

# 局地气温与人为热释放关系的模型研究

牛强<sup>①\*</sup>, 聂超群<sup>①</sup>, 林峰<sup>①</sup>, 李玲<sup>②</sup>, 季路成<sup>①</sup>

① 中国科学院工程热物理研究所, 先进能源动力重点实验室, 北京 100190;

② 中国科学院国家科学图书馆, 北京 100190

\* E-mail: niuqiang@iet.cn

收稿日期: 2011-09-19; 接受日期: 2011-10-28

中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(批准号: KGCX2-YW-356)

**摘要** 近几十年来全球变暖的同时, 城市局部区域普遍出现了更为突出的气温上升. 城市通常是人类社会的中心, 研究城市局地气温的变化规律有助于我国进行城市发展规划以减缓城市气温上升、以及更全面的认识气候变暖的原因, 并能够为我国提出更合理的国际能源制度提供一定的理论支撑. 局地升温与全球变暖的机理有所不同: 能源消费产生的热量(人为热释放)在短期内集中于城市区域, 会对局地气温产生明显的影响. 基于这一观点, 本文建立了结构化热力学模型, 将城市局地环境划分为 Human, Local, Outer 三个区域, 结合热力学基本定律分析了各区域热量和气温的变化规律, 明确了 Human 区域人为热释放对城市局地气温的作用. 研究表明: 人为热释放对局地气温的升高起着近似线性的推动作用, 人为热释放越强这种推动作用越明显. 之后本文对模型研究结论进行了验证, 验证研究以国家统计数据为依据, 运用线性拟合外推法以及 Pearson 统计相关方法, 对我国各省会城市以往气温与人为热释放数据进行了分析. 结果表明: 大部分省会城市的气温变化与人为热释放之间基本遵循线性的依赖关系, 而且在空间和时间维度上这种线性关系都随着人为热释放的增加而更加明显. 统计研究得到的规律与模型结论有着较好的对应, 较好的验证了模型研究的合理性.

**关键词**  
局地气温  
能源消费  
热力学模型  
人为热释放

近年来, 地球环境的一系列变化<sup>[1-8]</sup>, 使得以 CO<sub>2</sub> 为主的温室气体对全球气温的影响已经成为科学, 政治, 经济等各个领域十分关注的问题. 针对温室气体是否是导致气候变暖的主因, 当前仍然存在激烈的争论, 这样的舆论大环境容易让事实迷失在各种观点的交锋中. 事实上, 气温变化是非常复杂的过程. 作者认为, 分析气温的变化趋势及其影响因素首先要分清这种变化的时间和空间尺度, 也就是说, 短期(以十年为单位)和长期(以万年为单位), 整体(以全球为空间尺度)和局部(城市范围)的气温分布规律

可能是完全不同的. 在万年的时间尺度下, 温室气体浓度与气温确实有着很好的吻合<sup>[9]</sup>. 然而我们当前更关注的是人类活动对气温的影响, 而人类有能力对气温变化产生较大影响的时间不足百年. 因此作者认为: 考察人类活动对气温的影响首先应把时间尺度定在百年之内, 其次应把空间尺度定为能源消费集中区域(城市), 这样才能得出与社会需求紧密相关的科学结论, 制定相关产业政策的时候, 才能够有的放矢.

人类能源消费在排放 CO<sub>2</sub> 的同时还产生大量的热释放. 研究证明, CO<sub>2</sub> 等温室气体是通过吸收太阳

英文版发表信息: Niu Q, Nie C Q, Lin F, et al. Model study of relationship between local temperature and artificial heat release. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 821-830, doi: 10.1007/s11431-011-4669-5

辐射能影响气温的, 而由于 CO<sub>2</sub> 具有良好的扩散性, 局部释放的 CO<sub>2</sub> 随着大气环流扩散到全球, 并通过长期的累积作用对气温产生影响. 所以, CO<sub>2</sub> 对气候变化的影响是全球性的和长期的. 在局部区域和短期的时空尺度内, CO<sub>2</sub> 浓度和气温变化曲线并不能很好吻合<sup>[9-14]</sup>.

与温室气体的作用相反, 能源消费产生的大量热释放在短期内集中在城市及其周边, 对局部地区的气温变化和短期内的气温变化趋势会产生明显的影响. 这种影响强度有多大? 影响规律又如何? 这方面现有的研究报导还不多. 围绕这些问题, 本文下面将对城市区域的人为热释放及其对局地气温的影响展开热力学模型及统计验证的研究.

### 1 结构化热释放模型

将研究的区域划分为三部分.

**Human 区域**代表人类社会的主要活动区域, 即人为热源所在的区域, 从地面几米到地下人类所挖掘能源资源的深度. 静止的高楼等建筑也算作此区域之中.

**Local 区域**高度为地面到 120 m 之间的区域. 代表人类活动空间以外的局地大气环境, 我们所关注的局地气温就是这部分的气温.

**Outer 为外部区域**, 包括此局地之外的区域, 也包括此局地 local 区域之上的大气和 local 区域之下的地球各圈层.

#### Local 区域能量平衡分析.

根据热力学第一定律, 局地环境内能由于换热和做功而发生的改变:

$$\Delta En^{local} = Q^{local} + W^{local}, \quad (1)$$

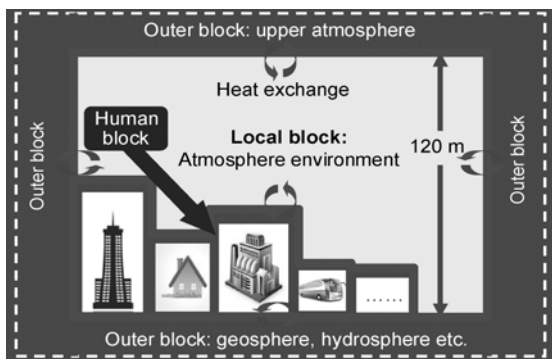


图 1 人为热释放模型结构图

$Q^{local}$  为局地大气环境从外部(上层大气, 周边大气, 人类社会的能源使用)吸收的热量.

$W^{local}$  为外部向局地环境所做的功. 比如 Local 区域的大气由于受热膨胀, 使得流出 Local 控制体的气体体积要多于流入的, 而由于一般情况下地面气流速度较低, 可以认为控制体内各处静压相同, 都为一个大气压. 于是此膨胀过程就是外部向局地环境做负功的过程.

$$Q^{local} = Q_{anthr}^{local} + Q_{nature}^{local},$$

$Q_{anthr}^{local}$  表示人为热释放导致的 Local 区域的热交换, 吸热为正.

$Q_{nature}^{local}$  表示自然气象因素导致的 Local 区域的热交换, 吸热为正.

同样  $W^{local} = W_{anthr}^{local} + W_{nature}^{local}$ , 但由于人类活动对 local 区域做功极其微小, 于是

$$W^{local} = W_{nature}^{local}.$$

定义  $\Delta En^{local}(t) = En^{local}(t) - En_0^{local}$ .

其中  $En_0^{local}$  为 Local 区域的基准内能, 即在没有人热释放和气象波动因素的情况下 Local 区域所应有的内能. 于是  $\Delta En^{local}$  即是人为和气象因素所造成的能量交换的效果之和:

于是  $t$  时刻的  $\Delta En^{local}(t)$  有:

$$\begin{aligned} \Delta En^{local} &= Q^{local} + W^{local} \\ &= Q_{anthr}^{local} + Q_{nature}^{local} + W_{nature}^{local}. \end{aligned} \quad (2)$$

**假设 1.** Local 区域热容量固定.

如果将某一地区的 Local 区域(即大气环境)看作一个控制体, 由于此区域的面积、高度以及大气比热容相对固定, 因此同一区域 Local 控制体的热容量可近似视作一个常量. 由热容量定义有

$$\Delta En^{local}(t) = C \cdot \Delta T(t). \quad (3)$$

$\Delta T(t)$  为实际气温  $T(t)$  相对于基准气温  $T_0$  的变化值. 基准气温  $T_0$  为不考虑人为和气象波动因素所应有的气温, 是一个固定的理想基准值, 其具体大小不必确定. 于是  $\Delta T(t)$  的物理意义即为由 Local 控制体内的能量变化  $\Delta En^{local}(t)$  所导致的局地气温变化.

对(2)进行时间求平均

$$\begin{aligned} \overline{\Delta En^{local}} &= \overline{Q_{anthr}^{local}} + \overline{Q_{nature}^{local}} + \overline{W_{nature}^{local}} \\ &= \overline{Q_{anthr}^{local}} + \overline{\Delta En_{nature}^{local}}. \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $\overline{\Delta En}^{local} = \frac{1}{\text{period}} \cdot \int \Delta En^{local} dt$ , 其他项的平均值

定义于此相同。

$\overline{\Delta En}^{local}_{nature}$  为自然气象所引起的环境内能的改变, 包括纯自然的本底以及人为活动所引起的气象反映, 即:

$$\overline{\Delta En}^{local}_{nature} = \overline{\Delta En}^{local}_{natureBg} + \overline{\Delta En}^{local}_{natureFb}, \quad (5)$$

其中  $\overline{\Delta En}^{local}_{natureBg}$  代表纯自然的因素导致的 Local 区域内能积累(Bg: background),

$\overline{\Delta En}^{local}_{natureFb}$  代表气象活动对人类热释放的反馈所导致的 Local 区域内能积累(Fb: feedback).

**假设 2.** 自然波动对气温变化的年均效为零。

由于直到工业革命前地球的平均气温变化都不大, 依据近 1000 年来温度波动的规律分析<sup>[1]</sup>, 本文作者假设: 大部分地区一年周期内由自然波动引起的环境内能改变近似为零。

$$\overline{\Delta En}^{local}_{natureBg} \Big|_{\text{annual}} = 0.$$

即认为一年内每个地区的暖气流, 冷气流, 气旋, 反气旋, 以及大气环境与岩石圈的换热等等影响 local 区域内能的非人为因素在一年的能够互相抵消, 即总效果为零。

因此这里认为本底的能量变化在某一气象周期(一年或者几年)内的积累以及对气温升高的总效果为零。于是

$$\overline{\Delta En}^{local}_{nature} \Big|_{\text{annual}} = \overline{\Delta En}^{local}_{natureFb} \Big|_{\text{annual}},$$

于是(4)式化为

$$\overline{\Delta En}^{local} \Big|_{\text{annual}} = \overline{Q}_{anthr}^{local} + \overline{\Delta En}^{local}_{natureFb} \Big|_{\text{annual}}. \quad (6)$$

若令  $\overline{\Delta En}^{local}_{anthr} = \overline{Q}_{anthr}^{local} + \overline{\Delta En}^{local}_{natureFb}$  来表示人为因素所造成的 Local 区域的能量积累, 则(6)式可表示为

$$\overline{\Delta En}^{local} \Big|_{\text{annual}} = \overline{\Delta En}^{local}_{anthr} \Big|_{\text{annual}}.$$

**假设 3.** Local 区域热量的流失遵循指数衰减规律。

人为热释放导致 Local 区域的内能和平均气温升高, 固有的大气环流以及城、郊温差造成的大气对流对 Local 区域升高的内能和平均气温有着衰减作用。这里用  $d(\overline{\Delta En}^{local}_{natureFb})$  来表示  $\overline{\Delta En}^{local}_{natureFb}$  随时间的变化, 是人为能源使用所引起的环境对 Local 区域内人为能量积累  $\overline{\Delta En}^{local}_{anthr}$  的一种负反馈。根据高温物体的内能

在环境中的近似指数衰减规律的特征, 对  $\overline{\Delta En}^{local}_{anthr}$  可以作一个指数衰减趋势的假设。

于是,

$$\begin{aligned} \overline{\Delta En}^{local}_{anthr}(t) &= \int_{t_0}^t \dot{Q}_{anthr}^{local} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt_Q + \overline{\Delta En}^{local}_{anthr}(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}, \end{aligned}$$

$t$  为关注气温的时间,  $t_Q$  为关注热释放的时间,  $t_0$  为每年的起始时间,  $\tau$  为热量衰减的半衰期,  $\overline{\Delta En}^{local}(t_0)$  为每年起始时间的前一年热量的残留, 于是

$$\begin{aligned} \overline{\Delta En}^{local} \Big|_{\text{annual}} &= \overline{\Delta En}^{local}_{anthr} \Big|_{\text{annual}} \\ &= \frac{1}{\text{period}} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \dot{Q}_{anthr}^{local}(t_Q) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt_Q dt \\ &\quad + \frac{1}{\text{period}} \cdot \int_{\text{period}} \overline{\Delta En}^{local}_{anthr}(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt. \end{aligned}$$

由于这里以年为周期, 有:  $\text{period} \gg \tau$ .

于是有:  $\frac{1}{\text{period}} \cdot \int_{\text{period}} \overline{\Delta En}^{local}_{anthr}(t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt \approx 0$ ,

所以

$$\overline{\Delta En}^{local} \Big|_{\text{annual}} = \frac{1}{\text{period}} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \dot{Q}_{anthr}^{local}(t_Q) \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt_Q dt. \quad (7)$$

**假设 4.** 各年的人为热释放年内分布规律不变

由于某一城市各个年份人为热释放的年内分布规律的相似性, 这里假定某年的人为热释放相对于前一年份同期值的变化是相同的。

于是  $\dot{Q}_{anthr}^{local}$  就是全年热释放量的一个线性的函数, 且此函数不随年份变化。

$$\dot{Q}_{anthr}^{local}(t_Q) = \frac{\gamma(t_Q)}{t_{\text{annual}}} Q_{anthr}^{local} \Big|_{\text{annual}},$$

其中  $t_{\text{annual}}$  为全年时间。

于是由(7)式得

$$\begin{aligned} \overline{\Delta En}^{local} \Big|_{\text{annual}} &= \frac{1}{\text{period}} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \frac{\gamma(t_Q)}{t_{\text{annual}}} Q_{anthr}^{local} \Big|_{\text{annual}} \cdot e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} dt_Q dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} \frac{1}{\int_{\text{period}} dt} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \frac{\gamma(t_0)}{t_{\text{annual}}} \cdot e^{-\frac{t_0-t_0}{\tau}} dt_0 dt \\
 &= Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} \cdot \eta \cdot C, \tag{8}
 \end{aligned}$$

其中  $\eta = \frac{1}{C \cdot \int_{\text{period}} dt} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \frac{\gamma(t_0)}{t_{\text{annual}}} \cdot e^{-\frac{t_0-t_0}{\tau}} dt_0 dt$ .

(3)式在一年周期内对时间求平均有

$$\overline{\Delta En}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} = C \cdot \overline{\Delta T(t)} \Big|_{\text{annual}} = C \cdot \overline{\Delta T}(a), \tag{9}$$

其中  $C$  表示所研究区域的局地环境热容.  $\bar{T}$  为所关注年份内的平均气温.

结合(9)和(8)式则有

$$Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} \cdot \eta \cdot C = C \cdot \overline{\Delta T}(a),$$

即  $\overline{\Delta T}(a) = \eta \cdot Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}}$ . (10)

### Local 区域受热 $Q_{\text{anthr}}^{\text{local}}$ 与人为热释放的关系.

这里 Local 区域获得的热量  $Q_{\text{anthr}}^{\text{local}}$  包括人类自身新陈代谢所引起的, 以及人类的能源消费活动所引起的. 但其中由于前者的数量要远小于后者, 因此以下的  $Q_{\text{anthr}}^{\text{local}}$  仅指来自人类能源消费的热释放.

根据 Local 和 Human 区域的热交换, 有

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} &= -Q_{\text{envir}}^{\text{human}} + Q_{\text{outer}}^{\text{human}} \\
 &= (-\Delta En^{\text{human}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} + W_{\text{envir}}^{\text{human}}) + Q_{\text{outer}}^{\text{human}}. \tag{11}
 \end{aligned}$$

于是

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} &= -Q_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + Q_{\text{outer}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= \left( -\Delta En^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + W_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \right) \\
 &\quad + Q_{\text{outer}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}}.
 \end{aligned}$$

这里  $F(t) \Big|_{\text{annual}}$  均为函数  $F(t)$  年末相对年初的变化量.

$Q_{\text{envir}}^{\text{human}}$  是指 Human 区域与环境(包括 Local 和 Outer)的热交换, 吸热为正.

$Q_{\text{outer}}^{\text{human}}$  为 Human 区域通过建筑的地面与 Outer 区域的热交换, Human 吸热为正.

$\Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}}$  为 Human 区域由于能量运输(煤运, 输电等)引起的能量变化, 输入为正.

$\Delta En^{\text{human}}$  为 Human 区域控制体的能量变化,  $W_{\text{envir}}^{\text{human}}$  为外界对此控制体做功.

由于人类活动对环境做功极其微小, 可以认为

$$W_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} = 0,$$

于是, 由于人类引起的 Human 区域热量外流

$$\begin{aligned}
 &-Q_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= -\Delta En^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + W_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= -\Delta En^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}}.
 \end{aligned}$$

由于 Human 区域通过建筑的地面与 Outer 区域的热交换有限, 且冬季夏季的热交换存在着抵消, 所以

$$\left| Q_{\text{outer}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \right| \ll \left| Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} \right|.$$

于是,

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} &= -Q_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + Q_{\text{outer}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= -Q_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= -\Delta En^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}}. \tag{12}
 \end{aligned}$$

即局地大气环境得到的热量等于 Human 区域的能量的减少量加上外地运入的能量.

**模型结论 1.** 一般地区局地气温对人为热释放有近似线性的依赖关系.

由(12)式可得

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} &= -\Delta En^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= -\left( \Delta En_{\text{embod}}^{\text{human}} + \Delta En^{\text{resource}} \right) \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}},
 \end{aligned}$$

$\Delta En_{\text{embod}}^{\text{human}}$  为人类社会积累在物质产品(能源除外)中的能量的变化;  $\Delta En^{\text{resource}}$  为局地 Human 区域能源总量变化, 即  $-\Delta En^{\text{resource}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}}$  为能源的消费量(即能源统计中“能源消费量”的定义).

由于  $\left| \Delta En_{\text{embod}}^{\text{human}} \right| \ll \left| \Delta En^{\text{resource}} \right|$ , 所以(12)式化为

$$\begin{aligned}
 Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} &= -\Delta En^{\text{resource}} \Big|_{\text{annual}} + \Delta En_{\text{transp}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} \\
 &= En_{\text{consum}}^{\text{human}}(a),
 \end{aligned}$$

而由(12)式可以知道

$$Q_{\text{anthr}}^{\text{local}} \Big|_{\text{annual}} = -Q_{\text{envir}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}} = Q_{\text{consum}}^{\text{human}} \Big|_{\text{annual}},$$

其中  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}$  为人类能源消费产生的热释放。

于是有  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}} = E n_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}$ , 即人为热释放量数量上与当地的能源消费量相等。

为了表述方便起见, 下文中有些地方用  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}(a)$  来代替  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}$ , 两者物理意义没有区别。

结合(10)式, 则可以得到人为热释放引起局地气温变化的关系式:

$$\begin{aligned} \Delta \bar{T}(a) &= \eta \cdot Q_{\text{consum}}^{\text{human}}(a), \\ \bar{T}(a) &= \eta \cdot Q_{\text{consum}}^{\text{human}}(a) + T_0, \end{aligned} \quad (13)$$

其中  $\bar{T}$  为年平均气温,  $T_0$  为基准气温。

**模型结论 2.** 个别地区局地气温与人为热释放关系的不确定性由气候波动导致, 且随着热释放增加此不确定性被削弱。

模型结论 1 给出的是—般情况下的关系, 这种情况下假设 2 都是成立的。但少数地区自然波动对气温

变化的年均效  $\frac{\Delta E n_{\text{natureBg}}^{\text{local}}|_{\text{annual}}}{C}$  不为零, 且不同年份存在着较大差异。

对于这些地区, (13)式就不再适用, 而要修改为

$$\bar{T} = \eta \cdot Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}} + \frac{\Delta E n_{\text{natureBg}}^{\text{local}}|_{\text{annual}}}{C} + T_0, \quad (14)$$

$$\bar{T} = \eta \cdot Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta E n_{\text{natureBg}}^{\text{local}}|_{\text{annual}}}{C \cdot \eta \cdot Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}} \right) + T_0. \quad (15)$$

即  $\frac{\Delta E n_{\text{natureBg}}^{\text{local}}|_{\text{annual}}}{C}$  变化的不确定性会带来年平均气温  $\bar{T}$  的不确定性。同时,  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}$  的增大会使  $\frac{\Delta E n_{\text{natureBg}}^{\text{local}}|_{\text{annual}}}{C}$  所产生的这种不确定性减小, 从而使得年平均气温  $\bar{T}$  和全年热释放  $Q_{\text{consum}}^{\text{human}}|_{\text{annual}}$  之间的线性关系更容易显现。

**模型结论 3.** 局地气温对人为热释放的响应程度由多种因素决定。

由(13)和(15)式可以看出, 虽然各地区气温与是释放的关系有着同样形式的规律, 但不同城市的气温对人为热释放的响应程度是不同的, 即  $\frac{\delta[\bar{T}(a)]}{\delta[Q_{\text{consum}}^{\text{human}}(a)]}$

$=\eta$  是不同的。由(8)式可知

$$\eta = \frac{1}{C \cdot \int_{\text{period}} dt} \cdot \int_{\text{period}} \int_{t_0}^t \frac{\gamma(t_Q)}{t_{\text{annual}}} \cdot e^{-\frac{t_Q-t_0}{\tau}} dt_Q dt.$$

即城市的规模、能源利用的集中程度对热容  $C$  的影响, 以及局地气候差异引起的热量衰减半衰期  $\tau$  的不同, 都决定着  $\eta$  的大小。比如城市规模大而能源利用又相对分散的情况, 对应的局地热容量就比较大; 空气流动剧烈的地区, 热量半衰期就比较短。

以上是人为热释放对气温影响的模型研究, 下面利用统计的方法对这个模型进行验证。

## 2 统计验证

下面以城市为研究对象, 以统计数据为依据对人为热释放量与城市气温关系物理模型进行验证研究。

### 数据来源与研究方法。

本文中选取 1978~2007 年的数据用于分析, 原因是这部分的统计数据相对比较齐全, 只有少数存在遗漏。人为热释放方面的数据来源于国家统计局公布的《新中国五十五年统计资料汇编》(1978~2004 年)和《中国能源统计年鉴》(2005~2007 年)。气象方面的数据来源于国家气象信息中心“中国地面国际交换站气候资料年值数据集”。

模型的统计验证研究采用的方法为时间走势图直观对比法, 以及 Pearson 统计相关方法。Pearson 相关系数又称样本相关系数<sup>[15]</sup>, 用来衡量两个变量测量值集合之间的相关性。

下面首先以北京和上海为例, 详细研究其人为热释放和气温变化的规律。并对其相互之间的关系进行探讨。

### 北京市人为热释放与气温关系的研究。

图 2 和 3 分别描述了北京人为热释放和北京年平均气温随年份的变化, 图 3 中选择了适合的多项式样条拟合的方式对气温进行回归性分析。竖线表示气温快速增长的起始年代。通过图 4 中的线性回归可以看出, 北京的气温变化与人为热释放具有比较强的线性相关性(以下简称为“热-温相关性”)。

对照(13)式可以得到北京气温与人为热释放的关系式:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{beijing}}(a) \\ = \eta_{\text{beijing}} \cdot Q_{\text{consum\_beijing}}^{\text{human}}(a) + T_{0\_beijing}, \end{aligned}$$

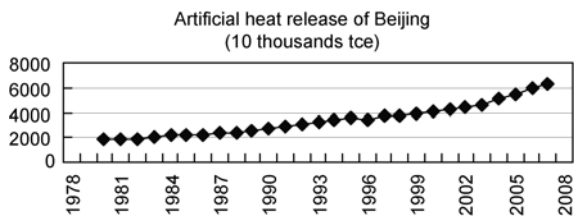


图2 北京人为热释放

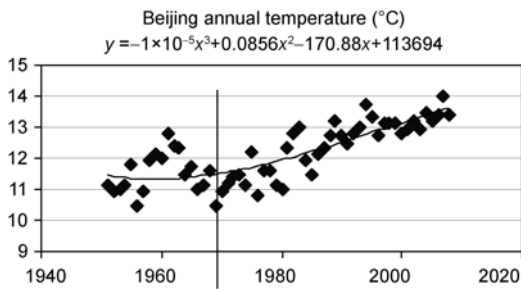


图3 北京年平均气温及其多项式趋势

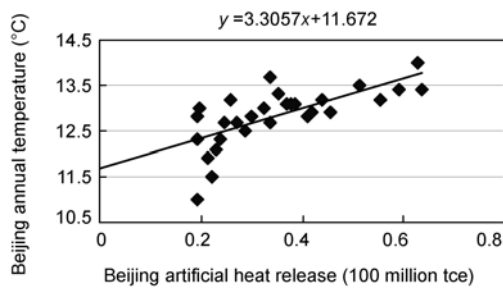


图4 北京人为热释放与气温的线性关系

其中线性系数  $\eta_{\text{beijing}} = 3.3057$  吨标准煤. 图4中截距  $T_{0\_\text{beijing}} = 11.672^\circ\text{C}$ , 其物理意义即理论上没有人为热释放的情况下北京应有的气温. 而北京周边地区的气象台站可以近似认为人为热释放为零.

北京郊县密云 2000~2010 平均气温为  $11.58^\circ\text{C}$ , 此气温即可认为是北京地区没有热释放情况下的气温. 此气温与北京截距  $T_{0\_\text{beijing}} = 11.672$  相差仅仅  $0.09^\circ\text{C}$ , 说明本文的理论模型与北京气温的实际变化规律有着很好的吻合.

经计算, 北京人为热释放和北京年平均气温的 Pearson 相关系数(以下简称为“热-温相关系数”)为  $0.703$ , 且满足  $0.01$  水平的显著性检验. 这说明了二者的确存在着比较强的线性相关关系. 进一步验证了理论模型在北京应用的可行性.

上海市人为热释放与气温关系的研究.

图5和6分别描述了上海人为热释放和上海年平均气温随年份的变化, 图6中选择了适合的多项式样条拟合的方式对气温进行回归性分析. 竖线表示气温快速增长的起始年代. 通过图7中的线性回归可以看出, 上海具有比较强的热-温相关性.

对照(13)式可以得到上海气温与人为热释放的关系式:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{\text{shanghai}}(a) &= \eta_{\text{shanghai}} \cdot Q_{\text{consum\_shanghai}}^{\text{human}}(a) + T_{0\_shanghai} \end{aligned}$$

其中线性系数  $T_{0\_shanghai} = 15.696^\circ\text{C}/\text{亿吨标准煤}$ . 图7中截距  $T_{0\_shanghai} = 15.696^\circ\text{C}$ , 其物理意义即理论上没有热释放的情况下上海应有的气温. 而上海周边地

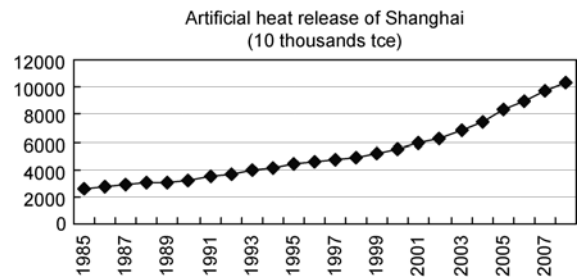


图5 上海人为热释放

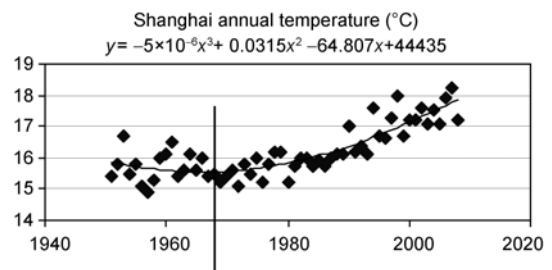


图6 上海年平均气温

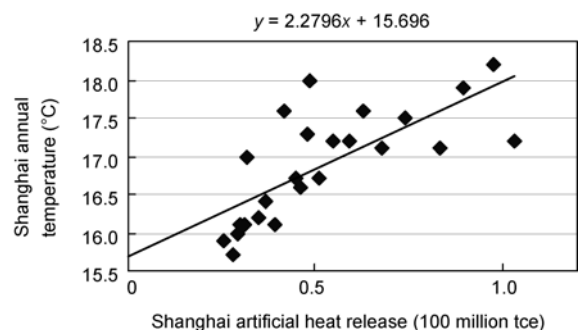


图7 上海人为热释放与气温的线性关系

区的气象台站可以近似认为人为热释放为零。

距离上海 50 km 的南通启东市吕四港镇台站 2000~2010 平均气温为 16.064°C, 此气温即可认为是上海地区没有热释放情况下的气温。此气温与上海截距  $T_{0\_shanghai}$  相差仅仅 0.37°C, 说明本文的理论模型与上海气温的实际变化规律有着较好的吻合。

经计算, 上海的热-温相关系数为 0.763, 且满足 0.01 水平的显著性检验。这说明了二者的确存在着比较强的线性相关关系。进一步验证了理论模型在上海应用的可行性。

#### 全国各省人为热释放与其省会城市年平均气温的相关性研究。

下面用类似的方法对全国各省份进行研究(无相关统计数据的省份除外), 考察年份是 1978~2007 总计 30 年。由于有些省份的统计数据不完整, 其样本数  $N$  会有相应的减少。再者, 鉴于省份众多, 就省去北京和上海研究中的详细表述步骤, 将最后的相关系数列于表 1 中。

通过对表 1 中  $N \geq 17$  的 25 个省市的计算结果进行观察可以发现:

1) 有 20 个省市的相关系数都大于 0.59, 占总数的 80%(其余 5 个省份用斜体标出), 即人为热释放与气温上升呈现出普遍的较强相关性;

2) 相关性较弱(相关系数小于 0.59)的 5 个省份中的 4 个是人为热释放量相对较小的, 占了其中的 80%, 它们分别是广西, 贵州, 青海, 海南。

表 1 中  $N \leq 15$  的 5 个省市(用阴影标出), 由于样本年份数过小带来的较大随机性, 其结果不予使用。

#### 人为热释放量对热-温相关性强弱的影响。

已经知道: 从空间上讲, 相关性弱的 5 个省份中人为热释放量较小的地区占 80%。那么从时间上讲, 随着人为热释放的变化, 热-温相关性的强弱又有怎样的变化规律? 下面就对我国各省不同时期的热-温相关性进行考察。

统计数据表明 1978 年至 2007 年 30 年间我国各省的人为热释放量基本上是持续增长的。为了研究不同时期的人为热释放量对热-温相关性的影响, 本文将这 30 年平均划分为 3 段对 10 个省市进行研究。

选取的 10 个省市符合以下条件:

对于每个 10 年, 只有  $N \geq 8$  的才给出相关系数, 以保证相对较高的准确性;

表 1 全国大部分省份人为热释放与其省会年平均气温的相关系数, 2007 年人为热释放(单位: 万吨标准煤), 年份样本数

Province	Heat-temperature correlation coefficient	Artificial heat release (million tce) (2007)	Sample year number $N$
Xinjiang	0.617	65.76	30
Shanxi	0.735	146.20	30
<b>Liaoning</b>	<b>0.215</b>	<b>173.79</b>	<b>30</b>
Jilin	0.645	73.46	30
Heilongjiang	0.76	93.74	30
Fujian	0.706	75.74	30
Shaanxi	0.764	66.39	30
<b>Guangxi</b>	<b>-0.074</b>	<b>61.37</b>	<b>30</b>
Yunnan	0.751	71.73	30
<b>Guizhou</b>	<b>-0.443</b>	<b>76.92</b>	<b>30</b>
Chongqing	0.594	52.17	29
Hubei	0.866	118.61	28
Beijing	0.703	62.85	28
Ningxia	0.686	30.47	28
<b>Qinghai</b>	<b>-0.157</b>	<b>20.95</b>	<b>28</b>
Henan	0.805	178.41	24
Guangdong	0.649	219.12	23
Jiangxi	0.748	50.54	23
Gansu	0.6	51.00	23
Jiangsu	0.769	206.04	23
Shanghai	0.763	97.68	23
Neimenggu	0.662	127.23	23
Zhejiang	0.783	145.33	18
<b>Hainan</b>	<b>0.348</b>	<b>10.16</b>	<b>17</b>
Anhui	0.598	77.52	17
Hebei	0.419	234.90	15
Tianjin	0.226	49.44	10
Shandong	-0.033	285.54	10
Sichuan	-0.363	136.85	9
Hunan	0.828	107.97	8

每个省市至少要有两个 10 年符合条件一, 从而能够研究其热-温相关性随时间的变化;

其 2007 年的人为热释放量居全国前列, 这样的省市 30 年间人为热释放量的变化更为明显;

符合条件二的直辖市包含于其中, 因为相对于辖区面积而言直辖市的人为热释放普遍较大。

于是这里研究的对象锁定在 3 个直辖市, 以及 2007 年人为热释放前 7 位的省份, 共计 10 个省市。

从图 8 中可以看出, 除了少数地区少数 10 年的

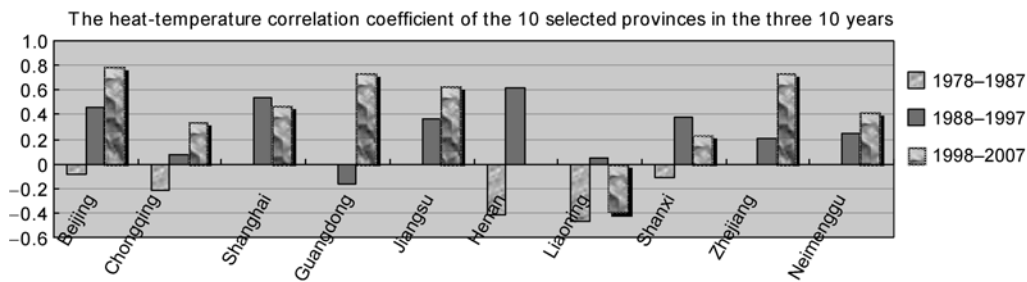


图8 人为热释放量较大的10个省市3个十年的热-温相关系数

相关系数下降之外,其他省市的相关系数都在上升.经计算,此10省市热-温相关系数的平均值在3个十年的值分别为-0.26, 0.28, 0.44, 表现出了显著的上升趋势.前文已经提到  $N$  小于15时本文的统计结果会存在较大的随机性,而图8在  $N=8\sim 10$  的情况下仍能明显的反映出相关系数的上升趋势,说明此上升趋势很强.

以上空间和时间两个角度的研究表明,热-温相关性的强弱的确受人为热释放量的影响.人为热释放量越大,热-温相关性越强.

统计验证结论

以上,以验证理论模型所揭示的人为热释放与气温变化的线性依赖关系为目的,分别对我国各个省份的相关统计数据进行了分析,得出了以下结论.

**验证结论 1.** 从统计数据的相关研究可以看出,全国各个地区的气温变化和人为热释放之间基本遵循着线性的依赖关系.对北京和上海的研究表现出了定量关系式(13)较好的适用性.这些都使得**模型结论 1**得到了比较好的印证.

**验证结论 2.** 与我国大多数地区不同,海南等五个地区的气温变化和人为热释放之间的关系较弱,甚至随着人为热释放的增长气温却在下降.这一现象可以由**模型结论 2**给予解释:

对于这些地区, (14)式中  $\overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}$  随着年份的发展发生了较大的降低. 即对于  $year_2 > year_1$  有

$$\overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}(year_2) < \overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}(year_1),$$

且

$$\eta \cdot Q_{consum}^{human}|_{annual}(year_2) - \eta \cdot Q_{consum}^{human}|_{annual}(year_1) < \overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}(year_1) - \overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}(year_2).$$

于是使得(14)式中

$$\bar{T}(year_2) < \bar{T}(year_1),$$

即虽然全年热释放量  $Q_{consum}^{human}|_{annual}$  有所增加,气温却降低了.

**验证结论 3.** 热-温相关性较弱的情况对应的人为热释放量普遍较小.

统计验证的结果表明,线性关系较弱的5个地区中有4个都是  $Q_{consum}^{human}|_{annual}$  较小的.而图8的结果表明随着  $Q_{consum}^{human}|_{annual}$  的升高,各个地区的  $\bar{T}$  和  $Q_{consum}^{human}|_{annual}$  之间的线性关系普遍在增强.这从空间和时间两个角度都说明了  $Q_{consum}^{human}|_{annual}$  的增大会使  $\overline{\Delta En_{natureBg}^{local}}_{annual}$  所产生的不确定性影响较小,使得热-温相关性较强.从而对**模型结论 2**中的(15)式给以较好的验证.

**验证结论 4.** 不同地区人为热释放对气温的影响系数有所不同.

通过对北京和上海的研究可以看出,对于不同的地区, (13)式中人为热释放对气温的影响系数  $\eta$  是有所不同的,这与**模型结论 3**有着很好的对应.

### 3 结论与展望

以上,本文通过结构化热释放模型研究和统计数据验证研究,对我国城市区域气温与人为热释放的关系进行了分析,得出了以下结论.

1) 我国大多数地区局地气温对当地人为热释放有着近似线性的依赖关系.

2) 由于气候波动的影响,个别地区局地气温与人为热释放的相关关系存在不确定性,这种不确定性随着地区和时期的不同呈现出一些差异:空间方面,人为热释放量小的地区,热-温相关关系的不确定性比较大;时间方面,随着人为热释放量的升高,



此不确定性明显降低, 城市区域的热-温相关性总体增强.

3) 不同地区人为热释放对气温的影响系数  $\eta$  有所不同. 城市的规模、能源利用的集中程度对热容  $C$  的影响, 以及局地气候差异引起的热量衰减半衰期  $\tau$  的不同, 都决定着  $\eta$  的大小.

当然, 本文的模型研究和统计验证研究还存在这一些不足之处, 需要在今后的工作中予以完善.

首先, 限于现有统计数据的完备程度, 全国性的验证研究中采用的年平均气温来自各省省会城市, 而人为热释放量则只能精确到各省的总量. 这注定带来一定的不准确. 好在省会城市通常是一省的中心, 一般来说其经济发展和能源利用水平在全省都起着带头作用, 因此省会城市的人为热释放一定程

度上与全省的人为热释放有着类似且同步的变化趋势. 而验证研究得到, 我国绝大多数地区人为热释放与气温都存在较强的正相关关系, 也说明这的确是一个普遍的规律. 如果人为热释放的统计数据能够精确到城市, 甚至精确到城区范围, 那么统计研究对模型的验证价值将进一步提高.

其次, 本文集中研究了人为热释放对局地气温的影响, 而影响局地气温的其他因素还有什么? 它们对局地气温影响的强度如何? 关于其他因素的进一步考察将对人为热释放的研究提供很好的补充, 从而有助于更加全面的认识城市局地气温的变化规律.

综上所述, 本文的研究只是一个开端, 以上的不足之处还需要在今后的工作中进一步探讨.

## 参考文献

- 1 Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 2 Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years. Science, 2000, 289(5477): 270-277
- 3 Broecker W S. 全球变暖: 行动还是等待? 科学通报, 2006, 51: 13
- 4 顾钟炜, 周幼吾. 气候变暖和人为扰动对大兴安岭北坡多年冻土的影响: 以阿木尔地区为例. 地理学报, 1994, 49(002): 182-187
- 5 黄清臻, 邵新玺, 周广平. 气候变暖对传染病的影响. 医学动物防制, 2000, 16(002): 110-112
- 6 赖远明, 米隆. 气候变暖条件下青藏铁路抛石路基的降温效果. 科学通报, 2003, 48(003): 292-297
- 7 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响. 植物生态学报, 2007, 31(002): 175-188
- 8 郑有飞, 牛鲁燕. 气候变暖对我国农业的影响及对策. 安徽农业科学, 2008, 36(010): 4193-4195
- 9 Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420000 years from the Vostok ice core, Antarctica. Nature, 1999, 399(6735): 429-436
- 10 方精云. 全球变暖与碳排放. 中国科学院第十五次院士大会学部学术年会学术报告. 北京: 中国科学院, 2010
- 11 李华斌. 全球变暖定量分析及未来全球平均气温变化预测. 硕士学位论文. 杭州: 浙江大学, 2007
- 12 牛强, 林峰, 李玲, 等. 我国各省能源消费与省会城市温度变化的对照研究. 中国工程院-国家能源局首届能源论坛论文集, 2010
- 13 CICERO Report 2000: 1—Climate change. Scientific background and process. 2002. 23
- 14 钱维宏, 陆波, 祝从文. 全球平均温度在 21 世纪将怎样变化? 科学通报, 55(16): 1532-1537
- 15 王学仁, 王松桂. 实用多元统计分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1990