

北京市辐射逆温的特征和 季节变化的研究

赵德山、洪钟祥*

(中国科学院大气物理所)

一、引言

作者使用中国科学院大气物理所 325 米气象塔于 1979 年 9 月和 1980 年 1 月、3 月和 7 月观测到的资料,分析和研究了北京市郊出现在 320 米以下近地层中各种逆温的情况。证明发生在大气边界层中的辐射逆温、锋面性逆温、平流性逆温和下沉性逆温,在 320 米以下的低层都可以观测到。

其中,辐射逆温(或以辐射逆温为主体)是指由于地面长波辐射,致使地面和贴地一薄层空气冷却而形成的逆温。分析表明这类逆温在北京地区,无论是哪个季节,通常都是在日落前大约二小时首先由地面附近开始形成的,日出后又首先由距离地面某一高度(20~50 米)处开始消散的。因此,是 320 米以下近地层所能观测到的逆温中,出现率最多,强度最大的一类逆温。所以,它对城市空气污染、能见度的恶化,大气辐射等问题影响是十分重要的。

二、辐射逆温的主要类型 和季节特征

由于辐射逆温是地面长波辐射冷却而形成的,因而在本文所分析的四个月的资料中,发现夜间几乎都存在着辐射逆温,即使是雨天或冷锋后大风天气条件下,夜间 20 米或 10 米以下依然会存在着一薄层很弱的贴地逆温,在冬半年白天大约 50~100 米或 150~200 米的高处还能观测到终日不散的辐射逆温的残留部分。所以,辐射逆温之间差异很

大。但是,根据产生时的天气形势和最突出的特征,我们将其划分为下列三类。

第 I 类称为典型辐射逆温。在这类逆温的生、消过程中,即日落前和日出后 2~3 小时,无冷锋过境、雷暴和降雨等中小天气系统,通常天气晴朗少云,地面风速小于 3 米/秒,且为北京地区地方性风场所控制下,形成的时间长、厚度大、强度强的典型辐射逆温。如图 1 a、b 所示。

第 II 类称为贴地薄层型辐射逆温。这类逆温特征与第 I 类正好相反,即存在的时间短,强度比较弱,厚度很薄,平均大约只有 20~30 米。通常发生在阴天降雨和冷锋后大风天气条件下。

第 III 类,是介于 I、II 类之间的一类非完整型辐射逆温。常常由于锋面过境、雷暴和降雨等天气系统的影响,夜间只有短时间得到发展,但不能充分发展,致使许多典型特征不能表现出来的逆温。

表 1 列出了上述三类辐射逆温的出现率(占总观测日数的百分比)、平均强度(离地面 1.5 米到逆温顶的温差)、平均厚度、持续时间(指地面附近逆温由生成到消散的时间)和逆温中心处的平均逆温强度等特征。

由表 1 可以看到,在各个季节第 I 类典型辐射逆温是出现率最多,厚度最大、强度最强和持续时间最长的逆温。秋季出现率约占 70~80%,高度有时可达 320 米以上,是

* 洪芳、李博参加了制图、资料分析工作。

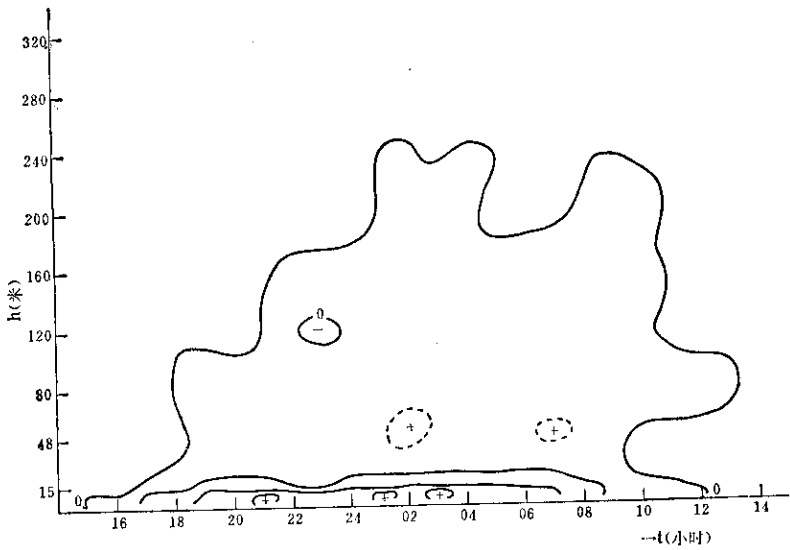


图 1a 1980年1月典型辐射逆温时—高平均剖面图（等值线 $I'=5^{\circ}\text{C}/100\text{米}$ ）

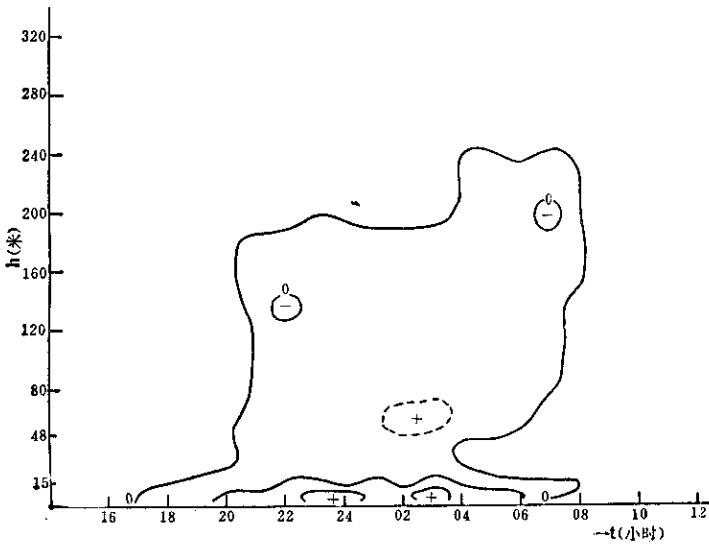


图 1b 1980年7月典型辐射逆温时—高平均剖面图（等值线 $I'=5^{\circ}\text{C}/100\text{米}$ ）

这类逆温出现率最多、厚度最大的季节。其次是春季（约占52%）和冬季（约占42%），夏季是出现率最少（约占38%）的季节；厚度在这三个季节中相差不大，平均约为240米左右。这和北京地区，秋季天气晴朗、风小、少雨，而冬、春季节冷锋活动频繁，夏季则降雨集中，中小天气系统多的气候背景是一致的。从逆温强度来看，是春、秋季节最强，夏季最弱；从逆温持续时间来看，是冬季最长，也是夏季最短。

为了更清楚地比较各季节逆温强度随时间的变化，我们将1.5米到逆温层顶的温差制成图2。

由图2可以看到，典型辐射逆温的

各类辐射逆温的统计特征

表 1

季 节	名 称 类 特 征	辐 射 逆 温														
		I					II					III				
		出现率	持续时间	平均厚度	平均强度	最强逆温中心递减率	出现率	持续时间	平均厚度	平均强度	最强逆温中心递减率	出现率	持续时间	平均厚度	平均强度	最强逆温中心递减率
		(%)	(小时)	(米)	(°C)	(-°C/100米)	(%)	(小时)	(米)	(°C)	(-°C/100米)	(%)	(小时)	(米)	(°C)	(-°C/100米)
春		52	18	230	4.9	15	37	16	15	0.5	6.3	11	16	150	3.5	10.0
夏		38	14	240	2.3	12.5	33	13	15	0.4	5.0	29	12	120	1.0	8.8
秋		79	16	320	3.8	15	4	16	20	1.4	17.5	17	14	150	1.3	10.0
冬		42	21	240	3.5	15	39	18	15	0.7	8.8	19	19	100	2.7	13.8

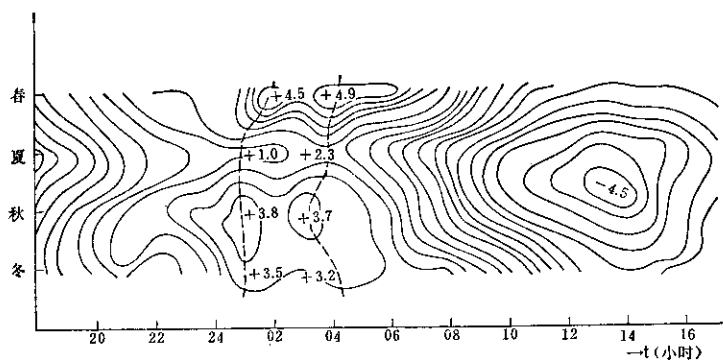


图 2 典型辐射逆温 1.5 米至逆温顶温差的季节变化 (等值线为 0.5°C)

强度,春、秋两季是最强的,冬季次之,夏季最弱。并且各个季节在一天中均出现两个明显的强逆温中心,一个发生在23~01点,一个发生在03~05点。而最强的递减层结是在夏季和秋季的13~15点。总之,典型辐射逆温是对城市空气污染物质的空间分布和演变规律起决定性作用的因素之一。

三、昼夜持续型辐射逆温的特征

在本文所分析的 4 个月资料中,发现 1 月 20~24 日和 26~27 日, 3 月 1~6 日和 14~16 日各为一次昼夜持续存在的辐射逆温,如图 3 所示。而夏、秋季节在 300 米以下这样的低层均未发现此类逆温。因而,这是北京地区冬半年辐射逆温 (或以辐射逆温为主的低层逆温) 的一个非常重要的季节性特征。本文称之为低层昼夜持续型辐射逆温。

由图 3 可以看到,这种逆温最突出的特征,是夜间为发展十分充分而完整的典型辐射逆温,一般强度比较大,而且厚度常能发展到该季节

典型辐射逆温的最大厚度。白天在大约 50~120 米或 150~250 米高度 (甚至该两层同时存在) 为一终日存在的逆温层,持续时间可以长达 5~6 天之久。在这一期间,白天近地面混合层高度只有 50~150 米,而且存在的时间也只有 2~5 小时之短。

关于这种低层昼夜持续型辐射逆温的形成机制,我们将在另一文中专述。其中指出一种常见的天气背景是高空受停滞性或移动缓慢的反气旋控制,地面图上常为一华北鞍型场形势,北京地区天气晴朗少云,近地面处于小风或静风状态的气象条件下出现的。因为这种情况下,夜间辐射逆温能得到充分发展,这种强而厚的逆温在日出后,由于地面增温贴地层不断削弱直至消散,而辐射逆温的上部往往需要更长时间才能消散,这是一种依靠湍流混合作用将地面不断增温的热量向上输送的“蚕蚀”过程^[1]。在冬季,由于太阳辐射较弱,地面增温小而慢,湍流运动不强,致使这种“蚕蚀”过程缓慢,因而辐射逆温消散过程增长,以致于在一定的条件下,当前一天的辐射逆温尚未完全消散时,地面又开始形成新的辐射逆温,二者合为一体,从而

在另一文中专述。其中指出一种常见的天气背景是高空受停滞性或移动缓慢的反气旋控制,地面图上常为一华北鞍型场形势,北京地区天气晴朗少云,近地面处于小风或静风状态的气象条件下出现的。因为这种情况下,夜间辐射逆温能得到充分发展,这种强而厚的逆温在日出后,由于地面增温贴地层不断削弱直至消散,而辐射逆温的上部往往需要更长时间才能消散,这是一种依靠湍流混合作用将地面不断增温的热量向上输送的“蚕蚀”过程^[1]。在冬季,由于太阳辐射较弱,地面增温小而慢,湍流运动不强,致使这种“蚕蚀”过程缓慢,因而辐射逆温消散过程增长,以致于在一定的条件下,当前一天的辐射逆温尚未完全消散时,地面又开始形成新的辐射逆温,二者合为一体,从而

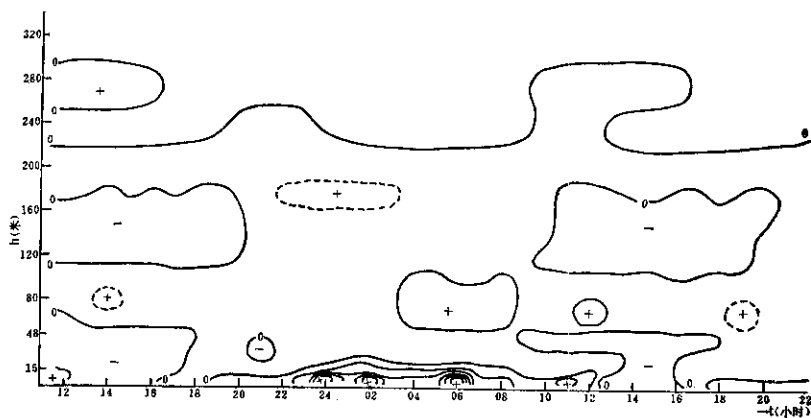


图 3 昼夜持续型辐射逆温时一高剖面图 (1980.3.1~2) (等值线 $\Gamma = 5^{\circ}\text{C}/100\text{米}$)

形成昼夜持续型逆温。当然，冬季由于出现的平流性逆温和下沉性逆温通常可以达到很低的低层，所以常和辐射逆温混合存在，这可能也是低层昼夜持续型逆温形成的原因，并且可以造成二层甚至三层的多层次性（见图3）。

显然，在这种低层昼夜持续逆温期间，是最不利于城市污染物（尤其是低排放）的输送和扩散的，因而常常是造成城市空气强污染期的主要原因^[2]。

四、典型辐射逆温的若干共同性特征

1. 在20米以下逆温强度最强，构成了一条典型辐射逆温层内最强的逆温中心带，本文称之为贴地强逆温中心带。中心高度通常位于10~15米处。在20~50米之间逆温强度迅速减弱，而且常常小于50~150米处的逆温强度。因而，在20~50米处经常形成一弱逆温带（有时处于近中性状态）。所以，在大约50~150米高度层，经常明显地呈现出辐射逆温层内的第二条较强的逆温中心带，本文称之为次强逆温中心带。

2. 上述贴地强逆温中心带和次强逆温中心带之间的弱逆温带，有时会在1小时左右的短时间内变为递减层结，如图4所示。从而形成二层辐射逆温。甚至在时—高剖面图的不同高度上，有时还能看到多层这种20~30米厚、维持时间只有1小时多的递减层结，表现为多层逆温。这些特征（包括第一个共同特征）是辐射逆温层内湍流运动随时间和高度呈不连续状态的明显证据。

3. 无论在哪个季节，典型辐射逆温在日出后，不是从地面，而是首先从20~50米的这个弱逆温带开始消散的。而贴地强逆温中心带的强度同时在逐渐削弱，需要在日出后

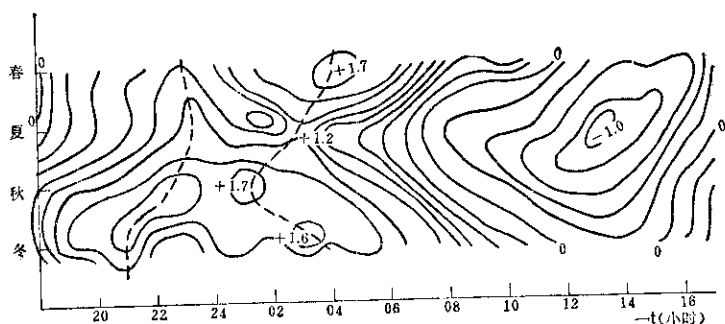


图4 温度垂直梯度连续变化的时—高剖面图（等值线 $\Gamma = 5^{\circ}\text{C}/100\text{米}$ ）1979.9.1~2

二小时左右才能完全消失。逆温层的上部则需要更长的时间由下而上的消散，在冬季甚至到12点左右才能完全消散。特殊情况下消散的更晚，以致于和从地面开始生成的第二天的辐射逆温连为一体，形成终日低层存在一逆温盖子。

4. 典型辐射逆温层的贴地强逆温中心带，经常具有二个以上的逆温中心。从平均的时—高剖面图上均可以看到，其中在前半夜和后半夜各出现一个最强的逆温中心。这一特征在任何季节任何一次典型的辐射逆温生、消过程中都会出现，只是各次逆温中心形成的个数和最强中心形成的时间不尽相同而已。为了便于比较，我们将不同季节的贴地强逆温中心带的平均强度制成图5，其中虚线表示最强逆温中心轴线。很明显，上述两个最强逆温中心的平均位置，春季发生在23点和04点左右；夏季发生在23点和03点左右；秋季发生在22点和01点左右；冬季发生在21点和04点左右。由图5还可以看到，贴地强逆温中心带的平均强度也是以春、秋季为最强，夏季最弱。而夏季13~15点左右的不稳定层结为最强。

5. 典型辐射逆温层厚度的加厚，常常呈现出一种急剧性的生长过程。也就是说逆温层发展到最大厚度，不是均匀地逐渐加厚的，而是通过两次或几次短时间的急剧性地加厚而完成的，在每两次加厚过程之间，逆温层

厚度通常总是维持比较长的一段时间的相对稳定状态。这在秋季和冬季的平均时—高剖面图上也明显地表现出来。我们在本文所分析的 110 次辐射逆温的例子中,发现在各个季节,辐射逆温层厚度的生长过程,普遍存在着这种急剧性加厚的特征,尽管有的表现出明显的阶梯状,而有的则不那么规则。

关于上述典型辐射逆温的一些共同性特征的形成机制问题是比较复杂的。但是,我们认为辐射逆温层内部温度场和

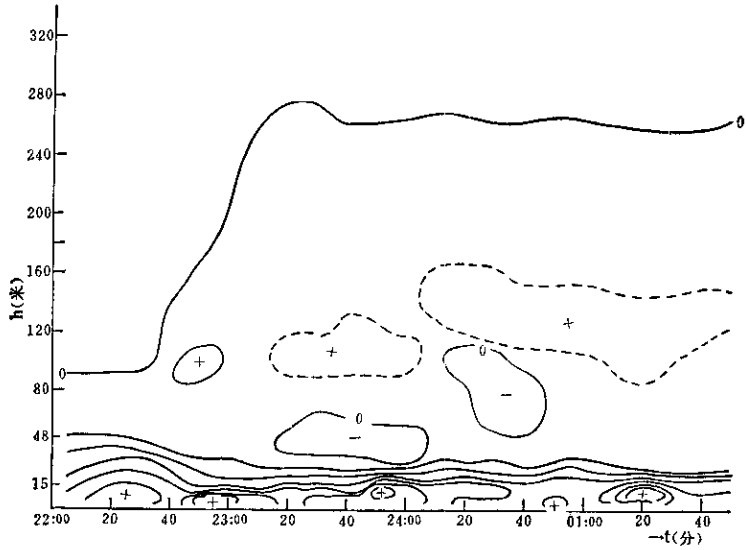


图 5 典型辐射逆温 (1.5 米至 15 米间温差) 的季节变化 (单位 $^{\circ}\text{C}$)

风场之间的相互制约、相互作用的关系,是主要的内在物理机制。这种温度场和风场关系的基本过程,我们已在《典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征》^[3]一文中作过初步探讨。指出:当日落后辐射逆温在贴地层开始生成并发展时,随着逆温强度的不断加强,湍流混合作用越来越弱,动量由于受到较强贴地逆温层的有效阻挡不能向下输送至地面,便在逆温中心上部不断堆积起来,使得该处的风速逐渐加大,于是这里的风速切变也就随之迅速发展起来。因而,该层的梯度里卡逊数

$$R_i = \frac{g}{T_0} \frac{\partial \theta / \partial z}{(\partial u / \partial z)^2} \text{ 迅速减小, 当 } R_i$$

减小到临界值以下 ($R_i < 0.25$) 时,便满足了 Kelvin-Helmoltz 切变不稳定条件^[4],使得该层湍流运动急剧加强,湍流混合作用迅速加大,随之便是动量、热量爆发性地向下输送至地面。这一短暂的动力过程引起了该层温度、风速等在几十分钟内发生剧烈变化,即逆温中心强度迅速减弱,逆温厚度急剧加厚,风速切变和风速迅速减小,层结稳定度重又增大,很快使切变不稳定条件消失。然后,贴地层逆温强度重新逐渐加强,进而可能重演上述过程。这种典型辐射逆温层内部温

度场和风场之间的相互作用、相互制约的关系,决定了逆温层内湍流运动不仅随时间呈间歇状爆发性结构,而且随高度也是不连续的。根据这种内在机制,解释典型辐射逆温层内贴地强逆温中心带的多中心特征和逆温层厚度的急剧性加厚的特征是比较合适的。

同时,当上述过程中动量、热量尚未发生爆发性输送时,虽然贴地强逆温中心带处湍流混合作用很弱 (甚至完全停止),但是在它的上部即 20~50 米这一层,由于动量的堆积使得该处风速切变不断加大,因而在这里湍流混合作用逐渐加强起来,使得这里温差减小,经常形成一层弱逆温带。于是在大约 50~100 米处也就自然呈现出一次强逆温中心带。所以,第一个共同性特征的形成也是由于辐射逆温层内温度场和风场之间的相互作用、相互制约的关系决定的。

然而,湍流混合作用将热量由高温向低温处输送的结果,只能使得上下层温差减小,而不可能出现递减层结。因而典型辐射逆温层内有时观测到厚度很薄 (20~30 米)、维持时间不长 (1 小时左右) 的递减层结,从而形成短时间的二层甚至三层辐射逆温的特征,除了上述温度场和风场之间相互作

用、相互制约的内在机制外,可能还有其它复杂的外部因素。例如,本场地处北京市北郊,由于北京地区地方性风场的风向转换期造成的局地性冷暖平流,就可能是一种经常起作用的因素。

关于第三个共同性特征的形成,主要是由于日出后地面增温十分迅速,而贴地层空气的增温主要是靠湍流混合作用,将地面热量不断向上输送的结果。因而在辐射逆温的消散过程中,假如逆温强度随高度的分布是均匀的话,逆温消散应该由地面开始逐渐向上扩展。这就是通常所说的,湍流混合作用不断将地面热量向上输送,而使逆温随高度和时间逐渐被蚕食直至完全消散的过程。然而,正如前面已经指出的,辐射逆温强度随高度和时间都是不均匀的。由于贴地强逆温中心带的强度很高,通常不能使之立即消散,只能逐渐消弱直至完全消散,这个过程可以延续到日出后2~3小时之久;相反,由于20~50米处是一层弱逆温带(日出前后常处于近中性状态),所以,当日出后地面迅速加温时,很快变为不稳定状态,从而形成上面所叙述的第三个共同性特征。

五、结 论

(1) 辐射逆温(或以辐射逆温为主)是城市近地层逆温中最常见、最重要的一类逆温。辐射逆温大体可以划分为典型辐射逆温、贴地薄层型辐射逆温和处于二者之间的非完整型辐射逆温三种。其中典型辐射逆温在各个季节中是出现率最多、强度最强、厚度最大和持续时间最长的一种。

(2) 典型辐射逆温又以秋季出现最多,厚度最厚,其次是春、冬季节;但是,春季逆温强度最强,冬季逆温持续时间最长。而夏季是典型辐射逆温出现率最少、强度最弱和持续时间最短的季节。同时,夏季却是不稳定层结最强的季节(出现在13~14点)。

(3) 下半年经常可以观测到昼夜持续

型辐射逆温,可以持续长达5~6天之久。是城市空气污染最严重的气象条件之一。

(4) 典型辐射逆温的强度和厚度随时间和高度的分布是不均匀的。通常可以明显地分为贴地强逆温中心带(20米以下)和次强逆温中心带(大约在50~150米之间),而在20~50米之间常常是一层弱逆温带。甚至有时该层会变成短时间(1小时左右)的递减层结,使辐射逆温分为明显的二层。

(5) 典型辐射逆温的消散首先是在日出后由20~50米的弱逆温带开始的。贴地强逆温中心带可以延至日出后2~3小时才能完全消散;而上部的次强逆温中心带则需要更长的时间才能完全消散,甚至在冬半年终日不能消散。所以,在日出后2~3小时内经常可以观测到二层辐射逆温,在冬半年可以观测到昼夜持续型辐射逆温。这时白天的混合层高度最低、时间也最短。

(6) 贴地强逆温中心带随时间通常表现为多中心状态。特别是在上半夜(21~24点)和下半夜(01~04点)各出现一次最强逆温中心。其中以春、秋季节最强,夏季最弱。最强的递减层结出现在夏秋季节(13点~14点)。

(7) 典型辐射逆温层厚度的加厚,通常是一种急剧性的生长过程,不是均匀的逐渐加厚的。在每次短时间的生长之后,逆温层厚度都在相对比较长的一段时间内维持少变状态。

(8) 典型辐射逆温层内温度场和风场之间的相互作用、相互制约的关系,决定着逆温层湍流混合作用随高度分布的不连续性和随时间呈间歇状爆发性的湍流运动结构,是形成典型辐射逆温若干共同性特征的主要的物理机制。

参 考 文 献

- [1] Tetsuji, Y., J, Appl. Met, 18(4), 526-531, (1978).
- [2] 赵德山、洪钟祥, 北京地区气溶胶化学元素