

北京地区气溶胶及其化学元素浓度 和气象条件的关系

赵德山 洪钟祥*

(中国科学院大气物理研究所)

提 要

本文分析了同时观测的气溶胶化学元素浓度和各种气象资料。证明城市空气污染与风向、风速、降水、大气稳定度和低层逆温等气象要素关系十分密切。在冬春季节,冷锋过境后偏北大风期间,通常是北京地区空气清洁期;而冷锋过境后,高空为缓慢移动的反气旋控制,300米以下昼夜持续的低层逆温和不利于水平输送的弱辐合型地面风场同时存在期间,是北京地区形成强污染期的一类典型的天气条件。

一、引 言

对于城市空气污染、排放源的分布、排放物的性质和排放量的大小的研究无疑是十分重要的。然而,一个大城市或一个地区排放源的情况通常在短期内是不会有大的变化的,更不会有非常明显的日变化和逐日变化。因此,在短期内排放源可以认为是不变的。

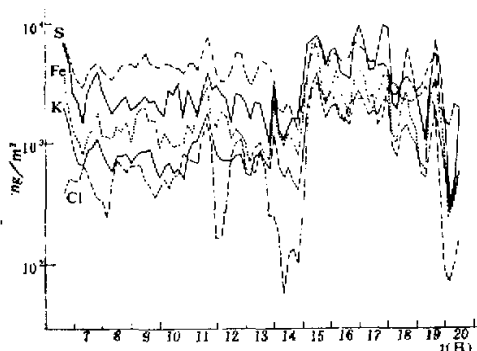


图 1 气溶胶化学元素浓度随时间的变化(1980.3)

但是,大量观测资料表明,城市空气污染具有明显的日变化和逐日变化,而且存在着差别很大的强污染期和清洁期。本文对北京地区气溶胶化学元素浓度的观测(见图1)也清楚地证明了这一结论。这就表明,气象条件是城市空气污染的重要因素,尤其是对城市

1982年5月31日收到修改稿。

* 洪芳、李博参加了本文的资料整理工作。

空气污染的日变化和逐日变化的影响,比排放源更为重要。

此外,由图 1 还可以看到,气溶胶中各种化学元素浓度的变化,在相同的污染源和气象条件下,除了表现出许多共性特征外,某些元素之间的差异也是相当大的。例如:以 14 日 24 时为界,前一周和后一周各元素浓度平均值相比, Ca、K、Fe 都增加了一倍多, Cl 则几乎增加了一个量级,而 S 却变化不大。这就表明,大气中气溶胶化学元素的浓度除了和排放源、气象条件有密切关系外,还取决于各种化学元素本身的大气化学过程。

本文主要目的是研究北京地区空气污染与气象条件的关系。

二、观测资料、分析方法和主要工业排放源的分布

气溶胶的观测是在位于北京北部市郊(距离城中心约 7 公里)的中国科学院大气物理研究所 325 米气象塔的观测场地,于 1980 年 3 月 6 日到 20 日进行的。观测仪器使用的是美国佛罗里达州立大学的条式连续采样仪^[1],观测高度距地面 8 米。

使用的气象资料是 325 米气象塔上同时观测的 15 层风向、风速、温差资料和北京气象台的高空气象图、探空资料以及北京地区 15 个气象台站的地面观测资料。

气溶胶化学元素的分析是由美国佛罗里达州立大学用 PIXE 方法分析的^[2],分析了钙(Ca)、铁(Fe)、铝(Al)、硅(Si)、氯(Cl)、钾(K)、硫(S)、钛(Ti)、锰(Mn)、锌(Zn)、锶(Sr)、铅(Pb)、钒(V)、铜(Cu)、溴(Br)、镁(Mg)等 16 种化学元素浓度。为了清楚起见,本文只以地壳元素 Ca、Fe、K 和污染元素 Cl、S 五种元素为例(见图 1)。

对于北京地区空气污染有重要影响的主要工业污染源分布在北京的西、西南和东南郊区。西北、北和东北部工业污染源较少。观测场周围没有较大的工业排放源。此外,观测期间正是北京地区冬季采暖季节末期。所以除工业排放源外,还有大量分布比较均匀的取暖排放、汽车排放等污染源。总之,北京地区的污染源具有以低排放为主和以煤的燃烧占绝对优势的明显特征。

三、气溶胶及其化学元素浓度与气象条件的关系

气象条件对空气污染的影响,主要取决于大气对污染物的扩散和输送的特征,而这两种特性又几乎完全取决于大气边界层的风向、风速、大气稳定度、低层逆温和降水等一般气象要素^[3]。因而,本节主要研究各种化学元素浓度与这些气象要素的关系。

1. 与风向、风速的关系 风向、风速主要决定着污染物的输送过程。当然,风速随高度的分布还决定着大气的动力稳定性,因而风况和空气污染物的扩散过程也有密切关系。为了证实这种关系,我们将观测期间的风向分为偏南风 and 偏北风两大类。从表 1 可以看到,偏南风时气溶胶化学元素浓度的平均值,均约为偏北风时的二倍左右。如果不以平均情况来看,除了小于 1 米/秒的静风状态下各化学元素浓度与风向关系不大外,通常吹偏北风时化学元素浓度均低于吹偏南风时的化学元素浓度。这一特征尤其在长时间吹较大偏北风时更为明显(尘暴除外)。显然,这是由于对本站而言,偏南风来自城区和工业污染区,而偏北风来自北部山区和农村。实质上是城区和工业污染区气溶胶总量高于北

表 1 气溶胶化学元素与风向的关系 (单位 ng/m^3)

元素 风向	Ca	Fe	K	Cl	S
偏南风	4365.9	2362.8	1411.6	1406.1	4614.8
偏北风	2303.2	1244.4	814.4	836.8	3054.9

部山区和农村的反映。

关于风速与空气污染的关系,我们选择 1980 年 3 月 14 日 20 时—17 日 12 时,天气比较晴朗,低层为典型北京地区地方性风场控制下所产生的强污染期间为例,结果如图 2 所示。很明显,各种化学元素浓度与风速基本上成反比关系。即各种化学元素的高浓度值均发生在小风和静风条件下,而随着风速的加大,化学元素的浓度趋于减小。因而,对于北京地区在以低排放源为主的情况下,风速越小越不利于污染物的输送和扩散,越容易造成区域性严重的空气污染。

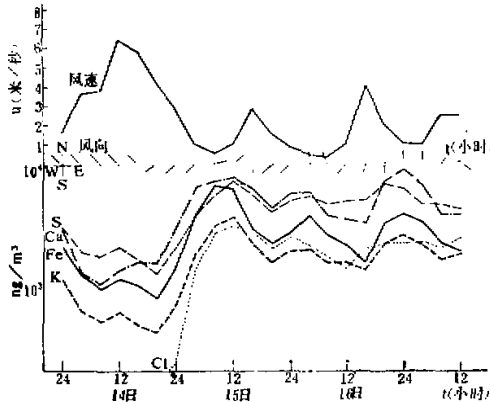


图 2 气溶胶化学元素浓度与风速之间的关系(1980.3)

然而,必须注意到,在许多情况下,即使风向、风速基本相同,各种化学元素浓度仍然可能具有明显的差异,见表 2。可以看到,在同是偏南风或偏北风,风速小于 3 米/秒条件下,各种化学元素的平均浓度(除 S 外) 15 日以后都比 14 日以前高一倍左右。这就表明,

表 2 相同风向、风速条件下化学元素的平均浓度 (单位 ng/m^3)
(风速小于 3 米/秒)

元素 风向		Ca	Fe	K	Cl	S
偏南风	6 日—14 日	2760.2	1554.9	929.7	609.6	4638.4
	15 日—20 日	6347.4	3360.8	2006.9	2389.9	4585.6
偏北风	6 日—14 日	1684.2	1097.9	667.7	356.0	2899.9
	15 日—20 日	2552.5	1403.1	973.3	1357.6	3222.8

对于一个城市或一个地区的空气污染来讲,风向、风速也并不是经常起决定性作用的因素^[3],尤其是对于城市空气强污染期的形成,大气稳定性和低层逆温的作用可能更大。

2. 与低层大气稳定性和逆温的关系 为了研究这个问题,我们首先分析了上述强污染期的 320 米以下逆温层强度资料,计算了 100 米以下近地层的大气稳定度,见图 3。

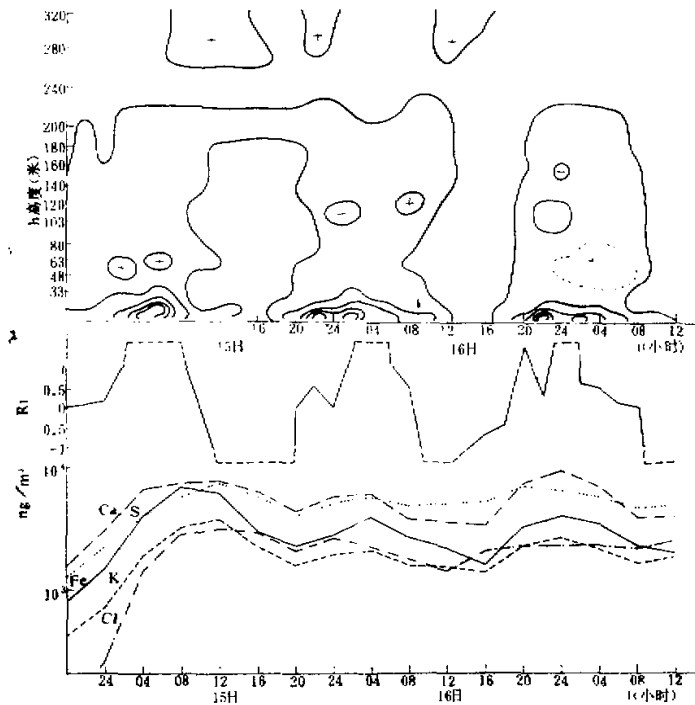


图 3 气溶胶化学元素浓度与大气稳定性和低层逆温的关系

由图 3 首先可以看到,里查孙数 Ri 曲线和化学元素浓度曲线之间存在着一致的变化关系,清楚地表明气溶胶化学元素浓度是随着低层大气稳定度的增大而增加的,当然,实质上这是气溶胶总量的增加。从低层出现的逆温条件来看,气溶胶各种化学元素的高浓度值,均出现在夜间辐射逆温层内贴地强逆温中心形成之时^[4],此时低层均处于小风或静风状态;而低浓度值则出现在白天辐射逆温完全消散的时候。这是因为,在夜间强而厚的辐射逆温层内,湍流混合作用随时间和高度的变化,均呈现出不连续的间歇性爆发状态^[5],而大部分时间湍流混合作用很弱。在强逆温中心形成期间,低层风速为小风或静风状态通常正是强逆温中心形成的重要条件之一,因而强辐射逆温中心的形成和低层小风或静风的风场经常是同时出现的,这时低层大气最为稳定,湍流混合作用最弱,水平运动几乎处于静止状态。所以,在低层强辐射逆温中心形成期间,大气对于污染物的扩散稀释作用和水平输送作用都很弱,极易造成污染物在低空堆积,出现各化学元素浓度的峰值。白天日出以后,辐射逆温通常会完全消散,混合层厚度大大增高。同时风速也会随之加大。因

而大气对污染物的扩散稀释作用和水平输送作用都会加强; 所以白天通常是低层空气污染得到减轻的时刻。

然而, 对于高架排放源或由远方输送来的污染物, 夜间形成的低层辐射逆温, 阻挡着逆温层上部的污染物向低层扩散, 保护着低层空气不受污染; 相反地在白天, 当风速加大时, 这层逆温消散, 夜间被阻挡在上层的大量污染物, 会由于混合作用被带入低层, 使低层空气污染物在白天反而增高。这又一次表明逆温对于空气污染的重要作用。本次所观测到的 11 日 04 时—13 日 20 时的气溶胶各种化学元素浓度的变化, 就比较清楚地表现出低层逆温的上述作用, 如图 4 所示。

由图 4 可以看到, 这几天辐射逆温只存在于 30 米以下的贴地层, 强度相对也比较弱。但是在 120—240 米和 280 米以上间断地存在着一层甚至两层下沉性逆温, 风场仍为北京地区典型地方性风场所控制, 风速均小于 3 米/秒。在这种情况下, 各种化学元素的高浓度值, 不是像图 3 表示的那样出现在夜间, 恰恰相反, 均出现在白天 12 时—18 时之间, 夜间的浓度反而偏低。这是因为大量污染物从 30 米到 100 米高度之间排放出来, 夜间 30 米厚的贴地辐射逆温起着阻碍污染物向下扩散至地面的作用, 而且由于 100 米以上存在着下沉性逆温(白天也存在), 大量污染物堆积于 30—100 米之间这一层中。所以白天 12 点左右当地面辐射逆温消散时, 由于加强的湍流混合作用便把该层堆积的污染物带入低层, 使得地面上测量到的气溶胶化学元素浓度增高。在冬季冷锋过境前夕和日出后辐射逆温消散过程中(经常形成夹层^[4]), 这种现象是经常可以观测到的。

3. 与降水、湿度的关系 图 5 表示的是气溶胶各种化学元素浓度与同时观测到的

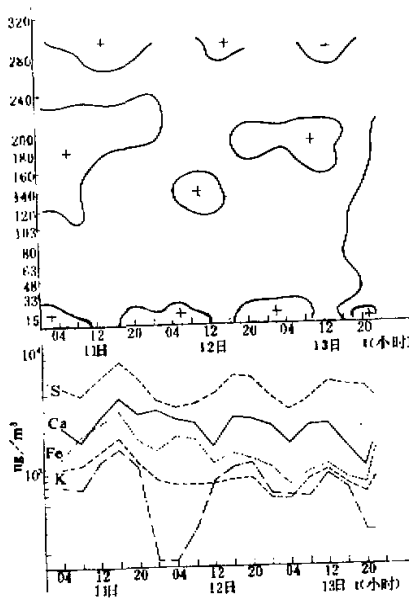


图 4 低层逆温与气溶胶化学元素浓度的关系

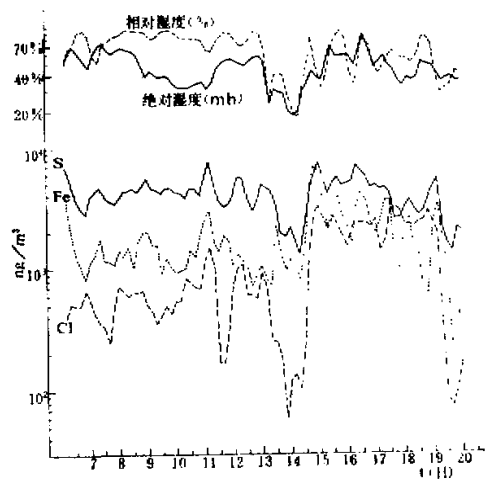


图 5 气溶胶化学元素浓度与相对湿度和绝对湿度之间的关系

地面相对湿度和绝对湿度之间的关系。可以看到,从平均状态来看,只有 S 元素和相对湿度相关性稍好,这表明大气中湿度主要与气体污染物向气溶胶转化的大气化学过程有关,而与地壳元素类的浓度关系不大。当然从日变化上来看,各种化学元素浓度与湿度的关系并不明显,也可能是因为,其一是大气气溶胶并非在当地生成,故与本站观测的当地湿度相关性较差;其二是其它气象要素的作用掩盖了气溶胶化学元素浓度与湿度的关系的缘故。

降水对于空气中气溶胶浓度的冲刷作用是明显的。本次观测结果证明在降雨(8日)和降雪(10日)时气溶胶各类化学元素浓度都偏低。

四、北京地区空气强污染期和清洁期形成的气象条件

从图 1 表示的气溶胶各化学元素浓度随时间的变化清楚地表明,本次观测期间,14 日 01 点—24 点和 19 日 20 点—20 日 12 点是北京地区空气清洁期;6 日以前某段时间(没有观测资料)和 15 日 01 点—17 日 12 点是北京地区空气强污染期。表 3 中统计了这些清洁期和强污染期的气溶胶各种化学元素的平均浓度。从中可以看到,地壳元素类 Ca、Fe、K 等,强污染期的平均浓度几乎都比清洁期的平均浓度大 3 倍以上;污染元素类 S 大 2 倍,Cl 将近大 20 倍。因而有力地说明,对于城市空气污染来说,强污染期和清洁期空气质量差别是很大的,所以研究它们形成的气象条件,尤其是强污染期形成的气象条件是有意义的。

表 3 强污染期和清洁期的化学元素的平均浓度(单位 ng/m^3)

元素 时间	Ca	Fe	K	Cl	S
强污染期	6146.0	3302.9	2070.3	2158.3	5200.8
清洁期	1196.3	810.2	491.8	114.4	1721.7

为了研究这个问题,我们仔细分析了本次观测到的 15 日 01 点—17 日 12 点形成的北京地区空气强污染期间的各种气象条件。

1. 天气形势 由 14 日—17 日的 850 毫巴和 500 毫巴天气图(图略)可以看到,随着强冷高压迅速向东南移动入海,于 14 日 05 点—20 点期间,北京地区出现了持续 12 小时的强西北风,地面平均风速大于 5—6 米/秒。之后,冷高压减弱,同时分裂成为几个移动缓慢的小高压,从 15 日 01 点到 17 日 12 点,北京地区一直处于这些缓慢东移的反气旋的控制之下;在地面天气图上表现为高压东移出海后断裂成的华北鞍型场的形势。连续三天天气晴朗,地面风场为典型的北京地区地方性风场,并且以北京市为中心形成弱辐合型流场,风速经常处于小风(小于 3 米/秒)和静风状态。

2. 边界层大气状态 在上述大的天气形势控制下,15 日—17 日连续三天夜间出现强而厚的辐射逆温层。尤其值得注意的是在 15 日、16 日,不仅夜间出现强辐射逆温,而且白天在 300 米以下仍然存在着一层逆温(见图 3),形成昼夜持续存在的低层逆温层。我

们把 300 米以下出现的这种昼夜持续存在的低层逆温简称为昼夜持续型逆温^[4]。在这种情况下,白天的混合层高度大大降低,有效地阻挡着低空污染物向高空扩散稀释,使得以低排放为主的北京地区大量污染物在白天和夜间均只能在很薄的贴地层内混合,这时如果水平输送不利的话,便会造成污染物在低空堆积,形成空气强污染期。因而,对区域性(一个大城市或一个地区)空气污染来说,300 米以下出现昼夜持续存在的低层逆温,是造成空气强污染期的最重要的气象条件。

3. 水平流场 正如上面所指出的,在 300 米以下昼夜持续型逆温存在期间,可以认为以低排放为主的所排放的大量污染物被限制在逆温层下贴地一薄层内混合和水平输送。因而,研究这种条件下的地面风场,不仅可以具体地研究污染物水平输送的情况,而且也是考察地区性地形影响的重要方面。为此,我们分析了 15 日 01 点—12 点各种化学元素浓度出现第一个峰值期间的地面流场(如图 6 所示)和风速矢端迹图(图略)。首先

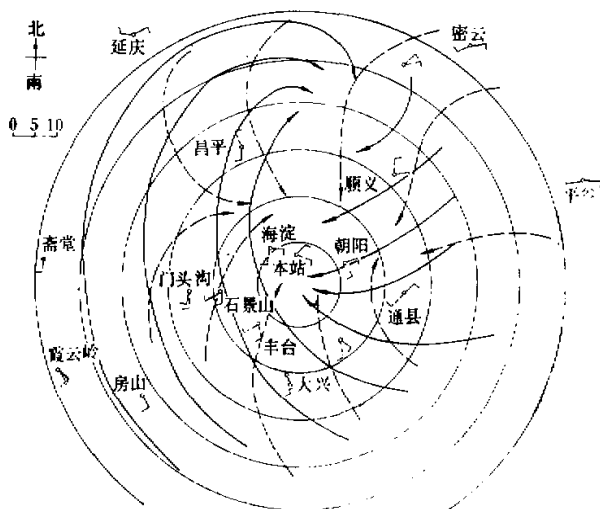


图 6 北京地区地面流场

由图 6 可以看到,在北京地区空气强污染期各种化学元素浓度出现第一个峰值期间,地面流场在北京城区和北部郊区均呈现出一比较明显的弱辐合区。显然这种流场对于上述地区气溶胶化学元素浓度的增高是一个重要的条件。根据地面风速矢端迹图的分析,我们看到(由于篇幅所限,这个问题将在另一篇文章中详述),在 15 日 01 点到 12 点期间北京西郊、西南郊和东南郊区主要工业区排放出的大量污染物,在其后 24 小时内,在北京城区和北部郊区(昌平、怀柔、顺义之间)形成明显的堆积区,并且都是在 16 日 12 点以后由西北方向输送出去的。值得注意的是,在这期间北京南郊区却很少受到这些工业污染源的污染。这就清楚地表明,主要由于地形和城市热岛影响而形成的地方性水平风场,对于区域性空气污染物的分布将起着重要作用。

以上,我们分析了北京地区空气强污染期间的天气形势、边界层大气状态和地方性水平风场。对于北京地区空气强污染期形成的气象条件,可以归纳为这样一种类型,即:当

高空为缓慢移动的反气旋和地面上为华北鞍型场控制, 300 米以下出现昼夜持续型低层逆温和不利于污染物水平输送的弱辐合型地方性风场的同时存在, 是造成区域性空气强污染期的一类极为重要的气象条件。

关于北京地区空气清洁期形成的气象条件是很明显的, 即通常都出现在冷锋过境后的强偏北风期间。因为在这种条件下, 夜间辐射逆温很弱而且很薄, 同时由于风速大, 风速垂直切变强, 低层大气经常处于近中性状态, 这时污染物的扩散稀释作用和水平输送作用都很强; 加上长达 10 小时以上强偏北风是由北部比较清洁的地区吹来, 因而这期间北京地区空气一般是最为干净的。当然, 在春季有时强偏北风所伴随的强尘暴过程则是一种例外情况。

另外, 前面已经指出降水对空气起着明显的净化作用, 因而通常在下雨或下雪期间空气也比较干净。

五、结论与讨论

根据本次观测和本文所进行的初步研究, 我们认为气象条件是一个城市或一个地区的区域性空气污染的日变化和逐日变化的决定性因素。尤其当高空为缓慢移动的反气旋在地面图上表现为华北鞍型场控制, 300 米以下又出现昼夜持续型低层逆温和弱辐合型地方性地面风场时, 是区域性空气强污染期形成的一类极为重要的气象条件。其中, 300 米以下出现的昼夜持续存在的低层逆温, 则可能对区域性空气强污染期形成起着最重要的作用。因此, 对这种逆温出现的季节特征、形成机制和天气条件以及在这种逆温存在期间, 地面流场的特征进行详细的研究是有必要的。

此外, 本文在研究空气强污染期的地面风场时指出, 在气溶胶各种化学元素浓度出现第一个峰值期间, 北京西、西南和东南郊区三个主要工业排放源所排放出的大量污染物, 在北京城区和北部郊区形成堆积区, 这是一个很值得关注的情况, 需要进行大量的实际观测和详细研究。

致谢: 本文所用的气溶胶元素浓度资料是由任丽新、吕位秀、王明星等同志提供的。在本文修改过程中还得到北京大学唐孝炎教授的热情帮助, 作者在此一并表示诚挚的感谢。

参 考 文 献

- [1] 王明星、吕位秀、任丽新、W. Winchester, 大气气溶胶的取样与分析技术, 环境科学丛刊, 21-10, 1981.
- [2] 中央气象局研究所, 应用气候和大气污染译文集, 1976.
- [3] 同[2].
- [4] 赵德山、洪钟祥, 北京市郊辐射逆温的特征和季节变化的研究, 中国环境科学(即将发表).
- [5] 赵德山、洪钟祥, 典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征, 大气科学, 1981 年第四期.

RELATIONSHIP BETWEEN ELEMENTAL CONCENTRATION OF AEROSOL AND METEOROLOGICAL CONDITIONS IN BEIJING

Zhao Deshan Hong Zhongxiang

(*Institute of Atmospheric Physics, Academia Sinica*)

Abstract

In this paper, observations of elemental concentration of the atmospheric aerosol and meteorological conditions are analyzed. It is confirmed that the urban air pollution has a close relation with wind direction and velocity, rainfall, stability, and inversion near the ground. Usually, during the period with strong north wind after passing of a cold front, the clear period will exist in Beijing. On the other hand, if the following typical conditions, a slow moving anticyclone at the upper atmosphere, continuous inversion below 300 m and wind field near the surface unfavorable for horizontal transfer, exist simultaneously, then there will be the period of heavy pollution in Beijing.