

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、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,王聿(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颗粒物特征及来源解析 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CO₂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漫射衰减系数 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,陈攀秋,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CAMBR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)

蜈蚣草中砷与铈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)

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^{1,2}, 高扬^{2*}, 张进忠^{1*}, 于贵瑞²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101)

摘要: 通过对亚热带干烟洲流域的冬季湿沉降化学特征及森林穿透雨进行研究, 揭示亚热带流域森林冠层对大气湿沉降中的营养元素(C、N、P、S)及金属元素(K、Ca、Na、Mg、Al、Fe、Mn、Zn)的截留与作用机制. 结果表明: ①亚热带丘陵区冬季大气湿沉降以酸沉降为主, pH变化范围在3.49~7.0之间, 冬季酸沉降离子中以 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 为主, 其月平均沉降通量分别为 $4.68 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 痕量金属元素中以Zn、K、Ca沉降为主, 其沉降通量分别为1.72、0.56、0.36 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; ②森林林冠对溶解性有机碳(DOC)、溶解性总氮(DTN)、总磷(TP)以及痕量元素Ca、Mg、Mn有明显的截留与离释作用, 离释百分比达到64.69%、206.75%、301.38%、137.94%、405.25%、1226.60%; 而对Zn、 SO_4^{2-} 具有很好的吸收作用, 吸收百分比为73.50%和12.51%, 显著降低了亚热带流域冬季酸沉降对土壤生态系统的危害.

关键词: 红壤; 湿沉降; 林冠截留; 穿透雨; 痕量金属

中图分类号: X131; X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4403-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.12.011

Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area

HAO Zhuo^{1,2}, GAO Yang^{2*}, ZHANG Jin-zhong^{1*}, YU Gui-rui²

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: In order to disclose the interception mechanism of forestry canopy to atmospheric wet deposition, the concentrations of nutrients (C, N, P, S) and trace elements (K, Ca, Na, Mg, Al, Fe, Mn, Zn) in wet deposition and through fall in winter were monitored in Subtropical Qianyanzhou basin. The results showed that the wet deposition in this area was mainly acid deposition, the pH of which ranged from 3.49 to 7.0. The major components of wet deposition were nitrate (NO_3^-) and sulfate ions (SO_4^{2-}), the monthly average deposition fluxes of which were $4.68 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $0.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, and trace elements (Zn, K, Ca) with monthly average deposition fluxes of 1.72, 0.56 and $0.36 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. Non-metallic nutrients such as dissolved organic carbon (DOC), dissolved total nitrogen (DTN), total phosphorus (TP), Ca, Mg and Mn were easy to leach, the dilution rate could reach up to 64.69%, 206.75%, 301.38%, 137.94%, 405.25% and 1226.60%, respectively. Moreover, the Zn and sulfate ion (SO_4^{2-}) could be well absorbed by forests canopy, the absorption proportions of which were 73.50% and 12.51%, respectively.

Key words: red soil; wet deposition; canopy interception; through fall; trace metal

随着工业现代化的发展,化石燃料的大量燃烧和土地利用方式的急剧变化,导致含硫、含氮化合物的排放量严重超标,大气污染加剧. 大气污染物主要以湿沉降的形式进入生态系统,造成河流、湖泊酸化及污染地下水对人类健康造成威胁^[1-4]. 我国南方森林地区湿沉降以酸沉降为主,主要污染物为pH < 5.6的 SO_2 、 NO_x 颗粒物和金属颗粒物,这些沉降物进入森林生态系统会引起森林林冠稀疏,大量叶片发黄,幼树叶片掉落,甚至造成树木死亡^[5].

大气降水是森林生态系统养分的主要来源之一,对森林群落的生长具有重要意义^[6-9]. 同时,森林生态系统通过自身独特的功能以及系统各个部分

的相互作用,对大气降水中的各种污染物进行着截留、过滤、吸附、净化等作用使污染物的种类和数量减少^[10]. 中国亚热带森林由于其结构和功能的特点,其林冠对于酸雨胁迫及金属污染物具有一定的缓冲作用^[11]. 雨水通过郁闭的林冠层后被重新分配,由于林冠的遮挡作用,大部分被截留,截留后一部分直接蒸发返回大气或被叶表面吸收,另一部

收稿日期: 2015-06-29; 修订日期: 2015-07-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(31570465); 中国科学院秉维优秀青年人才项目(2012RC202)

作者简介: 郝卓(1990~),女,硕士研究生,主要研究方向为大气氮湿沉降及其生物化学过程, E-mail: hzhfut@163.com

* 通讯联系人, E-mail: gaoyang@igsrr.ac.cn; jzhzhang@swu.edu.cn

分穿过林冠空隙或枝叶截留的部分雨水以雨滴的形式进入林内形成穿透雨^[12~15]. 由于雨水对树体表面分泌物的溶解以及对枝叶表面粉尘、微粒等大气悬浮沉降物的淋洗,同时枝叶对降水中离子的吸收作用,造成穿透雨的化学成分相比非穿透雨发生了根本变化,因而穿透雨在森林生态系统的功能研究具有重要意义^[16].

红壤广泛分布在南方地区,红壤是高度风化的土壤类型,土壤 pH 值,阳离子交换量和盐基饱和度均较低,黏粒矿物以高岭石和铁铝氧化物为主,缓冲容量低;并且这些地区降雨量丰富,年降水量在 1 300~1 800 mm 之间^[17, 18],极易造成土壤水蚀过程和养分大量流失. 目前,对于穿透雨的研究大都集中在截留量与截留率,对养分及痕量金属浓度变化研究较少. 本文将江西千烟洲地区人工林为研究对象,通过分析冬季亚热带森林湿沉降化学特征,揭示大气降雨经过森林冠层截留后雨水养分及痕量金属浓度的变化,了解森林植被对降雨养分及痕量金属吸收和淋失程度的多少,进一步探讨森林和降雨之间的关系,以期建立森林植被格局、改善土壤酸化等问题提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本实验研究区为中国科学院千烟洲生态网络试验站农业生态系统,位于江西省吉泰盆地泰和县灌溪镇桃源村境内(115°04'13"E, 26°44'48"N),平均海拔高度为 110.8 m,土壤类型为红壤. 研究区年均气温 16.5℃,年均降水量 1 542 mm,降雨量季节分配不均,雨季多集中于 3~9 月,其中 4~6 月降雨量约占全年的一半,7~8 月高温少雨,易出现伏旱. 年均相对湿度为 84%^[17],具有典型亚热带季风气候特征,属中亚热带湿润气候区,主要植被是分布于丘陵上的人工林,湿地松林、马尾松林、杉木林以及针阔混交林^[19~22].

1.2 研究方法

样地分布:如图 1 所示分别挑选合适的桔园、马尾松、木荷、湿地松等树种作为研究样地,在每种树种设立 3 块 5 m×5 m 样地(面积为 75 m²). 样地布设分别为, A 点阔叶林(木荷), B 点桔园, C 点马尾松 I(成年林), D 点马尾松 II(幼年林林高 80 cm), E 点湿地松 I(林密度小), F 点湿地松 II(林密度大).

穿透雨:采用简易雨量筒,在每种树种样地内放置 3 个雨量筒并彼此间隔相应距离作为重复. 降雨

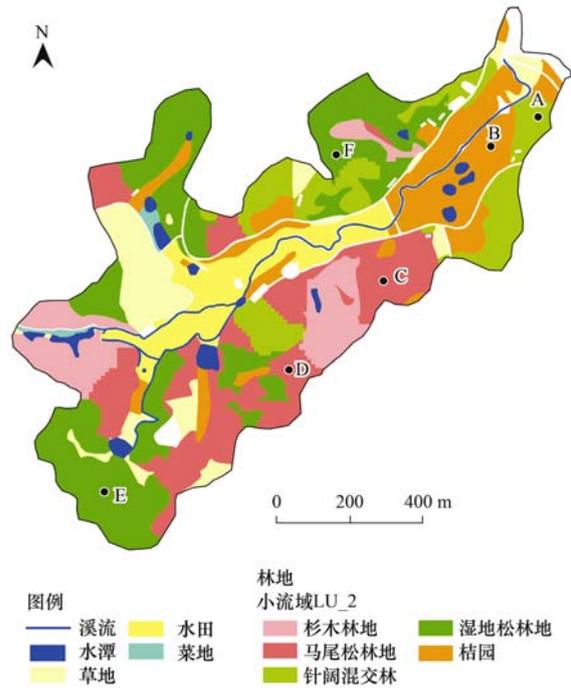


图 1 流域样地分布及土地利用方式

Fig. 1 Sampling point distribution of watersheds and different land-use types

后测量的 3 个数据平均值即为此次穿透雨的数据,由于冬季降雨量较小,故每月收集一次样品为一个雨水混合水样.

水质分析:每场降雨后采集水样,并及时对 pH 值进行测量,样品及时带回中国科学院地理科学与资源研究所进行 C、N、P、S 及金属离子数据分析.

测定指标:流动分析仪(法国 Futura 型号)测定总磷(TP)、总氮(TN)、溶解性总氮(DTN)、硝态氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N); liquid TOCII 仪(德国 elementar)测定溶解性有机碳(DOC);电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定硫酸根(SO₄²⁻)及金属离子钾(K)、钙(Ca)、钠(Na)、镁(Mg)、铝(Al)等金属离子.

通量方法计算^[17]:

$$F = \sum \left(\frac{p \times c}{100} \right) \quad (1)$$

式中, F 代表沉降通量(kg·hm⁻²), p 代表各场雨的降雨量(mm), c 代表雨水中各离子的浓度(mg·L⁻¹).

2 结果与分析

2.1 2014~2015 冬季大气降水化学特征

2.1.1 大气降水中 N、C、P、S 的浓度变化特征

千烟洲地处亚热带,年降水量丰富,春季多雨,

冬季少雨. 本实验收集从 2014 年至 2015 年冬季 3 个月的林下穿透雨. 如图 2 所示, 分别为 2014 年 12 月、2015 年 1 月和 2015 年 2 月降雨中各形态氮的浓度变化. 从图 2(a) 可以看出在 12 月收集的 3 场降雨中, 降雨量最大为 6.5 mm, 最小为 1 mm, 均为小雨. 其中 12 月 27 日、28 日降雨的 TN 浓度达到 $16.90 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 及 $16.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 而 DTN 浓度为 $6.61 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $6.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 说明雨水中颗粒态氮 (PN) 含量较高. 图 2(b) 为 1 月收集到的 4 场降雨, 降雨量最高为 5 mm, 最低 1.4 mm. 由图 2 可知, 4 场降雨各形态氮浓度大小规律相同, 但 1 月 27 日降雨的各形态 N 浓度均为最大, TN 达到 $43.9 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而 1 月 29 日降雨中 TN 浓度仅为 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 说明在 1 月 27 日前存在人为活动的干扰造成明显差异. 图 2

(c) 为 2015 年 2 月收集的 3 场降雨, 降雨量最大为 7.2 mm. 2 月 4 日降雨中各形态氮浓度均为 2 月最高值, TN 浓度达到 $28.25 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、DTN 为 $17.32 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为 $10.22 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的 $7.10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$.

结合图 2(a) ~ 2(c) 可以看出, 2 月 4 日与 1 月 27 日各形态氮浓度大小规律相同, 且与其它几场降雨的明显区别在于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度明显高于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$. 说明在这期间, 存在人为干扰, 例如当地村民会在冬季将收割后的稻田焚烧, 为春天播种做准备. 由图 2(d) 可知, 2014 年 12 月与 2015 年 2 月氮素浓度变化差异不大, 2015 年 1 月略高一些, 主要是受 1 月 27 日各氮素浓度过高且其降雨量最大的影响. 冬季的各形态氮的大小趋势是基本一致的.

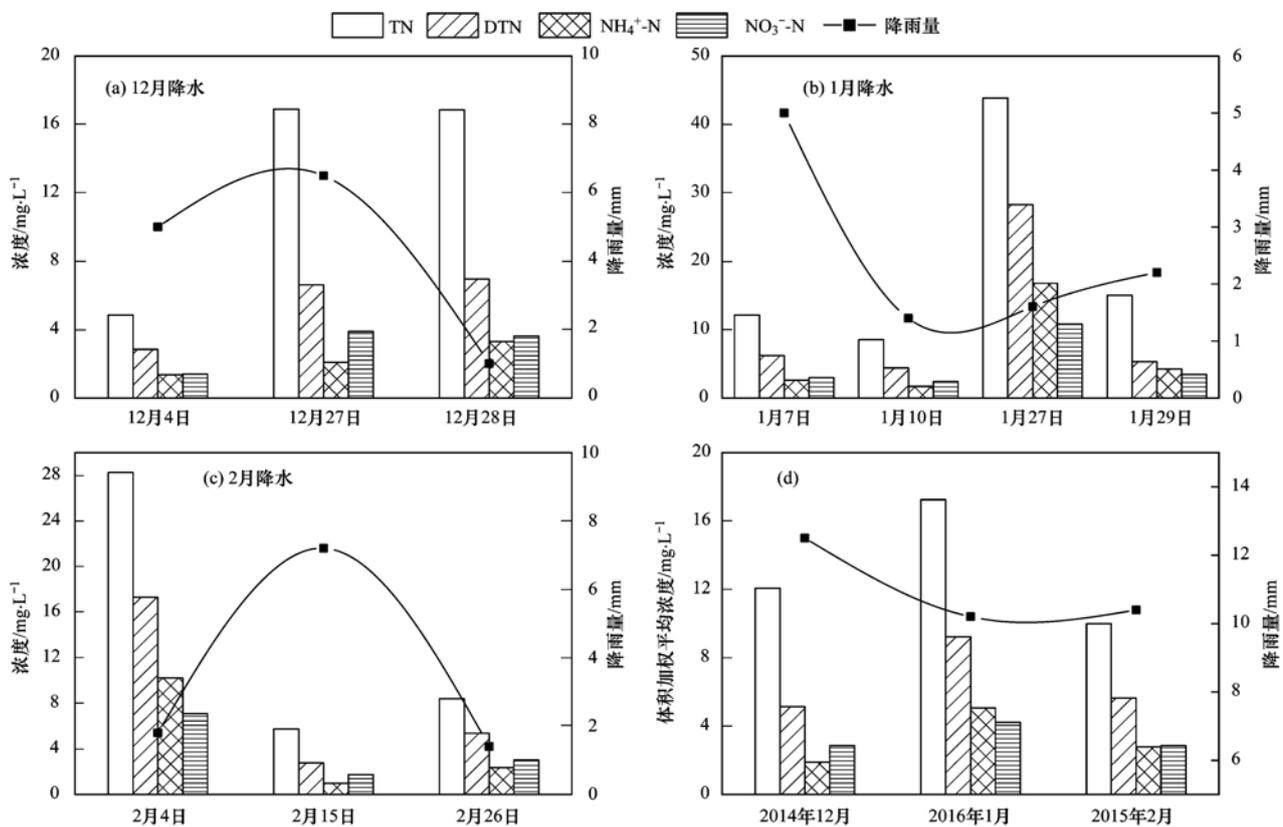


图 2 2014 ~ 2015 年冬季降雨各形态氮浓度

Fig. 2 Variation of different forms of nitrogen concentration in the rainfall in the winter of 2014 to 2015

由图 3(a) 可知, 1 月 27 日及 2 月 4 日 DOC 浓度值明显高于其它几次降雨, 分别为 $14.42 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $9.16 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 其它 8 场降雨 DOC 浓度变化不大. 从月变化曲线来看, 3 个月的降雨量加权平均浓度接近, 曲线较为平缓, 冬季雨水 DOC 平均浓度在 $5.81 \sim 6.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 冬季雨水 SO_4^{2-} 浓度变化, 与 DOC 及各形态氮浓度变化规律略有不同, 除 1 月

27 日及 2 月 4 日的浓度较高外, 12 月 27 日 SO_4^{2-} 的浓度高达 $145 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 这也直接导致 2014 年 12 月的 SO_4^{2-} 月平均浓度最高为 $85.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [图 3(b)]. 除 1 月 27 日 $51.49 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 2 月 4 日 $33.67 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 外, 其它几场降雨 SO_4^{2-} 浓度介于 $14 \sim 20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间. 1 月的 TP 浓度均大于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 明显高于其它 2 个月的降雨, 最大值为 1 月 29 日

1.57 mg·L⁻¹, 最小值为 12 月 27 日 0.18 mg·L⁻¹, 相差 8 倍多[图 3(c)].

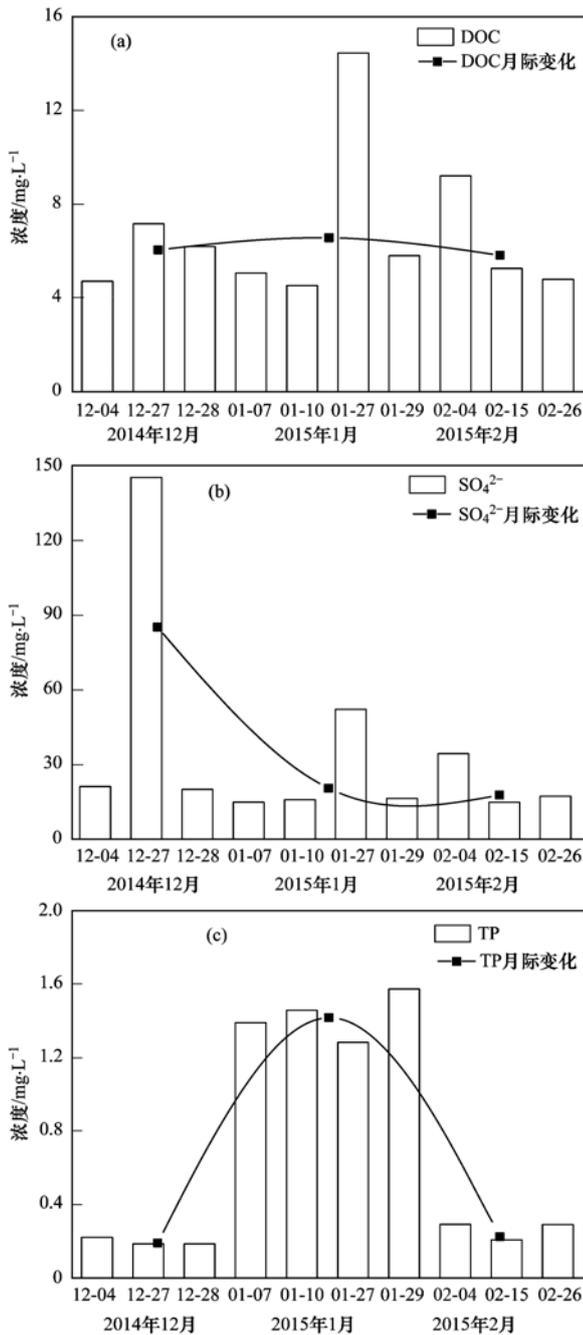


图 3 2014 ~ 2015 年冬季各场降雨 DOC、SO₄²⁻、TP 浓度及其月际变化

Fig. 3 Concentrations and monthly variation of DOC, SO₄²⁻, TP in the rainfall in the winter of 2014 to 2015

2.1.2 2014 ~ 2015 年冬季雨水金属元素浓度变化特征

图 4 所示为 Fe、K、Ca、Al、Mg、Mn、Na、Zn 共 8 种金属元素浓度变化及其月变化。从图 4(a) 可知, Fe 元素浓度在 1 月 27 日及 2 月 4 日浓度较高

分别为 0.56 mg·L⁻¹ 和 0.6 mg·L⁻¹, 冬季月际变化中 1 月的 Fe 元素浓度最高 0.27 mg·L⁻¹, 12 月浓度最低 0.02 mg·L⁻¹. 图 4(b) 中 K 元素浓度除 12 月 27 日达 20.3 mg·L⁻¹ 之外, 其余均低于 4.5 mg·L⁻¹, 故月变化 12 月浓度最高为 11.96 mg·L⁻¹, 1 月和 2 月为 1.22 mg·L⁻¹ 及 0.45 mg·L⁻¹. 12 月 27 日、1 月 27 日及 2 月 4 日的 Ca 元素浓度分别为各月中最高的, 分别为 6.03、10.31 及 3.01 mg·L⁻¹, 月变化比较平缓在 2 ~ 4 mg·L⁻¹ 之间[图 4(c)]. Al 元素最大值发生在 1 月 27 日为 0.84 mg·L⁻¹, 最小值为 12 月 27 日 0.01 mg·L⁻¹, 其月变化与 Fe 元素规律相似为 1 月浓度最高、12 月最低[图 4(d)]. 为 1 月 27 日为 Mg 元素最大值 1.09 mg·L⁻¹, 最小值为 12 月 4 日 0.12 mg·L⁻¹, 冬季月浓度变化为 12 月至次年 2 月逐渐下降的趋势[图 4(e)]. 如图 4(f) 所示, Mn 元素浓度的最大值仍是 1 月 27 日 0.13 mg·L⁻¹, 其它各场降雨浓度均低于 0.1 mg·L⁻¹. 平均月浓度变化为 1 月最高 0.05 mg·L⁻¹, 2 月最低 0.03 mg·L⁻¹. 从图 4(g) 可知 Na 元素浓度最高值为 1 月 27 日 3.81 mg·L⁻¹, 故月浓度变化 1 月最高 1.02 mg·L⁻¹. 如图 4(h) 所示, 与其它元素浓度变化规律明显不同, Zn 元素浓度在 1 月为最低, 最大值出现在 12 月 27 日高达 47.64 mg·L⁻¹ 是最小值 1 月 7 日 0.15 mg·L⁻¹ 的 300 多倍, 故月浓度变化 12 月最高, 1 月最低. 从图 4 中月变化的趋势来看, Fe、Al 变化相同均是 1 月 > 2 月 > 12 月; Ca、Mg 相同为 12 月 > 1 月 > 2 月; Na、Mn 变化相同为 1 月 > 12 月 > 2 月. 而其中几场特征降雨如 12 月 27 日、1 月 27 日及 2 月 4 日与各形态氮、DOC、SO₄²⁻ 等, 存在极端数值变化, 则有可能与人为干扰有一定的关联.

2.2 千烟洲冬季林种下穿透雨的养分特征

2.2.1 林下穿透雨 N、C、P、S 浓度变化特征

图 5(a) 所示 2014 年 12 月穿透雨, 各树种下穿透雨与大气降水各形态氮波动趋势相同, 但湿地松 I 各形态氮浓度变化幅度相对较大, TN 浓度达 28.70 mg·L⁻¹, 马尾松 II 与雨水趋势一致, 各形态氮浓度略高一些. 同场降雨情况下, 湿地松 I、II 对雨水浓度改变相对较大, 阔叶林和马尾松 I 次之. 另外, 在 2014 年 12 月的降雨中, 各树种除马尾松 I 外硝态氮浓度均高于铵态氮, 说明大气降雨经过马尾松 I 冠层淋洗后 NH₄⁺-N 比 NO₃⁻-N 增加得更多. 2015 年 1 月湿地松 I 林下穿透雨浓度变化最大, 马尾松 I 和阔叶林次之; 其中马尾松 II 各浓度值与雨水接近, 这是由于该样地马尾松多处于幼年期, 平均

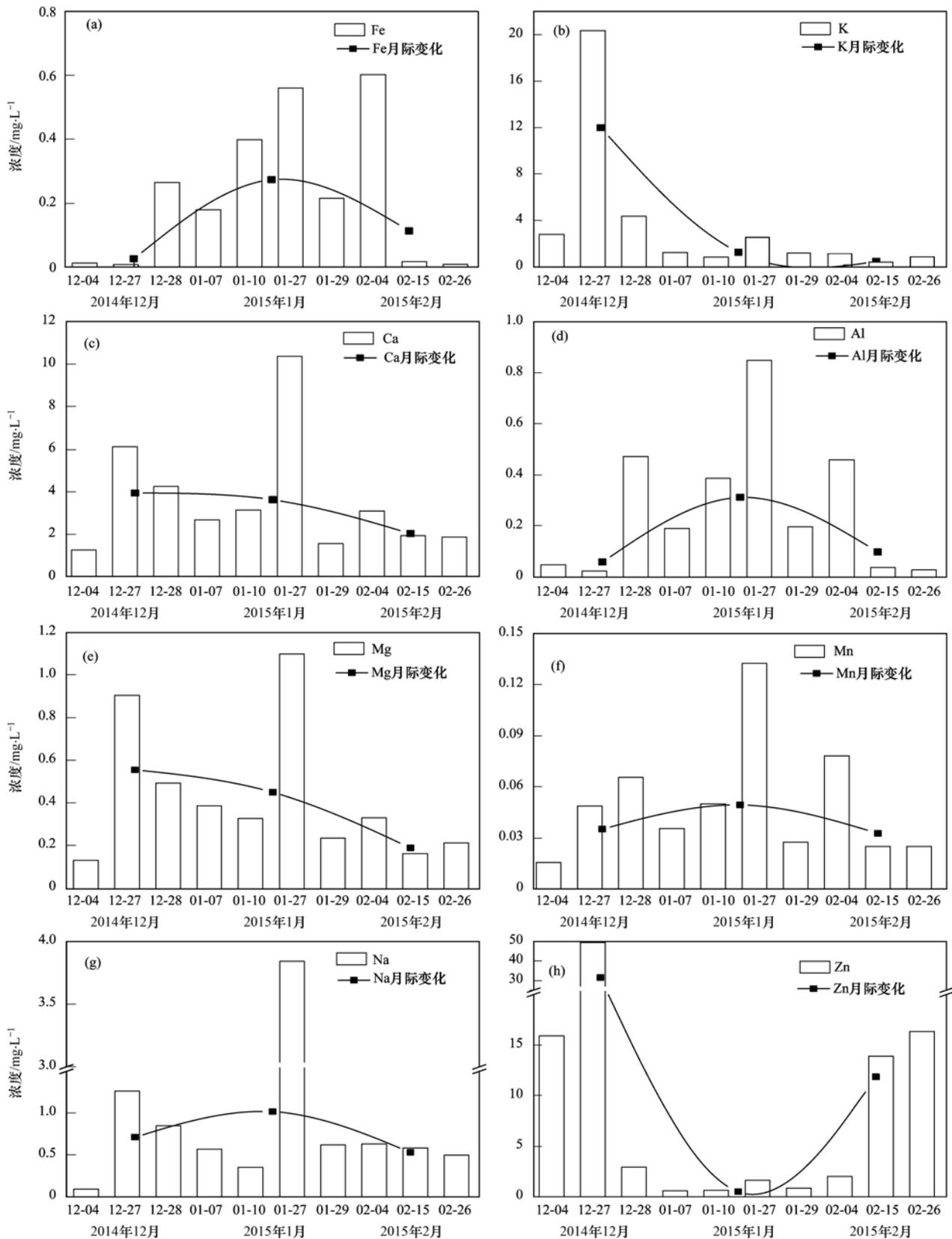


图 4 2014 ~ 2015 年冬季各场降雨金属离子浓度及其月际变化

Fig. 4 Concentrations and monthly variation of trace elements in the rainfall in the winter of 2014 to 2015

树高约 80 cm,对雨水截留作用微弱. 与雨水规律不同的是各树种的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均大于 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度,湿地松 I 尤为明显[图 5(b)]. 各树种 TN 浓度均小于雨水,并且桔园消减最明显,说明雨水经过树林颗粒态被明显吸收. 图 5(c)为 2015 年 2 月降雨,与前两个月降雨不同,桔园的各形态氮浓度有明显增加, TN 和 DTN 浓度仅次于湿地松 I, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最高而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度最低, TN 经过各树种均有明显的吸收

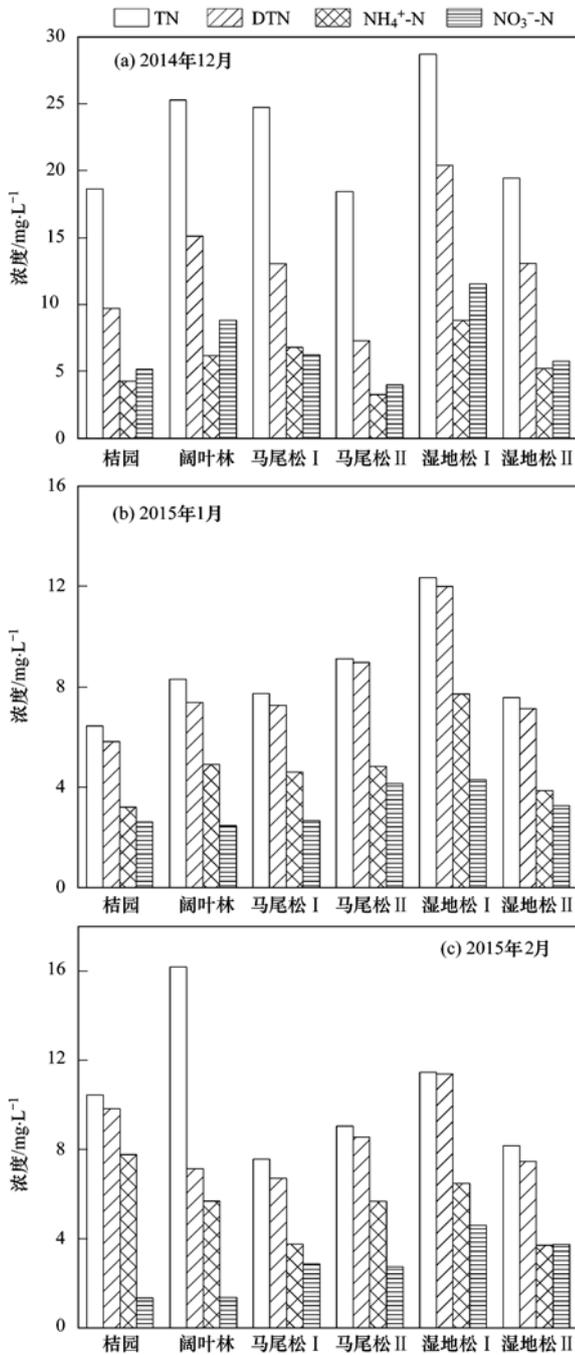


图 5 林下穿透雨各形态氮浓度变化

Fig. 5 Variation in concentrations of different forms of nitrogen in through fall

作用,浓度值均低于大气降水. 与图 2(d)相比,桔园,阔叶林对 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有明显的吸收作用,湿地松 I、II 通过雨水淋洗 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度增加. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、DTN 通过各林种浓度都有明显增加.

图 6 为雨水与林下 C、P、S 浓度变化对比,图 6(a)为 DOC 浓度变化特征,冬季 3 个月的降雨各树种均呈现离释作用,12 月和 2 月波动幅度较大,1 月波动较小. 图 6(b)所示 TP 浓度变化特征,除 2015 年 1 月为吸收作用外,其余 2 个月的穿透雨均呈现离释作用. 阔叶类(桔园和阔叶林)离释作用尤其突出. 图 6(c)为 SO_4^{2-} 的变化特征,在 12 月的降雨

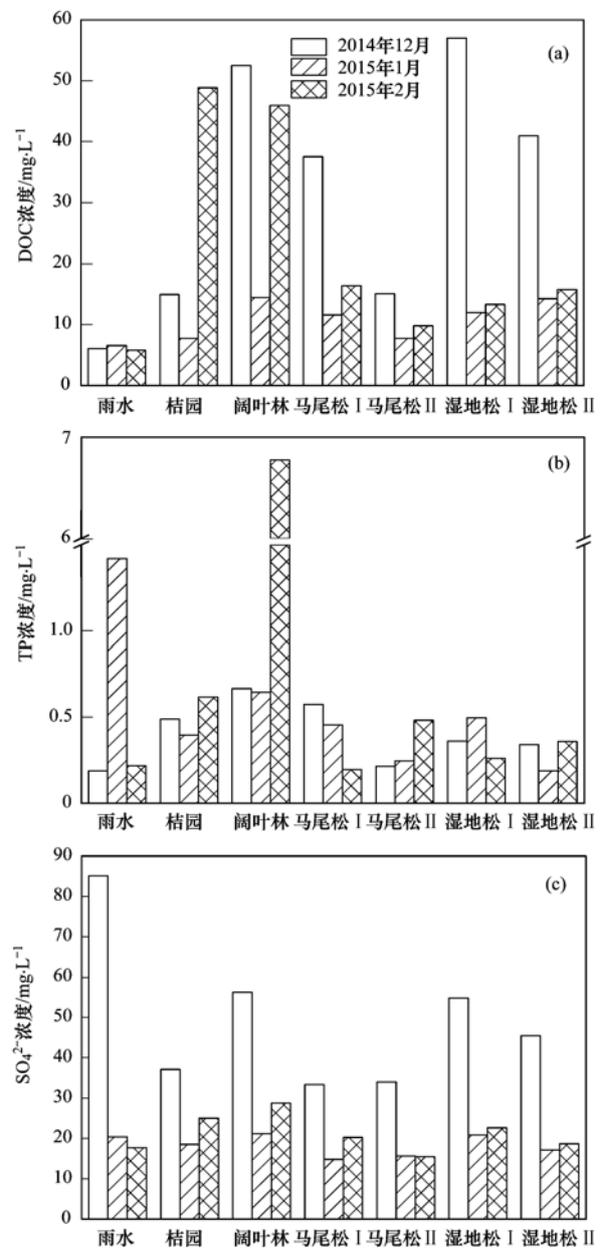


图 6 林下穿透雨 DOC、TP、 SO_4^{2-} 浓度变化

Fig. 6 Variation of DOC, TP, SO_4^{2-} concentrations in through fall

中,各树种林下穿透雨均为吸收作用,2015 年 1 月各树种浓度变化不明显,2 月降雨仅马尾松 II 呈现离释作用其它林种均为吸收作用. 综上,不同月份的时段,林种间养分浓度变化存在差异的,2015 年 1 月除 TP 外,C、S 浓度变化幅度均不明显,12 月各元

素浓度波动幅度最大,2 月次之.

2.2.2 林下穿透雨金属元素浓度变化特征

图 7 为冬季林下穿透雨金属离子浓度变化,其中 Na 离子 2014 年 12 月浓度最大,各林种穿透雨浓度较雨水均有增幅且湿地松 II 增幅最大[图 7

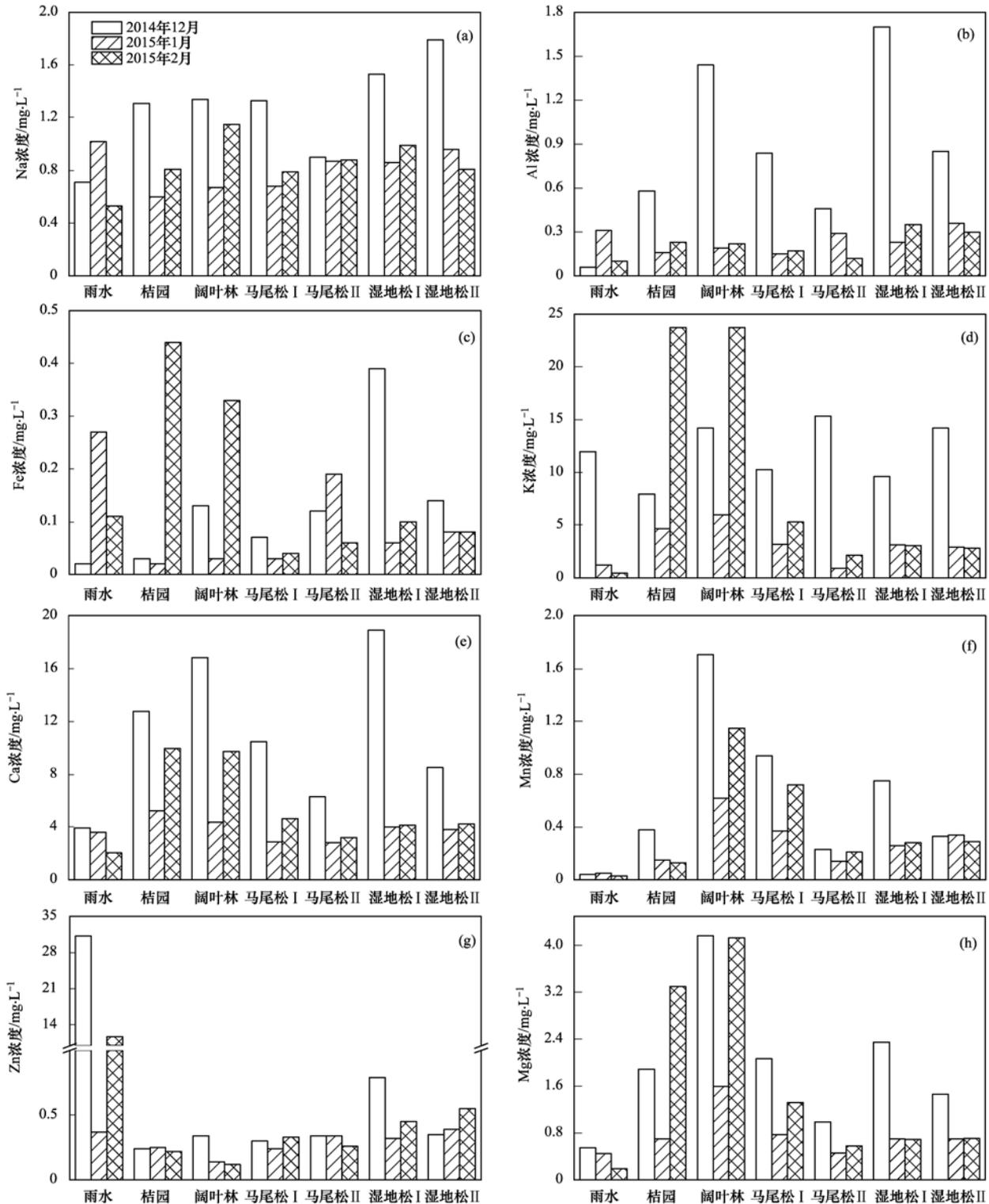


图 7 林下穿透雨金属元素浓度变化

Fig. 7 Variation of trace elements concentrations in through fall

(a)]. 2015年1月,各林种 Na 浓度呈现减小趋势. 2015年2月增幅幅度小,且与12月不同,增幅最大的林种为阔叶林. 图7(b)为 Al 离子浓度变化,可见2014年12月各林种均有明显增幅,尤其是阔叶林和湿地松 I. 2015年1月各树种差异性不大,主要呈现吸收作用. 2015年2月大气雨水经过各树种林冠淋洗 Al 离子浓度均有增加. 图7(c)为 Fe 元素浓度变化,2015年1月大气降水经过各林种 Fe 元素浓度均减小,而2015年2月 Fe 元素浓度在桔园和阔叶林浓度增长十分明显,浓度分别达到 $0.44 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 图7(d),冬季降雨除12月外 K 元素浓度经过林冠淋溶后浓度均有增加,其中2015年2月桔园和阔叶林增加幅度最大, K 离子浓度最高为 $23.75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Ca、Mn、Mg 均呈现相同规律,冬季的大气降水经过各森林冠层后,发生离释作用,浓度增加,且均是阔叶林增幅最明显. Zn 元素浓度除2015年1月经各树种林冠后浓度波动不明显外,其它2个月均呈现明显的吸收作用,浓度减少幅度很大.

3 讨论

3.1 林冠对 pH 的缓冲作用

图8为冬季大气降水及林下穿透雨的 pH 变化情况,大气降水 pH 小于 5.6 即为酸雨. 由图8(a)可知,冬季一共收集降雨 10 场,其中共 6 场降雨为酸性降雨,冬季酸雨出现频率为 60%,其中 2 月 4 日 pH 最低为 3.49. 图8(b)为各树种林下穿透雨的 pH 变化,大气降水经过林冠截留后 2014 年 12 月各树种林下雨 pH 均下降,其中湿地松 I 下降最为明显. 2015 年 1 月各树种 pH 有上升,但马尾松 II 和

湿地松 II 没有明显变化. 2015 年 2 月马尾松 II、湿地松 I、II 的林下穿透雨均属酸性且下降明显. 冬季穿透桔园、阔叶林及马尾松 I 的林下雨 pH 变化幅度不大. 马尾松 II 及湿地松 I、II 林下一般为酸性雨.

从对比结果可以看出,阔叶林和桔园对 pH 的缓冲作用比较明显,而针叶林(马尾松、湿地松)林下穿透雨反而比大气降雨 pH 略低一些. 这样的结果表明不同林型的林冠对酸沉降的缓冲能力有差异,阔叶林林冠较之针叶林对污染物引起的酸沉降有更大的缓冲能力.

3.2 冬季大气湿沉降养分沉降通量变化特征

在千烟洲地区冬季期间,根据公式(1)计算大气降雨各养分沉降通量分列于表1,从中可知:1月总磷及各形态氮的沉降通量均为最高,而硫酸根与 DOC 则 12 月最高,金属元素沉降通量各月相差不大. 沉降的组成成分大小顺序为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{TN} > \text{DOC} > \text{TP}$; 金属元素沉降通量大小为: $\text{Zn} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Mn}$. 流域冬季期间 C、N、P、S 沉降负荷分别为: 198.72、422.3、18.75、1427.76 kg. 由此推断,江西千烟洲地区湿沉降的主要组成是氮和硫沉降,并且冬季的酸雨发生率达 60%,当地要采取减少化肥的使用、秸秆的燃烧、机动车使用等措施,控制酸雨的发生.

3.3 林冠对大气降雨养分截留机制

大气降雨经过林冠后,林冠不仅对降雨进行了截流再分配,同时还伴随着元素的吸附、吸收、利用、淋洗和淋溶等过程,从而改变了大气降水中各元素的浓度^[23~25]. 雨水中各成分的沉降通量及沉降负荷都发生改变. 表2表明降雨经过各树种树冠

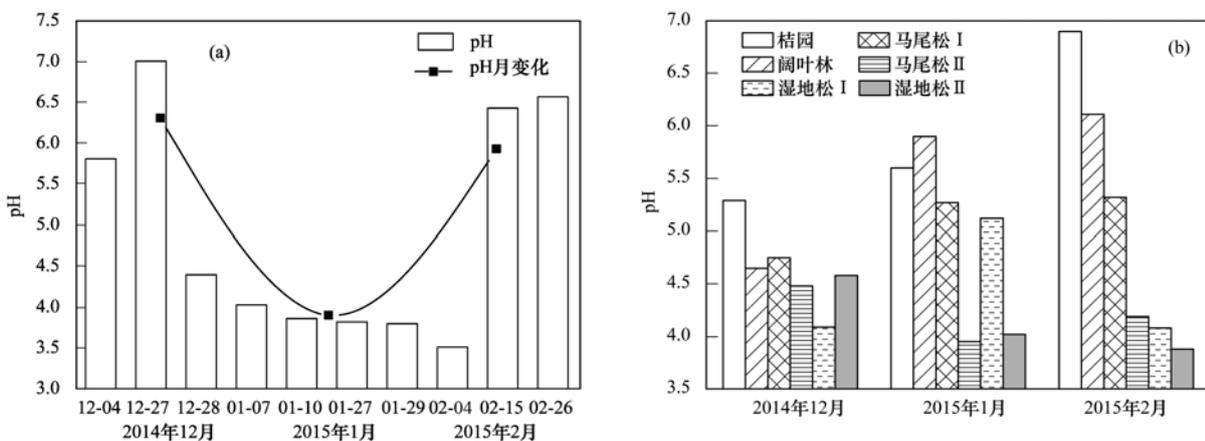


图8 冬季大气降水及林下穿透雨 pH 变化

Fig. 8 The pH range of wet precipitation and through fall in winter

表 1 冬季大气湿沉降各组分沉降通量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ Table 1 Deposition fluxes of wet precipitation components in winter/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

时间	TN	DTN	NH_4^+-N	NO_3^--N	DOC	TP	SO_4^{2-}	Na	Al	Fe	K	Ca	Mn	Zn	Mg
2014 年 12 月	1.51	0.64	0.24	0.36	0.76	0.02	10.64	0.09	0.01	0.00	1.50	0.49	0.00	3.90	0.07
2015 年 1 月	1.76	0.94	0.52	0.43	0.67	0.14	2.08	0.10	0.03	0.03	0.12	0.37	0.01	0.04	0.05
2015 年 2 月	1.04	0.59	0.29	0.30	0.60	0.02	1.85	0.06	0.01	0.01	0.05	0.21	0.00	1.23	0.02

表 2 森林林冠截留作用下大气降雨沉降通量增幅百分比¹⁾/ $\%$ Table 2 Increment percentage of deposition fluxes of rainfall under interception by forest canopy/ $\%$

时间	树种	TN	DTN	NH_4	NO_3	DOC	TP	SO_4^{2-}	Na
2014 年 12 月	桔园	54.39	89.21	126.81	80.49	147.03	158.77	-56.35	83.94
	阔叶林	109.30	194.48	226.98	206.97	769.21	250.88	-33.86	88.36
	马尾松 I	104.88	154.52	260.14	117.77	521.45	202.63	-60.83	87.28
	马尾松 II	52.73	42.04	73.19	38.79	149.28	14.04	-59.99	27.17
	湿地松 I	137.58	297.47	366.93	302.96	843.49	90.79	-35.56	114.86
	湿地松 II	61.15	154.65	176.01	101.39	578.31	79.82	-46.53	2 378.02
2015 年 1 月	桔园	-62.71	-37.00	-36.55	-38.43	18.41	-72.01	-9.09	-40.88
	阔叶林	-51.88	-20.07	-3.02	-41.66	120.61	-54.50	3.72	-34.33
	马尾松 I	-55.27	-21.13	-9.08	-36.70	76.83	-67.82	-27.33	-33.13
	马尾松 II	-47.15	-2.81	-4.68	-1.96	18.17	-82.55	-23.66	-14.81
	湿地松 I	-28.41	30.12	52.42	1.53	82.73	-64.90	2.28	-15.78
	湿地松 II	-56.14	-22.64	-23.55	-22.65	117.47	-86.67	-15.97	-6.20
2015 年 2 月	桔园	4.50	74.19	179.77	-52.95	740.85	180.83	41.07	52.61
	阔叶林	61.83	26.69	104.56	-52.68	690.29	2979.28	62.10	116.70
	马尾松 I	-24.33	18.91	35.32	-0.21	181.75	-9.88	14.30	48.33
	马尾松 II	-9.50	51.48	103.93	-4.32	68.61	120.08	-12.76	65.74
	湿地松 I	14.67	101.92	133.34	61.09	129.21	19.18	27.83	87.56
	湿地松 II	-18.33	32.46	33.27	31.05	171.18	63.64	5.52	52.84
时间	树种	Al	Fe	K	Ca	Mn	Zn	Mg	
2014 年 12 月	桔园	863.50	60.83	-33.53	224.21	851.33	-99.23	243.70	
	阔叶林	2 302.28	547.33	18.78	327.75	4 164.33	-98.90	657.27	
	马尾松 I	1 303.67	254.33	-14.02	166.03	2 253.67	-99.02	276.79	
	马尾松 II	670.94	515.33	28.14	59.89	462.83	-98.92	80.10	
	湿地松 I	2 739.17	1 835.25	-19.64	380.46	1 783.63	-97.47	326.45	
	湿地松 II	1 321.28	603.50	18.75	116.11	720.58	-98.89	165.08	
2015 年 1 月	桔园	-49.91	-91.57	280.36	44.31	202.13	-33.67	56.38	
	阔叶林	-39.80	-90.53	390.38	21.07	1132.73	-62.70	255.70	
	马尾松 I	-51.15	-88.23	161.61	-20.05	640.87	-35.28	72.12	
	马尾松 II	-7.13	-30.58	-25.78	-21.86	187.87	-7.33	1.39	
	湿地松 I	-26.00	-76.65	157.34	10.19	416.00	-13.80	55.39	
	湿地松 II	15.73	-70.20	137.76	5.45	574.87	5.76	55.30	
2015 年 2 月	桔园	133.80	302.82	5 175.26	390.56	322.11	-98.15	1 639.14	
	阔叶林	119.93	195.67	5177.78	379.26	3740.78	-99.00	2 072.11	
	马尾松 I	65.87	-65.48	1 076.30	129.24	2 306.89	-97.18	596.26	
	马尾松 II	23.70	-41.94	376.67	57.64	601.00	-97.77	203.26	
	湿地松 I	246.87	-9.82	575.04	103.68	842.33	-96.22	263.91	
	湿地松 II	195.63	-26.00	521.93	108.97	874.78	-95.30	274.12	

1) 正值为离释作用,负值为吸收作用

后,降水中组成沉降通量发生了改变,而且在不同树种中发生的变化情况不同,说明不同树种的树冠有不同的选择性吸收作用与交换特点。

在 2014 年 12 月大气降雨经过各树种林冠截留

后, SO_4^{2-} 、Zn 具有明显的吸收作用,Zn 离子吸收率高达 97% 以上。K 元素吸收或离释作用树种间存在差异。对于非金属养分,林冠的离释作用大小为: $\text{DOC} > \text{NH}_4^+-\text{N} > \text{NO}_3^--\text{N} > \text{DTN} > \text{TP} > \text{TN}$,金属离子

离释作用大小为: $Mn > Al > Fe > Na > Mg > Ca$. 树种之间, 针叶林(马尾松、湿地松)林密度大的离释和吸收能力比林密度小的更强; 阔叶林(木荷)比桔园离释和吸收能力更强, 这与树叶面积及树高均有关. 2015年1月只有 $Mn > K > Mg > DOC > Ca$ 这5种营养组分表现为离释作用, 而其他组分均表现为明显的吸收作用, 原因可能为2015年1月雨水本身浓度较高, 在经过林冠后被吸收, 导致林下穿透雨浓度低于大气降水. 吸收作用强弱顺序为: $Fe > TP > TN > Al > Zn > Na > NO_3^- - N > DTN > SO_4^{2-} > NH_4^+ - N$. 树种之间, 阔叶类与针叶类在($NH_4^+ - N$ 、 Ca 、 $NO_3^- - N$)等表现明显不同, 其它养分差异性不大. 从表2中看(2015年2月), 除Zn以97%表现为明显的吸收作用外, 大部分化学指标表现为离释作用, 沉降通量增幅情况为: $K > Mn > Mg > TP > DOC > Ca > Al > NH_4^+ - N > Na > DTN > SO_4^{2-}$. $NO_3^- - N$ 、 TN 、 Fe 这3种养分在各树种间存在差异, Fe 与 TN 均为阔叶类为离释作用而针叶类为吸收作用, 而 $NO_3^- - N$ 只有湿地松呈现离释作用.

大气降雨中的元素是完全可溶的, 植物无须经过复杂的分解过程, 可以直接吸收利用, 因此, 大气降雨具有加速植物生长和促进养分循环的重要作用^[23]. 在本研究中, 各树种对 DOC 、 TP 、 DTN 、 $NH_4^+ - N$ 、 Ca 、 Mg 、 Mn 存在明显的离释作用, 而对 TN 、 SO_4^{2-} 、 Zn 有一定的吸收作用, 而对于 $NO_3^- - N$ 、 K 、 Fe 、 Na 则两种作用交替出现. 研究发现, 研究区森林对颗粒态氮(PN)有明显的吸收作用, 并且马尾松对 $NO_3^- - N$ 、 SO_4^{2-} 均有较强的吸收作用, 可以大量种植, 改善酸雨造成的土壤酸化.

林下穿透雨的空间差异性大, 阔叶和针叶差别较大, 枝叶郁闭程度越高, 穿透雨可淋洗物质越多, 相应的元素浓度越高; 相同场次的降雨, 不同林木产生的穿透雨体积有差异, 一般为水量越大, 水化学浓度越低. 本研究仅对冬季林下穿透雨进行研究, 在短期内水化学性质变化的规律不明显, 不能代表研究区的总体变化规律. 由此可知, 有关大气降水的水质变化应该进行长期监测研究, 积累长期的数据, 进一步研究森林与降水的关系问题, 可为研究生物地球化学循环过程提供依据.

4 结论

(1) 2014~2015年冬季期间江西千烟洲地区湿沉降的主要组成是氮和硫沉降, 且冬季酸雨发生率约为60%, N 、 C 、 P 、 S 沉降通量分别为: 4.31、

2.03、0.19、14.57 $kg \cdot hm^{-2}$.

(2) 冬季大气降雨中金属元素浓度差异较大, 最高为 Zn 元素平均浓度为 14.46 $mg \cdot L^{-1}$, 冬季沉降通量为 5.17 $kg \cdot hm^{-2}$; 最小为 Mn 元素平均浓度仅为 0.04 $mg \cdot L^{-1}$, 沉降通量为 0.01 $kg \cdot hm^{-2}$, 其它痕量元素冬季沉降通量排序为 $K(1.67 kg \cdot hm^{-2}) > Ca(1.07 kg \cdot hm^{-2}) > Na(0.25 kg \cdot hm^{-2}) > Mg(0.13 kg \cdot hm^{-2}) > Al(0.05 kg \cdot hm^{-2}) > Fe(0.04 kg \cdot hm^{-2})$.

(3) 森林林冠对 DOC 、 TP 、 DTN 、 $NH_4^+ - N$ 、 Ca 、 Mg 、 Mn 存在明显的离释作用, 而对 TN 、 SO_4^{2-} 、 Zn 有一定的吸收作用, 而对于 $NO_3^- - N$ 、 K 、 Fe 、 Na 则两种作用交替出现.

(4) 冬季林下穿透雨中, 各林种间营养组分及痕量元素增幅比例存在差异, 阔叶类的林下穿透雨各浓度增加幅度比针叶类明显. 其中, 阔叶林(木荷)对 TP 、 DOC 、 Al 、 K 、 Mg 离释作用最强, 沉降通量增幅率分别为 1058.55%、526.70%、794.14%、1862.32% 和 995.03%, 对 Zn 元素吸收能力最强达 86.87%; 马尾松对 SO_4^{2-} 和 NO_3^- 吸收作用最明显, 吸收率达到 28.38% 和 10.83%, 对酸雨有一定的缓冲作用.

参考文献:

- [1] Anand M, Ma K M, Okonski A, et al. Characterising biocomplexity and soil microbial dynamics along a smelter damaged landscape gradient [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **311**(1-3): 247-259.
- [2] 陶璋萍, 吴宁, 罗鹏, 等. 森林对污染物湿沉降过滤作用的研究[J]. *水资源保护*, 2006, **22**(3): 16-19.
- [3] 付敏, 赵卫红, 王江涛, 等. 大气湿沉降对长江口水域营养盐的贡献[J]. *环境科学*, 2008, **29**(10): 2703-2709.
- [4] Pan Y P, Wang Y S. Atmospheric wet and dry deposition of trace elements at 10 sites in Northern China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(2): 951-972.
- [5] 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.
- [6] Rodrigo A, Àvila A, Rodà F. The chemistry of precipitation, throughfall and stemflow in two holm oak (*Quercus ilex* L.) forest under a contrasted pollution environment in NE Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **305**(1-3): 195-205.
- [7] 陈永瑞. 千烟洲试区湿地松人工林中降雨对矿质元素淋溶的影响[J]. *资源科学*, 2000, **22**(1): 65-68.
- [8] Dovey S B, du Toit B, De Clercq W. Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in *Eucalyptus* stands on the Zululand coastal plain, South Africa [J]. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 2011, **73**(3-4): 193-206.
- [9] Bhat S, Jacobs J M, Bryant M L. The chemical composition of rainfall and throughfall in five forest communities: a case study in

- Fort Benning, Georgia [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2011, **218**(1-4): 323-332.
- [10] 陶豫萍, 吴宁, 罗鹏, 等. 森林植被截留对大气污染物湿沉降的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2007, **15**(4): 9-12.
- [11] 詹敏, 窦云鹏, 郭培培, 等. 天目山不同森林类型林冠对酸雨的缓冲作用[J]. *浙江林业科技*, 2010, **30**(2): 26-30.
- [12] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 1081-1090.
- [13] Dohnal M, Cerny T, Votrubová J, *et al.* Rainfall interception and spatial variability of throughfall in spruce stand [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2014, **62**(4): 277-284.
- [14] 张娜, 乔玉娜, 刘兴诏, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林大气降雨、穿透雨和树干流的养分特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2010, **18**(5): 502-510.
- [15] Burbano-Garcés M L, Figueroa-Casas A, Peña M. Bulk precipitation, throughfall and stemflow deposition of $N-NH_4^+$, $N-NH_3$ and $N-NO_3^-$ in an Andean Forest [J]. *Journal of Tropical Forest Science*, 2014, **26**(4): 446-457.
- [16] 梁晓东, 孙兴海, 孙志虎, 等. 长白落叶松人工林穿透雨的养分特征 [J]. *东北林业大学学报*, 2010, **38**(7): 22-24.
- [17] 郝卓, 高扬, 张进忠, 等. 南方红壤区氮湿沉降特征及其对流域氮输出的影响 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1630-1638.
- [18] 黄运湘, 廖柏寒, 王志坤. 模拟酸雨对森林红壤中铝的溶出及不同土层酸度变化的影响 [J]. *生态环境*, 2005, **14**(4): 478-482.
- [19] 蔡玉林, 李飞, 李家永, 等. 红壤丘陵区人工林降水化学研究 [J]. *自然资源学报*, 2003, **18**(1): 99-104.
- [20] 任小丽, 何洪林, 刘敏, 等. 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟 [J]. *生态学报*, 2012, **32**(23): 7313-7326.
- [21] 陈建平, 李艳, 董思宏, 等. 江西千烟洲农业生态系统水环境氮污染研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2012, **23**(6): 51-54.
- [22] 涂洁, 刘琪璟, 王辉民. 江西千烟洲木荷液流特征及其与气象因子的关系 [J]. *长江流域资源与环境*, 2014, **23**(2): 267-273.
- [23] 盛后财, 蔡体久, 朱道光, 等. 原始红松林穿透雨和树干茎流养分特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, **22**(5): 47-51.
- [24] 陈书军, 田大伦, 闫文德, 等. 樟树人工林生态系统不同层次穿透水水化学特征[J]. *生态学杂志*, 2006, **25**(7): 747-752.
- [25] 鲍文, 包维楷, 丁德蓉, 等. 森林植被对降水水化学的影响 [J]. *生态环境*, 2004, **13**(1): 112-115.

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/Zeolite 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

国内外公开发刊