

陈兵, 陈良富, 董理, 等. 2016. 人为热释放: 全球分布的估算及其气候效应的探索 [J]. 大气科学, 40 (2): 289–295. Chen Bing, Chen Liangfu, Dong Li, et al. 2016. Estimating the global distribution of anthropogenic heat release and exploring its possible climatic effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 289–295, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14268.

人为热释放: 全球分布的估算及其气候效应的探索

陈兵^{1,2} 陈良富¹ 董理² 石广玉²

1 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室 (LASG), 北京 100029

摘 要 人类生产和生活中大量消费各种形式的能源,除了向大气里排放温室气体和气溶胶外,还释放大量热量。人为热释放伴随着人类社会长期存在,随着全球人口增长和经济发展,其影响效应不断加剧。人为热释放具有典型地域集中、不均匀分布的特征:虽然全球平均人为热释放通量仅约为 0.03 W m^{-2} ,在人口密集的城市地区,人为热释放可高达每平方米数百瓦,足以影响局地气候。伴随全球经济的发展,人口的增长及城市化进程的加剧,人为热释放分布更集中,影响气候的范围逐步扩大,其对气候的影响能力逐步增强。全球气候模式的结果表明:人为热释放能够对全球大气环流产生影响,进而影响到全球气候变化。人为热释放可以导致全球地表温度增温约 0.06 K , 500 hPa 温度场平均升温约 0.04 K ,尤其对北半球中高纬度升温效应明显。研究表明,人为热释放虽然没有温室气体如二氧化碳等影响因子对全球气候的影响那么显著,但是其仍然能够对全球气候产生影响,是全球气候变化不可忽视的影响因子。

关键词 人为热释放 全球分布 气候效应 气候变化

文章编号 1006-9895(2016)02-0289-07

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14268

Estimating the Global Distribution of Anthropogenic Heat Release and Exploring Its Possible Climatic Effect

CHEN Bing^{1,2}, CHEN Liangfu¹, DONG Li², and SHI Guangyu²

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101

2 The State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Anthropogenic Heat Release (AHR), which is produced through the consumption process of all kinds of energy resources in human society, will increase with the development of the global economy and expansion of the population. The present study shows that the global distribution of AHR is geographically concentrated and fundamentally correlated with economic activity. The global mean flux of AHR is just 0.03 W m^{-2} , but in populated urban regions it may reach several hundred watts per square meter—A high enough level to affect regional climate. The

收稿日期 2014-09-15; 网络预出版日期 2015-04-20

作者简介 陈兵, 男, 1985 年出生, 博士, 从事气候变化、大气环境与大气物理学方面的研究。E-mail: chenbing@mail.iap.ac.cn

通讯作者 石广玉, E-mail: shigy@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41505126、41130528, 中国博士后科学基金 2013M541077, 浙江省科技计划项目 2012C13011-2, 2014 年中国科学院大气物理所 LASG 国家重点实验室开放课题

Funded by The National Natural Science Foundation of China (Grants 41505126 and 41130528), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant 2013M541077), Science and Technology Project of Zhejiang Province (Grant 2012C13011-2), and the Open Project for 2014 of the State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics

climatic effect of AHR will increase with the development of global urbanization, implying that AHR may affect the global climate. Global climate model results in the present study show that AHR could have a significant impact on the surface temperature at mid and high latitudes over the Northern Hemisphere, leading to a 0.06 K increase in surface temperature and a 0.04 K increase at 500 hPa. Although AHR does not have as significant an impact as greenhouse gases, such as carbon dioxide, it is nonetheless an important climatic factor that should not be ignored in global climate change studies.

Keywords Anthropogenic heat release, Global distribution, Climatic effect, Climate change

1 引言

近百年来全球气候发生了巨大的变化, 人类活动被认为很可能是导致气候变化的关键因素 (IPCC, 2013)。人类生产和生活中大量消费各种形式的能源, 最终的结果除了向大气里排放温室气体和气溶胶外, 同时释放大热量, 这种热量称为人为热释放 (Anthropogenic Heat Release)。人类活动消费各类能源, 对气候产生了深远的影响, 其中温室效应被认为是造成全球气候变化的主要因素之一。

地球气候变化驱动力主要包括自然因素 (如太阳活动、火山喷发、地球轨道变化等) 和人为因素 (如化石燃料和生物质燃烧、温室气体的排放等)。各气候因子之间共同作用影响着全球气候变化。根据 IPCC AR5 (the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) 的结论 (IPCC, 2013), 从 1750 年欧洲工业革命以来, 人类活动对于气候的总体影响是增暖效应, 人类活动总的影响造成的辐射强迫约为 $2.29 [1.13 \sim 3.33] \text{ W m}^{-2}$ 。现阶段人口增加和 GDP (Gross Domestic Product) 增长跟能源消费成正相关 (Tucker, 1995; Dietz and Rosa, 1997; 石广玉, 2007; 陈兵等, 2011), 各种能源消费的最终结果是向大气排放热量, 即使不使用化石燃料, 改用其他清洁能源或可再生能源, 诸如太阳能、核能等, 可以减缓大气温室气体浓度的增加, 但不能根本减少人为热释放的排放。

人为热释放是伴随着近代工业革命以来, 人类大量使用化石燃料而产生的。随着全球人口的增长和经济的发展, 伴随着全球城市化的发展, 已经具有了影响局地气候的能力 (IPCC, 2007)。人为热释放具有分布严重不均, 局地集中的特征。在人为热释放聚集的地区可能高达 1000 W m^{-2} 以上 (Ichinose et al., 1999), 而在荒无人烟的荒漠等地区, 人为热释放几乎为 0。因此我们不能从全球平

均的角度看待人为热释放的气候效应。

人为热释放作为地气系统中外加的强迫热源, 可以导致地气系统的近地层能量收支受到扰动。人为热释放可以增加近地层大气的感热和潜热, 以及升高近地层空气的温度, 进而对城市局地气候、区域气候产生影响 (Oke, 1988; Taha, 1997; Fan and Sailor, 2005)。研究发现, 人为热释放对城市热岛具有重要作用 (佟华等, 2004; Crutzen, 2004; Oleson et al., 2010), 可以使全球表面增温, 并对边界层高度有明显增加作用, 可能对气溶胶的扩散和化学—气候过程造成影响 (Flanner, 2009)。目前虽然人为热释放通量全球表面平均大约为 0.03 W m^{-2} , 全球陆地平均约为 0.10 W m^{-2} , 但是全球人为热释放的分布具有局地集中的特点 (Chen and Shi, 2012), 其通量在人口稠密、工业发达的地区可以高达每平方米数百瓦。Ichinose et al. (1999) 对东京市区的人为热释放研究表明, 在东京市中心超过了 400 W m^{-2} , 冬季最大峰值达到了 1590 W m^{-2} , 明显具有影响局地气候的能力 (IPCC, 2007)。考虑到城市化的发展, 全球人口区域分布将更加集中, 未来人口将有 60 亿人聚集在城市里 (McCarthy et al., 2010)。随着全球能源需求的增加, 全球城市化导致的人口分布相对更加集中, 人为热释放对气候影响能力将持续增强。因此人为热释放的气候效应不局限于区域尺度, 对全球气候都能够会产生影响 (石广玉, 2007; 陈兵等, 2011; Chen et al., 2012; Chen and Shi, 2012)。

2 全球人为热释放分布的估算

一般而言, 人为热释放的来源分为来自人体新陈代谢产生的热量和来自经济活动中的能源消费 (Sailor and Lu, 2004), 并以后者为主。近来针对人为热释放的研究主要集中于局地的人为热释放通量 (Ichinose et al., 1999; Makar, 2006; Smith et al., 2009; Lee et al., 2009)。为了解决以往研究集中于局部地区及对于人为热释放的分布格点的估算过于

粗糙等问题, Chen et al. (2012) 利用经济发展和能源消费的关系, 结合 NOAA 的 DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program System/Operational Linescan System) 数据优势和特点, 研究了中国区域 1992 年到 2009 年人为热释放的分布估算和发展过程。DMSP/OLS 数据是美国国防气象卫星 DMSP 使用 OLS 传感器的红外和近红外两个通道获取的空间分辨率可达 0.56 km 的高精度卫星数据。该数据具有连续观测时间长和高精度的时间和空间分辨率的特征, 同时 OLS 传感器具有非常强的探测能力, 因此保证了数据的准确性 (Elvidge et al., 1997)。DMSP/OLS 数据被广泛应用于经济 GDP 评估、人口和能源消费的估算等研究领域 (Elvidge et al., 1997; Ghosh et al., 2009; Letu et al., 2010)。基于 DMSP/OLS 数据的以上特征, 因此采用 DMSP/OLS 资料预估全球人为热释放具有科学的理论基础。研究发现, NOAA 的 DMSP/OLS 数据跟人为热释放通量有强烈的线性相关性, 并且利用 DMSP/OLS 数据可以很好反映出随着经济发展和人口增长的发展, 人为热释放的不断发展和影响范围逐步扩大的过程 (Chen et al., 2012)。根据中国统计局能源统计消费资料 ([http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/\[2015-03-30\]](http://www.stats.gov.cn/tjsj/ndsj/[2015-03-30])), 结合国际能源署 IEA ([http://www.iea.org/\[2015-03-30\]](http://www.iea.org/[2015-03-30])) 和美国能源信息署 EIA ([http://www.eia.gov/\[2015-03-30\]](http://www.eia.gov/[2015-03-30])) 的资料, 应用 DMSP/OLS 卫星数据估算 2010 年全球人为热释放年平均通量的分布如图 1 所示。

如图 1 所示, 全球人为热释放分布很不均匀, 具有地域集中的特征, 跟经济发展和人口分布紧密

关联。人为热释放聚集的地区总体上是经济发达、人口稠密的区域; 反之, 人为热释放较小的地区一般多为人烟稀少的荒漠、森林等地。全球人为热释放集中地区主要包括北美东部、南美东南部、欧洲以及东亚和南亚地区。目前从人为热释放分布图来看, 高值地区年平均人为热释放通量可以达到每平方米数十瓦的量级。考虑到全球人口的增长以及能源需求的提高, 伴随着城市化进程的加剧, 人为热释放有发展成大面积片状分布的趋势。人为热释放的集中区域对气候的影响能力将逐步增强, 其气候效应值得密切关注。

为了检验应用 DMSP/OLS 数据得到的全球人为热释放的估算可能存在的误差, 将估算结果与统计资料进行对比。具体方法是, 针对中国区域, 参考 2010 年中国统计局的能源消费资料, 实现各省区内各个格点的累加, 得到各省区每年的能源消费的估算, 与统计资料进行对比。分析结果显示, 总体上应用 DMSP/OLS 卫星数据得到的人为热释放分布与统计资料吻合非常好 (Chen et al., 2012)。同样将应用 DMSP/OLS 得到 2006 年全球分布与国际能源署 IEA 和美国能源信息署 EIA 的能源消费统计数据对比, 结果显示误差在 30% 以内 (Chen and Shi, 2012)。总体上, 采用 DMSP/OLS 数据估算的全球人为热释放分布误差在合理的范围以内, 估算较为合理准确, 其优势在于获得全球范围内高精度格点的 (最小格点可达 $1\text{ km} \times 1\text{ km}$) 资料以及可以反映出人为热释放伴随着经济发展而不断加剧的过程, 为实现用气候模式研究人为热释放的气候效应提供了可能。

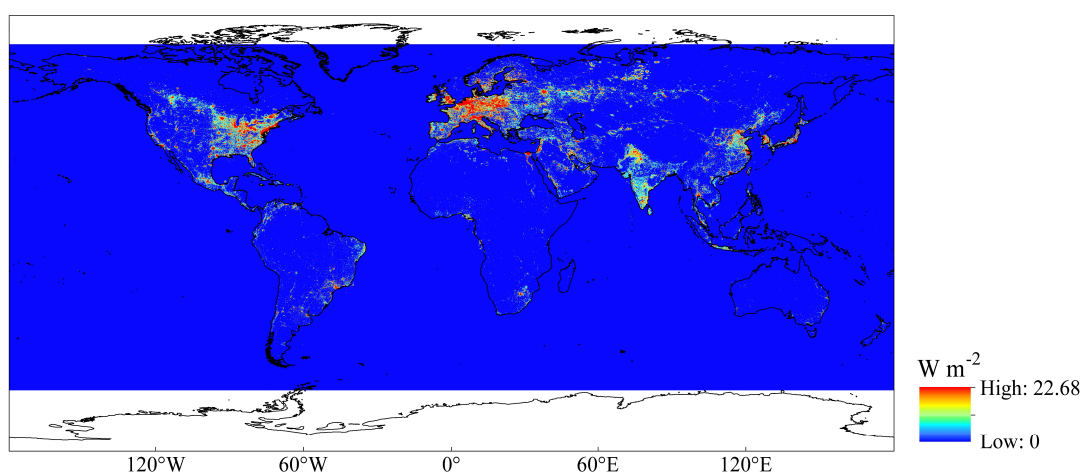


图 1 2010 年全球人为热释放通量的估算分布 (单位: W m^{-2} ; 分辨率: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)

Fig. 1 Estimation of the global distribution of anthropogenic heat release (AHR) in 2010 (units: W m^{-2} ; resolution: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$)

3 未来全球人为热释放分布的估算

从欧洲工业革命至今,人类社会生产和生活方式发生了很大的变革。从二十世纪初至今,世界人口增长了四倍多,一次能源消费增长了 22.5 倍(BP, 2011)。从 1965 年到 2012 年全球能源消费总量(BP, 2014)变化趋势如图 2 所示。

1965~2012 年间,全球能源呈现急速增长的趋势,全球能源消费总量增长了三倍多,全球平均人为热释放通量从不足 0.01 W m^{-2} 增长到 0.03 W m^{-2} 。根据英国石油公司 BP (2011) 发布的《Energy Outlook 2030》预计的人类社会人口增长和能源消费增长的情景 (BP, 2011), 忽略城市人口迁移等因素, 预估到 2100 年全球人为热释放分布如图 3 所示。

比较图 1 和图 3, 可以看出人为热释放增长明显, 在人为热分布集中区域如欧洲、北美中东部以

及东亚等大片地区, 人为热释放年平均通量达到能够影响局地气候的程度, 但又不仅仅局限于区域气候。人为热释放具有典型地域分布不均的特征, 可能对全球气候产生影响。人类社会的城市化发展使得人口分布更加集中, 并且能源需求也将提高。人为热释放必将随着人类社会的发展而不断加剧和发展。因此, 人为热释放在气候变化中的作用是不能被忽视的。

4 人为热释放全球气候效应的探索

为了检验人为热释放的气候效应, 将估算的全球人为热释放格点分布耦合到全球格点气候模式 GAMIL 中。GAMIL 气候模式是由中国科学院大气物理研究所国家重点实验室 LASG 开发的, 其基本物理框架基于美国大气研究中心 (NCAR) 的 Community Atmosphere Model (CAM), 并且参加了一系列诸如 AMIP (Atmospheric Model

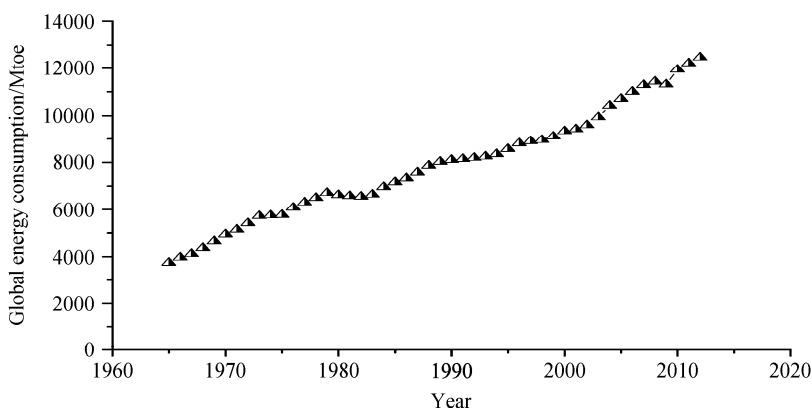


图 2 1965~2012 年全球能源消费总量变化趋势[单位: Mtoe (百万吨标准油)]

Fig. 2 Global total energy consumption from 1965 to 2012 [units: Mtoe (Million tons of oil equivalent)]

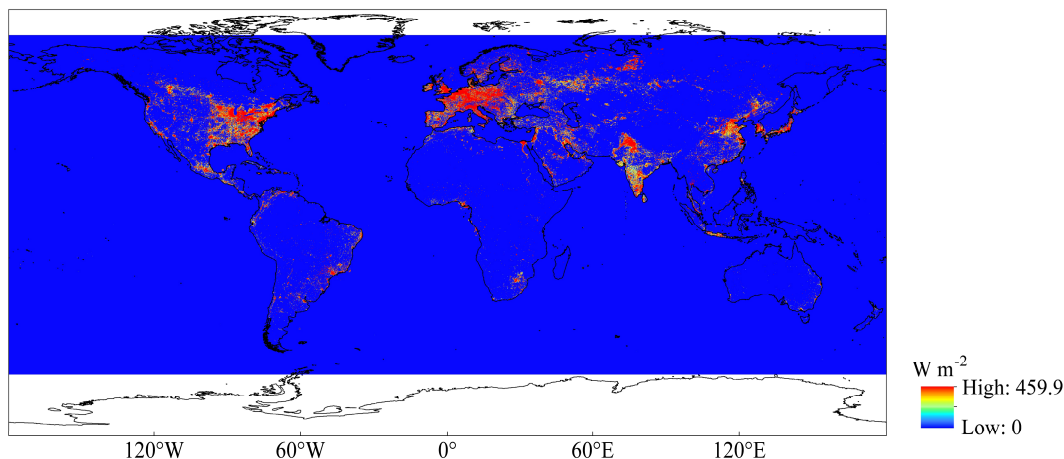


图 3 预估 2100 年全球人为热释放通量的分布 (单位: W m^{-2})

Fig. 3 Estimation of the global distribution of AHR in the year 2100 (units: W m^{-2})

Intercomparison Project), CliPAS (Climate Prediction and its Application to Society), C20C (Climate of the 20th Century) 等国际模式比较计划, 和 IPCC AR4、AR5 的气候变化研究, 具有较好的模式性能 (Li et al., 2013)。应用 NOAA 的 DMSP/OLS 资料, 可以得到 1992~2009 年全球高精度的人为热释放的分布 (Chen and Shi, 2012)。人为热释放可以加热近地层大气, 对近地层大气的能量平衡产生影响。由于人为热释放排放集中于近地层大气, 人为热释放被地表和近地层大气完全吸收后转化成向上的长波辐射, 因此将人为热释放作为长波辐射考虑到气候模式中。将 1992~2009 年全球人为热释放格点分

布耦合到 GAMIL 气候模式中。本试验中模式分辨率为 $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$, 模式运行时间是从 1992 到 2009 年, 为了减少模式误差, 只取 2000~2009 年这 10 年的模式结果进行分析。模式研究得到人为热释放对全球地表温度和 500 hPa 温度场的影响如图 4 和图 5 所示。

根据图 4 和图 5 所示, 人为热释放对全球平均地表升温约 0.06 K, 对 500 hPa 温度场平均升温约 0.04 K, 其中北半球中高纬度的升温效果比较明显。地表升温地区集中于北美中高纬地区以及亚欧大陆东部和 $30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ 地区; 500 hPa 温度场上, 升温较大的地区集中于北美洲东部和北部地区, 亚洲

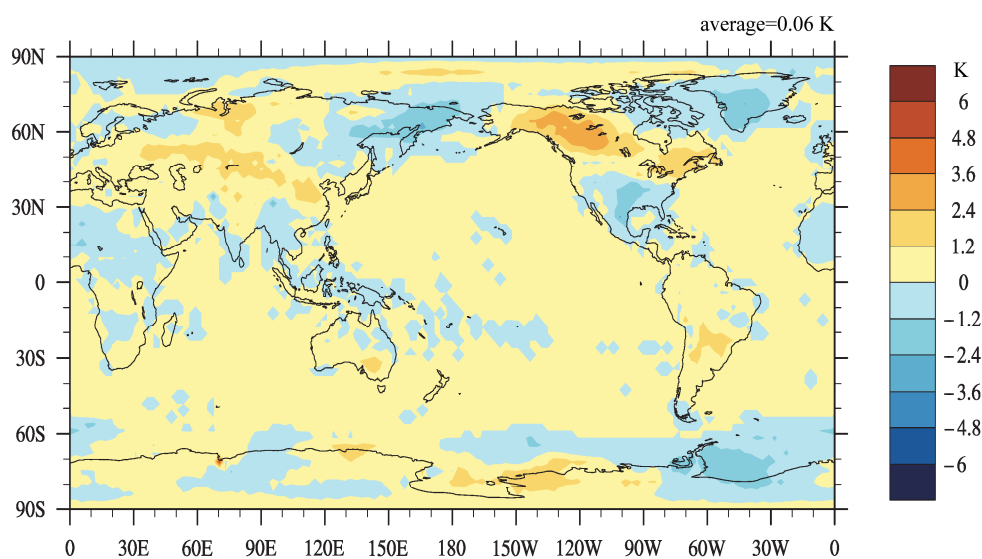


图 4 能源消费导致的人为热释放对全球地表温度 (单位: K) 的影响 (Chen et al., 2014)

Fig. 4 Effect of AHR on global surface temperature (units: K) (Chen et al., 2014)

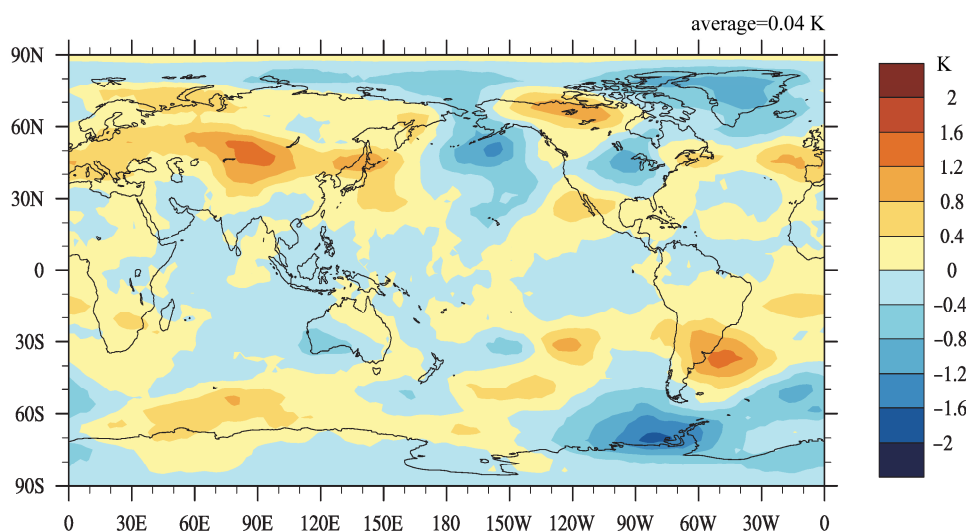


图 5 能源消费导致的人为热释放对全球 500 hPa 温度场 (单位: K) 的作用

Fig. 5 Effect of AHR on global 500-hPa temperature field (units: K)

东部和中部地区以及南美洲的东南部地区, 增暖中心升温可达 1~2 K。通过对比图 4 和图 5, 可以发现人为热释放导致的全球不同高度上大气升温效果存在差异。这个差异可能对大气的垂直运动产生影响。图 4 和图 5 跟图 1 进行比较可以看出, 近地层升温显著的地区跟人为热释放分布集中地区并不完全重合。这意味着, 人为热释放不仅能对局地气候产生影响, 而且可能对全球气候产生影响。最新的研究结果 (Chen et al., 2014; Zhang et al., 2013) 表明, 全球人为热释放可以影响大气运动, 导致北半球中高纬度地区升温明显, 进而影响全球气候。研究全球人为热释放的分布以及人为热释放的全球气候效应对研究全球变暖具有重要的科学意义。

5 结语和展望

本文采用了 NOAA 的 DMSP/OLS 数据估算全球人为热释放的分布, 并且根据未来全球人口和能源增长的情景预估了到 2100 年全球人为热释放分布。将人为热释放引入全球气候模式, 探索人为热释放的气候效应。

人为热释放的全球分布具有典型不均匀分布的特征, 已经具有影响局地气候效应的能力。伴随着全球经济发展和城市化进程的加剧, 人为热释放气候影响能力也将扩大。这也暗示了人为热释放可能对全球气候产生影响 (Nordell, 2003; Block et al., 2004; Feng et al., 2012; Zhang et al., 2013; Chen et al., 2014)。从对气候的影响时间尺度上来说, 人为热释放会一直伴随着人类社会存在而存在。人类社会的发展离不开对能源的需求, 而能源消费的最终结果是排放人为热释放。随着全球经济的发展和人口的增加, 以及全球城市化进程的加剧, 人为热释放分布相对集中的趋势会更加明显, 人为热释放对气候的影响力在逐步加强。模式结果说明, 人为热释放可以导致北半球中高纬度升温明显。人为热释放虽然没有温室气体对全球气候的影响那么显著, 但仍然是全球气候变化不可忽视的影响因子。

本研究应用全球气候模式研究人为热释放的气候效应, 处于初步探索阶段。模式结果也存在一定不确定性, 需要继续深入研究。人为热释放作为人类活动影响气候的一方面, 其在城市气候以及区域乃至全球气候变化中的作用都是不能忽视的。人为热释放的全球气候效应值得深入探索, 这对于研究人类活动对气候的影响和极端气候等研究领域

具有重要的科学意义和应用价值。

参考文献 (References)

- Block A, Keuler K, Schaller E. 2004. Impacts of anthropogenic heat on regional climate patterns [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L12211, doi:10.1029/2004GL019852.
- BP. 2011. Energy Outlook 2030, http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/2030-Energy-Outlook-CHN.pdf [2015-04-20].
- BP. 2014. BP Statistical Review of World Energy 2014, <http://www.bp.com/statisticalreview> [2015-04-20].
- Chen Bing, Shi G Y. 2012. Estimation of the distribution of global anthropogenic heat flux [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5 (2): 108–112.
- 陈兵, 石广玉, 戴铁, 等. 2011. 中国区域人为热释放的气候强迫 [J]. *气候与环境研究*, 16 (6): 717–722.
- Chen Bing, Shi Guangyu, Dai Tie, et al. 2011. Climate forcing due to anthropogenic heat release over China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 16 (6): 717–722.
- Chen Bing, Shi Guangyu, Wang Biao, et al. 2012. Estimation of the anthropogenic heat release distribution in China from 1992 to 2009 [J]. *Journal of Meteorological Research*, 26 (4): 507–515.
- Chen Bing, Dong L, Shi G Y, et al. 2014. Anthropogenic heat release: Estimation of global distribution and possible climate effect [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 92A: 157–165.
- Crutzen P J. 2004. New directions: The growing urban heat and pollution “island” effect—Impact on chemistry and climate [J]. *Atmos. Environ.*, 38 (21): 3539–3540.
- Dietz T, Rosa E A. 1997. Effects of population and affluence on CO₂ emissions [J]. *PNAS*, 94 (1): 175–179.
- Elvidge C D, Baugh K E, Kihn E A, et al. 1997. Relation between satellite observed visible-near infrared emissions, population, economic activity and electric power consumption [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 18 (6): 1373–1379.
- Fan H L, Sailor D J. 2005. Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: A comparison of implementations in two PBL schemes [J]. *Atmos. Environ.*, 39 (1): 73–84.
- Feng J M, Wang Yongli, Ma Zhuguo, et al. 2012. Simulating the regional impacts of urbanization and anthropogenic heat release on climate across China [J]. *J. Climate*, 25 (20): 7187–7203.
- Flanner M G. 2009. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36(2): L02801, doi:10.1029/2008GL036456.
- Ghosh T, Anderson S, Powell R L, et al. 2009. Estimation of Mexico’s informal economy and remittances using nighttime imagery [J]. *Remote Sens.*, 1 (3): 418–444.
- Ichinose T, Shimodono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. *Atmos. Environ.*, 33 (24–25): 3897–3909.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]// Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- IPCC. 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]//

- Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al., Eds. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp.
- Lee S H, Song C K, Baik J J, et al. 2009. Estimation of anthropogenic heat emission in the Gyeong-In region of Korea [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 96 (3–4): 291–303.
- Letu H, Hara M, Yagi H, et al. 2010. Estimating energy consumption from night-time DMPS/OLS imagery after correcting for saturation effects [J]. *Int. J. Remote Sens.*, 31 (16): 4443–4458.
- Li L J, Wang B, Dong Li, et al. 2013. Evaluation of grid-point atmospheric model of IAP LASG version 2 (GAMIL 2) [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (3): 855–867.
- Makar P A, Gravel S, Chirkov V, et al. 2006. Heat flux, urban properties, and regional weather [J]. *Atmos. Environ.*, 40 (15): 2750–2766.
- McCarthy M P, Best M J, Betts R A. 2010. Climate change in cities due to global warming and urban effects [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37 (9): L09705, doi:10.129/2010GL042845.
- Nordell B. 2003. Thermal pollution causes global warming [J]. *Global and Planetary Change*, 38 (3–4): 305–312.
- Oke T R. 1988. The urban energy balance [J]. *Progress in Physical Geography*, 12 (4): 471–580.
- Oleson K W, Bonan G B, Feddema J, et al. 2011. An examination of urban heat island characteristics in a global climate model [J]. *Int. J. Climatol.*, 31 (12): 1848–1865.
- Sailor D J, Lu Lu. 2004. A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas [J]. *Atmos. Environ.*, 38 (17): 2737–2748.
- 石广玉. 2007. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 327pp.
- Shi G Y. 2007. The Atmospheric Radiation (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 327pp.
- Smith C, Lindley S, Levermore G. 2009. Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat fluxes for UK cities: The case of Manchester [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 98 (1–2): 19–35.
- Taha H. 1997. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat [J]. *Energy and Buildings*, 25 (2): 99–103.
- 佟华, 刘辉志, 桑建国, 等. 2004. 城市人为热对北京热环境的影响 [J]. *气候与环境研究*, 9 (3): 409–421.
- Tong Hua, Liu Huizhi, Sang Jianguo, et al. 2004. The impact of urban anthropogenic heat on Beijing heat environment [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (3): 409–421.
- Tucker M. 1995. Carbon dioxide emissions and global GDP [J]. *Ecological Economics*, 15 (3): 215–223.
- Zhang G J, Cai M, Hu A X. 2013. Energy consumption and the unexplained winter warming over northern Asia and North America [J]. *Nature Climate Change*, 3 (5): 466–470, doi:10.1038/NCLIMATE1803.