

城市能量消耗对全球气候影响的模拟研究

张广俊¹ 蔡鸣² 胡爱学³

(1 加州大学圣地亚哥分校斯克里普斯海洋研究所, La Jolla, California 92093, USA; 2 佛罗里达州立大学地球、海洋和大气科学系, Tallahassee, Florida 32306, USA; 3 美国国家大气研究中心, Boulder, Colorado 80307, USA)

摘要: 2006年世界总能量消耗大约是 1.58×10^{13} W。这一能量消耗主要集中于人口稠密的地区。尽管这一能量消耗仅占自然界大气和海洋环流从低纬向高纬能量输送的0.3%，但当这一能量释放到大气中后有可能对正常的大气环流产生一定的影响，从而影响本地及下游地区的气温。本文使用全球气候模式对这一人类能量消耗潜在的气候影响进行了研究。结果表明，当把全球能量消耗超过0.4W的86个网格点加入数值模拟时，在北美和欧亚大陆的中高纬地区的冬季和秋季增温可达到1℃。这些增温地区恰恰是20世纪使用自然和人类强迫的气候模拟相较于实际观测有偏差的区域。因此，研究认为加入人类能量消耗可能会修正气候模拟相对于实际观测的误差。

关键词: 人类能量消耗，气候变化响应，北半球中高纬增温，全球数值模拟

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.002

Simulation of the Impact of Energy Consumption on Global Climate

Zhang Guangjun¹, Cai Ming², Hu Aixue³

(1 Scripps Institution of Oceanography, University of California at San Diego, La Jolla, California 92093, USA;

2 Department of Earth, Ocean, and Atmospheric Science, Florida State University, Tallahassee, Florida 32306, USA;

3 Climate Change Research, CGD/NCAR, Boulder, Colorado 80307, USA)

Abstract: The worldwide energy consumption in 2006 was close to 15.8 terawatts in populated regions. Although this energy consumption is only about 0.3% of the total energy transport to the extratropics by atmospheric and oceanic circulations, this anthropogenic heating could disrupt the normal atmospheric circulation pattern and produce a far-reaching effect on surface air temperature. This study identifies the plausible climate impacts of energy consumption by using a global climate model. Results show that the inclusion of energy use at 86 model grid points where it exceeds 0.4 W/m^2 can lead to remote surface temperature changes by as much as 1 K in mid- and high latitudes in winter and autumn over the most part of North America and Eurasia. These regions correspond well to areas with large differences in surface temperature trends between observations and global warming simulations forced by all natural and anthropogenic forcings. It is concluded that energy consumption is likely to be a missing forcing for the additional winter warming trends in observations.

Keywords: energy consumption, climate response, NH mid- and high-latitude warming, global numerical simulation

0 引言

工业革命以来，人类对能源的需求一直在增加。尽管人们努力使能源的来源多样化，但是到目前为止，人类使用的能源还是主要来自矿物燃料。矿物燃料的使用使得大气中CO₂的含量大大增加，从而影响地球的辐射平衡，进而影响全球气候。与此同时，全球人口从20世纪50年代的约25亿增加到现在的约70

亿。而农业技术的进步，使得农业人口不断减少，从而促使全球的城市化进程快速进行。城市化使得人口密度在大城市中急速增加。城市化本身改变了原有的地貌，也改变了地表对太阳辐射的反射率，建筑物和柏油马路可吸收更多的太阳辐射，从而改变城市区域的地表能量平衡和区域水循环，造成城市温度一般会比郊区高一些的现象，这是传统（或狭义）的城市热岛效应。其实，城市化还有另一个被早期研究所忽略的重要效应——大量人口聚居于大城市使得大城市的能量消耗显著地高于相邻地区。这些能量消耗主要来自对室内的供暖或制冷、驱动公共和私人交通工具、工厂生产、室内外的照明及各种家电等。所有这些能量的消耗最终都会转化为热量散发到大气中去，从而

收稿日期：2013年5月30日；修回日期：2013年7月1日

第一作者：张广俊（1960—），Email: zhangguangjun1960@gmail.com

资助信息：美国国家科学基金（ATM-0833001, ATM-0832915）；

美国能源部项目（DE-SC0004974, DE-SC000080, DE-FC02-97ER62402）；NOAA项目（NA10OAR4310168）

影响区域乃至全球气候（广义的城市热岛效应）。例如，有研究^[1]指出日本东京冬天晨间上班高峰，散发到大气中的这种能量可高达 $1590\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

2013年1月，*Nature Climate Change*在线发表的一篇学术论文^[2]对此进行了专门的研究，这项研究是由美国Scripps海洋研究所的张广俊研究员、佛罗里达州立大学的蔡鸣教授和美国国家大气科学研究中心（NCAR）的胡爱学研究员共同完成的。在这项研究中，他们首先指出人类能量消耗对气候的影响明显有别于传统的城市热岛效应。这一能量本身不是由于人类活动对自然地形地貌的改变而产生的，它是由于人类大规模能量消耗，尤其是对千百方年前贮存于地下的矿物燃料的使用而产生的。这一能量对气候的影响也不同于温室气体和大气气溶胶的作用。后者对气候的影响是通过改变地球气候系统与外太空，以及地球气候系统内部的自然的能量交换而改变地球气候。人类能量消耗对气候系统来说是一种直接的外部强迫源，它可直接对城市及其周边地区的大气进行加热，使得城市的热岛效应更强^[1,3-4]。然而，人类能源消耗产生的热能与自然界中的能量传输相比还是微不足道的。比如，这种热能的总消耗量（在2006年大约是150亿 $\text{kW}^{[5]}$ ）仅仅相当于自然界中由大气和海洋环流在 43°N 从热带副热带向高纬地区输送的能量的0.3%^[6]。早期研究曾推测这种热能或许会对大气环流及气候产生一定的影响^[7-8]。后续的全球气候模式研究发现它对短期气候（比如季节变化）的影响与模式中自然变化对短期气候的影响相当^[9-10]。由于这些研究局限于只对模式进行了短期积分（例如几个月），因此这一热能是否会对气候有长期的影响仍然是一个前沿的研究课题。

基于此，张广俊等的研究团队使用了NCAR的大气模式（CAM3）^[11]及其全球耦合气候系统模式（CCSM4）^[12]对人类能源消耗是否影响区域及其全球气候的长期变化进行了系统的研究。

1 模式、资料处理和模拟试验

1.1 模式

CAM3是一个谱模式。垂直方向有26层，水平分辨率是 2.8° （T42）^[11]。CCSM4是一个NCAR全球海气耦合气候系统模式的新版本^[12]。它包含大气环流模式（CAM4）、海洋环流模式（POP2）、海冰模式（CICE4），以及陆面过程模式（CLM4）。CAM4是一个有限体模式，垂直方向也是26层，但水平分辨率是 1° ；POP2是一个差分模式，垂直方向是60层，水平分辨率也是 1° 。

1.2 资料处理

首先，对全球能量消耗分布进行分析，发现全球主要能源消耗集中在北美东西两岸、欧洲、中国东部及日本、韩国等地区。2006年世界总能耗大约是150亿 $\text{kW}^{[5]}$ 。根据美国能源部统计的每个国家人均能量消耗资料，其考虑了能耗最大的86个模式网格点（图1），在这86个模式格点上，每个格点的平均能量消耗必须大于或等于 $0.4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ；加入模式的总能量大约占世界总能耗的42%。在模式积分过程中，这一能量不随时间变化（既无季节变化，又无年际变化）。

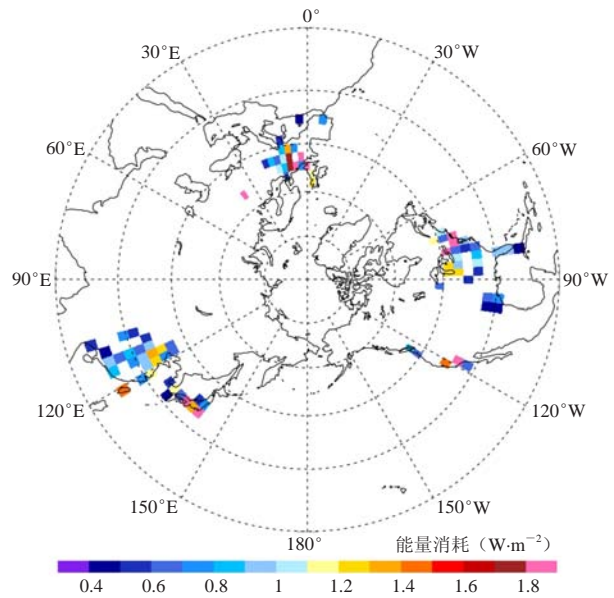


图1 在扰动试验中加入模式的人类能量消耗的模式网格点的地理位置和能量消耗在每个模式网格点的平均值（平均值根据观测资料估计的该模式网格点的能量消耗除以该网格点的面积而得）

另外，在这项研究中，也使用了英国气象局Hadley研究中心的格点化的地面温度观测资料——HadCRUTv3。这一资料使用了全球4500个陆地观测站资料，而海洋上的船舶观测和浮标观测资料来自国际综合海洋一大气资料集（ICOADS）^[13-14]。CRU对这些资料进行了同化、质量控制和月平均，然后插值到全球 $5^\circ\times 5^\circ$ 的网格上，这里只采用了1956—2005年的陆面资料（更详尽的资料请参阅Brohan等^[15]的文章）。

1.3 模拟试验

在这项研究中，一共做了六个试验。第一个为控制试验，包括太阳辐射的日变化和季节变化强迫，同时使用了通过观测得到的气候平均的海温和海冰场的季节变化，将其作为模式的下垫面。这些观测资料取自1981—2000年的月平均。控制试验一共积分了100年，最后的95年资料用于建构控制试验的年周期。第

二至六个试验是集合扰动试验。他们与控制试验的差别在于这些扰动试验中考虑了人类的能量消耗。这些扰动试验的初始条件是从不同时段的控制试验中得来的。每个扰动试验的积分也是100年，但只采用最后95年的资料。因此，总计475年独立的扰动试验年资料作为循环资料。为得到扰动试验相对于控制试验的偏差，扰动试验的每个年循环减去控制试验的平均年循环，从而可得475个独立的年循环样本。

为了与耦合模式结果进行比较，他们使用了NCAR的CCSM4 20世纪的模拟结果。NCAR一共有五个20世纪的模拟试验，初始条件取自同一个以1850年为气候背景的控制试验的不同时段。这些试验加入了所有已知的随时间变化的外部强迫，例如，太阳辐射变化、温室气体和大气气溶胶等，从而再现20世纪观测到的全球气候变化。当然，由于各种各样的模式的不确定性和观测的不连续性等原因，模拟的气候与观测的气候并不完全一样。

2 模式结果

从全球平均的角度考虑，他们加入模式中的由人

类能量消耗而引起的外部能量强迫仅仅是 $0.05\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ，远远小于温室气体和气溶胶产生的外部能量强迫（大约 $1.5\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ）^[16-17]。但在局部城市区域，热强迫可达到数百瓦每平方米，但反映到模式格点则仅可到 $4\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。这是因为模式每个格点面积大约是 $280\text{km}\times 280\text{km}$ 。因此人类能源消耗对全球平均温度的影响非常有限。在模式结果中它对全球表面年平均温度的贡献小于 0.01°C ，对冬季的全球平均气温的影响稍大一些（ 0.02°C ）。但是，作为对人类能源消耗的响应，在中高纬度会出现统计上显著的洲际尺度的气温增暖或变冷可达到 1°C （图2）。在欧亚大陆，最强的增暖出现北亚地区。中国大陆的东部增温达到大约 0.5°C 。在北美大陆，美国东北部和加拿大南部增温也比较明显，加拿大大草原地区的增温可达到 0.8°C 。另一方面，尽管加入模式的人类能量消耗并不随季节变化，但是大气对这一能量强迫的响应却存在着明显的季节变化。例如，北半球冬季的响应最强，其次是秋季和春季，最后是夏季。并且，由此引起的在加拿大西北部、中国东部、俄罗斯北极地区和美国东北部

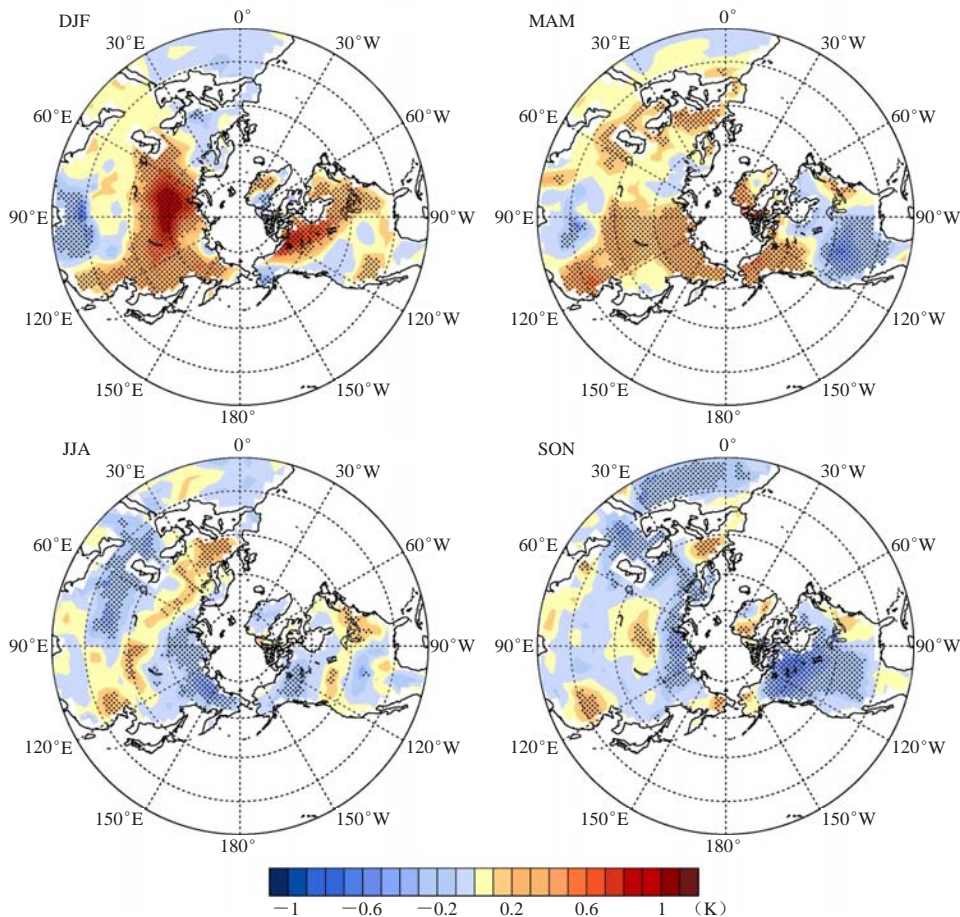


图2 扰动试验相对于控制试验的季节平均地表气温的偏差（黑点区代表通过0.01显著性水平检验的区域）

的冬季增温均持续到春季，而欧洲的冬季降温却演变成春季的增温。到了秋季，除去个别地区，北半球大部分地区对人类能量消耗的反应是降温。在张广俊等^[2]的研究中，没有进一步细致地解释造成大气环流对定常的人类能量消耗强迫的反应会有明显的季节变化的原因，这一现象还有待于进一步的研究。

为了验证CAM3模拟的大气及地表温度对人类能源消耗的反应是否如实地反映了观测结果，他们把CAM3模拟的地表气候变化的形势与CCSM4耦合模式的20世纪试验与实际观测资料进行了比较。CCSM4一共进行了六个20世纪的模拟试验，每个试验均从工业化前气候背景（1850年）的控制试验中不同时间开始积分。在每个试验中，所有已知观测的外部强迫时间序列都纳入到这些试验中，例如，CO₂，CH₄，黑碳、火山爆发产生的气溶胶，太阳辐射的变化等。这些模拟试验的积分是从1850—2005年。观测的地表气温资料来自HADCRUT格点化全球5°×5°的资料。首先，他们计算了CCSM4模拟的20世纪末至21世纪

初的表面气温的变化趋势相对于同年代观测的表面气温变化趋势的偏差的地理分布（1981—2005年的平均减去1956—1980年的平均）。这一偏差的地理分布与CAM3模拟的表面温度对人类能源消耗的反应的地理分布相当一致，尤其是在冬季和秋季（图3）。他们之间的相关系数在冬季和秋季分别达到了0.52和0.6。这一结果表明，CCSM4模拟的20世纪后期冬季和秋季表面温度变化趋势相对于观测的偏差很可能是由CCSM4没有包括人类能源消耗的强迫而造成的。换句话说，以前这一偏差普遍被认为是由于模式产生的气候系统内部的变化与实际观测中的气候系统内部变化不一致而引起的，但最新结果指出以前的观点可能是不正确的。

研究还发现，人类能源消耗不仅对表面温度的区域分布产生影响，还会对高层大气环流有一定的影响。例如，冬季中纬度的西风急流由于人类能源消耗的强迫有向赤道移动的趋势，从而使得西风在20°N加强，但在40°N变弱。另外，对流层上部的西风在60°N

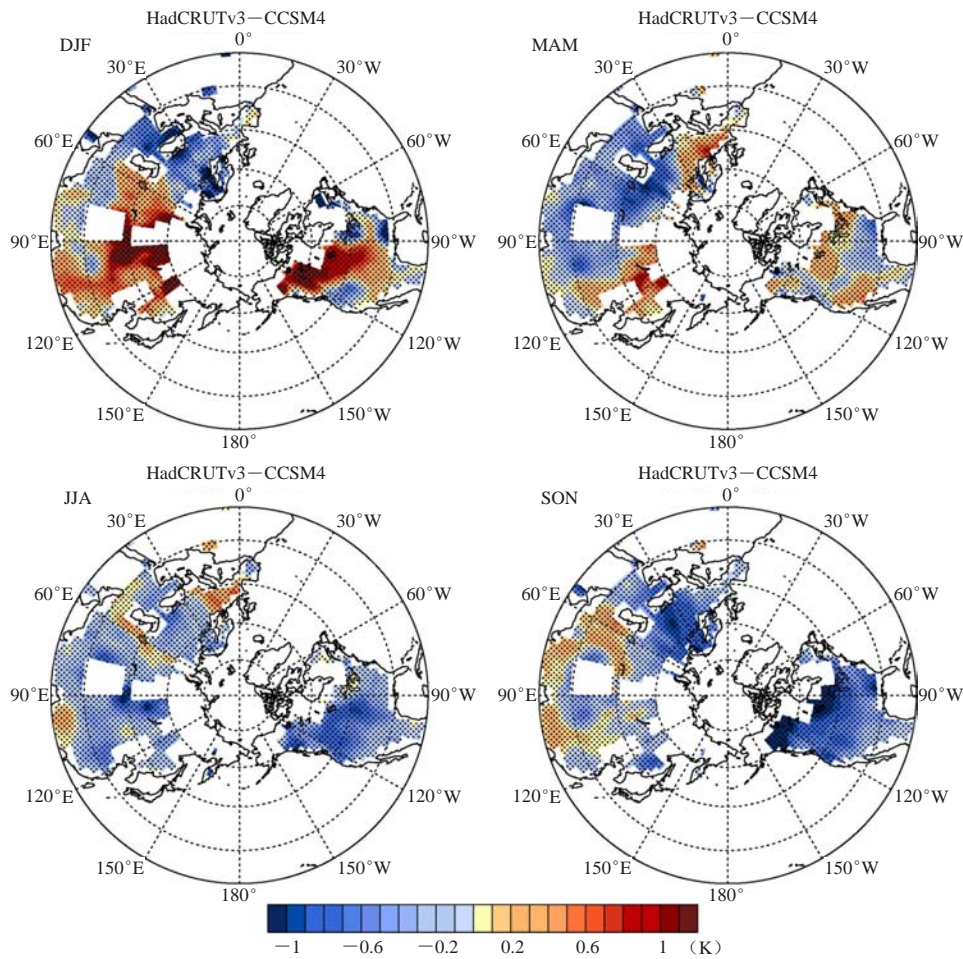


图3 HadCRUTv3观测的陆地上的年代际表面气温变化趋势与NCAR CCSM4集合模拟的20世纪年代际表面气温变化趋势间的偏差（年代际变化趋势与参考文献[1]类似；陆地上的白色区域代表缺乏足够的观测资料，海洋上的资料均省略；黑点区代表通过0.01显著性水平检验的区域）

也获得了加强。这些变化与热成风原理是一致的,比如中高纬的增暖和40°N以南的变冷。需要注意的是,由于人类能源消耗主要集中在中纬度地区,试验中的中纬度平均纬向风对这一强迫的响应与以前理想试验中中纬度纬向风对中纬度加热的响应是一致的^[18]。

人类能源消耗对大气的加热影响了大气的气压场,从而改变了冬季正常的大气环流。这一冬季大气环流的变化导致了洲际尺度的冬季中高纬度表面温度的变化。他们的研究显示俄罗斯北极地区的异常低压和中亚的异常高压造成了50°—70°N, 60°—90°E区域的南风明显增强。这一增强的南风把暖空气从南方输送到这里,从而引起了这一地区的明显增温。同理,加拿大大草原和西北地区的增温是由于异常的西风和西南风把暖空气从东北太平洋传递到那里。加拿大东北极区、巴芬湾和格陵兰西北部的变冷则是由坐落于格陵兰的异常低压引起的北风增强所导致的。

与其他由人类活动所引起的对大气环流的强迫相比较,人类能源消耗对大气的强迫相对比较小。例如,根据政府间气候变化委员会对未来强迫的估计,CO₂的加倍导致局部地区的增温可达到6°C,而森林砍伐引起的植被变化可产生2°C的局地气温变化。相比之下,大气环流对人类能源消耗的响应可导致欧亚大陆高纬地区最多1°C的增温,导致北美高纬地区大约0.6°C的增温。他们指出,这些结果只来自一个模式,其他模式是否也能得到相同结果尚不清楚。

3 结论及展望

这项研究表明,尽管人类能源消耗对全球平均气候的影响是微不足道的,可它对大气环流和区域气候产生的影响却不容忽视。与当前的气候模式模拟的20世纪后半叶气候变化趋势与观测的偏差相比较,大气环流和区域气候对人类能源消耗响应的形势与这些偏差十分相似,尤其是在冬季和秋季。显示这些偏差很可能是由于当前的气候模式没有加入人类能源消耗这一外部气候系统的强迫所造成的。当然,这项研究仅仅使用了一个气候模式,如果要进一步证实这一研究结果,类似的试验也应使用其他模式进行比较。另外需要指出的是,目前这项研究仅仅使用了相对粗网格的大气环流模式,未来的试验应使用海气海冰陆面耦合模式并尽可能地使用高分辨率的耦合模式。高分辨率的耦合模式可以更为精确地描述人类能量消耗的地理分布。

最后值得指出的是,由于人类整体生活水平的不断提高,人类的能量消耗在可预见的未来仍会维持在一个高水平上。即便我们更广泛地使用可再生能源,

大量地减少温室气体的排放量,进而减缓或消除全球气候变暖,但是人类能源消耗产生的废热并不会明显减少。这是因为人类的总体能量消耗预计并不会减少,只是从依赖于矿物燃料转而依赖于可再生能源。所以,这项研究再次警醒世人,无论你居住在地球的哪一个角落,人类都(通过大气)紧密地联系在一起。

参考文献

- [1] Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo. *Atmos Environ*, 1999, 33: 3897-3909.
- [2] Zhang G J, Cai M, Hu A. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America. *Nature Climate Change*, 2013, 3, 466-470, doi: 10.1038/NCLIMATE1803.
- [3] Kusaka H, Kimura F. Thermal effects of urban canyon structure on the nocturnal heat island: numerical experiment using a mesoscale model coupled with an urban canopy model. *J Applied Met*, 2004, 43: 1899.
- [4] Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model. *Int J Climatol*, 2010, doi: 10.1002/joc.2201.
- [5] International Energy Agency. *World Energy Demand and Economic Outlook. International Energy Outlook 2009*, 2009, 7-20.
- [6] Trenberth K E, Caron J M. Estimates of meridional atmosphere and ocean heat transports. *J Climate*, 2001, 14: 3433-3443.
- [7] Budyko M, Drosdov I O A, Yudin M I. Influence of economic activity on climate. *Modern Problems of Climatology (Collection of Articles)*, FTD-HT-23-1338-67, Foreign Tech Div, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1966, 484-500.
- [8] Sellers W D. Global climatic model based on the energy balance of the Earth-atmosphere system. *J App Met*, 1969, 8: 392-400.
- [9] Washington W M. Numerical climate-change experiments: The effect of man's production of thermal energy. *J Appl Meteorol*, 1972, 11: 769-772.
- [10] Washington W M, Chervin R M. Regional climatic effects of large-scale thermal pollution simulation studies with the NCAR general circulation model. *J Appl Meteorol*, 1979, 18: 1501-1511.
- [11] 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.
- [12] Gent P R, Danabasoglu G, Donner L J, et al. The Community Climate System Model version 4. *J Climate*, 2011, 24: 4973-4991, doi: 10.1175/2011JCLI4083.1.
- [13] Manabe T. The Kobe collection: Newly digitized Japanese historical surface marine meteorological observations, in *Advances in the Applications of Marine Climatology—The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD 1081. Geneva: World Meteorol Organ, 2003, 246.
- [14] Woodruff S D, Worley S J, Arnott J A, et al. COADS updates and the blend with the U.K. Met Office Marine Data Bank, in *Advances in the Applications of Marine Climatology—The Dynamic Part of the WMO Guide to the Applications of Marine Meteorology*, WMO/TD1081. Geneva: World Meteorol Organ, 2003, 246.
- [15] Brohan P, Kennedy J J, Harris I, et al. Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. *J Geophys Res*, 2006, 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548 (2006).
- [16] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2007: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge Univ Press, 2007.
- [17] Hansen J, Sato M, Ruedy R. Radiative forcing and climate response. *J Geophys Res*, 1997, 102: 6831-6864, doi:10.1029/96JD03436.
- [18] Ring M J, Plumb R A. The response of a simplified GCM to axisymmetric forcings: Applicability of the fluctuation-dissipation theorem. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 3880-3898.