

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锟, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氮氨异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

1992 ~ 2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素

郑秋萍, 王宏*, 陈彬彬, 隋平, 林文

(福建省气象科学研究所, 福州 350001)

摘要: 利用 1992 ~ 2012 年福州市和厦门市的酸雨观测资料、天气形势和大气污染物浓度资料, 分析酸雨变化特征及酸雨可能的影响因素。结果表明, 福州市非酸雨和酸雨频率分别为 38.1% 和 61.9%, 厦门市分别为 40.6% 和 59.4%; 福州市年均降水 pH 值在 4.1 ~ 5.5 之间, 2007 年之后酸雨污染减轻, 厦门市 2006 年之后酸雨污染减轻; 冬、春季酸雨污染重, 夏、秋季节酸雨污染轻。降水强度能改变降水的酸性程度; 福州市在东南(SE)、西南(SW)、西(W)、西北(NW)风向下酸雨污染较严重, 厦门市在东北(NE)、SW、W、NW 风向下酸雨污染较重; 变性冷高压下酸雨污染最重, 台风(热带辐合带)及其外围的天气形势下酸雨污染最轻; 福州市大气污染物 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 浓度与降水 pH 值呈负相关关系。

关键词: 酸雨; 天气形势; 降水 pH; 福州市; 厦门市

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3644-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.10.002

Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012

ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, SUI Ping, LIN Wen

(Fujian Institute of Meteorological Science, Fuzhou 350001, China)

Abstract: Based on the observed acid rain data, synoptic situations and mass concentrations of atmospheric pollutants data from 1992 to 2012, the temporal variation characteristics and the impact factors of acid rain were analyzed in Fuzhou and Xiamen. The results showed that acid rain and non-acid rain accounted for 38.1% and 61.9% respectively in Fuzhou, 40.6% and 59.4% respectively in Xiamen. The annual average pH was 4.1-5.5 in Fuzhou. Acid rain pollution alleviated after 2007 in Fuzhou, and alleviated after 2006 in Xiamen. Acid rain was more serious in winter and spring than in summer and autumn. Precipitation intensity could affect the acidity of rain. Acid rain was observed more serious in southeast, southwest, west and northwest wind in Fuzhou, and more serious in northeast, southwest, west and northwest wind in Xiamen. Acid rain was most severe under the condition of transformed surface cold high, while most light under the conditions of typhoon (intertropical convergence zone) and outside of typhoon (intertropical convergence zone). There was a negative correlation between the mass concentrations of atmospheric pollutants, such as SO_2 , NO_2 , PM_{10} , and the pH of rain in Fuzhou.

Key words: acid rain; synoptic situation; pH of rain; Fuzhou; Xiamen

酸雨指降水 pH 值小于 5.6 的雨、雪、雹等, 首先由英国化学家 Robert Angus Smith 提出。欧美一些国家对酸雨的研究从 1950 s 开始逐渐重视, 并于 1970 s 先后建立了大气酸沉降观测网^[1~3], 随后东亚地区也建立了酸沉降监测网^[4], 中国环境保护部和气象局分别于 1982 年和 1989 年开始建立全国酸雨监测网^[5~7]。由于工业化和城市化发展, 污染物排放增加, 中国的酸雨逐渐成为一个严重的环境问题, 全国酸雨范围呈扩大趋势, 北方酸雨范围扩大明显^[8], 中部至东北的月均降水 pH 值从 1985 ~ 1995 年间下降了 0.3 ~ 0.8^[9]。Huang 等^[10]指出上海市 2005 年年均降水 pH 值为 4.49, 酸雨频率为 71%, 降水酸度比 1997 年上升了 15 倍。

酸雨的形成机制复杂, 影响因素众多, 不仅与致酸前体物质有关, 也与气象条件关系密切^[11], 气象条件影响酸性污染物的扩散和输送、化学转化、以

及清除过程, 国外学者对降水化学或酸雨的成因分析中, 除了对离子组成、污染物的排放及输送研究^[12~15], 气象条件方面的成因也受到广泛关注^[16~19]。中国也有不少学者开展了各地酸雨分布特征及其影响因素分析^[20~22]。王文兴等^[23]指出我国北方沿海的酸雨主要来自朝鲜半岛和日本, 东南沿海地区则既受到东部大陆的影响, 也受到日本和韩国的影响。冯文等^[24]指出海南岛北部地区的致酸物多属远距离输送所致, 酸雨的形成不仅与气象条件有关, 还与海南岛的地形地貌有关。

近年来, 福建省的酸雨受到不少学者的关注, 如谢美云对三明市酸、碱降水的成因进行了分析^[25],

收稿日期: 2014-02-25; 修订日期: 2014-05-26

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2012Y0009)

作者简介: 郑秋萍(1984 ~), 女, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为大气环境, E-mail: qp_zheng@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wh1575@163.com

赵卫红分析了福建省主要城市降水粒子特征及沉降量现状^[26]。林长城等分析了福州气象条件与酸雨的关系^[27]以及福建九仙山自然保护区云雾水、雨水的酸度分析^[28]。这些研究成果介绍了酸雨现状并为酸雨防控起到推动作用,但在考虑酸雨成因时较多地考虑局地污染因素。福州和厦门市是福建省两个重点城市,规模大、人口集中、经济快速发展,福州地貌上属盆地,厦门是海岛城市,本研究利用福州市和厦门市 1992~2012 年共 21 a 的酸雨观测资料,分析两个城市酸雨变化特征及其与气象条件和污染物的相关关系,以期相关部门开展防治酸雨污染的工作提供决策依据,并为开展酸雨预测预警提供客观依据。

1 材料与方法

酸雨资料(包括每次降水的 pH、降水量)采用 1992~2012 年福建省气象局在福州市和厦门市酸雨监测站的数据(酸雨监测仪器设置在气象观测站内)。当降水 pH 值小于 5.6 时称为酸雨,小于 4.5 时称为强酸雨,介于 4.5 和 5.6 之间称为弱酸雨,大于等于 5.6 时称为非酸雨。对酸雨的统计分析采用的是文献[29]中的加权平均方法。气象部门对酸雨观测业务的规定在 2006 年前后有所不同,2006 年开始对当日 08:00~次日 08:00(北京时)所有降水过程的样品采集后合并为一个样品,进行 pH 值、K 值和降水量的测量,而 2006 年之前酸雨观测是在降水日根据降水过程逐个进行样品采集,对同个降水日的各降水过程分别测量 pH 值、K 值和降水量,为保证资料前后一致,对 2006 年之前的观测资料,利用加权平均法对同个降水日的多个降水过程进行日平均处理,求得日均 pH 值和 K 值,日降水量为各降水过程的降水量总和。

天气形势分型采用文献[30]中的方法,以 850 hPa 高空图为主,结合东亚地面图和 500 hPa 高空图作判别,选取 20°~35°N、110°~125°E 为关键区,将天气形势分为 8 种:冷高压脊、变性冷高压、低涡切变、高空槽、暖区辐合、副热带高压及边缘、台风(热带辐合带)、台风(热带辐合带)外围。主导风向为 850 hPa 的风向。天气形势和主导风向资料均为 2006~2012 年。

大气污染物资料为福州市 2005 年 8 月~2012 年 3 月每日逐时的 SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 浓度资料,为与酸雨观测采样日界一致,SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 日均浓度值均为当日 08:00~次日 08:00 的平均值。

SO₂ 和 NO₂ 排放量、汽车保有量等数据来自福建省、福州市、厦门市的统计年鉴或环境质量公报^[31~33]。

2 结果与分析

2.1 酸雨变化特征分析

2.1.1 酸雨出现频率

1992~2012 年福州市和厦门市各等级酸雨频率分布相似。福州市非酸雨占 38.1%,酸雨出现频率达到 61.9%,其中弱酸雨占 42.1%,强酸雨占 19.8%。厦门市非酸雨占 40.6%,酸雨占 59.4%,其中弱酸雨占 40.2%,强酸雨占 19.2%。与长江以南大部分城市相比,福州市与厦门市酸雨出现频率相对较低,且强酸雨频率也低^[8]。

2.1.2 酸雨年变化特征

图 1 是福州市和厦门市 1992~2012 年逐年年均降水 pH、强酸雨频率、酸雨频率、累计酸雨量和累计降水量,从图 1(a)可见,福州市降水 pH 值在 4.1~5.5 之间,达到酸雨或强酸雨量级,pH 最小值出现在 2003 年,最大值出现在 1993 年,2007 年之后,福州市年均降水 pH 值平稳增大,即酸雨污染减轻。酸雨频率在 38.9%~86.5% 之间,最低频率出现在 1997 年,最高频率在 2008 年,2008 年之后,酸雨频率逐年下降;强酸雨频率变化趋势和酸雨频率相似,在 5%~48% 之间,近几年强酸雨频率也在逐年下降。累计降水量和酸雨量变化规律基本一致,但 2002 年之后累计降水量和酸雨量的差值减小,即累计酸雨量占累计降水量的比例增高,而非酸雨量所占比例降低。从图 1(b)可见,厦门市降水 pH 在 2006 年前后变化明显,2006 年之前除 1999 年以外,年均降水 pH 均低于 5.0,而在 2006 年之后均高于 5.0。酸雨频率和强酸雨频率也都有较明显的降低,2006 年之后酸雨频率大多低于 50%,强酸雨频率基本低于 10%。累计降水量和酸雨量的差值也在 2006 年之后增大,即累计酸雨量占累计降水量的比例降低,而非酸雨量所占比例增高。总体来看,厦门市 2006 年之后酸雨污染减轻。

由图 1 可见,福州市和厦门市酸雨污染变化总体趋势相似,近年来酸雨污染均有减轻的趋势,这与 SO₂ 的排放量减少有关,随着“一控双达标”和“总量控制”措施的实施,2006 年开始福建全省 SO₂ 排放量明显降低(图略)。而随着汽车保有量的增加,NO₂ 的排放量增加,据统计,至 2012 年 NO₂ 已超过 SO₂,成为我国排放量最大的气体污染物,而 NO₂ 是

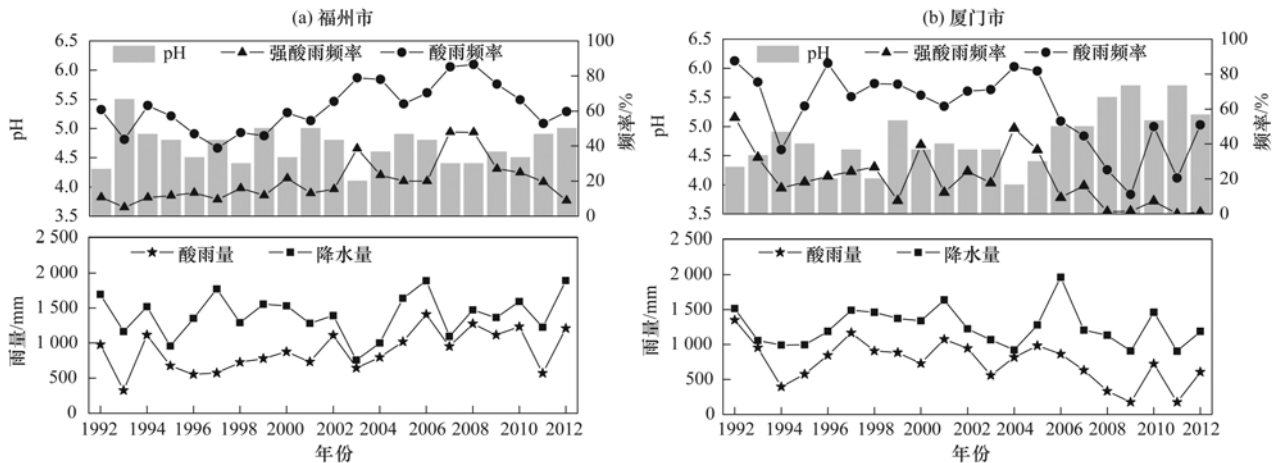


图1 福州市和厦门市降水 pH、(强)酸雨频率、累计酸雨量和降水量逐年变化

Fig. 1 Annual variation of pH, (heavy) acid rain frequency, acid rainfall and rainfall in Fuzhou and Xiamen

导致酸雨污染的一种重要的气体污染物。

2.1.3 酸雨月变化特征

图2是福州市和厦门市月均降水 pH、强酸雨频率、酸雨频率、累计酸雨量和降水量。从中可见,福州市月均降水 pH 值 1~6 月较小,7~12 月较大,最小值出现在 3 月和 4 月,为 4.3,最大值出现在 7 月和 10 月,为 5.0。酸雨频率在 7~10 月较低,最低出现在 8 月,只有 39.8%,11 月~次年 6 月较高,3 月最高,为 84%;强酸雨频率 5~10 月较低,7 月最低,只有 6.3%,11 月~次年 4 月强酸雨频率较高,最高出现在 3 月,为 38.7%。累计酸雨量和降水量变化规律相似,3~9 月酸雨量和降水量均较大,10 月~次年 2 月均较小。厦门市月均降水 pH 在 4.0~5.3 之间,最小值出现在 3 月,最大值出现在 11 月。酸雨频率和强酸雨频率变化规律相似,12 月~次年 6 月较高,7~11 月较低,酸雨频率在 35.5%~81.6% 之间,强酸雨频率在 2%~41.6% 之间,各月

之间强酸雨频率差别较大。累计降水量和酸雨量 4~9 月较大,酸雨频率较高的月份,累计酸雨量和降水量较接近,而酸雨频率低的月份,累计酸雨量比累计降水量小得多。

根据气候特点,福建省四季划分为春季 3~6 月,夏季 7~9 月,秋季 10~11 月,冬季 12 月~次年 2 月。由图 2 可见,福州市和厦门市冬、春季酸雨污染比夏、秋季节更严重,春季甚至达到强酸雨污染。季节差异与天气形势和气象因子有关,冬、春季福建省多出现暖区辐合、高空槽、变性冷高压的天气形势,在这些天气形势下, SO_2 和 NO_2 等污染物不易扩散^[30],且从降水来看,冬、春季降水强度小,污染物不易稀释,所以 pH 值较低,而夏、秋季节福建省多出现副热带高压及其边缘、低涡切变、台风(热带辐合带)及其外围的天气形势,这些天气形势有利于 SO_2 和 NO_2 等污染物扩散,且夏季降水以阵性为主、强度大,有利于酸性污染物的稀释,pH 值较大。

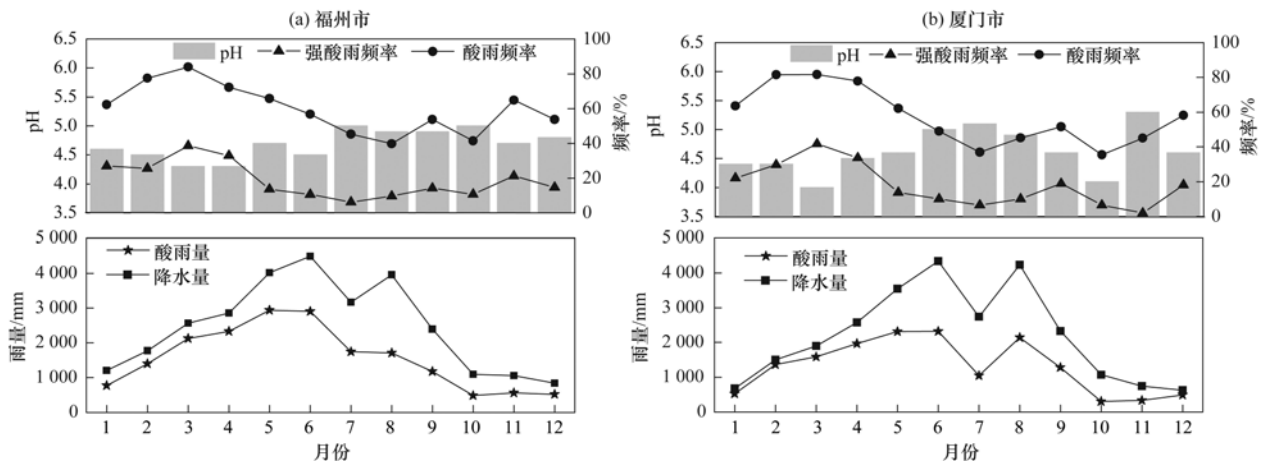


图2 福州市和厦门市降水 pH、(强)酸雨频率、累计酸雨量和降水量月变化

Fig. 2 Monthly variation of pH, (heavy) acid rain frequency, accumulative acid rainfall and rainfall in Fuzhou and Xiamen

2.2 酸雨的影响因素分析

2.2.1 降水强度

在做降水酸度分析时只对 1.0 mm 以上的降水样本进行分析,将降水样本分成 6 个等级,如表 1 所示,计算了不同等级降水强度下的 pH、酸雨频率、强酸雨频率,从中可见,福州市和厦门市都是随着降水强度增强 pH 值增大,小雨时 pH 值最小,酸雨污染最重,特大暴雨情况下,福州市 pH 值为 6.5,未出现酸雨,厦门市为 5.9,酸雨频率只有 14.3%. 除特大暴雨外,酸雨频率随着降水强度的变化没有明显的差别,而强酸雨频率随着降水强度增大总体呈下

降趋势,大暴雨时福州市强酸雨频率只有 5.3%,厦门只有 4.5%. 从降水 pH、酸雨频率及强酸雨频率的特征可知,降水强度的不同并不能改变降水的酸性特征,但是强度大的降水能稀释污染物,降低降水的酸性程度. 表 1 结果与林长城等^[27]在福州市的统计结果相类似,但由于资料来源(文献[27]资料来源于环保部门的监测站)及时长不同,两者在数值上有所差异,且本研究中所用资料没有 1.0 mm 以下的降水样本,这可能导致了小雨量级的统计结果与文献[27]中小雨(雨量为 2 ~ 10 mm)及毛毛雨(雨量为 0.1 ~ 2 mm)的结果有所差异.

表 1 福州市和厦门市 1992 ~ 2012 年不同等级降水的 pH、(强)酸雨频率

日降水量/mm	福州市				厦门市			
	样本数	pH	酸雨频率/%	强酸雨频率/%	样本数	pH	酸雨频率/%	强酸雨频率/%
1 ~ 10 (小雨)	1 035	4.3	58.0	19.1	836	4.3	56.9	18.5
10 ~ 25 (中雨)	482	4.6	66.8	22.2	371	4.4	64.4	20.2
25 ~ 50 (大雨)	255	4.7	70.2	20.8	195	4.7	60.0	20.0
50 ~ 100 (暴雨)	81	4.8	56.8	13.6	85	4.6	62.4	23.5
100 ~ 200 (大暴雨)	19	5.0	68.4	5.3	22	5.0	63.6	4.5
≥ 200 (特大暴雨)	3	6.5	0	0	7	5.9	14.3	0

2.2.2 主导风向

酸雨的形成一方面受到局地酸性污染物的影响,另一方面也受到高空酸性污染物大气输送的影响,考虑到 1 200 ~ 1 500 m 高度为大气污染物的主要平流高度^[21],为分析风向对降水酸度的影响,考虑到大气污染物的输送和累积需要一个时间过程,选择 2006 ~ 2012 年降水前 1 日和降水当日 08:00 或 20:00 的 850 hPa 主导风向资料,将风向分为 8 个方位,各种风向下的降水 pH 值、酸雨频率和强酸雨频率如图 3 所示.

福州市 2006 ~ 2012 年降水样本数一共 725 个,最多的为西南风(SW,333 个),其次是东南风(SE,

109 个),北风(N)时降水样本数最少(16 个). 由图 3(a1)和 3(a2)可见,降水前 1 日和降水当日的各种风向下降水 pH 值均小于 5.0,当风向为 SE、SW、W、NW 时,降水 pH 值较小,其中 NW 最小为 4.3. 酸雨频率在各个风向均超过 55%,SE、SW、W、NW 这 4 个风向下降酸雨频率高于其它风向,均在 70% 以上,且强酸雨频率也较高. 综合降水 pH、酸雨频率和强酸雨频率可见在 SE、SW、W、NW 这 4 个风向下降福州市酸雨污染较严重.

厦门市 2006 ~ 2012 年降水样本数一共 577 个,和福州市一样,最多的为西南风(SW,299 个),其次是东南风(SE,78 个),北风(N)时降水样本数最少

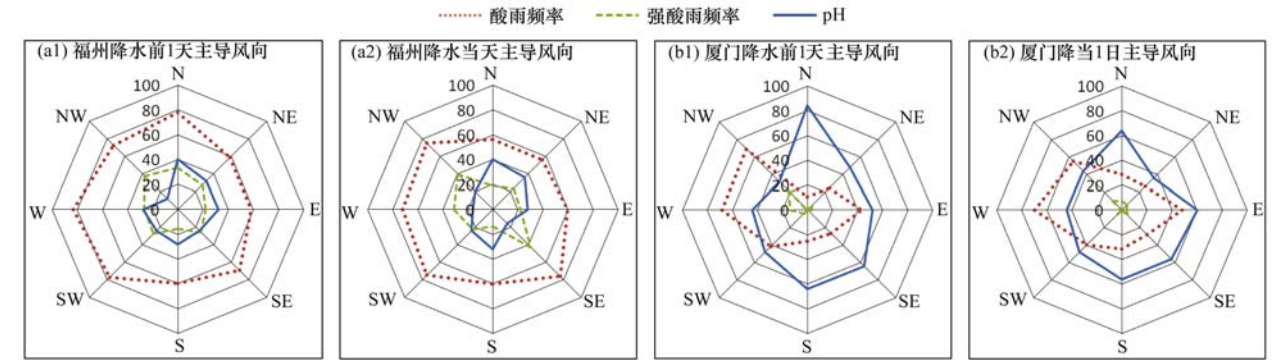


图 3 2006 ~ 2012 年福州市和厦门市降水前 1 日及降水当日不同主导风向下的降水 pH、(强)酸雨频率

Fig. 3 The pH and (heavy) acid rain frequency with different wind directions of the day before rainy day and the right rainy day in Fuzhou and Xiamen in 2006-2012

(14 个). 由图 3(b1) 和 3(b2) 可见, 降水前 1 日和降水当日各风向降水 pH 值基本上都大于 5.0, 在 8 种风向中, NE、SW、W、NW 风向下降水 pH 较小, 且 SW、W、NW 风向下酸雨频率较高, E 风向下降水 pH 较大, 但酸雨频率较高, 约达到 45%. 各风向下强酸雨频率均较低, 最高为 NW 风向, 按降水前 1 日风向统计的强酸雨频率为 21.8%, 按降水当日统计为 10.3%. 对比福州市的降水 pH、酸雨频率和强酸雨频率, 厦门市 2006~2012 年酸雨污染比福州市更轻.

2.2.3 天气形势

福州市 2006~2012 年在低涡切变和高空槽天气形势下降水样本最多, 分别占 29.2% 和 22.4%; 其次是暖区辐合, 占 12.4%; 副热带高压及边缘、冷高压脊天气形势下降水样本数最少, 分别只占 6.2% 和 5.5%. 图 4 是福州市和厦门市各种天气形势下的降水 pH、(强)酸雨频率, 由图 4(a) 可见, 在变性冷高压下降水 pH 值最低, 只有 4.4, 其次是冷高压脊和高空槽 4.5, 低涡切变、暖区辐合、副热带

高压及边缘均为 4.6, 台风(热带辐合带)及其外围降水 pH 值最高, 分别为 5.0 和 5.2. 酸雨频率在高空槽和低涡切变天气形势控制下较高, 均超过 75%, 在台风(热带辐合带)及其外围控制下较低, 但也接近 50%. 强酸雨频率在冷高压脊、变性冷高压和高空槽天气形势下较高, 达到 34%~40%, 台风(热带辐合带)及外围强酸雨频率约为 10%.

厦门市降水样本最多的天气形势也是低涡切变和高空槽, 分别占 29.3% 和 22.0%, 冷高压脊降水样本最少, 只占 5.4%. 由图 4(b) 可见, 变性冷高压和冷高压脊下降水 pH 值最低, 为 4.6, 其次是低涡切变、高空槽和暖区辐合, 台风(热带辐合带)及其外围的降水 pH 值最高, 分别为 5.9 和 5.8. 酸雨频率在冷高压脊和变性冷高压下较高, 接近 60%, 强酸雨频率也超过 20%, 而副热带高压及边缘、台风(热带辐合带)及其外围控制下酸雨频率都未超过 15%, 且没有出现强酸雨. 和福州市相比, 厦门市 2006~2012 年降水 pH 值较高, 酸雨频率和强酸雨频率较低, 即厦门市酸雨污染较轻.

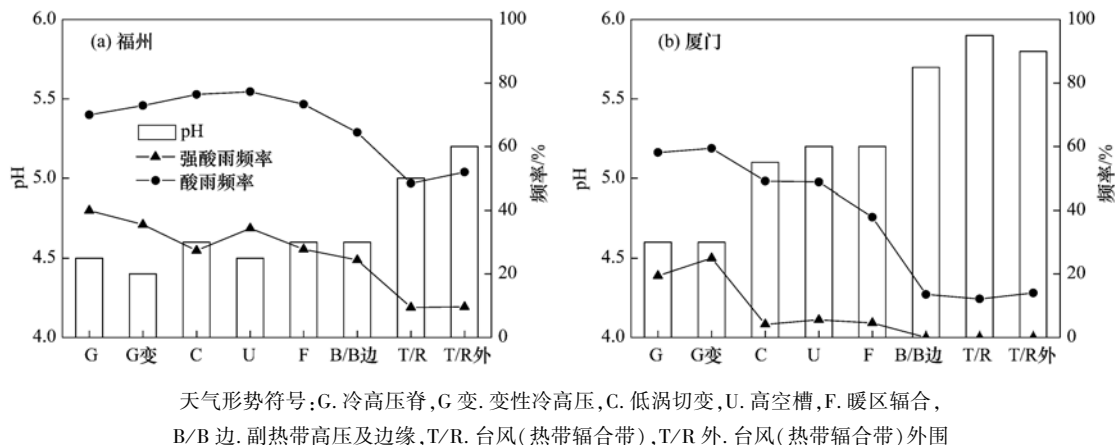


图 4 2006~2012 年福州市和厦门市各种天气形势下的降水 pH、(强)酸雨频率

Fig. 4 The pH and (heavy) acid rain frequency under different synoptic situations in Fuzhou and Xiamen in 2006-2012

福州市和厦门市降水 pH 值、酸雨和强酸雨频率虽然在各天气形势下有所差异, 但相对趋势相似. 在台风(热带辐合带)及其外围天气形势控制下, 由于海上极少人为污染排放源, 因此在这两种天气形势下福州和厦门不受外来污染物输送影响, 且由于易出现大风天气, 扩散条件好, 局地大气污染物浓度低, 且降水强度大, 能较好地稀释酸性物质, 所以酸雨污染轻. 在副热带高压及边缘控制下大气热力和动力条件好, 有利于大气污染物垂直输送和水平扩散, 降水类型多为午后热雷雨, 降水强度大但降水时间短, 溶入雨滴的酸性物质少, 酸雨污染也较轻. 低涡切变、高空槽、暖区辐合天气形势主要以西南风

为主导风, 在西南暖湿气流影响下, 一方面将人为污染源排放集中的广东省的大气污染物输送至福州和厦门, 另一方面气压场较弱、低层湿度大, 大气污染物不易扩散, 且降水类型多以强度适中、持续时间为主, 有利于酸性物质溶入雨滴, 导致酸雨污染较重. 变性冷高压包括高压底部和高压后部两种, 在高压底部控制下, 冷空气势力减弱, 大气层结稳定, 不利于大气污染物的垂直输送和水平扩散, 且主导风向为偏东气流, 受偏东气流引导, 前期已入海的华东区域(浙江、江苏一带)的大气污染物, 由海上输送至福州和厦门, 导致酸雨污染严重. 高压后部控制时高压主体入海, 天气回暖、湿度增加, 大气扩散

能力弱,易造成大气污染物累积,导致酸雨污染严重. 冷高压脊多出现在秋末和冬季,以偏北风为主,北方的大气污染物受偏北气流的引导输送至福州和厦门,且冷高压脊天气形势下降水量较小,酸性物质不易稀释,这两个因素导致冷高压脊天气形势下酸雨污染较重.

2.2.4 大气污染物

由于缺少厦门市大气污染物浓度资料,只利用福州市 2005 年 8 月~2012 年 3 月降水前 1 日和降水当日的 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 资料分析大气污染物对降水酸度的影响,结果如表 2. 从中可知,降水前 1 日 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 与降水 pH 的相关系数分别为 -0.29、-0.25 和 -0.16,相关系数均较小. 强酸雨下 3 种大气污染物浓度均最高,非酸雨下 3 种大气污染物浓度均最低,弱酸雨下大气污染物浓度介于强酸雨和非酸雨之间. 降水当日 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 与降水 pH 的相关系

数分别为 -0.33、-0.23 和 -0.21,其中降水当日的 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 与降水 pH 的相关系数大于降水前 1 日,而 $\rho(\text{NO}_2)$ 小于降水前 1 日. 降水当日各等级降水下的 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{PM}_{10})$ 平均值小于降水前 1 日的,降水当日的 $\rho(\text{NO}_2)$ 与降水前 1 日相当,说明降水对 SO_2 和 PM_{10} 的冲刷作用较大,而对 NO_2 的冲刷作用小.

由于缺乏降水的开始和结束时间的资料,表 2 中的结果是根据降水前 1 日和降水当日的大气污染物日均浓度计算的,而且所用大气污染物浓度资料是近地面的浓度,所得的相关系数不高,但也能说明大气污染物在一定程度上影响了降水的酸度,3 种污染物中 SO_2 的影响更大. 由于云内和云下冲刷的大气污染物主要是在高空,所以高空的大气污染物对酸度影响更大,进一步研究需根据降水的开始和结束时间,计算降水时段前后近地面和高空的大气污染物浓度对降水酸度的影响.

表 2 大气污染物与降水 pH 的关系及各酸度降水下的大气污染物浓度¹⁾

污染物	降水前 1 日的大气污染物				降水当日的大气污染物			
	与 pH 相关系数	各酸度降水下的浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$			与 pH 相关系数	各酸度降水下的浓度/ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$		
		强酸雨	弱酸雨	非酸雨		强酸雨	弱酸雨	非酸雨
SO_2	-0.29 *	0.019	0.015	0.012	-0.33 *	0.017	0.013	0.010
NO_2	-0.25 *	0.049	0.043	0.037	-0.23 *	0.049	0.045	0.038
PM_{10}	-0.16 *	0.072	0.065	0.057	-0.21 *	0.069	0.057	0.051

1) * 表示显著相关性在 0.01 水平

3 结论

(1)1992~2012 年福州市非酸雨和酸雨频率分别为 38.1% 和 61.9%,厦门市分别为 40.6% 和 59.4%. 福州市年均降水 pH 值在 4.1~5.5 之间,2007 年之后酸雨污染减轻,厦门市 2006 年之后酸雨污染减轻. 福州市月均降水 pH 值最小为 4.3,最大为 5.0,厦门市月均降水 pH 在 4.0~5.3 之间,冬、春季酸雨污染比夏、秋季节更严重.

(2)降水强度的不同并不能改变降水的酸性特征,但能改变酸性程度. 福州市降水前 1 日和降水当日的各种风向下降水 pH 值均小于 5.0,SE、SW、W、NW4 个风向下酸雨污染较严重;厦门市 NE、SW、W、NW 风向下酸雨污染较重. 福州市变性冷高压下降水 pH 值最低,只有 4.4,厦门市变性冷高压和冷高压脊下降水 pH 值最低,为 4.6,两城市在台风(热带辐合带)及其外围的降水 pH 值均为最高.

(3)福州市降水前 1 日 $\rho(\text{SO}_2)$ 、 $\rho(\text{NO}_2)$ 、

$\rho(\text{PM}_{10})$ 与降水 pH 的相关系数分别为 -0.29、-0.25 和 -0.16,降水当日的相关系数分别为 -0.33、-0.23 和 -0.21,大气污染物浓度在一定程度上影响了降水的酸度.

参考文献:

[1] www.emep.int[EB/OL].
[2] http://nadp.sws.uiuc.edu[EB/OL].
[3] Galloway J N, Likens G E, Edgerton E S. Acid precipitation in the northeastern United States: pH and acidity[J]. Sciences, 1976, **194**(4266): 722-724.
[4] www.eanet.cc[EB/OL].
[5] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(5): 323-329.
[6] Ding G A, Xu X B, Fang X M, et al. Current status and future of acid rain in China[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, **42**(24): 2076-2080.
[7] 丁国安, 徐晓斌, 王淑凤, 等. 中国气象局酸雨网基本资料数据集及初步分析[J]. 应用气象学报, 2004, **15**(增刊): 85-94.
[8] 赵艳霞, 侯青. 1993-2006 年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, **66**(6): 1032-1042.
[9] Terada H, Ueda H, Wang Z F. Trend of acid rain and

- neutralization by yellow sand in east Asia – a numerical study [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(3): 503-509.
- [10] Huang K, Zhuang G S, Xu C, *et al.* The chemistry of the severe acidic precipitation in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Research*, 2008, **89**(1-2): 149-160.
- [11] 樊琦, 范绍佳, 钟流举, 等. 华南地区典型酸雨过程气象条件的数值模拟[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(3): 279-283.
- [12] Sanusi A, Wortham H, Millet M, *et al.* Chemical composition of rainwater in Eastern France [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(1): 59-71.
- [13] Zhang M Y, Wang S J, Wu F C, *et al.* Chemical compositions of wet precipitation and anthropogenic influences at a developing urban site in southeastern China [J]. *Atmospheric Research*, 2007, **84**(4): 311-322.
- [14] Aas W, Shao M, Jin L, *et al.* Air concentrations and wet deposition of major inorganic ions at five non-urban sites in China, 2001-2003 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(8): 1706-1716.
- [15] Kulshrestha U C, Kulshrestha M J, Sekar R, *et al.* Chemical characteristics of rainwater at an urban site of south-central India [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 3019-3026.
- [16] Beverland I J, Crowther J M, Srinivas M S N, *et al.* The influence of meteorology and atmospheric transport patterns on the chemical composition of rainfall in south-east England [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, **32**(6): 1039-1048.
- [17] Singh B, Nohert M, Zwack P. Rainfall acidity as related to meteorological parameters in Northern Quebec [J]. *Atmospheric Environment*, 1987, **21**(4): 825-842.
- [18] Avila A, Alarcon M. Relationship between precipitation chemistry and meteorological situation at a rural site in NE Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(11): 1663-1677.
- [19] Pio C A, Salgueiro M L, Nunes T V, *et al.* Seasonal and air-mass trajectory effects on rainwater quality at the south-western European border [J]. *Atmospheric Environment*, 1991, **25**(10): 2259-2266.
- [20] 石春娥, 邱明燕, 张爱民, 等. 安徽省酸雨分布特征和发展趋势及其影响因子[J]. *环境科学*, 2010, **31**(6): 1675-1681.
- [21] 蒲维维, 张小玲, 徐敬, 等. 北京地区酸雨特征及影响因素[J]. *应用气象学报*, 2010, **21**(4): 464-472.
- [22] 邱明燕, 石春娥, 张浩, 等. 合肥市酸雨变化特征及其影响因子[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(6): 1329-1338.
- [23] 王文兴, 刘红杰, 张婉华, 等. 我国东部沿海地区酸雨来源研究[J]. *中国环境科学*, 1997, **17**(5): 387-392.
- [24] 冯文, 李天富, 吴春娃, 等. 海南岛北部地区酸雨的天气影响因素及污染源分析[J]. *环境科学研究*, 2009, **22**(6): 643-649.
- [25] 谢美云. 三明市酸、碱降水成因研究[J]. *中国环境监测*, 1999, **15**(3): 8-11.
- [26] 赵卫红. 福建省主要城市降水离子特征及沉降量现状分析[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2008, **3**(3): 19-24.
- [27] 林长城, 林祥明, 邹燕, 等. 福州气象条件与酸雨的关系研究[J]. *热带气象学报*, 2005, **21**(3): 330-336.
- [28] 林长城, 赵卫红, 蔡义勇, 等. 福建九仙山自然保护区云雾水、雨水的酸度分析[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2007, **36**(6): 622-626.
- [29] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [30] 郑秋萍, 王宏, 林长城, 等. 海峡西岸沿海城市群大气污染物浓度特征及其与天气形势的关系[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(2): 356-363.
- [31] 福建省统计局. 福建统计年鉴: 1995-2012[R].
- [32] 福建省环境状况公报: 1995-2012[R].
- [33] 厦门市统计局. 厦门经济特区年鉴: 2001-2012[R].

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行