

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

2015

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)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CABR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与磷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征

安思危¹, 孙涛¹, 马明^{1,2}, 王定勇^{1,2*}

(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 400715; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716)

摘要: 基于野外实验和室内实验相结合的方法, 于2012年9月至2013年8月对四面山常绿阔叶林大气降水、穿透水、地表枯透水、土壤渗滤液进行了持续一年的森林不同层次盐基离子季节动态变化特征的研究。结果表明, 四面山大气降水全年 pH 平均值为 4.90, 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; 森林冠层只对 Na^+ 有一定的截留作用, 降雨能够淋溶森林冠层的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ ; 研究结果也表明, 枯枝落叶的降解是导致各盐基离子质量浓度在枯透水中增加的主要原因; 枯透水下渗的过程淋溶了森林土壤中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 。四面山大气降水经过森林生态系统后 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的总截留率分别为 33.82%、-7.06%、74.36%、42.87%, 森林生态系统对 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 表现出了截留作用, 其中对 Na^+ 截留率最大。

关键词: 中亚热带; 森林生态系统; 盐基离子; 层次; 截留

中图分类号: X131; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4414-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.012

Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem

AN Si-wei¹, SUN Tao¹, MA Ming^{1,2}, WANG Ding-yong^{1,2*}

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment, Chongqing 400716, China)

Abstract: Based on field tests and laboratory experiments, effects of precipitation, throughfall, litterfall, and groundwater runoff of the ever-green broad-leaf forest on the dynamic characteristics of base cations in Simian Mountain were investigated from September 2012 to August 2013. The results showed that the rainfall of Simian Mountain was apparently acidic, with average pH of 4.90 and maximum pH of 5.14. The soil and canopies could increase pH of precipitation, with soils having the maximum increment, followed by the forest canopy. Forest canopy only had the function of interception on Na^+ . And precipitation could leach out Ca^{2+} , Mg^{2+} and K^+ of the canopies. Moreover, the degradation of litter was probably the main reason for the increase of base cations concentrations in the surface litter water. The litter water leached Ca^{2+} , Mg^{2+} and Na^+ of the forest soil through downward infiltration. The total retention rates of Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ and K^+ were 33.82%, -7.06%, 74.36% and 42.87%, respectively. Ca^{2+} , Na^+ , K^+ were found to be reserved in the forest ecosystem, and the highest interception rate was found for Na^+ .

Key words: mid-subtropical region; forest ecosystem; base cations; level; interception

近年来,随着人口的急剧增长和经济的迅猛发展导致矿物资源的大量消耗,人类排放的污染物数量不断增加。由于自然或人为的干扰影响,大气中的氮、硫等元素发生了变化,同时排放到大气中的大量含氮化合物和含硫化合物经过物理、化学的变化后随颗粒、尘埃和降水降落到植物和土壤表面,重新回到了地球生态系统的循环过程,因此形成了一系列的酸沉降过程。大气降水是将大气中污染物带到地表的主要方式,降水中盐基离子的变化和降雨酸度有着密切的联系。

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

含量发生明显的变化^[1]。大量的研究表明,酸雨会导致森林土壤中盐基离子的淋出,且随着酸雨 pH 的降低,盐基淋失量增加^[2~4]。此外,也有研究者指出 Ca^{2+} 是森林冠层缓冲降雨酸度的主要介质^[5,6]。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^[7~10]。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,同时

收稿日期: 2015-05-18; 修订日期: 2015-07-27

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重点项目(XDJK2013B044)

作者简介: 安思危(1990~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: 1728024058@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: dywang@swu.edu.cn

也是地球同纬度仅存的规模最大、保护最完好的亚热带常绿阔叶林(evergreen broad-leaf forest)^[11]。因此,本文以中亚热带常绿阔叶林这一典型林分为研究对象,基于系统学原理,分析并研究常绿阔叶林生态系统对降水中 pH 和盐基离子在迁移过程中的变化,以更深入地了解该类型森林生态系统截留净化作用并和其它地区不同类型森林生态系统做对比分析,从而更充分地认识该林区在经济社会发展中的重要生态地位。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究的实验区设在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),是云贵高原大娄山北侧余脉,离重庆市主城区约 200 km,研究区山势南高北低,最高峰蜈蚣岭海拔 1 709.4 m,最低处海拔 537 m,裸露地层为白垩纪夹关组砖红色长石,石英砂岩夹砖红色、紫红色粉砂岩等风化残积物、冲积物组成的巨原层,土壤为砂土,pH 值在 5.5~6.5 之间。

研究区属中亚热带季风湿润气候,气候温和,雨量充沛,年降水量为 150.7~1 522.3 mm,雨季集中在 5~9 月。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℃。该区森林植被保存良好,林中植物种类复杂,主要以柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、桫欏(*Eurya nitida* Korthals)、楠竹(*Phyllostachys pubescens*)、四川大头茶(*Gordonia sichuanensis*)、羽藓(*Thuidiaceae*)、栲树(*Castanopsis fargesii*)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%,是地球同纬度仅存的规模最大、保存最为完好的亚热带常绿原始阔叶林带,被联合国生态保护专家确定为地球上难得的“天然物种基因库”。

1.2 样品采集

本实验对四面山常绿阔叶林按降雨与森林生态系统相互作用的空间顺序进行不同层次的采集,分别为:大气降水、穿透水、地表枯透水、土壤渗滤液。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无障碍物的地方利用 APS-3A 自动降雨降尘采集器采集大气降水样品,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,设置冰箱冷藏温度为 4℃;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滤液的横向流动影响,放置集水板以收集垂直剖面互不影响的地表枯透水、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。各水样均收集在事先经超纯水清洗并 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。实验中 APS-3A 降水降尘自动采样器自动采集每一场降水。当雨量≥0.5 mm,仪器感应自动打开采雨桶的平移门收集降水,到第二天 09:00 自动换下一个采样瓶,准备收集下一场降水,每个采样器带有冰箱并设置冰箱冷藏温度为 4℃,样品可自动保存,每次上山采样后立刻带回实验室测定。其他层次(穿透雨、枯透水和渗滤液),采样期间每月的月初和月中各采集 1 次样品,该实验数据选取 2012 年 9 月到 2013 年 8 月的数据。

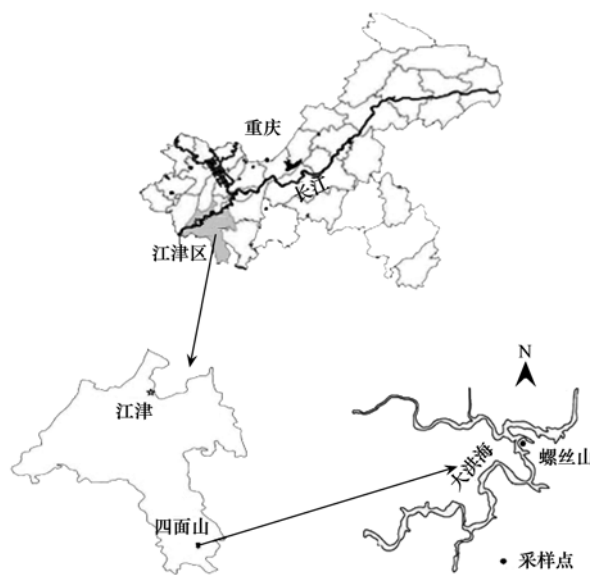


图 1 试验点地理位置示意

Fig. 1 Test point location

1.3 水样测试

pH 值采用德国 Sartorius 公司生产的普及型 pH 计(PB-10)测定;Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺采用美国 Dionex 公司生产的 DX-120 型离子色谱仪测定。

1.4 数据处理

该实验数据选取 2012 年 9 月到 2013 年 8 月的数据。实验中土壤渗滤液有 3 个测定值,本研究利

用加权平均的方法计算出一个渗滤液的值以便计算土壤截留系数. 文中数据用以下 4 个公式计算.

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

$$F_w = \frac{1}{1000} c^i \times p^i \quad (2)$$

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

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

式中, c^i 为各月降水不同盐基离子的质量浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); p^i 为各月降雨量 (mm); F_w 为月沉降量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2}$); i 是 j 的上一个层次降水.

2 结果与分析

2.1 pH 值

四面山的全年大气降水 pH 均值为 4.90, 由图 2 知大气降水的最大 pH 值为 5.14, 夏秋两季 pH 值均小于 5.08, 说明四面山大气降水明显偏酸性; 大气降水的 pH 值在 8 月最低, 其它月份变化波动性较小, 其中 3~6 月相对较高. 重庆市是我国酸雨污染较严重的地区, 而且重庆市的主要能源结构为高硫煤^[12], 煤资源的大量燃烧使大气中 SO_2 及其它污染物的含量增高, 降雨中 SO_4^{2-} 的质量浓度也随之增高, 导致大气降水的 pH 值相应较低. 进入 4 月降雨次数逐渐增加, 大气中的污染物被降雨及时地带到地面, 大气中污染物的浓度降低, 降雨的 pH 值升高.

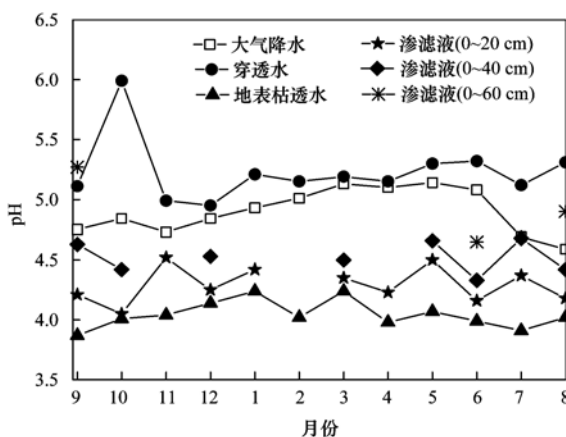


图 2 森林不同层次降雨 pH 变化趋势

Fig. 2 The pH change in rainfall at different storeys of the forest

大气降水经过森林冠层形成穿透水后, pH 值表现出升高的趋势, 森林冠层能够吸收降雨中的部分

污染物进而使穿透水中各离子的质量浓度发生了变化, pH 值也发生了变化, 这说明森林冠层能够调节降雨的 pH, 这与张胜利等^[10]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. 降雨经过枯落物层形成枯透水, 枯透水的 pH 值迅速下降, 相对大气降水降低了 0.86, 枯枝落叶的降解会释放出大量的腐殖酸、 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 等^[13], 这可能是造成枯透水 pH 值较低的主要原因. 枯透水经过土壤层的过滤后, 呈现出随土壤深度增加 pH 值升高的剖面分布特征, 可能由于枯透水在渗透到土壤层的过程中, 在各离子之间或其与土壤胶体发生了反应, 致酸离子和土壤层矿物质作用释放出更多的盐基离子. 研究结果表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能够吸收降雨中的 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 等离子及土壤层能够吸附中和 SO_4^{2-} 、 NH_4^+ 使 pH 值有所升高. 枯透水的 pH 值最低, 这可能是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、 NH_4^+ 和 NO_3^- ^[6], 进而造成了枯透水的 pH 值降低的结果. 盐基离子与酸性阴离子都是土壤酸化的重要因素. 枯透水下渗到土壤层的过程中 pH 值逐渐升高, 是因为酸性枯透水淋失了大量土壤中的盐基离子中和了部分致酸离子, 研究结果表明土壤层对酸性枯透水有缓冲的作用.

2.2 森林各层次降雨中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的动态变化及平均截留特征

四面山大气降水经过森林不同层次时各盐基离子质量浓度随月份的变化趋势如图 3 所示. 大气降水中 Ca^{2+} 质量浓度最大, 其次为 K^+ 、 Na^+ 和 Mg^{2+} 相对较小 (表 1), 相关研究^[14, 15]也表明大气气溶胶以及大气降水含量最高的阳离子成分为 Ca^{2+} . 和内陆丽江大气降水中盐基离子含量背景值相比较 (表 2), 四面山大气降水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 质量浓度分别高于丽江背景值 37、16、35、24 倍, 说明四面山大气降水已经受到了一定程度的污染. Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 质量浓度全年的变化波动性较小, Na^+ 在春季时达到最大值.

林冠层作为森林与外界环境相互作用最直接、最活跃的界面层, 时刻与大气之间进行着物质和能量的交换^[17, 18]. 森林冠层对 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的平均截留率分别为 -13.43%、-54.98%、49.01%、-181.68% (表 3), 降雨淋溶了森林冠层的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ . 穿透水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ 质

表 1 常绿阔叶林不同层次水质测试结果汇总

Table 1 Water quality indicators at different storeys of the evergreen broad-leaf forest									
降水类型	年降雨量 /mm	测定指标 /mg·L ⁻¹	样品数 /个	平均值	最大值	最小值	标准差	变异系数	月均沉降量 /μg·m ⁻²
大气降水	1 222	Ca ²⁺	24	3.72	5.23	1.80	0.94	0.25	358.72
		Mg ²⁺	24	0.33	0.54	0.12	0.12	0.37	32.43
		Na ⁺	24	0.69	1.35	0.26	0.35	0.50	55.72
		K ⁺	24	1.43	2.40	0.70	0.44	0.31	133.48
穿透水	924	Ca ²⁺	24	5.70	8.72	3.71	1.40	0.25	406.91
		Mg ²⁺	24	0.60	1.41	0.23	0.31	0.51	50.25
		Na ⁺	24	0.48	0.86	0.12	0.25	0.51	28.41
		K ⁺	24	5.39	7.52	3.14	1.18	0.22	375.98
枯透水	611	Ca ²⁺	24	8.25	10.76	5.51	1.43	0.17	404.72
		Mg ²⁺	24	1.10	2.77	0.57	0.63	0.57	63.62
		Na ⁺	24	0.59	0.86	0.29	0.18	0.30	24.97
		K ⁺	24	8.27	13.72	4.40	2.01	.024	374.81
渗滤液	234	Ca ²⁺	44	11.18	14.83	8.86	1.91	0.17	237.40
		Mg ²⁺	44	1.49	3.25	0.11	0.78	0.52	34.72
		Na ⁺	44	0.72	0.99	0.53	0.13	0.18	14.28
		K ⁺	44	3.95	6.63	1.81	1.44	0.37	76.25

表 2 内陆丽江降水背景值^[15]

Table 2 Background concentration of inland precipitation in Lijiang								
项目	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		K ⁺	
	μeq·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	μeq·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	μeq·L ⁻¹	mg·L ⁻¹	μeq·L ⁻¹	mg·L ⁻¹
最小值	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
最大值	60.20	1.20	183.20	2.20	58.40	1.30	25.50	1.00
加权平均值	4.60	0.10	1.80	0.02	0.90	0.02	1.60	0.06

表 3 常绿阔叶林各层次对不同离子的相对截留量和截留率

Table 3 Relative interception and interception rate of different base cations by different storeys in the evergreen broad-leaf forest								
项目	大气降水含量 /mg·L ⁻¹	林冠层		枯落物层		土壤层		总截留率 /%
		截留量 /mg·m ⁻²	截留率 /%	截留量 /mg·m ⁻²	截留率 /%	截留量 /mg·m ⁻²	截留率 /%	
Ca ²⁺	3.72	-48.19	-13.43	-46.00	-12.82	167.32	46.64	33.82
Mg ²⁺	0.32	-17.83	-54.98	-31.19	-96.20	-2.29	-7.06	-7.06
Na ⁺	0.69	27.31	49.01	30.75	55.18	41.44	74.36	74.36
K ⁺	1.43	-242.50	-181.68	-241.34	-180.81	57.22	42.87	42.87

量浓度增加的趋势和 pH 值升高的趋势相一致,穿透水中 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 质量浓度的增加可能是导致穿透水 pH 值升高的原因之一. 降雨经过林冠层后 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 质量浓度升高,这是因为酸雨会直接淋溶出植物叶片分泌物中的 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺,造成林冠中 Ca²⁺、Mg²⁺、K⁺ 不同程度的淋溶流失^[19]. 镁和钾元素是植物生长发育的重要元素,也是植物光合作用不可缺少的营养元素^[20],夏季穿透水中 Mg²⁺ 的质量浓度达到最大值,可能是由于夏季气温高森林树木生长旺盛,更多的 Mg²⁺ 被吸收利用并通过蒸腾作用到达林冠层被降雨淋溶. K、Na、Ca、Mg 元素参与了植物的新陈代谢过程,而这些在

植物叶面或叶表面细胞内相对活跃,容易被雨水淋溶,Mg 元素溶解度较低,林内雨淋溶出的 Mg²⁺ 含量相对较少; K⁺ 的质量浓度增长幅度最大,说明 K⁺ 更容易被淋,从图 3 可以看出 Na⁺ 除在 2~4 月有明显截留作用以外,其他月份并不明显,这可能是因为 Na 盐多为易溶盐,且在大气降水中的含量较低,但是酸性较强的降水却会破坏植物叶表的蜡质和角质层,使酸性物质直接进入树叶组织内部淋溶盐基离子,也说明降水中有较多的 H⁺ 参与了置换反应,这一过程置换出了较多的易溶 Na⁺,从而造成其他月份林冠层没有明显的截留 Na⁺ 的能力.

枯落物层在涵养水源、保持水土等森林水文

中具有极为重要的作用^[21],枯落物层与森林的更新与演替、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有着直接的关系. 有研究表明重庆四面山阔叶林地表枯落物相对其他种类林木有较高的持水能力^[22],枯落物层较高的持水量,保证了枯落物的水份含量充足,微生物在适宜的湿度和温度下新陈代谢活动强烈,枯落物层的分解也较彻底. 地表枯透水中的 Mg^{2+} 质量浓度是大气降水的 5.5 倍, K^+ 约为 6 倍,变化较大. 穿透雨流经枯落物层后含量有不同程度的变化, Ca^{2+} 是难溶解稳定化合物的组分,它的不可移动性是经过枯落物后 Ca^{2+} 质量浓度没有明显变化的原因. Mg 是植物生长的必要元素,枝叶衰老凋落

前 Mg 元素进行了转移,使得秋季凋落物中 Mg^{2+} 含量很低,所以经过枯落物层后, Mg^{2+} 质量浓度基本没有增幅.

而由图 3 知,经过枯落物层后 4 种盐基离子的质量浓度均增加,这是由于 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 均为植物生长的必需营养元素,枯落物的降解释放出植物组织中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 以及降雨在经过森林冠层和枯透层的过程中会有一部分降雨蒸发流失. 然而,枯透水中盐基离子的增加并没有导致枯透水 pH 值的升高,反而相对穿透水 pH 值降低,这可能是枯落物层在降解释放盐基离子的同时释放出了更多的腐殖酸、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等致酸离子导致枯透水的 pH 值降低.

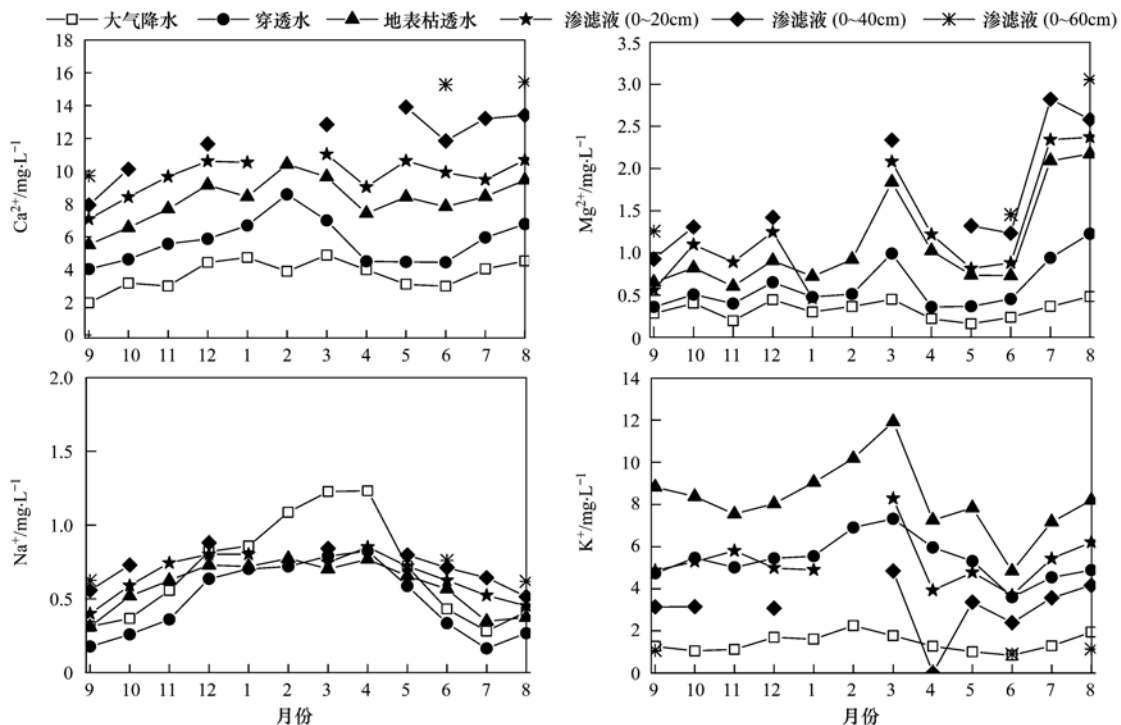


图 3 常绿阔叶林各层次降雨中盐基离子浓度随季节变化

Fig. 3 Monthly changes in concentrations of different base cations in rainfall at different storeys of the evergreen broad-leaf forest

土壤层是联系大气圈、岩石圈、水圈和生物圈的重要媒介^[23],因此土壤在这些系统间元素循环方面发挥着重要作用,土壤为生物的生长提供水分和营养成分. 廖柏寒等^[24]的研究指出我国酸雨中高浓度的盐基离子既缓冲了酸雨本身的酸度,也缓冲了土壤的酸化过程,盐基离子与酸性阴离子都是土壤酸化的重要影响因素. 研究期间土壤层对降雨中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 的平均截留率分别为 41.34%、45.43%、42.80%、79.96%,土壤层对 4 种盐基离子均表现出截留作用. 由表 1 知,土壤渗透液的年降雨量相对其他层次大幅下降,这是导致

渗透液各盐基离子沉降量减少的原因之一.

由表 2 和图 3 知降雨经土壤层后 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 质量浓度呈现上升趋势, K^+ 、 Ca^{2+} 淋失量较大,这是由于长期的酸雨会导致红壤的酸性土壤中 Ca^{2+} 的淋溶流失^[24], K^+ 、 Na^+ 是可移动性很强的离子,经常会以溶液的形式淋溶流失. 大量的相关研究^[25, 26]也表明酸雨淋溶土壤会引起土壤盐基离子的大量淋失,酸雨的长期作用会导致矿物的风化释放出盐基离子. 由图 2 知,枯透水下渗到土壤层的过程中 pH 值逐渐升高,研究结果表明土壤层对酸性枯透水有缓冲的作用.

2.3 森林各层次降雨中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 的相对截留特征

对比表 3 可知,林冠层对 K^{+} 释放量最大,释放率也最大,其次是 Ca^{2+} ,最小是 Mg^{2+} 。由于本研究中的 4 种盐基离子均是植物生长所必需的矿物元素,四面山区域雨量充沛、温度偏高使得枯落物的降解较快,凋落的植物组织分解释放出了各盐基离子,所以枯透水中各盐基离子的质量浓度均比穿透水的高,相对大气降水枯落物层仅对 Na^{+} 有截留作用,其相对截留率为 55.18%。枯透水经土壤层的过滤后,各盐基离子的质量浓度发生了变化,相较枯透水土壤层对 4 种盐基离子均表现出了截留作用,但相对大气降水土壤层却对 Mg^{2+} 没有截留能力,研究表明土壤层对各离子的截留能力和降雨量有很大的关系。土壤渗滤液中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 质量浓度的增加可能是导致渗滤液 pH 值升高的原因之一。

3 结论

(1)四面山全年降雨 pH 偏酸性,大气降水的 pH 值在 8、9 月最低,3~6 月较高;林冠层和土壤层具有调节 pH 的作用,其中土壤层对 pH 值的调升幅度最大。

(2)四面山大气降水经过森林冠层和枯落物后, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 的质量浓度增加;枯枝落叶的降解释放出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} ;地表枯透水下渗到土壤的过程中 K^{+} 的质量浓度降低, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 的质量浓度升高;土壤层对各盐基离子的截留能力和降雨量有很大的关系,同时土壤层能够缓冲降雨的酸度。

(3)四面山大气降水经过森林生态系统后 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 总的截留率分别为 33.82%、-7.06%、74.36%、42.87%,森林生态系统对 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 表现出了截留作用,其中的 Na^{+} 截留率最大。

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] 李光超,杨慧,张春来,等. 典型岩溶区板栗树下土壤 pH 值与盐基饱和度关系研究[J]. *中国水土保持*, 2012, (8): 49-52.
- [3] 杨平平,徐仁扣,黎星辉. 淋溶条件下马尾松针对土壤的酸化作用[J]. *生态环境学报*, 2012, **21**(11): 1817-1821.
- [4] 俞元春,丁爱芳,胡筋,等. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2001, **25**(2): 39-42.
- [5] 蒋益民,曾光明,张龚,等. 酸雨作用下的森林冠层盐基离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+})淋洗[J]. *热带亚热带植物学报*, 2004, **12**(5): 425-430.
- [6] 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.
- [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.
- [8] 张金池,曾峰,朱丽娟. 森林土壤对几种重金属污染的“记忆”效应[J]. *农村生态环境*, 2004, **20**(4): 32-36.
- [9] 欧阳学军,周国逸,黄忠良,等. 鼎湖山森林地表水水质状况分析[J]. *生态学报*, 2002, **22**(9): 1373-1379.
- [10] 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.
- [11] 赵喆. 论我国森林资源的利用与保护对策[J]. *环保前线*, 2012, (4): 35-36.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 吴兑,邓雪娇,叶燕翔,等. 岭南山地气溶胶物理化学特征研究[J]. *高原气象*, 2006, **25**(5): 877-885.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 吴飞华,刘廷武,裴真明,等. 酸雨引起森林生态系统钙流失研究进展[J]. *生态学报*, 2010, **30**(4): 1081-1088.
- [20] Beal S I. Enzymes of chlorophyll biosynthesis[J]. *Photosynthesis Research*, 1999, **60**(1): 43-73.
- [21] 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.
- [22] 饶良懿,朱金兆,毕华兴. 重庆四面山森林枯落物和土壤水文效应[J]. *北京林业大学学报*, 2005, **27**(1): 33-37.
- [23] 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.
- [24] 廖柏寒,蒋青. 我国酸雨中盐基离子的重要性[J]. *农业环境保护*, 2001, **20**(4): 254-256.
- [25] 刘俐,周友亚,宋存义,等. 模拟酸雨淋溶下红壤中盐基离子释放及缓冲机制研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(2): 49-55.
- [26] 覃葵清,王永敏,彭玉龙,等. 重庆缙云山降水中不同形态汞的含量及其沉降量[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 809-816.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 15, 2015

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: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行