对干旱结束时间的预测技术难度更大, 需要加强对干旱事件结束规律的认识, 以提升干旱结束时间的预测能力。

第三, 陆-气相互作用对干旱形成发展的作用。以往比较重视大气环流因素在干旱形成中的作用, 在许多研究中忽视了陆-气相互作用的影响, 即使涉及到了也主要是从陆面强迫的角度进行简单考虑, 这也许正是影响目前干旱预测准确率的主要原因之一。已有研究(Seneviratne, et al, 2006)表明, 在气候过渡带和干旱频发区, 陆-气耦合度要明显更强, 陆-气相互作用对干旱的贡献可以与大气环流的贡献基本相当, 甚至有时可能还会超过大气环流的贡献。在陆-气相互作用过程中, 陆面热力、水分和生理生态的耦合作用对干旱信号的传递及致灾过程也十分关键, 它是把气象干旱与农业、生态和水文干旱联系起来的重要物理环节。所以, 应该将数值模拟、观测试验、遥感反演和理论研究等方法相结合, 系统分析干旱事件形成和发展的陆面过程、大气边界层及大气边界层与自由大气相互作用的动力、热力和水分特征, 研究从土壤→植被→边界层→对流层→平流层的能量、水分和动能的交换和输送过程, 揭示干旱事件中陆-气相互作用对大气环流和季风变化的影响机理, 建立针对重大干旱事件的大气-土壤-植被的水分和能量循环过程特征及其与大气环流和季风的关系(张强等, 1997, 1999, 2012b, 2017c)。由此, 可为区域干旱预测理论和气候数值模式的改进提供新的理论依据, 为干

旱监测和预测技术的发展提供新的科学认识。

第四, 骤发性干旱的判别及监测预测。以往认为干旱事件的形成和发展是一个相对缓慢的过程, 所以干旱监测、预测技术更多是针对传统的渐变干旱事件而建立的(Tsegaye, et al, 2007; Brown, et al, 2008; 邹旭恺等, 2008)。干旱监测技术要求的监测产品的时间间隔相对较长, 但要能分辨干旱要素的微量变化。预测方法也更多是针对季节或年际时间长度的预测。而近年发生比较频繁的骤发性干旱(Zhao, et al, 2012; Wang, et al, 2016, 2018)具有迅速发展的显著特征, 对社会经济影响严重, 对其监测, 判识和预测提出了更高的要求(Otkin, et al, 2016, 2018)。目前对骤发性干旱发生、发展的准确判别还比较困难, 缺乏判识其发生、发展的客观定量阈值标准, 对不同区域和不同干旱影响对象而言, 阈值标准存在显著差异。骤发性干旱发展到一定程度也可能会转变为传统的缓变干旱, 在不同时间尺度上表现出截然不同的两种干旱特征。对骤发性干旱的监测技术要求至少要达到候或周的时间间隔, 要能够及时捕捉到干旱要素的快速变化, 对其预测要更加关注季节内的预测, 及时掌握可能在1—2月内发生的干旱事件。目前, 高密度干旱监测技术和季节内的预测本身还是个难题, 需要在多源资料与多模式模拟资料结合利用的基础上发展能够进行周时间间隔发布的干旱监测指数, 并发展动力与统计相结合的季节内气候预测方法, 实现对骤发性干旱的准确、及时判别和监测、预测。

第五, 气象、农业、生态和水文干旱的转变规律及其非一致性特征。在大气降水累计亏缺的前提下就必然会出现气象干旱, 然后会经历气象干旱→农业干旱→水文干旱→生态干旱→社会经济干旱这样一个链条式传递过程, 农业干旱、水文干旱、生态干旱和社会经济干旱的内部发展进程中也可能存在明显的传递过程。例如, 农业干旱或生态干旱内部是土壤干旱→作物(或植被)生理干旱→作物(或植被)生态干旱→作物经济产量下降(或植被状况变差)→农业(生态)效益降低。不过, 这个传递过程并不会必然发生, 它们是有条件性地往下传递, 只有在前面干旱指标达到一定阈值后才会继续往下传递。如果干旱传递到作物生理干旱之前就被阻断, 就不会对作物生理、生态造成伤害, 更不会形成灾害, 可以进行可逆性恢复。但如果已经传递

到了作物生态干旱,干旱灾害影响就不可逆转了。所以出现了气象干旱,可能不会出现农业干旱,出现了农业干旱也不一定会出现水文干旱或生态干旱。不过,在内陆河灌溉农业区,一般水文干旱还可能会出现在农业干旱之前。

如果遇到较长期的重大干旱,也许气象干旱和农业干旱已经解除了,但水文干旱和生态干旱可能依然长期存在,也有可能存在水文或生态干旱时并没有农业干旱或气象干旱存在,气象、农业、生态和水文干旱之间具有一定的非一致性特征。所以,从科学角度讲,针对气象、农业、生态和水文的干旱指数只是反映了干旱发展的不同阶段,不需要追求发布出一致的气象、农业、生态和水文干旱监测结论,而需要充分了解气象、农业、生态、水文和社会干旱的内在关系,揭示它们之间的传递规律、阈值标准和非一致性特征,实现对干旱发生、发展的全程监测,发挥逐级预警作用,才能及时把握干旱发展的动态,形成对干旱进行提前预判和共同防御的多部门合力。

第六,气候要素对农业干旱发展过程的关键影响期特征。一般会以某个干旱指数或干旱要素的变化来分析农业干旱发展的状态,但这种做法在很多情况下会做出不准确甚至错误的判断。这是因为在农作物生长季节,不同生长阶段对水分的需求显著不同。这就意味着,作物不同生长阶段对气象干旱指数或干旱影响要素的敏感性差异很大,在关键影响期作物对水分需求旺盛,对干旱指数或干旱影响要素很敏感;而在非关键影响期作物对水分的需求较弱,对干旱指数或干旱影响要素不太敏感。甚至在成熟期还需要干晒的气候条件,降水反而会起到不利的作用。所以,在分析干旱发展或评估干旱影响时,应该针对特定地区和特定作物的各个生长阶段赋予干旱指数或干旱要素的影响权重,这样才能够准确分析和判断农业干旱的发展趋势或影响程度。然而,目前对作物关键影响期的认识还比较有限,十分缺乏对作物生长阶段的影响权重分布的准确了解,更何况不同地区和不同作物类型的影响权重分布规律也会差异很大,甚至这种权重分布还会随着气候变暖进行动态调整。其实,农业干旱的这种关键影响特征在生态干旱发展过程中也会有类似的表现。所以,目前需要针对不同地区和不同类型的作物或植被,分析它们在生长过程中对于

干旱的敏感性特征,研究针对不同地区和不同作物或植被类型的生长期影响权重分布规律,建立将干旱监测指数与影响权重相结合的干旱监测指标。

第七,干旱对气候变暖响应的复杂性。干旱对气候变暖响应的复杂性主要在于几乎影响干旱形成和发展的所有因素都会对气候变暖做出响应甚至连锁反应。许多因素对气候变暖的响应还十分复杂,它们既可以通过不同途径进行多重响应,也可以通过直接或间接方式进行多方式响应。比如,干旱形成的最主要因素——降水的变化就是最明显的例子,很显然它并不会随温度变化表现出某种必然变化趋势,而是在不同区域和不同时段对气候变暖的响应具有明显的差异。类似地表蒸散这样的主要干旱影响因子对气候变暖的响应受气候和环境背景的影响均很大,在不同区域之间甚至会表现出截然相反的响应趋势(张强等,2018)。在干旱形成和发展过程中,气温-蒸发-湿度-降水的相互作用与反馈也并不是简单的线性过程,而往往表现为相当复杂的多层次、多途径交叉耦合过程。所以,要准确预测或预估气候变暖背景下干旱的发展趋势或者评估干旱的响应程度其实并不是一件很容易的事,目前给出的不少研究结果也许只是反映了干旱对气候变暖的某种方式或某种条件下的响应特征。需要充分认识干旱对气候变暖响应的复杂性,系统了解气候变暖对各种干旱形成因子的作用过程,深入揭示气候变暖对干旱形成与发展的影响机理。只有这样才会对气候变暖背景下干旱发展趋势及其影响程度做出准确的预判。

第八,干旱灾害风险的科学评估及其风险管理理念的实现。干旱灾害风险是由干旱致灾因子的危险性、孕灾环境的敏感性、承灾体的脆弱性和暴露度等多种因素影响,而且还具有突出的动态和非线性影响特征。由于对孕灾环境的作用机理和承灾体的社会经济属性认识不足及其数据信息的缺乏,目前对干旱灾害风险进行科学评估还比较困难。同时,由于干旱致灾因子在干旱灾害风险中的主导作用,很多时候就简单地用干旱致灾因子的危险性来代替干旱灾害的风险,即使有时候考虑了孕灾环境和承灾体因素,也往往由于这两种因素表征指标的合理性及指标中参数和数据的不完整性,只能在一定程度上反映孕灾环境和承灾体的作用。

气候变暖不仅会使干旱致灾因子的危险性发

生变化,而且还会使干旱灾害承灾体的脆弱性和孕灾环境的敏感性不断调整。气候变暖正在使干旱致灾因子的危险性呈增加趋势,且其不稳定性也在增强;孕灾环境中由气象干旱向水文干旱、农业干旱和生态干旱的传递进程也在加快。所以,需要干旱灾害风险模型能够反映干旱灾害风险受气候变暖影响的动态特征。目前干旱灾害风险评估模型都只能进行静态评估,不符合干旱灾害风险的动态变化特征点,需要在干旱评估模型中增加能够反映气候变暖影响的作用因子。

目前干旱灾害风险评估模型在风险形成及气候变暖影响机理、风险表达、方法的合理性、数据和参数的完整性等方面均有明显不足。需要加强干旱灾害风险形成规律及其评估方法的基础性研究,在深入认识干旱灾害风险因子作用机理及其对气候变暖响应机制的基础上,揭示干旱致灾因子、载体、孕灾环境的相互作用关系,提出物理内涵清晰的干旱灾害风险的数学表达方式,通过多源资料融合使用,建立科学合理的灾害风险评估模型。

从干旱灾害的风险管理理念角度讲,应该建立其技术、机制和政策相互匹配的科学有效的干旱灾害风险管理体系(张强等,2015a,2017b)。干旱灾害风险管理是目前国际上公认的科学应对干旱灾害的策略,其意义在于通过对干旱灾害风险及早预警,指导政府和决策部门及时采取减缓干旱灾害风险的应对措施,动员社会人力和物力,采取预防、减缓和防备等行为,有效地避免、减少或转移干旱灾害的不利影响,以达到降低风险和防旱减灾的目的,实现经济和社会效益最大化(Fisher, et al, 1995; 马柱国, 2007; 张强等, 2015a; Zhang H L, et al, 2016, Zhang Q, et al, 2016; McNeeley, et al, 2016)。这其中不仅需要专业技术机构通过干旱灾害风险评估对未来风险做出准确研判,还需要包括行政指令和组织机构的效能发挥、干旱防御政策和策略的贯彻落实,以及干旱灾害应对能力的提高等方面在内的系统化组织过程。所以建立能够体现风险管理理念的干旱灾害风险管理系统及其支持和保障其运行的制度和机制体系是十分必要的。

4 结 语

自新中国成立以来,中国干旱研究主要在重大

干旱事件的认识、干旱时空分布规律、干旱灾害的形成机理、干旱影响特征、干旱灾害风险特征和骤发性干旱等方面取得了许多重要成果和明显进步。中国干旱研究已彻底摆脱了传统意义上只关注降水的局面,已与多种气候要素变化、全球变化、生态环境、社会经济与可持续发展等紧密结合,成为多学科交叉特征突出和综合性显著的国际关注的焦点学科领域。不过,正是由于干旱不仅是一个多学科交叉的科学问题,而且在中国还有其独特性,再加之全球气候变暖和社会快速变化的影响,使中国干旱问题的复杂性进一步增大,中国干旱研究仍面临许多重要挑战,还需进一步加大科研力量和资源投入,加快发展,优先解决一些突出的关键科学问题,快速提升对干旱的防灾、减灾技术能力。

当前,广泛的社会需求和快速的科技进步,既是干旱气象科技迅速发展的需求牵引力,又是技术驱动力。一方面,社会经济发展对干旱防灾、减灾的依赖性增强,全球气候变化使干旱的影响日益显著,为干旱气象科学研究提出了许多新的科学问题和发展需求。另一方面,社会经济发展带来的科技投入增加,中国综合气象观测体系不断完善,卫星遥感和大气数值模拟技术的不断发展,又为干旱气象科学研究提供了良好的基础条件和难得的发展动力。突破和解决干旱气象领域关键科学问题的迫切性和可能性均日益增加。

对于干旱问题的研究而言,它的理论性和实践性都很强,必须遵循“针对关键干旱科学问题→科学试验→理论研究→技术研发→业务应用”的全链条式科学问题驱动发展思路,在深入揭示干旱事件表现特征和形成机理的基础上,对干旱监测、预测和风险评估技术实现新的突破,建立针对不同区域干旱特征的干旱防御技术体系,以干旱科技创新提升中国干旱气象业务现代化水平。

近年来,随着现代卫星遥感对地观测系统的快速发展,遥感技术对干旱的监测能力进一步提高,数学和物理等基础科学及数值模拟技术、大数据+智能技术等应用技术的不断发展,可以在最新的大数据与数据挖掘技术方法基础上,利用可见光遥感和微波遥感数据构建的高分辨率的遥感干旱监测系统,形成包括气象资料、地理信息、下垫面

状况、植被特征、土壤类型、土地利用和植物生理生态资料等多学科集成的干旱监测体系,可为干旱研究提出强有力的科学数据支撑。

目前,中国国家级干旱气象观测试验网正在日趋完善,并且以《中国干旱气象科学试验研究计划》为蓝本,正在开展的“干旱气象科学研究——我国北方干旱致灾过程及机理”和“我国典型夏季风影响过渡区陆-气相互作用及其对夏季风响应研究”等一系列重大科学项目,正在针对中国干旱灾害形成机制、变化规律、干旱灾害传递过程、多尺度干旱监测预警技术和干旱灾害风险特征等重大科学问题,集中优势力量进行科技攻关,必将会在干旱研究方面取得一些新的进展,可以更好地满足当前中国干旱气象业务现代化发展的科技需要。

从长远来看,国家以及世界气象组织和联合国粮食和农业组织等一些国际组织都将干旱问题研究作为优先研究主题,国家防灾、减灾和应对气候变化也将干旱防灾、减灾作为主要任务。所以,中国干旱气象科学长远发展必须既要瞄准国际干旱研究前沿与热点,也要充分结合中国建设现代化气象强国的干旱技术需求,科学制定中国干旱气象研究的未来规划,明确干旱气象科学的优先发展方向,针对典型干旱频发区综合性干旱科学试验、干旱形成的多因子协同作用及多尺度叠加转换效应、陆-气相互作用对干旱形成发展的作用、骤发性干旱的判别及监测预测技术、各类干旱之间传递规律及其非一致性特征、气候要素对农业干旱发展过程的关键影响期特征、干旱对气候变暖响应的复杂性、干旱灾害风险的科学评估及其风险管理理念的实现等关键科学问题,有计划、分步骤推进干旱气象研究重大科研项目的实施,促进中国干旱气象科技创新,逐步达到中国干旱气象科技水平在国际上的领先地位。

参考文献

蔡英,宋敏红,钱正安等. 2015. 西北干旱区夏季强干、湿事件降水环流及水汽输送的再分析. *高原气象*, 34(3): 597-610. Cai Y, Song M H, Qian Z A, et al. 2015. Reanalyses of precipitation circulation and vapor transportation of severe dry and wet events in summer in arid region of Northwest China. *Plateau Meteor*, 34(3): 597-610 (in Chinese)

陈文,康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. *大气科学*, 30(5): 863-870. Chen W, Kang L H. 2006.

Linkage between the arctic oscillation and winter climate over east Asia on the interannual timescale: Aoles of quasi-stationary planetary waves. *Chinese J Atmos Sci*, 30(5): 863-870 (in Chinese)

丁一汇,张锦,徐影等. 2003. 气候系统的演变及其预测. 北京: 气象出版社, 75-79. Ding Y H, Zhang J, Xu Y, et al. 2003. Evolution and Forecast of Climate System. Beijing: China Meteorological Press, 75-79 (in Chinese)

丁一汇,柳艳菊,梁苏洁等. 2014. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系. *气象学报*, 72(5): 835-852. Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al. 2014. Interdecadal variability of the east Asian winter monsoon and its possible links to global climate Change. *Acta Meteor Sinica*, 72(5): 835-852 (in Chinese)

丁一汇,李怡. 2016. 亚非夏季风系统的气候特征及其长期变率研究综述. *热带气象学报*, 32(6): 786-796. Ding Y H, Li Y. 2016. A review on climatology of afro-asian summer monsoon and its long-term variability. *J Trop Meteor*, 32(6): 786-796 (in Chinese)

丁一汇,司东,柳艳菊等. 2018. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化. *大气科学*, 42(3): 533-558. Ding Y H, Si D, Liu Y J, et al. 2018. On the characteristics, driving forces and inter-decadal variability of the East Asian summer monsoon. *Chinese J Atmos Sci*, 42(3): 533-558 (in Chinese)

费振宇,孙宏巍,金菊良等. 2014. 近 50 年中国气象干旱危险性的时空格局探讨. *水电能源科学*, 32(12): 5-10. Fei Z Y, Sun H W, Jin J L, et al. 2014. Temporal and spatial patterns of meteorological drought hazard in china for recent 50 years. *Water Resour Power*, 32(12): 5-10 (in Chinese)

封国林,杨涵清,张世轩等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探. *大气科学*, 36(5): 1009-1026. Feng G L, Yang H W, Zhang S X, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze river in late spring and early summer of 2011. *Chinese J Atmos Sci*, 36(5): 1009-1026 (in Chinese)

龚道溢,王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. *地理学报*, 58(4): 559-568. Gong D Y, Wang S W. 2003. Influence of arctic oscillation on winter climate over China. *Acta Geogr Sinica*, 58(4): 559-568 (in Chinese)

管晓丹,马洁茹,黄建平等. 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(6): 895-912. Guan X D, Ma J R, Huang J P, et al. 2019. Impact of oceans on climate change in drylands. *Sci China Earth Sci*, 62(6): 891-908

韩兰英,张强,姚玉璧等. 2014. 近 60 年中国西南地区干旱灾害规律与成因. *地理学报*, 69(5): 632-639. Han L Y, Zhang Q, Yao Y B, et al. 2014. Characteristics and origins of drought disasters in Southwest China in nearly 60 years. *Acta Geogr Sinica*, 69(5): 632-639 (in Chinese)

韩兰英,张强,贾建英等. 2019. 气候变暖背景下中国干旱强度、频次和持续时间及其南北差异性. *中国沙漠*, 39(5): 1-10. Han L Y, Zhang Q, Jia J Y, et al. 2019. Drought severity, frequency, duration and regional

- differences in China. *J Desert Res*, 39(5): 1-10 (in Chinese)
- 胡学平, 王武功, 许平等. 2014. 2009-2013 年中国西南地区连续干旱的成因分析. *气象*, 40(10): 1216-1229. Hu X P, Wang S G, Xu P P, et al. 2014. Analysis on causes of continuous drought in Southwest China during 2009-2013. *Meteor Mon*, 40(10): 1216-1229 (in Chinese)
- 胡学平, 许平平, 宁贵财等. 2015. 2012-2013 年中国西南地区秋、冬、春季持续干旱的成因. *中国沙漠*, 35(3): 763-773. Hu X P, Xu P P, Ning G C, et al. 2015. Causes of continuous drought in Southwest China from autumn of 2012 to spring of 2013. *J Desert Res*, 35(3): 763-773 (in Chinese)
- 黄庆忠, 张强, 李勤等. 2018. 基于 SPEI 的季节性干湿变化特征及成因探讨. *自然灾害学报*, 27(2): 130-140. Huang Q Z, Zhang Q, Li Q, et al. 2018. SPEI-based evaluation of seasonal dryness/wetness variations and related causes. *J Nat Dis*, 27(2): 130-140 (in Chinese)
- 黄荣辉, 陈际龙, 周连童等. 2003a. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究. *大气科学*, 27(4): 770-787. Huang R H, Chen J L, Zhou L T, et al. 2003a. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system. *Chinese J Atmos Sci*, 27(4): 770-787 (in Chinese)
- 黄荣辉, 陈文, 丁一汇等. 2003b. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究. *大气科学*, 27(4): 484-502. Huang R H, Chen W, Ding Y H, et al. 2003b. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle. *Chinese J Atmos Sci*, 27(4): 484-502 (in Chinese)
- 黄荣辉, 顾雷, 徐予红等. 2005. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系. *大气科学*, 29(1): 20-36. Huang R H, Gu L, Xu Y H, et al. 2005. Characteristics of the interannual variations of onset and advance of the East Asian summer monsoon and their associations with thermal states of the Tropical Western Pacific. *Chinese J Atmos Sci*, 29(1): 20-36 (in Chinese)
- 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(6): 564-575. Huang R H. 2006. Progresses in research on the formation mechanism and prediction theory of severe climatic disasters in China. *Adv Earth Sci*, 21(6): 564-575 (in Chinese)
- 黄荣辉, 刘永, 王林等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析. *大气科学*, 36(3): 443-457. Huang R H, Liu Y, Wang L, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010. *Chinese J Atmos Sci*, 36(3): 443-457 (in Chinese)
- 黄晚华, 杨晓光, 李茂松等. 2010. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 年演变特征. *农业工程学报*, 26(7): 50-59. Huang W H, Yang X G, Li M S, et al. 2010. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 26(7): 50-59 (in Chinese)
- 琚建华, 任菊章, 吕俊梅. 2004. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响. *高原气象*, 23(4): 429-434. Ju J H, Ren J Z, Lv J M. 2004. Effect of interdecadal variation of arctic oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter. *Plateau Meteor*, 23(4): 429-434 (in Chinese)
- 李明星, 马柱国. 2015. 基于模拟土壤湿度的中国干旱检测及多时间尺度特征. *中国科学: 地球科学*, 45(7): 994-1010. Li M X, Ma Z G. 2015. Soil moisture drought detection and multi-temporal variability across China. *Sci China Earth Sci*, 58(10): 1798-1813
- 李耀辉, 周广胜, 袁星等. 2017. 干旱气象科学研究——“我国北方干旱致灾过程及机理”项目概述与主要进展. *干旱气象*, 35(2): 165-174. Li Y H, Zhou G S, Yuan X, et al. 2017. Summary of the main progress of drought meteorology scientific research: The mechanism and disaster formation processes of drought in the north region of China. *J Arid Meteor*, 35(2): 165-174 (in Chinese)
- 李忆平, 王劲松, 李耀辉等. 2014. 中国区域干旱的持续性特征研究. *冰川冻土*, 36(5): 1131-1142. Li Y P, Wang J S, Li Y H, et al. 2014. Study of the sustainability of droughts in China. *J Glaciol Geocryol*, 36(5): 1131-1142 (in Chinese)
- 李韵婕, 任福民, 李忆平等. 2014. 1960-2010 年中国西南地区区域性气象干旱事件的特征分析. *气象学报*, 72(2): 266-276. Li Y J, Ren F M, Li Y P, et al. 2014. A study of the characteristics of the southwestern China regional meteorological drought events during 1960-2010. *Acta Meteor Sinica*, 72(2): 266-276 (in Chinese)
- 廖要明, 张存杰. 2017. 基于 MCI 的中国干旱时空分布及灾情变化特征. *气象*, 43(11): 1402-1409. Liao Y M, Zhang C J. 2017. Spatio-temporal distribution characteristics and disaster change of drought in China based on meteorological drought composite index. *Meteor Mon*, 43(11): 1402-1409 (in Chinese)
- 林大伟, 布和朝鲁, 谢作威. 2018. 夏季中国华北降水、印度降水与太平洋海表面温度的耦合关系. *大气科学*, 42(6): 1175-1190. Lin D W, Bueh C, Xie Z W. 2018. A study on the coupling relationships among the Pacific sea surface temperature and summer rainfalls over North China and India. *Chinese J Atmos Sci*, 42(6): 1175-1190 (in Chinese)
- 刘立涛, 刘晓洁, 伦飞等. 2018. 全球气候变化下的中国粮食安全问题分析. *自然资源学报*, 33(6): 927-939. Liu L T, Liu X J, Lun F, et al. 2018. Research on China's food security under global climate change background. *J Nat Resour*, 33(6): 927-939 (in Chinese)
- 罗哲贤. 2005. 中国西北干旱气候动力学引论. 北京: 气象出版社, 1-232. Luo Z X. 2005. Introduction to Drought Climate Dynamics in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 1-232 (in Chinese)
- 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(10): 1199-1206. Ma Z G. 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). *Chin Sci Bull*, 52(15): 2130-2139
- 马柱国, 任小波. 2007. 1951-2006 年中国区域干旱化特征. *气候变化研究进展*, 3(4): 195-201. Ma Z G, Ren X B. 2007. Drying trend over China from 1951 to 2006. *Adv Climate Change Res*, 3(4): 195-201 (in

- Chinese)
- 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. *大气科学*, 42(4): 951-961. Ma Z G, Fu Z B, Yang Q, et al. 2018. Drying trend in Northern China and its shift during 1951-2016. *Chinese J Atmos Sci*, 42(4): 951-961 (in Chinese)
- 钱维宏, 张宗婵. 2012. 西南区域持续性干旱事件的行星尺度和天气尺度扰动信号. *地球物理学报*, 55(5): 1462-1471. Qian W H, Zhang Z J. 2012. Planetary-scale and regional-scale anomaly signals for persistent drought events over Southwest China. *Chinese J Geophys*, 55(5): 1462-1471 (in Chinese)
- 钱正安, 吴统文, 宋敏红等. 2001. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题. *地球科学进展*, 16(1): 28-38. Qian Z A, Wu T W, Song M H, et al. 2001. Arid disaster and advances in arid climate researches over Northwest China. *Adv Earth Sci*, 16(1): 28-38 (in Chinese)
- 钱正安, 宋敏红, 吴统文等. 2017a. 世界干旱气候研究动态及进展综述 (I): 若干主要干旱区国家的研究动态及联合国的贡献. *高原气象*, 36(6): 1433-1456. Qian Z A, Song M H, Wu T W, et al. 2017a. Review of advances in world arid climate research (I): Development and contribution of some main dryland countries and the UN. *Plateau Meteor*, 36(6): 1433-1456 (in Chinese)
- 钱正安, 宋敏红, 吴统文等. 2017b. 世界干旱气候研究动态及进展综述 (II): 主要研究进展. *高原气象*, 36(6): 1457-1476. Qian Z A, Song M H, Wu T W, et al. 2017b. Review of advances in world dryland climate research (II): Main investigation progress. *Plateau Meteor*, 36(6): 1457-1476 (in Chinese)
- 秦大河, 丁一汇, 王绍武等. 2002. 中国西部生态环境变化与对策建议. *地球科学进展*, 17(3): 314-319. Qin D H, Ding Y H, Wang S W, et al. 2002. Ecological and environmental change in West China and its response strategy. *Adv Earth Sci*, 17(3): 314-319 (in Chinese)
- 秦大河. 2015. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 108-115. Qin D H. 2015. National Assessment Report on Extreme Weather and Climate Events and Disaster Risk Management and Adaptation in China. Beijing: Science Press, 108-115 (in Chinese)
- 任瑾, 罗哲贤. 1989. 从降水看我国黄土高原地区的干旱气候特征. *干旱地区农业研究*, (2): 36-43. Ren J, Luo Z X. 1989. Dry climatological feature on the loess plateau in view of rainfall in China. *Agric Res Arid Areas*, (2): 36-43 (in Chinese)
- 邵小路, 姚凤梅, 张佳华等. 2014. 华北地区夏季旱涝的大气环流特征诊断. *干旱区研究*, 31(1): 131-137. Shao X L, Yao F M, Zhang J H, et al. 2014. General circulation over North China in drought and flood summers. *Arid Zone Res*, 31(1): 131-137 (in Chinese)
- 沈晓琳, 祝从文, 李明. 2012. 2010年秋、冬季节华北持续性干旱的气候成因分析. *大气科学*, 36(6): 1123-1134. Shen X L, Zhu C W, Li M. 2012. Possible causes of persistent drought event in North China during the cold season of 2010. *Chinese J Atmos Sci*, 36(6): 1123-1134 (in Chinese)
- 唐锡仁, 薄树人. 1962. 河北省明清时期干旱情况的分析. *地理学报*, 28(1): 73-82. Tang X R, Bo S R. 1962. Analysis of drought in Ming and Qing dynasties in Hebei province. *Acta Geogr Sinica*, 28(1): 73-82 (in Chinese)
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. *大气科学*, 22(4): 399-407. Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. *Sci Atmos Sinica*, 22(4): 399-407 (in Chinese)
- 王绍武, 赵宗慈. 1979. 我国旱涝 36 年周期及其产生的机制. *气象学报*, 37(1): 64-73. Wang S W, Zhao Z C. 1979. The 36-YR wetness oscillation in China and its mechanism. *Acta Meteor Sinica*, 37(1): 64-73 (in Chinese)
- 王同美, 吴国雄, 万日金. 2008. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响. *高原气象*, 27(1): 1-9. Wang T M, Wu G X, Wan R J. 2008. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area. *Plateau Meteor*, 27(1): 1-9 (in Chinese)
- 王文祥, 左冬冬, 封国林. 2014. 基于信息分配和扩散理论的东北地区干旱脆弱性特征分析. *物理学报*, 63(22): 229201. Wang W X, Zuo D D, Feng G L. 2014. Analysis of the drought vulnerability characteristics in Northeast China based on the theory of information distribution and diffusion. *Acta Phys Sinica*, 63(22): 229201 (in Chinese)
- 王莺, 沙莎, 王素萍等. 2015. 中国南方干旱灾害风险评估. *草业学报*, 24(5): 12-24. Wang Y, Sha S, Wang S P, et al. 2015. Assessment of drought disaster risk in Southern China. *Acta Pratac Sinica*, 24(5): 12-24 (in Chinese)
- 王志强, 何飞, 贾健等. 2012. 基于 EPIC 模型的中国典型小麦干旱致灾风险评价. *干旱地区农业研究*, 35(5): 210-215. Wang Z Q, He F, Jia J, et al. 2012. Assessment on drought risk of typical wheat in China based on EPIC model. *Agric Res Arid Areas*, 35(5): 210-215 (in Chinese)
- 萧廷奎, 彭芳草, 李长付等. 1964. 河南省历史时期干旱的分析. *地理学报*, 31(3): 259-276. Xiao T K, Peng F C, Li C F, et al. 1964. On the droughts occurring in historical period of Honan province. *Acta Geogr Sinica*, 31(3): 259-276 (in Chinese)
- 徐国昌, 张志银. 1983. 青藏高原对西北干旱气候形成的作用. *高原气象*, 2(2): 9-16. Xu G C, Zhang Z Y. 1983. The effect of Qinghai-Xizang plateau on the formation of dry climate over the Northwest of China. *Plateau Meteor*, 2(2): 9-16 (in Chinese)
- 闫昕昕, 张强, 闫晓敏等. 2019. 全球干旱区分布特征及成因机制研究进展. *地球科学进展*, 34(8): 826-841. Yan X Y, Zhang Q, Yan X M, et al. 2019. An overview of distribution characteristics and formation mechanisms in Global Arid Areas. *Adv Earth Sci*, 34(8): 826-841 (in Chinese)
- 杨鑑初, 徐淑英. 1956. 黄河流域的降水特点与干旱问题. *地理学报*, 23(4): 339-352. Yang J C, Xu S Y. 1956. The pluvial regime and the droughts of the Huanghe valley. *Acta Geogr Sinica*, 23(4): 339-352 (in Chinese)
- 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. *地球物理学报*, 48(4): 789-797. Yang X Q, Xie Q, Zhu Y M, et

- al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns. *Chinese J Geophys*, 48(4): 789-797 (in Chinese)
- 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举等. 2018. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展. *生态学杂志*, 37(7): 2170-2179. Yao Y B, Yang J H, Xiao G J, et al. 2018. Research advances in the impacts of climate warming on rainfed agriculture and agro-ecology in Northwest China. *Chinese J Ecol*, 37(7): 2170-2179 (in Chinese)
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学. 北京: 科学出版社, 1-127. Ye D Z, Gao Y X. 1979. *Meteorology of the Qinghai-Tibet Plateau*. Beijing: Science Press, 1-127 (in Chinese)
- 叶笃正, 黄荣辉. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究. 济南: 山东科学技术出版社, 387-388. Ye D Z, Huang R H. 1996. A Study on the Law and Causes of Drought and Flood in the Yangtze River and Yellow River Basin. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 387-388 (in Chinese)
- 尹占娥. 2012. 自然灾害风险理论与方法研究. *上海师范大学学报(自然科学版)*, 41(1): 99-103. Yin Z E. 2012. Literature review of research on theory and method of natural disaster risk. *J Shanghai Norm Univ (Nat Sci)*, 41(1): 99-103 (in Chinese)
- 张继权, 刘兴朋, 刘布春. 2013. 农业灾害风险管理//农业灾害与减灾对策. 北京: 中国农业大学出版社, 753-794. Zhang J Q, Liu X P, Liu B C. 2013. Risk management on agricultural disasters//Agricultural Disasters and Disaster Reduction Measures. Beijing: China Agricultural University Press, 753-794 (in Chinese)
- 张强, 胡隐樵, 赵鸣. 1997. 降水强迫对戈壁局地气候系统水、热输送的影响. *气象学报*, 55(4): 492-498. Zhang Q, Hu Y Q, Zhao M. 1997. Effects of rainfall forcing on the trans-port of water and heat in the local climate system of Gobi. *Acta Meteor Sinica*, 55(4): 492-498 (in Chinese)
- 张强, 赵鸣. 1999. 绿洲附近荒漠大气逆湿的外场观测和数值模拟. *气象学报*, 57(6): 729-740. Zhang Q, Zhao M. 1999. Field experiment and numerical simulation of inverse humidity of atmosphere over desert near oasis. *Acta Meteor Sinica*, 57(6): 729-740 (in Chinese)
- 张强, 李裕, 陈丽华. 2011a. 当代气候变化的主要特点、关键问题及应对策略. *中国沙漠*, 31(2): 492-499. Zhang Q, Li Y, Chen L H. 2011a. Major characteristics, key issues and coping strategies of climate change. *J Desert Res*, 31(2): 492-499 (in Chinese)
- 张强, 张良, 崔显成等. 2011b. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战. *地球科学进展*, 26(7): 763-778. Zhang Q, Zhang L, Cui X C, et al. 2011b. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring. *Adv Earth Sci*, 26(7): 763-778 (in Chinese)
- 张强, 王润元, 邓振镛. 2012a. 中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策. 北京: 气象出版社, 420-475. Zhang Q, Wang R Y, Deng Z Y. 2012a. The Effects and Countermeasures of Drought Climate Change on Agriculture and Ecology in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 420-475 (in Chinese)
- 张强, 王胜, 问晓梅等. 2012b. 黄土高原陆面水分的凝结现象及收支特征试验研究. *气象学报*, 70(1): 128-135. Zhang Q, Wang S, Wen X M, et al. 2012b. An experimental study of land surface condense phenomenon and water budget characteristics over the Loess Plateau. *Acta Meteor Sinica*, 70(1): 128-135 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 张立阳等. 2014. 论气候变暖背景下干旱和干旱灾害风险特征与管理策略. *地球科学进展*, 29(1): 80-91. Zhang Q, Han L Y, Zhang L Y, et al. 2014. Analysis on the character and management strategy of drought disaster and risk under the climatic warming. *Adv Earth Sci*, 29(1): 80-91 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 郝小翠等. 2015a. 气候变化对中国农业旱灾损失率的影响及其南北区域差异性. *气象学报*, 73(6): 1092-1103. Zhang Q, Han L Y, Hao X C, et al. 2015a. On the impact of the climate change on the agricultural disaster loss caused by drought in China and the regional differences between the North and the South. *Acta Meteor Sinica*, 73(6): 1092-1103 (in Chinese)
- 张强, 姚玉璧, 李耀辉等. 2015b. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望. *地球科学进展*, 30(2): 196-211. Zhang Q, Yao Y B, Li Y H, et al. 2015b. Research progress and prospect on the monitoring and early warning and mitigation technology of meteorological drought disaster in Northwest China. *Adv Earth Sci*, 30(2): 196-211 (in Chinese)
- 张强, 王劲松, 姚玉璧等. 2017a. 干旱灾害风险及其管理. 北京: 气象出版社, 1-30. Zhang Q, Wang J S, Yao Y B, et al. 2017a. *Drought Disaster Risk and Its Management*. Beijing: China Meteorological Press, 1-30 (in Chinese)
- 张强, 尹宪志, 王胜等. 2017b. 走进干旱世界. 北京: 气象出版社, 1-23. Zhang Q, Yin X Z, Wang S, et al. 2017b. *Get into Drought Scopes*. Beijing: China Meteorological Press, 1-23 (in Chinese)
- 张强, 王蓉, 岳平等. 2017c. 复杂条件陆-气相互作用研究领域有关科学问题探讨. *气象学报*, 75(1): 39-56. Zhang Q, Wang R, Yue P, et al. 2017c. Several scientific issues about the land-atmosphere interaction under complicated conditions. *Acta Meteor Sinica*, 75(1): 39-56 (in Chinese)
- 张强, 姚玉璧, 王莺等. 2017d. 中国南方干旱灾害风险特征及其防控对策. *生态学报*, 37(21): 7206-7218. Zhang Q, Yao Y B, Wang Y, et al. 2017d. Risk characteristics and control technology measures of drought disaster in Southern China. *Acta Ecol Sinica*, 37(21): 7206-7218 (in Chinese)
- 张强, 韩兰英, 王兴等. 2018. 影响南方农业干旱灾损率的气候要素关键期特征. *科学通报*, 63(23): 2378-2392. Zhang Q, Han L Y, Wang X, et al. 2018. The affected characteristic of key period's climate factor on the agricultural disaster loss caused by drought in the South China. *Chinese Sci Bull*, 63(23): 2378-2392 (in Chinese)
- 张峭, 王克. 2011. 我国农业自然灾害风险评估与区划. *中国农业资源与区划*, 32(3): 34-38. Zhang Q, Wang K. 2011. Risk assessment and regionalization of agricultural natural disasters in China. *China*

- Agricultural Resources and Regional Planning, 32(3): 34-38 (in Chinese)
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003a. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流. 气象学报, 61(5): 559-569. Zhang Q Y, Tao S Y, Chen L T. 2003a. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia. Acta Meteor Sinica, 61(5): 559-569 (in Chinese)
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003b. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. 气候与环境研究, 8(3): 307-318. Zhang Q Y, Wei J, Tao S Y. 2003b. The decadal and interannual variations of drought in the Northern China and association with the circulations. Clim Environ Res, 8(3): 307-318 (in Chinese)
- 张人禾, 张若楠, 左志燕. 2016. 中国冬季积雪特征及欧亚大陆积雪对中国气候影响. 应用气象学报, 27(5): 513-526. Zhang R H, Zhang R N, Zuo Z Y. 2016. An overview of wintertime snow cover characteristics over China and the impact of Eurasian snow cover on Chinese climate. J Appl Meteor Science, 27(5): 513-526 (in Chinese)
- 张翔, 陈能成, 胡楚丽等. 2018. 1983-2015 年我国农业区域三类骤旱时空分布特征分析. 地球科学进展, 33(10): 1048-1057. Zhang X, Chen N C, Hu C L, et al. 2018. Spatio-temporal distribution of three kinds of flash droughts over agricultural land in China from 1983 to 2015. Adv Earth Sci, 33(10): 1048-1057 (in Chinese)
- 郑秋月, 沈柏竹, 龚志强等. 2014. 5 月北太平洋涛动与华北夏季旱涝的关系. 高原气象, 33(3): 775-785. Zheng Q Y, Shen B Z, Gong Z Q, et al. 2014. Relationship between North Pacific Oscillation in may and drought/flood in summer in North China. Plateau Meteor, 33(3): 775-785 (in Chinese)
- 邹旭恺, 张强. 2008. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, 19(6): 679-687. Zou X K, Zhang Q. 2008. Preliminary studies on variations in droughts over China during past 50 years. J Appl Meteor Sci, 19(6): 679-687 (in Chinese)
- Belayneh A, Adamowski J, Khalil B, et al. 2014. Long-term SPI drought forecasting in the Awash River Basin in Ethiopia using wavelet neural network and wavelet support vector regression models. J Hydrol, 508: 418-429
- Blaikie P, Cannon T, Davis I, et al. 1994. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. London, New York: Routledge, 141-156
- Brown J F, Brian D W, Tsegaye T, et al. 2008. The vegetation drought response index (veg dri): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. GIS Sci Remote Sensing, 45(1): 16-46
- Buda, S, Huang J L, Fischer T, et al. 2018. Drought losses in China might double between the 1.5°C and 2.0°C warming. Proc Natl Acad Sci USA, 115(42): 10600-10605
- Burton I, Kates R W, White G F. 1993. The Environment as Hazard. 2nd ed. New York: The Guilford Press, 284pp
- Charney J G. 1975. Dynamics of deserts and drought in the Sahel. Quart J Roy Meteor Soc, 101(428): 193-202
- Chen H P, Sun J Q. 2015. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index. J Climate, 28(13): 5430-5447
- Cheng L Y, Hoerling M, AghaKouchak A, et al. 2016. How has human-induced climate change affected California drought risk?. J Climate, 29(1): 111-120
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. Nat Climate Change, 3(1): 52-58
- Dezfuli A K, Karamouz M, Araghinejad S. 2010. On the relationship of regional meteorological drought with SOI and NAO over southwest Iran. Theor Appl Climatol, 100(1-2): 57-66
- Ding Y H, Liu Y J, Liang S J, et al. 2014a. Interdecadal variability of the East Asian winter monsoon and its possible links to global climate change. J Meteor Res, 28(5): 693-713
- Ding Y H, Si D, Sun Y, et al. 2014b. Inter-decadal variations, causes and future projection of the Asian summer monsoon. Eng Sci, 12(2): 22-28
- Ding Y H, Liu Y J, Song Y F, et al. 2015. From MONEX to the global monsoon: A review of monsoon system research. Adv Atmos Sci, 32(1): 10-31
- Dregne H E. 1970. Arid Lands in Transition, Baltimore, Maryland: Geo W King Printing Co, 1-524
- Findell K L, Shevliakova E, Milly P C D, et al. 2007. Modeled impact of anthropogenic land cover change on climate. J Climate, 20(14): 3621-3634
- Findell K L, Delworth T L. 2010. Impact of common sea surface temperature anomalies on global drought and pluvial frequency. J Climate, 23(3): 485-503
- Fisher A, Fullerton D, Hatch N, et al. 1995. Alternatives for managing drought: A comparative cost analysis. J Environ Econ Manage, 29(3): 304-320
- Fu Q, Feng S. 2014. Responses of terrestrial aridity to global warming. J Geophys Res Atmos, 119(13): 7863-7875
- Gao H, Yang S. 2009. A severe drought event in northern China in winter 2008-2009 and the possible influences of La Niña and Tibetan Plateau. J Geophys Res Atmos, 114(D24): D24104
- Hodge C, Ducisberg P C. 1963. Aridity and Man-the Challenge of the Arid Lands in United States. Baltimore, Maryland: The Horn-Shater Company, 584pp
- Hoerling M, Kumar A. 2003. The perfect ocean for drought. Science, 299(5607): 691-694
- Huang J P, Ji M X, Xie Y K, et al. 2016. Global semi-arid climate change over last 60 years. Climate Dyn, 46(3-4): 1131-1150
- Huang J P, Li Y, Fu C, et al. 2017a. Dryland climate change: Recent progress and challenges. Rev Geophys, 55(3): 719-778
- Huang J P, Xie Y K, Guan X D, et al. 2017b. The dynamics of the warming hiatus over the Northern Hemisphere. Climate Dyn, 48(1-2): 429-446
- Huang J P, Yu H P, Dai A G, et al. 2017c. Drylands face potential threat under

- 2°C global warming target. *Nat Climate Change*, 7(6): 417-422
- Huang J P, Ma J R, Guan X D, et al. 2019. Progress in semi-arid climate change studies in China. *Adv Atmos Sci*, 36(9): 922-937
- Huang L M, Yang P L, Ren S M. 2014. Brief probe into the key factors that influence Beijing agricultural drought vulnerability//Li D, Chen Y. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Berlin: Springer, 392-403.
- Ionita M, Lohmann G, Rimbu N, et al. 2012. Interannual to decadal summer drought variability over Europe and its relationship to global sea surface temperature. *Climate Dyn*, 38(1-2): 363-377
- IPCC. 2012. Summary for policymakers//Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 1-19
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press
- Jin D C, Guan Z Y, Cai J X, et al. 2015. Interannual variations of regional summer precipitation in mainland China and their possible relationships with different teleconnections in the past five decades. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 93(2): 265-283
- Kam J, Sheffield J. 2016. Increased drought and pluvial risk over California due to changing oceanic conditions. *J Climate*, 29(22): 8269-8279
- Li Q, Xue Y K. 2010. Simulated impacts of land cover change on summer climate in the Tibetan Plateau. *Environ Res Lett*, 5(1): 015102
- Li X Z, Zhou W, Chen Y D. 2015. Assessment of regional drought trend and risk over China: A drought climate division perspective. *J Climate*, 28(18): 7025-7037
- Li Y H, Yuan X, Zhang H S, et al. 2019. Mechanisms and early warning of drought disasters: Experimental drought meteorology research over China. *Bull Amer Meteor Soc*, 100(4): 673-687
- Lin L, Gettelman A, Fu Q, et al. 2018. Simulated differences in 21st century aridity due to different scenarios of greenhouse gases and aerosols. *Climatic Change*, 146(3-4): 407-422
- Liu Y M, Hoskins B, Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia. *J Meteor Soc Japan Ser II*, 85B: 1-19
- Liu Y Z, Wu C Q, Jia R, et al. 2018. An overview of the influence of atmospheric circulation on the climate in arid and semi-arid region of Central and East Asia. *Sci China Earth Sci*, 61(9): 1183-1194
- Lu J, Vecchi G A, Reichler T. 2007. Expansion of the Hadley cell under global warming. *Geophys Res Lett*, 34(6): L06805
- McNeeley S M, Beeton T A, Ojima D S. 2016. Drought risk and adaptation in the interior United States: Understanding the importance of local context for resource management in times of drought. *Wea Climate Soc*, 8(2): 147-161
- 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 Climate*, 22(22): 5962-5982
- Mo K C, Lettenmaier D P. 2015. Heat wave flash droughts in decline. *Geophys Res Lett*, 42(8): 2823-2829
- Murthy C S, Yadav M, Ahamed J M, et al. 2015. A study on agricultural drought vulnerability at disaggregated level in a highly irrigated and intensely cropped state of India. *Environ Monit Assess*, 187(3): 140
- Myers S S, Smith M R, Guth S, et al. 2017. Climate change and global food systems: Potential impacts on food security and undernutrition. *Annu Rev Public Health*, 38(1): 259-277
- Neelin J D, Münnich M, Su H, et al. 2006. Tropical drying trends in global warming models and observations. *Proc Natl Acad Sci USA*, 103(16): 6110-6115
- Olson J M, Alagarwamy G, Andresen J A, et al. 2008. Integrating diverse methods to understand climate-land interactions in East Africa. *Geoforum*, 39(2): 898-911
- Otkin J A, Anderson M C, Hain C, et al. 2016. Assessing the evolution of soil moisture and vegetation conditions during the 2012 United States flash drought. *Agric Forest Meteorol*, 218-219: 230-242
- Otkin J A, Svoboda M, Hunt E D, et al. 2018. Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bull Amer Meteor Soc*, 99(5): 911-919
- Seager R, Kushnir Y, Herweijer C, et al. 2005. Modeling of tropical forcing of persistent droughts and pluvials over Western North America: 1856-2000. *J Climate*, 18(19): 4065-4088
- Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. 2006. Land-atmosphere coupling and climate change in Europe. *Nature*, 443(7108): 205-209
- Sherwood S, Fu Q. 2014. A drier future?. *Science*, 343(6172): 737-739
- Staubwasser M, Weiss H. 2006. Holocene climate and cultural evolution in late prehistoric-early historic West Asia. *Quat Res*, 66(3): 372-387
- Sun C H, Yang S. 2012. Persistent severe drought in southern China during winter-spring 2011: Large-scale circulation patterns and possible impacting factors. *J Geophys Res Atmos*, 117(D10): D10112
- Sun Y, Fu R, Dickinson R, et al. 2015. Drought onset mechanisms revealed by satellite solar-induced chlorophyll fluorescence: Insights from two contrasting extreme events. *J Geophys Res Biogeosci*, 120(11): 2427-2440
- Tsegaye T, Brian W. 2007. The vegetation outlook (vegout): A new tool for providing outlooks of general vegetation conditions using data mining techniques. Seventh IEEE International Conference on Data Mining Workshops (ICDMW 2007), 667-672.
- Tannehill I R. 1947. Drought-its Causes and Effects. Princeton: Princeton University Press, 1-264
- Taylor C M, Lambin E F, Stephenne N, et al. 2002. The influence of land use change on climate in the Sahel. *J Climate*, 15(24): 3615-3629
- Thomas T, Jaiswal R K, Galkate R, et al. 2016. Drought indicators-based integrated assessment of drought vulnerability: A case study of Bundelkhand droughts in central India. *Nat Hazards*, 81(3): 1627-1652

- Ting M F, Wang H. 1997. Summertime U.S. precipitation variability and its relation to Pacific sea surface temperature. *J Climate*, 10(8): 1853-1873
- Ummenhofer C C, Gupta A S, Briggs P R, et al. 2011. Indian and Pacific ocean influences on Southeast Australian drought and soil moisture. *J Climate*, 24(5): 1313-1336
- Van Loon A F, Gleeson T, Clark J, et al. 2016. Drought in the anthropocene. *Nat Geosci*, 9(2): 89-91
- Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil Moisture drought in China, 1950-2006. *J Climate*, 24(13): 3257-3271
- Wang C H, Yang K, Li Y L, et al. 2017. Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in Eastern China. *J Climate*, 30(3): 885-903
- Wang H, Li D L. 2018. Decadal variability in summer precipitation over eastern China and its response to sensible heat over the Tibetan Plateau since the early 2000s. *Int J Climatol*, 39(3): 1604-1617
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 35(20): L20702
- Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, et al. 2016. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus. *Sci Rep*, 6: 30571
- Wang L Y, Yuan X. 2018. Two types of flash drought and their connections with seasonal drought. *Adv Atmos Sci*, 35(12): 1478-1490
- Wang P Y, Tang J P, Sun X G, et al. 2017. Heat waves in China: Definitions, leading patterns, and connections to large-scale atmospheric circulation and SSTs. *J Geophys Res Atmos*, 122(20): 10679-10699
- Wang Y, Zhang Q, Wang S P, et al. 2017. Characteristics of agrometeorological disasters and their risk in Gansu Province against the background of climate change. *Nat Hazards*, 89(2): 899-921
- Wheeler T, Von Braun J. 2013. Climate change impacts on global food security. *Science*, 341(6145): 508-513
- Wilhite D A, Glantz M H. 1985. Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water Int*, 10(3): 111-120
- Wilhite D A. 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions. *Drought: A Global Assessment*, 3-18
- Wu G X, Zhang Y S. 1998. Tibetan Plateau forcing and the timing of the monsoon onset over South Asia and the South China Sea. *Mon Wea Rev*, 126(4): 913-927
- Wu G X, Liu Y M, Zhang Q, et al. 2007. The influence of mechanical and thermal forcing by the Tibetan Plateau on Asian Climate. *J Hydrometeorol*, 8(4): 770-789
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci Rep*, 2: 404
- Xing W, Wang B. 2017. Predictability and prediction of summer rainfall in the arid and semi-arid regions of China. *Climate Dyn*, 49(1-2): 419-431
- Yu C Q, Li C S, Xin Q C, et al. 2014. Dynamic assessment of the impact of drought on agricultural yield and scale-dependent return periods over large geographic regions. *Environ Model Softw*, 62: 454-464
- Yu M X, Li Q F, Hayes M J, et al. 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951-2010?. *Int J Climatol*, 34(3): 545-558
- Yue Y J, Li J, Ye X Y, et al. 2015. An EPIC model-based vulnerability assessment of wheat subject to drought. *Nat Hazards*, 78(3): 1629-1652
- Yue Y J, Wang L, Li J, et al. 2018. An EPIC model-based wheat drought risk assessment using new climate scenarios in China. *Climatic Change*, 147(3-4): 539-553
- Zhang H L, Zhang Q, Yue P, et al. 2016. Aridity over a semiarid zone in northern China and responses to the East Asian summer monsoon. *J Geophys Res Atmos*, 121(23): 13901-13918
- Zhang Q, Han L Y, Jia J Y, et al. 2016. Management of drought risk under global warming. *Theor Appl Climatol*, 125(1-2): 187-196
- Zhang Q, Han L Y, Lin J J, et al. 2018. North-South differences in Chinese agricultural losses due to climate-change-influenced droughts. *Theor Appl Climatol*, 131(1-2): 719-732 (in Chinese)
- Zhang Q, Lin J J, Liu W C, et al. 2019a. Precipitation seesaw phenomenon and its formation mechanism in the eastern and western parts of Northwest China during the flood season. *Sci China Earth Sci*, 62(12): 2083-2098
- Zhang Q, Yao Y B, Wang Y, et al. 2019b. Characteristics of drought in Southern China under climatic warming, the risk, and countermeasures for prevention and control. *Theor Appl Climatol*, 136(3-4): 1157-1173
- Zhang R H. 2001. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China. *Adv Atmos Sci*, 18(5): 1006-1017
- Zhang Y Q, You Q L, Chen C C, et al. 2017. Flash droughts in a typical humid and subtropical basin: A case study in the Gan River Basin, China. *J Hydrol*, 551: 162-176
- Zhao G J, Mu X M, Hörmann G, et al. 2012. Spatial patterns and temporal variability of dryness/wetness in the Yangtze River Basin, China. *Quat Int*, 282: 5-13
- Zhao S Y, Zhang H, Feng S, et al. 2015. Simulating direct effects of dust aerosol on arid and semi-arid regions using an aerosol-climate coupled system. *Int J Climatol*, 35(8): 1858-1866
- Zhao Y, Huang A N, Zhou Y, et al. 2014. Impact of the middle and upper tropospheric cooling over Central Asia on the summer rainfall in the Tarim Basin, China. *J Climate*, 27(12): 4721-4732
- Zhu C W, Wang B, Qian W H, et al. 2012. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming. *Geophys Res Lett*, 39(9): L09701
- Zuo Z Y, Yang S, Kumar A, et al. 2012. Role of thermal condition over Asia in the weakening Asian Summer Monsoon under global warming background. *J Climate*, 25(9): 3431-3436