

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲, 赵三平, 周文 (1645)
环境损害评估: 国际制度及对中国的启示	张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕, 李怀恩 (1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锐, 周丽华, 谢成屏 (1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)
丛枝根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘遂庆 (1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国, 欧阳志云, 刘芃, 孙力, 王小勇 (2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿, 王钧伟 (2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博, 李巍 (2057)
《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)	

黄山降水酸度及电导率特征分析

石春娥^{1,2}, 邓学良¹, 吴必文¹, 洪杰³, 张苏¹, 杨元建¹

(1. 安徽省气象科学研究所, 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230031; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 3. 黄山气象管理处, 黄山 242709)

摘要: 为了解黄山降水酸碱度和污染程度的总体特征, 对2006~2011年黄山光明顶气象站常规监测的降水pH值和电导率进行了统计分析, 结果表明: ①该地区降水pH年均值在4.81~5.57, 2009年之前, 降水酸度加强, 之后酸度减弱; 降水平均pH值冬季最低(4.78), 夏季最高(5.33); 出现频率最高的降水事件为弱酸性到中性, 总酸雨频率为46%, 酸性降水累积雨量约占总雨量的45%。②年均降水电导率在16.91~27.84 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 无明显年变化趋势。电导率在15 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下的降水发生频率最高, 其次是15~25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间。2010年2月~2011年12月, 按日进行降水平行采样、存储、运送到实验室进行pH值与电导率测定和离子成分分析, 对此期间的现场测定与实验室测定的两组pH值、电导率进行了比较分析。结果表明: ①两组pH值间、两组电导率间都显著相关, 但从山上现场到实验室, 降水pH值向中性方向偏移, 偏移幅度与降雨量和现场pH值有关, 电导率的变化量与总离子浓度有关; 现场pH值与电导率之间存在显著的负相关($r = -0.51$)。②使用一次性采样袋采样, pH值偏差变小, 电导率之间相关性更强, 两组pH与电导率间都存在明显的负相关。与中东部其他高山站的观测结果相比, 黄山降水酸度弱, 离子污染程度轻。

关键词: 黄山; 降水酸度; pH值; 电导率

中图分类号: X517 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1964-09

Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang

SHI Chun-e^{1,2}, DENG Xue-liang¹, WU Bi-wen¹, HONG Jie³, ZHANG Su¹, YANG Yuan-jian¹

(1. Key Laboratory for Atmospheric Sciences & Remote Sensing of Anhui Province, Anhui Institute of Meteorological Sciences, Hefei 230031, China; 2. State Key of Laboratory of Atmospheric Boundary Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. Huangshan Meteorological Office, Huangshan 242709, China)

Abstract: To understand the general characteristics of pH distribution and pollution in precipitation at Mt. Huang, statistical analyses were conducted for the routine measurements of pH and conductivity (K) at Mt. Huang during 2006-2011. The results showed that: ① Over the period of study, the annual volume weighted mean (VWM) precipitation pH varied from 4.81 to 5.57, with precipitation acidity strengthening before 2009 and weakening thereafter. The precipitation acidity showed evident seasonal variations, with the VWM pH lowest in winter (4.78), and highest in summer (5.33). The occurrence frequency of acid rain was 46%, accounting for 45% of total rainfalls and with the most frequent pH falling into weak acid to neutral rain. ② The annual VWM K varied from 16.91 to 27.84 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, with no evident trend. As for ions pollution, the precipitation was relatively clean at Mt. Huang, with the most frequent K range being below 15 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, followed by 15-25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. From February 2010 to December 2011, precipitation samples were collected on daily basis for ions analysis, as well as pH and K measurement in lab. Detailed comparisons were conducted between the two sets of pH and K , one set from field measurement and the other from lab measurement. The results indicated: ① The lab measured pH (K) was highly correlated with the field pH (K); however, the lab pH tended to move towards neutral comparing with the corresponding field pH, and the shift range was closely correlated with the field pH and rainfall. The shift range of K from field to lab was highly correlated with the total ion concentration of precipitation. The field K showed evident negative correlation with the field pH with a correlation coefficient of -0.51 . ② When sampling with nylon-polyethylene bags, the statistics showed smaller bias between two sets of pH, with higher correlation coefficient between two sets of K . Furthermore, the lab K also showed evident negative correlation with the lab pH. Comparing with the observations at other alpine sites in central to eastern China, the natural precipitation at Mt. Huang was weaker in acidity and contains lower ion concentration.

Key words: Mt. Huang; precipitation acidity; pH; conductivity

高山站, 因为海拔高, 其降水化学特征可以反映出区域性的大气质量特征, 因此, 对高山降水化学的研究更有助于了解区域性的大气污染状况^[1]。早在20世纪80、90年代, 欧洲和北美就开展了不少高山云雾水和降水化学的研究, 重点是研究降水化学对森林等生态环境的影响^[2~4]。研究结果普遍认为由

于酸雨对土壤的影响, 会对森林有间接影响, 如酸雨

收稿日期: 2012-08-10; 修订日期: 2012-10-12

基金项目: 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室开放课题项目(LAPC-KF-2011-05); 安徽省高层次人才项目(2009Z019); 国家科技部公益性行业(气象)科研专项(GYHY201206011-04)

作者简介: 石春娥(1970~), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为大气物理与大气化学, E-mail: Chun.e.shi@gmail.com

会通过降低部分高山树木的耐寒性而造成树木的死亡^[4]. 目前, 美国仍有多个组织在联合开展高山降水化学观测以了解高海拔地区降水化学沉降的时空分布趋势以及硫、氮沉降对高山生态环境的影响^[5,6].

自 20 世纪 80 年代开始, 中国学者陆续进行了大量的高山降水化学研究, 主要包括西北地区的瓦里关山^[7]、天山^[8], 西藏中部^[9], 华北的泰山^[10,11], 西南地区的玉龙雪山^[12]、峨眉山^[13]、雷公山、鹿冲关^[14], 中部的衡山^[15], 中东部的庐山^[16], 东南的茫荡山^[17]以及南岭瑶山^[18]. 在濒临长三角经济区且海拔高度相对较高的黄山光明顶, 在“八五”酸雨攻关项目中, 也进行过一些降水化学的观测^[19], 但未见详细报道. 上述观测研究加深了人们对我国不同地区降水酸碱度、化学组分及其季节变化以及与低海拔地区降水化学差异的了解, 但由于我国幅员辽阔, 人口与工业分布不均, 下垫面土壤与植被分布东西南北差异很大, 因而各地观测的高山降水酸碱度和化学特征差异较大^[16].

为了加强酸雨的监测与研究, 中国气象局于 1989 年在黄山光明顶布设了酸雨观测站, 常规观测降水 pH 值和电导率(用 K 表示). 根据对黄山光明顶酸雨监测资料的分析, 笔者发现 2009 年之前, 黄山酸雨发生率呈逐年增加的趋势^[20], 因此, 为加强黄山降水化学成分的了解, 于 2010 年 2 月~2011 年 12 月在黄山光明顶气象站对降水进行采样、存储, 并运送回合肥进行离子成分分析, 同时也分析 pH 值和电导率. 这样, 对 2010 年 2 月~2011 年 12 月期间的所有降水事件, 本研究拥有两套 pH 值和电导率, 即山上现场分析与实验室分析. 通常由于样品存储、运输过程中微生物的分解作用和降水中颗粒物的溶解及其他化学变化, 以及测量仪器、人员的不同, 实验室和现场所测的 pH 值存在一定的差异^[21]. 而现场测量的 pH 值被认为更能代表降水实际酸碱度. 但是深入研究现场测量与实验室测量 pH 之间的差值也很有意义, 因为这个差值并不统一, 与降雨量和现场测定 pH 值都有密切关系. 现场与实验室测量的两种 pH 值间的差值及其物理意义早已引起国外学者的注意^[22,23], 但类似工作在国内还不多见. 因此, 本研究首先对黄山光明顶气象站 2006 年 1 月~2011 年 12 月的常规观测资料(pH 值和电导率)进行统计分析, 主要分析黄山降水 pH 值和电导率分布特征及季节变化以了解黄山降水酸碱度和污染程度的总体特征; 然后, 对 2010 年 2 月~

2011 年 12 月山上现场测量及与实验室测量 pH 值和电导率进行比较, 分析其差异原因, 以期后续深入研究黄山降水化学特征和影响机制奠定基础. 最后, 与泰山、庐山、衡山近年来的观测结果进行了简单比较.

1 材料与方法

1.1 站点介绍

黄山位于中国南北气候过渡带的皖南山区, 是中国中东部相对较高的山脉之一, 有多个海拔 1 800 m 以上的山峰, 黄山光明顶气象站(118°09'E, 30°08'N, 海拔 1 840.4 m)即位于黄山的第 2 高峰, 比庐山气象观测站高近 700 m. 从大的空间尺度上看, 黄山东部濒临工业发达的长三角经济区, 南北方向大约位于中国南北两大经济区(珠三角经济区和环渤海经济区)中间位置. 而且, 这三大经济区都属于 SO₂、NO₂ 等酸性物质的高值区^[24]. 从小的空间尺度看, 黄山站远离城市, 坐落在山顶, 距离最近的城市屯溪约 67 km, 海拔高度相差约 1 700 m, 方圆几十千米内无大的污染源, 本地污染物排放量非常小. 因此, 这里的降水酸碱度和污染程度有较好的区域代表性. 黄山光明顶气象站建于 1956 年, 近 30 年平均年降水量为 2 257 mm, 最大年降水量 3 227 mm, 最小年降水量 1 687 mm.

1.2 降水 pH 值和电导率的常规监测

降水样品采集点位于黄山光明顶气象观测站内. 遵循文献[25]的技术要求, 配备仪器, 进行手工采样和测量, 采样设备是直径为 36 cm 的聚乙烯采样容器, 采样时采样设备均距地 1 m 左右, 以防止地面尘埃溅入. 按照 08:00~次日 08:00 收集降水样品, 样品取回室内平衡一段时间后, 用 0.01 级 pH 计和 1.0 级电导率仪(PHS-3B 型 pH 计和 DDS-307 型电导率仪, 上海雷磁仪器厂, 中国)进行检测.

降水量资料则采用常规地面气象观测记录的数据.

1.3 降水采样和实验室分析

2010 年 2 月~2011 年 12 月, 用与 1.2 节同样的方法, 平行采集到 220 个样本, 用于实验室离子成分分析, 实验室同时还分析 pH 值和电导率. 其中 2010 年 10 月~2011 年 6 月用同样的采样桶和一次性尼龙-聚乙烯复合膜采样袋采集. 降水样品采集后, 保存在干净的聚乙烯塑料瓶中, 在 4℃ 的环境中冷藏储存, 每月用低温保温箱(冷冻过的蓝冰)将样品运送至合肥, 委托安徽省地质实验研究所进行离

子成分测定. 实验室使用电导率仪测定电导率, 离子选择电极的方法测定 pH 值.

1.4 采样和质量资料的质量保证

2006 年之后, 该测站酸雨观测业务每年接受中国气象局相关业务单位按年度进行的未知水样考核. 未知水样 pH 和电导率测定的成绩均为优秀和合格.

对于进行离子成分分析的降水样品的采集和分析尽可能地执行严格的质量保证和质量控制, 采样仪器的漏斗、定量瓶和收集降水的聚乙烯塑料瓶在每次采样前都要用自来水和纯净水清洗干净(聚乙烯瓶由本课题组负责清洗), 避免降水样品受到污染. 在运送途中使用蓝冰和保温箱确保样品低温.

在分析山上现场常规观测 pH 值和电导率资料时采用 K-pH 不等式方法^[26]进行数据校验, 2006 年 1 月~2011 年 12 月总有效样本个数为 819 个, 降水量为 12 565.2 mm, 用 K-pH 不等式方法剔除样本 10 个(占总样本数的 1.2%), 剔除降水量 131.8 mm(占总降水量的 1%).

1.5 分析方法

参考文献[16]的方法, 本研究除了统计实测电导率外, 也计算了非氢电导率(K_{NHC}), 因为从非氢电导率变化的分析中可得到降水中可溶性离子成分总量的变化, 从而可了解降水的清洁程度. 本研究所有降水 pH 平均值均采用氢离子浓度雨量加权平均方法计算; 降水电导率平均值和非氢电导率的平均值均采用雨量加权平均方法计算.

为了描述不同酸度降水的年、季变化特征, 对降水酸度进行分级统计处理, 具体分级标准为: 强酸性($\text{pH} < 4.5$)、中度酸性($4.5 \leq \text{pH} < 5.0$), 弱酸性($5.0 \leq \text{pH} < 5.6$)^[27].

2 结果与讨论

2.1 山上现场观测降水 pH 值与电导率

2.1.1 黄山各级酸雨发生频率和电导率的年变化

图 1 给出了 2006~2011 年黄山各级酸雨发生频率和体积加权平均 pH 值的年变化. 从中可见, 从 2006~2009 年, 黄山中度以上酸雨发生频率和总酸雨频率都呈稳步上升的趋势, 到 2009 年分别达到 45% 和 70%, 最近两年有下降的趋势. 对应地, 年均 pH 值也在 2009 年出现最低值, 为 4.81.

黄山电导率和非氢电导率的年均值起伏不大(图 2), 2011 年最低, 分别为 $16.91 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $15.02 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 2007 年最高, 分别为 $27.84 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $25.05 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

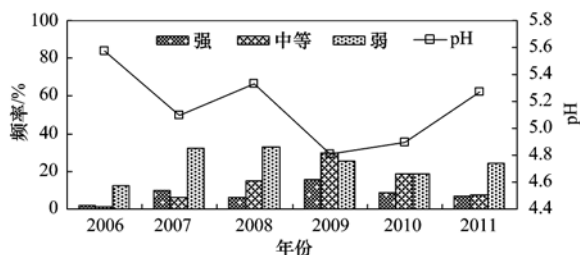


图 1 2006~2011 年黄山各级酸雨发生频率和体积加权平均 pH 值

Fig. 1 Variations in annual frequency of acid rain of each grade and volume-weighted mean precipitation pH at Mt. Huang during 2006-2011

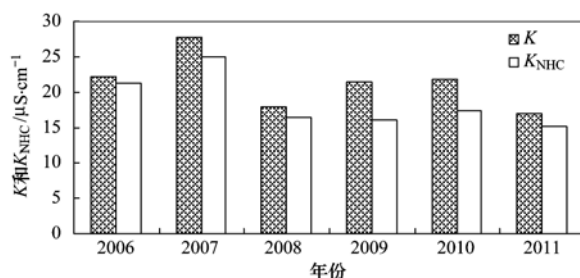


图 2 2006~2011 年黄山体积加权平均电导率

Fig. 2 Variations of annual volume-weighted mean precipitation conductivity at Mt. Huang during 2006-2011

2.1.2 降水 pH 和电导率频率分布特征

图 3 和图 4 是黄山 2006~2011 年降水 pH 值和电导率分布情况. 图 3 中水平坐标的分辨率为 0.2. 发生频率最高的 pH 值在 5.6~5.8, 其次是 5.8~6.0 和 5.4~5.6, 即较高的发生频率在弱酸性到近中性, 对应的降水量所占比例也比较高. 从降水事件看, 约有 46% 属于酸雨, 7% 属于强酸雨, 酸性降水累积雨量约占总雨量的 45%.

从降水电导率看, 黄山光明顶的降水比较干净, 发生率最高的电导率范围是 $< 15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; 其次是 $15 \sim 20 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 和 $20 \sim 25 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 随着电导率加大, 发生率减小, 约 54% 的降水事件电导率低于 $25 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 约 90% 的降水事件电导率低于 $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 约 50% 降水量的电导率低于 $15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, 90% 降水量的电导率低于 $45 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

pH 值与电导率之间存在明显的负相关 ($r = -0.4$, 通过置信水平 99% 的信度检验, 图 5), 即降水酸性越强电导率越大, 降水电导率与降水酸度之间有密切联系, 说明 H^+ 对降水电导率的贡献显著, 这可能与黄山降水比较干净、离子污染程度较轻有关, 因为这种关系并不是普遍存在的, 例如, 安徽省气象局的其他几个酸雨观测站的观测资料均不存在

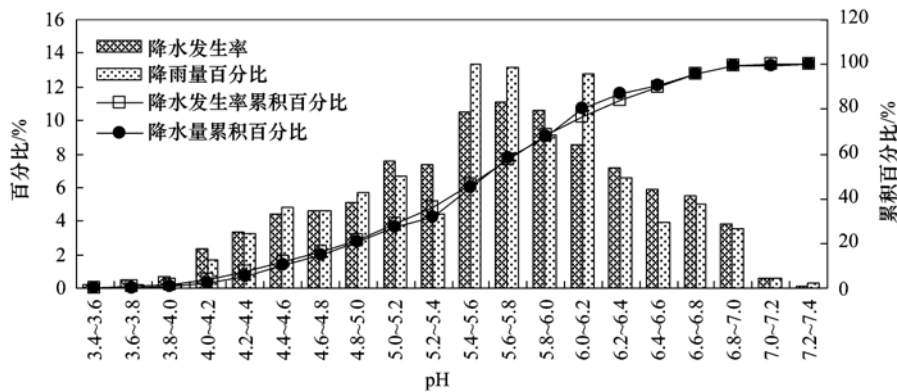


图3 2006~2011年黄山降水pH值分布

Fig. 3 Frequency distribution of precipitation pH at Mt. Huang during 2006-2011

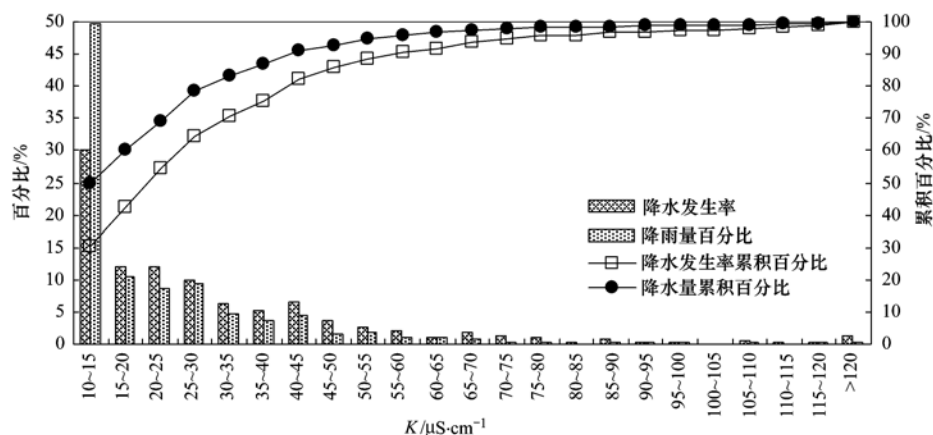


图4 2006~2011年黄山降水电导率分布

Fig. 4 Frequency distribution of precipitation conductivity at Mt. Huang during 2006-2011

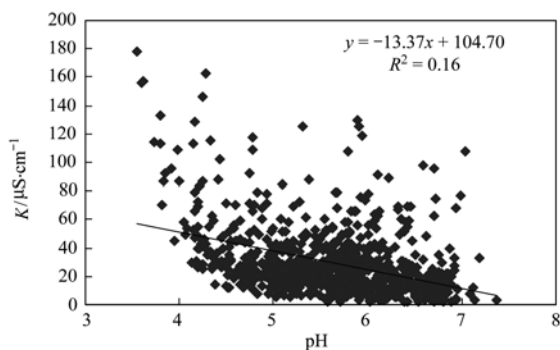


图5 2006~2011年黄山pH值与电导率的散点图

Fig. 5 Scatter plots of precipitation pH and conductivity at Mt. Huang during 2006-2011

这种显著的负相关关系。

2.1.3 pH值和电导率的月、季变化

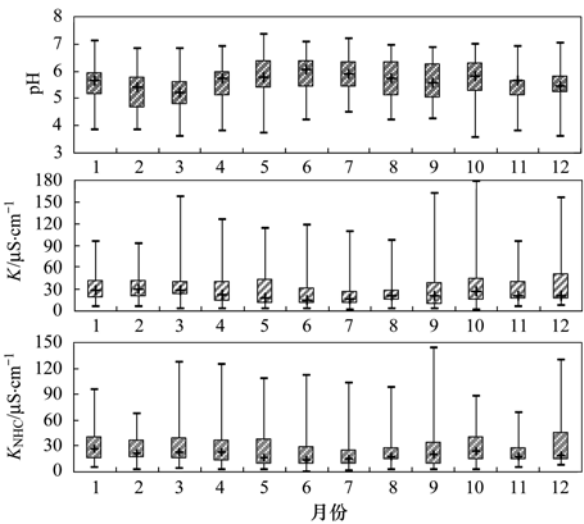
图6、图7是黄山降水pH值、电导率和降水量的月变化。从中可见,黄山夏季6~7月降水量最高,其次是8月、5月,冬季12月~次年1月降水量最低;对应地,平均pH值也是夏季最高、冬季最

低,中值在3月最低、6月最高,pH值的变化幅度在夏季小、冬季大,每个月的最大值都在7.0附近,6~9月以外的月份最低值都在4.0以下。电导率和非氢电导率总体上不高,但每个月都会有个别大值出现,大部分月份的最大值超过100 μS·cm⁻¹。从中值看,电导率和非氢电导率都是5~8月较低,冬半年较高。需要指出的是,pH的低值和电导率的最大值往往对应着较低的降水量,如pH低于4.0和电导率超过100 μS·cm⁻¹对应的样本降水量基本上都在20 mm以下,大部分不足5 mm,因此这些个例对黄山降水总体酸碱度和污染程度的影响不大。

从季节变化情况看(表1),四季降水量的变化顺序为夏季>春季>秋季>冬季,其中,夏季降水约占全年的一半。相应地,由于降水的稀释作用,夏季各级酸雨发生频率最低,平均pH值最高,电导率最低;反之,冬季降水量最低,强酸雨和总酸雨发生率都最高,平均pH值最低,电导率和非氢电导率都最高。春季虽然降水量居第二,但是,从平均pH值和

表 1 2006~2011 年黄山各级酸雨、电导率季节变化

Table 1 Seasonal distributions of occurrence frequency of acid rain at each grade, K and K_{NHC} at Mt. Huang during 2006-2011							
季节	强 /%	中度 /%	弱/%	pH	$K/\mu S \cdot cm^{-1}$	K_{NHC} $/\mu S \cdot cm^{-1}$	降雨量 /mm
春季(3~5月)	9.00	15.64	27.01	4.98	24.33	20.65	539.62
夏季(6~8月)	2.92	11.68	18.61	5.33	16.80	15.14	1 003.85
秋季(9~11月)	11.72	14.48	24.83	5.00	21.97	18.48	320.54
冬季(12~次年2月)	12.17	11.11	28.57	4.78	30.46	24.70	265.17



箱线图的上下两根短横线(—)分别表示最大值和最小值,加号(+)表示中值,箱子的上下边分别表示25%与75%分位

图 6 2006~2011 年黄山 pH、K 与 K_{NHC} 的月变化

Fig. 6 Monthly variations of precipitation pH, K and K_{NHC} at Mt. Huang during 2006-2011

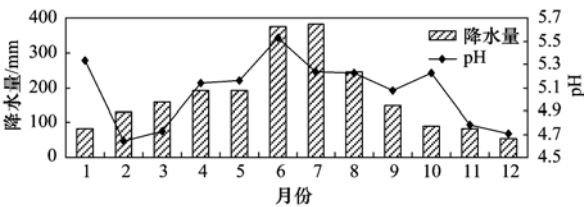


图 7 2006~2011 年黄山降雨量与降水体积加权平均 pH 的月变化

Fig. 7 Monthly rainfall and volume-weighted mean precipitation pH at Mt. Huang during 2006-2011

电导率看,其污染程度比秋季高,其中原因需要进一步研究.

2.2 2010 年 2 月~2011 年 12 月实验室测定 pH 与电导率及其与现场测定值的比较

为减少山上观测人员的工作量,也为了减少操作不当带来的人为干扰,在样品分析之前,没有对样品进行过滤,这可能会给实验室分析结果带来一定的影响,如样品中颗粒物在存储期间缓慢溶解导致降水 pH 值和电导率发生改变.但是,在近两年的采

样离子分析中,有 9 个月使用了一次性采样袋,这期间的样品会更少地受采样桶污染的影响,因此,本研究首先对 2010 年 2 月~2011 年 12 月所有样本的分析结果进行了统计分析,然后对使用采样袋期间(2010 年 10 月~2011 年 06 月)的分析结果进行统计分析.

2.2.1 两套 pH 值和电导率的比较

在实际测量中,受各种干扰的影响,测量值中不可避免地有部分异常值出现,这种异常值,又称为野值,为去除个别可能由于观测人员人为误差导致两者差异较大的影响,按莱特准则,去掉 8 个野值.图 8 给出了两组 pH 值之间的对比,二者存在显著的相关性($r=0.67$),二者差值(实验室-山上)在 $-1.27 \sim 1.64$,平均偏差为 0.14.

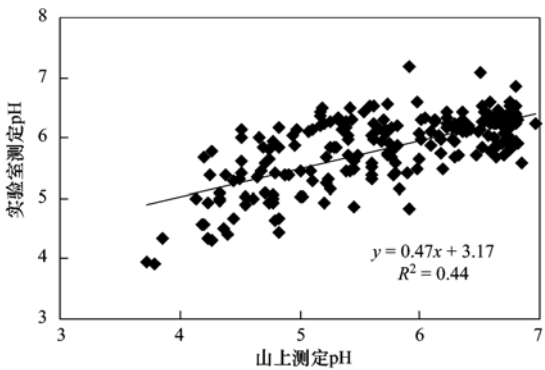


图 8 山上现场与实验室测量 pH 值的散点图

Fig. 8 Scatter plot of precipitation pH measured at field and in lab

山上与实验室测量的电导率之间存在非常显著的正相关(图 9),去除野值之后 209 个样本,相关系数为 0.93,差值范围(实验室-山上)为 $-20 \sim 25.5 \mu S \cdot cm^{-1}$,平均偏差为 $-0.5 \mu S \cdot cm^{-1}$,实验室测得电导率总体比山上略低.两组电导率之间的相关性大大超过两组 pH 值之间的相关性,这可能与两种仪器的敏感性不同有关,据了解,测量降水 pH 值的仪器非常敏感,稳定性差.

统计发现,观测期间山上 pH 值与电导率之间存在显著的负相关($r=-0.51$),但这种关系在实验室测量的 pH 值与电导率之间并不存在,这也说明

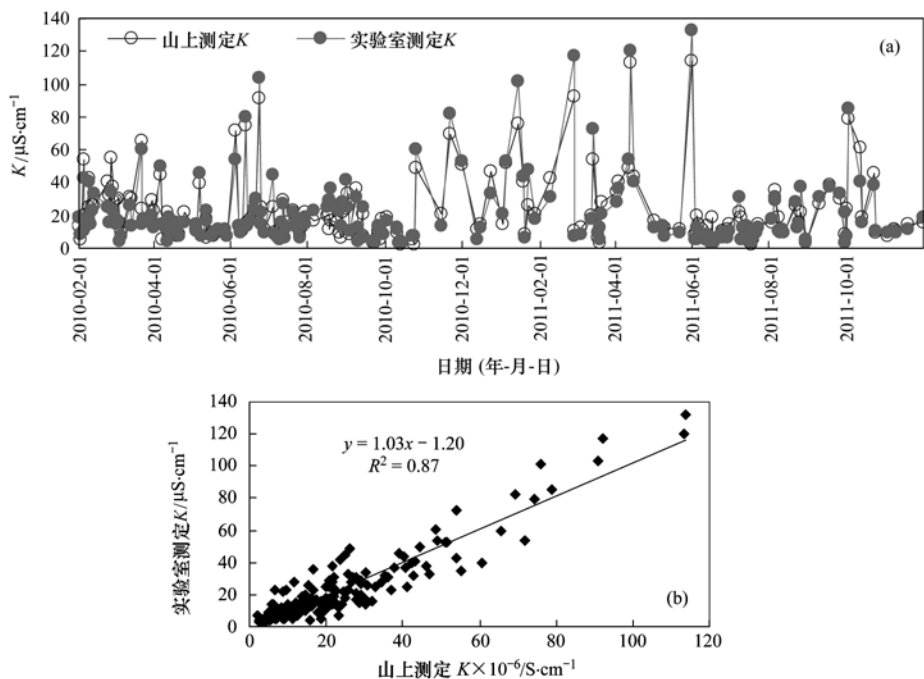


图 9 山上现场与实验室测得的电导率之间的比较

Fig. 9 Scatter plot of field K and lab K

降水样品在从采样到实验室测量的过程中,其离子成分会有改变,如有颗粒物溶解导致降水中离子成分增多.

2.2.2 现场测量与实验室测量间差异原因分析

根据前人的研究结果^[21],很容易把山上与实验室测量之间的差值归结于样品中颗粒物的溶解导致离子浓度的变化. 本研究的统计发现 pH 值差值大小与现场测定的 pH 值成显著的负相关[图 10 (a)],现场测定的降水酸性越强(pH 值越低),实验室测得的 pH 值超过现场测定值越大;反之,实验室测得的 pH 值低于现场测量的越多,也就是说,实验室测得的 pH 值更趋于中性. 山上与实验室测量差值的绝对值与雨量也有弱的负相关关系,雨量越大,差值的绝对值越小[图 10(b)]. 从现场测量到实验室测量 pH 值的这种变化说明降水样本中存在可溶性颗粒物或者说微生物导致颗粒物溶解了,颗粒物

浓度与雨量大小反相关,然而 pH 值差值或差值绝对值与所测得的总离子浓度之间并不存在显著的相关性,这说明颗粒物的溶解不是导致两套 pH 差值的唯一原因.

为理解黄山降水电导率的季节变化及两套电导率差值的产生原因,根据实验室测定的无机离子浓度计算了逐个降水事件的总阴阳离子浓度和总离子浓度:

$$\begin{aligned} [\text{总阴离子}] &= [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{Cl}^-], \\ [\text{总阳离子}] &= [\text{H}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Na}^+] + [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{+}] + [\text{NH}_4^+] \\ [\text{总离子}] &= [\text{总阴离子}] + [\text{总阳离子}] \end{aligned}$$

式中,[X]内为 X 离子的当量浓度.

用最小二乘法和莱特准则去除野值后,剩余样本数为 206 个. 图 11 是采样期间阴阳离子总当量浓度的变化情况. 由图 11 可见,所测阴阳离子

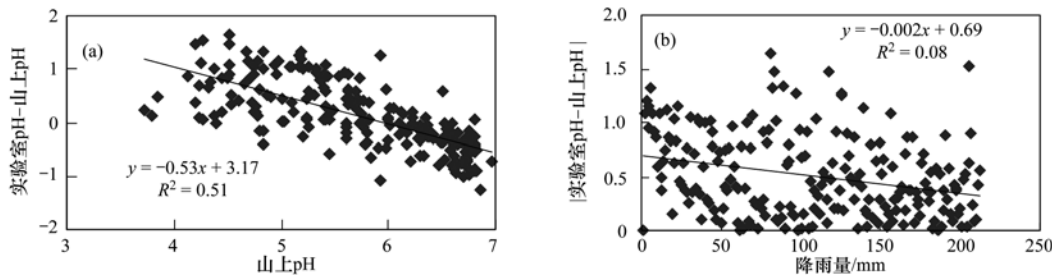


图 10 山上现场与实验室测得 pH 差值与山上 pH 值和降水量反相关关系

Fig. 10 Scatter plots of pH bias and field pH, pH difference and rainfall

当量浓度变化趋势比较一致,二者高度相关(相关系数为 0.84),由最小二乘法得到的最佳拟合方程的斜率为 1.16,总体上,总阳离子当量浓度略高于总阴离子当量浓度. 比较图 9(a)与图 11,现场和实验室测得的电导率都与降水中离子浓度变化趋势非常一致,与总离子浓度间的相关系数分别为 0.87(山上 K 值)和 0.90(实验室 K 值),大大超过

同期现场 pH 与电导率之间的相关性,说明氢离子以外的离子对黄山降水电导率的作用超过氢离子的贡献. 另外,实验室与山上测得电导率差值的绝对值与总离子浓度之间存在明显的正相关,相关系数为 0.48(通过置信水平为 99% 的信度检验),这意味着电导率的改变与降水样本中离子浓度的改变有密切联系.

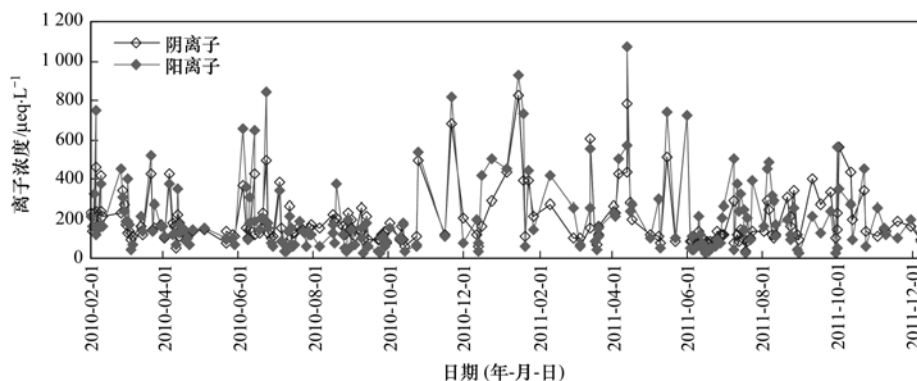


图 11 2010 ~ 2011 年黄山降水总阴、阳离子当量浓度的变化情况

Fig. 11 Variations of total cations and total anions in precipitation at Mt. Huang during 2010-2011

2.3 使用采样袋时段实验室测定 pH 和电导率与现场测定值的比较

2010 年 10 月 ~ 2011 年 6 月,在采样桶之上覆盖一次性尼龙-聚乙烯复合膜采样袋采集样品,可有效去除采样桶内壁污染的影响,理论上样品更纯,共有 67 个降水样本.

使用莱特准则去除部分野值后,剩 63 对 pH 值和 61 对电导率. 使用一次性采样袋,山上与实验室测定的 pH 值的吻合程度比 2.2 节中使用观测期间所有样品一起统计的吻合程度更好,如相关系数更高 ($r=0.76$),最佳拟合方程的斜率更接近于 1 (图

略),两处 pH 值之间的差值范围变小 ($-1.09 \sim 1.47$),平均偏差为 0.07,差值与山上 pH 值之间的负相关系数绝对值变大 ($r=-0.55$) (通过置信水平 99% 的信度检验),说明使用采样袋后,降水样品变得更干净.

两组电导率之间的相关系数为 0.97,明显高于 2.2 节所有样品时的相关系数(0.93). 山上现场和实验室测定的电导率都与 pH 之间都存在显著的负相关(图 12),说明降水样品从上山到实验室测量期间离子成分变化不大. 因此,在进行高山降水化学观测研究时为确保观测质量,最好使用一次性采样袋.

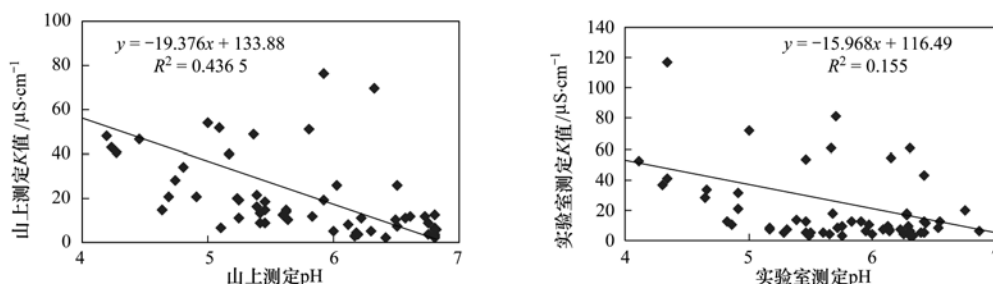


图 12 使用采样袋期间现场和实验室 pH 与电导率之间的对比

Fig. 12 Scatter plots of pH and K of field and lab measurements during the period using sampling bag

2.4 与中东部地区其他高山观测结果的比较

黄山与衡山、庐山、泰山同处我国中东部地区,海拔高度都在 1 000 m 以上,2000 年之后,国内一些学者相继在这些山上开展了降水化学的观测研

究. 在国家重点基础研究发展规划(973)项目的支持下,山东大学 2004 ~ 2006 年在泰山进行了降水采样和离子成分分析^[10],2009 年 3 ~ 5 月,在衡山进行了云和降水化学的观测研究^[15]. 庐山从 20 世纪 90

年代初就一直有降水 pH 值和电导率观测,2007 ~ 2009 年又增加了降水离子成分分析,Li 等^[16]详细报道了庐山降水化学观测结果. 上述观测结果都发表在国际著名刊物上,本研究根据文献报道结果,对这 4 座高山近年来观测降水 pH 值和电导率进行简单比较,见表 2.

表 2 黄山 pH 值和电导率与其它高山站观测结果的比较
Table 2 Comparison of the pH and K found in this work
with other alpine monitoring

位置	海拔 /m	时间	pH	电导率 / $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$
泰山 ^[10]	1 530	2004 ~ 2006 年	4. 70	22. 60 (2004 年)
庐山 ^[16]	1 150	2007 ~ 2009 年	4. 25	43. 00
衡山 ^[15]	1 279	2009 年 3 ~ 5 月	4. 35	27. 29
黄山 ^[19]	1 840	1980 年代	6. 33	—
黄山(本研究)	1 840	2010 年 10 月 ~ 2011 年 6 月	5. 12	14. 82
		2010 ~ 2011 年	4. 98	15. 92

从最近几年观测的结果看:庐山降水 pH 值最低(2007 ~ 2009 年平均为 4. 25),其次是衡山(2009 年春季 3 个月平均 4. 35),黄山最高(2010 ~ 2011 年平均为 4. 98),泰山居中(2004 ~ 2006 年平均为 4. 7);至于表征降水污染程度的电导率,黄山最低(2010 ~ 2011 年平均为 $15. 92 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),庐山最高(3 年平均为 $43 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),衡山与庐山接近(2009 年春季为 $27. 29 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$),泰山居中(2004 年为 $22. 6 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). 可见,黄山降水比衡山、庐山和泰山降水酸性弱,且离子污染轻. 但与 20 世纪 80 年代相比,pH 值下降了 1. 21 ~ 1. 35 个单位.

从多年观测的统计结果看,庐山降水 pH 值出现的峰值区间为 4. 2 ~ 4. 4,属于强酸雨,超过 70% 的降水为酸性降水;黄山降水 pH 值出现的峰值区间为 5. 6 ~ 5. 8,属于中性,约 46% 的降水为酸性;庐山降水电导率出现的峰值区间为 15 ~ 25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,随后是 25 ~ 35 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,黄山降水电导率出现的峰值区间为 10 ~ 15 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.

总之,黄山降水的酸性强度和污染程度都比附近各山都要低. 虽然黄山与庐山和泰山同处于东部,但由于海拔高度比庐山、泰山高,测站处于边界层之上的自由对流层下部,受边界层内局地人为排放影响较小,且山地范围大、远离大都市,因此,自然降水受污染程度低.

3 结论

(1)黄山 2006 ~ 2011 年降水已部分酸化,出现频率最高的降水事件 pH 介于 5. 6 ~ 5. 8,属于中性,

累计强酸雨(pH < 4. 5)频率为 7%,酸雨(pH < 5. 6)频率为 46%,酸性降水累积雨量约占总雨量的 45%. 从降水离子污染来看,黄山降水较为清洁,电导率在 $15 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下的降水发生频率最高,其次是 15 ~ 25 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 之间,约 90% 的降水事件电导率在 $60 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 以下.

(2)黄山春夏两季的降水多于秋冬,夏季约占全年的一半. 从累年的雨量加权季节平均值看,降水 pH 值的顺序是夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,电导率的顺序则相反.

(3)2010 ~ 2011 年平行采样时段,两种 pH 值、两种电导率吻合程度均较高,但从山上到实验室,降水 pH 值向中性方向偏移,偏移幅度与现场测定 pH 值和降水量关系密切;两组电导率之间平均偏差不大,偏差幅度与降水总离子浓度正相关;山上 pH 值与电导率存在明显的负相关($r = -0. 51$). 使用一次性采样袋时段的分析结果与总样品的分析结果略有差异,使用采样袋期间两组 pH 值与电导率间都有明显的负相关,结果更可靠.

(4)与庐山、泰山、衡山等站的观测结果相比,黄山降水酸度弱,离子污染程度轻;与上世纪 80 年代相比,其 pH 值明显下降.

致谢:感谢中国气象局大气成分中心的汤洁研究员和徐晓斌研究员对本工作的支持和指导!

参考文献:

[1] 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**(2-3): 266-281.
[2] Schemenauer R S, Banic C M, Urquizo N. High elevation fog and precipitation chemistry in southern Quebec, Canada [J]. Atmospheric Environment, 1995, **29**(17): 2235-2252.
[3] Anderson J B, Baumgardner R E, Mohnen V A, et al. Cloud chemistry in the eastern United States, as sampled from three high-elevation sites along the Appalachian Mountains [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(30): 5105-5114.
[4] Menz F C, Seip H M. Acid rain in Europe and the United States; an update[J]. Environmental Science and Policy, 2004, **7**(4): 253-265.
[5] Ingersoll G P, Mast M A, Campbell D H, et al. Trends in snowpack chemistry and comparison to National Atmospheric Deposition Program results for the Rocky Mountains, USA, 1993-2004[J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**: 6098-6113.
[6] Aleksic N, Roy K, Sistla G, et al. Analysis of cloud and precipitation chemistry at Whiteface Mountain, NY [J]. Atmospheric Environment, **43**(17): 2709-2716.
[7] 汤洁,薛虎胜,于晓岚,等. 瓦里关山降水化学特征的初步分析[J]. 环境科学学报, 2000, **20**(4): 420-425.
[8] Zhao Z P, Tian L D, Fischer E, et al. Study of chemical

- composition of precipitation at an alpine site and a rural site in the Urumqi River Valley, Eastern Tien Shan, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(39): 8934-8942.
- [9] Zhang Y L, Kang S C, Li C L, *et al.* Wet deposition of precipitation chemistry during 2005-2009 at a remote site (Nam Co Station) in central Tibetan Plateau [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2012, **69**(3): 187-200.
- [10] Wang Y, Wai K M, Gao J, *et al.* The impacts of anthropogenic emissions on the precipitation chemistry at an elevated site in North-eastern China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 2959-2970.
- [11] 王艳, 葛福玲, 刘晓环, 等. 泰山降水化学及大气传输的研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(7): 1187-1194.
- [12] 刘嘉麒, Keen W C. 中国丽江内陆降水背景值研究[J]. *中国环境科学*, 1993, **13**(4): 246-251.
- [13] Jiang D H. A lagrangian backward trajectory model and its application to the study of acid rain in the Emei mountainous district [J]. *Atmospheric Environment, Part B. Urban Atmosphere*, 1991, **25**(1): 59-65.
- [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] Sun M H, Wang Y, Wang T, *et al.* Cloud and the corresponding precipitation chemistry in south China: Water-soluble components and pollution transport [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, **115**: D22303, doi: 10.1029/2010JD014315.
- [16] Li Y, Tang J, Yu X L, *et al.* Characteristics of precipitation chemistry at Lushan Mountain, East China: 1992-2009 [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, **19**(6): 2329-2343.
- [17] Cheng Y L, Liu Y, Huo M Q, *et al.* Chemical characteristics of precipitation at Nanping Mangdang Mountain in eastern China during spring [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(8): 1350-1358.
- [18] 吴兑, 邓雪娇, 范绍佳, 等. 南岭大瑶山雾区锋面降水的雨水化学成分研究[J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2005, **44**(6): 105-109.
- [19] 黄美元, 植田洋匡, 刘帅仁. 中国和日本降水化学特性的分析比较[J]. *大气科学*, 1993, **17**(1): 27-38.
- [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] Latysh N, Gordon J. Investigation of differences between field and laboratory pH measurements of national atmospheric deposition program/national trends network precipitation samples [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, **154**(1-4): 249-270.
- [22] Chan W H, Tang A J S, Chung D H S, *et al.* An analysis of precipitation chemistry measurements in Ontario [J]. *Environmental Science & Technology*, 1987, **21**(12): 1219-1224.
- [23] Bigelow D S, Sisterson D L, Schroder L J. An interpretation of differences between field and laboratory pH values reported by the National Atmospheric Deposition Program/National Trends Network monitoring program [J]. *Environmental Science and Technology*, 1989, **23**(7): 881-887.
- [24] Richter A, Burrow J P, Nüß H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space [J]. *Nature*, 2005, **437**(7055): 129-132.
- [25] 中国气象局. 酸雨观测业务规范[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [26] 汤洁, 徐晓斌, 巴金, 等. 1992-2006 年中国降水酸度的变化趋势[J]. *中国科学*, 2010, **55**(8): 705-712.
- [27] 程新金, 黄美元. 降水化学特性的一种分类分析方法[J]. *气候与环境研究*, 1998, **3**(1): 82-88.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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