

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化

孙涛¹, 马明^{1,2}, 王定勇^{1,2*}, 黄礼昕¹

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 基于野外定点监测的方法, 于2012年9月~2013年8月对四面山常绿阔叶林大气降水、穿透水、枯透水、土壤渗滤液进行了持续1 a的氮、硫湿沉降动态变化的研究。结果表明: 四面山大气降水全年 pH 平均值为 4.89, 最大值为 5.14, 大气降水明显偏酸性; 土壤层和林冠层能使降雨的 pH 值有所升高, 其中土壤层对 pH 值的调升幅度最大, 其次为森林冠层; 森林冠层对 NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 有一定的吸附净化作用, 平均截留率分别为 56.68%、45.84%、35.51%; 研究结果也表明: 枯枝落叶的降解是导致各离子质量浓度在枯透水中增加的原因; 森林土壤能够吸附中和 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ , 释放出 NO_2^- 。中亚热带常绿阔叶林生态系统对大气降水中 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 的总截留率分别为 92.86%、57.86%、87.24%、87.25%, 对酸性降雨有一定的缓冲作用。

关键词: 氮硫沉降; 中亚热带; 常绿阔叶林; 层次; 截留

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4475-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.12.008

Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region

SUN Tao¹, MA Ming^{1,2}, WANG Ding-yong^{1,2}, HUANG Li-xin¹

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to investigate the dynamics of nitrogen and sulfur wet deposition in subtropical forest ecosystem, one typical forest stand, evergreen broad-leaved forest, at Simian Mountain located in Chongqing was selected in this research. Based on field monitoring, effects of precipitation, throughfall, litterfall, and groundwater runoff of the typical forest stand on the quality of water of Simian Mountain were investigated from September 2012 to August 2013. Results showed that the rainfall of Simian Mountain was apparently acidic, with average pH of 4.89 and maximum pH of 5.14. The soil, canopies and trunks could increase pH of precipitation, with soils having the maximum increment, followed by the forest canopy. Forest canopy had the function of adsorption and purification of NO_3^- , NO_2^- and SO_4^{2-} , and the average entrainment rate was 56.68%, 45.84% and 35.51%, respectively. Moreover, the degradation of litter was probably the main reason for the increase of ion concentrations in the surface litter water. Forest soils could absorb and neutralize NO_3^- , SO_4^{2-} and NH_4^+ , and release NO_2^- . The evergreen broad-leaf forest of mid-subtropical region had the function of interception on NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ and SO_4^{2-} , and the total entrainment rate was 92.86%, 57.86%, 87.24% and 87.25%, respectively, and it had a certain buffering function for the acid rain.

Key words: deposition of nitrogen and sulfur; mid-subtropical region; evergreen broad-leaf forest; storeys; entrainment

氮、硫元素是生命体生长所必需的基本元素,也是生态系统必不可少的物质。大气中氮和硫的化合物质量浓度都不是很高,然而随着人口的急剧增长、经济的迅猛发展和资源的大量消耗,原有的生态物质平衡发生了相应的变化,人类排放的污染物数量不断增加,对环境的危害日益严重。

大气降水是污染物沉降的最主要方式之一,同时也导致污染物远距离的转移。水是各种物质的良好溶剂,也是生态系统物质循环的载体,它能够直接与森林生态系统各个部分相互作用。降雨将大气中的污染物带入森林生态系统,同时降雨在流经森林的过程中会发生森林生态系统林冠层的吸附、淋

溶,枯枝落叶层的过滤和土壤层的净化,这一过程的发生使得降雨中的化学成分及浓度发生明显的变化^[1]。大量的研究结果表明,森林具有净化水质的作用,大气降水中的有害成分经过森林生态系统各个层次的截留后会大量减少^[2~4]。此外,也有研究者指出,林冠层是净化降雨的关键层次,其次为森林土壤^[3]。然而,不同的植被和植物种类的森林生

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2014-07-14

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430000); 国家自然科学基金项目(41103040); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2013B044)

作者简介: 孙涛(1989~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: suntao81589@126.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

态系统形成的穿透水和枯透水的量以及对降雨中各污染物的响应是不同的^[5-7]。西南地区是我国森林覆盖率第二大区,也是我国高山林区森林蓄积量最高的地区^[8],亚热带森林占整个林区的四分之三,丰富的亚热带森林资源具有很大的潜在净化水资源的功能。常绿阔叶林是该林区的最具代表地带性植被类型。重庆地处西南,广泛分布着中亚热带森林,但其特殊的地理环境和气候导致污染物不易扩散。因此,本文以中亚热带常绿阔叶林为研究对象,基于系统学原理,通过对不同层次降雨中的氮和硫沉降的质量浓度变化过程的分析,更深入地了解该森林生态系统中氮和硫沉降的动态变化过程,从而更充分地认识该林区的重要生态地位。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四面山国家级风景名胜区位于重庆江津市南端(106°17'~106°30'E, 28°16'~28°31'N),离重庆市主城区约 200 km,森林植被保存良好,林中植物种类复杂,主要以柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、四川大头茶(*Gordonia sichuanensis*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)、桫欏(*Eurya nitida* Korthals)、山胡椒(*Lindera glauca*)、山茶(*Camellia japonica*)、羽藓(*Thuidiaceae*)、楠竹(*Phyllostachys pubescens*)等为主要建群树种,森林占

地面积约23 000 hm²,森林覆盖率达 95.41%,是地球同纬度保存最为完好的亚热带常绿原始阔叶林带。四面山山势南高北低,最高峰蜈蚣岭海拔 1 709.4 m,最低处海拔 537 m。裸露地层为砖红色细砂岩和粉砂岩,主要土壤类型为酸性的红紫泥砂土和黄壤。

该地区属中亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛无霜期长,年均气温 13.7℃,8 月达到最高月平均气温 31.5℃,1 月达到月平均最低气温 -5.5℃。多年平均降水量为 1 250 mm,降雨多集中在 6~10 月。

1.2 样品采集

大气降水将大气中的各种污染物带入森林生态系统,经过森林林冠层、枯落物、土壤层最终流入河流湖泊或渗透到地下水。为了研究降雨过程中雨水经过森林空间不同层次时水质的变化,本试验对四面山常绿阔叶林的降水进行不同层次的采集,分别为:大气降水、穿透水、枯透水、土壤渗滤液。试验采样点设在四面山风景区大洪海核心区域的螺丝山上,如图 1 所示。在常绿阔叶林林外空旷且无遮挡物的地方利用 APS-3A 自动降雨降尘采集器采集大气降水样品;在常绿阔叶林内设置 20 m×20 m 样方,在样方内设置 50 cm 直径的聚四氟乙烯漏斗状穿透水采集装置,同时在样方内设置 2 m×2 m 样方挖掘土壤剖面,剖面四周设置隔水带防止土壤渗

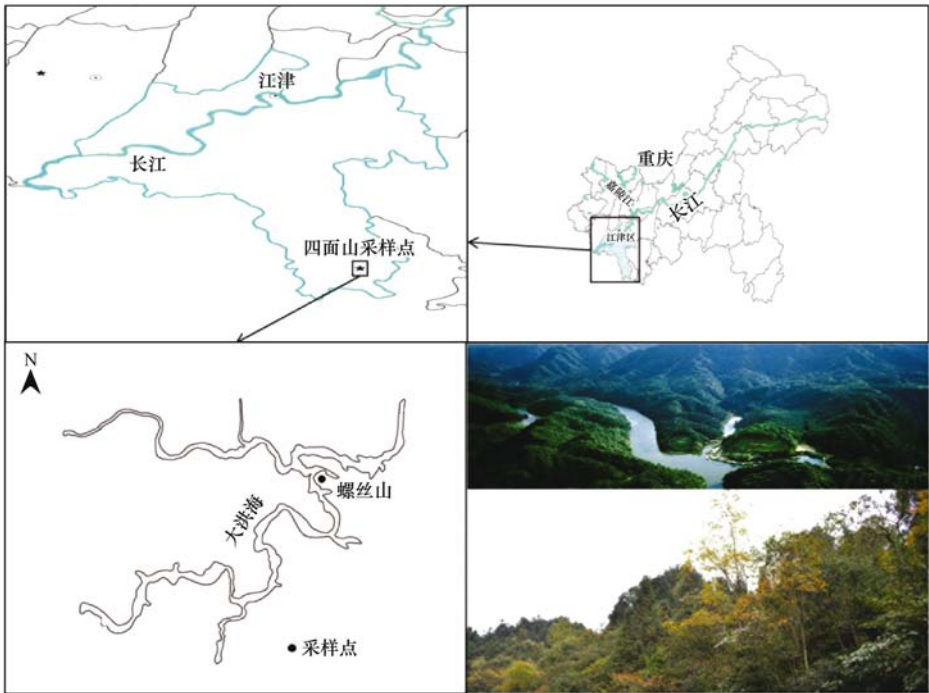


图 1 试验点地理位置示意

Fig. 1 Location of the test point

滤液的横向流动影响,放置集水板以收集枯透水、土壤渗滤液(0~20 cm)、土壤渗滤液(0~40 cm)、土壤渗滤液(0~60 cm)的水样。各水样均收集在事先经过 500℃ 高温超净化处理半小时以上的硼硅酸玻璃瓶中,瓶口装有漏斗状盖子,防止杂物进入瓶中,同时防止瓶内水样的蒸发浓缩。

1.3 水样测试

pH 值采用德国 Sartorius 公司生产的 PB-10 型 pH 计测定; NO_2^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 采用美国 Dionex 公司生产的 DX-120 型离子色谱仪测定。

野外试验从 2012 年 9 月~2013 年 8 月持续 1 a。试验期间共采集样品 24 次,116 个样品,其中只有 6、8、9 这 3 个月份每次均采集到全部的 6 个样品,其余月份由于降雨量的原因 3 个层次的土壤渗滤液均未完全采集到。

1.4 数据处理

试验中土壤渗滤液有 3 个测定值,本研究利用加权平均的方法计算出 1 个渗滤液的值以便计算土壤截留系数。文中数据的计算用以下 3 个公式计算:

$$c_{\text{渗滤液}} = \frac{20 \times c_{(0 \sim 20)} + 40 \times c_{(0 \sim 40)} + 60 \times c_{(0 \sim 60)}}{20 + 40 + 60} \quad (1)$$

$$F_w = c^i \times p^i \quad (2)$$

$$\text{平均截留系数} = \frac{F_w^i - F_w^j}{F_w^i} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{相对截留系数} = \frac{F_w^{\text{大气}} - F_w^j}{F_w^{\text{大气}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中, c^i 为各月不同降水离子浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); p^i 为各月降雨量 (mm); F_w 为月降水量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); i 是 j 的上一层次降水。

2 结果与讨论

2.1 水样 pH 值变化特征

四面山的全年大气降水 pH 均值为 4.89,由图 2 可见大气降水的最大 pH 值为 5.14,夏、秋、冬季 pH 值均小于 5.0,说明四面山降雨明显偏酸性;表 1 所示大气降水中 SO_4^{2-} 质量浓度全年均值为 $7.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相较内陆丽江背景值 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 高很多(表 2),而西南地区是我国酸雨污染较严重的地区,重庆市的主要能源结构为高硫煤^[10],煤资源的大量燃烧使大气中 SO_2 的质量浓度增高,进而导致降雨中 SO_4^{2-} 质量浓度的增高,研究结果表明这是导致大气降水 pH 值降低的主要原因,这与陶大钧等^[11]

的研究结果相一致。夏、秋两季四面山受到来自东北方向和北方气流的影响,使重庆市大气上方的气流经重庆市主城区后向南方移动到达四面山,而夏、秋两季又是重庆市能源消耗高峰期,大量的污染物被气流带到四面山,这可能是造成四面山大气降水夏、秋两季 pH 值较低的原因之一,冬季四面山降雨量较少,大气中污染物积累,形成的降雨中 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等质量浓度相对春季时较高,这是导致四面山大气降水冬季 pH 值较春季低的原因。降雨经过森林冠层, pH 值上升 0.33,说明森林冠层能够调升降雨的 pH,这与张胜利等^[3]在秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应中的研究结果基本一致。降雨经过土壤层过滤后相对枯透水的 pH 值有所升高,升高幅度为 0.90,但由于监测点土壤偏酸性的原因仍然比大气降水的 pH 值低,说明林冠层和土壤层均具有调节 pH 的功能,这可能是林冠层树叶及土壤层能够吸收降雨中的 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等离子使 pH 值有所升高。枯透水的 pH 值最低(图 2),这是由于西南地区亚热带森林,地表枯枝落叶较多,加上温度相对较高导致地面的枯枝落叶分解释放出了大量的腐殖酸所致^[12]。

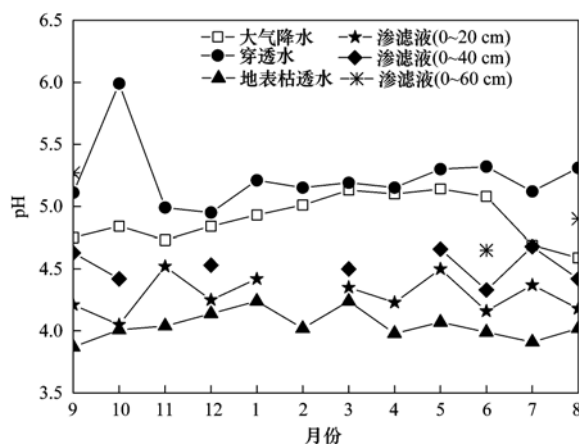


图 2 常绿阔叶林不同层次降雨 pH 变化趋势图

Fig. 2 The pH change in different rainfall of evergreen broad-leaf forest

2.2 森林不同层次对 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 的平均截留特征

大气中的氮素由于自然或人为的干扰影响而发生了变化,使得排放到大气中的大量含氮化合物经过物理和化学的变化后随颗粒、尘埃和降水降落到植物和土壤表面,重新进入地球生态系统的循环过程,形成氮的干湿沉降。湿沉降中氮元素的主要成分有 NO_3^- ,还包括一些 NH_4^+ 和可溶性的有机氮^[13]。

表 1 常绿阔叶林不同层次水质测试结果

Table 1 Water quality indicators of different of water in the evergreen broad-leaf forest									
降水类型	年降雨量 /mm	测定指标 /mg·L ⁻¹	样品数	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数	月均降水量 /mg·m ⁻²
大气降水	1 222	NO ₃ ⁻	24	1.21	2.53	0.95	0.30	0.25	128.91
		NO ₂ ⁻	24	0.05	0.12	0.02	0.03	0.50	4.25
		NH ₄ ⁺	24	0.97	1.79	0.68	0.25	0.26	89.28
		SO ₄ ²⁻	24	7.46	12.03	4.42	2.22	0.30	819.08
穿透水	924	NO ₃ ⁻	24	0.73	0.98	0.22	0.14	0.19	55.85
		NO ₂ ⁻	24	0.04	0.08	0.01	0.02	0.53	2.30
		NH ₄ ⁺	24	1.34	1.99	0.85	0.30	0.23	98.76
		SO ₄ ²⁻	24	6.35	10.80	3.92	1.91	0.30	528.21
枯透水	611	NO ₃ ⁻	24	1.70	2.94	1.24	0.30	0.18	89.66
		NO ₂ ⁻	24	0.05	0.08	0.03	0.02	0.31	2.21
		NH ₄ ⁺	24	1.89	2.79	1.25	0.35	0.18	97.63
		SO ₄ ²⁻	24	8.72	13.60	5.32	2.50	0.29	492.87
渗滤液	234	NO ₃ ⁻	44	0.45	0.96	0.13	0.18	0.39	9.20
		NO ₂ ⁻	44	0.10	0.52	0.05	0.09	0.94	1.79
		NH ₄ ⁺	44	0.57	1.05	0.22	0.20	0.35	11.39
		SO ₄ ²⁻	44	5.08	7.44	2.86	1.04	0.20	104.40

表 2 内陆丽江降水背景值^[9]

Table 2 The background value of inland precipitation						
项目	SO ₄ ²⁻		NO ₃ ⁻		NH ₄ ⁺	
	/μeq·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/μeq·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹	/μeq·L ⁻¹	/mg·L ⁻¹
最小值	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
最大值	185.6	8.9	21.7	1.3	300.7	5.4
加权平均值	9.0	0.4	2.3	0.1	6.8	0.1

研究期间大气降水中 NO₃⁻ 平均质量浓度为 1.21 mg·L⁻¹,大气降水中 NO₃⁻ 质量浓度在 8 月达到最大值,其他月份的变化波动性不大,变化幅度相对较小(图 3).降水经过森林冠层、地表枯落物和土壤层后平均截留率分别为 56.68%、-60.55% 和 89.74%(表 3),可知,森林冠层和土壤层对 NO₃⁻ 有截留作用,而枯落物层却释放出了 NO₃⁻,土壤层对 NO₃⁻ 的截留率较森林冠层大,地表枯落物释放 NO₃⁻ 的量较大.

大气降水中 NO₃⁻ 质量浓度经过森林冠层后有所下降,这是由于氮素是植物生长的必需元素而森林冠层枝叶对 NO₃⁻ 具有一定的吸收能力导致的.枯透水中的 NO₃⁻ 质量浓度相对大气降水有明显的上升,上升幅度为 0.49 mg·L⁻¹,并且枯透水中 NO₃⁻ 质量浓度在夏季达到最大值,冬季达到最小值,这是由于西南地区亚热带气候所具有的温度适宜、空气湿度大、微生物活动强烈进而导致地面的枯枝落叶分解释放出了更多的 NO₃⁻,夏季温度高、降雨量充足微生物活动更强烈加快了枯落物的降解^[14],而冬季温度相对较低.随着枯透水渗入到地下深度的不

同,NO₃⁻ 质量浓度呈逐渐下降趋势(图 3),这是由于 NO₃⁻ 是可移动的离子经常会以溶液的形式淋溶流失,枯透水中部分 NO₃⁻ 会随着地表径流的流失到达森林河流或者湖泊,另外土壤对 NO₃⁻ 的吸附以及湿润的土壤氧气浓度低,厌氧微生物经反硝化作用将部分 NO₃⁻ 转化为 NO₂⁻,氮元素作为植物生长需求量最大的必需矿质元素之一,土壤中的 NO₃⁻ 是植物通过根吸收无机氮的主要来源之一^[15, 16],部分 NO₃⁻ 被植物吸收利用.

由图 3 可见,森林各个层次的降雨中 NO₂⁻ 的质量浓度相较其它离子均很低,大气降水中 NO₂⁻ 平均质量浓度为 0.05 mg·L⁻¹(表 1),大气降水中 NO₂⁻ 质量浓度在 12 月达到最大值,其它月份的变化波动性和变化幅度均很小(图 3).降雨经过森林冠层、枯落物层和土壤层后平均截留率分别为 45.84%、3.92% 和 19.03%,可见,森林冠层、枯落物层和土壤层均对 NO₂⁻ 有截留作用且森林冠层的截留作用相对较大.

大气降水经森林冠层后 NO₂⁻ 的质量浓度减少,这是因为植物细胞中含有硝酸还原酶(nitrate

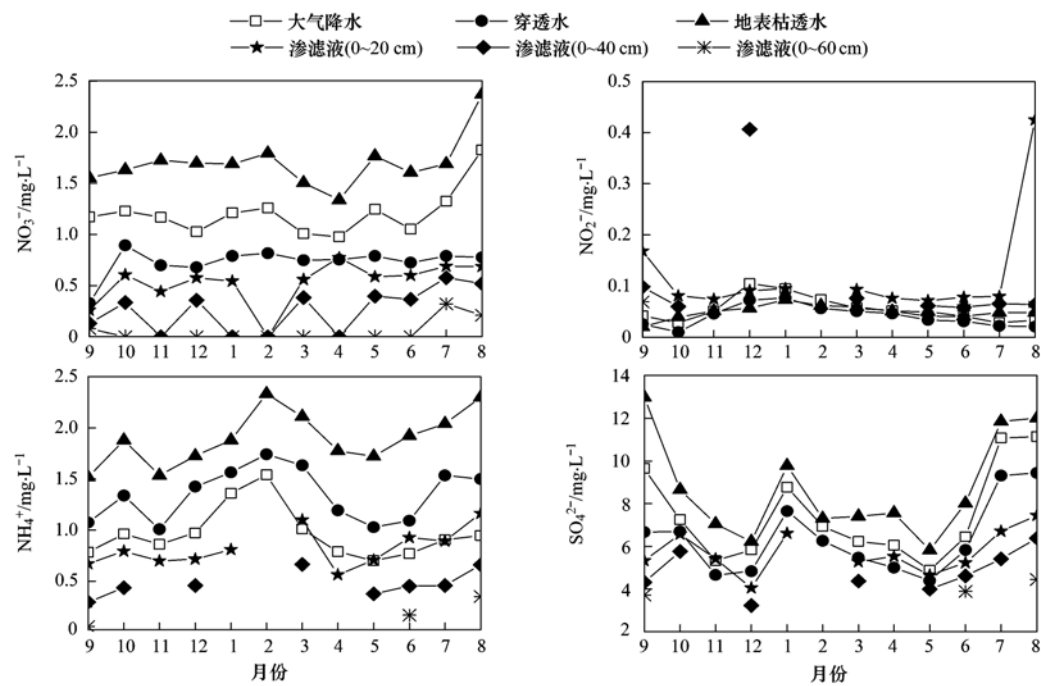


图3 常绿阔叶林降雨各层次中不同离子质量浓度随季节变化

Fig. 3 Monthly changes of ion concentrations in different rainfall of the evergreen broad-leaf forest

reductase, NR) 可将硝酸盐还原成亚硝酸盐, 进而亚硝酸盐进入叶绿体或质体中, 被亚硝酸盐还原酶 (nitrate reductase, NiR) 降解为铵, 参与到植物体内氮素的循环^[17, 18], 而森林冠层枝叶吸收了部分大气降水中的 NO_2^- 供植物利用. 地表枯透水中 NO_2^- 的质量浓度增加, 枯落物含氮有机物的降解和一系列的化学变化释放出一定量的亚硝酸盐, 降雨经过土壤表层后 NO_2^- 的质量浓度继续增加, 然后随着土壤深度的变化又出现下降趋势 (图 3), 这可能是由于林地酸性土壤反硝化细菌的群落在土壤 0~5 cm 含量最高^[19], 厌氧微生物在湿润且氧气浓度低的土壤中发生反硝化作用将部分 NO_3^- 转化为 NO_2^- 导致的.

研究期间大气降水中 NH_4^+ 平均质量浓度为 $0.97 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1), 由图 3 知各层次降水中 NH_4^+ 质量浓度在 2 或 3 月达到最大值. 降雨经过森林冠层、枯落物层和土壤层后平均截留率分别为

–10.61%、1.14% 和 88.34%, 可知, 森林冠层释放了部分 NH_4^+ , 枯落物层和土壤层均不同程度地截留了 NH_4^+ , 且土壤层对 NH_4^+ 的截留能力较高.

降雨经过森林林冠层 NH_4^+ 质量浓度有所增加, 这是由于植物细胞中含有硝酸还原酶 (nitrate reductase, NR) 可将硝酸盐还原成亚硝酸盐, 亚硝酸盐进入叶绿体或质体后又被亚硝酸盐还原酶 (nitrate reductase, NiR) 降解为铵盐^[17, 18], 大气降水对林木枝叶分泌物中的 NH_4^+ 具有淋溶作用^[20]. 降雨经过地表枯落物后 NH_4^+ 的质量浓度增加最大, 增加幅度为 $0.92 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着降雨对林冠层枝叶中 NH_4^+ 的淋溶和地表枯枝落叶降解释放出的 NH_4^+ 淋溶后使雨水中的 NH_4^+ 质量浓度积累进而导致 NH_4^+ 在枯透水中的质量浓度达到最大值. 枯透水中的 NH_4^+ 在经过土壤层下渗的过程中随着土壤深度的增加其质量浓度呈现明显降低的剖面分布特征 (图 3), 这主要是土壤胶体对 NH_4^+ 有较强的吸附能

表3 常绿阔叶林各层次对不同离子的平均截留量和截留率

Table 3 Average interception and entrapment rate of different ions by different storeys of the evergreen broad-leaf forest

名称	大气降水月均沉降量 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	林冠层		枯落物层		土壤层		总截留率 /%
		截留量 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	截留率 /%	截留量 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	截留率 /%	截留量 / $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$	截留率 /%	
NO_3^-	128.91	73.07	56.68	–33.81	–60.55	80.46	89.74	92.86
NO_2^-	4.25	1.95	45.84	0.09	3.92	0.42	19.03	57.86
NH_4^+	89.28	–9.48	–10.61	1.13	1.14	86.25	88.34	87.24
SO_4^{2-}	819.08	290.87	35.51	35.34	6.69	388.47	78.82	87.25

力^[21],以及植物对土壤中无机氮 NH_4^+ 的吸收^[16],导致土壤渗滤液中的 NH_4^+ 质量浓度降低.

研究期间大气降水中 SO_4^{2-} 平均质量浓度为 $7.46 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 1),而内陆大气降水中 SO_4^{2-} 质量浓度背景值为 $0.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 2),所以四面山降雨中 SO_4^{2-} 质量浓度偏高. 大气降水中 SO_4^{2-} 质量浓度在 8 月达到最大值(图 3),其它月份的变化波动性较小. 降雨经过森林冠层、枯落物层和土壤层后平均截留率分别为 35.51%、6.69% 和 78.82%,可知,森林冠层、枯落物层和土壤层均对 SO_4^{2-} 有截留作用,且土壤层对 SO_4^{2-} 的截留能力最大.

由于重庆市是西南地区工业最为集中发达的城市且重庆市的主要能源结构为高硫煤^[10],大量煤资源的燃烧将 SO_2 释放大气中, SO_2 在大气中经过一系列的化学变化转化成 SO_3 , SO_3 溶解于降雨后形成 SO_4^{2-} ,进而造成大气降水中的 SO_4^{2-} 质量浓度较高. 大气降水中 SO_4^{2-} 质量浓度在 8 月达到最大值 $11.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3),这是由于重庆市在夏季时能源需求量最高,夏季时煤资源消耗最大,进而排放到大气中的 SO_2 急剧增高,而夏季时,重庆市大气环流的方向向南,造成夏季四面山大气降水中的 SO_4^{2-} 质量浓度是全年中最高的时间段. 大气降水经过林冠层后有一定程度的降低是由于森林冠层对降雨中的 SO_4^{2-} 有一定的吸收截留作用. 枯透水的 SO_4^{2-} 质量浓度升高,升高幅度为 $1.26 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这是由于枯落物的分解^[22]释放出了 SO_4^{2-} 以及地表土壤中的 SO_4^{2-} 被溶解在枯透水中,而枯

透水下渗后 SO_4^{2-} 的质量浓度又出现了下降的趋势,主要是穿透水中高质量浓度的 SO_4^{2-} 被土壤胶体吸附及植物利用所致^[23]. 虽然枯透水和渗滤液中 SO_4^{2-} 质量浓度比大气降水高,但是由于枯透水和渗滤液的降水量相对大气降水要小很多,所以计算出沉降量结果枯落物层和土壤层均表现出截留作用.

2.3 森林各层次对 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 的相对截留特征

林冠层是森林与外界环境相互作用最直接、最活跃的界面层^[24],其与大气之间时刻进行着物质和能量的交换^[25, 26]. 由表 4 可知,森林冠层对 SO_4^{2-} 的相对截留量最大,对 NO_2^- 的相对截留量最小,而对 NH_4^+ 却没有截留能力反而释放出了 NH_4^+ . 由于大气降水中各离子质量浓度的基础值不同,林冠层对 NO_3^- 的相对截留率最大,对 SO_4^{2-} 的相对截留率最小. 枯落物层是土壤最有活力的部分,森林的更新与演替、土壤的通气性及水热状态和化学性质、分解者种群的数量与组成等均与枯落物层有着直接的关系. 同时,枯枝落叶层在涵养水源、保持水土等森林水文中具有极为重要的作用^[27]. 枯落物层只对 NO_3^- 、 NO_2^- 和 SO_4^{2-} 有不同程度的截留作用,而对 NH_4^+ 无截留作用. 虽然枯落物在适宜的环境下被微生物降解释放出了 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} ,以及降水的蒸发浓缩,导致枯透水中 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 质量浓度的增加,但在沉降量上 NO_3^- 和 SO_4^{2-} 还是表现出了截留作用.

表 4 常绿阔叶林各层次对不同离子的相对截留量和截留率

Table 4 Relative interception and entrapment rate of different ions by different storeys of the evergreen broad-leaf forest

名称	大气降水月均沉降量 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	林冠层		枯落物层		土壤层		总截留率 /%
		截留量 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	截留率 /%	截留量 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	截留率 /%	截留量 / $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$	截留率 /%	
NO_3^-	128.91	73.07	56.68	39.25	30.45	119.71	92.86	92.86
NO_2^-	4.25	1.95	45.84	2.04	47.96	2.46	57.86	57.86
NH_4^+	89.28	-9.48	-10.61	-8.35	-9.35	77.89	87.24	87.24
SO_4^{2-}	819.08	290.87	35.51	326.21	39.83	714.68	87.25	87.25

土壤层是联系大气圈、岩石圈、水圈和生物圈的重要媒介^[28],因此土壤在这些系统间元素循环方面发挥着重要作用,土壤的主要作用是支持生物生长,为其提供水分和营养成分.

研究表明,土壤层对 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 有截留作用,土壤层对 SO_4^{2-} 的相对截留量最大,对 NO_3^- 的相对截留率最大.

大气降水在经过森林生态系统的林冠层、枯落

物层和土壤层后 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 总的截留率分别为 92.86%、57.86%、87.24%、87.25%,森林生态系统截留了降雨中的 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} ,对酸性降雨有一定的缓冲作用.

3 结论

(1)四面山全年大气降水 pH 均值为 4.89,降雨偏酸性,夏、秋两季 pH 值均小于 5.0; 大气降水经

过土壤层、森林冠层后 pH 值有所升高,林冠层和土壤层具有调节 pH 的作用,土壤层对 pH 值的调升幅度最大. 大气降水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 质量浓度的增高是导致 pH 值较低的主要原因.

(2) 大气降水经过森林冠层后, NO_3^- 、 NO_2^- 、 SO_4^{2-} 的质量浓度均有降低的趋势,森林生态系统林冠层对这些离子有净化、截留的作用,平均截留率分别为 56.68%、45.84%、35.51%. 降雨淋溶了森林冠层枝叶表层的 NH_4^+ . 枯透水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 的质量浓度均较大气降水有所升高. 经过不同深度土壤后 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 的质量浓度呈现随着土壤深度的增加而下降的趋势,森林土壤胶体对这些离子有吸附中和或滞留的作用,随着土壤深度的增加 NO_2^- 的质量浓度增加. NO_2^- 随季节的变化较小, NO_3^- 质量浓度在 6 月达到最高值, NH_4^+ 质量浓度在春季时最高, SO_4^{2-} 质量浓度夏季时最高.

(3) 森林生态系统能够截留酸性降雨中的 NO_3^- 、 NO_2^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} , 对酸性降雨有一定的缓冲作用.

参考文献:

- [1] Potter C S, Ragsdale H L, Swank W T. Atmospheric deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian forest canopy[J]. *Journal of Ecology*, 1991, **79**(1): 97-115.
- [2] 张胜利. 秦岭火地塘森林水质的季节性变化特征[J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 316-321.
- [3] 张胜利, 李光荣. 秦岭火地塘森林生态系统不同层次的水质效应[J]. *生态学报*, 2007, **27**(5): 1838-1844.
- [4] 周光益, 徐义刚, 吴仲民, 等. 广州市酸雨对不同森林冠层淋溶规律的研究[J]. *林业科学研究*, 2000, **13**(6): 598-607.
- [5] 关晖, 肖化云, 朱仁果, 等. 马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪[J]. *环境科学*, 2013, **34**(10): 3777-3781.
- [6] 温达志, 陆耀东, 旷远文, 等. 39 种木本植物对大气污染的生理生态反应与敏感性[J]. *热带亚热带植物学报*, 2003, **11**(4): 341-347.
- [7] 陈树元, 徐和宝, 史建文, 等. 110 种树木对模拟酸雨和 SO_2 单一和复合暴露的反应[J]. *应用与环境生物学报*, 1997, **3**(3): 199-203.
- [8] 赵喆. 论我国森林资源的利用与保护对策[J]. *天津科技*, 2012, (4): 35-36.
- [9] 刘嘉麒. 降水背景值与酸雨定义研究[J]. *中国环境监测*, 1996, **12**(5): 5-9.
- [10] 彭岚, 何祖威. 重庆能源工业可持续发展的思考[J]. *重庆大学学报(自然科学版)*, 2002, **25**(8): 120-124.
- [11] 陶大钧, 张信华. 酸性降雨的物理和化学性质研究[J]. *环境污染与防治*, 1989, **11**(1): 26-28.
- [12] 杨曾奖, 曾杰, 徐太平, 等. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. *生态环境*, 2007, **16**(2): 649-654.
- [13] 周晓兵, 张元明. 干旱半干旱区氮沉降生态效应研究进展[J]. *生态学报*, 2009, **29**(7): 3835-3845.
- [14] Melillo J M, Naiman R J, Aber J D, *et al.* Factors controlling mass loss and nitrogen dynamics of plant litter decaying in northern streams [J]. *Bulletin of Marine Science*, 1984, **35**(3): 341-356.
- [15] Jones D L, Healey J R, Willett V B, *et al.* Dissolved organic nitrogen uptake by plants--an important N uptake pathway [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**(3): 413-423.
- [16] Killham K. *Soil Ecology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 108-141.
- [17] May S K, 顾立江, 程红梅. 植物中硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用[J]. *生物技术进展*, 2011, **1**(3): 159-164.
- [18] 方昭希, 王明录, 彭代平, 等. 硝酸还原酶活性与氮素营养的关系[J]. *植物生理学报*, 1979, **5**(2): 123-128.
- [19] Mergel A, Kloos K, Bothe H. Seasonal fluctuations in the population of denitrifying and N_2 -fixing bacteria in an acid soil of a Norway spruce forest[J]. *Plant and Soil*, 2001, **230**(1): 145-160.
- [20] 彭培好, 王金锡, 胡振宇, 等. 人工桉柏混交林中降雨对养分物质的淋溶影响[J]. *生态学杂志*, 1996, **15**(5): 12-15.
- [21] 王少平, 俞立中, 许世远, 等. 上海青紫泥土壤氮素淋溶及其对水环境影响研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2002, **11**(6): 554-558.
- [22] Maitat O, Boudot J P, Merlet D, *et al.* Aluminium chemistry in two contrasted acid forest soils and headwater streams impacted by acid deposition, Vosges mountains, N. E. France [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, **117**(1-4): 217-243.
- [23] 王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述[J]. *中国农学通报*, 2007, **23**(5): 249-253.
- [24] 李德志, 臧润国. 森林冠层结构与功能及其时空变化研究进展[J]. *世界林业研究*, 2004, **17**(3): 12-16.
- [25] Lowman M D, Nadkarni N M. *Forest Canopies*[M]. San Diego: Academic Press, 1995. 624.
- [26] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**(4): 811-841.
- [27] 李红云, 杨吉华, 鲍玉海, 等. 山东省石灰岩山区灌木林枯落物持水性能的研究[J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(1): 44-48.
- [28] Totsche K U, Rennert T, Gerzabek M H, *et al.* Biogeochemical interfaces in soil: the interdisciplinary challenge for soil science [J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2010, **173**(1): 88-99.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamidiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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