

任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 337 - 353. Ren Guoyu, Feng Guolin, Yan Zhongwei. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 337 - 353.

中国极端气候变化观测研究回顾与展望

任国玉¹ 封国林¹ 严中伟²

1 中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

摘要 评述、总结了近年有关中国极端气候变化的观测研究成果, 讨论了尚未解决的科学问题和今后应重点加强的工作方向。已有研究表明, 1951年以来中国大陆地区极端气候事件频率和强度发生了一定变化, 但不同类型和不同区域极端气候变化存在明显差异。从全国范围看, 与异常偏冷相关的极端事件如寒潮、冷夜和冷昼天数、霜冻日数等, 显著减少减弱, 偏冷的气候极值减轻; 与异常偏暖相关的暖夜、暖昼日数明显增多, 暖夜日数增多尤其明显, 但高温事件频数和偏热的气候极值未见显著长期趋势; 全国平均暴雨和极端强降水事件频率和强度有所增长, 特别是长江中下游和东南地区、西部特别是西北地区有较明显增长, 而华北、东北中南部和西南部分地区减少减弱; 多数地区小雨频数明显下降, 偏轻和偏强降水的强度似有增加; 全国遭受气象干旱的范围呈较明显增加趋势, 其中华北和东北地区增加更为显著; 登陆和影响我国的热带气旋、台风频数有所下降, 其造成的降水总量有较明显减少; 北方地区的沙尘暴事件从总体上看有显著减少减弱趋势; 我国东部部分地区夏季雷暴发生频率也存在较明显下降趋势。现有工作表明, 在涉及极端气候变化研究的资料处理和分析方法方面还有改进余地。观测资料的非均一性, 以及观测环境改变和城市化对地面气候要素变化趋势的影响偏差, 需要进行深入评价和客观订正。此外, 目前对于区域极端气候变化的综合分析还较薄弱, 在极端气候变化机理的研究方面有待加强。

关键词 极端气候/气候极值 逐日气象资料 非均一性 城市化偏差 气候变化 中国

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0337-17 **中图分类号** P467 **文献标识码** A

Progresses in Observation Studies of Climate Extremes and Changes in Mainland China

REN Guoyu¹, FENG Guolin¹, and YAN Zhongwei²

1 *Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

2 *Key Laboratory of Regional Climate - Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

Abstract Some progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China are summarized in this paper. It also discusses the problems to be solved and the direction of future studies. Previous investigations show that some changes in frequency and intensity of extreme climate events have occurred during the past more than 50 years in the country, with large differences existing among the categories of climate extremes for the

收稿日期 2010-01-15 收到, 2010-03-17 收到修定稿

资助项目 国家“十一五”科技支撑项目课题 2007BAC29B02 和 2007BAC03A01、水利部行业专项 200801001

作者简介 任国玉, 男, 1958 年出生, 博士, 研究员, 从事气候变化和古气候研究。E-mail: guoyoo@cma.gov.cn

whole country and among the regions for a given type of climate extremes.

The extremes related to low temperature, such as cold surges, cold nights and days, frost days, and cool summers, have been generally decreased in frequency and intensity, and the extremes related to high temperature, such as warm nights and days, frost-free days and warm winters, have been mostly increased in frequency and intensity, though heat waves and extreme high temperature have witnessed no significant upward trend in frequency with considerable interdecadal variations. Rainstorms or extreme precipitation events have been shown to insignificantly increase in the country as a whole. However, they have been found to experience an obvious increase in the mid-lower reaches of the Yangtze River, southeastern coastal region, and the vast western China especially northwestern Xinjiang region, and some downward trends in parts of North China, central and southern Northeast China, and Southwest China. For most regions, frequency of light rains has been significantly decreased, but intensity of light and heavy rains has been slightly increased. Areas stricken by meteorological drought have been shown to increase, especially in North China and Northeast China. Landing and influential tropical cyclones including typhoons have been evidently decreasing, and the precipitation amount produced by tropical cyclones has been also dropping. Frequency and intensity of dust storms in northern China have experienced a significant downward trend. Thunder storms in summer have been found to significantly decrease for a few regions analyzed so far.

It is obvious from the overview that there still exists large space for improving the studies of regional extreme climate change in both data processing procedure and statistical methodology. Inhomogeneities of surface air temperature and precipitation data, effect on observational data series of micro-environmental change around the observational sites and urbanization of cities and towns near climate stations need to be assessed and adjusted for large-scale analysis. In addition, more attention should be given to comprehensive evaluation of regional extreme climate events and their changes, and to further studies of the mechanism of the observed changes in climate extremes with high-resolution climate modeling.

Key words extreme climate/climate extremes, daily meteorological data, inhomogeneities, urbanization effect, climate change, China

1 引言

在最近的 10 余年,国际上对极端天气气候事件的时间变化特点进行了许多分析研究(例如: Alexander et al., 2006, 2009; IPCC, 2007; Zhang et al., 2007; Choi et al., 2009)。IPCC AR4 (IPCC, 2007) 对 2007 年之前的相关研究进行了系统总结。已有的研究包括采用过去几十年气候资料 and 统计技术对主要极端天气气候事件频率和强度年代变化特点及长期趋势的分析,以及采用气候模式模拟技术对未来可能气候极端事件发生频率变化的分析等。

20 世纪 60 年代以后,全球大部分陆地地区极端冷事件(如低温、寒潮、霜冻、冷夜和冷日等)发生频率逐渐减少,而极端暖事件(如高温、热浪、暖日和暖夜等)发生频率明显增加,其中极端冷事件频率的减少比极端暖事件的增加更为明显;20 世纪北半球大陆中高纬度大部分地区降水

增加了 5%~10%,近 50 年暴雨的发生频率增加了 2%~4%;低纬度地区和中低纬度地区夏季的极端干旱事件增多;台风和热带气旋(TC)生成和登陆数量变化趋势不明显,但某些地区 TC 强度显著加强,中纬度风暴路径有向极区移动的趋势;与海平面升高有关的极端事件(主要是风暴潮,但不包含海啸)增多(Easterling et al., 1997; Frich et al., 2002; IPCC, 2007; Alexander et al., 2009; Choi et al., 2009)。

模拟研究也发现,在大气中温室气体浓度增加的情况下,与气温和降水相关的极端天气气候事件发生频率及强度也将出现明显变化,一些变化与观测的趋势时空分布相似。气候模拟研究还指出,在未来不同温室气体排放情景下,全球陆地地区高温热浪事件频率增多的可能性极大,而寒冷日数和霜冻日数进一步减少,极端强降水事件频率和降水量在许多地区可能上升,受干旱影响的地区范围可能增加,强台风的数量可能增加(IPCC, 2007)。

我国学者对极端天气气候事件的研究也已有较长历史, 获得了大量成果(丁一汇和任国玉, 2008)。在“十一五”期间, 科技部的重大科技计划项目对极端气候事件观测和模拟研究又给予明确支持。其中, 国家科技支撑项目“我国主要极端天气气候事件及重大气象灾害的监测、检测和预测关键技术研究”和国家重点基础研究发展计划项目“全球变暖背景下东亚能量与水循环变异及对我国极端气候的影响研究”分别设立了有关观测的极端气候变化研究课题。

本文试图对最近 10 余年, 特别是最近 5 年国内有关极端气候变化观测研究的若干进展做个初步总结, 并简要讨论研究中仍存在的问题和今后工作方向。

2 主要研究进展

2.1 极端气候指数与统计分析技术

极端气候事件的定义方法很多。从单个观测点来看, 极端气候事件可用本站气候要素(如气温、降水量等)的异常记录或超过特定界限值的天数等指数来表述。近年文献里日渐频繁的一个用词“气候极值”(climate extremes)则更明确地指异常天气现象。气候是各种天气现象的综合表述, 可用一个概率分布来表示。传统气候研究注重该分布的均态(即平均天气条件, 所以大量使用月、季平均资料)。极端气候研究则强调在气候分布中远离平均态的那些小概率异常天气现象(如寒潮、热浪、强降水、持续无雨期等), 年/季内最高/低气温等记录也大致属于这个范畴, 即气候极值——这是针对气候均值来说的。

“异常天气”具有相对性, 即其含义对于不同地区以及不同季节可以大不相同。在逐日气象观测基础上, 通常采用如下办法定义相对气候极值:

设 $\{X_{ij}\}$ 构成要素 X 的一个观测数据集。其中 $i = 1, 2, \dots, 366$, 代表一年中每日的序号; $j = 1, 2, \dots, J$, 代表观测期间年序号。对于给定某日 n , 取 $i = n - m, n - m + 1, \dots, n, n + 1, \dots, n + m$, 构成一个样本数为 $(2m + 1)J$ 的子集,

基于该子集所逼近的概率分布, 可以推算其 a/b 百分位阈值。如果某年第 n 日的观测值落在该阈值区间之外, 就定义了一个气候极值事件。其中 m 与当地逐日天气变率的主要时间尺度有关(例如中高纬地区可取 $m = 5$)。

对于气温等连续变量, 上述子集的取法表示: 在 n 日前后一个天气波动期间发生过的所有天气构成了该日天气的气候分布。在工程研究中 a/b 可以取得很小/大(如 $1/99$ 或 $0.1/0.99$), 以便于量化当地当日最极端的天气状态。但在气候变化研究中, 通常取 $5/95$ 或 $10/90$, 以便于较稳妥地反映气候分布端点附近状态的变化趋势(Jones et al., 1999; Yan et al., 2002a)。对于降水等非连续变量, m 要足够大才能获得较稳定的气候分布百分位阈值, 所以很多研究者干脆直接按季节分析气候极值(近似于上述公式中取 $m = 45$, n 为各季中心日)。表 1 所列的一些指数就是基于上述相对极值定义计算的。

在世界气象组织气候学委员会(CCI/WMO)推荐的极端气候指数中, 除了上述相对极值类的指数外, 还有一类是根据绝对物理界限值确定的事件, 如霜冻日数、结冰日数、暴雨(日降水 50 mm 以上)日数、持续干/湿期等。更复杂的是, 一些极端气候现象并非单个气象要素就可描述清楚。例如, 干旱不仅和降水少有关, 还与高温、大风等有关。又如, 我国东部黄河以南地区夏季因湿度较高且受到副热带高压控制, 每年都形成一个极为“闷热”的阶段, 类似于传统说法中的三伏天气, 这种季节性的极端闷热天气需要考虑气温和湿度的联合作用来加以定义^①。表 1 和表 2 列出国际学术界较为通用且在国内研究中常用的极端气温、降水指数。

极端气候指数时间序列分析有助于深入了解气候变化。例如, 翟盘茂和任福民(1997)、翟盘茂等(1999)以及严中伟和杨赤(2000)利用我国逐日气象资料分析了多种极端气候指数变化格局。早期的研究虽然只用到有限数量观测站的逐日资料(翟盘茂等, 1999; 严中伟和杨赤, 2000), 但分析结果得到后来研究的证实。例如:

^① 夏江江, 严中伟, 周家斌. 三伏气候及其变化 [J]. 气候与环境研究, 待发表.

表 1 常用极端气温指数
Table 1 Commonly used indices of extreme temperature

序号	代码	名称	定义	单位
1	FD0	霜冻日数	日最低气温 (TN) $< 0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
2	ID0	结冰日数	日最高气温 (TX) $< 0^{\circ}\text{C}$ 的全部日数	d
3	TXx	月极端最高气温	每月内日最高气温的最大值	$^{\circ}\text{C}$
4	TNx	月最低气温极大值	每月内日最低气温的最大值	$^{\circ}\text{C}$
5	TXn	月最高气温极小值	每月内日最高气温的最小值	$^{\circ}\text{C}$
6	TNn	月极端最低气温	每月内日最低气温的最小值	$^{\circ}\text{C}$
7	TN10p	冷夜日数	日最低气温 (TN) $< 10\%$ 分位值的日数	d
8	TX10p	冷昼日数	日最高气温 (TX) $< 10\%$ 分位值的日数	d
9	TN90p	暖夜日数	日最低气温 (TN) $> 90\%$ 分位值的日数	d
10	TX90p	暖昼日数	日最高气温 (TX) $> 90\%$ 分位值的日数	d
11	WSDI	热日持续指数	每年至少连续 6 天日最高气温 (TX) $> 90\%$ 分位值的日数	d
12	CSDI	冷日持续指数	每年至少连续 6 天日最低气温 (TN) $< 10\%$ 分位值的日数	d

表 2 常用极端降水指数
Table 2 Commonly used indices of extreme precipitation

序号	代码	名称	定义	单位
1	RX1day	1 日最大降水量	每月最大 1 日降水量	mm
2	Rx5day	5 日最大降水量	每月连续 5 日最大降水量	mm
3	SDII	降水强度	年降水量与降水日数 (日降水量 ≥ 1.0 mm) 比值	$\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$
4	R10	中雨日数	日降水量 (PRCP) ≥ 10 mm 的日数	d
5	R20	大雨日数	日降水量 (PRCP) ≥ 20 mm 的日数	d
6	R50	暴雨日数	日降水量 (PRCP) ≥ 50 mm 的日数	d
7	CDD	持续干期	日降水量连续 < 1 mm 的最长时期	d
8	CWD	持续湿期	日降水量连续 ≥ 1 mm 的最长时期	d
9	R95p	强降水量	日降水量 $> 95\%$ 分位值的总降水量	mm
10	R99p	极强降水量	日降水量 $> 99\%$ 分位值的总降水量	mm

我国区域“毛毛雨”频率普遍减少,是当前北方地区干旱化的重要特征。这一结论在最近更多资料分析基础上得到了验证(如 Qian et al., 2007)。关于我国区域年、季极端气候变化比之平均值变化更加显著的结论,也反映了气候极值和极端气候指数研究的必要性。

为避免定义“极端”阈值时存在的主观因素,近年来广义极值理论(GEV)在研究中获得应用。GEV 原则上不依赖于原数据的概率分布特征,仅就其中极端值部分取样,因而是对气候观测中蕴含的气候极值信息最直接的拟合描述(Zhang et al., 2004)。Tu et al. (2010)对正经历严重干旱化的华北地区日降水量作了 GEV 拟合分析,发现尽管总降水量和大多数降水事件(包括暴雨事件)频率在减少,但大暴雨事件自 1970 年代以来却在

增加。这说明不能随意定义气候极值,否则可能混淆一些关键的气候变化信息。但由于现代气象观测记录长度有限,所能提供的极值样本更有限,GEV 理论的应用也受到一定局限。

广义线性拟合(GLM)为降水等非正态变量的气候变化及极值研究提供了一个分析工具。GLM 视每个“天气”值为某种气候分布总体中抽取的样本,通过最大似然回归确定最符合所有样本的分布(包括确定自回归规律以及分布参数随时间、地点和各种可能气候因子的变化);再通过蒙特卡罗(Monte Carlo)方法产生大量模拟样本,从中判断气候分布随各种可能原因而发生的变化(Coe and Stern, 1982; Stern and Coe, 1984; Chandler and Wheeler, 2002)。由于把所有资料同时纳入一个关于分布(包括均值和极值)

的研究框架, 结果具有优越的统计稳定性。Yan et al. (2002b) 应用 GLM 分析区域逐日风速气候分布变化及其与大尺度气候因子的联系, 显示了 GLM 在揭示区域气候变化及成因分析方面的独特价值。Wang et al. (2009) 利用 GLM 分析了我国区域日降水发生概率的演变规律, 认为近几十年我国夏季风区“南涝北旱”的气候变化格局可能与大尺度变暖有关。

考虑到气候极值主要是极端天气波动所致, Yan et al. (2001a) 利用小波方法, 分析了欧洲和我国近百年来逐日气温序列中天气波动的变化。结果表明, 气候变暖导致季节性波动减弱, 中高纬度区域天气波动 (尤其是在冷季) 也普遍减弱, 对应我国冷季寒潮减弱; 而中低纬度区域暖季天气波动有变短变强的倾向, 可能与气候变暖背景下暖季局部对流性天气增强有关, 对应我国夏季旱涝灾害趋于频繁。综合多种分析结果有助于更量化地认识我国极端气候变化。

目前气候极值检测技术对气候背景状态的描述基本采用计算均值的方法, 该方法的缺陷在于计算均值时将极端事件即极端值也包括在内, 某种程度上掩盖了系统背景的真实信息, 从而可能导致某些极端事件无法检测到 (封国林等, 2008)。均值和中值都用来量度序列分布的中心位置。均值对于一些特别高的数据值很敏感, 但中值却不受这一变化的影响, 因此当序列中的极值较多时, 中值能够更好的反映系统的背景状态, 减少了由于极值的群发性造成的漏测 (杨萍等, 2009)。通过蒙特卡罗试验与观测事实的对比分析发现, 基于中值的检测方法能更有效的反映极端气候事件的真实变化信息 (章大全和钱忠华, 2008)。杨萍等 (2009) 对群发性极端事件研究方法的研究提供了新的思路和视角, 利用极端气候指数分析了中国极端气温的变化趋势和季节特征。He et al. (2008) 针对极端事件与气候突变的关系提出了基于动力学特征的突变检测方法, 并应用于气候要素极值序列的检测 (封国林等, 2006; 龚志强等, 2006; 张文等, 2006; Zou M et al., 2006)。

气候系统的变化具有自记忆特征, 在气候时间序列里存在着长程相关性, 即系统的演化状态具有持续性 (王启光等, 2008)。由于极端气候是

系统演化的极端状态或是系统受到外界扰动而导致的异常状态, 不属于系统自身正常演化状态的范畴, 去趋势波动分析法 (DFA) 得到的 DFA 指数衡量的是系统在某一时间尺度内演化的长程相关性, 而系统整体的长程相关性不受极端事件的影响或影响很小。计算表明当系统的演化处于极端状态时, 去除这些极端状态对系统的长程相关性几乎没有任何影响; 当系统的演化状态为非极端值, 去除不同非极端状态后的 DFA 指数彼此之间有很大差异。侯威等 (2008) 基于这一思路提出了利用 DFA 方法确定极端事件阈值的方法, 并验证了方法的有效性。

气候系统是一个复杂开放的非线性耗散系统, 系统间各区域和要素间的关联性普遍存在。针对气候系统这一特点, 龚志强等 (2009) 引入复杂网络工具 (王晓娟等, 2009) 研究年平均气温变化和极端气温事件出现天数及其与突变的关系, 定义自相关因子指数, 分析中国地面气温的时空变化特征, 得到 8 个不同的动力学特征区的年平均气温变化和极端气温年出现天数及其与突变的关系, 以及不同气温段对中国近 58 年增暖的可能影响。基于极端气温值、强 El Niño/La Niña 年、气温变化关键区域和极端事件频发年四个方面, 研究了时间和空间上的极端事件对气温关联网性质的影响及网络性质相对稳定的可能条件。

任福民等 (2010) 提出了针对区域持续性极端气候事件进行客观识别的新方法。该方法采用台站逐日气象要素资料, 可以识别获得包含影响范围、强度和持续时间的完整事件个例。尽管还需要不断改进和完善, 这种方法对于未来区域持续性极端气候事件客观识别及其监测和研究具有潜在应用价值。

2.2 极端气温变化

国内学者应用各种方法和资料, 对中国地面极端气温变化进行了研究 (例如: 翟盘茂和任福民, 1997; 严中伟和杨赤, 2000; Qian and Lin, 2004; 龚道溢和韩晖, 2004; Zhang and Wan, 2008)。最近的分析结果与早期研究基本一致。在 1951~2008 年期间, 全国年平均最高气温有较明显的增加趋势, 增加速率为 $0.16\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$, 且气温升高主要发生在最近的 10 余年 (王翠花等, 2003; 唐红玉等, 2005)。平均最高气温北方

增加明显,南方大部分台站变化不明显;增加最多的地区包括东北北部、华北北部和西北北部,青藏高原增加也很明显(严中伟等,2000; Zhai and Pan, 2003; 唐红玉等, 2005; 周雅清和任国玉, 2010)。就季节平均最高气温来看,冬季的增加最为明显,对年平均最高气温的上升贡献最大;夏季平均最高气温增加最弱。

比之于最高气温,年平均最低气温在全国范围内表现出更为一致的显著增加趋势。全国年平均最低气温上升趋势远较年平均最高气温变化明显,上升速率达到 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 。北方地区上升更显著,且上升速率有随纬度增加趋势(任福民和翟盘茂, 1998; 唐红玉等, 2005; 周雅清和任国玉, 2010)。与年平均气温变化趋势相似,年平均最低气温增加最明显的地区是东北、华北、西北北部和青藏高原东北部等地区。各季节平均最低气温均呈增加趋势,冬季增加最明显,对年平均最低气温的上升贡献最大。

最高和最低气温的变化在各个区域内部存在差异。西北地区东部夏季平均最高气温有下降趋势,中部除冬季外所有季节平均最高气温都显著下降,北部冬季最高气温上升;季节平均最低气温在西北东部一般上升,但夏季下降(马晓波, 1999)。南方地区的长江中下游夏季平均气温下降明显,主要是由于最高气温明显下降造成的(任国玉等, 2005)。在我国北方地区,黄河下游区域年、春季和夏季平均最高气温均出现较明显的下降趋势(张宁等, 2008)。

因此,我国平均最高气温和平均最低气温都是以冬季的增暖最为明显。冬季气温的明显上升,是导致“暖冬”年份增多的主要原因(陈峪等, 2009)。无论是年还是季节,平均最低气温的增暖幅度均明显大于平均最高气温(王绍武等, 2005; 任国玉等, 2005; 唐红玉等, 2005; 翟盘茂等, 2007; 钱维宏等, 2007; 陈正洪, 2009)。在过去的半个多世纪,年平均最低气温开始显著升高的时间明显早于最高气温,后者主要在 20 世纪 80 年代中期以后表现出明显的上升趋势(王菱等, 2004; 任国玉等, 2005; 钱维宏等, 2007)。

由于平均最低气温增加一般比平均最高气温增加偏早、偏强,我国年平均日较差呈总体下降趋势。下降幅度较大的地区主要在东北、华东北

北部、新疆北部和青藏高原。全国各季平均日较差均呈下降趋势,但冬季的下降趋势最为明显(唐红玉等, 2005)。又由于冬季平均最低气温上升比夏季平均最高气温上升快,我国多数地区气温极值的年内变化趋向和缓。

1951 年以后全国平均高温日数有弱的减少趋势,但在 20 世纪 90 年代中期以后有一定增加。在不同地区,高温日数的变化趋势不同,长江中下游和华南地区有显著的减少趋势,中国西部的部分地区则有增加趋势(Zhai and Pan, 2003)。最近的分析发现,中国年均极端高温的频数在近 50 年中趋于上升,而年均极端低温的频数则有所减少,这与近年多数观测分析结果一致(章大全和钱忠华, 2008)。在空间分布上,除西南地区部分站点外,近 50 年中国大部分地区极端低温事件的年均发生频数趋于减少,而极端高温事件发生频率的变化则呈现出东南沿海减少、西北内陆增加的分布特点(章大全和钱忠华, 2008)。

Ding et al. (2009) 的分析表明,中国高温热浪事件频数变化具有较强年代际变动特点,西北地区 1990 年代后具有突然增长趋势;东部地区 20 世纪 60 年代前极热事件偏多,70~80 年代偏少,90 年代以后呈增多和增强趋势,但长期线性趋势不明显。中国大部分地区寒潮事件频率明显减少、强度减弱(Zhai and Pan, 2003; 丁一汇和任国玉, 2008; Ding et al., 2009)。封国林等(2009a)对中国逐日最高气温资料进行分析发现,中国中部和华北地区极端气温事件序列具有较明显的长程相关性,存在较强的记忆性特征,揭示出极端高温事件在这些地区更易发生;而云贵、内蒙中部、甘肃和沿海地区长程相关性较弱,区域性差异明显。

破纪录事件是极端气候的特殊表现形式。在气候变暖背景下,破纪录高温事件发生频次呈现不断增加的特点(封国林等, 2009b)。近半个世纪我国破纪录高温事件略有增多,而破纪录低温事件明显减少;在破纪录事件强度上,高温事件强度在高纬度地区略有增强,而低温事件强度在高纬度地区及新疆、青藏高原则有一定趋弱,但在南方大部地区却呈现较明显的增强趋势(熊开国等, 2009)。万仕全等(2009)利用极值理论(EVT)中的广义帕雷托分布(GPD)研究气候变

暖对中国极端暖月事件的潜在影响，发现气候变暖对极端暖月的变率和高分位数有明显影响，响应的空间分布集中在青藏高原中心区域和华北至东北南部的季风分界线附近，而其他地区对气候变暖的响应并不明显。

全国平均暖昼（夜）日数在 20 世纪 80 年代中期以后表现出显著的增加趋势（Zhai and Pan, 2003；周雅清和任国玉，2010）。北方大部、西部地区 and 东南沿海地区暖昼天数有增加趋势，而长江中下游和华南等地则有减少趋势。暖夜日数增加趋势更为明显，增长最显著的地区出现在西南地区。在绝大多数地区，霜冻日数有显著的减少，20 世纪 90 年代的平均年霜冻日数比 60 年代减少 10 天左右（Zhai and Pan, 2003）。与此对应的是，多数地区气候生长期则呈现明显增加趋势（徐铭志和任国玉，2004）。

全国平均冷昼日数在近半个世纪有弱的减少趋势，20 世纪 80 年代中期以后减少比较显著。空间分布上，北方地区冷昼日数减少显著，而南方地区则有弱的增加趋势（Zhai and Pan, 2003；周雅清和任国玉，2010）。全国平均冷夜日数有明显减少趋势，特别是 20 世纪 70 年代中期以后表现得更为明显。大部分地区的冷夜日数都在显著减少，北方地区的减少趋势要大于南方地区。

多数地区平均最低气温的上升幅度明显大于平均最高气温，这导致了平均气温日较差的显著减小。从气温年较差看，我国大多数地区都呈现出显著减少的趋势，北方地区的减少幅度普遍比南方地区大，大致为 $-0.86 \sim -0.94 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ （华丽娟等，2004；唐红玉等，2005）。

因此，在最近的半个世纪左右，我国与高温相关的极端气候事件频率和强度变化一般较弱，20 世纪 90 年代以后有增多增强趋势；与低温有关的极端事件频率和强度则明显减少减弱，但进入 21 世纪以来偏寒冷事件有所增多和增强。观测到的高、低温事件频率和强度变化与平均最高气温上升不明显、平均最低气温上升趋势显著的特点完全一致。

2.3 极端降水变化

对我国降水量极值变化趋势的分析表明，1951~1995 年期间全国平均 1 日和 3 日最大降水量没有出现明显的变化，华北地区趋于减少，而

西北西部地区趋于增加（翟盘茂等，1999）。最近的分析表明了相似的结果，1956~2008 年期间全国平均 1 日最大降水量同样没有明显的趋势变化，但可以发现显著的年代际变化。从 20 世纪 50 年代中到 70 年代后期，最大降水量有减少现象；而从 70 年代后期到 1998 年最大降水量有明显上升趋势，此后则重又下降（陈峪等，2010）。

不少作者利用各种绝对和相对阈值标准定义极端强降水事件，分析过去 50 年极端降水事件频率和强度的变化情况（Zhai et al., 2005；支蓉等，2006；闵岫和钱永甫，2008；Feng et al., 2008；邹用昌等，2009；陈峪等，2010）。这些分析一般表明，过去半个世纪我国有暴雨出现地区的年平均暴雨日数呈微弱增多趋势，但趋势不显著。从区域上看，华北和东北大部暴雨日数减少，而长江中下游和东南沿海地区一般增多。造成极端偏湿状况的连续降水日数变化与总降水量和极端强降水频率变化具有相似的空间分布特征（Bai et al., 2007）。根据百分位值定义的强降水频数和降水量与暴雨日数变化趋势相似，但可以发现西部大部分地区强降水频数和降水量有比较明显的增多（Zhai et al., 2005；杨宏青等，2005；苏步达等，2006，2007；邹用昌等，2009）。我国多数地区秋季极端强降水减少，冬季一般增多，夏季南方和西部增多，而北方减少（Wang and Yan, 2009）。Qian et al. (2007) 对降水进行分级后分析发现，全国小雨普遍减少，而暴雨和大暴雨有所增多。极端降水量与降水总量的比值在全国多数地区有所增加，说明降水量可能存在向极端化方向发展的趋势（闵岫和钱永甫，2008；杨金虎等，2008）。Zhang et al. (2008) 发现，我国北方地区极端强降水与总降水频数的比值在 20 世纪 70 年代末、80 年代初发生了比较明显的跃变。

许多研究指出，我国多数地区不仅极端强降水量或暴雨降水量在总降水量中的比重有所增加，极端强降水或暴雨级别的降水强度也增强了（Zhai et al., 2005；孙凤华等，2007；陈晓光等，2008）。这种现象不仅出现在降水量和极端强降水增加的南方和西部，甚至出现在降水量和极端强降水减少的华北和东北（翟盘茂和潘晓华，2003；孙凤华等，2007）。

除西部地区外，我国大部地区降水日数有显

著的减少。由于降水日数的减少,多数地区降水强度有所增加;在长江中下游和华南沿海地区,年降水量的增加主要是由降水强度增加造成的,而北方地区年降水量的减少主要源于降水日数的显著减少(翟盘茂等,2007)。西部地区年降水量的增加是降水频率和平均降水强度共同增加的结果(严中伟和杨赤,2000;龚道溢和韩晖,2004)。全国多数地区降水日数的减少在秋季更为明显(王大钧等,2006)。

在全球气候变化背景下,全国和各个区域气象干旱发生的频率、强度和持续时间是否出现了变化,是很值得关注的问题(翟盘茂等,2007;马柱国,2007)。根据综合气象干旱指数(CI),分析近50多年来中国的气象干旱时空分布特征(邹旭恺等,2010)表明,在近半个多世纪中,我国气象干旱较重的时期主要出现在20世纪60年代、70年代后期至80年代前期、80年代中后期以及90年代后期至21世纪初。就整体而言,全国气象干旱面积在1951~2008年中有比较显著的增加趋势。气象干旱面积增加主要出现在北方地区,其中松花江流域、辽河流域、海河流域增加趋势显著,海河流域干旱化最为突出,南方大多数的江河流域气象干旱面积的变化趋势不明显,只有西南诸河流域有显著的减少趋势。破纪录干旱事件的相关研究也表明,极端干旱强度最大区域分布在我国北方的半干旱地区,中心区域位于华北地区黄河中下游及淮河流域(杨杰等,2010)。

侯威等(2008)研究了北方地区近531年的极端干旱事件频率变化,并与古里雅冰芯 $\delta^{18}\text{O}$ 含量变化进行了对比,发现在 $\delta^{18}\text{O}$ 含量较高的时期(偏暖时期)发生极端干旱事件的概率较低,反之亦然。章大全等(2010)研究了气温升高和降水减少在极端干旱成因中所占的比重,发现降水减少仍然是中国东部干旱形成的主要因素。相对于南方地区,中国华北、东北及西北东部等地区的干旱化进程对气温比降水变化更为敏感。龚志强和封国林(2008)发现,华北和江淮流域在气候较暖的时期可能易发生强度大、范围广的同步干旱事件,并认为近30年北方地区的干旱化可能是自然气候变率起主导作用下人为气候变化和自然气候变率共同作用的结果。

2.4 热带气旋、沙尘暴和雷暴

在1970~2001年32年间,登陆我国的热带气旋(TC)频数有一定下降趋势,其中1998年达到了近30年来的最小值(李英等,2004;杨玉华等,2009)。1950~2008年期间,登陆我国的热带气旋频数同样存在减少趋势,其中20世纪50~60年代登陆TC频数较多,1991~2008年是TC登陆我国的最少时期,但进入新世纪以后有一定上升(王秀萍和张永宁,2006;曹祥村等,2007;杨玉华等,2009;赵珊珊等,2009)。经南海和菲律宾海区登陆我国的TC频数下降明显,经东海海区登陆的TC频数也有减少,但趋势不显著(王秀萍和张永宁,2006)。

从1951~2004年间登陆强度为强台风和超强台风的热带气旋频数变化看,一般呈显著减少趋势。最大登陆热带气旋强度出现在50~70年代,但平均登陆热带气旋强度没有明显变化。登陆热带气旋的破坏潜力也存在明显的年代际变化,50~70年代初明显偏强,以后则偏弱。登陆热带气旋平均强度的减弱和高强度热带气旋频次的减少是引起破坏潜力减弱的主要原因(纪忠萍等,2007;任福民等,2008;赵珊珊等,2009)。

在1957~2008年期间,热带气旋导致的中国大陆地区降水量总体上表现出下降趋势,东北地区南部这种趋势尤为显著(Ren et al., 2007;林小红等,2008;王咏梅等,2008)。这和登陆热带气旋数量趋于减少是一致的。

近半个世纪,我国北方沙尘暴发生频率整体呈现减少趋势,但在世纪之交的几年沙尘暴频率和强度有所增加(张莉和任国玉,2003;范一大等,2005;唐国利和巢清尘,2005;王勇等,2008)。20世纪70年代以前北方沙尘暴明显偏多,从80年代中期开始显著偏少。总体而言,20世纪60~70年代波动上升,80~90年代波动减少,2000年后又急剧上升,但仍明显低于常年水平(张莉和任国玉,2003;周自江和章国材,2003;唐国利和巢清尘,2005;张小曳和龚山陵,2006)。沙尘暴频率下降与北方地区平均风速、大风日数和温带气旋频数减少趋势完全一致(张莉和任国玉,2003;Zou X et al., 2006; Wang and Zhai, 2009; Jiang et al., 2010)。

最近几年,还有一些对于雷暴等局地强天气

现象变化的研究, 值得进行回顾和总结。关于雷暴日数变化的研究多集中在东部小区域范围内或大城市附近, 而且使用了不同的分析时间段落和方法, 但几乎全部台站和区域个例分析结果均表明, 雷暴发生频率有比较明显的减少趋势(蔡新玲等, 2004; 张美平等, 2004; 叶殿秀等, 2005; 胡艳和端义宏, 2006; 段炼和陈章, 2006; 易燕明等, 2006; 尹丽云等, 2007; 景怀玺等, 2007; 高留喜等, 2007; 丁叶风等, 2009)。其中, 1961~2002 年陕西省关中地区(蔡新玲等, 2004)、1961~2001 年长江三峡库区及其周边地区(叶殿秀等, 2005)、1957~2004 年广东省(易燕明等, 2006)、1959~2000 年成都地区(段炼和陈章, 2006)、1966~2005 年山东省(高留喜等, 2007)等区域年雷暴发生频率均呈现比较明显的下降。

3 基本认识、存在问题与建议

3.1 主要结论和认识

综合以上研究结果, 可以发现我国各主要类型极端气候事件频率和强度变化十分复杂, 不同区域不同类型极端气候变化特点表现出明显差异。表 3 总结了过去半个世纪中国主要类型极端气候变化的特点。

在全国范围内, 明显的变化发生在与气温相

关的极端气候事件上; 在区域尺度上, 各种与降水相关的极端气候事件频率和强度也出现一定变化。近半个世纪里, 影响我国的寒潮和低温事件频率和强度有下降趋势, 北方地区冬半年寒潮事件发生频次明显减少, 东北地区夏季低温冷害事件频率趋于下降; 异常冷夜和冷昼天数、霜冻日数一般显著减少减弱, 偏冷的气候极值减轻; 与异常偏暖相关的暖夜、暖昼日数一般明显增加, 但全国范围内极端高温事件发生频率没有明显增多, 西北、华北和东北南部等地区有一定增加, 长江流域和东南沿海地区 1990 年代后趋于增加。

在东南地区、长江中下游地区和西部大部分地区, 暴雨或极端强降水事件有增多、强度有增大趋势; 但在华北地区和东北中南部、西南部分地区暴雨或极端强降水事件频率减少, 而干旱面积和强度则有增加趋势。我国北方气候一般比较干燥, 常年干旱事件发生频率就比较高, 近半个世纪中还有加重趋向; 而南方气候比较湿润, 常年洪涝事件更容易发生, 干旱事件发生频率从总体上看趋势变化不明显。因此, 近 50 年与降水相关的极端气候变化对我国东部季风区整体来说, 具有很大的负面影响。

登陆和影响我国的热带气旋、台风没有表现出增多增强趋势, 观测记录显示最近 50 年登陆我国的热带气旋和台风数量有所下降, 其造成的降

表 3 20 世纪 50 年代以来全国主要类型极端气候变化观测研究结论

Table 3 Main findings of studies of observed extreme climate changes during period 1951 - 2008 for China

极端事件	研究时段	观测的变化趋势	结论的可信性
暴雨或极端强降水	1951~2008	全国趋势不显著, 但东南和西北增多, 华北和东北减少。暴雨或极端强降水事件强度在多数地区增加。	高
暴雨极值	1951~2008	1 日和 3 日暴雨最大降水量有一定增加, 南方增加较明显。	中等
干旱面积、强度	1951~2008	气象干旱指数 (CI) 和干旱面积比率全国趋于增加, 华北、东北南部增加明显, 南方和西部减少。	高
寒潮、低温频次	1951~2008	全国大范围地区减少、减弱, 北方地区尤其明显, 进入 21 世纪以来有所增多, 但长期下降趋势没有改变。	很高
高温事件频次	1951~2008	全国趋势不显著, 但华北地区增多, 长江中下游地区年代际波动特征较强, 90 年代后趋多。	中等
热带气旋、台风	1954~2008	登陆我国的台风数量减少, 每年台风造成的降水量和影响范围也减少。	高
沙尘暴	1954~2008	北方地区发生频率明显减少, 1998 年以后有微弱增多, 但与 20 世纪 80 年代以前比较仍显著偏少。	很高
雷暴	1961~2008	东部地区现有研究区域发生频率明显减少。	很高

注: 对评估结论可信度的描述采用 IPCC 第四次评估报告第二工作组的规定。很高: 至少有 90% 几率是正确的; 高: 约有 80% 几率是正确的; 中等: 约有 50% 几率是正确的; 低: 约有 20% 几率是正确的; 很低: 正确的几率小于 10%。

水总量也有明显减少趋势。进入 21 世纪以后登陆的几个强台风并没有改变长期趋势变化方向。另外,我国北方的沙尘暴事件发生频率从总体上看有明显减少趋势,在世纪之交的几年有所回升,但仍远低于 20 世纪 80 年代以前的水平。

因此,根据目前的研究结果,我国主要极端气候事件发生频率有增有减,极端气温出现了比较协调一致的变化,异常偏冷事件明显减少减弱,而异常偏暖事件有所增多增强。极端气温的变化与平均气温上升趋势存在密切联系。我国极端降水特别是极端强降水事件频率变化具有明显的区域差异和季节差异,但极端强降水事件强度似乎有普遍增加趋势。极端强降水事件频率变化趋势与总降水量的变化趋势大体一致,而极端强降水事件强度增加的原因还不很清楚。登陆和影响我国东南地区的热带气旋频数趋于减少,北方地区的沙尘暴事件和东部的雷暴事件发生频率也明显趋于减少减弱。综合起来,在全球气候明显变暖的半个多世纪,我国主要类型极端气候变化非常复杂,但没有表现出总体增多增强的趋势变化现象。

3.2 存在问题与未来研究方向

极端气候变化的检测需要利用成熟的指数与统计方法。目前的极端气候指数还存在一定缺陷,需要根据各个地区具体情况不断改进完善。在气候变化的背景下,气象要素概率分布的特征可能发生改变,使得气候极值变化的检测愈发困难,需要结合新的数理工具更为准确的表征极端气候背景状态。极端气候序列线性趋势的计算和分析还依赖于时间尺度的选取,同时趋势的大小受序列两端极值的影响也较大,因此如何更为准确科学地计算、分析序列趋势项仍有待进一步研究。

就极端气候指数分析而言,国内研究一般仅关注某一种或一类极端气候事件,而对于一个地区多种或多类极端气候事件的综合研究还较欠缺。在气候变化的检测和影响研究中,以及在应对气候变化的行动中,需要了解一个地区或国家多种极端气候事件发生频率和强度的总体变化情况,以便认识区域气候对于人为外强迫的可能响应信号,以及多种极端气候事件频率和强度变化的综合影响程度。任国玉等(2010)针对中国的情况定义了一个综合极端气候指数(SECI),并分析

了该指数的时间变化特点。但这方面的工作还需要不断深入和完善。

观测资料的非均一性检测和订正问题是当前研究中需要加强的一个方面。由于极值和极端气候是小概率事件,而且极端天气的空间尺度也较小,观测到的极值样本十分有限。观测序列中各种误差特别是台站迁址等非自然因素导致的非均一性严重影响对极值变化的判断。多年来我国区域大量极端气候变化分析都是建立在未经均一化校订的观测资料基础上的。近年来我国学者开始重视观测序列非均一性研究(Yan et al., 2001b; Li et al., 2004; Li and Yan, 2009),但以往大多均一化方案主要偏重于气候均态校订。考虑气候极值的均一化方法尚处于探索阶段(Della-Marta and Wanner, 2006; Yan and Jones, 2008)。为进一步定量地研究气候极值和极端气候变化,相应的日气温和日降水资料均一化评价和订正工作是非常需要的。

地面观测资料的城市化影响偏差是需要注意的另一个重要问题(任国玉等, 2005; 任国玉, 2009)。气象观测站附近环境的渐进变化,以及城市化引起的城市热岛效应加强等因素,可以对极端气候指数特别是极端气温指数序列的线性趋势造成影响,引入局地人为干扰的系统偏差。这些偏差可能是造成区域和全球尺度极端气温和降水事件频率、强度趋势变化研究不确定性的主要原因,需要从现有的观测资料序列中予以剔除。

在华北地区,城市化引起的局部增暖对于国家级气象台站 1961~2000 年期间年平均地面气温上升趋势的贡献达到 39% (Ren et al., 2008),对于年、季、月平均最低气温以及平均气温日较差变化趋势的相对影响更大,年平均最低气温的上升趋势的 53% 可以用城市化影响解释(周雅清和任国玉, 2009)。与最低气温有关的极端气候指数主要包括霜冻日数、月最低气温极值、冷(暖)夜日数、寒潮持续指数和气温日较差等。这些极端气候指数变化趋势分析显然将受到观测环境变化和城市化的影响,其分析结果可能还存在明显的系统偏差。今后,我国与气温相关的区域尺度极端气候变化分析,首先需要对现有观测资料序列中可能存在的城市化影响偏差进行科学评价,如果这种偏差明显,还需要对其进行适当的订正。

与降水相关的极端气候指数,特别是表征极端强降水事件强度的指数变化研究,可能也一定程度上受到城市化影响,需要将来进行客观评价。大城市区域下垫面特性转变导致的边界层热、动力条件变化,以及城市上空较高的气溶胶浓度,可能是引起市区和下风方向降水变化的主要因素。

但是,影响极端降水变化分析偏差的一个主要来源当为风速引起的雨量计“低捕获”误差。由于雨量计的设计缺陷,加上我国雨量观测没有设置“风障”消除风速的影响,现有的降水观测记录存在明显风速导致的误差(任芝花等, 2003; Ye et al., 2004; Ding et al., 2007)。在过去的半个世纪,国家级台站记录的平均风速和大风频率均呈现显著下降趋势(任国玉等, 2005; Jiang et al., 2010),这种下降在很大程度上与观测环境变化和城市化影响有关(刘学锋等, 2009; 张爱英等, 2009)。因此,局地人为因素引起的风速偏差可能已经对我国多数国家级台站记录的降水量特别是强降水量造成了系统性偏差,致使偏强降水事件的降水量和强度出现虚假增高现象。北方多数台站冬季降水量有比较明显的增多趋势,可能也在一定程度上与风速“低捕获”偏差在固体降水测量中表现更为明显有关。

为了获得可信的极端降水变化分析结果,需要客观评价、订正观测环境变化和城市化引起的降水观测记录的系统偏差。目前,特别需要在单站基础上评价和订正与局地人为因素有关的风速变化引入的系统偏差。

此外,目前对于全国和区域极端气候变化的综合分析还较薄弱,有关雷暴、龙卷风等局地强烈天气事件的气候变化分析还限于局地范围,对区域尺度极端气候变化机理和原因的研究也很不够。今后这方面的工作应得到加强。

参考文献 (References)

- Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. 2006. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *J. Geophys. Res.*, 111, D05109, doi: 10.1029/2005JD006290.
- Alexander L V, Tapper N, Zhang X, et al. 2009. Climate extremes: Progress and future directions [J]. *Int. J. Climatol.*, 29: 317-319.
- Bai A, Zhai P, Liu X, et al. 2007. On climatology and trends in wet spell of China [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 88: 137-148.
- 蔡新玲, 刘宇, 康岚, 等. 2004. 陕西省雷暴的气候特征 [J]. *高原气象*, 23 (增刊): 118-123.
- Cai Xinling, Liu Yu, Kang Lan, et al. 2004. Climatic characteristic of thunderstorm in Shaanxi Province [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 23 (Suppl.): 118-123.
- 曹祥村, 袁群哲, 杨继, 等. 2007. 2005年登陆我国热带气旋特征分析 [J]. *应用气象学报*, 18 (3): 412-416.
- Cao Xiangcun, Yuan Qunzhe, Yang Ji, et al. 2007. Features of the tropical cyclones landing on China in 2005 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (3): 412-416.
- Chandler R E, Wheaton H S. 2002. Analysis of rainfall variability using generalized linear models: A case study from the west of Ireland [J]. *Water Resour. Res.*, 38(10), 1192, doi:10.1029/2001WR000906.
- 陈晓光, Conway D, 陈晓娟, 等. 2008. 1961~2005年宁夏极端降水事件变化趋势分析 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (3): 156-160.
- Chen Xiaoguang, Conway D, Chen Xiaojuan, et al. Trends of extreme precipitation events in Ningxia during 1961-2005 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 4 (3): 156-160.
- 陈峪, 任国玉, 王凌, 等. 2009. 近56年我国暖冬气候事件变化 [J]. *应用气象学报*, 20 (5): 539-545.
- Chen Yu, Ren Guoyu, Wang Ling, et al. 2009. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 20 (5): 539-545.
- 陈峪, 陈鲜艳, 任国玉. 2010. 中国主要河流极端降水变化特征 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (4): 265-269.
- Chen Yu, Chen Xianyan, Ren Guoyu. 2010. Variation of extreme precipitation over the Chinese large river basins [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 6 (4): 265-269.
- 陈正洪. 2009. 湖北省四季气温变化与季节变化 [J]. *长江流域资源与环境*, 18 (2): 185-185.
- Chen Zhenghong. 2009. Change in seasonal mean temperature and beginning time of seasons [J]. *Yangtze Resource and Environment (in Chinese)*, 18 (2): 185-185.
- Choi G, Collins D, Ren G, et al. 2009. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asian-Pacific network region, 1955-2007 [J]. *Int. J. Climatol.*, 29 (13): 1906-1925.
- Coe R, Stern R D. 1982. Fitting models to daily rainfall data [J]. *J. Appl. Meteor.*, 21: 1024-1031.
- Della-Marta P M, Wanner H. 2006. A method of homogenizing the extremes and mean of daily temperature measurements [J]. *J. Climate*, 19: 4179-4197.
- Ding T, Qian W, Yan Z. 2009. Changes of hot days and heat waves in China during 1961-2007 [J]. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.1989.
- 丁叶风, 李秀连, 田勇, 等. 2009. 首都机场夏季雷暴气候特征及

- 其变化规律 [J]. 气象科技, 37 (4): 420 - 424. Ding Yefeng, Li Xiulian, Tian Yong, et al. 2009. Climatic characteristics and variability of summer thunderstorms at Capital Airport [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 37 (4): 420 - 424.
- 丁一汇, 任国玉. 2008. 中国气候变化科学概论 [M]. 北京: 气象出版社, 281pp. Ding Yihui, Ren Guoyu. 2008. Introduction to Climate Change Science of China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 281pp.
- Ding Y, Yang D, Ye B, et al. 2007. Effects of bias correction on precipitation trend over China [J]. J. Geophys. Res., 112, D13116, doi: 10. 1029/2006JD007938.
- 段炼, 陈章. 2006. 近 42 年成都地区雷暴的气候统计特征 [J]. 自然灾害学报, 15 (4): 59 - 64. Duan Lian, Chen Zhang. 2006. Climatic characteristics of thunderstorms in Chengdu area in the last 42 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 15 (4): 59 - 64.
- Easterling D R, Horton B, Jones P D, et al. 1997. Maximum and minimum temperature trends for the globe [J]. Science, 277: 364 - 367.
- 范一大, 史培军, 周俊华, 等. 2005. 近 50 年来中国沙尘暴变化趋势分析 [J]. 自然灾害学报, 14 (3): 22 - 28. Fan Yida, Shi Peijun, Zhou Junhua, et al. 2005. Research on change of dust storm in China in recent 50 years [J]. Journal of Natural Disasters (in Chinese), 14 (3): 22 - 28.
- 封国林, 董文杰, 龚志强, 等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 227pp. Feng Guolin, Dong Wenjie, Gong Zhiqiang, et al. 2006. Non-linear Theory and Method of Temporal and Spatial Distribution of Observational Data [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 227 pp.
- 封国林, 龚志强, 支蓉, 等. 2008. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展 [J]. 气象学报, 66 (6): 892 - 905. Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong, et al. 2008. Latest advances of climate change detecting technologies [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (6): 892 - 905.
- 封国林, 王启光, 侯威, 等. 2009a. 极端事件的长程相关性 [J]. 物理学报, 58 (4): 2853 - 2861. Feng Guolin, Wang Qiguang, Hou Wei, et al. 2009. Long-term correlations of extreme events in metrological fields [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (4): 2853 - 2861.
- 封国林, 杨杰, 万仕全, 等. 2009b. 温度破纪录事件预测理论研究 [J]. 气象学报, 67 (1): 61 - 74. Feng Guolin, Yang Jie, Wan Shiquan, et al. 2009. On the prediction of record-breaking daily temperature events [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 61 - 74.
- Feng G, Gong Z, Zhi R, et al. 2008. Analysis of precipitation characteristics of South and North China based on the power-law tail exponents [J]. Chinese Physics B, 17 (7): 2745 - 2752.
- Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Clim. Res., 19: 193 - 212.
- 高留喜, 杨成芳, 冯桂力, 等. 2007. 山东省雷暴时空变化特征 [J]. 气候变化研究进展, 3 (4): 239 - 242. Gao Liuxi, Yang Chengfang, Feng Guili, et al. 2007. Spatial-temporal variations of thunderstorms in Shandong Province [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (4): 239 - 242.
- 龚道溢, 韩晖. 2004. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析 [J]. 地理学报, 59 (2): 230 - 238. Gong Daoyi, Han Hui. 2004. Extreme climate events in northern China over the last 50 years [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59 (2): 230 - 238.
- 龚志强, 封国林. 2008. 中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究 [J]. 物理学报, 57 (6): 3920 - 3931. Gong Zhiqiang, Feng Guolin, 2008. The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (6): 3920 - 3931.
- 龚志强, 封国林, 万仕全, 等. 2006. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征 [J]. 物理学报, 55 (1): 477 - 484. Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Wang Shiquan, et al. 2006. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (1): 477 - 484.
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系 [J]. 物理学报, 58 (6): 4342 - 4353. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (6): 4342 - 4353.
- He W, Feng G, Wu Q, et al. 2008. A new method for abrupt change detection in dynamic structures [J]. Nonlinear Processes in Geophysics, 15: 601 - 606.
- 侯威, 杨萍, 封国林, 等. 2008. 中国极端干旱事件的年代际变化及其成因 [J]. 物理学报, 57 (6): 3932 - 3940. Hou Wei, Yang Ping, Feng Guolin, et al. 2008. The decadal variability and its cause of the extreme drought in China [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (6): 3932 - 3940.
- 胡艳, 端义宏. 2006. 上海地区雷暴天气的气候变化及可能影响因素 [J]. 中国海洋大学学报, 36 (4): 588 - 594. Hu Yan, Duan Yihong. 2006. Climatic changes related to thunderstorm days and probable impact factors in Shanghai [J]. Journal of Ocean University of China (in Chinese), 36 (4): 588 - 594.
- 华丽娟, 马柱国, 罗德海, 等. 2004. 1961~2000 年中国区域气温较差分析 [J]. 地理学报, 59 (5): 680 - 688. Hua Lijuan, Ma Zhuguo, Luo Dehai, et al. 2004. Analysis of temperature range from 1961 through 2000 across China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 59 (5): 680 - 688.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge Univer-

- sity Press, 996.
- 纪忠萍, 谢炯光, 梁健, 等. 2007. 赤道气压振荡与登陆中国热带气旋的关系 [J]. 中国科学 (D 辑), 37 (11): 1556 - 1564. Ji Zhongping, Xie Jiongguang, Liang Jian, et al. 2007. Sciences in China (series D) (in Chinese), 37 (11): 1556 - 1564.
- Jiang Y, Luo Y, Zhao Z, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956 - 2004 [J]. Theor. Appl. Climatol., 99: 421 - 430.
- 景怀玺, 石圆圆, 白虎志. 2007. 甘肃中部雷暴天气变化的气候特征分析 [J]. 干旱气象, 25 (1): 53 - 57. Jing Huaixi, Shi Yuanyuan, Bai Huzhi. 2007. Climatic characteristic of thunderstorm weather variations in the middle part of Gansu Province [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 25 (1): 53 - 57.
- Jones P D, Horton E B, Folland C K, et al. 1999. The use of indices to identify changes in climatic extremes [J]. Climatic Changes, 42: 131 - 149.
- Li Q, Liu X, Zhang H, et al. 2004. Detecting and adjusting temporal inhomogeneity in Chinese mean surface air temperature data [J]. Adv. Atmos. Sci., 21: 260 - 268.
- Li Z, Yan Z. 2009. Homogenized China daily mean/maximum/minimum temperature series 1960 - 2008 [J]. Atmospheric and Ocean Science Letters, 2 (4): 237 - 243.
- 李英, 陈联寿, 张胜军. 2004. 登陆我国热带气旋的统计特征 [J]. 热带气象学报, 20 (1): 14 - 23. Li Ying, Chen Lianshou, Zhang Shengjun. 2004. Statistical characteristics of tropical cyclone making landfalls on China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (1): 14 - 23.
- 林小红, 任福民, 刘爱鸣, 等. 2008. 近 46 年影响福建的台风降水的气候特征分析 [J]. 热带气象学报, 24 (4): 411 - 415. Lin Xiaohong, Ren Fumin, Liu Aiming, et al. 2008. Climatic variation features of typhoon precipitation influencing Fujian for the past 46 years [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (4): 411 - 415.
- 刘学锋, 江莹, 任国玉, 等. 2009. 河北城市化和观测环境改变对地面风速观测资料序列的影响 [J]. 高原气象, 28 (2): 433 - 439. Liu Xuefeng, Jiang Ying, Ren Guoyu, et al. 2009. Effect of urbanization and observation environment change on wind speed trend in Hebei Province, China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (2): 433 - 439.
- 马晓波. 1999. 中国西北地区最高、最低气温的非对称变化 [J]. 气象学报, 57 (5): 613 - 621. Ma Xiaobo. 1999. Change in maximum and minimum temperature over northwestern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (5): 613 - 621.
- 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 [J]. 科学通报, 52 (10): 1199 - 1206. Ma Zhuguo. 2007. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (10): 1199 - 1206.
- 闵灿, 钱永甫. 2008. 我国近 40 年各类降水事件的变化趋势 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 47 (3): 105 - 111. Min Shan, Qian Yongfu. 2008. Trends in all kinds of precipitation events in China over the past 40 years [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni (in Chinese), 47 (3): 105 - 111.
- Qian W, Lin X. 2004. Regional trends in recent temperature and indices in China [J]. Clim. Res., 2004, 27 (2): 119 - 134.
- Qian W, Fu J, Yan Z. 2007. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961 - 2005 [J]. Geophys. Res. Lett., 34, L11705, doi:10.1029/2007GL029631.
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 2007. 近 40 年中国平均气候与极值气候变化的概述 [J]. 地球科学进展, 22 (7): 673 - 684. Qian Weihong, Fu Jiaolan, Zhang Weiwei, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (7): 673 - 684.
- 任福民, 王小玲, 陈联寿, 等. 2008. 登陆中国大陆、海南和台湾的热带气旋及其相互关系 [J]. 气象学报, 66 (2): 224 - 235. Ren Fumin, Wang Xiaoling, Chen Lianshou, et al. 2008. Tropical cyclones landfalling in the mainland, Hainan and Taiwan of China and their interrelations [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (2): 224 - 235.
- 任福民, 翟盘茂. 1998. 1951~1990 年中国极端气温变化分析 [J]. 大气科学, 22 (2): 217 - 227. Ren Fumin, Zhai Panmao. 1998. Analysis of extreme temperature change in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (2): 217 - 227.
- 任福民, 崔冬林, 王艳皎, 等. 2010. 客观识别区域持续性极端事件的探索研究 [C]. 中国气象局气候研究开放实验室 2009 年度学术年会论文: 52 - 54. Ren Fumin, Cui Donglin, Wang Yanjiao, et al. 2010. Study of an objective identification method of consistent extreme climate events [C]. Abstract of Annual Meeting of the CMA Laboratory for Climate Studies, 2009: 52 - 54.
- Ren F, Wang Y, Wang X. 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations [J]. Advances in Atmospheric Science, 24 (4): 700 - 711.
- 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 2005. 中国气温变化研究最新进展 [J]. 气候与环境研究, 10 (4): 701 - 716. Ren Guoyu, Chu Ziyi, Zhou Yaqing, et al. 2005. Recent progresses in studies of regional temperature changes in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (4): 701 - 716.
- 任国玉. 2009. 关于极端气温变化研究的几个问题 [M] // 刘燕华. 气候变化与科技创新 [M]. 北京: 科学出版社, 85 - 86. Ren Guoyu. 2009. On a few issues of studies of extreme temperature change [M] (in Chinese) // Liu Yanhua. Climate Change and Scientific Innovation. Beijing: Science Press, 85 - 86.
- 任国玉, 陈峪, 邹旭恺, 等. 2010. 综合极端气候指数的定义和趋势分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 354 - 364. Ren Guoyu, Chen Yu, Zou Xukai, et al. 2010. Definition and trend analysis

- of an integrated extreme climatic index [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (4): 354 - 364.
- Ren G, Zhou Y, Chu Z, et al. 2008. Urbanization effect on observed surface air temperature trend in North China [J]. *J. Climate*, 21 (6), 1333 - 1348.
- 任芝花, 王改利, 邹凤玲, 等. 2003. 中国降水测量误差的研究 [J]. *气象学报*, 61 (5): 621 - 627. Ren Zhihua, Wang Gaili, Zou Fengling, et al. 2003. The research of precipitation measurement errors in China [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 61 (5): 621 - 627.
- Stern R D, Coe R. 1984. A model fitting analysis of daily rainfall data [J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 147A: 1 - 34.
- 苏布达, 姜彤, 任国玉, 等. 2006. 长江流域1960~2004年极端强降水时空变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 2 (1): 9 - 14. Su Buda, Jiang Tong, Ren Guoyu, et al. 2006. Observed trends of precipitation extremes in the Yangtze River Basin during 1960 to 2004 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2 (1): 9 - 14.
- 苏布达, Gemmer M, 姜彤, 等. 2007. 1960~2005年长江流域降水极值概率分布特征 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (4): 208 - 213. Su Buda, Gemmer M, Jang Tong, et al. 2007. Probability distribution of precipitation extremes over the Yangtze River Basin during 1960 - 2005 [J]. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 3 (4): 208 - 213.
- 孙风华, 杨素英, 任国玉. 2007. 东北地区降水日数、强度和持续时间的年代际变化 [J]. *应用气象学报*, 18 (5): 610 - 618. Sun Fenghua, Yang Suying, Ren Guoyu. 2007. Decade variations of precipitation event frequency, intensity and duration in Northeast China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 18 (5): 610 - 618.
- 唐国利, 巢清尘. 2005. 中国近49年沙尘暴变化趋势的分析 [J]. *气象*, 31 (5): 8 - 11. Tang Guoli, Chao Qingchen. 2005. Analysis on sandstorm variation in China for last 49 Years [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 31 (5): 8 - 11.
- 唐红玉, 翟盘茂, 王振宇. 2005. 1951~2002年中国平均最高、最低气温及日较差变化 [J]. *气候与环境研究*, 10 (4): 728 - 735. Tang Hongyu, Zhai Panmao, Wang Zhenyu. 2005. On change in mean maximum temperature, minimum temperature and diurnal range in China during 1951 - 2002 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (4): 728 - 735.
- Tu K, Yan Z, Dong W. 2010. Climatic jumps in precipitation and extremes in drying North China during 1954 - 2006 [J]. *Journal of Meteorological Society of Japan*, 88 (1): 29 - 42.
- 万仕全, 王令, 封国林, 等. 2009. 全球变暖对中国极端暖月事件的潜在影响 [J]. *物理学报*, 58 (7): 5083 - 5090. Wan Shiquan, Wang Ling, Feng Guolin. 2009. Influence of global warming on extreme warm months in China [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 58 (7): 5083 - 5090.
- 王翠花, 李雄, 缪启龙. 2003. 中国近年来日最低气温变化特征研究 [J]. *地理科学*, 23 (4): 441 - 447. Wang Cuihua, Li Xiong, Miao Qilong, et al. 2003. Study of characteristics of daily minimum temperature change in China [J]. *Scientia Geographica Sinica* (in Chinese), 23 (4): 441 - 447.
- 王大钧, 陈列, 丁裕国. 2006. 近40年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系 [J]. *热带气象学报*, 22 (3): 283 - 290. Wang Dajun, Chen Lie, Ding Yuguo. 2006. The change trend in rainfall, wet days of China in recent 40 years and the correlation between the change trend and the change of global temperature [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 22 (3): 283 - 290.
- 王菱, 谢贤群, 苏文, 等. 2004. 中国北方地区50年来最高和最低气温变化及其影响 [J]. *自然资源学报*, 19 (3): 337 - 343. Wang Ling, Xie Xianqun, Su Wen, et al. 2004. Changes of maximum and minimum temperature and their impacts in northern China over the second half of the 20th Century [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 19 (3): 337 - 343.
- 王启光, 支蓉, 张增平. 2008. Lorenz系统长程相关性的研究 [J]. *物理学报*, 57 (8): 5343 - 5350. Wang Qiguang, Zhi Rong, Zhang Zengping. 2008. The research on long range correlation of Lorenz system [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 57 (8): 5343 - 5350.
- 王绍武, 伍荣生, 杨修群, 等. 2005. 中国的气候变化 [M] // 秦大河等. 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 科学出版社: 63 - 103. Wang Shaowu, Wu Rongsheng, Yang Xiuqun, et al. Change in climate of China [M] (in Chinese) // Qin Dahe, et al. *Climate and Environmental Change of China I*. Beijing: Science Press, 63 - 103.
- 王晓娟, 龚志强, 周磊, 等. 2009. 温度关联网络稳定性分析 I——极端事件的影响 [J]. *物理学报*, 58 (9): 6651 - 6658. Wang Xiaojuan, Gong Zhiqiang, Zhou Lei, et al. Analysis of the stability of temperature networks I—the influence of extreme events [J]. *Acta Physica Sinica* (in Chinese), 58 (9): 6651 - 6658.
- 王秀萍, 张永宁. 2006. 登陆中国热带气旋路径的年代际变化 [J]. *大连海事大学学报*, 32 (3): 41 - 45. Wang Xiuping, Zhang Yongning. 2006. Interdecadal change of the landing tropical cyclone tracks over China [J]. *Journal of Dalian Maritime University* (in Chinese), 32 (3): 41 - 45.
- Wang X, Zhai P. 2009. Variation of extratropical cyclone activity in northern East Asia [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3), 471 - 479.
- 王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 2008. 中国台风降水的气候特征 [J]. *热带气象学报*, 24 (3): 233 - 238. Wang Yongmei, Ren Fumin, Li Weijing, et al. 2008. Climatic Characteristics of Typhoon precipitation over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (3): 233 - 238.
- 王勇, 缪启龙, 丁园圆. 2008. 西北地区春季沙尘暴的区域性时间变化特征 [J]. *干旱区资源与环境*, 22 (11): 30 - 37. Wang Yong, Miao Qilong, Ding Yuanyuan. 2008. Temporal and spatial change in spring dust storms in northwestern China [J]. *Resources and Environment in Arid Region* (in Chinese), 22 (11):

- 30-37.
- Wang Y, Yan Z. 2009. Trends in seasonal total and extreme precipitation over China during 1961-2007 [J]. *Atmospheric and Ocean Science Letters*, 2 (3): 165-171.
- Wang Y, Yan Z, Chandler R E. 2009. An analysis of mid-summer rainfall occurrence in eastern China and its relationship with large-scale warming using generalized linear models [J]. *Int. J. Climatol.*, doi: 10.1002/joc.2018.
- 熊开国, 封国林, 王启光, 等. 2009. 近 46 年来中国温度破纪录事件的时空分布特征分析 [J]. *物理学报*, 58 (11): 8107-8115.
- Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Wang Qiguang, et al. 2009. Spatial-temporal characteristics of record-breaking temperature events over China in recent 46 years [J]. *Acta Physica-Sinica (in Chinese)*, 58 (11): 8107-8115.
- 徐铭志, 任国玉. 2004. 近 40 年中国气候生长期的变化 [J]. *应用气象学报*, 15 (3): 306-312.
- Xu Mingzhi, Ren Guoyu. 2004. Change in growing season length over China, 1961-2000 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 15 (3): 301-312.
- 严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年我国极端气候变化格局 [J]. *气候与环境研究*, 5 (3): 267-372.
- Yan Zhongwei, Yang Chi. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951-1997 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 5 (3): 267-372.
- Yan Z, Jones P D, Moberg A, et al. 2001a. Recent trends in weather and seasonal cycles, an analysis of daily data from Europe and China [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D6): 5123-5138.
- Yan Z, Yang C, Jones P D. 2001b. Influence of inhomogeneity on the estimation of mean and extreme temperature trends in Beijing and Shanghai [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (3): 309-322.
- Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. 2002a. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations [J]. *Climatic Change*, 53: 355-392.
- Yan Z, Bate S, Chandler R, et al. 2002b. An analysis of daily maximum wind speed in northwestern Europe using Generalised Linear Modelling [J]. *J. Climate*, 15 (15): 2073-2088.
- Yan Z, Jones P D. 2008. Detecting inhomogeneities in daily climate series using wavelet analysis [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 25 (2): 157-163.
- 杨杰, 侯威, 封国林. 2010. 干旱破纪录事件统计理论研究 [J]. *物理学报*, 59 (1): 664-675.
- Yang Jie, Hou Wei, Feng Guolin. 2010. Study of record-breaking climate events [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 59 (1): 664-675.
- 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 [J]. *气候与环境研究*, 13 (1): 75-83.
- Yang Jinhua, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2008. Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (1): 75-83.
- 杨萍, 侯威, 王启光, 等. 2010. 近 40 年我国极端温度的变化趋势和季节特征 [J]. *应用气象学报*, 21 (1): 29-36.
- Yang Ping, Hou Wei, Wang Qiguang, et al. Trend and seasonal feature of extreme temperature change in China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 21 (1): 29-36
- 杨萍, 侯威, 支蓉, 等. 2009. 利用空间点过程提取丛集点算法的适用性研究 [J]. *物理学报*, 58 (3): 2097-2105.
- Yang Ping, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2009. Research on the validity of cluster delineation based on spatial point processes [J]. *Acta Physica Sinica (in Chinese)*, 58 (3): 2097-2105.
- 杨宏青, 陈正洪, 石燕, 等. 2005. 长江流域 1960 年以来暴雨日数和暴雨量的变化趋势 [J]. *气象*, 31 (3): 66-68.
- Yang Hongqing, Chen Zhenghong, Shi Yan, et al. 2005. Change trends of heavy rainfall events for last 40 years in the Changjiang Valley [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 31 (3): 66-68.
- 杨玉华, 应明, 陈葆德. 2009. 近 58 年来登陆中国热带气旋气候变化特征 [J]. *气象学报*, 67 (5): 689-696.
- Yang Yuhua, Ying Ming, Chen Baode. 2009. Climate change characteristics of land-falling tropical cyclones over the past 58 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 67 (5): 689-696.
- Ye B, Yang D, Ding Y, et al. 2004. A bias-corrected precipitation climatology for China [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 5: 1147-1160.
- 叶殿秀, 张强, 邹旭恺. 2005. 三峡库区雷暴气候变化特征分析 [J]. *长江流域资源与环境*, 14 (3): 381-385.
- Ye Dianxiu, Zhang Qiang, Zou Xukai. 2005. Features of climate change in thunderstorm over the Three Gorges area [J]. *Resources and Environment in Yangtze Basin (in Chinese)*, 14 (3): 381-385.
- 易燕明, 杨兆礼, 万齐林, 等. 2006. 近 50 年广东省雷暴、闪电时空变化特征的研究 [J]. *热带气象学报*, 22 (6): 539-546.
- Yi Yanming, Yang Zhaoli, Wan Qilin, et al. 2006. Temporal/spatial characteristics and climatological variation of thunderstorm and lightning over the past 50 years in Guangdong [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (6): 539-546.
- 尹丽云, 许迎杰, 张腾飞, 等. 2007. 云南雷暴的时空分布特征分析 [J]. *灾害学*, 22 (2): 87-92.
- Yin Liyun, Xu Yingjie, Zhang Tengfei, et al. 2007. A study on characteristics of spatio-temporal distribution of thunderstorm in Yunnan [J]. *Journal of Catastrophology (in Chinese)*, 22 (2): 87-92.
- 翟盘茂, 任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化 [J]. *气象学报*, 55 (4): 18-429.
- Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. Maximum and minimum temperature change of China over the past 40 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 55 (4): 418-429.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件的变化 [J]. *地理学报*, 58 (增刊): 1-10.
- Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th Century [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (Suppl.): 1-10.

- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. 气象学报, 57 (2): 208 - 216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1997. Detection of trend of precipitation extremes change in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (2): 208 - 216.
- 翟盘茂, 王志伟, 邹旭恺. 2007. 全国及主要流域极端气候事件变化 [M] // 任国玉. 气候变化与中国水资源. 北京: 气象出版社, 91 - 112. Zhai Panmao, Wang Zhiwei, Zou Xukai. 2007. Changes in extreme climate events of China and the major river basins [M] (in Chinese) // Ren Guoyu. Climate Change and Water Resources of China. Beijing: China Meteorological Press, 91 - 112.
- Zhai P, Zhang X, Wan H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J. Climate, 18: 1096 - 1108.
- Zhai P, Pan X. 2003. Trends in temperature extremes during 1951 - 1999 in China [J]. Geophys. Res. Lett., 30, doi: 10.1029/2003GL018004.
- 张爱英, 任国玉, 郭军, 等. 2009. 1980~2006 年我国高空风速变化趋势分析 [J]. 高原气象, 28 (3): 680 - 687. Zhang Ziyang, Ren Guoyu, Guo Jun, et al. Analyses of change trend of upper-air wind speed over China during 1980 - 2006 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 680 - 687.
- 章大全, 张璐, 杨杰, 等. 2010. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响 [J]. 物理学报, 59 (1): 655 - 663. Zhang Daquan, Zhang Lu, Yang Jie, et al. 2010. Change of precipitation and temperature and its influence on drought development over the past 50 years in China [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 59 (1): 655 - 663.
- 章大全, 钱忠华. 2008. 利用中值检测方法研究近 50 年中国极端气温变化趋势 [J]. 物理学报, 57 (7): 6435 - 6440. Zhang Daquan, Qian Zhonghua. 2008. Analysis of extreme events in China's temperature in recent 50 years using detecting method based on median [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 57 (7): 6435 - 6440.
- Zhang D, Feng G, Hu J. 2008. Trend of extreme precipitation events over China in last 40 years [J]. Chinese Physics B, 17 (2): 736 - 742.
- 张莉, 任国玉. 2003. 中国北方沙尘暴频数演化及其气候成因分析 [J]. 气象学报, 61 (6): 744 - 750. Zhang Li, Ren Guoyu. 2003. Change in dust Storm frequency and the climatic controls in northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 744 - 750.
- 张美平, 敖淑珍, 刘翔, 等. 2004. 广州白云国际机场近 46 年来雷暴气候的统计特征 [J]. 应用气象学报, 15 (1): 66 - 73. Zhang Meiping, Ao Shuzhen, Liu Xiang, et al. 2004. Statistic characteristics of thunderstorm climate at Guangzhou Baiyun International Airport in the late 46 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 15 (1): 66 - 73.
- 张宁, 孙照渤, 曾刚. 2008. 1955~2005 年中国极端气温的变化 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 123 - 128. Zhang Ning, Sun Zhaobo, Zeng Gang. 2008. Change of extreme temperatures in China during 1955 - 2005 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 123 - 128.
- 张文, 高新全, 董文杰, 等. 2006. 利用高阶矩检测近 2000 年来气候极端异常的研究 [J]. 物理学报, 55 (5): 2657 - 2662. Zhang Wen, Gao Xinquan, Dong Wenjie, et al. 2006. Detection of the recent 2000 a climatic extreme anomalies based on a new kind of approach: The high-order moment method [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (5): 2657 - 2662.
- Zhang W, Wan S. 2008. Detection and attribution of abrupt climate changes in the last one hundred years [J]. Chinese Physics B, 17 (6): 2311 - 2316
- 张小曳, 龚山陵. 2006. 2006 年春季的东北亚沙尘暴 [M]. 北京: 气象出版社, 1 - 118. Zhang Xiaoye, Gong Shanling. 2006. Springtime Dust Storms of 2006 in East Asia [M] (in Chinese). Beijing: China Metrological Press, 1 - 118.
- Zhang X, Zwiers F W, Li G. 2004. Monte Carlo experiments on the detection of trends in extreme values [J]. J. Climate, 17: 1945 - 1952.
- Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 448: 461 - 465.
- 赵珊珊, 高歌, 孙旭光, 等. 2009. 西北太平洋热带气旋频数和强度变化趋势初探 [J]. 应用气象学报, 20 (5): 555 - 563. Zhao Shanshan, Gao Ge, Sun Xuguang, et al. 2009. Climatological characteristics of tropical cyclones in the northwestern Pacific [J]. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 20 (5): 555 - 563.
- 支蓉, 龚志强, 王德英, 等. 2006. 基于幂律尾指数研究中国降水的时空演变特征 [J]. 物理学报, 55 (11): 6185 - 6191. Zhi Rong, Gong Zhiqiang, Wang Deying, et al. 2006. Analysis of the spatio-temporal characteristics of precipitation of China based on the power-law exponent [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 55 (11): 6185 - 6191.
- 周雅清, 任国玉. 2009. 城市化对华北地区最高、最低气温和日较差变化趋势的影响 [J]. 高原气象, 28 (5): 1158 - 1166. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2009. Urbanization effect on trends of mean maximum, minimum temperature and daily temperature range in North China [J]. Plateau Metrology (in Chinese), 28 (5): 1158 - 1166.
- 周雅清, 任国玉. 2010. 中国大陆 1956~2008 年极端气温事件变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 405 - 417. Zhou Yaqing, Ren Guoyu. 2010. Variation characters of extreme temperature indices in mainland China during 1956 - 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 405 - 417.
- 周自江, 章国材. 2003. 中国北方的典型强沙尘暴事件 (1954~2002 年) [J]. 科学通报, 48 (11): 1224 - 1228. Zhou Zijiang, Zhang Guocai. 2003. Strong dust storm events of northern China

- over 1954 - 2002 [J]. *Bulletin of Sciences (in Chinese)*, 48 (11): 1224 - 1228.
- Zou M, Feng G, Gao X. 2006. Sensitivity of intrinsic mode functions of Lorenz system to initial values based on EMD method [J]. *Chinese Physics*, 15 (6): 1384 - 1390.
- 邹旭恺, 张强, 任国玉. 2010. 基于综合气象干旱指数与干旱变化趋势研究 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 371 - 378. Zhou Xukai, Zhang Qiang, Ren Guoyu. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 371 - 378.
- Zou X, Alexander L V, Parker D, et al. 2006. Variations in severe storms over China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17701, doi: 10.1029/2006GL026131.
- 邹用昌, 杨修群, 孙旭光, 等. 2009. 我国极端降水过程频数时空变化的季节差异 [J]. *南京大学学报 (自然科学)*, 45 (1): 98 - 109. Zou Yongchang, Yang Xiuqun, Sun Xuguang, et al. 2009. Seasonal difference of the spatio-temporal variation of the number of the extreme precipitation processes in China [J]. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 45 (1): 98 - 109.