

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.

中国区域人为热释放的气候强迫

陈兵^{1,2} 石广玉¹ 戴铁^{1,2} 申彦波³ 王标¹ 杨溯^{1,2} 赵剑琦¹

1 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, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 国家气候中心, 北京 100081

摘 要 研究了1978~2008年中国地区及各省、市、自治区、特别行政区人为热释放造成的气候强迫与不同地区间的人口、能源消费状况和人为热释放的气候强迫的关系, 并试图对未来人为热释放的气候强迫做出预估。结果表明, 近30年中国地区平均人为热释放造成的气候强迫迅速增加, 1978年其值约为 $0.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 但2008年则增至 $0.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。另外, 中国人为热释放的气候强迫呈典型地域分布特征, 华北、华东、华中和华南等经济发达地区明显高于周围其他地区, 而西北地区整体上来说则很小, 地区分布很不均匀。这种不均匀分布的特征, 可能对区域气候、甚至全球气候造成影响。

关键词 人为热释放 气候强迫

文章编号 1006-9585 (2011) 06-0717-06 **中图分类号** P422.4 **文献标识码** A

Climate Forcing due to Anthropogenic Heat Release over China

CHEN Bing^{1,2}, SHI Guangyu¹, DAI Tie^{1,2}, SHEN Yanbo³, WANG Biao¹,
YANG Su^{1,2}, and ZHAO Jianqi¹

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081*

Abstract The population, energy consumption, and the climate forcing for anthropogenic heat release (AHR) in China and in different provinces and areas were analyzed, as well as the relationship among them. Besides, the climate forcing for AHR in the future was predicted. The result shows that the climate forcing for AHR has greatly increased during recent 30 years. In 1978, the climate forcing for AHR is only $0.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, while it has increased to $0.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in 2008. The distribution of AHR has regional characteristics in China, that is, the climate forcing for AHR in the northwestern part of China, they is very little, while in North China, Central China, East China, and South China, they are much higher than other regions. The distribution of the climate forcing for AHR is nonuniform, and it may be very high in some regions. It may influence the regional climate, as well as the climate of China, even the world climate.

收稿日期 2010-03-18 收到, 2011-08-23 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金面上项目“人为热释放气候效应的数值模拟研究”(40775008)

作者简介 陈兵, 男, 1985年出生, 博士研究生, 研究方向为大气辐射及全球变化的数值模拟。E-mail: chenbing@mail.iap.ac.cn

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

Key words anthropogenic heat release, climate forcing

1 引言

工业革命以来,人类消费煤、石油和天然气等化石燃料的速度明显加快,在向大气中排放大量 CO_2 、 N_2O 和 CH_4 等温室气体的同时,也向大气直接释放热量,被称为人为热释放或人为热污染。人类活动释放出的温室气体和气溶胶,主要通过改变大气的组成和性质,影响地气系统的能量平衡,导致气候变化;而人为热释放则可直接加热地面和近地层大气,影响局地能量平衡,对局地气候产生影响。

为了应对全球气候变化问题,世界各国正在争论所谓“减排”问题,即减少温室气体的排放以阻止或延缓全球变暖。的确,减少化石燃料的消费,改用其他“清洁”或可再生能源,诸如太阳能、风能、水能、潮汐能以及核能等,均可以减缓大气温室气体浓度的增加。但研究表明,人口增加、GDP 增长以及能源消费基本上是成正比的,这就意味着经济的增长必然伴随能源消费的增长,而一切能源消费的最终结果是向大气排放热量。因此,即使不使用化石燃料,但这种直接的热释放对于全球气候仍然会产生影响。(李学勇等,2007;石广玉,2007;石广玉等,2010)。

“热岛效应”就是一种典型的局地热污染,多年来许多学者已对此进行了很多研究。例如,Ichinose et al. (1999) 对东京的人为热释放研究表明,在市中心,昼间人为热释放通量可以达到近 $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,在冬季人为释放热通量的最大值达到了 $1950 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。对北京的人为热释放研究表明,市区的最大值接近 $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,使得城区昼间温度提高 0.5°C 左右,夜间温度增加 $1\sim 3^\circ\text{C}$ (佟华等,2004)。这些例子说明,局地人为热释放所造成的气候强迫远远超过了大气中 CO_2 浓度加倍引起的 $3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射强迫 (Christensen et al., 2007)。对上海近 50 年气温变化研究表明,城郊温差增温率为 $0.23^\circ\text{C} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ (曹爱丽等,2008),冬季热岛强度最大可达到 5.6°C ,城市热岛效应显著 (孙娟等,2007)。显而易见,它们已经具有显著的局地气候效应。

值得注意的一个问题是,随着全球人口和经济的快速增长,城市化必将日益加剧,“热岛效应”有可能从局地问题变成一个区域问题,进而影响全球气候。就中国来说,近年来的快速发展,能源消费的大量增加,城镇化的加速,导致各地的热污染大幅度增加;研究其地理分布,并探讨其与人口、能源消费的关系,显然是有意义的,这是本文的目的。

2 资料来源

本文采用了《中国统计年鉴 2009》(中华人民共和国国家统计局,2009)中有关中国全国和各省区的人口、能源消费等资料。澳门和台湾主要依据《中国统计年鉴 2009》,香港地区参考了《香港能源统计季刊—2009》(中华人民共和国香港特别行政区政府统计处,2009)等资料。

3 计算方法

人为热释放作为可能引起局地和全球气候变化的因子之一,可以定义其气候强迫在数值上等于单位面积、单位时间内由于人类活动而释放到大气中的热量大小。它主要包括能源消费和人体新陈代谢两个部分 (石广玉等,2010),即

$$A = A_E + A_P, \quad (1)$$

其中 A_E 和 A_P 分别表示能源消费和人体新陈代谢作用所产生的气候强迫。相对于能源消费,人体新陈代谢的气候强迫非常小,通常可忽略不计,但本文为了较全面的考查人为热释放气候强迫的大小,在计算中考虑了它的作用。

能源消费所产生的气候强迫 A_E 可以通过如下公式计算获得,

$$A_E = \frac{MC}{ST}, \quad (2)$$

其中, M 是积分时间内消费的能源总量; C 为每吨标准煤所产生的热量,为 $292.7 \times 10^5 \text{ kJ}$; T 为积分总时间,通常以 a 作为单位,本文将其换算成以 s 为单位; S 为积分的区域面积,换算成以 m^2 为单位。

对人体新陈代谢所产生的气候强迫 A_P 的计算, 采用公式

$$A_P = \frac{(P_1 t_1 + P_2 t_2) N}{ST}, \quad (3)$$

其中, P_1 、 P_2 分别表示睡眠和非睡眠期间人体的平均代谢率, P_1 约为 75 W, P_2 约为 175 W (Fanger, 1972; Fulton, 1984); t_1 、 t_2 分别表示积分时间内人体的睡眠时间和非睡眠时间, 并假定一天当中睡眠时间为 8 h, 其余时间为正常工作生活时间, 以 s 为单位。T 通常以 a 为单位, 换算成以 d 为单位。N 为总人口数。

4 全国年平均人为热释放的气候强迫的估算

中国改革开放 30 多年来, 经济迅速增长, 能源消费剧增, 人口快速增长。如表 1 所示, 自 1978 年以来, 中国人口总量基本处于线性增长, 从 1978 年的 96000 万增至 2008 年的近 133000 万。中国能源消费总量处于快速增长趋势, 特别是从 2000 年开始, 中国的能源消费增长迅猛 (见图 1)。从 1978 年的 5.7 亿吨标准煤, 到 2008 年

增长了 4 倍, 能源消费达到了 28.5 亿吨标准煤。

表 1 中国人口总量

Table 1 Total population of China

年份	人口数 ($\times 10^4$)	年份	人口数 ($\times 10^4$)
1978	96259	1998	124761
1980	98705	1999	125786
1985	105851	2000	126743
1990	114333	2001	127627
1991	115823	2002	128453
1992	117171	2003	129227
1993	118517	2004	129988
1994	119850	2005	130756
1995	121121	2006	131448
1996	122389	2007	132129
1997	123626		

中国区域人为热释放的平均气候强迫增长非常迅速 (见图 2)。1978 年的人为热释放的气候强迫为 $0.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 到 2008 年已经增长到 $0.30 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。中国区域内年平均人为热释放的气候强迫 Y 与能源消费 X_1 和人口量 X_2 的关系为

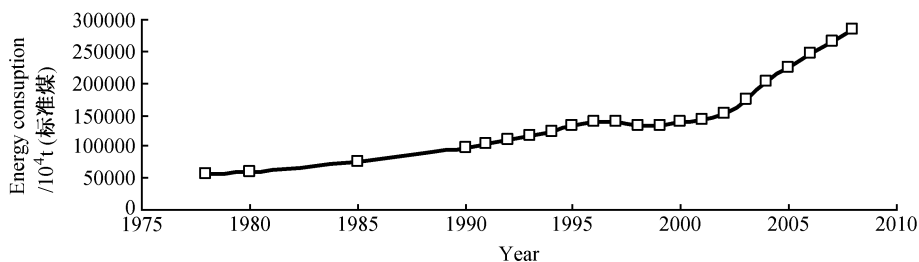


图 1 中国能源消费总量

Fig. 1 Total energy consumption in China

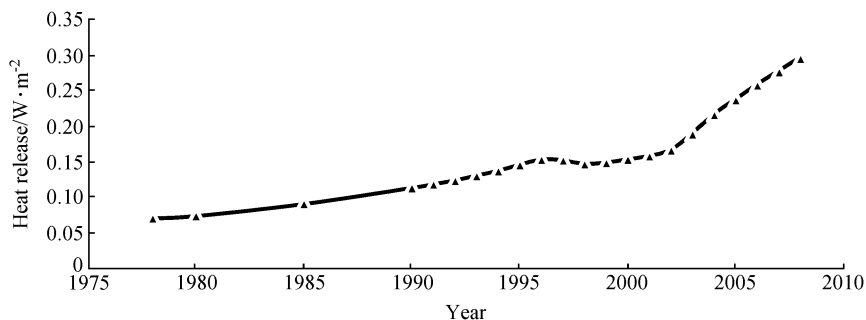


图 2 中国区域年平均人为热释放的气候强迫

Fig. 2 The mean climate forcing due to anthropogenic heat release in China

$$Y = 9.67 \times 10^7 X_1 + 1.48 \times 10^{-7} X_2,$$

其中人为热释放的气候强迫与能源消费相关系数接近于 1, 表明中国能源消费是影响人为热释放的气候强迫的关键因素。

人为热释放已经成为一个不可忽视的影响中国区域气候变化的重要因子, 并且影响程度在逐渐加大。按照中国能源消费和人口的增长趋势, 预计到 2050 年人为热释放的气候强迫可增长到 $0.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而主要经济发达地区人为热的气候强迫增长更快, 可能远高于全国平均值。

5 各省区人为热释放的气候强迫

中国各省区平均人为热释放的气候强迫的分布如图 3 所示。受人为热释放影响较大的地区一般都是工业发达、耗能多的地区, 华北、华东地区以及东南沿海地区受人为热污染影响严重。华北地区, 整体上工业耗能多, 人口密度大, 大城市比较集中, 人为热释放的气候强迫较大。北京、天津、河北和山西 4 省区平均人为热释放的气候强迫达 $1.51 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。其中人为热释放的气候强迫在北京市的值达 $4.00 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 天津为 $5.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 河北省为 $1.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 山西省为 $1.09 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。东北地区整体上人为热释放的气

候强迫不大, 其中辽宁省较大, 为 $1.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。华东地区是人为热污染影响严重的地区, 其中山东、上海、江苏和浙江 4 省区较为严重。华东地区山东、上海、江苏和浙江 4 省区平均人为热释放的气候强迫达到 $1.65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 远高于全国平均值。上海市的人为热释放的气候强迫为 $16.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 而在江苏、山东和浙江分别为 $2.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $2.16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $1.60 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。华中地区整体上人为热污染不显著, 河南省平均人为热释放造成的气候强迫较大, 为 $1.33 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其余地区热污染不显著。华南地区整体上人为热污染影响不明显, 但局地偏大。广东省平均人为热污染的严重程度最高, 其造成的气候强迫达 $1.40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 广西和海南两省区相对较小。西南地区整体上热污染影响不大, 重庆平均人为热释放的气候强迫最大, 为 $0.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其余省区皆较小。西北地区整体上人为热污染影响很小, 人为热释放的气候强迫在宁夏和陕西较大, 分别为 $0.58 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $0.42 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 其余地区人为热污染影响很小。港澳台地区整体上受人为热污染影响严重, 远高于全国平均值。澳门地区人为热释放产生的气候强迫超过了 $300 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 仅澳门地区 2008 年由于电力消费所产生的气候强迫就高达 $12.80 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。香港和台湾地区由人为热释放造

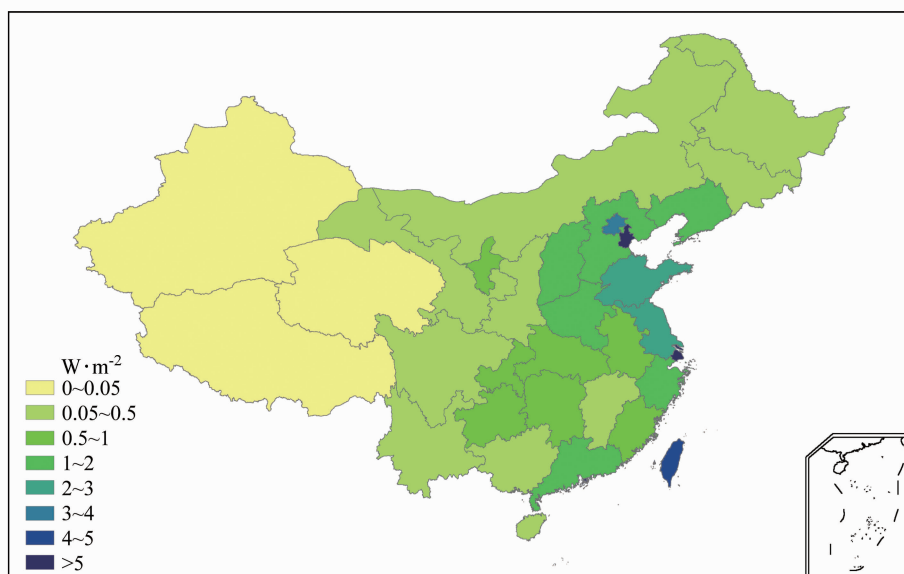


图 3 中国各省区人为热释放的气候强迫分布

Fig. 3 The distribution of climate forcing due to anthropogenic heat release in the areas of China (unit: $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)

成的气候强迫分别为 $5.40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $4.40 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

经以上分析，中国的人为热污染总体上呈典型的地域分布特征，这也与经济发展密切相关。华北地区、华东地区、辽东半岛、东南沿海地区及港澳台地区人为热污染较为严重。而随着经济的发展和城市化的进程加快，华北地区、华东、华中和华南地区以及东南沿海地区将形成一个热污染的高值区，而这一区域形成的一个大面积的加热大气的热源，其对未来的气候影响以及在中国气候变化中的作用值得密切关注和研究。

6 结语和讨论

(1) 中国区域平均人为热释放的气候强迫 1978 年为 $0.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，到 2008 年增至 $0.28 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，按照目前的增长趋势，预计到 2050 年将增至 $0.86 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。人为热污染对中国区域的气候的影响在逐渐加大。中国区域内人为热释放造成的气候强迫地区分布很不均匀，局部地区人为热释放造成的气候强迫比较大，可能对局部地区乃至中国气候变化产生影响。

(2) 中国的人为热污染主要是由能源消费所致，其分布具有典型的地域分布的特征，与经济发展紧密相关。华北地区、华东和以及东南沿海经济发达区以及港澳台地区都是人为热污染较严重地区。

(3) 随着中国经济的发展和城市化进程的加速，华北、华东以及华中、华南地区将形成一个大面积的人为热污染的高值区，这一区域内对于中国区域气候的影响和在中国气候变化中的作用很具有研究意义。

人类活动通过改变大气成分，影响下垫面的性质以及消费化石燃料，排放大量的热量而对气候造成了深刻的影响。对人为热释放的初步研究表明，人为热释放是一个影响区域气候甚至全球气候变化的重要因子之一。从人为热污染对气候的影响程度来看，在区域性气候的范围内比 CO_2 等温室气体所造成的辐射强迫的改变对气候的影响要大，甚至高于 CO_2 加倍所造成的气候强迫 ($3.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) (Christensen et al., 2007)。因此，由人为热释放造成的气候强迫对气候变化的影响是不可忽视的。人为热释放对整个地气系统

的能量平衡以及对区域气候甚至全球气候都有影响。人为热释放造成的气候强迫对气候的影响途径和物理过程的考虑，很具有研究意义。利用美国能源部的美国能源消费资料 (<http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/overview.html> [2010 - 02 - 18]) 计算得到美国 2007 年平均人为热释放造成的气候强迫为 $0.36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。相比而言，美国人为热污染比中国更为严重。虽然目前很多研究都集中于城市气候的研究 (Arnfield, 2003; Fan and Sailor, 2005; Smith et al., 2009)，在世界范围内考察人为热释放排放的不均匀以及由此造成对生态、气候和环境的影响很具有研究潜力。相对于气溶胶研究和温室气体对气候的影响，人为热释放是气候不可忽视的一个重要的影响因子。未来研究将集中于考虑如何在气候模式里研究人为热释放对气候的影响。人为热释放对全球气候的影响以及区域气候的作用值得深入研究。

参考文献 (References)

- Arnfield J. 2003. Review two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island [J]. *Int. J. Climatol.*, 23: 1-26.
- 曹爱丽, 张浩, 张艳, 等. 2008. 上海近 50 年气温变化与城市化发展的关系 [J]. *地球物理学报*, 51 (6): 1663-1669. Cao Aili, Zhang Hao, Zhang Yan, et al. 2008. Decadal changes of air temperature in Shanghai in recent 50 years and its relation to urbanization [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51 (6): 1663-1669.
- Christensen J H, Hewitson B, Busuioc A, et al. 2007. Regional climate projections [M] // *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Solomon S, Qin D, Manning M, et al, Eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996pp.
- Fanger P O. 1972. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering* [M]. New York: McGraw-Hill, 1-244.
- Fulton P N. 1984. Estimating the Daytime Population with the Urban Transportation Planning Package [M]. Washington D. C. : Transportation Research Record, 25-27.
- 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: 73-84.

- Ichinose T, Shimodozono K, Hanaki K. 1999. Impact of anthropogenic heat on urban climate in Tokyo [J]. *Atmos. Environ.*, 33 (24–25): 3897–3909.
- 李学勇, 秦大河, 李家洋, 等. 2007. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 1–422. Li Xueyong, Qin Dahe, Li Jiayang, et al. 2007. National Assessment Report on Climate Change [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 1–422.
- 石广玉. 2007. 大气辐射学 [M]. 北京: 科学出版社, 319–327. Shi Guangyu. 2007. The Radiation in the Atmosphere [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 319–327.
- 石广玉, 戴铁, 檀赛春, 等. 2010. 人为热释放全球年平均气候强迫的估算 [J]. *气候变化研究进展*, 6 (2): 119–122. Shi Guangyu, Dai Tie, Tan Saichun, et al. 2010. Preliminary calculation of the global annual climate forcing for anthropogenic heat release [J]. *Advance in Climatology Change Research* (in Chinese), 6 (2): 119–122.
- Smith C, Lindley S, Levermore G. 2009. Estimating spatial and temporal patterns of urban anthropogenic heat flux for UK cities: The case of Manchester [J]. *Theor. Appl. Climatol.*, 98: 19–35.
- 孙娟, 束炯, 乐群, 等. 2007. 上海市城市热岛效应的时间多尺度特征 [J]. *华东师范大学学报 (自然科学版)*, 2: 36–43. Sun Juan, Shu Jiong, Yue Qun, et al. 2007. Multi-scale characteristics of the urban heat island intensity in Shanghai [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)* (in Chinese), 2: 36–43.
- 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 Zhihui, Sang Jianguo, et al. 2004. The influence on the heat environment in Beijing caused by anthropogenic heat release [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 9 (3): 409–421.
- 中华人民共和国香港特别行政区政府统计处. 2009. 香港能源统计季刊—2009 [R]. 第一季, 第二季, 第三季, 1–28. Census and Statistics Department, Hong Kong Special Administrative Region, People's Republic of China. 2008. Hong Kong energy statistics 2009 Quarterly Report [R]. 1st, 2nd, and 3th Quarter, 1–28.
- 中华人民共和国国家统计局. 2009. 中国统计年鉴 2009 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1074pp. National Bureau of Statistics of China. 2009. China Statistical Yearbook 2009 [M] (in Chinese). Beijing: China Statistics Press, 1074pp.