

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第2期

Vol.35 No.2

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

我国环境空气中颗粒物达标统计要求研究 王帅,丁俊男,王瑞斌,李健军,孟晓艳,杨彬,林宏 (401)

北京城区 PM_{2.5} 中致癌重金属季节变化特征及其来源分析 陶俊,张仁健,段菁春,荆俊山,朱李华,陈忠明,赵岳,曹军骥 (411)

北京地区冬春 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 污染水平时空分布及其与气象条件的关系 赵晨曦,王云琦,王玉杰,张会兰,赵冰清 (418)

北京市 PM_{2.5} 可吸入颗粒物反演及其时空分布分析 王艳慧,肖瑶 (428)

杭州市春季大气超细颗粒物粒径谱分布特征 谢小芳,孙在,杨文俊 (436)

春节期间南京市大气气溶胶粒径分布特征 王红磊,朱彬,沈利娟,刘晓慧,张泽锋,杨洋 (442)

南京市大气颗粒物中有机碳和元素碳粒径分布特征 吴梦龙,郭照冰,刘凤玲,刘杰,卢霞,姜琳娟 (451)

忻州市环境空气 PM₁₀ 中有机碳和元素碳污染特征分析 史美鲜,彭林,刘效峰,牟玲,白慧玲,刘凤娟,杨花 (458)

广州某工业区大气中 PCDD/Fs 含量水平及其季节性变化特征 青亮,苏原,苏青,张素坤,任明忠 (464)

燃煤电厂锅炉 PM_{2.5} 排放危害度评价模型建立及案例分析 史妍婷,杜谦,高建民,边昕,王知涛,董鹤鸣,韩强,曹阳 (470)

中国南海大气降水化学特征 肖红伟,龙爱民,谢露华,肖化云,刘丛强 (475)

临安本底站酸雨长期观测特征分析 李正泉,马浩,毛裕定,冯涛 (481)

北京城区大气氮湿沉降特征研究 贺成武,任玉芬,王效科,毛宇翔 (490)

烟雾箱与数值模拟研究苯和乙苯的臭氧生成潜势 贾龙,徐永福 (495)

祁连山老虎沟 12 号冰川积雪中飞灰颗粒物的特征 董志文,秦大河,秦翔,杜志恒,陈记祖,任贾文 (504)

生活垃圾填埋场作业面恶臭散发率研究 羌宁,王红玉,赵爱华,袁文祥,邵俊,陈檬 (513)

生物滴滤塔处理苯酚气体研究 何觉聪,黄倩茹,陈洲洋,叶杞宏,罗雨薇,魏在山 (520)

国 V 柴油机燃用丁醇-柴油混合燃料颗粒粒径分布特性试验研究 楼狄明,徐宁,范文佳,张涛 (526)

翻堆频率对猪粪条堆肥过程温室气体和氨气排放的影响 赵晨阳,李洪枚,魏源送,钟佳,郑嘉嘉,韩圣慧,万合锋 (533)

CuBr₂ 分解缓释-膜催化对零价汞的氧化性能研究 胡林刚,瞿赞,晏乃强,郭永福,谢江坤,贾金平 (541)

浙闽沿海岸域总溶解态无机锡的分布及影响因素研究 张许州,任景玲,刘宗广,樊孝鹏,刘诚刚,吴莹 (547)

基于双向算法的湖库允许纳污负荷量计算及案例 贾海峰,郭羽 (555)

北京平原区第四系地下水污染风险评价 郭高轩,李宇,许亮,李志萍,杨庆,许苗娟 (562)

不同季节辽河口营养盐的河口混合行为 张晋华,于立霞,姚庆祯,田琳 (569)

太湖南运河入湖河口沉积物氮素分布特征 马久远,王国祥,李振国,张佳,周锋,魏宏农,欧媛 (577)

亚热带地区潜流人工湿地木本植物筛选与净化潜力评价 陈永华,吴晓芙,郝君,陈明利,朱光玉 (585)

潜流人工湿地基质结构与水力特性相关性研究 白少元,宋志鑫,丁彦礼,游少鸿,何珊 (592)

凤眼莲对铜绿微囊藻生长及藻毒素与营养盐释放的影响 周庆,韩士群,严少华,宋伟,刘国锋 (597)

不同预氧化剂对长江原水氯(胺)化 DBPs 生成潜能的影响 田富箱,徐斌,荣蓉,陈英英,张天阳,朱贺振 (605)

溴化十六烷基吡啶改性沸石对水中菲的吸附作用 李佳,林建伟,詹艳慧,陈祖梅,王鹏钧 (611)

四环素光催化降解特性与选择性研究 宋晨怡,尹大强 (619)

微生物电解系统生物阴极的硫酸盐还原特性研究 符诗雨,刘广立,骆海萍,张仁铎,章莹颖 (626)

市政污水 A/DAT-IAT 系统中溶解性有机物表征与生态安全 杨赛,周启星,华涛 (633)

膜-生物反应器处理高盐废水膜面污染物特性研究 李彬,王志伟,安莹,吴志超 (643)

臭氧-曝气生物滤池组合工艺处理石化二级出水的试验研究 刘明国,吴昌永,周岳溪,高祯,王佩超,杨琦,董德 (651)

厌氧生物法处理果胶废水的研究 陈兵兵,杨春平,黎想,代传花,彭蓝艳 (657)

氧氟沙星在碳纳米管上的吸附机制研究 赵兴兴,于水利,王哲 (663)

平菇菌糠对废水中铜离子的生物吸附性能 胡晓婧,戴婷婷,顾海东,金羽,曲娟娟 (669)

基于流态化作用的吸附反应动力学和穿透特征 王君,王瑶,黄星,袁益龙,陈瑞晖,周航,周丹丹 (678)

广州城市污泥中重金属形态特征及其生态风险评价 郭鹏然,雷永乾,蔡大川,张涛,吴锐,潘佳翎 (684)

中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究 张小敏,张秀英,钟大洋,江洪 (692)

废旧电容器封存点土壤中的 PCBs 污染特征和健康风险评价 周玲莉,吴广龙,薛南冬,杨兵,李发生,丁琼,周丹丹,燕云仲,刘博,韩宝禄 (704)

深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究 章迪,曹善平,孙建林,曾辉 (711)

洋河流域万全段重金属污染风险及控制对策 谭冰,王铁宇,朱朝云,李奇峰,徐笠,吕永龙 (719)

施用组配固化剂对盆栽土壤重金属交换态含量及在水稻中累积分布的影响 曾卉,周航,邱琼瑶,廖柏寒 (727)

螯合剂复配对实际重金属污染土壤洗脱效率影响及形态变化特征 尹雪,陈家军,吕策 (733)

Pseudomonas sp. QJX-1 的锰氧化特性研究 周娜娜,柏耀辉,梁金松,罗金明,刘锐平,胡承志,袁林江 (740)

$n(\text{NO}_3^- - \text{N})/n(\text{NO}_2^- - \text{N})$ 对混培养菌与纯培养菌同步脱氮除硫的影响 陈子爱,陈会娟,魏本平,刘刚金,邓良伟,吴力斌 (746)

杭州市空气微生物群落碳代谢特征研究 龚婵娟,许晶,方治国,楼秀芹,欧阳志云 (753)

鼠李糖脂逆胶束体系中纤维素酶的后萃研究 赵艳鸽,袁兴中,黄华军,崔凯龙,彭馨,彭子原,曾光明 (759)

黄海常见鱼类体内汞含量的种内和种间差异研究 朱艾嘉,许战洲,柳圭泽,邓丽杰,方宏达,黄良民 (764)

3 种 PAEs 对蚯蚓的毒性作用和组织酶活性影响的研究 王艳,马泽民,吴石金 (770)

新型保水剂应用于土壤-小白菜系统的环境安全评价 李希,贺纪正,郑袁明,郑明兰 (780)

黄河三角洲翅碱蓬湿地硫化氢和羧基硫磺排放动态研究 李新华,郭洪海,杨丽萍,朱振林,孙晓青 (786)

农田土壤 N₂O 产生的关键微生物过程及减排措施 朱永官,王晓辉,杨小茹,徐会娟,贾炎 (792)

《环境科学》征订启事(691) 《环境科学》征稿简则(800) 信息(489,519,591,791)

临安本底站酸雨长期观测特征分析

李正泉, 马浩*, 毛裕定, 冯涛

(浙江省气候中心, 杭州 310017)

摘要: 利用临安本底站酸雨长期观测资料, 分析了该站酸雨年际变化及月变化, 并对其变化特征进行了归因, 同时分析了酸雨与气象因子之间的关系。结果表明, 1985~2012 年期间, 临安本底站的酸雨总体呈增加趋势, 且有 2 次明显加重和 2 次明显减弱过程。近 20 年酸雨的月变化表现为以 7 月为中心月份, 降水酸度及强酸雨发生频率向两侧月份增加, 弱酸雨发生频率向两侧月份减小。酸雨发生受降水强度、风速、风向影响, 小雨时强酸雨发生频率高、弱酸雨发生频率低, 而暴雨时弱酸雨发生频率高、强酸雨发生频率低; 随风速等级升高, 酸雨发生频率及强酸雨所占比重逐渐降低, 降水 pH 值逐渐升高; 弱酸雨发生日主导风向多集中于 S-W 扇区, 而强酸雨发生日主导风向更倾向于 N-E 扇区。临安本底站酸雨的月变化主要归因于降水量变化以及各月 SSE-WSW 和 NWN-ENE 风向扇区来风的增多和减少, 酸雨的年际变化可归因于江浙沪能源消耗量增加及重大环保措施实行的综合影响。

关键词: 酸雨; 长序列; pH 值; 年际变化; 临安本底站

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)02-0481-09

Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data

LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, FENG Tao

(Zhejiang Climate Center, Hangzhou 310017, China)

Abstract: Using long-term observation data of acid rain at Lin'an Regional Background Station (Lin'an RBS), this paper studied the interannual and monthly variations of acid rain, the reasons for the variations, and the relationships between acid rain and meteorological factors. The results showed that interannual variation of acid rain at Lin'an RBS had a general increasing trend in which there were two obvious intensifying processes and two distinct weakening processes, during the period ranging from 1985 to 2012. In last two decades, the monthly variation of acid rain at Lin'an RBS indicated that rain acidity and frequency of severe acid rain were increasing but the frequency of weak acid rain was decreasing when moving towards bilateral side months of July. Acid rain occurrence was affected by rainfall intensity, wind speed and wind direction. High frequency of severe acid rain and low frequency of weak acid rain were on days with drizzle, but high frequency of weak acid rain and low frequency of severe acid rain occurred on rainstorm days. With wind speed upgrading, the frequency of acid rain and the proportion of severe acid rain were declining, the pH value of precipitation was reducing too. Another character is that daily dominant wind direction of weak acid rain majorly converged in S-W section, however that of severe acid rain was more likely distributed in N-E section. The monthly variation of acid rain at Lin'an RBS was mainly attributed to precipitation variation, the increasing and decreasing of monthly incoming wind from SSE-WSW and NWN-ENE sections of wind direction. The interannual variation of acid rain could be due to the effects of energy consumption raising and significant green policies conducted in Zhejiang, Jiangsu and Shanghai.

Key words: acid rain; long-time series; pH value; interannual variation; Lin'an regional background station

自 20 世纪 80 年代以来我国社会经济一直处于迅速发展阶段, 随着国家工业化与城市化进程的快速推进, 煤炭石油等化石能源的消耗大幅度增加, 其向大气中排放的 SO_2 和 NO_x 等废气物对大气降水化学组成产生了重要影响, 全国大部分地区均发生了不同程度的酸雨污染现象^[1~3]。尤其是经济发达的长三角地区, 酸雨污染最为严重, 酸雨危害已成为该区域亟需治理的重大环境问题^[4]。酸雨的形成涉及着复杂的大气化学和大气物理过程, 其产生不仅与污染物排放源有关, 还受大尺度大气环流、中尺度天气过程、局地地形作用等多种气象因子的共同影响, 因而各地酸雨的发生频率、发生强度以及年

季月变化都有着独特的地域性特征^[5~7]。处于不同的社会经济发展阶段, 酸雨的形成类型亦有着一定的差异, 如工业化阶段酸雨多以硫酸型为主, 城市化阶段的酸雨已发展成为硫酸型和硝酸型并重类型^[8]。从文献调研获知: 有关酸雨成因、发生特征及变化规律的相关研究已有较多成果^[9~12], 但主要集中于酸雨的短序列资料分析, 资料年限多不长于

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-07-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90815028); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306050)

作者简介: 李正泉(1978~), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为气候变化与生态, E-mail: lzq110119@163.com

* 通讯联系人, E-mail: mahao20032003@aliyun.com

15 a,尚不足以分析长序列酸雨资料的变化特征. 赵伟等^[13]首次给出了临安本底站酸雨 25 a 的降水年均 pH 值变化曲线(1985~2009 年),却缺乏酸雨发生频率这一酸雨指标的长年际变化,有关酸雨月变化及酸雨与气象因子的关系分析仍局限于短期资料(2005~2010 年),且该研究未对酸雨长年际变化特征加以归因解析.

位于浙江省临安市的临安本底站(位置为:北纬 30°18',东经 119°44'E,海拔 139.0 m)始建于 1983 年,是我国早期建设的 3 个区域大气本底观测站之一,也是世界气象组织(WMO)开展全球大气观测的大气本底站之一,其观测数据对评价长三角地区的大气本底环境状况具有良好代表性^[14]. 该站的酸雨观测项目开始较早,现今已积累近 30 年的酸雨连续观测资料,为研究酸雨的长序列年际变化特征奠定了宝贵的数据基础,针对该站的酸雨研究也已有相关文献报道. 洪盛茂^[15]论述了 1985~1994 年该站酸雨的发生特点,其研究认为受主导风的上风向上海等城市和工业区的影响,临安酸雨发生频繁且小雨时易产生强酸雨; Zhao 等^[2]和杨东贞等^[16]研究表明,1985~1997 年期间临安降水的 SO_4^{2-} 离子浓度呈上升趋势而 NO_3^- 离子浓度变化微弱,1999~2006 年期间的降水阴离子浓度除 SO_4^{2-} 呈上升趋势外, NO_3^- 上升趋势亦为明显,2001 年后 NO_3^- 对该站降水酸度的贡献逐步加大; Qi 等^[14]详细分析了 2006~2010 年临安本底站的 SO_2 大气浓度日尺度、月尺度及年际变化特征,指出该期间 SO_2 大气浓度呈显著下降态势; 另有牛彧文等^[17]和徐宏辉等^[18]分析了有机酸对临安降水酸化的影响以及临安酸雨与大气气溶胶的相互作用情况. 上述有关临安本底站的酸雨研究为认知该站酸雨成因及其变化规律做出了积极贡献,但都未能揭示该站酸雨长年际变化特征,有关酸雨的归因分析也仅局限于分段年代且分散于不同文献,然而这些研究成果却为临安本底站的酸雨长期变化特征分析及其变化特征的归因探讨奠定了良好的研究基础.

本研究旨在采用临安本底站近 30 a 酸雨观测的长序列资料,分析该站酸雨的长年际变化特征及近 20 a 平均状况的酸雨月变化规律,利用酸雨观测的长期资料进一步统计分析酸雨发生与气象因子的关系,并结合气候因子、大背景的酸性气体排放等数据对临安本底站酸雨的月变化及年际变化特征的形成进行初步归因探讨分析.

1 材料与方法

1.1 资料使用

利用临安本底站 1985~2012 年的酸雨长序列资料,分析酸雨长年际变化特征,结合江浙沪地区历年的能源消耗量、 SO_2 排放量、 SO_2 与 NO_2 大气浓度监测数据等,对该站酸雨的长年际变化特征进行归因探讨. 同时基于 1993~2012 年该站酸雨的逐次观测资料,研究近 20 a 该站酸雨的月变化规律,结合风速、风向、降水强度等气象要素观测,分析酸雨发生与气象因子之间的统计关系,并使用该站的气候资料对酸雨的月变化特征进行归因解释. 因本研究仅收集到 1985~1992 年该站酸雨的雨量加权年均 pH 值和酸雨发生频率的年值数据,故酸雨月变化及酸雨发生与气象因子的关系分析,其资料的使用年限仅能为 1993~2012 年. 本研究中所采用的酸雨资料与气象要素资料均为临安本底站的原位观测与采样,江浙沪地区历年的能源消耗量、 SO_2 排放量、 SO_2 与 NO_2 大气浓度监测数据,主要来源于中国能源统计年鉴^[19]及江苏、浙江和上海两省一市的各年度环境状况公报^[20~22].

1.2 研究方法

利用 K -pH 不等式方法^[23,24]对临安本底站 1993~2012 年酸雨的逐次观测资料(共约 2240 个样本)进行数据质量检验,剔除观测数据中 $\Delta\text{pH} < -0.5$ 的严重可疑数据,并利用文献[24]中的方法对 $-0.5 \leq \Delta\text{pH} < 0$ 的观测数据做进一步的订正处理,以保证观测数据分析的科学性. 文中有关 1993~2012 年的酸雨分析结果,其所采用的数据均经过质量检验和订正处理. 数据质量检验共剔除观测数据约 2%,需订正的观测数据主要集中在 1995 年和 1997~1999 年观测期间. 从已订正的降水年均 pH 值来看,数据订正处理可改变年均 pH 值大小,但年均 pH 值的总体变化趋势在订正前后变化并不大(图 1). 由此而言,1985~1992 年的酸雨年值数据虽未订正(因 1985~1992 年的酸雨资料为年值数据,故无法对其作数据质量检验和订正处理),但不妨碍酸雨长年际变化趋势的结果分析.

酸雨发生频率的计算按照文献[25],定义 $\text{pH} < 5.6$ 的降水为酸雨,其中 $4.5 \leq \text{pH} < 5.6$ 为弱酸雨, $\text{pH} < 4.5$ 为强酸雨,其计算公式表达为:

$$F = N/N_{\text{总}} \times 100\%$$

式中, F 为酸雨发生频率, N 为 $\text{pH} < 5.6$ 的降水日数, $N_{\text{总}}$ 为降水样品采集的总日数. 当 N 表示为 4.5

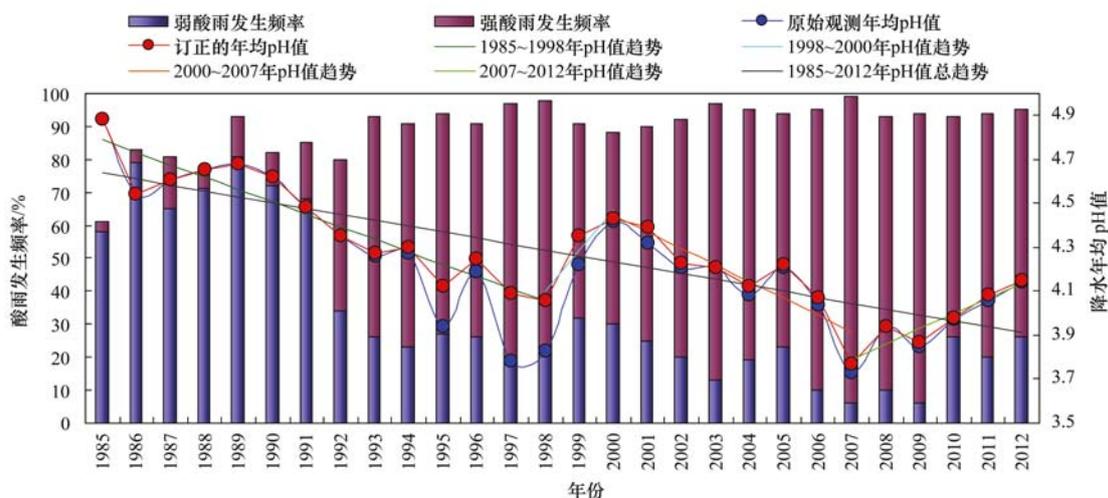


图1 1985~2012年临安本底站酸雨年际变化

Fig. Interannual variation of acid rain at Lin'an regional background station (from 1985 to 2012)

$\leq \text{pH} < 5.6$ 的降水日数时, F 即为弱酸雨发生频率; 当 N 表示为 $\text{pH} < 4.5$ 的降水日数时, F 即为强酸雨发生频率; 即有, 酸雨发生频率等于弱酸雨发生频率与强酸雨发生频率之和。

采用雨量加权平均法计算年、月降水平均 pH 值。在分析酸雨发生与气象因子的关系时, 将降水强度划分为 5 个等级, 即毛毛雨为 $0.1 \leq P < 2$, 小雨为 $2 \leq P < 10$, 中雨为 $10 \leq P < 25$, 大雨为 $25 \leq P < 50$, 暴雨为 $P \geq 50$, P 为降水量, 单位 mm; 风速划分为 5 个等级, 即 $V < 1$, $1 \leq V < 2$, $2 \leq V < 3$, $3 \leq V < 4$, $V \geq 4$, V 为风速, 单位 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 风向以 16 方位法表示。

2 结果与分析

2.1 酸雨年际变化及月变化

2.1.1 酸雨长年际变化特征

临安本底站 1985~2012 年酸雨发生频率及降水年均 pH 值如图 1。从酸雨发生频率(强弱酸雨发生频率之和)分析: 1985~1992 年该站的酸雨发生频率多低于 85% (1989 年除外), 期间的多年平均值为 80%, 但强酸雨所占的比例总体上在逐步上升; 在 1993~2012 年期间, 各年(除 2000 年外)的酸雨发生频率均超过 90%, 多年平均值为 94%, 强酸雨发生频率多年平均值为 73%, 大气降水达到了“十雨九酸”, 且 70% 以上是强酸雨的状况。

从降水年均 pH 值(红色圆点曲线)分析: 在 1985~2012 年期间, 各年降水的年均 pH 值均在 4.9 以下, 即全部达到酸雨程度; 年均 pH 值的变化大体上有 2 次下降和 2 次上升趋势, 但总体上呈下降态势, 即大气降水的酸化程度总体呈增加趋势;

以 1991 年为界限(该年 pH 值约为 4.5), 其以前的年份($4.5 \leq \text{pH} < 5.6$)均为弱酸雨程度, 其以后的年份($\text{pH} < 4.5$)均为强酸雨程度。

若将该站酸雨的年际变化划分为 4 个过程阶段(如图 1), 则更易表述该站酸雨的长年际变化特征。1985~1998 年为酸雨第 1 次加重阶段, 该阶段酸雨发生频率不断增加, 强酸雨所占比例逐步升高, 降水年均 pH 值不断降低。1998~2000 年为酸雨第 1 次减弱阶段, 此期间酸雨发生频率及强酸雨所占比例均在下降, 分别从 1998 年的 98% 和 78% 下降至 2000 年的 88% 和 58%, 降水年均 pH 值也从 4.06 上升至 4.43。2000~2007 年为酸雨第 2 次加重阶段, 酸雨发生频率及强酸雨所占比例均在进一步增加, 降水年均 pH 值也在逐步降低; 至 2007 年, 酸雨发生频率以达到 99%, 强酸雨发生频率达 93%, 降水年均 pH 值为 3.77, 该年是整个时间序列中酸雨发生最严重的年份。2007~2012 年为酸雨第 2 次减弱阶段, 该期间酸雨发生频率虽仍维持在 94% 左右, 但强酸雨发生频率有所降低, 降水年均 pH 值也在增加。有关临安本底站酸雨的长年际变化表现为上述 4 个明显过程阶段的原因探析见 2.3.2 节。

2.1.2 近 20 年酸雨月变化特征

按月统计 1993~2012 年临安本底站酸雨逐次观测数据, 获得酸雨发生频率及降水 pH 均值的 20 a 平均状况的月变化特征, 如图 2。

酸雨发生频率以 7 月为最低, 约为 80%, 以 11 月为最高, 为 99%。弱酸雨发生频率与强酸雨发生频率的月变化, 两者总体上表现为相反趋势, 即两者均以 7 月为中心月份, 弱酸雨发生频率向两侧月份

(1月←—7月和7月—→12月)降低,而强酸雨发生频率向两侧月份升高。

降水月均 pH 值曲线显示:各月 20 a 平均的降水月均 pH 值(以圆点表示)均在 4.7 以下,且以 7 月为中心,月均 pH 值总体向两侧月份降低,除 7 月呈弱酸型月份外,其它各月均为强酸雨月。从降水月均 pH 值的变动范围(以 20 a 内各月均 pH 值的最大与最小值表示,在图 2 中以圆点上下竖横线标识)分析:除 7 月外,其它各月份的月均 pH 值变动上限均在 5.6 以下,且 10 月和 11 月的变动上限在 4.5 以下。即是说,在所分析的 20 个年份中,有些年份的 7 月还尚未达到酸雨程度,但所有年份的 10 月和 11 月均达到了强酸雨程度,其它月份在所分析的年份中均为酸雨月,或表现为强酸雨,或表现为弱酸雨。

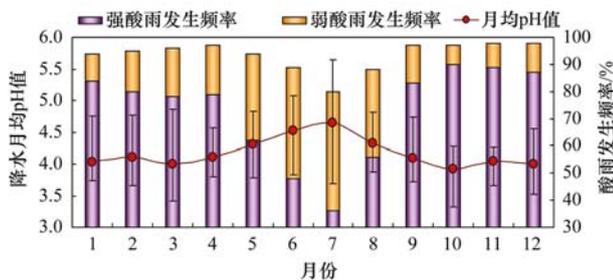


图 2 临安本底站酸雨月变化

Fig. 2 Monthly variation of acid rain at Lin'an regional background station

2.2 酸雨与气象因子关系

为进一步研究临安本底站酸雨发生与当地降水、风速、风向长期数据的统计关系,本研究对 1993~2012 年该站酸雨的逐次观测数据(经过数据质量检验和订正处理)、酸雨发生日的降水量、平均风速、主导风向进行了统计分析。

2.2.1 酸雨与降水强度

根据降水强度的分级,对临安本底站不同酸度

降水的发生频率及降水 pH 值进行统计。从统计结果(见表 1)中可看出:降水 pH 均值随降水强度先减小后增大,小雨和中雨的平均降水酸度相对较高,暴雨的平均降水酸度最低。比较不同降水强度所对应的酸雨发生频率发现,酸雨发生频率以中雨最大,毛毛雨最小,但两者之间相差不大(仅约 6 个百分点);强酸雨发生频率以小雨最高暴雨最低,而弱酸雨发生频率以小雨最低暴雨最高;小雨的强酸雨发生频率约为暴雨的 2 倍,暴雨的弱酸雨发生频率约为小雨的 4 倍。

表 1 酸雨与降水强度的关系/%

| 项目 | 降水强度 | | | | |
|----------|------|------|------|------|------|
| | 毛毛雨 | 小雨 | 中雨 | 大雨 | 暴雨 |
| 弱酸雨发生频率 | 25.1 | 14.8 | 22.9 | 25.4 | 57.9 |
| 强酸雨发生频率 | 66.3 | 77.7 | 74.4 | 68.1 | 35.2 |
| 酸雨发生频率 | 91.4 | 92.5 | 97.3 | 93.5 | 93.1 |
| 降水 pH 均值 | 4.37 | 4.23 | 4.22 | 4.38 | 4.65 |

2.2.2 酸雨与地面风速风向

从临安本底站酸雨发生日的日平均风速(10 m 观测高度)分析(见表 2):在风速小于 $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等级,酸雨发生频率最高,风速大于 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的等级,酸雨发生频率最低;强酸雨发生频率随风速等级的提高而降低,弱酸雨发生频率随风速等级的提高而逐步加大;各风速等级的降水 pH 均值随风速等级提高也在逐步增加。总体来说,低风速不利于当地酸性污染物的扩散,酸雨发生频率及强酸雨所占的比重较大,降水的酸化程度也较为严重;高风速的酸雨状况与低风速时正好相反,其酸雨发生频率较低且强酸雨所占比重较小,降水的酸化程度也相对较轻。这是因为临安本底站位于天目山系附近,局地地形使得外围酸性气体常在此汇聚,当地风速的增大反而有利于其酸性气体向外围扩散。

表 2 酸雨与日平均风速的关系/%

| 风速等级 | $<1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $1\sim2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $2\sim3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $3\sim4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ | $\geq 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
|----------|----------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 强酸雨发生频率 | 78.9 | 73.6 | 68.3 | 64.1 | 57.1 |
| 弱酸雨发生频率 | 17.2 | 19.8 | 25.2 | 28.5 | 31.6 |
| 酸雨发生频率 | 96.1 | 93.4 | 93.5 | 92.6 | 88.7 |
| 降水 pH 均值 | 4.15 | 4.27 | 4.39 | 4.41 | 4.56 |

从酸雨发生的风向频率分析(如图 3):临安本底站强酸雨与弱酸雨发生的日主导风向主要集中在 N-E 和 S-W 两个风向扇区内,约有 91.2% 的强酸雨和 93.5% 的弱酸雨都发生在这两个风向扇区。然而,强酸雨与弱酸雨的发生在风向的具体分配上却

存在着一定的差异。50.1% 的强酸雨发生在 N-E 风向扇区, S-W 风向扇区集中了 41.1% 的强酸雨;但 S-W 风向扇区却集中了 59.0% 的弱酸雨, N-E 风向扇区仅有 34.5% 的弱酸雨发生。说明弱酸雨的发生更多集中于 S-W 风向扇区,而强酸雨的发生更多倾

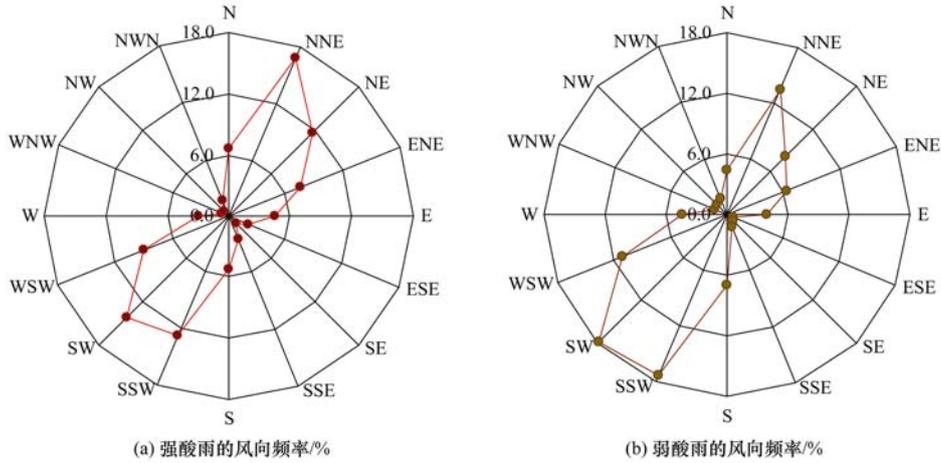


图3 临安本底站酸雨的风向频率

Fig. 3 Wind direction frequency of acid rain at Lin'an regional background station

向于 N-E 风向扇区。

2.3 酸雨年际及月变化特征归因探析

2.3.1 酸雨月变化特征归因

酸雨的形成发生与气象条件关系密切,气象条件一方面影响酸雨前体物的转化速率,另一方面影响着酸性物质的扩散、输送和清除过程^[7]. 临安本底站的酸雨月变化表现出与当地降水及风况的气候特征密切相关. 据 1993 ~ 2012 年酸雨观测和降水与风向的观测资料分析:月均 pH 与月降

水量[见图 4(a)]、弱酸雨发生频率与 SSE-WSW 扇区风向频率[见图 4(b)]、强酸雨发生频率与 NWN-ENE 扇区风向频率[见图 4(c)],它们之间有着较好的对应变化关系,且图 4(d)表明降水和扇区风向两者对酸雨的影响具有相互独立作用(除毛毛雨外,NWN-ENE 和 SSE-WSW 两风向扇区内各级降水强度的降雨发生频率相差较小). 线性统计结果亦表明:当采用月降水量、SSE-WSW 扇区风向频率和 NWN-ENE 扇区风向频率 3 个因子

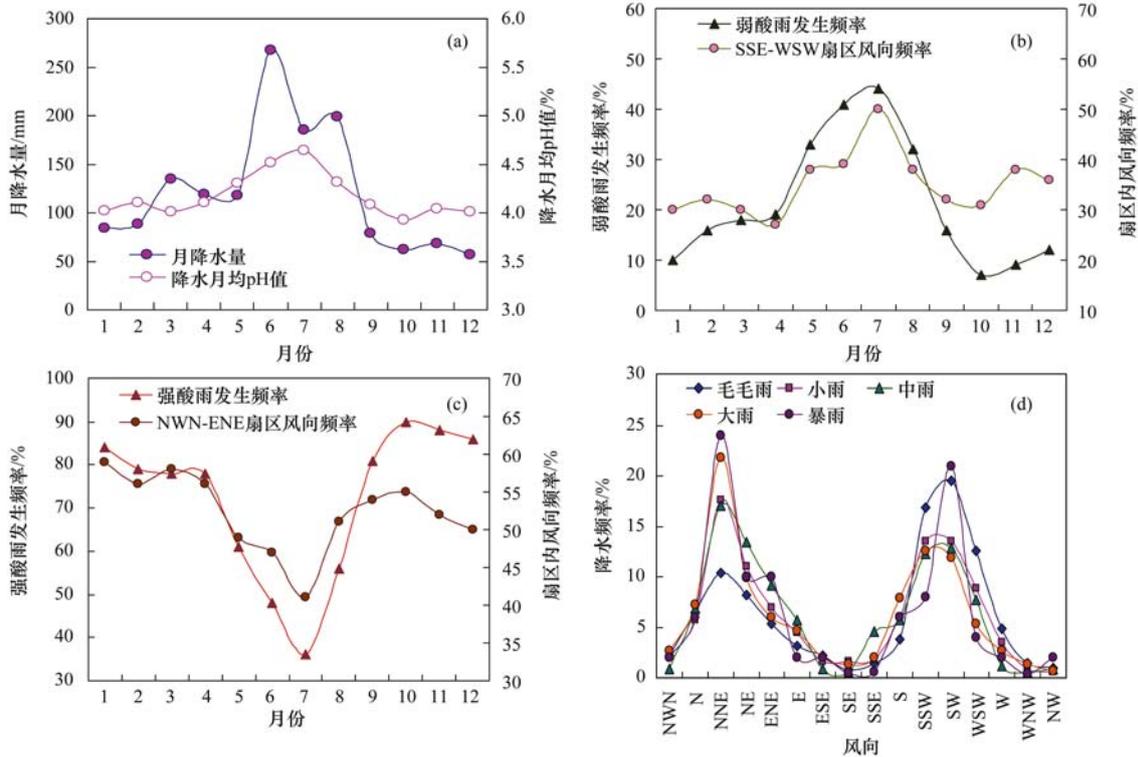


图4 降水与扇区风向的月变化及各风向降水频率分布

Fig. 4 Monthly variations of precipitation and sector wind direction and distributions of rainfall frequency in wind directions

共同表述月均 pH 值变化时,多元线性回归方程的相关系数(R^2)为 0.92;而用单独因子表述月均 pH 值变化时,其线性回归方程相关系数(R^2)则分别为 0.69(月降水)、0.71(NWN-ENE 扇区风向频率)和 0.66(SSE-WSW 扇区风向频率).由此可知,临安本底站的酸雨月变化是受其降水和扇区风向频率的共同影响,且降水与扇区风向频率对酸雨影响具有独立性.

有关降水量对酸雨月变化的影响[见图 4(a)],即高雨量对应着高降水月均 pH 值(尤其是夏季月份),低雨量对应着低降水月均 pH 值(冬季月份),这种对应关系主要是雨水的雨除和冲刷结果,在此不再作以叙述,本研究着重介绍扇区风向频率的月变化如何影响临安本底站的酸雨发生.从图 4(b)和 4(c)中可分析出:弱酸雨和强酸雨发生频率分别与 SSE-WSW 和 NWN-ENE 两扇区内各月主导风向频率的变化相一致.弱酸雨发生频率随 SSE-

WSW 风向扇区的来风增多而升高、减少而降低,强酸雨发生频率随 NWN-ENE 风向扇区的来风减少而降低、增多而升高.这是因为临安本底站 SSE-WSW 风向扇区(图 5 两条绿线所夹区)的上风方多为致酸性物质的低排放区,而 NWN-ENE 风向扇区(两条红线所夹区)的上风方则多为致酸性物质的高排放或重排放区(如图 5,该图是根据文献[26]重新绘制而得到).在各月中,当 SSE-WSW 风向扇区的来风增多时,意味着上风向的低排放区将会把更多的清洁空气输送到临安,从而该地的弱酸雨发生频率增加[见图 4(b)],而强酸雨发生频率减少且降水月均 pH 值也相应增加(见图 2),反之则情况相反;当 NWN-ENE 风向扇区的来风增多时,意味着其上风向的高排放区将会把更多的致酸性物质输送到临安,致使该地强酸雨发生频率增加[见图 4(c)],而弱酸雨发生频率减少且降水月均 pH 值也相应降低(见图 2),反之则情况亦相反.

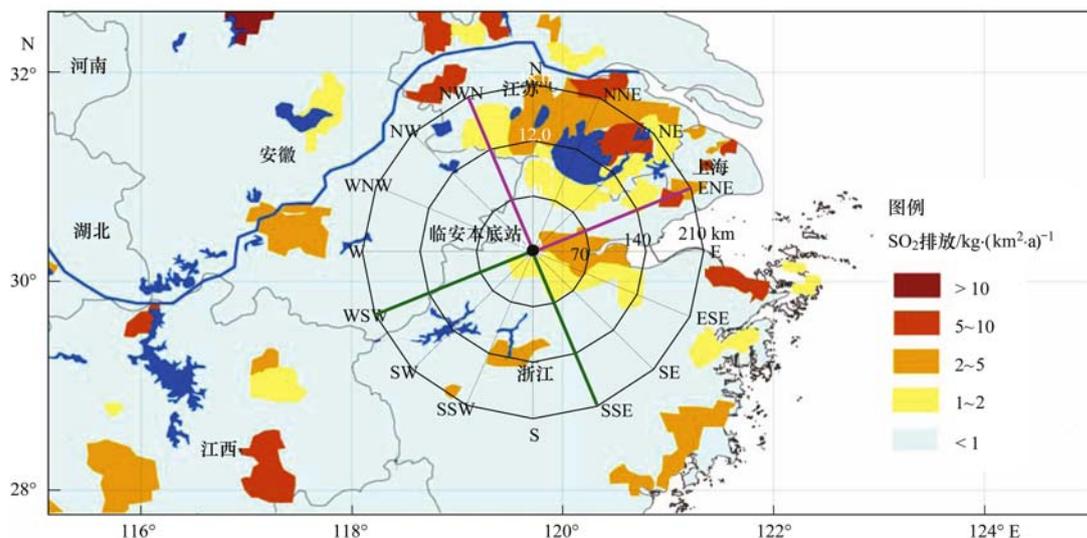


图 5 临安本底站主导风向扇区及该站周围地区 SO_2 排放强度

Fig. 5 Wind direction section of dominant wind and SO_2 emission intensity of the surrounding area of Lin'an regional background station

临安本底站 SO_2 大气浓度的观测亦有着明显的月变化趋势,即冬季 SO_2 浓度高夏季 SO_2 浓度低,详见文献[14].该站 SO_2 浓度的这种月变化并非是季节性生产生活耗能的影响,江苏南部、上海及浙江区域的冬季采暖均以电力为主,从电力需求来说夏季的南方更易出现“拉闸限电”,即夏季生产生活的用电量相对于冬季会更多些^[27].若从生产生活耗能的 SO_2 排放而言,临安本底站的 SO_2 大气浓度应该是夏季高而冬季低,但真实情况并非如此.事实上,临安本底站 SO_2 大气浓度的月变化在很大程度上亦取决于当地降水与风向的影响,夏季临安地区

雨量多(雨水对 SO_2 的雨除与冲刷作用大)、SSE-WSW 扇区的风向频率高(外围清洁空气输送多)、NWN-ENE 扇区的风向频率低(外围高浓度 SO_2 的空气输送少),由此形成夏季临安本底站 SO_2 大气浓度偏低,冬季的情况与夏季相反.

尽管临安本底站酸雨的月变化并不仅是取决于季节性大气环流产生的气象因子,同时还涉及酸性物质光化学转化的季节性以及其它要素诸多影响,但总体上该站酸雨的月变化特征可由降水及扇区风向频率的月变化加以充分解释.

2.3.2 酸雨年际变化特征归因

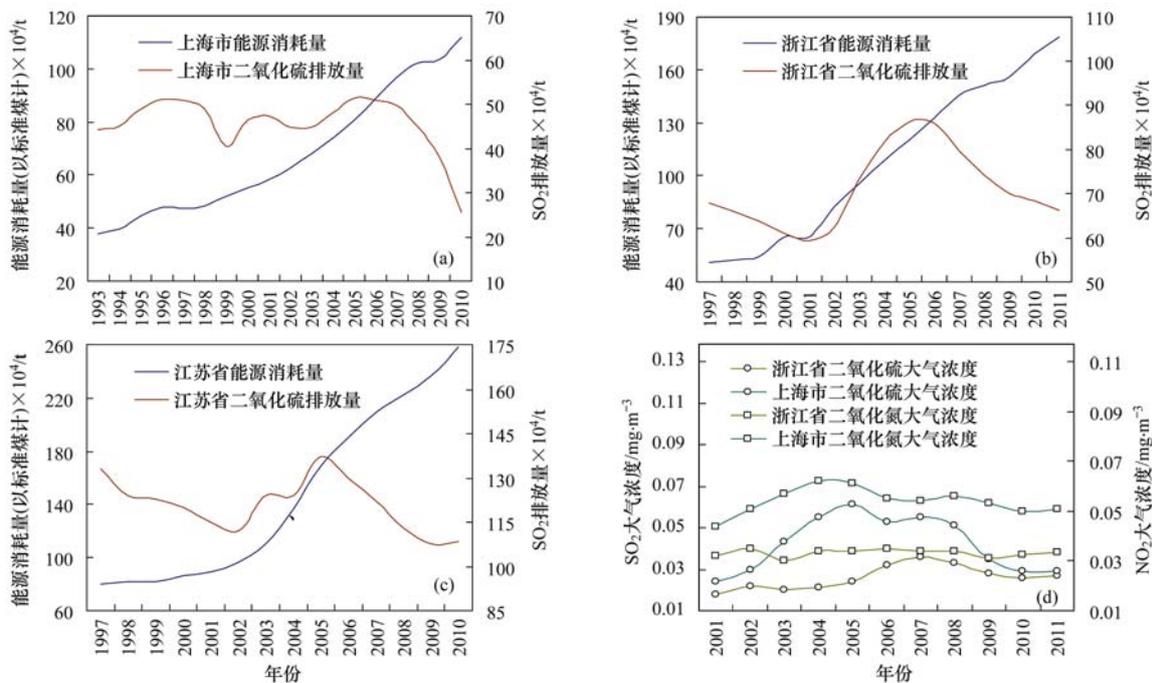
临安本底站地处长三角腹地,其大气环境状况与长三角地区(尤其是江浙沪两省一市)大气污染物的排放及治理有着一定关系,这一区域 SO_2 和 NO_2 等致酸性污染气体的排放对临安本底站的酸雨形成亦有着重要影响^[8]. 查看江浙沪各年度的能源统计年鉴和环境状况公报,本研究收集了近些年江浙沪地区的能源消耗年总量、 SO_2 年排放量、大气中 SO_2 和 NO_2 浓度的年均值等统计数据(未收集到江苏省 SO_2 和 NO_2 浓度资料),利用这些数据尝试对临安本底站的酸雨长年际变化特征进行探讨性归因分析.

在 1985~2012 年期间,临安本底站酸雨的年际变化主要表现为 2 次加重和 2 次减弱,据此将其年际变化划分为 4 个过程阶段(见 2.2.1 节). 在 1985~1998 年,江浙沪三地经济增长迅速,其能源消耗量分别以年均 14.9%、15.2% 和 21.8% 的增速逐年攀升. 以煤炭为主的能源消耗方式,加之该时期燃煤过程多未采取脱硫处理^[28],燃煤量的逐年增加势必加大了该区域 SO_2 的排放强度,从而诱使该区域酸雨发生频率上升,降水酸化程度加重,这一过程与临安本底站的第一次酸雨加重阶段相对应. 杨东贞等^[16]对临安本底站降水组分的分析表明,1985~1997 年该站降水的 SO_4^{2-} 离子浓度在不断增加,

其分析结论亦佐证了 SO_2 排放增加诱使临安酸雨加重的推断.

1998 年国务院批准了国家环保局《酸雨控制区和二氧化硫污染控制区划分方案》,并对“两控区”开展 SO_2 重点污染治理. 从图 6 中可看出:1998~2000 年前后,尽管江浙沪三地的能源消耗量在不断增加,但其 SO_2 排放量却呈下降趋势,尤其是江苏和浙江,其 SO_2 减排趋势更为明显. 该期间江浙沪地区的 SO_2 大气污染状况得到了一定改善,正对应着临安本底站酸雨的第 1 次减弱阶段. 但随着能源消耗量的进一步增长,“两控区”的环控措施已阻止不了 SO_2 排放量的进一步增加,浙江的 SO_2 排放量于 2001 年后开始上升,江苏、上海的 SO_2 排放量于 2002 年后开始上升,这一过程江苏上海延续到 2005 年、浙江延续到 2006 年[见图 6 (a)~6(c)],且在 2007 年浙江的 SO_2 大气浓度达到了最高值,上海的 SO_2 大气浓度处于次高值[见图 6 (d)].

总体来说,2000~2007 年江浙沪三地的 SO_2 排放趋势(尤其是浙江的排放趋势),可在很大程度上对临安本底站酸雨的第 2 次加重过程作以解释,但并不能完全解释. Zhao 等^[2]研究表明:2001~2006 年临安本底站的降水酸性阴离子除 SO_4^{2-} 离子浓度在不断上升外,降水中的 NO_3^- 离子浓度也在不断增



(a)、(b)、(c)分别是上海、浙江、江苏的能源消耗与 SO_2 排放的年际变化曲线,

(d)为浙江与上海大气中 SO_2 和 NO_2 浓度的年均值变化曲线

图 6 江浙沪地区 SO_2 排放和大气中 SO_2 与 NO_2 浓度的年际变化

Fig. 6 Interannual variations of SO_2 emission and concentration of SO_2 and NO_2 in Jiangsu, Zhejiang and Shanghai

加,尽管降水酸度的主控离子还是 SO_4^{2-} ,但 NO_3^- 对降水酸度的贡献越来越大. 由此看来,临安本底站酸雨的第2次加重过程,除受 SO_2 排放趋势的主影响外, NO_2 污染物对其影响亦不可忽视,如浙江、上海在2007年,其 SO_2 和 NO_2 的大气浓度均同处高位[见图6(d)],这正对应着临安酸雨发生的最重年份.

2007年以后,江浙沪贯彻实施国家节能减排、污染减排等重大环保政策,并进一步加强各地环保政策的执行,如江苏省的《关于推进环境保护工作的若干政策措施》、浙江省的新“811”环保行动、上海市的《上海市环境保护条例》重新修订等. 因此在2007年后,江浙沪三地的 SO_2 排放量均在明显下降,上海的 SO_2 和 NO_2 大气浓度及浙江的 SO_2 大气浓度也均呈明显下降趋势(见图6). 在江浙沪大气污染排放治理的大背景下,临安本底站的 SO_2 大气浓度在2008年后也表现为显著下降^[14]. 正因大背景下的 SO_2 排放量减少及大气中 NO_2 浓度降低,临安本底站的酸雨也呈现出了第2次减弱过程.

3 结论

(1)1985~2012年临安本底站的酸雨总体呈增加趋势,此期间的酸雨年际变化表现出2次酸雨加重和2次酸雨减弱4个明显过程. 1993~2012年临安本底站酸雨月变化的长期统计特征总体表现为,弱酸雨和强酸雨发生频率均以7月为中心月份,分别向两侧月份(1月←—7月和7月→—12月)降低和增高,降水月均pH值也以7月为中心向两侧月份降低.

(2)临安本底站的强酸雨发生频率以小雨最高暴雨最低,而弱酸雨发生频率以小雨最低暴雨最高. 酸雨发生频率、强酸雨所占比重以及降水酸化程度随风速等级提高表现为减少和减弱趋势. 酸雨发生日的主导风向主要集中在N-E和S-W两个风向扇区,其中弱酸雨发生多集中于S-W风向扇区,而强酸雨发生更倾向于N-E风向扇区.

(3)临安本底站的酸雨月变化与降水、风况的气候特征密切相关,月降水量的变化以及各月SSE-WSW和NWN-ENE风向扇区来风的增多和减少,是诱使酸雨月变化特征形成的主导因素. 该站酸雨的年际变化特征与江浙沪的能源消耗量增加及重大环境保护措施的实行相互关联,环保措施可在很大程度上影响着酸雨年际的变化趋势走向.

参考文献:

[1] 汤洁,徐晓斌,巴金,等. 1992-2006年中国降水酸度的变化

趋势[J]. 科学通报,2010,55(8):705-712.

- [2] Zhao Y X, Hou Q. Characteristics of the acid rain variation in China during 1993-2006 and associated causes [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 24(2): 239-250.
- [3] 解淑艳,王瑞斌,郑皓皓. 2005-2011年全国酸雨状况分析[J]. *环境监控与预警*, 2012, 4(5): 33-37.
- [4] 顾列铭. 长三角GDP背后的代价与反思[J]. *生态经济*, 2005, (7): 14-17.
- [5] 刘宝章,王敬云. 青岛地区酸雨发展时空变化研究[J]. *环境科学学报*, 2000, 20(增刊): 34-39.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 徐晓斌,林伟立,颜鹏,等. 1994-2006年长江三角洲和东北平原酸性气体浓度变化[J]. *气候变化研究进展*, 2008, 4(4): 195-201.
- [9] Tang A H, Zhuang G S, Wang Y, et al. The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(19): 3397-3406.
- [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] 王文兴,许鹏举. 中国大气降水化学研究进展[J]. *化学进展*, 2009, 21(3): 266-281.
- [12] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(5): 527-532.
- [13] 赵伟,康丽莉,林惠娟,等. 临安大气本底站酸雨污染变化特征与影响因素分析[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(4): 9-13.
- [14] Qi H X, Lin W L, Xu X B, et al. Significant downward trend of SO_2 observed from 2005 to 2010 at a background station in the Yangtze Delta region, China [J]. *Science China Chemistry*, 2012, 55(7): 1451-1458.
- [15] 洪盛茂. 临安地区强酸雨的特点[J]. *大气科学*, 1997, 21(1): 31-38.
- [16] 杨东贞,周怀刚,张忠华. 中国区域空气污染本底站的降水化学特征[J]. *应用气象学报*, 2002, 13(4): 430-439.
- [17] 牛彧文,顾骏强,俞向明,等. 有机酸对长江三角洲大气背景区降水酸化的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(2): 150-154.
- [18] 徐宏辉,刘洁,王跃思,等. 临安本底站大气气溶胶水溶性离子浓度变化特征[J]. *环境化学*, 2012, 31(6): 796-802.
- [19] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴(2011)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012, 123-156.
- [20] 江苏省环境保护厅. 江苏省环境状况公报[EB/OL]. <http://www.jshb.gov.cn/jshbw/hbzl/>, 2011-06-03.
- [21] 浙江省环境保护厅. 浙江省环境状况公报[EB/OL]. <http://www.zjepb.gov.cn/root14/xxgk/hjzl/hjzkgb/>, 2012-06-04.
- [22] 上海市环境保护厅. 上海市环境状况公报[EB/OL]. <http://www.sepb.gov.cn/fa/cms/shhj/shhj2072/shhj2144/index.shtml>, 2012-06-04.

- [23] 汤洁, 徐晓斌, 杨志彪, 等. 电导率加和性质及其在酸雨观测数据质量评估中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 385-392.
- [24] 汤洁, 巴金. 酸雨观测中 pH 测量负偏差的统计分析[J]. 应用气象学报, 2013, 24(1): 55-64.
- [25] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005. 24-25.
- [26] 国务院办公厅. 全国主体功能区规划[R]. 北京, 2010. 133-142.
- [27] 沈续雷. 气候变化对大城市能源消费的影响研究——以上海为例[D]. 上海: 复旦大学, 2011. 95-110.
- [28] 吕太, 杨荣, 国文学, 等. 我国火电厂脱硫示范性工程状况和脱硫前景分析[J]. 上海理工大学学报, 2001, 23(4): 337-341.

《环境科学》编辑部关于启用编辑信息管理系统公告

《环境科学》编辑部已经开通本刊网站并启用编辑信息管理系统(网站地址:<http://www.hjcx.ac.cn>). 该系统能实现在线投稿、在线审稿、期刊浏览检索等功能, 欢迎广大作者、读者和审稿专家使用. 目前我刊所有来稿都通过网站编辑信息管理系统进行. 作者使用编辑信息管理系统投稿时请先进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面上给出的提示投稿即可. 如果您在使用过程中有问题, 请及时与我刊编辑部联系.

邮政地址: 北京市海淀区双清路 18 号《环境科学》编辑部

邮 编: 100085

电 话: 010-62941102, 010-62849343

传 真: 010-62849343

E-mail: hjcx@rcees.ac.cn

网 址: www.hjcx.ac.cn

CONTENTS

| | |
|--|---|
| Form of the Particulate Matter Ambient Air Standards in China | WANG Shuai, DING Jun-nan, WANG Rui-bin, <i>et al.</i> (401) |
| Seasonal Variation of Carcinogenic Heavy Metals in PM _{2.5} and Source Analysis in Beijing | TAO Jun, ZHANG Ren-jian, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (411) |
| Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} and PM ₁₀ Pollution Status and the Correlation of Particulate Matters and Meteorological Factors During Winter and Spring in Beijing | ZHAO Chen-xi, WANG Yun-qi, WANG Yu-jie, <i>et al.</i> (418) |
| Inversion and Spatial-Temporal Distribution Analysis on PM _{5.0} Inhalable Particulate in Beijing | WANG Yan-hui, XIAO Yao (428) |
| Characterization of Ultrafine Particle Size Distribution in the Urban Atmosphere of Hangzhou in Spring | XIE Xiao-fang, SUN Zai, YANG Wen-jun (436) |
| Size Distributions of Aerosol During the Spring Festival in Nanjing | WANG Hong-lei, ZHU Bin, SHEN Li-juan, <i>et al.</i> (442) |
| Size Distributions of Organic Carbon and Elemental Carbon in Nanjing Aerosol Particles | WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (451) |
| Characterization of Organic and Elemental Carbon in PM ₁₀ in Xinzhou City | SHI Mei-xian, PENG Lin, LIU Xiao-feng, <i>et al.</i> (458) |
| Seasonal Variation of Concentrations and Distribution Characteristics of PCDD/Fs in Atmosphere of an Industrial Area, Guangzhou | QING Xian, SU Yuan, SU Qing, <i>et al.</i> (464) |
| Hazard Evaluation Modeling of Particulate Matters Emitted by Coal-Fired Boilers and Case Analysis | SHI Yan-ting, DU Qian, GAO Jian-min, <i>et al.</i> (470) |
| Chemical Characteristics of Precipitation in South China Sea | XIAO Hong-wei, LONG Ai-min, XIE Lu-hua, <i>et al.</i> (475) |
| Analysis of Acid Rain Characteristics of Lin'an Regional Background Station Using Long-term Observation Data | LI Zheng-quan, MA Hao, MAO Yu-ding, <i>et al.</i> (481) |
| Characteristics of Atmospheric Nitrogen Wet Deposition in Beijing Urban Area | HE Cheng-wu, REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (490) |
| Studies of Ozone Formation Potentials for Benzene and Ethylbenzene Using a Smog Chamber and Model Simulation | JIA Long, XU Yong-fu (495) |
| Characteristics of Fly Ash Particles Deposition in the Snowpack of Laohugou Glacier No. 12 in Western Qilian Mountains, China | DONG Zhi-wen, QIN Da-he, QIN Xiang, <i>et al.</i> (504) |
| Odor Emission Rate of Municipal Solid Waste from Landfill Working Area | QIANG Ning, WANG Hong-yu, ZHAO Ai-hua, <i>et al.</i> (513) |
| Gaseous Phenol Removal in a Bio-Trickling Filter | HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, CHEN Zhou-yang, <i>et al.</i> (520) |
| Particulate Distribution Characteristics of Chinese Phrase V Diesel Engine Based on Butanol-Diesel Blends | LOU Di-ming, XU Ning, FAN Wen-jia, <i>et al.</i> (526) |
| Effects of Turning Frequency on Emission of Greenhouse Gas and Ammonia During Swine Manure Windrow Composting | ZHAO Chen-yang, LI Hong-mei, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (533) |
| Oxidation of Mercury by CuBr ₂ Decomposition Under Controlled-Release Membrane Catalysis Condition | HU Lin-gang, QU Zan, YAN Nai-qiang, <i>et al.</i> (541) |
| Distributions and Influencing Factors of Total Dissolved Inorganic Antimony in the Coastal Area of Zhejiang and Fujian | ZHANG Xu-zhou, REN Jing-ling, LIU Zong-guang, <i>et al.</i> (547) |
| Calculation of Allowable Pollution Loads for Lake and Reservoir Based on Bi-direction Algorithm and Its Case Study | JIA Hai-feng, GUO Yu (555) |
| Risk Assessment of Quaternary Groundwater Contamination in Beijing Plain | GUO Gao-xuan, LI Yu, XU Liang, <i>et al.</i> (562) |
| Mixing Behavior of Nutrients in Different Seasons at Liaohe Estuary | ZHANG Jin-hua, YU Li-xia, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (569) |
| Distribution of Nitrogen in the Sediment of Taige South River Estuary | MA Jiu-yuan, WANG Guo-xiang, LI Zhen-guo, <i>et al.</i> (577) |
| Selection and Purification Potential Evaluation of Woody Plant in Vertical Flow Constructed Wetlands in the Subtropical Area | CHEN Yong-hua, WU Xiao-fu, HAO Jun, <i>et al.</i> (585) |
| Correlation of Substrate Structure and Hydraulic Characteristics in Subsurface Flow Constructed Wetlands | BAI Shao-yuan, SONG Zhi-xin, DING Yan-li, <i>et al.</i> (592) |
| Impacts of <i>Eichhornia crassipes</i> (Mart.) Solms Stress on the Growth Characteristics, Microcystins and Nutrients Release of <i>Microcystis aeruginosa</i> | ZHOU Qing, HAN Shi-qun, YAN Shao-hua, <i>et al.</i> (597) |
| Effects of Different Pre-oxidants on DBPs Formation Potential by Chlorination and Chloramination of Yangtze River Raw Water | TIAN Fu-xiang, XU Bin, RONG Rong, <i>et al.</i> (605) |
| Adsorption of Phenanthrene from Aqueous Solution on Cetylpyridinium Bromide (CPB)-Modified Zeolite | LI Jia, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (611) |
| Characteristics and Selectivity of Photocatalytic-Degradation of Tetracycline Hydrochloride | SONG Chen-yi, YIN Da-qiang (619) |
| Characterization of Biocatalysed Sulfate Reduction in a Cathode of Microbial Electrolysis System | FU Shi-yu, LIU Guang-li, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (626) |
| Characteristics of Dissolved Organic Matter in A/DAT-IAT System for Municipal Wastewater Treatment Based on Ecological Safety | YANG Sai, ZHOU Qi-xing, HUA Tao (633) |
| Membrane Surface Fouling Properties in MBRs for High-Salinity Wastewater Treatment | LI Bin, WANG Zhi-wei, AN Ying, <i>et al.</i> (643) |
| Treatment of Petrochemical Secondary Effluent by Ozone-biological Aerated Filter | LIU Ming-guo, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (651) |
| Treatment of Pectin Wastewater by Anaerobic Biological Process | CHEN Bing-bing, YANG Chun-ping, LI Xiang, <i>et al.</i> (657) |
| Sorption Mechanism of Ofloxacin by Carbon Nanotubes | ZHAO Xing-xing, YU Shui-li, WANG Zhe (663) |
| Biosorption Characteristics of Cu ²⁺ by Spent Substrate of Pleurotus Oyster | HU Xiao-jing, ZANG Ting-ting, GU Hai-dong, <i>et al.</i> (669) |
| Adsorption Dynamics and Breakthrough Characteristics Based on the Fluidization Condition | WANG Jun, WANG Yao, HUANG Xing, <i>et al.</i> (678) |
| Characteristics of Speciation and Evaluation of Ecological Risk of Heavy Metals in Sewage Sludge of Guangzhou | GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, CAI Da-chuan, <i>et al.</i> (684) |
| Spatial Distribution and Accumulation of Heavy Metal in Arable Land Soil of China | ZHANG Xiao-min, ZHANG Xiu-ying, ZHONG Tai-yang, <i>et al.</i> (692) |
| Pollution Patterns and Health Risk Assessment for Polychlorinated Biphenyls in Soils from a Capacitor Storage Site | ZHOU Ling-li, WU Guang-long, XUE Nan-dong, <i>et al.</i> (704) |
| Occurrence and Spatial Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Shenzhen, China | ZHANG Di, CAO Shan-ping, SUN Jian-lin, <i>et al.</i> (711) |
| Risk Assessment and Countermeasures of Heavy Metals Pollution in Wanquan Segment of Yanghe River | TAN Bing, WANG Tie-yu, ZHU Zhao-yun, <i>et al.</i> (719) |
| Effects of Group Matching Curing Agent on Exchangeable Pb, Cd, Zn Contents in the Potted Soils and their Accumulation in Rice Plants | ZENG Hui, ZHOU Hang, QIU Qiong-yao, <i>et al.</i> (727) |
| Impact of Compound Chelants on Removal of Heavy Metals and Characteristics of Morphologic Change in Soil from Heavy Metals Contaminated Sites | YIN Xue, CHEN Jia-jun, LÜ Ce (733) |
| Characterization of Manganese Oxidation by <i>Pseudomonas</i> sp. QJX-1 | ZHOU Na-na, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (740) |
| Effects of the Ratio of NO ₃ ⁻ -N to NO ₂ ⁻ -N on the Removal of Sulfide and Nitrogen by Mixed Culture and Pure Culture | CHEN Zi-ai, CHEN Hui-juan, WEI Ben-ping, <i>et al.</i> (746) |
| Carbon Metabolic Characteristics of Airborne Microbes in Hangzhou | GONG Chan-juan, XU Jing, FANG Zhi-guo, <i>et al.</i> (753) |
| Study on the Backward Extraction of Cellulase in Rhamnolipid Reverse Micelles | ZHAO Yan-ge, YUAN Xing-zhong, HUANG Hua-jun, <i>et al.</i> (759) |
| Inner- and Inter-Species Differences of Mercury Concentration in Common Fishes from the Yellow Sea | ZHU Ai-jia, XU Zhan-zhou, LIU Gui-ze, <i>et al.</i> (764) |
| Study on the Effect of Enzymatic Activity and Acute Toxicity of Three PAEs on <i>Eisenia foetida</i> | WANG Yan, MA Ze-min, WU Shi-jin (770) |
| Environmental Safety Assessment on the New Super Absorbent Polymers Applied into a Soil-Chinese Cabbage System | LI Xi, HE Ji-zheng, ZHENG Yuan-ming, <i>et al.</i> (780) |
| Study on Dynamics of Hydrogen Sulfide and Carbonyl Sulfide Emission Fluxes from <i>Suaeda salsa</i> Marsh in the Yellow River Estuary | LI Xin-hua, GUO Hong-hai, YANG Li-ping, <i>et al.</i> (786) |
| Key Microbial Processes in Nitrous Oxide Emissions of Agricultural Soil and Mitigation Strategies | ZHU Yong-guan, WANG Xiao-hui, YANG Xiao-ru, <i>et al.</i> (792) |

《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2月15日 35卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 2 Feb. 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