

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

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(卷终)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征 高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)

杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征 徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)

太原市采暖季 PM_{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价 李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)

成都市城区 PM_{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征 李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)

北京市臭氧的时空分布特征 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)

南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析 安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)

祁连山中段降水化学的环境意义研究 李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)

中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化 孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)

本底大气 CO₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估 刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)

轻型汽油车 CH₄ 和 N₂O 排放因子研究 何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)

煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究 孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)

春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N₂O 的分布和海-气交换通量 王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)

珠江口水体组分的吸收特性分析 王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)

河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例 闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)

基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究 魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)

百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征 冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)

自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响 郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)

垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制 张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)

三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响 张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)

纳米 TiO₂ 对底泥中汞释放及活化的影响 张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)

首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析 高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)

石化工业园区有毒废水来源识别研究 杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)

污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子 李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)

2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究 刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)

硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征 席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)

MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析 魏健,宋永会,赵乐(4610)

制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究 曾国驱,贾晓珊(4618)

生物滤池工艺的数值模拟与运行优化 邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)

气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响 李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)

给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究 王建军,李田,张颖(4642)

北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染 白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)

电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险 唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)

广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价 谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)

崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征 耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)

啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析 周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响 陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)

土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响 李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)

上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析 唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)

某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究 刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)

海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究 孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)

盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素 汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)

不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性 王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)

碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响 周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)

国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)

我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考 江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)

《环境科学》第35卷(2014年)总目录 (4767)

《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)

氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响

陈高起¹, 傅瓦利¹, 罗亚晨¹, 高文龙², 李胜功², 杨浩^{2*}

(1. 西南大学地理科学学院, 重庆 400715; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于低剂量、多形态的 N 添加控制实验, 以大兴安岭寒温带针叶林为研究对象, 通过长期持续的原位增 N 处理, 测定了 2010 年、2012 年和 2013 年生长季初期(5 月)和生长旺季(8 月)0~10 cm 土壤有效氮(NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N) 含量以及土壤 pH 值. 结果表明, 生长季初期和生长旺季土壤有效氮均以 NH_4^+ -N 为主, NO_3^- -N 含量较低, 其中 NH_4^+ -N 含量占无机氮含量的 96% 以上. 随着增 N 时间的延长, 同生长旺季相比, 增 N 对生长季初期 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 影响较为明显, 且主要受施 N 类型影响. 与此相反, 生长旺季 0~10 cm 土壤 NO_3^- -N 含量高于生长季初期. N 输入对生长季初期和生长旺季土壤 NO_3^- -N 影响较为明显, 且低 N 处理更倾向于促进 0~10 cm 土壤 NO_3^- -N 的富集. 随着时间的延长, 土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 对增 N 的响应都由前期的不显著向后期的显著转变. 增 N 对生长季初期和生长旺季 0~10 cm 土壤 pH 值影响显著, 其中低 N 处理的土壤和生长旺季阶段土壤 pH 值相对较低. 随着增 N 时间的延长, 土壤 pH 值对增 N 的响应也由前期的不显著向后期的显著转变. 长期持续的增 N 处理已经使大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤产生了明显的酸化.

关键词: 氮沉降; 森林土壤; 氮循环; 无机氮; 土壤酸化

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4686-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.12.036

Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season

CHEN Gao-qi¹, FU Wa-li¹, LUO Ya-chen¹, GAO Wen-long², LI Sheng-gong², YANG Hao²

(1. School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on a low-level and multi-form N addition control experiment, this study took cold-temperate coniferous forest in Daxing'an Ling as the research object. After long-term and continuous nitrogen addition in situ, the available nitrogen (NH_4^+ -N & NO_3^- -N) contents and pH values of the soil (0-10 cm) were measured in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2010, 2012 and 2013. The results showed that, the available nitrogen in the early and peak growing seasons was mainly NH_4^+ -N which accounted for over 96% of the inorganic nitrogen content, while the content of NO_3^- -N was very low. With the time extension of nitrogen addition, the effects of nitrogen addition on the NH_4^+ -N content in 0-10 cm soil were more obvious in the early growing season than that in the peak growing season, and the NH_4^+ -N content was mainly affected by the type of nitrogen addition. On the contrary, the NO_3^- -N content in 0-10 cm soil was higher in the peak growing season than that in the early growing season. The effect of N input was obvious on NO_3^- -N content in both early and peak growing seasons, and low nitrogen treatment tended to promote the enrichment of NO_3^- -N. As time went on, the response of NH_4^+ -N and NO_3^- -N content to N addition was changed from insignificant in the early stage to significant in the late stage. N addition had a significant impact on the pH value of the 0-10 cm soil in the early and peak growing seasons. The pH values of the soil with low nitrogen treatment and the soil in the peak growing season were relatively lower. With the extension of the nitrogen addition time, the response of pH value also turned from insignificant in the early stage to significant in the late stage. Because of the long-term and continuous nitrogen addition, the 0-10 cm soil in this cold-temperate coniferous forest was obviously acidified.

Key words: N deposition; forest soil; N cycle; inorganic nitrogen; soil acidification

近年来, 由于受到工业急速发展、农业 N 肥的大量施用以及畜牧业等人类活动的影响, 大气中含氮化合物的浓度显著地增加. 其中大部分又通过干湿沉降的形式返回到陆地生态系统中, 在一定程度上改变了陆地生态系统的 N 循环格局^[1~4]. 森林作为陆地生态系统的主体部分, 森林土壤中的有效氮主要以铵态氮 (NH_4^+ -N) 和硝态氮 (NO_3^- -N) 的形式存在. NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 是经矿化作用由有机氮转化

而来, 并可以被植物直接吸收利用的两种 N 形态. 近些年来约占我国北方森林面积 1/3 的大兴安岭林区, 大气 N 沉降量已经达到了 9.8~14.3 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[5]. 因此, 有必要展开 N 沉降对寒温

收稿日期: 2014-05-18; 修订日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(31130009); 国家科技支撑计划项目(2013BAC03B03)

作者简介: 陈高起(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土地利用与土壤环境, E-mail: chengaoqi2012@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yangh@igsrr.ac.cn

带针叶林土壤有效 N 含量以及酸化的长期系统的原位研究。

已有文献资料表明我国已经成为继欧洲、北美外,全球第三大氮沉降集中区域^[6],迫切需要展开对我国森林生态系统氮沉降的系统研究。然而关于大气 N 沉降对我国森林土壤 N 素动态影响的研究相对不足,有限的报道主要来自于室内模拟研究^[7-10];另外一些研究多集中于热带森林^[11, 12]、亚热带森林生态系统^[13, 14],而对北方寒温带针叶林的原位监测的报道相对较少。寒温带针叶林地区因温度较低、腐殖质及矿质层土壤 C/N 比较高,土壤氮矿化速度相对较慢^[15]。N 沉降除了会增加森林生态系统的 N 素有效性^[16-18],还会造成森林土壤酸化^[19],进而影响到生态系统的生物多样性^[20, 21]。研究表明,外源性 N 输入的增加倾向于促进温带、寒温带森林土壤有机氮矿化^[15, 22, 23],增加土壤硝化^[24, 25],并可能会导致土壤的酸化^[26, 27],反过来土壤酸化可能会影响森林生态系统中 N 的矿化、硝化和反硝化等 N 循环过程,从而不利于森林生态系统的稳定。

鉴于以上分析,本研究选择 NH_4Cl 、 KNO_3 和 NH_4NO_3 这 3 种 N 肥原位 N 添加实验,通过观测 2010 年、2012 年、2013 年生长季初期(5 月)和生长旺季(8 月)0~10 cm 矿质层土壤无机 N 含量以及 pH 值对长期持续的增 N 处理的响应特征,以揭示大气 N 沉降对大兴安岭寒温带针叶林土壤有效 N 含量和土壤酸化的影响。该结果有助于进一步阐明大气 N 沉降增加背景下北方寒温带针叶林土壤无机 N 储量动态和土壤酸化的演变趋势,以期为相关研究提供基础资料和参考借鉴。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于内蒙古自治区大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测站东侧的开拉气林场。样地设置于大兴安岭西北坡(50°20'~50°30'N, 121°45'~122°00'E),海拔 826 m。气候类型为寒温带半湿润气候,年均温 -5.4℃,年均降水量 450~550 mm,其中 60%集中在 6~8 月。每年 9 月末到翌年 5 月初为降雪期,降雪厚度 20~40 cm,降雪量占全年降水总量的 12%。全年地表蒸发量 800~1 200 mm,年均日照时数 2 594 h,无霜期 80 d。棕色针叶林土为区域内主要土壤类型,矿质层土壤平均厚度 20 cm,其中土壤主要的理化性质如下:土壤容重 0.15~0.74 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,土壤

pH 值 4.5~6.5,腐殖质含量 10%~20%,全氮 2.9~4.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 0.5~1.1 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。林分类型为杜香-落叶松林,林龄约为 150 a,主要物种为兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)、杜香(*Ledum palustre* var. *Dilatatum*)、白桦(*Betula platyphylla* Suk)、兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum* L.)等。

1.2 实验设计

2010 年 5 月初在研究区域内选择立地条件基本一致的样地,为模拟 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 输入,设置对照和氯化铵(NH_4Cl)、硝酸钾(KNO_3)和硝酸铵(NH_4NO_3)这 3 种类型 N 肥,每种处理 3 次重复。参照大兴安岭站大气 N 沉降背景值 8.5 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$,设置低 N [Low N, 10 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]和高 N [High N, 40 $\text{kg}\cdot(\text{hm}^2\cdot\text{a})^{-1}$]两种 N 水平处理,分别模拟未来大气 N 沉降增加 1 倍和 4 倍的情景。样方大小为 10 m × 20 m,两两间隔 10 m。在生长季(5~9 月)内,每月月初将各形态 N 肥(分析纯)溶于 20 L 水中,用喷雾器均匀喷洒于各样方内,对对照样方内只需喷洒等量水即可。在非生长季(10 月初到翌年 4 月底),于 10 月初将每月的 N 肥一次性集中喷洒。

1.3 样品采集和测定

生长季初期(5 月)和生长旺季(8 月),在各个处理中选好取土点移除凋落物、有机物及杂质后,用土钻(直径为 2.5 cm)取矿质层 0~10 cm 土壤。具体操作是在同一样方内,沿对角线随机采样,5 钻土均匀混合成一个样品。剔除样品中明显的砂石、根系和有机残留物等杂质,过 2 mm 筛,用保温箱带回实验室冷藏备用。

土壤含水量采用烘干法测定,在 105℃ 条件下烘干 24 h 至恒重;无机氮(NH_4^+ -N、 NO_3^- -N)采用 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾(KCl)浸提,然后采用流动化学分析仪(Bran Luebbe, Germany)测定其含量。土壤 pH 值采用 pH 计(Mettler Toledo, Switzerland)测定,其中水土比为 2.5:1。

1.4 数据处理

采用双因素方差分析(two-factor ANOVAs)来分析不同 N 水平和 N 类型及其交互作用对 2010、2012、2013 年生长季初期(5 月)和生长旺季(8 月)0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值的影响。使用重复测量方差分析(Repeated measures ANOVA, RANOVA)整合这 3 a 数据分析年份、N 水平和 N 类型及其交互作用对土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值的影响。采用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分

析,并利用 SigmaPlot 10.0 软件进行制图. 文中除特殊说明外,显著性水平 $P=0.05$.

2 结果与分析

大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤无机氮含量在生长季初期(5月)和生长旺季(8月)都以 NH_4^+ -N 为主,占无机氮含量的 96% 以上. 其中 NH_4^+ -N 含量变化范围为 7.74~43.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, NO_3^- -N 含量变化范围为 0.01~3.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 生长季初期 NH_4^+ -N 含量高于生长旺季土壤 NH_4^+ -N 含量.

2.1 土壤 NH_4^+ -N 对增 N 的响应

生长季初期和生长旺季土壤 NH_4^+ -N 对 N 输入的响应存在差异,响应程度与施 N 时间和施 N 水平有关. 在施 N 初期(2010年),施 N 水平、施 N 类型及其交互作用对生长季初和生长旺季土壤 NH_4^+ -N 含量影响均不显著(表 1). 在施 N 第 3 年(2012年),施 N 类型对生长季初土壤 NH_4^+ -N 含量有显著

影响(表 2). 其中, KNO_3 和 NH_4NO_3 处理的 NH_4^+ -N 含量显著低于 NH_4Cl 处理,且低 N 和高 N 处理下结果相同(图 1). N 输入水平对生长旺季土壤 NH_4^+ -N 影响不显著(表 2). 在施 N 第 4 年(2013年),施 N 类型对生长季初期和生长旺季土壤 NH_4^+ -N 均有显著影响($P=0.004$ 和 $P=0.05$,表 3),而 N 输入水平处理仍然没有显著影响. 进一步分析发现,2013年,在低 N 处理下,生长季初, NH_4NO_3 处理的土壤 NH_4^+ -N 含量显著高于对照和 NH_4Cl 和 KNO_3 处理,而后三者之间差异不显著. 在生长旺季,低 N 处理下, NH_4Cl 和 KNO_3 处理均与对照有显著差异($P=0.009$ 和 $P<0.001$,图 1), KNO_3 处理与 NH_4NO_3 处理存在显著差异($P=0.004$,图 1). 在高 N 处理下,生长旺季, NH_4Cl 和 KNO_3 处理均与对照存在显著差异(分别为 $P=0.001$ 和 $P=0.005$,图 1). 年份对于生长季初期和旺季的土壤 NH_4^+ -N 含量有显著影响($P=0.000$ 和 $P=0.000$,表 4).

表 1 施 N 水平、施 N 类型及其交互作用对 2010 年生长季初期 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值影响的方差分析

Table 1 ANOVAs of the effects of N form, N level and their interactions on soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and pH value in the 0-10 cm mineral layer in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2010

变异来源	土壤 NH_4^+ -N 含量				土壤 NO_3^- -N 含量				土壤 pH 值			
	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}
N 类型	0.18	0.84	0.31	0.74	0.179	0.839	0.395	0.685	0.687	0.528	0.347	0.716
N 水平	1.10	0.32	0.23	0.65	0.064	0.806	0.006	0.939	2.266	0.166	0.563	0.472
N 类型 × N 水平	3.11	0.09	0.23	0.80	0.031	0.969	0.979	0.412	0.339	0.721	0.512	0.616

表 2 施 N 水平、施 N 类型及其交互作用对 2012 年生长季初期 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值影响的方差分析

Table 2 ANOVAs of the effects of N form, N level and their interactions on soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and pH value in the 0-10 cm mineral layer in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2012

变异来源	土壤 NH_4^+ -N 含量				土壤 NO_3^- -N 含量				土壤 pH 值			
	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}
N 类型	10.18	<0.001	0.299	0.744	1.234	0.299	1.673	0.202	3.473	0.038	2.245	0.121
N 水平	0.635	0.429	1.366	0.250	0.008	0.929	3.745	0.061	0.679	0.414	0.155	0.696
N 类型 × N 水平	0.643	0.530	1.186	0.318	0.476	0.624	1.441	0.250	2.281	0.112	0.127	0.881

表 3 施 N 水平、施 N 类型及其交互作用对 2013 年生长季初 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值影响的方差分析

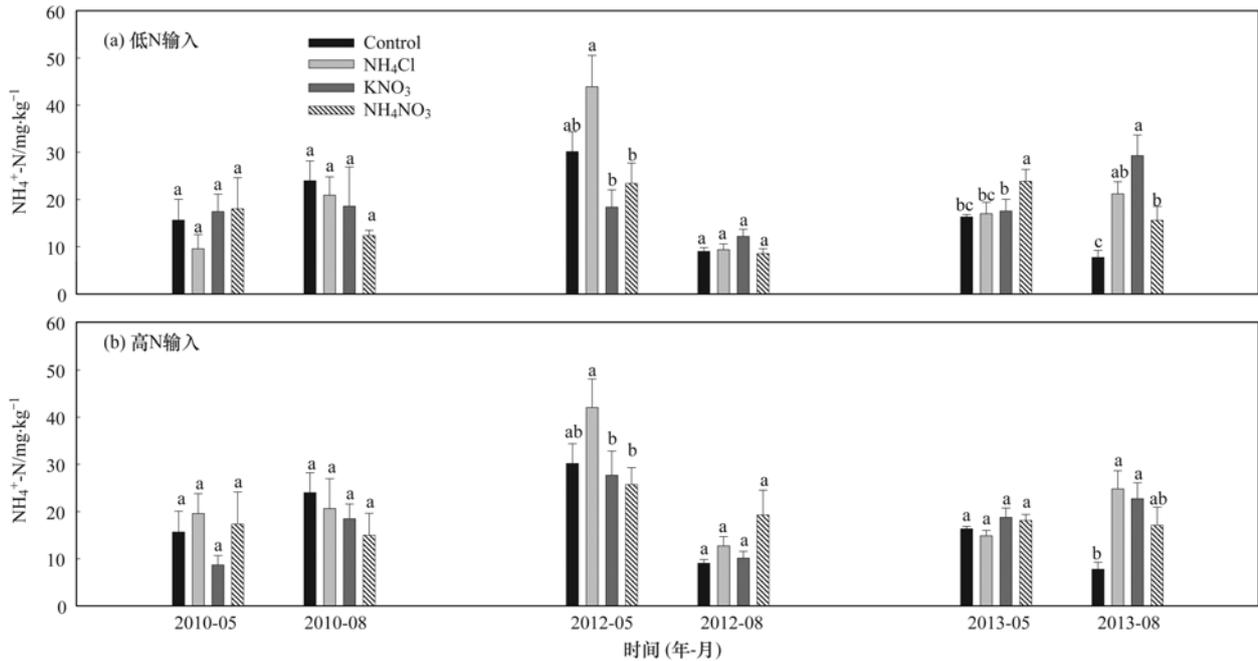
Table 3 ANOVAs of the effects of N form, N level and their interactions on soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and pH value in the 0-10 cm mineral layer in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2013

变异来源	土壤 NH_4^+ -N 含量				土壤 NO_3^- -N 含量				土壤 pH 值			
	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}
N 类型	6.32	0.004	3.13	0.05	12.76	<0.001	0.239	0.789	0.213	0.810	4.067	0.040
N 水平	0.92	0.341	0.07	0.80	0.310	0.583	0.270	0.606	4.599	0.050	10.08	0.007
N 类型 × N 水平	2.40	0.103	0.71	0.50	1.310	0.281	3.299	0.050	4.721	0.027	3.265	0.069

2.2 土壤 NO_3^- -N 对增 N 的响应

在生长季初期和生长旺季, 0~10 cm 土壤

NO_3^- -N 含量都较低. 生长季初期和生长旺季土壤 NO_3^- -N 对 N 输入的响应存在差异,响应程度与施 N



数据为均值和标准误差,不同字母表示存在显著性差异,下同

图 1 2010 年、2012 年和 2013 年生长季初期 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N 对 N 输入的响应

Fig. 1 Responses of soil NH_4^+ -N in the 0-10 cm mineral layer to N input in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2010, 2012 and 2013

表 4 年份、施 N 水平、施 N 类型及其交互作用对生长季初 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 pH 值影响的方差分析

Table 4 ANOVAs of the effects of year, N form, N level and their interactions on soil NH_4^+ -N, NO_3^- -N and pH value in the 0-10 cm mineral layer in the early growing season (May) and the peak growing season (August)

变异来源	土壤 NH_4^+ -N 含量				土壤 NO_3^- -N 含量				土壤 pH 值			
	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}	F_{May}	P_{May}	F_{Aug}	P_{Aug}
年份	10.14	0.000	135.4	0.00	152.7	0.000	25.43	0.000	28.54	0.000	2.453	0.092
N 类型	1.906	0.155	0.473	0.63	1.237	0.295	1.157	0.319	4.060	0.021	2.842	0.064
N 水平	0.077	0.782	1.426	0.24	0.064	0.801	7.785	0.007	49.05	0.000	0.018	0.892
N 类型 × N 水平	0.053	0.948	2.745	0.07	2.021	0.139	4.951	0.009	7.213	0.001	0.605	0.548
年份 × N 类型 × N 水平	0.633	0.640	2.223	0.07	1.702	0.157	4.378	0.003	5.172	0.001	0.351	0.842

时间和施 N 类型、施 N 水平有关。在施 N 第 1 年和第 3 年,施 N 类型、施 N 水平及其交互作用对土壤 NO_3^- -N 含量均无显著影响(表 1 和表 2)。与对照相比,低 N 处理下土壤 NO_3^- -N 含量较高,生长季初期土壤 NO_3^- -N 含量比生长旺季要高。施 N 第 4 年(2013 年),施 N 类型对生长季初期土壤 NO_3^- -N 有显著影响($P < 0.001$, 表 3),施 N 类型与施 N 水平的交互作用对生长旺季土壤 NO_3^- -N 含量影响显著($P = 0.05$, 表 3),施 N 水平对生长季初期和生长旺季土壤 NO_3^- -N 含量均不存在显著影响(表 3)。进一步分析发现,在施 N 第 4 年的生长季初期,低 N 处理下, NH_4Cl 处理与 NH_4NO_3 处理间存在显著差异($P = 0.023$, 图 2); 在生长旺季,土壤 NO_3^- -N 平均含量高于生长季初期(图 2)。增氮时间的变化对于生

长季初期和旺季的土壤 NO_3^- -N 含量有显著影响($P = 0.000$ 和 $P = 0.000$, 表 4),生长旺季土壤 NO_3^- -N 对 N 输入的响应尤其与年份、施 N 水平有关。

2.3 土壤 pH 值对增 N 的响应

自然状态下,2010 年和 2013 年生长季初期 0~10 cm 土壤 pH 值略高于生长旺季土壤 pH 值。在施 N 第 1 年(2010 年),施 N 类型、施 N 水平及其交互效应对生长季初期和生长旺季土壤 pH 值均没有显著影响(表 1)。在施 N 第 3 年(2012 年),施 N 类型仅对生长季初期土壤 pH 值有显著影响($P = 0.038$, 表 2),N 输入水平对土壤 pH 值影响不显著(表 2)。其中,低 N 处理中,生长季初期 KNO_3 处理土壤 pH 值显著高于对照,而在生长旺季则相反。在施 N 第 4 年(2013 年),施 N 类型仅对生长旺季土

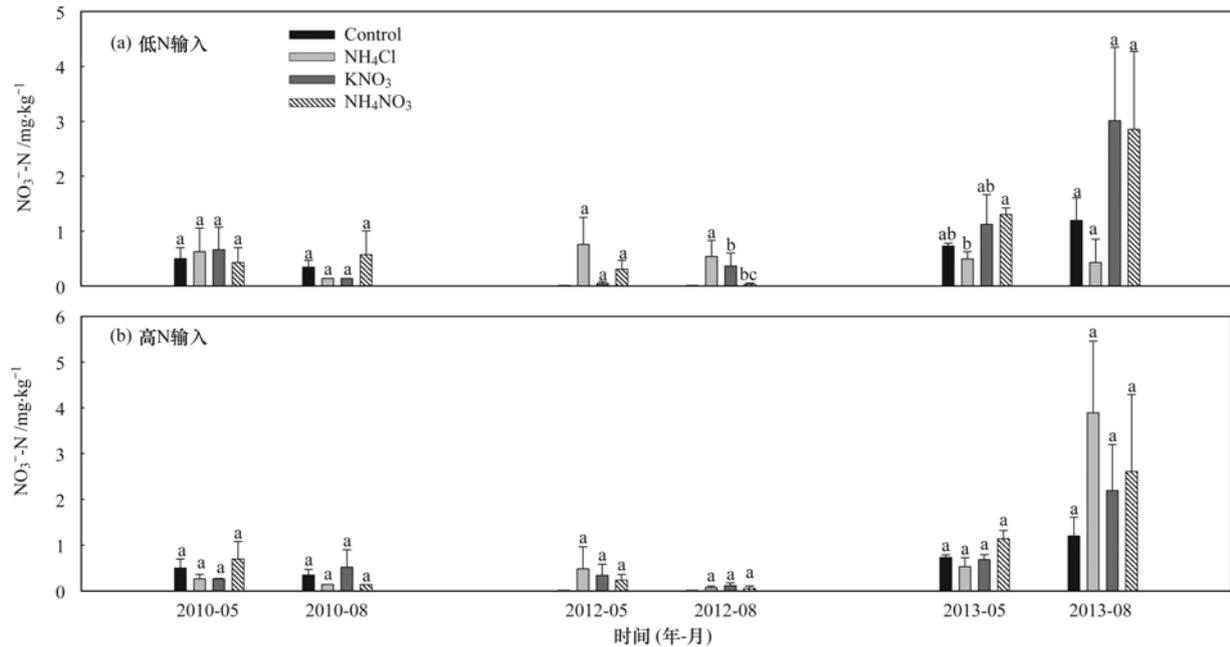


图 2 2010 年、2012 年和 2013 年生长季初期 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 对 N 输入的反应

Fig. 2 Responses of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ in the 0~10 cm mineral layer to N input in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2010, 2012 and 2013

壤 pH 值有显著影响 ($P=0.040$, 表 3), 施 N 水平对生长季初期和生长旺季土壤 pH 值均有显著影响 ($P=0.05$ 和 $P=0.007$, 表 3), 施 N 类型和水平的交互作用对生长季初期土壤 pH 值有显著影响 ($P=0.027$, 表 3). 在施 N 第 4 年的生长季初期, 低 N 和高 N 两个处理间 0~10 cm 土壤 pH 值存在显著差

异 ($P=0.05$), 低 N 处理中, KNO_3 和 NH_4NO_3 处理与对照存在显著差异 ($P=0.018$ 和 $P=0.049$, 图 3); 生长旺季, 低 N 处理中 KNO_3 处理分别与对照、 NH_4Cl 、 NH_4NO_3 这 3 种处理差异显著 ($P=0.021$ 、 $P=0.004$ 和 $P=0.031$, 图 3), 而对照、 NH_4Cl 、 NH_4NO_3 这 3 种处理之间无显著差异 (图 3). 整体

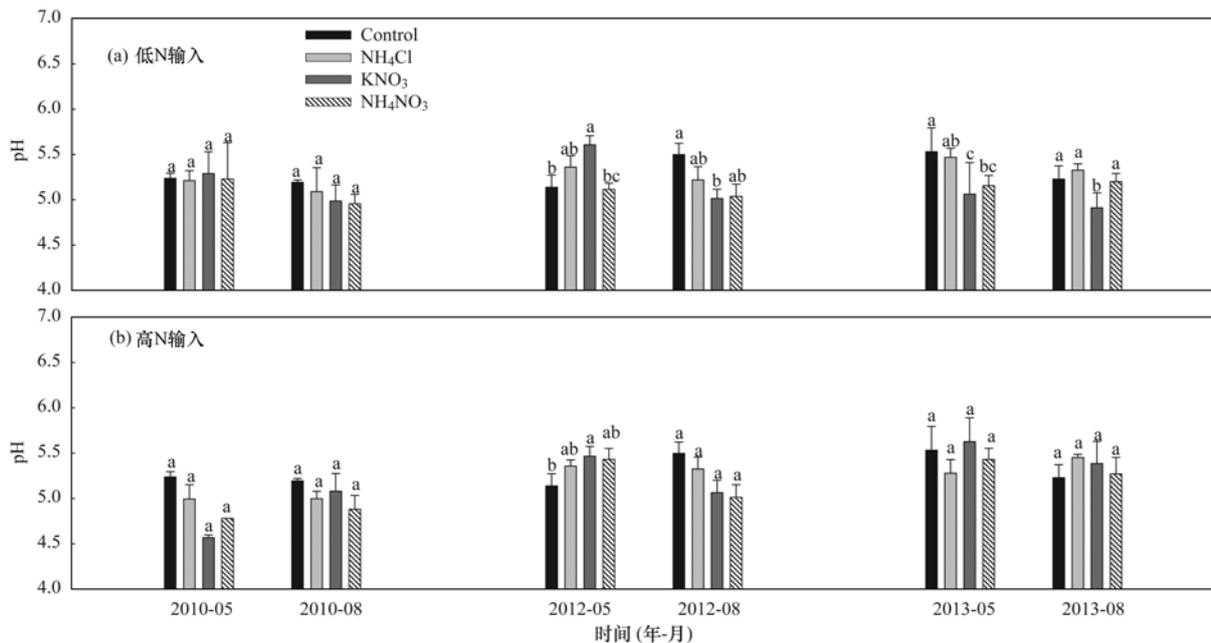


图 3 2010 年、2012 年和 2013 年生长季初期 5 月和生长旺季 8 月 0~10 cm 矿质层土壤 pH 对 N 输入的反应

Fig. 3 Responses of soil pH value in the 0-10 cm mineral layer to N input in the early growing season (May) and the peak growing season (August) in 2010, 2012 and 2013

上看, 年份、氮水平、氮类型及其交互作用对生长季初期土壤 pH 值有显著影响(表 4)。

3 讨论

3.1 增 N 对生长季初期和生长旺季寒温带针叶林土壤 NH_4^+ -N 的影响

大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤有效氮以 NH_4^+ -N 为主, NO_3^- -N 含量较低。生长季初期和生长旺季土壤 NH_4^+ -N 对 N 输入的响应存在差异, 且主要受施 N 类型的影响。随着施 N 时间的延长, 生长旺季土壤 NH_4^+ -N 对 N 输入的响应由前期的不显著向后期的显著发生转变。

森林土壤中无机 N 含量的净变化是其产生、转化及输出几个过程综合作用的结果。仅对 NH_4^+ -N 来说, 森林土壤 NH_4^+ -N 主要来源于有机 N 的矿化(即氨化), 主要流向为植物吸收、微生物固持、硝化为 NO_3^- -N、 NH_3 的挥发、非生物性固持等^[28]。实验结果表明在增 N 初期, N 输入并没有对 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 含量产生显著影响。在增 N 早期阶段内, 外源性 N 输入对矿质层 NH_4^+ -N 响应不敏感很可能和上层覆盖的大量凋落物和腐殖质层的阻隔有关。尤其在北方寒温带森林生态系统中, 植物生长一般受土壤有效 N 限制^[29], 植物根系强烈地吸收和利用外源性输入的 NH_4^+ -N, 导致 NH_4^+ -N 含量在土壤中并无明显累积, 对增 N 的响应存在一定的滞后效应^[28]。此外, 土壤中 NH_4^+ -N 含量的季节性动态是受环境因素、根系吸收、微生物利用以及土壤有机质等综合作用的, 短期的 N 输入并没有使 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 表现出明显的累积效应。随着增 N 时间的延长, 到了增 N 实验第 3 年, 3 种施 N 类型均对生长季初期土壤 NH_4^+ -N 含量产生显著影响, 生长旺季则不明显。与对照相比, NH_4Cl 处理明显地促进了生长季初 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 富集。同样的情况也出现在增 N 实验的第 4 年, 施 N 类型对生长季初和生长旺季土壤 NH_4^+ -N 含量均产生显著影响, NH_4NO_3 处理明显地促进了生长季初期 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 富集。且在 2013 年生长旺季高 N 处理的土壤 NH_4^+ -N 含量高于对照处理。原因可能是由于外源性 N 输入在提高氨氧化菌数量及活性的同时进一步加剧了具有固 N 作用的异养细菌的生长, 而高 N 处理则相对于低 N 处理更能使异养菌在竞争 NH_4^+ -N 时处于优势。与本实验研究结果不同, 徐星凯等^[30]发现不同剂量 NH_4^+ -N 输入尤其对长白山落

叶红松林 0~7 cm 土壤氮素年净矿化量和年净矿化量有显著的促进作用, 但是这种促进作用却随着增施 N 年限的延长而减弱。同样的结果, McNulty 等^[31]通过对美国红松林进行了 14 a (1988~2002 年) 的 N 添加实验发现, 实验初期两年内 N 输入量的增加 (NH_4Cl) 能显著地促进土壤氮素净矿化量, 不过这种促进作用随着施 N 时间的延长而逐渐减弱。由此可见, 森林土壤对增 N 响应机理比较复杂, 原因可能与不同的森林类型、自然 N 素状况、增 N 类型、土壤属性以及环境因素等有着密切联系。

本实验结果表明, 随着施 N 时间的延长, 生长旺季大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 对 N 输入的响应由前期的不显著向后期的显著发生转变, 主要是由于持续的 NH_4^+ -N 输入 (NH_4Cl 和 NH_4NO_3) 引起的。本实验结果还表明, 生长季初期明显比生长旺季更倾向于促进 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 富集。其可能的原因有: ①相对于生长季初期, 生长旺季处在一个相对“富 N”的环境下, 由于气温较高, 水分充足, 植物和微生物大量吸收利用土壤中的无机氮以及土壤大量硝化损失 NH_4^+ -N, 从而使得生长旺季阶段土壤 NH_4^+ -N 含量低于生长季初期。②长期持续的 NH_4^+ -N 输入会导致贫 N 条件下大兴安岭寒温带针叶林土壤微生物群体以真菌为主体向以细菌为优势群转变, 而菌根真菌的减少会降低植物根系地下的 C 分配^[32], 从而抑制了异养微生物的活性, 便降低了微生物的 N 固持。③在受 N 限制的森林生态系统中, 植物和微生物对土壤中有效 N 的激烈竞争会抑制硝化细菌种群的数量, 从而土壤中矿质 N 以 NH_4^+ -N 为主^[15]。实际上, 研究结果显示目前中国大气 N 沉降的主导 N 形态为 NH_4^+ -N^[33]。因此, 本实验的研究结果对进一步探讨持续增加的大气 N 沉降对北方寒温带针叶林生态系统相关生态过程以及土壤 N 素动态变化提供了重要的参考依据。

3.2 增 N 对生长季初期和生长旺季寒温带针叶林土壤 NO_3^- -N 的影响

研究结果显示, 增 N 对生长季初和生长旺季大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤 NO_3^- -N 影响较为明显。与前期研究结果一致^[28], 增 N 4 a 后, 低 N 处理仍倾向于促进 0~10 cm 土壤 NO_3^- -N 的富集。不过随着施 N 时间的延长, 生长旺季土壤 NO_3^- -N 含量高于生长季初期, 对增 N 的响应由前期的不显著向后期的显著转变。同样 Fenn 等^[34]研究发现, 低 N 处理在短期内促进了森林土壤硝化, 相对于高 N 处

理而言,低 N 处理显著地促进矿质层土壤 NO_3^- -N 累积. 与此相反,胡艳岭等^[17]发现,高 N 处理显著地增加了长白山地区温带森林生长季土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量,但是低 N 处理不显著. 同时在增 N 前期,N 输入对土壤 NO_3^- -N 含量并无显著影响,由于在北方寒温带针叶林地区土壤温度比较低,pH 值低,凋落物、腐殖质以及矿质层土壤 N 矿化速度相对较慢,土壤中有有效 N 贫乏^[15],植物和微生物对可利用性 N 竞争激烈. 所以,在外源性 N 输入的条件下,N 限制的寒温带针叶林对前期 N 输入的反应不强烈或滞后. 生长旺季阶段,降雨量比较大,降水时间较长,雨水的淋溶作用明显. 淋溶通常是指 NO_3^- -N 的淋失, NH_4^+ -N 和有机 N 的淋失甚少^[35]. 这是由于 NO_3^- -N 带负电,容易从土壤尤其是阴离子交换能力差的土壤中淋溶流失. 由于有机层和上层腐殖质层对土壤 NO_3^- -N 截留作用比较小还有 NO_3^- -N 的易淋溶性,直接的 NO_3^- -N 输入对有机层 NO_3^- -N 含量影响不大,却显著地提高矿质层土壤 NO_3^- -N 的含量. 长期而又持续的 NO_3^- -N 输入可以被森林生态系统所利用,过剩的 NO_3^- -N 可能会通过淋溶及可能的反硝化作用从土壤中去掉或者有一部分累积下来^[27]. 大兴安岭地区寒温带针叶林 0~10 cm 土壤有效 N 以 NH_4^+ -N 为主体,长期的 NH_4^+ -N 的输入会显著促进土壤的净硝化作用,导致土壤中 NO_3^- -N 显著积累^[36],而长期持续的增 N 在导致了土壤 NH_4^+ -N 含量由初期的不显著向显著转变同时,也会导致土壤中 NO_3^- -N 含量的显著性变化,表现出了明显的累积效应.

研究表明,森林土壤矿化过程(包括氨化和硝化过程)除了受自然 N 状况以及人为增 N 类型、水平因素影响外,环境因子如温度和水分也是重要的驱动因素,特别是在气温和降水季节性变化较大的温带地区^[15]. 增 N 对生长季初期和生长旺季土壤 NO_3^- -N 含量的影响明显,且与施 N 类型、剂量及其交互效应都有关系. 综合而言,森林土壤中 NO_3^- -N 的动态变化可能与不同的森林类型、土壤属性以及土壤的 C/N 比格局有关,此外还受到气候和环境因素的制约.

3.3 增 N 对生长季初期和生长旺季寒温带针叶林土壤酸化的影响

增 N 实验对生长季初期和生长旺季大兴安岭寒温带针叶林 0~10 cm 土壤 pH 值影响较为明显. 随着增 N 时间的延长,低 N 处理以及生长旺季土壤

pH 值较低. 土壤 pH 值对增 N 的响应由前期的不显著向后期的显著转变. 持续的增 N 处理已经使 0~10 cm 土壤产生了明显的酸化. 增 N 初期,N 输入并没有对矿质层土壤 pH 值产生显著影响,可能是由于植物根系和微生物大量吸收无机 N 以及土壤本身的缓冲性都在一定程度上延缓了土壤的酸化. 而到了增 N 后期却产生显著变化,可能的解释为森林生态系统中土壤表层有较多的微生物,硝化作用又往往发生在土壤表层,随着增 N 时间的延长,增 N 量越多,由矿化和硝化作用产生的 H^+ 越来越多,土壤胶体表面吸附的盐基离子与 H^+ 发生离子交换作用, H^+ 被吸附在土壤表层,交换下来的 Ca^+ 、 Mg^+ 等离子在淋溶作用下向土壤下层移动. 随着表层土壤 H^+ 聚集的越来越多, H^+ 随同淋溶液通过有机层进入土壤矿质层,进而导致矿质层土壤的酸化^[19].

一般情况下,土壤中 H^+ 主要来自酸沉降输入、微生物分解有机物和土壤 NH_4^+ 的硝化作用 3 个方面^[19]. NH_4^+ 和 NO_3^- 的沉降都可以导致各种环境下的土壤酸化,土壤酸化包括植被、土壤矿物和土壤溶液在内的 N 迁移过程^[27]. 本研究随着增 N 时间延长, NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量都由增 N 初期的不显著转变为后期的显著,且低 N 处理更倾向于促进 0~10 cm 土壤 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 的累积. 由于在硝化过程中,1 mol NH_4^+ 在转化成 NO_3^- 时会产生 2 mol H^+ ,所以 NH_4^+ -N 沉降可能比 NO_3^- -N 沉降更能促进土壤的酸化^[37]. 同时在以 NH_4^+ -N 为主体的增 N 条件和大气 N 沉降情境下,低 N 处理土壤酸化情况显然会更加明显,而随着增 N 时间的延长和土壤中 N 素的累积,增 N 后期土壤 pH 值对增 N 的响应当然由前期的不显著向后期的显著转变. 本研究结果还发现,增 N 类型、水平以及交互效应对土壤 pH 值有显著影响,增 N 初期并不显著,到了第 3 年,增 N 类型对生长季初期土壤 pH 值产生显著影响,相对于对照来看,生长旺季 pH 值低于生长季初期,且 KNO_3 和 NH_4NO_3 处理的酸化效应比 NH_4Cl 处理更为显著. 增 N 情景下,生长旺季阶段土壤 pH 值显著下降,可能是由于 pH 值相对较高的土壤更容易遭受酸沉降的影响^[14]. 到了增 N 实验第 4 年,生长季初期土壤均对施 N 水平及交互作用有显著响应,而生长旺季阶段土壤对施 N 类型和水平有显著响应,土壤 pH 值对增 N 的响应由初期的不显著向后期的显著变化. 生长旺季土壤 pH 值低于生长季初期,相对于对照来说,低 N 处理的 NH_4Cl 、 KNO_3 、 NH_4NO_3 处理酸化效应更明显,其中 KNO_3 处理的

土壤酸化最为显著. 直接的 NO_3^- -N输入导致的土壤酸化可能是由于其附带的阳离子(如 K^+)可替换土壤交换点位上的 H^+ ,从而导致土壤溶液中 H^+ 增加^[38]. 进一步分析发现,增N后期生长旺季8月0~10 cm土壤 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N均表现出积累效应,可能是因为寒温带针叶林土壤pH值主要受丰富的 NH_4^+ -N所支配,其微量的富集也会导致土壤pH值下降;大量的 NH_4^+ -N和 NO_3^- -N在土层中的富集, NH_4^+ -N累积引发硝化作用发生,降低土壤pH值;此外生长旺季阶段降水相对较多, NO_3^- -N淋失导致土壤酸化. 实验及研究结果表明, NH_4^+ -N的硝化和过剩的 NO_3^- -N的淋失是土壤主要的酸化机制^[39].

有研究表明,N沉降也对N饱和的森林土壤存在明显酸化作用^[14]. 近年来,由于工业发展,大气N沉降量的增加以及酸雨导致的森林土壤酸化正日益危害着森林生态系统的稳定. 由土壤酸化引发的土壤中养分动态变化,比如Al水平的增加引起的P素缺乏^[40],菌根数量减少导致的森林固N能力的降低^[40],还有土壤酸化导致的植物木质部中的重金属元素(Cr、Cd、Ni、Zn)累积^[41]从而危害植物生长,很显然持续增加的N沉降量导致的土壤酸化不利于森林生态系统的稳定,危害了森林的可持续发展. 进一步探讨增N对土壤酸化的响应机制,对于以后的林地土壤酸化的治理和防护以及森林资源的可持续发展有着重要的理论指导和实践意义.

4 结论

(1)总体来看,大兴安岭寒温带针叶林0~10 cm土壤有效N含量在生长季初期(5月)和生长旺季(8月)都以 NH_4^+ -N为主. 与生长旺季相比,N输入对生长季初期土壤 NH_4^+ -N影响较为明显,且主要受施N类型影响. 随着施N时间的延长,生长旺季阶段土壤 NH_4^+ -N对N输入的响应由前期的不显著向后期的显著发生转变.

(2)增N对生长季初和生长旺季大兴安岭寒温带针叶林0~10 cm土壤 NO_3^- -N影响较为明显. 低N处理更倾向于促进0~10 cm土壤 NO_3^- -N的富集. 随着施N时间的延长,生长旺季土壤 NO_3^- -N含量高于生长季初期. 土壤 NO_3^- -N对长期持续的增N的响应由前期的不显著向后期的显著转变.

(3)增N实验对生长季初期和生长旺季大兴安岭寒温带针叶林0~10 cm土壤pH值影响较为显著. 随着增N时间的延长,低N处理土壤和生长旺

季阶段土壤pH值相对较低. 土壤pH值对增N的响应由前期的不显著向后期的显著转变. 持续的增N处理已经使大兴安岭寒温带针叶林0~10 cm土壤产生了明显的酸化.

参考文献:

- [1] Vitousek P M. Beyond global warming: Ecology and global change[J]. *Ecology*, 1994, **75**(7): 1861-1876.
- [2] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *AMBIO*, 2002, **31**(2): 64-71.
- [3] Reay D S, Dentener F, Smith P, *et al.* Global nitrogen deposition and carbon sinks[J]. *Nature Geoscience*, 2008, **1**(7): 430-437.
- [4] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 1-7.
- [5] 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**(D22): D22S05.
- [6] Richter A, Burrows J P, Nub H, *et al.* Increase in tropospheric nitrogen dioxide over China observed from space[J]. *Nature*, 2005, **437**(7055): 129-132.
- [7] 周才平, 欧阳华. 长白山两种主要林型下土壤氮矿化速率与温度的关系[J]. *生态学报*, 2001, **21**(9): 1469-1473.
- [8] Zhou C P, Ouyang H, Pei Z Y, *et al.* Net soil nitrogen mineralization in Chinese forest ecosystems [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(2): 170-176.
- [9] Ouyang X J, Zhou G Y, Huang Z L, *et al.* Effect of simulated acid rain on potential carbon and nitrogen mineralization in forest soils[J]. *Pedosphere*, 2008, **18**(4): 503-514.
- [10] 陈立新, 黄兰英, 乔璐, 等. 模拟氮沉降对温带不同森林类型土壤氮矿化速率的影响[J]. *水土保持学报*, 2012, **26**(6): 139-146.
- [11] 沙丽清, 孟盈, 冯志立, 等. 西双版纳不同热带森林土壤氮矿化和硝化作用研究[J]. *植物生态学报*, 2000, **24**(2): 152-156.
- [12] 李明锐, 沙丽清. 西双版纳不同土地利用方式下土壤氮矿化作用研究[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(1): 54-58.
- [13] Zhao W, Cai Z C, Xu Z H. Does ammonium-based N addition influence nitrification and acidification in humid subtropical soils of China? [J]. *Plant and Soil*, 2007, **297**(1-2): 213-221.
- [14] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, *et al.* Soil Acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(3): 399-408.
- [15] 方运霆, 莫江明, Gundersen P, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, **24**(7): 1523-1531.
- [16] 陈立新, 段文标. 模拟氮沉降对温带典型森林土壤有效氮形态和含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, **22**(8): 2005-2012.
- [17] 胡艳玲, 韩士杰, 李雪峰, 等. 长白山原始林和次生林土壤有效氮含量对模拟氮沉降的响应[J]. *东北林业大学学报*,

- 2009, **37**(5): 36-38, 42.
- [18] 方运霆, 莫江明, 周国逸, 等. 南亚热带森林土壤有效氮含量及其对模拟氮沉降增加的初期响应[J]. 生态学报, 2004, **24**(11): 2353-2359.
- [19] 孙本华, 胡正义, 吕家珑, 等. 模拟氮沉降下南方针叶林红壤的养分淋溶和酸化[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(10): 1820-1826.
- [20] 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(11): 5532-5548.
- [21] Binkley D, Son Y, Valentine D W. Do forests receive occult inputs of nitrogen? [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(4): 321-331.
- [22] Vestgard L S, Selle L T, Stuanes A O. In situ soil nitrogen mineralisation in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand: effects of increased nitrogen input[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, **176**(1-3): 205-216.
- [23] Gundersen P, Emmett B A, Kjonaas O J, et al. Impact of nitrogen deposition on nitrogen cycling in forests: a synthesis of NITREX data[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 37-55.
- [24] Moldan F, Wright R F. Nitrogen leaching and acidification during 19 years of NH_4NO_3 additions to a coniferous-forested catchment at Gardsjon, Sweden (NITREX) [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(2): 431-440.
- [25] Perakis S S, Sinkhorn E R. Biogeochemistry of a temperate forest nitrogen gradient[J]. *Ecology*, 2011, **92**(7): 1481-1491.
- [26] Fluckiger W, Braun S. Nitrogen deposition in Swiss forests and its possible relevance for leaf nutrient status, parasite attacks and soil acidification[J]. *Environmental Pollution*, 1998, **102**: 69-76.
- [27] 肖辉林. 大气氮沉降对森林土壤酸化的影响[J]. 林业科学, 2001, **37**(4): 111-116.
- [28] Gao W L, Cheng S L, Fang H J, et al. Effects of simulated atmospheric nitrogen deposition on inorganic nitrogen content and acidification in a cold-temperate coniferous forest soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, **33**(2): 114-121.
- [29] Nasholm T, Ekblad A, Nordin A, et al. Boreal forest plants take up organic nitrogen[J]. *Nature*, 1998, **392**(6679): 914-916.
- [30] 徐星凯, 韩琳, 罗献宝. 模拟氮沉降对温带阔叶红松林地氮素净矿化量的影响[J]. 气候与环境研究, 2012, **17**(5): 628-638.
- [31] McNulty S G, Boggs J, Aber J D, et al. Red spruce ecosystem level changes following 14 years of chronic N fertilization [J]. *Forest Ecology and Management*, 2005, **219**(2-3): 279-291.
- [32] Kuzyakov Y, Xu X L. Competition between roots and microorganisms for nitrogen: mechanisms and ecological relevance [J]. *New Phytologist*, 2013, **198**(3): 656-669.
- [33] Liu X J, Zhang Y, Han W X, et al. Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [34] Fenn M E, Poth M A, Terry J D, et al. Nitrogen mineralization and nitrification in a mixed-conifer forest in southern California: Controlling factors, fluxes, and nitrogen fertilization response at a high and low nitrogen deposition site [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, **35**(6): 1464-1486.
- [35] 陈伏生, 曾德慧, 何兴元. 森林土壤氮素的转化与循环[J]. 生态学杂志, 2004, **23**(5): 126-133.
- [36] Ste-Marie C, Pare D. Soil, pH and N availability effects on net nitrification in the forest floors of a range of boreal forest stands [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, **31**(11): 1579-1589.
- [37] Skeffington R A. Accelerated nitrogen inputs-A new problem or a new perspective? [J]. *Plant and Soil*, 1990, **128**(1): 1-11.
- [38] Fang H J, Cheng S L, Yu G R, et al. Responses of CO_2 efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition[J]. *Plant and Soil*, 2012, **351**(1-2): 177-190.
- [39] Bergkvist B O, Folkesson L. Soil acidification and element fluxes of a *Fagus sylvatica* forest as influenced by simulated nitrogen deposition[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1992, **65**(1-2): 111-133.
- [40] Mulder J, Van Grinsven J J M, Van Breemen N. Impacts of acid atmospheric deposition on woodland soils in the Netherlands: III. Aluminum chemistry [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, **51**(6): 1640-1646.
- [41] Hutchinson T C, Watmough S A, Sager E P S, et al. The impact of simulated acid rain and fertilizer application on a mature sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) forest in central Ontario Canada [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1999, **109**(1-4): 17-39.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《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12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 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