

山东省主要城市酸沉降现状及影响因素分析

贾洪玉^{1, 2}, 张巧显¹, 邓红兵¹, 赵景柱¹, 慕金波², 张德志³

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态重点实验室, 北京 100085; 2. 山东省环境保护科学研究设计院, 济南 250013; 3. 山东大学环境科学与工程学院, 济南 250013)

摘要: 根据山东省多年降水观测资料, 分析了其 17 个设区城市的酸雨现状, 并研究了济南市和青岛市硫的干、湿沉降及其变化规律. 结果表明, 近 5a(1997~2001 年) 青岛市降水酸度位列全省 17 城市之首, 是唯一降水 pH 年均值低于酸雨临界值 5.60 的城市; 山东省主要城市的降水酸度总体上呈下降趋势. 济南市和青岛市近年来硫沉降总通量基本稳定或呈下降趋势, 仍达 10 t/(km²·a) 左右; 在硫沉降总通量中, 硫干沉降的贡献率达 80% 以上, 而在硫干沉降通量中, SO₂ 干沉降的贡献率要远远高于 SO₄²⁻ 干沉降的贡献率. 通过分析酸雨前体物排放强度、土壤酸碱性以及气象条件对酸沉降的影响, 揭示了山东省内主要城市酸沉降的影响因子.

关键词: 酸沉降; 硫; 影响因子; 山东省

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2453-05

Current Situation and Impact Factors of Acid Deposition in Main Cities of Shandong Province

JIA Hong-yu^{1, 2}, ZHANG Qiao-xian¹, DENG Hong-bing¹, ZHAO Jing-zhu¹, MU Jin-bo², ZHANG De-zhi³

(1. Key Laboratory of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Shandong Provincial Scientific Research and Design Institute of Environmental Protection, Jinan 250013, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250013, China)

Abstract: Based on the monitoring data for years in Shandong Province, current situation of acid rain in every city was assessed, and the temporal distribution of the dry, wet and total sulfur deposition in Jinan and Qingdao were studied. The results showed that Qingdao which had the largest precipitation acidity was the single city whose annual average precipitation pH was below 5.60. The precipitation acidities in the main cities of Shandong Province were in a descent tendency. The total sulfur desposition in Jinan and Qingdao was basically stable or in a descent tendency, but also reached 10 t/(km²·a) or so. Among the total sulfur deposition flux, the dry deposition of sulfur had the greater contribution, and the contribution of SO₂ dry deposition was higher than that of SO₄²⁻ dry deposition. By analyzing the relation between the precipitation acidity and the SO₂ discharge intensity, soil acidity and meteorological condition, the impact factors of acid precipitation in the cities of Shandong Province were revealed.

Key words: acid deposition; sulfur; impact factor; Shandong Province

酸雨通常是指 pH 值低于 5.6 的降水. 为控制中国酸雨和 SO₂ 污染不断恶化的趋势, 1998-01 国务院正式批复了中国酸雨控制区和 SO₂ 污染控制区的划分方案. 山东省不属于酸雨控制区, 但有 58 个县(市、区)被划为 SO₂ 污染控制区, 占全省县级行政区总数的 41.7%. 从全国范围来看, 山东省酸雨污染程度比酸雨控制区内的其他省份要轻, 但局部地区如青岛市酸雨污染程度在国内亦属比较严重的, 济南、潍坊、烟台等城市几乎每年也有酸雨检出. 即使没有或少有酸雨检出的城市, 其硫干湿沉降通量在全国也较高; 实际上有些地区降水酸度呈下降趋势, 但致酸物质沉降通量不一定也呈下降趋势. 许多研究^[1~4]已经表明, 酸沉降对生态系统的影响重大. 因此, 加强对山东省城市酸沉降现状、变化规律及其影响因子的研究, 可以为有效控制山东省酸沉

降污染提供理论依据.

1 研究方法

1.1 硫湿沉降通量估算方法

原则上应采用某时段内每次降水的致酸物质浓度和降水量相乘, 求出该时段内的致酸物质湿沉降通量, 但在实际中很难将该时段内全部场次降水的致酸物质浓度和降水量准确观测. 为此, 首先选取某月几次实测离子浓度的雨量加权平均值, 来代表该月全部场次降水离子浓度实测值, 然后乘以降水量, 作为致酸物质该月湿沉降通量. 年度湿沉降通量, 则

收稿日期: 2005-12-05; 修订日期: 2006-05-18

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX3-SW-423); 国家杰出青年科学基金项目(70325002)

作者简介: 贾洪玉(1972~), 女, 博士研究生, 工程师, 主要研究方向为环境管理与环境系统工程, E-mail: jhyu848@126.com

由 12 个月份的湿沉降通量迭加即可。

1.2 硫干沉降通量估算方法

SO_2 气体和 SO_4^{2-} 气溶胶以干沉降的形式到地面, 气体和气溶胶的干沉降均与接受体表面附近的微气象因素、沉降表面的性质、地理条件等因素有关, 并随时间和空间变化。硫的干沉降通量用单位时间内在地表面单位面积上的沉降量来表示, 对于气体 SO_2 和气溶胶 SO_4^{2-} 的计算均有成熟方法^[5,6]。因受客观条件限制, 很难采用野外测量或实验室内测定 2 类方法来实测山东省境内各个区域的 SO_2 、 SO_4^{2-} 干沉降速率, 为此类比他人的测定结果^[7~11]。本研究取 SO_2 干沉降速率为城区 0.6 cm/s, 郊区 0.7 cm/s; SO_4^{2-} 干沉降速率为城区 0.15 cm/s, 郊区 0.2 cm/s。

1.3 硫沉降总通量估算方法

硫干沉降通量与湿沉降通量之和即为硫沉降总通量。 SO_4^{2-} 干湿沉降通量乘以 1/3 即为 SO_4^{2-} 干湿沉降贡献的 S 干、湿沉降通量, SO_2 干沉降通量乘以 1/2 即为 SO_2 干沉降贡献的 S 干沉降通量。

2 山东省各城市酸雨状况

酸雨状况主要用降水 pH 值和酸雨频率 2 个指标来表征。表 1 给出了山东省各城市 1997~2001 年 2001 年降水 pH 均值及酸雨频率。山东省在 1997~2001 年降水 pH 均值具有明显地域分布特

征。在 17 城市中青岛市降水 pH 值最小 (4.99), 是唯一降水 pH 均值低于酸雨临界值 5.60 的城市。潍坊、济南、烟台、临沂 4 城市次之, 略高于酸雨临界值。莱芜、聊城 2 城市最大, 其余 10 城市位于中间。在 1997~2001 年山东省降水酸雨频率也具有明显的地域分布特征。青岛市酸雨频率最高 (32%); 依次是临沂市、潍坊市、济南市、烟台市; 枣庄、东营、济宁、泰安、威海、日照、滨州、聊城 8 城市酸雨频率为 0; 其余 5 城市的酸雨频率介于 2.67%~0.23%。采用降水 pH 均值、酸雨频率 2 个评价指标对城市降水酸度的排序结果并不完全一致, 但还是可以对城市降水酸度进行大致分类。青岛市无论用哪一项指标评价, 其降水酸度均名列所有城市之首。事实上青岛市不仅在山东省属于酸雨严重地区, 在全国也是酸雨严重地区之一。

比较各城市降水 pH 均值发现, 青岛、潍坊、济南、临沂 4 城市 2001 年高于近 5a, 酸雨频率同期降低, 而烟台市则相反。综上所述, 全省酸雨较为严重的 5 个城市中, 青岛、潍坊、济南、临沂降水酸度年际变化呈下降趋势; 烟台市降水酸度近 5a 呈上升趋势, 但对 1986~2001 年的 pH 年均值、酸雨频率用 Spearman 秩相关系数法^[12]检验, 发现 pH 年均值上升趋势显著, 而酸雨频率下降趋势显著, 即从历年看烟台市降水酸度呈下降趋势, 故认为山东省城市降水酸度总体上呈下降趋势。

表 1 山东省各城市降水 pH 均值、酸雨频率及 SO_2 排放量

Table 1 Average pH values of precipitation, acid rain frequency, and SO_2 discharge capacity in different cities of Shandong Province

城市	pH 均值		酸雨频率/%		1997~2001 年 SO_2 平均	2001 年 SO_2 平均
	1997~2001	2001	1997~2001	2001	排放量/ $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$	排放量/ $\text{t} \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{a})^{-1}$
济南	6.02	6.71	5.43	0	16.66	9.85
青岛	4.99	5.87	32.00	19.10	17.54	11.85
淄博	7.45	7.43	0.23	0	46.90	39.77
枣庄	6.67	7.15	0	0	22.43	18.92
东营	6.35	6.36	0	0	9.98	8.74
烟台	6.05	5.69	4.07	10.53	9.98	6.61
潍坊	5.73	6.04	6.19	0	13.14	9.25
济宁	6.61	6.54	0	0	12.37	10.96
泰安	6.62	6.58	0	0	18.31	12.97
威海	6.42	6.19	0	0	10.08	6.54
日照	6.70	6.70	0	0	7.70	8.78
莱芜	7.27	8.05	2.67	0	35.35	30.14
滨州	6.80	6.87	0	0	5.32	5.81
德州	7.71	7.31	0.56	0	10.94	8.99
聊城	7.72	7.47	0	0	9.13	6.29
临沂	5.62	6.99	7.25	0	5.26	3.03
菏泽	7.10	6.43	2.29	6.25	4.82	5.01

3 硫沉降通量及其时间变化

3.1 硫沉降月变化

以济南市和青岛市为例,硫干、湿沉降通量及硫沉降通量的月变化见表 2。由表 2 可见,济南市和青岛市 SO₂ 干沉降通量的月份分布具有一致的特征,即 1、2、12 月所占全年的比例最大,3、4、11 月次之,5、9、10 月再次之,6、7、8 月所占比例最小。这是由于 1、2、12 月处于冬季采暖期,空气中 SO₂ 浓度月均值为全年最高,并且是全年非降水时间最长的月份,故这 3 个月的 SO₂ 干沉降通量最大。3、4、11 月部分时间处于采暖期,空气中 SO₂ 浓度月均值为全年第 2 大,并且非降水时间仅次于 1、2、12 月,故这 3 个月的 SO₂ 干沉降通量排第 2 位。5、9、10 月非降水时间小于 3、4、11 月,故这 3 个月的 SO₂ 干沉降通量排第 3 位。6、7、8 月完全处于非采暖期,空气中 SO₂ 浓度月均值为全年最低,非降水时间全年最小,故这 3 个月的 SO₂ 干沉降通量是全年最小的。

表 2 济南市和青岛市硫沉降的月变化 / kg·(km²·month)⁻¹

Table 2 Monthly distribution of S deposition in Jí nan and Qingdao / kg·(km²·month)⁻¹

城市	月份	SO ₂ 干沉降 的 S 通量	SO ₄ ²⁻ 干沉降 的 S 通量	SO ₄ ²⁻ 湿沉降 的 S 通量	S 沉降 总通量
济南	1	2 139	106	269	2 514
	2	1 561	80	335	1 976
	3	980	85	110	1 175
	4	468	83	187	738
	5	390	70	434	894
	6	289	58	547	894
	7	206	55	387	648
	8	226	50	513	789
	9	339	62	192	593
	10	338	65	198	601
	11	931	78	72	1 081
	12	1 889	104	79	2 072
青岛	1	1 216	69	235	1 520
	2	958	54	91	1 103
	3	704	51	113	868
	4	432	53	178	663
	5	361	42	180	583
	6	304	36	179	519
	7	279	36	264	579
	8	268	31	232	531
	9	344	37	161	542
	10	419	43	183	645
	11	582	50	90	722
	12	936	58	117	1 111

济南市和青岛市 SO₄²⁻ 干沉降通量的月份分布具有几乎一致的特征,青岛市 1、2、12 月最大,济南市 1、3、12 月最大;青岛市 3、4、11 月次之,济南市

2、4、11 月次之;2 市 5、9、10 月再次之,6、7、8 月最小。这是由于 1、2、3、12 月处于采暖期,且地面植被覆盖率低,燃煤及地面扬尘排放的总悬浮微粒是 1a 中最高;而 6、7、8 月处于非采暖期,且地面植被覆盖率高,此时总悬浮微粒最低。再加上非降水时间也是 1、2、3、12 月最长,6、7、8 月最短,其他月份居中,因此各月 SO₄²⁻ 干沉降通量出现上述分布特征。济南市和青岛市 SO₄²⁻ 湿沉降通量的月份分布特征相差较大,青岛市 7、1、8 月 3 个月最高。尽管 7、8 月降水 SO₄²⁻ 浓度相对其他月份偏小,但是这 2 个月的降水量远远高于其他月份。1 月降水量偏小,但降水 SO₄²⁻ 浓度远高于其他月份,致使 7、1、8 月 SO₄²⁻ 湿沉降通量全年最高。

2 城市 S 沉降总通量 1、2、12 月位于前 3 位,这是各类干、湿沉降综合作用的结果。

3.2 硫沉降年际变化

以济南市和青岛市为例,1991~2000 年硫干湿沉降通量及硫总沉降通量见表 3。采用 Spearman 秩相关系数法^[12],对其年际变化趋势进行检验可知,SO₂ 干沉降通量济南市无显著年际变化,青岛市呈显著下降趋势;SO₄²⁻ 干沉降通量年际变化济南呈显著下降趋势,青岛无显著变化;SO₄²⁻ 湿沉降通量济南和青岛 2 城市均无显著年际变化;S 沉降总通量济南无显著年际变化,青岛市呈显著下降趋势。

表 3 济南市和青岛市硫沉降的年际变化 / kg·(km²·a)⁻¹

Table 3 S deposition in Jinan and Qingdao during 1991~2000 / kg·(km²·a)⁻¹

城市	年份	SO ₂ 干沉降 的 S 通量	SO ₄ ²⁻ 干沉降 的 S 通量	SO ₄ ²⁻ 湿沉降 的 S 通量	S 沉降 总通量
济南	1991	14 406	2 021	2 690	19 117
	1992	24 662	1 729	1 519	27 910
	1993	20 710	1 555	2 823	25 088
	1994	16 808	1 406	3 834	22 048
	1995	10 478	1 190	2 745	14 413
	1996	22 393	1 396	2 585	26 374
	1997	19 437	1 294	3 244	23 975
	1998	17 206	1 131	2 293	20 630
	1999	11 607	969	3 167	15 743
	2000	7 105	590	3 182	10 877
青岛	1991	14 494	615	2 638	17 747
	1992	14 523	574	1 541	16 638
	1993	15 959	482	2 376	18 817
	1994	16 875	543	1 573	18 991
	1995	15 966	514	1 224	17 704
	1996	15 024	670	2 271	17 965
	1997	12 985	767	1 394	15 146
	1998	9 968	664	2 118	12 750
	1999	7 947	585	1 133	9 665
	2000	5 516	436	2 198	8 150

3.3 硫干湿沉降的贡献率

表 4 给出了济南和青岛市硫干、湿沉降对总沉降的贡献率. 在硫沉降总通量中, 硫干沉降的贡献率较大, 2 城市均达到 80% 以上; 而在硫干沉降通量中, SO_2 干沉降的贡献率要远远高于 SO_4^{2-} 干沉降的贡献率.

表 4 济南市和青岛市硫干湿沉降贡献率/%
Table 4 Contribution rates of sulfur dry and wet deposition in Jí nan and Qingdao/%

城市	SO_2 干沉降贡献率	SO_4^{2-} 干沉降贡献率	SO_4^{2-} 湿沉降贡献率
济南	79.66	5.51	14.83
青岛	80.79	4.90	14.31

4 硫沉降影响因素

4.1 SO_2 排放强度对酸沉降的影响

山东省各城市历降水 pH 均值与 SO_2 排放强度的相关性分析结果表明, 济南、青岛、潍坊、临沂 4 城市降水 pH 均值与 SO_2 排放强度呈显著负相关, 即 SO_2 排放强度越大, 降水 pH 均值也越低; 淄博、枣庄、东营、烟台、泰安、威海、滨州、德州、聊城、日照、莱芜 11 城市降水 pH 均值受 SO_2 排放强度影响不显著; 济宁、菏泽 2 城市呈显著正相关, 即 SO_2 排放强度越大, 降水 pH 均值也越高. 出现城市降水 pH 均值与 SO_2 排放强度显著正相关、显著负相关、不显著多种情况, 说明了降水酸度不仅受局地致酸气体排放影响, 而且还受区域外致酸气体输入的影响.

酸沉降是一个区域性问题, 在大气运动的框架上, 致酸气体历经输送、扩散、转化、清除的全过程, 往往通过长距离影响到离源较远的地方, 因此一个城市酸沉降受局地 and 外来致酸物质的同时影响, 只是贡献率大小不同. 同时还发现, 山东省降水酸度最大地区并不出现在致酸物质排放强度最大地区, 即降水酸度的地理分布与该地区 SO_2 排放强度的地理分布并不呈现一致性, 这说明区域酸雨的形成, 一定量的排放源是必要条件, 但不是充分条件, 充分条件必然包括各种自然因素.

4.2 土壤酸碱性对降水酸度的影响

大气颗粒物排放源分为天然源、人为源、混合源和其他源 4 大类. 其中天然源主要是土壤风沙尘, 指由于自然风力作用把地面、干枯的河道、湖底的土壤、沙砾扬起扩散到空气中的尘, 各城市外来尘的主要来源是城市周边的土壤风沙尘. 在所有排放源类中, 土壤风沙尘排放源对大气颗粒物的分担率占有较大比例. 2001 年对济南市大气颗粒物的来源进行了系统解析, 发现济南市土壤风沙尘对 TSP、 PM_{10} 的分担率全年均达 30% 以上^[13]. 土壤通过进入大气环境中的土壤风沙尘对降水酸度产生影响, 山东省各城市周边的土壤酸碱性必定对全省酸雨的分布产生影响.

根据山东省土壤 pH 值分布图(见图 1), 查出 17 个城市各降水观测点所在地及周边土壤酸碱度^[14], 并对比其 1997~2001 年降水 pH 均值及酸

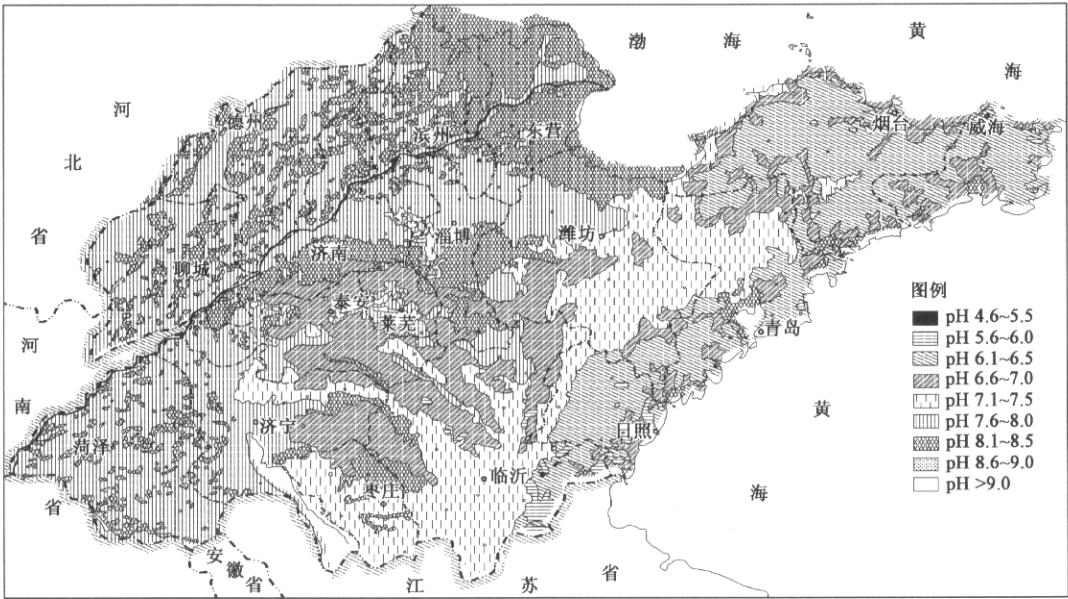


图 1 山东省土壤 pH 值分布

Fig. 1 Distribution of Soil pH in Shandong Province

雨频率,可知山东省境内酸雨最严重的城市是青岛,1997~2001年市气象局、流亭机场、崂山水库测点降水 pH 均值分别为 4.69、5.09、5.81,酸雨频率分别为 52.55%、28.46%、14.29%,而这 3 个测点所在地土壤均为弱酸性。烟台、日照、威海各测点所在地土壤属酸性或中性,尽管这 3 个城市的酸雨频率较低或为 0,但降水 pH 均值相对较低。滨州市、菏泽市、德州市、莱芜市、淄博市、聊城市、东营市各个测点所在地土壤属弱碱性,这些城市绝大部分测点的降水 pH 均值大于 7,即使小于 7 也很接近,个别测点有很小的酸雨频率,绝大部分测点无酸雨检出。临沂市的唯一测点位于中性土壤,潍坊市的 2 个测点位于中性或弱碱性土壤,济南市的 3 个测点位于弱碱性土壤,但按整个城市的降水 pH 均值、酸雨频率分析,降水酸污染程度分别列山东省第 2、3 和 4 位,这说明影响降水酸度的因素除了土壤酸碱度外,还受到致酸气体的排放以及气候气象特征等其他自然因素的影响。

4.3 气象条件对酸雨的影响

以山东省内酸雨最严重的青岛市为例,刘宝章等人通过大规模的野外实验和调查,对其气象条件对酸雨的影响进行研究^[15,16],结果表明青岛市酸雨的成因与当地边界层气象条件密切相关。

青岛市边界层风场与温度场垂直分布很特殊。在 1500m 高度以下风场,近地面层风速较小,300~400m 高度风速较大,500m 以上风速减小,1000m 以上又逐渐增大。温度层结早晚稳定,午后 200m 以上不稳定,混合层不高,一般在 400m 左右,有时可达 700m,低空经常出现多层逆温。冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,并经常受江淮气旋和黄淮气旋影响,气旋经过青岛地区时,流场经常出现上、下辐合气流。引入平直和上、下切变 2 种气流,应用平流扩散方程,对青岛地区连续点源所排放的污染物作模式计算,结果表明,在单一平直气流时,污染物传输较远,但浓度轴线也一定距离上与地面相交。尤其是在雨天,污染物只在局地散布,浓度较大。当风向出现上、下层切变时,污染物传输范围受限制,这些污染物在雨天经过化学变化即在近距离形成酸雨。

5 结论

依据山东省多年观测资料,研究了各城市酸沉降的时空分布规律。山东省主要城市的降水酸度及硫沉降总体上呈下降趋势;在硫沉降总通量中,硫干沉降的贡献率较大,而在硫干沉降通量中,SO₂ 干沉降的贡献率要远远高于 SO₄²⁻ 干沉降的贡献率。通过分析酸雨前体物排放强度、土壤酸碱性、以及气象条件对酸沉降的影响,揭示了山东省内主要城市酸沉降的影响因子,从而为有效控制酸沉降提供了科学依据。

参考文献:

- [1] 冯宗炜. 酸雨对生态系统的影响——西南地区酸雨研究[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.
- [2] 刘连贵. 酸雨和 SO₂ 复合污染对几种农作物的影响[J]. 环境科学, 1996, 17(2): 16~20.
- [3] 瑞典农业部环境委员会. 环境酸化的现状与展望[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [4] 吴刚, 章景阳, 王星. 酸沉降对重庆南岸马尾松针叶林年生物生产量的影响及其经济损失的估算[J]. 环境科学学报, 1994, 14(4): 460~465.
- [5] 徐家骝. 上海市硫氧化物酸沉降量的估算[J]. 上海环境科学, 1991, 10(2): 14~18.
- [6] 赵大为, 张冬保, 高世东. 重庆地区酸沉降趋势及硫污染控制[J]. 重庆环境科学, 1996, 18(6): 18~22.
- [7] 朱联锡, 蒋文举, 朱晓帆, 等. 峨眉山酸沉降通量与冷杉衰败的相关性研究[J]. 四川环境, 1997, 21(2): 35~44.
- [8] 范思泓, 洪钟祥, 周乐义, 等. 二氧化硫干沉降的测量[J]. 大气科学, 1993, 17(1): 106~111.
- [9] 宋文质, 沈济, 赵倩雪, 等. 二氧化硫干沉降测定方法及其测量的研究[J]. 环境科学进展, 1996, 4(2): 77~81.
- [10] 袁撰英. 用间接浓度法测量干沉积通量[J]. 大气科学, 1986, 10(4): 357~370.
- [11] 杨新兴, 高庆先, 姜振远, 等. 我国硫输送和沉降量规律的研究[J]. 环境科学研究, 1998, 11(4): 27~34.
- [12] 国家环境保护局. 环境质量报告书编写技术规定[M]. 北京: 国家环境保护局, 1991.
- [13] 冯银厂, 吴建会, 朱坦. 济南市环境空气中 TSP 和 PM₁₀ 来源解析研究[J]. 环境科学研究, 2004, 17(2): 1~5.
- [14] 山东省土壤肥料工作站. 山东土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994. 354~358.
- [15] 刘宝章, 李金龙, 王敬云, 等. 青岛酸雨天气边界层气象特征[J]. 中国环境科学, 1997, 17(2): 103~106.
- [16] 刘宝章, 李金龙, 王敬云, 等. 青岛地区边界层特征及酸雨成因[J]. 环境科学学报, 1998, 18(1): 39~44.