

福州城市空气污染对太阳辐射的影响

蔡学湛

(福建省气候中心)

提 要

本文通过1962—1985年大气辐射过程、大气透明度和大气混浊度的变化,间接推断福州大气质量的长期演变及空气污染的季节变化。结果表明,直接辐射量减少,大气透明度的降低和大气混浊度的提高,都反映了城市空气污染的逐步发展,归因于空气中颗粒物的增加。本文所讨论的大气污染物混浊因子 T_R ,可以较客观地反映福州空气污染的年变化。

城市上空各种废气、含尘量的增加,势必改变大气和地面的辐射过程。福州近几年城市工业和人口的发展,排入大气的废气、尘埃等污染物迅速增加,但由于尚未普遍建立空气监测站网,缺乏长期的空气污染实测资料,因而要直接分析评价空气质量的演变规律是困难的。本文试图通过空气污染所引起的大气辐射过程的改变,以及大气混浊度长期与全年的变化,来间接推断福州上空大气质量的长期演变规律,以及空气污染强度的季节特征。

在分析大气辐射过程中,为了使问题简化,排除云层对太阳辐射的影响,本文使用的资料只采用福州站9:30、12:30、15:30三个时次晴天无云时的日射观测记录,及其相应的水汽压。讨论年际变化时采用1962—1985年的春季3—5月份,讨论全年变化时则采用1981—1985年的1—12月份,共有1800项次记录作为统计样本。

一、空气污染引起太阳总辐射及其各分量的变化

晴天时太阳辐射在大气中的传播所受到的削弱作用,主要表现为干洁空气分子的散射,水汽与臭氧的吸收,以及气溶胶微粒等

混合污染物的吸收和散射。那末,混合污染物对太阳直接辐射的减弱量(包括臭氧的减弱作用)可以通过下式余项法估计:

$$\Delta S_D = S_0 - S_m - \Delta S_w - S \quad (1)$$

式中 S_0 为太阳常数,其值为 $1354W \cdot m^{-2}$,讨论全年变化时, S_0 须进行日地距离的订正; ΔS_w 为水汽对直接辐射的吸收减弱量; S 为到达地面实测的垂直于太阳光线的直接辐射量; S_m 为经过干洁大气受到空气分子散射减弱了的直接辐射通量,可按下式计算^[1]:

$$S_m = S_0 [1.112(1 + 0.265m)^{-0.325} - 0.112] \quad (2)$$

式中 m 为大气光学质量,可根据太阳高度角 h 求出,

$$m = 1/\sin h$$

水汽对直接辐射的吸收减弱,取决于光程内的水汽含量,一般情况下可用下式估计^[1]:

$$\Delta S_w = 0.172(m \cdot W)^{0.303} \times 697.8 \quad (3)$$

式中 W 指铅直方向大气柱内的水汽含量,由实验式 $W = 2.1e_0$ 估计, e_0 系地面水汽压,以毫米为单位。

福州地面春季晴天垂直于太阳光线的直接辐射通量多年平均值为 $649W \cdot m^{-2}$,它只有大气上界太阳辐射量的48%。经上面各式

计算,在实际大气传播过程中,受到空气分子的散射,平均减弱 $147\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (占大气上界的11%);受到水汽的吸收,平均减弱 $349\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (占大气上界的26%);受到混合污染物的吸收和散射,平均减弱 $209\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (占大气上界的15%)。其长期变化可由图1看出,水汽对直接辐射的减弱年际变化很小,其偏差约在 $\pm 6\%$ 之内,整个变化过程基本上没有增加或减少的趋势。而混合污染物对直接辐射的减弱年际波动较大,在其波动中减弱量有着明显的增加趋势。整个变化过程大致经历这样几个阶段:1962—1968年这7年变化不大;1969—1979年的11年中减弱量有所增加,约比前7年平均增加25%;1980—1985年这6年增加更为明显,比头7年平均增加53%。特别是1981—1985年这5年,比1962—1966年头5年平均增加了64%。其结果,使得1981—1985年到达地面垂直于射线的直接辐射比1962—1966年降低了13%。

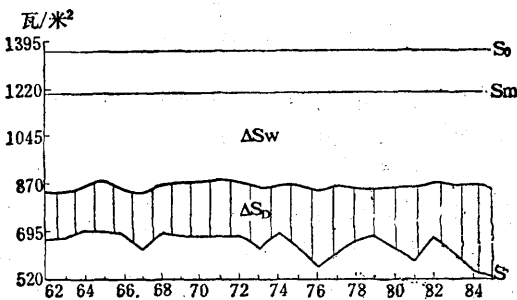


图1 大气中各成份减弱直接辐射的年际变化

近年来的研究发现,由于人类的活动导致大气层中臭氧含量略有减少的趋势〔2〕。那末,使得混合污染物减弱直接辐射量 ΔS_D 增加的直接原因只能是空气污染物中影响太阳辐射的烟、粉尘等总颗粒物的增加。

近来短期的环境监测表明,福州上空空气污染物的主要成份为总颗粒物和降尘,其次为二氧化硫。福州的能源结构以烧煤为主,

市区及周围分布着众多的大小工厂,这些工厂的生产和居民生活都以煤炭为主要燃料。据统计全市煤炭年耗用量,1962—1968年平均为17.1万吨,1969—1979年平均为36.0万吨,1980—1985年平均达51.0万吨,因而向上空排放的废气和烟尘等污染物随着煤耗量的增加而增加。

空气污染物的增加,在减少到达地面直接辐射量的同时,使得到达地面的天空散射辐射量增加。散射辐射的增加在一定程度上补偿了直接辐射的损失,而太阳总辐射的变化则取决于它们的总和。

图2给出福州全年(全天候)直接辐射量 S' 、天空散射辐射量 D 和总辐射量 Q 历年变化情况。

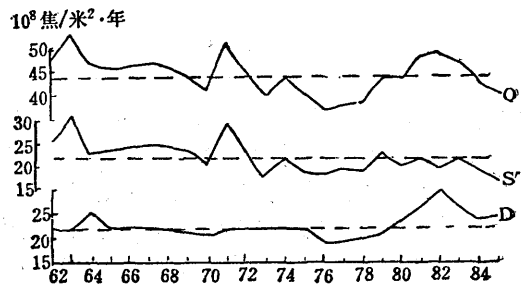


图2 太阳总辐射年总量及其分量的年际变化

其变化幅度大致可由表1说明,1974—1985年比1962—1973年直接辐射量平均减少17.6%,散射辐射量平均增加5.2%,D的增加量不及 S' 的减少量,其结果还是造成总辐射量的减少,1974年后平均减少6.9%。

表1 全年太阳总辐射量及其分量前后12年平均(10^7 焦/米²·年)

辐射量	年代	
	1962—1973年	1974—1985年
S'	240.3	198.0
D	217.2	228.5
Q	457.5	426.1

二、空气污染对大气透明度的影响

计算大气透明度，通常利用布格公式

$$P_m = \sqrt{\frac{m}{S_0}} \quad (4)$$

P_m 为大气光学质量为 m 时的大气透明系数， P_m 值愈小，表征大气愈混浊，反之， P_m 值愈大，大气愈干洁。

由于不同 m 确定的 P_m 值具有虚拟变化，即福尔布斯效应，根据阿维尔基耶夫公式^[3]，可将不同 m 时的大气透明系数统一

订正到 $m = 2$ ，以利比较，即

$$P_2 = 0.964 \left(\frac{S}{1.84} \right)^{\frac{\sinh 0.15}{1.3}} \quad (5)$$

根据福州 1981—1985 年 1—12 月份的日射值，算得 P_2 的平均值为 0.626。

表 2 给出福州历年春季的 P_2 值。表中可见，在长期的变化过程中，大气透明系数是呈逐年下降的趋势，尤其是最近几年颇为明显，福州上空的空气已越来越混浊。

晴天时的大气透明度，主要取决于大气

表 2 逐年 (3—5 月份) 的大气透明系数

年份	1962	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
P_2	0.625	0.639	0.649	0.644	0.623	0.577	0.651	0.613	0.605	0.624	0.632	0.580
年份	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
P_2	0.645	0.581	0.558	0.589	0.609	0.625	0.590	0.552	0.618	0.583	0.532	0.514

中水汽和污染物的含量，为了鉴别水汽和污染物对于透明度的影响程度，以 $P_2 = P_L P_w P_d$ 表示总透明系数与各成份透明系数的关系， P_L 代表干洁空气透明系数， P_w 代表水汽透明系数， P_d 代表混合污染物透明系数。

若设 S_2 为 $m = 2$ 时到达地面垂直于太阳光线的直接辐射量，它可由 (4) 式的演变式 $S_2 = S_0 P_2^2$ 算出， S_{Ld} 为 $m = 2$ 时经过干浊大气 (实际大气除去水汽) 的直接辐射通量，那末， $S_{Ld} = S_2 + \Delta S_w$ 。根据布格定律，水汽与混合污染物的透明系数可分别列于下面两式：

$$P_w = \sqrt{\frac{S_2}{S_{Ld}}} \quad (6)$$

$$P_d = \sqrt{\frac{S_{Ld}}{S_L}} \quad (7)$$

式中 S_L 是经过干洁大气的直接辐射通量，根据文献[4]，取值 $1130.5 W \cdot m^{-2}$ 。

表 3 是根据 (6)、(7) 两式计算的结果。该表说明，虽然水汽 P_w 对于总透明度 P_2 的影响大于污染物 P_d ，但是 P_w 的际变化很小，它对 P_2 长期变化的影响是不大的， P_d 际变化大，并出现逐年减小的趋

表 3 逐年 (3—5 月份) 的 P_w 和 P_d 值

年份	1962	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73
P_w	0.763	0.766	0.766	0.775	0.752	0.714	0.773	0.743	0.746	0.767	0.764	0.728
P_d	0.908	0.911	0.926	0.908	0.906	0.882	0.920	0.898	0.886	0.888	0.902	0.871
年份	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
P_w	0.772	0.737	0.715	0.743	0.743	0.754	0.731	0.742	0.758	0.745	0.750	0.740
P_d	0.914	0.860	0.852	0.867	0.894	0.905	0.881	0.743	0.815	0.782	0.709	0.694

势，因而它对 P_2 长期变化的影响是主要的，特别是近几年的影响，已使 P_2 降到历史最低值。

三、空气污染与大气混浊度的关系

由于大气透明系数具有随 m 而变化的缺陷，世界气象组织早在1969年就建议各成员国建立大气本底污染监测网，把大气混浊度列为主要观测内容。林克因子作为表征大气混浊度的一个特征量，它对于大气混浊度的反映要比大气透明系数灵敏得多，并且林克因子还可以不受 m 的牵制，把削减辐射的基本成份分解出来，而便于全年变化的分析。

所谓林克因子，就是实际大气的消光系数与干洁大气的消光系数之比，其物理意义在于表明该地实际大气的混浊度是该地干洁大气混浊度的倍数，即

$$T = \frac{\ln S_0 - \ln S}{\ln S_0 - \ln S_m} \quad (8)$$

图3是采用上述样本根据(8)式计算的结果。图中表明，福州空气混浊度 T 是不断提高的，24年中曾出现几次的波动，但每次波动的峰值或谷值均比前次有一定程度的提高，特别是1982年后呈急剧上升的趋势。

实际消光系数可以看作干洁大气的消光

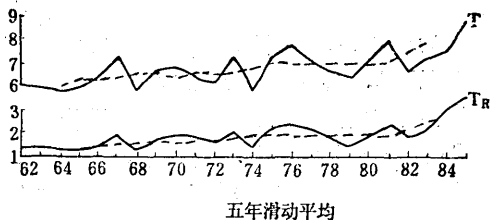


图3 大气混浊度的年际变化

系数(以 $a_{干洁}$ 表示)，水汽消光系数 ($a_{水}$) 与混合污染物消光系数 ($a_{污}$) 之和。如设 $T_w = \frac{a_{水}}{a_{干洁}}$, $T_R = \frac{a_{污}}{a_{干洁}}$ ，按照林克因子的定义，(8)式可写为

$$T = 1 + T_w + T_R \quad (9)$$

那末， $T_w = \frac{\ln(S + \Delta S_w) - \ln S}{\ln S_0 - \ln S_m}$ (10)

因而根据(9)、(10)两式可以把空气混浊度中两个基本因子分解出来。由图3可见， T_R 与 T 的年际变化基本上是一致的，从而我们可以推论福州大气混浊度的长期变化，基本上取决于空气污染物的影响，1982年后大气混浊度的急剧上升，无疑是由污染物的急剧增加而引起。

我们还可根据(8)一(10)式计算福州大气混浊度的全年变化，如表4。

表4 林克因子及其各分项各月平均值

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
T	5.35	6.46	8.08	8.20	8.23	6.15	6.38	5.98	5.53	5.25	4.46	5.01
T_w	2.80	3.25	4.29	4.59	5.05	4.36	4.69	4.42	4.07	3.57	2.79	2.64
T_R	1.55	2.21	2.80	2.61	2.19	0.79	0.69	0.55	0.46	0.68	0.67	1.37

不言而喻， T_w 值的年变化，则完全取决于福州 e_0 的年变化，即春夏大，秋冬小。

福州冬季无需供暖，可把一年四季污染物的排放量看成不变。在污染源不变的情况下，污染程度主要受到气象条件的影响，如风向、风速，大气层结等。近地层逆温的出现有利于污染物的堆积。据多年统计，福州近地层逆温出现的频率、厚度和强度，都表

现为冬春大，夏秋小的规律(冬春逆温的频率、厚度和强度分别为夏秋的1.6、4.4和2.7倍)。风是输送和稀释污染物的主要因子，就长期而言，显然与当地各风向频率和平均风速有关，福州地面风速夏秋大，冬春小，秋最大，春最小。在大气层结和平均风速二因素的共同影响下，冬春上空污染物的堆积量可大于夏秋。除此，春季静风频率最高，

风向多 SE, 日射站 (位于市中心略北偏西) 经常处于弱的 SE 风的下风方, 此地上空的污染物含量可堆积得更高; 秋季盛行强而稳的 NW 风, 日射站 (大致位于上风方) 上空的污染物含量可被输送和稀释得较低。表 4 T_R 值表现为冬春大, 夏秋小, 春最大, 秋最小的年变化特征, 与上述各季节气象条件的共同影响基本一致。

日射站附近近几年每年四季 (1、4、7、10 月份) 每季 4—5 天的实测值表明, 冬春近地层颗粒物的浓度约为夏秋的 2 倍, 各季间浓度变化与上述讨论也大体一致。

因而所计算的 T_R 值, 既反映了污染程度的年际变化, 又反映了当地气象条件影响污染程度的全年变化。

四、小 结

1. 近几年到达福州地面太阳辐射量出现明显的变化, 直接辐射量渐趋减少; 天空散射辐射量渐趋增加, 其结果总辐射量略有减少, 1974 年后总辐射量平均减少了 6.9%。

2. 空气污染物对直接辐射传播减弱的影响逐步扩大, 是到达地面直接辐射量渐趋减少的直接原因, 它与煤炭耗用量的逐年增加有关。估计 1981—1985 年污染物对直接辐射的减弱量约比 1962—1966 年增大 64%。

3. 近几年直接辐射量的减少, 大气透明

度的降低和大气混浊度的提高, 都反映了福州城市空气污染逐步发展的概况: 1968 年前空气质量基本良好; 1969—1979 年空气质量有所下降; 1980 年后空气质量明显下降, 近两年尤为严重。

4. 林克因子反映大气混浊状况较为敏感, 从中分解污染物影响因子 T_R 的计算方法是可行的。 T_R 的最大优点, 还表现在客观地反映日射站附近污染程度的年变化, 当地年变化表现为冬春大, 夏秋小, 春最大, 秋最小。

为简便起见, 本文讨论年际变化时, 只采用每年春季 45 个样本数, 由于污染程度还受气象环境条件的制约, 可影响年际间平均值的波动, 但不至影响年际变化的趋势及其大致幅度, 如果增加样本数, 可望取得更佳效果。

参考文献

- [1] K. Я. 康德拉捷夫 (李怀瑾译), 太阳辐射能, 科学出版社, 1962 年。
- [2] 王贵勤等编译, 大气臭氧研究, 科学出版社, 1985 年。
- [3] Евневич Т. В., К вопросу о расчёте характеристик прозрачность атмосферы при сильном её помутнении, Мет. и Гид. 1977, 3.
- [4] 王炳忠等, 我国的大气透明度及其计算, 太阳能学报, 1981 年, 第 1 期。

The influence of air pollution on solar radiation over Fuzhou City

Cai Xuezhao

(Climat center of Fujian)

Abstract

In this paper using indirect method inferred long variation of atmospheric quality and the seasonal variation of air pollution, by the variation of atmospheric radiation process, transparency and turbidity in 1962—1985. Its result shows the urban air pollution has been developing gradually, by decreasing of radiative flux and transparency of atmosphere, increasing of atmospheric turbidity, due to increasing of pollution particle. T_R —the turbidity factor of atmospheric pollutant—discussed in this paper, reflected objectively annual variation of air pollution over Fuzhou City.