

中国百种杰出学术期刊
中国精品科技期刊
中国科协优秀期刊
中国科学院优秀科技期刊
新中国 60 年有影响力的期刊
国家期刊奖

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

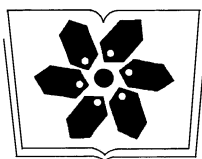
(Shengtai Xuebao)

第 30 卷 第 24 期
Vol.30 No.24
2010



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



生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

中国科学院科学出版基金资助出版

第 30 卷 第 24 期

2010 年 12 月 (半月刊)

目 次

三江平原残存湿地斑块特征及其对物种多样性的影响	施建敏, 马克明, 赵景柱, 等 (6683)
叶片碳同位素对城市大气污染的指示作用	赵德华, 安树青 (6691)
土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响	张容娟, 布乃顺, 崔 军, 等 (6698)
缓/控释复合肥料对土壤氮素库的调控作用	董 燕, 王正银 (6707)
北京海淀公园绿地二氧化碳通量	李 霞, 孙 睿, 李 远, 等 (6715)
三峡库区消落带生态环境脆弱性评价	周永娟, 仇江啸, 王 姣, 等 (6726)
应用碳、氮稳定同位素研究稻田多个物种共存的食物网结构和营养级关系	张 丹, 闵庆文, 成升魁, 等 (6734)
基于弹性系数的江苏省能源生态足迹影响因素分析	杨足膺, 赵 媛, 付伍明 (6741)
中国土地利用多功能性动态的区域分析	甄 霖, 魏云洁, 谢高地, 等 (6749)
遮荫处理对东北铁线莲生长发育和光合特性的影响	王云贺, 韩忠明, 韩 梅, 等 (6762)
臭氧胁迫对冬小麦光响应能力及 PS II 光能吸收与利用的影响	郑有飞, 赵 泽, 吴荣军, 等 (6771)
地表覆草和覆膜对西北旱地土壤有机碳氮和生物活性的影响	谢驾阳, 王朝辉, 李生秀 (6781)
喀斯特峰丛洼地旱季土壤水分的空间变化及主要影响因子	彭晚霞, 宋同清, 曾馥平, 等 (6787)
极干旱区深埋潜水蒸发量的测定	李红寿, 汪万福, 张国彬, 等 (6798)
灌木林土壤古菌群落结构对地表野火的快速响应	徐赢华, 张 涛, 李 智, 等 (6804)
稻田免耕和稻草还田对土壤腐殖质和微生物活性的影响	区惠平, 何明菊, 黄 景, 等 (6812)
造纸废水灌溉对黄河三角洲盐碱地土壤酶活性的影响	董丽洁, 陆兆华, 贾 琼, 等 (6821)
神农宫扁角菌蚊幼虫种群分布及其与环境因子的相关性	顾永征, 李学珍, 牛长缨 (6828)
三亚珊瑚礁水域纤毛虫种类组成和数量分布及与环境因子的关系	谭烨辉, 黄良民, 黄小平, 等 (6835)
淞江鲈在中国地理分布的历史变迁及其原因	王金秋, 成 功 (6845)
黄海中南部小黄鱼生物学特征的变化	张国政, 李显森, 金显仕, 等 (6854)
甲基溴消毒对番茄温室土壤食物网的抑制	陈云峰, 曹志平 (6862)
离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量——以千烟洲人工针叶林为例	盛文萍, 于贵瑞, 方华军, 等 (6872)
乡土植物芦苇对外来入侵植物加拿大一枝黄花的抑制作用	李愈哲, 尹 昕, 魏 维, 等 (6881)
遂渝铁路边坡草本植物多样性季节动态和空间分布特征	王 倩, 艾应伟, 裴 娟, 等 (6892)
古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量	孙鹏飞, 周宏飞, 李 彦, 等 (6901)
碟果虫实种子萌发对策及生态适应性	刘有军, 刘世增, 纪永福, 等 (6910)
原始兴安落叶松林生长季净生态系统 CO ₂ 交换及其光响应特征	周丽艳, 贾丙瑞, 曾 伟, 等 (6919)
五种红树植物通气组织对人工非潮汐生境的响应	伍卡兰, 彭逸生, 郑康振, 等 (6927)
亚高寒草甸不同生境植物群落物种多度分布格局的拟合	刘梦雪, 刘佳佳, 杜晓光, 等 (6935)
内蒙古荒漠草原地表反照率变化特征	张 果, 周广胜, 阳伏林 (6943)
中国沙棘克隆生长对灌水强度的响应	李甜江, 李根前, 徐德兵, 等 (6952)
增温与放牧对矮蒿草甸 4 种植物气孔密度和气孔长度的影响	张立荣, 牛海山, 汪诗平, 等 (6961)
基于 ORYZA2000 模型的北京地区早稻适宜播种期分析	薛昌颖, 杨晓光, 陈怀亮, 等 (6970)
专论与综述	
区域生态安全格局研究进展	刘 洋, 蒙古军, 朱利凯 (6980)
植物功能性状与湿地生态系统土壤碳汇功能	王 平, 盛连喜, 燕 红, 等 (6990)
农田水氮关系及其协同管理	王小彬, 代 快, 赵全胜, 等 (7001)
虫害诱导挥发物的生态调控功能	王国昌, 孙晓玲, 董文霞, 等 (7016)
土壤微生物资源管理、应用技术与学科展望	林先贵, 陈瑞蕊, 胡君利 (7029)
问题讨论	
从演化的角度评价北京市经济系统可持续发展趋势	黄茹莉, 徐中民 (7038)
基于植物多样性特征的武汉市城市湖泊湿地植被分类保护和恢复	郑忠明, 宋广莹, 周志翔, 等 (7045)
濒危兰科植物再引入技术及其应用	陈宝玲, 宋希强, 余文刚, 等 (7055)
研究简报	
实验条件下华北落叶松和白杆苗期生长策略的差异比较	张芸香, 李海波, 郭晋平 (7064)
基于源-库互反馈的温室青椒坐果时空动态模拟	马韞韬, 朱晋宇, 胡包钢, 等 (7072)
西双版纳小磨公路及其周边道路对蛇类活动的影响	孙 戈, 张 立 (7079)
温度变化对藻类光合电子传递与光合放氧关系的影响	张 曼, 曾 波, 张 怡, 等 (7087)
黄土区六种植物凋落物与不同形态氮素对土壤微生物量碳氮含量的影响	王春阳, 周建斌, 董燕婕, 等 (7092)
食细菌线虫 <i>Caenorhabditis elegans</i> 的取食偏好性	肖海峰, 焦加国, 胡 锋, 等 (7101)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 424 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 48 * 2010-12	

离子树脂法测定森林穿透雨氮素湿沉降通量 ——以千烟洲人工针叶林为例

盛文萍^{1,2}, 于贵瑞¹, 方华军¹, 刘允芬¹, 胡中民¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, CERN 综合研究中心, 北京 100101;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 穿透雨是大气氮素输入森林生态系统的重要途径之一, 穿透雨中氮素含量的定量评估在森林生态系统氮素循环研究中的作用不可忽视。穿透雨中氮沉降通量的空间异质性很强, 传统降水收集法工作量大, 且容易带来测定误差。分析了国产离子树脂测定大气氮素湿沉降的可行性, 并以千烟洲人工针叶林为例探讨离子树脂法测定森林穿透雨的适用性。结果表明, 离子交换树脂法和传统降水收集法测定值之间的相关性显著, 离子交换树脂法可以很好的反映大气氮沉降通量和季节变化特征, 并且在采样周期较长时也能准确测定氮沉降组分, 是适用于野外站点林内穿透雨氮沉降通量的观测方法。千烟洲人工针叶林穿透雨的氮沉降通量为 $9.19 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 夏季的 5—7 月份和冬季的 1—2 月份出现氮沉降通量高峰。夏季穿透雨氮沉降以铵态氮为主, 而冬季以硝态氮为主。千烟洲人工针叶林的氮沉降通量与附近地区针叶林穿透雨氮沉降通量近似, 低于临近区域阔叶林穿透雨的氮沉降通量水平, 但已可能接近森林生态系统氮输出出现强烈反应的氮沉降临限值。

关键词: 氮沉降, 离子交换树脂, 穿透雨, 亚热带人工林

Determination of nitrogen deposition in throughfall using ion-exchange resins: a field test in planted coniferous forest ecosystem at Qianyanzhou

SHENG Wenping^{1,2}, YU Guirui¹, FANG Huajun¹, LIU Yunfen¹, HU Zhongmin¹

1 Synthesis Research Center of Chinese Ecosystem Research Network, Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

Abstract: Throughfall is an important pathway of atmospheric nitrogen deposition into forest ecosystems. Qualifying temporal dynamics of the atmospheric nitrogen deposition via throughfall is critical to reveal nitrogen cycle in forest ecosystems. The traditional method for collecting and analyzing throughfall nitrogen, i. e., the throughfall-gathering method, is labor intensive, and it may induce large uncertainties due to the spatial heterogeneity of throughfall and the instability of the chemical solution. In this study, we tested the feasibility of using domestic ion-exchange resin columns, a labor-saving method, to measure throughfall nitrogen deposition at a subtropical planted coniferous forest ecosystem. A laboratory study was conducted to investigate the efficiency of using domestic anion-cation exchange resins in absorbing dissolved inorganic nitrogen and the efficiency of 0.2 mol/L KCl in releasing inorganic nitrogen ions back into solution from ion exchange resins. Results showed that domestic ion exchange resins could extract more than 99% inorganic nitrogen ions in the standard series solutes and the 0.2 mol/L KCl extraction efficiencies were >90% after three times of extraction. A field experiment was conducted in a planted coniferous forest at Qianyanzhou station, where both the traditional rainfall-gathering method and the ion-exchange resin columns method were deployed. Ion exchange resin columns were used to absorb nitrogen ions in rainfall and throughfall. After a month exposure, the nitrogen ions were extracted out from the resin columns

基金项目: 国家重点基础研究资助项目(2010CB833500); 国家自然科学基金重大资助项目(30590381); 中国科学院知识创新工程重要方向性资助项目(KZCX2-YW-432)

收稿日期: 2009-12-07; 修订日期: 2010-02-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

back to solute with 0.2 mol/L KCl. Results indicated that measurements of the two methods were in agreement with each other throughout the whole year, confirming that the ion-exchange resin columns could successfully detect the seasonal dynamics of wet nitrogen deposition. Further, the ion-exchange resin column method performed better in discriminating the amount of nitrate and ammonium composition, owing to its ability in capturing ions by the functional groups with different electric charges. Therefore, this ion-exchange resin columns method is practical to be used at remote sites. According to the measurements of the ion-exchange resin columns method, the total annual inorganic nitrogen deposition in throughfall in Qianyanzhou planted coniferous forest was $9.19 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, similar to the neighboring natural coniferous forest but lower than the broadleaf forest. Inorganic nitrogen deposition showed obvious seasonal variations within the whole year. The nitrogen deposition in throughfall at Qianyanzhou peaked in May to July and ammonium accounted for more than 80% of the total wet deposition, which was mainly due to ammonia volatilization after the rice topdressing. In addition, the decomposition of animal carcass and plant residues caused by the high temperature and humidity also contributed greatly to nitrogen deposition in summer. In January to February, due to NO_x emission as a result of burning coal for heating, there was another peak of nitrogen deposition in throughfall, with nitrate being the dominant form. Nitrogen deposition in throughfall is linearly correlated with precipitation in Qianyanzhou planted coniferous forest. The annual precipitation in the study year is about 450 mm, lower than the mean annual value of this site. Therefore, the nitrogen deposition at this planted coniferous forest site is likely more than $10 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$.

Key Words: nitrogen deposition; ion-exchange resin; throughfall; planted coniferous forest

从 1860 年到 2000 年,人类活动产生并排放到大气中的反应性氮由 15 TgN/a 增加到 165 TgN/a ,其中 70% 通过沉降到达地表^[1]。大气氮沉降是自然生态系统重要的氮素来源^[2],沉降量的增加必然会对自然生态系统的生物地化循环产生影响^[3]。穿透雨是大气降水经穿过林冠进入林内的降水,是森林生态系统养分平衡的重要因子,直接影响林地土壤的水分分布以及养分的循环利用^[4-6]。因此,穿透雨中氮沉降通量的定量评估是研究森林生态系统接收大气氮素沉降的关键,是理解森林生态系统对大气氮沉降的反馈机制的前提^[7]。

穿透雨会受到海拔、地形、植被类型和边缘效应的影响,空间异质性很强^[8-10],通过收集降水观测穿透雨氮沉降通量的传统方法工作量大,采样点分布因此受到很大限制,并且会由于样品无法及时分析而引起氮沉降组分变化。离子交换树脂(Ion-exchange Resin, IER)的交换官能团能在水溶液中能离解出某些阳离子(如 H^+ 或 Na^+)或阴离子(如 OH^- 或 Cl^-),同时吸附溶液中原有的其他阳离子或阴离子,因此阴离子交换树脂可以将降水中的 NO_3^- 、 NO_2^- 固定在树脂中带正电荷的官能团上,而阳离子交换树脂则可把 NH_4^+ 固定在树脂中带负电荷的官能团上,从而增强他们的稳定性。并且 NO_3^- 、 NO_2^- 和 NH_4^+ 可以被中性盐溶液重新浸提到溶液中,测定其浓度后可计算得到离子交换树脂交换硝态氮和铵态氮的量。该方法不需要收集降水样品只需要定期更换离子交换树脂即可获得大气氮素湿沉降通量,离子交换树脂法在降水氮沉降和穿透雨野外观测中已有广泛应用^[11-15]。

我国离子交换树脂在氮素循环中的应用目前仅限于对土壤有效氮的测定^[16-18],且这些研究中多使用美国的 Amberlite 系列离子交换树脂,其价格通常为国产离子交换树脂的数十倍。本研究对国药集团(沪试)生产的 717 阴离子交换树脂和 732 阳离子交换树脂的交换效率和被浸提回收效率进行检验,通过与传统方法的对比观测分析国产离子树脂测定大气氮素湿沉降的可行性,并以千烟洲人工针叶林为例探讨离子树脂法测定森林穿透雨氮沉降通量动态的适用性。

1 材料和方法

1.1 试验站点

千烟洲试验站位于江西省泰和县 ($26^\circ 44' 48'' \text{ N}$, $115^\circ 04' 13'' \text{ E}$), 试验区海拔多在 100 m 左右,具有典型亚

热带季风气候特征。年平均气温为 17.9℃,日照时数 1 406 h,太阳年总辐射量 4 349 MJ/m²,≥0℃活动积温 6 523℃,无霜期 323 d。年平均降雨量为 1 491 mm,3—6 月份降雨较集中,炎热的夏季降水偏少。主要土壤类型为红壤,成土母质多为红色砂岩,属典型的红壤丘陵地貌。土地利用类型以人工林为主,造林时间为 1984 年,主要造林树种为湿地松(*Pinus elliotii*)、马尾松(*Pinus massoniana*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等。造林前曾是被人为破坏的荒山秃岭,经过 20 多年的恢复,景观发生了巨大变化,森林高度郁闭,生物种类明显增加。

1.2 树脂交换效率测定

离子交换树脂常用的原料为苯乙烯或丙烯酸酯,通过聚合反应生成具有三维空间的立体网络结构骨架,再在骨架上导入不同类型的化学活性基团(通常为酸性或碱性基团)而制成。常用于生物地化循环研究的离子交换树脂有美国的 Amberlite^[19]、Dowex^[15]和 Rexin^[11]以及英国的 Doulite^[20]等,但是进口树脂的售价通常为国产树脂的数十倍,因此,本研究选用国药集团(沪试)生产的 717 阴离子交换树脂和 732 阳离子交换树脂,它们分别相当于 Amberlite 系列中的 IRA-400 和 IR-120。由于未见国产离子交换树脂用于大气湿沉降通量的观测研究,本研究中使用 NO₃⁻和 NH₄⁺混合标准液检验 717、732 离子交换树脂的交换效率和中性盐溶液对 NO₃⁻和 NH₄⁺的浸提效率。离子树脂交换效率依据下式计算:

$$E_c = \left(1 - \frac{C_s - C_a + C_b}{C_s} \right) \times 100\%$$

式中, E_c 表示离子树脂的交换效率(%), C_s 是标准溶液 NO₃⁻或 NH₄⁺的浓度(mg/L), C_a 为置换后溶液 NO₃⁻或 NH₄⁺浓度(mg/L), C_b 为置换后对照处理溶液中 NO₃⁻或 NH₄⁺浓度(mg/L)。

交换后的离子树脂用 0.2mol/L 的 KCl 浸提液 100 ml 振荡浸提,KCl 溶液浸提率的定义如下:

$$E_t = \left(1 - \frac{C_s - C_a + C_b + C_k}{C_s - C_a + C_b} \right) \times 100\%$$

式中, E_t 表示 KCl 溶液对交换后树脂的浸提效率(%), C_k 是 KCl 浸提后溶液 NO₃⁻或 NH₄⁺的平均浓度(mg/L), C_s 、 C_a 、 C_b 的定义同上。

1.3 样品采集

2008 年 6 月到 2009 年 5 月,在千烟洲试验站分别用降水收集法和离子交换树脂法进行大气氮素湿沉降通量的观测,用离子交换树脂法进行人工针叶林穿透雨氮素湿沉降通量观测,研究期间降水和温度的变化情况如图 1。大气降水氮素湿沉降的观测装置至于试验站楼顶,采样频率为月,降水收集法设置 3 个重复,离子交换树脂设置 5 个重复。人工针叶林穿透雨观测位于 ChinaFlux 千烟洲站的通量塔附近实验林内,设置 5 个重复,分散置于林冠均匀的冠层下方。样品定期送回 CERN 综合中心理化实验室分析,气象数据由千烟洲试验站的标准气象观测场观测获得。

离子交换树脂法测定氮素湿沉降通量装置如图 2 所示,该装置可用木桩等固定,确使漏斗口高于地面 1 m 以上,以防泥土溅入。测定前向 PVC 内管中分别装入阴离子树脂和阳离子树脂各 10 g,两种树脂分层放置,尽量避免混合。用去离子水冲去离子树脂所吸附的杂质,并使树脂在内管中形成紧实的树脂柱,以充分交换降水中的 NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺。

1.4 NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺浓度测定及氮沉降通量计算

模拟实验和实际观测中 NO₃⁻、NO₂⁻和 NH₄⁺浓度均用 CERN 综合中心理化实验室的流动分析仪(BRAN

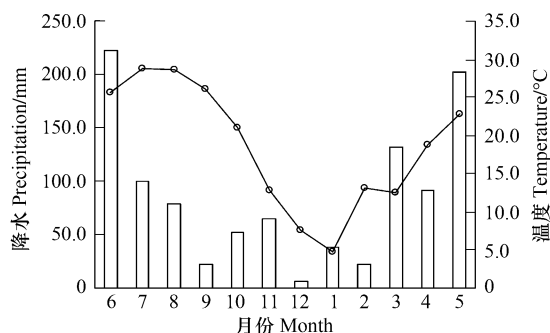


图 1 研究期间千烟洲降水和温度变化

Fig. 1 Monthly precipitation and temperature in the study period

+ LUEBBE, AACE3, Germany) 测定, 样品测定速度为 50 个/h。

降水收集法测定的氮沉降通量 D_{pp} ($\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 的计算方法如下:

$$D_{pp} = \frac{C \times P}{100}$$

式中, C 为降水中铵态氮或硝态氮浓度 (mg/L); P 为每月降水量 (mm); 100 为单位换算系数。

离子树脂法测定的氮沉降通量 D_{IER} ($\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 的计算方法如下:

$$D_{\text{IER}} = \frac{C_{\text{ex}} \times V_{\text{ex}}}{100A}$$

式中, C_{ex} 为浸提液中铵态氮或硝态氮浓度 (mg/L); V_{ex} 为浸提液体积 (L); A 为图 1 中漏斗口面积 (m^2); 100 为单位换算系数。

2 结果与分析

2.1 离子树脂交换效率

(1) 离子交换树脂交换率 离子交换树脂有一定的 NO_3^- 和 NH_4^+ 本底含量, 对照中离子交换树脂交换后溶液中 NO_2^- 和 NO_3^- 的总浓度为 $(6.7 \times 10^{-3}) \pm (2.8 \times 10^{-3}) \text{ mg/L}$, NH_4^+ 的浓度为 $(9.0 \times 10^{-2}) \pm (0.6 \times 10^{-3}) \text{ mg/L}$, 该浓度可以作为离子交换树脂的本底值。扣除离子交换树脂的本底值后, 不同浓度交换液中 NO_3^- 和 NH_4^+ 的含量都极低, 10 g717 阴离子交换树脂和 10 g732 阳离子交换树脂对 6、4、2、1、0.5 mg/L 混合标准溶液中 NO_3^- 和 NH_4^+ 的置换效率分别都达到 99% 以上(表 1)。

(2) 离子交换树脂回收率 0.2 mol/L 的 KCl 溶液对交换后的树脂进行一次浸提时, NO_3^- 和 NH_4^+ 的回收率分别仅有 30% 和 70% 左右, 浸提次数增加后 NO_3^- 和 NH_4^+ 的浸提回收率明显增加, 通过 3 次浸提后 2 mg/L 浓度以下的模拟降水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 的回收率都能达到 95% 以上, 而 6 mg/L 和 4 mg/L 的模拟降水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 的回收率也达到 90% 以上(表 2)。

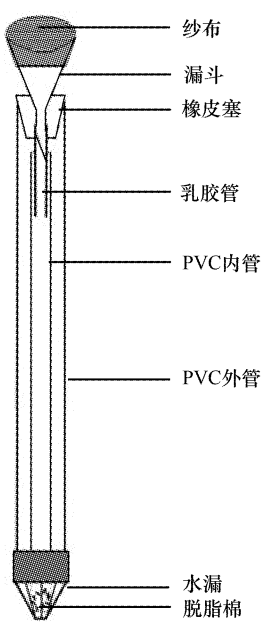


图 2 离子树脂法测定氮沉降装置
Fig.2 Ion exchange resin collector design

表 1 717 和 732 离子交换树脂对硝态氮和氨态氮的交换效率
Table 1 Exchanging efficiency of 717 ion-exchange resin for nitrate and 732 ion-exchange resin for ammonia

浓度 Concentration/(mg/L)	交换效率 Exchange efficiency/%	
	NO_3^-	NH_4^+
6.0	99.0 ± 0.1	99.1 ± 0.3
4.0	99.1 ± 0.2	99.5 ± 0.2
2.0	99.2 ± 0.3	99.2 ± 0.8
1.0	99.4 ± 0.5	99.3 ± 0.6
0.5	100.0 ± 0.1	99.2 ± 1.0

表 2 KCl 溶液 (mol/L) 对离子交换树脂中硝态氮和氨态氮的回收率
Table 2 KCl (mol/L) extraction efficiency of anion-loaded resins

浓度 Concentration (mg/L)	NO_3^- 浸提回收率 Extraction efficiency of NO_3^- /%			NH_4^+ 浸提回收率 Extraction efficiency of NH_4^+ /%		
	1 次浸提 1st extraction	2 次浸提 2nd extraction	3 次浸提 3rd extraction	1 次浸提 1st extraction	2 次浸提 2nd extraction	3 次浸提 3rd extraction
6.0	33.2 ± 0.3	77.5 ± 0.1	93.0 ± 0.1	67.7 ± 0.5	76.9 ± 0.1	90.9 ± 0.7
4.0	32.6 ± 0.4	77.1 ± 0.1	92.9 ± 0.1	67.9 ± 0.3	77.6 ± 0.6	92.8 ± 0.7
2.0	31.9 ± 0.4	76.9 ± 0.4	96.0 ± 2.1	70.8 ± 0.6	84.3 ± 0.6	95.2 ± 2.7
1.0	31.3 ± 1.5	76.0 ± 0.1	95.3 ± 2.5	77.0 ± 1.7	93.3 ± 5.9	98.5 ± 1.5
0.5	34.2 ± 1.5	76.5 ± 0.5	95.5 ± 0.5	86.5 ± 4.0	94.0 ± 0.4	100.0 ± 0.0

(3) 与传统降水收集测定结果比较 离子交换树脂法测定的千烟洲生态站大气氮素湿沉降通量与传统降水收集法测定结果之间相关性显著 ($P = 0.003$), 且拟合直线接近 1:1 线 (图 3)。但两种方法测得的千烟洲生态站全年大气氮素沉降通量略有差别, 离子交换树脂法测定值为 $6.63 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 高于传统雨水收集法测定值 $1.69 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.2 离子树脂法测定千烟洲人工针叶林穿透雨氮沉降通量

2008 年 6 月到 2009 年 5 月千烟洲人工林穿透雨中的氮沉降通量为 9.19 kgN/hm^2 , 高于大气降水的氮沉降通量 2.56 kgN/hm^2 。穿透雨的氮沉降通量在各月间的波动较大, 其中硝态氮沉降通量分别在夏季和冬季出现两个峰值 (图 4A), 而铵态氮沉降通量在夏季的 5—7 月份明显高于其他月份 (图 4B)。穿透雨中无机氮沉降通量全年呈双峰型变化, 在夏季的 7 月份和冬季的 1 月分别出现沉降通量高峰 (图 4C), 而 9—12 月份的氮沉降通量较低。氮沉降通量组分在各月间的变化波动很大, 一般夏季硝态氮和铵态氮之比 < 1 , 而冬季硝态氮和铵态氮之比 > 1 (图 4D)。在氮沉降通量最小的 11 月份, 硝态氮沉降通量约为铵态氮沉降通量的 3 倍, 而在沉降通量较高的 5 月份, 硝态氮沉降量不足铵态氮沉降量的 $1/6$, 全年穿透雨氮沉降中硝态氮占总氮沉降的 38.1%。

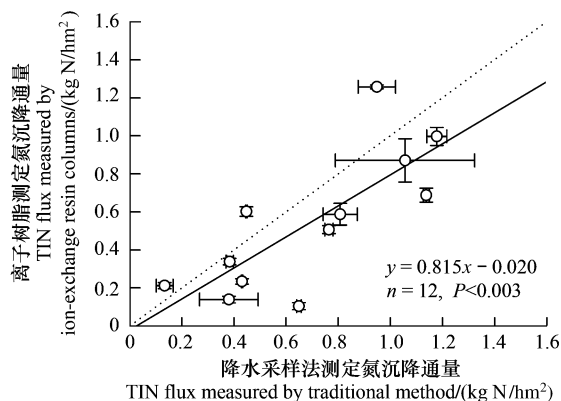


图3 离子交换树脂法和常规雨水采样法测定大气氮素湿沉降结果比较

Fig.3 Results comparison between the traditional method and ion-exchange resin columns

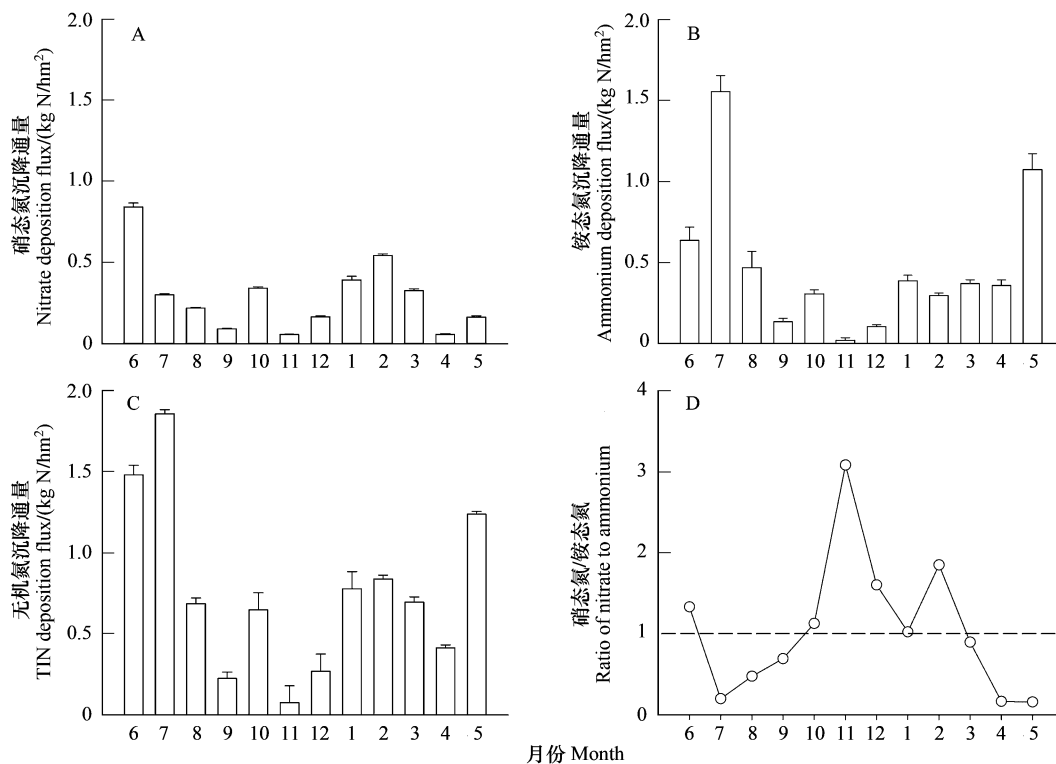


图4 穿透雨各组分氮沉降通量与比例关系

Fig.4 Components and their ratio in nitrogen deposition flux in throughfall

千烟洲人工针叶林穿透雨中氮沉降通量随降水量的增加显著增加(图5),其中沉降通量较大而又偏离回归曲线的点为7月份观测到的氮沉降通量值,可能是由于7月份当地农业施肥活动的人为干扰引起。硝态氮沉降通量和铵态氮沉降通量与降水量之间也存在正相关关系,但相关性达不到显著。穿透雨的总氮沉降通量和铵态氮通量随着月平均温度的升高而升高,相关性不显著,硝态氮沉降通量与月平均温度之间基本没有相关性。

3 讨论

3.1 离子树脂法测定大气氮素湿沉降通量

离子交换树脂法测定的千烟洲各月大气降水氮沉降通量与传统降水收集法的测定值之间相关性显著(图3),且拟合曲线接近于1:1线,因此离子交换树脂法的测定结果可以很好地反映大气氮素湿沉降通量的时间变化趋势。传统降水收集法测定氮素沉降通量,由于采样时间较长,降水中的铵态氮会被硝化细菌氧化^[21],全年氮沉降通量中硝态氮平均含量高达55%,而江西临近地区降水高频采样研究(每天或每周收集降水样品分析)^[22-24]发现硝态氮仅占全年氮沉降的33%—46%。离子交换树脂能将硝态氮和铵态氮分别固定在不同的官能团上,增加了他们的稳定性,离子交换树脂法测定结果中硝态氮沉降的平均含量为35.4%,符合雨水中实际的氮素形态比例组成。

研究期间离子交换树脂法和降水收集法测定的氮沉降通量之间的差异不显著($n = 12, P = 0.346$),但全年的氮沉降通量后者却比前者高 $1.69 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。产生这种差异的原因,首先因为常规降水采样方法每月收集1次降水,采样时间相对较长,降水中的有机氮在微生物作用下可能发生矿化,使有机氮转换为无机氮。另外,随着沉降通量的增大,两种方法测定值的拟合曲线逐渐偏离1:1线(图3),这可能因为随着溶液浓度的增加树脂交换效率和KCl溶液的浸提效率有所下降(表1,表2),从而产生误差。也可能是当降水强度大时离子树脂柱中的水流速度过快, NO_2^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 不能与离子树脂彻底交换所导致。所以,今后的研究中可以改用内径更小的PVC内管,或增加离子交换树脂用量,来达到增加离子树脂柱高度,使降水中的氮素离子与离子树脂充分交换的目的。增加中性盐溶液的置换次数,保证交换和浸提的充分,也可从另一方面增强试验结果准确性。

3.2 离子树脂法测定森林生态系统穿透雨氮沉降通量

研究期间千烟洲人工针叶林的穿透雨氮沉降通量为 $9.19 \text{ kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,与临近的福建南平和江西大岗山的人工针叶林穿透雨氮沉降通量相当,低于湖南、广东、广西等临近区域热带、亚热带阔叶林的穿透雨氮沉降通量(表3),可见,离子交换树脂法可以用于森林穿透雨氮沉降通量测定。

研究结果表明千烟洲人工针叶林穿透雨氮沉降通量在夏季5—7月份出现高峰(图4C),这与当地农业活动,温度、降雨量等因素的变化规律一致。千烟洲地区5—7月份的降水量占全年降水的50%,使大气中和植物体表的氮素得到充分的洗刷^[25],因此穿透雨氮沉降通量在这些月份出现高峰值。千烟洲人工针叶林穿透雨的氮素沉降通量在5月份和7月份最高,且这2个月的沉降通量中铵态氮含量高达80%以上(图4D)。该地区的双季稻插秧时间在每年的4月底和7月中旬,研究表明插秧后追肥的尿素在淹水条件下会引起大量的 NH_3 挥发^[26-27],并且挥发的 NH_3 中有90%经大气中的酸作用转化成 NH_4^+ ,84%的 NH_3 以 NH_4^+ 形态进入降水中^[28],这可能是造成5月和7月大气沉降中铵态氮通量大、比例高的主要原因。另外夏季气温高、湿度大,地表、地下动植物残体腐烂加速,大量 NH_3 、 NO_2 等气体挥发也是氮沉降通量增加的原因^[29]。穿透雨的氮沉降通量在冬季的1、2月份也出现小高峰,可能与当地炭火取暖释放大量的 NO_x 有关^[30]。由此可见,离子树脂法的测

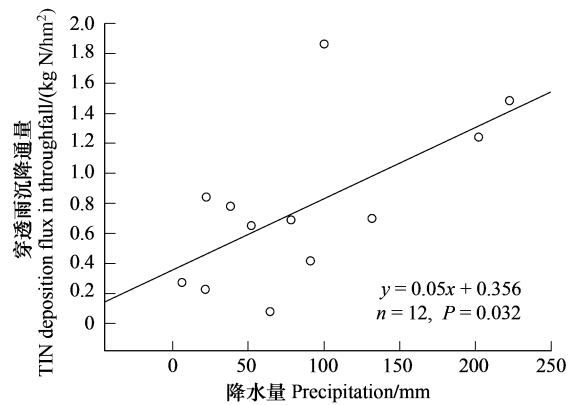


图5 穿透雨氮沉降通量与降水量的关系

Fig. 5 Relationship between monthly TIN deposition flux and precipitation

定结果可以反映千烟洲地区人工针叶林氮沉降的季节变化规律。

表 3 我国森林生态系统穿透雨中氮沉降通量
Table 3 Nitrogen deposition in throughfall in different forest ecosystem

研究地点 Site	降水量 Precipitation/mm	森林类型 Forest type	氮沉降通量 TIN deposition flux /(kgN hm ⁻² a ⁻¹)	资料来源 Reference
湖南蔡家堂 Caijiatang, Hunan	1232	亚热带针阔混交林	33.7	[23]
广东流溪河 Liuxihe, Guangdong	1620	亚热带阔叶林	11.9	[23]
云南西双版纳 Xishuangbanna, Guangxi	1557	热带季雨林	10.97	[31]
黑龙江帽儿山 Maoershang, Heilongjiang	723.8	兴安落叶松	9.1	[32]
四川平武 Pingwu, Sichuan	805.3	白桦林	3.75	[33]
		冷杉林	4.79	[33]
		紫果云杉林	5.22	[33]
福建南平 Nanping, Fujian	1637	人工杉木林	9.1	[34]
江西大岗山 Dagangshan, Jiangxi	1300	人工杉木林	9.78	[35]
江西千烟洲 Qianyanzhou, Jiangxi	1392.0	人工杉木林	10.1	[36]
江西千烟洲 Qianyanzhou, Jiangxi	1034.6	人工针叶林	9.19	本研究

3.3 千烟洲人工针叶林氮沉降负荷

一般认为,当无机氮沉降小于 25 kgN·hm⁻²·a⁻¹时,大部分被保留在生态系统中,超过该值时,造成过饱和^[37]。但也有实验证明,氮沉降在 10—25 kgN·hm⁻²·a⁻¹的范围内时,森林生态系统的氮输出就会出现强烈反应^[38-39],增加森林对寒冷、霜冻、病害等胁迫的敏感性^[40],影响整个系统的碳氮循环。2008 年 6 月到 2009 年 5 月,千烟洲人工针叶林通过穿透雨供接收到大气氮素湿沉降 9.19 kgN/hm²,由于千烟洲人工针叶林穿透雨氮沉降通量与降水量之间存在显著的正相关关系(图 5),而本研究期间的年降水量仅有 1034.6 mm,比多年平均值低约 450 mm,因此在降水较多的年份由于冲刷充分,穿透雨氮沉降通量会有所增加,接近或超过 10 kgN·hm⁻²·a⁻¹的氮沉降临界值。因此需要加强对千烟洲人工针叶林生态系统氮沉降和氮素输出项的持续综合观测研究,以确定输入氮素在该生态系统中的存留状态,从而判断目前的氮沉降水平是否达到千烟洲人工针叶林的氮素饱和的临界负荷。

4 结论

国产 717 和 732 离子交换树脂对硝态氮和铵态氮的交换效率高达 99% 以上,0.2mol/L 的 KCl 溶液经过 3 次浸提后,对以交换树脂的浸提回收率也在 90% 以上。离子交换树脂法可以很好地反映大气氮沉降通量及其季节变化特征,并且在采样周期较长时也能很好地测定氮沉降的组分组成,是用于野外站点林内穿透雨氮沉降通量观测的有效方法。但是在野外观测中,要保证离子交换树脂柱的一定高度,以使降水中的硝态氮和铵态氮与离子树脂交换完全。

千烟洲人工针叶林穿透雨氮沉降通量为 9.19 kgN·hm⁻²·a⁻¹,与降水量之间相关性显著。氮沉降通量在全年内呈双峰型变化,夏季的 5—7 月份和冬季的 1—2 月份分别出现氮沉降通量高峰,且夏季氮沉降以铵态氮为主,冬季以硝态氮为主。千烟洲人工针叶林穿透雨氮沉降通量与附近地区针叶林穿透雨氮沉降通量值近似,低于临近区域阔叶林穿透雨氮沉降通量水平,千烟洲人工针叶林穿透雨沉降水平已可能接近导致森林生态系统的氮输出出现强烈反应的临界值。

References:

[1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, Boyer E W, Howarth R W, Seitzinger S P, Asner G P, Cleveland C C, Green P A, Holland E A, Karl D M, Michaels A F, Porter J H, Townsend A R, Vorosmarty C J. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, 2004, 70(2): 153-226.

- [2] Pearson J, Stewart G R. The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. *New Phytologist*, 1993, 125(2):283-305.
- [3] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, Likens G E, Matson P A, Schindler D W, Schlesinger W H, Tilman D G. Human alteration of the global nitrogen cycle: sources and consequences. *Ecological Applications*, 1997, 7(3):737-750.
- [4] Guo Z, Shao M. Precipitation, soil water and soil water carrying capacity of vegetation. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(5): 522-528.
- [5] Marin C T, Bouten W, Sevink J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *Journal of Hydrology*, 2000, 237(1/2):40-57.
- [6] Carlyle-Moses D E. Throughfall, stemflow, and canopy interception loss fluxes in a semi-arid Sierra Madre Oriental matorral community. *Journal of Arid Environments*, 2004, 58(2):181-202.
- [7] Thimonier A. Measurement of atmospheric deposition under forest canopies: Some recommendations for equipment and sampling design. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1998, 52(3):353-387.
- [8] Robson A J, Neal C, Ryland G P, Harrow M. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *Journal of Hydrology*, 1994, 158(1/2):107-122.
- [9] Lovett G M, Bowser J J, Edgerton E S. Atmospheric deposition to watersheds in complex terrain. *Hydrological Processes*, 1997, 11(7): 645-654.
- [10] Weathers K C, Cadenasso M L, Pickett S T. Forest edges as nutrient and pollutant concentrators: Potential synergisms between fragmentation, forest canopies, and the atmosphere. *Conservation Biology*, 2001, 15(6): 1506-1514.
- [11] Klopatek J M, Barry M J, Johnson D W. Potential canopy interception of nitrogen in the Pacific Northwest, USA. *Forest Ecology and Management*, 2006, 234(1/3): 344-354.
- [12] Kochy M, Wilson S D. Nitrogen deposition and forest expansion in the northern Great Plains. *Journal of Ecology*, 2001, 89(5): 807-817.
- [13] Langlois J L, Johnson D W, Mehuys G R. Adsorption and recovery of dissolved organic phosphorus and nitrogen by mixed-bed ion-exchange resin. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67(3):889-894.
- [14] Fenn M, Poth M, Arbaugh M. A throughfall collection method using mixed bed ion exchange resin columns. *The Scientific World Journal*, 2002, 2:122-130.
- [15] Simkin S M, Lewis D N, Weathers K C, Lovett G M, Schwarz K. Determination of sulfate, nitrate, and chloride in throughfall using ion-exchange resins. *Water, Air & Soil Pollution*, 2004, 153(1):343-354.
- [16] Chen F, Zeng D, Fan Z, Chen G. Comparative nitrogen mineralization and its availability in certain woody plantations in Keerqin Sand Lands, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(2): 341-348.
- [17] Fang Y T, Mo J M, Zhou G Y. Response of soil NO_3^- -N dynamics to N additions in Dinghushan forests, assessed by ion-exchange resin bag method. *Ecology and Environment*, 2005, 14(4): 483-487.
- [18] Mo J, Yu M, Kong G. The dynamics of soil NH_4^+ -N and NO_3^- -N in a pine forest of Dinghushan, as assessed by ion exchange resin bag method. *Acta Phytocologica Sinica*, 1997, 21(4): 335-341.
- [19] Fenn M E, Poth M A. Monitoring nitrogen deposition in throughfall using ion exchange resin columns: A field test in the San Bernardino Mountains. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2007-2014.
- [20] Nilsson L O, Wallander H, Baath E, Falkengren-Grerup U. Soil N chemistry in oak forests along a nitrogen deposition gradient. *Biogeochemistry*, 2006, 80(1): 43-55.
- [21] Karlsson V, Lauren M, Peltoniemi S. Stability of major ions and sampling variability in daily bulk precipitation samples. *Atmospheric Environment*, 2000, 34(28):4859-4865.
- [22] Chen N, Hong H, Xiao J, Zhang L, Wang J. Dry deposition of atmospheric nitrogen to Jiulong River watershed in southeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8):2602-2607.
- [23] Chen X, Mulder J. Atmospheric deposition of nitrogen at five subtropical forested sites in South China. *Science of the Total Environment*, 2007, 378(3):317-330.
- [24] Wang Q, Wang X, Lin W, Zhong L, Dong H, Liu H. Study on sources of inorganic nitrogen in wet deposition in Dinghushan mountain. *Research of Environment Science*, 2008, 21(6):156-160.
- [25] Potter C S, Ragsdale H L, Swank W T. Atmospheric Deposition and foliar leaching in a regenerating southern Appalachian forest canopy. *Journal of Ecology*, 1991, 79(1):97-115.
- [26] Zheng S, Liu D, Nie J, Dai A, Xiao J. Fate and recovery efficiency of controlled release nitrogen fertilizer in flooding paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2):137-142.
- [27] Su C, Yin B, Zhu Z, Shen Q. Ammonia volatilization loss of nitrogen fertilizer from rice field and wet deposition of atmospheric nitrogen in rice growing season. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):1884-1888.
- [28] Xu R. NH_4^+ in rainfall and its function to soil acidification. *Agro-environmental Protection*, 1996, 15(3): 139-140.

- [29] Jia J, Zhang Y, Cai X B, Liu X. A dynamic changes of wet deposition of nitrogen in southeast Tibet; taking Linzhi experiment station as an example. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4):1907-1913.
- [30] Ye X, Wang Z, An J, Matsuda K, Zhu B, Chen W. Analysis of the spatial-temporal distribution and ion features of components of precipitation in East Asia. *Climatic and Environment Research*, 2005, 10(1): 115-123.
- [31] Sha L, Zheng Z. Biogeochemical cycling of nitrogen at a tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna, SW China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(6):689-694.
- [32] Liu S. Biogeochemical cycling characteristics of Dahurian Larch plantation ecosystem. *Chinese Journal of Ecology*, 1992, 11(5): 1-6.
- [33] Gong H D, Wang K Y, Yang W Q. Nutrient characteristics of throughfall and stemflow in three forests at the Subalpine of western Sichuan. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(5):14-20.
- [34] Fan H B. Effects of canopy interception by Chinese fir forests on precipitation chemistry. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(4):2-8.
- [35] Kan X Y, Pan W C. Dynamic properties of nitrogen in the Chinese fir plantation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(003):201-206.
- [36] Chen Y, Lin Y, Li J, Liu Y, Yang R. Rainfall process and nutrient dynamics of artificial Chinese fir plantation in Jiangxi Qianyanzhou experimental station. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(1): 74-76.
- [37] Aber J D, McDowell W J, Nadelhoffer K, Melillo J M. Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems. *BioScience*, 1998, 48(11):921-934.
- [38] De Vries W, Reinds G J, Gundersen P, Sterba, H. The impact of nitrogen deposition on carbon sequestration in European forests and forest soils. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1151-1173.
- [39] Li D, Mo J, Fang Y, Peng S. Impact of nitrogen deposition on forest plants. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [40] Xiao H L. Effects of increased deposition of atmospheric nitrogen on forest nutrition and stress of susceptibility. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(6): 378-399.

参考文献:

- [4] 郭忠升, 邵明安. 雨水资源, 土壤水与土壤水分植被承载力. *自然资源学报*, 2003, 18(5): 522-528.
- [16] 陈伏生, 曾德慧, 范志平, 陈广生. 沙地不同树种人工林土壤氮素矿化过程及其有效性. *生态学报*, 2006, 26(2): 341-348.
- [17] 方运霆, 莫江明, 周国逸. 离子交换树脂袋法研究森林土壤硝态氮及其对氮沉降增加的响应. *生态环境*, 2005, 14(4): 483-487.
- [18] 莫江明, 郁梦德. 鼎湖山马尾松人工林土壤硝态氮和铵态氮动态研究. *植物生态学报*, 1997, 21(4): 335-341.
- [22] 陈能汪, 洪华生, 肖健, 张珞平, 王吉莘. 九龙江流域大气氮干沉降. *生态学报*, 2006, 26(8): 2602-2607.
- [24] 王茜, 王雪梅, 林文实, 钟流举, 董汉英, 刘海岗. 鼎湖山无机氮湿沉降来源研究. *环境科学研究*, 2008, 21(6): 156-160.
- [26] 郑圣先, 刘德林, 聂军, 戴平安, 肖剑. 控释氮肥在淹水稻田土壤上的去向及利用率. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(2): 137-142.
- [27] 苏成国, 尹斌, 朱兆良, 沈其荣. 稻田氮肥的氨挥发损失与稻季大气氮的湿沉降. *应用生态学报*, 2003, 14(11): 1884-1888.
- [28] 徐仁扣. 我国降水中 NH_4^+ 及其在土壤酸化中的作用. *农业环境保护*, 1996, 15(3): 139-140.
- [29] 贾钧彦, 张颖, 蔡晓布, 刘学军. 藏东南大气氮湿沉降动态变化——以林芝观测点为例. *生态学报*, 2009, 29(4):1907-1913.
- [30] 叶小峰, 王自发, 安俊岭, 松田秀和, 朱彬, 陈万隆. 东亚地区降水离子成分时空分布及其特征分析. *气候与环境研究*, 2005, 10(1): 115-123.
- [31] 沙丽清, 郑征. 西双版纳热带季节雨林生态系统氮的生物地球化学循环研究. *植物生态学报*, 2002, 26(6): 689-694.
- [32] 刘世荣. 兴安落叶松人工林生态系统营养元素生物地球化学. *生态学杂志*, 1992, 11(5): 1-6.
- [33] 巩合德, 王开运, 杨万勤. 川西亚高山 3 种森林群落穿透雨和茎流养分特征研究. *林业科学*, 2005, 41(5): 14-20.
- [34] 樊后保. 杉木林截留对降水化学的影响. *林业科学*, 2000, 36(4): 2-8.
- [35] 湛小勇, 潘维伟. 杉木人工林生态系统中氮素的动态特征. *生态学报*, 1989, 9(3): 201-206.
- [36] 陈永瑞, 林耀明, 李家永, 刘允芬, 杨汝荣. 江西千烟洲试区杉木人工林降雨过程及养分动态研究. *中国生态农业学报*, 2004, 12(1): 74-76.
- [39] 李德军, 莫江明, 方运霆, 彭少麟. 氮沉降对森林植物的影响. *生态学报*, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [40] 肖辉林. 大气氮沉降的增加对森林营养和胁迫敏感性的影响. *农业环境保护*, 2000, 19(6): 378-399.

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊*

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1~9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 30 卷 第 24 期 (2010 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 30 No. 24 2010

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 70.00 元