

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第12期

Vol.38 No.12

2017

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)

京津冀区域 PM _{2.5} 污染相互输送特征	王燕丽, 薛文博, 雷宇, 王金南, 武卫玲 (4897)
顾及尺度效应的多源遥感数据“源”“汇”景观的大气霾效应	许凯, 余添添, 孙姣姣, 袁兆祥, 秦昆 (4905)
基于多源数据的 PM _{2.5} 浓度时空分布预测与制图	肖璐, 郎艺超, 夏浪, 楼昭涵, 孙楠, 黄李童, George Christakos (4913)
华东区域 PM _{2.5} 变化背景下浙江省人口经济暴露水平评估	郁珍艳, 高大伟, 李正泉, 杨续超, 王阔, 马浩, 徐宏辉 (4924)
南京北郊不同大气污染程度下气溶胶化学组分特征	张程, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 林梦凡 (4932)
菏泽市 PM _{2.5} 碳组分季节变化特征	刘泽珺, 吴建会, 张裕芬, 梁丹妮, 马威, 刘保双, 冯银厂, 张勤勤 (4943)
辽宁典型城市道路扬尘 PM ₁₀ 、中水溶性无机离子组分特征及来源解析	张伟, 姬亚芹, 张军, 张蕾, 王伟, 王士宝 (4951)
天津冬季一次重污染过程颗粒物中水溶性离子粒径分布特征	姚青, 刘子锐, 韩素芹, 蔡子颖, 刘敬乐, 黄小娟, 刘景云, 王跃思 (4958)
高原城市昆明公路隧道大气中 PM _{2.5} 理化特征分析	王成辉, 闫琨, 韩新宇, 施择, 毕丽玫, 向峰, 宁平, 史建武 (4968)
2015 年中国近地面臭氧浓度特征分析	段晓瞳, 曹念文, 王潇, 张玉欣, 梁静舒, 杨思鹏, 宋秀瑜 (4976)
不同 CDPF 贵金属负载量对柴油公交车 VOCs 组分排放影响	楼狄明, 张子骏, 刘继凯, 谭丕强, 胡志远 (4983)
ENSO 事件对上海降水中氢氧同位素变化的影响	董小芳, 杨华玮, 张杰, 朱志鹏, 杨言, 郑祥民, 周立旻 (4991)
我国南方两个典型森林生态系统的硫、氮和汞沉降量	程正霖, 罗遥, 张婷, 段雷 (5004)
新安江水库二氧化碳排放的时空变化特征	杨乐, 李贺鹏, 孙滨峰, 岳春雷 (5012)
三峡库区表层沉积物营养盐时空变化及评价	卓海华, 邱光胜, 翟婉盈, 刘云兵, 兰静 (5020)
三门峡水库水体中不同形态汞的分布特征	程柳, 麻冰涓, 周伟立, 王力, 耿音, 刘清伟, 毛宇翔 (5032)
太子河流域中游地区河流硝酸盐来源及迁移转化过程	李艳利, 孙伟, 杨梓睿 (5039)
典型入湖河流水体氮素变化特征及其对降雨的响应: 以太湖乌溪港为例	连慧妹, 刘宏斌, 李旭东, 宋挺, 刘申, 雷秋良, 任天志, 武淑霞, 李影 (5047)
缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征	马明, 孙涛, 李定凯, 王定勇 (5056)
基于 MIKE11 模型提高污染河流水质改善效果的方法	熊鸿斌, 陈雪, 张斯思 (5063)
北京市地下水典型抗生素分布特征与潜在风险	陈卫平, 彭程伟, 杨阳, 吴玉梅 (5074)
深圳茅洲河下游柱状沉积物中碳氮同位素特征	凌郡鸿, 张依章, 王民浩, 周北海, 陶明, 陈惠明, 闫振广 (5081)
供水管网铁释放的影响因素相对重要性分析	刘莹, 于影, 石宝友, 刘书明, 吴雪 (5090)
低温高铁锰氨氮地下水生物同池净化	李冬, 曹瑞华, 杨航, 王刘煜, 张杰, 曾辉平 (5097)
臭氧预氧化强化混凝对二级出水中 DON 作用机制探讨	刘冰, 郑煜铭, 王大祥, 李清飞, 赵承美, 余国忠, 古励 (5106)
碱活化过一硫酸盐降解水中环丙沙星	葛勇建, 蔡显威, 林翰, 徐梦苑, 沈一挺, 周丹, 钱梦洁, 邓靖 (5116)
MIL-88A@MIP 催化活化过硫酸盐靶向降解邻苯二甲酸二丁酯	王九妹, 关泽宇, 万金泉, 王艳, 马邕文, 闫志成, 张桂华 (5124)
常温下加装脱硫装置的 MCBMBR 处理高硫酸盐有机废水试验	徐婷, 金艳青, 李勇 (5132)
载镁天然沸石复合材料对污水中氮磷的同步回收	成雪君, 王学江, 王浩, 张志昊, 赵建夫 (5139)
不同运行模式下改良型 CAST 工艺处理生活污水的除磷性能	马娟, 王谨, 俞小军, 周猛, 孙洪伟, 王磊 (5146)
ABR-MBR 工艺处理生活污水实现短程硝化	吕亮, 赵诗惠, 韦佳敏, 张敏, 尤雯, 吴鹏, 沈耀良 (5154)
海洋厌氧氨氧化菌处理含海水污水的基质抑制及其动力学特性	周同, 于德爽, 李津, 吴国栋, 王晓静 (5162)
游离氨 (FA) 对氨氧化过程氨逃逸影响试验	孙洪伟, 于雪, 尤永军, 彭永臻, 王淑莹 (5169)
西安市典型景观水体水质及反硝化细菌种群结构	康鹏亮, 黄廷林, 张海涵, 陈胜男, 商潘路, 冯稷, 贾宽宇 (5174)
厌氧氨氧化启动过程及微生物群落结构特征	汪瑶琪, 张敏, 姜滢, 徐乐中, 陈重军, 沈耀良 (5184)
SBAF 单级自养脱氮快速启动、稳定运行及微生物群落演化	岳秀, 刘竹寒, 于广平, 吉世明, 唐嘉丽 (5192)
活性污泥中硝化螺菌 (Nitrospira) 的富集及其动力学参数	姚倩, 彭党聪, 赵俏迪, 王博 (5201)
pH 值对零价铁自养反硝化过程的影响	张宁博, 李祥, 黄勇 (5208)
接种单一/混合污泥对厌氧氨氧化反应器快速启动的影响	张泽文, 李冬, 张杰, 郭跃洲, 李帅 (5215)
活性污泥法和生物膜法 SBR 工艺亚硝化启动和稳定运行性能对比	孙艺齐, 卞伟, 王盟, 赵青, 王文啸, 梁东博, 李军 (5222)
长期暴露下纳米 TiO ₂ 对厌氧颗粒污泥体系稳定性的影响	李慧婷, 崔福义 (5229)
长三角典型城郊不同土地利用土壤抗生素组成及分布特征	赵方凯, 陈利顶, 杨磊, 方力, 孙龙, 李守娟 (5237)
不同有机肥中磷在土壤剖面中累积迁移特征与有效性差异	张田, 许浩, 茹淑华, 苏德纯 (5247)
有机磷酸酯在三峡库区土壤中污染特征	何明靖, 杨婷, 杨志豪, 魏世强 (5256)
上海某生活垃圾焚烧厂周边土壤重金属污染特征、来源分析及潜在生态风险评价	郭彦海, 孙许超, 张士兵, 余广杰, 唐正, 刘振涛, 薛昱, 高品 (5262)
大庆市不同环境介质中多环芳烃污染特征对比及来源解析	宋宁宁, 冯嘉申, 于洋, 李迎霞 (5272)
工业区户外儿童游乐场地表灰尘重金属污染的磁学响应	杨孟, 李慧明, 李凤英, 王金花, 刁一伟, 钱新, 杨兆平, 王成 (5282)
上海市郊工业区附近蔬菜中重金属分布及其健康风险	周雅, 毕春娟, 周泉潇, 张焕焕, 陈振楼, 包新一 (5292)
基施硅肥对土壤微生物有效性及水稻镉累积效应的影响	高子翔, 周航, 杨文弢, 辜娇峰, 陈立伟, 杜文琪, 徐珺, 廖柏寒 (5299)
水稻对气态单质汞的吸收与挥发	尚帅, 田珮, 蒋煜, 武婧轩, 姜珊, 邓泓 (5308)
麦田 O ₃ 浓度的长期变化及其对冬小麦干物质和产量损失的估算	赵辉, 郑有飞, 李硕, 徐静馨, 曹嘉晨, 魏莉, 关清 (5315)
缓控释肥侧深施对稻田氨挥发排放的控制效果	侯朋福, 薛利祥, 俞映惊, 薛利红, 范立慧, 杨林章 (5326)
生物炭和有机肥对华北农田盐碱土 N ₂ O 排放的影响	石玉龙, 刘杏认, 高佩玲, 张晴雯, 张爱平, 杨正礼 (5333)
成都平原不同类型沟渠 CO ₂ 、CH ₄ 和 N ₂ O 排放通量特征及其影响因素	冯香荣, 邓欧平, 邓良基, 吴铭, 姚昆, 杨泽鹏 (5344)
河流 CO ₂ 与 CH ₄ 排放研究进展	王晓峰, 袁兴中, 陈槐, 何奕忻, 罗珍, 刘恋, 何宗茂 (5352)
《环境科学》第 38 卷 (2017 年) 总目录	(5367)
《环境科学》征稿简则 (4950) 《环境科学》征订启事 (5031) 信息 (4923, 5105, 5161)	

缙云山常绿阔叶林湿沉降过程中不同空间层次水质变化特征

马明¹, 孙涛¹, 李定凯³, 王定勇^{1,2*}

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 重庆市江津区四面山森林资源管理局, 重庆 400296)

摘要: 为全面调查森林生态系统各层次降水水质状况以及对降水中各离子的截留特征, 于2013年9月至2014年8月对重庆市缙云山常绿阔叶林大气降雨、林内降雨、地表枯透水、土壤渗滤液进行了持续1a的水质效应研究。结果表明, 缙云山大气降雨偏酸性($\text{pH}=4.75$); 土壤层和林冠层均能调升降雨的 pH 值, 其中土壤层对 pH 值的调升幅度最大, 其次为森林林冠层。森林林冠层对 NO_3^- 、 Na^+ 有一定的吸附净化作用, 降雨能够淋溶森林林冠层的 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 。另外, 枯枝落叶的降解导致构成植物组织的有机物降解为无机物, 进而促使各离子质量浓度在地表枯透水中增加。森林土壤中的官能团以及胶体能够吸附并中和渗滤液中的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 、 PO_4^{3-} 、 K^+ 和 Mg^{2+} , 同时长期处于酸性条件下的土壤层也释放出部分 Na^+ 、 PO_4^{3-} 和 Ca^{2+} 。该森林生态系统对大气降水中各离子具有较强的截留作用, 但各层次对降水中的各离子表现出的截留特征不尽相同, 其中以林冠层的截留作用最强。

关键词: 缙云山; 森林生态系统; 沉降; 水质; 截留

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)12-5056-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201704208

Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain

MA Ming¹, SUN Tao¹, LI Ding-kai³, WANG Ding-yong^{1,2*}

(1. College of Resource and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China; 3. Simian Mountain Forest Resources Administration, Jiangjin District, Chongqing 400296, China)

Abstract: A typical forest stand on the subtropical Jinyun Mountain in China was selected to investigate water quality and interception characteristics for several important ions at different levels in the subtropical forest ecosystem. Based on field and laboratory experiments, the effect of precipitation, throughfall, litterfall, and soil percolation on water quality and ionic interception were investigated from September 2013 to August 2014. Results indicated that the rainfall on Jinyun Mountain was obviously acidic, with an average pH of 4.75. The soil and canopy can elevate the pH of rainfall, while the soil had a greater capability for adjusting pH than did the forest canopy. In addition, the concentrations of NH_4^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , and K^+ in the litterfall increased with litterfall tissue disintegration, while the other ions decreased. Moreover, functional groups and colloids in the soil can bind or neutralize many ions, such as NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ , and Mg^{2+} . However, some ions were released from the soil by erosion from acid rain over a long time. Generally, the forest ecosystem is a sink for ions found in precipitation with diverse functions for different layers, and the forest canopy has the highest interception capacity for the ions found in precipitation.

Key words: Jinyun Mountain; forest ecosystem; deposition; water quality; interception

大气环境的优劣直接关系到人类和地球生物的生存状态, 而最易引起居民关注的是大气污染状况。研究表明大气降水能够冲刷大气中的污染物^[1~3], 随后, 大气降水降落到地表形成径流和壤中流。而森林生态系统又是陆地系统中十分重要的生态系统之一, 其生态系统对大气降水水质的影响可以为研究污染物在水资源的环境地球化学循环过程中的演化提供非常有价值的数据库^[2~5]。

在森林生态系统湿沉降过程中, 林冠层对降水

中的污染物具有一定的吸附或淋溶作用。枯枝落叶层也可以过滤或释放污染物, 土壤层能够截留或者释放部分污染物等, 这一系列复杂的物理化学变化导致降水中的化学成分及含量发生明显的变

收稿日期: 2017-04-21; 修订日期: 2017-06-12

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2013CB430003); 国家自然科学基金项目(41573105, 41173116); 重庆市自然科学基金项目(cstc2016jcyjA1643)

作者简介: 马明(1980~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为环境污染化学, E-mail: maming@swu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: dywang@swu.edu.cn

化^[1-3, 6]。研究表明, 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, 特别是氮氧化物和硫化物^[2, 3, 7], 同时林地降雨过程中也会释放部分元素和污染物^[1, 2]; 而且不同区域林分基于其区域特点和气候特点, 具体森林生态系统对某些特定元素的截留或释放的作用并不一致^[3, 6]。由此可以看出, 不同区域或不同林分对水质的净化作用的大小并不相同, 不同森林生态系统对某些元素和化合物的吸收或释放功能也并不统一。西南地区是我国高山常绿阔叶林森林蓄积量最高的地区^[8], 本文以常绿阔叶林为研究对象, 通过对不同层次湿沉降过程中的水质效应及变化特征的

分析, 以期能更深入地了解该森林生态系统对水质的净化作用。

1 试验区概况

缙云山国家级风景名胜区位于重庆市北碚区嘉陵江温塘峡畔(106°17' ~ 106°24'E, 29°41' ~ 29°52' N), 海拔 350 ~ 951.5 m, 离重庆市市中心 35 km (图 1), 森林植被保存完好, 林中植物种类复杂, 森林占地面积约 1 130.6 hm², 森林覆盖率达 96.6%, 是地球同纬度保存最为完好的亚热带常绿原始阔叶林带。缙云山气候、降雨量以及土壤等情况如表 1 所示^[1]。

表 1 缙云山常绿阔叶林森林土壤性质

Table 1 Water quality indicators for different types of water in the Jinyun Mountain forest ecosystem											
土壤	年均气温/℃	年均相对湿度/%	年均降水量/mm		年均蒸发量/mm		气候类型				
	13.6	87	1 243.8		777.1		亚热带季风湿润性气候				
黄壤	pH	土壤容重 /g·cm ⁻³	有机碳 /g·kg ⁻¹	全氮 /g·kg ⁻¹	碱解氮 /mg·kg ⁻¹	硝态氮 /mg·kg ⁻¹	铵态氮 /mg·kg ⁻¹	全磷 /mg·kg ⁻¹	有效磷 /mg·kg ⁻¹	有效硫 /mg·kg ⁻¹	速效钾 mg·kg ⁻¹
	4.25	1.07	22.89	1.67	171.38	16.06	6.13	140.30	7.10	139.04	81.49

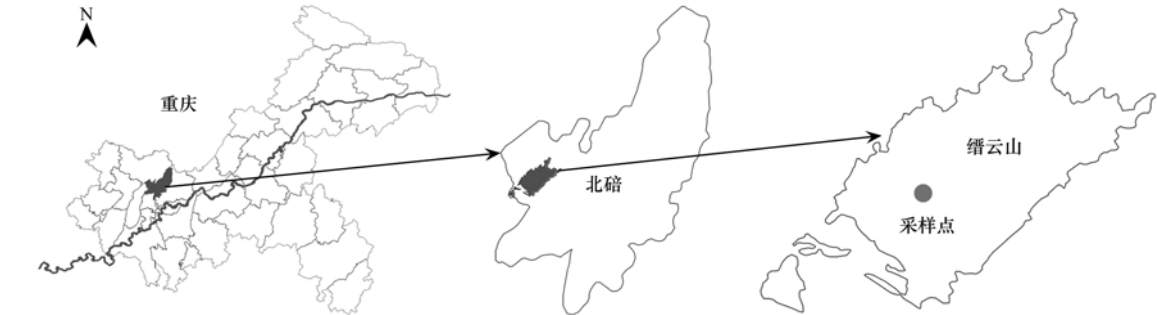


图 1 试验点地理位置示意
Fig. 1 Illustration of the location of the study site

2 材料与方法

2.1 样品采集

大气降雨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、枯枝落叶层、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, 本试验对缙云山常绿阔叶林的降雨进行不同层次的采集, 分别为: 林外降雨、林内降雨、地表枯透水、土壤渗滤液(0 ~ 20 cm)、土壤渗滤液(0 ~ 40 cm)、土壤渗滤液(0 ~ 60 cm)。采样点设在缙云山风景区具有代表性的常绿阔叶林林内, 如图 1 所示。在常绿阔叶林林外利用 APS-3A 自动降雨降尘采集器采集林外降雨样品, 设置仪器灵敏度 0.04 mm·h⁻¹, 滑

板开动作方式为平移, 运行时间 ≤ 10 s; 采水桶上(下)运行时间 ≤ 15 s, 关门延时间隔 5 min, 采样瓶设置为 7 个, 冰箱冷藏温度设置为 4℃。在常绿阔叶林内设置 20 m × 20 m 样方, 在样方内随机布设 3 个自制的林内降雨采集装置。同时, 在样方内随机设置 3 个 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滤液的横向流动影响, 放置集水板以收集地表枯透水、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。各水样均收集到事先经过 500℃ 高温超净化处理 0.5 h 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。每半月收集一次样品, 样品收集后放在 4℃ 保温箱中及时送到实验室进行处理, 检

测各指标.

2.2 水样测试

水样 pH 值采用德国 Sartorius 公司生产的普及型 pH 计 (PB-10) 测定; NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 采用美国 Dionex 公司生产的 DX-120 型离子色谱仪测定. 其中, PB-10 型 pH 计量程为 0 ~ 14, 精准度 0.01. DX-120 型离子色谱仪测定 NO_2^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、

SO_4^{2-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 Cl^- 的量程为 0 ~ 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 精准度为 0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$; 在测定 SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 Ca^{2+} 时的量程为 0 ~ 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 精准度为 0.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 由于森林降雨过程中土壤有机层中的渗透的不确定性以及元素通量的有限性, 为了准确评估降雨在亚热带林分各个层次的分配, 本文利用不同层次 Cl^- 浓度来校正森林生态系统不同层次降雨量 (表 2).

表 2 缙云山森林生态系统不同层次水质测试结果汇总¹⁾

Table 2 Water quality indicators for different types of water in the Jinyun Mountain forest ecosystem

水样类型	降雨量 /mm	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SO_4^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	PO_4^{3-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH	Na^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mg^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
大气降水	1 065	1.324	1.132	8.324	0.873	4.75	0.713	0.346	4.822	1.581
林内降水	595	0.476	1.322	9.465	1.893	5.34	0.320	0.915	6.613	4.832
地表枯透水	382	1.348	1.564	10.534	3.160	5.21	0.462	1.162	10.648	6.461
土壤渗滤液 (0 ~ 20 cm)	110	1.575	1.031	12.172	1.680	4.54	0.532	1.535	21.354	1.523
土壤渗滤液 (0 ~ 40 cm)	—	1.384	0.475	10.642	0.834	5.31	0.551	1.636	22.651	1.266
土壤渗滤液 (0 ~ 60 cm)	—	1.203	0.193	7.634	0.761	6.42	0.604	1.6656	20.412	1.051

1) 用不同层次 Cl^- 浓度校正和估算各层次年度降雨量

2.3 数据分析处理

本试验数据选取 2013 年 9 月到 2014 年 8 月的数据. 试验期间每月月初和中旬各采集样品一次, 样品共计 24 次, 其中只有 6、8、9 月降雨充足月份采集到的全部层次的水样, 其他月份由于降雨量的原因各个层次采集不完全, 尤其渗滤液 40 cm 和 60 cm. 本文利用加权平均的方式将 3 个渗滤液浓度计算出 1 个渗滤液的浓度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^[1]:

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

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

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

式中, c^i 为不同降水离子浓度 ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); p^i 为降雨量 (mm); F_w 为沉降量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$); i 是 j 的上一次降水.

3 结果与讨论

3.1 常绿阔叶林不同层次 pH 变化特征

表 2 统计结果表明, 缙云山的全年林外降雨 pH 均值为 4.76, 由图 2 可知林外降雨的最大 pH 值为 5.1, 夏、秋两季 pH 值均小于 5.0, 结果表明缙云山大气降雨偏酸性 (pH 值均为雨量均值). 分

析发现, 大气降雨中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 质量浓度较高, 全年均值分别为 8.324 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.324 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 同时调查发现重庆市的主要能源结构为高硫煤^[9], 煤资源的大量燃烧使大气中 SO_2 和 NO 的浓度增高, 进而导致降雨中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 浓度的增高, 分析结果指出这是导致降雨 pH 值较低的主要原因^[1, 2, 10]. 另外, 与同一地区的四面山常绿阔叶林的研究对比发现, 处在重庆市主城近郊的缙云山大气降水的 pH 值较低, 降水中 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 的浓度相对较高, 这说明处在工业城市周边的森林生态系统受到城市大气污染的影响更为显著. 降雨经过森林林冠层后, pH 值上升 0.58, 林冠层能够调升降雨的 pH, 这与秦岭火地塘以及四面山常绿阔叶林

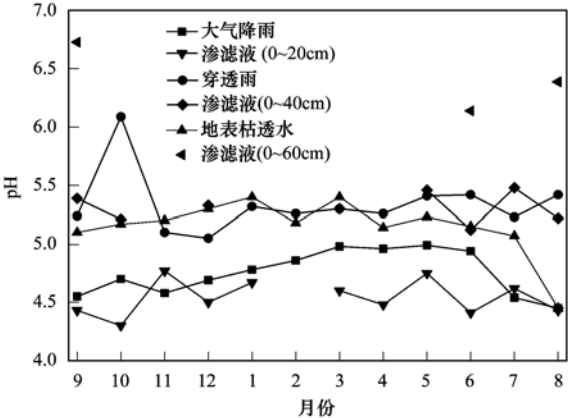


图 2 森林不同层次降雨 pH 变化趋势

Fig. 2 Changes in pH in the rainfall of different layers of the forest

中的研究结果基本一致^[2,3].

降雨经过土壤层过滤后形成的地表枯透水的 pH 值有小幅降低,且土壤渗滤液 0~20 cm 的 pH 值进一步降低,分析原因为地表枯枝落叶层有大量的凋落植物组织,植物组织在微生物的作用下分解释放出了大量的腐殖酸、 NH_4^+ 和 NO_3^- 等^[11],林内降雨在经过枯枝落叶层时溶解了这部分酸性物质进而造成了地表枯透水的 pH 值略微降低,但是土壤表层是在积累这些酸性物质的同时产生了相对厌氧的环境促使大量的厌氧微生物对有机物的分解,因此土壤表层的渗滤液 pH 值进一步地降低.随着土壤层深度的增加,土壤渗滤液的 pH 值又逐渐升高,这可能是由于土壤中的碱性离子对渗滤液中酸性物质的中和所产生的结果.

表 3 内陆丽江降水中各离子质量浓度背景值

Table 3 Background concentrations of several ions in the inland precipitation of Lijiang							
项目	NO_3^- / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	NH_4^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SO_4^{2-} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Na^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Mg^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	Ca^{2+} / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	K^+ / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
参数	0.1	0.1	9.0	0.02	0.02	4.6	0.06

大气降雨经过林冠层后 NO_3^- 的质量浓度有所降低(图 3),这是由于树木枝叶对 NO_3^- 具有一定的吸附作用^[12],另外部分 NO_3^- 离子以 HNO_3 的形式存在,而 HNO_3 又具有较强的挥发性,亚热带高

3.2 常绿阔叶林不同层次 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 的变化及截留特征

本研究期间,大气降雨中 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 的平均质量浓度分别为 1.324、1.132、8.324 和 0.873 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$.与内陆丽江背景值相比^[12],该地区大气降水中氮硫磷化合物的浓度很高,这说明大气降水受到了一定的大气污染影响(表 3).另外,与具有相同背景的四面山大气降水中各离子的质量浓度相对比,也发现该地区的离子质量浓度较高^[1],说明近距离城市污染地区受大气污染的影响比较大.由图 3 可知 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 具有相似的季节变化趋势,每年的春季以及夏末各离子质量浓度较高,这可能与这两个时间段大气降雨的雨量较少,大气层中以及林冠层枝叶上的污染物不能及时被降雨冲刷导致.

郁闭度的林冠层具有的巨大枝叶表面增加了 HNO_3 的挥发量.降雨经过林冠层后 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 的质量浓度有不同幅度的升高,其质量浓度略高于具有相同背景的四面山自然保护区,由于该研究点

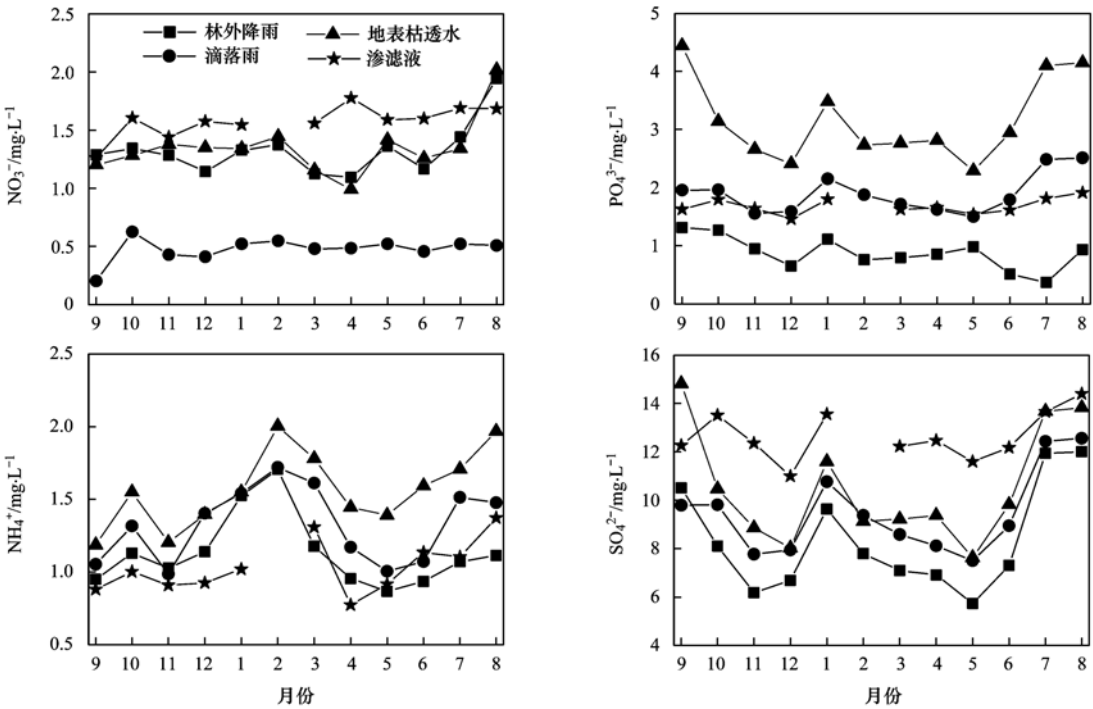


图 3 常绿阔叶林降雨各层次中不同阴离子质量浓度随季节变化

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

地理位置更靠近主城区,可能是大气降雨淋溶了更多积累在林冠层的 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-} 等离子^[14,15]. 此外,林分的郁闭度反映了一个林分的茂密程度和对干沉降物质的接纳能力,本研究所选常绿阔叶林郁闭度高达 96%,长期的干沉降使得林冠层枝叶表面积累了大量的空气悬浮物等,而湿沉降过程的冲刷能有效地淋溶此部分累积的污染物. 有研究也指出大气干湿沉降中的氨氮化合物是森林生态系统一个重要的营养元素输入途径^[16],林冠层可以积累大量的随干沉降降落到枝叶表面的氨氮化合物,但是森林植被林冠层枝叶对这些氨氮化合物的吸收利用有限,最终被降雨冲刷而进入林地^[17,18].

降水经过枯枝落叶层后, NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 均有不同程度的升高,其中 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 的增幅比较大,这主要是由于枯枝落叶层中凋落的植物组织中有有机质降解产生无机物所导致的结果. 枯落物分解过程中会产生有大量的氨基酸和蛋白质,微生物利用过后释放出了 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 等无机物,而林内降雨经过枯枝落叶层时溶解了此部分无机物^[18]. 在地表枯透水渗入到土壤层的过程中,土壤表层中的 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的浓度达

到了最大值. 这时,土壤表层显示出了较强的截留作用,渗入到土壤层的降雨将地表枯落物降解时产生的 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 和 PO_4^{3-} 带入土壤层. 而土壤层具有较强的拦截作用,延缓了各阴离子向更深土壤层的移动. NH_4^+ 和 PO_4^{3-} 可为植物的生长提供营养元素,其部分被地表植被吸收利用供植物本体生长发育^[19,20]. 同时,土壤中的胶体以及各种酸、碱性基团也可以和 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 发生反应中和,比如土壤中的 NH_4^+ 和碱性胶体中和能够生成易挥发的 NH_3 ^[21].

由表 4 可知,大气降水阴离子中 SO_4^{2-} 的沉降量最大,达到了 $809.52 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$, PO_4^{3-} 最小为 $76.20 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}$. 林冠层、枯落物层、土壤层对各阴离子的截留特征具有较大的差异性,林冠层对 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 表现出截留作用而对 PO_4^{3-} 表现出释放作用. 枯落物层对 NO_3^- 和 PO_4^{3-} 表现出释放作用,而对 NH_4^+ 和 SO_4^{2-} 表现出截留作用. 土壤层对 4 种阴离子均表现出截留作用. 就该森林生态系统而言,对 4 种阴离子均表现出了截留作用,截留率均达到了 75% 以上,其中以 NH_4^+ 的截留率 89.17% 为最高,说明该森林生态系统对大气降水中的阴离子具有较强的截留净化作用.

表 4 常绿阔叶林各层次对不同阴离子的平均截留量和截留率

Table 4 Average interception and entrapment rate of anions by different levels of the evergreen broad-leaf forest

项目	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^-	124.27	100.84	81.14	-21.34	-91.07	29.45	65.78	87.67
PO_4^{3-}	76.20	-23.74	-31.15	-9.39	-9.4	93.11	85.16	78.78
NH_4^+	94.41	30.80	32.63	12.84	20.19	40.54	79.86	89.17
SO_4^{2-}	809.52	309.82	38.27	135.26	27.07	242.34	66.50	84.92

3.3 常绿阔叶林不同层次 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 的变化及截留特征

由表 2 和图 4 可知,大气降水中 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^+ 的质量浓度相较内陆背景值偏高,说明该区域受到了一定的人为污染影响. 其中 Ca^{2+} 的质量浓度最大,相关的研究也已经证实大气降水以及大气颗粒物中 Ca^{2+} 的浓度均占最大比重^[22]. 大气降雨经过林冠层后,林内降雨中的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 K^+ 质量浓度均有不同程度增加,这是由于大气降水淋溶了部分吸附在林冠层的盐基离子. 另外,镁和钾元素作为植物生长发育以及光合作用所必需的重要元素,其可通过根系吸收土壤层中的 Mg^{2+} 和 K^+ ,随着植物的蒸腾作用到达林冠层枝叶,并通过

叶片的呼吸作用流失部分 Mg^{2+} 和 K^+ 到叶片表面. 然后在降雨冲刷的作用下溶解到林内降雨中. Na^+ 形成的盐多为易溶盐,且大气降雨中本底浓度并不高,在酸性降雨条件下易被植物体吸收利用^[23]. 另外,盐基离子的季节变化趋势与阴离子具有相似的变化规律.

地表枯透水中各盐基离子的质量浓度也均有不同程度的增加,这是由于钠、镁、钙、钾元素均为植物体生长所必需的元素,枯枝落叶在降解的过程中释放出了这些盐基离子,而这些盐基离子在酸性条件下更易溶于降水中^[24].

降水在渗透到土壤层的过程中,除 K^+ 外,其他盐基离子浓度均有增加. Na^+ 的流动性比较强且

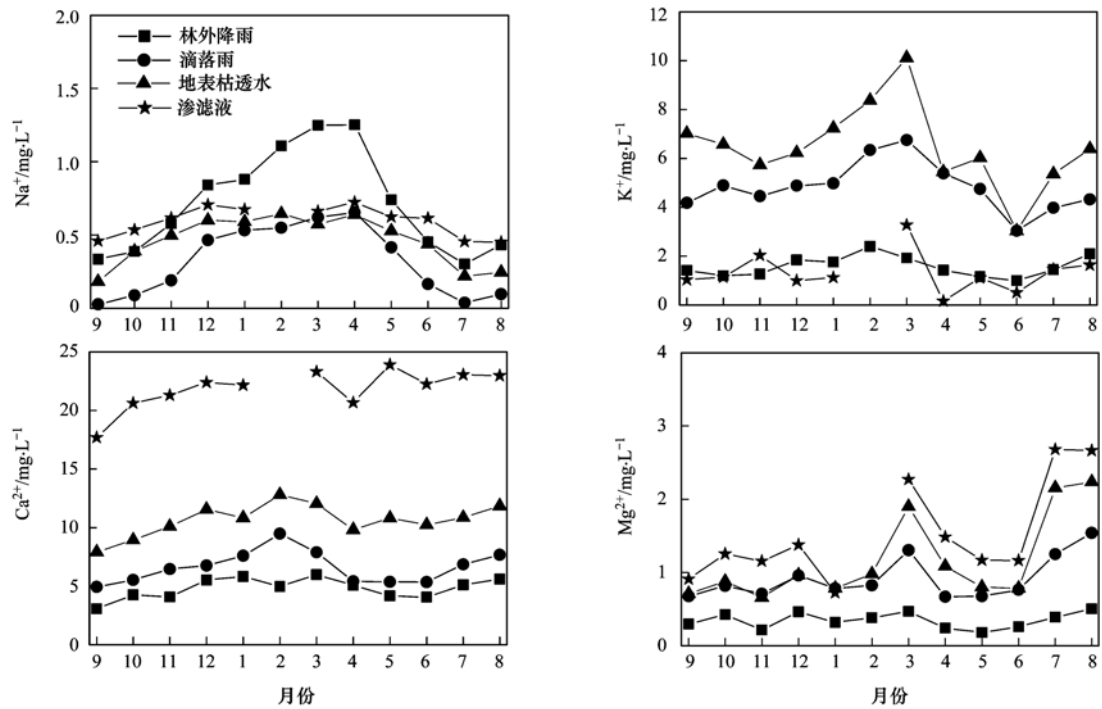


图 4 常绿阔叶林降雨各层次中不同盐基离子质量浓度随季节变化

Fig. 4 Monthly changes in base cation concentrations in different types of rainfall in the evergreen broad-leaf forest

易形成可溶性盐，而 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 在酸性条件下易被淋溶出土壤。 K^{+} 虽也具有较强的流动性并易形成可溶性盐，但是植物根对土壤中的钾离子吸收作用比较强，导致土壤中 K^{+} 的浓度下降^[25]。

由表 5 可知，大气降水中盐基离子的沉降量相对阴离子较小，以 Ca^{2+} 的沉降量最大 (416.14

$\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)，其次为 K^{+} (134.75 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)。林冠层对 Na^{+} 、 Ca^{2+} 具有截留作用，对 K^{+} 、 Mg^{2+} 具有释放的作用，而枯落物层对这 4 种盐基离子相比林冠层却表现出相反的规律，土壤层对 4 种盐基离子均表现出了截留的作用。整体森林生态系统对盐基离子均表现出截留作用，其中以 K^{+} 的截留率为最高 (90.66%)。

表 5 常绿阔叶林各层次对不同盐基离子的平均截留量和截留率

Table 5 Average interception and entrapment rate of base cations by different levels in the evergreen broad-leaf forest

项目	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 /%	
Na^{+}	51.38	40.97	79.73	-1.44	-13.82	6.36	53.65	89.31
K^{+}	134.75	-81.28	-60.32	34.72	16.07	168.74	93.06	90.66
Ca^{2+}	416.14	104.13	25.02	-19.67	-6.31	120.27	36.26	49.20
Mg^{2+}	31.22	-17.27	-55.32	6.65	13.71	25.52	60.99	47.71

4 结论

- (1) 缙云山大气降雨偏酸性，森林林冠层对降水 pH 值有调升作用。
- (2) 降雨经过森林冠层后， NO_3^{-} 的浓度有降低的趋势，森林生态系统林冠层对这些离子有吸附净化的作用。 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^{+} 经过森林冠层后有所增加，降雨淋溶了森林冠层的 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 和 NH_4^{+} 。而经过地表枯枝落叶层后降水中的各氮、硫化合物浓度均有不同程度的增加。

- (3) 降雨经过森林冠层后， Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^{+} 的浓度增加，降雨淋溶了森林冠层的 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和 K^{+} ，而枯枝落叶的降解却释放出了 Na^{+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} ，进而导致地表枯透水以及土壤表层渗滤液中盐基离子的升高；地表枯透水在渗透到土壤层的过程中 K^{+} 的浓度降低而 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 Na^{+} 的浓度升高，土壤层吸附了 K^{+} 、 Mg^{2+} ，释放出了 Ca^{2+} 。

参考文献：

[1] 孙涛，马明，王定勇，等. 中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化[J]. 环境科学, 2014, 35(12): 4475-4481.
Sun T, Ma M, Wang D Y, et al. Dynamics of nitrogen and sulfur

- wet deposition in typical forest stand at different spatial levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4475-4481.
- [2] 孙涛, 马明, 王定勇. 中亚热带典型森林生态系统对降水中铅镉的截留特征[J]. *生态学报*, 2016, **36**(1): 218-225.
- Sun T, Ma M, Wang D Y. Intercepting characteristics of lead and cadmium in a representative forest ecosystem in mid-subtropical area in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, **36**(1): 218-225.
- [3] 张胜利, 李光录. 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.
- Zhang S L, Li G L. The effects of different components of the forest ecosystem on water quality in the Huoditang forest region, Qinling Mountain Range[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, **27**(5): 1838-1844.
- [4] Ma M, Wang D Y, Du H X, *et al.* Atmospheric mercury deposition and its contribution of the regional atmospheric transport to mercury pollution at a national forest nature reserve, southwest China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, **22**(24): 20007-20018.
- [5] Ma M, Wang D Y, Du H X, *et al.* Mercury dynamics and mass balance in a subtropical forest, southwestern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(7): 4529-4537.
- [6] 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.
- [7] 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.
- Zhou G Y, Xu Y G, Wu Z M, *et al.* Influences of acid rain on crown leaching of chemical ions in different forest ecosystem in Guangzhou[J]. *Forest Research*, 2000, **13**(6): 598-607.
- [8] 刘刚, 黄柯, 李久海, 等. 树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3737-3742.
- Liu G, Huang K, Li J H, *et al.* Chemical composition of water-soluble ions in smoke emitted from tree branch combustion[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3737-3742.
- [9] 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.
- Peng L, He Z W. Sustainable development of Chongqing energy industry[J]. *Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)*, 2002, **25**(8): 120-124.
- [10] 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, 25.
- [11] Mergel A, Kloos K, Bothe H. Seasonal fluctuations in the population of denitrifying and N₂-fixing bacteria in an acid soil of a Norway spruce forest[J]. *Plant and Soil*, 2001, **230**(1): 145-160.
- [12] Balestrini R, Tagliaferri A. Atmospheric deposition and canopy exchange processes in alpine forest ecosystems (northern Italy) [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(36): 6421-6433.
- [13] Polkowska Z, Astel A, Walna B, *et al.* Chemometric analysis of rainwater and throughfall at several sites in Poland [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(5): 837-855.
- [14] Neal C, Reynolds B, Neal M, *et al.* Soluble reactive phosphorus levels in rainfall, cloud water, throughfall, stemflow, soil waters, stream waters and groundwaters for the Upper River Severn area, Plynlimon, mid Wales [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **314-316**: 99-120.
- [15] 陈诗文, 袁旭音, 金晶, 等. 西苕溪支流河口水体营养盐的特征及源贡献分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4179-4186.
- Chen S W, Yuan X Y, Jin J, *et al.* Characteristics and pollution source analysis of nutrients in tributary outlets of Xitaoxi watershed[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4179-4186.
- [16] Talkner U, Krämer I, Hölscher D, *et al.* Deposition and canopy exchange processes in central-German beech forests differing in tree species diversity [J]. *Plant and Soil*, 2010, **336**(1-2): 405-420.
- [17] Burbano-Garcés M L, Figueroa-Casas A, Peña M. Bulk precipitation, throughfall and stemflow deposition of N-NH₄⁺, N-NH₃ and N-NO₃⁻ in an Andean forest [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2014, **26**(4): 446-457.
- [18] 邓晗, 张翔, 张成, 等. 三峡库区消落带优势草本植物淹水后汞的释放特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 987-992.
- Deng H, Zhang X, Zhang C, *et al.* Release characteristics of mercury from submersed typical herbaceous plants in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 987-992.
- [19] Howard J B, Rees D C. How many metals does it take to fix N₂? A mechanistic overview of biological nitrogen fixation [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, **103**(46): 17088-17093.
- [20] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- Shi Y X, Wu S H, Zhou S L, *et al.* Simulation of the absorption, migration and accumulation process of heavy metal elements in soil-crop system[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3996-4003.
- [21] Beale S I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis [J]. *Photosynthesis Research*, 1999, **60**(1): 43-73.
- [22] 唐先干, 杨金玲, 张甘霖. 皖南山区降水酸性特征与元素沉降通量[J]. *环境科学*, 2009, **30**(2): 356-361.
- Tang X G, Yang J L, Zhang G L. Acidity characteristics and element flux of rainwater in the hilly area of South Anhui, China [J]. *Environmental Science*, 2009, **30**(2): 356-361.
- [23] 安思危, 孙涛, 马明, 等. 中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(12): 4414-4419.
- An S W, Sun T, Ma M, *et al.* Dynamic characteristics of base cations during wet deposition in evergreen broad-leaf forest ecosystem[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(12): 4414-4419.
- [24] 徐军, 牛健植. 北京鹫峰山区常见树种的枝叶及枯落物截留特征[J]. *水土保持学报*, 2016, **30**(1): 103-110.
- Xu J, Niu J Z. The foliage and litter interception characteristics of common tree species in Jiufengshan Mountain area of Beijing [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, **30**(1): 103-110.
- [25] 庞晓攀, 王倩, 贾婷婷, 等. 高原鼠兔有效洞口数密度对高山嵩草甸植物种间联结性的影响[J]. *草业学报*, 2015, **24**(5): 224-230.
- Pang X P, Wang Q, Jia T T, *et al.* Effect of burrow entrance densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on interspecific association in *Kobresia pygmaea* meadow[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(5): 224-230.

CONTENTS

Regional Transport Matrix Study of PM _{2.5} in Jingjinji Region, 2015	WANG Yan-li, XUE Wen-bo, LEI Yu, <i>et al.</i> (4897)
Effect of Atmospheric Haze Based on Multi-source Remote Sensing Data Considering the Size Effect of Landscape Sources and Sinks	XU Kai, YU Tian-tian, SUN Jiao-jiao, <i>et al.</i> (4905)
Space-Time Estimations and Mapping of PM _{2.5} Fine Particulates Based on Multi-source Data	XIAO Lu, LANG Yi-chao, XIA Lang, <i>et al.</i> (4913)
Exposure Level of Population and Economy in Zhejiang Province Considering the Background of PM _{2.5} in East China	YU Zhen-yan, GAO Da-wei, LI Zheng-quan, <i>et al.</i> (4924)
Aerosol Chemical Characteristics for Different Air Pollution Levels in North Suburban Nanjing	ZHANG Cheng, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (4932)
Seasonal Variation of Carbon Fractions in PM _{2.5} in Heze	LIU Ze-jun, WU Jian-hui, ZHANG Yu-fen, <i>et al.</i> (4943)
Characteristics and Source Apportionment of Water-soluble Inorganic Ions in Road Dust PM _{2.5} in Selected Cities in Liaoning Province	ZHANG Wei, JI Ya-qin, ZHANG Jun, <i>et al.</i> (4951)
Characteristics of the Size Distribution of Water-soluble Ions During a Heavy Pollution Episode in the Winter in Tianjin	YAO Qing, LIU Zi-rui, HAN Su-qin, <i>et al.</i> (4958)
Physico-chemical Characteristic Analysis of PM _{2.5} in the Highway Tunnel in the Plateau City of Kunming	WANG Cheng-hui, YAN Kun, HAN Xin-yu, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics Analysis of the Surface Ozone Concentration of China in 2015	DUAN Xiao-tong, CAO Nian-wen, WANG Xiao, <i>et al.</i> (4976)
Effects of Different Precious Metal Loads of CDPF on Characteristics of VOCs Emissions from a Diesel Bus	LOU Di-ming, ZHANG Zi-jun, LIU Ji-yue, <i>et al.</i> (4983)
Influence of ENSO Events on the Hydrogen ($\delta^2\text{H}$) and Oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) Isotopic Values of Precipitation in Shanghai	DONG Xiao-fang, YANG Hua-wei, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (4991)
Deposition of Sulfur, Nitrogen and Mercury in Two Typical Forest Ecosystems in Southern China	CHENG Zheng-lin, LUO Yao, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (5004)
Spatial and Temporal Variability of CO ₂ Emissions from the Xin'anjiang Reservoir	YANG Le, LI He-peng, SUN Bin-feng, <i>et al.</i> (5012)
Evaluation of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nutrients in Surface Sediment in the Three Gorges Reservoir Area	ZHUO Hai-hua, QIU Guang-sheng, ZHAI Wan-ying, <i>et al.</i> (5020)
Distribution of Different Mercury Species in the Waterbody at Sanmenxia Reservoir	CHENG Liu, MA Bing-juan, ZHOU Wei-li, <i>et al.</i> (5032)
Identification of Nitrate Sources and Transformation Processes in Midstream Areas; A Case in the Taizi River Basin	LI Yan-li, SUN Wei, YANG Zi-rui (5039)
Characteristics of Nitrogen Variation and Its Response to Rainfall; A Case Study in Wuxi Port at Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (5047)
Dynamics of the Water Quality in a Broad-leaf Evergreen Forest at Different Spatial Levels on Jinyun Mountain	MA Ming, SUN Tao, LI Ding-kai, <i>et al.</i> (5056)
Method of Improving the Water Quality of Polluted Rivers Based on the MIKE11 Model	XIONG Hong-bin, CHEN Xue, ZHANG Si-si (5063)
Distribution Characteristics and Risk Analysis of Antibiotic in the Groundwater in Beijing	CHEN Wei-ping, PENG Cheng-wei, YANG Yang, <i>et al.</i> (5074)
Characteristics of Carbon and Nitrogen in the Downstream Columnar Sediment of Maozhou River, Shenzhen	LING Jun-hong, ZHANG Yi-zhang, WANG Min-hao, <i>et al.</i> (5081)
Relative Importance of Factors Influencing Iron Release in Drinking Water Distribution Systems	LIU Ying, YU Ying, SHI Bao-you, <i>et al.</i> (5090)
Removal of High Concentration of Iron, Manganese and Ammonia Nitrogen from Low Temperature Groundwater Using Single Bio-filter	LI Dong, CAO Rui-hua, YANG Hang, <i>et al.</i> (5097)
Mechanism of Pre-ozonation Enhanced Coagulation on DON in the Secondary Effluent	LIU Bing, ZHENG Yu-ming, WANG Da-xiang, <i>et al.</i> (5106)
Base Activation of Peroxymonosulfate for the Degradation of Ciprofloxacin in Water	GE Yong-jian, CAI Xian-wei, LIN Han, <i>et al.</i> (5116)
MIL-88A@MIP Activated Persulfate for Targeted Degradation of Dibutyl Phthalate	WANG Jiu-mei, GUAN Ze-yu, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (5124)
Methane Cycle Anaerobic Membrane Bioreactor with Desulfurization for Treating High Sulfate Organic Wastewater at Normal Temperature	XU Ting, JIN Yan-qing, LI Yong (5132)
Simultaneous Recovery of Nutrients from Wastewater by Mesoporous MgO-loaded Natural Zeolite	CHENG Xue-jun, WANG Xue-jiang, WANG Hao, <i>et al.</i> (5139)
Phosphorus Removal Capacity of Domestic Wastewater Treated by a Modified CAST Process Under Different Operating Modes	MA Juan, WANG Jin, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (5146)
Realization of Shortcut Nitrification in the ABR-MBR Process Treating Domestic Wastewater	LÜ Liang, ZHAO Shi-hui, WEI Jia-min, <i>et al.</i> (5154)
Substrate Inhibition and Kinetic Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria Treating Saline Wastewater	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (5162)
Effect of Free Ammonia on Ammonia Escape During an Ammonia Oxidation Process	SUN Hong-wei, YU Xue, YOU Yong-jun, <i>et al.</i> (5169)
Water Quality and Diversity of Denitrifier Community Structure of Typical Scenic Water Bodies in Xi'an	KANG Peng-liang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (5174)
Start-up and Characteristics of the Microbial Community Structure of ANAMMOX	WANG Yao-qi, ZHANG Min, JIANG Ying, <i>et al.</i> (5184)
Fast Start-up and Performance of the CANON Process Based on a SBAF System and Evolution Properties of Microorganisms	YUE Xiu, LIU Zhu-han, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (5192)
Enrichment of <i>Nitrospira</i> in Activated Sludge and Kinetic Characterization	YAO Qian, PENG Dang-cong, ZHAO Qiao-di, <i>et al.</i> (5201)
Effect of pH Value on Autotrophic Denitrification Process of Zero Valent Iron Substrate	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong (5208)
Effect of Seeding Single/Mixed Sludge on Rapid Start-up of an ANAMMOX Reactor	ZHANG Ze-wen, LI Dong, ZHANG Jie, <i>et al.</i> (5215)
Comparison of Start-up and Stable Performance of Nitrification in Activated Sludge and Biofilm Processes in a SBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, WANG Meng, <i>et al.</i> (5222)
Long-term Impacts of TiO ₂ Nanoparticles on the Stability of an Anaerobic Granular Sludge Bioreactor	LI Hui-ting, CUI Fu-yi (5229)
Composition and Distribution of Antibiotics in Soils with Different Land Use Types in a Typical Peri-urban Area of the Yangtze River Delta	ZHAO Fang-kai, CHEN Li-ding, YANG Lei, <i>et al.</i> (5237)
Distribution of Phosphorus in Soil Profiles after Continuous Application of Different Fertilizers	ZHANG Tian, XU Hao, RU Shu-hua, <i>et al.</i> (5247)
Occurrence of Organophosphate Esters in Soils of the Three Gorges Reservoir	HE Ming-jing, YANG Ting, YANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (5256)
Pollution Characteristics, Source Analysis and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Soils Surrounding a Municipal Solid Waste Incineration Plant in Shanghai	GUO Yan-hai, SUN Xu-chao, ZHANG Shi-bing, <i>et al.</i> (5262)
Comparison of Characteristics and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media in the Urban Area of Daqing City	SONG Ning-ning, FENG Jia-shen, YU Yang, <i>et al.</i> (5272)
Magnetic Response of Heavy Metal Pollution in Playground Dust of an Industrial Area	YANG Meng, LI Hui-ming, LI Feng-ying, <i>et al.</i> (5282)
Distribution Characteristics and Health Risk for Heavy Metals in Vegetables Near the Industrial Areas in Shanghai	ZHOU Ya, BI Chun-juan, ZHOU Xiao-xiao, <i>et al.</i> (5292)
Impacts of Silicon Fertilizer as Base Manure on Cadmium Bioavailability in Soil and on Cadmium Accumulation in Rice Plants	GAO Zi-xiang, ZHOU Hang, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (5299)
Uptake and Volatilization of Gaseous Elemental Mercury by Paddy Rice	SHANG Shuai, TIAN Pei, JIANG Yu, <i>et al.</i> (5308)
Long Term Variations of Ozone Concentration of in a Winter Wheat Field and Its Loss Estimate Based on Dry Matter and Yield	ZHAO Hui, ZHENG You-fei, LI Shuo, <i>et al.</i> (5315)
Control Effect of Side Deep Fertilization with Slow-release Fertilizer on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	HOU Peng-fu, XUE Li-xiang, YU Ying-liang, <i>et al.</i> (5326)
Effects of Biochar and Organic Fertilizer on Saline-alkali Soil N ₂ O Emission in the North China Plain	SHI Yu-long, LIU Xing-ren, GAO Pei-ling, <i>et al.</i> (5333)
Flux Characteristics of CO ₂ , CH ₄ , and N ₂ O and their Influencing Factors in Different Types of Ditches on the Chengdu Plain	FENG Xiang-rong, DENG Ou-ping, DENG Liang-ji, <i>et al.</i> (5344)
Review of CO ₂ and CH ₄ Emissions from Rivers	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, CHEN Huai, <i>et al.</i> (5352)