

# 北京市春季沙尘暴天气大气气溶胶污染特征研究

王 玮<sup>1</sup>, 岳 欣<sup>1</sup>, 刘红杰<sup>1</sup>, 潘 志<sup>1</sup>, 汤大钢<sup>1</sup>, 王 英<sup>2</sup>, 杜尧国<sup>2</sup>,  
苏红梅<sup>3</sup>, 钱 枫<sup>3</sup>, 坂本和彦<sup>4</sup> (1. 中国环境科学研究院大气环境研究所, 北京 100012; 2. 吉林大学

环境科学系, 长春 130061; 3. 北京工商大学环境工程系, 北京 100081; 4. 日本埼玉大学研究生院, 日本 338)

摘要 采集并分析了北京市 2 次沙尘暴天气和非沙尘暴天气 TSP(总悬浮颗粒物, <100 μm)、PM<sub>10</sub>(可吸入颗粒物, <10 μm) 的质量浓度、离子浓度、元素浓度等。研究结果表明, 发生沙尘暴时大气气溶胶的污染水平极高, 这种情况在北京市只有发生沙尘暴时才可能出现。地表扬尘对大气气溶胶的贡献显著, 显示出沙尘暴时的污染特征。

关键词 大气气溶胶; 沙尘暴; 北京市

## Study on pollution characteristics of aerosols during sand-dust storm weather in Beijing

WANG Wei<sup>1</sup>, YUE Xin<sup>1</sup>, LIU Hongjie<sup>1</sup>, PAN Zhi<sup>1</sup>, TANG Dagang<sup>1</sup>, WANG Ying<sup>2</sup>, DU Raoguo<sup>2</sup>, SU Hongmei<sup>3</sup>, QIAN Feng<sup>3</sup>, Sakamoto Kazuhiko<sup>4</sup> (1. Atmospheric Environment Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012; 2. Department of Environmental Sciences, Jilin University, Changchun 130061; 3. Department of Environmental Engineering, Beijing Industrial and Commercial University, Beijing 100081; 4. Graduate School of Saitama University, Japan 338)

**Abstract** In the spring of 2000, there were 12 sand-dust storms that brought enormous impacts to atmospheric environment and daily life in Beijing. 2 sand-dust storms were experienced in this study. Mass concentrations, ionic concentrations, elementary concentrations and etc of TSP( total suspended particulate, <100 μm) and PM<sub>10</sub>( inhalable particulate, <10 μm) were sampled and analyzed. Results showed that pollution level of aerosols was extremely high and such kind of serious pollution only occurred during sand-dust storms. Contribution of ground dust to aerosols was very significant, which might be the pollution characteristics of sand-dust storm in Beijing.

**Keywords** aerosols; sand-dust storm; Beijing

近年中国西北部地区春季都会发生沙尘暴天气, 而随着人类活动对自然破坏的加剧和气候的变化, 沙尘暴有逐渐加剧和向东南部推移的倾向<sup>[1, 2]</sup>。2000 年春季, 中国北方发生了多次大范围扬尘、浮尘和沙尘暴天气, 特别是北京市在 3—5 月发生了 12 次沙尘暴天气, 其中 2 次强度非常大。为了解和研究北京市春季特殊气象条件下大气气溶胶的污染状况和污染特征, 我们于 2000 年 4 月在北京市北部采集了发生沙尘暴时和非沙尘暴天气时 TSP(总悬浮颗粒物, <100 μm)和 PM<sub>10</sub>(可吸入颗粒物, <10 μm)样品, 分析了其质量浓度、离子浓度、元素浓度。本文将就所得到的结果进行分析和讨论。

### 1 样品的采集和分析方法

#### 1.1 样品的采集方法

在中国环境科学研究院内(在北京市亚运村北 6 km 处)以滤膜法采集 TSP 样品和 PM<sub>10</sub> 样品。样品采集装置为北京地质仪器厂生产的 KB-80 型中流量大气颗粒物采样器, 采样流量

为 78 L/min. 样品采集滤膜为日本东洋滤纸公司生产的聚四氟乙烯滤膜(PF020).

## 1.2 样品的分析方法

样品采集前后,将滤膜放置在温度 20℃ 和相对湿度 48% 的恒温恒湿室内 24 h,然后用日本岛津制造的十万分之一精密天平称重,由样品采集前后滤膜的质量差和大气的采样体积求出大气气溶胶的质量浓度.分取一定面积的样品滤膜,用去离子水经超声波震荡浸取滤膜,浸取液用 0.47  $\mu\text{m}$  的微孔滤膜(北京化工学校制)过滤.滤液定容后用美国 DIONEX 公司生产的 DX100 型离子色谱仪分析其中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{F}^-$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等阴、阳离子.分取一定面积的样品滤膜,用混合酸  $\text{HF-HNO}_3\text{-HClO}_4$  加热分解,加热分解后的残渣用定量的去离子水溶解,使用日本岛津仪器公司制造的 ICPQ-1000 型耦合诱导等离子发射光谱分析仪分析样品水溶液中的主要元素,其中包括 Al、Ba、Ca、Mg、Ti、Li、Cr、Co、Cu、Fe、Ga、K、Mn、Na、Ni、Pb、Sr、V、Zn 等元素.根据上述元素的分析结果和采样体积可计算样品的元素浓度.

## 2 结果和讨论

### 2.1 质量浓度的结果和讨论

图 1 是 TSP 和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度的逐日变化曲线.

与其它的 analysis 结果比较,可以发现观测期间大气气溶胶的污染极为严重<sup>[1-6]</sup>.28 个 TSP 样品的平均浓度为 1.09  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,最大值达到 5.20  $\text{mg}/\text{m}^3$ .用日平均浓度与中华人民共和国国家环境空气质量标准相比较,则其浓度全部超过 TSP 质量浓度日均值的二级标准(0.30  $\text{mg}/\text{m}^3$ ),最大超标倍数达到 16.1

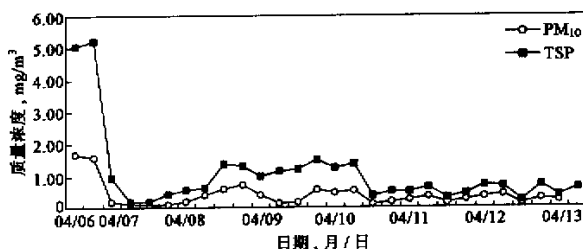


图 1 TSP 和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度变化

Fig. 1 Variation of mass concentrations of TSP and  $\text{PM}_{10}$

倍;与三级标准(0.50  $\text{mg}/\text{m}^3$ )相比较,则 8 天中有 5 天超标,超标比率为 62.5%,最大超标倍数为 9.2 倍.同时,27 个  $\text{PM}_{10}$  样品的平均浓度也达到 0.42  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,最大值为 1.70  $\text{mg}/\text{m}^3$ .用日平均浓度与中华人民共和国国家环境空气质量标准相比较,则其浓度全部超过  $\text{PM}_{10}$  质量浓度日均值的二级标准(0.15  $\text{mg}/\text{m}^3$ ),最大超标倍数达到 10.3 倍;与三级标准(0.25  $\text{mg}/\text{m}^3$ )相比较,则 8 天中有 6 天超标,超标比率为 75%,最大超标倍数为 5.6 倍.

从图 1 还可以看到 4 月 6 日和 4 月 8—9 日 TSP 和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度均出现了浓度高峰,这主要是由于出现了沙尘暴天气.特别是 4 月 6 日为 2000 年北京市最严重的沙尘暴,所以浓度也出现了最大值.这与沙尘暴源区发生中型沙尘暴时的浓度水平基本相当<sup>[1,2]</sup>.通过与相同观测时段 TSP 的比较,可以发现  $\text{PM}_{10}$  总平均质量浓度为 0.42  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,占 TSP 质量浓度的 38.5%;不考虑沙尘暴的影响, $\text{PM}_{10}$  平均质量浓度为 0.29  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,占 TSP 质量浓度的 47.5%.而沙尘暴天气时, $\text{PM}_{10}$  平均质量浓度为 0.78  $\text{mg}/\text{m}^3$ ,占 TSP 质量浓度的 31.4%,表明春季大气气溶胶中粒径较小的粒子在质量浓度中所占比重较小,特别是发生沙尘暴时由于风沙和地表土壤等粒径较大的粒子对 TSP 的贡献增加,而未发生沙尘暴天气时细粒子的质量分数较大.

万方数据

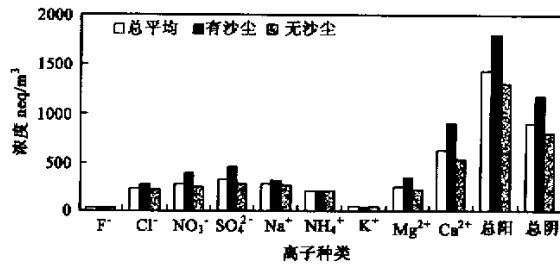


图 2 TSP 离子浓度

Fig. 2 Ionic concentrations of TSP

于粒径较大的粒子中,同时又是风沙和地面扬尘中的主要离子,所以可以认为风沙和地面扬尘对大气气溶胶的影响非常大.同时,还可以发现PM<sub>10</sub>中NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>的浓度很高,在阴离子中占有很大比例,这表明人为活动对细粒子的贡献较大.

2.3 元素浓度的结果和讨论

表 1 和表 2 分别给出了 TSP 和 PM<sub>10</sub>部分元素浓度的分析结果,其中元素总浓度为分析元素质量的总和,元素总浓度/质量浓度是分析元素质

量的总和与颗粒物质量浓度的比值,表 3 则是计算得到的 TSP 和 PM<sub>10</sub>部分元素的富集因子(参比元素为 Fe)<sup>[7]</sup>.从表中的数据首先可以发现大气气溶胶中 Al、Ca、Fe、K、Mg、Na 等元素的浓度比较高,在 TSP 中上述元素的浓度之和占元素总质量浓度的 97.8%,在 PM<sub>10</sub>中则占 98.1%,这表明上述元素是大气气溶胶中的主要元素.通过比较还可以发现 PM<sub>10</sub>中人为来源的 Pb、Mn、Cu 的浓度相对较高,PM<sub>10</sub>中上述元素在 TSP 中的比例分别占 59.0%、51.0%、67.5%,特别是在非沙尘暴时其比率更提高为 65.0%、59.0%、77.3%.因此可以认为这些人为来源的元素主要存在于细粒子中.同时,从表中的数据还可以发现沙尘暴时和非沙尘暴时大气气溶胶的污染特征存在着显著的差别.在发生沙尘暴时 Al、Ca、Fe、Mg 等元素在 TSP 中的增加比率高于 PM<sub>10</sub>,这表明上述元素主要来源于沙尘和土壤粒子等大粒子,在发生沙尘暴时,这些粒子对大气气溶胶污染性质的影响非常显著.从元素总浓度与质量浓度的比较还可以发现在发生沙尘暴时元素总浓度在质量浓度中的比重下降,这是由于此时沙尘和土壤粒子较多,这些粒子中来源于土壤的其它元素和物质较多,如硅酸盐和碳酸盐等.

富集因子的计算结果也表明大气气溶胶受沙尘暴和地面扬尘等影响较大.分析的元素中大部分富集因子都小于 10,这些元素包括 Al、Ca、Mg、Na 等. K 元素的富集因子也在 10 左右,这表明上述元素在大气气溶胶中基本没有富集,其主要原因是此时大气气溶胶受到沙尘暴和地面扬尘的影响和贡献比较大.从计算结果可以看到 Pb、Zn、Ga 的富集因子比较大,其中 Pb 达到

2.2 离子浓度的结果和讨论

图 2 和图 3 分别给出了 TSP 和 PM<sub>10</sub>离子浓度的分析结果,其中总平均为 28 个样品的平均值,有沙尘暴时的平均为发生沙尘暴时 10 个样品的平均值,无沙尘暴时的平均为未发生沙尘暴时 18 个样品的平均值.

由图中的分析结果可知,TSP 和 PM<sub>10</sub>中 Ca<sup>2+</sup>的浓度都非常高,在阳离子中占有主导地位,由于 Ca<sup>2+</sup>多存在

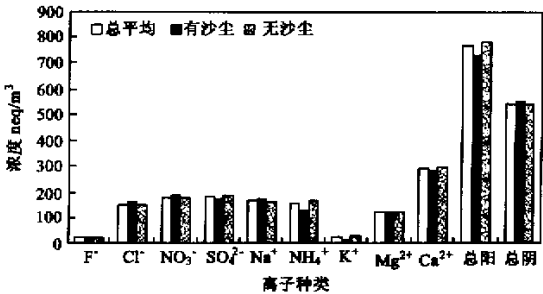


图 3 PM<sub>10</sub>离子浓度

Fig. 1 Ionic concentrations of PM<sub>10</sub>

表 1 TSP 元素浓度的分析结果(  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  )  
Table 1 Elemental concentrations of TSP(  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  )

日期_月.日	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K	Li	Mg
4.06	68.56	0.62	45.07	0.015	0.04	0.05	35.09	0.52	36.25	0.040	16.68
4.07	5.42	0.06	14.90	0.002	0.03	0.01	2.92	0.04	10.09	0.003	4.85
4.08	11.93	0.16	18.45	0.003	0.03	0.02	6.44	0.10	35.24	0.008	6.52
4.09	16.54	0.19	17.57	0.004	0.06	0.01	8.75	0.15	22.00	0.009	5.33
4.10	10.04	0.15	15.36	0.003	0.04	0.02	5.53	0.08	12.72	0.005	4.31
4.11	5.57	0.12	19.62	0.003	0.03	0.02	3.44	0.06	20.49	0.005	4.82
4.12	4.74	0.06	18.16	0.002	0.05	0.01	2.99	0.05	25.36	0.004	3.99
4.13	7.00	0.12	15.84	0.003	0.04	0.01	3.95	0.07	16.35	0.005	4.48
Ave.1	33.77	0.10	26.51	0.008	0.04	0.03	17.50	0.27	25.66	0.019	8.85
Ave.2	6.72	0.03	17.01	0.003	0.04	0.02	3.84	0.06	19.38	0.005	4.84
Ave.3	13.62	0.05	19.44	0.004	0.04	0.02	7.33	0.12	21.87	0.009	5.87

日期_月.日	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn	元素总浓度	元素总浓度/质量浓度,%
4.06	0.71	9.90	0.04	0.20	0.18	3.82	0.09	0.20	218.08	4.26
4.07	0.07	4.61	0.00	0.04	0.02	0.33	0.01	0.06	43.46	9.45
4.08	0.14	9.91	0.01	0.10	0.04	0.74	0.02	0.18	90.05	9.19
4.09	0.19	6.98	0.01	0.10	0.06	1.07	0.02	0.17	79.22	6.55
4.10	0.14	6.03	0.01	0.05	0.03	0.63	0.02	0.14	55.32	6.36
4.11	0.09	6.52	0.01	0.08	0.04	0.50	0.01	0.23	61.67	12.85
4.12	0.07	7.62	0.01	0.06	0.04	0.37	0.01	0.21	63.81	11.00
4.13	0.09	5.07	0.01	0.09	0.04	0.53	0.01	0.17	53.88	11.00
Ave.1	0.36	7.87	0.02	0.12	0.10	1.97	0.05	0.17	119.54	4.82
Ave.2	0.09	6.55	0.01	0.07	0.03	0.48	0.01	0.17	62.26	10.21
Ave.3	0.16	6.87	0.01	0.08	0.05	0.86	0.02	0.17	76.88	7.05

注 :Ave.1—3 分别为沙尘暴时、非沙尘暴时和总加权平均值

表 2 PM<sub>10</sub> 元素浓度的分析结果(  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  )  
Table 2 Elemental concentrations of PM<sub>10</sub>(  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  )

日期_月.日	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Fe	Ga	K	Li	Mg
4.06	24.69	0.34	16.92	0.006	0.01	0.02	13.16	0.18	12.25	0.015	6.13
4.07	1.68	0.03	7.74	0.001	0.02	0.01	0.83	0.01	7.39	0.002	2.22
4.08	5.98	0.10	12.37	0.001	0.02	0.01	2.84	0.04	25.08	0.004	3.94
4.09	7.08	0.15	9.71	0.002	0.03	0.01	3.41	0.04	12.53	0.004	2.85
4.10	4.15	0.12	6.82	0.001	0.02	0.01	2.19	0.03	5.47	0.003	2.30
4.11	2.67	0.10	9.51	0.002	0.02	0.02	2.01	0.02	13.21	0.009	2.81
4.12	2.51	0.05	10.64	0.002	0.02	0.00	1.34	0.01	16.65	0.008	2.77
4.13	2.74	0.05	5.58	0.001	0.02	0.01	1.67	0.02	10.28	0.003	2.46
Ave.1	12.89	0.20	12.31	0.003	0.02	0.02	6.57	0.09	15.00	0.007	3.73
Ave.2	3.07	0.08	8.77	0.001	0.02	0.01	1.71	0.02	8.16	0.005	2.84
Ave.3	5.67	0.11	10.05	0.002	0.02	0.01	3.00	0.04	13.19	0.006	3.08

日期_月.日	Mn	Na	Ni	Pb	Sr	Ti	V	Zn	元素总浓度	元素总浓度/质量浓度,%
4.06	0.30	5.96	0.02	0.08	0.07	1.28	0.04	0.09	81.57	4.94
4.07	0.04	3.27	0.00	0.02	0.01	0.04	0.00	0.05	23.37	14.61
4.08	0.09	6.43	0.01	0.06	0.02	0.26	0.01	0.12	57.41	11.48
4.09	0.09	4.45	0.01	0.07	0.03	0.24	0.01	0.12	40.83	12.01
4.10	0.07	4.21	0.00	0.02	0.02	0.19	0.01	0.09	25.71	7.79
4.11	0.05	3.55	0.01	0.06	0.03	0.19	0.01	0.20	34.58	13.30
4.12	0.06	3.80	0.00	0.04	0.02	0.12	0.00	0.17	38.23	13.18
4.13	0.04	3.19	0.00	0.04	0.01	0.28	0.01	0.21	29.63	14.11
Ave.1	0.16	5.80	0.01	0.05	0.04	0.59	0.02	0.13	48.26	6.19
Ave.2	0.06	3.73	0.00	0.05	0.02	0.15	0.01	0.12	37.22	12.83
Ave.3	0.08	4.38	0.01	0.05	0.02	0.27	0.01	0.13	40.14	9.56

注 :Ave.1—3 分别为沙尘暴时、非沙尘暴时和总加权平均值

了 100 左右 ,表明上述元素有可能受到了人为污染的影响 ,Pb 的富集因子比较高说明即使目前已经停止使用含铅汽油 ,但是以往沉降到土壤中的铅还会在相当长的时间内造成一定的污染 .特别是通过发生沙尘暴和无沙尘暴时 Pb 富集因子的比较 ,可以发现在发生沙尘暴时 Pb 的富集因子有很大的下降 ,这种污染特征与沙尘暴源区大气气溶胶的污染特征比较接近 ,这表明发生沙尘暴时大气气溶胶中非本地源的贡献有很大的增加<sup>[ 1 2]</sup> .与其它的分析和计算结果相比较 ,本次研究得到的富集因子显著比较小 ,表明此时大气气溶胶受自然来源的影响大 ,而受人为来源影响相对较小<sup>[ 7]</sup> .从计算结果还可以发现 ,未发生沙尘暴时上述元素受人为污染的影响较大 ,这从 PM<sub>10</sub> 上述元素的富集因子大于 TSP 也可以反映 .

表 3 TSP 和 PM<sub>10</sub>元素富集因子的计算结果  
Table 3 Calculation of enrichment factors of TSP and PM<sub>10</sub>

种类	元素	Al	Ba	Ca	Co	Cr	Cu	Ga	K	Li
TSP	总平均	1.35	3.38	3.04	1.11	3.26	2.63	54.07	10.31	3.38
	沙尘暴平均	1.40	2.83	1.74	0.91	1.74	1.58	52.74	4.31	3.18
	无沙尘暴平均	1.27	4.25	5.08	1.42	5.64	4.27	56.15	19.67	3.68
PM <sub>10</sub>	总平均	1.37	5.74	3.84	1.24	4.11	4.33	42.03	15.19	5.40
	沙尘暴平均	1.42	4.63	1.89	0.95	2.17	2.12	44.34	4.29	3.25
	无沙尘暴平均	1.30	7.27	6.54	1.66	6.77	7.39	38.85	30.23	8.37
种类	元素	Mg	Mn	Na	Ni	Sr	Ti	Pb	V	Zn
TSP	总平均	1.68	1.29	2.41	1.09	11.40	0.79	66.45	0.93	16.23
	沙尘暴平均	1.06	1.21	1.08	0.93	9.43	0.76	38.18	0.88	6.07
	无沙尘暴平均	2.64	1.42	4.47	1.34	14.49	0.84	110.65	1.00	32.11
PM <sub>10</sub>	总平均	2.15	1.62	3.66	6.41	13.68	0.61	95.78	1.09	29.81
	沙尘暴平均	1.19	1.43	1.83	1.30	10.72	0.61	47.51	0.91	9.84
	无沙尘暴平均	3.47	1.88	6.18	13.46	17.78	0.60	162.37	1.37	57.38

3 结论

( 1 )2000 年春季北京市大气气溶胶的污染非常严重 ,这表现在 TSP 和 PM<sub>10</sub> 质量浓度和化学成分水平很高 ,特别是发生沙尘暴时 TSP 和 PM<sub>10</sub> 的质量浓度极高 ,远远超过了相应的标准 ,同时大气气溶胶的污染也表现出沙尘暴的污染特征 .( 2 )根据对沙尘暴和非沙尘暴天气以及 TSP 和 PM<sub>10</sub> 化学成分浓度的对比分析 ,可以发现在发生沙尘暴时来源于沙尘和土壤的大粒子对大气气溶胶的贡献明显增加 ,其中来源于土壤的离子和元素浓度骤增 ,而在非沙尘暴时来源于人为排放的离子和元素的相对比例则增加 ,这些元素主要存在于细粒子中 .( 3 )富集因子的计算结果也表明观测期间沙尘暴对大气气溶胶的贡献显著 ,同时可以发现 Pb 等元素的富集因子比较大 ,但是在沙尘暴期间其富集因子降低 ,表明其受人为污染的影响比较大 .

参考文献 :

[ 1 ] Wang Wei ,Liu Hongjie ,Zhang Yutian *et al.* Study on the aerosol pollution characteristic in the desert areas ,Proceedings of The 6<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric Sciences and Applications to air Quality[ C ] .Beijing :China Ocean Press , 1998. 507—521

[ 2 ] Xuhui Dong ,Kazuhiko Sakamoto ,Wei Wang. Characteristics of Ca and Mg Distribution in soil of china and their relationship to acidic pollutants in the atmosphere[ J ] .J Aerosol Res Jpn ,1999 ,14( 2 ) :171—180

[ 3 ] 王 玮 ,姜振远 ,张孟衡 ,等 .华南地区气溶胶的污染特征及其与酸雨的关系[ J ] .环境科学学报 ,1992 ,12( 1 ) :7—15

[ 4 ] 王 玮 ,王文兴 ,陈宗良 ,等 .日本东京湾地区冬季飘尘污染研究[ J ] .环境科学学报 ,1998 ,18( 3 ) :248—253

[ 5 ] Wang Wei ,Sakamoto K ,Wang Wenxing *et al.* Pollution characteristic of atmospheric aerosol and its relations to acid rain at the southern area of fujian province in China[ J ] .J Jpn Soc Atmos Environ ,1997 ,33( 4 ) :204—215

[ 6 ] Wang Wei ,Sakamoto K ,Wang Wenxing *et al.* Acidity and buffering ability to precipitation acidification of atmospheric aerosols collected in China[ J ] .J Aerosol Res Jpn ,1997 ,12( 2 ) :96—102

[ 7 ] 唐孝炎 .大气环境化学[ M ] .北京 :高等教育出版社 ,1990