

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.05.003

南京市典型区域城市湿沉降污染成分特征分析

白莹,阮晓红,李荣富,王琼,郑菲

(南京大学地球科学与工程学院水科学系,江苏南京 210093)

摘要:以南京市中心城区鼓楼区和城市郊区仙林地区为对象,对 2009 年 12 月至 2011 年 7 月每场降雨雨水进行水质监测和分析,研究城市湿沉降面源污染特征。结果显示:①研究区域雨水的主要污染成分为 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、TN 和 COD;②实验监测期内,鼓楼地区雨水中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、TN 和 COD 质量浓度均高于仙林地区雨水组分。其中, SO_4^{2-} 质量浓度平均值 62.79 mg/L,约是仙林地区平均值 16.11 mg/L 的 4 倍。③干湿周期对雨水水质影响显著。采集的雨水样本中,久未降雨后的首场雨水的 COD、 SO_4^{2-} 质量浓度值高于相对连续降水后的雨水相关组分,但 NO_3^- -N 质量浓度低于连续性降水后的雨水组分。

关键词:城市面源污染;湿沉降;水质监测;南京市

中图分类号:X52 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2013)05-0010-05

Contaminant properties analysis of wet precipitation in typical urban areas in Nanjing City

BAI Ying, RUAN Xiaohong, LI Rongfu, WANG Qiong, ZHENG Fei
(Department of Hydrosiences, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: In order to study the contaminant properties of wet precipitation in urban areas in Nanjing City, the chemical characteristics of rainwater were investigated from December 2009 to July 2011 at the Gulou campus and the Xianlin campus of Nanjing University, which are located in the downtown and suburban areas of Nanjing City, respectively. The results are as follows: (1) The main contaminant components of rainwater in the two study areas were SO_4^{2-} , NO_3^- -N, TN, COD. (2) During the monitoring period, the concentrations of SO_4^{2-} , COD, TN, and NO_3^- -N at the Gulou campus were higher than those at the Xianlin campus. The average concentration of SO_4^{2-} at the Gulou campus was 62.79 mg/L, four times that at the Xianlin campus, which had an average concentration of SO_4^{2-} of 16.11 mg/L. (3) The antecedent dry weather period had a remarkable effect on the rainwater quality. The concentrations of COD and SO_4^{2-} in the rainwater from the first rainfall event after a long interval without rain were higher than those from continuous rainfall, but the concentration of NO_3^- -N showed the opposite tendency.

Key words: urban non-point source pollution; wet precipitation; water quality monitoring; Nanjing City

1 研究背景

随着城市化进程的加快、人类活动影响强度的增加及其土地利用状况的改变,城市降雨酸雨频率、降雨强度及其地面汇流过程都发生了显著变化。城市降雨水质对城市径流水质有着重要影响^[1],城市径流所带来的面源污染也已成为城市水体的主要污染源^[2]。

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07317-007-02);国家大学生创新训练计划(XY091028417)
作者简介:白莹(1989—),女,硕士研究生,研究方向为水污染控制。E-mail:Betty163BYWZB2@163.com
通信作者:阮晓红,教授。E-mail:ruanxh@nju.edu.cn

目前,国内对城岛效应与城市湿沉降之间的关系有较多研究^[3-6]。王建鹏等^[7]对西安及其周边气象观测资料的分析发现,城市下垫面变化与城郊湿度差异和污染物浓度效应有着密切关系。马凤莲等^[8]采用趋势分析的统计方法,对比了承德市城区、郊区降水变化特征,研究下垫面变化对降水量的影响规律。但多数研究着重分析降雨量变化,而对雨水水质的地域性差异研究仍不充分。因此,系统地开展降雨动态污染的时空分布规律研究,分析城市降雨污染成分特征,对科学认识和有效控制城市雨水径流所带来的面源污染具有重要意义^[8-12]。

笔者通过监测分析,对南京市中心城区和城郊地区降雨的水质成分进行对比,同时观测降雨干湿周期对雨水水质的影响,分析降雨动态污染的时空分布规律,以期为城市环境水体的面源污染控制提供依据。

2 研究区域及样品采集

雨水观测站设于南京市中心的南京大学鼓楼校区和南京市郊的南京大学仙林校区(以下简称鼓楼校区监测点、仙林校区监测点),采样点设在南京大学鼓楼校区和仙林校区的学生宿舍天台上,分布位置见图1。鼓楼校区人口密度大,商业活动频繁,交通拥堵,城市下垫面以水泥柏油路面为主;仙林校区位于南京市东北郊,背倚钟山,距鼓楼校区18 km,周边多分布林业用地和生态环境安全控制区,人口密度小,地域开阔,植被丰富,下垫面以草甸、泥土为主。南京大学鼓楼校区和仙林校区分别位于南京市典型市中心和典型近郊地区,从人口密度、工农业用地分布及下垫面特征,都能充分反映南京市城区与郊区的特点,取其作为雨水采样点,具有充分的代表性。

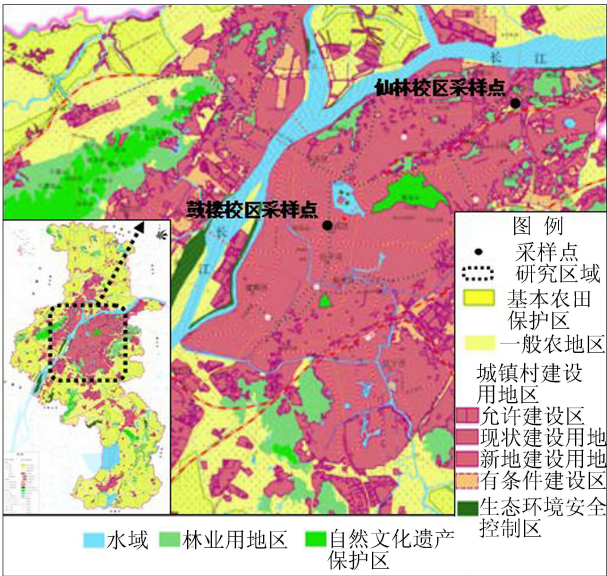


图1 雨水采样点分布

实验观测时间为2009年12月到2011年7月,分别对鼓楼校区和仙林校区的降雨进行同步采集和监测,共采集有效雨水样品18组。现场收集雨水、记录降雨历时,雨水样品各水质指标分析方法参照文献^[13],具体见表1。

表1 水质指标分析方法

分析项目	样品保存容器	样品保存方法	水质测定方法
pH		现场测定	玻璃电极法
COD	G	保存2 d	酸性法
TOC	G	加稀 H ₂ SO ₄ 至 pH<2,保存7 d	燃烧氧化-非分散红外吸收法
TN	P/G	加稀 H ₂ SO ₄ 至 pH<2,保存7 d	碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法
NH ₄ ⁺ -N	P/G	加稀 H ₂ SO ₄ 至 pH<2,保存24 d	纳氏试剂光度法
NO ₃ ⁻ -N	P/G	保存24 h	酚二磺酸光度法
NO ₂ ⁻ -N	P/G	保存24 h	N-(1-萘基)-乙二胺光度法
TP	P/G	加稀 H ₂ SO ₄ 至 pH<2,保存24 d	钼锑抗比色法
SO ₄ ²⁻	P	1 L 水样加 Zn (Ac) 22 mL	铬钡钼光度法

注: G 为玻璃容器,P 为聚乙烯容器。

3 数据分析

3.1 降雨主要污染成分特征分析

对18组雨水样本的水质进行主成分分析,统计分析指标包括:pH、COD、TOC、TN、TP、NH₄⁺-N、NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、SO₄²⁻,统计样本的主成分特征值及其贡献率见表2。

表2 雨水水质主成分分析

组分	贡献率		
	特征值	百分比/%	累计值/%
F1	4.402	48.914	48.914
F2	1.913	21.256	70.170
F3	0.936	10.400	80.570
F4	0.818	9.090	89.660
F5	0.431	4.789	94.449
F6	0.331	3.676	98.125
F7	0.144	1.595	99.719
F8	0.024	0.266	99.985
F9	0.001	0.015	100

雨水水质组分特征值大于1的影响因子有2个(F1、F2),累计反映原始数据总信息量的70.2%,确定为成分分析主因子。主因子与各水质指标相关系数见表3。由表3可知,SO₄²⁻、NO₃⁻-N、TN和COD位列第一主成分因子,pH和NO₂⁻-N位列第二主成分因子。鼓楼校区与仙林校区雨水水质组分的浓度差异也主要表现在第一主成分SO₄²⁻、NO₃⁻-N、TN和COD。

表 3 主因子与各水质指标的相关系数									
主因子	相关系数								
	pH	COD	TOC	TN	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	SO ₄ ²⁻
F1	0.595	0.839	0.347	0.849	0.373	-0.212	0.293	0.952	0.922
F2	0.599	-0.032	-0.878	0.449	0.114	-0.795	0.562	-0.082	0.297

3.2 研究区域降雨水质特征对比

3.2.1 硫酸盐浓度特征

鼓楼校区与仙林校区雨水样本中主要污染因子SO₄²⁻质量浓度变化特征见表4。对比两地雨水水质可以发现,鼓楼校区雨水中SO₄²⁻质量浓度高于仙林校区,变化幅度较大。鼓楼校区雨水中SO₄²⁻质量浓度平均值为62.79 mg/L,明显大于仙林地区的平均值16.11 mg/L,最高达到100 mg/L以上。

表 4 鼓楼、仙林雨水 SO₄²⁻质量浓度对比

监测 点位	监测 日期	ρ(SO ₄ ²⁻)/ (mg·L ⁻¹)	pH	监测 点位	监测 日期	ρ(SO ₄ ²⁻)/ (mg·L ⁻¹)	pH
鼓 楼	2009-12-06	118.87	7.99	仙 林	2009-12-06	7.02	6.78
	2010-03-03	57.34	7.63		2009-12-13	25.14	5.82
	2010-03-04	52.10	7.77		2010-03-03	13.98	6.64
	2010-03-05	105.83	7.72		2010-03-04	28.45	6.12
	2010-03-15	100.55	7.19		2010-03-23	10.71	6.34
	2010-03-23	30.34	7.64		2010-03-24	11.56	6.01
	2010-12-13	32.18	7.46		2010-03-31	13.04	5.87
	2011-07-12	34.09	7.53		2010-04-01	8.38	6.07
	2011-07-17	33.79	4.88		2010-12-13	25.47	7.35
					2011-07-12	34.63	7.44
					2011-07-17	100.90	5.82

鼓楼校区与仙林校区雨水样本中pH值的变化特征见表4。鼓楼校区雨水的pH值在7~8间波动,平均值为7.59;仙林地区雨水的pH值在4~7间波动,平均值为6.18。

SO₂和NO₂是降水中致酸离子的重要前体物,因而是降水酸度的主要贡献者^[9],其中SO₂对全球酸沉降的贡献率达60%~70%。从采样分析结果来看,南京仙林校区雨水pH值较鼓楼校区持续偏低,雨水酸性更大。据2009年环境报告,南京城区的酸雨发生频率为33.2%,远远小于郊区的50.1%,与本研究结果一致。但是仙林校区雨水硫酸盐浓度却比鼓楼校区雨水低,说明仙林地区湿沉降中主要致酸因子已不是SO₂。据2009年的气象报告及环境监测中心站10多年的跟踪研究显示^[9],江苏省的酸雨污染已从硫酸型向硝酸型转化,SO₂对南京市酸雨的贡献率有所下降。

有研究表明,雨水pH值受大气中的酸性气体总量与溶解于雨水中的矿物粉尘和固体颗粒物总量有关^[10]。大气中的酸性气体溶解于雨水中使雨水pH值降低,酸性气体含量越高,雨水pH值越低;而矿物粉尘和固体颗粒溶解量越多,雨水pH值越高。

另外,大气相对湿度大于90%时,大气中的碱性灰尘会加快气相和颗粒物中SO₂转化为SO₄²⁻的速率^[11]。鼓楼地区大气污染严重,大气中气溶胶等污染物含量远高于仙林地区,对空气中还原性物质有较强的吸附作用,同时空气中含有大量矿物粉尘和酸性气体,因而雨水中出现SO₄²⁻质量浓度较高、pH值偏高的反常现象。

另外,雨水pH值还与降雨背景、降雨持续时间、雨强、降雨云系等因素有关^[11],因此要进一步分析南京市区与郊区降雨酸度差异性原因,需要对相关信息进行综合分析。

3.2.2 含氮污染物浓度特征

仙林校区和鼓楼校区的雨水含氮污染物质量浓度对比分析结果见表5。

表 5 鼓楼、仙林雨水含氮污染物质量浓度及其百分含量对比

监测 点位	监测日期	NO ₃ ⁻ -N		NO ₂ ⁻ -N		NH ₃ -N	
		质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量 分数/%	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量 分数/%	质量浓度/ (mg·L ⁻¹)	质量 分数/%
鼓 楼	2009-12-06	7.07	60.27	2.85	24.30	1.81	15.43
	2010-03-03	2.39	71.41	0.04	1.32	0.91	27.27
	2010-03-04	1.96	52.43	0.06	1.48	1.72	46.09
	2010-03-05	6.87	88.11	0.06	0.82	0.86	11.06
	2010-03-15	5.52	83.09	0.17	2.58	0.95	14.33
	2010-03-23	3.64	75.51	0.06	1.31	1.12	23.18
	2010-12-13	0.09	6.41	0.02	1.71	1.29	91.88
	2011-07-12	0.01	0.58	0.26	27.02	0.68	72.40
	2011-07-17	0.13	35.16	0.00	0.73	0.25	64.11
仙 林	2009-12-06	0.69	18.82	0.02	0.63	2.95	80.55
	2010-03-03	0.48	29.16	0.02	1.01	1.15	69.83
	2010-03-04	0.31	27.65	0.01	0.89	0.80	71.46
	2010-03-23	0.96	23.41	0.03	0.65	3.11	75.94
	2010-03-24	0.56	25.19	0.02	0.69	1.64	74.12
	2010-03-31	1.20	41.08	0.02	0.80	1.70	58.12
	2010-12-13	0.10	10.64	0.01	1.06	0.83	88.30
	2011-07-12	0.13	28.73	0.00	0.57	0.31	70.70
	2011-07-17	0.51	62.12	0.00	0.25	0.31	37.63

仙林校区降雨中TN的质量浓度为3 mg/L左右,含氮污染物主要以氨氮和硝态氮形式存在,占总含氮量的80%以上。鼓楼地区雨水含氮污染物也是以氨氮和硝态氮形式为主,但硝态氮含量较仙林地区雨水相比更高,一般占总氮浓度的50%左右,表明鼓楼地区雨水经过了更长的氧化历程。

南京市从1998年开始,空气污染特征已经处于煤烟型污染向机动车尾气污染变化的转型期,机动车尾气污染增长迅速,酸雨中的氮氧化物所占的比例不断提高,酸雨结构正悄悄发生变化。文献[9]表明,鼓楼地区和仙林地区空气中氮氧化物较SO₂浓度均偏高,见表6。

表 6 2012 年 3 月 19 日南京市空气质量指标

站点名称	mg/m ³	
	$\rho(\text{SO}_2)$	$\rho(\text{NO}_2)$
草场门(鼓楼区)	0.028	0.043
山西路(鼓楼区)	0.034	0.047
仙林大学城	0.025	0.051

3.2.3 COD 质量浓度特征

鼓楼区雨水样本的 COD 质量浓度一般在 5 ~ 20 mg/L 之间,平均值为 9.38 mg/L;仙林校区雨水样本的 COD 质量浓度平均值为 3.25 mg/L,具体见表 7。

表 7 鼓楼、仙林雨水 COD 质量浓度对比

监测 点位	监测日期	$\rho(\text{COD})/$ (mg · L ⁻¹)	监测 点位	监测日期	$\rho(\text{COD})/$ (mg · L ⁻¹)
鼓 楼	2009-12-06	10.21	仙 林	2009-12-06	5.46
	2010-03-03	12.71		2009-12-13	6.31
	2010-03-04	16.29		2010-03-03	7.02
	2010-03-05	7.73		2010-03-04	3.64
	2010-03-15	7.70		2010-03-23	1.26
	2010-03-23	3.64		2010-03-24	1.02
	2010-12-13	14.72		2010-03-31	3.24
	2011-07-12	2.02		2010-04-01	2.59
				2010-12-13	22.88
				2011-07-12	2.11

从对比结果来看,鼓楼区雨水 COD 质量浓度较仙林校区雨水偏高,而且波动范围更大,说明鼓楼地区雨水有机物含量高。南京地区大气颗粒物中的有机物主要来自燃煤、交通排放、矿物燃料残留物排放和焚烧。相关研究表明,由于鼓楼地处市中心,交通流量大,汽车尾气排放量高,市区大气中气溶胶 PM_{2.5} 含量高出郊区 4 倍^[12],这解释了鼓楼校区雨水水质与仙林雨水水质差异的原因。

3.2.4 仙林校区与鼓楼校区雨水水质综合对比

对鼓楼区观测站及仙林校区观测站采集的 18 组雨水样本的监测指标进行浓度对比分析,各项监测指标平均值对比结果如图 2 所示。

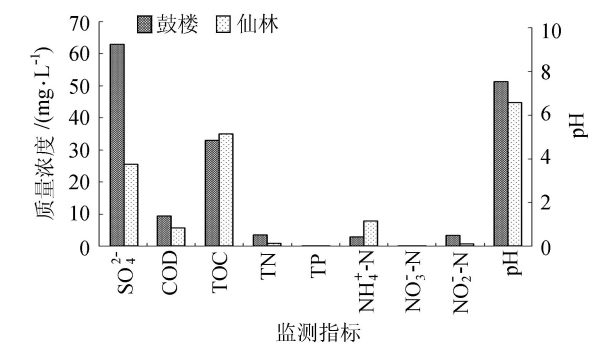


图 2 鼓楼校区、仙林校区雨水水质综合对比

分析表明,鼓楼区雨水样本的主成分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- -N、TN 和 COD 质量浓度均高于仙林校区雨水

样本相关物质质量浓度。其中, SO_4^{2-} 质量浓度高达 60 mg/L 以上,远高于仙林校区的 16.11 mg/L。仙林校区雨水样本的 TOC 质量浓度略高于鼓楼校区雨水样本相关物质质量浓度。

3.3 干湿周期对降雨水质的影响

以鼓楼地区为例,久未降雨与连续降雨后的雨水水质各项监测指标对比分析见表 8。其中,久未降雨后雨水的 COD、 SO_4^{2-} 质量浓度值要远高于连续降雨后的。同时,COD 与 NO_3^- -N 质量浓度相关性较好,COD 浓度高的水体其 NO_3^- -N 浓度却相对较低,体现了雨水中含氮污染物的氧化过程。

表 8 不同降雨间隔时间雨水水质对比

间隔期	pH	$\rho(\text{COD})/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{NO}_3^-)\text{-N}/$ (mg · L ⁻¹)	$\rho(\text{SO}_4^{2-})/$ (mg · L ⁻¹)
连续降雨	7.64	3.64	0.52	30.34
久未降雨	7.46	14.72	0.09	32.18

不同降雨时间间隔下的鼓楼、仙林两地雨水中 SO_4^{2-} 质量浓度对比见图 3。分析表明,久未降雨后的鼓楼校区和仙林校区中雨水 SO_4^{2-} 质量浓度均高于连续降雨后的。有关研究指出,城市大气明显富含尘埃和 SO_2 等气体, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 类的物质较多^[14],降雨形成过程中聚集了大气中一部分酸性气体和固体颗粒,其降雨过程也对大气进行了冲刷,这解释了连续降雨后雨水中的 SO_4^{2-} 质量浓度低于久未降雨后初次降雨时的雨水相关物质浓度的成因。

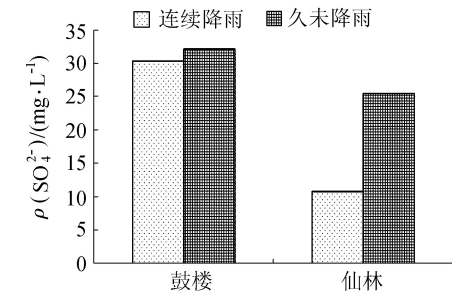


图 3 不同降雨间隔时间下鼓楼、仙林雨水中硫酸盐质量浓度对比

4 结果与讨论

a. 影响研究区雨水水质的主成分为 SO_4^{2-} 、COD 和 NO_3^- -N,pH、 NO_2^- -N 对雨水水质的影响次之。

b. 鼓楼校区雨水时期的 SO_4^{2-} 质量浓度偏高, SO_4^{2-} 质量浓度平均值为 62.79 mg/L,明显大于仙林地区的平均值 16.11 mg/L。但是仙林校区雨水酸度高,爆发酸雨的频次大于鼓楼校区。酸雨的形成除酸性气体 SO_2 和 NO_2 外,颗粒物对雨水酸化程度也有一定影响,其中所含的催化金属促使酸性气体氧化成酸。另一方面,碱性颗粒物可对酸起一定的中

合作用,大气中一些颗粒物会对雨水酸度进行缓冲^[13]。鼓楼校区所在地区由于城市建设、机动车辆尾气排放造成的大气污染严重,空气中气溶胶等污染物含量远高于仙林地区,对空气中还原性物质有较强的吸附作用。另外市中心空气中大量的碱性土壤颗粒和烟尘颗粒可很好地中和缓冲了降水酸度,使得鼓楼地区雨水酸度低于仙林地区雨水酸度。

c. 鼓楼雨水氮污染物主要以 NO_3^- -N 形式存在,雨水中 NO_3^- -N 质量浓度高于仙林雨水相关物质浓度。这是由于位于南京市中心的鼓楼地区交通网密集,机动车尾气排放增长迅速,尾气中氮氧化物排入大气,参与降雨过程,使得雨水中的氮氧化物所占比例有所提高。

d. 干湿周期对雨水水质影响显著。检测结果显示:久未降雨后的鼓楼、仙林两地初场雨水中的 COD 、 SO_4^{2-} 质量浓度值均高于连续性降雨时期,这是由于久未降雨后大气中聚集的悬浮颗粒以及酸性气体浓度较大,对降水水质的影响结果。但 NO_3^- -N 浓度却略低于连续性降雨的,相关文献表明降雨干湿周期对雨水的氧化环境没有显著影响,而雨水中的 NO_3^- -N 主要是由 NH_4^+ -N 转化而来,因此 NO_3^- -N 浓度变化不大。

参考文献:

[1] 陈炬锋,刘磊磊. 雨水水质研究进展[J]. 安徽农业科学,2007,35(7):2045-2046. (CHEN Jufeng,LIU Leilei. Progress of rainwater quality [J]. Journal of Anhui Agricultural,2007,35(7):2045-2046. (in Chinese))

[2] 李立青,尹澄清,孔玲莉,等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响[J]. 环境科学,2007,28(10):2287-2293. (LI Liqing, YIN Chengqing, KONG Lingli, et al. Effect of antecedent dry weather period on urban storm runoff pollution load [J]. Environmental Science,2007,28(10):2287-2293. (in Chinese))

[3] 黄金良,涂振顺,杜鹏飞,等. 城市绿地降雨径流污染特征对比研究:以澳门与厦门为例[J]. 环境科学,2009,30(12):3514-3521. (HUANG Jinliang, TU Zhenshun, DU Pengfei, et al. Comparative study on characteristics of urban rainfall runoff from two urban lawn catchments in Macau and Xiamen [J]. Environmental Science,2009,30(12):3514-3521. (in Chinese))

[4] 张富国,姚华栋,张华林,等. 北京城区的雨岛、湿岛与干岛特征分析[J]. 气象,1994,17(2):43-46. (ZHANG Fuguo, YAO Huadong, ZANG Hualin, et al. Characteristics analysis of rain island, dry island and wet island in Beijing [J]. Meteorological Monthly, 1994, 17 (2) : 43-46. (in Chinese))

[5] 车伍,刘燕,李俊奇. 国内外城市雨水水质及污染控制[J]. 给水排水,2003,129(110):38-42. (CHE Wu, LIU Yan, LI Junqi. Rainwater quality and pollution control in

city [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 129 (110) : 38-42. (in Chinese))

[6] 殷健,梁珊珊. 城市化对上海市区域降水的影响[J]. 水文,2010,30(2):66-72. (YIN Jian, LIANG Shanshan. Influence of urbanization on regional precipitation in Shanghai City [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30 (2) : 66-72. (in Chinese))

[7] 王建鹏,孙继松,张弘. 关中盆地中西安城市热岛效应对冬夏季降水的影响研究[C]//第七届全国优秀青年气象科技工作者学术研讨会论文集. 宜昌:中国气象局,中国气象学会,2010.

[8] 马凤莲,孙庆川,蔡丽娜,等. 承德市城市化对降水变化的可能性影响分析[J]. 四川师范大学学报:自然科学版,2010,33(2):251-256. (MA Fenglian, SUN Qingchuan, CAI Lina, et al. The probable influence of urbanization on variation of rainfall in Chengde City [J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science, , 2010, 33 (2) : 251-256. (in Chinese))

[9] 梁骏,郑有飞,唐信英,等. 南京江北酸雨分布特征及其与气象条件的关系[J]. 环境科学与技术,2009,32(6):96-100. (LIANG Jun, ZHENG Youfei, TANG Xinying, et al. Distribution characteristics of acid rain and its relation with meteorological conditions in north bank of Yangtze River in Nanjing [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32 (6) : 96-100. (in Chinese))

[10] 陈福,朱笑青. 贵阳地区降雨过程中雨水酸度变化初探[J]. 地质地球化学,1986,2(1):57-60. (CHEN Fu, ZHU Xiaoqing. Exploring of pH changing throughout the rian in Guiyang area [J]. Geology-Geochemistry, 1986, 2 (1) : 57-60. (in Chinese))

[11] 迪丽努尔·塔力甫,阿布力克木·阿布力孜,普宗朝. 乌鲁木齐市南山地区雾水总离子变化规律及常量阴离子化学表征的研究[J]. 新疆大学学报:自然科学版,2008,25(3):330-333. (Dilynur Talip, Ablikim Ablimit, PU Zongchao. The chemical character of fog water at Nanshan in Urumqi [J]. Journal of Xinjiang University: Natural Science Edition, 2008, 25 (3) : 330-333. (in Chinese))

[12] 顾凯华,樊曙先,黄红丽,等. 南京冬季雾天颗粒物中 PAHs 分布与气象条件的关系[J]. 中国环境科学,2011,31(8):1233-1240. (GU Kaihua, FAN Shuxian, HUANG Hongli, et al. Characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in particles and the influence of foggy weather conditions during the winter in Nanjing [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (8) : 1233-1240. (in Chinese))

[13] 国家环保总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京:中国环境科学出版社,2002.

[14] 周建康,黄红虎,唐运忆,等. 城市化对南京市区域降水量变化的影响[J]. 长江科学院院报,2003,20(4):44-46. (ZHOU Jiankang, HUANG Honghu, TANG Yunyi, et al. Influence of urbanization on regional precipitation of Nanjing City [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2003, 20 (4) : 44-46. (in Chinese))

(收稿日期:2012-11-24 编辑:高渭文)