

# 陆-气耦合增加中国的高温热浪

张井勇, 吴凌云

中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100029

E-mail: zjy@mail.iap.ac.cn

2011-03-17 收稿, 2011-06-14 接受

中国科学院“百人计划”、中国科学院院长特别奖启动基金和国家重点基础研究发展计划(2009CB421405)资助项目

**摘要** 极端气候, 例如高温热浪, 对社会、经济和生态系统有着重要的影响. 在过去的几十年间, 中国的高温热浪已经发生了显著的年际和年代际尺度上的变化. 然而, 目前对引起中国高温热浪变化的物理机制尚不清楚. 本文利用 2 个长期的含有和没有土壤湿度-大气相互作用的 WRF 区域气候模式模拟评估了陆-气耦合对中国夏季高温热浪的影响. 结果表明陆-气耦合增加了中国的高温热浪. 尤其是, 在中国东部和西南的大部分地区, 高温热浪的增加都有统计上的显著性. 在这些地区, 陆-气耦合能够贡献 30%~70% 的高温热浪. 研究结果表明, 陆-气相互作用对中国高温热浪的发生起到重要作用.

## 关键词

陆-气耦合  
高温热浪  
区域气候模拟

近些年, 高温热浪由于对人类和自然系统的重要影响, 正在受到人们越来越多的关注<sup>[1,2]</sup>. 例如, 2003 年夏季, 高温热浪席卷了欧洲大部分地区, 导致了大约 35000 人的死亡和严重的财产损失<sup>[3]</sup>. 同年夏季, 中国南方也经历了创历史记录的热浪<sup>[4]</sup>. 在 2006 年和 2007 年夏季, 中国许多地区再次遭遇高温热浪侵袭<sup>[5,6]</sup>. 这些高温热浪事件对人民的生存和生活, 能量和水资源的供需, 工农业生产等都造成了严重的影响.

过去的几十年间, 中国的高温热浪发生了显著的年际和年代际尺度上的变化<sup>[7-14]</sup>. 未来在东亚和全球, 高温热浪发生的频次、强度、持续时间可能具有增加的趋势<sup>[15]</sup>. 以往的研究表明中国的高温热浪与大尺度环流异常和海表温度异常活动有关<sup>[16,17]</sup>. 另外, 全球变暖和城市化也能导致高温热浪的发生<sup>[18,19]</sup>. 土壤湿度是陆地表面的一个重要分量, 它对表面气候的变化起到重要的作用<sup>[20-22]</sup>. 最近的研究发现土壤湿度对中国的日平均和最高温度产生重要影响<sup>[23,24]</sup>. 但是陆-气耦合怎样影响中国的高温热浪尚缺乏研究.

区域气候模式已经被广泛用来理解区域气候特

征和变化, 及相关的物理机制<sup>[25-30]</sup>. Zhang 等人<sup>[24,31]</sup>的研究表明相比较于对观测和以观测为基础的分析数据的统计分析结果, WRF 区域气候模式能够相当好地模拟出局地和区域尺度上的陆-气耦合强度分布<sup>[23,32,33]</sup>. 本文通过分析两个长期含有和没有土壤湿度-大气相互作用的 WRF 区域气候模式模拟来评估陆-气耦合对中国高温热浪的影响.

## 1 数据和方法

本文分析了 2 个 WRF ARW 版本 3.1.1<sup>[34]</sup>的长期区域气候模拟<sup>[24]</sup>, 来评估陆-气耦合对中国高温热浪的作用. 所用的物理参数化方案包括 WSM6 微物理过程方案<sup>[35]</sup>, Kain-Fritsch 积云对流参数化方案<sup>[36]</sup>, YSU 行星边界层参数化方案<sup>[37]</sup>, NCAR CAM 3.0 的短波和长波辐射方案<sup>[38]</sup>, 和 Noah 陆面模式<sup>[39]</sup>. 模式水平分辨率取为 60 km, 中心点在(36°N, 116°E), 覆盖范围为整个中国及周边地区, 垂直方向分为 28 层.

控制试验中, WRF 大气模式和 Noah 陆面模式完全耦合, 允许土壤湿度和大气相互作用. 敏感性试验使用了相同的模式构造, 但是土壤湿度在每一个时间步长采用控制试验的气候平均值, 因而“解耦”了

土壤湿度-大气相互作用. 控制试验积分时间为 1979 年 1 月 1 日到 1999 年 12 月 31 日共 21 a, 模式初始和边界条件及海表温度驱动场采用 NCEP-DOE 再分析资料<sup>[40]</sup>. 边界条件和海表温度每隔 6 小时输入 1 次. 敏感性试验包含 1980~1999 年 20 个夏季的模拟, 从 6 月 1 日开始积分到 8 月 31 日. 敏感性试验有效地“解耦”了土壤湿度-大气相互作用, 它与控制试验的差别能够用来评估陆-气耦合对中国高温热浪的贡献.

本文采用高温日数和热浪次数 2 个指数来测量高温热浪. 高温日数是指日最高温度达到或超过长期平均的第 90 个日最高温度百分位值的高温天数. 热浪次数是指高温天气持续 2 d 及以上的频次. 对于 1980~1999 年任何 1 a, 第 90 个日最高温度的百分位值是用夏季 92 d 的数据计算得到. 长期平均的第 90 个日最高温度百分位值是平均了 20 年的第 90 个日最高温度的百分位值的结果. 模拟和观测的长期平均的第 90 个日最高温度百分位值分别用控制试验和 CN05 数据<sup>[41]</sup>计算得到.

Zhang 等人<sup>[24]</sup>的研究已经表明 WRF 区域气候模式对东亚气候平均态和年际变率有较好的模拟能力. 为了检验 WRF 对中国高温热浪的模拟能力, 我们采用了 Xu 等人<sup>[41]</sup>发展的 0.5°×0.5°分辨率的 CN05 资料. 这个数据集是通过插值 751 站点数据得到, 主要用来

验证气候模式的模拟.

## 2 结果分析

为了评价 WRF 区域气候模式模拟中国高温热浪的能力, 我们对比了 1980~1999 平均的控制试验模拟和观测的高温日数和热浪次数(图 1). 观测的高温日数和热浪次数呈现出相似的空间分布. 总体而言, WRF 模式较好地模拟出了中国东部和西南地区的高温日数和热浪次数的大小和空间分布. 在长江中下游和东北北部, 模式高估了高温日数和热浪次数. 在西北地区, 模式虽然能够很好地模拟高温热浪的空间分布, 但是低估了其量值.

由于敏感性试验“解耦”了土壤湿度-大气的相互作用, 因此控制试验与敏感性试验的差反映了陆-气耦合引起的高温热浪的变化. 图 2 表明中国的高温日数和热浪次数的变化有非常相似的空间分布. 在大部分地区, 陆-气耦合主要增加了中国的高温热浪. 如此的增强效应依赖于气候区的干湿状况. 在湿润半湿润的东部和西南的大部分地区, 高温日数和热浪次数的增加具有统计显著性, 幅度分别为 3~7 d/a 和 0.75~1.5 次/a. 对比而言, 在干旱的西北地区, 土壤湿度对高温热浪的影响普遍不显著, 幅度小得多. 土壤湿度主要通过影响潜热和感热来调整表面气温.

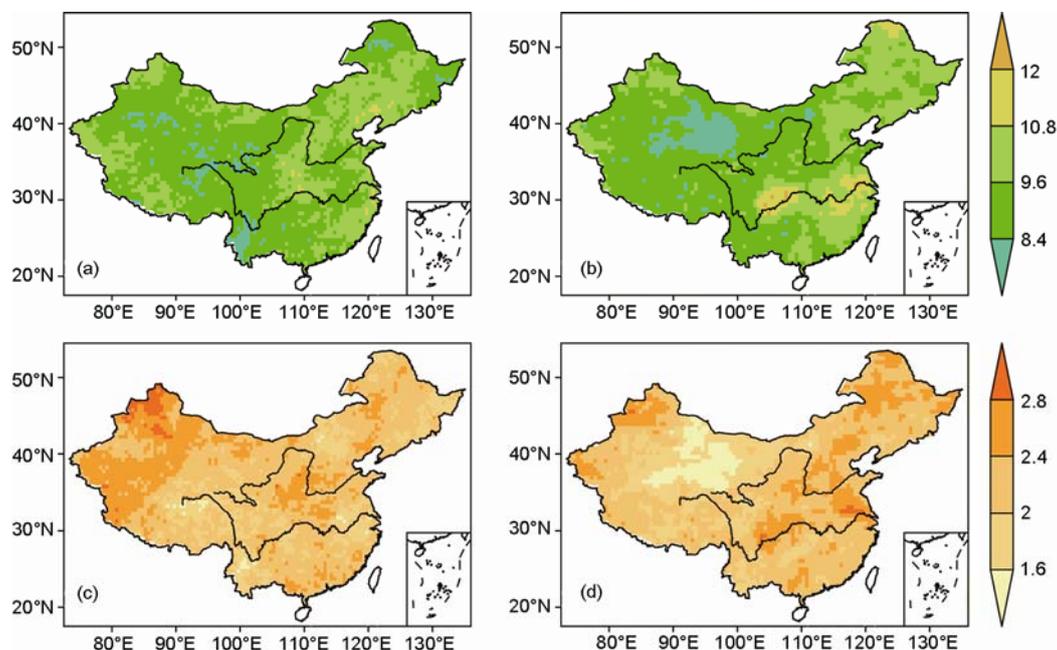


图 1 1980~1999 平均的观测的和控制试验模拟的高温热浪  
(a), (b) 高温日数; (c), (d) 热浪次数. (a), (c) 为观测 (CN05<sup>[41]</sup>) 结果; (b), (d) 为控制试验结果

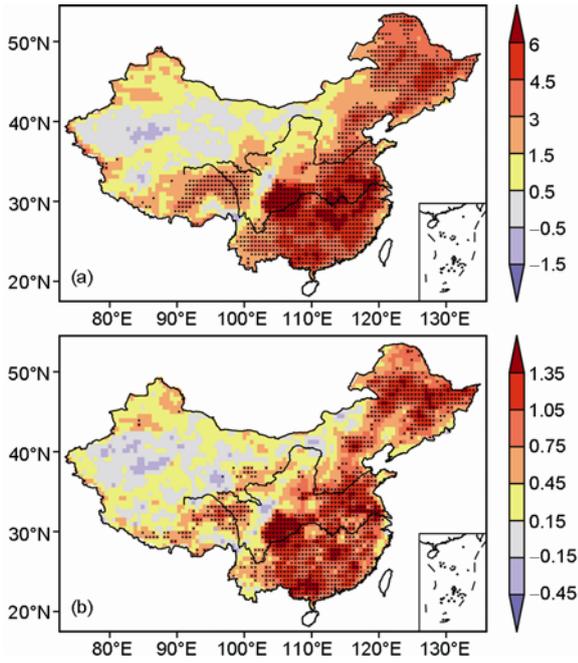


图 2 控制试验与敏感性试验的差值场

(a) 高温日数; (b) 热浪次数. 实心点代表通过 90% 统计显著性检验 (Student's *t*-test)

Zhang 等人<sup>[24]</sup>的研究表明土壤湿度对日平均和最高温度的影响很大程度上取决于表面通量交换对土壤湿度的敏感性. 高温热浪与日最高温度有紧密联系. 因而, 土壤湿度对高温热浪的影响也主要依赖于它对表面通量交换的影响能力. 普遍来讲, 在陆-气耦合显著增加高温热浪的地区, 土壤湿度对表面通量交换尤其是感热都有很强的影响 (见文献[24]中的图 8). 对比而言, 在干旱的西北地区, 土壤湿度变化太小, 对表面通量及高温热浪的影响相对有限.

我们进一步利用控制试验与敏感性试验的差与控制试验的比来评估陆-气耦合对中国高温热浪的相对贡献(图 3). 在东部和西南的大部分地区, 陆-气耦合通常能够解释 30%~70%的高温日数和热浪次数. 而在干旱的西北地区, 陆-气耦合起到相对有限的作用, 只能解释 30%或更少的高温热浪. 除了陆-气耦合, 中国的高温热浪也受到诸如海表面温度异常等其他因子的影响<sup>[16-19,42]</sup>. 尤其在西北地区, 陆-气耦合的影响相对比较有限, 其他因子起到了更重要的作用.

### 3 结论

以往研究认为中国高温热浪的发生是由于大尺度环流异常、海表面温度异常、全球变暖和城市化引

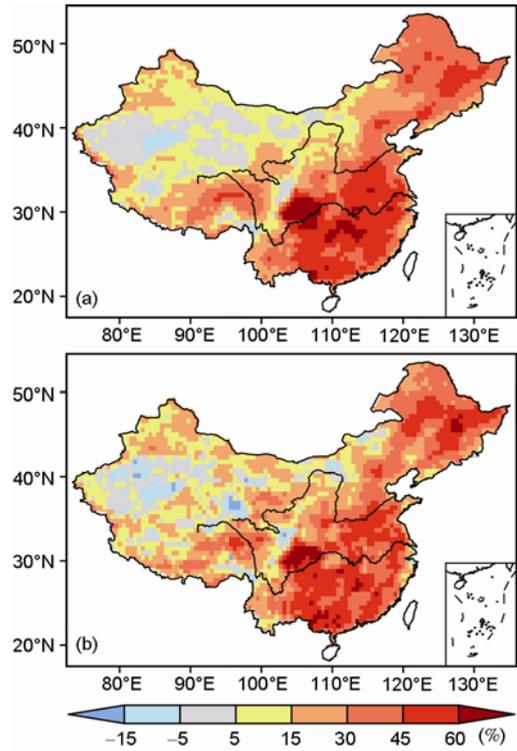


图 3 陆-气耦合对高温热浪的相对贡献

(a) 高温日数; (b) 热浪次数. 百分比值由控制试验与敏感性试验的差与控制试验的比计算得来

起的<sup>[16-19]</sup>, 而对陆-气耦合的作用知之甚少. 本文首次评估了陆-气耦合对中国高温热浪的影响. 我们分析了 2 个长期的 WRF 区域气候模式模拟: 控制试验中土壤湿度与大气完全耦合, 从 1979 年 1 月 1 日积分到 1999 年 12 月 31 日; 敏感性试验重复了 1980~1999 夏季的积分, 但是在每一个时间步长土壤湿度采用控制试验的气候平均值. 我们利用 2 个试验的差评估了陆-气耦合对中国高温热浪的贡献.

在中国东部和西南的大部分地区, 陆-气耦合能够显著地增加高温热浪, 解释了 30%~70%的高温日数和热浪次数. 在干旱的西北地区, 土壤湿度对高温热浪只能产生相对有限的影响. 这些结果表明陆-气耦合对除西北地区以外的中国大部分地区的高温热浪发生起到关键作用.

总体而言, WRF 区域气候模式能够较好地模拟中国的高温热浪, 但是同时注意到模拟结果存在着一定的偏差. 例如, 模式低估了西北地区的高温热浪, 而高估了长江中下游和东北北部的高温热浪. 将来应当开展更多的研究来评估模式的偏差怎样影响土壤湿度对中国高温热浪的反馈作用.

参考文献

- 1 Easterling D R, Meehl G A, Parmesan C, et al. Climate extremes: Observations, modeling, and impacts. *Science*, 2000, 289: 2068–2074
- 2 Meehl G A, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 2004, 305: 994–997
- 3 Luterbacher J, Dietrich D, Xoplaki E, et al. European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500. *Science*, 2004, 303: 1499–1503
- 4 杨辉, 李崇银. 2003年夏季中国江南异常高温的分析研究. *气候与环境研究*, 2005, 10: 80–85
- 5 陈洪滨, 范学花. 2006年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾. *气候与环境研究*, 2007, 12: 100–112
- 6 陈洪滨, 范学花. 2007年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾. *气候与环境研究*, 2008, 13: 102–112
- 7 任福民, 翟盘茂. 1951~1990年中国极端气温变化分析. *大气科学*, 1998, 22: 217–227
- 8 Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China. *Clim Change*, 1999, 42: 203–218
- 9 Yan Z, Jones P D, Davies T D, et al. Trends of extreme temperatures in Europe and China based on daily observations. *Clim Change*, 2002, 53: 355–392
- 10 Qian W, Lin X. Regional trends in recent temperature indices in China. *Clim Res*, 2004, 27: 119–134
- 11 封国林, 杨杰, 万仕全, 等. 温度破纪录时间预测理论研究. *气象学报*, 2009, 67: 61–74
- 12 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. *气候与环境研究*, 2010, 15: 337–353
- 13 Ding T, Qian W, Yan Z. Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007. *Int J Climatol*, 2010, 30: 1452–1462
- 14 Yan Z, Xia J, Qian C, et al. Changes in seasonal cycle and extremes in China during the period 1960–2008. *Adv Atmos Sci*, 2011, 28: 269–283
- 15 IPCC. *Climate Change 2007, Working Group I Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2007
- 16 Gong D, Pan Y, Wang J. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China during 1955–2000. *Theor Appl Climatol*, 2004, 77: 25–37
- 17 You Q, Kang S, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003. *Clim Dyn*, 2010, doi: 10.1007/s00382-009-0735-0
- 18 谈建国, 郑有飞, 彭丽, 等. 城市热岛对上海夏季高温热浪的影响. *高原气象*, 2008, 27: 144–149
- 19 任国玉, 陈峪. 全球变暖与中国极端气候事件变化. *科学*, 2010, 62: 30–33
- 20 Shukla J, Mintz Y. Influence of land-surface evapotranspiration on the Earth's climate. *Science*, 1982, 215: 1498–1501
- 21 Yeh T C, Wetherald R T, Manabe S. The effect of soil moisture on the short-term climate and hydrology change—A numerical experiment. *Mon Weather Rev*, 1984, 112: 474–490
- 22 Koster R D, Dirmeyer P A, Guo Z, et al. Regions of strong coupling between soil moisture and precipitation. *Science*, 2004, 305: 1138–1140
- 23 Zhang J, Dong W. Soil moisture influence on summertime surface air temperature over East Asia. *Theor Appl Climatol*, 2010, 100: 221–226
- 24 Zhang J, Wu L, Dong W. Land-atmosphere coupling and summer climate variability over East Asia. *J Geophys Res*, 2011, 116: D05117, doi:10.1029/2010JD014714
- 25 Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States. *Clim Change*, 1989, 15: 383–422
- 26 Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in general circulation model. *J Clim*, 1990, 3: 941–963
- 27 Leung L R, Ghan S J, Zhao Z C, et al. Intercomparison of regional climate simulations of the 1991 summer monsoon in eastern Asia. *J Geophys Res*, 1999, 104: 6425–6454
- 28 符淙斌, 袁慧玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. *科学通报*, 2001, 46: 691–695
- 29 许吟隆, 张勇, 林一骅, 等. 利用 PRECIS 分析 SRES B2 情景下中国区域的气候变化响应. *科学通报*, 2006, 51: 2068–2074
- 30 Gao X, Shi Y, Song Y, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM and the driving GCM. *Meteorol Atmos Phys*, 2008, 100: 73–86
- 31 Zhang J, Wang W C, Leung L R. Contribution of land-atmosphere coupling to summer climate variability over the contiguous United States. *J Geophys Res*, 2008, 113: D22109, doi: 10.1029/2008JD010136
- 32 Zhang J, Wang W C, Wei J. Assessing land-atmosphere coupling using soil moisture from the Global Land Data Assimilation system and observational precipitation. *J Geophys Res*, 2008, 113: D17119, doi: 10.1029/2008JD009807
- 33 Dirmeyer P A, Schlosser C A, Brubaker K L. Precipitation, recycling and land memory: An interated analysis. *J Hydrometeorol*, 2009, 10: 1177–1198

- 34 Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3. Technical Note, NCAR/TN-475+STR, 2008. 125
- 35 Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). J Korean Meteorol Soc, 2006, 42: 129–151
- 36 Kain J. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J Appl Meteorol, 2004, 43: 170–181
- 37 Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Mon Weather Rev, 2006, 134: 2318–2341
- 38 Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. The formulation and atmospheric simulation of the Community Atmosphere Model version 3 (CAM3). J Clim, 2006, 19: 2144–2161
- 39 Chen F, Dudhia J. Coupling and advanced land surface–hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. Mon Weather Rev, 2001, 129: 569–585
- 40 Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). Bull Am Meteorol Soc, 2002, 83: 1631–1643
- 41 Xu Y, Gao X, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. Adv Atmos Sci, 2009, 26: 763–772
- 42 Yuan Y, Yang H, Zhou W, et al. Influences of the Indian Ocean dipole on the Asian summer monsoon in the following year. Int J Climatol, 2008, 28: 1849–1859

· 动态 ·

## 群落生态学研究新进展

探索群落构建机制的生态和进化过程是群落生态学领域的一大中心任务。在局部森林群落水平上,运用系统发育分析方法探讨群落构建规则是群落生态学的研究热点。中国科学院华南植物园分子生态学研究所葛学军研究员等人采用植物条形码通用的3个片段(*rbcL*, *matK* 和 *psbA-trnH*),利用植物DNA条形码和PhyloMatic方法构建了鼎湖山20 hm<sup>2</sup>森林大样地183种木本植物(隶属于24目52科110属)的群落系统发育关系,并结合大样地5种生境类型分析了该群落的构建方式。两种方法的研究结果均发现,山谷(valley)和低坡(low slope)生境为系统发育聚集分布格局(phylogenetically clustered),表明近缘物种共存于这些低海拔生境,生境过滤(environmental filtering)可能起主导作用;而且,两者均表明,高坡(high slope)和山脊(ridge top)生境为系统发育扩散分布(phylogenetically over-

dispersed),说明远缘物种共存于这些高海拔生境,竞争排斥(competitive exclusion)可能起主导作用。然而,对于高谷(high gully)生境,PhyloMatic方法得到的结果为系统发育扩散分布,而条形码方法得到的结果为系统发育随机分布(phylogenetically random),表明与系统发育有关的作用可能在这种生境类型下不起作用或者作用不明显。生境随机化检测结果发现,495对物种-生境组合(5种生境类型×95个常见物种)中有52对存在显著物种-生境关联,表明在物种水平上非随机生境关联可能在局部群落构建时起到重要作用。相关研究结果已在线发表在国际知名综合性期刊PLoS ONE上(doi: 10.1371/journal.pone.0021273)。

裴男才  
中国科学院华南植物园