

占俊杰, 丹利. 2014. 广州地区人为热释放的日变化和年际变化估算 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 726–734, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13149.
Zhan Junjie, Dan Li. 2014. Diurnal and annual variations of anthropogenic heat estimation in Guangzhou city, China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 726–734.

广州地区人为热释放的日变化和年际变化估算

占俊杰^{1,2} 丹利¹

¹ 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

² 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

摘 要 基于《广州市统计年鉴》2001~2012 年数据估算了广州 2000~2011 年人为热释放的日变化以及年际变化, 计算中考虑了人类新陈代谢、工业、交通以及生活排放人为热。计算结果显示: 4 种排放源中工业 12 年平均达到了 55%, 交通达到 36%, 其次依次为生活排放和新陈代谢排放。总的人为热在这 12 年时间里大致呈现上升的趋势, 从 2000 年的 2.7×10^{17} J 增加到 2011 年的 4.4×10^{17} J, 但在 2006 年后有小幅的下降, 这主要是由于工业释放是人为热释放的主要部分, 在 2006 年后工业能源效率有所提高以致能源消耗排放率下降造成的。日变化在 10:00 (北京时间, 下同) 和 14:00 达到最大, 并且 12 年间随着时间的推移日变化呈现出下降的趋势, 主要是由于城市化进程的速度远远快于能源消耗、人口和车辆保有量增加的速度。对比 WRF 模式中城市模块中的人为热释放的日变化系数, 这些原始系数在广州使用的误差主要与广州地区和西方国家的生产生活作息时间有关。

关键词 人为热估算 年变化 日变化

文章编号 1006-9585 (2014) 06-0726-09

中图分类号 P461⁺.8

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13149

Diurnal and Annual Variations of Anthropogenic Heat Estimation in Guangzhou City, China

ZHAN Junjie^{1,2} and DAN Li¹

¹ Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² College of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

Abstract Considering the anthropogenic heat (AH) flux sources from human metabolism and activity, factories, vehicular traffic, this work has estimated the diurnal and annual variations of AH flux in Guangzhou from 2000 to 2011 using 2001–2012 data obtained from the Statistics Annals of Guangzhou. The results show that the averaged AH flux of factories and vehicular traffic accounts for 55% and 36%, respectively. The AH flux value shows an increasing trend during the 12-year period from 2.7×10^{17} J to 4.4×10^{17} J, with an exception after 2006 when the value presents a slight decline. This result can be attributed to a higher energy efficiency leading to a lower emission rate of energy consumption as manufactories are the major source of AH flux. The peak values of diurnal variation is shown to occur at 1000 LST and 1400 LST. During the 12-year period, the overall diurnal variation shows a decreased trend, which can be attributed mainly to a faster pace of urbanization than the increasing rate of energy consumption, population, and vehicles. Compared with the diurnal variation parameters of AH flux in the urban module of the Weather Research and Forecasting (WRF) model, this discrepancy is closely related to discrepancies in work and life span between Guangzhou and cities in western countries.

收稿日期 2013-09-06 收到, 2013-11-19 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 2010CB428502, APN 项目 ARCP2012-10NMY-Li, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-EW-QN208

作者简介 占俊杰, 女, 1987 年出生, 硕士生, 主要从事陆气相互作用与气候模拟研究。E-mail: 429627974@qq.com

通讯作者 丹利, E-mail: danli@tea.ac.cn

Keywords Anthropogenic heat estimation, Annual variation, Diurnal variation

1 引言

城市约占全球陆地面积的 2%, 却消耗着世界能源的 70% (International Energy Agency, 2008)。预计城市居民及维持城市运转相关活动所需要的能源将在未来 20 年甚至更长时间内将不断增加 (International Energy Agency, 2009)。人为热释放是城市能量平衡的重要组成部分, 由于城市的快速发展, 人为活动加剧, 城市中人为热的排放对城市热环境影响很大, 人为排放的废热通过热通量形式直接影响大气的温度场, 进而改变局地环流。佟华等 (2004) 研究了城市人为热对北京热环境的影响, 结果表明人为热对城市热岛的形成起很大的作用, 白天使城市中心温度增加 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 夜晚增加 $1\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。何晓凤等 (2007) 用南京大学多尺度模式系统在不同区域进行了多种人为热源引入方案的研究表明, 人为热源的存在对城市热岛的生成有重要作用, 结果显示, 南京现有人为热排放量对该地区的城市热岛贡献率约为 29.6%。Zhang et al. (2010) 利用 WRF 模式设计了有无城市下垫面的两组试验, 结果表明城市化导致地表温度平均增加 $0.45\pm 0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。但由于全球各地的经济发展水平、能源消耗量、人口密度, 能源利用率等不同, 致使人为热释放在空间分布上表现出很大的地区差异。霍飞和陈海山 (2010) 利用耦合了单层城市冠层模型 (UCM) 的 WRF, 研究了人为热源对上海区域城市气候的影响。结果表明, 使用新陆面资料的试验效果要好于使用旧的路面资料, 加入人为热源的试验效果要优于没有加入人为热源的试验, 这反应了热岛效应是不断增加的城市面积和人为热源共同决定的。Feng et al. (2012) 利用耦合了城市冠层模式的 WRF 模式研究了人为热释放对中国区域气候的影响, 人为热释放会使中国大部分地区的地表温度升高, 尤其是在长三角城市群地区。综合下垫面改变以及人为热释放的共同作用, 地表温度将会增加 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 并且在冬季人为热释放引起的地表温度增加高于下垫面改变引起的增温, 夏季刚好相反, 二者的共同作用也会使一些地区的降水增加, 尤其是在北京—天津—河北地区, 而在长三角有明显的减少。

关于区域尺度或全球尺度上人为热释放对气候变化影响方面的数值模拟研究还很少。目前只有一些初步的定量估计, 考虑日变化的人为热源作用的数值模拟出的热岛的日变化比将热源单独考虑为常数与实况更接近, 说明加入与实际情况相符的人为热对模拟结果有改善 (杨玉华等, 2003)。为了更细致地研究人为热的气候效应, 对于人为热释放的精细估算也显得尤为重要。工业能源消耗、商业及居民住宅的热排放、车辆的油料燃烧以及人体新陈代谢是人为热释放的重要来源 (Sailor and Lu, 2004; Sailor, 2011)。但由于相关数据的缺乏, 在中国区域估计人为热释放主要是根据能源的消耗来进行的 (陈兵等, 2011)。Chen and Shi (2012)、石广玉等 (2010) 利用能源经济领域权威的英国石油公司 (BP) 世界能源统计资料和联合国人口统计资料, 分别计算了人类的能源消耗和人体新陈代谢两部分的人为热释放。Sailor (2011) 同时考虑新陈代谢、工业、建筑、交通 4 个部分的人为热, 估算了城市环境中的人为热释放。Quah and Roth (2012) 也同时考虑人类新陈代谢、交通、住宅等人为热释放源, 估算了新加坡的人为热释放日变化规律。王志铭和王雪梅 (2011) 利用统计资料考虑了工业、交通和生活 3 种人为热排放源, 利用工业和生活能源消耗量、汽车保有量、主干道车流量等数据, 估算了广州人为热日变化排放通量, 最大排放通量出现在 11:00 (北京时间, 下同), 为 72.3 W m^{-2} , 其中工业排放占总排放量的 68.6%。

但由于很多估算方法中并没有考虑能源的利用效率等问题, 这样导致人为热释放的估算值要大于真实值, 这样在研究人为热的气候效应将会夸大, 跟实际情况不一致, 本文在已有的估算方法上更加全面地考虑了人为热的释放源, 包括人类新陈代谢、工业、交通、生活这个 4 个排放源。并且考虑了能源消耗中的能源利用率, 以求更加真实地估计人为热释放。但由于能源资料以及更加细致的调研资料的缺乏, 在估算的过程中仍然存在着一一定主观性这一局限性。

2 人为热估算的方法及日变化

人为热释放 Q_F 估算为各主要源废热的总和:

$$Q_F=Q_M+Q_I+Q_V+Q_L, \tag{1}$$

其中 Q_M 、 Q_I 、 Q_V 和 Q_L （单位均为 J）分别为新陈代谢释放的人为热、工业释放的人为热、交通释放的人为热和生活释放的人为热。 Q_M 主要是指人体的各种活动时新陈代谢向大气释放的热量； Q_I 主要是指工业生产中所用的能源（煤、石油、天然气等）消耗时向大气释放的热量； Q_V 主要是指交通工具（汽车、摩托车等）在行驶过程中由于燃油向大气释放的热量； Q_L 主要是指日常生活（做饭、照明、取暖等）中所消耗的电力、天然气、液化气等向大气释放的热量。估算中使用的资料来自于《广州市统计年鉴》（广州市统计局，2001–2012）2000~2012 年的资料记录进行电子化后的数据。

本文同时考虑了新陈代谢、工业、交通、生活 4 部分的排放源，利用《广州市统计年鉴》各年中的能源消耗量、车辆保有量、人口、建城区面积以及估算的各个排放源中能源的利用效率等数据估算出各个部分的废热排放总量。再根据各个排放源的逐时分布计算出各个排放源的排放通量，最终得出广州地区人为热释放的日变化通量。

2.1 人类新陈代谢释放的人为热

人类新陈代谢释放的人为热为

$$Q_M=\sum(M_p n_p), \tag{2}$$

其中， p 代表时间（单位：h）， M_p 为时间 p 内新陈代谢的人均热释放，这主要取决于 p 时间内的人类

的活动，表 1 是人体各种活动时新陈代谢热量的估算值[计算方法参考 Fanger（1972）]； n_p 为时间 p 内研究区域的人口数量，人口数量使用的是《广州市统计年鉴》中各个年份对应的年末常住人口数量。

表 1 人体活动产生的新陈代谢热量

Table 1 Metabolic heat production values of activities

人类活动	代谢产热（单位： $W m^{-2}$ ）	基于成人体表面积 1.7 m^2 计算代谢产热（单位：W）	用于计算的平 均值（Fanger, 1972）
睡眠	41	69	
工作	52~70	88~119	104
驾车	58~100	99~197	148
购物	93	58	
家务劳动	93~198	158~336	247
步行	116	198	

以 2011 年为例，根据《广州市统计年鉴》2012 年数据 $n_p=1275.14$ 万，计算出 2011 年人为热释放为 6.2×10^{15} J。再根据建成区面积（城市化区域面积）为 $990.11 km^2$ ，可以估算出新陈代谢人为热释放通量的日变化（图 1）。从图 1 可以看出，新陈代谢的最大值出现在 18:00，这主要是由于在 17:00 至 18:00 中人体活动比较多（比如走路、开车、购物、做饭等）。次极大值出现在 07:00，早上起床后人体活动也会较多（比如走路、开车、吃饭等）。最低值则出现在夜间（23:00 至次日 06:00）的睡眠时段。需要提到的是，由于每个小时是何种活动缺乏细致的调研数据，主要是人为的根据生活经验得到的，

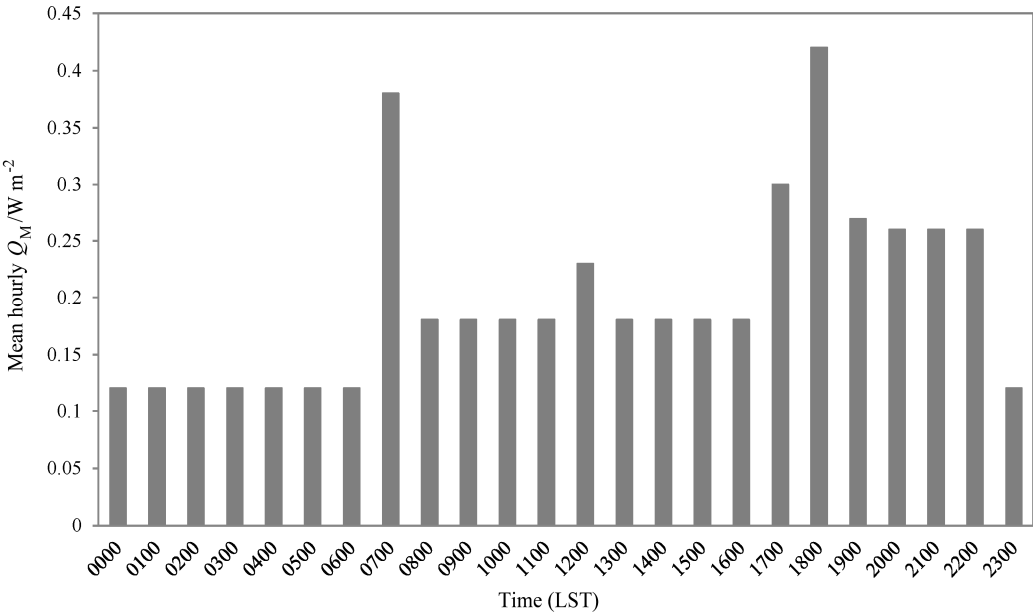


图 1 2011 年人类新陈代谢排放人为热通量 (Q_M) 的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of Anthropogenic heat (AH) flux from human metabolism (Q_M) in 2011

存在着一定的主观性, 所以今后需要进一步的调研作为参考。

2.2 工业人为热释放

工业人为热释放为

$$Q_I = (1 - \varepsilon_I) M_I C, \quad (3)$$

其中 ε_I 为工业能源利用效率, 利用《广州市统计年鉴》中能源投入量与产出量的比值来进行估算, 这就避免了将工业消耗能源全部转换成余热排放到大气中使得估算值偏高的弊端; M_I 为全年工业消费标准煤总量, 同样是根据《广州市统计年鉴》各年中工业使用标准煤的值。 C 为标准煤的热值, 我国

规定的标准煤发热值为 29306 kJ/kg。

根据《广州市统计年鉴》2012 年数据, M_I 为 2965.07×10^4 t 标准煤, 根据工业产出量与投入总量计算出能源加工转换率为 75% (见图 2), 因此计算得到 2011 年工业人为热释放为 2.3×10^{17} J。假设工业总产量白天 (09:00 至 17:00 为上班时间) 占 60%, 其余时间占 40% (Kimura and Takahashi, 1991) (如图 3)。

2.3 生活人为热释放

生活人为热释放为

$$Q_L = (1 - \varepsilon_L) M_L C, \quad (4)$$

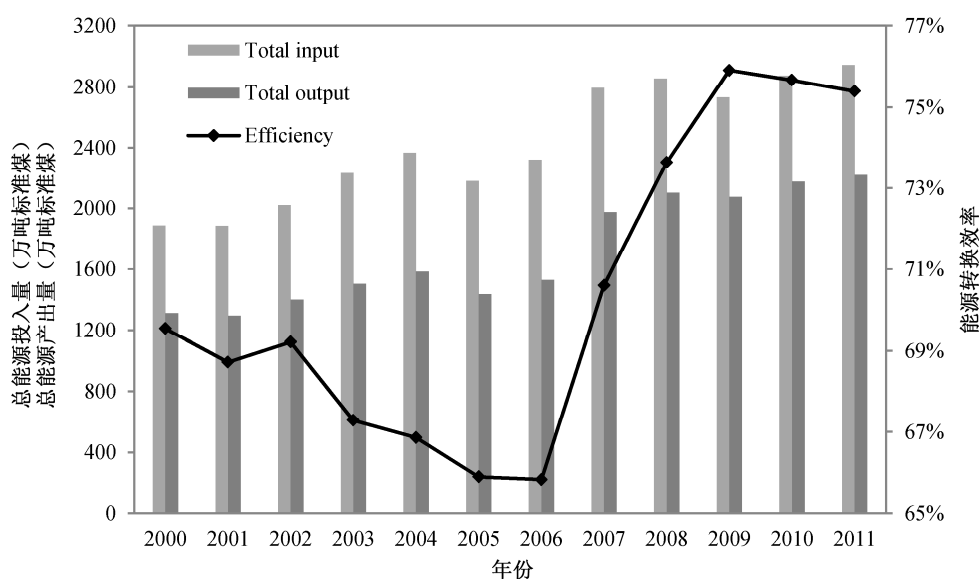


图 2 2000~2011 年规模以上工业企业能源转换效率

Fig. 2 Efficiency of energy conversion by industrial enterprises above designated size during 2000–2011

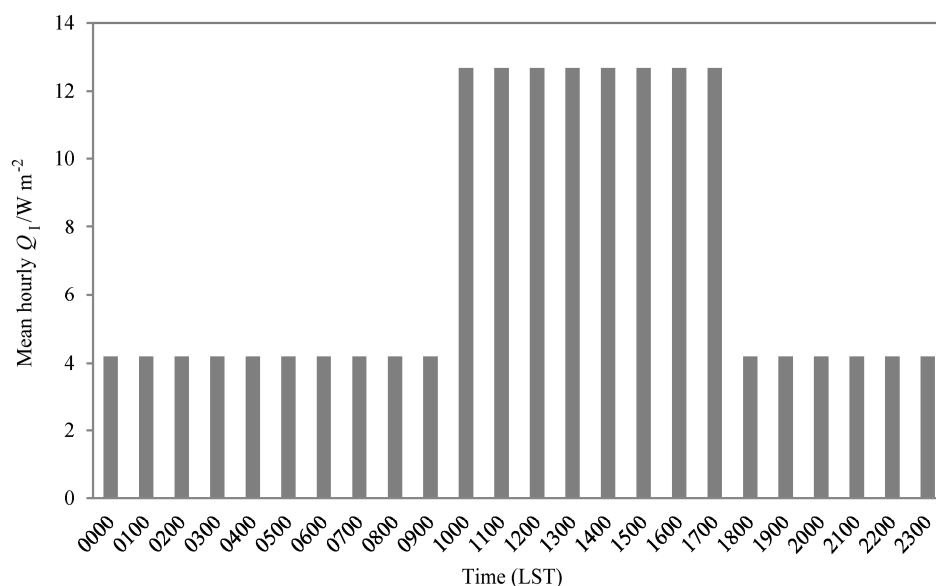


图 3 2011 年工业排放人为热通量的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of AH flux from manufactory in 2011

其中, ε_L 为生活能源利用效率, M_L 为生活能源消费标准煤总量。

2011 年, M_L 为 715.59×10^4 t 标准煤, 包括煤炭 0.13×10^4 t 标准煤、汽油 151.35×10^4 t 标准煤、液化石油气 105.98×10^4 t 标准煤、电力 431.04×10^4 t 标准煤等。由于缺乏较细致的能源利用资料, 电力消耗占据了生活能源消耗的大部分, 因而将电能利用率用来替代生活能源总的利用率, 广东地区的平均电能利用效率为 79% (乞建勋和张昆, 2010)。因而全年生活排放人为热为 4.4×10^{16} J。

生活人为热释放的日变化如图 4, 生活排放人为热在早中晚餐时间附近是峰值, 由于广州天气较热, 晚间使用空调所用电力也多, 因而前半段夜间也是排放高峰时段。最低值是在 02:00 至 05:00 (这段时间温度也相对低了很多), 各种生活活动停止、生活能源消耗几乎为 0。

2.4 交通人为热排放

交通人为热排放为

$$Q_V = (1 - \varepsilon_p) n \bar{d} L C_p, \quad (5)$$

其中, ε_p 为我国汽车对汽油的利用效率, 约为 30% (许挺等, 2011); n 为民用汽车保有量, $\bar{d}$ 为每辆车平均行驶路程, L 为每百公里汽车消耗汽油, C_p 为汽车每克油排放的热量。

据《广州市统计年鉴》2012 年数据, 2011 年全市民用汽车保有量为 2325357 辆; 据林秀丽等 (2009) 的研究, 中国每辆汽车每年平均行驶

2.5×10^4 km; L 以汽车每百公里消耗汽油 12.7 L 为标准 (佟华等, 2004); c_p 据测算为 45 kJ (Small, 1991)。由此估算 2011 年由交通排放的人为热为 1.7×10^{17} J。

根据珠三角机动车车流量调研 (车汶蔚, 2010), 07:00 至 09:00 和 17:00 至 18:00 两个时段上下班时间有明显的峰值, 在午餐和晚餐时间呈现明显的下降趋势, 得到 2011 年交通人为热释放日变化如图 5。根据上述结果可以得出 2011 年人为热释放通量的日变化如图 6, 从图 6 可以看出, 一天中人为热释放在 14:00 达到最大值 24.59 W m^{-2} , 在 10:00 达到次极大值 24.08 W m^{-2} 。在 03:00 达到最小值 5.17 W m^{-2} , 其中工业人为热释放的比重达到了 51%, 交通人为热释放比重达到 38%, 虽然新陈代谢所占的比重只有 1.4%, 但对于系统完整全面的估算人为热释放以及能量闭合还是非常有意义的。因此主要可以通过减少工业能源消耗, 提高能源利用率以及减少车辆等方法来达到减少人为热释放的目的。

3 人为热释放的年变化

根据上述的计算方法, 根据《广州市统计年鉴》2001~2012 的数据, 依次可以得出 2000~2011 年共 12 年的新陈代谢、工业、生活、交通及总的人为热释放 (图 7)。

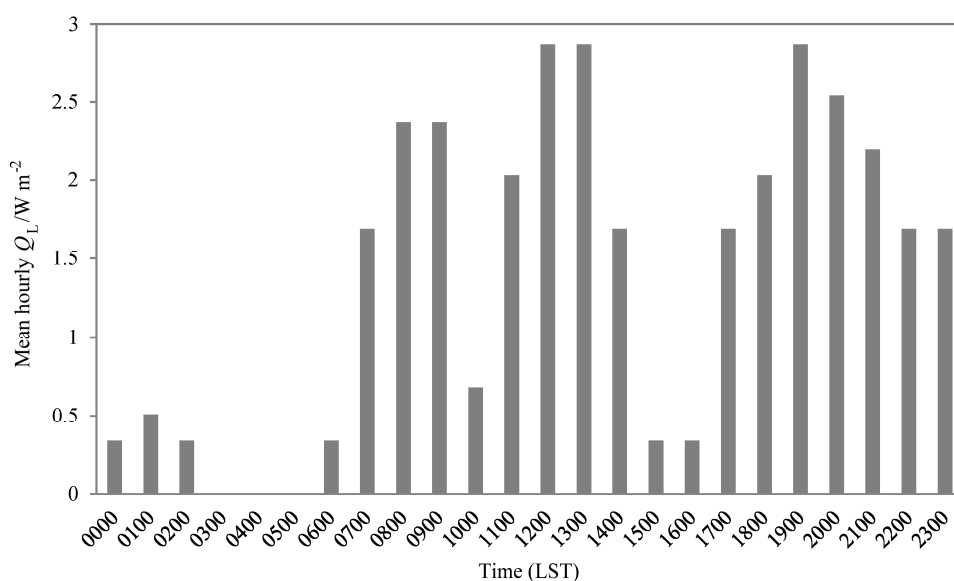


图 4 2011 年生活排放人为热通量的日变化

Fig. 4 Diurnal variation of AH flux from residents in 2011

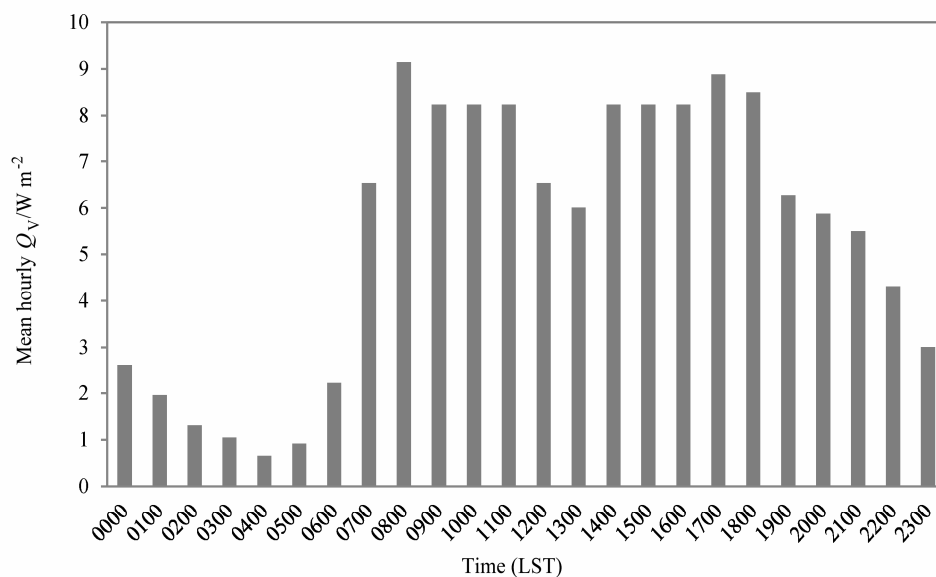


图5 2011年交通排放人为热通量的日变化

Fig. 5 Diurnal variation of AH flux from vehicular traffic in 2011

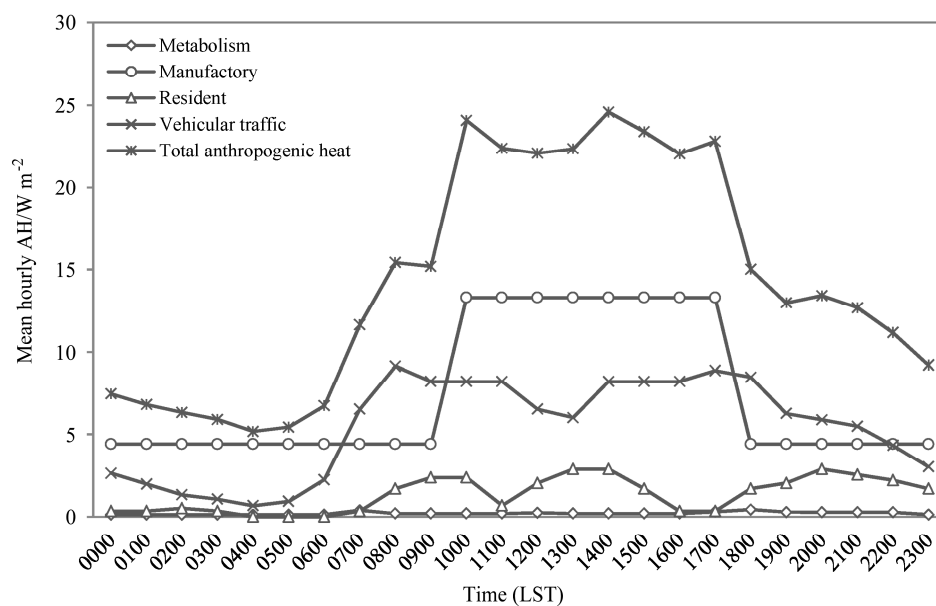


图6 2011年新陈代谢、工业、交通、生活以及总的人为热释放通量的日变化

Fig. 6 Diurnal variations of AH flux from human metabolism, manufactories, vehicular traffic, residents, and their total in 2011

从图7可以看出,不管是4个分量及总量在这12年里总趋势都是呈现上升的态势。但总的人为热释放与工业排放在2007年、2008年出现减少的情况主要是由于工业能源利用率的波动造成的。通过计算可以知道工业能源利用率从2006年的66%增加到2007年的70%,2008年增加到74%,以后维持在76%左右,所以从2009年又开始随着工业能源消耗量的增加稳步上升。通过计算结果可以知道,在降低人为热释放的过程中一方面可以从减少

能源消耗着手,另一方面也可以通过提高能源的利用率来减少能源消耗所带来的人为热释放。

进而可以分别算出每年的人为热释放通量日变化如图8。从图8可以看出,在2000~2011年这12年中,除了2000年出现了明显的变化外,其余11年的都表现出相当一致的变化趋势。这种差异主要是由于在2000~2001年城市化过程的速度异常得快导致的,建成区面积从2000年的297.50 km²增加到2001年的526.42 km²,而这种速度远大于工

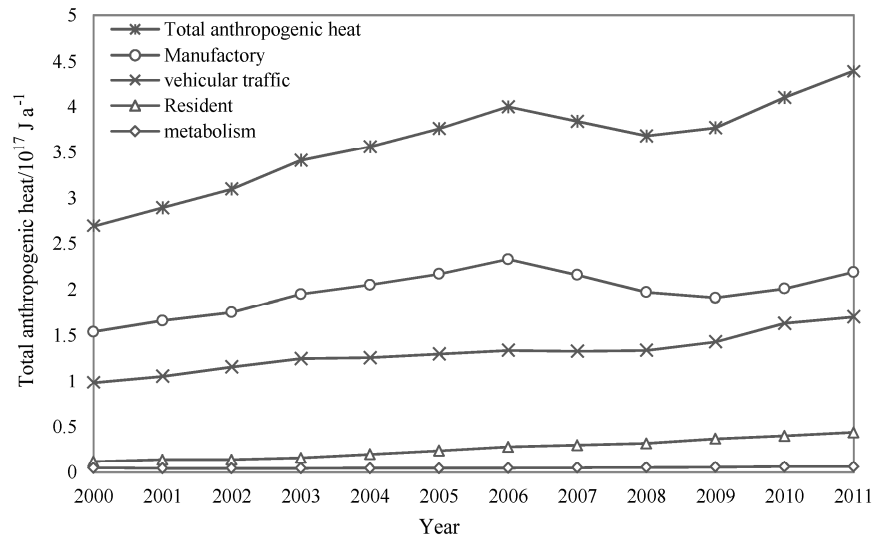


图 7 2000~2011 年人类新陈代谢、工业、交通、生活排放的人为热以及人为热释放总量

Fig. 7 AH from human metabolism, manufactories, vehicular traffic, residents, and total AH during 2000–2011

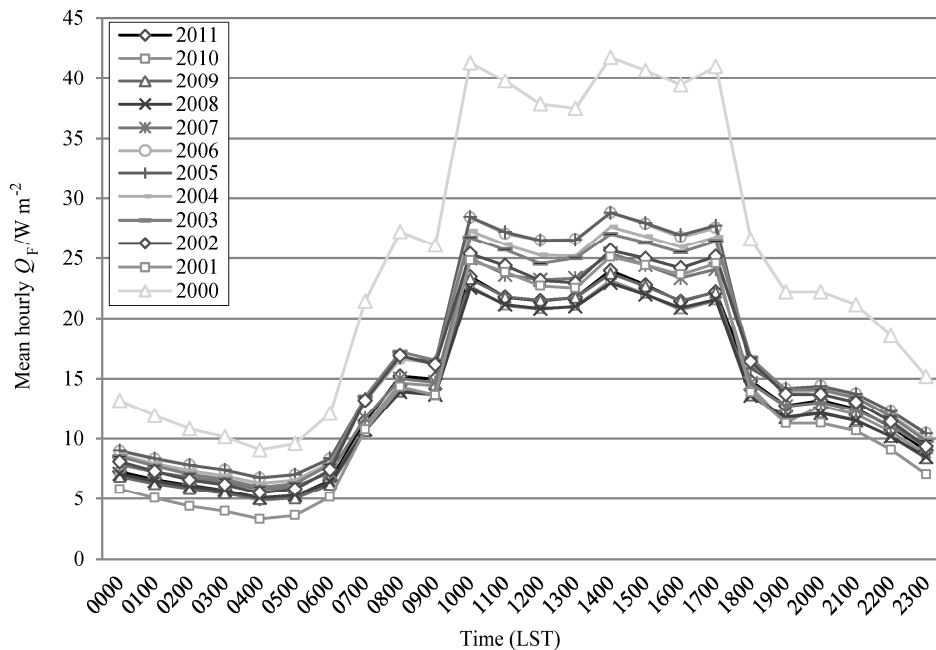


图 8 2000~2011 年人为热释放通量的日变化

Fig. 8 Diurnal variation of AH flux during 2000–2011

业能源消耗以及车辆保有量等的增加,于是在 2000 年的通量上表现出了跟其他年份极大的不同。这说明在研究人为热释放的气候响应时不能以增大人为热通量来反应城市化的过程,这样是不合理的,需要用实际的数据计算得出真实的结果。

估算人为热释放的意义在于将估算的结果加入到气候模式中以便得到更加真实的模拟结果,更好地研究人为热释放的气候效应,这样便于我们在城市化进程中更好地平衡经济增长与环境的关系,

尽可能地使经济增长最大化的同时到达对环境最小的破坏。因此通过以上的计算可以对比 WRF 模式中给出的人为热释放的日变化系数(图 9),对比发现,2000~2011 年这 11 年的计算的结果人为热释放的日变化系数较为一致(图 9 中只给出了 2000 年和 2011 年),包括日变化通量有些差异的 2000 年。计算结果与 WRF 模式自带的参数给出的日变化系数之间的差异主要在峰值的时间上,模式中的峰值在 17:00 和 08:00,而计算结果是在 14:00 和

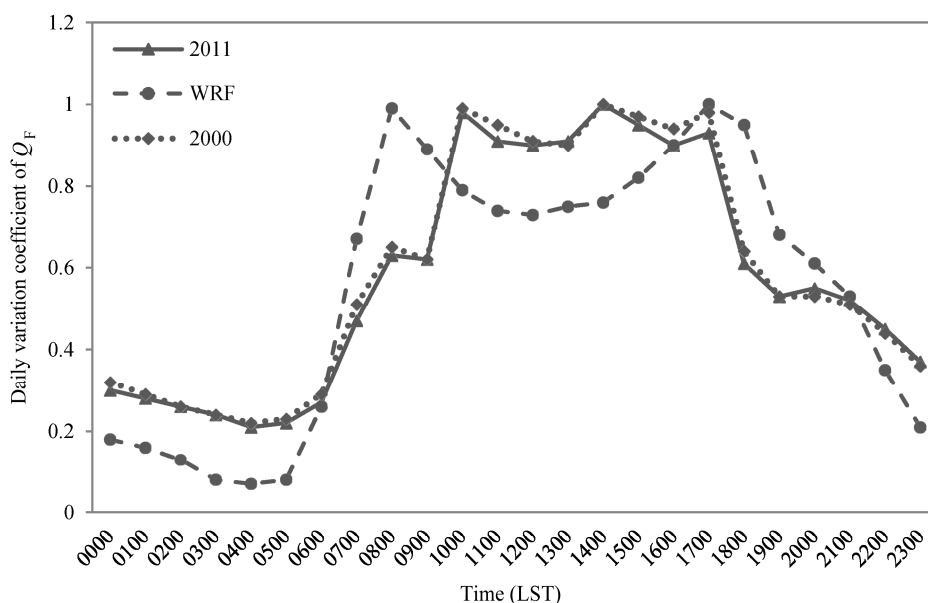


图9 2000年和2011年统计资料估算以及WRF模式自带参数给出的人为热释放日变化系数

Fig. 9 Diurnal variation coefficient of AH from statistical data in 2000 and 2011 and default parameter in WRF

10:00, 这种差异是由于各地的生产生活作息时间(例如上下班时间等)的差异造成的,这也进一步说明人为热释放具有很大的地区差异,所以今后将用估算的结果放入到模式中,更准确地研究人为热释放对气候的影响。

4 结论

本文在调研了国内外估算人为热释放的各种方法基础上,使用了基于统计资料和广州地区实际情况的估算方法,分别计算了新陈代谢、工业、交通和生活释放的人为热,再结合建成区面积以及调研的各个部分的日变化规律得出了人为热释放通量的日变化,得出以下主要结论:

(1) 计算方法较系统地考虑了人为热释放的各个排放源。虽然新陈代谢所占的比重特别小,但这对准确估算人为热释放的量值是有意义的,工业所占比重最大,为51%,其次为交通释放达到38%。因此城市地区主要可以通过减少工业能源消耗,提高能源利用率以及减少车辆等方法来达到减少人为热释放的目的。

(2) 通过对2000~2011年这12年的计算发现,总的人为热释放跟着工业排放在2007年、2008年出现减少后又稳步上升的情况,这主要是由于工业能源利用率从2006年的66%增加到2007年的70%

和2008年的74%,而后面的年份维持在76%左右造成的。

(3) 通过计算每年的人为热释放通量日变化,可以发现除了2000年出现明显的变化外,其余11年都表现出相当一致的变化趋势。这种差异主要是由于在2000~2001年城市化过程的速度过快导致的,建成区面积从2000年的297.50 km²增加到2001年的526.42 km²,而这种速度远大于工业能源消耗以及车辆保有量等的增加,使2000年的通量异常大于其他年份。

(4) 通过对比WRF模式中的人为热释放日变化系数,模式中的峰值在当地时间17:00和08:00,而计算结果是在当地时间的14:00和10:00,这种差异是由于各地的生产生活作息时间的差异造成的,这也进一步说明人为热释放具有很大的地区差异。所以用估算的结果放入到模式中将更加真实地反映人为热释放对气候的影响。

5 讨论

本文较全面地考虑了人为热的4个排放源,并且考虑了每个排放源的能源利用效率,这对系统精确地估算人为热释放是有重要意义的。但由于资料的局限性,也缺乏更加细致的调研,人为热释放日变化规律存在着一定的主观性,这也是今后研究需

要加强的地方。由于人为热在空间分布上存在很大的差异性,尤其是日变化的分布情况,所以在应用的时候需要针对所研究的区域进行适当的调研。对人为热的排放进行估算,将估算结果用来研究其气候效应,所以可以将估算的结果放入模式中来模拟,通过模式结果来分析人为热在气候变化中的作用,这也是以后进一步研究的方向。

参考文献 (References)

- 车汶蔚. 2010. 珠江三角洲高时空分辨率机动车污染排放清单开发及控制对策研究 [D]. 华南理工大学硕士学位论文, 126. Che Wenwei. 2010. A highly resolved mobile source emission inventory in the Pearl River Delta and assessment of motor vehicle pollution control strategies [D]. M. S. thesis (in Chinese), South China University of Technology, 126.
- 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. 2012. Estimation of the distribution of global anthropogenic heat flux [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 5 (2): 108–112.
- Fanger P O. 1972. Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering [M]. New York: McGraw-Hill, 1–244.
- Feng Jinming, 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.
- 广州市统计局. 2001–2012. 广州市统计年鉴 (2001–2012) [M]. 北京: 中国统计出版社. Statistics Bureau of Guangzhou Municipality. 2001–2012. Guangzhou Statistical Yearbook 2001–2012 [M] (in Chinese). Beijing: China Statistics Press.
- 何晓凤, 蒋维楣, 陈燕, 等. 2007. 人为热源对城市边界层结构影响的数值模拟研究 [J]. 地球物理学报, 50 (1): 74–82. He Xiaofeng, Jiang Weimei, Chen Yan, et al. 2007. Numerical simulation of the impacts of anthropogenic heat on the structure of the urban boundary layer [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (1): 74–82.
- 霍飞, 陈海山. 2010. 人为热源对城市热岛效应影响的数值模拟试验 [J]. 气象与减灾研究, 33 (3): 49–55. Huo Fei, Chen Haishan. 2010. Numerical simulation of the effect of anthropogenic heat on UHI [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 33 (3): 49–55.
- International Energy Agency. 2008. World Energy Outlook 2008 [M]. France: STEDI MEDIA, 569.
- International Energy Agency. 2009. World Energy Outlook 2009 [M]. France: LESCURE THEOL, 691.
- 林秀丽, 汤大钢, 丁焰, 等. 2009. 中国机动车行驶里程分布规律 [J]. 22 (3): 377–380. Lin Xiuli, Tang Dagang, Ding Yan, et al. 2009. Study on the distribution of vehicle mileage traveled in China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 22 (3): 377–380.
- Kimura F, Takahashi S. 1991. The effects of land-use and anthropogenic heating on the surface temperature in the Tokyo metropolitan area: A numerical experiment [J]. Atmos. Environ., 25B (2): 155–164.
- 乞建勋, 张昆. 2010. 我国沿海地区电能利用效率分析 [J]. 中国电力教育, (31): 250–252. Qi Jianxun, Zhang Kun. 2010. Analysis of power energy utilization efficiency in coastal areas of China [J]. China Electric Power Education (in Chinese), (31): 250–252.
- Quah A K L, Roth M. 2012. Diurnal and weekly variation of anthropogenic heat emissions in a tropical city, Singapore [J]. Atmos. Environ., 46: 92–103.
- Sailor D J. 2011. A review of methods for estimating anthropogenic heat and moisture emissions in the urban environment [J]. International Journal of Climatology, 31 (2): 189–199.
- Sailor D J, Lu L. 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, 戴铁, 檀赛春, 等. 2010. 全球年平均人为热释放气候强迫的估算 [J]. 气候变化研究进展, 6 (2): 119–122. Shi Guangyu, Dai Tie, Tan Saichun, et al. 2010. Preliminary estimate of the global average annual climate forcing resulted from anthropogenic heat release [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 6 (2): 119–122.
- Small R D. 1991. Environmental impact of fires in Kuwait [J]. Nature, 350 (6313): 11–12.
- 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.
- 王志铭, 王雪梅. 2011. 广州人为热初步估算及敏感性分析 [J]. 气象科学, 31 (4): 422–430. Wang Zhiming, Wang Xuemei. 2011. Estimation and sensitivity test of anthropogenic heat flux in Guangzhou [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (4): 422–430.
- 许挺, 张磊, 梁一桥. 2011. 电动汽车的能耗效率分析及提高能耗经济性的研究 [J]. 能源工程, (2): 1–5. Xu Ting, Zhang Lei, Liang Yiqiao. 2011. Analysis on energy consumption efficiency of electric vehicle and the solutions to improve the energy consumption economy [J]. Energy Engineering (in Chinese), (2): 1–5.
- 杨玉华, 徐祥德, 翁永辉. 2003. 北京城市边界层热岛的日变化周期模拟 [J]. 应用气象学报, 14 (1): 61–68. Yang Yuhua, Xu Xiangde, Weng Yonghui. 2003. Simulation of daily cycle of boundary layer heat island in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (1): 61–68.
- Zhang Ning, Gao Zhiqiu, Wang Xuemei, et al. 2010. Modeling the impact of urbanization on the local and regional climate in Yangtze River Delta, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 102 (3–4): 331–342.