

上海城市气候中的“五岛”效应*

周 淑 贞

(华东师范大学地理系,上海)

本文从人为条件(城市下垫面性质的改变、人为热和污染物的排放等)与天气条件(大尺度环流微弱、局地天气形势等)两方面的结合上,应用气象卫星资料、回归统计分析、典型个例分析与长期气候统计分析等方法,阐明上海城市热岛、干岛、湿岛、雨岛和混浊岛等五岛效应的形成过程、特征以及它们之间相互制约、相互联系的关系。这对论证人类活动(通过城市化)对气候的影响,防治城市气候恶化,进行城市天气气候预报和城市规划都有重要意义。

关键词: 城市气候,上海,气候效应

上海市工商业发达,人口众多,建筑物密度与能源消耗量均大,城市的气候效应非常显著。本文应用:上海中心气象台、郊区县站近数十年气候资料;市区 10 个气象哨的观测记录;国家气象局卫星气象中心引进的 Tiros-N/GMS 气象卫星的晴天红外辐射资料;以及上海市环保部门调查的有关污染物和能量消耗等资料。从气温、温度、降水和混浊度等几个方面对上海城市气候中的热岛、干岛、湿岛、雨岛和混浊岛等“五岛”效应以及它们之间的相互关系,进行了分析。

一、城市热岛效应及其形成过程

上海城市气候中有明显的热岛效应^[1-3]。热岛的形成具有:一定的天气条件、下垫面性质和人为热三个因素。根据多次观测,上海城市热岛以在仲秋至初冬季节夜晚无云、无风的稳定型天气条件下表现最明显。例如 1979 年 12 月 13 日 20 时,在上述天气型下,在市中心南京路西藏路口,气温为 8.5℃,而其西北郊嘉定气温只有 2℃,热岛强度为 6.5℃^[1]。在有浓雾时热岛就很不明显,例如 1977 年 2 月 8 日 8 时市区有雾,这时城、郊气温差别只有 0.2℃^[4]。当有强风大雨时,热岛现象即完全消失。

根据 1984 年全年龙华(代表市区)与辛庄(代表郊区)逐日 20 时的气温差值 $\Delta T_{u-r,20}$ 进行计算,作为热岛强度。再与当天龙华的太阳直接辐射日总量 $S(J)$, 日平均风速 $\bar{v}_d(m/s)$, 20 时的风速 $v_{20}(m/s)$ 和 20 时低云量 N_{20} 等进行对照普查。在这一年气象资料序列中,删去有降水、冷暖空气过境和雾等特殊天气的日子,将余下的 154 天作为样本,进行逐步回归分析,计

本文 1987 年 8 月 7 日收到,1988 年 6 月 3 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

算结果得出回归方程如下:

$$\Delta T_{u-r,20} = 1.201 + 0.008375 - 0.146\bar{v}_A - 0.080v_{20} - 0.022N_{20}, \quad (1)$$

上式的复相关系数为 0.68,均方差估计值为 0.036,在信度为 0.05 下高度显著。

由(1)式可见,上海夜晚 20 时的热岛强度与白天城区太阳直接辐射的日总量为正相关,与日平均风速、20 时风速和低云量为负相关。

上海下垫面性质城区与郊区不同。首先,城区建筑群密集,深色屋顶、墙壁和路面的反射率小。在 Tiros-N/GMS 气象卫星资料上有明显的反映(图略),城区晴天所吸收的太阳辐射能比郊区多。其次,城区绿地面积小,晴天地面干燥,消耗于蒸散的热量少,所吸收的日射热能绝大部分用于下垫面增温,其下垫面增温速度比郊区快。第三,组成城市下垫面的建筑材料其平均导热率 K 约比郊区自然下垫面和农田大 3 倍,平均热容量 C 比郊区大 1/3 倍。城区总的热导纳 μ (thermal admittance, $\mu = \sqrt{KC}$) 要比郊区大得多。从而使整个城区下垫面储存的热量远比郊区多^[5]。因此当太阳高度角减小乃至日落之后,城区下垫面降温速度远比郊区为慢,城市下垫面温度经常比郊区高,提供给城区大气的长波辐射热能也就较多,这在城市(气温)热岛形成中起着重要作用。

从 1984 年 2 月 26 日 15 时气象卫星所分析的地面亮度温度($^{\circ}\text{C}$)分布图(图 1)上可以看出:这时城区下垫面温度明显的高于郊区。城区高值地面亮度温度等值线所划出的相对高温区域与上海市区的轮廓十分近似。可是在同一天 14 时实测的地面(距地面 1.5m 高处)气温分布图上(图略),城市气温热岛并无反映,直到当天 20 时(图 2)及次日凌晨 2 时(图略),才呈现

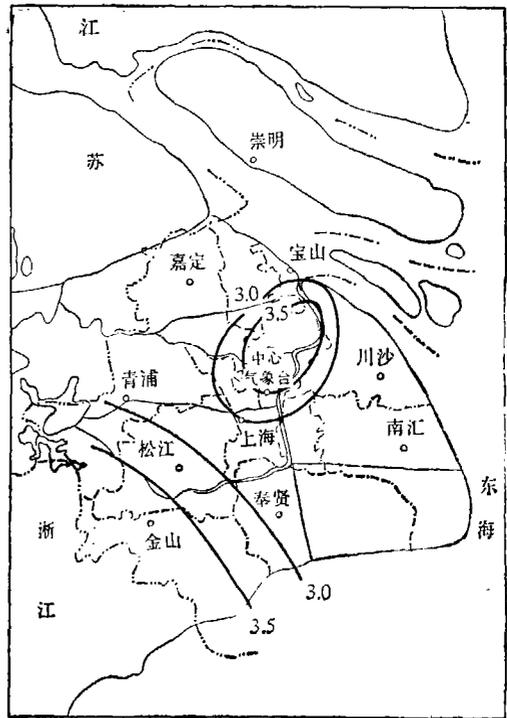
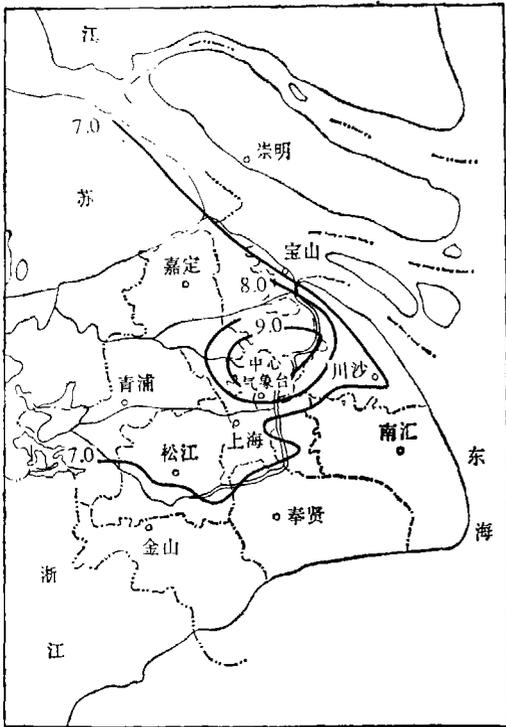


图1 1984年2月26日15时地面亮度温度($^{\circ}\text{C}$)分布

图2 1984年2月26日20时地面气温($^{\circ}\text{C}$)分布

出城市热岛现象。再从当天实测风速和城市与郊区的气温日变化图(见图3)上可以看出,由于日间风速大,而引起的水平方向和垂直方向的能量交换比较显著,城、郊间的气温差别并不大。到了日落以后,风速减小,城、郊间的空气热量交换减弱,城市下垫面白天蓄积的热量仍继续以长波辐射和湍流交换等方式进入城区大气,部分地补偿了大气由于长波辐射而损失的热量,使城市气温下降缓慢。相对地对降温较快的郊区来说,便形成城市(气温)热岛^[6]。

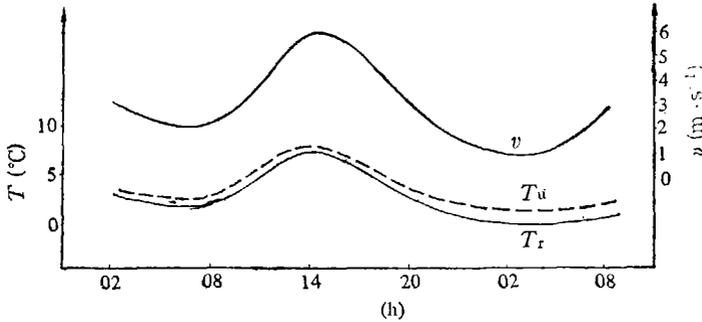


图3 1984年2月26—27日城郊气温(°C)及风速(m/s)日变化曲线
(T_u ——市区8站平均温度(°C), T_r ——郊区10站平均温度(°C), v ——龙华风速(m/s))

由此可见,在日落以后城市与郊区的气温下降速率不同是夜晚城市热岛形成的直接原因,而白天城市与郊区的不同增温效应和蓄热能力,则为夜晚城市热岛的形成奠定了能量基础。城市建筑群鳞次栉比,天空可见度 ϕ (sky view factor) 小,亦有利于夜晚城市热岛的形成^[7]。

形成上海城市热岛的另一因素是城市人为热的排放量比郊区多。据1984年环保部门对上海市区及其附近四个郊县的部分地区总面积约为500km²范围内的调查(上海市区总面积在1984年调整后为340km²,占调查范围的68%),城市耗煤总量却占这一范围的78.36%,耗油量占73.65%(见表1),均比近郊其它地区为多。在这范围内的“耗煤大户”——工厂更是集中市内,其中以杨浦区为最多。按单位面积的耗煤量计算,市区平均每平方公里面积上耗煤量为36874.6t/km²·a,相当于近郊的1.704倍。市区每年每平方公里面积上的耗油量为11533.6t/km²·a,相当于近郊的1.508倍,仅就此两项而论,市区平均每年每平方公里面积上所获得的人为热相当于郊区的3.212倍。如果再加上其它的人为热(如燃烧其它化石燃料等),那么市区与郊区的人为热差异当更大。此外,与人为热排放的同时还有CO₂,烟尘等物质进入市

表1 1984年上海市区能量消耗分配表

	市 区												其它 (近郊部分 地区)	总计
	徐汇	长宁	普陀	闸北	虹口	杨浦	黄浦	南市	卢湾	静安	吴淞	闵行		
煤耗量占%	2.53	2.52	3.22	1.23	1.22	18.34	0.50	2.07	1.80	1.08	4.76	39.04	21.64	100
油耗量占%	1.84	1.57	2.62	1.76	1.90	29.92	0.13	12.05	0.48	0.44	11.03	9.91	26.35	100
煤耗 $\geq 1 \times 10^4$ t/a 的工厂数	4	4	9	4	3	20	1	3	5	2	7	10	20	92
煤耗 $\geq 1 \times 10^3$ t/a 的工厂数	48	57	63	32	32	72	10	32	36	36	8	8	83	517

区,这对热岛的形成亦有一定的助长效应。

总之,由于上海市区与郊区下垫面性质的差异和人为热排放量大小的悬殊,这些城市化的人为因素,使在晴稳无风或风速极小的天气形势下,产生显著的城市热岛效应。

二、城市干岛和湿岛效应

上海城市对湿度的影响主要表现在以下两个方面。

1. 干岛与湿岛昼夜交替现象

我们曾在 1959 年 8 月 9 日至 11 日在上海市及其近郊,用阿斯曼通风干湿表进行过 33 个定点昼夜逐时观测,发现城区空气的水汽压 (hPa) 白天比郊区小得多,出现城市干岛,而夜间从子夜至凌晨 5 时左右却相反,城区水汽压比郊区大,出现湿岛^[8,9]。

图 4 是 1959 年 8 月 10 日 5 时所测得的水汽压 (hPa) 和气温 (°C) 分布情况。当时天晴、风微(风速为 0—1.3m/s)。湿岛中心 (W) 位于威海卫路瑞金路口 61 中学附近,水汽压为 31.0hPa,近郊水汽压在 28.6—29.6hPa 间,市中心与近郊相差 1.4—2.2hPa,此时有一热岛中心 (N) 在其附近。

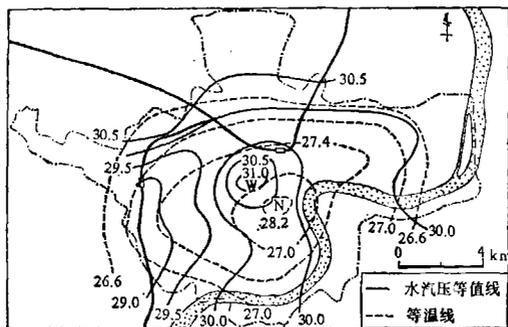


图 4 上海城市湿岛图

(1959 年 8 月 10 日 5 时水汽压 (hPa) 和气温 (°C) 的分布。
W 示湿岛中心, N 示干岛中心)

在白天城区则转变成干岛,图 5 是同一天 7 时的水汽压和气温分布图。干岛中心 (D) 位于思南路思南小学附近,水汽压为 26.9hPa,这时西郊公园为 30.6hPa,相差 3.7hPa。

根据观测记录,例如 1959 年 8 月 9 日 15 时至 10 日 15 时(其日变化曲线图从略),城市湿岛出现时间比较短,湿岛的强度 (Δe_{u-r}) 亦比较小。在一昼夜中,干岛出现时间要长得多,强度 (Δe_{u-r}) 比较大,其最大值可达—10hPa 以上。从日平均的水汽压来讲,城市小于郊区。

产生干岛与湿岛昼夜交替现象的天气条件与热岛相似。都是在晴天无风或风速极微的情况下出现。白天郊区(农田遍布、河汉水道纵横)的蒸发蒸腾量比市区大,因此郊区水汽压比市区高。夜晚郊区的空气冷却得很快,并且层结比城市覆盖层稳定,水汽集结在贴近地面的下层,有大量露水凝结出来,因此水汽压减低。市区因夜间热岛效应强,气温比郊区高,增加其蒸发能力,且有微风来自郊区(热岛环流),加上还有一定量的人为水汽,凝露量又小,这些因素综合起来,使这时城市覆盖层的水汽压反而比郊区稍大,出现湿岛现象。

从实测的相对湿度来看,基本上都是市区小于郊区,即使在水汽压出现湿岛的那一段时间

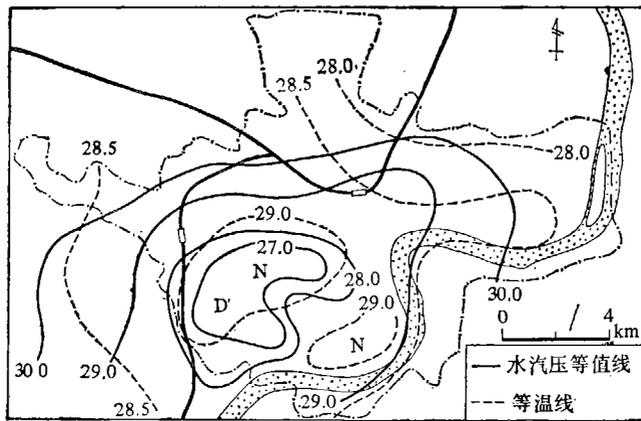


图5 上海城市干岛图

(1959年8月10日7时水汽压(hPa)和气温(°C)的分布。

D示干岛中心, N示热岛中心)

内,亦复如此。

2. 干岛效应突出

在上海地区水汽压和相对湿度的平均值干岛效应非常突出,尤以相对湿度为甚。以1984年上海地区年平均相对湿度分布为例(图略),市中心相对湿度为74%,而近郊上海县莘庄却有82%。两者相差达8%。这显然是受城区蒸发量小和热岛效应的双重影响。

三、城市雨岛效应及其形成条件

上海地区雨量观测站多达170余个¹⁾。这为研究城市雨岛效应提供了有利条件。我们曾作过大量个例分析和分类统计^[10],发现上海城市对降水的影响以汛期(5—9月)暴雨比较明显,而在汛期暴雨中又以气旋暖区型、低压型、静止切变形和静止锋型等天气形势下,出现雨岛效应的机会较多。这几种天气型占整个汛期暴雨过程降水频率的64%。因此在上海近20余年汛期平均降水量分布图上,城区的降水量比四周郊区多(见图6)。

上海城市雨岛形成条件是在大环流较弱,有利于在上海地区产生降水的大尺度天气形势下,由于城市热岛效应助长局地气流的辐合上升;下垫面粗糙度大,对移动滞缓的降雨系统有阻障效应,使城区雨时增长。再加上城区空气中凝结核多,有利于云(特别是低云)的形成,其中有些粒径较大的凝结核(如硝酸盐类)有促进暖云降水的作用,这种种因素的影响,会“诱导”暴雨最大强度的落点位于市区及其下风方向。我们过去已列举过不少实例。本文仅就1985年8月31日的特大暴雨在上海市区形成强度极大的雨岛进行个例分析。

这一天市区内多数地区降了60—70mm的降水,暴雨中心在静安区常熟路一带,降水量达161.3mm,其中1h降水竟达97mm。这次暴雨强度大,集中在市中心区。与此同时,上海县、奉贤县降水量很少,青浦、松江基本无雨(见图7)。

经过分析,这次特大暴雨的天气形势是副热带高压在8511台风转向后西伸,南下的西风

1) 这些雨量站分属各部门的气象站、气候站、水文站、泵站、水闸等,站点分布图见文献[8]。

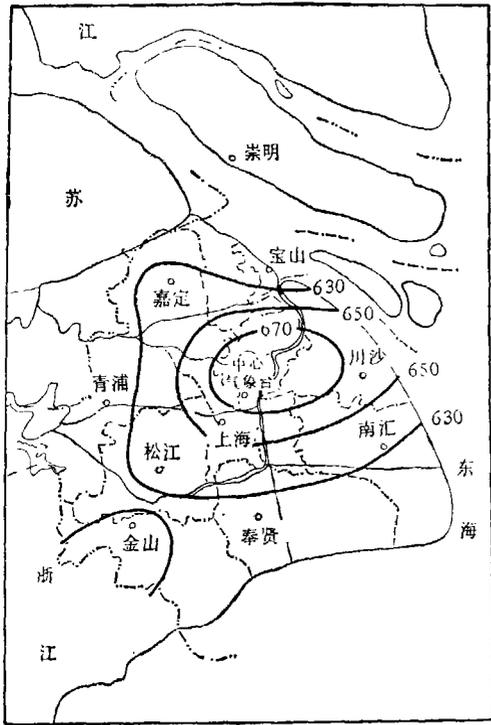


图 6 上海汛期(5—9月)平均降水量 (mm)分布图(1959—1985年)

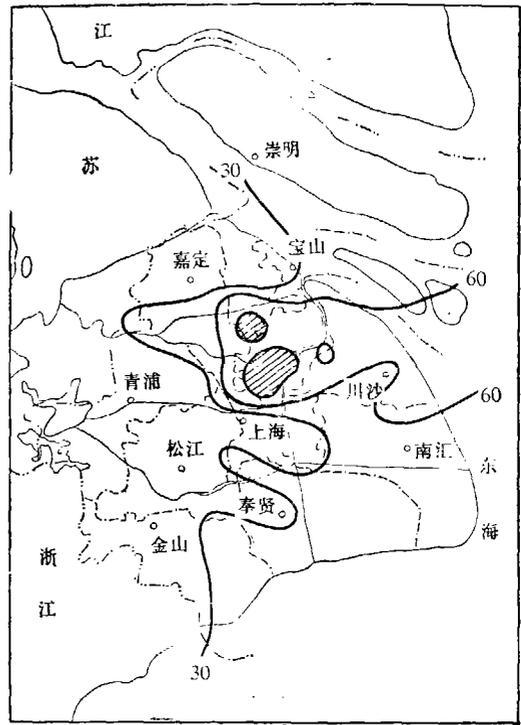


图 7 1985年8月31日08时—9月1日08时上海地区雨量(mm)图 (图中阴影区域内为14时—18时雨量在70mm以上地区)

槽在移到上海附近时,短期内近于停滞,副热带高压位置已比较稳定,冷暖空气在上海交绥.在上述环流形势下,02时市区平均气温为26.5℃,比四周郊区高2.2℃.这在8月份属于为数不多的较强热岛.这时水平风速很小,多数台站在1m/s左右.市区有热岛环流,涡旋中心位于市区.从总温度的计算表明¹⁾,市区为一高能中心,总温度为76.5℃,比郊区约高出7℃.到早晨8时,能量中心依然维持在市区.11时地面流线上黄浦江以西为西北风,而黄浦江以东为偏东风,辐合线两侧温差一般为3℃,最大值为5℃.

从这种流场和温度场的结构上可以认为,这条辐合线实际就是明显的海风锋.当海风锋经川沙西移到市区,与原先的热岛起叠加作用,使得降水最大区位于市区.这就导致短时间内在市区形成一强烈的雨岛,造成市区大面积积水,最深处达50cm,使市区居民生活和交通都受到一定的影响^[11].

通过普查,在近20余年中,以1978年上海地区大气环流较弱,在汛期冷空气多在北纬35°以北活动,锋面位置偏北.当年台风偏在南海和太平洋面上,上海受台风影响很小.这一年是江南的大旱年.在这种大型环流条件下,上海城市雨岛效应特别显著,市区降水量在410mm以上,比四周郊区高得多.而在环流较强的年份(如1977年),上海城市雨岛效应就不出

1) 总温度(T_t)按 $T_t = T + 10z + 2.5q + 5 \times 10^{-4}v^2$ 简化公式计算,式中 T ——气温(℃) z ——海拔高度(m), q ——比湿(g/g), v ——风速(m/s).

现。

四、上海城市混浊岛效应

上海城市混浊岛效应可从以下三个方面来分析:

1. 大气质量的城、乡对比

上海市区能量消耗和污染物的排放量远比郊区多,以 1984 年为例,列表分析如下(见表 2)。由表 2 可见上海城区二氧化硫 (SO_2)、烟尘和粉尘的年排放量分别相当于郊区的 2.4, 2.7 和 3.3 倍。再从各种污染物的年日平均浓度 (mg/m^3) 来讲,城区 SO_2 为郊区的 9 倍,氮氧化物 NO_x 为郊区的 2.5 倍,飘尘和降尘分别为郊区的 1.2 倍和 2 倍强。

表 2 1984 年上海城区与郊区空气污染状况比较

	SO_2 排放量 ($10^4\text{t}/\text{a}$)	烟尘排放量 ($10^4\text{t}/\text{a}$)	粉尘排放量 ($10^4\text{t}/\text{a}$)	SO_2 年日 平均浓度 (mg/m^3)	SO_2 年平 均超标率 (%)	NO_x 年日 平均浓度 (mg/m^3)	NO_x 年平 均超标率 (%)	飘尘年日平 均浓度 (mg/m^3)	飘尘年平均 超标率 (%)	降尘量年 平均 ($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{min}$)
城区	22.9	15.9	7.9	0.09	12.0	0.05	3.0	0.16	39.0	24.0
郊区	9.5	5.8	2.4	0.01	0.2	0.02	0.1	0.12	22.0	11.6
城区—郊区	13.4	10.1	5.5	0.08	11.8	0.03	2.9	0.04	17.0	12.4

再从因工业生产而导致上海地区大气污染物绝对排放量的密度来看,上海城区平均为 $1556.1 \text{ t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$, 相当于郊县平均值的 66.5 倍, 相当于全市区(包含城郊)的 17.9 倍(见表 3)。特别是闵行、杨浦、闸北、南市、卢湾, 这五个区分别比全市平均分布密度高 48 倍、40 倍、24 倍、17 倍和 16 倍。这一连串数值可以充分说明上海城区的大气质量远比郊区差。城区飘尘污染的超标率竟高达 39%, SO_2 超标率达 12%, 城市混浊效应实在惊人。

表 3 上海大气污染物(工业排放)绝对排放量密度 ($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$)

城区	区名	静安	黄浦	虹口	普陀	闸北	徐汇	南市	杨浦	闵行	卢湾	长宁	吴淞	城区平均
	排放密度		1153.0	312.0	938.0	883.0	2089.0	1059.0	1471.0	3515.0	4182.0	1409.0	1140.0	522.3
郊县	县名	宝山	川沙	奉贤	南汇	松江	青浦	崇明	嘉定	上海	金山	郊县平均	全地区(含城郊)平均	
	排放密度		44.5	30.3	3.13	4.30	6.00	3.93	21.25	74.3	16.0	29.8	23.4	87.1

2. 低云量和阴、晴天数的分布

根据上海近 20 余年来云量的记录分析,发现上海城区(以上海台为代表)的低云量比郊区多,以低云量为标准的晴天日数(低云量 ≤ 2)比郊区少,阴天日数(低云量 ≥ 8)比郊区多,表 4 列举了上海近 5 年(1981—1985 年)城郊各台站年平均低云量、晴天和阴天日数的平均值。

表 4 上海近 5 年(1981—1985 年)各台站低云量、晴天和阴天日数平均值

	I	II										III	I—III
	上海台	上海县	嘉定	宝山	川沙	南汇	奉贤	松江	金山	崇明	郊县平均值		
低云量	4.0	3.3	2.7	2.9	3.1	2.7	3.0	3.3	2.6	3.2	3.0	1.0	
晴天日数(低云量 ≤ 2)	132.4	140.6	174.8	185.0	174.2	179.4	165.8	167.8	192.6	164.0	171.6	-39.2	
阴天日数(低云量 ≥ 8)	55.8	41.2	17.0	38.4	38.4	22.4	28.0	45.8	24.4	41.6	33.0	+22.8	

由表 4 可见,最近 5 年(1981—1985 年)上海城区年平均低云量为 4,比郊区多 1 成,晴天日数为 132.4 天,比郊区各站平均值少 39.2 天,而阴天日数却多 22.8 天,这主要是由于城区污染物浓度大,凝结核多,再加上城区热岛引起的热力湍流,城市下垫面粗糙度大,机械湍流比郊区强等因子所造成的。

3. 混浊度因子的分布

混浊度因子的表示方法有多种,我们采用 Marvin 的方法,以散射辐射(D)与直接辐射(S)的比值 D/S 来表示。它计算方便,物理意义明确,比 Linke 混浊度因子所反映的上海大气混浊度更为敏感。上海台自 1958 年起开始进行太阳直接辐射(S)、散射辐射(D)和总辐射(Q)的观测。迄今已积累了 20 余年的资料。上海郊县各气象站没有太阳辐射的观测项目,但有 20 余年的日照百分率(S')、总云量(N_1)和低云量(N_2)的观测资料。我们根据上海台的记录,应用回归统计的方法,求得 Q , D 和 S 与 S' , N_1 和 N_2 关系的回归方程如下^[3]:

$$Q = S_0(0.285 - 0.016N_2 + 0.488S'), \quad (2)$$

$$D = -106.408 + 17.278N_1 + 151.49S', \quad (3)$$

$$S = Q - D. \quad (4)$$

上式中 S_0 为天文辐射月总量 (W/m^2),其余符号如前述。(2) 式总的复相关系数 R 为 0.94 标准差为 0.5。(3) 式中 R 为 0.72,标准差为 0.8。(2), (3) 两式皆通过显著性水平为 0.01 的 F 检验。

根据上述经验公式和上海各郊县 1959—1985 年的日照百分率(S')、总云量(N_1)和低云量(N_2)的记录,先求出各站历年的 Q , D 和 S 值,然后再计算其混浊度因子 D/S 。计算结果

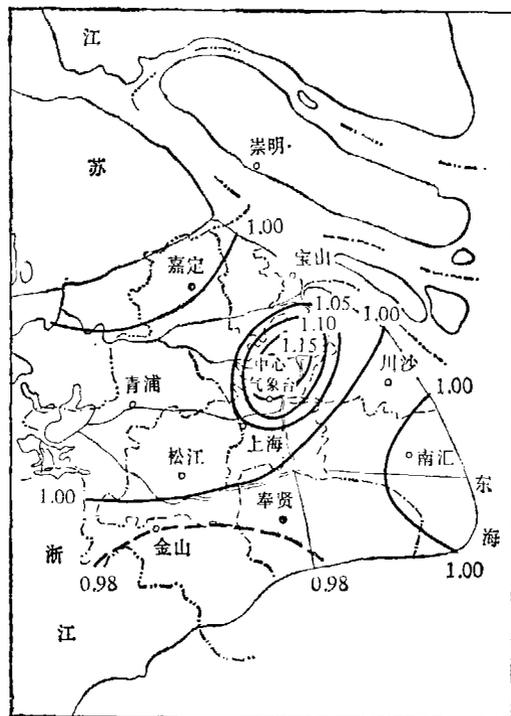


图 8 上海地区年平均混浊度因子(1959—1985年)的分布

表明:上海地区混浊度因子的地区差异非常明显。上海台因受城市的影响,混浊度因子最大,达 1.17(1959—1985 年 27 年平均值),比同时期十个郊县站 D/S 的年平均值要大 15.8%。在上海混浊度因子分布图(图 8)上,城区形成一个明显的混浊岛。东部和南部濒临东海和杭州湾地区,西北部嘉定等县的混浊度因子都不足 1.0,而以奉贤和金山两站为最小。

显然,混浊度因子的大小取决于太阳散射辐射(D)和直接辐射(S)、上海城区污染物浓度大,低云量和阴天日数又比郊区多,这就必然导致城区的 D 值增大, S 值减小,混浊度因子 D/S 加大,用 D/S 来表示大气混浊程度最能反映出城市与郊区大气质量的差异。

五、结 束 语

上海城市的热岛、干岛、湿岛、雨岛和混浊岛等“五岛”效应是上海城市气候在温度场、湿度场、降水分布和空气混浊度分布上的几个主要特征。它们的形成条件有两方面:一是人为条件,城市化的高度发展,即人口密集、下垫面的性质改变显著、不透水面积大、地面粗糙度大、能源消耗量大、污染源众多、城乡差异突出;另一条件是大气环流微弱、天气形势稳定、风速小,在这种天气下城乡差异的影响才能呈现出来。

在“五岛”之中,以热岛、干岛和混浊岛出现的频率为最大。湿岛我们目前只发现在夏季无风或微风的晴夜数小时内出现。雨岛则集中于汛期大气环流较弱时,某些天气型下出现。热岛、干岛、和混浊岛分布形式基本上与城市建成区一致。雨岛则受当时风向影响,出现在城区及其下风方向。

这“五岛”之间有着紧密的相互联系、相互制约关系。城市热岛强,能促使城区相对湿度降低,夜间凝露量减小,有利于干岛、湿岛的昼夜交替。热岛辐合气流和热力湍流有助于城区低云量的增多,并能诱导对流雨在城区增幅,对混浊岛和雨岛的形成是有利的。相反,由于混浊岛的存在,使太阳直接辐射减弱,低云量增多,晴天日数减少,对城市热岛有负反馈作用。显然,雨岛效应更能破坏热岛的存在。掌握上海城市气候中的“五岛”效应,不仅可为城市天气气候预报提供科学依据,并且对城市的防暑降温、汛期排涝和大气污染的防治等都有重要的参谋作用。

参 考 文 献

- [1] 周淑贞、张超,地理学报,37(1982),372—382.
- [2] 周淑贞,地理学报,38(1983),397—405.
- [3] 周淑贞、张超,城市气候与城市规划,科学出版社,1985,128—137.
- [4] 周淑贞、郑景春,气象学报,45(1987),366—369.
- [5] 周淑贞、张超,城市气候学导论,华东师范大学出版社,1985,67,128.
- [6] 周淑贞、吴林,环境科学学报,1987,3: 261—268.
- [7] Oke, T. R., *Boundary Layer Climate*, Methuen & Co. London, 1978, 263.
- [8] 周淑贞、张超,华东师范大学学报(自然科学版),1983,1: 69—84.
- [9] Chow Shu Djen, Chang Chao, *Geo. Journal.*, 8 (1984), 3: 201—204.
- [10] Chow Shu Djen, WMO-No. 652, 1986, 87—109.
- [11] 束炯,华东师范大学学报,1987,4: 81—87.
- [12] Wesely, Marin L., et al., *Atmos. Environ.*, 10 (1976), 11:981.
- [13] 周淑贞、邵建民,地理学报,42(1987),319—327.