



中国干旱、半干旱区气候变化及影响研究百年进展*

张 强^{1,2} 黄建平³ 杨金虎¹ 管晓丹³ 于海鹏⁴ 朱 颢²
张红丽⁵ 韩东亮³ 闫昕旸² 张国龙³
杨泽粟⁶ 曾 剑⁶

ZHANG Qiang^{1,2} HUANG Jianping³ YANG Jinhui¹ GUAN Xiaodan³ YU Haipeng⁴ ZHU Biao²
ZHANG Hongli⁵ HAN Dongliang³ YAN Xinyang² ZHANG Guolong³
YANG Zesu⁶ ZENG Jian⁶

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. 兰州大学大气科学学院, 兰州, 730000
4. 中国科学院西北生态环境资源研究院, 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 兰州, 730000
5. 天水师范学院资源与环境工程学院, 天水, 741000
6. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都, 610225

1. *Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province/Key Open Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, Lanzhou 730020, China*
2. *Gansu Meteorological Bureau, Lanzhou 730020, China*
3. *College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*
4. *Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Lanzhou 730000, China*
5. *School of Resources and Environmental Engineering, Tianshui Normal University, Tianshui 741000, China*
6. *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China*

2024-08-31 收稿, 2024-12-17 改回。

张强, 黄建平, 杨金虎, 管晓丹, 于海鹏, 朱颢, 张红丽, 韩东亮, 闫昕旸, 张国龙, 杨泽粟, 曾剑. 2025. 中国干旱、半干旱区气候变化及影响研究百年进展. 气象学报, 83(3): 699-715

Zhang Qiang, Huang Jianping, Yang Jinhui, Guan Xiaodan, Yu Haipeng, Zhu Biao, Zhang Hongli, Han Dongliang, Yan Xinyang, Zhang Guolong, Yang Zesu, Zeng Jian. 2025. Advances in research on climate change and its effects on the arid and semi-arid regions of China over the past century. *Acta Meteorologica Sinica*, 83(3):699-715

Abstract Arid and semi-arid regions constitute approximately one-third of the total land area in China and are vulnerable to the effects of global climate change. Over the past century, a large number of studies have investigated regional climate change and its impacts. However, the conclusions are inconsistent due to differing research perspectives, and this has highlighted the urgent need to

* 资助课题: 国家自然科学基金 (42230611、42375039)、甘肃省自然科学基金 (23JRRA1324、24JRRA725)、甘肃省重点人才计划项目 (2023RCXM37)。

作者简介: 张强, 主要从事陆面过程、干旱气候变化等研究工作。E-mail: zhangqiang@cma.gov.cn

通信作者: 杨金虎, 主要从事干旱气候变化及影响研究工作。E-mail: yjh740701@163.com

obtain systematic, scientific knowledge through review and synthesis. This study, based on a survey of all available literature, reviews the evolution of regional climate change and its effects in the arid and semi-arid regions of China over the last century. The present review examines three aspects of the surveyed previous studies: Data, methods, and subjects, and then summarizes essential scientific findings into four subject areas: The origin and expansion of arid and semi-arid regions, the characteristics of climate change in these areas, the drivers of climate change in arid and semi-arid zones, and the consequences of climate change in such environments. Finally, six key directions for future research on climate change and its effects on the arid and semi-arid regions of China are proposed.

Key words Climate change, Impact, Progress and prospects, Arid and semi-arid areas of China

摘 要 中国干旱、半干旱区面积占国土总面积的三分之一以上,是全球气候变化敏感区和脆弱区。近百年来针对区域气候变化及其影响已开展了大量研究工作,但由于研究视角不同,结论比较分散,亟需通过系统的总结归纳,形成相对系统和完整的科学认识。为此,基于近百年来中国干旱、半干旱区气候变化及其影响研究的文献资料,从研究资料、研究方法和研究对象3个方面归纳梳理了区域气候变化及影响研究的发展历程,从干旱、半干旱区的形成及扩缩、区域气候变化特征、气候变化驱动因子以及区域气候变化的影响4个方面总结凝练了一些比较重要的科学认识。在此基础上,提出了干旱、半干旱区气候变化及影响研究的未来6个重点方向。

关键词 气候变化, 影响, 进展与展望, 中国干旱、半干旱区

中图法分类号 P462.3

1 引言

从依据干燥度指数划分来看,中国干旱、半干旱区主要包括新疆、宁夏、内蒙古中部和西部、陕西北部、甘肃大部、青海西部和西藏西部等地区,占中国国土总面积的三分之一以上,地形复杂、地貌多样,是全球典型的气候变化敏感区和生态环境脆弱区,在全球气候系统中具有一定的独特地位(Xu, et al, 2016; 陈亚宁, 2021)(图1)。该区域生态环境和水资源对气候变化的响应十分显著,气候变化对自然环境和社会经济发展影响非常突出,涉及“西部大开发”等国家一系列重大战略的实施。因此,中国干旱、半干旱区气候变化及其影响一直是社会各界关注的热点,也是中国政府一直在着力解决的重要科学问题(竺可桢, 1972; 徐国昌, 1997;

丁一汇等, 2001; 黄建平等, 2013; 管晓丹等, 2019; Zhang, et al, 2019a, 2022; 张强等, 2000, 2021; 李卓忆等, 2024)。

近百年来,众多学者已经对中国干旱、半干旱区气候变化开展了大量研究,不过由于观测设备逐步完善、技术方法持续改进以及关注重点不断变化,研究资料、研究方法和研究对象也在不停地更新(竺可桢, 1972; 王绍武, 1993; 施雅风等, 1996; 孙国武, 1997; 徐国昌等, 1997; 吕达仁等, 2002; 张强等, 2012; 黄建平等, 2013; Huang, et al, 2016; Zhang, et al, 2019b),并形成了几个比较鲜明的发展阶段。而且,在研究资料、研究方法以及研究对象不断发展的历程中,研究深度逐渐提升,研究角度不停调整,科学认识不断丰富(Li, et al, 2015; Huang, et al, 2019; 张强等, 2021; 姚旭阳等, 2022; 丁一汇等, 2023; 张强等, 2023a),不少科学认识经历了不断完善和矫正过程。不过,从单个或者部分研究来看,难免会存在片面性和局限性。所以,当前特别需要通过总结归纳研究进展,形成相对系统和完整的科学认识,凝练出比较重要的科学共识,以促进干旱、半干旱区气候变化及其影响研究进一步创新发展。

鉴于此,文中试图通过梳理近百年来中国干旱、半干旱区气候变化及其影响的研究文献,系统回顾研究进程,总结凝练研究进展,概括归纳科学共识,洞察提炼研究方向,进而为中国干旱、半干旱区气

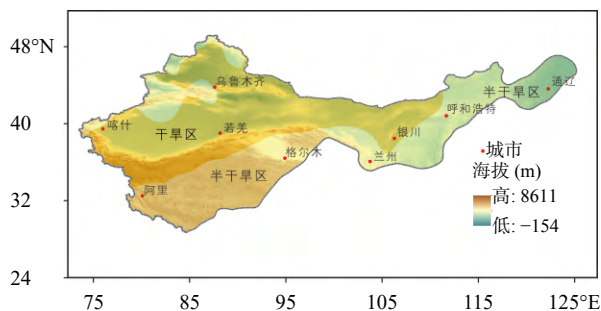


图1 中国干旱、半干旱区分布(图数据来源于朱颀等, 2023)
Fig. 1 Distribution of arid and semi-arid regions in China
(data from Zhu, et al, 2023)

候变化及其影响研究的深入推进提供重要参考。

2 干旱、半干旱区气候变化及影响的研究进程

近百年来,中国干旱、半干旱区气候变化及其影响研究经历了一个循序渐进不断发展的历程,从其研究资料、研究对象以及研究方法等方面可以划分出具有明显不同特点的发展阶段。

2.1 研究资料发展历程

第一,以文献资料为主的研究阶段。20世纪50年代之前,由于观测资料很少,中国干旱、半干旱区气候变化的研究主要通过文献资料来分析判断,较有影响的研究主要有竺可桢(1925)、谢义炳(1943)、涂长望等(1944)对历史时期气候和水旱灾的研究。中华人民共和国成立后基于历史文献研究气候变化有了蓬勃发展,其中李宪之(1955)对寒潮天气进行了总结,发现中国干旱、半干旱区冬季寒潮最为频繁,势力最为强大,范围最为广泛;竺可桢(1972)发现中国干旱、半干旱区隋、唐时期气候温暖,宋朝气候转凉,认为物候差4 d与纬度差1°的作用相当,并按照这个标准推算出中国干旱、半干旱区中世纪的气温。

第二,以器测资料为主的研究阶段。自20世纪50年代起,随着一些观测资料的积累,学界利用有限的资料,初步探讨了中国干旱、半干旱区气候变化(白肇烨等,1988;高由禧,1989)。后来,随着气象观测设备的不断完善和气象资料的不断积累,学者先后使用观测资料开展研究,其中徐国昌等(1997)和孙国武(1997)对中国干旱、半干旱区气候变化开展了系统分析;李栋梁等(1997)对中国西北地区夏季降水异常进行了深刻探讨;施雅风等(2003)提出了中国西北干旱区从暖干向暖湿的转型推断;张强等(2021)揭示了中国西北地区暖湿化的新特征。

第三,野外科学观测试验数据逐渐发挥重要作用的研究阶段。为深入认识干旱、半干旱区气候变化机理,20世纪80年代末开始,中国先后开展了一系列大型陆面过程试验,如“黑河地区陆气相互作用观测试验”(胡隐樵等,1994)、“内蒙古半干旱区草原土壤-植被-大气相互作用试验”(吕达仁等,2002)、“中国西北干旱区陆气相互作用试验”(张强等,2005)及“黄土高原陆面过程试验”(张强等,2012)等。这些试验数据为认识干旱、半干旱区陆

面过程对气候变化的影响提供了支撑(岳平等,2015)。21世纪初,一些长期科学试验观测站的逐步建立,获得了更为系统规范的观测资料,如张强等(2014)利用半干旱气候与环境观测站(SACOL)数据(Huang, et al, 2008)对中国半干旱区陆面能量平衡空间分布与气候环境要素的物理关系进行了研究。

第四,逐渐转入以多源数据为主导的研究阶段。21世纪初,地面观测、再分析和卫星遥感等多源数据开始在气候变化研究中兴起应用,进一步丰富了中国干旱、半干旱区气候变化的研究资料。如美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)的全球长序列格点资料、英国东英格利亚大学气候研究部门的CRU数据、中国第一代陆面再分析资料(CRA40/Land)以及欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析资料(ERA5)等。与此同时,归一化植被指数(NDVI)、叶面积指数(LAI)等一批性能较好的卫星遥感资料也得到了广泛应用(罗格平等,2003;孙康慧等,2021;李京忠等,2024),进一步扩展了研究的维度。近年来,多源资料的融合使用更是将研究的数据条件推上了新的高度。

2.2 研究方法发展历程

第一,以定性分析为主的研究阶段。中华人民共和国成立之前,中国干旱、半干旱区气候变化主要通过文献或者树木年轮、冰芯、石笋、历史文献、黄土、湖泊沉积和岩芯等代用资料开展一些相对初步的分析。因此,当时大多数研究结论都是一些定性认识,中央气象局气象科学研究院(1981)基于历史文献定性给出了1947—1979年的旱涝分布图。此外,基于孢粉、冰芯等代用资料研究发现,中国西北干旱区存在大暖期,但是大暖期中的气温究竟比现在高多少,不同学者的估计存在差异,其中施雅风等(1992)给出的大暖期与现今的气温差比王绍武等(2000)给出的平均值要高,但究竟谁的结论更准确至今难以判断。

第二,以气候统计诊断为主的研究阶段。气候统计诊断是基于气候统计分析进行一系列的科学综合推断,期望通过气候统计诊断对气候变化特征进行定量分析,并对其成因做出科学判断(王绍武,1993),在实际研究中,气候统计分析与诊断是密切结合的。自20世纪80年代以来,随着观测资料的

逐渐积累, 诸多学者利用经验正交函数分解、趋势分析、小波分析、突变检测等气候统计诊断方法揭示了中国干旱、半干旱区气候变化的时、空特征(施雅风等, 2003; Huang, et al, 2012; 张强等, 2021)。

第三, 气候动力学方法兴起的研究阶段。气候动力学方法作为气候变化研究的重要手段, 是针对气候动力系统与气候本身变化及两者之间的关系进行统计诊断分析, 旨在研究气候变化的动力机制。与中国干旱、半干旱区气候关系最密切的气候动力系统主要包括青藏高原下垫面热状况、大气环流型、厄尔尼诺事件、台风活动、西太平洋副热带高压等。研究表明, 青藏高原潜热加热异常引起青藏高原、西太平洋副热带高压、亚洲季风以及欧亚中高纬度环流发生变化, 进而影响中国干旱、半干旱区气候(赵声蓉等, 2003; 罗哲贤, 2005; Wei, et al, 2021a; Yu, et al, 2022)。

第四, 以气候统计与气候数值模拟相结合的研究阶段。20世纪80年代以来, 随着计算机技术的飞速发展, 将统计方法与数值预报相结合(罗菲菲等, 2015; 张慕琪等, 2022), 使得气候模式的模拟性能得到显著提高。随着统计诊断分析和数值模拟的快速发展, 将统计分析 with 数值模拟结合进行气候预测(黄嘉佑等, 1993; 苏海锋等, 2023), 提升了中国干旱、半干旱区的短期气候预测能力(杨子寒等, 2024)。中国干旱、半干旱区气候变化研究也充分将气候统计诊断分析与不断发展的气候数值模拟方法结合来深入开展, 并成为分析研究的有力工具(Zhao, et al, 2014; Yang Y F, et al, 2019; 王政琪等, 2021)。

2.3 研究对象发展历程

第一, 以气温和降水等基本气象要素为主的研究阶段。气温、降水是反映气候变化最基本的气象要素。所以, 起初中国干旱、半干旱区气候变化主要是通过气温与降水的器测资料来开展的, 其中翟盘茂等(2005)和马柱国(2007)利用分辨率较低的气温和降水观测资料分别对区域变暖和干湿变化开展了研究。近年来, 众多专家利用分辨率更高的气温和降水资料对中国干旱、半干旱区变暖和干湿变化开展了系统分析(张强等, 2021; 朱颢等, 2023)。

第二, 开始关注潜在蒸散的研究阶段。潜在蒸散作为重要气候参量之一, 它在反映气候变化方面

具有不可替代的作用, 尤其是随着对干湿变化的重视, 其在中国干旱、半干旱区气候变化研究中被广泛应用(黄建平, 2013; Ren, et al, 2022)。潜在蒸散的计算主要有3种, 分别是Thornthwaite(杨金虎等, 2012)、Penman-Monteith(Allen, et al, 1998)以及Holdridge方法(张存杰等, 2016), 其中Penman-Monteith是世界粮农组织推荐的方法, 目前使用更广泛。此外, 降水与潜在蒸散的比值作为湿润度指数也是划分气候区域的重要依据之一(Hulme, et al, 1992), 中国不少学者基于此对中国干旱、半干旱区干湿变化展开了研究, 也获得不少重要结论(张存杰等, 2016; 张红丽等, 2016; Ren, et al, 2022)。

第三, 逐渐重视极端天气、气候事件的研究阶段。21世纪初, 极端事件的变化越来越受到更多学者的关注, 中国干旱、半干旱区气候变化研究也不例外, 最初大多数学者利用气象传统的绝对阈值来统计极端事件(杨金虎等, 2005, 2006)。考虑到不同区域的气候差异, 用统一的极端事件阈值并不科学, 后来众多学者基于百分位法来定义极端气候事件阈值, 并对中国干旱、半干旱区气候变化开展研究(杨金虎等, 2007, 2008; 王冀等, 2008)。此外, 干旱和沙尘暴也作为中国干旱、半干旱区的主要极端事件被广大学者关注(马柱国, 2007; 李岩璞等, 2022)。

第四, 正在步入以气候系统多圈层为对象的研究阶段。气候系统不仅包括大气圈, 还包括水圈、冰雪圈、岩石圈和生物圈等, 它们在气候变化中发挥着至关重要的作用(汪品先等, 2018)。在现代气候变化中, 海洋活动对中国干旱、半干旱区气候变化的影响不可忽视(管晓丹等, 2019; Zhou, et al, 2024); 土壤湿度通过影响地表能量和水分平衡, 对大气感热和潜热、地表反照率及热容量造成影响, 从而引起气候变化(高晓宇等, 2023; 姜萍等, 2023); 北极海冰(武炳义, 2018)与青藏高原积雪(车涛等, 2019)对中国干旱、半干旱区气候变化也存在显著影响。

3 干旱、半干旱区气候变化及影响的主要科学认识

近百年来, 中国干旱、半干旱区气候变化及其影响研究逐渐深入, 取得了比较丰富的研究成果, 目前大致可以凝练为以下几个方面主要的科学认识。

3.1 干旱、半干旱区的形成原因及扩缩特征

第一,哈得来环流是导致中国干旱、半干旱区形成的最主要原因。从南、北半球的年和冬、夏平均径圈环流来看,均存在3个理想的环流,即低纬度的哈得来正环流圈,中纬度的费雷尔逆环流圈,高纬度的极地正环流圈。而中国干旱、半干旱区虽地处北半球中纬度地区,但由于受青藏高原大地形的影响,正好位于北半球哈得来环流的下沉区,因此,该区域常年呈现出干旱的气候特征(闫昕旸等, 2019),这是中国干旱、半干旱区形成的最主要原因。

第二,远离海洋且受“西风模态”控制是中国干旱、半干旱区形成的另一主要原因。中国干旱、半干旱区地处北半球中纬度地区,远离海洋,常年受西风环流控制,而西风环流一路向东沿途把从大西洋携带的水汽消耗殆尽,能为区域提供的水汽十分有限(汪久文, 1997; 钱正安等, 1998)。陈发虎等(2023)指出亚洲中部干旱区在现代间冰期千年一百年一年代际时间尺度上皆存在显著不同于季风区的“西风模态”(图2),气候系统外部驱动是亚轨道尺度上“西风模态”形成的主导因素,而百年一年代际尺度上“西风模态”则主要由气候系统内部变率控制(Chen, et al, 2019)。

第三,青藏高原(简称高原)隆升也是中国干旱、半干旱区形成的重要原因。高原对于中国干旱、半干旱区的形成有着重要作用(汪久文, 1997; 钱正安等, 1998)。研究认为,高原对源于印度洋的暖湿气流向亚洲内陆输送起着阻挡作用,并在高原北侧形成下沉气流,导致亚洲内陆气候干旱化(安芷生等, 2006; Luo, et al, 2024)。因此,高原隆升是



图2 百年一年代际尺度上“西风模态”形成机理示意(Chen, et al, 2019)

Fig. 2 Schematic diagram of formation mechanism for the "westerly wind mode" from century to decadal scale (Chen, et al, 2019)

中国干旱、半干旱区形成的重要原因(Wu, et al, 2012; Tang, et al, 2013; Liu, et al, 2015; 罗红羽等, 2023)。当然,残留于欧亚大陆内的副特提斯海在新生代早期一直延伸至中国西部,后来逐渐收缩封闭,该过程对中国干旱、半干旱区的形成也起到重要的作用(Ramstein, et al, 1997),甚至比高原的作用更大(Fluteau, et al, 1999)。

第四,20世纪50年代以来中国半干旱区呈现出扩张趋势。研究表明,20世纪50年代以来中国半干旱区呈现扩张趋势(Li, et al, 2015; 姜江等, 2017; Huang, et al, 2019; Wei, et al, 2019; 高艳红等, 2020),扩张区域主要集中在半干旱区东部(Li, et al, 2015),且半干旱区的东扩与华北干旱化趋势一致(王菱等, 2004; 马柱国等, 2005; 胡子瑛等, 2018)。但是对于干旱区面积及其变化幅度各家结论并不一致, Huang等(2019)认为1948—2008年干旱区面积下降趋势不明显;姜江等(2017)发现1962—2011年干旱区面积波动变化;高艳红等(2020)认为1961—2019年干旱区面积显著减少。这种研究结论的分歧可能与研究时段和干旱区范围界定有关。

3.2 干旱、半干旱区气候变化的主要特征

第一,千年尺度上经历了2次冷干和2次暖湿期。中国干旱、半干旱区过去2000年的温度变化大致可划分为4个阶段,分别为公元元年—600年和1350—1850年的2次寒冷期以及600—1400年和1850年以来的2次温暖期(竺可桢, 1972; 郑景云等, 2005)。而干湿变化虽然存在一定的区域差异,但总的来看,暖期对应湿期,冷期对应干期。因此,过去2000年的冷暖与干湿可以粗略分为4个阶段,即东汉—南北朝的冷干期、隋唐两宋的暖湿期、明清的冷干期以及1800年至今的暖湿期(郝志新等, 2020)。

第二,近百年来呈一致变暖趋势,干湿波动变化,且存在区域差异。近百年来,中国干旱、半干旱区升温是全球最显著的地区之一(Ji, et al, 2014; Huang, et al, 2016),似乎在全球变暖大趋势中叠加了2个年代际自然变暖期(张强等, 2023a)。而降水在20世纪初至20世纪40年代呈现弱的增多趋势,随后至20世纪70年代末呈现显著的减少趋势,此后,至21世纪初,再次呈现增多趋势,且较20世纪初增多幅度更大(从靖等, 2017)。从区域差异来

看,在干旱、半干旱区西部,1960年之前波动变化,1960年之后明显上升;而在中部,气候干、湿交替循环,且在20世纪20—80年代前湿期较干期更长,近30年来的干期较湿期更长(张强等,2023a),在东部,20世纪初至40年代气候偏干,40—70年代变湿,从70年代后期开始由湿转干(黄刚,2006;徐娟等,2006)。

第三,半个世纪以来变暖背景下东、西部降水呈跷跷板变化。1971—2019年中国干旱、半干旱区温度显著上升,干旱区与半干旱区升温速率分别为 0.399 和 $0.371\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ (朱飙等,2023)。20世纪80年代升温加快,但从1998年开始绝大多数区域升温减缓,随后又逐步加快,且表现出季节差异,其中冷季升温显著快于暖季(冉津江等,2014;闫昕畅等,2021)。从降水变化来看,中国干旱、半干旱区西部呈现明显的增多趋势(Zhang, et al, 2022),而中、东部继续呈减少趋势,而且这种减少不仅仅表现在降水量上,降水日数也呈现出类似的特征(Zhang, et al, 2019a)。

第四,进入21世纪以来呈现出显著的暖湿化趋势。21世纪初以来,中国干旱、半干旱区的气温变化趋势与全球相似,2010年前后升温有所趋缓,随后又逐步加快,其中2013年以来气温距平持续在 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (姚旭阳等,2022;朱飙等,2023)。降水在2000年之前以偏少为主,但21世纪初以来明显增多(马柱国等,2018;马鹏里等,2019),其中2010年以来连续10 a偏多,且有8 a距平百分率在20%以上(图3),特别是20世纪80年代出现在干旱、半干

旱区西部的暖湿化呈东扩增强特征(张强等,2021)。降水西增东减的分界线自1971年以来呈逐气候态时段东扩,且在最近一个气候态时段(1991—2020年)已东扩至西北地区全境(张强等,2021;丁一汇等,2023)。

第五,具有比全球其他区域更为显著的升温特征。中国干旱、半干旱区同其他干旱、半干旱区一样,都是全球陆地的特殊组成部分,Huang等(2012)研究指出,1900年至今全球陆地整体趋于变暖,变暖最先开始于北半球高纬度和副热带地区,随后南半球副热带地区开始变暖,而热带地区则经历了一个先变冷再变暖的过程。特别是1900年至今,累积变暖最快的区域在降水量 $200\text{—}500\text{ mm}$ 的区域,尤其在北半球中纬度冬季升温达 $1.89\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图4)。也就是说,中国干旱、半干旱区是近100年来温度升高最显著的地区之一(Ji, et al, 2014)。

第六,半干旱区陆面水分和能量具有独特的变化特征。中国半干旱区地表蒸散对气温升高的响应随降水类型不同变化明显。年降水为 $200\text{—}400\text{ mm}$ 的半干旱区地表蒸散对气温升高的响应并不明显,而在更湿润地区,地表蒸散随气温升高而增大,在更干燥区,地表蒸散随气温升高而降低(张强等,2018; Zhang, et al, 2019b),半干旱区地表蒸散变化的这种转换特征,在全球其他类似地区也有不同程度的表现。并且,半干旱区蒸发皿蒸发在变暖背景下显著增大,具有与其他区域显著不同的反“蒸发悖论”现象(Zhang Q, et al, 2016; Yang Z S, et al, 2019)(图5),这种特殊现象主要与该地区低

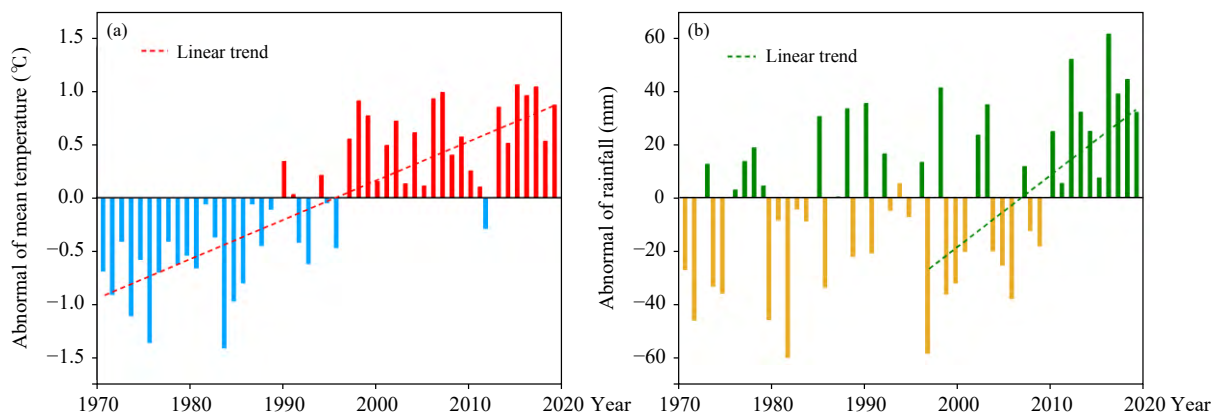


图3 近半个世纪以来干旱、半干旱区温度(a)与降水(b)变化(图数据来源于朱飙等,2023)

Fig. 3 Temperature (a) and precipitation (b) changes in arid and semi-arid regions over the past half century (data from Zhu, et al, 2023)

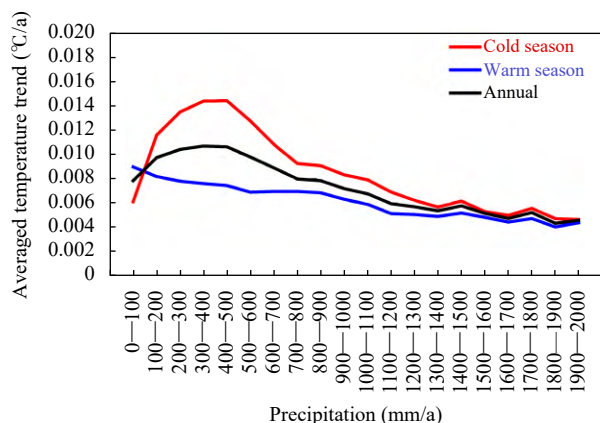


图4 不同降水量下温度变化曲线 (Huang, et al, 2012)

Fig.4 Temperature variation curves under different precipitation (Huang, et al, 2012)

云量减少及风速增大和日照增多有关。此外,半干旱区潜热和感热通量空间梯度变化较其他区域明显增大,呈现出突变特征,而且感热比潜热通量的突变更为显著(曾剑等, 2016)。

第七,未来可能继续呈暖湿化,但存在很大的不确定性。中国干旱、半干旱区气候变化预估表明未来将加剧升温。其中,基于CMIP5预估表明不同情景下都将持续升温,冬季尤为明显(Wang, et al, 2014),极端高、低温也将升高(于恩涛等, 2015)。就降水而言,不论是CMIP5或是CMIP6的预估结果均表明未来将增多,且存在明显的季节差异,其中在RCP4.5情景下,2021—2050年干旱、半干旱区西部呈增多趋势,冷季增多幅度为20%—40%,暖季增多幅度为10%—20%,而东部将减少10%—20%(杨阳等, 2022)。当然,未来气候变化的预估结果仍然存在很大的不确定性,仍需在方法不断改进的前提下进行更科学的预估分析。

3.3 干旱、半干旱区气候变化的主要驱动因子

第一,温室气体浓度上升是干旱、半干旱区气候变化的主要人为驱动因子。温室气体大量排放是全球变暖的根本原因,这早已成为国际科学界的共识,也是中国干旱、半干旱区变暖的主要原因(张强等, 2021, 2023a)。而且,由于干旱、半干旱区大气和土壤热容量较小,受温室气体的驱动作用更显著。温室气体导致地表温度升高,加快地面蒸散发,通过提高大气水分含量,使得降水再循环率显著增大。干旱、半干旱区西部10月至次年3月降水再循环率增大6%—8%(康红文等, 2005)。温室

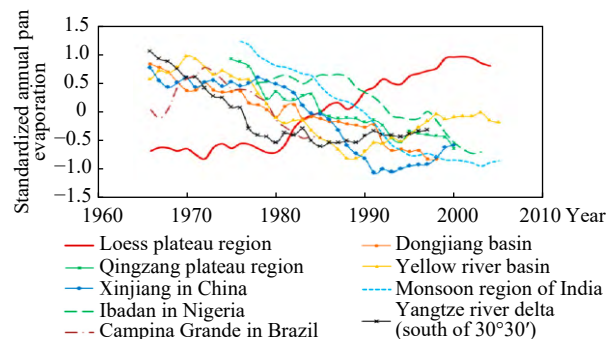


图5 不同区域蒸发变化趋势 (Zhang, et al, 2016)

Fig.5 Evaporation change trends in different regions (Zhang, et al, 2016)

气体联合气溶胶排放加速了高山积雪和冰川的融化,有更多的固态水转变为液态水参与到局地水循环,同样也是加速地面蒸散发并导致降水再循环率增大的原因之一(张强等, 2023b)。

第二,氧循环也与干旱、半干旱区气候变化密切相关。以往在变暖方面更多关注二氧化碳的影响,却忽略了氧气的重要性。实际上,氧气不但是生命出现和发展的主要驱动力,也是大气的重要组成部分。一旦大气中氧气含量下降(Huang, et al, 2018; Han, et al, 2021, 2022; Li, et al, 2021; Wei, et al, 2021b),就会导致大气辐射强迫增强,进而升高地表温度,引起气候系统强烈变化。氧循环贡献着大气密度和质量,影响着大气光学厚度,也被认为是关键的气候强迫因子(Poulsen, et al, 2015; Han, et al, 2021, 2022)。这是因为在低氧浓度背景下,空气分子对太阳短波散射频率较低,导致地面短波强迫显著增大,促进地表温度升高,进而导致地表水循环加快,引起降水与潜在蒸发的动态速率变化,当潜在蒸发速率远大于降水补给时呈现干旱化。在高排放情景(RCP8.5)下,氧循环分别随着气温、降水、潜在蒸散及干旱面积的增加而增大,当氧气生产不可持续且与氧气消耗相结合时,将加速干旱生态系统的退化,并对干旱地区提供基本生态系统服务的能力产生负面影响(图6)。

第三,大气环流是影响干旱、半干旱区气候变化的最主要自然因素。中国干旱、半干旱区当前湿化是大气环流多因子多时间尺度作用的结果,并且在不同时间尺度上的主要影响因子不尽相同(张强等, 2023b),与湿润气候区也存在显著差异(Zhang H L, et al, 2016)。尤其是亚洲季风与西风环流的

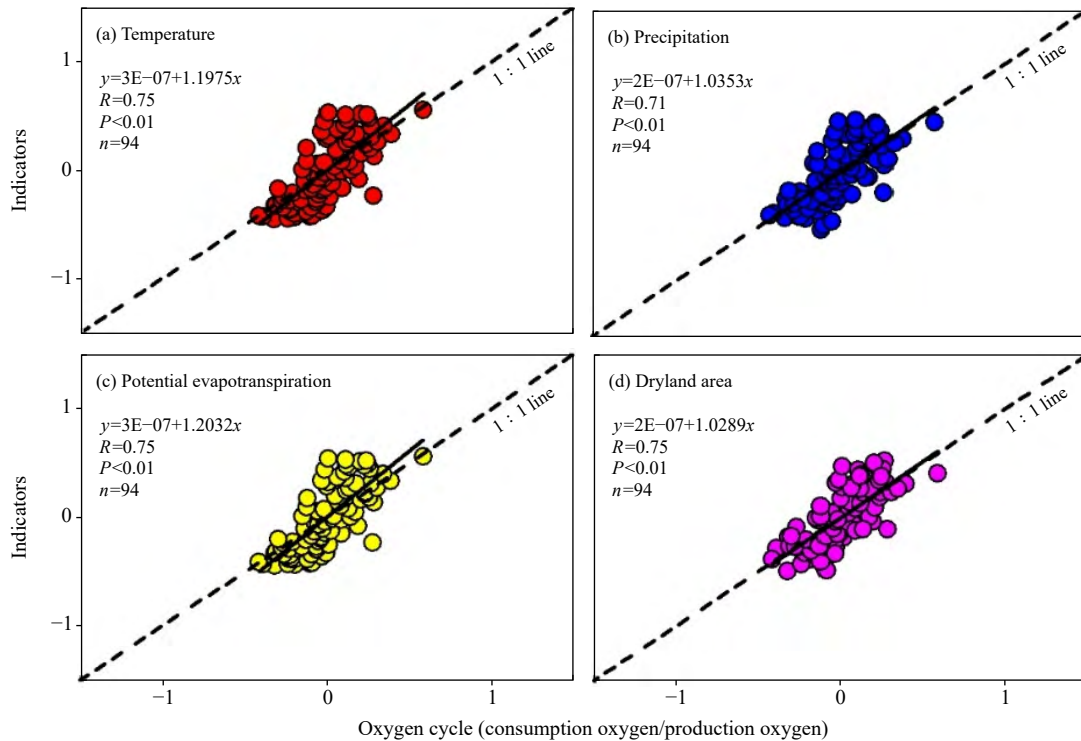


图6 氧循环与干旱、半干旱区气候效应关系 (改编自 Han, et al, 2021)

Fig. 6 Relationship between oxygen cycle and climate effect in arid and semi-arid regions (adapted from Han, et al, 2021)

异常对气候的多尺度变化影响明显, 20 世纪 80 年代, 西风纬向环流的增强致使水汽输送增强或许是引发干旱、半干旱区西部降水增多的原因之一(龚咏琪等, 2023)。同时, 丝绸之路遥相关波列的显著负位相导致亚洲急流发生经向偏移, 也是引发 1998 年以来干旱、半干旱区降水异常的主要原因。此外, 欧亚、北美、太平洋遥相关波列引起西伯利亚气旋性异常环流, 从而通过异常的水汽输送, 造成 20 世纪 90 年代以来干旱、半干旱区冬季降水增多(Ren, et al, 2024)。此外, 副热带西风急流经向偏移, 致使涡度垂直和平流运动出现异常, 导致中国干旱、半干旱地区降水显著增多(张强等, 2021, 2023b)。

第四, 海洋是干旱、半干旱区气候变化的自然外强迫因子。虽然中国干旱、半干旱区远离海洋, 但海洋仍然是其重要的水汽来源。来自大西洋的水汽在西风带作用下, 可到达干旱、半干旱区西部边缘。海洋与陆地的热力差异还会引发季风活动, 进而影响干旱、半干旱区气候(张强等, 2023b)。同时, 海洋对全球大气环流起关键调制作用, 进而影响干旱、半干旱区气候(黄刚, 2006; Cheng, et al,

2024)。例如, 厄尔尼诺和拉尼娜现象会引起太平洋海温的异常, 导致大气环流调整, 进而改变干旱、半干旱区气候。太平洋海温变化还会影响西风带的强度和位置。当海温升高时, 西风带加强, 从而将更多的水汽输送到干旱、半干旱区。总之, 海温异常可导致西风 and 季风环流异常, 从而影响中国干旱、半干旱区气候(Ding, et al, 2022; Wu, et al, 2022; Wei, et al, 2024)。

第五, 陆面过程对干旱、半干旱区气候变化的影响不容忽视。伴随着人口增多和经济发展, 人类对于自然资源的开发利用持续增多, 进而引发土地利用变化、水资源短缺及环境污染等问题(张强等, 2023b)。这对陆面过程造成影响, 进而导致气候变化。例如, 过度放牧、开垦荒地以及砍伐森林等人类活动会破坏植被覆盖, 降低土壤含水量, 增大土壤侵蚀以及沙漠化风险, 并进一步改变陆面能量和水分交换, 从而导致气候变化(马柱国等, 2005; 从靖等, 2017)。近年来, 干旱、半干旱区土地利用主要表现为耕地扩张、草地退化以及森林减少等, 这些变化会通过陆面过程影响气候变化。例如, 耕地扩张会增加土壤水分蒸发, 致使大气湿度上升, 从

而影响降水；草地退化会降低植被覆盖度，增大土壤侵蚀及沙漠化风险，同时也会影响地表能量平衡与水分循环；森林减少会降低碳汇功能，增加温室气体排放，加剧气候变化(张强等, 2023b; 朱飙等, 2023)。因此，陆面过程对中国干旱、半干旱区气候有显著影响。

第六，青藏高原暖湿化的作用。青藏高原的暖湿化将促使原本较为干旱的区域降水增多。高原周边的部分半干旱地区可能因暖湿化使降水条件得到一定程度的改善，进而使得这些区域向半湿润气候转化。一定程度上对中国干湿气候区的界限与范围产生影响，使半湿润地区的范围可能有所拓展。在一些原本就属于湿润气候的区域，青藏高原暖湿化可能会致使这些地区内部的降水分布更为不均衡。可能会出现局部区域降水显著增多，而另一些区域降水变化不明显甚至减少的情况，从而改变湿润地区内部的干湿差异结构。气温上升和降水增多会作用于地表蒸发和植物蒸腾作用。在青藏高原暖湿化的进程中，一些地区的蒸发和蒸腾作用可能会加强，这会对当地的水分循环和干湿状态带来影响。可能会使一些原本相对湿润的地区，由于蒸发、蒸腾作用的增强而变得相对较干燥，进而影响干湿区域的分布格局(赵声蓉等, 2003; 安芷生等, 2006; 罗红羽等, 2023)。

3.4 干旱、半干旱区气候变化的影响

第一，对陆地植被的影响。气候变化对陆地植被影响极其强烈，而且温度与降水仍然是主要驱动因子。从长期趋势分析，中国干旱、半干旱区植被变化与温度和降水均呈显著正相关，西北干旱区1981—2015年NDVI基本呈现出一致的增大趋势(图7)，因此暖湿化有利于植被的生长、发育。当然，也存在一定的区域差异。例如，进入21世纪以来的显著暖湿化使得河西走廊植被覆盖度在2000—2015年整体变好，植被覆盖度从西北向东南增大显著；而甘肃陇东、陇中和陕北在内的黄土高原在1982—2000年植被显著退化，但2001—2018年植被明显改善(《西北区域气候变化评估报告：2020》编写委员会, 2021)。虽然中国干旱、半干旱区绝大部分区域正在变暖、变湿，有利于生态改善，然而长期形成的干旱气候环境在短期内难以发生改变。因此，中国干旱、半干旱区气候变化对陆地植被的影响，应当全面认识，权衡其利弊得失，采取

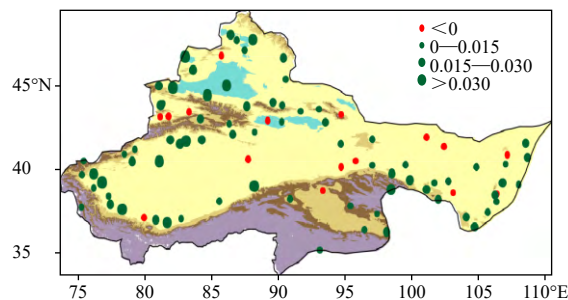


图7 1981—2015年西北干旱区NDVI变化(Zhang, et al, 2021)

Fig. 7 NDVI changes in northwest arid region from 1981 to 2015 (Zhang, et al, 2021)

科学合理的举措来适应并应对，从而实现植被状况持续改善。与此同时，持续强化生态保护和水资源管理，确保生态平衡及经济社会的发展。

第二，对水资源的影响。中国干旱、半干旱区的河川补给有相当部分来自冰川和积雪融水，冰川的覆盖面积变化显著影响了陆地储水量和河川径流。在变暖影响下，1960—2001年塔里木内陆冰川的总面积减少了3.3%；1956—2010年祁连山冰川面积减少了20.9%。与此同时，乌鲁木齐河流径流量在1993—2017年较1959—1992年增加了70%。疏勒河与黑河的年径流量在1961年以来分别以3.3和2.0 m³/(10 a·s)的速率增大。叶尔羌河以0.73 m³/(10 a·s)的速率增大，玛纳斯河以1.37 m³/(10 a·s)速率增大(《新疆区域气候变化评估报告：2020》编写委员会, 2021)(图8)。当然，气候变化对中国干旱、半干旱区水资源具有诸多的影响(Huang, et al, 2017)，一方面带来了某些机遇，如降水增多以及短期内冰川融水增加了内陆河流量；另一方面也带来了严峻挑战，如水资源脆弱性加剧以及生态环境恶化(龚咏琪等, 2023; Ren, et al, 2024)。因此，为应对气候变化给水资源带来的影响，应当加强水资源管理、提升水资源利用效率、守护生态环境等，以此来达成水资源的可持续利用以及经济社会的可持续发展。

第三，对土壤碳的影响。土壤碳是表征陆地生态系统服务及其功能大小的综合指标，对生态系统的健康发展极为重要，也是受气候变化影响的关键要素之一(马柱国等, 2018; 陈发虎等, 2023; 符淙斌等, 2023)。进入21世纪以来，中国干旱、半干旱区的暖湿化，有利于植被通过凋落物分解向土壤进行

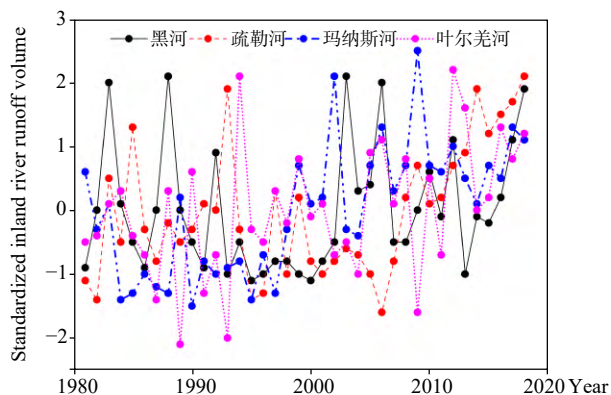


图8 西北干旱区内陆河径流变化(张强等, 2023a)

Fig. 8 Inland river runoff changes in the northwest arid region (Zhang, et al, 2023a)

碳输送(姜江等, 2017)。同时, 新碳进入土壤后会与土壤矿物颗粒结合, 形成不同粒径土壤团聚体保护土壤碳并进行积累, 有利于土壤肥力的增加(Han, et al, 2021, 2022)。另外, 气候变化或许还会致使土壤碳储量降低, 增大其向大气释放碳的风险, 进而对区域乃至全球的碳循环以及气候变化带来影响。不过, 影响程度与机制还会受到诸如土壤类型、植被覆盖、土地利用方式等多种因素的共同作用。因此, 采取恰当的土地管理和生态保护举措, 有助于减缓土壤碳的流失并增加土壤固碳量。

第四, 对农业的影响。在气候变化背景下, 中国干旱、半干旱区光、热、水、碳资源增加, 农业种植区不断扩大, 产量也随之增加。比如, 北疆和南疆棉花种植面积均有所增大(《新疆区域气候变化评估报告: 2020》编写委员会, 2021); 冬小麦种植的边界在甘肃呈现不同程度的西扩北移态势, 其中河西地区北移 130—180 km, 西扩 80—170 km; 甘南高原北移 80—140 km, 西扩 40—150 km, 甘肃冬油菜种植的北界平均向北移了 40—300 km。同时, 在甘肃河西春小麦单产增加幅度达 3.18 kg/hm², 马铃薯和玉米增产幅度分别达 9.60 和 13.08 kg/hm²(李克南等, 2010; 鲍文中等, 2017)。因此, 气候变化对中国干旱、半干旱区的农业具有诸多影响, 需要施行综合举措, 调整农业结构布局, 强化水资源管理, 提升农业适应能力, 加大生态环境保护力度, 以达成农业的可持续发展。

第五, 对物种的影响。气候变化致使干旱、半干旱区的生态环境发生变化, 一些物种的分布区域

和数量也随之改变(马柱国等, 2018; 符淙斌等, 2023)。中国干旱、半干旱区适应能力较强的物种会拓展分布范围, 而适应能力较弱的物种则面临生存困境, 数量减少乃至灭绝。例如, 一些依赖特定气候条件的珍稀濒危物种生存正在因气候变化遭受威胁。不同物种之间的相互关系可能因气候变化而发生改变, 一些食物链和食物网可能会被扰乱(马柱国等, 2005; 从靖等, 2017; 符淙斌等, 2023)。例如, 某些植物的减少可能致使以其为食的动物数量下降, 进而影响整个生态系统平衡。气候变化对中国干旱、半干旱区的物种具有诸多影响(胡子瑛等, 2018; 张强等, 2023a), 这些影响可能带来了巨大的挑战, 如生态系统稳定性降低、生物多样性减少等(郭正堂, 2017; 张强等, 2023b)。因此, 为了应对气候变化对物种的影响, 需要采取一系列举措, 以实现生物多样性和物种的稳定(郭正堂, 2017; 姜江等, 2017; 胡子瑛等, 2018)。

4 未来展望

近百年来, 中国干旱、半干旱区气候变化研究在时空分布、形成机理、归因及影响等方面取得了一些重要成果, 形成了一些重要科学共识, 然而仍面临着诸多科学问题亟需研究:

第一, 构建中国干旱、半干旱区的高分辨科学数据集。干旱、半干旱区气象监测站点稀少且数据缺失严重, 多源气象数据在空间和时间上存在一定的不一致, 进而限制了对气候变化的全面认识。因此, 未来应增加干旱、半干旱区气象监测站点布设, 并且通过整合现有的地面观测、卫星遥感和再分析资料, 结合数据同化技术, 提高气象数据的一致性和准确性, 构建中国干旱、半干旱区高分辨科学数据集, 为干旱、半干旱区气候变化的深入研究提供更科学可靠的数据支持。

第二, 中国干旱、半干旱区陆-气耦合系统对外强迫响应的区域差异。干旱、半干旱区气候受人类活动、内部变率以及外强迫等多种因子协同影响, 量化认识不同因子对气候变化的相对贡献非常关键。因此, 未来应加强对内部变率、外强迫和人类活动的贡献检测归因研究, 明晰陆-气耦合系统对外强迫响应的区域差异, 基于更高质量的多源时、空数据, 厘清干旱、半干旱区气候变化的机理、区域间的关联和差异。

第三,区域水循环对中国干旱、半干旱区湿化的响应特征。进入21世纪以来,干旱、半干旱区湿化趋势的结论主要是基于降水变化分析的结果,而对区域地表水分收支变化并不清楚。因此,未来应集中发展高分辨率的气候和水文模型,提高对水循环过程的模拟精度,增强模型的预测能力,客观认识地表实际蒸散和地表径流,基于地表水分平衡来厘清地表水分收支变化以及未来预估,为区域的水资源管理提供科学支撑。

第四,中国干旱、半干旱区极端天气、气候事件变化特征及其主导机制。气候变暖背景下干旱、半干旱区极端天气、气候事件趋多、趋强,然而,目前更多研究集中在基本气候态的变化及影响方面,而对极端天气、气候事件变化规律的认识并不明确,影响机理理解更是不清楚,同时现有的气候模型在预测极端事件方面也存在很大不确定性。因此,未来应强化极端天气、气候事件的检测归因分析,并且结合耦合模式比较计划,探究极端天气、气候事件的未来可能变化,为区域气象防灾、减灾提供科学依据。

第五,中国干旱、半干旱区气候系统更多圈层要素的系统性变化特征及其联动机制。目前,干旱、半干旱区气候变化研究中更多关注的是气温、降水等常规气象要素,但对于地表辐射平衡、感热和潜热、土壤水分、积雪、冻融等陆面水分和能量等气候系统多圈层分量变化认识并不深入。因此,未来应发展和改进多时、空尺度的多圈层耦合气候系统模式和野外科学试验观测站网,提高气候模式对各圈层要素的综合模拟能力及各圈层要素间相互作用的认识水平,进而提升对干旱、半干旱区气候系统多圈层变化规律、机理认识以及预估能力。

第六,中国干旱、半干旱区大气干旱与陆面干旱对气候变化响应的差异原因。大气干旱与陆面干旱并不是同时发生的,从大气干旱到陆面干旱存在一个传递过程,但这种传递并不是必然发生的,只有在一定条件下才能发生,有研究认为变暖背景下中国干旱、半干旱区大气干旱化范围在扩张(Huang, et al, 2019),而另有研究则认为陆面干旱的范围却在缩小(Berg, et al, 2021),大气干旱与陆面干旱变化并不一致。因此,未来需要充分了解大气干旱与陆面干旱的内在关系,揭示它们之间的传递规律和机制,明晰大气干旱与陆面干旱对气候变

化响应的差异原因,提升干旱化的预判和防御水平。

5 结语

中国干旱、半干旱区基本处在“胡焕庸线”以西(胡焕庸, 1935),其气候背景决定了该地区人类赖以生存的自然资源尤其是水资源相对匮乏,从而导致该地区社会经济基础相对落后,在超过中国三分之一的国土面积上只承载了不到8%的人口,造成了中国社会经济发展严重的不平衡。“胡焕庸线”西北与东南部指标对比如图9所示。当前,推动中国高质量发展面临的突出问题正是发展的不平衡、不充分,要解决这一问题首先需要努力实现中国东、西部平衡发展,而要实现东、西部平衡发展必须深入研究中国干旱、半干旱区气候变化及对自然资源的影响特征,通过对自然资源的科学开发利用与跨区域调配,补足西部地区资源短板,打破“胡焕庸线”对西部地区的自然条件约束,促进西部地区生态良好与社会经济高质量发展。

并且,中国干旱、半干旱区不仅是全球独特的气候区和生态环境地带,也是中国风能和太阳能等清洁能源的富集区,还是中国西部大开发等重大战略实施的主战场,在中国未来发展中具有重要战略地位。所以不仅需要将已形成共识的科学成果与国家重大战略的实施方案密切结合起来,及时服务区域高质量发展,而且更需要科学系统地认识该地区气候变化规律、未来趋势及其对生态安全、水资源安全、能源安全和社会经济发展的影响,为中华民族伟大复兴提供强有力的科技支撑。

同时,中国干旱、半干旱区是全球典型的气候

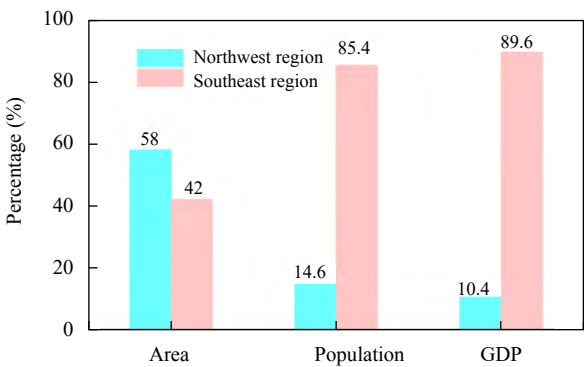


图9 2023年中国“胡焕庸线”西北、东南部指标对比
Fig. 9 Comparison of indicators for the Northwest and Southeast of the "Hu Huanyong line" over China in 2023

变化敏感区和生态环境脆弱区,也是全球十分独特的区域气候系统,其气候变化的驱动因子很多。该地区气候变化不仅受高、中及低纬度环流系统的共同影响,而且受陆-气相互作用过程的影响与其他区域相比更加显著,受人类活动的影响也非常突出,受青藏高原大地形及其热力变化的影响也十分明显。因此,区域气候变化的影响机理非常复杂,目前的认识还相对肤浅,尚有很多重要的科学问题需要进一步厘清。

目前,中国干旱、半干旱区已建立的国家气候观测台和野外科学观测试验网,可以获取多尺度、多要素、高精度的气候系统多圈层数据,为深入揭示该地区气候系统多圈层要素的系统变化及其相互作用机制提供了良好基础。迫切需要国家针对该地区气候变化及其影响问题专门立项进行综合科学考察,并在此基础上开展深入系统的科学研究,进一步突破一些关键科学难题,弄清该地区气候变化与自然环境和社会经济发展的关系,回答好“胡焕庸线”如何破解这一事关中国发展全局的科学难题,有力支撑中国式现代化建设。

参考文献

- 安芷生, 张培震, 王二七等. 2006. 中新世以来我国季风-干旱环境演化与青藏高原的生长. 第四纪研究, 26(5): 678-693. An Z S, Zhang P Z, Wang E Q, et al. 2006. Changes of the monsoon-arid environment in China and growth of the Tibetan Plateau since the Miocene. *Quat Sci*, 26(5): 678-693 (in Chinese)
- 白肇烨, 徐国昌. 1988. 中国西北天气. 北京: 气象出版社, 1-442. Bai Z Y, Xu G C. 1988. *Northwest China Weather*. Beijing: China Meteorological Press, 1-442 (in Chinese)
- 鲍文中, 周广胜, 马鹏里等. 2017. 甘肃农业对气候变化的适应与风险评估报告(No. 1). 北京: 社会科学文献出版社, 1-199. Bao W Z, Zhou G S, Ma P L, et al. 2017. *Assessment Report on Adaptation and Risk of Agriculture to Climate Change in Gansu (No. 1)*. Beijing: Social Sciences Academic Press (China), 1-199 (in Chinese)
- 车涛, 郝晓华, 戴礼云等. 2019. 青藏高原积雪变化及其影响. 中国科学院院刊, 34(11): 1247-1253. Che T, Hao X H, Dai L Y, et al. 2019. Snow cover variation and its impacts over the Qinghai-Tibet Plateau. *Bull Chinese Acad Sci*, 34(11): 1247-1253 (in Chinese)
- 陈发虎, 谢亭亭, 杨钰杰等. 2023. 我国西北干旱区“暖湿化”问题及其未来趋势讨论. 中国科学: 地球科学, 53(6): 1246-1262. Chen F H, Xie T T, Yang Y J, et al. 2023. Discussion of the “warming and wetting” trend and its future variation in the drylands of Northwest China under global warming. *Sci China Earth Sci*, 53(6): 1246-1262 (in Chinese)
- 陈亚宁. 2021. 干旱区科学概论. 北京: 科学出版社, 1-30. Chen Y N. 2021. *Introduction to Science in Arid Regions*. Beijing: China Science Press, 1-30 (in Chinese)
- 从靖, 赵天保, 马玉霞. 2017. 中国北方干旱半干旱区降水的年代际变化特征及其与太平洋年代际振荡的关系. 气候与环境研究, 22(6): 643-657. Cong J, Zhao T B, Ma Y X. 2017. Multi-decadal variability of precipitation in arid and semi-arid region of northern China and its relationship with Pacific Decadal Oscillation index. *Climatic Environ Res*, 22(6): 643-657 (in Chinese)
- 丁一汇, 王守荣. 2001. 中国西北地区气候与生态环境概论. 北京: 气象出版社, 77-154. Ding Y H, Wang S R. 2001. *Introduction to Climate, Ecology and Environment in Northwest China*. Beijing: China Meteorological Press, 77-154 (in Chinese)
- 丁一汇, 柳艳菊, 徐影等. 2023. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望. 地球科学进展, 38(6): 551-562. Ding Y H, Liu Y J, Xu Y, et al. 2023. Regional responses to global climate change: Progress and prospects for trend, causes, and projection of climatic warming-wetting in Northwest China. *Adv Earth Sci*, 38(6): 551-562 (in Chinese)
- 符添斌, 马柱国. 2023. 全球干旱/半干旱区年代尺度干湿变化研究的进展及思考. 大气科学学报, 46(4): 481-490. Fu C B, Ma Z G. 2023. Progress and reflection on the study of interdecadal changes in dry and wet conditions in global arid and semiarid regions. *Trans Atmos Sci*, 46(4): 481-490 (in Chinese)
- 高晓宇, 郝海超, 张雪琪等. 2023. 中国西北干旱区植被水分利用效率变化对气象要素的响应——以新疆为例. 干旱区地理, 46(7): 1111-1120. Gao X Y, Hao H C, Zhang X Q, et al. 2023. Responses of vegetation water use efficiency to meteorological factors in arid areas of Northwest China: A case of Xinjiang. *Arid Land Geogr*, 46(7): 1111-1120 (in Chinese)
- 高艳红, 许建伟, 张萌等. 2020. 中国 400 mm 等降水量变迁与干湿变化研究进展. 地球科学进展, 35(11): 1101-1112. Gao Y H, Xu J W, Zhang M, et al. 2020. Advances in the study of the 400 mm isohyet migrations and wetness and dryness changes on the Chinese mainland. *Adv Earth Sci*, 35(11): 1101-1112 (in Chinese)
- 高由禧. 1989. 关于我所开展干旱气候研究的历史. 高原气象, 8(2): 103-106. Gao Y X. 1989. The history of arid climate research in LIPAP. *Plateau Meteor*, 8(2): 103-106 (in Chinese)
- 龚咏琪, 于海鹏, 周洁等. 2023. 东亚干旱半干旱区水汽来源研究进展. 地球科学进展, 38(2): 168-182. Gong Y Q, Yu H P, Zhou J, et al. 2023. Review on water vapor sources in drylands of East Asia. *Adv Earth Sci*, 38(2): 168-182 (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*, 49(6): 895-912 (in Chinese)
- 郭正堂. 2017. 黄土高原见证季风和荒漠的由来. 中国科学: 地球科学, 47(4): 421-437. Guo Z T. 2017. Loess Plateau attests to the onsets of monsoon and deserts. *Sci China Earth Sci*, 47(4): 421-437 (in Chinese)

- 郝志新, 吴茂伟, 张学珍等. 2020. 过去千年中国年代和百年尺度冷暖阶段的干湿格局变化研究. *地球科学进展*, 35(1): 18-25. Hao Z X, Wu M W, Zhang X Z, et al. 2020. An overview on changes of dry/wet pattern in China in decadal to centennial warm and cold periods during the past millennium. *Adv Earth Sci*, 35(1): 18-25 (in Chinese)
- 胡焕庸. 1935. 中国人口之分布——附统计表与密度图. *地理学报*, 2(2): 33-74. Hu H Y. 1935. The distribution of population in China, with statistics and maps. *Acta Geogr Sinica*, 2(2): 33-74 (in Chinese)
- 胡隐樵, 高由禧. 1994. 黑河实验(HEIFE)——对干旱地区陆面过程的一些新认识. *气象学报*, 52(3): 285-296. Hu Y Q, Gao Y X. 1994. Some new understandings of processes at the land surface in arid area from the HEIFE. *Acta Meteor Sinica*, 52(3): 285-296 (in Chinese)
- 胡子瑛, 周俊菊, 张利利等. 2018. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征. *生态学报*, 38(6): 1908-1919. Hu Z Y, Zhou J J, Zhang L L, et al. 2018. Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China. *Acta Ecol Sinica*, 38(6): 1908-1919 (in Chinese)
- 黄刚. 2006. 与华北干旱相关联的全球尺度气候变化现象. *气候与环境研究*, 11(3): 270-279. Huang G. 2006. Global climate change phenomenon associated with the droughts in North China. *Climatic Environ Res*, 11(3): 270-279 (in Chinese)
- 黄嘉佑, 宋玉梅, 王绍武. 1993. 区域随机动力统计气候模式及其预报试验. *气象学报*, 51(3): 315-324. Huang J Y, Song Y M, Wang S W. 1993. A local stochastic dynamic climatic model and its forecasting experiments. *Acta Meteor Sinica*, 51(3): 315-324 (in Chinese)
- 黄建平, 李明霞, 刘玉芝等. 2013. 干旱半干旱区气候变化研究综述. *气候变化研究进展*, 9(1): 9-14. Huang J P, Ji M X, Liu Y Z, et al. 2013. An overview of arid and semi-arid climate change. *Adv Climate Chang Res*, 9(1): 9-14 (in Chinese)
- 姜江, 姜大膀, 林一骅. 2017. 中国干湿区变化与预估. *大气科学*, 41(1): 43-56. Jiang J, Jiang D B, Lin Y H. 2017. Changes and projection of dry/wet areas over China. *Chinese J Atmos Sci*, 41(1): 43-56 (in Chinese)
- 姜萍, 胡列群, 许婷婷. 2023. 近 60 a 新疆大气水分亏缺的时空变化特征. *干旱区地理*, 46(1): 1-10. Jiang P, Hu L Q, Xu T T. 2023. Spatiotemporal variations of vapor pressure deficit in Xinjiang in recent 60 years. *Arid Land Geogr*, 46(1): 1-10 (in Chinese)
- 康红文, 谷湘潜, 付翔等. 2005. 我国北方地区降水再循环率的初步评估. *应用气象学报*, 16(2): 139-147. Kang H W, Gu X Q, Fu X, et al. 2005. Precipitation recycling over the northern China. *J Appl Meteor Sci*, 16(2): 139-147 (in Chinese)
- 李栋梁, 谢金南, 王文. 1997. 中国西北夏季降水特征及其异常研究. *大气科学*, 21(3): 331-340. Li D L, Xie J N, Wang W. 1997. A study of summer precipitation features and anomaly in Northwest China. *Sci Atmos Sinica*, 21(3): 331-340 (in Chinese)
- 李京忠, 辛振华, 谢潇等. 2024. 半干旱区植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应: 以锡林郭勒盟为例. *应用生态学报*, 35(1): 80-86. Li J Z, Xin Z H, Xie X, et al. 2024. Spatio-temporal variations of vegetation cover in semi-arid regions and its response to climate change: A case study of Xilin Gol, Inner Mongolia, China. *Chinese J Appl Ecol*, 35(1): 80-86 (in Chinese)
- 李克南, 杨晓光, 刘志娟等. 2010. 全球气候变化对中国种植制度可能影响分析 III. 中国北方地区气候资源变化特征及其对种植制度界限的可能影响. *中国农业科学*, 43(10): 2088-2097. Li K N, Yang X G, Liu Z J, et al. 2010. Analysis of the potential influence of global climate change on cropping systems in China III. The change characteristics of climatic resources in northern China and its potential influence on cropping systems. *Sci Agric Sin*, 43(10): 2088-2097 (in Chinese)
- 李宪之. 1955. 东亚寒潮侵袭研究. *中国近代科学论著选刊: 气象学(1919-1949)*. 北京: 科学出版社, 35-117. Li X Z. 1955. Research on the invasion of cold waves in EAST Asia. *Selected Journals of Modern Chinese Scientific Treatises: Meteorology (1919-1949)*. Beijing: China Science Press, 35-117 (in Chinese)
- 李岩瑛, 张春燕, 张爱萍等. 2022. 河西走廊春季沙尘暴大气边界层垂直结构特征. *气象*, 48(9): 1171-1185. Li Y Y, Zhang C Y, Zhang A P, et al. 2022. Vertical structure characteristics of atmospheric boundary layer in spring sandstorm over Hexi Corridor. *Meteor Mon*, 48(9): 1171-1185 (in Chinese)
- 李卓忆, 杨庆, 马柱国等. 2024. 中国北方干旱半干旱区植被对气候变化和人类活动的响应. *大气科学*, 48(3): 859-874. Li Z Y, Yang Q, Ma Z G, et al. 2024. Responses of vegetation to climate change and human activities in the arid and semiarid regions of northern China. *Chinese J Atmos Sci*, 48(3): 859-874 (in Chinese)
- 罗菲菲, 李双林. 2015. 动力统计相结合的未来 30 年东亚气温年代际预测. *中国科学: 地球科学*, 45(4): 402-413. Luo F F, Li S L. 2014. Joint statistical-dynamical approach to decadal prediction of East Asian surface air temperature. *Sci China Earth Sci*, 45(4): 402-413 (in Chinese)
- 罗格平, 陈嘻, 胡汝骥. 2003. 基于 AVHRR/NOAA 影像的天山北坡近 10a 植被变化. *冰川冻土*, 25(2): 237-242. Luo G P, Chen X, Hu R J. 2003. Vegetation change during the last 10 years derived from satellite image in the North Slopes of the Tianshan Mountains. *J Glaciol Geocryol*, 25(2): 237-242 (in Chinese)
- 罗红羽, 于海鹏, 胡泽勇等. 2023. 青藏高原热源对我国旱区气候异常影响研究进展. *高原气象*, 42(2): 257-271. Luo H Y, Yu H P, Hu Z Y, et al. 2023. Progress of the impact of the Qinghai-Xizang plateau heat sources on climate anomalies in drylands of China. *Plateau Meteor*, 42(2): 257-271 (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, 1-332. Luo Z X. 2005. Introduction to the Dynamics of Arid Climate in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 1-332 (in Chinese)
- 吕达仁, 陈佑忠, 陈家宜等. 2002. 内蒙古半干旱草原土壤-植被-大气相互作用(IMGRASS)综合研究. *地学前缘*, 9(2): 295-306. Lv D R, Chen Z Z, Chen J Y, et al. 2002. Composite study on Inner Mongolia semi-arid grassland soil-vegetation-atmosphere interaction (IMGRASS). *Earth Sci Front*, 9(2): 295-306 (in Chinese)

- 马鹏里, 杨金虎, 卢国阳等. 2020. 西北地区东部气候的转折性变化. 高原气象, 39(4): 840-850. Ma P L, Yang J H, Lu G Y, et al. 2020. The transitional change of climate in the east of Northwest China. Plateau Meteor, 39(4): 840-850 (in Chinese)
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征. 地球物理学报, 48(3): 519-525. Ma Z G, Fu C B. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China. Chinese J Geophys, 48(3): 519-525 (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 relationship between aridity trend and turning change in North China and Pacific decadal oscillation. Chinese Sci Bull, 52(10): 1199-1206 (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 C 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)
- 钱正安, 吴统文, 吕世华等. 1998. 夏季西北干旱气候形成的数值模拟——高原地形和环流场等的影响. 大气科学, 22(5): 753-762. Qian Z A, Wu T W, Lu S H, et al. 1998. Numerical simulation of Northwest China arid climate formation: Effects of the Qinghai-Xizang plateau terrain and circulation field. Sci Atmos Sinica, 22(5): 753-762 (in Chinese)
- 冉津江, 李明霞, 黄建平等. 2014. 中国干旱半干旱地区的冷季快速增温. 高原气象, 33(4): 947-956. Ran J J, Ji M X, Huang J P, et al. 2014. Enhanced cold-season warming in arid and semi-arid regions of China. Plateau Meteor, 33(4): 947-956 (in Chinese)
- 施雅风, 孔昭宸. 1992. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1-212. Shi Y F, Kong Z C. 1992. Climatic Change and Environmental Characteristic of the Holocene in China. Beijing: China Ocean Press, 1-212 (in Chinese)
- 施雅风, 张丕远. 1996. 中国历史气候变化. 济南: 山东科学技术出版社, 533. Shi Y F, Zhang P Y. 1996. Climate Change in Chinese History. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 533 (in Chinese)
- 施雅风, 沈永平. 2003. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探. 科技导报, (2): 54-57. Shi Y F, Shen Y P. 2003. Signal impact and outlook of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. Sci Technol Rev, (2): 54-57 (in Chinese)
- 苏海峰, 戴新刚, 熊喆等. 2023. 黑河流域降水统计-动力降尺度问题研究. 大气科学, 47(3): 642-654. Su H F, Dai X G, Xiong Z, et al. 2023. Study on statistical-dynamical downscaling for precipitation in the Heihe River Basin. Chinese J Atmos Sci, 47(3): 642-654 (in Chinese)
- 孙国武. 1997. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 384. Sun G W. 1997. The Research of Drought Climate in Northwest China. Beijing: China Meteorological Press, 384 (in Chinese)
- 孙康慧, 曾晓东, 李芳. 2021. 中国生态脆弱区叶面积指数变化的主导气象因子研究. 自然资源学报, 36(7): 1873-1892. Song K H, Zeng X D, Li F. 2021. Study on the dominant climatic driver affecting the changes of LAI of ecological fragile zones in China. J Nat Resour, 36(7): 1873-1892 (in Chinese)
- 涂长望, 张汉松. 1944. 明代水旱灾周期的初步探讨. 气象学报, 18(1): 1-8. Tu C W, Zhang H S. 1944. A preliminary study on the cycle of water and drought in the Ming Dynasty. Acta Meteor Sinica, 18(1): 1-8 (in Chinese)
- 汪久文. 1997. 中国干旱区形成的古地理过程. 干旱区资源与环境, (1): 2-9. Wang J W. 1997. Paleogeographical processes in the formation of China arid land. J Arid Land Resour Environ, (1): 2-9 (in Chinese)
- 汪品先, 田军, 黄恩清等. 2018. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 565pp. Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. 2018. Earth System and Evolution. Beijing: China Science Press, 565pp (in Chinese)
- 王冀, 江志红, 严明良等. 2008. 1960-2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析. 气象科学, 28(4): 384-388. Wang J, Jiang Z H, Yan M L, et al. 2008. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960-2005. Scientia Meteor Sinica, 28(4): 384-388 (in Chinese)
- 王菱, 谢贤群, 李运生等. 2004. 中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化. 地理研究, 23(1): 45-54. Wang L, Xie X Q, Li Y S, et al. 2004. Changes of humid index and borderline of wet and dry climate zone in northern China over the past 40 years. Geogr Res, 23(1): 45-54 (in Chinese)
- 王绍武. 1993. 气候预测与模拟研究. 北京: 气象出版社, 340. Wang S W. 1993. Climate Prediction and Simulation Research. Beijing: China Meteorological Press, 340 (in Chinese)
- 王绍武, 龚道溢. 2000. 全新世几个特征时期的中国气温. 自然科学进展, 10(4): 325-332. Wang S W, Gong D Y. 2000. Temperature in China during several characteristic periods of the Holocene. Adv Nat Sci, 10(4): 325-332 (in Chinese)
- 王政琪, 高学杰, 童尧等. 2021. 新疆地区未来气候变化的区域气候模式集合预估. 大气科学, 45(2): 407-423. Wang Z Q, Gao X J, Tong Y, et al. 2021. Future climate change projection over Xinjiang based on an ensemble of regional climate model simulations. Chinese J Atmos Sci, 45(2): 407-423 (in Chinese)
- 武炳义. 2018. 北极海冰融化影响东亚冬季天气和气候的研究进展以及学术争论焦点问题. 大气科学, 42(4): 786-805. Wu B Y. 2018. Progresses in the impact study of Arctic sea ice loss on wintertime weather and climate variability over East Asia and key academic disputes. Chinese J Atmos Sci, 42(4): 786-805 (in Chinese)
- 《西北区域气候变化评估报告: 2020》编写委员会. 2021. 西北区域气候变化评估报告: 2020 决策者摘要. 北京: 气象出版社, 1-21. Writing Committee of Northwest Regional Climate Change Assessment Report: 2020. 2021. Summary for Policymakers of Northwest Regional Climate Change Assessment Report: 2020. Beijing: China Meteorological Press, 1-21 (in Chinese)
- 谢义炳. 1943. 清代水旱灾之周期研究. 气象学报, 17(S1): 67-74. Xie Y B. 1943. Research on the cycle of water and drought in the Qing Dynasty.

- Acta Meteor Sinica, 17(S1): 67-74 (in Chinese)
- 《新疆区域气候变化评估报告: 2020》编写委员会. 2021. 新疆区域气候变化评估报告: 2020 决策者摘要. 北京: 气象出版社, 1-21. Writing Committee of Xinjiang Regional Climate Change Assessment Report: 2020. 2021. Summary for Policymakers of Xinjiang Regional Climate Change Assessment Report: 2020. Beijing: China Meteorological Press, 1-21 (in Chinese)
- 徐国昌等. 1997. 中国干旱半干旱区气候变化. 北京: 气象出版社, 1-101. Xu G C, et al. 1997. Climate Change in Arid and Semi-Arid Regions of China. Beijing: China Meteorological Press, 1-101 (in Chinese)
- 徐娟, 魏明建. 2006. 华北地区百年气候变化规律分析. 首都师范大学学报(自然科学版), 27(4): 79-82. Xu J, Wei M J. 2006. The climate change features in the last 100 years. J Cap Norm Univ (Nat Sci Ed), 27(4): 79-82 (in Chinese)
- 闫昕昉, 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)
- 闫昕昉, 张强, 张文波等. 2021. 泛中亚干旱区气候变化特征分析. 干旱区研究, 38(1): 1-11. Yan X Y, Zhang Q, Zhang W B, et al. 2021. Analysis of climate characteristics in the Pan-Central-Asia arid region. Arid Zone Res, 38(1): 1-11 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 杨启国等. 2005. 中国西北近 41 a 来年中雨及以上级别降水次数的时空分布特征. 地球科学进展, 20(S1): 132-139. Yang J H, Jiang Z H, Yang Q G, et al. 2005. In recent 41a temporal and spatial distribution of annual moderate rain or more than precipitation frequency in Northwest China. Adv Earth Sci, 20(S1): 132-139 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 魏锋等. 2006. 近 45 a 来中国西北年极端高、低温的变化及对区域性增暖的响应. 干旱区地理, 29(5): 625-631. Yang J H, Jiang Z H, Wei F, et al. 2006. Variability of extreme high temperature and low temperature and their response to regional warming in Northwest China in recent 45 years. Arid Land Geogr, 29(5): 625-631 (in Chinese)
- 杨金虎, 沈永平, 王鹏祥等. 2007. 中国西北近 45 a 来极端低温事件及其对区域增暖的响应. 冰川冻土, 29(4): 536-542. Yang J H, Shen Y P, Wang P X, et al. 2007. Extreme low temperature events in Northwest China and their response to regional warming in the recent 45 years. J Glaciol Geocryol, 29(4): 536-542 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥等. 2008. 中国年极端降水事件的时空分布特征. 气候与环境研究, 13(1): 75-83. Yang J H, Jiang Z H, Wang P X, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China. Climatic Environ Res, 13(1): 75-83 (in Chinese)
- 杨金虎, 江志红, 刘晓芸等. 2012. 近半个世纪中国西北干湿演变及持续性特征分析. 干旱区地理, 35(1): 10-22. Yang J H, Jiang Z H, Liu X Y, et al. 2012. Influence research on spring vegetation of Eurasia to summer drought-wetness over the Northwest China. Arid Land Geogr, 35(1): 10-22 (in Chinese)
- 杨阳, 戴新刚, 汪萍. 2022. 未来 30 年亚洲降水情景预估及偏差订正. 大气科学, 46(1): 40-54. Yang Y, Dai X G, Wang P. 2022. Projection of Asian precipitation for the coming 30 years and its bias correction. Chinese J Atmos Sci, 46(1): 40-54 (in Chinese)
- 杨子寒, 托雅, 杨杰等. 2024. 基于多种动力-统计方法的中国夏季降水集成预测研究. 地球物理学报, 67(3): 982-996. Yang Z H, Tuo Y, Yang J, et al. 2024. Integrated prediction of summer precipitation in China based on multi dynamic-statistic methods. Chinese J Geophys, 67(3): 982-996 (in Chinese)
- 姚旭阳, 张明军, 张宇等. 2022. 中国西北地区气候转型的新认识. 干旱区地理, 45(3): 671-683. Yao X Y, Zhang M J, Zhang Y, et al. 2022. New insights into climate transition in Northwest China. Arid Land Geogr, 45(3): 671-683 (in Chinese)
- 于恩涛, 孙建奇, 吕光辉等. 2015. 西部干旱区未来气候变化高分辨率预估. 干旱区地理, 38(3): 429-437. Yu E T, Sun J Q, Lv G H, et al. 2015. High-resolution projection of future climate change in the northwestern arid regions of China. Arid Land Geogr, 38(3): 429-437 (in Chinese)
- 岳平, 张强, 赵文等. 2015. 黄土高原半干旱草地生长季干湿时段环境因子对陆面水、热交换的影响. 中国科学: 地球科学, 45(8): 1229-1242. Yue P, Zhang Q, Zhao W, et al. 2015. Influence of environmental factors on land-surface water and heat exchange during dry and wet periods in the growing season of semiarid grassland on the Loess Plateau. Sci China Earth Sci, 45(8): 1229-1242 (in Chinese)
- 曾剑, 张强, 王春玲. 2016. 东亚夏季风边缘摆动区陆面能量时空分布规律及其与气候环境的关系. 气象学报, 74(6): 876-888. Zeng J, Zhang Q, Wang C L. 2016. Spatial-temporal pattern of surface energy fluxes over the East Asian summer monsoon edge area in China and its relationship with climate. Acta Meteor Sinica, 74(6): 876-888 (in Chinese)
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 1951-2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 1(1): 16-18. Zhai P M, Zou X K. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951-2003. Adv Climate Change Res, 1(1): 16-18 (in Chinese)
- 张存杰, 廖要明, 段居琦等. 2016. 我国干湿气候区划研究进展. 气候变化研究进展, 12(4): 261-267. Zhang C J, Liao Y M, Duan J Q, et al. 2016. The progresses of dry-wet climate divisional research in China. Adv Climate Change Res, 12(4): 261-267 (in Chinese)
- 张红丽, 张强, 刘骞等. 2016. 中国干旱状况的时空分布特征及影响因素. 兰州大学学报(自然科学版), 52(4): 484-491. Zhang H L, Zhang Q, Liu Q, et al. 2016. The temporal and spatial distribution characteristics of dryness index and its main factors in China. J Lanzhou Univ (Nat Sci), 52(4): 484-491 (in Chinese)
- 张慕琪, 闻新宇, 包赞等. 2022. 基于人工神经网络开发中国地区统计降尺度气候预估数据. 北京大学学报(自然科学版), 58(2): 221-233. Zhang M Q, Wen X Y, Bao Y, et al. 2022. Statistical downscaled climate projection dataset for China using artificial neural network. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 58(2): 221-233 (in

(Chinese)

- 张强, 胡隐樵, 曹晓彦等. 2000. 论西北干旱气候的若干问题. 中国沙漠, 20(4): 357-362. Zhang Q, Hu Y Q, Cao X Y, et al. 2000. On some problems of arid climate system of Northwest China. J Desert Res, 20(4): 357-362 (in Chinese)
- 张强, 黄荣辉, 王胜等. 2005. 西北干旱区陆-气相互作用试验(NWC-ALIEX)及其研究进展. 地球科学进展, 20(4): 427-441. Zhang Q, Huang R H, Wang S, et al. 2005. NWC-ALIEX and its research advances. Adv Earth Sci, 20(4): 427-441 (in Chinese)
- 张强, 王胜, 闫晓梅等. 2012. 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. 2012. 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, 张良, 黄菁等. 2014. 我国黄土高原地区陆面能量的空间分布规律及其与气候环境的关系. 中国科学: 地球科学, 44(9): 2062-2076. Zhang Q, Zhang L, Huang J, et al. 2014. Spatial distribution of surface energy fluxes over the Loess Plateau in China and its relationship with climate and the environment. Sci China Earth Sci, 44(9): 2062-2076 (in Chinese)
- 张强, 杨泽粟, 郝小翠等. 2018. 北方蒸散对气候变暖响应随降水类型转换特征. 科学通报, 63(11): 1035-1049. Zhang Q, Yang Z S, Hao X C, et al. 2018. Transition features of surface evapotranspiration responding to climate warming with spatial precipitation-based climate type in northern China. Chinese Sci Bull, 63(11): 1035-1049 (in Chinese)
- 张强, 朱颀, 杨金虎等. 2021. 西北地区气候湿化趋势的新特征. 科学通报, 66(28-29): 3757-3771. Zhang Q, Zhu B, Yang J H, et al. 2021. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China. Chinese Sci Bull, 66(28-29): 3757-3771 (in Chinese)
- 张强, 杨金虎, 马鹏里等. 2023a. 西北地区气候暖湿化增强东扩特征及其形成机制与重要环境影响. 干旱气象, 41(3): 351-358. Zhang Q, Yang J H, Ma P L, et al. 2023a. The enhancement and eastward expansion of climate warming and humidification, formation mechanism and important environmental impacts in Northwest China. Arid Meteor, 41(3): 351-358 (in Chinese)
- 张强, 杨金虎, 王朋铃等. 2023b. 西北地区气候暖湿化的研究进展与展望. 科学通报, 68(14): 1814-1828. Zhang Q, Yang J H, Wang P L, et al. 2023b. Progress and prospect on climate warming and humidification in Northwest China. Chinese Sci Bull, 68(14): 1814-1828 (in Chinese)
- 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 2003. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究. 大气科学, 27(5): 881-893. Zhao S R, Song Z S, Ji L R. 2003. Heating effect of the Tibetan Plateau on rainfall anomalies over North China during rainy season. Chinese J Atmos Sci, 27(5): 881-893 (in Chinese)
- 郑景云, 王绍武. 2005. 中国过去 2000 年气候变化的评估. 地理学报, 60(1): 21-31. Zheng J Y, Wang S W. 2005. Assessment on climate change in China for the last 2000 years. Acta Geogr Sinica, 60(1): 21-31

(in Chinese)

- 中央气象局气象科学研究所. 1981. 中国近五百年旱涝分布图集. 北京: 地图出版社, 1-260. Meteorological Science Research Institute of China Meteorological Administration. 1981. Atlas of Drought and Flood Distribution in China Over the Past 500 Years. Beijing: Sinomap Press, 1-260 (in Chinese)
- 朱颀, 张强, 李春华等. 2023. 我国干旱半干旱区气候变化特征及其对于湿波动的影响. 大气科学学报, 46(1): 42-54. Zhu B, Zhang Q, Li C H, et al. 2023. Characteristics of climate change in arid and semi-arid areas of China and its influence on climatic dry-wet fluctuation. Trans Atmos Sci, 46(1): 42-54 (in Chinese)
- 竺可桢. 1925. 中国历史上气候之变迁. 东方杂志, 22(3): 1-12. Zhu K Z. 1925. Climate change in Chinese history. The Eastern Miscellany, 22(3): 1-12 (in Chinese)
- 竺可桢. 1972. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 考古学报, (1): 15-38. Zhu K Z. 1972. A preliminary study on climate changes since the last 5000 years in China. Acta Archaeol Sinica, (1): 15-38 (in Chinese)
- Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. 1998. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations
- Berg A, Mccoll K A. 2021. No projected global drylands expansion under greenhouse warming. Nat Climate Chang, 11(4): 331-337
- Chen F F, Chen J, Huang W H, et al. 2019. Westerlies Asia and monsoonal Asia: Spatiotemporal differences in climate change and possible mechanisms on decadal to sub-orbital timescales. Earth-Sci Rev, 192: 337-354
- Cheng S, Yu H, Zhou J, et al. 2024. Impact of summer North Atlantic sea surface temperature tripole on precipitation over mid-high-latitude Eurasia. J Climate, 37(19): 5037-5053
- Ding Y H, Wu P, Liu Y J. 2022. Modulation of sea surface temperature in three oceans on precipitation increase over Northwest China during the past 60 years: A review. Front Climate, 4: 1015225
- Fluteau F, Ramstein G, Besse J. 1999. Simulating the evolution of the Asian and African monsoons during the past 30 Myr using an atmospheric general circulation model. J Geophys Res Atmos, 104(D10): 11995-12018
- Han D L, Huang J P, Ding L, et al. 2021. Oxygen footprint: An indicator of the anthropogenic ecosystem changes. CATENA, 206: 105501
- Han D L, Huang J P, Ding L, et al. 2022. Breaking the ecosystem balance over the Tibetan Plateau. Earth's Future, 10(10): e2022EF002890
- Huang J P, Zhang W, Zuo J Q, et al. 2008. An overview of the semi-arid climate and environment research observatory over the loess plateau. Adv Atmos Sci, 25(6): 906-921
- Huang J P, Guan X D, Ji F. 2012. Enhanced cold-season warming in semi-arid regions. Atmos Chem Phys, 12(12): 5391-5398
- 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, Yu H P, Dai A G, et al. 2017. Drylands face potential threat under

- 2°C global warming target. *Nat Climate Chang*, 7(6): 417-422
- Huang J P, Huang J P, Liu X Y, et al. 2018. The global oxygen budget and its future projection. *Sci Bull*, 63(15): 1180-1186
- 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
- Hulme M, Marsh R, Jones P D. 1992. Global changes in a humidity index between 1931-60 and 1961-90. *Climate Res*, 2(1): 1-22
- Ji F, Wu Z H, Huang J P, et al. 2014. Evolution of land surface air temperature trend. *Nat Climate Chang*, 4(6): 462-466
- Li C Y, Huang J P, Ding L, et al. 2021. Estimation of oceanic and land carbon sinks based on the most recent oxygen budget. *Earth's Future*, 9: 2021EF002124
- Li Y, Huang J P, Ji M X, et al. 2015. Dryland expansion in northern China from 1948 to 2008. *Adv Atmos Sci*, 32(6): 870-876
- Liu X D, Guo Q C, Guo Z T, et al. 2015. Where were the monsoon regions and arid zones in Asia prior to the Tibetan Plateau uplift?. *Natl Sci Rev*, 2(4): 403-416
- Luo H Y, Yu H P, Hu Z Y, et al. 2024. Impact of the summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau on interannual variability of meridional circulation on the north side of the Tibetan Plateau. *J Climate*, 37(13): 3543-3561
- Poulsen C J, Tabor C, White J D. 2015. Long-term climate forcing by atmospheric oxygen concentrations. *Science*, 348(6240): 1238-1241
- Ramstein G, Fluteau F, Besse J, et al. 1997. Effect of orogeny, plate motion and land-sea distribution on Eurasian climate change over the past 30 million years. *Nature*, 386(6627): 788-795
- Ren Y, Yu H P, Liu C X, et al. 2022. Attribution of dry and wet climatic changes over central Asia. *J Climate*, 35(5): 1399-1421
- Ren Y, Yu H P, Huang J P, et al. 2024. The projected response of the water cycle to global warming over drylands in East Asia. *Earth's Future*, 12(4): e2023EF004008
- Tang H, Micheels A, Eronen J T, et al. 2013. Asynchronous responses of East Asian and Indian summer monsoons to mountain uplift shown by regional climate modelling experiments. *Climate Dyn*, 40(5): 1531-1549
- Wang L, Chen W. 2014. A CMIP5 multimodel projection of future temperature, precipitation, and climatological drought in China. *Int J Climatol*, 34(6): 2059-2078
- Wei Y, Yu H P, Huang J P, et al. 2019. Drylands climate response to transient and stabilized 2°C and 1.5°C global warming targets. *Climate Dyn*, 53(3): 2375-2389
- Wei Y, Yu H P, Huang J P, et al. 2021a. Improving China's summer precipitation prediction in 2020 by observational constrained bias correction. *Theor Appl Climatol*, 145(3): 1317-1331
- Wei Y, Wu J G, Huang J P, et al. 2021b. Declining oxygen level as an emerging concern to global cities. *Environ Sci Technol*, 55(12): 7808-7817
- Wei Y, Yu H P. 2024. The interdecadal weakening of the relationship between Indian Ocean sea surface temperature and summer precipitation in central Asia. *Geophys Res Lett*, 51(4): e2023GL107371
- Wu G X, Liu Y M, He B, et al. 2012. Thermal controls on the Asian summer monsoon. *Sci Rep*, 2: 404
- Wu P, Liu Y J, Ding Y H, et al. 2022. Modulation of sea surface temperature over the North Atlantic and Indian-Pacific warm pool on interdecadal change of summer precipitation over Northwest China. *Int J Climatol*, 42(16): 8526-8538
- Xu Y F, Yang J, Chen Y N. 2016. NDVI-based vegetation responses to Climate change in an arid area of China. *Theor Appl Climatol*, 126(1-2): 213-222
- Yang Y F, Bai L, Wang B, et al. 2019. Reliability of the global climate models during 1961-1999 in arid and semiarid regions of China. *Sci Total Environ*, 667: 271-286
- Yang Z S, Zhang Q, Hao X C, et al. 2019. Changes in evapotranspiration over global semiarid regions 1984-2013. *J Geophys Res Atmos*, 124(6): 2946-2963
- Yu H P, Zhang Q, Wei Y, et al. 2022. Bias-corrections on aridity index simulations of climate models by observational constraints. *Int J Climatol*, 42(2): 889-907
- 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): 13,901-13,918
- Zhang Q, Wang W Y, Wang S. 2016. Increasing trend of pan evaporation over the semiarid loess plateau under a warming climate. *J Appl Meteorol Climatol*, 55(9): 2007-2020
- 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, Yang Z S, Hao X C, et al. 2019b. Conversion features of evapotranspiration responding to climate warming in transitional climate regions in northern China. *Climate Dyn*, 52: 3891-3903
- Zhang Q, Yang J H, Wang W, et al. 2021. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: Multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation. *J Meteor Res*, 35(1): 113-127
- Zhang Q, Yang J H, Duan X Y, et al. 2022. The eastward expansion of the climate humidification trend in Northwest China since the start of this century and the synergistic influences on the circulation mechanism. *Climate Dyn*, 59(7): 2481-2497
- Zhao T B, Chen L, Ma Z G. 2014. Simulation of historical and projected climate change in arid and semiarid areas by CMIP5 models. *Chinese Sci Bull*, 59(4): 412-429
- Zhou J, Yu H P, Xu P Q, et al. 2024. Extreme heat event over Northwest China driven by Silk Road Pattern teleconnection and its possible mechanism. *Atmos Res*, 297: 107090