

天津市区城市热岛温度场的特征 和红外遥感技术的应用*

孙奕敏 李 檬 解以杨

(天津市气象科学研究所)

郭之怀 李乃煌 王国华

(中国科学院遥感应用研究所)

研究城市热岛效应, 对大气湍流、扩散、大气污染预报^[1], 大气环境质量评价和防治, 城市气候, 对城市规划和保护环境都有重要意义。过去人们只是利用气象台站等单点所观测到的风、温等气象资料来研究热岛效应^[2], 因此, 在空间分布的研究上受到一定限制。

1980年我们在天津渤海地区环境遥感试验期间, 用飞机上的红外扫描仪, 对天津市郊下垫面拍摄的大量彩色红外热图象, 结合气象资料和其他遥感资料进行城市环境热效应研究的。现报告如下。

一、城市下垫面热量平衡方程和城市热岛成因

目前研究城市热岛的形成, 主要采用热量平衡的方法。地表面热量平衡公式可写成^[3]:

$$I + H - R + G - \varepsilon \sigma T^4 = \pm RN \\ = \pm B \pm LE \pm A \pm P \pm N \pm HE \pm V \quad (1)$$

(1)式中 I ——太阳直接短波辐射, H ——天空散射短波辐射, R ——地面反射短波辐射, G ——大气长波辐射, $\varepsilon \sigma T^4$ ——地表长波辐射, RN ——总纯辐射, B ——建筑、道路、土壤等热量输送, LE ——潜热输送, V ——地面和大气之间的显热输

送, A ——平流热输送, P ——植物光合作用和呼吸的热输送, N ——降水产生的热输送, HE ——人工产生的热。

要正确地观测和估算式中所有参数, 目前仍有一定困难。但对于城市内外的日射差异^[4], 建筑物、马路和土壤的热量输送, 人工产生的热量等项已有一些学者进行了专门研究。我们主要利用红外遥感技术所测得的城郊地表温度的分布、实测飘尘资料、地表有效辐射项计算、总辐射观测和市区人工热量计算等资料, 探讨城市热岛的形成和其本质。下面对热量平衡方程式中的有关项进行讨论。

(一)巨大的太阳辐射能和遥感地面辐射温度值的可靠性。

首先测知1980年太阳辐射(采暖季是6.85千卡/厘米²月, 非采暖季是9.82千卡/厘米²月), 用来分析气温与地面辐射温度的关系。设云量 $n=0$, 气温与地面辐射温度相差不大时, 采用布伦特(Bnmt)公式, 给出地面有效辐射为:

$$F = \sigma T^4 (1 - a - b\sqrt{e}) \quad (2)$$

式中 σT^4 为地面辐射通量。 $F' = (a + b\sqrt{e}) \sigma T^4$ 是大气逆辐射, 由斯蒂芬——波

* 参加本课题工作的还有王长友、张惠民、陈炎源、刘学军、相超武等同志

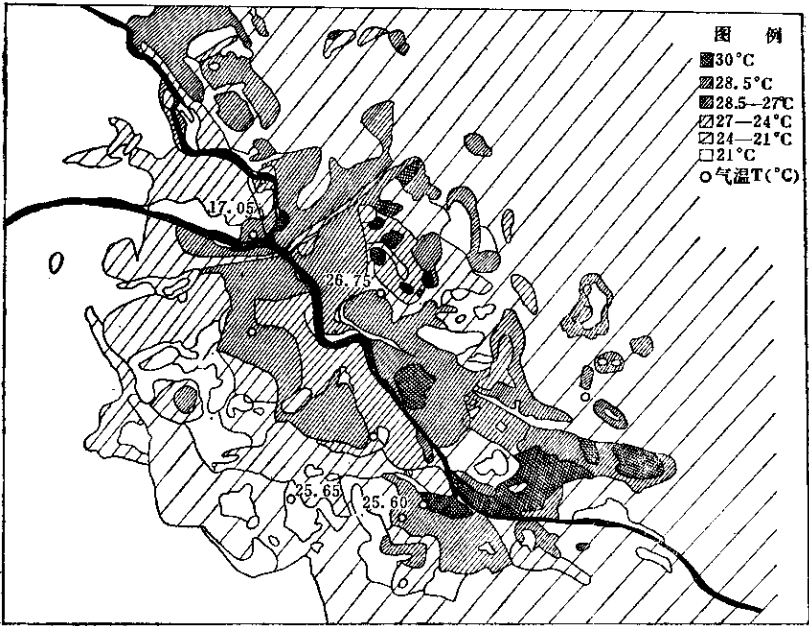


图 1 1980年 9 月 6 日 17:04—18:34 红外遥感天津市区地表辐射温度场

尔兹曼定律，大气逆辐射可表示为 $F' = \epsilon \sigma T_a^4$ 。由上两式可得：

$$T_a = \left[\frac{1}{\epsilon} \left(a + b \sqrt{e} \right) \right]^{\frac{1}{4}} T \quad (3)$$

(3) 式中 T_a 为大气绝对温度； T 为地面辐射温度； $a=0.52$ ； $b=0.06$ ； e 为水汽压（毫巴），水汽压 $e \propto T$ ； ϵ 为大气发射率，若大气稳定，辐射温度高的地表上面的气温亦高。由此根据热图象的辐射温度差异，就得到气温值。

据 1980 年 9 月 6 日 17:04—18:34 热图象（图一）所示的地表辐射温度：市区公路 30—33°C，植被 21—23°C，农田 15—21°C，水面 21—23°C。地表平均辐射温度为：市中心约 27°C，郊区约 19°C。市郊平均辐射温度相差约 8°C。取 $\epsilon=0.95$ （地物发射率 ≈ 1 ），市郊区水汽压均取 12.7 毫巴，利用（2）式估算市郊区气温差约为 7°C。

根据 1980 年 9 月 6 日 17:04—18:34 市区 5 个气象点同步观测的资料，平均气温为 23.4°C，与这时遥感热图象所示的地表辐射温度相比，市中心地表辐射温度比气温高

3°C 左右。

再根据 1983 年 1 月在市区内对各种地表（柏油、水泥、土壤和水面）温度的观测，和它们上面的气温昼夜变化规律分析（图 2），日落前的气温都低于柏油、水泥、土壤的表面温度约 3~6°C。而不少微气象学家认为，贴地面附近能存在很大的温度梯度^[5]（ $>6^\circ\text{C}\text{厘米}^{-1}$ ）。所以根据以上分析，可

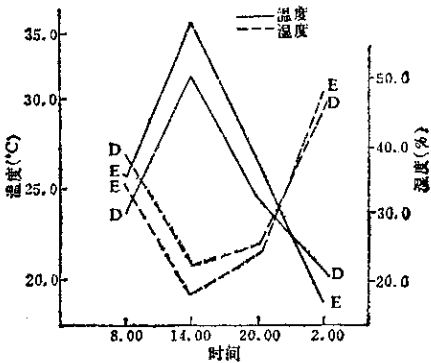


图 2 1983 年 1 月 22—23 日天津市各种地表温度和其气温的昼夜变化

* 应注意， F' 是从零到无穷大的波长区间上积分结果。而辐射计并非对所有波长都灵敏。

说明遥感热图象所表示的地表温度值是可靠的。进而得出：凭借遥感热图象，结合气象、土壤等资料，利用热量平衡方程，是能够直接揭示“城市热岛”特征和其形成的本质。

(二) 人工热是生成城市热岛的重要因素

1. 市区热源强分布

城市下垫面的热源除主要来自太阳辐射外，人工热源则占重要地位。天津的能源消耗以煤为主，约占整个能源消耗的92%多，全市有几千个工矿企业厂（点），均分布在建成区内。据统计，天津的能源利用率较低，一般能源利用率只达30%左右，尚余近70%的热量都直接或间接逸散到近地层大气中了，这就必然造成一些能源消耗大的工厂企业，工业区和人口密集区的地表辐射温度和空气温度升高。据1977年在天津钢厂观测，该厂近地层气温一般比气象台高2~3℃。我们根据天津市区耗煤量分布，以7000千卡/公斤计算，绘制了两幅全市热源强度分布图3a和图3b，从图可看出：非采暖期热源

强度普遍偏低，只有白庙工业区，一发电厂，北站外工业区，自行车厂、炼钢厂和土城工业区，耗能高热源强度大些。而采暖期的热源强度普遍偏高，其中以一发电厂，白庙，北站外、郑庄子、土城、陈唐庄、西营门等工业区的热源强度为最高，人口密集的市中心也偏高。设有燃煤或耗煤较少的地方，如水域、公园等处的热源强则较低。

全市约有3000多个厂（点）热源，分布在内160平方公里的面积上，每年约平均燃烧500多万吨煤，占全市总燃煤量的57.05%。其中采暖季每月燃烧64.5万吨，非采暖季每月35.9万吨。若不计燃烧石油、天然气所产生的热量，只算煤所产生的热量，除一部分转换成机械能、电能外，尚有大部分热量直接释放到最低层空气中，冬秋两季尤为突出。据计算燃烧所放出的热量，采暖季1.223千卡/厘米²月，非采暖季0.68千卡/厘米²月。而天津市区1980年的太阳总辐射值，采暖季为6.85千卡/厘米²月，非采暖季约为9.82千卡/厘米²月。可见市区耗煤所产生的热量在采暖季相当于太阳总辐射的1/6

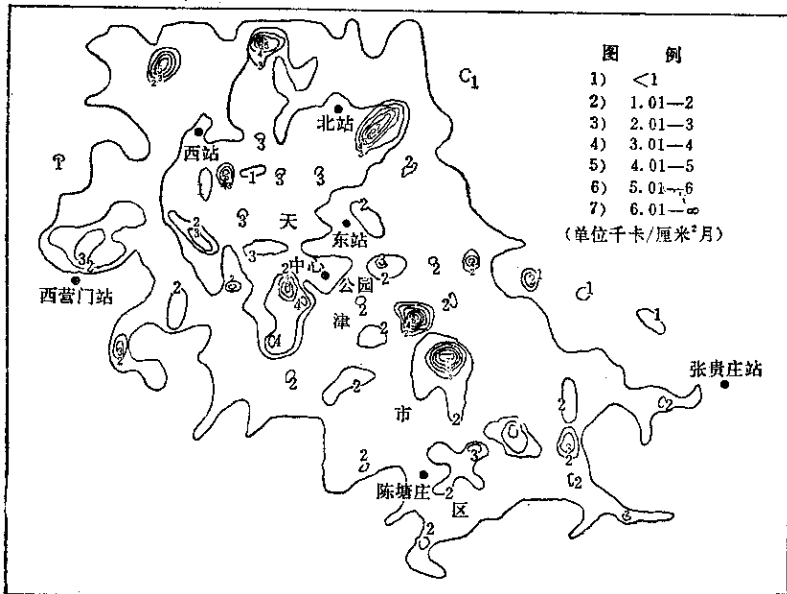


图 3a 天津市非采暖期热源强度（千卡/厘米²月）分布图

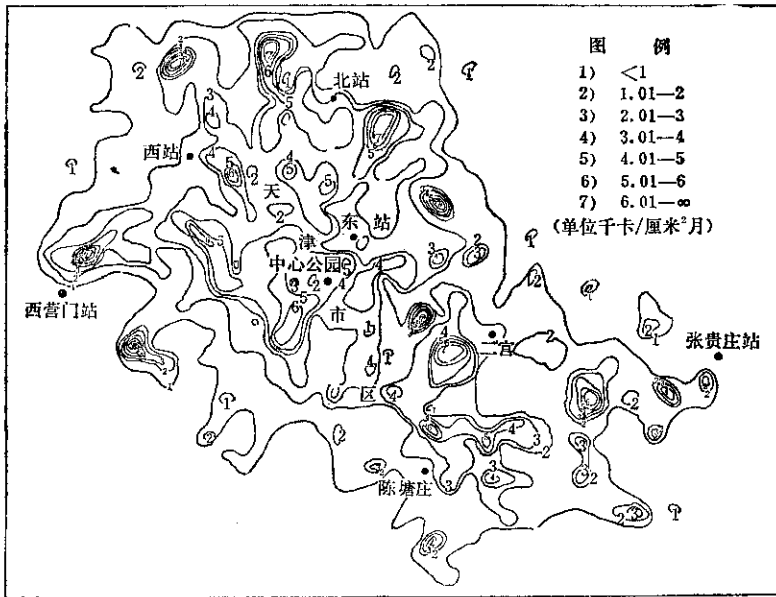


图 3b 天津市采暖期热源强度 (千卡/厘米²月) 分布图

非采暖季相当于太阳总辐射的 1/8, 所以人工热占热岛形成的重要地位。

另外, 能源消耗高的地方, 输送到附近下垫面的热量也多, 该处的地面辐射温度也会高, 二者有很大的一致性。为了证明这种关系, 根据 1980 年 9 月 6 日 17:07—18:34 的遥感热图象, 与能源消耗进行相关分析, 结果得出煤耗量和辐射温度有较好的线性关系。所以煤耗量对下垫面辐射温度影响很大。

2. 城市人口密度与城市热岛

城市规模的大小影响了城市热岛的强弱。而城市人口密集则是城市社会环境因素中的主要一环, 是影响城市生态平衡、增强城市热岛的重要因素。根据天津市夜间人口的统计, 密度基本上采用净密度, 分十级, 最小的是小于 400 人/公顷, 最大的是大于 2000 人/公顷, 中间按 200 人进级。根据 1980 年 5 月 10 日夜间的红外遥感热图象的温度场分布 (见图 4), 与人口密度等级图 (图 5) 比较, 分析结果表明: 人口密度大的地方则近地面辐射温度高, 反之亦然, 它们呈正相关。这说明人口过密的居民区是城市热

岛增强的重要因素之一。

根据 Oke (1972) 的经验公式 $\Delta T = P^{\frac{1}{4}} / 4\bar{u}^{\frac{1}{2}}$ 。式中 ΔT 为市内外气温差, P 为城市人口, $\bar{u}$ 为郊外平均风速, 按照天津市区为 400 万人, 在小风的天气条件, 平均风速取 1 米/秒, 计算结果得出 $\Delta T = 1.2^\circ\text{C}$, 这与本市弱热岛日的 $\Delta T (^\circ\text{C})$ 很接近。但小于红外遥感所测的城乡地面辐射温差 $\Delta T (^\circ\text{C})$ 。总之, 可看出大城市中的人口愈密, 则热岛强度有愈强的趋势, 与地面辐射温度呈正相关。

(三) 严重的大气污染与城市热岛

天津市市区大气污染严重, 城市上空常存在大量的烟雾, 飘尘和气体污染物, 容易形成浓雾^[6] (水雾)。它们夜间将减少地面有效辐射, 使地面降温减缓。但白天存在着大量的气溶胶粒子又会减弱太阳辐射而降低气温。在天津市曾观测到 (见图 6) 气溶胶半径为 0.001~0.1 微米的近地面浓度为 7922~19227 个/厘米³; 半径为 0.1~20 微米在低空多为 10000 个/升。它们的浓度平均值均随高度增加而减少。其分布状况呈现一种

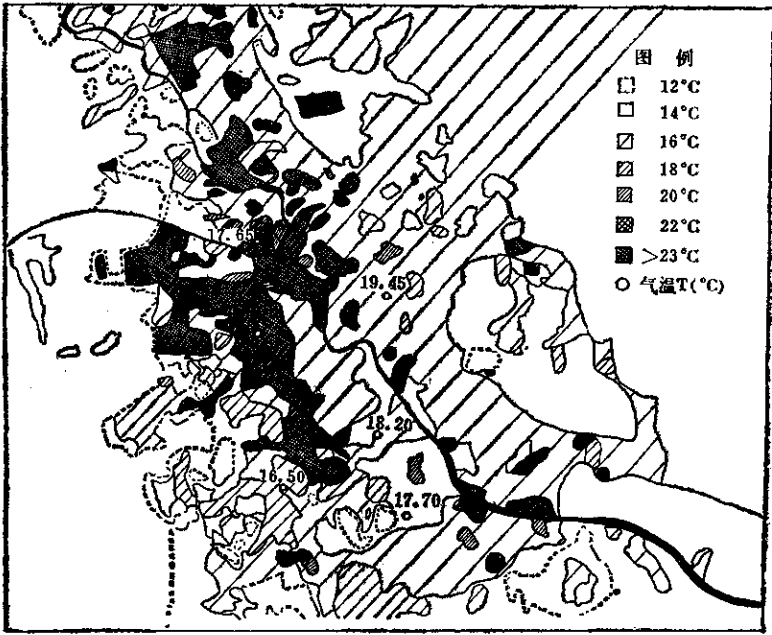


图 4 1980年5月10日03~04, 红外遥感市区下垫面辐射温度场

较好的指数特征, 其分布函数^[7]形式是:

$$N=N_0e^{-H/\alpha}$$

式中 N 是高度 H 处的气溶胶浓度, N_0 是地面气溶胶浓度(个/厘米³), α 为经验系数。

从图6的分布状况来看, 天津市近地面浓度值约比郊区大一个量级。可以认为, 气溶胶有90%是由工业污染产生, 气溶胶的存在, 增加了对太阳辐射的反射, 散射和吸收, 并减低了大气透明度。在微风、晴天无云, 大气稳定的秋、冬季节, 在远离市区20~30公里的郊区, 经常可观测到天津市上空在日出后和日落前为浓浓的烟雾所笼罩。市区的能见度明显减少, 太阳直接辐射减弱, 降低地面温度, 削弱了热岛强度。而夜间减少有效辐射又增强了热岛强度。到底那个因子起主要作用, 尚待研究。

二、天津“城市热岛” 的温度特征

(一) 市郊区温度场的分布

从图7可知: 累年平均气温市区比郊区

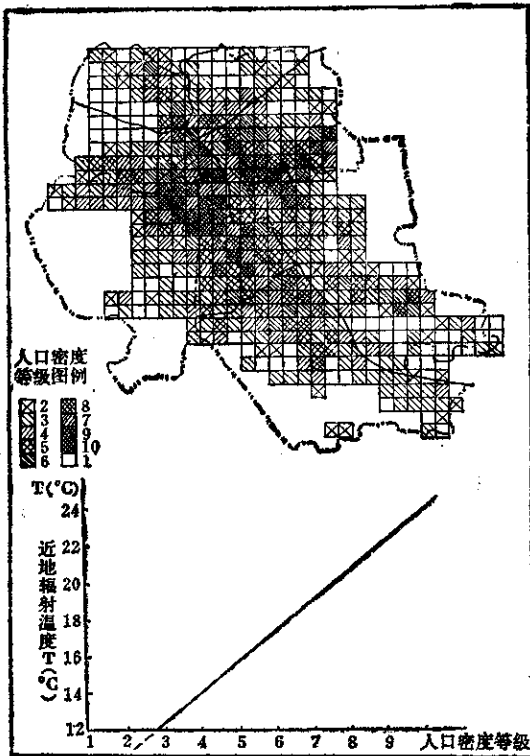


图 5 天津市区人口密度等级与下垫面辐射温度的关系

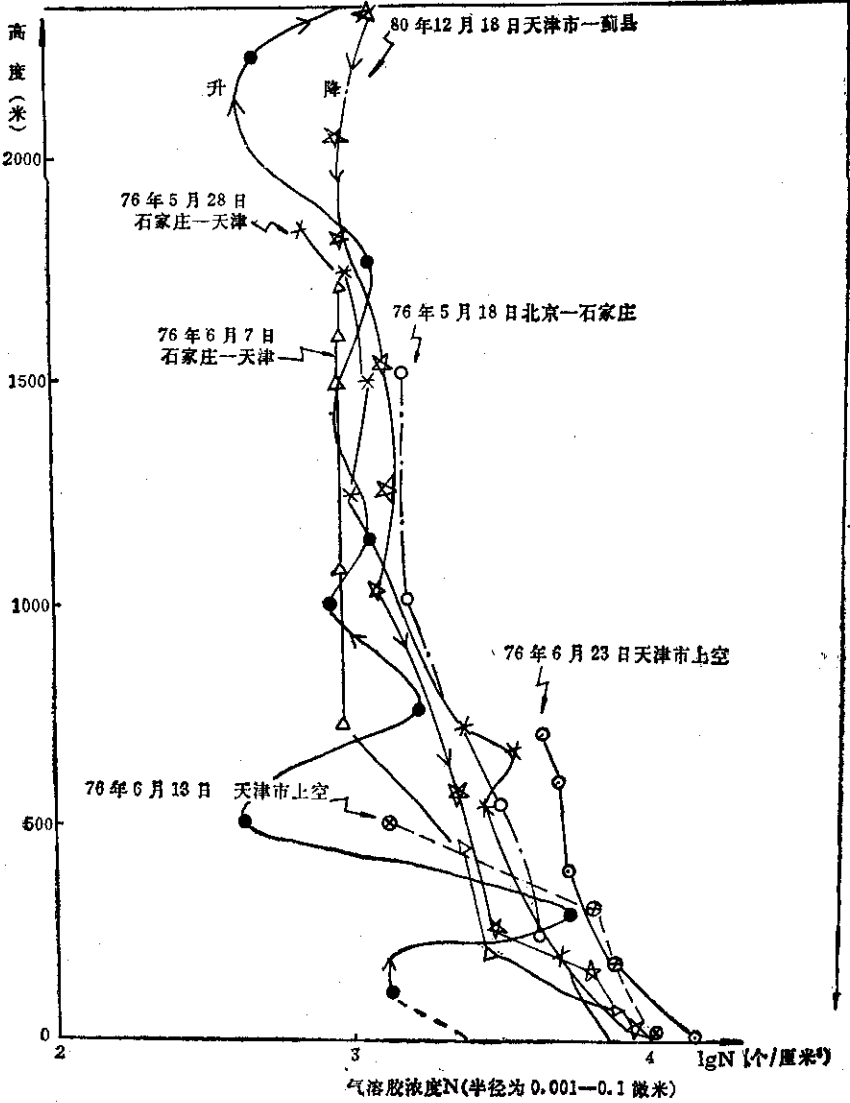


图 6 京, 津, 石地区气溶胶浓度随高度增加而减少的分布状况 (半径为0.001~0.1 μ m)

高0.7℃; 累年平均最低气温市区比郊区高0.7℃; 而1980年冬季的晚上的气温, 市区比郊区高1.7℃。所以从长年平均气温看热岛强度都是很明显的。从温度场分布来看热岛的形状、走向和位置, 都与建成区是一致的。

(二) 城市热岛强度的季节和日变化

不少学者认为: 秋、冬季城乡温差一般较大, 春季夏季较弱。我们根据20年的地面气温资料统计结果, 市区热岛强度 $\Delta T(^{\circ}\text{C})$

冬、秋季较强, 夏季次之, 春季最弱 (见图 8 a)。它们的强度分别为2.1℃、1.8℃、1.5℃、0.8℃。

热岛强度的日变化, 由图 8 b 可知: 春、秋、冬季相似, 强度为1~1.5℃。春、秋、冬季都有两个峰值, 春秋两季出现在日出前和夜间, 而冬季则出现在日出和日落之后, 冬季的热岛强度最强。由于冬季取暖, 人工释放的热量明显超过其它季节, 可见热岛强度的强弱有明显的时间性^[8]。日落后

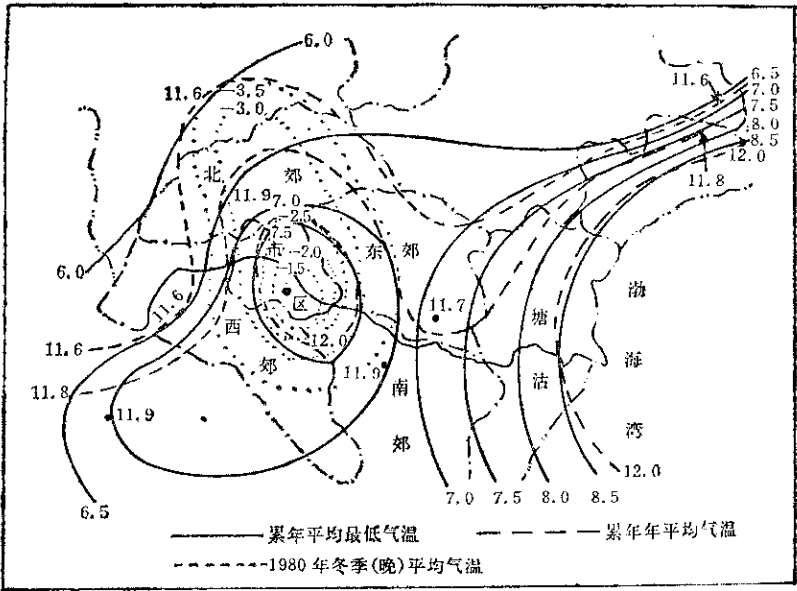


图 7 市郊区累年平均气温度和1980年冬季晚上的气温水平分布

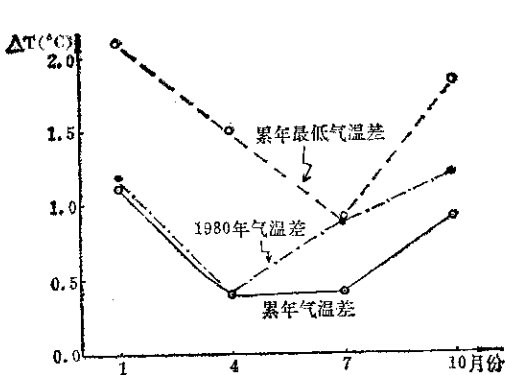


图 8a 天津市区累年热岛强度的季节变化

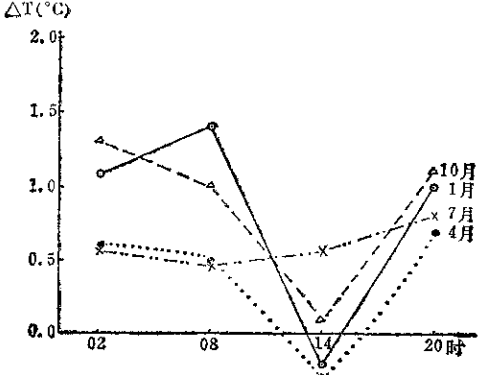


图 8b 天津市区热岛强度1979~1981年的平均日变化

由于城乡长波辐射差异^[9]和城区人工释放的热,使强度明显增大,以后逐渐平稳下来,直到日出前后才明显减弱。而中午城市热岛不但完全消失,反而有时市区比郊区的气温还要低0.2~0.4℃。唯有夏季热岛强度最弱,只有一个峰值,多出现在20时

(三)从红外遥感热图象探讨“城市热岛”特征

凭红外遥感热图象可直观地、形象地研究下垫面热环境,感知下垫面热信息所形成的热力分布和热力景观结构,可展示出整个市区有若干个大小不同,强弱不同的热岛群,构成一个大的“城市热岛”。发电一

厂、天津钢厂等大的热源地,都明显地是一些热岛。例如:1980年9月6日17:04~18:34、5月10日03~04和12月16日的下垫面辐射温度场(见图1,图4),都分别含有20个、55个和10个热岛,它们的强度又分别约为3℃、4~6℃和3~4℃。这就是由遥感技术所探讨的“城市热岛”的显著特征。

总之,天津“城市热岛”强度的特征是:城乡累年平均气温差是1~2℃,有时可达3~5℃,但并无明显增加趋势;遥感城乡下垫面辐射温度一般为10℃左右;热岛冬、秋季较强,夏季弱,多出现在夜间,其厚度多为250米上下的等特征。

参 考 文 献

- [1] Сонькия П. Р., ТР. ГГО (436) 49~54 (1979).
- [2] М. Е. Берлянд, М. Н. Зашихин, МЕТЕ-
ОР. ИГИДР, (2), 5~16(1982).
- [3] 河村武, 气象研究ノート, (133) 48~58
(1977).
- [4] 河村武, 气象研究ノート, (133)26~47(1977).
- [5] O.G. 萨顿著、徐尔灏、吴和康译, 微气象学
217~258高等教育出版社, 1959。
- [6] 孙奕敏, 气象(7)29~31气象出版社(1981)。
- [7] 格拉波夫斯 P.N. 著, 周梦廖译, 大气凝结核,
45~74, 科学出版社, 1959。
- [8] 周明煜等, 环境科学 1 (5), 12~18(1980)。
- [9] Биненко В. И. ТР. ГГО, (415) 8~13
(1979)。