

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

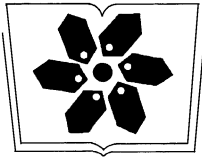
Acta Ecologica Sinica



第 33 卷 第 13 期 Vol.33 No.13 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 13 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 强度干扰后退化森林生态系统中保留木的生态效应研究综述..... 缪宁,刘世荣,史作民,等 (3889)
- AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理..... 罗巧玉,王晓娟,林双双,等 (3898)

个体与基础生态

- 东灵山不同林型五角枫叶性状异速生长关系随发育阶段的变化..... 姚婧,李颖,魏丽萍,等 (3907)
- 不同温度下 CO₂ 浓度增高对坛紫菜生长和叶绿素荧光特性的影响..... 刘露,丁柳丽,陈伟洲,等 (3916)
- 基于 LULUCF 温室气体清单编制的浙江省杉木林生物量换算因子..... 朱汤军,沈楚楚,季碧勇,等 (3925)
- 土壤逐渐干旱对菖蒲生长及光合荧光特性的影响..... 王文林,万寅婧,刘波,等 (3933)
- 一株柠条内生解磷菌的分离鉴定及实时荧光定量 PCR 检测..... 张丽珍,冯利利,蒙秋霞,等 (3941)
- 一个年龄序列巨桉人工林植物和土壤生物多样性..... 张丹桔,张健,杨万勤,等 (3947)
- 不同饵料和饥饿对魁蚶幼虫生长和存活的影响..... 王庆志,张明,付成东,等 (3963)
- 禽畜养殖粪便中多重抗生素抗性细菌研究..... 祁诗月,任四伟,李雪玲,等 (3970)
- 链状亚历山大藻赤潮衰亡的生理调控..... 马金华,孟希,张淑,等 (3978)
- 基于环境流体动力学模型的浅水草藻型湖泊水质数值模拟..... 李兴,史洪森,张树礼,等 (3987)

种群、群落和生态系统

- 干旱半干旱地区围栏封育对甘草群落特征及其分布格局的影响..... 李学斌,陈林,李国旗,等 (3995)
- 宁夏六盘山三种针叶林初级净生产力年际变化及其气象因子响应..... 王云霓,熊伟,王彦辉,等 (4002)
- 半干旱黄土区成熟柠条林地土壤水分利用及平衡特征..... 莫保儒,蔡国军,杨磊,等 (4011)
- 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响..... 丘清燕,陈小梅,梁国华,等 (4021)
- 基于改进 PSO 的洞庭湖水源涵养林空间优化模型..... 李建军,张会儒,刘帅,等 (4031)
- 外来植物火炬树水浸液对土壤微生物生态系统的化感作用..... 侯玉平,柳林,王信,等 (4041)
- 崇明东滩抛荒鱼塘的自然演替过程对水鸟群落的影响..... 杨晓婷,牛俊英,罗祖奎,等 (4050)
- 三峡水库蓄水初期鱼体汞含量及其水生食物链累积特征..... 余杨,王雨春,周怀东,等 (4059)
- 元江鲤种群遗传多样性..... 岳兴建,邹远超,王永明,等 (4068)

景观、区域和全球生态

- 中国西北干旱区气温时空变化特征..... 黄蕊,徐利岗,刘俊民 (4078)
- 集水区尺度下东北东部森林土壤呼吸的模拟..... 郭丽娟,国庆喜 (4090)
- 增氮对青藏高原东缘高寒草甸土壤甲烷吸收的早期影响..... 张裴雷,方华军,程淑兰,等 (4101)
- 基于生态系统服务的广西水生态足迹分析..... 张义,张合平 (4111)
- 深圳市景观生态安全格局源地综合识别..... 吴健生,张理卿,彭建,等 (4125)

庐山风景区碳源、碳汇的测度及均衡..... 周年兴,黄震方,梁艳艳 (4134)

气候变化对内蒙古中部草原优势牧草生长季的影响 李夏子,韩国栋,郭春燕 (4146)

民勤荒漠区典型草本植物马蔺的物候特征及其对气候变化的响应..... 韩福贵,徐先英,王理德,等 (4156)

血水草生物量及碳贮量分布格局..... 田大伦,闫文德,梁小翠,等 (4165)

5 种温带森林生态系统细根的时间动态及其影响因子 李向飞,王传宽,全先奎 (4172)

资源与产业生态

干旱胁迫下 AM 真菌对矿区土壤改良与玉米生长的影响..... 李少朋,毕银丽,陈咄圳,等 (4181)

城乡与社会生态

上海环城林带保健功能评价及其机制..... 张凯旋,张建华 (4189)

研究简报

北京山区侧柏林林内降雨的时滞效应 史 宇,余新晓,张佳音 (4199)

采伐剩余物管理措施对二代杉木人工林土壤全碳、全氮含量的长期效应
..... 胡振宏,何宗明,范少辉,等 (4205)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 326 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 35 * 2013-07



封面图说: 岳阳附近的水源涵养林及水系鸟瞰——水源涵养林对于调节径流,减缓水、旱灾害,合理开发利用水资源具有重要的生态意义。洞庭湖为我国第二大淡水湖,南纳湘、资、沅、澧四水,北由岳阳城陵矶注入长江,是长江上最重要的水量调节湖泊。因此,湖周的水源涵养林建设对于恢复洞庭湖调节长江中游地区洪水的功能,加强湖区生物多样性的保护是最为重要的举措之一。对现有防护林采取人为干扰的调控措施,改善林分空间结构,将有利于促进森林生态系统的正向演替,为最大程度恢复洞庭湖水源林生态功能和健康经营提供重要支撑。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201209111279

丘清燕, 陈小梅, 梁国华, 周国逸, 张德强. 模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流水化学特征的影响. 生态学报, 2013, 33(13): 4021-4030.

Qiu Q Y, Chen X M, Liang G H, Zhou G Y, Zhang D Q. Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(13): 4021-4030.

模拟酸沉降对鼎湖山季风常绿阔叶林 地表径流水化学特征的影响

丘清燕^{1,2}, 陈小梅^{1,2}, 梁国华^{1,2}, 周国逸¹, 张德强^{1,*}

(1. 中国科学院华南植物园, 广州 510650; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:通过模拟酸沉降实验,研究了旱季期间(10—3月份)鼎湖山季风常绿阔叶林在4种不同pH模拟酸雨处理(对照、pH 4.0、pH 3.5、pH 3.0)下地表径流水化学输出特征。结果显示:(1)地表径流pH随酸处理强度增强呈“U”型变化模式,酸沉降对地表径流pH的影响不显著($P>0.05$),表明模拟酸沉降尚未引起地表水的酸化。(2)地表径流中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 浓度随酸处理强度增强略有增加; HCO_3^- 浓度的变化模式与地表径流pH类似。酸根离子浓度与地表径流pH相关性分析表明, SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 有助于提高地表水抗酸化能力而 NO_3^- 则有助于促进地表水酸化。(3)地表径流中盐基离子对酸沉降的响应不尽相同。pH 3.0处理显著提高地表径流中 Ca^{2+} 、 Na^+ 浓度; Mg^{2+} 浓度具有随酸处理梯度增强而增加的趋势; K^+ 受模拟酸度的影响小。表明强酸(pH 3.0)处理将导致土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 盐基离子流失。(4)酸沉降具有诱发土壤可溶性有机碳(DOC)流失的倾向,增加地表水受有机污染的风险。

关键词:酸沉降; 鼎湖山; 常绿阔叶林; 地表水化学

Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan

QIU Qingyan^{1,2}, CHEN Xiaomei^{1,2}, LIANG Guohua^{1,2}, ZHOU Guoyi¹, ZHANG Deqiang^{1,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

Abstract: The effects of simulated acid deposition on chemical properties of surface runoff were studied in a monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan Nature Reserve. Four gradients of simulated acid rain treatments with three replications were designed: control (natural lake water, pH 4.5 ± 0.3), pH 4.0, pH 3.5 and pH 3.0. The surface runoff pH, nitric acid (NO_3^-), sulfuric acid (SO_4^{2-}), bicarbonate (HCO_3^-), base cations (K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) and dissolved organic carbon (DOC) were detected from October 2011 to March 2012. The result showed that the surface runoff pH was not significantly different among treatments, which exhibited “U” patterns with increasing acid intensity. This suggested the pH was unlikely to decline in a short time. The NO_3^- and SO_4^{2-} concentrations increased with acid increment, while HCO_3^- exhibited the same pattern as the surface runoff pH. According to the correlation between acid ions concentrations and the surface runoff pH, we found that SO_4^{2-} and HCO_3^- promoted the ability of anti-acidification, while NO_3^- was adverse. Base cations responded differently to simulated acid treatments. Ca^{2+} and Na^+ were very sensitive to acid deposition, and their concentrations at pH 3.0 treatment were significantly higher than at other acid treatments. Mg^{2+} concentration increased with

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421101); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050205)资助

收稿日期:2012-09-11; **修订日期:**2013-03-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangdeq@scib.ac.cn

the simulated acid intensity, however, there were not significant differences among different acid treatments. K^+ , however, was not sensitive to acid treatment. These results indicated that pH 3.0 treatment led to the loss of Na^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+} from the soil. In addition, acid treatments tended to cause dissolved organic carbon (DOC) loss, increasing the risk of organic contamination in the surface runoff.

Key Words: acid deposition; Dinghushan; evergreen broad-leaved forest; surface runoff chemistry

随着工业的迅猛发展,大量化石燃料燃烧排放的硫氧化物、氮氧化物和酸性颗粒物,导致大气中酸沉降物质含量急剧增加。这些酸沉降物是形成酸雨的重要来源,大范围迁移是它的一个重要特征^[1]。早在上世纪 80 年代我国已成为继欧洲和北美之后的第三大酸雨区^[2-3],酸雨面积占国土面积的 30%^[4]。大气酸沉降频率、广度和强度在加剧的同时酸沉降的化学组成也由硫酸型逐渐向硫酸与硝酸混合型转变^[5]。酸沉降导致一系列生态环境问题,如植物光合作用降低、土壤酸化、盐基离子淋溶、重金属元素活化、森林衰退等^[6-12]。

地表水的化学组成是水在循环过程中与周围环境相互作用的结果。水环境是对化学环境变化反应最直接敏感的部分^[13],其化学特征的改变能够反映相应流域化学风化、气候、生态环境变化^[14]。酸沉降进入土壤后,通过土壤自身的缓冲作用和中和作用,形成了一定化学组成的土壤溶液,它们以径流的方式进入地表水中,影响地表水体的化学组成^[15]。酸沉降引起地表水酸化曾经对欧洲、北美造成严重的影响,这也使得其在研究酸沉降对地表水化学特征影响方面走在前列。已取得的研究结果指出,当水体 pH<6 时,可认为该水体已被酸化^[16],并且认为 Ca^{2+} 、 SO_4^{2-} 浓度以及矿化度对酸沉降的响应敏感,可作为识别水体早期酸化的较好参考指标^[17-18]。虽然我国在酸沉降的生态环境影响方面已做过大量的研究工作,但是有关酸沉降对地表径流水化学特征影响的研究却鲜有报道。

广东省作为我国经济极具活力、工业化速度最快的地区之一,其在经济飞速发展的同时大气污染日趋严重。据统计,全省 80% 的地区受到不同程度的酸雨影响^[1]。而位于广东省肇庆市的鼎湖山自然保护区其酸雨频率由 2002 年的 62.7% 上升至 2009 年的 96%^[2,19]。当前大量的模拟酸沉降试验对水化学特征影响的研究集中在可控条件下人工模拟酸雨对土壤淋溶液化学组成的影响,几乎不涉及酸沉降对地表水化学的影响。而且所用模拟酸雨的酸度一般都较高^[20],缺乏野外实验数据,其结果与实际仍有较大差距,增加了确定酸雨对生态系统危害程度的难度。本文以鼎湖山自然保护区内季风常绿阔叶林为对象,通过模拟酸沉降试验,探究鼎湖山常绿阔叶林地表水化学特征对酸沉降的响应,揭示其发生变化的原因和过程。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地建立在广东省肇庆市鼎湖山自然保护区,东经 $112^{\circ}30'39''$ — $112^{\circ}33'41''$,北纬 $23^{\circ}09'21''$ — $23^{\circ}11'30''$,该区面积 1145 hm^2 ,属亚热带季风性气候,年平均温度 21.0°C ,年平均相对湿度为 80%,年平均降雨量为 1927.3 mm ,雨季旱季明显,4—9 月为雨季,10—3 月为旱季,雨季雨量占全年降雨量的 75%。最冷月(1 月)和最热月(7 月)的平均气温分别为 12.6°C 和 28.0°C ^[21]。鼎湖山季风常绿阔叶林林地位于海拔 250—400 m,是有近 400 年纪录保护历史的亚热带地带性植被类型,整个群落处于由阳性植物占优势的森林向耐阴性植物占优势的演替顶级群落类型演变的最后阶段,群落外貌终年常绿,垂直结构复杂,群落优势树种主要有锥栗(*Castanopsis chinensis*)、木荷(*Schima superba*)、厚壳桂(*Cryptocarya chinensis*)、黄果厚壳桂(*Cryptocarya concinna*)等^[22]。季风常绿阔叶林样地的土壤是发育于母岩为砂页岩的赤红壤,土层深约 60—90 cm,表层(0—10 cm)土壤 pH 4.04,有机碳含量 38.16 g/kg ^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 实验设计

2008 年在季风常绿阔叶林内设置 12 个 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 的样方用于模拟酸沉降试验。每个样方四周用 PVC

板材围起,PVC 板材插入地表 15 cm,地上部分高出地表 5 cm。2010 年 6 月在样方下坡位方向设置地表径流收集装置。该装置由一个 PVC 塑料圆桶和水表组成。在塑料桶桶壁的中上部位水平方向上安装 3 根虹吸管,桶的底端安装 1 根 PVC 排水管,离桶底近一侧的排水管上安一个水阀开关。3 根虹吸管一端伸入塑料桶内底部,另一端位于桶外,并与位于桶底端安装的出水管相连,该出水管的下端安装 1 个水表,当 PVC 塑料桶中的水位超过 3 根虹吸管的高度时,发生虹吸作用,桶内的水自动排出,此时水表可自动记录地表径流的输出量。当桶内的水位低于虹吸管时,虹吸现象停止,这时可以打开排水管开关,使圆桶内蓄积的水排出,水表可自动记录地表径流的输出量。

根据该地区近年酸雨的酸度(pH 值约 4—5)和酸雨主要成分中 SO_4^{2-} 与 NO_3^- 摩尔比约为 2:1 左右,且酸雨类型有由硫酸型向硫酸硝酸混合型转变的趋势^[19]。因而本研究以 H_2SO_4 、 HNO_3 按 1:1 摩尔比配制作模拟酸雨实验材料,以 pH 值为衡量单位,设计模拟酸雨 pH 值分别为 3.0、3.5、4.0 和对照 4 种处理,每个处理设 3 个重复。从 2009 年 6 月开始在每月上旬和下旬将用鼎湖山天然湖水加酸配置好的不同 pH 梯度的 40 L 模拟酸雨,人工均匀喷洒在林地上(年增加水量相当于新增降水约 9.6 mm)。对照处理样方则喷洒等量的天然湖水(不加酸),天然湖水 pH 值为 4.5 ± 0.3 。采样期间,模拟酸雨处理仍正常进行(每月喷施两次)。

1.2.2 样品采样与化学分析方法

地表径流的采集从模拟酸沉降处理 28 个月后的 2011 年 10 月开始进行。采样频次为每次降雨足以使森林生态系统产生地表径流时采集水样,由于旱季期间(10 月—翌年 3 月)降雨频率低降雨量少,在各月份只采集到 1 次地表径流。12 月份降雨少,未形成地表径流,因而旱季期间共采集到 5 次地表径流。每次采集水样时,打开地表径流收集瓶下的开关,在水流经过水表流出水口处用 250 mL 塑料瓶收集地表径流。取回的水样立即测定其 pH 值,然后用 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜进行过滤,最后将过滤液放入 4°C 冰箱冷藏,并尽快的进行相关指标的测试分析,其中 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 这两种化学成分在旱季的第一、第二次采样中未对其进行测试分析。

化学成分的分析参照中国生态系统网络观测分析测试^[23]。水样 pH 值用 pH 计玻璃电极法测定; K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 用 ICP 等离子体发射光谱进行分析; NO_3^- 用紫外分光光度法进行测定; SO_4^{2-} 用浊度法进行测定; HCO_3^- 用 HCl 滴定法测定;DOC 用 TOC 分析仪进行测定。

1.2.3 数据处理

不同酸处理下所测指标的浓度采用容积加权平均值计算,公式如下:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} V_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} V_{ij}} \quad (1)$$

式中, i 表示第 i 个酸处理, j 为第 i 个酸处理下的第 j 个观测值, n_i 为第 i 个酸处理下的样本数, C_i 为第 i 个酸处理下观测指标的浓度, C_{ij} 表示第 i 个酸处理下第 j 个样本的浓度, V_{ij} 表示第 i 个酸处理下第 j 个样本的体积。本文各图表中观测指标在整个旱季的平均浓度是将旱季期间(10—3 月)5 次采样累加后得到的容积加权平均值。

采用 SPSS16.0 软件对数据进行统计分析。由于本实验设计为具有一个重复测量的单因素 4 水平设计,因而采用具有一个重复测量的方差分析法。由于采用上述分析方法未能通过其中的球形检验,表明酸处理下不同时间段取得的水样在时间上的关联性不强。因而可用单因素方差分析法进行数据分析,并用最小显著差异法比较不同酸处理间的差异,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。用 Pearson 相关系数研究各化学指标之间的相关关系。作图采用 Sigmaplot10.0 完成。

2 结果与分析

2.1 地表径流 pH 的动态变化

本研究结果显示,10、11 月份不同梯度酸处理下地表径流 pH 值分别介于 6.18—7.29、6.93—7.75,各酸

处理间无显著性差异 ($P>0.05$)。1—3 月份各种酸处理下地表径流 pH 值变化趋势一致,均随着酸处理梯度增强呈现“U”型变化模式,即 CK 与 pH 3.0 处理下的 pH 值高于其它酸处理,且在 1 月份 CK 处理下的 pH 显著高于 pH 4.0、pH 3.5 处理而其与 pH 3.0 处理差异不显著。整个旱季(10—3 月)不同酸处理下地表径流 pH 介于 6.14—7.75,属于微酸性至中性。不同酸处理下地表径流 pH 虽无显著性差异,但是具有随着酸处理强度增强而呈“U”型变化模式(图 1)。

2.2 地表径流酸根离子 (NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^-) 的动态变化

就单次取样看来(表 1),各月份 pH 3.0 处理下地表径流 NO_3^- 浓度均显著高于 CK(1 月份除外),其中最明显的出现在 11 月份, pH 3.0 处理下 NO_3^- 浓度是 CK 的 4.88 倍,酸处理间差异大可能与不同梯度酸处理下地表径流量大小以及不同梯度酸处理加入的 NO_3^- 量不同有关。但是就整个旱季看来, NO_3^- 浓度在不同酸处理下的大小关系为: pH 3.5 > pH 3.0 > CK > pH 4.0, 不同酸处理间差异不显著。对 NO_3^- 浓度与 pH 之间的相关性分析发现,二者呈极显著的负相关关系 ($r = -0.432$, $P < 0.01$, $N = 60$),表明 NO_3^- 有助于促进地表水的酸化。

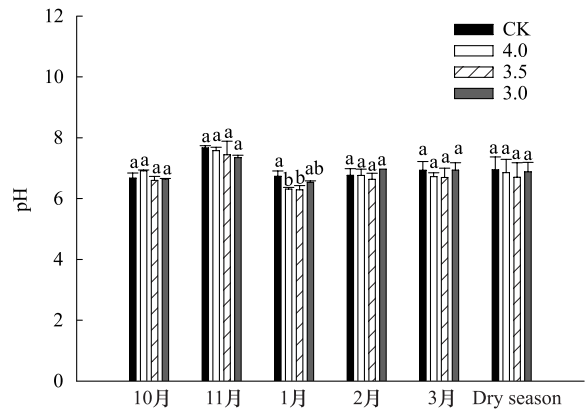


图 1 旱季不同梯度酸处理下地表径流 pH 动态变化(平均值±标准偏差)

Fig.1 The dynamic of surface water pH under different acid treatments in dry season (mean±SD)

同一月份不同字母表示不同酸处理间的差异显著 ($P < 0.05$), CK: 对照

表 1 旱季不同酸处理下地表径流酸根离子动态变化(平均值±标准偏差)*

Table1 The dynamics of acid ions concentrations under different acid treatments in dry season (mean±SD)*

测试项目 Measure items	处理 Treatment	10 月 October	11 月 November	1 月 January	2 月 February	3 月 March	整个旱季 Dry Season
NO_3^- /(mg/L)	对照 CK	3.33±0.15a	2.24±0.53a	32.76±13.27a	27.84±5.01a	5.25±1.72a	6.08±8.07a
	pH 4.0	5.02±0.96ab	3.50±0.21a	52.87±2.92a	25.65±7.04a	5.93±1.43a	5.78±10.76a
	pH 3.5	5.34±0.56b	15.38±1.09b	42.61±6.55a	31.23±7.98a	7.32±2.38a	6.97±8.50a
	pH 3.0	5.31±0.47b	10.92±0.01c	56.06±18.50a	40.23±4.24b	11.97±0.55b	6.91±10.34a
SO_4^{2-} /(mg/L)	对照 CK	—	—	24.53±1.26a	120.27±6.30a	128.67±9.59a	98.82±50.32a
	pH 4.0	—	—	28.57±2.31a	141.76±18.97a	151.63±20.29a	112.20±60.30a
	pH 3.5	—	—	33.46±8.17a	162.58±8.69b	144.28±42.83a	124.89±64.88a
	pH 3.0	—	—	40.41±7.53a	150.41±21.47a	152.09±27.96a	118.92±59.01a
HCO_3^- /(mg/L)	对照 CK	—	—	—	42.07±1.54b	25.07±10.21a	25.56±10.93a
	pH 4.0	—	—	—	31.68±5.04ab	18.86±3.01a	19.21±8.13a
	pH 3.5	—	—	—	29.12±6.96a	24.53±11.25a	24.79±8.70a
	pH 3.0	—	—	—	43.93±3.11b	32.68±5.67a	33.45±6.63a

* — 表示在该月份未进行该指标的测定; 同列不同字母表示不同酸处理间差异显著 ($P < 0.05$)

由表 1 可知,1 月份地表径流 SO_4^{2-} 的浓度随酸处理强度增强而增加,CK、pH 4.0 与 pH 3.5 处理下 SO_4^{2-} 浓度比 pH 3.0 处理减少 39%、29%、17%。2、3 月份 pH 3.0 处理地表径流 SO_4^{2-} 分别是 CK 的 1.25、1.18 倍,但是由于地表水中 SO_4^{2-} 变异性大,二者间差异不显著。从整个旱季来看,随着处理酸度增强,地表径流 SO_4^{2-} 的浓度呈略微的增加趋势, pH 3.0、pH 3.5、pH 4.0 分别比 CK 的浓度高 23.42、0.47、7.82mg/L。对 SO_4^{2-} 与 pH 之间的相关性分析发现,两者呈极显著的正相关关系,表明 SO_4^{2-} 有利于缓解地表水的酸化 ($r = 0.536$, $P < 0.01$, $N = 36$)。

HCO_3^- 离子浓度在不同梯度酸处理下的变化特征与整个旱季地表径流 pH 的变化模式相似。这种现象在

初次测试中表现的尤为明显(表1),对这2次取样下 pH 与 HCO_3^- 的相关性进行分析发现,两者呈极显著的正相关关系($r=0.524, P<0.01, N=24$),表明 HCO_3^- 有利于缓解地表水的酸化,而且在强酸(pH 3.0)处理下这种缓解能力更强。

由此可见,上述3种酸根离子均对地表水的 pH 有一定的影响,按相关程度的大小分别为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ 。 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 有利于提高地表水抗酸化能力,而 NO_3^- 则有助于促进地表水的酸化。

2.3 地表径流盐基离子(K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+})的动态变化

2.3.1 地表径流 K^+ 、 Na^+ 的动态变化

K^+ 作为移动性较强的离子,其在不同月份不同梯度酸处理下的变化无固有模式。10、1、3 月份不同酸处理下地表径流 K^+ 浓度无显著性差异。但是 11 月份 pH 3.0 处理下地表径流 K^+ 浓度(8.66 mg/L)显著高于其它各种酸处理,分别是 CK、pH 4.0、pH 3.5 处理的 2.28、2.28、2.51 倍。2 月份 K^+ 浓度在 pH 4.0 处理下显著高于 pH 3.5 与 pH 3.0 处理。从旱季期间的 5 次采样来看,不同酸处理下地表径流 K^+ 浓度无显著性差异(图 2)。

由图 2 可知,10、11 月份地表径流 Na^+ 浓度随酸处理强度增强而逐渐增加,且 pH 3.0 处理显著高于 CK。1、3 月份不同酸处理下 Na^+ 浓度虽无显著性差异,但是均表现为 pH 3.0 处理高于 CK。2 月份 Na^+ 浓度表现为 pH 3.0 处理显著高于 pH 3.5 处理。从旱季 5 次采样来看,地表径流 Na^+ 浓度在不同强度酸处理下的大小关系表现为:pH 3.0>pH 3.5>pH 4.0>CK, pH 3.0 处理下地表径流 Na^+ 浓度显著高于 CK、pH 4.0 酸处理,表明一定强度的酸处理将导致土壤 Na^+ 的流失。

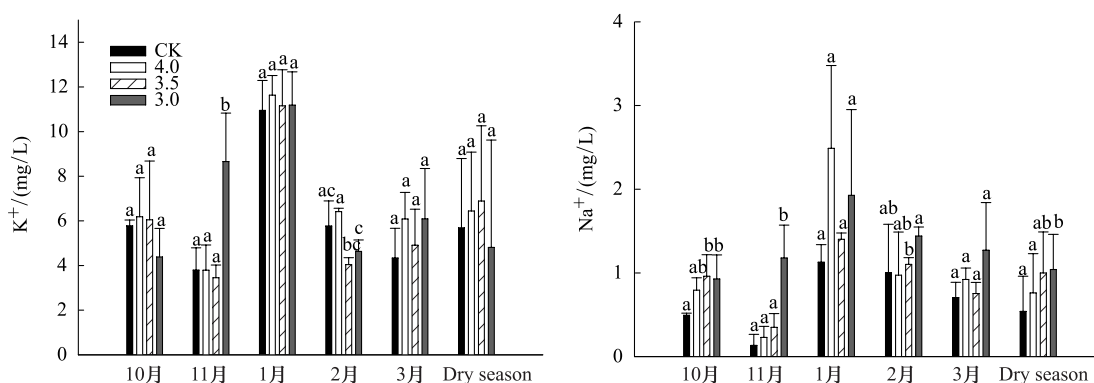


图 2 旱季不同梯度酸处理下地表径流 K^+ 、 Na^+ 浓度动态变化(平均值 $\pm$ 标准偏差)

Fig. 2 The dynamics of K^+ and Na^+ concentrations in surface water under different acid treatments in dry season (mean $\pm$ SD)

2.3.2 地表径流 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的动态变化

从图 3 可知,10、11 月份 pH 3.0 处理下地表径流 Ca^{2+} 浓度显著高于 CK 处理,分别高出 43%、75%。1—3 月份 pH 3.0 处理下 Ca^{2+} 浓度与 CK 虽无显著性差异,但均表现为 pH 3.0 处理下 Ca^{2+} 浓度高于 CK 处理,分别高出 1.16、5.85、4.60 mg/L。从整个旱季来看,pH 3.0 处理将导致土壤中 Ca^{2+} 的流失,这也可以为 pH 3.0 处理下地表径流 pH 偏高提供佐证,因为喷酸加入的 H^+ 代换出土壤中的 Ca^{2+} ,从而缓解了地表水体的酸化,从 pH 3.0 处理下这 5 次取样 Ca^{2+} 与 pH 的相关分析发现,两者呈极显著的正相关关系($r=0.673, P<0.01, N=15$)。

10、11 月份随着酸处理梯度增强地表径流中 Mg^{2+} 浓度也随之增加,且 pH 3.0 处理下 Mg^{2+} 浓度显著高于其它酸处理。1—3 月份不同酸处理下 Mg^{2+} 均无显著性差异。从这 5 次采样来看,不同酸处理下地表径流 Mg^{2+} 浓度虽无显著性差异,但是 pH 3.0 处理下的浓度略高于其它酸处理(图 3)。

总而言之,从整个旱季采样看来, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 这 4 种离子对酸沉降的响应有所不同。其中二价 Ca^{2+} 对酸沉降响应最为敏感, Mg^{2+} 、 Na^+ 浓度均表现为随酸处理增强而升高, K^+ 则受模拟酸雨强度的影响小。

强酸(pH 3.0)处理下地表径流 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度提高,这表明一定强度酸处理促进土壤中矿质养分的流失,但与此同时这些离子的释放也缓解了地表水的酸化。

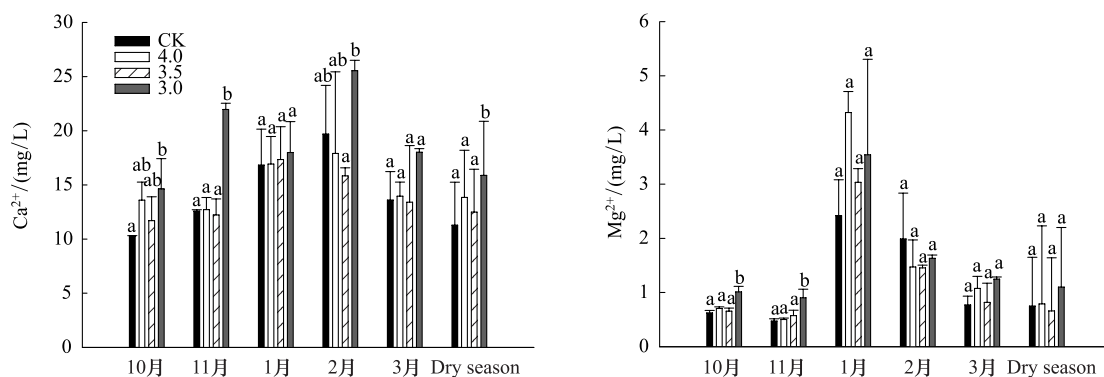


图3 旱季不同梯度酸处理下地表径流 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 浓度动态变化(平均值 $\pm$ 标准偏差)

Fig. 3 The dynamics of Ca^{2+} and Mg^{2+} concentrations in surface water under different acid treatments in dry season (mean $\pm$ SD)

2.4 地表径流中 DOC 的动态变化

由图4可知,10、11、1、3月份各酸处理地表径流 DOC 浓度表现为 pH 3.0 处理高于 CK,呈现随酸处理强度增强而增加的趋势。尤其是10月份采样发现随着酸处理梯度增加其 DOC 浓度分别为 37.48, 49.98, 51.10, 53.81 mg/L,其中 pH 3.0 处理显著高于 CK。2月份地表径流 DOC 的变化规律表现为 pH 4.0 与 pH 3.5 处理地表径流 DOC 浓度显著高于其它2种处理,这可能是由于 pH 4.0、pH 3.5 处理下个别样方锥栗多,冬季凋落叶多,而凋落物作为 DOC 的一个重要来源,其作用可能掩盖酸处理对 DOC 的影响,这可以通过标准差的大小反应。从整个旱季来看,酸处理强度增强可能导致土壤 DOC 的流失。

3 讨论

3.1 酸沉降对地表径流 pH 的影响

就整个旱季而言,不同强度酸处理尚未引起地表径流 pH 显著变化。Schindler^[18]对长期受酸沉降(大气降雨 pH 介于 4.0—5.0)影响的安大略湖的研究也发现,15年间湖水 pH 未下降。宋玉芝等^[4]对太湖沿岸湿沉降的研究也发现,虽然近20年来太湖酸雨频率及酸雨强度有增强趋势,水体也有轻微酸化迹象,但是水体 pH 变化不大。Kernan 等^[24]认为地表水酸化不仅取决于降水和水体本身的物理化学性质,而且还与集水区土壤缓冲酸沉降能力、基岩矿物的风化能力以及植被覆盖类型有关。土壤的缓冲能力在很大程度上决定了地表水体对酸化的敏感性,南方的赤红壤、红壤均属于对酸化中等敏感土壤,流经这些土壤的地表水对酸化并不很敏感,地表水发生酸化的可能性不大^[25]。

3.2 酸沉降对地表径流酸根离子的影响

5次取样 pH 3.0 处理下 NO_3^- 浓度均显著高于 CK,即便第3次取样各酸处理下 NO_3^- 浓度无显著差异,但也呈现出 pH 3.0 处理高于 CK。pH 3.0 处理下 NO_3^- 浓度显著高于 CK 的原因可能来自以下2方面:(1)pH 3.0 处理喷洒 NO_3^- 的量多于 CK,且本研究样地属于 N 饱和森林生态系统,对于外加 N 源的响应敏感^[26], NO_3^- 移动性强,雨水的淋洗导致其快速流失,系统对其截留能力弱。(2)5次取样皆在旱季进行,正处于植物

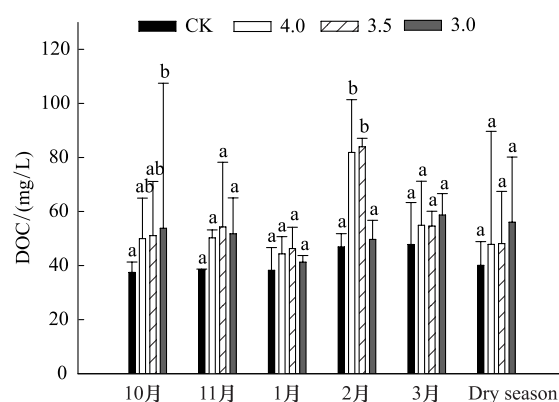


图4 旱季不同梯度酸处理下地表径流 DOC 浓度动态变化(平均值 $\pm$ 标准偏差)

Fig. 4 The dynamic of dissolved organic carbon concentration in surface water under different acid treatments in dry season (mean $\pm$ SD)

的非生长季(10—3月),植物对N的同化量少。因而旱季可能更突显酸处理效应。

一般认为,南方赤红壤铁铝氧化物含量高,对酸沉降带来的 SO_4^{2-} 具有很强的专性吸附能力^[10,27]。为了维持电荷平衡土壤在吸附 SO_4^{2-} 时向土壤水溶液中释放 OH^- ,缓解水体的酸化,土壤水溶液中 SO_4^{2-} 与pH呈负相关关系^[27]。但在本研究中,地表径流 SO_4^{2-} 与pH呈极显著的正相关关系,与前人研究结果相悖,其原因有待进一步研究。

本研究中 HCO_3^- 与地表径流pH呈极显著的正相关关系,表明其有助于缓解地表径流的酸化。通过对仅有的2次取样的相关性分析发现,pH 3.0处理下 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 的相关性虽未达到显著水平,但是其相关系数高达0.763($P=0.07, N=6$),这更从另一个角度证明,pH 3.0的酸处理效应已经促使碳酸盐风化,从而增加地表径流中 HCO_3^- 含量,提高水体抗酸化能力。但是CK处理下 HCO_3^- 含量也较高,这可能是由于CK处理下土壤的pH较高,促进土壤呼吸,使更多的 CO_2 进入土壤溶液中从而增加了地表水中 HCO_3^- 的含量,而且对CK处理下 HCO_3^- 与 Ca^{2+} 的相关性研究发现,二者的相关性很弱($r=0.24, P=0.33, N=6$),这表明地表径流 HCO_3^- 在pH 3.0处理与CK处理下的生成机制不同。前者主要通过促进碳酸盐矿物分解来提高地表径流中 HCO_3^- 的含量,后者则是由于土壤pH高,促进土壤呼吸^[28],从而增加地表径流中 HCO_3^- 的浓度^[29]。有研究发现,土壤 CO_2 分压升高后改变了土壤中 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ 的平衡,使得土壤溶液中产生更多游离的 HCO_3^- ^[17,30]。

3.3 酸沉降对地表径流盐基离子的影响

不同梯度酸处理地表径流pH变化不明显,可能与土壤对酸的缓冲能力有关。王云飞等^[31]将地表水酸化过程分为早期酸化阶段、酸化显露阶段以及酸化阶段。在水体处于早期酸化阶段,酸沉降带入的 H^+ 可以通过土壤盐基离子释放得以缓解。俞元春等^[8]的酸雨淋洗实验发现,pH 2.5、pH 3.5的酸雨在刚开始淋洗土样时,淋出液pH均高于原来淋洗液的pH,认为在低pH时土壤可以通过释放交换性盐基离子来缓解酸性。在本研究中,pH 3.0处理的地表径流pH几乎与CK接近(分别为6.64、6.67),但高于pH 4.0、pH 3.5处理。地表径流pH随酸处理强度增强呈“U”型变化模式,可能与一定强度酸处理促进土壤阳离子交换、矿物分化有关。刘滔等^[12]对本研究样地酸处理1年后土壤盐基离子含量的测定发现,CK处理土壤提取液中 K^+ 、 Ca^{2+} 的含量显著高于其它酸处理,不同酸处理下 Na^+ 、 Mg^{2+} 的含量虽无显著性差异,但是大体表现为CK、pH 3.0处理下的略高于pH 3.5、pH 4.0处理。在自然生态系统,土壤的化学风化是缓冲酸沉降的重要机制。廖柏寒等^[32]将土壤对酸沉降的缓冲体系划分为初级缓冲体系和次级缓冲体系。初级缓冲体系为反应较为迅速的阳离子交换过程。次级缓冲体系是指缓冲能力大但是反应过程相对较慢的矿物风化过程。酸沉降在 $\text{pH}>4.0$ 时主要是阳离子交换反应^[33], $\text{pH}<3.5-4.0$ 以矿物风化占主导^[33-34]。对应本研究不难发现,pH 3.0处理已使土壤启用次级缓冲体系来缓解外源质子加入。

本研究中pH 3.0处理下地表径流 Ca^{2+} 浓度显著提高,这与前人对酸沉降下湖泊、江河 Ca^{2+} 浓度增加所得结果一致^[3,18],表明盐基离子中 Ca^{2+} 对酸沉降的响应敏感,其在质子缓冲过程中起着重要作用。刘俐等^[20]通过模拟酸雨淋溶研究红壤盐基离子释放过程发现,盐基离子对酸的敏感性的大小顺序为: $\text{Ca}^{2+}>\text{Mg}^{2+}>\text{K}^+>\text{Na}^+$,二价阳离子对酸的敏感性强于一价阳离子。本研究也发现除二价 Ca^{2+} 外,二价 Mg^{2+} 虽然在不同酸处理下无显著性差异但是随着酸处理强度增强其浓度也增加。 Na^+ 、 K^+ 均属于一价阳离子但是在本研究中 Na^+ 比 K^+ 对酸沉降的响应更为敏感。

3.4 酸沉降对地表径流DOC的影响

早期对地表径流中DOC的研究主要将其作为水质优劣的一个评价指标,用来评判水中有机污染程度^[1,13]。但是随着全球碳平衡问题研究的深入,DOC作为碳循环的一个重要分支也逐渐引起了关注。DOC不仅对区域微环境变化极为敏感,而且DOC随地表水的流失是森林土壤有机碳流失的重要途径^[35]。从整个旱季看来,不同酸处理下地表径流DOC浓度虽无显著差异,但是随着酸处理强度增强其浓度呈逐渐增加趋势,pH 3.0处理下地表径流DOC浓度分别是CK、pH 4.0、pH 3.5处理下的1.40、1.17、1.64倍。出现这种现象可能来自以下几个方面:(1)pH 3.0处理降低土壤pH,影响微生物活性,从而减弱了微生物对DOC的分

解^[36]。(2)酸化作用可能使 SO_4^{2-} 与 DOC 竞争土壤吸附位点,由前文提到的不同酸处理下地表径流 SO_4^{2-} 的浓度有随着酸处理梯度增强而增加,这间接表明土壤具有的负电荷吸附位点在 pH 3.0 处理下有所减少,土壤对 SO_4^{2-} 的吸附使土壤吸附位点消耗殆尽,进而无法为 DOC 提供吸附位点,导致 DOC 的流失。(3)土壤中的 Fe/Al 氧化物氢氧化物虽然对 DOC 有很强的吸附能力,但是在酸处理下为了缓冲土壤进一步酸化,Fe/Al 氧化物氢氧化物不断溶解,因而降低了其对 DOC 的吸附,造成 DOC 的流失。Guggenberger 等^[37] 研究发现,土壤淋溶液 DOC 浓度与土壤提取液中 Fe、Al 含量呈极显著的负相关关系。由此可见,酸沉降可能通过影响土壤生物学过程与土壤物理化学过程影响土壤 DOC 的释放。

4 结论

(1)酸沉降对地表水 pH 的影响并不明显,表明酸沉降尚未引起鼎湖山季风常绿阔叶林地表径流的酸化。

(2) SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 NO_3^- 离子均对地表水的 pH 有一定的影响,按相关程度的大小分别为 $\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ 。其中 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 有利于提高地表水的抗酸化能力,而 NO_3^- 则有助于促进地表水酸化。

(3)从整个旱季采样看来, K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 这 4 种离子对酸沉降的响应存在差异。 Ca^{2+} 对酸沉降响应最为敏感,其次为 Na^+ 、 Mg^{2+} , 而 K^+ 则对酸沉降不敏感。酸沉降虽然导致土壤 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 矿质养分的流失,但是这些养分元素的释放也有助于缓解地表水的酸化。

(4)酸沉降可能导致土壤 DOC 的流失,增加地表水受有机污染的风险。

(5)酸沉降虽然对地表水 pH 的影响并不明显,但是较强的酸沉降(pH 3.0 处理)已经导致地表水中 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、DOC 浓度的增加,打破原有水体的物质平衡。

References:

- [1] Wen D Z, Zhou G Y, Kong G H, Yu M D. A status report on the effects involved with acid rain on plants, soils and surface waters of three selected terrestrial ecosystems in lower subtropical China. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 11-18.
- [2] Liu J X, Zhang D Q, Zhou G Y, Wen D Z, Zhang Q M. A preliminary study on the chemical properties of precipitation, throughfall, stemflow and surface runoff in major forest types at Dinghushan under acid deposition. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(8): 1223-1228.
- [3] Duan L, Ma X, Larssen T, Mulder J, Hao J. Response of surface water acidification in upper Yangtze River to SO_2 emissions abatement in China. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(8): 3275-3281.
- [4] Song Y Z, Qin B Q, Yang L Y, Hu W P, Luo L C. The chemical characteristics of wet deposition and preliminary analysis of surface water acidification along the coastal area of Taihu Lake. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(5): 593-600.
- [5] Wang W X, Xu P J. Research progress in precipitation chemistry in China. *Progress in Chemistry*, 2009, 21(2/3): 265-281.
- [6] Johnson N M, Driscoll C T, Eaton J S, Likens G E, McDowell W H. 'Acid rain', dissolved aluminum and chemical weathering at the Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(9): 1421-1437.
- [7] Likens GE, Driscoll CT, Buso DC. Long-term effects of acid rain: response and recovery of a forest ecosystem. *Science*, 1996, 272(5259): 244-246.
- [8] Yu Y C, Ding A F, Hu J, Meng L. Effects of simulated acid rain on soil acidification and base ions transplant. *Journal of Nanjing Forestry University*, 2001, 25(2): 39-42.
- [9] Xue N, Seip HM, Guo J, Liao B, Zeng Q. Distribution of Al-, Fe- and Mn-pools and their correlation in soils from two acid deposition samll catchments in Hunan, China. *Chemosphere*, 2006, 65(11): 2468-2476.
- [10] Yang Z F, Yu T, Tang J R, Zhu C J, Zong S F, Zhang J, Zhang J X, Shen Z J. A study of the characteritics and mechanisms of soil acidification in the Dongting Lake region in Hunan Province, South China. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(1): 105-112.
- [11] Jin Q, Jiang H, Yu S Q, Jin J, Wang Y H. Research on the growth and photosynthesis of typical seedlings in subtropical regions under acid rain stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3322-3327.
- [12] Liu T, Yin G C, Liu J X, Liang G H, Wu J P. Impact of acid deposition on the main nutrients of subtropical forest soil. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2013, 19(2): 255-261
- [13] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, Huang M H. Analysis on runoff water quality in Dinghushan Biosphere Reserve. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [14] Xing X, Ji H B. Hydro-chemistry characteristics and sulfur isotope variation of the water in the water source area of northern Beijing. *Environmental*

Chemistry, 2012, 31(6): 803-813.

- [15] Ye X M, Hao J M, Duan L, Zhou Z P. Acid-deposition critical loads for 80 surface waters in southern China. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2001, 41(12): 89-91.
- [16] Stoddard J, Jeffrey S, Frank A. Response of surface water chemistry to the Clean Air act Amendments of 1990. United States Environmental Protection Agency, 2003, 1-8.
- [17] Reuss J O, Cosby B J, Wright R F. Chemical processes governing soil and water acidification. *Nature*, 1987, 329(27/32): 27-32.
- [18] Schindler D. Effects of acid rain on freshwater ecosystems. *Science*, 1988, 239(4836): 149-157.
- [19] Zhu S J, Wang X M, Long X J, Dong H Y, Huang Z L, Chen Y J. Characteristics of inorganic chemistry components in rainfall of the Dinghu Mountain. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2011, 50(5): 135-141.
- [20] Liu L, Zhou Y Y, Song C Y, Li F S. Release of basic cations in red soil under simulated acid rain and buffering mechanism. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2): 49-55.
- [21] Hang Z L, Kong G H, Wei P. Plant species diversity dynamics in Dinghu Mountain forests. *Chinese Biodiversity*, 1998, 21(2): 116-121.
- [24] Kernan M R, Allott T H E, Battarbee R W. Predicting Freshwater Critical Loads of Acidification at the Catchment Scale: An Empirical Model. *Water, Air, & Soil Pollution*, 1998, 105(1/2): 31-41.
- [25] Ye X M, Hao J M, Duan L, Zhou Z P. Mapping sensitivity of surface waters to acidification in China. *Environmental Science*, 2002, 23(1): 16-21.
- [26] Mo J M, Fang Y T, Lin E D, Li Y E. Soil N₂O emission and its response to simulated N deposition in the main forests of Dinghushan in subtropical China. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(6): 901-910.
- [27] Wang D Z, Jiang X, Bian Y R, Xu R K, He J Z. The factors of influence accelerating soil acidification under acidic deposition. *Soil and Environmental Sciences*, 2002, 11(2): 152-157.
- [28] Zhang Y, Wang L X, Chen S T, Hu Z H, Shen X S, Shi Y S. Effects of simulated acid rain on soil respiration in a northern subtropical secondary forest. *China Environmental Science*, 2011, 31(9): 1541-1547.
- [29] Cao J H, Yuan D X, Pan G X, Jiang G H. Influence of soil carbon transfer under different vegetations on carbon cycle of karst dynamics system. *Earth and Environment*, 2004, 32(1): 90-96.
- [30] Liu L C, Zheng F D, Zhang C Y. Characteristics of water quality of South-to-North water diversion mixed with groundwater in Beijing. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2012, 39(1): 1-7.
- [31] Wang Y F, Zhu Y X, Yin Y, Pan H X. Research progress in surface water acidification and study on environmental information from lake acidification. *Advance in Earth Sciences*, 2001, 16(3): 421-425.
- [32] Liao B H, Dai S H. Soil buffering capacity to acid precipitation and weathering characteristics of soil minerals. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1991, 11(4): 425-431.
- [33] Lin G Z, Ding R. A study on buffering power of the forest soil for acidic precipitation in some regions of China. *Acta Ecologica Sinica*, 1988, 8(3): 226-232.
- [34] Qiu R L, Zhang Y N, Mo D L. Sensitivity of soil to acid deposition in South China VI. Soil solid components and acid buffering capacity. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1998, 18(5): 517-521.
- [35] Wang Q K, Wang S L, Feng Z W, Huang Y. Active soil organic matter and its relationship with soil quality. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(3): 513-519.
- [36] Simard R R, Evans L J, Bates T E. The effects of additions of CaCO₃ and P on the soil solution chemistry of a podzolic soil. *Canadian Journal of Soil Science*, 1988, 68(1): 41-52.
- [37] Guggenberger G, Zech W. Dissolved organic carbon control in acid forest soils of the Fichtelgebirge (Germany) as revealed by distribution patterns and structural composition analyses. *Geoderma*, 1993, 59(1/4): 109-129.

参考文献:

- [1] 温达志, 周国逸, 孔国辉, 郁梦德. 南亚热带酸雨地区陆地生态系统植被、土壤与地表水现状的研究. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 11-18.
- [2] 刘菊秀, 张德强, 周国逸, 温达志, 张倩媚. 鼎湖山酸沉降背景下主要森林类型水化学特征初步研究. *应用生态学报*, 2003, 14(8): 1223-1228.
- [4] 宋玉芝, 秦伯强, 杨龙元, 胡维平, 罗淑葱. 太湖沿岸湿沉降的化学特性及水体酸化的趋势. *南京气象学院学报*, 2005, 28(5): 593-600.
- [5] 王文兴, 许鹏举. 中国大气降水化学研究进展. *化学进展*, 2009, 21(2/3): 265-281.

- [8] 俞元春, 丁爱芳, 胡笳, 孟磊. 模拟酸雨对土壤酸化和盐基迁移的影响. 南京林业大学学报(自然科学版), 2001, 25(2): 39-42.
- [10] 杨忠芳, 余涛, 唐金荣, 朱翠娟, 宗思锋, 张娇, 张建新, 申志军. 湖南洞庭湖地区土壤酸化特征及机理研究. 地学前缘, 2006, 13(1): 105-112.
- [11] 金清, 江洪, 余树全, 金静, 王艳红. 酸雨胁迫对亚热带典型植物幼苗生长与光合作用的影响. 生态学报, 2009, 29(6): 3322-3327.
- [13] 欧阳学军, 周国逸, 黄忠良, 黄梦虹. 鼎湖山森林地表水水质状况分析. 生态学报, 2002, 22(9): 1373-1379.
- [14] 邢鑫, 季宏兵. 北京北部水源地水化学特征及硫同位素变化. 环境化学, 2012, 31(6): 803-813.
- [15] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 周中平. 中国南方 80 个地表水体的酸沉降临界负荷计算. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12): 89-91.
- [19] 朱圣洁, 王雪梅, 龙晓娟, 董汉英, 黄忠良, 陈银洁. 鼎湖山降水无机化学成分变化特征. 中山大学学报(自然科学版), 2001, 50(5): 135-141.
- [20] 刘俐, 周友亚, 宋存义, 李发生. 模拟酸雨淋溶下红壤中盐基离子释放及缓冲机制研究. 环境科学研究, 2008, 21(2): 49-55.
- [21] 黄忠良, 孔国辉, 魏平. 鼎湖山植物物种多样性动态. 生物多样性, 1998, 6(2): 116-121.
- [22] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学[M]. 北京: 科学出版社, 1996, 57-71.
- [23] 谢贤群, 王立军. 水环境要素观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [25] 叶雪梅, 郝吉明, 段雷, 周中平. 中国地表水酸化敏感性的区划. 环境科学, 2002, 23(1): 16-21.
- [26] 莫江明, 方运霆, 林而达, 李玉娥. 鼎湖山主要森林土壤 N_2O 排放及其对模拟 N 沉降的响应. 植物生态学报, 2006, 30(6): 901-910.
- [27] 王代长, 蒋新, 卞永荣, 徐仁扣, 贺纪正. 酸沉降下加速土壤酸化的影响因素. 土壤与环境, 2002, 11(2): 152-157.
- [28] 张勇, 王连喜, 陈书涛, 胡正华, 沈小帅, 史艳姝. 模拟酸雨对北亚热带天然次生林土壤呼吸的影响. 中国环境科学, 2011, 31(9): 1541-1547.
- [29] 曹建华, 袁道先, 潘根兴, 姜光辉. 不同植被下土壤碳转移对岩溶动力系统中碳循环的影响. 地球与环境, 2004, 32(1): 90-96.
- [30] 刘立才, 郑凡东, 张春义. 南水北调水源与北京地下水混合的水质变化特征. 水文地质工程地质, 2012, 39(1): 1-7.
- [31] 王云飞, 朱育新, 尹宇, 潘红玺. 地表水酸化的研究进展及其湖泊酸化的环境信息研究. 地球科学进展, 2001, 16(3): 421-425.
- [32] 廖柏寒, 戴昭华. 土壤对酸沉降的缓冲能力与土壤矿物的风化特征. 环境科学学报, 1991, 11(4): 425-431.
- [33] 林国珍, 丁茹. 中国若干地区森林土壤对酸雨缓冲能力的探讨. 生态学报, 1988, 8(3): 226-232.
- [34] 仇荣亮, 张云霓, 莫大伦. 南方土壤酸沉降敏感性研究 VI. 固相组成与酸缓冲性能. 环境科学学报, 1998, 18(5): 517-521.
- [35] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜, 黄宇. 土壤活性有机质及其与土壤质量的关系. 生态学报, 2005, 25(3): 513-519.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 13 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- A review of ecological effects of remnant trees in degraded forest ecosystems after severe disturbances MIAO Ning, LIU Shirong, SHI Zuomin, et al (3889)
- Mechanism and application of bioremediation to heavy metal polluted soil using arbuscular mycorrhizal fungi LUO Qiaoyu, WANG Xiaojuan, LIN Shuangshuang, et al (3898)

Autecology & Fundamentals

- Changes of allometric relationships among leaf traits in different ontogenetic stages of *Acer mono* from different types of forests in Donglingshan of Beijing YAO Jing, LI Ying, WEI Liping, et al (3907)
- The combined effects of increasing CO₂ concentrations and different temperatures on the growth and chlorophyll fluorescence in *Porphyra haitanensis* (Bangiales, Rhodophyta) LIU Lu, DING Liuli, CHEN Weizhou, et al (3916)
- Research on biomass expansion factor of chinese fir forest in Zhejiang Province based on LULUCF greenhouse gas Inventory ZHU Tangjun, SHEN Chuchu, JI Biyong, et al (3925)
- Influence of soil gradual drought stress on *Acorus calamus* growth and photosynthetic fluorescence characteristics WANG Wenlin, WAN Yinjing, LIU Bo, et al (3933)
- Isolation, identification, real-time PCR investigation of an endophytic phosphate-solubilizing bacteria from *Caragana korshinskii* Kom. roots ZHANG Lizhen, FENG Lili, MENG Qixia, et al (3941)
- Plant's and soil organism's diversity across a range of *Eucalyptus grandis* plantation ages ZHANG Danju, ZHANG Jian, YANG Wanqin, et al (3947)
- Effects of diet and starvation on growth and survival of *Scapharca broughtonii* larvae WANG Qingzhi, ZHANG Ming, FU Chengdong, et al (3963)
- Multidrug-resistant bacteria in livestock feces QI Shiyue, REN Siwei, LI Xueling, et al (3970)
- Physiological regulation related to the decline of *Alexandrium catenella* MA Jinhua, MENG Xi, ZHANG Shu, et al (3978)
- Numerical simulation of water quality based on environmental fluid dynamics code for grass-algae lake in Inner Mongolia LI Xing, SHI Hongsen, ZHANG Shuli, et al (3987)

Population, Community and Ecosystem

- Influence of enclosure on *Glycyrrhiza uralensis* community and distribution pattern in arid and semi-arid areas LI Xuebin, CHEN Lin, LI Guoqi, et al (3995)
- The interannual variation of net primary productivity of three coniferous forests in Liupan Mountains of Ningxia and its responses to climatic factors WANG Yunni, XIONG Wei, WANG Yanhui, et al (4002)
- Soil water use and balance characteristics in mature forest land profile of *Caragana korshinskii* in Semiarid Loess Area MO Baoru, CAI Guojun, YANG Lei, LU Juan, et al (4011)
- Effect of simulated acid deposition on chemistry of surface runoff in monsoon evergreen broad-leaved forest in Dinghushan QIU Qingyan, CHEN Xiaomei, LIANG Guohua, et al (4021)
- A space optimization model of water resource conservation forest in Dongting Lake based on improved PSO LI Jianjun, ZHANG Huiru, LIU Shuai, et al (4031)
- Allelopathic effects of aqueous extract of exotic plant *Rhus typhina* L. on soil micro-ecosystem HOU Yuping, LIU Lin, WANG Xin, et al (4041)
- The impact of natural succession process on waterbird community in a abandoned fishpond at Chongming Dongtan, China YANG Xiaoting, NIU Junying, LUO Zukui, et al (4050)
- Mercury contents in fish and its biomagnification in the food web in Three Gorges Reservoir after 175m impoundment YU Yang, WANG Yuchun, ZHOU Huaidong, et al (4059)

- Microsatellite analysis on genetic diversity of common carp, *Cyprinus carpio*, populations in Yuan River
 YUE Xingjian, ZOU Yuanchao, WANG Yongming, et al (4068)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Research on spatio-temporal change of temperature in the Northwest Arid Area HUANG Rui, XU Ligang, LIU Junmin (4078)
- Simulation of soil respiration in forests at the catchment scale in the eastern part of northeast China
 GUO Lijuan, GUO Qingxi (4090)
- The early effects of nitrogen addition on CH₄ uptake in an alpine meadow soil on the Eastern Qinghai-Tibetan Plateau
 ZHANG Peilei, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (4101)
- Analysis of water ecological footprint in Guangxi based on ecosystem services ZHANG Yi, ZHANG Heping (4111)
- The integrated recognition of the source area of the urban ecological security pattern in Shenzhen
 WU Jiansheng, ZHANG Liqing, PENG Jian et al (4125)
- Carbon sources and storage sinks in scenic tourist areas: a Mount Lushan case study
 ZHOU Nianxing, HUANG Zhenfang, LIANG Yanyan (4134)
- Impacts of climate change on dominant pasture growing season in Central Inner Mongolia
 LI Xiazi, HAN Guodong, GUO Chunyan (4146)
- Phenological Characteristics of Typical Herbaceous Plants (*Lris lacteal*) and Its Response to Climate Change in Minqin Desert
 HAN Fugui, XU Xianying, WANG Lide, et al (4156)
- Biomass and distribution pattern of carbon storage in *Eomecon chionantha* Hance
 TIAN Dalun, YAN Wende, LIANG Xiaocui, et al (4165)
- Temporal dynamics and influencing factors of fine roots in five Chinese temperate forest ecosystems
 LI Xiangfei, WANG Chuankuan, QUAN Xiankui (4172)

Resource and Industrial Ecology

- Effects of AMF on soil improvement and maize growth in mining area under drought stress
 LI Shaopeng, BI Yinli, CHEN Peizhen, et al (4181)

Urban, Rural and Social Ecology

- Health function evaluation and exploring its mechanisms in the Shanghai Green Belt, China
 ZHANG Kaixuan, ZHANG Jianhua (4189)

Research Notes

- Time lag effects of rainfall inside a *Platycladus Orientalis* plantation forest in the Beijing Mountain Area, China
 SHI Yu, YU Xinxiao, ZHANG Jiayin (4199)
- Long-term effects of harvest residue management on soil total carbon and nitrogen concentrations of a replanted Chinese fir
 plantation HU Zhenhong, HE Zongming, FAN Shaohui, et al (4205)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 彭少麟

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 13 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 13 (July, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元