

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫脲对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入

孙素琪¹, 王玉杰^{1*}, 王云琦¹, 张会兰¹, 于雷¹, 刘婕^{1,2}

(1. 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京良乡蓝鑫水利工程设计所, 北京 102488)

摘要: 选取重庆缙云山的常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林为研究对象, 于 2012 年 5~10 月对大气降水、穿透雨和树干径流等降水过程及其氮素输入进行研究. 结果表明: ①研究期间总降雨量 564.88 mm, 常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的穿透雨量占总降雨量的比例分别为 74.0%、85.0% 和 71.6%, 且树干径流量所占比例分别为 1.9%、10.3% 和 1.6%; 3 种林分的穿透雨量、树干径流量与林外降雨量之间均呈显著的线性关系 ($P < 0.05$), 且穿透雨率、树干径流率与林外降雨量之间都呈对数关系 ($P < 0.05$). ②与大气降水相比, 穿透雨和树干径流的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度要高, 且 3 种林分的大小关系为针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林; 穿透雨和树干径流的总无机氮输入量 (以 N 计) 分别为针阔混交林 ($18.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、常绿阔叶林 ($14.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和毛竹林 ($15.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). ③3 种林分的无机氮输入量与穿透雨量、树干径流量之间均呈显著的线性关系 ($P < 0.05$).

关键词: 常绿阔叶林; 毛竹林; 针阔混交林; 穿透雨; 树干径流; 氮输入量

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1081-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.03.037

Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain

SUN Su-qi¹, WANG Yu-jie¹, WANG Yun-qi¹, ZHANG Hui-lan¹, YU Lei¹, LIU Jie^{1,2}

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Combating Desertification, Ministry of Education, College of Water and Soil Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Beijing Liangxiang Lanxin Water Resource Engineering Design Institute, Beijing 102488, China)

Abstract: Evergreen broad-leaved forest (EBF), bamboo forest (BF) and mixed conifer and broadleaved forest (MF) were selected as objects of study on Jinyun Mountain from May to October 2012. The main contents were to analyze the rainfall process and nitrogen input of atmospheric rainfall, throughfall and stemflow. The results showed that: ①During the research period, the total precipitation was 564.88 mm, and throughfall of EBF, BF and MF were 74.0%, 85.0% and 71.6% of rainfall, respectively, and stemflow were EBF (1.9%), BF (10.3%) and MF (1.6%), respectively. The relationship between throughfall, stemflow and atmospheric rainfall could be described by a significant linear equation ($P < 0.05$), and both throughfall rate and stemflow rate had an obvious logarithmic function relationship with atmospheric rainfall ($P < 0.05$). ②The concentration of NO_3^- and NH_4^+ of throughfall and stemflow were higher than those of atmospheric rainfall, of which the three typical forests ranked as MF > EBF > BF. The total inorganic nitrogen input of throughfall and stemflow were EBF ($14.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), BF ($15.31 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) and MF ($18.93 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), respectively. ③There was a significant linear relationship between inorganic nitrogen input and throughfall, stemflow for three typical forest stands ($P < 0.05$).

Key words: evergreen broad-leaved forest (EBF); bamboo forest (BF); mixed conifer and broadleaved forest (MF); throughfall; stemflow; nitrogen input

大气降水是森林生态系统水分来源和养分输入的主要形式之一, 降水经过林冠层后会得到重新分配, 并且以穿透雨和树干径流两种途径将养分输入到森林林地, 供森林植被生长所需^[1,2]. 20 世纪 80 年代国内外学者开始针对森林与降水中养分含量之间的相互关系进行重点研究^[3,4], 而且涉及到不同的森林类型^[5~8]. 在森林生态系统中, 氮素是植物生长发育必需的大量元素之一, 其中土壤氮素占整个生态系统氮贮量的 90% 以上, 但是大部分以有机

氮形式存在, 无法被植物直接吸收利用^[9]. 因此, 定量研究降水中的氮素输入是十分必要的. 目前, 中国大气氮素湿沉降量平均值已达 $9.9 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[10], 远远高于美国 [$3.0 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和欧洲 [$6.8 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]^[11], 成

收稿日期: 2013-07-12; 修订日期: 2013-09-12

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104009-03)

作者简介: 孙素琪(1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持, E-mail: 734169641@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: wyujie@bjfu.edu.cn

为继欧美之后的第三大沉降区。氮沉降的不断增大会使森林生态系统产生氮饱和 [超过 $25 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$]^[12], 进而造成氮素淋溶损失, 加速森林土壤酸化, 导致植被营养失衡, 生物多样性改变, 最终导致森林活力下降^[13].

刘文飞等^[14]对福建三明莘口教学林场(年均降水量 1741 mm)的 6 种马尾松阔叶树混交林的研究发现, 随降水输入的氮素总含量仅为 $0.83 \sim 2.45 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; Fang 等^[15,16]2005 年在鼎湖山对马尾松林和马尾松混交林的研究表明, 该地区大气降水 1657 mm , 穿透雨所占比例分别为 79.4% 和 74.2% , 随穿透雨输入的氮含量分别为 $26.80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $22.80 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. Srinivasan 等^[2]在印度南部对柚木人工林的试验表明, 林外降雨 966.6 mm , 穿透雨和树干径流所占比例分别为 75.5% 和 14.9% , 降水过程输入林地的氮素总含量为 $10.75 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; Drápelová^[17]在 Bílý Kříž 长达 2 a 的研究发现, 降水(2008 年降水量 1033 mm , 2009 年降水量 934 mm)输入的氮素平均含量是 $13.05 \text{ kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$. 由此可见, 在不同地区, 降水量的多少对不同森林生态系统的氮素贡献是不同的. 目前国内针对降水中的养分研究多集中于其浓度的变化^[1,8], 对养分输入量的研究较少, 已有的研究多集中在温带和南亚热带^[8,14,18], 而对中亚热带的报道很罕见. 地处中亚热带的重庆市是长江上游经济带核心地区, 全国综合交通枢纽, 工业基础雄厚, 农业发展迅猛. 随着工农业和交通运输业的快速发展, 使得大气中的含氮污染物不断增多, 从而对当地森林生态系统的影响也越来越严重. 因此本试验选取重庆缙云山自然保护区的常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林这 3 种典型林分为研究对象, 对不同林分的降水过程和随降水输入的氮素含量进行分析与探讨, 同时评价不同类型的森林冠层对降水中氮素浓度的影响, 系统地揭示该地区不同林分中随穿透雨和树干径流输入的氮的形态、浓度、数量及其变化规律, 以期进一步了解森林降水过程中氮素

的输入和森林生态系统的氮循环特征奠定基础, 并为探寻本地区森林生态系统氮、水循环之间的耦合影响关系提供参考数据.

1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区位于重庆市西北部的北碚、沙坪坝等区县境内(见图 1), 地理坐标为东经 $106^{\circ}17' \sim 106^{\circ}24'$, 北纬 $29^{\circ}41' \sim 29^{\circ}52'$, 占地面积 76 km^2 , 海拔 $350 \sim 951.5 \text{ m}$, 属典型的亚热带季风湿润性气候. 年平均气温 13.6°C , 年平均相对湿度 87% , 年平均降雨量 1611.8 mm , 干湿季分明, 雨季(4~9 月)降雨量 1243.8 mm , 占全年的 77.2% ; 年平均蒸发量 777.1 mm , 其中 7~8 月是伏旱期, 两个月蒸发量共 255.4 mm , 占全年的 32.8% . 土壤呈酸性(pH 值 $4.0 \sim 4.5$), 主要有黄壤(自然条件下)和水稻土(人为影响下)两大类. 区内植物资源丰富, 植被类型多样, 森林覆盖率达 96.6% .

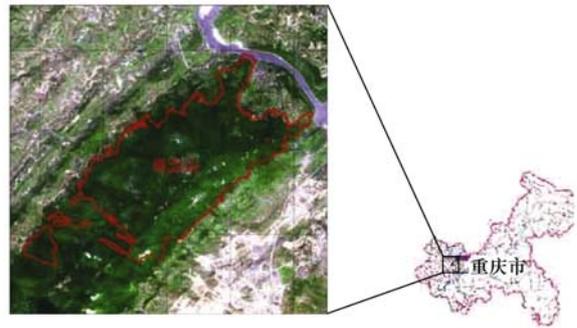


图 1 缙云山位置示意^[19]

Fig. 1 Jinyun Mountain site exhibition in Chongqing, China

2 研究方法

2.1 试验区设置

试验区布设在重庆市缙云山国家级自然保护区, 在保护区内选取海拔相近的具有代表性的 3 种典型林分, 分别是常绿阔叶林(EBF)、毛竹林(BF)和针阔混交林(MF), 在每个林分内选择一块大小为 $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的标准样地, 其基本情况见表 1.

表 1 3 种典型林分样地基本情况

Table 1 Basic information of 3 typical forest stands in Jinyun Mountain

林分类型	立地因子			林分			主要树种
	海拔/m	坡向	坡度/(°)	起源	龄级	郁闭度	
常绿阔叶林	868.4	西北	20	天然	VI	0.90	四川杨桐(<i>Adinandra bockiana</i>)、四川大头茶(<i>Gordonia acuminata</i>)、白毛新木姜子(<i>Neolitsea velutina</i>)
针阔混交林	868.4	西北	18	天然	VI	0.90	四川大头茶、四川杨桐、马尾松(<i>Pinus massoniana</i>)、杉木(<i>Cunninghamia lanceolata</i>)
毛竹林	855.2	西北	21	天然	V	0.85	毛竹(<i>Phyllostachys pubescens</i>)

2.2 样品采集与指标检测

2012 年 5 ~ 10 月分别收集常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的穿透雨和树干径流, 同时在缙云保护站同步收集大气降水. 若降雨量过小则合并多次雨样至测定需要的体积, 并视为一次降雨, 若遇到连续几天降雨, 由于采样不方便也合并为一个样品, 故整个观测期间共收集、记录降水 9 次. 大气降水(林外降雨)采用 APS-2A 型降水降尘自动采集仪进行收集, 穿透雨采用自制穿透雨收集器进行收集^[8,20,21], 树干径流采用“PVC 管蛇形缠绕法”进行收集^[22], 在每个样地分别 S 型布设 8 个穿透雨和树干径流收集器. 每次降雨结束后收集样品, 人工测量总体积后采样 200 mL, 并将样品装入洁净的聚乙烯瓶中, 在 4℃ 冷藏储存, 待测. 整个观测时段正好是植物生长阶段.

样品检测指标有 NO_3^- 和 NH_4^+ , NO_3^- 浓度用离子色谱法测定, NH_4^+ 浓度用纳氏试剂分光光度法测定.

2.3 数据分析

林外降雨量和穿透雨量根据降雨总体积和盛雨器的面积换算成雨量深(mm)^[23], 树干径流量根据以下公式计算^[24]:

$$\text{SF} = \sum_{i=1}^N \frac{C_i \times M_i}{S \times 1000}$$

式中, SF 为树干径流量(mm); N 为树干径级数; C_i 为每一径级的单株树干径流体积(mL); M_i 为每一径级的树木株数; S 为样地面积(m^2).

穿透雨率的计算公式为 $\text{TR} = \frac{\text{TF}}{P_G} \times 100\%$, 树干

径流率计算公式为 $\text{SR} = \frac{\text{SF}}{P_G} \times 100\%$, 式中, TR 为穿透雨率(%), SR 为树干径流率(%), TF 为穿透雨量(mm); P_G 为林外降雨量(mm).

不同形态氮的月输入量根据以下公式计算^[25,26]:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \times P_i}{100}$$

式中, D 为不同形态氮的月输入量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); c_i 为每一次降雨中相应形态氮的浓度($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); P_i 为每一次降雨的降雨量(mm); n 为降雨次数.

采用 Microsoft Office Excel 2007 对数据进行处理及作图, 并利用 SPSS 18.0 软件对试验所得数据进行标准差和回归分析.

3 结果与分析

3.1 森林生态系统的降雨特征

3.1.1 穿透雨

穿透雨是森林土壤水分的主要来源, 受到降雨量、降雨强度、降雨持续时间和林分类型等多种因素的影响^[27]. 国内外很多学者研究表明, 穿透雨和林外降雨之间存在着密切关系. 一般来说降雨量和降雨强度越大, 穿透雨量越大^[8,27,28]. 在本研究中, 整个观测期间共收集 9 次降雨资料, 总降雨量为 564.88 mm. 毛竹林的穿透雨量最大, 占总降雨量的 85.0%, 常绿阔叶林和针阔混交林的穿透雨量相差不多, 分别占总降雨量的 74.0% 和 71.6%. 由图 2 (a) 可知, 3 种林分的穿透雨呈现出与林外降雨相同的变化趋势.

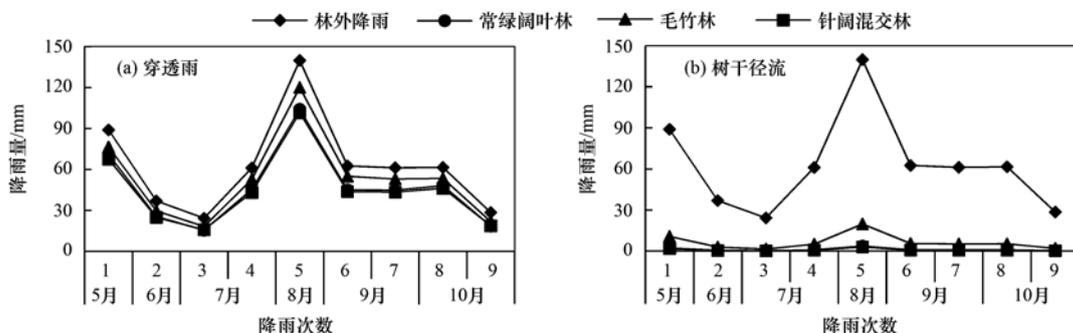


图 2 穿透雨、树干径流与林外降雨的变化规律

Fig. 2 Variation of throughfall, stemflow and atmospheric rainfall

统计分析结果表明, 3 种林分的穿透雨量与林外降雨量呈显著的直线关系($P < 0.05$, 表 2). 令回归方程中的 $\text{TF} = 0$, 通过计算可得, 常绿阔叶林、毛

竹林和针阔混交林产生穿透雨的临界林外降雨量分别是 3.31、2.37 和 3.01 mm. 由此可知, 常绿阔叶林的临界林外降雨量最大, 说明阔叶林的截留效果

好于其它两种林分. 穿透雨率与林外降雨量之间呈显著的对数函数关系 ($P < 0.05$, 表 2), 并随着降雨

量的增大而大幅增大, 但是当达到一定降雨量时, 穿透雨率的增幅减小并开始逐渐趋向稳定.

表 2 3 种典型林分穿透雨率、树干径流率与林外降雨的关系

Table 2 Relationship between throughfall rate, stemflow rate and atmospheric rainfall for 3 typical forest stands

林分类型	拟合方程	参数		R^2	P	拟合方程	参数		R^2	P
		a	b				a	b		
常绿阔叶林	TF = $aP + b$	0.781	-2.585	0.994	0.000	TR% = $a \ln(P) + b$	0.081	0.399	0.671	0.007
	SF = $aP + b$	0.031	-0.735	0.952	0.000	SR% = $a \ln(P) + b$	0.009	-0.019	0.745	0.003
毛竹林	TF = $aP + b$	0.884	-2.094	0.998	0.000	TR% = $a \ln(P) + b$	0.069	0.476	0.717	0.004
	SF = $aP + b$	0.159	-3.507	0.969	0.000	SR% = $a \ln(P) + b$	0.044	-0.086	0.844	0.000
针阔混交林	TF = $aP + b$	0.752	-2.263	0.996	0.000	TR% = $a \ln(P) + b$	0.051	0.429	0.660	0.008
	SF = $aP + b$	0.025	-0.591	0.952	0.000	SR% = $a \ln(P) + b$	0.007	-0.015	0.736	0.003

3.1.2 树干径流

树干径流能将附着在树干上的大量养分淋洗下来, 在植物根部下渗分布, 被根吸收利用, 而且降雨量、降雨强度和降雨频率对树干径流都有直接的影响^[29]. 当降雨条件相同时, 树干径流量的大小主要取决于树冠枝条的疏密度、树种的组成以及树干粗糙度等^[18,30]. 一般情况下, 树干径流量只占降雨量的很少部分, 而且不同树种间的差异比较明显^[31]. 在整个观测期间, 常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的树干径流量明显小于穿透雨量, 占总降雨量的比例分别是 1.9%、10.3% 和 1.6%, 毛竹林的树干径流量最大, 分别是常绿阔叶林和针阔混交林的 5.42 和 6.44 倍, 这与毛竹林郁闭度最小且树干光滑坚硬不吸水有关. 3 种林分的树干径流量随林外降雨量的变化而变化, 并且变化趋势与降雨量的变化趋势相似, 如图 2(b).

由表 2 可知, 3 种林分的树干径流量与林外降雨量也呈显著的直线关系 ($P < 0.05$), 而树干径流率与林外降雨量之间呈显著的对数函数关系 ($P < 0.05$). 在树干径流产生初期, 树干径流率随着降雨量的增大而增大, 当树干径流达到一定程度, 即树干湿度饱和时, 随着降雨量的增大, 树干径流率增加幅度不大或不再增大, 只是趋于一个稳态值.

3.2 不同林分穿透雨和树干径流中的氮素变化特征

3.2.1 穿透雨和树干径流中的氮浓度特征

在整个观测期间(2012 年 5 ~ 10 月), 缙云山地区大气降水和 3 种林分穿透雨、树干径流的氮浓度均值见表 3. 从中可知, 相对于大气降水, 3 种林分穿透雨中的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度要高, 常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的 NH_4^+ 浓度分别是大气降水的 2.09、1.96 和 3.44 倍, NO_3^- 浓度分别是 2.45、2.04 和 3.60 倍, 其原因是林冠层拦截了大量的干沉降以及林冠分泌的代谢产物, 当下雨时这些物质

随大气降水被一起冲洗下来^[18]. 从林分角度分析, 不论 NO_3^- 还是 NH_4^+ 浓度, 都表现出一致的大小关系: 针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林, 且各林分的 NH_4^+ 浓度高于 NO_3^- 浓度.

树干径流量虽然很小, 但是能够将植物所需的营养元素输送到根际部分, 是植物生长养分输入必不可少的组成部分^[32]. 由表 3 亦知, 树干径流中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度的变化规律与穿透雨相似, 其中常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的 NH_4^+ 浓度分别是大气降水的 2.74、2.13 和 3.15 倍, NO_3^- 浓度分别是 2.31、2.00 和 3.07 倍, 其原因是大气降水不仅拦截了干沉降物质, 还淋洗了叶片分泌的代谢物和树干表面的尘埃颗粒^[9].

表 3 大气降水和 3 种典型林分穿透雨、树干径流的氮浓度均值/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 3 Average nitrogen concentration of atmospheric rainfall and throughfall, stemflow for 3 typical forest stands/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

林分类型	指标	大气降水	穿透雨	树干径流
常绿阔叶林	NH_4^+	0.96 ± 0.19	2.01 ± 0.27	2.63 ± 0.53
	NO_3^-	0.55 ± 0.12	1.35 ± 0.22	1.27 ± 0.24
毛竹林	NH_4^+	0.96 ± 0.19	1.88 ± 0.26	2.04 ± 0.63
	NO_3^-	0.55 ± 0.12	1.12 ± 0.14	1.10 ± 0.31
针阔混交林	NH_4^+	0.96 ± 0.19	3.30 ± 0.97	3.02 ± 0.31
	NO_3^-	0.55 ± 0.12	1.98 ± 0.34	1.69 ± 0.35

3.2.2 穿透雨和树干径流中的氮输入量特征

氮浓度以及降雨量的不同最终导致不同林分的氮输入量各不相同. 由表 4 可知, 3 种林分穿透雨的 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量较大气降水要高. 在整个观测期间, 穿透雨中的无机氮输入量 (NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量之和) 的大小顺序是针阔混交林 (18.62 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 明显高于常绿阔叶林 (14.42 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和毛竹林 (13.98 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), 而常绿阔叶林和毛竹林二者之间相差不大. 虽然针阔混交林和常绿阔叶林的穿透雨量相差不多, 但由于针阔混交林的氮浓度

最大,从而导致其无机氮输入量高于常绿阔叶林;毛竹林的穿透雨量最大,但是氮浓度最小,使得最终无机氮输入量低于针阔混交林。

由于树干径流量远远低于穿透雨量,导致随树干径流进入森林的无机氮输入量稀少。其中,毛竹林的树干径流量明显多于其它两种林地[见图 2(b)],从而使其树干径流的无机氮输入量($1.33 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)最大;常绿阔叶林和针阔混交林的树干径流量以及树干径流中氮素浓度相差不大,故二者的无机氮输入量也很相近,分别为 $0.51 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (表 4),而且 3 种林分的无机氮输入量均以 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为主。

表 4 大气降水和 3 种典型林分穿透雨、树干径流的无机氮输入量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

Table 4 Inorganic nitrogen input of atmospheric rainfall and throughfall, stemflow for 3 typical forest stands/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

林分类型	指标	大气降水	穿透雨	树干径流	林冠净流量
常绿阔叶林	NH_4^+	5.69	8.70	0.35	3.36
	NO_3^-	3.03	5.72	0.16	2.85
	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$	8.72	14.42	0.51	6.21
毛竹林	NH_4^+	5.69	8.63	0.85	3.79
	NO_3^-	3.03	5.35	0.48	2.80
	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$	8.72	13.98	1.33	6.59
针阔混交林	NH_4^+	5.69	11.77	0.22	6.30
	NO_3^-	3.03	6.85	0.09	3.91
	$\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$	8.72	18.62	0.31	10.21

3.3 不同林分穿透雨和树干径流中的氮素月变化

3.3.1 穿透雨和树干径流中的氮浓度月变化

在整个试验观测期间共收集 9 次降雨资料,其中针阔混交林 5 月收集的穿透雨和树干径流样品均未检测出各形态氮素的浓度值。从图 3(a)和图 3(b)中可以看出,3 种林分穿透雨中的氮素浓度月变化特征表现为:毛竹林中 NO_3^- 浓度呈“V”字型变化,5~6 月下降,6~10 月持续上升,并在 10 月达到最高值 $1.57 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$;而 NH_4^+ 浓度以及常绿阔叶林的 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度均呈“W”型变化,只是发生变化的转折点略有不同;针阔混交林的 NH_4^+ 和 NO_3^- 浓度变化规律一致,都是从 6~7 月急剧升高,7~9 月连续下降,到 10 月又明显回升。

从林分角度分析,3 种林分穿透雨中的 NO_3^- 浓度均在 6 月出现最低值,其中针阔混交林 ($0.85 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($0.68 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 毛竹林 ($0.43 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),而且 NH_4^+ 浓度最低值也表现出相同的大小关系,即针阔混交林 ($1.31 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($1.13 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) > 毛竹林 ($0.92 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$);另外,3 种林分的 NO_3^- 浓度与常绿阔叶林和毛竹林的 NH_4^+ 浓度均在 10 月达到最高值,而针阔混交林

将穿透雨和树干径流中的养分输入量减去大气降水中的养分输入量即可得到该养分的林冠净流量,用来揭示林冠与降水中养分的相互作用。正值表示林冠养分被降水淋洗,负值表示降水中的养分被林冠直接吸收^[9,33]。表 4 数据显示,3 种林分的养分均被降水淋洗,这与郭平等^[34]在缙云山对针阔混交林的研究相一致。其中,常绿阔叶林和毛竹林的淋溶量相差不大,分别为 $6.21 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $6.59 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,而针阔混交林的淋溶量 ($10.21 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 分别是这两种林分的 1.64 倍和 1.55 倍,而梁翠萍^[33]在火地塘林区对华山松松林的研究结果则相反。

的 NH_4^+ 浓度最高值出现在 7 月,其值高达 $5.86 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,这可能是样品在收集过程中受到污染所导致的。

从图 3(c)和图 3(d)中可发现,3 种林分树干径流中的氮素浓度月变化特征表现为:常绿阔叶林的 NH_4^+ 浓度、毛竹林的 NO_3^- 、 NH_4^+ 浓度和针阔混交林的 NO_3^- 浓度变化规律一致,都表现为先升高后降低再升高的变化趋势。其中,毛竹林的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度均在 7 月达到最高值,分别为 $2.07 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.14 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而针阔混交林的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度最高值都在 10 月出现,分别为 $2.74 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.95 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。针阔混交林的 NH_4^+ 浓度变化从 6~10 月呈缓慢持续上升趋势,其最低值 ($2.12 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 比毛竹林的 NO_3^- 浓度最高值还要略高;常绿阔叶林的 NO_3^- 浓度呈“W”型变化,其中 NO_3^- 浓度最高值 ($2.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 和最低值 ($0.51 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 分别出现在 5 月和 6 月,而 NH_4^+ 浓度最高值 ($5.55 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 出现在 8 月。

3.3.2 穿透雨和树干径流中的氮输入量月变化

从图 4(a)和图 4(b)中可发现,3 种林分穿透雨

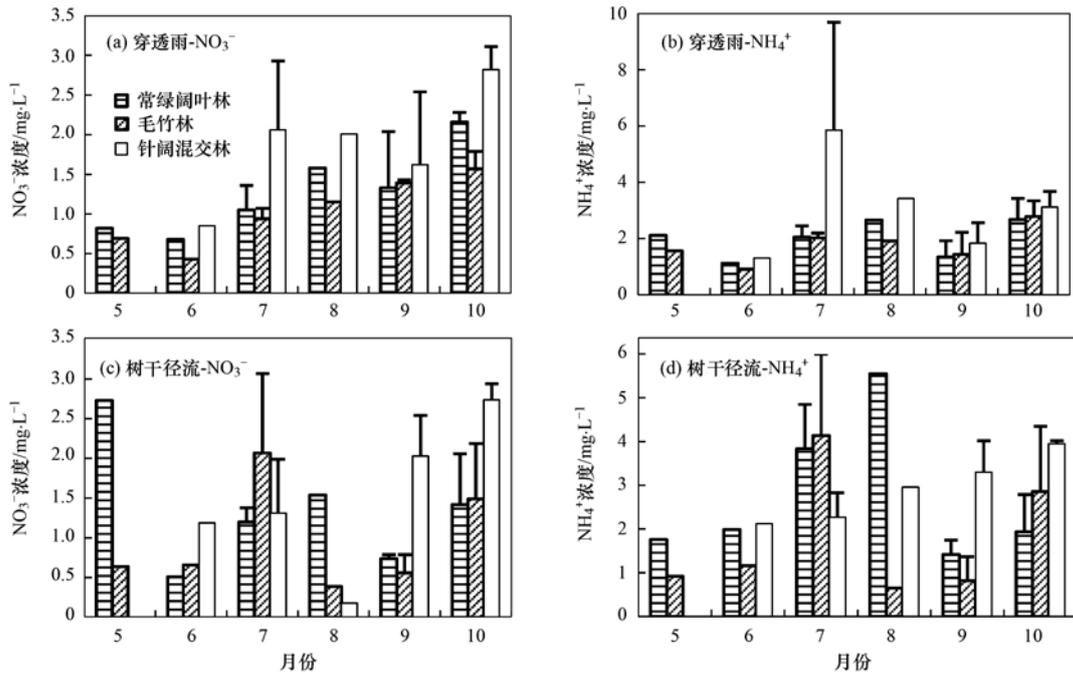


图3 3种林分穿透雨和树干径流中各形态氮浓度的月变化

Fig. 3 Monthly variation of nitrogen concentration of throughfall and stemflow for 3 typical forest stands

中 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N输入量最值的大小关系均表现为针阔混交林>常绿阔叶林>毛竹林,而且输入量的最低值也是在6月出现,而最高值都出现在8月,这是由于该月穿透雨量最高且氮浓度也较高共同导致的。

比较穿透雨中 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N输入量的动态变化可以发现,当 NH_4^+ -N输入量低的时候, NO_3^- -N输入量也低,相反当 NH_4^+ -N输入量高的时候,

NO_3^- -N输入量也高. 这与田大伦^[35]的研究相反,这可能与缙云山所处的地理位置有关. 缙云山位于重庆市西北部的北碚、沙坪坝等区县境内,近年来,这两个地区农业生产迅猛发展,大面积种植蔬菜,长期过量施用氮肥,以及秸秆燃烧带来的氨排放,导致大气中 NH_3 的挥发量急剧升高;而且缙云山是国家级自然风景名胜区,5~10月正好是旅游旺季,大部分游客自驾而来,带来经济收益的同时也造成了严重

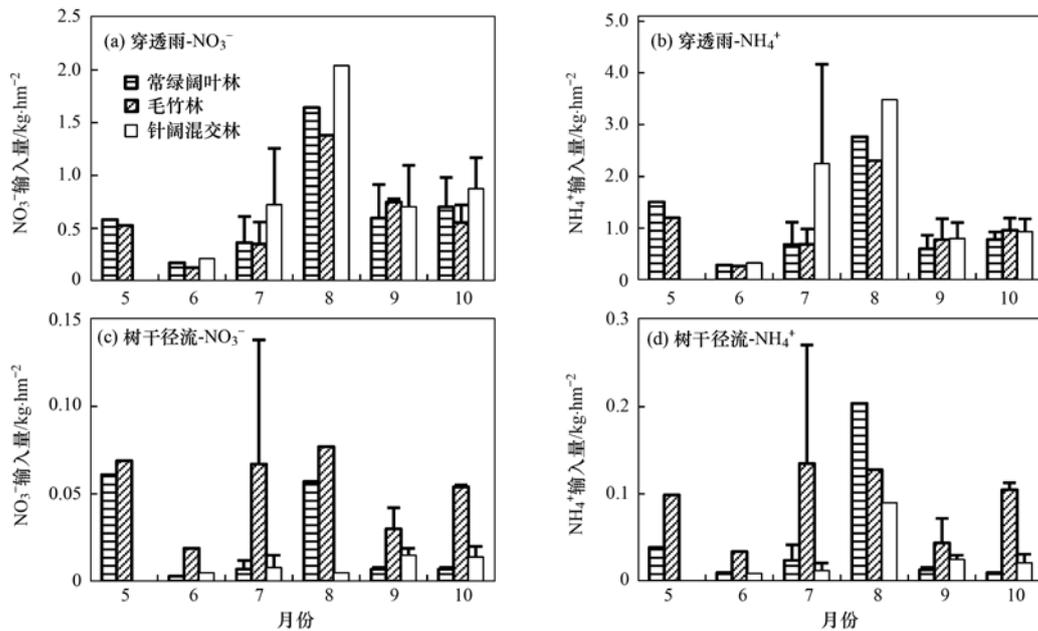


图4 3种林分穿透雨和树干径流中各形态氮输入量的月变化

Fig. 4 Monthly variation of nitrogen input of throughfall and stemflow for 3 typical forest stands

的空气污染, 车辆尾气的排放导致大气中 NO_x 的含量不断升高。

在整个研究期间, 常绿阔叶林和针阔混交林树干径流中的 NH_4^+ -N 输入量仅在 8 月出现一次峰值, 分别为 $0.21 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.09 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 而 3 种林分的 NO_3^- -N 输入量和毛竹林的 NH_4^+ -N 输入量出现两次峰值, 并且两次峰值相差不多[见图 4(c) 和图 4(d)]. 另外, 3 种林分 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 输入量最低值都在 6 月出现, 常绿阔叶林 ($0.003 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.010 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 和针阔混交林 ($0.005 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.009 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的大小接近, 二者明显低于毛竹林 ($0.019 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $0.034 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$).

与穿透雨量相比, 树干径流量要小很多, 所以随树干径流进入森林的氮素含量也很少. 由于毛竹林的树干径流量最大, 占总降雨量的 10.3%, 故该林地随树干径流输入的氮素比其它两种林地都高。

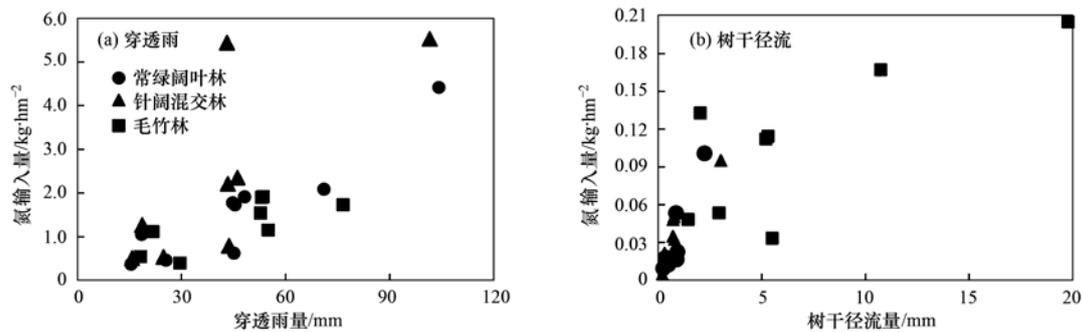


图 5 氮输入量与穿透雨量、树干径流量之间的关系

Fig. 5 Relationships between inorganic nitrogen input and throughfall, stemflow

表 5 氮输入量与穿透雨、树干径流之间的关系方程¹⁾

Table 5 Correlation equations between inorganic nitrogen input and throughfall, stemflow

林分类型	穿透雨			树干径流		
	关系方程	R^2	P	关系方程	R^2	P
常绿阔叶林	$y = 0.041x_1 - 0.317$	0.846	0.000	$y = 0.071x_2 - 0.027$	0.930	0.000
毛竹林	$y = 0.028x_1 + 0.030$	0.843	0.000	$y = 0.008x_2 + 0.057$	0.598	0.025
针阔混交林	$y = 0.057x_1 - 0.107$	0.569	0.031	$y = 0.028x_2 + 0.012$	0.859	0.000

1) y 表示无机氮输入量, x_1 表示穿透雨量, x_2 表示树干径流量

4 讨论

4.1 不同林地的降雨特征

常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的穿透雨量分别占总降雨量的 74.0%、85.0% 和 71.6%。这主要与 3 种不同林分的林冠和结构特征有关, 毛竹林相对于其它两种林分, 叶片小, 冠层薄, 且竹叶表面角质层较厚, 吸水能力差, 雨滴容易穿过和下滴^[36], 故穿透雨量最大; 针阔混交林的林冠层次稍多, 具

3.4 不同林分氮输入量与穿透雨、树干径流的关系

将 3 种林分的无机氮输入量与穿透雨量、树干径流量分别进行回归分析发现, 二者之间均呈明显的线性相关(图 5)。其中, 穿透雨中常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的决定系数 (R^2) 分别是 0.846、0.843 和 0.569, 树干径流中常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的决定系数 (R^2) 分别是 0.930、0.598 和 0.859 (见表 5), 且均达到了显著水平 ($P < 0.05$), 这说明穿透雨量和树干径流量的多少直接影响着森林生态系统无机氮输入量的大小。

由降水输入的氮量取决于降水量的多少和降水中的氮素的浓度, 由于穿透雨和树干径流中氮浓度的变化范围不大, 分别为 $1.12 \sim 3.29 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $1.10 \sim 3.02 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (见表 3), 而穿透雨量和树干径流量随降雨量的增大而增大, 故无机氮输入量与穿透雨量和树干径流量之间存在显著的直线回归关系。

有较大的雨水附着面积, 容易拦截降水, 而常绿阔叶林与针阔混交林相比其雨水附着面积较小, 因此常绿阔叶林的穿透雨量较高; 另外, 不同林分的小气候变化对穿透雨也会产生一定的影响^[37]。

3 种林分的树干径流量占总降雨量的比例的大小关系为毛竹林 (10.3%) > 常绿阔叶林 (1.9%) > 针阔混交林 (1.6%)。其中, 毛竹林的树干径流量最大, 这与毛竹秆枝部表面光滑且有坚硬的硅化蜡质层, 吸水性能差有关, 而且 Krishna 等^[22] 的研究也发

现,毛竹林的树干径流量最高可达 22%; 针阔混交林的针叶树种以马尾松和杉木为主,马尾松树干皮质较硬而且粗糙,杉木皮厚且质地松软,吸水量大,所以树干径流量最小。

整个研究期间,穿透雨量和树干径流量与林外降雨量之间均呈显著的直线关系,而且穿透雨率和树干径流率与林外降雨量之间都呈对数函数关系,这与赵洋毅^[19]和宋吉红^[36]在缙云山的研究结果相一致,且李汉强等^[27]、李佳等^[37]和 Bahmani 等^[38]的研究也得出相同的结论。然而黄进等^[39]对北亚热带次生毛竹林的研究发现,树干径流率与降雨量之间的相关性不显著。

4.2 穿透雨和树干径流中的氮素变化特征

穿透雨和树干径流的氮浓度比大气降水要高,主要原因有:第一,大气降水淋洗了大气中的干沉降以及林冠和树干表面的尘埃颗粒;第二,降雨淋溶了叶片的分泌物^[9]。一般地, NH_4^+ 浓度大于 NO_3^- , 这与国内外许多研究结果相一致^[19,40,41],同时亦有相反的研究结果^[42,43]。对于 3 种林分来说,不论是穿透雨还是树干径流的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度,都表现出一致的大小关系:针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林(表 3)。另外,随穿透雨进入林地的无机氮含量也表现出相似的特征,而且 NH_4^+ -N 输入量占主要部分,这说明在缙云山地区铵态氮对林地土壤中的氮素贡献要比硝态氮大。但是,由于树干径流量显著低于穿透雨量,导致随树干径流进入森林的无机氮输入量稀少。

降水经过植物表面时,通常要经过两个过程:第一,降水对植物体分泌的代谢物的淋洗作用;第二,植物体(主要是叶片)对降水中养分的吸收和表面吸附作用。通常将这两个作用的综合结果称之为淋溶,即淋溶为大气降水输入与穿透雨和树干径流输入的差值,当淋洗大于吸收作用时淋溶为正,反之为负^[9]。本试验结果表明,3 种林分均表现为淋洗作用,这是由于该研究区森林的林龄结构处于近熟林或成熟林,植被发育较成熟,对降水中氮素的吸收作用小于大气降水经过林冠和树干时的淋洗作用。冠层淋溶是一种自然现象,能够促进营养元素的循环和植物的生长,如果长期处于淋洗条件下,那么将会造成森林生态系统的氮饱和,导致营养元素大量流失,最终影响林木的生长和森林生态系统的生产力。

在整个观测期间,穿透雨和树干径流中的总无机氮输入量分别为:常绿阔叶林($14.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)、毛竹林($15.31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)和针阔混交林(18.93

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),其中 NH_4^+ -N 含量所占比例分别为 60.6%、61.9% 和 63.3%,这与张龚^[44]在湖南韶山的研究相一致,而且 Dise 等^[45]早在 1995 年通过对 NITREX 试验地的氮输入研究也发现氮沉降的主要形式是 NH_4^+ -N,但是 Drápelová^[17]和 Kopáček 等^[42]的研究表明,降水中的氮含量以 NO_3^- -N 为主。由于缙云山地区的氮主要以 NH_4^+ 形式输入森林生态系统,而且 NH_4^+ -N 主要来自土壤、氮肥和家畜粪便中 NH_3 的挥发,由此可推测该地区近年来农业活动越来越集中。田大伦^[35]在会同广坪林区对杉木林的研究发现,穿透雨和树干径流的氮输入量为 $20.81 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,Srinivasan 等^[2]的研究表明,柚木人工林中随降水输入的氮含量为 $10.75 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,Dovey 等^[5]在 Dukuduku 北部和 KwaMbonambi 南部两个不同地区对桉树林的研究结果显示,降水输入的氮含量分别是 $11.0 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $10.0 \text{ kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 。由于本研究只进行了短期观测,无法与他人的研究结果作直接比较,但是该地区 3 种典型林分的短期观测结果已经很高,这说明重庆缙云山地区随降水输入到森林生态系统的氮含量很高,这可能与本地工农业发展迅猛有关,也与观测期间多雷电现象以及当地居民烧柴使大量氮进入空气中有关,因此需要进一步进行长期观测。

4.3 穿透雨和树干径流中各形态氮素月变化

不同林分穿透雨和树干径流中的氮素浓度及其输入量在不同月份各不相同,但是 3 种林分的穿透雨中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度和输入量均在 6 月出现最低值,而输入量的最高值出现在 8 月,这是因为:氮输入量是由氮浓度和降雨量共同所决定的,6 月穿透雨量最小,而 8 月穿透雨量最大,并且该月份氮浓度也较高。此外,树干径流中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度和输入量的最值出现时间各有不同,这可能与降雨量的大小以及不同林分的树干特征和树木自身的生理特性有着密切关系^[35]。

受地理位置和人类活动的共同作用,随大气降水向森林生态系统输入的氮素含量的随机性很大,而且穿透雨和树干径流的影响因素很多,通过短期的观测对反映该地区氮素输入的长期规律有一定的局限性,因此需要进行长期观测来深入研究不同森林类型的降水过程及其养分输入的规律。另外,本研究只讨论了不同森林生态系统中无机氮输入量的多少,大量研究证明有机氮的输入也不容忽

视^[12,46,47]。其中 Drápelová^[17]的研究表明,随降水输入的有机氮含量占总氮输入量的 12%,进一步说明有机氮也是氮输入的一个重要部分。如果考虑到降水中有机氮的输入,重庆缙云山地区森林生态系统中随降水输入的氮含量的实际值可能远高于目前的数据,而且本试验只进行了短期研究,对估算该地区森林生态系统氮素的输入量会存在一定的缺陷性,需要进一步开展长期深入的研究。

5 结论

(1)研究期间总降雨量 564.88 mm,常绿阔叶林、毛竹林和针阔混交林的穿透雨量占总降雨量的百分率分别为 74.0%、85.0% 和 71.6%,且树干径流量所占百分率分别为 1.9%、10.3% 和 1.6%; 3 种林分的穿透雨量、树干径流量与降雨量之间均呈显著的线性相关,而穿透雨率、树干径流率与降雨量之间都呈对数关系。

(2)3 种林分的穿透雨和树干径流的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度比大气降水都高,而且 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度的大小关系都表现为针阔混交林 > 常绿阔叶林 > 毛竹林; 研究期间随穿透雨和树干径流进入林地的总无机氮含量分别为针阔混交林 ($18.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 毛竹林 ($15.31 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) > 常绿阔叶林 ($14.93 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$),且以 NH_4^+ -N 形式为主。

(3)3 种林分的穿透雨和树干径流的 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度大小及其输入量的多少在不同月份各不相同,这与不同森林类型的林冠结构、树木特征和月降雨量的多少密切相关。

参考文献:

- [1] 郎燕. 小兴安岭不同类型原始红松林对降水化学特征的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [2] Srinivasan M, Mani K A, Kiruba M. Nutrient gains by stem flow, through fall and rainfall in Teak ecosystem [C]. Proceedings of International Forestry and Environment Symposium, 2012.
- [3] 卢琦, 李清河. 美国森林的水文效应[J]. 世界林业研究, 2002, **15**(3): 54-60.
- [4] 鲁如坤, 史陶钧. 金华地区降雨中养分含量的初步研究[J]. 土壤学报, 1979, **16**(1): 81-84.
- [5] Dovey S B, Toit B D, 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.
- [6] 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.
- [7] Xiao Q F, McPherson E G. Rainfall interception of three trees in Oakland, California [J]. Urban Ecosystems, 2011, **14**(4): 755-769.
- [8] 张赞齐, 曾玲梅, 王陆军, 等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨中的养分动态[J]. 林业科学, 2011, **47**(12): 143-148.
- [9] 周才平. 中国主要类型森林生态系统及区域氮循环研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2000.
- [10] Lu C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2007, **112**: D22S05. doi: 10. 1029/2006JD007990.
- [11] Holland E A, Braswell B H, Sulzman J, et al. Nitrogen deposition onto the United States and Western Europe: synthesis of observations and models [J]. Ecological Application, 2005, **15**(1): 38-57.
- [12] Dise N B, Rothwell J J, Gauci V, et al. Predicting dissolved inorganic nitrogen leaching in European forests using two independent databases [J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(5): 1798-1808.
- [13] Fang Y T, Gundersen P, Vogt R D, et al. Atmospheric deposition and leaching of nitrogen in Chinese forest ecosystems [J]. Journal of Forest Research, 2011, **16**(5): 341-350.
- [14] 刘文飞, 樊后保. 马尾松阔叶树混交林生态系统的氮素循环特征[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30**(6): 52-58.
- [15] Fang Y T, Gundersen P, Mo J M, et al. Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution [J]. Biogeosciences, 2008, **5**(2): 339-352.
- [16] Fang Y T, Gundersen P, Mo J M, et al. Nitrogen leaching in response to increased nitrogen inputs in subtropical monsoon forests in southern China [J]. Forest Ecology and Management, 2009, **257**(1): 332-342.
- [17] Drápelová I. Organic and inorganic nitrogen in precipitation and in forest throughfall at Bílý Kříž site (Beskydy Mts. , Czech Republic) [J]. Journal of Forest Science, 2012, **58**(2): 88-100.
- [18] 刘菊秀, 温达志, 周国逸. 广东鹤山酸雨地区针叶林与阔叶林降水化学特征 [J]. 中国环境科学, 2000, **20**(3): 198-202.
- [19] 赵洋毅. 缙云山水源涵养林结构对生态功能调控机制研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- [20] 张赞齐, 王陆军, 丁正亮, 等. 安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨中氮和可溶性有机碳的动态变化 [J]. 水土保持学报, 2010, **24**(2): 146-149, 164.
- [21] Zimmermann A, Germer S, Neill C, et al. Spatio-temporal patterns of throughfall and solute deposition in an open tropical rain forest [J]. Journal of Hydrology, 2008, **360**(1-4): 87-102.
- [22] Krishna R B, Kurothe R S, Pande V C, et al. Throughfall and stemflow measurement in bamboo (*Dendrocalmus strictus*) plantation [J]. India Journal of Soil Conservation, 2012, **40**(1): 60-64.

- [23] 何常清, 薛建辉, 吴永波, 等. 岷江上游亚高山川滇高山栎林的降雨再分配[J]. 应用生态学报, 2008, **19**(9): 1871-1876.
- [24] Shi Z J, Wang Y H, Xu L H, *et al.* Fraction of incident rainfall within the canopy of a pure stand of *Pinus armandii* with revised Gash model in the LiuPan Mountains of China[J]. Journal of Hydrology, 2010, **385**(1-4): 44-50.
- [25] 盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等. 大气氮沉降通量观测方法[J]. 生态学杂志, 2010, **29**(8): 1671-1678.
- [26] 郑祥洲, 张玉树, 丁洪, 等. 闽西北农田生态系统中大气氮湿沉降研究[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(3): 127-130.
- [27] 李汉强, 邱治军, 张宁南, 等. 马占相思人工林的林冠截留效应[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(2): 86-90.
- [28] Gómez J A, Vanderlinden K, Giráldez J V, *et al.* Rainfall concentration under olive trees [J]. Agricultural Water Management, 2002, **55**(1): 53-70.
- [29] 王静, 尤文辉, 石琨, 等. 天童常绿阔叶林树干径流中硝态氮特征[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2008, **39**(4): 440-445.
- [30] Levia D F, Herwitz S R. Interspecific variation of bark water storage capacity of three deciduous tree species in relation to stemflow yield and solute flux to forest soil[J]. Catena, 2005, **64**(1): 117-137.
- [31] Sraj M, Brilly M, Miko M. Rainfall interception by two deciduous Mediterranean forests of contrasting stature in Slovenia [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, **148**(1): 121-134.
- [32] Hofhansl F, Wanek W, Drage S, *et al.* Controls of hydrochemical fluxes via stemflow in tropical lowland rainforests: Effects of meteorology and vegetation characteristics[J]. Journal of Hydrology, 2012, **452-453**: 247-258.
- [33] 梁翠萍. 秦岭南坡锐齿栎林、油松林和华山松林对降水水质的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2011.
- [34] 郭平, 王云琦, 王玉杰, 等. 重庆缙云山酸沉降背景下针阔混交林水化学特征初步研究[J]. 水土保持学报, 2012, **26**(5): 235-238.
- [35] 田大伦. 会同广坪林区降雨和杉木林内雨的养分含量[J]. 中南林学院学报(自然科学版), 2002, **22**(3): 9-13.
- [36] 宋吉红. 重庆缙云山森林水文生态功能研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2008.
- [37] 李佳, 饶良懿, 鲁绍伟, 等. 北京密云油松与刺槐林降雨再分配过程研究[J]. 广东农业科学, 2012, **39**(12): 169-174.
- [38] Bahmani S M H G, Attarod P, Bayramzadeh V, *et al.* Throughfall, stemflow, and rainfall interception in a natural pure forest of chestnut-leaved Oak (*Quercus castaneifolia* C. A. Mey.) in the Caspian Forest of Iran [J]. Annals of Forest Research, 2012, **55**(2): 197-206.
- [39] 黄进, 张家洋, 张金池, 等. 北亚热带次生毛竹林冠生态水文效应及其影响因素分析[J]. 水土保持通报, 2009, **29**(1): 23-27.
- [40] Zhang G, Zeng G M, Jiang Y M, *et al.* Exchange of proton and major elements in two-layer canopies under acid rain in a subtropical evergreen forest in central-south China[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2006, **48**(10): 1154-1162.
- [41] Dezzeo N, Chacón N. Nutrient fluxes in incident rainfall, throughfall, and stemflow in adjacent primary and secondary forests of the Gran Sabana, southern Venezuela [J]. Forest Ecology and Management, 2006, **234**(1-3): 218-226.
- [42] Kopáček J, Turek J, Hejzlar J, *et al.* Bulk deposition and throughfall fluxes of elements in the Bohemian Forest (central Europe) from 1998 to 2009[J]. Boreal Environment Research, 2011, **16**(6): 495-508.
- [43] Chiwa M, Onozawa Y, Otsuki K. Hydrochemical characteristics of throughfall and stemflow in a Moso-bamboo (*Phyllostachy pubescens*) forest[J]. Hydrological Processes, 2010, **24**(20): 2924-2933.
- [44] 张龚. 中亚热带韶山森林水文特征与主要营养物的生物地球化学过程研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [45] Dise N B, Wright R F. Nitrogen leaching from European forests in relation to nitrogen deposition [J]. Forest Ecology and Management, 1995, **71**(1-2): 153-161.
- [46] Sarah E C. Atmospheric nitrogen deposition: Revisiting the question of the importance of the organic component [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2214-2222.
- [47] Facchini M C, Decesari S, Rinaldi M, *et al.* Important source of marine secondary organic aerosol from biogenic amines [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(24): 9116-9121.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 15, 2014

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行