

北京市区大气氮沉降研究

王德宣¹, 赵普生², 张玉霞¹, 张丽华³

(1. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012; 2. 中国气象局北京城市气象研究所, 北京 100089; 3. 中国科学院植物研究所, 北京 100093)

摘要: 2009年3~9月, 使用离子交换树脂柱法对北京市区大气氮沉降进行了观测. 2009年3~6月, 北京市区大气硝态氮沉降平均值为 $40.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 大气亚硝态氮沉降平均值为 $14.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 2009年6~9月, 北京市区大气硝态氮沉降平均值为 $75.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 大气亚硝态氮沉降平均值为 $20.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 观测表明, 大气硝态氮和亚硝态氮沉降有明显的局部分异特点, 沉降量大的地点主要是交通干线和热电厂周边地区, 显示了大气硝态氮和亚硝态氮的线源和点源特征. 2009年3~6月, 北京市区大气氨态氮沉降平均值为 $12.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 2009年6~9月, 北京市区大气氨态氮沉降平均值为 $8.46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 结果表明, 各观测点之间大气氨态氮沉降变化明显小于硝态氮和亚硝态氮, 显示了大气氨态氮的非点源特征.

关键词: 氮; 沉降; 大气; 离子交换树脂; 北京

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-1987-06

Atmospheric Nitrogen Deposition in Urban Area of Beijing

WANG De-xuan¹, ZHAO Pu-sheng², ZHANG Yu-xia¹, ZHANG Li-hua³

(1. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China)

Abstract: Using ion exchange resin columns method, atmospheric nitrogen deposition was observed in the urban area of Beijing from March to September in 2009. The average value of atmospheric nitrate nitrogen deposition was $40.59 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ and that of atmospheric sulfite nitrogen deposition was $14.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ from March to June. The average value of atmospheric nitrate nitrogen deposition was $75.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ and that of atmospheric sulfite nitrogen deposition was $20.67 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ from June to September. Observational results show that atmospheric nitrate and sulfite nitrogen deposition had obvious local difference, that is to say, there was relatively large amount of deposition around traffic arteries and power plants, which shows the character of line/point source of atmospheric nitrate and sulfite nitrogen deposition. The average value of atmospheric ammonia nitrogen deposition was $12.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ from March to June, and $8.46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$ from June to September. Observational results show that the change of atmospheric ammonia nitrogen deposition among observation points was obvious smaller than atmospheric nitrate and sulfite nitrogen deposition, which shows the character of non-point source of atmospheric ammonia nitrogen deposition.

Key words: nitrogen; deposition; atmosphere; ion exchange resin; Beijing

自工业革命以来,受人类活动的强干扰,自然界原有的氮循环被打破,产生了大量的环境问题,威胁到人类的生存和社会经济的可持续发展. 化学氮肥和化石燃料的使用为农业和工业的发展做出了重要的贡献,但伴随着工农业生产的发展和人口数量的增长,特别是化学氮肥和化石燃料消耗量及机动车数量的急剧增加,自然界的氮循环失去了原有的平衡^[1~3]. 目前,国内外的学者已经进行了大量的有关超量氮沉降对陆地生态系统结构和功能的影响研究^[4~16]. 超量的氮沉降对城市生态系统也具有重要的影响,主要是导致了环境的酸化和大气氮氧化物污染. 随着机动车保有量的增长,我国大中城市机动车尾气污染越来越严重. 以汽油、柴油为燃料的汽车,尾气中氮氧化物的浓度相当高,是造成城市大气氮氧化物污染的重要原因之一. 尤其是一些大城市

氮氧化物污染呈持续增长趋势,机动车已成为我国城市的主要氮氧化物污染源. 有关资料表明,大型城市氮氧化物的污染中,50%以上来自机动车. 我国虽然只在少数城市发现过光化学烟雾污染,但随着城市机动车数量的急剧增加,我国很多城市也都存在潜在的威胁. 从总体上看,氮氧化物污染突出表现在人口100万以上的大城市或特大城市^[17].

北京是我国的特大城市,近几年来机动车保有量以高于每年10%的速度增长,目前已经突破400万辆,再加上一些高排放的老旧汽车淘汰速度 $\times$,

收稿日期: 2009-11-18; 修订日期: 2010-01-15

基金项目: 2008年度城市气象科学研究基金项目(UMRF200804); 中国科学院东北地理与农业生态研究所前沿领域项目(07H1111)

作者简介: 王德宣(1954~),男,博士,研究员,主要研究方向为大气污染及湿地生态系统温室气体, E-mail: wangdexuan@neigae.ac.cn

机动车尾气排放已经成为北京市大气污染的主要来源之一。受机动车数量持续增长的影响,北京市区大气环境中的氮氧化物浓度连年下降后,2002 年又开始上升,使北京市面临光化学烟雾污染的潜在危险。特别是市区由于车辆众多,交通堵塞严重,更加重了机动车的氮氧化物排放量,严重污染了市区的大气环境,直接影响了广大人民群众的身心健康^[18, 19]。

为了研究北京市区大气氮沉降的基本状况,2009 年 3~9 月使用“离子交换树脂柱法”对北京市区的大气氮沉降进行了观测。

使用离子交换树脂测氮始于 20 世纪 80 年代,主要是采用“离子交换树脂袋法(Ion exchange resin bags method)”研究土壤中氮素的动态^[20, 21]。它的基本原理是,通过离子交换树脂能够进行离子交换的特性,将环境中的含氮阴阳离子进行交换吸附,然后通过某种提取液将含氮离子浸提出来,进行分析测定。我国学者从 20 世纪 90 年代起,开始使用这种方法进行森林土壤氮素动态的研究^[22~24]。“离子交换树脂柱法”(ion exchange resin column method)则是由 Fenn 等^[25]在 2004 年首先应用于美国加利福尼亚州南部的森林生态系统的大气氮沉降研究。“离子交换树脂柱”采样器的基本结构是,上部为一个漏斗,漏斗的下管插入装有离子交换树脂的管(离子交换树脂柱)中,管的下部有孔。降水由漏斗进入树脂柱,经离子交换树脂进行离子交换后降到地面。在观测采样期间,大气氮的干沉降在重力作用下和湿沉降的冲刷下,会沿漏斗壁进入到树脂柱,回收后的树脂还要经过用去离子蒸馏水进行清洗的过程。因此,使用该采样器观测到的大气氮沉降是湿沉降和分子态干沉降的总和^[25]。该研究方法的另一个特点是采样周期长且样品保存时间长。在国外的研究中,使用“离子交换树脂柱”进行大气氮沉降采样,一次采样周期最长可达 12 个月^[25]。

采用“离子交换树脂柱法”进行城市生态系统大气氮沉降研究,目前国内还鲜见类似的报道。本研究的主要目的是利用该观测方法无需动力、无需人看管、可以在城市各个局部布设相对较多观测点的特点,分析大气氮沉降在城市生态系统中的分布格局及主要来源。

1 材料与方法

1.1 观测采样方法

本研究使用的采样器为:上部是一个直径为 120 mm 的漏斗,漏斗下部插入直径为 18 mm、长为

300 mm 的内管,内管中填充有离子交换树脂。为了防止阳光照射产生高温对管内离子交换树脂的影响,内管外罩有直径为 30 mm 的外管,内管和外管的下部均有孔。大气沉降物由漏斗承接,经内管中的离子交换树脂进行离子交换后降到地面。使用的离子交换树脂特征:粒径范围为 300~850 μm ,官能团由强酸性阳离子交换树脂和强盐基性阴离子交换树脂构成,装填的阴阳离子交换树脂量的比例为 1:1。其中,阳离子交换树脂用于交换吸附氨态氮,阴离子交换树脂用于交换吸附硝态氮和亚硝态氮。

将制备好的采样器安装到城市道路两侧的电线杆上,高度为 3.5 m。经过一段时间后,进行离子交换树脂柱的换装。换装时仅换装内管(离子交换树脂柱),将取得的离子交换树脂柱带回实验室。

1.2 样品分析方法

将离子交换树脂由内管中取出,用去离子蒸馏水对离子交换树脂进行清洗过滤。用浓度为 1 mol/L 的 KCl 溶液对离子交换树脂中的氮进行浸提,然后对浸提液进行分析。

硝态氮:采用硫酸联胺法(硫酸 Hydrazine)^[26],使用分光光度计在 543 nm 波长处进行测定。

亚硝态氮:采用 BR 法^[26],使用分光光度计在 543 nm 波长处进行测定。

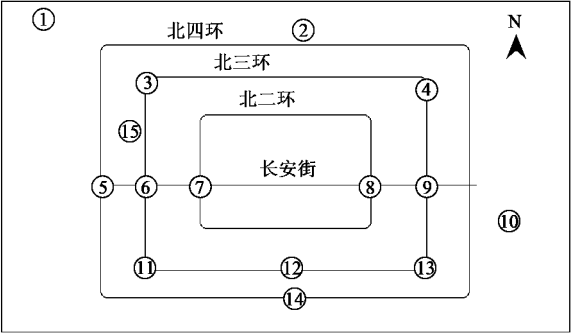
氨态氮:采用水杨酸分光光度法^[27],使用分光光度计在 697 nm 波长处进行测定。

1.3 观测点的选取和观测时段

城市生态系统大气中的硝态氮主要来源于工业企业和机动车尾气的排放,氨态氮主要来源于有机物的分解及城市周边农业地区的外源性输入。北京市大气氮沉降观测布点,主要采用基于城市各个方向的总体布局。在市区共布设有中国气象局北京城市气象研究所、苏州桥、三元桥、国家体育场(鸟巢)、五棵松桥、公主坟桥、复兴门桥、建国门桥、国贸桥、丰益桥、木樨园桥、十里河桥、大红门桥、华能热电厂(工业企业)等 14 个观测点。其中,在北京城市气象研究所观测点,共进行 2 组观测,其中一组的采样器安装在距地表 3 m 高处,另一组采样器安装在 36 m 高的楼顶,以期研究大气氮沉降在低空垂直方向上是否有变化。在距市区较远的香山植物园设 1 个清洁对照点。各观测点的位置见图 1。此外,由于机动车线源是大气硝态氮的重要来源,在五棵松桥附近的西四环路,按距路 0、22.7、45.4 和 76.8 m 设 4 个观测点。上述各观测点均设 2 个重复采样器。整个观测期间共回收用于分析的“离子交换树脂

柱”74 个。

观测分为 2 个时间段,第一个时间段为 2009 年 3~6 月,第二个时间段为 2009 年 6~9 月.2009 年 3 月中旬在各观测点进行采样器的安装,2009 年 6 月中旬进行第 1 次采样器的回收和换装,2009 年 9 月中旬进行第 2 次采样器的回收.2 个观测时段取得的样品带回实验室进行分析。



1. 香山植物园; 2. 国家体育场(鸟巢); 3. 苏州桥; 4. 三元桥;
5. 五棵松桥; 6. 公主坟桥; 7. 复兴门桥; 8. 建国门桥; 9. 国贸桥;
10. 华能热电厂; 11. 丰益桥; 12. 木樨园桥; 13. 十里河桥;
14. 大红门桥; 15. 北京城市气象研究所

图 1 北京市观测点示意
Fig. 1 Sketch of monitoring points in Beijing

2 结果与讨论

2.1 大气硝态氮和亚硝态氮沉降观测结果与讨论

2.1.1 2009 年 3~6 月时段的观测结果与讨论

在此观测时段,大气硝态氮沉降的最大值出现在华能热电厂观测点($134.63\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) (图 2),表明在城市环境中,热电厂等工业企业确实是大气硝态氮的一个重要排放源.此外,苏州桥($123.65\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、国贸桥($66.33\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、三元桥($61.55\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、建国门桥($48.09\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等机动车流量大的交通枢纽处也有较大量的硝态氮沉降.大气硝态氮沉降的最小值出现在国家体育场(鸟巢)观测点($4.52\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$).大气硝态氮沉降量较小的还有香山植物园($7.90\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、北京城市气象研究所(地面为 $16.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,楼顶为 $10.75\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、五棵松桥($14.66\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等观测点.在此观测时段,北京市总体的大气硝态氮沉降平均值为 $40.59\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (表 1).

大气亚硝态氮沉降的最大值也出现在华能热电厂观测点($36.30\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$).此外,大气亚硝态氮沉降量较大的观测点有国贸桥($34.99\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、苏州桥($28.51\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、三元桥($28.34\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、建国

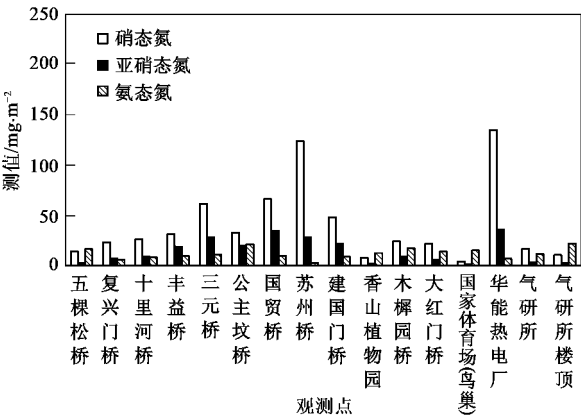
表 1 北京市 2009 年 3~6 月大气氮沉降特征值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

Table 1 Eigenvalues of atmospheric nitrogen deposition from March to June in 2009 in Beijing/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

项目	硝态 N	亚硝态 N	氨态 N
最大值	134.63	36.30	21.99
最小值	4.52	1.24	2.82
平均值	40.59	14.66	12.19
标准差	38.86	12.28	5.32

门桥($22.03\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等处.大气亚硝态氮沉降的最小值也出现在国家体育场(鸟巢)观测点($1.24\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$).大气亚硝态氮沉降量较小的还有香山植物园($2.33\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、五棵松桥($3.10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、北京城市气象研究所(地面为 $3.68\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,楼顶为 $3.06\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等观测点.在此观测时段,北京市总体的大气亚硝态氮沉降平均值为 $14.66\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.

上述观测数据显示,大气硝态氮沉降与大气亚硝态氮沉降具有相关性,即大气硝态氮沉降量大的地点大气亚硝态氮沉降量也大,反之亦然.经计算其线性相关系数为 0.87.



气研所:北京城市气象研究所;气研所楼顶:
北京城市气象研究所楼顶,下同

图 2 北京市 2009 年 3~6 月大气氮沉降
Fig. 2 Atmospheric nitrogen deposition from
March to June in 2009 in Beijing

2.1.2 2009 年 6~9 月时段的观测结果与讨论

在此观测时段,大气硝态氮沉降的最大值出现在三元桥观测点($193.56\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$) (图 3).此外,丰益桥($142.53\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、华能热电厂($137.35\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、苏州桥($132.24\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、建国门桥($130.13\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、公主坟桥($125.97\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等处也有较大的大气硝态氮沉降.大气硝态氮沉降的最小值出现在香山植物园($3.61\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$),大气硝态氮沉降量较小的其他观测点有五棵松桥(23.18

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、国家体育场(鸟巢)($25.42\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、木樨园桥($26.55\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、北京城市气象研究所(地面为 $28.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,楼顶为 $21.16\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等处.在此观测时段,北京市总体的大气硝态氮沉降平均值为 $75.13\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (表2).

大气亚硝态氮沉降的最大值也出现三元桥观测点($43.61\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$).此外,华能热电厂($41.49\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、苏州桥($39.48\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、建国门桥($38.75\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、丰益桥($36.55\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、公主坟桥($33.59\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等处也有较大的亚硝态氮沉降.大气亚硝态氮沉降的最小值出现在北京城市气象研究所观测点(地面为 $2.72\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,楼顶为 $3.79\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$).大气亚硝态氮沉降量较小的还有香山植物园($3.09\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、木樨园桥($3.40\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、国家体育场(鸟巢)($6.84\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)、五棵松桥($8.46\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$)等观测点.在此观测时段,北京市总体的大气亚硝态氮沉降平均值为 $20.67\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.

与3~6月的观测时段相同,此段时间大气硝态氮沉降与大气亚硝态氮沉降具有相关性,其线性相关系数高达0.97.

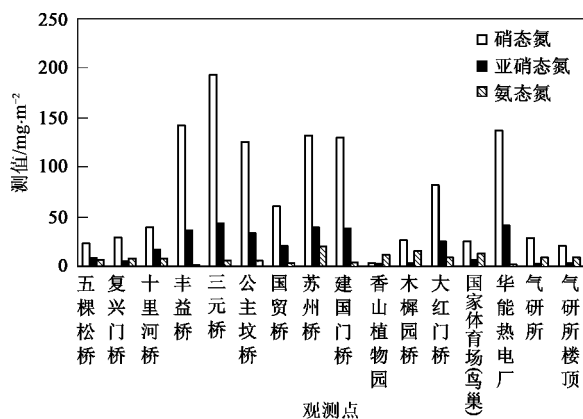


图3 北京市2009年6~9月大气氮沉降

Fig. 3 Atmospheric nitrogen deposition from June to September in 2009 in Beijing

表2 北京市2009年6~9月大气氮沉降特征值/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

Table 2 Eigenvalues of atmospheric nitrogen deposition from June to September in 2009 in Beijing / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$

项目	硝态 N	亚硝态 N	氨态 N
最大值	193.56	43.61	20.23
最小值	3.61	2.72	1.70
平均值	75.13	20.67	8.46
标准差	59.25	16.07	4.97

2.1.3 2个时段观测结果的总体分析与讨论

3~6月时段,北京市大气硝态氮沉降平均值为

$40.59\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,大气亚硝态氮沉降平均值为 $14.66\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.6~9月时段,北京市大气硝态氮沉降平均值为 $75.13\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$,大气亚硝态氮沉降平均值为 $20.67\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$.6~9月大气硝态氮沉降量要明显高于3~6月,前者大气硝态氮沉降量和亚硝态氮沉降量分别是后者的1.84倍和1.41倍.6~9月是北京市的主要降水期,显示大气硝态氮和亚硝态氮的湿沉降在总沉降中处于主导地位.

2个时段观测数据表明,大气硝态氮和亚硝态氮沉降在城市的各部位有较大差别.大气硝态氮沉降值标准差分别为 $38.86\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (3~6月)和 $59.25\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (6~9月).大气亚硝态氮沉降标准差分别为 $12.28\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (3~6月)和 $16.07\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$ (6~9月).数据的标准差较大表明数据的分散度较大,即大气硝态氮和亚硝态氮沉降量在城市的不同部位差别较大,反映了大气硝态氮和亚硝态氮沉降的线源和点源特征.

将2个时段的数据进行相关分析,大气硝态氮沉降与大气亚硝态氮沉降明显具有相关性,其线性相关系数为0.93.

2.1.4 机动车线源对大气硝态氮沉降的影响

机动车尾气是城市生态系统大气硝态氮污染的重要来源,通过本研究在北京市的实地观测,证明了这一点.在2个观测期间,除了华能热电厂观测点有大量的大气硝态氮沉降之外,大气硝态氮沉降量大的观测点基本上均为北京市机动车流量较大的交通路口,例如三元桥、苏州桥、丰益桥、国贸桥、建国门桥等处.北京城市气象研究所观测点尽管位于市区的较中心部位(西三环和西四环之间的北洼西里),但由于距主要交通干线有一定的距离,大气硝态氮的沉降量明显降低.反映了在城市生态系统中,大气硝态氮主要来源于机动车尾气排放,且大气硝态氮沉降具有明显的局部分异性.

为了进一步研究机动车线源对大气硝态氮沉降的影响,2009年3~6月的观测期间,在五棵松桥附近,设置了距西四环干道不同距离的观测.第1个观测点为紧靠西四环干道的路边,第2个观测点为距西四环干道22.7m,第3个观测点为距西四环干道45.4m,第4个观测点为距西四环干道76m.结果发现大气硝态氮和亚硝态氮沉降量随着距交通干线距离的加长,呈递减趋势(图4).

2.2 大气氨态氮沉降观测结果与讨论

2009年3~6月时段,大气氨态氮沉降最大值出现在北京城市气象研究所36m高的楼顶观测点

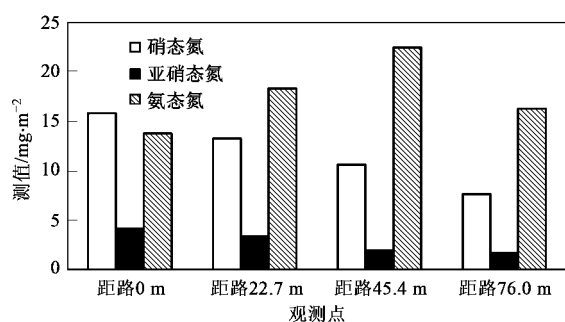


图4 距交通干道不同距离大气氮沉降变化

Fig. 4 Changes of atmospheric nitrogen deposition at different distances away from traffic artery

($21.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$), 最小值出现在苏州桥观测点 ($2.82 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$). 此段时间, 北京市大气氨态氮沉降平均值为 $12.19 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 标准差为 $5.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 数据的标准差较小表明, 各观测点间大气氨态氮沉降的差别要明显小于大气硝态氮沉降.

2009年6~9月时段, 大气氨态氮沉降最大值出现在苏州桥观测点 ($20.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$), 最小值出现在丰益桥观测点 ($1.70 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$). 此段时间, 北京市各观测点大气氨态氮沉降平均值为 $8.46 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 标准差为 $4.97 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 数据的标准差与3~6月时段相似, 明显小于大气硝态氮沉降数据的标准差.

上述2个观测时段中, 大气氨态氮沉降最大值出现在北京城市气象研究所36 m高的楼顶, 可能预示在城市环境中, 大气氨态氮在一定的高度比地表有更大的浓度. 对于这一问题还有待进一步的研究来验证.

北京市大气氨态氮沉降量在各观测点间差别较小, 且无明显的高值沉降点, 反映了城市环境大气氨态氮具有面源特征.

2.3 低空垂直方向大气氮沉降的变动

为了研究低空垂直方向大气氮沉降是否有变动, 在北京城市气象研究所观测点, 设置了2组观测, 其中一组的采样器安装在距地表3 m高处, 另一组采样器安装在36 m高的楼顶.

2.3.1 大气硝态氮和亚硝态氮沉降在低空垂直方向的变化

3~6月时段, 3 m高处观测点大气硝态氮沉降量为 $16.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 36 m高处为 $10.75 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 大气亚硝态氮沉降量3 m高处为 $3.68 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 36 m高处为 $3.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 6~9月时段, 3 m高处观测点大气硝态氮沉降量为 $28.86 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 36 m高处为 $21.16 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 大气亚硝态氮沉降量3 m高处为

$2.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 36 m高处为 $3.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$.

在上述2个观测时段, 大气硝态氮和亚硝态氮沉降量在3 m高处基本上要多于36 m高处, 仅在6~9月时段, 3 m高处观测点的亚硝态氮沉降量 ($2.72 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$) 稍低于36 m高处观测点的亚硝态氮沉降量 ($3.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$). 似乎表明大气硝态氮沉降量在低空有随高度增加而递减的趋势. 这一点也有待进一步的观测来验证.

2.3.2 大气氨态氮沉降在低空垂直方向的变动

3~6月时段, 3 m高处观测点大气氨态氮沉降量为 $11.64 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 36 m高处为 $21.99 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$; 6~9月时段, 3 m高处观测点大气氨态氮沉降量为 $8.95 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$, 36 m高处为 $9.29 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2}$. 与大气硝态氮沉降相反, 大气氨态氮沉降在2个观测时段36 m高处均要高于地表3 m高处. 显示出在低空, 大气氨态氮沉降量呈现出随高度的增加而增加的趋势. 城市大气氨态氮的来源主要是城市中各类有机物的分解, 此外周边农业地区产生的氨态氮外源性输入也是城市大气氨态氮的一个来源, 而外源性输入应是在一定高度随空气流动而输入的. 对于这一问题有待进一步的研究.

3 结论

(1) 使用“离子交换树脂柱法”对北京市区大气氮沉降进行了实地观测. 大气硝态氮和亚硝态氮沉降具有明显的局部分异性, 显示了城市生态系统中大气硝态氮和亚硝态氮的线源和点源特征. 大气硝态氮和亚硝态氮沉降量较大的城市部位主要是交通干线和热电厂周边区域, 表明在城市生态系统中大气硝态氮和亚硝态氮主要来源于机动车尾气和工业企业的排放. 大气硝态氮和亚硝态氮沉降有明显的相关性, 线性相关系数分别为0.87(3~6月)和0.97(6~9月).

(2) 大气氨态氮沉降在各观测点间的差别要明显小于大气硝态氮和亚硝态氮沉降, 表现为相对较均匀分布的态势, 显示了城市生态系统中大气氨态氮的面源特征.

(3) 大气硝态氮和亚硝态氮沉降量在城市低空, 有随高度增加而减少的趋势. 相反, 大气氨态氮沉降有随高度增加而增加的趋势. 对此, 有待进一步的观测研究来验证.

(4) 此次采用“离子交换树脂柱法”观测到的大气氮沉降是湿沉降和分子态干沉降的总和. 对于大气粒子态氮干沉降(不能在水介质中形成离子态),

及大气氮湿沉降和干沉降的区分,有待采用其他观测方法进一步研究。

参考文献:

- [1] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**: 238-253.
- [2] Holland E A, Dentene F J, Braswell B H, *et al.* Contemporary and pre-Industrial global reactive nitrogen budgets [J]. *Biogeochemistry*, 1999, **46**: 7- 43.
- [3] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world; 200 years of change [J]. *AMBIO*, 2002, **31**: 64-71.
- [4] Kochy M, Wilson S D. Nitrogen deposition and forest expansion in the northern great plains [J]. *J Ecol*, 2001, **89**: 80 7- 817.
- [5] Hall S J, Matson P A. Nitrogen oxide emissions after nitrogen additions in tropical forests [J]. *Nature*, 1999, **400**: 152- 155.
- [6] Nihlgard B. The ammonium hypothesis-an additional explanation to the forest dieback in Europe [J]. *Ambio*, 1985, **14**: 2-8.
- [7] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应 [J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(2): 205-218.
- [8] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制 [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2006, **32**(4): 395-402.
- [9] 薛景花, 莫江明, 李炯, 等. 氮沉降增加对土壤微生物的影响 [J]. *生态环境*, 2005, **14**(5): 772-782.
- [10] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响 [J]. *林业科学*, 2001, **37**(4): 111-116.
- [11] 梅雪英, 张修峰. 上海地区氮素湿沉降及其对农业生态系统的影响 [J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(1): 16-18.
- [12] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷. 中国主要湖泊营养氮沉降临界负荷的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2002, **24**(1): 54-58.
- [13] 张金霞, 曹广民. 高寒草甸生态系统氮素循环 [J]. *生态学报*, 1999, **19**(4): 509-513.
- [14] 陈能汪, 洪华生, 肖健, 等. 九龙江流域大气氮干沉降 [J]. *生态学报*, 2006, **26**(8): 2602-2607.
- [15] 王体健, 刘倩, 赵恒, 等. 江西红壤地区农田生态系统大气氮沉降通量的研究 [J]. *土壤学报*, 2008, **45**(2): 280-286.
- [16] 邓君俊, 王体健, 李树, 等. 南京郊区大气氮氧化物浓度和氮沉降通量的研究 [J]. *气象科学*, 2009, **29**(1): 25-30.
- [17] 王金南, 陈罕立. 中国大城市: 阻击氮氧化物污染迫在眉睫 [J]. *环境经济*, 2004, **7**: 16-21.
- [18] 郝吉明, 吴烨, 傅立新, 等. 北京市机动车污染分担率的研究 [J]. *环境科学*, 2001, **22**(5): 1-6.
- [19] 傅立新, 郝吉明, 何东全, 等. 北京市机动车污染物排放特征 [J]. *环境科学*, 2000, **21**(3): 68-70.
- [20] Binkley D, Matson P. Ion exchange resin bag method for assessing forest soil nitrogen availability [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1983, **47**: 1050-1052.
- [21] Gibson D J. Spatial and temporal heterogeneity in soil nutrient supply measured using in situ ion-exchange resin bags [J]. *Plant Soil*, 1986, **96**: 445-450.
- [22] 郁梦德, 莫江明, 孔国辉. 离子交换树脂袋法测定鼎湖山季风常绿阔叶林土壤有效氮的初步研究 [J]. *热带亚热带植物学报*, 1995, **3**(4): 44-48.
- [23] 莫江明, 郁梦德, 孔国辉. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究 [J]. *植物生态学报*, 1997, **21**(4): 335-341.
- [24] 方运霆, 莫江明, 周国逸. 离子交换树脂袋法研究森林土壤硝态氮及其对氮沉降增加的响应 [J]. *生态环境*, 2005, **14**(4): 483-487.
- [25] Fenn M E, Poth M A. Monitoring nitrogen deposition in throughfall using ion exchange resin columns-a field test in the San Bernardino Mountains [J]. *J Environ Qual*, 2004, **33**: 2007-2014.
- [26] 西条八束, 三田村緒佐武. 湖沼分析法 [M]. 東京: 株式会社講談社, 2002. 159-165.
- [27] GB 7481-1987, 水质——铵的测定——水杨酸分光光度法 [S].