

中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展

郑景云^{1,2*}, 方修琦³, 吴绍洪^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要:气候学是自然地理学的重要组成部分;过去气候变化和当代气候增暖的影响与适应研究是中国自然地理学在气候变化领域的2个主要研究方向。本文综述了这2个研究方向的主要进展,包括:分别简述研究的意义、发展历程与主要科学问题;梳理总结中国过去气候变化重建与时空特征分析,历史时期气候变化的影响,全球增暖背景下中国气候区划变动特征,全球增暖对中国自然生态系统、水资源、农业等方面影响的区域差异,气候变化的综合风险区划等方面的前沿进展,特别是在各方面所取得的主要科学认识;以为未来的深入研究,特别是编制相关领域和学科发展战略提供参考。

关键词:气候变化;研究进展;过去气候变化;全球增暖影响与适应;中国

气候学是自然地理学的重要组成部分,也是大气科学分支学科;气候变化是气候学研究的传统领域。20世纪70年代以来,随着全球增暖问题日益突出,气候变化研究得到迅速发展,成为当前国内外学术界乃至社会各界关注的“热点”。与大气科学领域的气候变化研究重点相比,中国自然地理学中的气候变化研究主要侧重于“过去气候变化”和“当代气候增暖的影响与适应”2个研究方向。

1 过去气候变化研究

1.1 研究意义、简要历程与重点问题

过去气候变化是全球变化研究的核心内容,国际上主要通过过去全球变化计划(Past Global Changes, PAGES)推动和引领,重点关注过去2000年、全新世、过去15万年等3个重点时域(Temporal Stream)和年代至万年尺度的变化史实与机制问题(PAGES, 2009),并与CLIVAR计划共同发起了“提供古气候图景:理解气候变率与可预报性的需要”

的交叉计划(Duplessy et al, 1994),紧密地将气候变化历史重建与气候变化的时空特征分析及预测等问题结合起来。PAGES大致经历了3个发展阶段(PAGES, 2009):1989-2000年,以代用资料的获取和局地气候变化重建为研究重点;2000-2009年,区域气候变化记录集成为核心;2009年以来,研究重点转为:气候驱动力,地球系统动力学,区域气候变化动力学机制,过去人类—气候—生态系统相互作用;以及定年、代用资料校准与验证、气候模拟、资料集成等4个共性技术问题。

在过去气候变化研究中,自然地理学主要关注全新世以来,特别是过去2000年;因为这一时段是气候从仅受自然驱动到叠加人类影响的衔接时段,对辨识当代增暖是否超出自然变率、区分自然与人为驱动对气候变化的贡献、诊断气候在年代至百年尺度上的变化机制、了解气候多尺度变化的影响与适应特征、预估和应对未来气候变化等有独特价值。当前主要关注以下4方面:①各种代用记录的准确定年、样品的实验分析、记录的解释、校准和验

收稿日期:2018-01-02;修订日期:2018-01-15。

基金项目:国家自然科学基金项目(L1624026, 41671036);中国科学院学部学科发展战略研究项目(2016-DX-C-02) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.L1624026, No.41671036; Research Project on the Development Strategy of Chinese Academy of Sciences, No.2016-DX-C-02]。

通讯作者:郑景云(1966-),研究员,主要从事气候变化研究, E-mail: zhengjy@igsnr.ac.cn。

引用格式:郑景云, 方修琦, 吴绍洪. 2018. 中国自然地理学中的气候变化研究前沿进展[J]. 地理科学进展, 37(1): 16-27. [Zheng J Y, Fang X Q, Wu S H. 2018. Recent progress of climate change research in physical geography studies from China[J]. Progress in Geography, 37(1): 16-27.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.01.003

证过程中不确定性的定量分析;②全球框架下区域尺度的气候重建研究;③气候变化与人类活动的相互作用;④气候模式的优化、重建与模拟结果的对比以及年代至百年尺度的气候变化机制。

中国历史悠久,文献记载丰富、记述详尽,且其中拥有大量的气候、灾异及其影响记录,这些记录定年准、指示要素明确;同时,中国地理环境多样,从而孕育、留存了树轮、冰芯、湖芯、石笋和珊瑚等多种类型的高分辨率气候变化自然代用证据;为气候变化重建提供了独特的代用资料基础,使中国成为开展过去全球变化研究的理想区域(国家自然科学基金委员会, 1998)。

经过数代人的努力,中国历史气候变化研究在竺可桢(Chu, 1973)开创的基础上得到了蓬勃发展;不但通过持续查阅正史、地方志、清代和民国档案、日记等史料中的气象、物候、灾异及其影响记载,整编了多部历史气象记录资料集(张德二, 2004; 中国科学院地理科学与资源研究所历史气候资料整编委员会《清实录》编选组, 2016),建立了历史气候变化文献数据库(郑景云等, 2002);而且也采集大量的树轮、冰芯、湖芯、石笋、珊瑚等自然证据,建立发展了利用自然证据进行气候变化研究的新手段,实现了研究方法与国际研究的接轨;同时编制了《中国近五百年旱涝分布图集》(中央气象局气象科学研究所, 1981),出版了中国历史气候变化等专著(张丕远, 1996; 王绍武, 2011)。特别是21世纪以来,其研究内容也拓展至气候变化的定量重建及结果不确定性分析、多源代用资料集成、年—年代—百年尺度气候变化的区域差异及机制诊断、气候变化对历史时期社会经济发展的影响等多个方面,取得了若干有国际显示度的成果。仅最近10余年,就发表了约500篇相关论文,出版了10余部资料集和专著;其中利用史料重建的中国温度序列及部分树轮、冰芯等代用资料被国际古气候数据库收录,在半球、洲际温度序列集成重建、亚洲格网干旱指数数据集研制等工作得到广泛引用(National Research Council, 2006; Osborn et al, 2006; Hegerl et al, 2007; Mann et al, 2008, 2009; Jones et al, 2009; Cook et al, 2010; Christiansen et al, 2011; PAGES2k Consortium, 2013, 2017)。

1.2 前沿进展与主要认识

1.2.1 中国过去2000年气候变化时空特征

利用历史文献及树轮等代用证据,中国学者已重建了一批高分辨率气候变化序列,揭示了过去

2000年中国冷暖与干湿变化的若干重要特征,同时结合气候模拟,诊断了历史时期温暖气候的形成机制及其与20世纪增暖的差异。主要认识概括如下:

(1) 冷暖变化基本特征及中世纪气候增暖与当代增暖的机制差异:中国过去2000年温度变化存在50~70年、100~120年、200~250年和准600年等多尺度的周期波动;其间公元1~200、550~760、950~1300年和20世纪等4个时段气候总体温暖,公元210~350、420~530、780~940和1320~1900年等相对寒冷;特别是其中950~1300和1320~1900年分别与北半球其他区域存在的中世纪气候异常期和小冰期基本对应。此外,从温度变幅看,冷暖期间的百年尺度最大温度变幅约达1.0℃,年代际最大变幅约为1.5℃;且出现过数个(如公元660~760、1020~1120、1190~1290年)与20世纪温暖程度基本相似的百年温暖时段(Ge et al, 2013)。

尽管在过去2000年中国曾存在数个与20世纪温暖程度相仿的暖期,但这并不能否认20世纪全球显著增暖主要是因人类活动引发的温室效应增强所致(王绍武等, 2013)。因为区域温度重建结果和模拟均显示:20世纪气候增暖在北半球几乎同步,而中世纪增暖在空间上则存在幅度和位相差异。如在中世纪气候异常期,中国东部尽管都有显著的温暖时段,但东北和东中部的暖期出现时间却不尽一致,且同期青藏高原的温暖程度却极弱;类似特征在北半球的各大洲也同样存在(葛全胜等, 2015)。模拟诊断发现:这一差异可能是因驱动历史暖期和20世纪暖期的主控因子和物理机制不同而致(王志远等, 2014)。中世纪全球增暖主要受太阳短波辐射变化驱动;短波辐射在到达地球后,通过加热下垫面、特别是被海洋吸收后,再发射长波辐射加热大气,这一物理机制称为“海洋恒温机制(thermostat mechanism)”;由于地球下垫面具有显著的不均质性,因而导致增暖出现非均匀特征。但20世纪的全球增暖则主要受温室气体的控制,温室气体在大气中随大气环流均匀扩散并吸收长波辐射直接加热大气,因此其增暖在全球具有较强一致性,这一机制称为“大气稳定机制(stabilization mechanism)”(Liu et al, 2013)。此外,模拟还显示:这两种不同的增暖机制虽均导致全球平均降水量增加,但增加幅度和影响区域差异显著。

(2) 干湿与极端旱涝变化特征:大量的重建结果分析显示,中国多数地区的干湿变化均存在显著的年代际(10~35年)、多年代(40~75年)和世纪(80~

150年)等3个尺度的准周期性波动。其中在东部季风区,10~35年周期性变率的方差解释量占总方差的28.6%~33.3%,多年代尺度占13.9%~15.7%,世纪尺度占9.0%~13.0%(Zheng et al, 2017);而且也存在千年尺度的趋势变化。从整个东部季风区总体看,在千年尺度上,干湿变化趋势大致可分为2个阶段:一是公元初-13世纪前期,总的趋势是在波动中逐渐变干;二是13世纪中期后-20世纪,总趋势是在波动中转湿。在年代和百年尺度上,魏晋南北朝期间(公元221-580年)气候总体偏干,仅240s-290s、410s-420s、460s-520s等时段相对湿润;隋唐期间(公元581-907年)则在过去2000年平均水平上下波动,其中公元600年、730年、820年和900年前后气候偏湿,而660年、760年、800年和850年前后气候偏干;五代-北宋(公元908-1127年)气候总体略偏湿,但存在转干趋势;南宋-元代(公元1128-1368年)气候总体偏干,但在波动中逐渐趋湿;明代(1369-1644年)前期气候湿润,中期(约1430-1550年)持续偏干,中后期虽曾两度(1570和1600年前后)短暂转湿,但趋势为波动转干,明末则出现了自秦汉以来最为严重的持续性干旱事件,并因此引发了社会动荡和大规模的农民起义(Zheng et al, 2014);清代(1645-1911年)气候总体湿润,但年代际波动极为显著,1720、1785、1810和1877年前后还出现了持续性极端干旱;20世纪气候在波动中趋干,其中40年代中期-60年代中期较为湿润,80年代起则再次转干。

从极端旱涝发生状况看,公元101-150、251-300、951-1000、1701-1750、1801-1850和1901-1950年极端大涝多发;301-400、751-800、1051-1150、1501-1550和1601-1650年极端干旱多发;特别是1551-1600年则既多发极端干旱,又多发极端大涝;且在气候总体偏干的12-14世纪和15世纪后期-17世纪中期多发极端连旱;相对偏湿的10-11世纪及17世纪中期以后,多发极端连涝(郑景云等, 2014);特别是其间的大部分持续性干旱事件还得到了位于季风边缘区的万象洞石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 变化序列(Zhang et al, 2008)的印证。

然而,无论是重建、还是模拟结果都显示,中国东部季风区在各个尺度上的干湿周期变化信号均不稳定,从而使得不同地带的干湿变化对应关系极为复杂,如在年代际和多年代尺度上,华北和江淮地区的干湿在1736-1780和1966-1991年基本同

步,但在1785-1834、1886-1915和1942-1960年等时段,则呈反相变化;华北和江南地区的干湿在公元760-870、1180-1390、1490-1650和1730年之后,大致呈反相变化,其他时段的反相却不显著;且3个地区的极端旱、涝事件多发时段也存在差异。

在秦岭西侧至祁连山东段、柴达木盆地东沿等半干旱地区,利用数十个地点树轮资料集成重建的过去千年干湿变化序列(Shao et al, 2010; Yang et al, 2014)显示:11世纪、13世纪中叶、14世纪、16世纪后半叶-17世纪初、18世纪后半叶、19世纪后半叶以及20世纪后半叶气候湿润,其他时段则气候干旱。而在西部干旱区,1000-1350年间相对偏干,1500-1850年降水偏多、气候相对偏湿,近几十年气候则从暖干转为暖湿(Chen et al, 2010)。

1.2.2 历史时期气候变化对中国社会经济发展的影响

历史时期气候变化对社会经济发展的影响是当前全球变化研究的热点与难点之一。集成中国过去温度、干湿与极端旱涝事件等高分辨率重建结果,结合利用丰富历史文献定量重建的丰歉(Yin et al, 2015)、经济(Wei et al, 2015)、财政(Wei et al, 2014)、社会兴衰等级与人口增长率、饥荒指数、农民起义频次、农牧民族战争频次(Fang et al, 2015)等社会经济序列,通过对比分析揭示了气候变化与社会经济发展过程的宏观对应特征,以及极端气候在其中的可能影响(方修琦等, 2017)。主要结论如下:

(1) 中国历史上的社会经济波动与气候变化之间总体上存在“冷抑暖扬”对应关系。即在暖期时,中国往往呈现农业生产发达、经济繁荣、人口增加、国力强盛态势。反之,寒冷阶段往往农业萎缩、经济衰退、国力式微、社会动荡;其中在15次王朝更替中,有11次出现在冷期或相对寒冷时段(葛全胜等, 2011)。

(2) 气候趋势变化主要通过粮食安全和财政收支影响社会经济系统的脆弱性,极端气候事件则多在由暖转冷背景下的社会高脆弱时段触发重大社会危机。这主要是因为:在宏观尺度上,暖期对应的人口增长和经济发展会增加社会对资源环境的压力,使得在气候恶化(特别是转冷或极端旱涝事件增加)时,会导致资源的相对短缺,引发农业生产萎缩、经济衰退,造成人地关系失衡(Zhang et al, 2007; Fang et al, 2015)。如在过去2000年中国社会的9个高风险期中,有8个与气候由暖转冷过程一致,使得以农业为基础的社会系统风险持续上升,

导致其间的一些极端气候事件与重大灾害往往成为社会危机和动荡(甚至全面动荡、战争和朝代更替等)的触发因素(Zheng et al, 2014; Wei et al, 2015)。

(3) 人类对气候变化影响的响应手段与方式多样,从农业生产、赈济、移民到社会危机处置等的响应层序,既与气候变化幅度之间存在一定的对应关系,也与社会脆弱性密切相关;其响应过程中增强的适应能力往往还是促进后续社会发展的重要因素(葛全胜等, 2014)。

然而,应当指出的是,气候变化对社会经济发展的影响不仅受制于气候和极端事件变化的冲击,更多地还取决于由人口、经济、文化、体制、管理(governance)等众多人文因素组成的社会经济系统脆弱性;这些人文因素又有其自身变化规律。因而,气候变化对人类社会的影响与人类对气候变化的适应并不是简单的线性“驱动—响应”关系,其中存在着复杂的多尺度(包括时间和空间)相互作用过程和响应特征(IPCC, 2012)。如仅在气候变化对农(牧)业生产影响及其对食物的人均供给量、民生(特别是温饱与饥荒)、社会稳定性等冲击过程中,就存在多种时空尺度的非线性影响与响应过程;每个过程都可能产生抑制或放大作用,且因地、因时而异(葛全胜等, 2014; Fang et al, 2015)。案例分析表明:在明、清两朝后期,气候恶化特征基本相似,即均呈现气候转冷、极端旱涝事件多发等特征,但其对社会影响后果却因二者社会背景和响应策略、方式的不同,而呈现显著差异(Ye et al, 2012; Xiao et al, 2015)。因此,气候与极端事件变化对人类社会的最终冲击后果,不只受气候变化时空差异的影响,还在更大程度上受制于社会组织、政府决策部门和受众等对气候变化冲击的认知及其响应弹性与敏感性;需要通过逐个案例分析,才能深入了解影响与响应在各种时空尺度上的具体过程及其复杂性。然而,目前这方面的案例研究还极少,有待深入开展。

2 当代气候变暖的影响与适应研究

科学评估当代全球变暖的各种影响,是因地制宜应对未来气候变化、保障可持续发展的科学基础,对国家和地区发展战略制定、国家参与全球变化治理等都具有重大意义。

中国自20世纪80年代末开始启动这一领域研

究,其中地理学者从气候变化的区域差异入手,主要关注:全球变暖对中国气候和自然综合区划的影响,全球变暖对中国自然生态系统、水资源、农业等影响(包括利、弊两方面)的区域差异,以及气候变化的综合风险区划等问题。

2.1 过去60年中国气候区划变动特征

揭示气候区域分异格局变化对全球变暖的响应特征,有助于因地制宜制定区域气候变化适应策略,是各地、各行业适应未来气候变化的重要依据。其中在全球层面上,已有研究(Kalvová et al, 2003)发现:与20世纪初期相比,1961–1990年的热带、温带和寒带分布范围均有一定程度的扩展,分别达1.86%、0.45%和1.31%;而干旱区和极地寒冷带的分布范围则分别缩小了1.89%和1.72%。中国地域广、气候类型多,加之气候变化时空差异显著,因此辨识气候区划及界限变动对全球变暖响应特征一直是中国地理学关注的重点问题,并开展了不少研究,但由于不同研究使用的方法、特别是资料和分析指标不同,因而认识也不一致。

最近,郑景云等(2013a, 2013b)利用1951–2010年中国756个站气象观测日值数据集,对因台站迁移及测站类型变更导致的资料进行了整合与均一性订正;然后按照同一区划原则,采用同一方法和标准,分别编制了1951–1980年、1961–1990年、1971–2000年和1981–2010年等4个时段的全国气候区划;通过不同时段间的对比,定量揭示了20世纪全球变暖背景下的中国气候区划及其主要区划界线的变化特征(廖要明等, 2014)。主要结论如下:

(1) 受1951–2010年间中国气候总体变暖及各地降水波动等的影响,气候区划界线也相应出现了一定程度的变化。与1951–1980年相比,1981–2010年中国有30个气候区出现了水平位置移动或范围盈缩;寒温带界线出现了小幅北移和西缩;暖温带、北亚热带、中亚热带、南亚热带等温度带的北界均出现了北移。其中暖温带北界东段的最大北移幅度和北亚热带北界东段的平均北移幅度均达1个纬度以上,且北亚热带北界已越过淮河;中亚热带北界虽然东段北移幅度较小,但中段最大移动幅度已达2个纬度,从江汉平原南沿移到了江汉平原北部;南亚热带北界西段也北移了0.5~2.0个纬度。同时,青藏高原高原温带范围出现了一定程度的扩展,亚寒带范围则有所缩小(图1a)(卞娟娟等, 2013)。

(2) 过去 60 年(1951–2010 年)中国的干湿区界线虽仅在淮河流域的半湿润—湿润界线出现了约 1 个纬度的北移,东北的中温带地区湿润—半湿润东界有所东移,大兴安岭中部与南部的半湿润—半干旱界线有小幅北扩;但大多数区域的干湿状况变化都出现了一定程度的变化(图 1b)。其中总体特征为:东北的湿润、半湿润区转干与趋湿并存;北方的半干旱和半湿润及位于内蒙的干旱区总体转干;甘肃、新疆及青藏高原等西部干旱区、半干旱区总体转湿;南方湿润区则是东部(包括江淮、江南和东南等)总体转湿,西南大部总体转干,但云南大部趋干与转湿并存(卞娟娟等, 2013)。

2.2 全球增暖对中国影响的区域差异

全球增暖的影响涉及自然与社会经济系统的多个方面,特别是水资源、自然生态、农业系统等因与气候变化直接相关而尤被广泛关注,也是中国地理学者涉猎全球变化研究最广泛的领域,涉及局地、区域、全国和年际、年代际等多个时空尺度;主要研究结果已分别被三次气候变化国家报告全面评估(《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007;《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2011;《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015),初步厘清了气候变化对中国若干领域影响的区域利弊(表 1)。其中:

(1) 对水资源影响的主要特征为:西部地区冰川萎缩、融水径流增加(丁永建等, 2009),但全国径

流量总体下降,区域径流变异性加大(叶柏生等, 2008; 王国庆等, 2011),其中近 50 年气候变化对海河流域、黄河中游河川径流减少的贡献率分别达 26%和 38%(Tang et al, 2008)。在 RCP4.5 排放情景下,未来中国水资源南多北少格局不会改变,北疆和黄河以北地区的水资源量也可能增加,但全国水资源量总体可能减少 5%以内,且旱涝灾害频次和强度可能增加,冰湖溃决突发洪水风险加大。由于气候变化很可能导致农业、工业、生活需水增加,因此中国水资源的区域性供需矛盾可能进一步加剧。

(2) 对自然生态系统影响的主要特征为:北方温带森林分布北移高扩,生长期延长,森林总体碳汇增加(Ren et al, 2011; Liu et al, 2012),温带草原增加,高山牧场草原界线上移;但同时也会导致局地生境改变,从而使一些物种发生局地消失,并导致北方落叶林减少,草原分布东移,西部部分区域的荒漠化趋势加剧、自然生产力下降(李英年等, 2003; 严作良等, 2003),东部湿地总体萎缩。未来预估显示:温度上升在 3℃以内,气候变化虽然不太可能对中国生态系统可持续性造成不可逆转的影响,且近期的负面效应也不明显,但中、远期却会对生态系统可持续性产生显著的负面影响(Wu et al, 2010)。

(3) 对农业影响的主要特征为:在气候增暖促进复种指数增加的同时,也导致小麦和玉米单产分别下降 1.27%和 1.73%,并导致耕地质量总体下降,农作物病虫害总体呈加重态势(潘根兴等, 2011; 霍

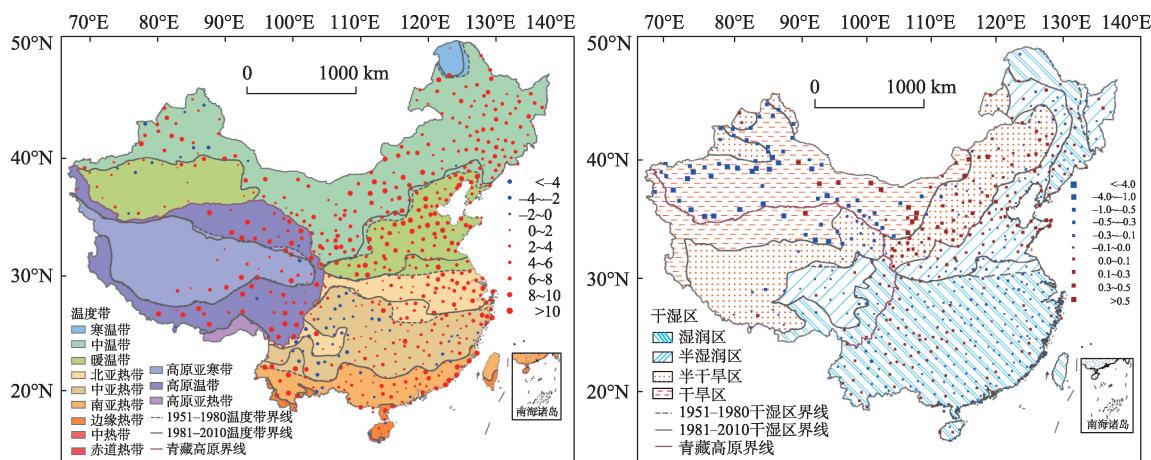


图 1 中国 1951–1980 年至 1981–2010 年温度带与日平均气温稳定 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 日数(a, 红圆点为增加, 蓝色为减少)和干湿区界线与年干燥度(b, 红方块为转干, 蓝色为转湿)变化(卞娟娟等, 2013)

Fig.1 Changes in the demarcation lines for temperature zones and the number of days with daily temperature above 10°C (red dots: increase, blue dots: decrease) (a), and the demarcation lines for moisture regions and aridity index (red squares: drier, blue squares: wetter) (b) in China from 1951–1980 to 1981–2010 (Bian et al, 2013)

表1 当代气候变化对中国若干关键领域影响及区域利(+)弊(-)特征(改自吴绍洪等, 2016)

Tab.1 Positive and negative impacts of recent climate change on several sectors for different regions in China (Adapted from Wu et al, 2016)

受影响 领域/系统	主要利弊		重点区域的影响利弊
	有利	不利	
水资源	冰川融水径流增加	径流量总体下降,区域径流变异性加大;旱涝灾害加重	华北地区(-)、华中地区(-)、西南地区(-)、西北地区(+)
冰冻圈环境	冰川融水增加;冰封期缩短;凌期趋于缓和;渤海及黄海北部海冰冰情总体缓解	冰川萎缩、厚度减薄;冰湖溃决风险加大;多年冻土面积萎缩;雪灾频次总体增加;局部海冰冰情年际变率加大	东北地区(-)、西南地区(-)、西北地区(+&-)
森林与其他自然生态系统	森林总体碳汇增加;温带草原增加;高山牧场草原界线上移	北方落叶林减少;西部荒漠化、生产力下降;东部湿地萎缩;局部物种消失	东北地区(-)、西南地区(+&-)、西北地区(-)
海岸带和近海环境		海洋酸化加剧;赤潮、风暴潮加重;海岸侵蚀强度增大;红树林和珊瑚礁退化	华东地区、华南地区
农业	热量资源增加;复种指数增加	耕地质量下降;用水供需矛盾加剧;病虫害加重	东北地区(+)、华北地区(+)、华东地区(-)、华中地区(+)、西北地区(+)
环境质量与人体健康		水体富营养化及大气污染等加剧;传染病及自然疫源性疾病增加、流行区域扩大	华东地区、华中地区

治国等, 2012; Tao et al, 2012)。预估在不考虑主要农作物品种改良和农业生产管理技术进步的背景下,未来因气候增暖导致的区域性水资源短缺将是限制农业可持续发展最主要因素,造成中国粮食自给率下降,粮食安全风险增加(Ye et al, 2013)。

此外,在气候变化对冰冻圈环境、海岸带和近海环境、环境质量与人体健康等的影响方面,也取得了若干重要结果(表1)。

2.3 气候变化的综合风险区划

借鉴自然地理学综合区划方法论,辨识中国不同区域的温度、降水变化类型,揭示其变化趋势和波动特征的区域分异,对深入认识不同区域的气候变化与相关的自然灾害及环境风险等,从而更针对性地制定区域适应气候变化的举措具有重要价值;这也是近年地理学者关注的新问题。利用气象观测和未来气候情景模拟资料,史培军等(2014)揭示了过去50年中国气候变化的区域分异特征;吴绍洪等(2017)编制了未来中国气候变化综合风险区划。

(1) 过去50年中国气候变化的区域分异特征。新近研究结果(史培军等, 2014)显示:1961-2010年,中国的温度、降水变化分为5个趋势带14个波动特征区。其中:I是东北—华北暖干趋势带,包括:小兴安岭—长白山—三江平原气温波动增强降水波动减弱区(I 1)、大兴安岭—辽西山地—科尔沁沙地气温波动减弱降水波动增强区(I 2)、华北山地—平原—山东半岛气温波动减弱降水波动减弱区(I 3)、

黄土高原—汾河谷地气温波动增强降水量波动减弱区(I 4);II是华东—华中温暖趋势带,包括:淮河流域—长江下游平原气温波动减弱降水波动增强区(II 1)、长江下游沿江平原—浙江—赣北—湘东降水波动增强气温波动减弱区(II 2)、南岭东部丘陵山地区气温波动减弱降水波动减弱区(II 3);III是西南—华南干暖趋势带,包括秦岭西部山地—四川盆地气温波动增强降水波动减弱区(III 1)、秦岭东部—鄂西山地区气温波动增强降水波动减弱区(III 2)、云贵高原—南岭西部山地丘陵降水波动增强气温波动增强区(III 3);IV是藏东南—西南温暖趋势带,包括:IV藏东南山地—高原降水波动增强气温波动增强区(IV 1)、横断山区山地岭谷降水波动增强气温波动增强区(IV 2);V是西北—青藏高原暖湿趋势带,包括:新疆山地—祁连山—内蒙古高原气温波动减弱降水波动增强区(V 1)、青藏高原气温波动增强降水波动增强区(V 2)。此外,还有研究根据各地降水变率、降水量的偏度、峰度和频率分布形式、周期波动及突变等变化特征的区域差异,按3个等级进一步划分了中国1961-2010年降水变化区(梁圆等, 2016)。

(2) 未来中国气候变化综合风险区划。在依次辨识未来气温变化线性趋势与全国平均的差异及降水增减特征、主要极端事件(干旱、高温热浪和洪涝)的发生频次和程度与二者对各类承险体(粮食生产、生态系统、人口与经济系统)的综合影响等级基础上,吴绍洪等(2017)根据温室气体排放RCP8.5^①

①即假定人口增长最快、技术革新水平较低、能源改善十分缓慢,导致持续过高的能源需求以及大量的温室气体排放,2100年辐射强迫高达8.5 W/m²。

情景下的2021–2050年气候模拟结果,采用3级区划方案进行了中国气候变化未来情景综合风险区划;将中国分为8个气候变化敏感区、19个极端事件危险区和46个综合风险区(图2),揭示了中国气候变化综合风险的区域分异特征。

结果表明:在RCP8.5情景下,2021–2050年中

国将继续增暖,其中增暖趋势强烈的区域主要分布在东北、西北、青藏高原中西部及华东—华中的部分地区;其他地区则呈弱增暖趋势;除新疆天山及南疆盆地、内蒙大部及长江以南至南岭以北的区域降水减少外,其他大部分地区的降水均增加。同时,全国多数地区的干旱、洪涝和高温热浪危险性



图2 中国气候变化(2021-2050, RCP8.5)综合风险区划(吴绍洪等, 2017)

Fig.2 China's comprehensive climate change risk regionalization (2021-2050, RCP 8.5) (Wu et al., 2017)

增高。其中,内蒙古南部、黄土高原、西南南部、新疆北部、青海省及西藏西部是干旱危险性增高最大的区域;华北内陆、华东内陆、四川盆地、华南、内蒙古西部、准格尔盆地和塔里木盆地等为高温热浪高危险区;而洪涝高危险区则主要分布在东部沿海、长江中下游平原、华南地区及东喜马拉雅山南翼。其中,在鄂尔多斯及其西北侧的新甘蒙—准格尔等地,则是干旱和高温热浪的危险性同时增高;长江中下游至华南沿海等地,洪涝和高温热浪危险性均增高。

综合考虑区域粮食生产、生态系统、人口与经济系统脆弱性与暴露度,以及未来增暖强弱、降水增减和干旱、高温热浪、洪涝等主要极端事件对其的共同影响,可以看出,2021-2050年中国气候变化综合风险最高的区域分别为:华北平原中南部增暖增雨极端气候加剧与人口经济粮食高风险区[IIC5(abd)],华南西部增暖增雨热浪加剧、生态经济粮食人口高风险区[IVC5(cbda)],华南沿海增暖增雨干旱热浪加剧、生态粮食经济人口高风险区[IVE5(cd-ba)];中高风险的区域分别为:华东沿海增暖增雨洪涝加剧、人口经济粮食生态中高风险区[IIB4(abdc)],东南沿海增暖减雨洪涝加剧、粮食人口经济生态中高风险区[IIIB4(dabc)],长江中下游增暖减雨洪涝热浪加剧、人口经济粮食生态中高风险区[IIIE4(abdc)],滇西—滇中增暖增雨干旱加剧、粮食生态经济人口中高风险区[IVA4(dcba)]。这些认识可为国家因地制宜地应对未来气候变化风险提供了科学参考。

3 结语

本文依据中国自然地理学在气候变化领域的研究成果,特别是近10余年来发表的文献,综述了过去气候变化和当代气候增暖的影响与适应2个方向研究的前沿进展,总结其在中国过去气候变化重建与时空特征分析,历史时期气候变化的影响,全球增暖背景下中国气候区划变动特征,全球增暖对中国自然生态系统、水资源、农业等方面影响的区域差异,气候变化的综合风险区划等问题研究所取得的主要科学认识。这些认识为中国编制三次气候变化国家评估报告(《气候变化国家评估报告》编写委员会, 2007;《第二次气候变化国家评估报告》

编写委员会, 2011;《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会, 2015)、应对未来气候变化提供了重要依据,其中部分结果还被IPCC评估报告(IPCC, 2001, 2007, 2013)引用,得到了国际同行的认可。

目前,国家自然科学基金委员会和中国科学院正在联合开展自然地理学的学科发展战略研究;系统梳理学科研究现状与前沿进展是其重要内容,也是进一步编制学科发展规划、深入开展相关问题研究的基础。由于自然地理学研究分支学科多,涉及领域广、研究方向多,特别是随着气候系统和地球系统科学的相继创立与发展,多学科间的相互交叉和渗透日益显著,使气候学研究内容得到迅速拓展;且随着全球增暖问题日益突出,使得气候变化不仅成为气候学研究的主要问题,也成为其他多个科学研究关注的“热点”。在系统梳理其前沿进展、分析发展趋势基础上,根据自然地理学研究的区域性、综合性强的特点,进一步发挥气候变化领域多学科交叉特征显著的优势,深入开展过去气候变化和当代全球气候变化影响问题研究,结合科学技术和经济社会的发展需求,培育新的学科增长点,既是推动气候学研究发展的机遇,也是气候学研究面临的新挑战。展望未来,我们认为,中国自然地理学中的气候变化研究,应在深入开展上述各个问题研究基础上,将过去和现代气候变化研究与未来应对研究融为一体,同时将研究视野拓展至“全球”,以研究气候系统变化的阈值(Thresholds)、反转点(Tipping Points)与多重均衡(Multiple Equilibria),气候变化和极端事件风险的区域差异及高风险区识别、温暖气候应对等新“热点”问题为纽带,开展更综合的交叉研究,与其他学科共同努力,将气候变化研究推向新高度,为推动“一带一路”共建、参与全球气候环境治理等作出新贡献。

参考文献(References)

- 卞娟娟, 郝志新, 郑景云, 等. 2013. 1951-2010年中国主要气候区划界线的移动[J]. 地理研究, 32(7): 1179-1187. [Bian J J, Hao Z X, Zheng J Y, et al. 2013. The shift on boundary of climate regionalization in China from 1951 to 2010 [J]. Geographical Research, 32(7): 1179-1187.]
- 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2011. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Editing Commission of the Second National Report on Climate Change of China. 2011. Dierci qihou bianhua guojia ping-

- gu baogao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 《第三次气候变化国家评估报告》编写委员会. 2015. 第三次气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Editing Commission of the Third National Report on Climate Change of China. 2015. Disanci qihou bianhua guojia pinggu baogao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 丁永建, 秦大河. 2009. 冰冻圈变化与全球变暖: 我国面临的影响与挑战[J]. 中国基础科学, 11(3): 4-10. [Ding Y J, Qin D H. 2009. Cryosphere change and global warming: Impact and challenges in China[J]. China Basic Science, 11(3): 4-10.]
- 方修琦, 萧凌波, 苏筠, 等. 2017. 中国历史时期气候变化对社会发展的影响[J]. 古地理学报, 19(4): 729-736. [Fang X Q, Xiao L B, Su Y, et al. 2017. Social impacts of climate change on the history of China[J]. Journal of Palaeogeography, 19(4): 729-736.]
- 葛全胜, 等. 2011. 中国历朝气候变化[M]. 北京: 科学出版社. [Ge Q S, et al. 2011. Zhongguo lichao qihou bianhua [M]. Beijing, China: Science Press.]
- 葛全胜, 方修琦, 郑景云. 2014. 中国历史时期气候变化影响及其应对的启示[J]. 地球科学进展, 29(1): 23-29. [Ge Q S, Fang X Q, Zheng J Y. 2014. Learning from the historical impacts of climatic change in China[J]. Advances in Earth Science, 29(1): 23-29.]
- 葛全胜, 华中, 郑景云, 等. 2015. 过去2000年全球典型暖期的形成机制及其影响[J]. 科学通报, 2015, 60(18): 1727-1734. [Ge Q S, Hua Z, Zheng J Y, et al. 2015. Forcing and impacts of warm periods in the past 2000 years[J]. Chinese Science Bulletin, 60(18): 1727-1734.]
- 国家自然科学基金委员会. 1998. 全球变化: 中国面临的机遇和挑战[M]. 北京: 高等教育出版社. [National Natural Science Foundation of China. 1998. Quanku bianhua: Zhongguo mianlin de jiyu he tiaozhan[M]. Beijing, China: Higher Education Press.]
- 霍治国, 李茂松, 李娜, 等. 2012. 季节性变暖对中国农作物病虫害的影响[J]. 中国农业科学, 45(11): 2168-2179. [Huo Z G, Li M S, Li N, et al. 2012. Impacts of seasonal climate warming on crop diseases and pests in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 45(11): 2168-2179.]
- 李英年, 赵新全, 赵亮, 等. 2003. 祁连山海拔高寒湿地气候变化及植被演替分析[J]. 冰川冻土, 25(3): 243-249. [Li Y N, Zhao X Q, Zhao L, et al. 2003. Analysis of vegetation succession and climate change in Haibei Alpine Marsh in the Qilian Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 25(3): 243-249.]
- 梁圆, 千怀遂, 张灵. 2016. 中国近50年降水量变化区划(1961-2010年)[J]. 气象学报, 74(1): 31-45. [Liang Y, Qian H S, Zhang L. 2016. Regionalization of the annual precipitation change in the last 50 years in China (1961-2010)[J]. Acta Meteorologica Sinica, 74(1): 31-45.]
- 廖要明, 翟盘茂, 郑景云, 等. 2014. 中国气候区划与气候图集方案研究[M]. 北京: 气象出版社. [Liao Y M, Zhai P M, Zheng J Y, et al. 2014. Study on China's zoning and climate atlas scheme[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 潘根兴, 高民, 胡国华, 等. 2011. 气候变化对中国农业生产的影响[J]. 农业环境科学学报, 30(9): 1698-1706. [Pan G X, Gao M, Hu G H, et al. 2011. Impacts of climate change on agricultural production of China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 30(9): 1698-1706.]
- 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社. [Editing Commission of the Second National Report on Climate Change of China. 2007. Qihou bianhua guojia pinggu baogao[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 史培军, 孙劭, 汪明, 等. 2014. 中国气候变化区划(1961-2010年)[J]. 中国科学: 地球科学, 44(10): 2294-2306. [Shi P J, Sun S, Wang M, et al. 2014. Climate change regionalization in China (1961-2010)[J]. Science China Earth Sciences, 57(11): 2676-2689.]
- 王国庆, 张建云, 刘九夫, 等. 2011. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. 水科学进展, 22(3): 307-314. [Wang G Q, Zhang J Y, Liu J F, et al. 2011. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(3): 307-314.]
- 王绍武. 2011. 全新世气候变化[M]. 北京: 气象出版社. [Wang S W. 2011. Holocene climate change[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 2013. 全球变暖的科学[M]. 北京: 气象出版社. [Wang S W, Luo Y, Zhao Z C, et al. 2013. Sciences of global warming[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 王志远, 刘健. 2014. 过去2000年全球典型暖期特征与机制的模拟研究[J]. 第四纪研究, 34(6): 1136-1145. [Wang Z Y, Liu J. 2014. Modeling study on the characteristics and mechanisms of global typical warm periods over the past 2000 years[J]. Quaternary Sciences, 34(6): 1136-1145.]
- 吴绍洪, 罗勇, 王浩, 等. 2016. 中国气候变化影响与适应: 态势和展望[J]. 科学通报, 61(10): 1042-1054. [Wu S H, Luo Y, Wang H, et al. 2016. Climate change impacts and adaptation in China: Current situation and future prospect

- [J]. Chinese Science Bulletin, 61(10): 1042-1054.]
- 吴绍洪, 潘韬, 刘燕华, 等. 2017. 中国综合气候变化风险区划[J]. 地理学报, 72(1): 3-17. [Wu S H, Pan T, Liu Y H, et al. 2017. Comprehensive climate change risk regionalization of China[J]. Acta Geographica Sinica, 72(1): 3-17.]
- 严作良, 周华坤, 刘伟, 等. 2003. 江河源区草地退化状况及成因[J]. 中国草地, 25(1): 73-78. [Yan Z L, Zhou H K, Liu W, et al. 2003. Preliminary discuss on grassland degradation in the source region of Yangtze and Yellow Rivers[J]. Grassland of China, 25(1): 73-78.]
- 叶柏生, 陈鹏, 丁永建, 等. 2008. 100多年来东亚地区主要河流径流变化[J]. 冰川冻土, 30(4): 556-561. [Ye B S, Chen P, Ding Y J, et al. 2008. Discharge changes of the eight large rivers in east Asia during the last more than 100 years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 30(4): 556-561.]
- 张德二. 2004. 中国三千年气象记录总集[M]. 南京: 江苏教育出版社. [Zhang D E. 2004. Zhongguo sanqiannian qixiang jilu zongji[M]. Nanjing, China: Jiangsu Education Press.]
- 张丕远. 1996. 中国历史气候变化[M]. 济南: 山东科学技术出版社. [Zhang P Y. 1996. Climate change in China during historical times[M]. Jinan, China: Shandong Science and Technology Press.]
- 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 2013a. 中国 1951-1980 年及 1981-2010 年的气候区划[J]. 地理研究, 32(6): 987-997. [Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. 2013a. The climate regionalization in China for 1951-1980 and 1981-2010[J]. Geographical Research, 32(6): 987-997.]
- 郑景云, 卞娟娟, 葛全胜, 等. 2013b. 1981-2010 年中国气候区划[J]. 科学通报, 58(30): 3088-3099. [Zheng J Y, Bian J J, Ge Q S, et al. 2013b. The climate regionalization in China for 1981-2010[J]. Chinese Science Bulletin, 58(30): 3088-3099.]
- 郑景云, 郝志新, 狄小春. 2002. 历史环境变化数据库的建设与应用[J]. 地理研究, 21(2): 146-154. [Zheng J Y, Hao Z X, Di X C. 2002. A study on the establishment and application of environmental change database during historical times[J]. Geographical Research, 21(2): 146-154.]
- 郑景云, 郝志新, 方修琦, 等. 2014. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征[J]. 地理科学进展, 33(1): 3-12. [Zheng J Y, Hao Z X, Fang X Q, et al. 2014. Changing characteristics of extreme climate events during past 2000 years in China[J]. Progress in Geography, 33(1): 3-12.]
- 中国科学院地理科学与资源研究所历史气候资料整编委员会《清实录》编选组. 2016. 《清实录》气候影响资料摘编[M]. 北京: 气象出版社. [Editing Group of Qingshilu in the Commission of Historical Records on Climate, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences. 2016. 《Qingshilu》qihou yingxiang ziliao zhaibian[M]. Beijing, China: China Meteorological Press.]
- 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[M]. 北京: 地图出版社. [Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration. 1981. Zhongguo jin wubainian hanlao fenbu tuji[M]. Beijing, China: Map Publishing House.]
- Chen F H, Chen J H, Holmes J, et al. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region[J]. Quaternary Science Reviews, 29(7-8): 1055-1068.
- Christiansen B, Ljungqvist F C. 2011. Reconstruction of the extratropical NH mean temperature over the last millennium with a method that preserves low-frequency variability [J]. Journal of Climate, 24(23): 6013-6034.
- Chu K-C. 1973. A preliminary study on the climatic fluctuations during the last 5,000 years in China[J]. Scientia Sinica, 16(2): 226-256.
- Cook E R, Anchukaitis K J, Buckley B M, et al. 2010. Asian monsoon failure and megadrought during the last millennium[J]. Science, 328: 486-489.
- Duplessy J C, Overpeck J. 1994. The PAGES/CLIVAR intersection: Providing the paleoclimatic perspective needed to understand climate variability and predictability: Coordinated research objectives of the International Geosphere-Biosphere (IGBP) and World Climate Research (WCRP) Programmes[R]. Report of a Joint IGBP- WCRP Workshop, Venice, Italy: PAGES Core Project Office.
- Fang X Q, Su Y, Yin J, et al. 2015. Transmission of climate change impacts from temperature change to grain harvests, famines and peasant uprisings in the historical China[J]. Science China Earth Sciences, 58(8): 1427-1439.
- Ge Q S, Hao Z X, Zheng J Y, et al. 2013. Temperature changes over the past 2000 yr in China and comparison with the Northern Hemisphere[J]. Climate of the Past, 9(3): 1153-1160.
- Hegerl G C, Crowley T J, Allen M, et al. 2007. Detection of human influence on a new, validated 1500-year temperature reconstruction[J]. Journal of Climate, 20(4): 650-666.
- IPCC. 2001. Climate Change 2001: The scientific basis: Contribution of working group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change[M].

- Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The physical science basis: Contribution of working group I to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change[M]. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change[M]. Cambridge, UK, New York, USA: Cambridge University Press.
- Jones P D, Briffa K R, Osborn T J, et al. 2009. High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects[J]. *The Holocene*, 19(1): 3-49.
- Kalvová J, Halenka T, Bezpalcová K, et al. 2003. Köppen climate types in observed and simulated climates[J]. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47(1): 185-202.
- Liu J, Wang B, Cane M A, et al. 2013. Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing[J]. *Nature*, 493(7434): 656-659.
- Liu S N, Zhou T, Wei L Y, et al. 2012. The spatial distribution of forest carbon sinks and sources in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 57(14): 1699-1707.
- Mann M E, Zhang Z H, Hughes M K, et al. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(36): 13252-13257.
- Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. 2009. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly[J]. *Science*, 326: 1256-1260.
- Moberg A, Sonechkin D M, Holmgren K, et al. 2005. Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data[J]. *Nature*, 433(7026): 613-617.
- National Research Council. 2006. Surface temperature reconstructions for the last 2,000 years[M]. Washington, DC: The National Academies Press.
- Osborn T J, Briffa K. 2006. The spatial extent of 20th-century warmth in the context of the past 1200 years[J]. *Science*, 311: 841-844.
- PAGES. 2009. Science plan and implementation strategy. IGBP Report No.57[R]. Stockholm, Sweden: IGBP Secretariat.
- PAGES 2k Consortium. 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia[J]. *Nature Geoscience*, 6(5): 339-346.
- PAGES 2k Consortium. 2017. A global multiproxy database for temperature reconstructions of the Common Era[J]. *Scientific Data*, 4: 170088.
- Ren W, Tian H Q, Tao B, et al. 2011. Impacts of tropospheric ozone and climate change on net primary productivity and net carbon exchange of China's forest ecosystems[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 20(3): 391-406.
- Shao X M, Xu Y, Yin Z Y, et al. 2010. Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews*, 29(17-18): 2111-2122.
- Tang Q H, Oki T, Kanae S, et al. 2008. Hydrological cycles change in the Yellow River basin during the last half of the twentieth century[J]. *Journal of Climate*, 21(8): 1790-1806.
- Tao F L, Zhang S, Zhang Z. 2012. Spatiotemporal changes of wheat phenology in China under the effects of temperature, day length and cultivar thermal characteristics[J]. *European Journal of Agronomy*, 43: 201-212.
- Wei Z D, Rosen A M, Fang X Q, et al. 2015. Macro-economic cycles related to climate change in dynastic China[J]. *Quaternary Research*, 83(1): 13-23.
- Wei Z D, Fang X Q, Su Y. 2014. Climate change and fiscal balance in China over the past two millennia[J]. *Holocene*, 24(12): 1771-1784.
- Wu S H, Yin Y H, Zhao D S, et al. 2010. Impact of future climate change on terrestrial ecosystems in China[J]. *International Journal of Climatology*, 30(6): 866-873.
- Xiao L B, Fang X Q, Zheng J Y, et al. 2015. Famine, migration and war: Comparison of climate change impacts and social responses in North China between the late Ming and late Qing dynasties[J]. *The Holocene*, 25(6): 900-910.
- Yang B, Qin C, Wang J L, et al. 2014. A 3500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(8): 2903-2908.
- Ye L M, Xiong W, Li Z G, et al. 2013. Climate change impact on China food security in 2050[J]. *Agronomy for Sustainable*

- able Development, 33(2): 363-374.
- Ye Y, Fang X Q, Khan M A U. 2012. Migration and reclamation in Northeast China in response to climatic disasters in North China over the past 300 years[J]. *Regional Environmental Change*, 12(1): 193-206.
- Yin J, Su Y, Fang X Q. 2015. Relationships between temperature change and grain harvest fluctuations in China from 210 BC to 1910 AD[J]. *Quaternary International*, 355: 153-163.
- Zhang D D, Zhang J, Lee H F, et al. 2007. Climate change and war frequency in eastern China over the last millennium [J]. *Human Ecology*, 35(4): 403-414.
- Zhang J C. 1988. The reconstruction of climate in China for historical times[M]. Beijing, China: Science Press.
- Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record[J]. *Science*, 322: 940-942.
- Zheng J Y, Wu M W, Ge Q S, et al. 2017. Observed, reconstructed, and simulated decadal variability of summer precipitation over Eastern China[J]. *Journal of Meteorological Research*, 31(1): 49-60.
- Zheng J Y, Xiao L B, Fang X Q, et al. 2014. How climate change impacted the collapse of the Ming dynasty[J]. *Climatic Change*, 127(2): 169-182.

Recent progress of climate change research in physical geography studies from China

ZHENG Jingyun^{1,2*}, FANG Xiuqi³, WU Shaohong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Department of Geography, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: As a key subfield in climatology, the study of climate changes is the research focus of physical geography in China. In this article, we review recent progress in such study, which focused on past climate changes and climate change impacts and adaptations in the context of present global warming. The highlights and results of the studies are summarized, especially on the following issues: reconstruction of past climate in China, analysis of the spatiotemporal patterns of climate changes and their impacts during historical times in China, characteristics of changes on climate regionalization in China under global warming since 1950, regional difference of impacts of recent global warming on natural ecosystems, water resources, and agriculture in China, and comprehensive climate change risk regionalization of China. These results provided a solid scientific basis for forming disciplinary development strategies and further studies of related issues in the field of physical geography in China.

Key words: recent progress; climate change research; past climate changes; impacts of global warming and adaptations; China