

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈丽冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐丽梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏芫,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响

韩力慧, 张海亮, 向欣, 张鹏, 程水源, 魏巍

(北京工业大学环境与能源工程学院, 区域大气复合污染防治北京市重点实验室, 北京 100124)

摘要: 通过采集北京市典型区域 2015 年夏季大气降水样品, 分析研究了大气降水的理化特性, 典型降水过程化学组分的变化特征、成因以及对大气污染物的影响。结果表明, 北京市典型区域夏季降水 pH 值范围为 5.15 ~ 7.34, 雨量加权平均值为 6.21, 酸雨率极低。降水中污染元素 Cd、Ca 和 Mn 呈现中度富集, Cu、Zn、Pb 和 S 呈现严重富集; Ca 和 S 是降水中主要污染元素, 分别占总污染元素浓度的 45.43% 和 43.93%, Zn、Mn、Cu、Pb 和 Cd 是降水中主要重金属污染元素, 占总污染元素浓度的 1.32%。降水速率不同的降水对大气污染物的影响作用也有所不同。降水速率较大的降水对 PM_{2.5} 的清除作用较小, 对 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的清除作用较大, 且影响机制表现为 4 个重要过程: 大气污染物的清除、累积、累积和清除、清除。降水速率较小的降水主要以云内雨除为主, 对 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 和 O₃ 的云下清除作用较小, 且影响机制表现为: 污染物的清除、清除和累积、累积、以及清除为特征的 4 个重要过程。降水速率较大的降水对大气污染物的清除作用大于降水速率较小的降水。

关键词: 大气降水; 典型降水过程; 化学组分; 大气污染物; 成因

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2211-07 DOI: 10.13227/j.hjks.201610133

Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer

HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, ZHANG Peng, CHENG Shui-yuan, WEI Wei

(Key Laboratory of Beijing on Regional Air Pollution Control, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Atmospheric precipitation samples were collected in a representative region of Beijing in summer of 2015 to investigate the physical and chemical characteristics of atmospheric precipitation, the changes and causes of major chemical components in rainwater during the course of typical precipitation, and the impacts of typical precipitation processes on atmospheric pollutants. The volume-weighted mean pH value of rainwater in the representative region of Beijing in summer was 6.21 with the range of 5.15-7.34, and acid rain seldom occurred. The pollution elements Cd, Ca and Mn were moderately enriched, and Cu, Zn, Pb and S were seriously enriched in rainwater, of which Ca and S were main pollution elements, which accounted for 45.43% and 43.93% of the total pollution elements respectively, and Zn, Mn, Cu, Pb and Cd were main heavy metal pollution elements, which accounted for 1.32% of the total pollution elements. Different rates of precipitations could have different impacts on atmospheric pollutants. PM_{2.5} could be scavenged by raindrop, and SO₂, NO₂ and O₃ could be scavenged greatly by raindrop during the precipitation episode at a relatively high rainfall rate, containing four significant stages, such as clear-out of atmospheric pollutants, accumulation, both accumulation and clear-out, and another clear-out of airborne pollutants. Atmospheric pollutants such as PM_{2.5}, SO₂, NO₂ and O₃ could mainly be scavenged by in-cloud scavenging processes during the precipitation episode at a relatively low rainfall rate, including four important stages, such as clear-out, both clear-out and accumulation, accumulation, and another clear-out of atmospheric pollutants. The effect of rainfall at a relatively high rate on atmospheric pollutants was bigger than that of rainfall at a relatively low rate.

Key words: atmospheric precipitation; typical precipitation process; chemical composition; atmospheric pollutant; cause

大气降水是大气颗粒物的汇, 云内雨除和云下冲刷作用能够有效地去除空气中大量的污染物^[1-3]。同时, 大气降水作为最能反映大气污染的环境因子之一, 其化学组分能够反映大气污染的程度和状况而受到广大学者的高度重视, 其中, 重金属由于其高毒性及致癌性也逐渐成为大气降水研究的重要内容^[4-6]。

近年来, 大气降水的研究主要以整场降水累积样品为研究对象。陈小敏等^[7]和刘星等^[8]研究了不同等级降水对大气污染物浓度的影响; 韩燕等^[9]研究了降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影

响。胡健等^[10]研究了贵阳市大气降水中重金属含量特征及其主要来源; 贾学秀等^[11]研究了北京市降雪中重金属污染现状; 李月梅等^[12]研究了华北工业城市降水中金属元素的污染特征; 彭玉龙等^[13]研究了重庆市大气降水中重金属的分布特征及其沉降通量。这些研究均反映了整场降水的理化特性及其对

收稿日期: 2016-10-20; 修订日期: 2017-01-11

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201409003); 国家留学基金委项目(201406545022); 北京市教委人才培养质量建设-双培计划新兴专业建设(中央资金)项目(PXM2016_014204_001029_00205967_FCG)

作者简介: 韩力慧(1964~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气污染与防治, E-mail: hlh@bjut.edu.cn

环境的影响.

降水化学组分除了受到地域、季节、降水量等因素的影响外,还受到降水过程不同时间段的纵向影响^[14]. 王跃思等^[15]对北京市 2007 年夏季典型降水过程进行了分时段采样,分析了降水中水溶性大气污染成分 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 等随时间的变化特征;陈宗娇^[16]通过基于降水体积的分段采样,分析研究了大连市和抚顺市同一时间降水中酸雨的形成机制;张青新^[17]通过基于降水体积的分段采样,分析研究了大连市大气降水不同时段 pH 值和离子浓度的变化特征,以及影响降水酸度的因素. 可见降水过程分段研究,不仅能反映降水中化学组分浓度的实时变化特征,而且还能进一步揭示降水对大气污染物的清除机制,但目前相关研究报道甚少. 本文针对北京市典型区域 2015 年夏季大气降水及其过程中主要元素组分的变化、成因以及对大气污染物的影响进行了深入细致的研究,通过揭示降水过程对大气污染物的影响机制,以期为湿沉降化学以及大气污染防治措施的制定提供重要的科学理论依据.

1 材料与方法

1.1 样品采集

1.1.1 采样点设置

北京市大气污染的空间特征表现为南城高于北城,而东南区域又位于北京市的下风向,因此选择北京市东南区域为典型区域,采样点设置于该区域东南三环和四环之间,即北京工业大学(BJUT)环化楼顶,距地面约 15 m,周围无明显局地污染源,能较好地代表北京市东南区域特征.

1.1.2 采集大气降水样品

使用手动采样方式(将聚乙烯采样袋内衬于直径为 25 cm 的塑料桶中)于 2015 年 6~8 月,采取逢雨必采的原则进行大气降水样品的采集,并记录降水量. 其中对于降水量较大的大气降水过程,进行了分段采样,由于目前国内外还没有关于降水过程分段采样的相关标准,因此采用近年来一些学者提出以降水体积为依据的分段采样方法^[16, 17]采集了降水样品,即同一场连续降水依据降水体积(如 100 mL)划分的采样时段,采集降水样品. 样品采集过程严格按照国标《大气降水样品的采集与保存》(GB/T 13580. 2-1992)进行.

样品采集完后立即取适量样品进行 pH 值的测定,另外取适量样品采用孔径为 0.45 μm 的针筒式

过滤头进行过滤,过滤液放置在冰箱中(4℃)保存,待测.

1.2 化学组分分析

1.2.1 pH 值

取适量刚采集的降水样品,采用 METTLER TOLEDO 梅特勒 pH 计(测量精度为 0.01),测定样品 pH 值. 在测定样品前必须进行 3 种 pH 值标准液的校正,以确保数据的可靠性.

1.2.2 元素组分

采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, Agilent7500a)对上述降水过滤待测溶液进行 24 种水溶性无机元素的测定:Na、Mg、Al、S、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、As、Se、Sr、Mo、Cd、Sb、Ce、Eu 和 Pb.

2 结果与讨论

2.1 降水量与 pH 值

统计数据显示(www.wunderground.com),北京市 2015 年夏季平均降水量 189.0 mm,约占全年降水量 345.9 mm 的 54.6%. 研究期间,共采集到 27 场有效降水样品,累积降水量为 199.3 mm,约占北京市夏季平均降水量的 105.5%. 由图 1 可知,2015 年北京市夏季降水主要集中于 7 月,约占夏季总降水量的 62.0%,其中,降水量大于 10 mm 的降水事件共有 6 场,最大降水量为 28.1 mm,对总降水量贡献较大.

北京市夏季大气降水 pH 值变化范围为 5.15~7.34,如图 1 所示,雨量加权平均值为 6.21. 由于 pH 值小于 5.6 的湿沉降才称为酸雨^[18, 19],因此北

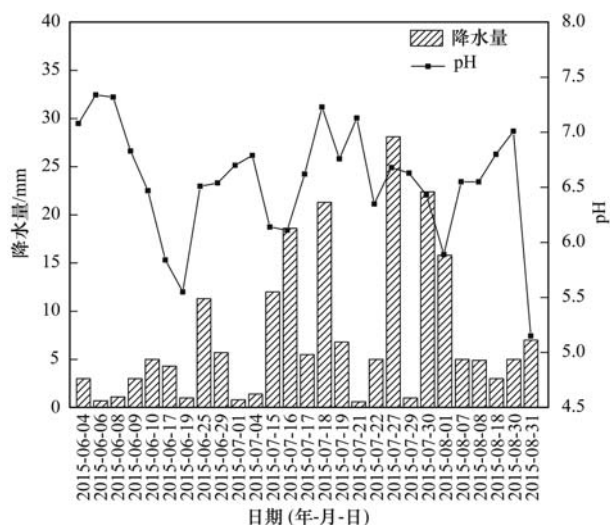


图1 降水量及 pH 值

Fig. 1 Rainfall amounts and pH of precipitations

京市夏季降水只出现了 2 次酸雨,酸雨发生频率仅为 7.4%,整体呈偏中性,与 Yang 等^[20]研究结果相一致. 这与北方大气颗粒物中存在大量碱性矿物质有很大关系.

2.2 降水中化学元素组分特征

富集因子法能有效地区分大气降水中地壳元素和人为污染元素,并能反映大气降水中污染元素的富集程度,其计算公式如下:

$$EF = \frac{\left(\frac{C_X}{C_R}\right)_{\text{降水}}}{\left(\frac{C_X}{C_R}\right)_{\text{地壳}}}$$

式中, C_X 为元素 X 的含量, C_R 为参比元素 R 的含量. 地壳中元素含量选用中国大陆华夏壳体^[21]的元素丰度,参比元素选择目前普遍采用的 Al 元素,富集因子划分为: $EF < 5$,表示元素主要来自地壳源; $5 < EF < 10$,表示元素受到轻微人为污染,呈现轻度富集; $10 < EF < 100$,表示元素受人为活动影响较大,呈现中度富集; $EF > 100$,表示元素明显受到人为活动影响,呈现严重富集.

大气降水中除检出率较低的 Sc、Co、Eu、As 等元素外,主要元素富集因子如图 2 所示, Ti、V、Al、Fe 元素的富集因子均小于 5,主要来自地壳源,为地壳元素;Sr、Mg、Ni 和 Na 元素的富集因子介于 5 ~ 10 之间,受到轻微人为污染,呈现轻度富集;Mn、Ca 和 Cd 元素富集因子介于 10 ~ 100 之间,受人为活动影响较大,呈现中度富集;Pb、Cu、Zn 和 S 元素富集因子均大于 100,甚至超过 1 000,严重受到人为因素的影响,呈现高度富集.

大气降水中主要元素浓度如图 3 所示,依次表

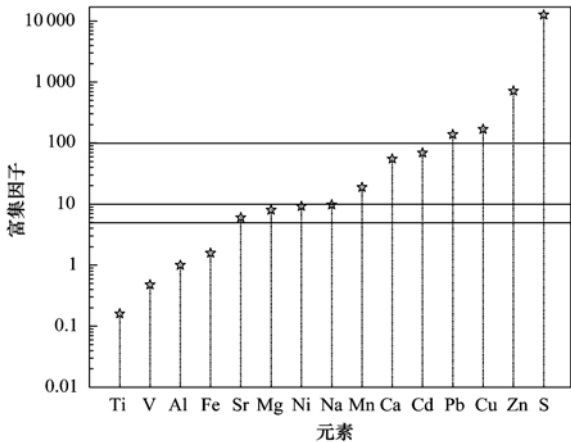


图 2 降水样品中元素富集因子

Fig. 2 Enrichment factors of major elements in the precipitation samples

现为:Ca > S > Na > Mg > Al > Fe > Zn > Mn > Cu > Sr > Pb > Ti > Ni > V > Cd,其中污染元素占总元素浓度的 96.80%,Ca 和 S 是降水中的主要污染元素,分别占总污染元素浓度的 45.43% 和 43.93%. Zn、Mn、Cu、Pb、Ni 和 Cd 是降水中的主要重金属污染元素,占总污染元素浓度的 1.32%.

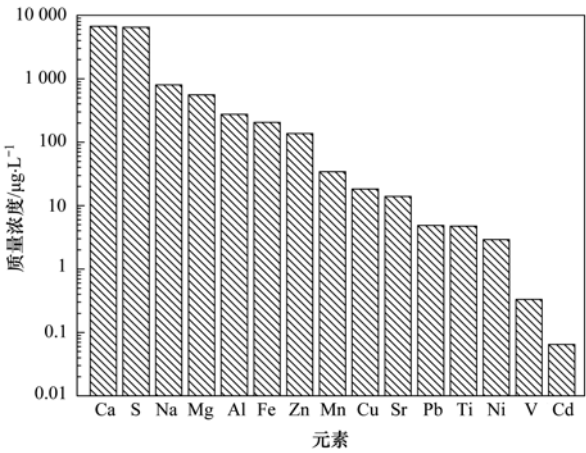


图 3 降水中主要元素质量浓度特征

Fig. 3 Mass concentrations of main elements in rain samples

2.3 典型降水过程元素组分变化特征

为了研究不同降水过程元素组分变化特征以及对大气污染物的清除作用,选择了两场降水量较大且相近,持续时间差异较大的降水,即 6 月 10 日降水和 7 月 17 日降水作为典型降水过程.

6 月 10 日降水发生在夜间 21:10 ~ 22:50,持续时间约 1 h 40 min,降水量为 5 mm,降水速率为 3.0 mm·h⁻¹,共有 4 个时段,1 段为初期,2 段和 3 段为中期,细分为中前期和中后期,4 段为后期,如图 4 (a) 和 4(b) 所示. 降水初期,pH 值为 6.55,降水中各元素浓度相对较高,说明降水初期对大气污染物的冲刷作用较强. 降水中前期,除 pH 值和污染元素 S 升高以外,均呈现下降趋势;降水中后期,pH 值继续升高,S 元素开始下降,受较大或严重人为影响的污染元素 Ca、Zn、Cu 和 Pb 仍继续下降,而地壳元素 Ti、Al 和 Fe 以及受轻微人为活动影响的 Mg 和 Na 元素均呈现不同程度的升高,说明降水中期降水对酸性物质清除较强,而对其他物质,特别是受人为影响较大或严重的污染元素清除较弱. 降水后期,除 pH 值出现下降,S 元素浓度持续降低外,各元素均呈现升高趋势,说明降水后期降水对酸性物质清除较弱,而对其他元素清除较强. 由此可见,此次降水过程不同时段各元素浓度表现出不同的变化特征.

7 月 17 日降水发生在上午 08:40 ~ 12:40,持续时间约 4 h,降水量 5.5 mm,降水速率为 1.4

$\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$, 共有 5 个时段, 1 段为初期, 2 段 ~ 4 段为中期, 细分为中前期, 中中期和中后期, 5 段为后期, 如图 4(c) 和 4(d) 所示. 在降水初期, pH 值为 6.41, 各元素浓度较高, 说明降水初期对污染物的清除作用较大. 随着降水进入中前期, 降水中除 pH 值略有升高, S 元素明显升高外, 其余元素均显著下降, 这与 6 月 10 日降水变化趋势基本一致. 在降水中中期和中后期, 降水中 pH 值略有下降, 以 Fe、Al、Ti 为主的地壳元素略有升高, 受轻微人为影响的 Na、Mg 和 Sr 元素略有下降, 受人为影响较大或严重的污染元素中除 Pb 以外则明显下降, 说明降水

中期降水对各物质的清除作用均有不同程度的减小, 尤其对受人为影响较大或严重的污染元素清除作用更小. 在降水后期, pH 值变化不大, 以 Fe、Al、Ti 为主的地壳元素略有下降, 污染元素 Ca、S、Cu、Zn、Mn 则明显升高, 说明降水后期降水对污染元素的清除作用较大, 而对酸性物质及其他元素的清除作用较小.

此次降水过程不同时段各元素浓度的变化与 6 月 10 日降水相应组分变化趋势有所不同, 说明降水速率不同, 降水对大气污染物的清除作用也有所不同.

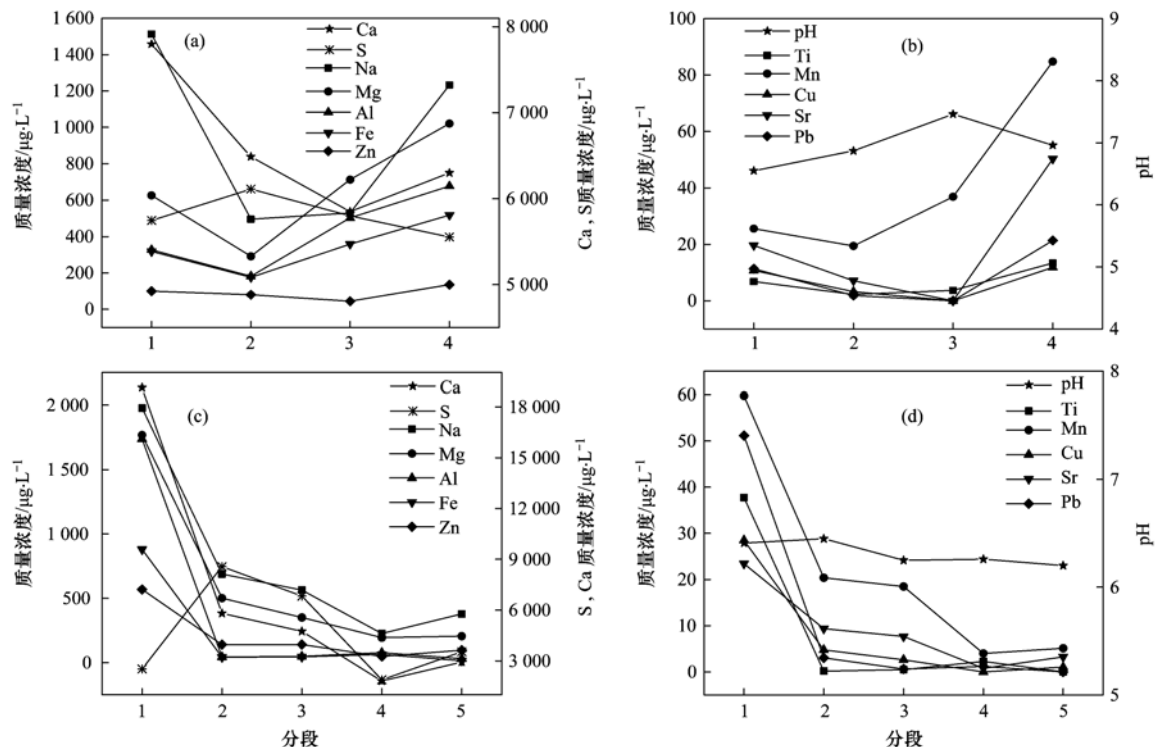


图 4 降雨期间降水中元素质量浓度和 pH 变化特征

Fig. 4 Variations of mass concentrations of major elements and pH in rainwater during the course of rainfall

2.4 典型降水过程对大气污染物的影响

6 月 10 日降水期间不同时段, 各元素浓度变化特征如上所述, 如表 1 所示, 这可能与当天的大气污染状况和气象要素密不可分. 降水当天, 大气污染物 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 浓度变化如图 5 所示, 降水前 1 h, 细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 浓度在增加, O_3 和 NO_2 浓度在减少, 大气处于静稳型, 有利于污染物的累积和二次污染物的形成, 空气质量为中度污染, 首要污染物为 $\text{PM}_{2.5}$. 降水初期, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度没有继续增加而是基本不变, O_3 浓度略有减少, SO_2 和 NO_2 有所减少, 说明大气降水初期, 除云内雨除作用外, 云下冲刷作用清除了部分 $\text{PM}_{2.5}$ 、光化学氧化剂 O_3 、酸性气态污染物 SO_2 和 NO_2 (与张泽峰等^[22] 的研究

结果相近), 使降水中地壳元素和污染元素浓度较高, pH 值适中. 降水中前期, 可能受到吸湿增长的影响使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有升高 (与吴丹等^[23] 的研究结果相似), 而 O_3 没有明显变化, SO_2 和 NO_2 略有减少, 说明此时降水对大气中 $\text{PM}_{2.5}$ 、 O_3 、 SO_2 和 NO_2 的清除作用有不同程度的减弱, 因此降水中地壳元素和大多数污染元素明显降低, 只有 pH 值和二次污染元素 S 略有增加, 但变化甚微. 降水中后期, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有减少, O_3 、 SO_2 和 NO_2 浓度明显减少, 说明降水对它们的清除作用有所增加, 同时, 因为降水在清除细颗粒物的同时也清除了部分粗颗粒物 PM_{10} , 且地壳元素主要富集于粗颗粒物中, 污染元素主要富集于细颗粒物中, 因此综合作用使降

水中大多数地壳元素浓度明显增加,大多数污染元素浓度有所增加,pH 值也有所增加,而二次污染元素 S 略有减少。同理,降水后期,PM_{2.5} 浓度略有减少,O₃、SO₂ 和 NO₂ 浓度明显减少,导致降水中地壳元素和大多数污染元素明显增加,二次污染元素 S 略有减少,所不同的是 pH 值有所减少,这可能是因为降水后期雨滴变小,比表面积增大,降水的云下冲刷作用增强,能够捕获更多的酸性物质(与

Migliavacca 等^[24]的研究结果相近),同时,能够致使大气中酸性气态污染物,特别是 NO₂ 进入降水中的量增加,导致 pH 值有所减少。

可见此次降水,对 PM_{2.5} 的清除作用较小,对 SO₂、NO₂ 和 O₃ 的清除作用较大,且降水过程不同时段对大气污染物的影响机制表现为:初期以污染物清除为主,中前期以污染物累积作用为主,中后期以污染物清除和累积作用为主,后期以污染物清除为主。

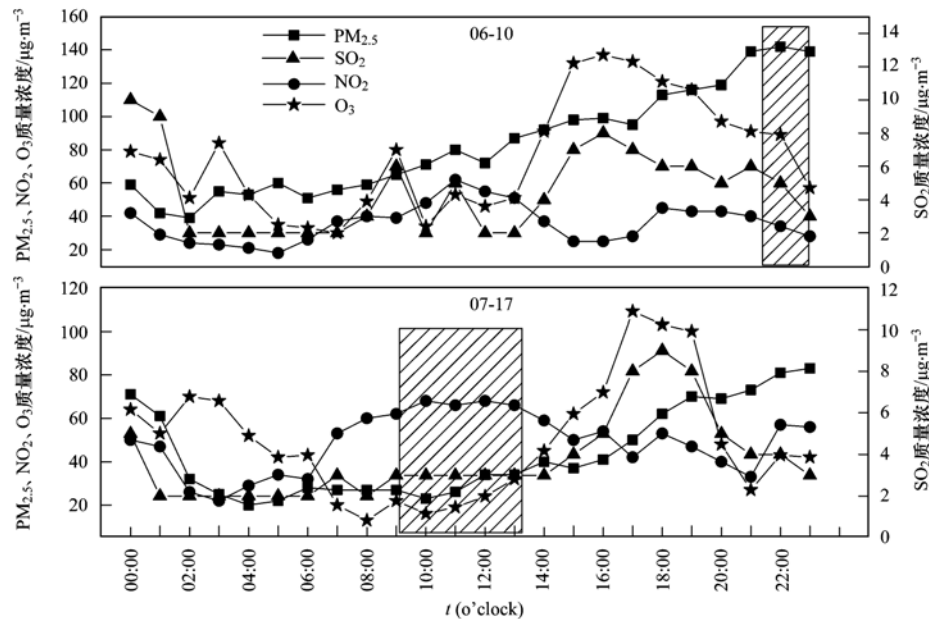


图5 降雨过程中大气污染物质量浓度变化趋势

Fig. 5 Variations of mass concentrations of atmospheric pollutants in the process of rainfall

表1 6月10日降水期间不同时段降水中元素组分质量浓度变化
Table 1 Changes of main element mass concentrations of different rainwater samples in the precipitation on June 10

元素	初期	中前期	中后期	后期
Ti	较高	下降	升高	升高
Al	较高	下降	升高	升高
Fe	较高	下降	升高	升高
Sr	较高	下降	下降	升高
Mg	较高	下降	升高	升高
Na	较高	下降	升高	升高
Mn	较高	下降	下降	升高
Ca	较高	下降	下降	升高
Pb	较高	下降	下降	升高
Cu	较高	下降	下降	升高
Zn	较高	下降	下降	升高
S	较高	升高	下降	升高
pH	适中	升高	升高	下降

7月17日降水期间不同时段,各元素浓度变化特征如上所述,如表2所示,与6月10日降水期间各元素浓度的变化表现出不同的特征,这同样与当天的大气污染状况和气象要素有很大关系。降水当

天大气污染物 PM_{2.5}、SO₂、NO₂ 和 O₃ 浓度变化如图5所示,降水前1 h,细颗粒物 PM_{2.5}、SO₂ 和 O₃ 浓度较低,NO₂ 浓度较高,空气质量为优。降水初期,PM_{2.5} 浓度略有减少,SO₂、NO₂ 和 O₃ 浓度略有升高,说明大气降水初期,一方面发生云内清除过程,即雨除,大气中的硫酸盐和硝酸盐等气溶胶颗粒物可作为活性凝结核参与成云过程,大气中的污染气体可溶于或通过液相氧化反应进入云滴,当云滴成熟后即变成雨从云基下落;另一方面雨滴离开云基在下落过程中,继续吸收和捕获大气中部分颗粒物和气态污染物,即云下冲刷,这两个过程共同作用致使降水中地壳元素和污染元素浓度较高,pH 值适中。降水中前期,PM_{2.5} 浓度略有升高,SO₂ 和 NO₂ 浓度变化不大,O₃ 浓度略有下降,说明此时降水对 PM_{2.5}、O₃、SO₂ 和 NO₂ 的清除作用明显减弱,因此降水中地壳元素和大多数污染元素明显降低,pH 值变化不大,只有二次污染元素 S 明显升高,有可能是因为此时降水强度略有减弱,导致雨滴较小比表面积较大,高空点源排放的 SO₂ 很快被雨滴吸收和捕

获,又与大气中碱性气态污染物 NH_3 发生反应(与石春娥等^[25]的研究结果相近),使降水中 S 元素明显升高,pH 值变化不大. 降水中中期和中后期, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度略有增加, SO_2 和 NO_2 浓度变化不大, O_3 浓度略有升高,说明降水主要以雨除为主,故此阶段降水中可能会出现地壳元素 Fe、Al、Ti 略有升高,pH 值略有下降,污染元素明显下降的趋势,这完全取决于云滴中化学组分的变化. 降水后期,虽然 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度仍略有增加, SO_2 和 NO_2 浓度变化不大, O_3 浓度略有升高,但在降水中污染元素明显升高,地壳元素 Fe、Al 和 Ti 略有下降. pH 值变化不大,说明降水后期除云内雨除外,还伴有明显的云下冲刷作用. 因为降水后期降水强度减弱,雨滴变小比表面积增大,强化了雨滴捕获大气污染物的能力,另一方面,气象条件稳定,有利于污染物的累积,这两种相反过程作用的结果导致降水中上述组分的变化.

由此可见,此次降水对大气污染物的清除作用,因降水前空气质量为优,而主要以云内雨除为主,对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的云下清除作用较小,且降水初期以污染物清除为主,降水中前期和中中期以污染物的清除和累积为主,中后期以污染物的累积为主,后期以污染物的清除为主.

综上所述可知,降水速率较大的降水对大气污染物的影响作用要大于降水速率较小的降水.

表 2 7 月 17 日降水期间不同时段降水

中元素组分质量浓度变化

Table 2 Changes of major element mass concentrations of different rainwater samples in the precipitation on July 17

元素	初期	中前期	中中期	中后期	后期
Ti	较高	下降	升高	升高	下降
Al	较高	下降	升高	升高	下降
Fe	较高	下降	升高	升高	下降
Sr	较高	下降	下降	下降	升高
Mg	较高	下降	下降	下降	升高
Na	较高	下降	下降	下降	升高
Mn	较高	下降	下降	下降	升高
Ca	较高	下降	下降	下降	升高
Pb	较高	下降	下降	升高	下降
Cu	较高	下降	下降	下降	升高
Zn	较高	下降	升高	下降	升高
S	较高	升高	下降	下降	升高
pH	适中	微升	下降	不变	下降

3 结论

(1)北京市典型区域夏季降水量占北京市全年降水的 54.6%,且主要集中于 7 月份,约占夏季降

水的 62.0%. 降水 pH 雨量加权平均值为 6.21,呈偏中性,酸雨频率极低为 7.4%.

(2)北京市典型区域夏季降水中,主要元素浓度大小依次为: $\text{Ca} > \text{S} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Cu} > \text{Sr} > \text{Pb} > \text{Ti} > \text{Ni} > \text{V} > \text{Cd}$,其中 Mn、Ca 和 Cd 元素呈现中度富集,Pb、Cu、Zn 和 S 元素呈现高度富集;且 Ca 和 S 是降水中的主要污染元素,分别占总污染元素浓度的 45.43% 和 43.93%. Zn、Mn、Cu、Pb 和 Cd 是降水中的主要重金属污染元素,占总污染元素浓度的 1.32%.

(3)降水速率较大的降水,对 $\text{PM}_{2.5}$ 的清除作用较小,对 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的清除作用较大. 降水过程不同时段对大气污染物的影响机制表现为初期以污染物清除为主,中前期以污染物累积为主,中后期以污染物的累积和清除为主,后期以污染物清除为主.

(4)降水速率较小的降水,主要以云内雨除为主,对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 SO_2 、 NO_2 和 O_3 的云下清除作用较小. 降水过程不同时段对大气污染物的影响机制表现为初期以污染物清除为主,降水中前期和中中期以污染物的清除和累积为主,中后期以污染物的累积为主,后期以污染物清除为主.

(5)降水速率不同,降水对大气污染物的影响作用也有所不同,降水速率较大的降水对大气污染物的影响作用要大于降水速率较小的降水.

参考文献:

- [1] Yoo J M, Lee Y R, Kim D, *et al.* New indices for wet scavenging of air pollutants (O_3 , CO, NO_2 , SO_2 , and PM_{10}) by summertime rain[J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **82**: 226-237.
- [2] 张六一, 刘源, 乔保清, 等. 三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征[J]. *环境科学*, 2016, **37**(2): 466-474.
Zhang L Y, Liu Y, Qiao B Q, *et al.* Characteristics of atmospheric dry and wet deposition of trace metals in the hinterland of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(2): 466-474.
- [3] 王瑛, 朱彬, 康汉青, 等. 气溶胶云下清除理论及观测研究[J]. *中国科学院大学学报*, 2014, **31**(3): 306-313, 321.
Wang Y, Zhu B, Kang H Q, *et al.* Theoretical and observational study on below-cloud rain scavenging of aerosol particles [J]. *Journal of University of Chinese Academy of Sciences*, 2014, **31**(3): 306-313, 321.
- [4] 罗璇, 李军, 张鹏, 等. 中国雨水化学组成及其来源的研究进展[J]. *地球与环境*, 2013, **41**(5): 566-574.
Luo X, Li J, Zhang P, *et al.* Advances in research on the chemical composition of precipitation and its sources in China [J]. *Earth and Environment*, 2013, **41**(5): 566-574.
- [5] 胡春华, 柯丽, 童乐, 等. 大气降水重金属含量特征及来源分析[J]. *环境污染与防治*, 2012, **34**(12): 26-30.

- Hu C H, Ke L, Tong L, *et al.* Characteristics and source analysis of heavy metals in atmospheric precipitation of Boyang Lake basin[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2012, **34**(12): 26-30.
- [6] 周静. 焦作市大气降水重金属研究初探[D]. 焦作: 河南理工大学, 2009.
- [7] 陈小敏, 邹倩, 周国兵. 重庆主城区冬春季降水强度对大气污染物影响[J]. *西南师范大学学报(自然科学版)*, 2013, **38**(7): 113-121.
- Chen X M, Zou Q, Zhou G B. On impact of precipitation intensity of air pollutants in winter and spring in Chongqing downtown[J]. *Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition)*, 2013, **38**(7): 113-121.
- [8] 刘星, 黄虹, 左嘉, 等. 夏季降雨对大气污染物的清除影响[J]. *环境污染与防治*, 2016, **38**(3): 20-24.
- Liu X, Huang H, Zuo J, *et al.* Scavenging of rainfall on air pollutants in summer[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2016, **38**(3): 20-24.
- [9] 韩燕, 徐虹, 毕晓辉, 等. 降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(2): 193-200.
- Han Y, Xu H, Bi X H, *et al.* Changes of particulate matters during rain process and influence of that on chemical composition of precipitation in Hangzhou, China[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(2): 193-200.
- [10] 胡健, 张国平, 刘丛强. 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 J, Zhang G P, Liu C Q. The characteristics of heavy metals in rain water in Guiyang city, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2005, **25**(3): 257-262.
- [11] 贾学秀, 涂明, 王鹏, 等. 北京部分地区降雪重金属污染现状分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(4): 92-96.
- Jia X X, Tu M, Wang P, *et al.* Analysis and study on heavy metal pollution in snow samples from some areas of Beijing[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(4): 92-96.
- [12] 李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 等. 华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2012, **33**(11): 3712-3717.
- Li Y M, Pan Y P, Wang Y S, *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.
- [13] 彭玉龙, 王永敏, 覃蔡清, 等. 重庆主城区降水中重金属的分布特征及其沉降量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2490-2496.
- Peng Y L, Wang Y M, Qin C Q, *et al.* Concentrations and deposition fluxes of heavy metals in precipitation in core urban areas, Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2490-2496.
- [14] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 王跃思, 李雪, 姚利, 等. 2007年北京夏季降水分段采样酸度和化学成分分析[J]. *环境科学*, 2009, **30**(9): 2715-2721.
- Wang Y S, Li X, Yao L, *et al.* Variation of pH and chemical composition of precipitation by multi-step sampling in summer of Beijing 2007[J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(9): 2715-2721.
- [16] 陈宗娇. 大连市与抚顺市降水分段监测与成因对比分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, **36**(12M): 270-274.
- Chen Z J. The analysis on the reasons of the differences of the rain by step by step sampling between Dalian and Fushun in Liaoning province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, **36**(12M): 270-274.
- [17] 张青新. 基于分段降水离子相关性和气流轨迹的大连市降水酸度分析[J]. *干旱环境监测*, 2013, **27**(2): 49-54.
- Zhang Q X. The influences of the pH of the rain in Dalian based on multi-step sampling and air trajectory clustering[J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2013, **27**(2): 49-54.
- [18] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究[J]. *中国环境监测*, 1996, **12**(5): 5-9.
- Liu J Q. Research on precipitation background value and definition of acid rain[J]. *Environmental Monitoring in China*, 1996, **12**(5): 5-9.
- [19] 黄美元, 徐华英, 王庚辰. 大气环境学[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [20] Yang F, Tan J, Shi Z B, *et al.* Five-year record of atmospheric precipitation chemistry in urban Beijing, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(4): 2025-2035.
- [21] 黎彤, 袁怀雨, 吴胜昔, 等. 中国大陆壳体的区域元素丰度[J]. *大地构造与成矿学*, 1999, **23**(2): 101-107.
- Li T, Yuan H Y, Wu S X, *et al.* Regional element abundances of continental crustobodies in China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 1999, **23**(2): 101-107.
- [22] 张泽锋, 沈利娟, 朱彬, 等. 南京市降水化学特征及其来源研究[J]. *大气科学学报*, 2015, **38**(4): 473-482.
- Zhang Z F, Shen L J, Zhu B, *et al.* Chemical characteristics and potential sources of precipitation in Nanjing[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2015, **38**(4): 473-482.
- [23] 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 等. 南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3268-3279.
- Wu D, Cao S, Tang L L, *et al.* Variation of size distribution and the influencing factors of aerosol in northern suburbs of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3268-3279.
- [24] Migliavacca D, Teixeira E C, Wiegand F, *et al.* Atmospheric precipitation and chemical composition of an urban site, Guaíba hydrographic basin, Brazil[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(10): 1829-1844.
- [25] 石春娥, 姚克亚, 郭俊. 降雨对云下污染气体 SO₂ 清除的研究[J]. *中国科学技术大学学报*, 2000, **30**(6): 735-739.
- Shi C E, Yao K Y, Guo J. Rain Scavenging of SO₂ under cloud base[J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 2000, **30**(6): 735-739.

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)