

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第10期

Vol.37 No.10

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

北京地区空气重污染下雾凇和偏东风对 PM _{2.5} 清除作用	孙兆彬, 廖晓农, 王占山, 李梓铭, 赵秀娟, 花丛 (3679)
降雨对不同粒径气溶胶粒子碰撞清除能力	董群, 赵普生, 陈一娜 (3686)
北京冬季雾霾频发期 VOCs 源解析及健康风险评价	刘丹, 解强, 张鑫, 王海林, 闫志勇, 杨宏伟, 郝郑平 (3693)
浙江省制鞋行业挥发性有机物污染特征及其排放系数	徐志荣, 姚轶, 蔡卫丹, 李嫣, 许明珠, 王浙明 (3702)
2014 年 APEC 期间北京市 PM ₁₀ 和 PM _{2.5} 氧化性损伤能力研究	郭茜, 邵龙义, 王文华, 侯聪, 赵承美, 幸娇萍, 马施民 (3708)
武汉市洪山区夏季 PM _{2.5} 浓度、水溶性离子与 PAHs 成分特征及来源分析	孙焰, 祁士华, 张莉, 邢新丽, 杨丹, 胡天鹏, 瞿程凯 (3714)
基于快速聚类方法分析常州市区 PM _{2.5} 的统计特性	王振, 余益军, 徐圆青, 李艳萍, 夏京, 殷磊 (3723)
PM _{2.5} 在线水溶性离子与滤膜采集-实验室检测的比对分析	杨懂艳, 刘保献, 石爱军, 张大伟, 丁萌萌, 周健楠, 富佳明, 景宽 (3730)
树木模拟燃烧排放烟尘中水溶性离子的组成	刘刚, 黄柯, 李久海, 徐慧 (3737)
轻型汽油车排放颗粒物数浓度和粒径分布特征	樊筱筱, 蒋靖坤, 张强, 李振华, 何立强, 吴烨, 胡京南, 郝吉明 (3743)
基于台架测试的我国船用柴油机废气排放因子	邢辉, 段树林, 黄连忠, 韩志涛, 刘勤安 (3750)
西安城区地表灰尘中邻苯二甲酸酯分布、来源及人群暴露	张文娟, 王利军, 王丽, 史兴民, 卢新卫 (3758)
生活垃圾焚烧厂垃圾的汞含量与汞排放特征研究	段振亚, 苏海涛, 王凤阳, 李智坚, 李韶璞, 王书肖 (3766)
三峡库区消落带土壤中硫酸盐还原菌对汞甲基化作用的影响	陈瑞, 陈华, 王定勇, 向玉萍, 申鸿 (3774)
城市化进程对地下河中溶解态正构烷烃来源的影响	廖昱, 孙玉川, 沈立成, 梁作兵, 王尊波 (3781)
基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价	王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰 (3789)
贡嘎山地区地表水化学特征及水环境质量评价	何晓丽, 吴艳宏, 周俊, 邴海健 (3798)
多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征	钱锋, 吴婕, 于会彬, 宋永会, 张美, 孔令昊, 何孟常 (3806)
地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因	何小松, 张慧, 黄彩红, 李敏, 高如泰, 李丹, 席北斗 (3813)
昆明市不同功能区排水管道沉积物性质	常海东, 金鹏康, 付博文, 李雪兵, 贾锐珂 (3821)
滇池水生植物分布对沉积物间隙水磷浓度的影响	丁帅, 王圣瑞, 张蕊, 肖焱波, 焦立新, 李乐, 王忠诚, 尹诗诗 (3828)
紫色母岩覆盖层控制底泥磷释放的效果及机制	黄雪娇, 石纹豪, 倪九派, 李振轮 (3835)
排水循环灌溉下稻田磷素时空分布特征	焦平金, 许迪, 朱建强, 于颖多 (3842)
快速高效去除微囊藻的 GO/QPEI 复合纳米材料	李洁, 肖琳 (3850)
一体式生物净化-沉淀池对微污染水体污染物的强化去除性能	王文东, 刘荟, 马翠, 韩雨, 常妮妮 (3858)
生物粉末活性炭-超滤组合工艺对微污染水源水中臭味物质的去除效能及其微生物特性	宣雍祺, 周丽, 邓慧萍, 蔡宙, 李大鹏, 刘刚 (3864)
聚硅酸对不同形态铝沉积行为的影响	赵园园, 张玥, 李素英, 石宝友, 李贵伟, 孙改清 (3870)
典型南方水源氨基酸浓度变化与去除	刘伟, 蔡广强, 卢小艳, 刘丽君, 张金松, 刘嘉祺, 曲莹 (3877)
O ₃ /UV 降解含氮杂环化合物喹啉	陈傲蕾, 常凤民, 汪翠萍, 徐恒, 吴静, 左剑恶, 王凯军 (3884)
蒽醌-2-磺酸钠促进 <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 脱色产氢机制与产能分析	胡金梅, 虞磊, 黄天寅 (3891)
2-丁烯醛生产废水中溶解性有机物的分级解析	孙秀梅, 宋广清, 席宏波, 周岳溪, 牛远方 (3899)
不同缺氧段硝酸盐氮浓度条件下连续流单污泥污水处理系统 PHA、TP 代谢	王晓玲, 员东丹, 白莉, 李紫棋, 余勇, 秦旭东, 张晓旭, 赵可 (3906)
长江口邻近海域沉积物中厌氧氨氧化细菌分布特征研究	付璐璐, 甄毓, 贺惠, 张玉, 米铁柱 (3914)
焦化废水活性污泥细菌菌群结构分析	蒙小俊, 李海波, 曹宏斌, 盛宇星 (3923)
黄土高原不同植被类型下土壤细菌群落特征研究	刘洋, 黄懿梅, 曾全超 (3931)
苯酚对活性污泥活性及微型动物群落结构的影响	胡小兵, 饶强, 唐素兰, 姜晶, 谢瑞桃, 郝文静, 钟梅英 (3939)
城市生活污水和生活垃圾渗滤液抗生素抗性基因污染的比较研究	黄福义, 李虎, 安新丽, 欧阳纬莹, 苏建强 (3949)
菌株 <i>Desulfovibrio</i> sp. CMX 的 DNRA 性能和影响因素	谢柄柯, 张玉, 王晓伟, 孙超越, 周集体 (3955)
生活污水灌溉对麦秸还田稻田氨挥发排放的影响	徐珊珊, 侯朋福, 范立慧, 薛利红, 杨林章, 王绍华, 李刚华 (3963)
模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响	曾清苹, 何丙辉, 李源, 夏力文, 杨龙龙, 邓雪梅, 李川 (3971)
生物炭添加和灌溉对温室番茄地土壤反硝化损失的影响	张文娟, 余冬立, Gamareldawla H. D. Agbna, 夏永秋 (3979)
土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响	王群艳, 吴小红, 祝贞科, 袁红朝, 隋方功, 葛体达, 吴金水 (3987)
土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟	施亚星, 吴绍华, 周生路, 王春辉, 陈浩 (3996)
组配改良剂对稻田系统 Pb、Cd 和 As 生物有效性的协同调控	王英杰, 邹佳玲, 杨文强, 周航, 廖柏寒 (4004)
几种有机物料对设施菜田土壤 Cd、Pb 生物有效性的影响	周贵宇, 姜慧敏, 杨俊诚, 张建峰, 张水勤, 梁雷 (4011)
蒙脱石对有机物料施入土壤磷形态和有效性的影响	宋贤威, 赵秀兰, 张进忠, 胡梦坤, 徐艳昭, 王明禹 (4020)
不同镉浓度及 pH 条件下纳米沸石对土壤镉形态及大白菜镉吸收的影响	秦余丽, 熊仕娟, 徐卫红, 赵婉伊, 王卫中, 陈永勤, 迟芬琳, 陈序根, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (4030)
黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究	董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 陆维佳, 杨秀卿, 刘逸凡 (4044)
挥发性甲基硅氧烷的体外代谢行为	黎敏丹, 郑国贸, 万伟, 胡建英 (4054)
中药渣与城市污泥好氧共堆肥的效能	宿程远, 郑鹏, 阮祁华, 覃菁菁, 卢宇翔, 李俊兵 (4062)
《环境科学》征订启事 (3827)	《环境科学》征稿简则 (4053)
信息 (3736, 3930, 4043)	

模拟氮沉降对重庆缙云山马尾松林土壤呼吸和酶活性的季节性影响

曾清苹^{1,2}, 何丙辉^{1*}, 李源³, 夏力文¹, 杨龙龙¹, 邓雪梅¹, 李川³

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 四川沃尔宜环保科技有限公司, 成都 610000; 3. 重庆市涪陵区林业局, 重庆 408000)

摘要: 土壤酶参与土壤碳氮转化, 同时土壤碳氮状况又是土壤酶活性的基础, 而大气氮沉降通过影响土壤酶活性进而影响土壤 CO_2 释放。通过野外模拟试验, 探讨不同氮沉降量对马尾松土壤呼吸和酶活性的影响, 探索该区域马尾松土壤呼吸 (R_s) 与土壤温度 (T)、土壤湿度 (W)、Ure (脲酶)、Ive (转化酶)、CAT (过氧化氢酶) 及 ACP (酸性磷酸酶) 的关系, 为深入研究氮沉降对马尾松林森林生态系统的影响提供参考。2014 年 5 月~2015 年 7 月在缙云山马尾松林设置 3 个氮添加水平和一个无氮添加的对照处理: 低氮 [N_5 , $20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 中氮 [N_{10} , $40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 高氮 [N_{15} , $60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] 和对照 [N_0 , $0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], 每个处理量分 4 次, 在每个季度开始各施 1 次, 每个处理各 9 次重复, 采用 ACE (automated soil CO_2 exchange station, UK) 自动土壤呼吸监测系统分别对土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度进行分析测定。结果表明: ① 土壤酶和土壤呼吸均具有明显的季节变化规律, 各处理土壤呼吸均表现为夏季最高, 其次是春季和秋季, 最低为冬季, 而各处理土壤酶活性则无一致的变化规律。② 总体而言, 氮沉降对土壤呼吸和酶活性均有抑制作用, 且抑制程度随氮浓度增加而加强, 但冬季氮沉降对马尾松林土壤呼吸有促进作用, 春、夏、秋这 3 个季节氮沉降对 Ure、Ive、CAT 及 ACP 有抑制作用, 而冬季氮沉降对 4 种土壤酶活性影响则存在差异。③ 逐步回归表明, 无氮和低氮处理时, T 、Ure 和 Ive 对 R_s 的贡献较大, 且随着 T 、Ure 和 Ive 的增加, R_s 也急剧增加; 中氮处理时, T 、Ure 和 CAT 对 R_s 的贡献较大, R_s 随着 T 、Ure 和 Ive 的增加而增加; 高氮处理时, R_s 随着 Ure 的增加而降低, 随着 CAT 和 W 的增加而增加。

关键词: 模拟氮沉降; 土壤呼吸; 土壤酶; 马尾松林; 土壤温度; 土壤湿度

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)10-3971-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2016. 10. 040

Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China

ZENG Qing-ping^{1,2}, HE Bing-hui^{1*}, LI Yuan³, XIA Li-wen¹, YANG Long-long¹, DENG Xue-mei¹, LI Chuan³

(1. Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. Sichuan Allvery Environmental Technology Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 3. Forestry Administration of Fuling, Chongqing 408000, China)

Abstract: Soil enzymes involved in the conversion of soil carbon and nitrogen, meanwhile the availability of soil carbon and nitrogen is the base of soil enzymes, yet atmospheric N deposition influences the release of soil CO_2 by reduce the activities of soil enzyme. The objective of this study was to investigate the effect of different nitrogen deposition on soil respiration and soil enzymes, and explore the relationship among soil respiration, soil temperature, soil moisture and soil enzymes in the Masson pine forest. The results might provide a reference for further study on the effects of nitrogen deposition on pine forest ecosystem. From May 2014 to July 2015, three nitrogen application treatments and a control treatment were set up: low nitrogen [N_5 , $20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], moderate nitrogen [N_{10} , $40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$], high nitrogen [N_{15} , $60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] and control treatment [N_0 , $0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$] in the Masson pine forest. We measured soil respiration, soil temperature, and soil moisture simultaneously by using the Automated Soil CO_2 Exchange Station (ACE, UK). The results showed that: ① Soil enzymes and soil respiration had obvious seasonal variation, soil respiration of N_0 , N_5 , N_{10} and N_{15} was the highest in Summer, followed by the Spring and Autumn, and the lowest in Winter, and no consistent change rule was found in soil enzymes. ② Generally, nitrogen deposition suppressed soil respiration and soil enzymes, and these inhibitory effects were strengthened with increasing levels of nitrogen deposition. The only exception in which nitrogen deposition enhanced soil respiration was in the Masson pine forest in Winter, In Spring, Summer and Autumn, nitrogen deposition suppressed soil enzymes, while there was

收稿日期: 2016-03-16; 修订日期: 2016-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271291); 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA10Z427); 国家林业局“948”项目(2015-4-42); 重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研2015-7); 重庆市应用开发计划重点项目(CSTC2014yykfb80015); 西南大学资源环境学院“光炯”创新实验项目(20150104)

作者简介: 曾清苹(1988~), 女, 硕士, 主要研究方向为经济林培育与林业生物技术, E-mail: 709904956@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

difference among Ure, Ive, CAT and ACP in Winter. ③ stepwise regression showed that in control treatment and low nitrogen treatment, T , Ure and Ive made great contributions to the R_s , and R_s rapidly increased with the increase of T , Ure and Ive. In middle nitrogen treatment, T , Ure and CAT made great contributions to the R_s , and R_s increased with the increase of T , Ure and CAT. In high nitrogen treatment, R_s decreased with the increase of Ure, yet R_s increased with the increase of CAT and W .

Key words: simulated nitrogen deposition; soil respiration; soil enzymes; Masson pine forest; soil temperature; soil moisture

随着全球现代化农业、畜牧业和工业的快速发展,许多地方人为氮排放量已超过自然排放量占主导地位,并不断向水体和陆地生态系统沉降^[1~3]. 继美国和北欧之后,中国已成为世界上第3个氮沉降集中区,1989~1990年珠江三角洲北缘的鼎湖山自然保护区的降水氮沉降量为 $35.57 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,而1998~1999年度则达到了 $38.4 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[4,5]. 2003~2004年北京地区氮沉降为 $32.5 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ^[6]. 一般认为, $25 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 是一个临界点^[7],当氮沉降量低于此值时,大部分氮被保留在生态系统中,但若超过此值,将达到过饱和状态. 过量的氮沉降会降低生物多样性、加剧土壤酸化、导致水体富营养化、减少土壤呼吸率及降低土壤酶活性等^[8,9],因此,在我国开展氮沉降对陆地生态系统影响的研究具有重要意义. 土壤呼吸(soil respiration, R_s)是大气 CO_2 的重要来源,主要由土壤微生物呼吸、土壤动物呼吸、植物根呼吸及土壤有机质分解产生^[10,11]. 土壤呼吸过程极为复杂,既受土壤微生物量、土壤酶活性、植被类型及凋落物等^[12,13]生物因子的影响,又受土壤质地、土壤温湿度及大气降水等^[14~16]非生物因子的影响,同时还受到耕作方式、施肥及土地利用类型等^[17~19]人类活动的综合影响. 氮沉降通过改变土壤酶活性和提高土壤矿化速率进而影响土壤 CO_2 的释放^[20],许多研究结果表明氮沉降抑制了土壤呼吸^[21,22]和酶活性^[23,24],也有学者发现氮沉降对土壤呼吸和酶活性有促进作用^[25,26]或无影响^[27],由此可见,氮沉降引起的土壤呼吸改变存在不确定性,而在不同氮沉降水平下,关于土壤呼吸和土壤酶效应的研究报道鲜见. 土壤酶积极参与土壤碳氮的转化,对提高土壤肥力有重要作用,同时土壤碳氮状况又是土壤酶活性的基础,对土壤酶活性有着不可忽视的影响^[28].

本文选取我国中亚热带地区广泛分布的马尾松林为研究对象,开展人工氮添加模拟氮沉降试验,探讨不同氮沉降水平对马尾松林土壤呼吸及土壤酶活性的影响,探索该区域马尾松林土壤呼吸和酶活性的动态特征及不同氮沉降水平下土壤酶活性和土壤呼吸的关系,以期为该区域马尾松林生态系统碳动

态提供参考.

1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区($106^\circ 22' \text{E}$, $29^\circ 45' \text{N}$)位于重庆市北碚区境内(图1),距市中心60 km. 缙云山占地面积 76 km^2 ,海拔350~951.5 m,属典型的中亚热带温暖湿润季风气候. 年平均温度 13.6°C ,最高气温 43°C ,最低气温 -1°C ;年平均相对湿度87%,年平均降雨量 1161.8 mm ,年均日照 1293.9 h ,干湿季分明. 雨季是4~9月(降雨量 1243.8 mm),其中7~8月是伏旱期(蒸发量 255.4 mm),降雨量小,蒸发量大,试验地2014年7月~2012年5月的月均降水和空气温度^[29]如图2. 土壤以酸性黄壤及水稻土为主,伴有少量零星分布的紫色土. 区内植物资源丰富,植被种类繁多,森林覆盖率达96.6%.

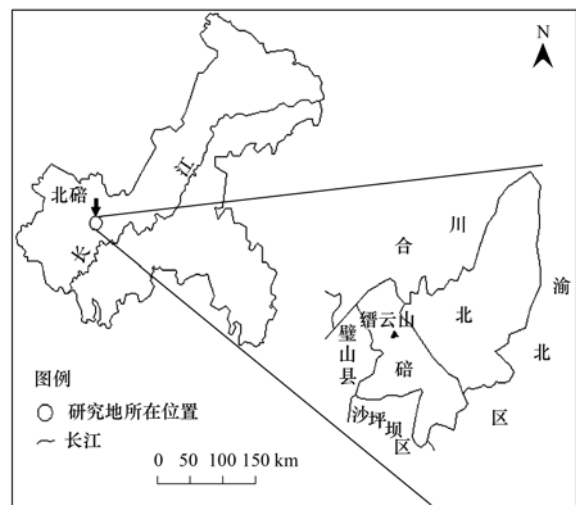


图1 研究样地地理位置示意

Fig. 1 Map of research plots at Jinyun natural conservation region

2 材料与方法

2.1 试验设计及样地背景值调查

2014年5月,在海拔350~500 m的马尾松林内选取3块面积为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$ 的代表性样地,沿样地对角线确定3个点,于每个点各设置4个 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ 的小样地(间隔 $>1 \text{ m}$ 以防相互干扰)作为氮添加处理(不考虑大气氮沉降)样方(图3). 参照氮饱和

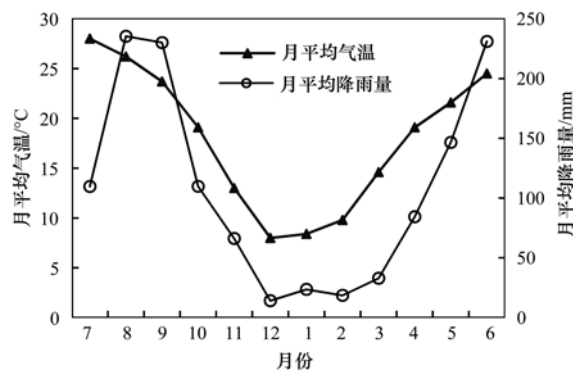


图2 研究区的月平均降水量和空气温度(2014-07~2015-06)

Fig. 2 Mean precipitation and air temperature in the study area (July 2014- June 2015)

项目、北美哈佛林和我国广东省东莞市大岭山森林公园等研究氮沉降处理的强度,并结合我国未来氮沉降可能继续增加的氮沉降趋势^[30~32],本试验氮添加处理共设置4个水平:对照 N_0 [$0\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]、低氮 N_5 [$20\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]、中氮 N_{10} [$40\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$]和高氮 N_{15} [$60\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$],每个处理各9次重复. 分别于当年的7月、11月及次年的2月、5月施入样地中. 施氮时将不同浓度 NH_4NO_3 溶于1 L水中,采用手提式喷雾器均匀喷洒在每个小样地内,对对照地喷洒等体积清水. 为消除流水等对样地氮含量造成影响,施氮时应保证高浓度样方在低浓度样方之下. 同时将长为16 cm内径为23 cm的PVC管随机埋入小样地中并确保管顶距土壤表面3 cm,去除管内植物和凋落物. 在每个季度初期选择晴天将不同浓度 NH_4NO_3 溶于1 L水中,采用手提式喷雾器均匀喷洒在每个小样地内,为排除试验中溶解 NH_4NO_3 所需水分对土壤呼吸和酶活性

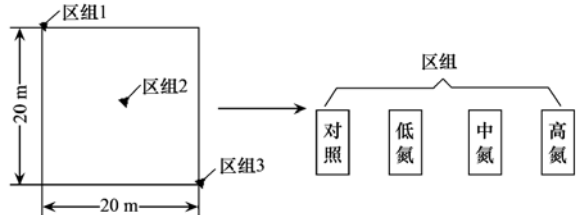


图3 氮沉降样地设计示意

Fig. 3 Schematic design of nitrogen-loaded research plots

的影响,在对照样地喷洒了等体积水.

45年生马尾松林平均密度为每亩35株,平均胸径18.6 cm,平均树高14.1 m,郁闭度80%,其主要优势乔木为:马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.);主要优势灌木为:杉木[*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.],盐肤木(*Rhus chinensis* Mill.),四川山矾(*Symplocos setchuensis* Brand),异叶榕(*Ficus heteromorpha* Hemsl.),青冈[*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oersted],野桐[*Mallotus japonicus* (Thunb.) Muell. Arg.],毛桐[*Mallotus barbatus* (Wall.) Muell. Arg.],朴树(*Celtis sinensis* Pers.),黄牛奶树[*Symplocos laurina* (Retz.) Wall.],钝叶柃(*Eurya obtusifolia* H. T. Chang),白栎(*Quercus fabri* Hance),慈竹[*Neosinocalamus affinis* (Rendle) Keng f.]等;主要优势草本为:边缘鳞盖蕨[*Microlepia marginata* (Houtt.) C. Chr.],中华里白[*Hicriopteris chinensis* (Ros.) Ching],粽叶狗尾草[*Setaria palmifolia* (Koen.) Stapf],菝葜(*Smilax china* Linn.),山莓(*Rubus corchorifolius* Linn. f.),尖叶清风藤(*Sabia swinhonei* Hemsl.),香花崖豆藤(*Millettia dielsiana* Harms)等. 土壤基本理化特征见表1.

表1 马尾松林土壤理化性质特征

Table 1 Soil physico-chemical properties in the Masson pine forest

pH	全氮 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	速效钾 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	SOC / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	砂粒 (1~0.05 mm)/%	粉粒 (0.05~0.005 mm)/%	粘粒 (<0.005 mm)/%
4.34	3.18	0.13	0.32	23.64	88.17	4.81	7.02

2.2 试验数据测定

2014年7月至2015年7月,夏、秋、冬、春4个季节(夏季用7月和9月所得数据平均值表示,秋季用11月和1月所得数据平均值表示,冬季用2月和3月所得数据平均值表示,春季用5月和6月所得数据平均值表示),在施氮2 d后(所施氮溶液完全渗入土壤后)选择晴朗天气,采用ACE自动土壤呼吸监测系统(automated soil CO_2 exchange station, UK)于7、9、11、1、2、3、5、6月对两林地土壤呼

吸进行测定,各测定4 d(连续),各个点每天共测定4次,测定时间为08:00~18:00(每次测定间隔2.5 h). 为了减小安放PVC管对土壤呼吸的影响,每个季度埋管与测定土壤呼吸时间间隔保持一致,并在每次测定前一天,将测定管内的地表植被自土壤表层彻底剪除,尽量不破坏土壤,以减少土壤扰动和根系损伤对测量结果的影响. 呼吸圈埋好后固定1 a.

脲酶(Ure)测定用靛酚比色法;转化酶(Ive)测定用3,5-二硝基水杨酸比色法; H_2O_2 酶(CAT)测

定用 KMnO_4 滴定法;酸性磷酸酶(ACP)测定用磷酸苯二钠法^[33].采用紫外可见分光光度计进行测定(仪器型号:UV-5200).所有测定结果均为3次重复的平均值,用烘干土壤质量表示.

2.3 试验数据测定

数据处理和统计分析在 SPSS 18.0、Excel 2003 等软件中进行,采用单因素方差分析法(LSD)比较土壤呼吸及土壤酶活性在不同氮处理、不同季节间的差异水平,采用回归分析方法比较土壤呼吸与土壤温湿度及酶活性之间的关系.

3 结果与分析

3.1 土壤呼吸、温度及湿度随季节的变化特征

由表2可知,季节变化对各浓度氮沉降处理下

土壤呼吸、土壤温度和土壤湿度影响显著($P < 0.05$), N_0 、 N_5 和 N_{10} 土壤呼吸均表现为夏季最高,其次是春季和秋季,冬季土壤呼吸最低,而 N_{15} 土壤呼吸随季节变化表现为春季 $[(3.66 \pm 0.38) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > \text{夏季} [(3.47 \pm 0.68) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > \text{秋季} [(3.06 \pm 0.74) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}] > \text{冬季} [(2.70 \pm 0.61) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$; N_0 、 N_5 、 N_{10} 和 N_{15} 土壤温度均随季节表现为夏 $>$ 秋 $>$ 春 $>$ 冬; N_0 、 N_5 和 N_{10} 土壤湿度的季节变化规律为春 $>$ 夏 $>$ 冬 $>$ 秋,而 N_{15} 土壤湿度最大出现在夏季,为 $(27.79 \pm 1.71)\%$,其次是春季和冬季,其值分别为 $(27.47 \pm 1.82)\%$ 和 $(17.40 \pm 0.71)\%$,土壤湿度最小为秋季 $(13.69 \pm 1.31)\%$.

表2 不同季节氮沉降处理对土壤呼吸的季节性影响(平均值 $\pm$ SD)¹⁾/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

Table 2 Seasonal effects of different nitrogen deposition treatments on soil respiration(mean $\pm$ SD)/ $\mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$

指标	处理	春	夏	秋	冬
土壤呼吸	N_0	3.85 ± 0.27 (Ba)	3.93 ± 0.38 (Ab)	3.49 ± 0.50 (Ca)	2.63 ± 0.41 (Dd)
	N_5	3.79 ± 1.10 (Bb)	3.95 ± 0.35 (Aa)	3.23 ± 0.90 (Cc)	2.80 ± 0.32 (Da)
	N_{10}	3.67 ± 0.80 (Bc)	3.85 ± 0.61 (Ac)	3.30 ± 0.70 (Db)	2.65 ± 0.45 (Cc)
	N_{15}	3.66 ± 0.38 (Ad)	3.47 ± 0.68 (Bd)	3.06 ± 0.74 (Cd)	2.70 ± 0.61 (Db)
0~10 cm 土壤温度	N_0	20.19 ± 0.94 (Cd)	27.77 ± 1.58 (Ab)	21.38 ± 0.16 (Bd)	13.765 ± 0.429 (Dd)
	N_5	20.49 ± 1.01 (Cb)	27.59 ± 1.09 (Ad)	21.48 ± 0.93 (Bb)	14.131 ± 0.239 (Db)
	N_{10}	20.25 ± 0.79 (Cc)	27.67 ± 1.25 (Ac)	21.47 ± 0.21 (Bc)	14.142 ± 0.103 (Da)
	N_{15}	20.95 ± 0.71 (Ca)	27.82 ± 1.56 (Aa)	21.58 ± 0.31 (Ba)	13.981 ± 0.333 (Dc)
0~10 cm 土壤湿度	N_0	27.72 ± 0.71 (Aa)	27.23 ± 2.99 (Bb)	13.22 ± 2.13 (Dc)	17.14 ± 2.01 (Cd)
	N_5	27.70 ± 1.13 (Ba)	26.51 ± 1.34 (Bc)	13.69 ± 2.96 (Db)	18.15 ± 1.59 (Ca)
	N_{10}	27.56 ± 0.13 (Ab)	27.23 ± 2.69 (Bb)	13.88 ± 1.90 (Da)	17.36 ± 1.42 (Cc)
	N_{15}	27.47 ± 1.82 (Bd)	27.79 ± 1.71 (Aa)	13.69 ± 1.31 (Db)	17.40 ± 0.71 (Cb)

1) 不同小写字母表示相同季节不同处理间差异显著($P < 0.05$),不同大写字母表示相同处理不同季节间差异显著($P < 0.05$)

3.2 模拟氮沉降对土壤呼吸、温度及湿度的影响

氮沉降对土壤呼吸有显著影响(表2).春季氮沉降处理后,土壤呼吸随氮沉降浓度升高而直线降低;夏季氮沉降处理后,土壤呼吸则表现为先增加后降低的变化趋势;秋季氮沉降处理后,土壤呼吸变化趋势为 $N_0 > N_5 > N_{10} > N_{15}$;冬季氮沉降处理后,土壤呼吸最大值出现在 N_5 组,为 $[(2.80 \pm 0.32) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$,其次是 N_{15} 和 N_{10} 组,其值分别为 $[(2.70 \pm 0.61) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ 和 $[(2.65 \pm 0.45) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$,土壤呼吸最低为 N_0 组 $[(2.63 \pm 0.41) \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$.土壤温度和湿度也显著受氮沉降影响.

3.3 土壤酶活性随季节变化特征

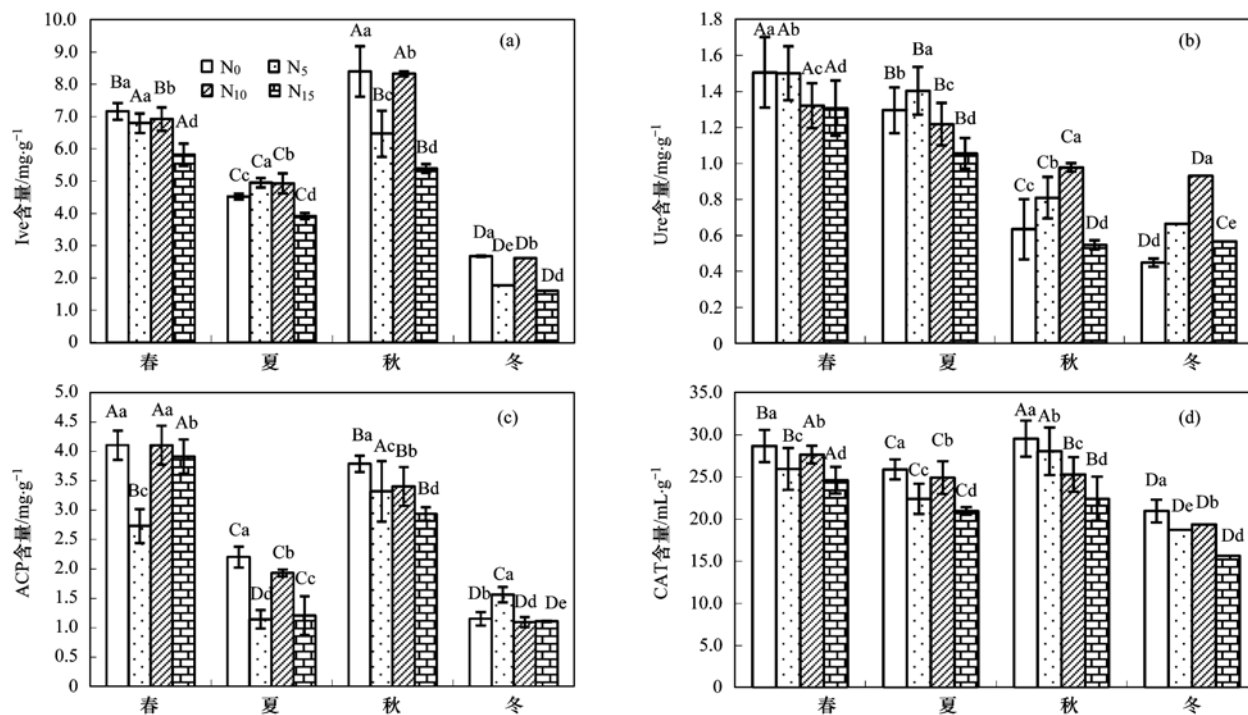
季节变化对土壤Ure、Ive、CAT及ACP酶活性影响显著($P < 0.05$),且氮沉降浓度不同影响结果各异(图4). N_0 、 N_5 和 N_{10} 组Ure酶活性随季节变

化表现为春 $>$ 夏 $>$ 秋 $>$ 冬, N_{15} 组则表现为春 $>$ 夏 $>$ 秋 $>$ 冬; N_0 和 N_{10} 组Ive酶活性随季节变化为秋 $>$ 春 $>$ 夏 $>$ 冬, N_5 和 N_{15} 组则为春 $>$ 秋 $>$ 夏 $>$ 冬; N_0 和 N_5 组CAT酶活性随季节变化为秋 $>$ 春 $>$ 夏 $>$ 冬, N_{10} 和 N_{15} 组则为春 $>$ 秋 $>$ 冬 $>$ 夏; N_0 、 N_{10} 和 N_{15} 组ACP酶活性春季最高,秋季和夏季次之,最低为冬季, N_5 组ACP酶活性大小依次为秋 $[(3.32 \pm 0.51) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}] > \text{春} [(2.73 \pm 0.29) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}] > \text{冬} [(1.56 \pm 0.13) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}] > \text{夏} [(1.14 \pm 0.16) \text{mg} \cdot \text{g}^{-1}]$

3.4 模拟氮沉降对土壤酶活性的影响

不同氮沉降处理对土壤酶活性的影响达到显著水平($P < 0.05$).整体而言,氮沉降对Ure、Ive、CAT和ACP有显著的抑制作用(图4).

春季模拟氮沉降结果表明,随着氮浓度的升高,土壤酶活性总体表现为先降低后增加再降低的变化



不同小写字母表示相同季节不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同处理不同季节间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 不同季节氮沉降处理对土壤酶活性的季节性影响

Fig. 4 Seasonal effects of different nitrogen deposition treatments on soil enzymes

趋势. 与 N_0 相比, N_5 、 N_{10} 及 N_{15} 组 Ure 酶活性分别降低了 0.37%、12.30%、13.20%; IVE 酶活性分别降低了 5.14%、3.34%、18.72%; ACP 酶活性分别降低了 33.49%、0.02%、4.7%.

夏季模拟氮沉降处理后, 各土壤酶活性变化趋势与春季相似. 与 N_0 相比, N_5 、 N_{10} 及 N_{15} 组 Ure 酶活性分别增加了 8.37%, 降低了 5.98% 和 18.53%; IVE 酶活性分别增加了 9.43% 和 8.98%, 降低了 13.40%; CAT 酶活性分别降低了 13.53%、3.74%、19.11%; ACP 酶活性分别降低了 48.07%、12.28%、45.21%.

秋季模拟氮沉降处理后, 4 种酶活性变化趋势各不相同. 与 N_0 相比, N_5 、 N_{10} 及 N_{15} 组 Ure 酶活性分别增加了 27.60% 和 53.97%, 降低了 13.69%; IVE 酶活性分别降低了 22.98%、0.91%、35.82%; CAT 酶活性分别降低了 5.05%、14.32%、24.14%; ACP 酶活性分别降低了 12.37%、10.16%、22.51%.

冬季模拟氮沉降处理后, 与 N_0 相比, N_5 、 N_{10} 及 N_{15} 组 Ure 酶活性分别增加了 48.07% 和 40.11%, 降低了 13.69%; IVE 酶活性分别降低了 33.86%, 增加了 47.60%, 降低了 38.66%; CAT 酶活性分别降低了 10.68%, 增加了 3.42%, 降低了 19.01%;

ACP 酶活性分别增加了 35.67%, 降低了 29.92%, 增加了 1.30%.

3.5 氮沉降处理下马尾松林土壤呼吸与土壤酶活性及环境因子的关系分析

土壤呼吸与土壤酶活性、土壤温度及湿度间的相关性分析结果表明 (表 3), R_s 与 W 、 T 、Ure、IVE、CAT 及 ACP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); T 与 W 、Ure、IVE 及 CAT 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); W 与 Ure 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); Ure 与 IVE 及 CAT 呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 而与 ACP 呈显著正相关 ($P < 0.05$); IVE 与 CAT 及 ACP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$); CAT 与 ACP 呈极显著正相关 ($P < 0.01$).

为了进一步说明不同氮沉降浓度下马尾松林 R_s 与 W 、 T 、Ure、IVE、CAT 及 ACP 的关系, 采用逐步回归分析 4 个氮水平所得最优方程如下.

N_0 处理:

$$Y = 0.049X_1 + 0.578X_2 + 0.066X_3 + 1.525 \quad (1)$$

N_{10} 处理:

$$Y = 0.037X_1 + 0.855X_2 + 0.008X_3 + 1.701 \quad (2)$$

N_{15} 处理:

$$Y = 0.052X_1 + 1.003X_2 + 0.038X_4 + 0.239 \quad (3)$$

N_{20} 处理:

$$Y = -0.381X_2 + 0.081X_4 + 0.051X_5 + 0.239 \quad (4)$$

表 3 土壤呼吸与酶活性、土壤湿度及土壤温度之间的相关系数¹⁾

Table 3 Correlation coefficients among soil enzyme, soil moisture and soil temperature

氮沉降浓度		T	W	R_s	Ure	Ive	CAT	ACP
氮沉降浓度	1	0.020	0.014	-0.203	-0.091	-0.202	-0.454	-0.109
T	NS	1	0.500	0.813	0.543	0.412	0.444	0.122
W	NS	* *	1	0.720	0.849	0.038	0.175	0.026
R_s	NS	* *	* *	1	0.844	0.610	0.680	0.437
Ure	NS	* *	* *	* *	1	0.405	0.461	0.303
Ive	NS	* *	NS	* *	* *	1	0.896	0.847
CAT	* *	* *	NS	* *	* *	* *	1	0.822
ACP	NS	NS	NS	* *	*	* *	* *	1

1) * 和 ** 分别表示在 5% 和 1% 水平显著性; NS: 不显著; *T*: 土壤温度; *W*: 土壤湿度; *R_s*: 土壤呼吸; Ure: 脲酶; Ive: 转化酶(蔗糖酶); CAT: 过氧化氢酶; ACP: 酸性磷酸酶

式中, Y : R_s ; X_1 : T ; X_2 : Ure; X_3 : Ive; X_4 : CAT; X_5 : W . 方程(1)表明 T 、Ure 和 Ive 对 R_s 的标准系数分别为 0.473 ($P < 0.01$)、0.495 ($P < 0.01$) 和 0.286 ($P < 0.01$), 方程(2)表明 T 、Ure 和 Ive 对 R_s 的标准系数分别为 0.382 ($P < 0.01$)、0.679 ($P < 0.01$) 和 0.035 ($P < 0.01$), 由此可知无氮和低氮处理时, T 、Ure 和 Ive 对 R_s 的贡献较大, 且随着 T 、Ure 和 Ive 的增加, R_s 也急剧增加; 方程(3)表明 T 、Ure 和 CAT 对 R_s 的标准系数分别为 0.544 ($P < 0.01$)、0.353 ($P < 0.01$) 和 0.251 ($P < 0.01$), T 、Ure 和 CAT 对 R_s 的贡献较大, R_s 随着 T 、Ure 和 Ive 的增加而增加; 方程(4)表明 Ure、CAT 和 W 对 R_s 的标准系数分别为 -0.332 ($P < 0.01$)、0.715 ($P < 0.01$) 和 0.856 ($P < 0.01$), 说明 R_s 随着 Ure 的增加而降低, 随着 CAT 和 W 的增加而增加。

4 讨论

4.1 氮沉降对土壤呼吸的影响

本试验结果表明在模拟氮沉降的春季、夏季及秋季, 氮沉降处理使土壤 CO_2 排放速率降低了 1% ~ 13%, 而在模拟氮沉降的冬季, 氮沉降处理使土壤 CO_2 排放速率升高了 0.5% ~ 7%, 且各个处理浓度均达到显著水平 ($P < 0.05$). 氮沉降使土壤呼吸降低的原因可能是: ①氮沉降增加了土壤铵态氮和硝态氮含量, 高浓度氨氮含量降低微生物活性和数量, 产生抑制物质或影响土壤酶系统, 从而阻碍凋落物分解和养分释放, 进而减慢土壤碳释放速度. ②氮沉降加强土壤硝化作用, 使森林土壤 pH 值降低, 加速土壤酸化^[34], 降低植物根系生长和根生物量, 致使根际分泌物减少, 进而抑制植物根系呼吸^[35]. ③在氮素丰富的地区, 当森林土壤氮含量达到饱和状态后, 过量的氮沉降就会对土壤呼吸产生抑制的

作用^[36,37]. ④可能是水分对土壤呼吸的激发效应^[38]. 春、夏、秋、冬这 4 个季节的土壤呼吸均在每次施氮后从第 3 d 开始连续测定 4 d, 由于水分变化对土壤呼吸存在较强的激发效应, 尤其是水分添加后 48 ~ 72 h 内激发效应最强, 而本研究的氮添加通过溶液形式添加到土壤中, 对照也会施用等量清水, 因此, 施氮后 3 ~ 6 d 内进行的气体采集与测定可能为水分激发效应的影响. 此外, 由于每个季节观测持续时间较短, 而每次观测前土壤的干旱程度及干旱持续时间也会影响到施用含氮水溶液之后土壤激发效应的强弱.

4.2 氮沉降对土壤酶活性的影响

土壤酶参与并影响土壤中一系列生化反应, 且在物质循环和能量流动等过程中最为活跃, 其活性高低反映了土壤生物活性和土壤生化反应强度, 因此常被用作土壤质量的评价指标^[39]. 在适宜的环境条件下, 土壤酶对土壤养分溶解、各种生化过程反应速率、微生物代谢过程等都具有显著促进作用^[40], 但当环境条件(氮元素添加等)改变甚至超过土壤酶适宜生长的范围时, 土壤酶活性则会受到限制. Ajwa 等^[23]发现氮沉降使脲酶活性降低 6% ~ 13%, 周晓兵等^[24]则发现 $1.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $3.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 使 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层转化酶活性升高, 但随着施氮量的继续增加, $6.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $24.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 处理使 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 土层转化酶活性降低; 氮沉降使土壤脲酶降低, 与对照相比, 3.0、6.0 和 $24.0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 处理使 0 ~ 5 cm 土层脲酶活性分别降低了 23.6%、37.1% 和 67.2%, 使 5 ~ 10 cm 土层脲酶活性比对照分别降低了 20.2%、25.0% 和 42.7%. 而本研究结果表明, 春季氮沉降处理时, Ure、Ive、CAT 及 ACP 这 4 种酶活性均受到抑制, 且抑制程度随氮沉降增加而增加;

在夏季氮沉降处理时,低氮促进了 Ure 和 Ive,但抑制了 CAT 及 ACP,中氮使 Ive 升高使 Ure、CAT 及 ACP 降低,而高氮对 4 种酶活性均表现为抑制作用;秋季氮沉降处理时,低、中氮使 Ure 升高,使 Ive、CAT 及 ACP 降低,高氮仍表现为抑制作用;冬季氮沉降处理后,低氮抑制了 Ive 和 CAT,促进了 Ure 和 ACP,中氮使 Ure、Ive 和 CAT 升高,使 ACP 降低,高氮则使 Ure、Ive、CAT 降低,使 ACP 升高. 总体而言,春、夏、秋这 3 个季节氮沉降对土壤酶活性具有毒害作用,这与 Ajwa 等^[23]研究结论一致,与周晓兵等^[24]研究部分一致. 原因可能是试验所用浓度不同,本试验所采用的最低浓度为 $20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,显著高于周晓兵等^[24]所采用的最高浓度,而在此浓度下脲酶和转化酶均表现为受抑制状态. 本试验中冬季氮沉降处理后,Ure、Ive、CAT 及 ACP 这 4 种酶活性对不同浓度氮响应结果表现不一致,这可能与冬季马尾松林土壤温度和湿度有关,与春夏秋季相比,冬季马尾松林地土壤温度仅 13°C 左右,土壤湿度也仅保持在 17% 上下,而土壤温度与 Ure、Ive 及 CAT 呈极显著正相关($P < 0.01$),土壤湿度与 Ure 呈极显著正相关($P < 0.01$),导致了土壤酶对不同氮沉降水平响应不一致. 然而也有研究表明氮沉降能增加土壤酶活性^[41],可能原因是试验添加的氮形态不同,活性试验土壤本身的理化性质间差异所致.

4.3 不同氮沉降浓度下土壤呼吸与土壤酶活性的关系

当氮素保持在林地所需范围时,氮添加打破了林地土壤原有的营养元素平衡,使土壤中氮素增加,增加了土壤微生物的营养来源,进而提高了土壤微生物数量和活性,使微生物生长加快,代谢增强,呼吸速率加快从而使土壤表面积聚较高的土壤酶活性,土壤酶加速了土壤生化反应的速率,最终加快土壤释放 CO_2 的速度. 但当氮元素超出林地所需范围时,某些对氮浓度适应范围较低的酶种类则急速下降,而对氮浓度需求较高的则急速增长,从而导致了土壤呼吸贡献的土壤酶类型的变化. 本研究结果表明,低氮处理并未改变对 R_s 的贡献较大的 T 、Ure 和 Ive 的类型,中氮处理时,CAT 取代 Ive 成为对 R_s 的贡献较大土壤酶,当高氮处理时,CAT 和 W 取代 T 和 Ive 成为对 R_s 的贡献较大土壤酶.

5 结论

(1)土壤酶和土壤呼吸均具有明显的季节变化规律,各处理土壤呼吸均表现为夏季土壤呼吸最高,

其次是春季和秋季,最低为冬季,而各处理土壤酶活性则无一致的变化规律.

(2)总体而言,氮沉降抑制了土壤表层呼吸和土壤酶活性,且抑制程度随氮沉降增加而升高,但在土壤湿度低的冬季,氮沉降对马尾松林土壤呼吸有促进作用,对 Ure、Ive、CAT 及 ACP 这 4 种土壤酶活性降低作用表现不一致.

(3)逐步回归表明,无氮和低氮处理时, T 、Ure 和 Ive 对 R_s 的贡献较大,且随着 T 、Ure 和 Ive 的增加, R_s 也急剧增加;中氮处理时, T 、Ure 和 CAT 对 R_s 的贡献较大, R_s 随着 T 、Ure 和 Ive 的增加而增加;高氮处理时, R_s 随着 Ure 的增加而降低,随着 CAT 和 W 的增加而增加.

致谢:感谢李正轮老师及梁伟师兄对本研究数据检测的支持.

参考文献:

- [1] Mooney H A, Vitousek P M, Matson P A. Exchange of materials between terrestrial Ecosystems and the atmosphere[J]. *Science*, 1987, **238**(4829): 926-932.
- [2] Vitousek P M, Aber J D, Howarth R W, *et al.* Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences[J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**(3): 737-750.
- [3] Kaiser J. The other global pollutant: nitrogen proves tough to curb[J]. *Science*, 2001, **294**(5545): 1268-1269.
- [4] 黄忠良,丁明懋,张祝平,等. 鼎湖山季风常绿阔叶林的水文学过程及其氮素动态[J]. *植物生态学报*, 1994, **18**(2): 194-199.
- [5] 周国逸,闫俊华. 鼎湖山区域大气降水特征和物质元素输入对森林生态系统存在和发育的影响[J]. *生态学报*, 2001, **21**(12): 2002-2012.
- [6] 张颖,刘学军,张福锁,等. 华北平原大气氮素沉降的时空变异[J]. *生态学报*, 2006, **26**(6): 1633-1639.
- [7] Galloway J N, Cowling E B. Reactive nitrogen and the world: 200 years of change[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2002, **31**(2): 64-71.
- [8] Erisman J W, Galloway J N, Seitzinger S, *et al.* Consequences of human modification of the global nitrogen cycle[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2013, **368**(1621): 20130116.
- [9] Zhao J, Wang F M, Li J, *et al.* Effects of experimental nitrogen and/or phosphorus additions on soil nematode communities in a secondary tropical forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 1-10.
- [10] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, **48**(1): 7-20.
- [11] Schimel D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. *Global Change Biology*, 1995, **1**(1): 77-91.
- [12] 李红生,刘广全,王鸿喆,等. 黄土高原四种人工植物群落土壤呼吸季节变化及其影响因子[J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 4099-4106.
- [13] Mo J M, Zhang W, Zhu W X, *et al.* Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J].

- Global Change Biology, 2008, **14**(2): 403-412.
- [14] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 不同土地利用下土壤呼吸温度敏感性差异及影响因素分析[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(11): 1537-1542.
- [15] Lee M S, Nakane K, Nakatsubo T, *et al.* Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest [J]. Ecological Research, 2002, **17**(3): 401-409.
- [16] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地理科学进展, 2005, **20**(7): 778-785.
- [17] 贾淑霞, 王政权, 梅莉, 等. 施肥对落叶松和水曲柳人工林土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2007, **31**(3): 372-379.
- [18] 王小国, 朱波, 王艳强, 等. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性[J]. 生态学报, 2007, **27**(5): 1960-1968.
- [19] 孟凡乔, 关桂红, 张庆忠, 等. 华北高产农田长期不同耕作方式下土壤呼吸及其季节变化规律[J]. 环境科学学报, 2006, **26**(6): 992-999.
- [20] Sitaula B K, Bakken L R, Abrahamsen G. N-fertilization and soil acidification effects on N₂O and CO₂ emission from temperate pine forest soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1995, **27**(11): 1401-1408.
- [21] 刘益君, 闫文德, 郑威, 等. 施氮对湿地松(*Pinus elliotii*)林土壤呼吸和相关因子的影响[J]. 生态学报, 2016, **36**(2): 342-349.
- [22] Sun Z Z, Liu L L, Ma Y C, *et al.* The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **197**: 103-110.
- [23] Ajwa H A, Dell C J, Rice C W. Changes in enzyme activities and microbial biomass of tallgrass prairie soil as related to burning and nitrogen fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 1999, **31**(5): 769-777.
- [24] 周晓兵, 张元明, 陶冶, 等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量氮对模拟氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2011, **31**(12): 3340-3349.
- [25] Tu L H, Hu T X, Zhang J, *et al.* Nitrogen addition stimulates different components of soil respiration in a subtropical bamboo ecosystem[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, **58**: 255-264.
- [26] 涂利华, 胡庭兴, 张健, 等. 华西雨屏区苦竹林土壤酶活性对模拟氮沉降的响应[J]. 应用生态学报, 2009, **20**(12): 2943-2948.
- [27] Hasselquist N J, Metcalfe D B, Höglberg P. Contrasting effects of low and high nitrogen additions on soil CO₂ flux components and ectomycorrhizal fungal sporocarp production in a boreal forest [J]. Global Change Biology, 2012, **18**(12): 3596-3605.
- [28] 沈芳芳, 袁颖红, 樊后保, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤有机碳矿化和土壤酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 517-527.
- [29] 中国天气网: <http://cq.weather.com.cn/qxfwcp/yqhpj/index.shtml>.
- [30] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects [J]. Forest Ecology and Management, 1998, **101**(1-3): 1-7.
- [31] Gundersen P, Emmett B A, Kjønnaas 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.
- [32] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 等. 模拟氮沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(5): 1422-1433.
- [33] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 27-30.
- [34] 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.
- [35] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学, 2014, **50**(1): 1-8.
- [36] Franklin O, Höglberg P, Ekblad A, *et al.* Pine forest floor carbon accumulation in response to N and PK additions: bomb ¹⁴C modelling and respiration studies [J]. Ecosystems, 2003, **6**(7): 644-658.
- [37] Maier C A, Kress L W. Soil CO₂ evolution and root respiration in 11 year-old loblolly pine (*Pinus taeda*) plantations as affected by moisture and nutrient availability [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, **30**(3): 347-359.
- [38] 张延, 梁爱珍, 张晓平, 等. 不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响[J]. 环境科学, 2016, **37**(3): 1106-1113.
- [39] von Mersi W, Schinner F. An improved and accurate method for determining the dehydrogenase activity of soils with iodonitrotetrazolium chloride [J]. Biology and Fertility of Soils, 1991, **11**(3): 216-220.
- [40] 周礼恺. 土壤酶学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [41] 宋学贵, 胡庭兴, 鲜骏仁, 等. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟 N 沉降的响应[J]. 生态学报, 2009, **29**(3): 1234-1240.

CONTENTS

Scavenging Effect of Rime and East Wind on PM _{2.5} Under Air Heavy Pollution in Beijing	SUN Zhao-bin, LIAO Xiao-nong, WANG Zhan-shan, <i>et al.</i> (3679)
Impact of Collision Removal of Rainfall on Aerosol Particles of Different Sizes	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, CHEN Yi-na (3686)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of VOCs During the Haze Period in the Winter in Beijing	LIU Dan, XIE Qiang, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (3693)
Pollution Characteristics and Emission Coefficient of Volatile Organic Compounds from Shoe-making Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, YAO Yi, CAI Wei-dan, <i>et al.</i> (3702)
Oxidative Capacity of the PM ₁₀ and PM _{2.5} in Beijing During 2014 APEC	GUO Qian, SHAO Long-yi, WANG Wen-hua, <i>et al.</i> (3708)
Concentration, Water-Soluble Ionic and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Composition and Sources of PM _{2.5} During Summer in Hongshan District, Wuhan	SUN Yan, QI Shi-hua, ZHANG Li, <i>et al.</i> (3714)
Statistical Characteristics of Urban Changzhou PM _{2.5} Based on <i>k</i> -means Analysis	WANG Zhen, YU Yi-jun, XU Pu-qing, <i>et al.</i> (3723)
Comparison Test Between On-line Monitoring of Water-soluble Ions and Filter-based Manual Methods for PM _{2.5}	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, SHI Ai-jun, <i>et al.</i> (3730)
Chemical Composition of Water-soluble Ions in Smoke Emitted from Tree Branch Combustion	LIU Gang, HUANG Ke, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (3737)
Number Concentration and Size Distribution of Particles Emitted by Light-duty Gasoline Vehicles	FAN Xiao-xiao, JIANG Jing-kun, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (3743)
Testbed-Based Exhaust Emission Factors for Marine Diesel Engines in China	XING Hui, DUAN Shu-lin, HUANG Lian-zhong, <i>et al.</i> (3750)
Distribution, Source and Human Exposure of Phthalic Acid Esters (PAEs) in Surface Dust in Urban Area of Xi'an City, China	ZHANG Wen-juan, WANG Li-jun, WANG Li, <i>et al.</i> (3758)
Mercury Emission Characteristics and Mercury Concentrations of Municipal Solid Waste in Waste Incineration Plants	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (3766)
Role of Sulfate-Reducing Bacteria in Mercury Methylation in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir Area	CHEN Rui, CHEN Hua, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3774)
Impact of Urbanization on the Sources of Dissolved <i>n</i> -alkane in Underground River	LIAO Yu, SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, <i>et al.</i> (3781)
Source Apportionment and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Water from Yangtze River, China; Based on PMF Model	WANG Cheng-long, ZOU Xin-qing, ZHAO Yi-fei, <i>et al.</i> (3789)
Hydro-chemical Characteristics and Quality Assessment of Surface Water in Gongga Mountain Region	HE Xiao-li, WU Yan-hong, ZHOU Jun, <i>et al.</i> (3798)
UV-Visible Spectra Properties of DOM from Taizi River in Benxi City Section by Multivariable Analysis	QIAN Feng, WU Jie-yun, YU Hui-bin, <i>et al.</i> (3806)
Vertical Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter in Groundwater and Its Cause	HE Xiao-song, ZHANG Hui, HUANG Cai-hong, <i>et al.</i> (3813)
Sediment Characteristics of Sewer in Different Functional Areas of Kunming	CHANG Hai-dong, JIN Peng-kang, FU Bo-wen, <i>et al.</i> (3821)
Concentration of Phosphorus in Sediments Interstitial Water as Affected by Distribution of Aquatic Plants in Dianchi Lake	DING Shuai, WANG Sheng-rui, ZHANG Rui, <i>et al.</i> (3828)
Efficiency and Mechanism of Capping with Purple Parent Rocks to Control Phosphorus Release from Sediments	HUANG Xue-jiao, SHI Wen-hao, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (3835)
Temporal and Spatial Distribution of Phosphorus in Paddy Fields Under Cyclic Irrigation of Drainage Water	JIAO Ping-jin, XU Di, ZHU Jian-qiang, <i>et al.</i> (3842)
GO/QPEI Nanocomposite for Fast and High-capacity Removal of <i>M. Aeruginosa</i>	LI Jie, XIAO Lin (3850)
Enhanced Pollutant Removal Performance of an Integrated Biological Settling Tank from Micro-polluted Water Bodies	WANG Wen-dong, LIU Hui, MA Cui, <i>et al.</i> (3858)
Odorants Removal and Microbial Characteristics in Treatment of Micro-polluted Source Water with Biological Powdered Activated Carbon-Ultrafiltration Combined Process	XUAN Yong-qi, ZHOU Li, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (3864)
Effect of Polysilicic Acid on the Deposition Behavior of Different Aluminum Species	ZHAO Yuan-yuan, ZHANG Yue, LI Su-ying, <i>et al.</i> (3870)
Concentration Variation and Removal of Amino Acids in Typical Drinking Sources in the South of China	LIU Wei, CAI Guang-qiang, LU Xiao-yan, <i>et al.</i> (3877)
Degradation of the Nitrogenous Heterocyclic Compound Quinoline by O ₃ /UV	CHEN Ao-lei, CHANG Feng-min, WANG Cui-ping, <i>et al.</i> (3884)
Impact of Anthraquinone-2-sulfonic Acid on the MO Decolorization, Hydrogen Production and Energy Creation During Anaerobic Fermentation of <i>Klebsiella oxytoca</i> GS-4-08 with Sucrose	HU Jin-mei, YU Lei, HUANG Tian-yin (3891)
Classification and Analysis of Dissolved Organic Matter in 2-Buternal Manufacture Wastewater	SUN Xiu-mei, SONG Guang-qing, XI Hong-bo, <i>et al.</i> (3899)
Concentration of Nitrate in Main Anoxic Stage and PHA, TP Metabolism for Nitrogen and Phosphorus Removal in Single Sludge System with Continuous Flow	WANG Xiao-ling, YUAN Dong-dan, BAI Li, <i>et al.</i> (3906)
Distribution Characteristics of Anaerobic Ammonia Oxidation Bacteria in Sediments from the Adjacent Seas of Yangtze Estuary	FU Lu-lu, ZHEN Yu, HE Hui, <i>et al.</i> (3914)
Bacterial Community Composition of Activated Sludge from Coking Wastewater	MENG Xiao-jun, LI Hai-bo, CAO Hong-bin, <i>et al.</i> (3923)
Soil Bacterial Communities Under Different Vegetation Types in the Loess Plateau	LIU Yang, HUANG Yi-mei, ZENG Quan-chao (3931)
Effects of Phenol on Activity and Microfauna Community Structure of Activated Sludge	HU Xiao-bing, RAO Qiang, TANG Su-lan, <i>et al.</i> (3939)
Comparative Investigation of Antibiotic Resistance Genes Between Wastewater and Landfill Leachate	HUANG Fu-yi, LI Hu, AN Xin-li, <i>et al.</i> (3949)
Performance and Influencing Factors of Dissimilatory Nitrate Reduction to Ammonium Process by the Strain <i>Desulfonitrospira</i> sp. CMX	XIE Bing-ke, ZHANG Yu, WANG Xiao-wei, <i>et al.</i> (3955)
Effect of Straw Incorporation and Domestic Sewage Irrigation on Ammonia Volatilization from Paddy Fields	XU Shan-shan, HOU Peng-fu, FAN Li-hui, <i>et al.</i> (3963)
Seasonal Effect of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Respiration and Soil Enzyme Activity in Masson Pine Forest in Mt. Jinyun, Chongqing, China	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, LI Yuan, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Biochar Amendment and Irrigation on Denitrification Losses in Greenhouse Tomato Fields	ZHANG Wen-juan, SHE Dong-li, Gamareldawla H. D. Agbna, <i>et al.</i> (3979)
Effects of Soil Texture on Autotrophic CO ₂ Fixation Bacterial Communities and Their CO ₂ Assimilation Contents	WANG Qun-yan, WU Xiao-hong, ZHU Zhen-ke, <i>et al.</i> (3987)
Simulation of the Absorption, Migration and Accumulation Process of Heavy Metal Elements in Soil-crop System	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (3996)
Synergetic Control of Bioavailability of Pb, Cd and As in the Rice Paddy System by Combined Amendments	WANG Ying-jie, ZOU Jia-ling, YANG Wen-tao, <i>et al.</i> (4004)
Effects of Different Organic Materials on Bio-availability of Cd, Pb in a Contaminated Greenhouse Soil	ZHOU Gui-yu, JIANG Hui-min, YANG Jun-cheng, <i>et al.</i> (4011)
Effect of Montmorillonite on Fractions and Availability of Phosphorus in Soils Applied with Organic Fertilizer	SONG Xian-wei, ZHAO Xiu-lan, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4020)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Uptake by Chinese Cabbage at Different Soil pH and Cadmium Levels	QIN Yu-li, XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4030)
Characterization of Cr Tolerance and Accumulation in <i>Lolium perenne</i> L. and <i>Pharbitis purpurea</i> (L.) Voigt	DONG Bing-bing, CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, <i>et al.</i> (4044)
<i>In vitro</i> Metabolism of Volatile Methyl Siloxanes	LI Min-dan, ZHENG Guo-mao, WAN Yi, <i>et al.</i> (4054)
Efficiency of Aerobic Co-composting of Urban Sludge and Chinese Medicinal Herbal Residues	SU Cheng-yuan, ZHENG Peng, RUAN Qi-hua, <i>et al.</i> (4062)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
赵进才 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)

2016年10月15日 第37卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 10 Oct. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行