

朱新胜, 朱宽广, 谢旻, 等. 2016. 江苏省人为热排放现状及未来变化趋势分析 [J]. 气候与环境研究, 21 (3): 306–312. Zhu Xinsheng, Zhu Kuanguang, Xie Min, et al. 2016. Present distribution and future change of anthropogenic heat fluxes in Jiangsu Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (3): 306–312, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15171.

江苏省人为热排放现状及未来变化趋势分析

朱新胜^{1,2} 朱宽广² 谢旻² 黄安宁² 欧阳琰¹ 陈飞¹ 赵卫¹

¹ 环境保护部南京环境科学研究所, 南京 210042

² 南京大学大气科学学院, 南京 210093

摘 要 依据 1990~2013 年江苏省能源消费统计资料和 1990、1995、2000、2005、2010 年的人口空间分布数据, 估计江苏省人为热排放量、探讨其时空分布特征并预测其未来变化趋势。研究结果表明, 20 多年来江苏省的人为热排放量持续增长, 从 1990 年全省平均的 0.59 W/m^2 增加到 2013 年的 2.85 W/m^2 。排放的空间分布也不均匀, 总体上江苏南部地区的排放通量高于江苏北部。近些年江苏省的人为热排放已成为区域问题, 高值区已连接成片, 2010 年江苏省大部分地区的人为热排放高于 2.5 W/m^2 , 南部主要城市排放通量大于 10 W/m^2 、北部城市也多大于 5 W/m^2 。江苏各城市的城区人为热排放通量稳步增长, 2002 年后增长加速、增量最高可达到 $2 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在 2030 年和 2050 年江苏省的平均人为热排放通量将分别达到 5.7 W/m^2 和 9.1 W/m^2 , 可能对中国东部的气候和大气环境产生重要影响。

关键词 人为热 能源消费 气候强迫 城市化 江苏

文章编号 1006-9585 (2016) 03-0306-07

中图分类号 X57

文献标志码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15171

Present Distribution and Future Change of Anthropogenic Heat Fluxes in Jiangsu Province

ZHU Xinsheng^{1,2}, ZHU Kuanguang², XIE Min², HUANG Anning², OUYANG Yan¹,
CHEN Fei¹, and ZHAO Wei¹

¹ Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract The energy consumption and demographic data in Jiangsu Province have been exploited to estimate the anthropogenic heat emissions over Jiangsu Province. The spatial and temporal variations of anthropogenic heat emissions and their possible changes in the future are analyzed. Results show that the annual average anthropogenic heat flux in Jiangsu Province has been continuously increasing since 1990. The mean value averaged over Jiangsu Province increases from 0.59 W/m^2 in 1990 to 2.85 W/m^2 in 2013. The spatial distribution of anthropogenic heat flux is inhomogeneous, and the emission flux in southern Jiangsu is higher than that in northern Jiangsu. High emissions usually occur in urban areas.

收稿日期 2015-07-15; **网络预出版日期** 2016-03-07

作者简介 朱新胜, 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 工程师, 主要从事大气环境污染及其影响评价研究。E-mail: 12607795@qq.com

通讯作者 谢旻, E-mail: minxie@nju.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金面上项目 41475122, 国家环境保护公益性行业科研专项 201409008, 环境保护部南京环境科学研究所中央级公益性科研院所基本科研业务专项

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41475122), National Special Fund for Environmental Protection Research in the Public Interest (Grant 201409008), Special Fund for Basic Scientific Researches of Central Public Research Institutes from Nanjing Institute of Environmental Sciences MEP

In 2010, the regional average value of anthropogenic heat flux over Jiangsu is about 2.5 W/m^2 . The high values over urban areas in southern Jiangsu are greater than 10 W/m^2 , while those in urban areas in northern Jiangsu are larger than 5 W/m^2 . The anthropogenic heat emissions over all urban areas in Jiangsu Province have been steadily increasing. After 2002, the increasing rate accelerates and reaches up to $2 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Based on the present trends of energy consumption and population growth, the mean anthropogenic heat flux over Jiangsu is projected to be 5.7 W/m^2 and 9.1 W/m^2 in 2030 and 2050, respectively. The above results imply that anthropogenic heat emissions may exert significant influences on regional climate and air quality in East China.

Keywords Anthropogenic heat, Energy consumption, Climate forcing, Urbanization, Jiangsu

1 引言

在工商业发达、人口密集的城市地区, 能源消耗、机动车尾气排放和人体新陈代谢产生的热量进入大气, 会对局地气候和空气质量产生重要影响 (Oke, 1988; Taha, 1997)。多年的研究表明, 上述人为热排放会影响城市大气边界层的热力学特性, 是导致城市热岛形成的重要因素之一 (Khan and Simpson, 2001; Block et al., 2004; Fan and Sailor, 2005; Xie et al., 2015)。因此, 研究人为热的排放特征有利于揭示人类活动对地表能量平衡的影响, 正确估计人为热排放量有助于提高城市气象和空气质量模拟的准确度 (Xie et al., 2015)。

过去, 国内外学者已经对不同尺度和不同地区的人为热排放量进行了定量研究。例如, Flanner (2009)、石广玉等 (2010) 估计了全球尺度人为热排放, 认为全球平均值约为 0.028 W/m^2 。谢旻等 (2015) 研究了中国人为热问题, 发现 1985~2013 年平均排放通量从 0.09 W/m^2 增长到了 0.38 W/m^2 。在城市尺度上, Ichinose et al. (1999) 估计得到东京城区的平均值在冬季日间可达 400 W/m^2 ; Quah and Roth (2012) 研究新加坡的商业区, 发现其人为热排放最大值可达 113 W/m^2 ; Sailor and Lu (2004) 对美国 6 个大城市的研究表明: 人为热排放通量的夏季和冬季平均值分别达到 60 W/m^2 和 75 W/m^2 , 峰值出现在早晚交通高峰。近年来, 长江三角洲地区的人为热排放量急剧增长, 引起了研究者的关注。陈兵等 (2011) 基于全国的估计结果, 得到上海、江苏、浙江的平均排放通量分别为 16.54 、 2.32 、 1.60 W/m^2 。何晓凤等 (2007) 估计了部分长三角城市的排放量, 发现南京和杭州的平均值分别为 40 W/m^2 和 50 W/m^2 。陆燕等 (2014) 基于长三角经济区 12 个主要城市的统计数据估计了各城市的工业、交通、建筑和人体新陈代谢排放热, 发现上海、苏州、无锡、杭州和南京的排放总量约占研究区域总量

($1.4 \times 10^{19} \text{ J/a}$) 的 71%。

江苏省地处长江三角洲地区, 人口集中、城镇化发展迅速、经济高速发展、能源消费量不断增加。然而, 在过去的研究中, 研究者较少专门针对江苏省人为热排放进行估计, 大多基于全国或区域的研究结果 (陈兵等, 2011; 谢旻等, 2015; 朱宽广等, 2015), 或者仅针对江苏部分城市 (何晓凤等, 2007; 陆燕等, 2014) 开展相关研究。由于所用的估计方法和统计资料 (能源消耗项目分类、数据来源等) 各不相同, 上述关于江苏省的结果多有出入。此外, 过去的人为热排放量估计工作大部分并未给出网格化排放清单, 不能满足高时空分辨率的环境和气候研究需要。因此, 为正确认识江苏省人为热排放特征、建立数值模拟所需的网格化数据, 本文利用 1990~2013 年江苏省的能源消费统计资料以及部分年份网格化的人口数据, 研究了江苏省高时空分辨率的人为热排放情况, 探讨了其发展趋势。细致研究江苏省人为热的空间分布, 合理估计其随时间的变化规律以及未来的发展趋势, 对长江三角洲地区以及江苏省的环境与经济协调发展、城市合理布局、有效适应气候变化等工作有重要的学术意义和参考价值。

2 方法和数据

本研究的区域覆盖 ($30.5^\circ\text{N} \sim 35.5^\circ\text{N}$, $116^\circ\text{E} \sim 122^\circ\text{E}$), 包括整个江苏省。估计人为热排放量时, 研究区域分为 144×120 网格, 网格分辨率为 $2.5'$ (纬度) $\times 2.5'$ (经度)。在每个格点上计算年平均排放量, 据此得到人为热排放的空间分布情况。基于 Flanner (2009)、陈兵等 (2011)、谢旻等 (2015) 的工作, 本研究将人为热分为能源消费和人体新陈代谢产生的热量两部分, 每个格点上的具体计算公式如下:

$$Q = \frac{\eta \times C \times (M_i + M_v + M_r + M_o)}{t \times S} + P \times Q_m, \quad (1)$$

其中, Q 是单个格点的人为热通量 (单位: W/m^2); η 是格点上能源消费量对全省能源消费量的贡献率; C 是单位标准煤释放的热量, 基于前人研究 (Flanner, 2009; 谢旻等, 2015) 取值为 $2.927 \times 10^7 \text{ J/kg}$; M 是指在统计年份江苏省各项能源消费量, 其中下标 i 、 v 、 r 、 o 分别表示工业、交通运输、生活消费和其它的能源消费量 (来自相关统计数据, 已换算成标准煤的消费量, 单位: kg); t 为统计时间 ($365 \times 24 \times 3600 \text{ s}$); P 和 S 分别是格点上的人口数量和格点的面积 (单位: m^2); Q_m 是人体每天新陈代谢所释放的热通量, 可以通过人在不同时刻新陈代谢率加权平均估算出来, 每个格点上 Q_m 的计算公式如下:

$$Q_m = Q_d \times \eta_1 + Q_n \times \eta_2, \quad (2)$$

其中, Q_d 、 Q_n 分别是人体白天活动和晚上休息时的新陈代谢功率, η_1 和 η_2 分别是白天和晚上对应的时间加权系数。基于 Fanger (1972) 和 Guyton (1986) 的研究结果, 本研究对人们坐着、行走、剧烈活动和睡眠这四种状态取加权平均, 得到白天每人新陈代谢的平均功率 Q_d 为 175 W , 晚上每人新陈代谢平均功率 Q_n 为 75 W 。按白天 16 h 和晚上 8 h , 得到时间加权系数 η_1 和 η_2 分别为 $0.667 (16/24)$ 和 $0.333 (8/24)$ 。

上述估算中, 1990~2013 年江苏省的能源消耗、经济、人口总量等数据来自《江苏省统计年鉴》([http://www.jssb.gov.cn/\[2015-06-18\]](http://www.jssb.gov.cn/[2015-06-18])), 同时还参考了江苏省重要城市 (如南京等) 的相关统计资料。当各项能源消耗数据 (M_i 、 M_v 、 M_r 、 M_o) 缺失时, 本研究用总的能源消费量代替各项能源消费量总和 ($M_i + M_v + M_r + M_o$)。1990、1995、2000、2005 和 2010 年空间分布的人口数据资料来自于哥伦比亚大学的社会经济数据和应用中心, 网格分辨率为 $2.5' (\text{纬度}) \times 2.5' (\text{经度})$ 。为保障空间分布数据的准确性, 本研究对城市网格点的人口数据进行统计, 若数值明显不同于统计年鉴的, 将依据省市的人口统计数据对网格数据进行订正。

3 结果和讨论

3.1 江苏省人为热排放的时间变化特征

图 1 给出了江苏省 1990~2013 年人为热年排放量的区域平均值和空间最大值的时间变化曲线, 可见 20 多年来, 该省的人为热排放不断增强。

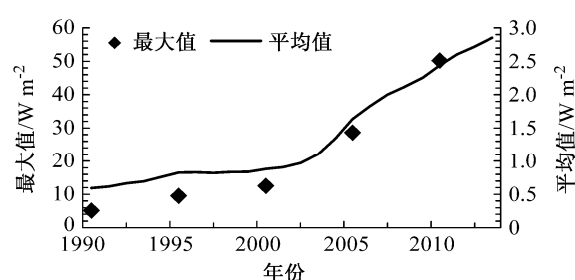


图 1 江苏省人为热年排放量的区域平均值和空间最大值的时间变化曲线

Fig. 1 Temporal variations of area average and maximum of mean annual anthropogenic heat fluxes over Jiangsu Province

区域平均值和空间最大值的变化趋势基本一致, 在 2002 年之前平缓增长、之后急速增加。区域平均值从 1990 年的 $0.59 \text{ W}/\text{m}^2$ 增至 2013 年的 $2.85 \text{ W}/\text{m}^2$, 23 年增长了接近 4 倍。空间最大值在 2010 年为 $50 \text{ W}/\text{m}^2$, 是 1990 年数值 ($5 \text{ W}/\text{m}^2$) 的 10 倍。何晓凤等 (2007) 研究发现, 人为热源对清晨城市边界层逆温结构有破坏作用, 会明显升高夜间近地层气温 $0.5 \sim 1.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 南京人为热排放对城市热岛贡献率为 29.6%; Flanner (2009) 的研究指出, 当格点的人为热通量超过 $3 \text{ W}/\text{m}^2$ 时, 会使格点处的年平均温度增加 $0.15 \text{ }^\circ\text{C}$, 行星边界层高度增加 32 m 。因此, 江苏省的人为热排放不断增加, 将对城市局地小气候和空气污染造成重要影响, 甚至影响区域平均气温和边界层高度。

对江苏省人为热排放通量的变化趋势进行 Mann-Kendall 检验 (图 2), 可见 1995 年后 UF 值开始超过 0.001 显著性水平的临界线 ($u_{0.001}=2.56$), 表明江苏省人为热排放通量有显著的增长趋势。曲线 UF 和曲线 UB 的交点位置在 2002 年, 也说明了江苏省人为热排放通量从 2002 年开始增长的趋势加快。这可能是由于 2002 年后经济快速发展、能源消耗量急速上升造成的。从《江苏省统计年鉴》([http://www.jssb.gov.cn/\[2015-06-18\]](http://www.jssb.gov.cn/[2015-06-18])) 可以发现, 1990~2002 年江苏省能源消费的年平均增量仅为 340 万吨 (标准煤), 而 2002~2013 年间其年平均增量却高达 1800 万吨 (标准煤)。

表 1 给出了江苏省的工业、交通和居民生活消费排放的人为热通量以及它们占总人为热排放的比例, 可以看到 3 部分能源消费所产生的人为热通量也是逐年递增的, 年均增幅都在 10% 左右。这主要是由近几十年江苏省的经济快速发展, 工业能源需求增加, 居民生活水平提高, 机动车保有量增加

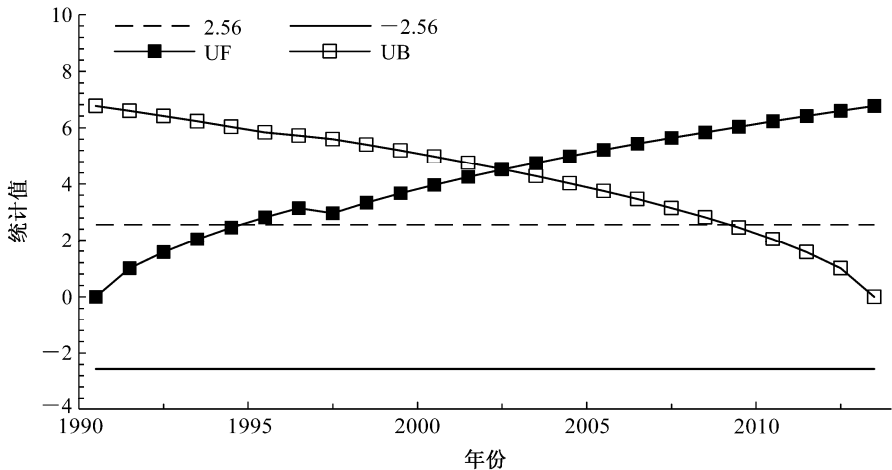


图2 江苏省人为热的 Mann-Kendall 统计量曲线
Fig. 2 The curve from the Mann-Kendall method for the variation of anthropogenic heat emissions in Jiangsu Province

表 1 江苏省工业、交通运输和居民生活消费产生的人为热通量及其占比

Table 1 The anthropogenic heat fluxes from industry, transportation, and living consumption in Jiangsu Province

年份	工业		交通		生活	
	热通量/ W m^{-2}	占比	热通量/ W m^{-2}	占比	热通量/ W m^{-2}	占比
2002	0.65	66.8%	0.05	5.1%	0.07	6.7%
2003	0.80	72.4%	0.07	5.9%	0.07	6.7%
2004	1.01	75.7%	0.08	5.9%	0.08	5.6%
2005	1.29	78.9%	0.08	5.0%	0.10	6.2%
2006	1.41	77.4%	0.09	4.7%	0.11	5.8%
2007	1.59	79.4%	0.10	4.8%	0.12	5.8%
2008	1.67	78.6%	0.11	5.1%	0.13	6.3%
2009	1.77	78.5%	0.11	5.0%	0.15	6.5%
2010	1.89	77.5%	0.13	5.4%	0.17	7.1%
2011	2.02	77.6%	0.14	5.4%	0.18	6.8%
2012	2.08	76.5%	0.15	5.7%	0.20	7.4%
2013	2.14	75.1%	0.15	5.3%	0.23	8.2%

等因素造成的。在江苏，工业、交通、居民能源消费排放一般占总人为热排放的 80%以上，2005 年之后占比更达到了 90%。其中，占比最大的是工业能源消费产生的热量，其占比在 2002 年后开始增加，2007 年达到峰值后又逐渐减少；而居民生活消费占比则保持长期增长的趋势，在 2013 年达到最大值 8.2%；交通运输占比则稳定在 5%左右，波动较小。各人为热分量排放占比的变化与江苏省经济发展中产业结构调整密切相关。随着经济发展，劳动力由第一产业向第二、三产业发展，并随着居民收入的增加，第三产业的比重不断增强，因此导致工业能源消耗排放的占比达到一定程度后会逐渐降低，

而居民生活消费占比却逐渐增加。

3.2 江苏省人为热排放的空间分布特征

图 3 给出了 1995、2000、2005 和 2010 年江苏省人为热排放量的空间分布情况，可见排放有明显的地区差异，并且全省各地的排放均呈增长趋势。在 1995 年（图 3a），全省人为热排放的空间差异性较小，大部分区域的人为热排放通量年均值都小于 1.5 W/m^2 ，大值区（ $>2 \text{ W/m}^2$ ）主要分布在南京、扬州、泰州、常州、无锡、苏州、昆山、南通、徐州等城市地区。2000 年（图 3b）江苏省年均人为热排放的空间分布与 1995 年分布非常类似，空间差异性也小，大值区主要集中在南部城市地区，南京、扬州、常州、无锡、昆山、徐州等城市城区平均人为热排放超过了 5 W/m^2 。与 1995 年相比，2000 年的数值总体上有所增加，但增量并不明显，对照图 1 也不难发现，1990~2002 年这段时间全省平均人为热排放增长缓慢。然而，江苏北部的连云港、盐城、淮安等城市开始有了明显的人为热排放（ $>2 \text{ W/m}^2$ ）。

在 2005 年，伴随着经济快速发展，江苏省的人为热排放明显增强，成为了区域问题（图 3c）。特别是江苏南部，人为热排放大于 5 W/m^2 的区域明显增多，南京、扬州、无锡、常州、苏州以及南通的人为热排放增长很快、部分城区排放通量已经超过了 10 W/m^2 。同时，江苏北部地区的排放也有增加，大部分地区高于 1.5 W/m^2 ，徐州、淮安、宿迁、连云港、盐城等地均有超过 2.5 W/m^2 的区域，特别是徐州城区、通量超过了 10 W/m^2 。但总体上

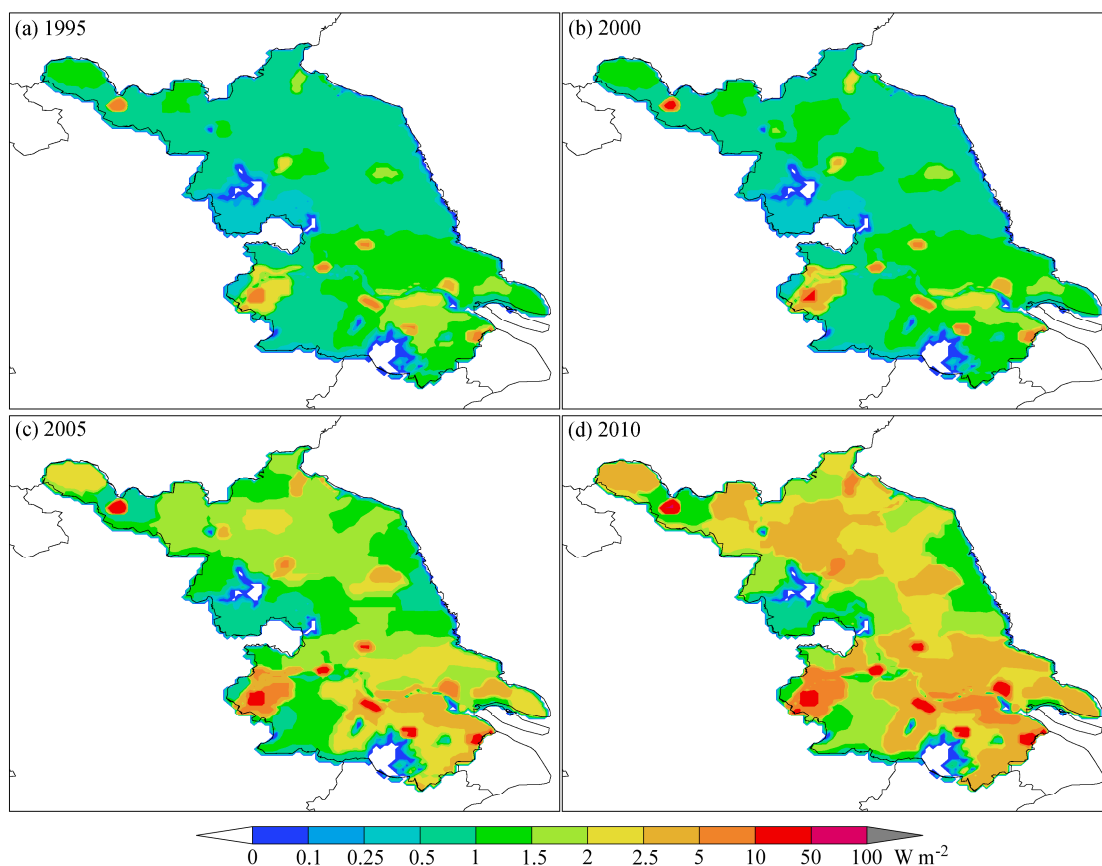


图3 1995、2000、2005、2010年江苏省人为热排放的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of anthropogenic heat flux over Jiangsu Province in 1995, 2000, 2005, and 2010

江苏北部的人为热排放明显小于南部地区。

在2010年,江苏省各地人为热通量基本在 2.5 W/m^2 以上(图3d)。整个江苏南部几乎都是人为热排放高值区。南京至上海沿线大部分区域人为热排放通量高于 5 W/m^2 ,主要城市附近数值大于 10 W/m^2 。而在江苏北部,徐州是一个高值中心区、通量值大于 10 W/m^2 ,淮安、连云港是次高值区域、通量大于 5 W/m^2 。总体上,江苏北部地区与南部地区的人为热排放通量均值更加接近。随着江苏省城市愈来愈密集,人为热排放的高值区域也会愈来愈多,大量连续的高值区可能会对整个中国东部地区的区域气候和环境空气质量产生较大影响。

3.3 江苏省人为热排放的未来发展趋势

近些年,中国经济告别了高速增长阶段、进入稳定调整期。经济结构调整取得了显著成绩,GDP依然能实现7%左右的增长目标。依据此发展速度,本研究分析了江苏省人为热排放的未来发展趋势。假设2000年后能源消费的增长趋势不变,则江苏省的能源消费 E (单位:万吨标准煤)与时间 t ($t=$

年份-1999)之间的关系可以通过下面的拟合公式得到:

$$E = 1834 \times t + 5325. \quad (3)$$

同理,假设人口的增长趋势也不变,则江苏省人口数量 Y (万人)随时间 t 的变化可由下式得到:

$$Y = 51 \times t + 7273. \quad (4)$$

根据公式(3)和公式(4)可以分别预计江苏省未来的能源消耗总量以及人口数量,进而由公式(1)和公式(2)估算得到2030年和2050年江苏省的平均人为热通量将分别达到 5.7 W/m^2 和 9.1 W/m^2 。

3.4 江苏省各城市城区人为热排放的时间变化特征及未来发展趋势

根据江苏省各个城市的城区范围,在历年人为热排放网格化清单中取出对应格点数值并求平均,得到了各城市的人为热排放通量(如表2所示)。其中,1990~2010年的排放量为3.2节中利用历史能耗及人口数据估计得到,2030年和2050年数据为利用3.3节中外推方法得到。由表2可见,从1990~2010年,江苏各城市的人为热排放通量都有

不同程度的增长。如前分析可知,随着经济的发展,人民生活以及工业生产等消耗的能源愈来愈多,而城市是人口集中的区域,因此城区人为热通量随着时间和经济发展持续上升。此外,从表 2 还可以看到,1990~2000 年江苏省各城市人为热排放通量都是稳步增长的、数值变化并不剧烈,而 2005~2010 年则增长非常迅速,年增长率明显高于 1990~2000 年,最高可达 $2 \text{ W m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。这一现象主要与 1998 年的经济危机导致我国经济增长减速以及 2001 年我国加入世界贸易组织 (World Trade Organization, WTO) 后,经济又快速增长有关。

表 2 江苏主要城市城区的年均人为热通量

Table 2 The annual mean anthropogenic heat fluxes in the urban areas of the major cities in Jiangsu Province

地区	不同年份热通量/ W m^{-2}						
	1990	1995	2000	2005	2010	2030	2050
常州	2.88	4.66	5.75	12.34	20.31	49	78
淮安	1.44	2.18	2.51	5.01	7.67	18	28
连云港	0.78	1.15	1.29	2.51	3.74	9	13
南京	5.04	7.73	9.02	18.29	28.37	67	105
南通	1.45	2.50	3.27	7.45	12.99	32	51
宿迁	0.83	1.17	1.25	2.33	3.32	7	11
苏州	3.17	5.01	6.02	12.56	20.10	48	76
泰州	3.65	5.12	5.46	10.11	14.33	32	50
无锡	2.97	4.95	6.95	14.26	16.01	35	53
徐州	2.34	4.07	5.16	11.52	19.86	49	78
盐城	0.72	1.03	1.12	2.11	3.06	7	11
扬州	2.85	4.46	5.33	11.11	17.81	42	67
镇江	2.69	4.28	5.12	10.95	17.67	42	67

从 2010 年开始,江苏省很多城市城区的平均人为热排放通量已经超过了 15 W/m^2 ,人为热对环境和气候的影响作用已经不容忽视。而从表 2 中各城市的未来人为热排放预测值来看,2050 年江苏省大部分城市城区的数值将超过 50 W/m^2 ,而南京城区的人为热通量将超过 100 W/m^2 。这些热量将会对江苏省区域的地面温度和边界层高度有重要影响,在未来区域气候和空气质量模拟中必须考虑这部分能量对模式模拟结果的影响。

4 结论

(1) 基于 1990~2013 年能源消耗及人口资料,发现江苏省人为热排放量年均值一直稳步增长,从 0.59 W/m^2 增至 2.85 W/m^2 。2002 年之前排放通量年增长率相对较小,之后随着经济快速发展、能耗急剧增加,人为热排放量迅速增长。

(2) 基于空间分布的人口资料分析江苏省人为热排放的分布特征,发现排放有明显的地区差异,高值区主要集中在江苏南部地区。2010 年江苏省各地排放通量基本超过 2.5 W/m^2 ,江苏南部高值区成片、主要城市的排放通量均大于 10 W/m^2 ;在江苏北部,徐州、淮安、连云港等地的数值大于 5 W/m^2 。

(3) 通过外推,发现未来 2030 年和 2050 年,江苏省的平均人为热通量将分别达到 5.7 W/m^2 和 9.1 W/m^2 。随着经济的发展,城市愈来愈密集,大量高值区相连,对江苏乃至整个中国东部的气候和大气环境会产生较大影响。

(4) 基于各城市的地理位置,统计得到江苏省各城市的城区人为热排放的变化特征及趋势,发现各地的排放量均逐年递增,在 2010 年大部分城市的数值都超过 15 W/m^2 ,未来部分城市的人为热排放通量将达到 100 W/m^2 。因此,人为热的作用在城市气候及环境空气质量模拟中不容忽视。

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 (12): L12211, doi: 10.1029/2004GL019852.
- 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.
- 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, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.031.
- Fanger P O. 1972. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering* [M]. New York: McGraw-Hill, 244.
- Flanner M G. 2009. Integrating anthropogenic heat flux with global climate models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (2): L02801, doi: 10.1029/2008GL036465.
- Guyton A C. 1986. *Textbook of Medical Physiology* [M]. 7th ed. Philadelphia, USA: W. B. Saunders Company, 1057.
- 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.
- Ichinose T, Shimodono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. *Atmos. Environ.*, 33 (24–25): 3897–3909, doi: 10.1016/S1352-2310(99)00132-6.
- Khan S M, Simpson R W. 2001. Effect of a heat island on the meteorology of a complex urban airshed [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 100 (3): 487–506,

- doi: 10.1023/A:1019284332306.
- 陆燕, 王勤耕, 翟一然, 等. 2014. 长江三角洲城市群人为热排放特征研究 [J]. 中国环境科学, 34 (2): 295–301. Lu Yan, Wang Qingeng, Zhai Yiran, et al. 2014. Anthropogenic heat emissions in the Yangtze River Delta region [J]. China Environmental Science (in Chinese), 34 (2): 295–301.
- Oke T R. 1988. The urban energy balance [J]. Progress in Physical Geography, 12 (4): 471–508, doi: 10.1177/030913338801200401.
- 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, doi: 10.1016/j.atmosenv.2011.10.015.
- 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, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.01.034.
- 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]. 气候变化进展研究, 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.
- Taha H. 1997. Urban climates and heat islands: Albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat [J]. Energy and Buildings, 25 (2): 99–103, doi: 10.1016/S0378-7788(96)00999-1.
- Xie M, Liao J B, Wang T J, et al. 2015. Modeling of the anthropogenic heat flux and its effect on air quality over the Yangtze River Delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 15 (22): 32367–32412, doi: 10.5194/acpd-15-32367-2015.
- 谢旻, 朱宽广, 王体健, 等. 2015. 中国地区人为热分布特征研究 [J]. 中国环境科学, 35 (3): 728–734. Xie Min, Zhu Kuanguang, Wang Tijian, et al. 2015. Study on the distribution of anthropogenic heat flux over China [J]. China Environmental Science (in Chinese), 35 (3): 728–734.
- 朱宽广, 谢旻, 王体健, 等. 2015. 长三角地区人为热时空分布特征研究 [J]. 南京大学学报 (自然科学), 51 (3): 543–550. Zhu Kuanguang, Xie Min, Wang Tijian, et al. 2015. Study of the temporal and spatial variation of anthropogenic heat flux over YRD [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 51 (3): 543–550.