

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第4期

Vol.39 No.4

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

京津冀地区钢铁行业污染物排放清单及对 PM _{2.5} 影响	段文娇, 郎建全, 程水源, 贾佳, 王晓琦 (1445)
京津冀内陆平原区 PM _{2.5} 浓度时空变化定量模拟	郝静, 孙成, 郭兴宇, 王卫, 刘方田, 党海燕 (1455)
成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响	刘凡, 谭钦文, 江霞, 蒋文举, 宋丹林 (1466)
华山地区 PM _{2.5} 中无机离子垂直分布特征	曹聪, 王格慧, 吴灿, 李建军, 刘浪, 李瑾, 余兴 (1473)
烟花爆竹集中燃放的大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 成分图谱	谢瑞加, 侯红霞, 陈永山 (1484)
长三角地区中小燃煤锅炉 PM _{2.5} 成分谱特征	徐健, 黄成, 李莉, 陈勇航, 楼晟荣, 乔利平, 王鸿宇 (1493)
民用燃煤排放分级颗粒物中重金属排放因子	严沁, 孔少飞, 刘海彪, 王伟, 吴剑, 郑明明, 郑淑睿, 杨国威, 吴方琪 (1502)
冬、春季青岛大气气溶胶中乙二酸的分布特征及影响因素	张帅, 石金辉, 姚小红, 高会旺 (1512)
青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度	李茜, 石金辉, 李鹏志, 姚小红, 高会旺 (1520)
辽东湾大气中多环芳烃的含量组成及气粒分配	张玉凤, 宋永刚, 田金, 赵海勃, 杨爽, 吴金浩 (1527)
典型地区大气新型卤代阻燃剂污染特征、来源分析及人体暴露	李琦路, 杨孔, 李军, 张干 (1537)
苏州工业园区室内外颗粒物中多溴联苯醚污染特征及人体暴露水平	王俊霞, 顾海东, 张占恩, 钱飞跃 (1544)
上海市大气污染对感冒疾病相对危险度的影响	杨丝絮, 马玉霞, 周建丁, 周骥 (1552)
城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性: 以宁波市北仑区芦江为例	曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 纵亚男, 唐剑锋 (1560)
艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨	曹灿, 张飞, 阿依尼格·亚力坤, 朱世丹, 郭苗, 阿丽米热·塔力甫江, Kung Hsiangte (1568)
三峡澎溪河水华期间水体 CH ₄ 浓度及其通量变化特征初探	秦宇, 张渝阳, 李哲, 马健荣 (1578)
漓江段地表水体旱季硝酸盐动态变化特征及其来源	苗迎, 章程, 肖琼, 赵海娟, 李成习 (1589)
柳江流域饮用水源地重金属污染与健康风险评价	张清华, 韦永著, 曹建华, 于爽 (1598)
黄柏河流域梯级水库沉积物磷形态特征及磷释放通量分析	刘佳, 雷丹, 李琼, 王亮, 张平, 肖尚斌 (1608)
白洋淀典型持久性有机污染物污染特征与风险评估	高秋生, 焦立新, 杨柳, 田自强, 杨苏文, 安月霞, 贾海斌, 崔志丹 (1616)
典型有机氯农药在珠三角地区多介质环境中的归趋模拟	高梓闻, 徐月, 亦如瀚 (1628)
河道水旁路处理中试工艺中 PPCPs 的去除效果及机制	李力, 朱楦, 白瑶, 赵健, 曹之淇, 郭泓利, 李凌云, 左剑勇 (1637)
蔡普生在氯消毒过程中的去除、转化与风险评价	樊鑫鑫, 杜尔登, 李佳琦, 赵丽丽, 王聿琳, 彭明国 (1645)
真空紫外/氯处理饮用水典型致嗅物质	孙昕, 张焱, 史路肖, 陈笑涵, 唐晓 (1654)
热活化过硫酸盐降解三氯生	蒋梦迪, 张清越, 季跃飞, 陆鸢鹤 (1661)
水体模拟颗粒物对四环素的吸附特性及基本规律	徐龙凤, 魏群山, 吕强, 唐立朋, 刘亚男, 柳建设 (1668)
海水优化 ANAMMOX 包埋固定化及其处理含海水污水的脱氮性能	单晓静, 于德爽, 李津, 陈光辉, 冯莉, 吕廷廷, 邵青 (1677)
外源甜菜碱投加增强高盐废水厌氧氨氧化脱氮性能	于德爽, 吴国栋, 李津, 周同, 王晓静 (1688)
硝化污泥富集及其强化高氨氮冲击的中试研究	盛晓琳, 崔灿灿, 王家德, 刘锐, 徐峰, 陈吕军 (1697)
分段进水对改良 A ² /O-BAF 双污泥系统反硝化除磷脱氮的影响	南彦斌, 彭永臻, 曾立云, 赵智超, 刘宏, 李慧, 陈永志 (1704)
不同温度下应用比值控制实现连续流好氧颗粒污泥短程硝化	梁东博, 卞伟, 阚睿哲, 王文啸, 赵青, 孙艺齐, 李军 (1713)
智能化曝气控制 A/O 工艺活性污泥特性演化对内源反硝化脱氮的作用机制	徐旻昶, 胡湛波, 张穗生, 李昊航 (1720)
温度对一体式厌氧流化床膜生物反应器运行效能及微生物群落结构的影响	李玥, 胡奇, 高文 (1731)
污泥臭原位置量工艺中抗生素的去除	汪鲁, 黄伟伟, 李彦刚, 强志民 (1739)
零价铁对污泥厌氧消化过程中四环素抗性基因水平转移的作用影响	杨帆, 徐雯丽, 钱雅洁, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (1748)
环境因子对全自养脱氮颗粒污泥功能菌协同效应的影响	陈希, 钱飞跃, 王建芳, 高军军, 沈耀良, 贾珣 (1756)
后置固相反硝化滤池工艺沿程微生物特性	张千, 吉芳英, 徐璇 (1763)
复合菌株 YH01 + YH02 强化 SBR 好氧反硝化脱氮及菌群结构分析	陈海升, 曹刚, 张迪, 黄郑郑, 莫测辉 (1773)
氮磷失衡下膨胀污泥性能及膨胀菌群落结构变化	贺雪濛, 丁丽丽, 张璐璐, 顾卓江, 任洪强 (1782)
1 株铜绿假单胞菌对砷的降解特性及代谢途径	李想, 张雪英, 周俊, 宋军, 王建刚, 雍晓雨, 贾红华 (1794)
铜尾矿库坝面土壤微生物群落动态的驱动因子	李磊, 景炬辉, 刘晋仙, 柴宝峰 (1804)
垦殖对桂林会仙喀斯特湿地土壤养分与微生物活性的影响	黄科朝, 沈育伊, 徐广平, 黄玉清, 张德楠, 孙英杰, 李艳琼, 何文, 周龙武 (1813)
黄土丘陵区退耕还林还草对土壤细菌群落结构的影响	陈孟立, 曾全超, 黄懿梅, 倪银霞 (1824)
河岸带表层土壤的铁氨氧化 (Feammox) 脱氮机制的探究	丁帮琛, 李正魁, 朱鸿杰, 陈湜, 覃云斌, 杨建华, 胡优优 (1833)
藏猪扰动作用下的高寒草甸土壤退化特征及微生物群落结构变化	展鹏飞, 肖德荣, 闫鹏飞, 刘振亚, 马金成, 陈志明, 格茸, 田伟, 王行 (1840)
深圳湾典型红树植物根表铁膜及其重金属富集特征	沈小雪, 李瑞利, 柴民伟, 邱国玉 (1851)
香港周边海域野生鱼体内 DDTs 和 PCBs 的含量分布和食用风险评估	苏杨, 鲍恋君, 曾永平 (1861)
偏远高山湿地土壤中 PAHs 污染特征: 以神农架大九湖为例	胡天鹏, 邢新丽, 柯艳萍, 毛瑶, 黎荧, 郑煌, 喻月, 张家泉, 祁士华 (1872)
西南地区典型森林水库土壤和沉积物汞的迁移转化特征	孙涛, 马明, 王永敏, 安思危, 王定勇 (1880)
广西西江流域土壤镉含量特征及风险评估	宋波, 杨子杰, 张云霞, 王佛鹏, 周浪, 李黎, 钟雪梅 (1888)
长期施肥对旱地红壤及作物中砷累积的影响	张蓉, 余光辉, 李亚青 (1901)
三元土壤调理剂对田间水稻镉累积转运的影响	辜娇峰, 周航, 贾润语, 王倩倩, 李虹呈, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (1910)
稻田土壤性质与水稻镉含量的定量关系	王梦梦, 何梦媛, 苏德纯 (1918)
钙基膨润土辅助对堆肥及土壤 Cu、Zn 形态转化和白菜吸收的影响	赵军超, 王权, 任秀娜, 李荣华, Mukesh Kumar Awasthi, Altaf Hussain Lahori, 张增强 (1926)
外源碳和氮输入对降水变化下土壤呼吸的短期影响	贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 董云社, 郭树芳, 闫钟清, 李兆林, 王丽芹 (1934)
模拟降水量减少对大豆-冬小麦轮作农田土壤呼吸的影响	王朝辉, 陈书涛, 孙鹭, 胡正华 (1943)
紫色土丘陵区农田源头沟渠一氧化氮排放的季节差异及影响因素	田琳琳, 任光前, 朱波 (1952)
季节非对称升温对喀斯特土壤 CO ₂ 释放的影响	唐国勇, 张春华, 刘方炎, 李昆, 马艳 (1962)
《环境科学》征订启事 (1472) 《环境科学》征稿简则 (1511) 信息 (1755, 1839, 1925)	

青岛大气降水中微量元素的浓度及溶解度

李茜¹, 石金辉^{1,2*}, 李鹏志¹, 姚小红^{1,2}, 高会旺^{1,2}

(1. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学海洋环境与生态教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 利用 2016 年 6 月~2017 年 5 月在青岛采集的 35 个降水样品, 分析其中 8 种微量元素的总态和溶解态浓度, 讨论了大气降水中微量元素的浓度及其溶解度的变化特征, 并探讨了影响大气降水中微量元素溶解度的因素. 结果表明, 青岛降水中微量元素的总态浓度以 Al 和 Fe 的最高, 其次是 Zn、Mn、Ba、Pb、Sr、V 的较低; 溶解态浓度以 Zn 的最高, 其次是 Al、Mn、Fe、Ba、Sr、Pb 和 V 的较低; 溶解度以地壳元素 Al 和 Fe 的最低, 为 5% 左右, 受到人为源影响的元素溶解度相对较高, Pb 和 Ba 的为 10%~40%, Mn 和 Sr 的为 20%~60%, Zn 和 V 溶解度最高, 平均约为 55%. 季节变化显示不同元素总态和溶解态浓度基本呈现冬、春季明显高于夏、秋季, 溶解度基本表现为春季最高. 持续降雨的前后期微量元素的总态和溶解态浓度均呈现明显降低, 但溶解度的变化趋势在不同降雨过程中不一致, pH 变化是控制降水中微量元素溶解度的主要因子.

关键词: 大气降水; 微量元素; 溶解度; pH; 青岛; 气溶胶

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)04-1520-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201708034

Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao

LI Qian¹, SHI Jin-hui^{1,2*}, LI Peng-zhi¹, YAO Xiao-hong^{1,2}, GAO Hui-wang^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Laboratory of Marine Environmental Science and Ecology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Thirty-five atmospheric precipitation samples were collected at an urban site in Qingdao from June 2016 to May 2017. The total and soluble concentrations of eight trace elements in the samples were determined, and the variable characteristics of the concentrations and solubility of trace elements, as well as the factors affecting the solubility of trace elements in atmospheric precipitation, have been discussed. Based on the overall data, the total concentrations of the trace elements were found to be in the order $Al > Fe > Zn > Mn > Ba > Pb > Sr > V$, but the soluble concentrations of the trace elements were in the order $Zn > Al > Mn > Fe > Ba > Sr > Pb > V$. Solubility was about 5% for the crustal elements Al and Fe, and the solubility of the elements affected by anthropogenic sources was relatively higher, 10%-40% for Pb and Ba, 20%-60% for Mn and Sr, and nearly 55% for Zn and V. The total and soluble concentrations of the trace elements were higher in winter and spring than in summer and autumn, but element solubility in spring was the highest. During continuous rainfall, the total concentrations of trace elements in precipitation decreased appreciably, but the variation trend of the solubility of trace elements was not consistent during the different rainfall processes. The variation in pH was the main factor controlling the solubility of trace elements in precipitation.

Key words: atmospheric precipitation; trace elements; solubility; pH; Qingdao; aerosol

大气干湿沉降带来的微量元素因其在海洋生态系统中有着重要的环境效应而正在受到广泛关注 (GEOTRACES, <http://www.geotraces.org>), 如微量元素 Fe 会在很大程度上影响海洋的初级生产和固氮能力, Mn、Zn、Cu 等元素会参与不同的酶过程从而影响海洋生物的生长和生物群落结构^[1,2]. 大气降水对气体和气溶胶的湿清除作用在大气微量元素的沉降通量中有重要贡献, 已有研究表明湿沉降是陆源 Al 向黄海输送的重要途径^[3], 青岛大气 Fe、Mn、Zn 和 Pb 等微量元素的湿沉降通量比其干沉降通量一般高 1~2 个数量级^[4]. 大气降水中的微量元素包括可溶和不可溶的部分, 溶解态与总态的浓度比值通常称为微量元素的溶解度^[5]. 由于大气沉降中的微量元素只有可溶部分能够被海洋生物所利

用, 因此, 近年来有关大气沉降中微量元素溶解度的研究已经成为海洋科学和大气科学研究的热点科学问题^[6]. 但目前研究多关注的是大气气溶胶中微量元素的溶解度^[7,8], 对大气降水中微量元素溶解度的认识还非常有限^[5,9,10].

青岛地处山东半岛南端, 东南濒临黄海, 处于亚洲沙尘源区和华北城市群的下风带, 是亚洲大陆气溶胶向西北太平洋运输的重要通道. 本文利用 2016 年 6 月~2017 年 5 月在青岛采集的雨水样品,

收稿日期: 2017-08-04; 修订日期: 2017-09-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41210008); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2014CB953702)

作者简介: 李茜(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境化学, E-mail: liqia123@126.com

* 通信作者, E-mail: engroup@ouc.edu.cn

分析其中 8 种微量元素的总态和溶解态浓度, 讨论青岛大气降水中微量元素浓度和溶解度的变化特征及影响因素, 以期为准评价大气沉降的微量元素对中国近海初级生产力的影响奠定基础。

1 材料与方法

1.1 样品采集及预处理

2016 年 6 月 ~ 2017 年 5 月在青岛采集大气降水样品, 采样地点设在中国海洋大学崂山校区 ($36^{\circ}09'N$, $120^{\circ}29'E$), 距离最近海岸线约 7 km. 采用聚丙烯雨水收集器采集降水样品, 采雨器放置在校园开阔地, 距地面高度为 1.8 m. 逢雨时采集样品, 雨停后立即取回样品, 对时间较长的连续降雨进行分时段采样, 采样结束后立即取回, 共采集 35 个降水样品。

采集的降水样品分为 4 份, 一份立即测定 pH; 一份经 $0.45\ \mu m$ 微孔滤膜过滤, 滤液加浓 HNO_3 酸化至 2% (质量分数), 用于溶解态微量元素分析; 一份未过滤的样品, 用于总态微量元素分析; 一份经 $0.45\ \mu m$ 微孔滤膜过滤, 用于可溶性离子分析. 所有用于元素和离子分析的样品于 $-20^{\circ}C$ 冷冻保存. 分析前取出解冻, 已过滤样品可直接进行溶解态元素和离子分析, 未过滤样品需加入浓 HNO_3 和浓 HF 在高压聚四氟乙烯消解罐中 $180^{\circ}C$ 下消解 48 h, 消解完全后取出聚四氟乙烯内胆, 于 $180^{\circ}C$ 下加热赶酸至近干, 残渣用 2% HNO_3 溶解定容后分析. 每批次样品消解时, 同时取超纯水和标准溶液进行消解分别作为空白和标准样品, 空白样品中各元素浓度基本低于检出限, 标准样品中各元素的回收率为 90% ~ 105%. 样品处理过程中所用的酸均为优级纯, 采样及样品处理过程中所用的所有器皿均经预先的酸洗处理, 以确保没有玷污。

1.2 样品分析

样品 pH 采用 Mettler Toledo S20 型精密 pH 计、InLab Micro 微电极进行测定; 样品中 Fe、Al、V、Mn、Zn、Sr、Ba 和 Pb 等微量元素浓度采用 Agilent 7500c ICP-MS 进行分析, 仪器装配有八极杆碰撞/反应池和全自动校正的双通道脉冲/模拟检测器. 以铑 (Rh) 为内标元素, 各元素检测的线性范围最小为 6 个数量级, 方法检出限 Fe 为 $3.7\ \mu g \cdot L^{-1}$, 其他元素检出限均 $< 0.09\ \mu g \cdot L^{-1}$. 样品中可溶性阴、阳离子采用 Dionex ICS-3000 离子色谱仪进行分析. 样品分析的详细过程和质量控制见文献 [11].

由于降水样品中有些溶解态元素浓度很低, 分

析中出现部分样品中个别元素浓度低于检出限, 本文对样品中低于检出限的元素浓度以检出限的一半计. 文中降水样品中元素的平均浓度和溶解度、平均 pH 均为雨量加权平均值。

2 结果与讨论

2.1 青岛大气降水中微量元素浓度及溶解度的总特征

青岛大气降水中分析的 8 种微量元素的总态浓度以 Al 和 Fe 的最高, 其浓度范围分别为 $50 \sim 2400\ \mu g \cdot L^{-1}$ 和 $10 \sim 2200\ \mu g \cdot L^{-1}$, 平均浓度分别为 $385.2\ \mu g \cdot L^{-1}$ 和 $193.4\ \mu g \cdot L^{-1}$, 其次是 Zn、Mn 和 Ba, 平均浓度分别为 30.4 、 8.9 和 $7.7\ \mu g \cdot L^{-1}$, Pb 和 Sr 的总态浓度较低, 平均约为 $3 \sim 4\ \mu g \cdot L^{-1}$, V 的最低, 约为 $1\ \mu g \cdot L^{-1}$ (图 1). 与总态浓度不同, 微量元素的溶解态浓度以 Zn 的最高, 浓度范围为 $1 \sim 150\ \mu g \cdot L^{-1}$, 平均为 $16.0\ \mu g \cdot L^{-1}$, 其次是 Al、Mn 和 Fe, 平均分别为 9.7 、 4.3 和 $3.6\ \mu g \cdot L^{-1}$, Ba、Sr 和 Pb 的溶解态浓度较低, 平均约为 $1 \sim 2\ \mu g \cdot L^{-1}$, V 的最低, 约为 $0.6\ \mu g \cdot L^{-1}$. 尽管青岛大气降水中 Al、Fe 的总态浓度最高, 但因溶解态浓度不高, 所以其溶解度最低, 对于 Al, 在 70% 降水样品中其溶解度低于 5%, 平均为 4.7%; 对于 Fe, 其溶解度基本在 1% ~ 15% 之间, 平均为 5.9%. Pb、Ba、Mn、Sr 的溶解度相近, Pb 和 Ba 的溶解度在多数样品中为 10% ~ 40%, 平均接近 30%, Mn 和 Sr 的溶解度在多数样品中为 20% ~ 60%, 平均约为 35%. 在青岛大气降水中 Zn 的总态浓度不高, 但溶解态浓度最高, 所以 Zn 的溶解度最高, 平均为 56%, V 的总态浓度和溶解态浓度均最低, 但其溶解度较高, 约为 55%. 朱敏等^[12]报道青岛大气气溶胶中 Al 和 Fe 的溶解度最低, $< 5\%$, Pb、Ba 的为 10% 左右, V、Mn 的为 20% ~ 30%, Zn 的溶解度最高约为 40%. 与气溶胶中微量元素的溶解度相比, 青岛大气降水中不同微量元素溶解度的高低顺序与气溶胶中的基本一致, 但降水中元素的溶解度高于相应元素在气溶胶中的溶解度, 这是由于降水是对大气气溶胶的湿清除、且微量元素在雨水中更易于溶解的缘故^[10,13].

与世界其它地区相比 (表 1), 青岛大气降水中微量元素的总态浓度明显低于受北非沙尘影响的地中海东北近岸的^[10], Al、Fe、Pb、V 等的总态浓度也低于土耳其降水中的^[5], 但青岛降水中 Zn 的总态浓度明显高于土耳其, 这可能与我国工业模式有

关, 大气中的 Zn 受到了金属冶炼和燃煤等人为污染源的影响^[14]. 与墨西哥降水相比, 青岛降水中 Al 的总态浓度较高, 但其他元素的总态浓度相差不大^[9]. 对溶解态微量元素而言, 青岛降水中 Al、Fe、Mn、Ba 的浓度与地中海东北近岸的基本相当, 但 Sr、Zn、Pb 的浓度明显低于地中海近岸的^[10]; 与土耳其降水相比, 青岛降水中溶解态 Al、Fe 的浓

度明显较低, 但 Zn 的浓度则较高^[5]; 与墨西哥降水相比, 青岛降水中各元素的浓度均较低. 青岛大气降水中 Al、Fe 的溶解度与地中海近岸的基本相当, 但 Mn、Ba、Sr、Zn 的溶解度则相对较低. 与土耳其^[5]和墨西哥^[9]降水相比, 青岛降水中各元素的溶解度也相对较低, 这可能与降水中微量元素的来源及 pH 等因素有关^[15].

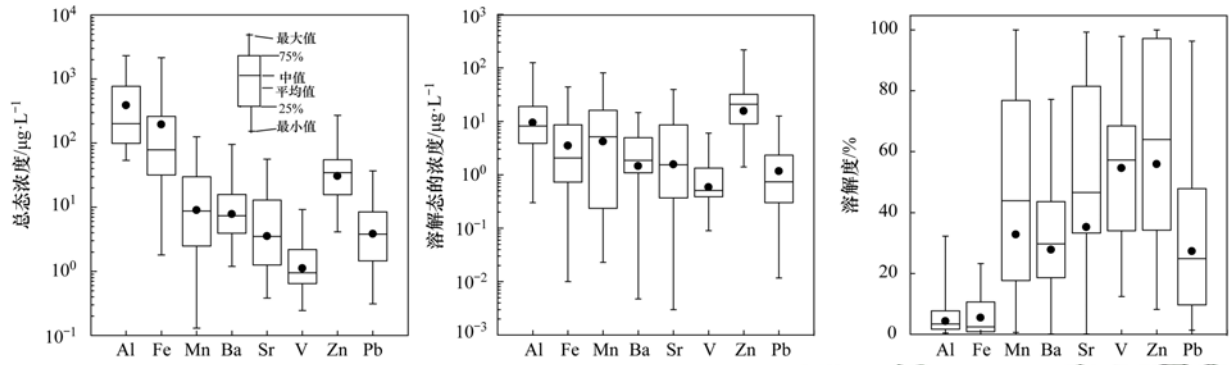


图1 青岛大气降水中微量元素的浓度及其溶解度

Fig. 1 Concentrations and solubility of trace elements in atmospheric precipitation in Qingdao

表1 青岛大气降水中微量元素的浓度及其溶解度与世界其他地区的比较

Table 1 Comparison of the trace elements concentrations and solubility in precipitation between in Qingdao and different regions of the worldwide												
元素	青岛 (pH=6.37)			地中海东北近岸 ^[10] (pH=6.2)			土耳其 ^[5] (pH=4.7)			墨西哥 ^[9] (pH=5.1)		
	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%
Al	385±557	9.7±14.7	4.7±4.0	484.5±49.5	6.48±1.07	4.8±12.4	980±2900	47±13	14±14	50.7±5.4	15.3±1.7	42.6±30.4
Fe	193±350	3.6±6.3	5.9±6.1	743.2±115	3.21±0.44	5.2±12.9	750±2370	31±40	17±16	—	—	—
Mn	8.9±14.8	4.3±10.4	33.2±38.1	19.03±2.55	3.23±0.25	40.6±25.1	—	—	—	9.64±1.3	8.3±1.3	79.7±18.5
Ba	7.7±7.1	1.8±2.4	28.2±22.2	5.14±0.64	1.63±0.16	42.3±26.3	—	—	—	—	—	—
Sr	3.5±5.9	1.6±4.5	35.6±34.5	15.6±2.52	12.6±2.35	74.2±22.4	—	—	—	—	—	—
V	1.1±0.9	0.6±0.7	55.0±24.3	—	—	—	2.22±4.06	0.92±1.0	61±26	5.1±1.0	4.8±1.0	85.8±14.4
Zn	30.4±18.9	16.0±25.1	56.3±43.4	50.2±6.06	36.9±5.54	62.6±33.8	0.03±0.03	0.02±0.03	43±29	—	—	—
Pb	3.8±3.4	1.2±1.9	27.7±24.1	11.36±0.81	5.07±0.73	—	19.1±37.6	3.3±5.1	40±35	2.5±0.3	1.6±0.3	58.67±29.1

2.2 青岛大气降水中微量元素的季节变化特征

2016-06~2017-05 观测期间, 青岛降水主要集中在 6~10 月, 夏、秋季节的降雨量约为冬、春季节的 2 倍左右(图 2). 降水中微量元素的总态浓度基本呈现冬、春季明显高于夏、秋季, 除 Zn 外, 微量元素的总态浓度冬、春季比夏、秋季一般高约 2~5 倍, Zn 的总态浓度没有明显的季节差异, 夏季略低, 秋、冬季略高. 与总态浓度的季节变化相似, 微量元素的溶解态浓度也基本呈现冬、春季明显高于夏、秋季, 但 V 的溶解态浓度季节差异不大, 夏季略低, 其他季节基本相当. 青岛降水中微量元素总态和溶解态浓度的这种季节变化趋势与降雨量的季节变化趋势相反, 表明大气降水中微量元素的浓度与降雨量有关^[16]. 夏、秋季降水量较大, 对大气

中微量元素的稀释效应明显较强, 而冬、春季降雨量较小, 且观测期间青岛春、冬季出现较多的霾等重污染天气, 因此, 冬春季较少降水对较重污染大气的湿清除作用, 使得降水中微量元素浓度明显增高.

青岛降水中微量元素的溶解度基本表现为春季的最高, 其他季节不同元素的变化特征不同. Al 和 Fe 的溶解度在夏、秋、冬季均 <5%, 平均而言冬季较低、夏秋季较高; Mn、Ba、Sr、Pb 和 Zn 的溶解度则在秋季或夏季最低, 在冬季较高; V 在不同季节均有较高的溶解度, 其溶解度季节变化与其他元素的不同. 青岛降水中各微量元素溶解度的季节变化特征, 可能与降水中所含酸组分的浓度大小、微量元素的来源及存在形态等因素有关^[17]. 酸化的

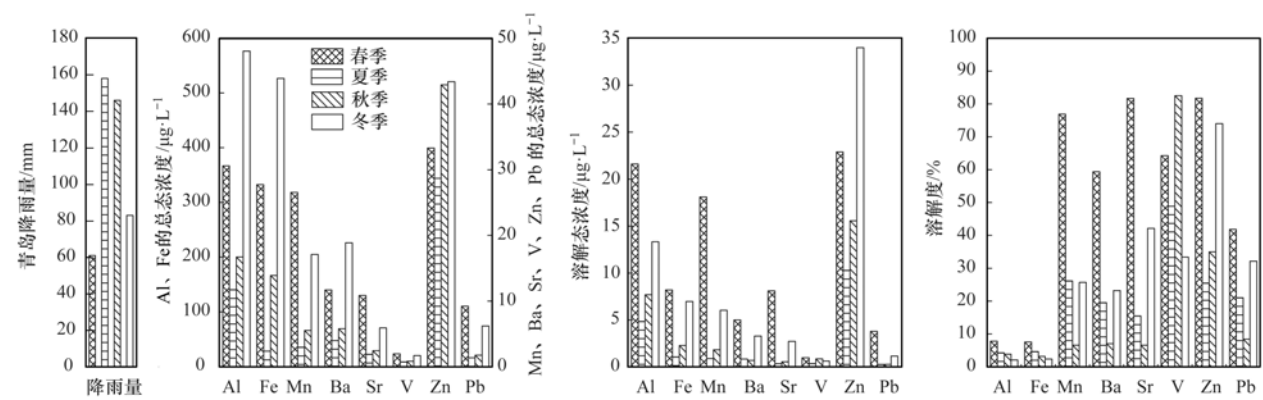


图2 青岛大气降水中微量元素浓度和溶解度季节变化

Fig. 2 Seasonal variations in the concentrations and solubility of trace elements in the atmospheric precipitation in Qingdao

环境可以促进微量元素溶解度的提高^[18]，青岛降水的 pH 以春季的最低，平均为 5.91，这可能是不同元素的溶解度基本在春季最高的原因。

2.3 连续降雨过程中微量元素的变化特征

观测期间，对降雨持续时间长、降雨量大的降雨过程采用分时段采集样品，本文对其中 3 场降雨时间 > 8 h、降雨量 > 10 mm 的降雨过程的前期和后期降雨样品进行对比分析(表 2)。结果显示，微量元素的总态浓度明显降低，其中降雨前后期 Al、Fe 的总态浓度降低幅度较大，降雨对其的湿清除效率达 50% ~ 90%，而 Zn、Pb 的降低幅度较小，一般在 10% ~ 40%。降雨对不同微量元素的湿清除效率不同可能与这些元素的粒径谱分布有关，孟亚等^[19]发现青岛大气气溶胶中 Al、Fe 总态浓度的峰值出现在 > 2.1 μm 粗粒子上，Zn、Pb 则出现在 < 2.1 μm 细粒子上，由于降雨对粗粒子的清除能力强于细粒子，因此降雨对 Al、Fe 的清除效率高于 Zn、Pb。降雨前后微量元素溶解态浓度也呈现降低趋势，但与总态浓度变化不同，

降雨对溶解态 Al、Fe 和 Zn、Pb 的清除效率基本相当，这可能是由于溶解态 Al、Fe 与溶解态 Zn、Pb 均主要分布在细粒子上的缘故^[18]。与浓度变化不同，前后期降雨中微量元素溶解度的变化在不同降雨过程中没有表现出一致的趋势，在 2016 年 7 月 15 日降雨的前后期，各元素溶解度均有明显降低；2017 年 1 月 7 日降雨的前后期，各元素溶解度均有明显升高；2016 年 12 月 21 日降雨的前后期，Al、Fe、Mn、Ba 等溶解度升高，而 Zn、Pb 的溶解度降低。不同降雨过程中微量元素溶解度的差异可能与降雨前后期 pH 的变化有关^[20]，2016 年 7 月 15 日降雨的前后期 pH 由 7.65 升至 8.26，pH 升高不利于元素溶解，因此该降雨后期元素溶解度均降低，2017 年 1 月 7 日降雨的前后期 pH 由 7.16 降至 6.40，pH 降低有利于元素的溶解，因此该场降雨后期元素溶解度均升高。2016 年 12 月 21 日降雨的前后期 pH 基本一致，这场降雨中微量元素溶解度的变化可能除 pH 外还有其他因素控制^[21]。

表 2 连续降水过程中微量元素浓度和溶解度的变化

Table 2 Variations in the concentrations and solubility of trace elements in the early and late precipitation during a continuous rainfall												
元素	2016-07-15, 降雨量 = 21 mm				2016-12-21, 降雨量 = 18 mm				2017-01-07, 降雨量 = 18 mm			
	前期 pH = 7.65		后期 pH = 8.26		前期 pH = 6.26		后期 pH = 6.32		前期 pH = 7.16		后期 pH = 6.40	
	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%	总态浓度 /μg·L ⁻¹	溶解度 /%
Al	193.7	4.0	67.8	3.2	674.9	1.7	81.4	4.8	489.6	0.6	61.5	3.0
Fe	31.9	5.9	16.6	5.4	275.4	2.1	35.5	7.1	129.5	0.3	5.80	7.2
Mn	2.48	22.5	0.13	17.7	7.80	26.7	3.47	47.8	8.17	5.3	0.84	14.2
Ba	3.93	27.7	2.98	0.6	12.40	15.0	2.60	39.2	21.12	5.2	6.46	35.1
Sr	1.25	47.8	0.94	31.9	3.42	40.1	0.97	36.3	1.56	33.3	0.94	43.9
V	0.75	56.0	0.69	13.1	0.94	18.0	0.59	25.4	0.80	33.6	0.38	44.9
Zn	28.9	21.0	17.1	8.2	18.1	77.5	15.7	35.3	25.5	17.1	12.9	18.3
Pb	1.26	35.5	0.72	4.2	5.48	62.1	3.92	16.0	2.10	27.2	0.90	33.0

2.4 影响大气降水中微量元素溶解度的因素

2.4.1 微量元素的来源

富集因子(EF)可用于判断大气降水中元素的来源^[22],若EF等于或接近1时,表明该元素主要受地壳源影响,EF越大时,表明该元素受到人为污染源影响的程度越大.本文以Al为地壳源参比元素,按照:

$$EF = (c_X/c_{Al})_{\text{降水}} / (c_X/c_{Al})_{\text{地壳}}$$

式中, $(c_X/c_{Al})_{\text{降水}}$ 和 $(c_X/c_{Al})_{\text{地壳}}$ 分别为大气降水和地壳中某一元素X与Al的比值,计算青岛大气降水中各元素的EF.结果显示,Fe的EF接近1,表明其主要来自地壳源,青岛大气降水中Fe和Al总态浓度有很好的相关关系($r > 0.9$, $P < 0.01$)也表明了这一点;Mn、Sr、V、Ba的EF基本在2~8之间,存在轻微富集,表明这些元素除受到地壳源的影响,还一定程度受人为源的影响;Zn、Pb的EF均 > 100 ,表明其主要来自人为源的贡献.

主要来自地壳源的Al、Fe在大气降水中的溶解度均较低,一般低于10%,平均约为5%(图3);受地壳源和人为源共同影响的元素在降水中的溶解度较高,如Mn、Ba和Sr的溶解度多数处于25%~45%,平均为35%左右,同样受地壳源和人为源共同影响的V溶解度相对更高,多数处于40%~70%,平均约为55%;主要来自人为源的元素一般认为有更大的溶解度^[23],如Zn的溶解度多数处于40%~90%,平均约为56%,但同样主要受人为源影响的Pb溶解度却相对较低,多数处于10%~50%,平均约为30%.这些结果表明大气降水在地

壳元素的溶解度普遍较低,受人为源影响的元素溶解度相对较高,但微量元素溶解度的大小并不总是与其受到的人为源影响程度相关.在对青岛大气气溶胶微量元素溶解度的研究中也观测到了类似的结果^[12],这可能与元素本身的矿物组成和存在形态及大气化学环境等因素有关^[24,25].

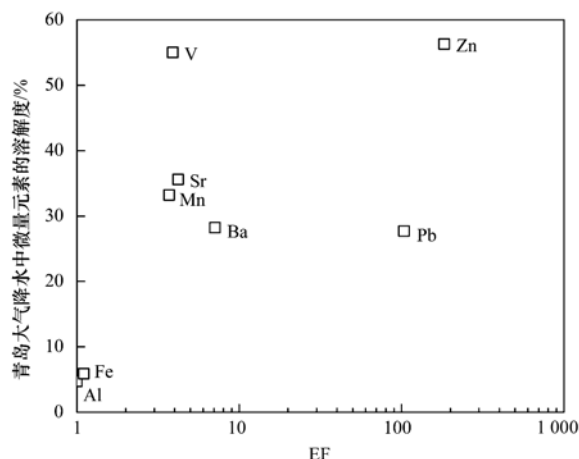


图3 青岛大气降水中微量元素溶解度与富集因子(EF)的关系

Fig. 3 Relationship between the solubility and enrichment factor (EF) of trace elements in precipitation in Qingdao

2.4.2 降水的pH

大气中酸性污染物混合发生的酸化反应可以改变降水的pH,这可能是降水中微量元素溶解度增加的重要原因之一^[26]. SO_4^{2-} 和 NO_3^- 是大气降水中主要的酸性离子,其主要来自汽车尾气和化石燃料燃烧等排放的 SO_2 、 NO_x 酸性气态前体物的二次转化反应^[27].如图4所示,青岛大气降水中溶解态微

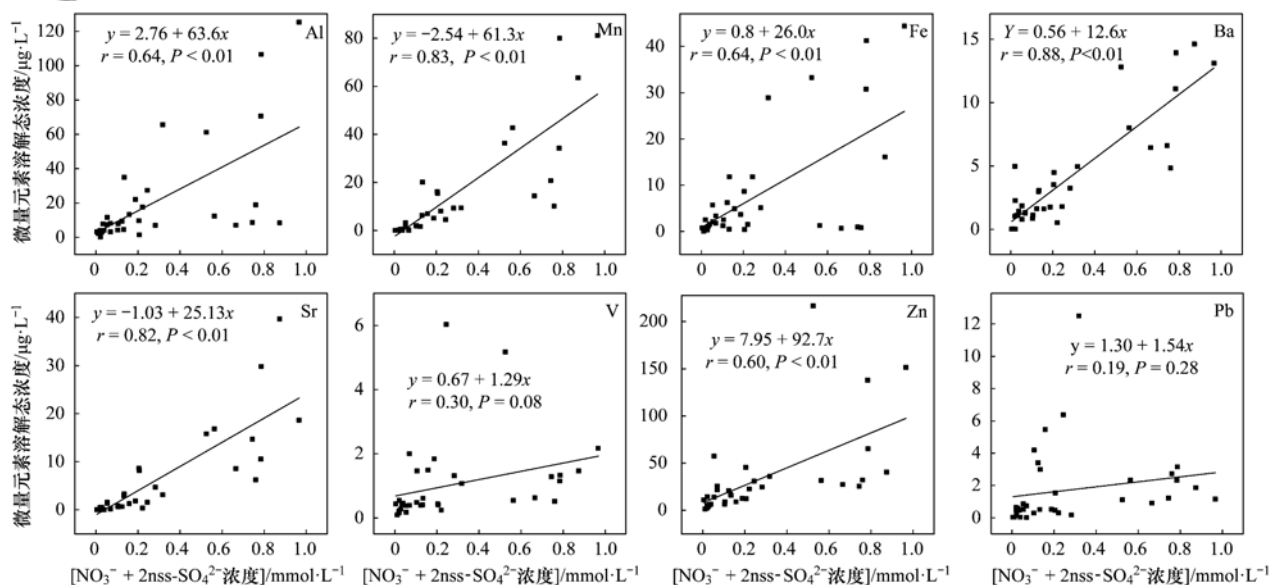


图4 青岛大气降水中溶解态微量元素与酸性组分的关系

Fig. 4 Correlations of soluble trace elements with acid species in precipitation collected from Qingdao

量元素与 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 均存在一定的正相关关系。由于海盐对降水中的 SO_4^{2-} 也有一定的贡献, 因此, 为反映人为污染的影响, 文中采用非海盐 SO_4^{2-} (nss-SO_4^{2-}) 的浓度 ($[\text{nss-SO}_4^{2-}] = [\text{SO}_4^{2-}] - 0.2455 \times [\text{Na}^+]$, 0.2455 为海水中 SO_4^{2-} 与 Na^+ 的质量比值)。分析溶解态微量元素与 $[\text{NO}_3^- + 2\text{nss-SO}_4^{2-}]$ 之间的关系, 发现除浓度较低的 V 和 Pb 外, 其他微量元素均与酸性离子存在显著正相关关系 (r 为 0.6 ~ 0.9, $P < 0.01$) (图 4), 这表明大气酸化过程可能对青岛降水中微量元素溶解度产生一定影响。

进一步分析青岛降水中微量元素溶解度和 pH

的关系 (图 5), 发现微量元素溶解度与降水的 pH 均呈现一定负相关关系 ($P < 0.05$), 表明微量元素溶解度随降水酸度的增加而增加, 但降水 pH 变化对不同元素溶解度的促进程度不同, 如当 pH 由 7 降至 5 时, 地壳元素 Al、Fe 的溶解度大致由 4% 升至 8%, 而人为元素 Zn 的溶解度约由 50% 升至 75%。Garcia 等^[20] 对墨西哥降水的研究中也发现 pH < 5 的降水中各微量元素的溶解度明显较高, Sholkovitz 等^[28] 报道撒哈拉降水 pH 约为 8 时 Fe 的溶解度仅为 0.5%, 而在 pH 为 4~5 的降水中 Fe 的溶解度达到 27%。

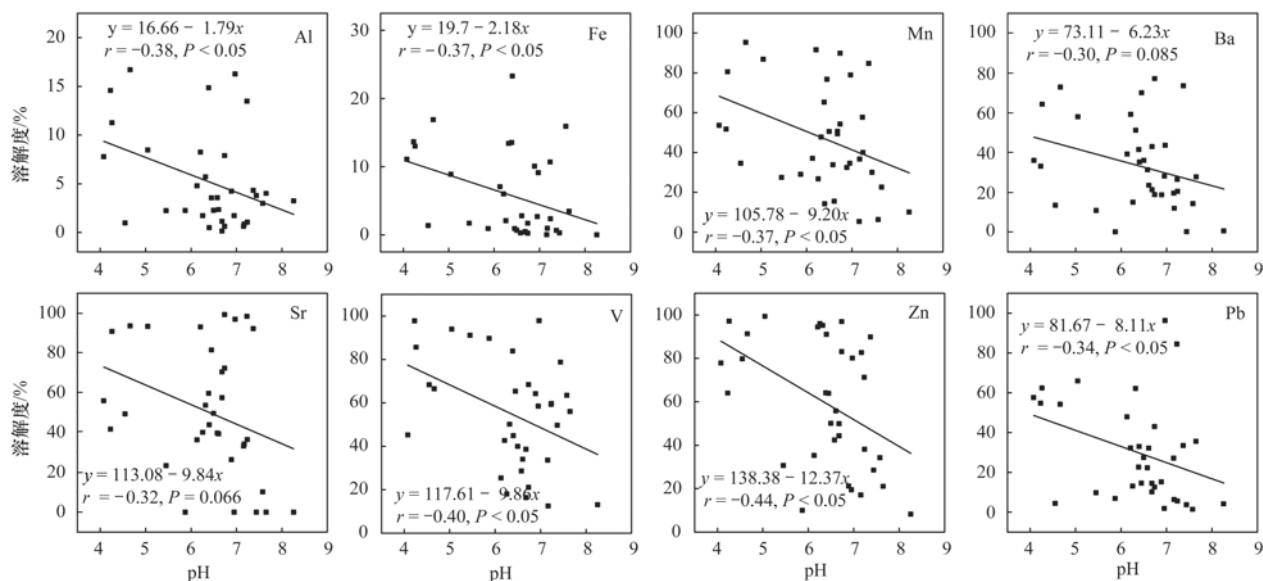


图 5 青岛大气降水中微量元素溶解度与 pH 关系

Fig. 5 Correlations of trace element solubility with pH in precipitation collected from Qingdao

3 结论

(1) 青岛降水中微量元素的总态浓度以 Al 和 Fe 的最高, 其次是 Zn、Mn、Ba、Pb 和 Sr 的总态浓度较低, V 的最低; 溶解态浓度以 Zn 的最高, 其次是 Al、Mn、Fe、Ba、Sr 和 Pb 的溶解态浓度较低, V 的最低。季节变化显示不同元素总态和溶解态浓度基本呈现冬、春季明显高于夏、秋季。

(2) 青岛降水中微量元素的溶解度以 Al 和 Fe 的最低, 为 5% 左右, Pb 和 Ba 的为 10% ~ 40%, Mn、Sr 的为 20% ~ 60%, Zn 和 V 的溶解度最高, 均值约为 55%。微量元素溶解度的季节变化基本呈现春季最高, 其他季节不同元素呈现不同的变化特征。

(3) 降雨持续过程中, 微量元素的总态和溶解态浓度均呈现明显降低, 降低幅度与气溶胶中微量

元素粒径谱分布有关。降雨前后元素溶解度的变化趋势在不同降雨过程中不一致, pH 变化可能是控制降雨前后元素溶解度升高或降低的主要因子。

(4) 降水中主要来自地壳源的元素溶解度普遍较低, 受人为源影响的元素溶解度相对较高, 但元素溶解度与其受人为源影响的程度并不总是相关。青岛降水中溶解态微量元素与酸性离子存在正相关关系, 溶解度和 pH 值存在负相关关系, 表明降水的酸度可能是控制微量元素溶解度的主要因子。

参考文献:

- [1] Paytan A, Mackey K R M, Chen Y, *et al.* Toxicity of atmospheric aerosols on marine phytoplankton[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2009, **106**(12): 4601-4605.
- [2] Al-Khashman O A, Jaradat A Q, Salameh E. Five-year monitoring study of chemical characteristics of Wet atmospheric precipitation in the southern region of Jordan[J]. Environmental

- Monitoring and Assessment, 2013, **185**(7): 5715-5727.
- [3] 许卉, 张经. 山东半岛近岸大气降水中的铝[J]. 海洋科学, 2002, **26**(8): 64-67.
- Xu H, Zhang J. Observations on aluminum in atmospheric wet depositions along the coast of Shandong Peninsula[J]. Marine Sciences, 2002, **26**(8): 64-67.
- [4] 刘素美, 黄薇文, 张经, 等. 青岛地区大气沉降物的化学成分研究: I. 微量元素[J]. 海洋环境科学, 1991, **10**(4): 21-28.
- [5] Kaya G, Tuncel G. Trace element and major ion composition of wet and dry deposition in Ankara, Turkey[J]. Atmospheric Environment, 1997, **31**(23): 3985-3998.
- [6] Manousakas M, Papaefthymiou H, Eleftheriadis K, *et al.* Determination of water-soluble and insoluble elements in PM_{2.5} by ICP-MS[J]. Science of the Total Environment, 2014, **493**: 694-700.
- [7] Hsu S C, Wong G T F, Gong G C, *et al.* Sources, solubility, and dry deposition of aerosol trace elements over the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2010, **120**(1-4): 116-127.
- [8] Buck C S, Landing W M, Resing J A. Pacific Ocean aerosols: Deposition and solubility of iron, aluminum, and other trace elements[J]. Marine Chemistry, 2013, **157**(12): 117-130.
- [9] Báez A, Belmont R, García R, *et al.* Chemical composition of rainwater collected at a southwest site of Mexico City, Mexico[J]. Atmospheric Research, 2007, **86**(1): 61-75.
- [10] Özsoy T, Örnektekin S. Trace elements in urban and suburban rainfall, Mersin, Northeastern Mediterranean[J]. Atmospheric Research, 2009, **94**(2): 203-219.
- [11] 贲孝宇, 石金辉, 仇帅, 等. 青岛大气气溶胶中铁的溶解度及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2015, **35**(1): 65-71.
- Ben X Y, Shi J H, Qiu S, *et al.* Solubility of iron in atmospheric aerosols and related influence factors in Qingdao, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, **35**(1): 65-71.
- [12] 朱敏, 石金辉, 贲孝宇, 等. 青岛大气气溶胶中微量元素溶解度及影响因素[J]. 中国环境科学, 2016, **36**(11): 3245-3252.
- Zhu M, Shi J H, Ben X Y, *et al.* Solubility of trace elements in atmospheric aerosols and determination factors in Qingdao, China[J]. China Environmental Science, 2016, **36**(11): 3245-3252.
- [13] Koçak M, Kubilay N, Herut B, *et al.* Trace metal solid state speciation in aerosols of the Northern Levantine Basin, East Mediterranean[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 2007, **56**(3): 239-257.
- [14] 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.
- [15] Kamani H, Hoseini M, Safari G H, *et al.* Study of trace elements in wet atmospheric precipitation in Tehran, Iran[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2014, **186**(8): 5059-5067.
- [16] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, **15**(2): 951-972.
- [17] Chester R, Murphy K J T, Lin F J, *et al.* Factors controlling the solubilities of trace metals from non-remote aerosols deposited to the sea surface by the 'dry' deposition mode[J]. Marine Chemistry, 1993, **42**(2): 107-126.
- [18] Ravelo-Pérez L M, Rodríguez S, Galindo L, *et al.* Soluble iron dust export in the high altitude Saharan Air Layer[J]. Atmospheric Environment, 2016, **133**: 49-59.
- [19] 孟亚, 李鹏志, 曹婉婉, 等. 青岛大气气溶胶中微量元素浓度及溶解度的粒径谱分布[J]. 中国环境科学, 2017, **37**(3): 851-858.
- Meng Y, Li P Z, Cao W W, *et al.* Size distributions of particulate trace elements in mass concentration and their size-dependent solubility in the atmosphere in Qingdao, China[J]. China Environmental Science, 2017, **37**(3): 851-858.
- [20] Garcia R, Ma C D T, 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): 6088-6100.
- [21] 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**(32): 4507-4515.
- [22] Chester R, Nimmo M, Alarcon M, *et al.* Defining the chemical character of aerosols from the atmosphere of the Mediterranean-Sea and surrounding regions[J]. Oceanologica Acta, 1993, **16**(3): 231-246.
- [23] Guo L, Chen Y, Wang F J, *et al.* Effects of Asian dust on the atmospheric input of trace elements to the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2014, **163**: 19-27.
- [24] Chance R, Jickells T D, Baker A R. Atmospheric trace metal concentrations, solubility and deposition fluxes in remote marine air over the south-east Atlantic[J]. Marine Chemistry, 2015, **177**: 45-56.
- [25] Sedwick P N, Sholkovitz E R, Church T M. Impact of anthropogenic combustion emissions on the fractional solubility of aerosol iron: Evidence from the Sargasso Sea[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2007, **8**(10): Q10Q06.
- [26] Shi Z B, Krom M D, Jickells T D, *et al.* Impacts on iron solubility in the mineral dust by processes in the source region and the atmosphere: A review[J]. Aeolian Research, 2012, **5**: 21-42.
- [27] Koçak M, Kubilay N, Herut B, *et al.* Dry atmospheric fluxes of trace metals (Al, Fe, Mn, Pb, Cd, Zn, Cu) over the Levantine Basin: a refined assessment[J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(38): 7330-7341.
- [28] Sholkovitz E R, Sedwick P N, Church T M, *et al.* Fractional solubility of aerosol iron: Synthesis of a global-scale data set[J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta, 2012, **89**: 173-189.

CONTENTS

Air Pollutant Emission Inventory from Iron and Steel Industry in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and Its Impact on PM _{2.5}	DUAN Wen-jiao, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (1445)
Simulation of the Spatio-temporally Resolved PM _{2.5} Aerosol Mass Concentration over the Inland Plain of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	HAO Jing, SUN Cheng, GUO Xing-yu, <i>et al.</i> (1455)
Effect of Relative Humidity on Particulate Matter Concentration and Visibility During Winter in Chengdu	LIU Fan, TAN Qin-wen, JIANG Xia, <i>et al.</i> (1466)
Vertical Distributional Characteristics of Inorganic Ions of PM _{2.5} at Mt. Huashan, Inland China	CAO Cong, WANG Ge-hui, WU Can, <i>et al.</i> (1473)
Analysis of the Composition of Atmospheric Fine Particles (PM _{2.5}) Produced by Burning Fireworks	XIE Rui-jia, HOU Hong-xia, CHEN Yong-shan (1484)
Chemical Composition Characteristics of PM _{2.5} Emitted by Medium and Small Capacity Coal-fired Boilers in the Yangtze River Delta Region	XU Jian, HUANG Cheng, LI Li, <i>et al.</i> (1493)
Emission Factors of Heavy Metals in Size-resolved Particles Emitted from Residential Coal Combustion	YAN Qin, KONG Shao-fei, LIU Hai-biao, <i>et al.</i> (1502)
Distribution of Oxalate in Atmospheric Aerosols and the Related Influencing Factors in Qingdao, During Winter and Spring	ZHANG Shuai, SHI Jin-hui, YAO Xiao-hong, <i>et al.</i> (1512)
Concentrations and Solubility of Trace Elements in Atmospheric Precipitation in Qingdao	LI Qian, SHI Jin-hui, LI Peng-zhi, <i>et al.</i> (1520)
Occurrence and Gas-particle Partitioning of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Air of Liaodong Bay	ZHANG Yu-feng, SONG Yong-gang, TIAN Jin, <i>et al.</i> (1527)
Analysis of Sources, Pollution Characteristics, and Human Exposure to Atmospheric New Halogenated Flame Retardants in Selected Areas	LI Qi-lu, YANG Kong, LI Jun, <i>et al.</i> (1537)
Contamination Characterization and Human Exposure Levels to Polybrominated Diphenyl Ethers in Indoor and Outdoor Air in Industrial Park of Suzhou City	WANG Jun-xia, GU Hai-dong, ZHANG Zhan-en, <i>et al.</i> (1544)
Effect of Air Pollution on the Cold Disease in Shanghai	YANG Si-xu, MA Yu-xia, ZHOU Jian-ding, <i>et al.</i> (1552)
Fluorescent Dissolved Organic Matter and Its Correlation with Water Quality in a Urban River: A Case Study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo	CAO Chang-li, LIANG Meng-qi, HE Gui-ying, <i>et al.</i> (1560)
Relationship Between Landscape Pattern and Water Quality in the Ebinur Lake Region	CAO Can, ZHANG Fei, Ayinigeer·Yalikun, <i>et al.</i> (1568)
CH ₄ Fluxes During the Algal Bloom in the Pengxi River	QIN Yu, ZHANG Yu-yang, LI Zhe, <i>et al.</i> (1578)
Dynamic Variations and Sources of Nitrate During Dry Season in the Lijiang River	MIAO Ying, ZHANG Cheng, XIAO Qiong, <i>et al.</i> (1589)
Heavy Metal Pollution of the Drinking Water Sources in the Lujiang River Basin, and Related Health Risk Assessments	ZHANG Qing-hua, WEI Yong-zhu, CAO Jian-hua, <i>et al.</i> (1598)
Characteristics of Phosphorus Fractions and Phosphate Diffusion Fluxes of Sediments in Cascade Reservoirs of the Huangbai River	LIU Jia, LEI Dan, LI Qiong, <i>et al.</i> (1608)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Baiyangdian Lake	GAO Qiu-sheng, JIAO Li-xin, YANG Liu, <i>et al.</i> (1616)
Simulating the Fate of Typical Organochlorine Pesticides in the Multimedia Environment of the Pearl River Delta	GAO Zi-wen, XU Yue, YI Ru-han (1628)
Mechanisms and Efficiencies of Removal of PPCPs by Pilot River Water Bypass Treatment Process	LI Li, ZHU Bing, BAI Yao, <i>et al.</i> (1637)
Chlorination of Naproxen: Removal, Transformation and Risk Assessment	FAN Xin-xin, DU Er-deng, LI Jia-qi, <i>et al.</i> (1645)
Removing Typical Odorants in Drinking Water by Vacuum Ultraviolet Combined with Chlorine	SUN Xin, ZHANG Yi, SHI Lu-xiao, <i>et al.</i> (1654)
Degradation of Triclosan by Heat Activated Persulfate Oxidation	JIANG Meng-di, ZHANG Qing-yue, JI Yue-fei, <i>et al.</i> (1661)
Adsorption of Tetracycline on Simulated Suspended Particles in Water	XU Long-feng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (1668)
Characteristics and Performance of Embedded ANAMMOX Bacteria in Treating Saline Wastewater	SHAN Xiao-jing, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (1677)
Enhanced Nitrogen Removal of ANAMMOX Treating Saline Wastewater With Betaine Addition	YU De-shuang, WU Guo-dong, LI Jin, <i>et al.</i> (1688)
Pilot-scale Experiment on Enrichment of Nitrifying Activated Sludge and Its Application in Enhancing a Wastewater Biological Treatment System Against Ammonia Shocking Loads	SHENG Xiao-lin, CUI Can-can, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (1697)
Effect of Step Feed on Denitrifying Phosphorus and Nitrate Removal in a Modification of the Two Sludge A ² /O-BAF System	NAN Yan-bin, PENG Yong-zhen, ZENG Li-yun, <i>et al.</i> (1704)
Achieving Partial Nitrification in a Continuous-flow Aerobic Granular Sludge Reactor at Different Temperatures Through Ratio Control	LIANG Dong-bo, BIAN Wei, KAN Rui-zhe, <i>et al.</i> (1713)
Mechanism of Action of Activated Sludge Properties in Nitrogen Removal by Endogenous Denitrification Through an Intelligent Aeration-controlled A/O Process	XU Min-yang, HU Zhan-bo, ZHANG Sui-sheng, <i>et al.</i> (1720)
Effect of Temperature on the Performance and Microbial Community Structure in an Integrated Anaerobic Fluidized-bed Membrane Bioreactor Treating Benzothiazole Wastewater	LI Yue, HU Qi, GAO Da-wen (1731)
Removal of Antibiotics During In-situ Sludge Ozone-reduction Process	WANG Lu, BEN Wei-wei, LI Yan-gang, <i>et al.</i> (1739)
Effect of Zero Valent Iron on the Horizontal Gene Transfer of Tetracycline Resistance Genes During Anaerobic Sludge Digestion Process	YANG Fan, XU Wen-li, QIAN Ya-jie, <i>et al.</i> (1748)
Effects of Environmental Factors on the Synergy of Functional Bacteria in Completely Autotrophic Granular Sludge	CHEN Xi, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (1756)
Microbiological Characteristics of a Post Solid-Phase Denitrification Biofilter Process	ZHANG Qian, JI Fang-ying, XU Xuan (1763)
Aerobic Denitrification and Microbial Community Shift in SBR Bioaugmented with Strains YH01 and YH02	CHEN Hai-sheng, CAO Gang, ZHANG Di, <i>et al.</i> (1773)
Performance, Sludge Characteristics, and the Microbial Community Dynamics of Bulking Sludge Under Different Nitrogen and Phosphorus Imbalances	HE Xue-meng, DING Li-li, ZHANG Lu-lu, <i>et al.</i> (1782)
Degradation Characteristics and Metabolic Pathway of a Pyrene-Degrading <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain	LI Xiang, ZHANG Xue-ying, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (1794)
Driving Factors of the Dynamics of Microbial Community in a Dam of Copper Mine Tailings	LI Cui, JING Ju-hui, LIU Jin-xian, <i>et al.</i> (1804)
Effects of Reclamation on Soil Nutrients and Microbial Activities in the Huixian Karst Wetland in Guilin	HUANG Ke-chao, SHEN Yu-yi, XU Guang-ping, <i>et al.</i> (1813)
Effects of the Farmland-to-Forest/Grassland Conversion Program on the Soil Bacterial Community in the Loess Hilly Region	CHEN Meng-li, ZENG Quan-chao, HUANG Yi-mei, <i>et al.</i> (1824)
Insight into the Mechanism of Feammox in the Surface Soils of a Riparian Zone	DING Bang-jing, LI Zheng-kui, ZHU Hong-jie, <i>et al.</i> (1833)
Soil Degradation-Associated Microbial Community Structure Changes in an Alpine Meadow Under Tibetan Pig Herding	ZHAN Peng-fei, XIAO De-rong, YAN Peng-fei, <i>et al.</i> (1840)
Characteristics of Iron Plaque and Its Heavy Metal Enrichment in Typical Mangrove Plants in Shenzhen Bay, China	SHEN Xiao-xue, LI Rui-li, CHAI Min-wei, <i>et al.</i> (1851)
Spatial Distribution of DDTs and PCBs in Wild Fish from Hong Kong Coastal Areas and Potential Human Health Risk Assessment	SU Yang, BAO Lian-jun, ZENG Eddy Y (1861)
Pollution Characteristics of PAHs in Soil from a Remote Mountain Wetland-Dajihu Lake, Shengnongjia	HU Tian-peng, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1872)
Migration and Transformation of Mercury in Unsubmerged Soil and Sediment at One Typical Forest Reservoir in Southwest China	SUN Tao, MA Ming, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (1880)
Accumulation of Cd and Its Risks in the Soils of the Xijiang River Drainage Basin in Guangxi	SONG Bo, YANG Zi-jie, ZHANG Yun-xia, <i>et al.</i> (1888)
Effects of Long-term Fertilization Regimes on As Accumulation in Upland Red Earth and the Crops Growing on It	ZHANG Rong, YU Guang-hui, LI Ya-qing (1901)
Effects of a Tribasic Amendment on Cadmium and Arsenic Accumulation and Translocation in Rice in a Field Experiment	GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, <i>et al.</i> (1910)
Quantitative Relationship Between Paddy Soil Properties and Cadmium Content in Rice Grains	WANG Meng-meng, HE Meng-yuan, SU De-chun (1918)
Effect of Ca-bentonite on Cu and Zn Forms in Compost and Soil, and Their Absorption by Chinese Cabbage	ZHAO Jun-chao, WANG Quan, REN Xiu-na, <i>et al.</i> (1926)
Effects of Short-term Exogenous Nitrogen and Carbon Input on Soil Respiration Under Changing Precipitation Pattern	HE Yun-long, QI Yu-chun, PENG Qin, <i>et al.</i> (1934)
Effects of Simulated Precipitation Reduction on Soil Respiration in a Soybean-Winter Wheat Rotation Cropland	WANG Zhao-hui, CHEN Shu-tao, SUN Lu, <i>et al.</i> (1943)
Seasonal Variation in Nitric Oxide Emission from an Agricultural Headwater Ditch in the Hilly Purple Soil Area and the Factors Influencing Emission	TIAN Lin-lin, REN Guang-qian, ZHU Bo (1952)
Effects of Seasonal Asymmetric Warming on Soil CO ₂ Release in Karst Region	TANG Guo-yong, ZHANG Chun-hua, LIU Fang-yan, <i>et al.</i> (1962)