

北京地区大气 PM₁₀ 和 SO₂ 的背景浓度分析*

蔡旭晖 张睿 宋宇 谢绍东

(北京大学环境科学系, 北京 100871)

摘要 用2000年1、4、7、10月北京地区5个测站的逐时环境监测资料, 同期20个测点的逐时气象观测数据, 结合风场诊断和随机游走扩散模拟方法, 分析北京城区污染物的输送扩散作用对郊外清洁对照点(定陵站)浓度监测结果的影响, 并初步推断这一地区大气可吸入颗粒物(PM₁₀)和二氧化硫(SO₂)的背景浓度。结果表明, 清洁对照点定陵站受北京城区大气污染物的影响显著。去除这种影响并经进一步的概率分析, 获得本地区SO₂的背景浓度估计值在冬季(1月)约为0.044 mg m⁻³以下, 其他各季约为0.008 mg m⁻³; PM₁₀在冬春夏季(1、4、7月)的背景浓度估计值约为0.03~0.04 mg m⁻³, 秋季(10月)约为0.01~0.02 mg m⁻³。

关键词: 可吸入颗粒物; 二氧化硫; 背景浓度; 监测数据; 扩散模拟

文章编号 1006-9585 (2004) 03-0445-09 **中图分类号** X131.1 **文献标识码** A

1 引言

可吸入颗粒物(PM₁₀)和二氧化硫(SO₂)是北京地区的两种主要大气污染物^[1,2], 确定这些污染物的环境背景浓度具有理论和现实的意义。因为不论是评估城市大气环境质量的现状, 还是制定环境整治措施的方案或检验其效果, 都需以此背景浓度作为定量化的参考。虽然北京市的10余个环境监测站中, 专门设有一个位处远郊的定陵站作为清洁对照点, 该点获得的PM₁₀和SO₂的浓度也的确比城区的低得多^[1,2], 但是否能就此简单地把该站的观测结果作为这一地区的背景浓度却是一个引起争议的问题。

确定环境本底或背景浓度是环境科学研究中一项基础性的工作, 但其研究有相当难度。一般认为, 背景浓度应代表研究区域内未受人类活动直接影响的自然情况^[3]。大气由于其流动性, 情况十分复杂, 监测的浓度不仅可能受研究区域内人为排放源的影响, 而且也可能受研究区域外排放源长距离输送的影响。对北京地区而言, 实际监测浓度不妨划分为以下几部分: (1) 真正意义的背景浓度, 即本地区的自然排放影响; (2) 监测点附近人为排放源的局地影响; (3) 区域外长距离输送对本地区的影响; (4) 区域内最大、最集中的人为排放—北京城区的影响。可见, 有3方面的因素会影响到该区域内背景浓度的正确估计。其中, 北京城区的影响可能最为明显, 因为在方圆约

200 km 的范围内北京市是唯一的大型城市,其区域性污染影响不可忽略。另一方面,作为清洁对照点的定陵站虽说远离城市中心约 45 km,且处于长年平均的城市上风方向,但整个北京地区特定的山地-平原地形引起的中尺度环流,却使城区排放的污染物极可能经常影响到定陵站所处的北部山地^[4~6]。因此,定量评估并排除北京城区排放的大气污染物对定陵站监测结果的影响,对更准确地估计本地区大气 PM₁₀ 和 SO₂ 的背景浓度是至关重要的。

本文结合实际气象资料和大气扩散模式对监测的浓度数据进行分析,重点排除北京城区对定陵站监测结果的影响,并进而通过概率分析,推断本地区大气 PM₁₀ 和 SO₂ 可能的背景浓度估计值。

2 研究方法和资料

2.1 模式

2.1.1 三维风场诊断模式

该模式通过对地面和高空实测资料的插值和变分调整处理,获得符合边界层流动连续性条件的三维风场。模式具体情况及其应用详见文献 [6~8]。这里所取的相关模式参数为:水平区域 200 km×200 km,大体以北京城区为中心,网格距 4 km;垂直方向从地面至 2 000 m 高空,分 15 层。

2.1.2 随机游走扩散模式

该模式根据当时的风场、稳定度类型和边界层高度等逐一计算示踪粒子的空间位移和拉格朗日轨迹,并从大量粒子的空间分布了解实际大气的扩散状况。模式详情参见文献 [7, 9],扩散计算的范围与风场模式相同。

2.2 资料

所用资料包括:(1)北京市环境监测总站的定陵、前门、奥体中心、农展馆和古城 5 个测点 2000 年 1、4、7、10 月的逐时 PM₁₀ 和 SO₂ 监测浓度;(2)对应时段昌平、上甸子、延庆、密云、怀柔、顺义、平谷、石景山、观象台、朝阳、通县、丰台、房山、霞云岭、大兴、海淀、汤河口、斋堂、门头沟、佛爷顶 20 个测站的逐时地面风观测资料;(3)逐时稳定度分类资料;(4)高空地转风、地形和地面粗糙度资料。

2.3 研究和分析方法

使用风场诊断模式和相关气象观测资料等计算了 4 个月逐时的三维风场,以此作为扩散计算的 actual 流场输入。用被动示踪粒子代表污染物质,以随机游走扩散模式模拟示踪粒子从北京城区范围排放后在模拟区域内的迁移扩散过程。由扩散粒子的逐时空间分布,判断各时刻定陵站所处位置是否受到源自城区的大气污染物影响,据此将定陵站的监测资料划分为“受到”和“未受到”城区影响 2 种情况分别进行统计和分析。这 2 种情况的判断标准是,在以定陵站为中心的 10 km 边长的正方形水平区域上空,若计算接收到来自城区的 1 个以上扩散粒子,就认为是受到城区影响,否则为不受影响。由于扩散模拟的重点是区分城区污染物对定陵站的 2 种情况,因此模拟中不考虑城区污染源排放的具体细节,也不考虑具体的排放物质以及扩散过程中干湿沉积等因子的作用,而假设北京城区范围连续、均匀地释放示踪粒子,释放区域的水平尺

度大致对应城区的大小，为 10 km×10 km（参见图 1）。具体计算时，在 1 个月的时间里从地面 10 m 高度连续、均匀地释放 72 000 个示踪粒子（相当于每小时从城区释放 100 个粒子）。边界层湍流参数和边界层高度皆以经验方法参数化设定^[9,10]。

3 结果和讨论

3.1 定陵站受城区污染影响的理论频率

随机游走模式模拟的示踪粒子影响到定陵站的情况如图 1。由于模式使用的是实际气象资料，粒子又都是从城区释放的，因此图 1 反映的是实际条件下城区排放的污染物烟云的空间扩散和分布情况，也反映了该个例时刻（2000 年 7 月 1 日 18:00（北京时，下同））城区污染物可能对定陵站的影响。取定陵站周围方圆 10 km（图 1 中粗黑框）范围内接收到示踪粒子的情况为受城区影响的情况，可获 1、4、7、10 各月定陵站受城区污染影响的理论频率分别约为 47%、42%、48%和 59%。可见单从大气运动和扩散的角度来看，定陵站受到城区污染影响的几率是颇高的。这一结果也与北京地区流场分析的结果基本吻合，即该地区各季大致有 1/3 的日数处于较典型的局地中尺度环流影响下^[11]，有利于污染物午后向北输送影响到昌平、定陵一带。这里的结果明显高于局地中尺度环流出现的频数，表明其他类型的风场条件（如系统偏南风或风向

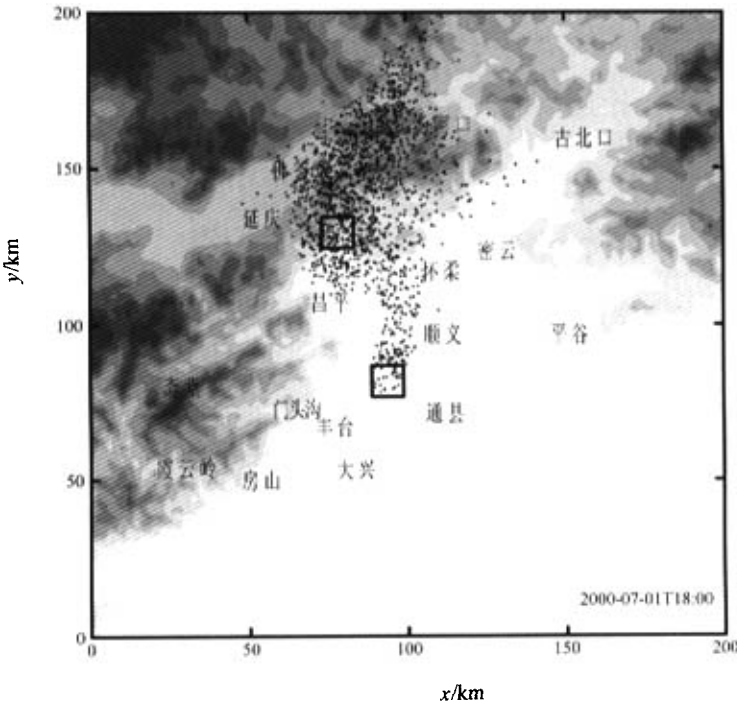


图 1 城区污染物影响到定陵地区的个例

变化不定的条件^[11])也可对定陵受城区污染的影响有不小的贡献。

3.2 定陵站与城区浓度监测值的相关性

从 5 个测站的总体监测结果来看,城区各站(前门、奥体中心、农展馆和古城)相互之间的浓度相关性甚强,城区与定陵站结果的相关性也相当高。表 1 列出了前门站与其他 4 站浓度的线性相关系数,可见除了夏季(7 月)的情况略有异样以外,其他各季皆符合上述规律。城区各站之间的浓度相关性显然是因为它们都处于大体相同的城市污染源和气象条件影响下的缘故。城区逐时浓度与定陵站结果的相关性至少说明以下几种可能:一是定陵站的观测结果受到来自城区污染物的显著影响;二是定陵和城区同处于大范围内共同的源或浓度场(如背景场)的影响下;三是定陵和城区受到基本相同的气象因素影响。从随机游走扩散模拟结果显示的城区污染物对定陵地区的显著影响频率来看,上述第一种情况是值得充分重视的。

表 1 前门站与其他 4 站浓度测值的线性相关系数

	PM10				SO ₂			
	奥体中心	农展馆	石景山	定陵	奥体中心	农展馆	石景山	定陵
1 月	0.85	0.90	0.81	0.72	0.82	0.84	0.81	0.61
4 月	0.96	0.97	0.90	0.83	0.80	0.76	0.48	0.46
7 月	0.80	0.84	0.60	0.37	0.62	0.31	0.17	0.32
10 月	0.82	0.92	0.68	0.55	0.74	0.62	0.52	0.46

3.3 去除城区影响后的定陵站监测结果

虽然上述结果显示了城区污染物对定陵地区的影响频数颇高,但两地毕竟相距几十千米,城区影响的定量数值大小有待确定。如上所述,将定陵站监测结果划分为受城区污染物影响和不受城区影响的情况分别进行统计,获结果如表 2。表中 I、II 和 III 分别代表月均值、受城区影响和不受城区影响 3 种情况下的 PM10 和 SO₂ 浓度监测值,以及与定陵相近的昌平站的对应风速值统计结果。可以看出,不受城区影响的平均浓度监测值明显降低、反之明显增高,变化的幅度依各季而不同,大致约为 10%~50%(见表中圆括号内数值)。对于 SO₂ 浓度,冬春季(1、4 月)这种情况最明显,城区影响接近或超过月均浓度的 40%。PM10 的情况略有不同,总体上春季(4 月)影响最小,在月均浓度的 20%以下,其他各季在 20%以上或接近 30%。

3.4 讨论

以上结果初步证实,城区的污染物通过输送扩散的确对定陵站的浓度有显著影响。但结果的定量准确性仍值得仔细推敲。主要有相互关联的两方面问题,一是统计结果的风速影响,二是污染物(主要是 PM10)与其他不确定因素的作用。

显然,本文依据实际观测的风场和扩散模式,首先确定城区污染物是否对定陵地区有影响,进而划分定陵站的实测浓度值进行统计,具有明确的物理意义。城区污染物最可能影响到定陵地区的情况是,这一区域受山地-平原中尺度环流影响,午后出现偏南风。这种情况往往天气系统较弱,风速较小^[5]。而这一地区春秋冬 3 季经常出现的偏北系统大风,则把城区污染物带向南边,不影响到北部的定陵地区。因此,对城区污染物是否影响定陵地区的划分,实际隐含了对不同风速的选择性。表 2 中昌平站风速结果显示,不受城区影响时风速较大而受城区影响时风速较小。由污染气象学可知,

表 2 定陵站 2000 年各季中月监测浓度分解

	PM10/mg m ⁻³			SO ₂ /mg m ⁻³			U/m s ⁻¹		
	I	II	III	I	II	III	I	II	III
1 月	0.084	0.109 (30)	0.060 (29)	0.074	0.110 (49)	0.044 (41)	2.1	0.9	2.9
4 月	0.198 [0.113]	0.235 (19) [0.165 (46)]	0.174 (12) [0.079 (30)]	0.013	0.022 (69)	0.008 (38)	3.0	2.4	3.4
7 月	0.091	0.115 (26)	0.069 (24)	0.009	0.010 (11)	0.008 (11)	1.6	1.5	1.7
10 月	0.068	0.088 (29)	0.037 (46)	0.010	0.012 (20)	0.008 (20)	1.5	1.2	1.8

注：I、II 和 III 分别代表月均值、受城区影响和不受城区影响 3 种情况，“()”内为相对于月均值的增加/减小百分率，“[]”内为春季剔除严重沙尘过程影响后的对应结果。

知，局地连续排放源若保持源强不变，则风速越大，它对局地浓度的影响就越小。北京地区的实际观测研究也充分证实了这一点^[12]。定陵地区相对城区而言，虽然局地排放量较小，但测站受附近污染物的影响仍在所难免。较大的风速有利于降低局地污染排放的影响从而获得更近于背景浓度的值。对 SO₂ 这样主要源自人为排放的污染物来说，认为测站周围的排放在统计时段内基本保持不变是一个合理的假设。因此，表 2 中去除城区影响后的定陵站 SO₂ 浓度应该对本区域的背景浓度有更好的代表性，即冬季（1 月）平均浓度约 0.044 mg m⁻³，其他各季（4、7、10 月）皆为 0.008 mg m⁻³。

颗粒污染物 PM10 的情况则甚为复杂，它不仅包含重要的外来输送和局地自然排放因素（如沙尘暴和局地扬沙起尘），而且也受到污染物的转化（二次污染物的形成）以及本文所用方法的局限性影响。对地处北方的北京地区而言，春季（4 月）受沙尘暴和扬沙天气影响最强^[13]。这些沙尘天气多表现为无规律的“偶发事件”，使月均沙尘质量浓度的年际变化极大^[14]。在本文所进行的一个月的统计时段里，包含这些“偶发事件”会使结果有较大的扰动和不确定性。因此，我们根据气象观测资料中有关沙尘天气活动的记录，结合定陵站 PM10 浓度数值的大小，将 2000 年春季（4 月）有严重沙尘过程影响的记录人为剔除。剔除数据的时间段具体为：2000 年 4 月 6 日 11：00～7 日 03：00；8 日 09：00～9 日 08：00；9 日 21：00～10 日 11：00；25 日 07：00～26 日 03：00；28 日 15：00～29 日 06：00。剔除部分的 PM10 浓度值一般大于 0.40 mg m⁻³。这样剔除严重沙尘过程的影响后，春季正常天气条件下的 PM10 浓度统计值列于表 2 之方括号内。可见春季 PM10 浓度仍高于其他各季浓度，但数值上已与其他各季较为接近。这表明，春季在上述严重沙尘过程以外，其他过程也对 PM10 总浓度有一定影响。

在有关沙尘的局地自然排放方面，风速是关键因素之一。当风速超过某阈值后，局地沙尘排放率将随风速的增加而快速增大^[15]。考虑到前述有关定陵站不受城区污染影响的条件对应较大风速的现实，我们分析了定陵站受城区影响与否的逐时 PM10 浓度与其附近的昌平站逐时风速的关系。结果发现，PM10 浓度与风速的关系并不十分明显（图略），仅在冬季（1 月）和春季（4 月）的沙尘暴天气条件下，PM10 浓度才似乎随风速而有增高的趋势。因此认为，表 2 中去除城区影响后的 PM10 浓度受这一因素的影响不大，或仅仅是使估计值略有偏高。

将表 2 中去除城区影响后的 PM10 浓度作为本地区背景浓度估计值的最大问题，

可能在于本文所用方法的局限性。由于本文扩散模式所用的水平区域有限,模拟的扩散粒子逸出边界后即不再考虑其影响,因此用于划分定陵地区是否受城区影响的情况实际仅为是否受到城区“直接影响”的情况。对于城区污染物经过更大的输送范围和更长的输送时间,同时生成二次颗粒污染物而影响到定陵地区的情况并不能辨识出来。另外,正如本文引言中所分析的,定陵监测站附近的人为源排放和区域外的长距离输送影响因素这里也未予考虑。因此,表2中的结果显然仍为本地区背景浓度偏高的估计值。

为进一步探讨本地区可能的背景浓度,对监测数据进行概率(频率)分布分析。图2给出了定陵站4季(1、4、7、10月)不同PM₁₀浓度出现频率的分布。图中分别给出整月、受城区影响和不受城区影响3种情况的结果(对应于表2)。由图可见,相对于整月的情况,各季受城区影响和不受城区影响的浓度频率分布表现为两个相分离的模式,前者向浓度大的方向偏移,后者向浓度小的方向偏移。两模式的均值即对应表2中所列的受城区影响和不受城区影响的PM₁₀浓度值(II和III)。可见图中不受城区影响的浓度频率模式为很强的偏态分布。由前述分析可知,除受城区污染物“直接影响”以外,仍有其他不同因素可使该地区出现较高的浓度。因此认为,直接用图2中不受城区影响的浓度频率模式均值浓度作为北京地区的背景浓度估计值是不妥当的。浓度频率模式峰值对应的浓度(最大概率浓度)应能更好地代表这一地区的背景浓度

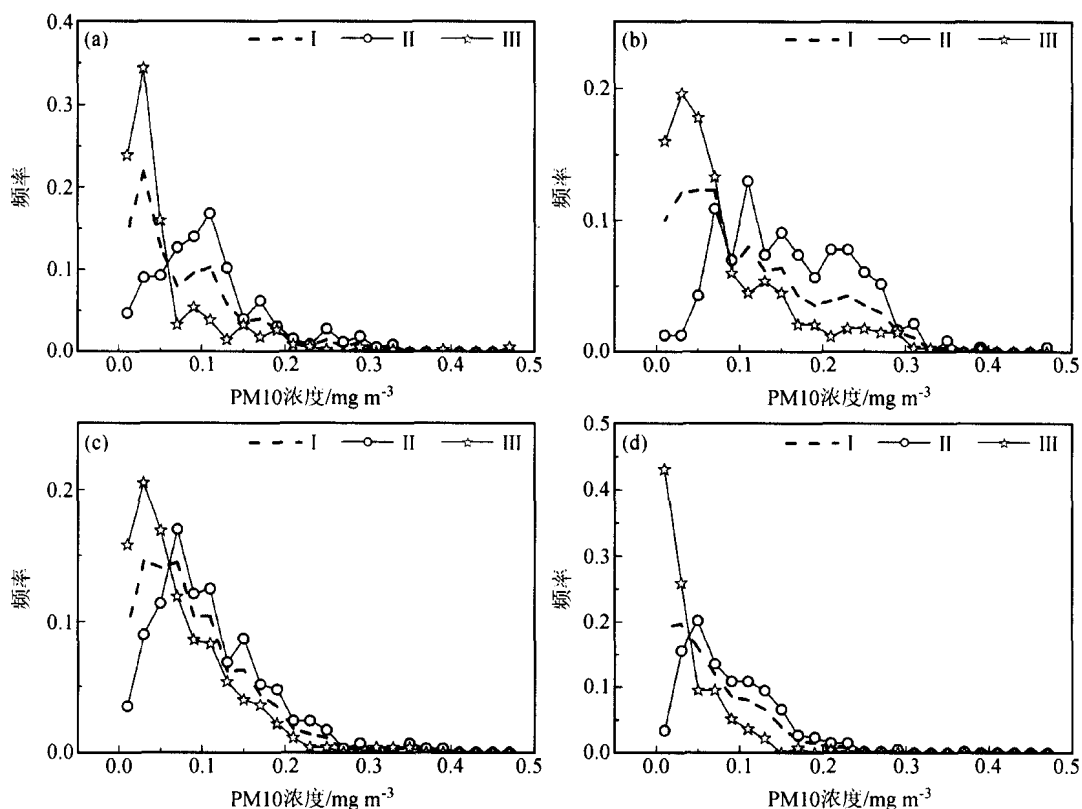


图2 定陵站PM₁₀浓度的出现频率分布

(a) 1月; (b) 4月; (c) 7月; (d) 10月

I为月均值, II为受城区影响, III为不受城区影响

值。由图 2 可知，冬春夏季（1、4、7 月）PM10 的最大概率浓度大致为 0.03~0.04 mg m⁻³，秋季（10 月）约为 0.01~0.02 mg m⁻³。

作为对照，图 3 同样给出了定陵站 4 季（1、4、7、10 月）SO₂ 浓度出现频率的分布。由图可见，只有冬季（1 月）受城区影响和不受城区影响的分布表现出 2 个相分离的模式，其他各季，两种情况的频率分布十分相近，尤其频率峰值基本重合，只是数值大小有所不同。这与 PM10 浓度的情况明显不同。显然作为采暖期的冬季（1 月），北京城区的大量污染排放对定陵测站的 SO₂ 浓度有重要影响，以至改变了频率分布的形状。从去除城区影响后的频率峰值浓度情况来看，冬季（1 月）的值约为 0.02~0.04 mg m⁻³，其他各季大致为 0.006~0.01 mg m⁻³。这比前面所获的去除城区影响后的均值浓度略偏小，但数值较为接近。可见 SO₂ 的排放以人为源为主，情况较为简单。

通过以上分析获得的背景浓度估计值，各季不尽相同。这可能一方面反映了该地区各季自然排放等因素的真实变化，如秋季（10 月）PM10 浓度略低；另一方面，由于本文方法并未排除清洁对照点附近以及区域内其他可能的人为排放源的影响，推测的背景浓度可能有误差，如冬季（1 月）SO₂ 浓度比其他各季大大偏高，这可能与整个区域内普遍的采暖情况有关。因此，进一步的深入研究仍是必要的。

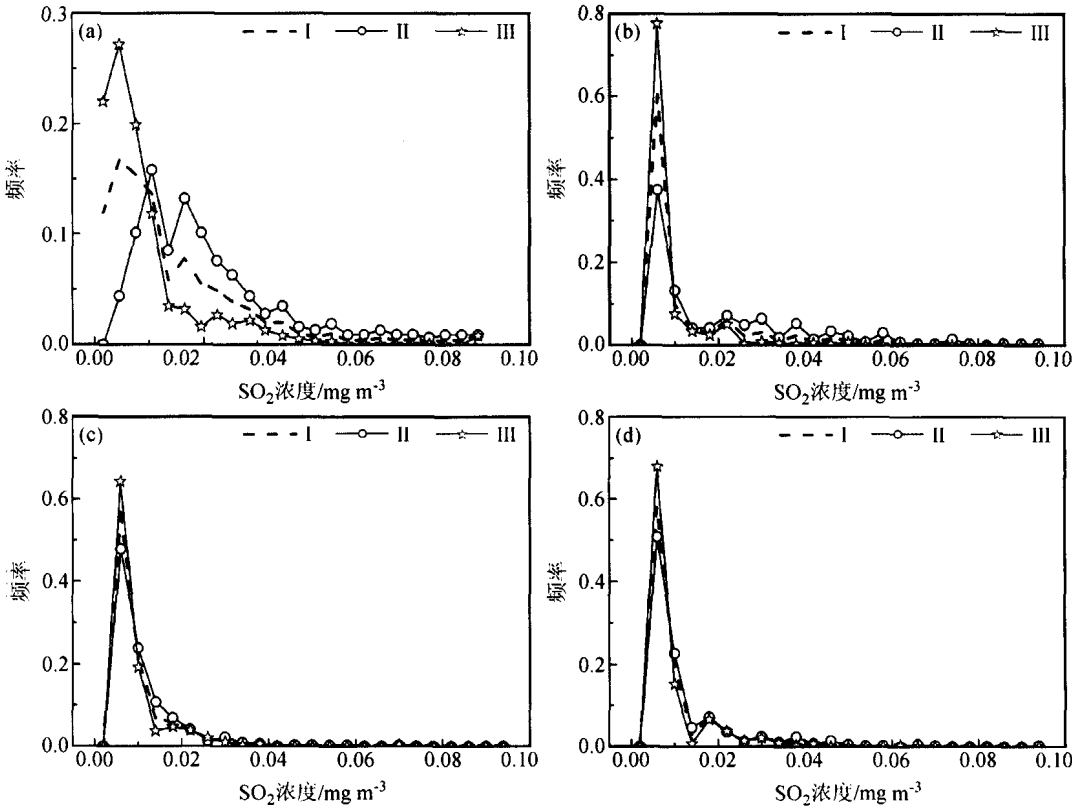


图 3 定陵站 SO₂ 浓度的出现频率分布

(a) 1 月；(b) 4 月；(c) 7 月；(d) 10 月

I 为月均值，II 为受城区影响，III 为不受城区影响

4 结论

用风场诊断模式和大气扩散模式结合实际气象观测数据对北京地区的大气环境监测资料进行深入分析,有利于进一步揭示该地区的大气污染特征和规律。

实际扩散模拟的结果表明,北京城区的污染物可通过扩散输送作用影响到郊外约 45 km 的定陵地区,使作为清洁对照点的定陵站浓度监测结果明显偏大。

城区污染物对定陵站 PM₁₀ 和 SO₂ 浓度监测值的直接影响可达到其平均浓度的 10%~50%,甚至更高。去除这种城区影响,并进一步作概率分析,可以推断北京地区 SO₂ 的背景浓度在冬季(1月)约在 0.044 mg m⁻³ 以下,其他各季约为 0.008 mg m⁻³; PM₁₀ 在冬春夏季(1、4、7月)的背景浓度估计值约为 0.03~0.04 mg m⁻³,秋季(10月)约为 0.01~0.02 mg m⁻³。

参 考 文 献

- 1 于淑秋、林学春、徐祥德,北京市区大气污染的时空特征,应用气象学报,2002,13(增刊),92~99.
- 2 王淑英、张小玲,北京地区 PM₁₀ 污染的气象特征,应用气象学报,2002,13(增刊),177~184.
- 3 环境科学大词典编辑委员会,环境科学大词典,北京:中国环境科学出版社,1991,14.
- 4 段欲晓、徐晓峰,北京地区 SO₂ 污染特征及气象条件分析,气象科技,2001(4),11~22.
- 5 北京市气象局气候资料室,北京气候志,北京:北京出版社,1987,69~77.
- 6 蔡旭晖、郭昱、刘辉志等,北京地区低层大气流动模态研究,北京大学学报,2002,38(3),387~392.
- 7 胡二邦、陈家宜,核电厂大气扩散及其环境影响评价,北京:原子能出版社,1999,153~168.
- 8 Sherman, C. A., A mass consistent model for wind field over complex terrain, *J. Applied Meteorology*, 1978, 17, 312~319.
- 9 郭昱、蔡旭晖、刘辉志等,北京地区大气中尺度扩散模态和时间特征分析,2002,北京大学学报,38(5),705~712.
- 10 陈家宜,大气湍流度的参数化估算,环境科学学报,1985,5(1),85~95.
- 11 蔡旭晖、郭昱、陈家宜等,北京石景山区大气污染扩散对市区影响的半定量分析,环境科学,2002,23(增刊),48~53.
- 12 陈辉、胡非、任丽红等,北京冬季二氧化硫污染和气象条件的关系,气候与环境研究,2000,5(3),287~295.
- 13 安俊岭、张仁健、韩志伟,北方 15 个大型城市总悬浮颗粒物的季节变化,气候与环境研究,2000,5(1),25~29.
- 14 刘毅、周明煜,北京沙尘质量浓度与气象条件关系研究及其应用,气候与环境研究,1998,3(2),142~146.
- 15 Alfaro, S. C., and L. Gomes, Modeling mineral aerosol production by wind erosion: emission intensities and aerosol size distributions in source area, *J. Geophys. Res.*, 2001, 106 (D16), 18075~18084.

An Analysis on Background Concentration of PM10 and SO₂ over Beijing Area

Cai Xuhui, Zhang Rui, Song Yu, and Xie Shaodong

(*Department of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871*)

Abstract By use of the monitoring concentrations of PM10 and SO₂ at 5 stations over Beijing area, combined with diagnostic analysis of wind field as well as random walk simulation for atmospheric diffusion, the influence of air pollution from urban area of Beijing to the monitoring data of Dingling, a control station for clean air which located far away from the city, are accounted and the background concentrations of PM10 and SO₂ over this region are estimated. It shows that the influence from the city is important. Eliminating the influence and through an additional probability analysis results in a background concentration of SO₂ in winter as 0.044 mg m⁻³ or less, and 0.008 mg m⁻³ for other seasons. For PM10, the background concentration in winter, spring and summer might be 0.03—0.04 mg m⁻³, respectively. And the concentration in autumn might be 0.01—0.02 mg m⁻³.

Key words: PM10; SO₂; background concentration; monitoring; diffusion modeling