

城市降水中重金属污染特征研究进展

王书敏¹, 马月华¹, 刘政², 韩凤¹, 马俊平¹, 李强¹

(1. 重庆文理学院 环境材料与修复技术重庆市重点实验室, 重庆 402160; 2. 重庆市南岸区环境监测站, 重庆 400060)

摘要: 根据国内外最近几年的研究情况, 从城市降水重金属浓度、重金属赋存形态、重金属浓度影响因素等方面详细介绍了关于城市降水重金属污染的研究现状。现有研究表明, 城市降水重金属含量时空差异明显, 降水 pH、人为因素、气象因素、季节因素等均会对城市降水的重金属浓度水平产生影响。今后, 建立重金属含量与影响因子的映射关系将是城市降水重金属污染研究的一个重要方向。

关键词: 城市降水; 重金属; 浓度; 影响因素; 赋存形态

中图分类号: X522 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0279-05

Research progress of heavy metal pollution characteristic in urban rainfall

WANG Shu min¹, MA Yue hua¹, LIU Zheng², HAN Feng¹, MA Jun ping¹, LI Qiang¹

(1. Key Laboratory of Water Environmental Restoration, Chongqing University of Arts and Sciences,

Chongqing 402160, China; 2. Environmental Monitoring Station of Nan'an District, Chongqing 400060, China)

Abstract: The research progress of heavy metal pollution in urban rainfall was introduced from the aspects of heavy metal concentrations, chemical forms, and impact factors of concentrations. The results suggested that heavy concentration in urban rainfall has significantly spatial and temporal variations, and rainfall pH, human activities, meteorological factors, and seasonal factors can affect the heavy metal concentration. The relationship between heavy metal concentration and impact factors is an important research topic for heavy metal pollution in urban rainfall in future.

Key words: urban rainfall; heavy metal; concentration; impact factor; chemical form

随着城市化进程的快速推进, 城市面源污染对水环境的影响日益凸显, 逐渐成为城市接纳水体污染的重要来源^[1]。降水是城市面源污染发生的驱动力, 其水质状况反映了城市面源污染的本底水平。有研究表明, 降水是城市水体重金属污染的主要来源之一^[2]。降水作为地壳水文循环过程中的一个重要环节, 是地壳层物质循环、能量流动和信息传递的重要载体, 也是重金属迁移转化的重要途径。重金属因其高毒性、高致癌性、污染长期性、易生物富集性等原因, 很容易对生物圈和人体健康造成不可逆威胁^[3]。因此, 降水中的重金属污染特征研究是接纳水体水质保障的必要前提。同时, 降水重金属含量水平与周围环境质量状况密切相关, 降水的随机性使降水重金属浓度呈现出诸多不确定性^[4]。论文综述了近几年关于城市降水重金属的研究成果, 旨在了解城市降水重金属浓度及其赋存形态的时空差异特性, 明晰城市降

水重金属含量的主要影响因素。

1 城市降水重金属监测发展历程

城市降水重金属污染作为很重要的非点源污染之一, 欧洲^[5-6]、北美洲^[7]、亚洲^[26-36]等许多国家都相继开展了降水重金属的监测和研究工作, 如 EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme)、Helsinki Commission (Baltic Marine Environment Protection Commission)、AMAP (Arctic Monitoring and Assessment Program) 等^[5]。在国外, 早在 1988 年, EMEP 的部分监测点开始逐步监测降水重金属浓度; 1995 年, 美国建立了大气中重金属 Hg 沉降的 MDN 监测网; 1999 年, 重金属的监测被列入到统一规范中, Pb、Hg、Cd、Cr、Ni、Zn、Cu 和 As 被列为 8 种优先检测重金属。除了上述监测网在大区域对重金属的监测外, 还有一些关于特定

收稿日期: 2014-04-12 修回日期: 2014-10-13 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1408.001.html>

基金项目: 重庆市科委项目 (cstc2014jcyjA20022); 重庆市教委科技项目 (KJ1401120; KJ121214); 重庆文理学院资助课题 (Z2013CH03; Y2013T556); 大学生创新创业训练计划项目 (201310642005)

作者简介: 王书敏 (1980-), 男, 山东泰安人, 副教授, 博士, 主要从事城市面源污染监控及水环境安全保障方面研究。E-mail: wangshurmin5103@sina.com

通讯作者: 李强 (1973-), 男, 重庆人, 教授, 博士, 主要从事水环境生态修复研究。E-mail: lq1973_2002@163.com

地区重金属污染的研究。Bard(1999)通过分析重金属沉降通量发现大气输送是北极地区许多难降解污染物的重要来源^[8];Azimi等人(2005)研究了法国巴黎地区降水中重金属的时间变化特征^[9];Sakata等人(2006)对日本 10 个站点观测资料的研究表明 Hg 的湿沉降量大于干沉降量^[10]。

我国降水重金属污染研究历史较短,目前还处于发展阶段。中国科学院地质研究所和香港理工大学于 2001 年-2002 年探究了我国珠江三角洲降水重金属来源和季节分布特征^[11]。丛源等(2008)采用被动方式分析了北京市干、湿沉降样品中重金属元素的年沉降通量^[12]。成都、贵阳、焦作、唐山、长春、上海、西安、泰山、台湾、西藏、鄱阳湖流域、太湖流域等地方先后开展了降水重金属相关研究工作,研究内容包括降水重金属污染源解析,以及污染物的污染特征、时空分布及其影响因素分析,为大气、水、土壤的重金属污染评

价、控制与治理提供了有力的理论依据。

2 城市降水中重金属浓度分析

国内外部分城市降水重金属浓度的研究结果见表 1、表 2,可以看出,降水重金属浓度空间分布特征明显且具有区域差异性^[30-32]。Al、Fe、Mn 的浓度在土耳其梅尔辛市降水中已偏高^[16],而伊斯坦布尔降水中 Fe、Al、Cu 的浓度则分别是梅尔辛的约 4 倍、16 倍、368 倍^[18];发达国家降水重金属浓度普遍较低,如日本、美国、法国等。在国内,降水重金属浓度同样存在空间分布不均匀的现象。西藏降水总汞浓度低于空气污染严重的中国东部的北京和长春等大都市^[37];上海和唐山取样时间段相似,但唐山降水重金属浓度比上海高许多,如 Fe 浓度高了近 8 倍;同时段的西安降水重金属浓度明显高于永寿。

表 1 国外降水重金属含量研究情况

Tab. 1 Research development of heavy metal concentration in urban rainfall in the world

地点	采样时段(年-月)	样点 / 个	样品 / 个	重金属含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)									
				Fe	Al	Mn	Pb	Zn	Cu	Ni	As	Cd	Cr
墨西哥 ^[13]	2001-5-2002-10	1	81	-	50.7	9.64	2.48	-	-	3.37	-	0.41	0.52
美国(纽瓦克) ^[14]	2006-9-2007-10	1	46	4.57	6.09	-	0.39	4.86	1.15	0.45	-	0.02	-
美国(华盛顿) ^[15]	2006-1-2007-1	1	-	-	-	-	0.89	-	-	-	0.35	0.59	0.8
土耳其(梅尔辛) ^[16]	2003-12-2005-5	4	252	743.2	484.5	19.03	11.36	50.2	3.94	7.23	-	0.81	5.72
土耳其(伊兹密尔) ^[17]	2003-10-2004-6	1	13	-	-	-	7.0	186.4	19.7	7.4	-	3.1	17.2
土耳其(伊斯坦布尔) ^[18]	2007-10-2008-5	1	43	2750	7660	-	1.47	-	1450	0.77	-	-	0.58
约旦北部 ^[19]	1998-12-2000-4	1	63	92	382	2.11	2.57	6.52	3.08	2.62	-	0.42	0.77
法国 ^[20]	2010-10-2012-3	1	-	-	-	-	0.198	5.4	-	0.60	-	0.02	-
日本 ^[21]	2002-12-2006-3	3	-	-	-	3.1	2.9	-	1.3	0.46	0.38	0.10	0.17
日本(冲绳岛) ^[22]	2001-10-2002-9	3	-	2.36	2.71	2.01	-	9.25	1.29	-	-	-	-
希腊(凯法利尼亚岛) ^[23]	2002-2005	1	156	11	-	1.0	2.0	10	2.5	10	-	0.05	1.3
韩国 ^[24]	2006-8-2009-7	1	87	-	13.85	3.23	1.51	9.90	1.73	0.52	0.38	0.07	-
西班牙 ^[25]	2006-9-2009-1	1	67	2.87	2.4	1.1	0.14	12.0	1.0	0.8	0.13	0.05	0.2

注: a:“-”为未分析; b: 加权平均浓度

表 2 国内降水重金属含量研究情况

Tab. 2 Research development of heavy metal concentration in urban rainfall in China

地点	采样时段(年-月)	样点 / 个	样品 / 个	重金属含量/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)									
				Fe	Al	Mn	Pb	Zn	Cu	Ni	As	Cd	Cr
成都 ^[26]	2008-1-2008-12	1	44	43.31	32.42	31.30	9.72	9.86	1.79	0.13-1.05	0.24-4.03	0.05-0.9	0.22-3.69
贵阳 ^[27]	2003-9-2004-10	1	84	18.8	13.6	33.7	45.8	420	4.5	-	-	-	-
焦作 ^[28]	2008-4-2008-6	1	17	380	-	67.06	-	37.06	97.65	-	-	-	-
鄱阳湖流域 ^[29]	2010-1-2010-12	18	18	142.65	-	-	9.53	33.73	11.32	-	-	1.55	9.09
太湖流域 ^[30]	2009-8-2010-4	10	-	-	-	26.90	6.36	79.54	-	5.12	-	0.26	1.74
泰山山上 ^[31]	2006-1-2006-12	1	34	29.36	18.87	10.11	8.04	92.94	2.74	0.82	1.72	0.52	-
泰山山下 ^[31]	2006-1-2006-12	1	34	10.75	17.92	11.84	7.79	70.41	8.12	1.50	1.58	0.74	-
长春 ^[32]	2006-8-2007-7	3	12	-	-	-	21.71	148.6	9.25	-	18.44	0.993	3.59
上海 ^[33]	2009-6-2010-8	1	122	38.38	69.75	11.57	11.10	58.16	4.28	1.83	-	0.38	-
唐山 ^[34]	2009-12-2010-11	1	35	291.0	247.7	21.8	18.3	88.7	5.4	1.4	1.4	0.3	1.0
台湾 ^[35]	2004-6-2004-9	1	20	-	13.8	9.94	17.10	64.2	993	7.24	1.05	-	0.40
永寿 ^[36]	2007-1-2008-1	1	-	18.39	18.57	8.59	7.74	23.02	1.91	1.76	1.35	0.65	1.38
西安 ^[36]	2007-1-2008-1	1	-	30.69	50.65	11.08	12.61	60.99	2.91	2.16	1.93	0.89	1.28

注: a:“-”表示未分析; b: 为加权平均浓度。

3 降水重金属赋存形态

重金属的赋存形态决定了其在水体中的迁移转化规律、

毒性大小以及环境毒理效应^[17]。降水重金属的形态大体可分为溶解态和颗粒态两种,两种形态重金属浓度均有时空变化现象,即使是同一地区降水,各重金属溶解态和颗粒态的

浓度差异也较大^[13]。由于稀释效应溶解态重金属浓度随降水量增加呈现稳步减少的双曲线关系^[19], 空气中的粗颗粒随首场降水落下, 此后短时间内重金属浓度值会降低。以汞为例, 加拿大多伦多大气降水中总汞的浓度要比甲基汞高得多^[41]; 西藏拉萨非季风季节的总汞和颗粒态汞浓度明显高出季风季节, 而溶解态汞浓度则相反^[37]。墨西哥降水重金属中以颗粒态和溶解态铝的加权平均浓度最高, 在其余颗粒态重金属中, $Mn > Pb > Ni > V > Cd > Cr$, 而溶解态重金属中, $Mn > V > Ni > Pb > Cd > Cr$ ^[13]。

4 降水重金属浓度影响因素

分析降水重金属浓度影响因素有助于进一步追溯重金属来源, 为重金属防治与评估提供理论依据。降水重金属浓度受自然因素、人为因素、pH 值、空气质量等的综合影响。

4.1 pH 值

降水 pH 值对重金属溶解度有直接影响, 且降水重金属含量与 pH 值呈正相关性^[28] 或负相关性^[25-27]。pH 值受降水持续时间、季节^[32]、燃煤量、交通量^[26-27] 等影响。同等条件下 pH 呈酸性且 pH 值越低重金属浓度越高, 相反, pH 呈碱性且 pH 值越高重金属浓度越低。例如日本^[22]、泰山^[31] 的酸性降水使重金属浓度增高^[31]; 日本冲绳岛在冬季具有相对低的 pH 值, 重金属浓度 $Zn > Al > Fe > Mn > Cu$, 其与降水 pH 值、监测点位置、风速和方向等因素有关^[22]; 梅尔辛的碱性降水, 使得 Al、Fe、Mn 和 Ni 的溶解度低于在世界平均水平^[19]。

4.2 人为因素

降水重金属分为自然源和人为源, 可利用富集因子法、聚类分析法、气团轨迹法、主成分分析法等分析自然源和人为来源对雨水重金属浓度的贡献率^[13-16, 38], 也可根据不同重金属浓度之间的相关性来推断重金属来源的异同^[15, 17, 22, 24]。采用因子分析^[34, 36]、SPSS17.0 软件^[29] 对降水重金属相关性进行溯源分析, 结果表明大多数城市降水重金属主要来自人为源^[15-16, 24, 25], 主要有冶金企业烟气粉尘^[33-34, 39]、土壤尘^[33, 22]、建筑工地^[39]、扬尘^[34, 39] 等, 而少数重金属来自自然源^[19]。

城市降水重金属人为来源非常广泛, 涉及有化石燃料燃烧、汽车尾气、工业废气、冶金烟尘、燃煤发电、粉尘等。约旦北部降水重金属来源有道路交通排放、燃烧产物和二次气溶胶^[19]; 日本冲绳岛降水中 Al 和 Fe 来源于道路交通^[22]; 梅尔辛降水中 Ca、Fe、Al、Mn 来源于气溶胶^[16]; 西班牙则来自城市交通^[25]。上海市降水中 Fe、Al 和 Pb 主要来自于工业活动的直接排放或者燃煤排放^[33]; 鄱阳湖流域人为源重金属主要来源于冶金企业烟气粉尘、土壤尘、建筑工地、局地扬尘、矿业开采、化石燃料燃烧和汽车尾气等^[29], 即降水重金属主要来源于第二产业和第三产业。

4.3 季节因素

冬春季节大气层稳定、污染物扩散能力较差; 夏季空气上下对流旺盛、降水频繁、降水量大, 大气污染物容易扩散稀释, 降水过后清除作用明显。受此影响, 城市降水重金属浓度的季节差异突出^[23, 24, 41], 表现为秋冬季高、春夏季

低^[30, 36, 39] 或冬春季高、夏秋季低^[31, 34] 的特点。此外, 也有城市的冬季雨水重金属浓度较高其他季节较低^[21, 41] 或夏季低春冬季高^[24]。根据太湖流域重金属湿沉降率随四季更替的变化情况(见图 1)可知, 不同重金属浓度变化趋势各异, 湿沉降中重金属浓度季节变化存在显著差异。在贵阳市大气降水中, 冬春季的 Zn 重金属含量明显高于夏秋季, 约 17 倍, 而 Sr 的浓度冬春季是夏秋季的 2 倍, 说明重金属浓度受季节因素影响显著^[27]。美国华盛顿降水重金属中 As 的浓度的峰值在夏季, 最小值在初秋, 而 Cd 的峰值在秋季^[19]。然而, 也有研究指出法国^[20]、加州蒙特利湾^[42] 雨水中微量重金属浓度与季节变化无关。

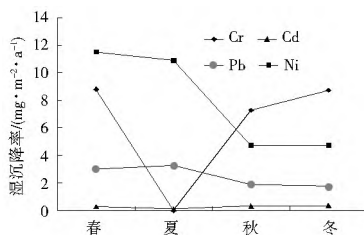


图 1 太湖流域重金属湿沉降率变化^[30]

Fig. 1 Variation of wet deposition rates of heavy metals in the Taihu Lake

4.4 气象因素

降水重金属含量还受气温^[32]、相对湿度^[32]、降水持续时间、降水量^[36-37, 40]、风速风向^[32, 36]、降水时间间隔等气象因素影响。胡建等对贵阳市降水重金属含量进行测定, 发现, 1月、9月、10月、12月份的重金属浓度高于其余月份的数倍^[27] (图 2)。而在西安, 冬季的西北风盛行, 市区处于西郊发电厂的下风向, 同时逆温天气的频频发生又限制了污染物的扩散, 西安冬季降水中各重金属含量比永寿高出近 1 倍, 可见降水量和风力条件也可引起痕量金属含量的季节性变化^[36]。另一方面, 特殊气象因素也会影响降水重金属浓度, 如台风可以造成降水重金属浓度偏高^[35]。

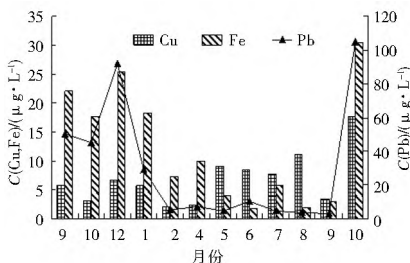


图 2 贵阳市雨水的重金属浓度变化^[27]

Fig. 2 Variation of heavy metal concentrations in rainfall of Guiyang

4.5 大气跨区域传输

大气圈是一个整体, 区域环境差异使降水重金属浓度易受大气圈跨区域传输的影响^[19]。Uygur 等(2010)运用功能模型 PSCF 分析发现伊斯坦布尔降水重金属是从欧洲、俄罗斯、地中海国家、土耳其西部地区的工业区, 通过远距离输送而来的^[19]。日本则将气溶胶中 Pb 和 Zn 的浓度比作为亚洲大陆远距离运输物质的评价指标^[21], 且日本冲绳岛降水重金属浓度受亚洲大陆气团输送的影响显著^[22]。在冬春季节, 源自西北的矿物气溶胶会携带较多的地壳元素, 从而造

成唐山降水中重金属浓度的增加^[34]。

5 展望

降水的重金属含量水平对于受纳水体的水质保障具有重大影响, 尽管针对城市降水重金属浓度已有部分研究, 也对降水重金属含量的影响因素、污染源等进行了分析, 但这些研究基本是在局部区域针对降水重金属含量进行的监测研究。降水重金属含量影响因素众多, 还需要加强局部区域长时间跨度的场次降水研究, 最终形成降水重金属含量水平与环境条件的响应、预测模型, 为城市水环境管理提供依据。

降水重金属含量水平的空间分异性明显。一方面需要加强场次降水历程中重金属浓度的变化规律, 明确其时间分布特征; 另一方面需要借助 GIS 等空间信息管理平台, 健全网络监测布点, 加强大区域降水重金属浓度研究, 借以明确降水重金属浓度空间差异的耦合关联, 为跨区域环境管理提供理论依据。

参考文献 (References):

- [1] Wang S M, He Q, Ai H N, et al. Pollutant concentrations and pollution loads in stormwater runoff from different landuses in Chongqing[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(3): 502-510.
- [2] Sabina L D, Lim J H, Stolzenbach K D, et al. Contribution of trace metals from atmospheric deposition to stormwater runoff in a small impervious urban catchment[J]. Water Research, 2005, 39: 3929-3937.
- [3] 王灿, 陈吉宁, 邹骥. 基于 CGE 模型的 CO₂ 减排对中国经济的影响[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(12): 1621-1624. (WANG Can, CHEN Jining, ZOU Ji. Impact assessment of CO₂ mitigation on China economy based on a CGE model[J]. J Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2005, 45(12): 1621-1624. (in Chinese))
- [4] 李立青, 尹澄清, 何庆慈, 等. 城市降雨径流的污染来源与排放特征研究进展[J]. 水科学进展, 2006, 17(2): 288-293. (LI Liqing, YIN Chengqing, HE Qingci, et al. Progress in research on the sources and characterization of urban rainfall runoff[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(2): 288-293. (in Chinese))
- [5] Aas W, Breivik K. Heavy metals POPs measurements, 2003 (EMEP/CCG Report9/2005) [EB/OL]. http://www.nilu.no/projects/ccr/reports/cccr9_2005_07 (2013-01-15).
- [6] Massei A M, Ollivon D, Tiphagne K, et al. Atmospheric bulk deposition of trace metals to the Seine River basin, France: concentrations, sources and evolution from 1988 to 2001 in Paris[J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, 164: 119-135.
- [7] Garc3a R, Ma T C, Padilla H, et al. Measurement of chemical elements in rain from Rancho Viejo, a rural wooded area in the State of Mexico, Mexico[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(32): 645-651.
- [8] Bard S M. Global transport of anthropogenic contaminants and the consequences for the arctic marine ecosystem[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(5): 356-379.
- [9] Azimi S, Rocher V, Garnaud S, et al. Decrease of atmospheric deposition of heavy metals in an urban area from 1994 to 2002 (Paris, France) [J]. Chemosphere, 2005, 61(5): 645-651.
- [10] Sakata M, Marumoto K, Narukawa M, et al. Regional variations in wet and dry deposition fluxes of trace elements in Japan[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(3): 521-531.
- [11] Wong C S C, Li X D, Zhang G, et al. Atmospheric deposition of heavy metals in the Pearl River Delta, China[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37(6): 767-776.
- [12] 丛源, 陈岳龙, 杨忠芳, 等. 北京平原区元素的大气干湿沉降通量[J]. 地质通报, 2008, 27(2): 257-264. (CONG Yuan, CHEN Yue long, YANG Zhongfang, et al. Dry and wet atmospheric deposition fluxes of elements in the Plain area of Beijing Municipality, China[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(2): 257-264. (in Chinese))
- [13] Bez A, Belmont R, Garcia R, et al. Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico[J]. Atmospheric Research, 2007, 86(1): 61-75.
- [14] Song F, Gao Y. Chemical characteristics of precipitation at metropolitan Newark in the US East Coast. Atmospheric Environment, 2009, 43(32): 4903-4913.
- [15] Melaku S, Morris V, Raghavan D, et al. Seasonal variation of heavy metals in ambient air and precipitation at a single site in Washington, DC[J]. Environmental Pollution, 2008, 155(1): 88-98.
- [16] Ösoy T, Örnektekin S. Trace elements in urban and suburban rainfall, Mersin, Northeastern Mediterranean[J]. Atmospheric Research, 2009, 94(2): 203-219.
- [17] Muezzinoglu A, Cizmecioglu S C. Deposition of heavy metals in a Mediterranean climate area[J]. Atmospheric Research, 2006, 81: 1-16.
- [18] Uygur N, Karaca F, Alagha O. Prediction of sources of metal pollution in rainwater in Istanbul, Turkey using factor analysis and long-range transport models[J]. Atmospheric Research, 2010, 95: 55-64.
- [19] Al Momani I F. Trace elements in atmospheric precipitation at Northern Jordan measured by ICP MS: acidity and possible sources[J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 4507-4515.
- [20] Connan O, Maro D, H bert D et al. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France[J]. Atmospheric Environment, 2013, 67: 394-403.
- [21] Sakata M, Asakura K. Factors contributing to seasonal variations in wet deposition fluxes of trace elements at sites along Japan Sea coast [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43: 3867-3875.
- [22] Vuai S A H, Tokuyama A. Trend of trace metals in precipitation around Okinawa Island, Japan [J]. Atmospheric Research, 2011, 99: 80-84.
- [23] Sazakli E, Alexopoulos A, Leotsinidis M. Rainwater harvesting, quality assessment and utilization in Kefalonia Island, Greece[J]. Water Research, 2007, 41: 3039-2047.
- [24] Kim J E, Han Y J, Kim P R, et al. Factors influencing atmospheric wet deposition of trace elements in rural Korea[J]. Atmospheric Research, 2012, 116: 185-194.
- [25] Montoya Mayor R, Fernandez Espinosa A J, Seijor Delgado I, et al. Determination of soluble ultra trace metals and metalloids in rainwater and atmospheric deposition fluxes: A 2 year

- survey and assessment[J]. *Chemosphere*, 2013, 92: 882-891.
- [26] 王华, 马宁, 杨晓静, 等. 成都市雨水中的重金属特征[J]. *地球与环境*, 2010, 38(1): 49-53. (WANG Hua, MA Ning, YANG Xiao Jing, et al. Heavy metal characteristics of rainwater in Chengdu[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1): 49-53. (in Chinese))
- [27] 胡健, 张国平, 刘从强. 贵阳市大气降水中的重金属特征[J]. *矿物学报*, 2005, 25(3): 257-262. (HU Jian, ZHANG Guoping, LIU Cong qiang. The characteristics of heavy metals in rain water in Guiyang city, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, 25(3): 257-262. (in Chinese))
- [28] 杨伟, 周静. 焦作市雨水中重金属特征[J]. *环境科学与管理*, 2009, 34(1): 5-59. (YANG Wei, ZHOU Jing. Character of heavy metals in rainwater of Jiaozuo city[J]. *Environmental Science and Management*, 2009, 34(1): 5-59. (in Chinese))
- [29] 胡春华, 柯丽, 童乐, 等. 大气降水重金属含量特征及其来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2012, 34(12): 26-30. (HU Chunhua, KE Li, TONG Le, et al. Characteristics and source analysis of heavy metals in atmospheric precipitation of Boyang lake basin[J]. *Environmental Pollution and Control*, 2012, 34(12): 26-30. (in Chinese))
- [30] 余辉, 张璐璐, 李焕利, 等. 太湖流域重金属湿沉降特征[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(12): 1331-1337. (YU Hui, ZHANG Lu lu, LI Huan li, et al. Wet deposition characteristics of heavy metals in Taihu lake watershed[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(12): 1331-1337. (in Chinese))
- [31] 王艳, 刘晓环, 金玲仁, 等. 泰山地区湿沉降中重金属的空间分布[J]. *环境科学*, 2007, 28(11): 2562-2568. (WANG Yan, LIU Xiaohuan, JIN Ling ren, et al. Spatial variations of heavy metals in precipitation at mount Taishan region[J]. *Environmental Science*, 2007, 28(11): 2562-2568. (in Chinese))
- [32] 杨忠平, 卢文喜, 龙玉桥, 等. 长春市城区大气湿沉降中重金属及pH值调查[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2009, 39(5): 887-892. (YANG Zhong ping, LU Wen xi, LONG Yu qiao, et al. Current situation of pH and wet deposition of heavy metals in precipitation in Changchun city, China[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2009, 39(5): 887-892. (in Chinese))
- [33] 艾东升. 上海市大气降水化学组成特征及物源解析[D]. 华东师范大学, 2011. (AI Dong sheng. Chemical characteristics of wet precipitation in Shanghai and its source analysis[D]. Master Thesis. Shanghai: East China Normal University, 2011. (in Chinese))
- [34] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中重金属污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2012, 33(11): 3712-3717. (LI Yue mei, PAN Yue peng, WANG Yue si, et al. Chemical characteristics and sources of trace metals in precipitation collected from a typical industrial city in northern China[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(11): 3712-3717. (in Chinese))
- [35] Cheng M C, You C F. Sources of major ions and heavy metals in rainwater associated with typhoon events in southwestern Taiwan[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010, 105: 106-116.
- [36] 白莉, 王中良, 黄毅. 西安地区大气降水的痕量金属特征及其来源解析[J]. *干旱区地理*, 2010, 33(3): 385-393. (BAI Li, WANG Zhong liang, HUANG Yi. Characteristics and source analysis of trace metals in precipitation in Xian district, Shaanxi province, China[J]. *Arid Land Geography*, 2010, 33(3): 385-393. (in Chinese))
- [37] Huang J, Kang S C, Wang S X, et al. Wet deposition of mercury at Lhasa, the capital city of Tibet[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 447: 123-132.
- [38] Okubo A, Takeda S, Obata H. Atmospheric deposition of trace metals to the western North Pacific Ocean observed at coastal station in Japan[J]. *Atmospheric Research*, 2013, 129(130): 20-32.
- [39] 唐信英. 南京市江北工业区大气降水酸性及化学成分研究分析[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. (TANG Xin ying. The studies and analyses of precipitation acidity and chemical composition in industrial estate located in north bank of the Yangtze river, Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2007. (in Chinese))
- [40] 刘娜, 仇广乐, 冯新斌, 等. 贵阳市大气降水中汞分布特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 933-938. (LIU Na, QIU Guang le, FENG Xin bin, et al. Distribution characteristics of mercury in precipitation of Guiyang, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 933-938. (in Chinese))
- [41] Zhang X T, Siddiqi Z, Song X J, et al. Atmospheric dry and wet deposition of mercury in Toronto[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 50: 60-65.
- [42] Christopher H Conaway, Frank J Black, Peter Weiss Penzias, et al. Mercury speciation in Pacific coastal rainwater, Monterey Bay, California[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, 44: 1788-1797.