

文章编号: 1001-8166(2007)10-1066-10

21 世纪初极端天气气候事件研究进展^{*}

胡宜昌^{1,3}, 董文杰^{1,2}, 何 勇²

(1. 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;

2. 国家气候中心, 北京 100081; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 由于极端天气气候事件的严重影响, 越来越多的研究开始关注其变化情况。从观测分析到模拟研究, 几乎都发现极端气温、降水事件发生了显著变化, 而且在全球变暖的大背景下, 未来有些极端事件可能会发生频数更高或强度更强。当然, 研究结论也存在一定程度的不确定性, 从模式模拟来看, 目前模拟结果仍存在不确定性, 不同模式的结果间常常存在较大的差异; 而从观测分析来看, 研究主要局限于 20 世纪后半叶, 如果对更长时间作分析, 结论或许会有所不同。文章从最基本的极端天气气候事件的定义出发, 结合观测事实和模拟研究两个主要方面来介绍近几年来极端事件研究取得的主要进展, 最后简单地总结了这些进展, 并提出了进一步研究的思路。

关 键 词: 极端事件; 气温; 降水

中图分类号: P466

文献标识码: A

1 引 言

IPCC 第三次评估报告 (TAR) 指出^[1], 20 世纪 (1901—2000 年) 全球平均地表温度升高 0.6℃, 比第二次报告 (SAR) 高出 0.15℃; 第四次评估报告 (AR4)^[2] 指出更新的 100 年 (1906—2005 年) 线性趋势大小为 0.74℃ (0.56~0.92℃), 大于 TAR 给出的 1901—2000 年增加 0.6℃ (0.4~0.8℃) 的趋势大小。每次报告都比前一次所得到的变暖趋势强, 一个重要的原因就是新评估报告分析时段内增加的几年与以往年份相比几乎都是偏暖的, 这也说明了近些年来全球变暖越来越明显。在全球变暖的大背景下, 极端事件发生的频率、强度等会如何变化, 是 SAR 以来气候变化研究中普遍关注的问题。Katz 等^[3] 认为与气候平均态相比, 极端气候事件对气候变化更敏感。不同于平均气候态的变化, 与极端事件的发生频率或强度有关的任何变化都可能对自然和社会产生重大的影响。1998 年夏季中国长

江流域的洪涝、2003 年夏季欧洲大陆的热浪、2005 年美国遭遇的 Katrina 飓风的袭击等, 这些都是在社会上产生重大影响的由极端天气引发的灾难性事件。为了降低极端事件对自然和社会的影响, 弄清极端事件变化趋势、发生原因及机理, 成为减缓措施的必要环节。

2 定义及研究方法

研究极端天气气候事件, 有必要先对其概念有一个清晰的认识。Easterling 等^[4] 将极端气候事件归为 2 类: 一类基于简单的气候统计学, 这些极端事件每年都会发生, 如非常高或非常低的逐日温度、强的逐日或逐月降水量; 另一类是更复杂一些的直接由事件发生与否来决定的, 如洪涝、飓风等, 这样的事件对于给定的地点并不是每年都发生。Easterling^[5] 认为可以从很多方面来定义极端气候事件, 如既可以从极端日温度、日降水量、大范围出现暖的月温度异常来定义, 或者事件 (如飓风) 的发生与否

^{*} 收稿日期: 2007-05-29; 修回日期: 2007-08-15.

^{*} 基金项目: 中国气象局气候变化专项项目“未来 30 年气候变化对我国北方农牧交错带生态系统的影响及其对策研究” (编号: CCSF2007-8); 国家重点基础研究发展计划项目“北方干旱化与人类适应” (编号: 2006CB400503) 资助。

作者简介: 胡宜昌 (1982-), 男, 湖南华容人, 博士生, 主要从事极端气候事件研究. E-mail: huyc@tea.ac.cn

来定义,也可以从事件对社会造成影响的大小来判定。Beniston 等^[6]简单归纳了常用的定义极端事件的 3 种标准:①事件发生的频率相对较低;②事件有相对较大或较小的强度值;③事件导致了严重的社会经济损失。对某一具体的极端事件,往往并不能同时满足以上 3 类标准,如以第一类标准定义出来的干旱区极端降水,强度并不会很大,而且可能对社会经济还是有利的。TAR 和 AR⁴都对极端天气气候事件作了明确的定义^[1,2],对一特定地点和时间,极端天气事件就是从概率分布的角度来看,发生概率极小的事件,通常发生概率只占该类天气现象的 10% 或者更低,从这样的定义来看,极端天气事件的特征是随地点而变的;极端气候事件就是在给定时期内,大量极端天气事件的平均状况,这种平均状态相对于该类天气现象的气候平均态也是极端的。从气候学研究的角度来看,TAR 和 AR⁴给出的定义简洁而明确,虽然只涉及事件的发生概率,但却避免了事件的绝对强度随区域不同而差异较大,很难用同一标准作比较的问题。

分析研究极端事件的变化特征通常有两种方法,一种是定义与极端事件相关的代用气候指数,通过分析这些气候指数的特征来反映极端事件的变化情况;另一种就是根据天气现象(如热带气旋)本身的定义标准,直接通过对原始资料的分析来判断该类极端事件的频率或强度有何变化。

尽管国际上不同研究组都一致认同极端事件的代用气候指数对气候变化监测的重要性,但每个研究组所采用的具体定义方式又略有不同^①。ETC-CDM I(Expert Team on Climate Change Detection and Indices)定义了 27 个代用气候指数^②,主要集中在对极端事件的描述上,其中包括 16 个气温指数和 11 个降水指数,这些指数是从逐日最高、最低及平均气温或逐日降水量计算得到的。Alexander 等将这些指数归为 5 类^[8]:①基于百分比阈值的相对指数;②代表某个季节或某年最大或最小值的绝对指数;③气温或降水值大于或小于某固定阈值的天数的阈值指数;④过度冷、暖、干、湿的持续时间或对生长季长度而言的生长周期所对应的持续指数;⑤其它指数,包括年总降水量、气温日较差、平均雨日降水强度、极端气温差以及年极端降水占总降水的百分比。当研究区域气候差异比较大时,通常选用基于百分比阈值的相对指数,由绝对阈值大小定义的指数并不适用,但对气候特征相当的区域,利用绝对阈值指数研究是可行的,而且能更直观的看出极端

事件的影响强弱;另外像生长季长短,其往往在中纬度地区才有意义^[7~9];此外,ETCCDM I 所定义的指数与其它研究中相应指数的具体计算方式可能略有差别。

3 观测事实

通常所说的极端天气气候事件主要包括极端气温、降水事件和热带气旋。对热带气旋的研究主要包括其发生频率、强度和路径变化,在全球变暖的大背景下,目前对热带气旋这些特征变化趋势的研究仍有很多不同意见^[10~12]。Webster^[13]指出,在过去的 35 年间,虽然热带气旋总个数没有显著的变化,但强热带气旋的个数有增加;关于全球变暖与热带气旋之间的关系仍存在争论,Pielke^[14]认为虽然自 1995 年以来,大西洋风暴数和强台风数都增加,但这种变化没有超出其年代际变化范围(至少从 1900 年以来),这样很难区分这种变化是自然变率的原因还是受温室气体排放的影响。Trenberth^[10]指出仍然没有坚实的理论基础来下结论说人类活动引起的气候变化如何影响着热带气旋的发生频率和移动路径,但他同时也认为,在热带气旋的生成区域,受人类活动影响的环境变化现在趋势很明显,这种变化影响到了热带气旋的强度及与其相关的降水强度的变化,然而其对热带气旋发生频率的影响还不清楚,目前的关键问题不是热带气旋发生的频率和路径是否存在某种变化趋势,而是它们正发生着怎样的变化。下面主要对极端气温和极端降水两方面作介绍。

3.1 极端气温

翟盘茂等^[16]对 1951—1999 年中国北方极端气温的研究发现,高温日数(日最高气温大于 35℃)略有减少,华北及河西走廊减少趋势很明显;低温日数(日最低气温小于 0℃)显著减少,东部地区 and 新疆北部尤其突出;北方整体而言,极端高温(大于日最高气温序列的 95%)日数明显增多,极端低温(小于日最低气温序列的 5%)日数显著减少。翟盘茂^[16]发现中国整体来看,热日数(日最高气温大于 35℃)有较小的减少趋势,中国东部趋势特别明显;雾日数(日最低气温小于 0℃)显著减少;暖日(大于日最高气温序列的 90%)和暖夜(大于日最低气温序列的 90%)发生频率有增加趋势;冷日数(小于日最高气

① <http://eca.knmi.nl/documents/ETCCDMIndicesComparison.pdf>

② http://ccma.seos.uvic.ca/ETCCDM1/list27_indices.htm

温序列的 90%) 减少, 冷夜数 (小于日最低气温序列的 10%) 减少更明显。龚道溢等^[17]发现 1956—2001 年间华北地区的极端高温 (大于日平均气温序列的 90%) 发生频率显著升高, 极端低温 (小于日平均气温序列的 10%) 发生频率显著降低。Qian^[18]采用 ECA & D (European Climate Assessment & Dataset)^① 的指数定义方式对中国的情况进行了更详细的研究, 1961—2000 年以来, 从中国大陆平均气温来看, 温度日较差减小, 东北、华南及新疆地区减小趋势尤为显著; 沿黄河流域的 40°N 附近地区, 冷日数显著减少, 黄河中上游、华南沿海及其它许多地区暖日数都增加, 只有个别地方暖日数减少; 冷夜数减少、暖夜数增加, 而且冷夜数、暖夜数变化趋势的空间分布比日间气温的更一致; 大陆地区雾日数显著减少, 华北、东北地区生长季长度增加, 北方大部分地区霜冻期缩短, 原来一些冷空气爆发的主要地区持续冷日数都减小。此外, 我国地方气象业务部门也开展了一些相关研究。周秀杰等^[19]发现黑龙江省 30℃ 以上极端最高气温平均日数下降, -30℃ 以下极端最低气温平均日数明显减少。王鹏祥等^[20]发现中国西北极端高温事件发生频率虽然变化趋势较一致, 但显著性明显不同, 青海北部增加显著, 西北东部和青海南部高原增加比较明显, 而北疆和南疆地区增加趋势较弱。虽然上面都是对中国地区的研究, 但由于对极端气温的具体定义方式不同, 使得不同研究间的结果比较起来存在困难。

Brabson 等^[21]研究英国中部地区 1772—2000 年的日平均气温记录, 发现对夏季高温和冬季低温, 平均 10 年一遇的极端气温事件发生频率都增大。欧洲地区^[22], 大约一半的站点雾日数 (日最低气温小于 0℃) 显著减少, 1/3 的站点夏日数 (日最高气温大于 25℃) 显著增多, 个别站点情况相反; 大致看来 1946—1999 年间, 冷夜、冷日数都减少, 暖夜、暖日数增多, 气温日较差减小, 但也有地方暖夜数是减少的, 特别是在冰岛和欧洲东南部, 主要出现在夏季, 而且冷日、暖日的这种变冷趋势表现也较明显; 1975—1999 年没有站点出现暖夜数减少的情况, 除了冷日以外, 其它极端气温指数都反映出显著的变暖趋势, 温度日较差有较小的增加趋势; 1946—1975 年有较弱的变冷的趋势, 极端暖事件减少。Nogaj 等^[23]利用 NCEP 再分析资料 (1947—2004 年) 研究发现北大西洋地区 (80°W ~ 40°E, 30°~70°N), 极端高温事件频数增加的同时, 其振幅大小却没有变化。

Vincent 等^[24]发现加拿大从 1950—2003 年, 冷日、

冷夜显著减少, 暖日、暖夜显著增加; 1900—2003 年除了上述变化外, 南部地区的温度日较差也减小。

对于一直以来极端事件研究相对较少的中美洲、南美洲、非洲、中东以及东南亚等地区, 最近几年都出现了相关研究。Manton 等^[25]利用东南亚及南太平洋地区 1961—1998 年站点资料, 发现该地区暖日、暖夜数显著增加, 冷日、冷夜数显著减少, 由于计算时没考虑季节循环因素, 使得高温指数都集中在夏季, 低温指数都集中在冬季。Griffiths 等^[26]从不同的出发角度及极端气温定义方式研究了亚太地区的极端气温变化情况, 结果发现超过一半的站点暖夜数显著的增加, 冷日、冷夜数显著的减少, 而且对于冷日、冷夜数没有站点表现出显著的增加趋势; 不管最高还是最低温度, 对于城市化站点, 其平均值都显著的增加、标准差显著减小, 但极端气温没显著的变化; 对于非城市化站点, 主要是其平均值的变化以及由此引起的极端高温或低温的显著变化, 其标准差变化不明显。Peterson^[27]分析发现加勒比海地区自 1950s 以来, 暖最高、最低气温出现频次增加, 冷最高、最低气温出现频次减少; 对中美洲地区 1961—2003 年的极端气温研究也发现了相似的变化^[28]。中东地区^[29], 1950—2003 年间日最高、最低气温的年最大、最小值都增大, 极端高温事件发生频率 1990s 后迅速增加, 极端低温事件发生频率 1970s 以来逐渐减少, 气温日较差减小。对于南美洲^[30], 基于日最高气温的气候指数没有一致的变化, 基于日最低气温的气候指数变化趋势显著, 超过 40% 的研究站点冷夜数显著减少、暖夜数显著增加, 这种变化在夏季 (12~2 月) 和秋季 (3~5 月) 更显著, 而且这种趋势主要集中在东部和西部沿岸地区; 许多地方气温日较差减小, 但极端气温差 (年最高气温与最低气温之差) 变化都很弱。非洲南部和西部^[9], 极端冷日、冷夜数减少, 极端暖日、暖夜数增加; 气温日较差没有一致的变化趋势。

3.2 极端降水

翟盘茂等^[15]对 1951—1999 年中国北方极端降水的研究发现, 西北大部分地区极端降水 (大于日降水量序列的 99%) 事件频率显著增加, 东北东部及华北大部趋势相反; 整体来看, 北方大雨 (≥ 25 mm/d) 或暴雨 (≥ 50 mm/d) 频率都减少。龚道溢等^[17]发现 1956—2001 年间华北地区暴雨 (≥ 50 mm) 频率没有显著变化趋势, 但 1980—1990 年代

初, 频率显著降低。定义降水量大于 1961—1990 年间日降水量序列 95% 的为极端降水, 翟盘茂等^[31]又研究发现, 1951—2000 年间中国西部和长江中下游极端降水事件发生频率显著增加, 华北的显著减少, 而且这些地区的极端降水与平均降水变化趋势一致。Wang 等^[32]利用 1961—2001 年中国的台站资料, 定义日降水量序列的 95% 及 97.5% 为极端事件阈值, 也发现西南、西北北部和华东极端降水事件频率有增加趋势, 华北、华中有减少趋势, 而且这种趋势与平均降水变化趋势空间分布一致, 除了西北南部平均降水量增加而极端降水频率减少外。Qian 等^[33]利用 494 个台站 1961—2000 年的降水资料, 根据基于降水百分比、强度及持续性的不同阈值指数, 发现黄河流域和华北干旱出现的频率增加, 东南地区 (包括长江中下游) 和新疆地区强降水事件增多。此外, 我国地方气象业务部门也开展了一些相关研究。赵庆云等^[34]分不同季节定义强度不同的极端降水指数研究中国西北地区东部的极端降水事件, 结果发现春、夏、秋季极端降水事件频次呈下降趋势, 冬季极端降水事件频次呈上升趋势; 对于夏季, 与暴雨 ($\geq 50 \text{ mm/d}$) 情况相反, 大雨 ($\geq 25 \text{ mm/d}$) 发生频率呈上升趋势, 不过文中并未对趋势作显著性检验。孙凤华等^[35]发现东北近 50 年来在降水总量减少的情况下, 暴雨 ($\geq 50 \text{ mm/d}$) 发生频率并没有减少, 而且强度明显变大了, 这样更容易造成旱涝灾害的发生。虽然上面各研究的结论基本一致, 同样由于极端降水具体定义方式的差异, 不同研究间也很难做详细的比较。

Tank 等^[22]研究发现, 1946—1999 年间欧洲强降水以正的变化趋势为主, 对于大多数站点, 强降水随着总降水量的增多而增加, 但并不随总降水量的减少而减少; Tank 等将研究时段分为 1946—1975 年和 1975—1999 年 2 个阶段, 除了单日最大降水量之外, 2 个阶段极端降水指数都是增强的, 虽然 1946—1975 年的变化趋势显著性程度不高。Kunkel 等^[36]利用 1895—2000 年的逐日降水资料研究美国的极端降水, 发现 19 世纪末至 20 世纪初, 极端降水的频率相当高, 之后频率降低, 但从 20 世纪二三十年代直到 20 世纪末, 频率又有相当大的增加; 而对于加拿大^[37], 非常强的极端降水频率没有明显的变化趋势, 但强度相对较弱的极端降水频率增加。Goswami 等^[38]分析印度中部 1871—2003 年上百年的降水资料, 用不同的绝对降水值大小定义强度不同的降水事件, 发现在变暖的环境背景下, 极端降水

事件呈显著的增加趋势。

同样, 对极端降水研究相对较少的中美洲、南美洲、非洲、中东以及东南亚等地区, 最近几年都开展了相关研究。1961—1998 年期间, 东南亚及南太平洋地区很多站点年极端降水量占年总降水量的比例增大, 绝大部分站点极端降水的发生频率都减小, 虽然这种变化不显著, 但也有个别站点出现了相反的显著性变化趋势^[25]。Peterson^[27]研究加勒比海地区, 发现该地区自 1950s 以来, 极端降水事件增加; 利用 1961—2003 年的资料研究中美洲地区也得到了相似的结论^[28]。对中东地区的研究表明^[29], 1950—2003 年间该地区总降水量、降水日数、平均降水强度及最大日降水事件整体上变化都不明显, 空间分布不均匀。在非洲南部和西部^[9], 区域平均总降水量有减少, 但不明显, 区域平均日降水强度、干旱持续时间都显著增加。南美洲极端降水的变化和总的年降水趋势大致一样^[39], 厄瓜多尔、秘鲁北部、巴西南部、巴拉圭、乌拉圭以及阿根廷中部和北部降水有增加趋势, 秘鲁南部和智利南部降水有减少趋势; 作者把这种降水趋势的变化归因于与 SST 密切相关的气候事件和天气系统的变化, 一是因为 El Niño 事件增多, 南方涛动指数 (SOI) 减小, 二是因为南半球高纬大陆低压槽减弱导致风暴路径南移。

由于不同研究所用资料的时间序列长度、空间分布密度或资料类型不同, 以及不同的极端气候指数定义方式和趋势检验方法等问题, 使得不同研究所得的结果很难作比较, 更无法将全球不同地区的研究结果拼合成一个整体来反映全球极端事件的变化特征。针对这些问题, 已有研究采用统一的标准对全球的极端事件变化特征作了分析。

Frich 等^[40]利用当时所能获得的最全的站点资料对极端事件做了全球分析, 但其几乎没有中美和南美洲的数据, 非洲和南亚的数据也非常少, 而且由于站点的分布以及资料的质量问题, Frich 去掉了一些站点来做分析, 使得原本不多的资料序列变得更少了。Kiktev 等^[8]对全球情况作统一分析时, 将资料插值到网格点上, 一方面因为没有去掉有些站点资料而保留了更多可用的信息; 另一方面, 资料插值到网格点上以后便于与模拟结果相比较, 但 Kiktev 最后仍然强调: 研究受原始资料的限制, 无法分季节分别做分析, 对于副热带地区, 观测资料分布较合理, 但极端气候事件容易发生的热带地区却存在观测上的大量的空白。由于世界气象组织指数专家组 (ETCCDMI) 的努力及国际间合作交流的进一步加

强,通过采用统一的观测资料质量控制标准及气候指数计算方法,使得不同国家的分析能够完美的结合起来, Alexander等^[7]利用这些几乎覆盖了全球所有地区的气候指数,对年及不同季节的极端气温、降水都做了详细分析,给出了当前最新、最全面的极端气温、降水变化特征的全球分布状况。

4 模拟研究

直到 1990s 早期,气候模式才开始被用来研究极端天气气候事件。对极端气候事件的模拟研究,最初基本上都是利用全球气候模式,只有个别研究利用区域模式,如 Meams等^[41]利用区域气候模式(RegCM)模拟研究美国温度日较差的变化。全球气候模式由于空间分辨率较低,无法描述对极端气温、降水也有重要影响的中小尺度环流型或天气过程,所以在模拟研究极端事件方面存在较大的不足。随着高分辨率的区域气候模式的发展,越来越多的极端事件模拟研究开始选用区域气候模式。然而,RegCM 的计算花费相当大,而且其侧边界的处理问题一直都未得到很好的解决。近几年来统计降尺度模式也被用在极端事件的研究中,其最主要的优点就是计算量小,然而其利用目前的气候数据建立的统计关系对未来可能在不同强迫条件下的气候状态是否适用无法证实,而且基于经验的方法没法考虑区域强迫条件或反馈过程可能的系统变化^[41]。

观测虽然能给出较高时空分辨率的气温、降水等气象要素信息,但观测数据的记录长度几乎都局限在 20 世纪,因此数据中包含有温室气体、人口增长和城市化等多种因素对气候变化影响的信号,由于缺少工业革命前的观测数据,较短的观测记录难以将气候变率和气候变化分开^[42]。气候模式虽然还存在一些不足,但却是目前定量估计不同因子对气候变化影响大小以及预测未来气候变化的有效工具。

鉴于 CO₂ 等温室气体浓度的增加对全球变暖的重要影响,在全球变暖的大背景下模拟研究极端事件,往往首先考虑的也是 CO₂ 等温室气体的强迫效应。此外,陆面覆盖状况和土壤湿度等的变化也是目前认为对极端事件变化特征有较大影响的因子,但相对于 CO₂ 作强迫因子的模拟,利用这些要素作强迫因子的极端事件模拟研究还非常少。

4.1 温室气体的影响

温室气体浓度的增加使全球地表气温平均值升高,从概率分布的角度来看,这种变化必然影响极端

气温事件的发生频率;当然,除了气温平均值的变化以外,气温变率的变化对极端气温事件也是有影响的^[43-44]。一般认为气温服从正态分布,其平均值增大而方差不变时,高温事件发生的频率增加,低温事件变化相反;平均值不变而方差变大的时,高温事件和低温事件发生的概率都将增加。而且有研究表明^[3]变率变化对极值的影响比平均值变化的影响更大, Schär等^[45]在研究 2003 年欧洲夏季热浪时也证明了这一观点。温室气体浓度的增加使全球平均气温普遍升高,同时也使得大气中水汽含量增加,水循环加强,影响降水。与极端气温和平均气温变化的关系相比,极端降水与总降水变化之间的关系更复杂,许多研究都发现,在总降水量增加或不变时,极端降水增加而且往往增加幅度更大,甚至总降水量减少时仍然出现极端降水增加的情况,通常认为^[43-46],因为降水服从 Gamma 分布,其平均值变化时方差也会跟着一起变化,所以造成了总降水量和极端降水有时不成比例的变化。

Bell等^[42]利用 RegCM2 对地形和气候分布都很复杂的加利福尼亚地区作研究,发现在 CO₂ 加倍的情景下,大部分地方极端降水频率增加,只有北部部分地方减小;生长季延长、热日数增加、热浪持续时间延长;气温日较差 DTR 有增加也有减少,而 CCM3 模拟的 DTR 是一致增加的, Bell 认为这可能与模式的分辨率有关。全球变暖对高温事件的频率和强度都是有影响的,但对 2003 年夏季的欧洲热浪,仅仅用平均气温的变化是很难解释的,气温变率的变化起着更大的作用, Schär等^[45]利用 CHRM 区域模式模拟发现,在 A2 情景下,21 世纪末欧洲像 2003 年那样强的热浪可能平均每两年就会发生一次。Boo 等^[47]用 MM5 模式模拟了在 A2 情景下 1971—2100 年朝鲜半岛气温和降水的变化趋势,与 1971—2000 年相比,2071—2100 年气温平均值显著变大,但方差不变;极端日最低、最高气温都有显著的增加,但前者几乎是后者的两倍;不同地区降水变化差异较大,整体来看,总降水和极端降水北部比南部增加更明显。Saha 等^[48]利用区域气候模式 HRHAM4 模拟了 B2 情景下北极地区冬季极端事件的变化,发现未来(2037—2051 年)与现在(1981—1995 年)相比,温室气体浓度增加将使得极端气温、降水的频率和强度都发生显著的变化,不同区域的变化差异较大,极端气温、降水变化最大的地区并不一定对应平均值变化最大的地区;对给定情景下的模拟,不仅对流层气温升高,而且低层湿度增

大,这意味着未来在冬季风暴路径处湿不稳定性增强,未来对流降水的增加可能与对流性位势不稳定有关。Gao 等^[49]利用 RegCM2 模拟 CO₂ 浓度加倍情景下东亚地区极端事件的变化情况,发现夏季极端日最高气温从东北南部到华北北部及西北东部都明显增强,冬季极端日最低气温在华中、东南增强最显著;东北和西北雨日数有显著增加,极端降水频数总体来看增加,但区域间差异较大,显著增加的地区集中在华南。Zhang 等^[50]利用 Hardley 中心的 PRE-CIS 模式,发现在 B2 情景下,中国 21 世纪末极端高温事件普遍增多、生长季延长,极端降水在大部分地区都有增加的趋势。Frei 等^[51]利用 6 个区域气候模式集合预测了 A2 情景下欧洲本世纪末的极端降水情况,冬季极端降水在 45°N 以北地区增加,以南地区减少,这与 Schmidli 等^[52]在相同温室气体排放情景下利用不同方法得到的平均降水变化趋势的空间分布一致;夏季情况要复杂一些,大致存在从斯堪的纳维亚 (Scandinavia) 北部增加到地中海地区减少的梯度,但模式间的结果存在一定差异,特别是变化幅度差异非常大甚至出现相反变化,Frei 认为模式参数化等的差异可能是产生夏季极端降水变化不确定性的主要原因。

近几年有不少研究开始利用 AOGCM 来研究极端事件。Tebaldi 等^[53]认为模拟技术的发展为 GCM 模拟预测极端事件提供了可能,他们利用多个 AOGCM 模拟分析了一些极端气温、降水指数的历史演变及未来在不同的温室气体排放情景下的变化趋势,发现模拟结果与以往观测研究的基本一致,说明了 GCM 模拟研究极端事件的可行性,但作者仍然强调由于相对低的分辨率,并不能期望 GCM 模拟出频率和强度都与观测相当的极端天气事件,特别是与降水相关的事件。综合近年来不同 AOGCM 模拟极端事件的结果,AR4 指出^[2],未来在气候变暖的背景下,强降水、洪涝、干旱发生的可能性都增大;热浪可能强度更强、持续时间更长而且发生频率更高。

同 RCM 和 GCM 一样,也有研究开始用统计降尺度模型来研究极端事件。Haiphphan 等^[54]利用 3 种不同的统计降尺度模型,分析了英国东南部、西北部两个不同区域的极端降水情况,结果发现对不同区域、不同季节以及不同降水指数,没有哪个模型降尺度的结果一致的优于其它模型,所有模型对反映大尺度冬季降水或夏季旱日长短的持续性指数都有较高的模拟技巧。Haylock 等^[55]对分别由动力降尺度和统计降尺度方法模拟的英国强降水作比较,结

果发现模式普遍对降水指数空间分布较均匀的季节有高的模拟技巧,反映降水发生频率的指数比强度指数模拟效果要好,但是,对由降尺度得到的降水指数的未来变化,不同模式结果间的差异大小至少与同一模式不同温室气体排放情景下的差异相当,这也说明了利用多模式、多情景对区域气候变化作预测以及加强模式结果不确定性研究的必要性。

4.2 陆面覆盖的影响

土地利用变化对区域气候产生的影响已有大量的研究,其对区域气温、降水的影响主要通过 3 个方面^[56]:①改变地表反照率^[57],地表反照率增加,整个空气柱吸收的能量减少而冷却,空气随之产生下沉而增温,降水也随之减少;②改变地表的水分蒸散,蒸散的减小直接导致行星边界层水汽减少,由此降低湿对流不稳定,减少降水;③改变地表粗糙度长度,粗糙度长度减小,从地表到大气的潜热湍流输送也减小,造成地表温度偏高并加强了射出长波辐射^[58],从空气动力学的角度来看,较小的粗糙度长度还会减小边界层大气的摩擦系数^[59]。其实,除了上面所讲的生物物理过程外,生物化学过程的影响作用也是非常大的,这里主要对与前者相关的研究作介绍。土地利用造成陆面覆盖变化 (LCC), LCC 又通过影响地表反照率、粗糙度长度、地气间感热和潜热的交换等对极端事件产生影响。

Zhao 等^[60]用 CCM3 耦合 BATS 及一个混合层海洋模式,发现同 CO₂ 浓度增加一样, LCC 也使得极端日最高气温及强降水都增大,依 LCC 的特征不同,降水强度及最高气温的变化可以达到与 CO₂ 的影响相当的大小; LCC 对气温、降水的影响区域性差异非常大,模拟得出欧洲由落叶森林转化为农田的地方,由于气孔阻抗减小、潜热通量增加,使地表极端日最高气温减小,降水增加;而在中国,由阔叶森林转化为草地的地方虽然反照率增加了,但由于 LAI 粗糙度长度及根深度减小所造成的潜热通量的减少,使地表出现高温的可能性增大,降水减少。Suh 等^[61]用 RegCM2 模拟发现,当 LCC 造成华中、华北地区落叶阔叶林转化为混合农田和灌溉庄稼后,该地区潜热通量和风速都显著的增加,气温偏低,由此造成的海陆间气压梯度变化使向北的水汽输送受到抑制,使得华北夏季偏干; LCC 使得朝鲜半岛和日本岛夏季偏冷、偏湿。植被的平稳变化,通过改变陆—气界面的辐射、水汽和动量通量,不仅影响平均气候状况,而且对极端气候事件的发生频率、强度及空间分布都有影响,利用 CCM3.6.6、RegCM

2.5和 BIOME4 模式耦合,模拟研究美国西部, Diefenbaugh^[62]发现极端气候事件对植被—大气反馈作用的响应大小与对 CO₂ 浓度加倍时辐射强迫的响应大小相当, Zhao等^[60]也发现在区域尺度上土地利用变化对极端气温、降水的作用大小与 CO₂ 辐射强迫的相当,说明由陆面植被覆盖变化所引起的陆—气相互作用对极端气候事件的影响是非常重要的。

4.3 土壤湿度的影响

土壤湿度变化是与陆面覆盖变化密切相关但又不完全一样的过程,两者对气温、降水的影响机理是有差异的。Schär等^[63, 64]认为土壤水分对降水的影响是间接的,它通过影响边界层的特征及大气稳定度来影响降水。显著的降水事件造成土壤异常湿润,植被蒸腾和土壤蒸发都加强,引起强的土壤水分蒸散损失,结果潜热通量增加、感热通量降低,边界层厚度变薄,水汽通量的加强造成边界层异常变湿,稳定度降低;同时,湿润的土壤相对而言颜色更深、温度更低,这使得土壤净辐射通量加强,结果更大的总热通量进入边界层,所有这些因素使得湿土壤上空的单位质量空气的湿静力能比干土壤上空的大,当边界层不稳定激发出深的湿对流时,降水也加强,当然这种机制没有考虑云层覆盖的影响^[64]。

Schär等^[45]指出气温变率的变化对欧洲夏季热浪发生的影响比气温平均值变化的影响大得多, Senéviratne等^[65]利用 CHRM 区域模式通过模拟当前情况的实验 CTL及未来 A2排放情景下的情景实验 SCEN,两种实验又分为有、无土壤湿度—大气耦合两种情况,无耦合时土壤湿度给定为多年平均的年循环值,从陆—气相互作用角度分析了产生这种气温变率变化的可能原因,不同于陆面覆盖变化的影响,作者从土壤湿度与气温反馈的角度出发,证明了土壤湿度所起的重要作用,研究发现,在 SCEN 实验中,大约 2/3 的气候变化信号可以归因于土壤湿度—气温耦合所起的作用,要解释气温变率的增加,大气环流变化和土壤湿度起作用的陆面过程都必须考虑;同样,对 SCEN 中所模拟的降水量有相当大增加的地区,陆—气耦合作用可以解释 2/3 的总降水量方差。Fischer等^[66]利用同样的模式和方法,研究欧洲 1976 年、1994 年、2003 年和 2005 年 4 次热浪事件,结果发现不管是热日数还是热浪最大持续天数,耦合与未耦合模拟间的差异比模式偏差要大得多,50%~80% 的热日数可能受土壤湿度—气温相互作用的影响,这种相互作用在大陆内最强,在沿海地区较弱;除了 1994 年以外,其它几次热浪发生前

的至少 4 个月内平均降水都不足,前期降水不足造成土壤湿度偏低而对后期气温产生影响,这种影响并不局限于土壤湿度偏低的地区,土壤湿度异常通过影响大气环流还对其它地区的气温产生影响; Vautard 等^[67]利用 MM5 模拟研究了 1994 年这次热浪过程,结果认为地中海地区前冬和早春降水不足使该地区土壤湿度偏低,阻碍了局地对流云的形成并加强了感热通量,在偏南风的作用下,这种暖干的信号北移,最终造成了其它地方的夏季高温。

人类活动对上面几个要素有着不同程度的影响,通过这些要素也反映出人类活动对极端事件的影响作用。另外,与人类活动影响的关系相对较弱的海温,其对极端事件的影响也是很大的。总之,影响极端事件的决不是单个因素,而且除了这几个因素之外,其它可能的因素,特别是与人类活动有关的因素还有待进一步去研究。

5 结 语

近年来,通过国际间的交流协作,目前已对全球几乎所有站点的极端气温、降水事件的变化特征不仅对年,而且分季节作了统一标准的分析研究,这为认识全球极端事件变化情况,以及对比不同地区的变化特征都提供了很大帮助。AR4 指出^[2],大多数陆地上的强降水事件发生频率有所上升,这与增暖和观测到的大气水汽增加相一致,而且基于不同温室气体排放情景下的模拟结果显示,这种趋势很可能会持续;近 50 年来已观测到极端气温的大范围变化,冷昼、冷夜和霜冻的发生频率已减小,而热昼、热夜和热浪的发生频率已增加,而且几乎可以确定,未来在不同温室气体排放情景下,这种变化趋势还会持续。

目前的研究结论大多基于对 20 世纪后半叶的观测分析, Kunkel 等^[36]利用更长时间序列的资料研究美国的极端事件时发现,19 世纪末到 20 世纪初同样出现了与现在频率相当的极端事件。虽然大量研究都表明人类活动可能对 20 世纪后期极端事件变化产生了较大影响,但如何将这种影响同自然变率分开并定量估计各自的影响大小仍有待研究。

Trenberth 等^[68]指出,与日降水量相比,更高分辨率的降水时间序列能够提供更多有关降水强度的信息。利用比逐日资料时间分辨率更高的资料,可能会为今后研究极端降水事件频率、强度等特征的变化提供更丰富的信息。

对于热带气旋,由于多种年代际变率的存在,以

及 1970 年前后开始的常规卫星观测之前的热带气旋记录的资料质量, 使对热带气旋活动长期趋势的检测复杂化^[2]。与极端气温、降水事件的研究相比, 有关热带气旋等极端事件的研究还较少, 更需要加强相关研究。

区域气候模式不断得到改进, 为研究极端事件提供了更可靠的工具; 同时, AOGCM 以及统计降尺度方法也开始用在极端事件的模拟研究中, 丰富了极端事件研究方法。然而模式结果的不确定性仍然是一个非常棘手的问题, 利用多模式、多情景做集合模拟还很有必要。

在研究极端天气气候事件的影响因子时, 与土地利用密切相关的陆面覆盖及土壤湿度等特征的变化也越来越为研究所重视, 而且其重要性也被很多研究所证实。然而许多地区还缺少相关的研究, 加强研究这些受人类活动影响的因素对极端事件的影响, 更有利于缓解极端事件的发生。

近几年, 有关中国极端天气气候事件的研究工作越来越多, 包括地方气象业务部门也陆续开展了相关方面的研究, 但到目前为止, 研究主要集中在对观测资料的统计分析方面, 未来还有必要加强模拟方面的研究。

参考文献 (References):

- [1] Houghton J T, Ding Y, Griggs D J et al IPCC Climate change 2001: The scientific basis[C]// Observed Climate Variability and Change. Cambridge: United Kingdom and New York USA: Cambridge University Press. 2001.
- [2] IPCC Climate change 2007: The physical science basis[C]// Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: United Kingdom and New York USA: Cambridge University Press. 2007 (in press).
- [3] Katz R W, Brown B G. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages[J]. *Climatic Change* 1992, 21(3): 289-302.
- [4] Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C et al Climate extremes: Observations, modeling and impacts[J]. *Science* 2000, 289(5487): 2068-2074.
- [5] Easterling D R, Evans J L, Grisman P Y, et al Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2000, 81(3): 417-425.
- [6] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change* 2007, 81(Supplement 1): 71-95.
- [7] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research* 2006, 111(3): D05109.
- [8] Kiktev D, Sexton D M H, Alexander L et al Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes [J]. *Journal of Climate* 2003, 16(22): 3560-3570.
- [9] New M, Hewitson B, Stephenson D B, et al Evidence of trends in daily climate extremes over southern and west Africa [J]. *Journal of Geophysical Research* 2006, 111(7): D14102.
- [10] Trenberth K. Uncertainty in hurricanes and global warming [J]. *Science* 2005, 308(5729): 1753-1754.
- [11] Anthes R A, Corell R W, Holland G, et al Hurricanes and global warming: potential linkages and consequences [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2006, 87(5): 623-628.
- [12] Pielke R A, Landsea C, Mayfield M, et al Reply to "Hurricanes and Global Warming-Potential Linkages and Consequences" [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2006, 87(5): 628-631.
- [13] Webster P J, Holland G J, Curry J A, et al Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment [J]. *Science* 2005, 309(5730): 1844-1846.
- [14] Pielke R, Landsea C, Mayfield M, et al Hurricanes and global warming [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2005, 86(11): 1571-1575.
- [15] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in Extreme temperature and precipitation over Northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* 2003, 58 (suppl): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 1-10.]
- [16] Zhai P M, Pan X H. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China [J]. *Geophysical Research Letters* 2003, 30(17): 1913-1916.
- [17] Gong Daoyi, Han Hui. Extreme climate events in northern China over the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica* 2004, 59(2): 230-238. [龚道溢, 韩晖. 华北农牧交错带夏季极端气候的趋势分析 [J]. *地理学报*, 2004, 59(2): 230-238.]
- [18] Qian W H, Lin X. Regional trends in recent temperature indices in China [J]. *Climate Research* 2004, 27(5): 119-134.
- [19] Zhou Xijie, Zhang Guihua, Zhen Hong, et al Effect of climate warming for the extreme weather climate event in Heilongjiang province [J]. *Meteorological Monthly* 2004, 30(11): 47-50. [周秀杰, 张桂华, 郑红, 等. 黑龙江省气候变暖对极端天气气候事件的影响 [J]. *气象*, 2004, 30(11): 47-50.]
- [20] Wang Pengxiang, Yang Jinhui. Extreme high temperature events and response to regional warming in recent 45 years in northwest China [J]. *Journal of Desert Research* 2007, 27(7): 649-655. [王鹏祥, 杨金虎. 中国西北近 45 年来极端高温事件及其对区域性增暖的响应 [J]. *中国沙漠*, 2007, 27(7): 649-655.]
- [21] Brabson B B, Pahtikof J P. The evolution of extreme temperatures in the central England temperature record [J]. *Geophysical Research Letters* 2002, 29(24): 2163-2166.
- [22] Tank A, Können G P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999 [J]. *Journal of Cli-*

- mate 2003, 16(22); 3 665-3 680.
- [23] Nogaj M, Yiou P, Parey S et al Amplitude and frequency of temperature extremes over the North Atlantic region [J]. *Geophysical Research Letters* 2006, 33(5); L10801.
- [24] Vincent L A, Mekis Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century [J]. *Atmosphere-Ocean* 2006, 44(2); 177-193.
- [25] Manton M J, DellaMarta P M, Haylock M R et al Trends in extreme daily rainfall and temperature in southeast Asia and the south Pacific, 1961-1998 [J]. *International Journal of Climatology* 2001, 21(3); 269-284.
- [26] Griffiths G M, Chambers L E, Haylock M R et al Change in mean temperature as a predictor of extreme temperature change in the Asia-Pacific region [J]. *International Journal of Climatology* 2005, 25(10); 1 301-1 330.
- [27] Peterson T C, Taylor M A, Demeritte R et al Recent changes in climate extremes in the Caribbean region [J]. *Journal of Geophysical Research* 2002, 107(21); 4 601-4 609.
- [28] Aguilar E, Peterson T C, Obando P R et al Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America 1961-2003 [J]. *Journal of Geophysical Research* 2005, 110(12); D23107.
- [29] Zhang X B, Aguilar E, Sensoy S et al Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003 [J]. *Journal of Geophysical Research* 2005, 110(11); D22104.
- [30] Vincent L A, Peterson T C, Barros V R et al Observed trends in indices of daily temperature extremes in South America 1960-2000 [J]. *Journal of Climate* 2005, 18(23); 5 011-5 023.
- [31] Zhai P M, Zhang X B, Wan H et al Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *Journal of Climate* 2005, 18(7); 1 096-1 108.
- [32] Wang Y Q, Zhou L Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961-2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. *Geophysical Research Letters* 2005, 32(5); L09707.
- [33] Qian W, Lin X Regional trends in recent precipitation indices in China [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics* 2005, 90(2); 193-207.
- [34] Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong et al Change of extreme precipitation events in arid and semi-arid regions in the east of northwest China [J]. *Journal of Desert Research* 2005, 25(6); 904-909. [赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化 [J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6); 904-909.]
- [35] Sun Fenghua, Wu Zhijian, Yang Suying Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 year [J]. *Chinese Journal of Ecology* 2006, 25(7); 779-784. [孙凤华, 吴志坚, 杨素英. 东北地区近 50 年来极端降水和干燥事件时空演变特征 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(7); 779-784.]
- [36] Kunkel K E, Easterling D R, Redmond K, Hubbard K Temporal variations of extreme precipitation events in the United States 1895-2000 [J]. *Geophysical Research Letters* 2003, 30(17); 1900.
- [37] Kunkel K E North American trends in extreme precipitation [J]. *Natural Hazards* 2003, 29(2); 291-305.
- [38] Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D et al Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. *Science* 2006, 314(5 804); 1 442-1 445.
- [39] Haylock M R, Peterson T C, Alves L M et al Trends in total and extreme south American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature [J]. *Journal of Climate* 2005, 19(8); 1 490-1 512.
- [40] Frich P, Alexander L V, DellaMarta P et al Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. *Climate Research* 2002, 19(3); 193-212.
- [41] Meams L O, Giorgi F, McDaniel L et al Analysis of variability and diurnal range of daily temperature in a nested regional climate model: Comparison with observations and doubled CO₂ results [J]. *Climate Dynamics* 1995, 11(4); 193-209.
- [42] Bell J L, Sloan L C, Snyder M A Regional changes in extreme climatic events: A future climate scenario [J]. *Journal of Climate* 2004, 17(1); 81-87.
- [43] Meehl G A, Karl T, Easterling D R et al An introduction to trends in extreme weather and climate events: Observations, socioeconomic impacts, terrestrial ecological impacts, and model projections [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2000, 81(3); 413-416.
- [44] Schaeffer M, Sellen F M, Opsteegh J D Shifts of means are not a proxy for changes in extreme winter temperatures in climate projections [J]. *Climate Dynamics* 2005, 25(1); 51-63.
- [45] Schär C, Vidale P L, Lüthi D et al The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves [J]. *Nature* 2004, 427(6 972); 332-336.
- [46] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R et al Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. *Climatic Change* 1999, 42(1); 243-283.
- [47] Boo K, Kwon W, Baek H Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change [J]. *Geophysical Research Letters* 2006, 33(1); L01701.
- [48] Saha S K, Rinke A, Dethloff K Future winter extreme temperature and precipitation events in the Arctic [J]. *Geophysical Research Letters* 2006, 33(8); L15818.
- [49] Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F Changes of extreme events in regional climate simulations over east Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences* 2002, 19(5); 927-942.
- [50] Zhang Y, Xu Y L, Dong W J et al A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model [J]. *Geophysical Research Letters* 2006, 33(12); L24702.
- [51] Frei C, Schär R, Fukutome S et al Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models [J]. *Journal of Geophysical Research*

- 2006, 111(3); D06105.
- [52] Schmidli J, Goodess C M, Frei C, et al. Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps [J]. *Journal of Geophysical Research* 2007, 112(2); D04105.
- [53] Tebaldi C, Hayhoe K, Abtaster J M, et al. Going to the extremes [J]. *Climatic Change* 2006, 79(3); 185-211.
- [54] Happhan C, Wilby R L. Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts [J]. *Journal of Hydrology* 2005, 312(2); 235-255.
- [55] Haylock M R, Cawley G C, Happhan C, et al. Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: A comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios [J]. *International Journal of Climatology* 2006, 26(10); 1397-1415.
- [56] Zeng N, Dickinson R E, Zeng X. Climatic impact of amazon deforestation—A mechanistic model study [J]. *Journal of Climate* 1996, 9(4); 859-883.
- [57] Chamey J G. Dynamics of deserts and drought in the Sahel [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1975, 101(427); 193-202.
- [58] Dickinson R E, A H S. Modeling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parameterizations [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 1988, 114(480); 439-462.
- [59] Sud Y C, Shukla J, Mintz Y. Influence of land surface roughness on atmospheric circulation and precipitation: A sensitivity study with a general circulation model [J]. *Journal of Applied Meteorology* 1988, 27(9); 1036-1054.
- [60] Zhao M, Pitman A J. The impact of land cover change and increasing carbon dioxide on the extreme and frequency of maximum temperature and convective precipitation [J]. *Geophysical Research Letters* 2002, 29(6); 1078-1081.
- [61] Suh M, Lee D. Impacts of land use/cover changes on surface climate over east Asia for extreme climate cases using RegCM2 [J]. *Journal of Geophysical Research* 2004, 109(1); D02108.
- [62] Diffenbaugh N S. Sensitivity of extreme climate events to CO₂-induced biophysical atmosphere-vegetation feedbacks in the western United States [J]. *Geophysical Research Letters* 2005, 32(4); L07702.
- [63] Schär C, Lüthi D, Beyerle U. The soil precipitation feedback: A process study with a regional climate model [J]. *Journal of Climate* 1999, 12(4); 722-741.
- [64] Lawrence D M, Slingo J M. Weak land atmosphere coupling strength in HadAM3: The role of soil moisture variability [J]. *Journal of Hydrometeorology* 2005, 6(5); 670-680.
- [65] Seneviratne S I, Lüthi D, Litschi M, et al. Land atmosphere coupling and climate change in Europe [J]. *Nature* 2006, 443(7108); 205-209.
- [66] Fischer E M, Seneviratne S I, Lüthi D, et al. Contribution of land-atmosphere coupling to recent European summer heat waves [J]. *Geophysical Research Letters* 2007, 34(6); L06707.
- [67] Vautard R, Yiou P, Andrea F D, et al. Summertime European heat and drought waves induced by wintertime Mediterranean rainfall deficit [J]. *Geophysical Research Letters* 2007, 34(4); L07711.
- [68] Trenberth K E, Dai A G, Rasmussen R M, et al. The changing character of precipitation [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society* 2003, 84(9); 1205-1217.

Progress of the Study of Extreme Weather and Climate Events at the Beginning of the Twenty First Century

HU Yi-chang^{1,3}, DONG Wen-jie^{2,3}, HE Yong²

(1. Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. National Climate Center, Beijing 100081, China; 3. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: More and more researches pay attention to extreme events because of their destructive impacts. Both observing and modeling studies found that extreme temperature and precipitation had significant changes. Furthermore, there may be more severe extreme events in the future with global warming. Of course, there are still many uncertainties contained in these results. Two main factors contribute to these uncertainties. One is associated with models. There are usually great difference of outputs between different models; the other is the possible difference resulted from the period of different length analyzed. From the definition of extreme events, progresses about the study of extreme events in the last few years are described in detail first for both observing and modeling studies. Then the main progresses are listed, and some problems hanging in doubt are summarized.

Key words: Extreme events; Temperature; Precipitation