

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化硝酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517)      《环境科学》征稿简则 (3561)      信息 (3289, 3321, 3422)

# 应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响

曾清苹<sup>1,2</sup>, 何丙辉<sup>1\*</sup>

(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)

**摘要:** 氮沉降虽可提升林地生产力却会给环境造成压力, 而土壤微生物对环境变化敏感. 通过野外模拟试验, 探讨不同氮沉降量对马尾松土壤微生物群落的影响, 探索该区域马尾松土壤微生物群落与土壤温湿度、氮沉降浓度的关系, 为深入研究氮沉降对马尾松林土壤生态系统的影响提供参考. 2014 年 5 月~2015 年 6 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 [ $N_{20}, 20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], 中氮 [ $N_{40}, 40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], 高氮 [ $N_{60}, 60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] 和对照 [ $N_0, 0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], 采用磷脂脂肪酸 (PLFA) 标记法和 ACE (automated soil  $\text{CO}_2$  exchange station, UK) 自动土壤呼吸监测系统分别对土壤微生物群落结构、土壤温度和土壤湿度进行分析测定. 结果表明: ① 季节变化对土壤细菌、真菌、放线菌及总 PLFA 量有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 各类型均在春季最高, 冬季最低. 在不同季节, 土壤微生物量对氮沉降的响应趋势不同, 总体而言, 春季和秋季氮沉降抑制了土壤微生物量, 夏季和冬季氮沉降促进了土壤微生物量. ② 氮沉降对土壤微生物群落结构有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 在春季和夏季, 低、中氮沉降使土壤微生物丰富度指数和多样性降低, 使均匀度指数升高; 在秋季和冬季, 低氮和中氮则使丰富度指数、多样性指数及均匀度指数升高. 高氮沉降使 4 个季节土壤微生物丰富度指数、多样性指数和均匀度指数降低. ③ 相关性分析表明, 氮沉降浓度与细菌呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与总 PLFA 呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ); 土壤温度与放线菌呈极显著负相关; 土壤湿度与细菌和总 PLFA 呈极显著正相关. 综上所述, 缙云山马尾松林土壤微生物群落结构主要受土壤湿度和氮沉降的影响, 受土壤温度影响较小.

**关键词:** 氮沉降; 土壤微生物; 土壤温度; 土壤湿度; 马尾松林

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3590-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.09.042

## Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing

ZENG Qing-ping<sup>1,2</sup>, HE Bing-hui<sup>1\*</sup>

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

**Abstract:** Nitrogen deposition increases the productivity of forest-land, yet may cause environmental damage, while soil microorganisms are sensitive to the ecological environment. The objective of this study was to investigate the effects of nitrogen deposition on soil microbial communities and the relationship among soil microbial communities, soil temperature, soil moisture and the concentration of nitrogen deposition in the Masson pine forest. The results might provide a reference for further study on the effects of nitrogen deposition on forest ecosystem of Masson pine. From May 2014 to June 2015, three nitrogen application treatments and the control treatment were set up: low nitrogen [ $N_{20}, 20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], moderate nitrogen [ $N_{40}, 40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ], high nitrogen [ $N_{60}, 60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] and control treatment [ $N_0, 0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ] in the Masson pine forest. Soil microbial community structure, soil temperature and soil moisture were measured by phosphorus lipid fatty acids (PLFAs) and automated soil  $\text{CO}_2$  exchange station. The results showed that: ① Seasonal variation had a remarkable effect on soil bacteria, fungi, actinomycetes and the total PLFA ( $P < 0.05$ ), all kinds of soil microorganisms had the highest amounts in spring and the lowest in winter. In different seasons, the response of different soil microorganisms to nitrogen deposition was different. Generally, nitrogen deposition decreased soil microorganisms in spring and autumn, while in summer and winter, nitrogen deposition had a positive effect on soil microorganisms. ② Nitrogen deposition had a significant effect on soil microbial community structure ( $P < 0.05$ ). In spring and summer, low nitrogen and moderate

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-13

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

nitrogen decreased the soil microbial richness index and diversity index, yet increased the evenness index. In the autumn and winter, low nitrogen and moderate nitrogen promoted the soil microbial richness index, diversity index and evenness index. In all four seasons, nitrogen deposition reduced the soil microbial richness index, diversity index and evenness index. ③ Correlation analysis showed that the concentration of nitrogen deposition had a very significant negative correlation with soil bacteria ( $P < 0.01$ ), and a significant negative correlation with total PLFA ( $P < 0.05$ ). Soil temperature had a significant negative correlation with soil actinomycetes. Soil moisture had a significant positive correlation with bacteria and total PLFA. In conclusion, soil microorganisms of Masson pine forest were mainly influenced by soil moisture and less affected by soil temperature in Jinyun Mountain. Nitrogen deposition had a significant effect on microbial community structure and diversity.

**Key words:** nitrogen deposition; soil microorganisms; soil temperature; soil moisture; Masson pine

近年来,氮肥施用、畜牧业快速发展及矿物燃料燃烧等人类活动使全球大气含氮化合物成倍增长,导致全球氮沉降量增加<sup>[1]</sup>。氮素作为林木生长的养分限制因子虽可提升林地生产力但过多却会给环境造成压力如导致土壤酸化、水体富营养化、氮素流失、微生物多样性降低及森林蓄积量下降等<sup>[2-4]</sup>,目前,氮沉降引起的诸多土壤生态环境改变正逐步成为各领域学者研究的热点问题。微生物是土壤生态系统的重要部分,参与物质转化和养分循环,直接影响生态系统的结构和功能,同时对环境变化敏感,土壤微生物作为环境变化的指示因子渐渐引起人类重视<sup>[5,6]</sup>。氮沉降的土壤微生物效应深受植被类型、土壤性质、海拔梯度与气候差异等因子的影响<sup>[7-12]</sup>,研究区域不同研究结果各异。刘彩霞等<sup>[13]</sup>研究表明高铵态氮沉降促进土壤微生物 PLFA 的数量,低硝态氮沉降促进土壤微生物 PLFA 的数量。Wang 等<sup>[14]</sup>、Contosta 等<sup>[15]</sup>和 Treseder 等<sup>[16]</sup>的研究则表明氮沉降抑制了土壤微生物总量。除此之外,有的研究结果表明氮沉降对土壤微生物无影响,Huang 等<sup>[17]</sup>和 Zhao 等<sup>[18]</sup>分别研究了氮沉降对草原和尾叶桉土壤微生物数量的影响,结果显示氮沉降并未显著影响土壤微生物数量。可见,氮沉降对土壤微生物群落的影响存在很大的不确定性,需要进一步地深入研究。研究微生物群落结构的方法很多,包括磷脂脂肪酸 (phospholipid fatty acid, PLFA) 法、Biolog 法、DGGE (denaturing gradient gel electrophoresis) 法等。本研究采用 PLFA 法是因为其操作简便,研究结果较为准确、高效且无需分离和培养技术<sup>[19,20]</sup>,可定量描述土壤环境中微生物群体<sup>[21,22]</sup>。

本文以缙云山马尾松林土壤为研究对象,在春、夏、秋、冬这 4 个季节开展人工氮添加模拟氮沉降试验,研究该区域马尾松土壤微生物群落不同氮沉降水平下的四季动态特征,以期分析氮沉降对亚热带森林生态系统的影响提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

缙云山国家级自然保护区(106°22'E,29°45'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<sup>2</sup>,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℃,最高气温 43℃,最低气温 -1℃;年平均相对湿度 87%,年平均降雨量 1 161.8 mm,年均日照 1 293.9 h,干湿季分明。雨季是 4 ~ 9 月(降雨量 1 243.8 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 月至 2012 年 5 月的月均降水和空气温度<sup>[23]</sup>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%。

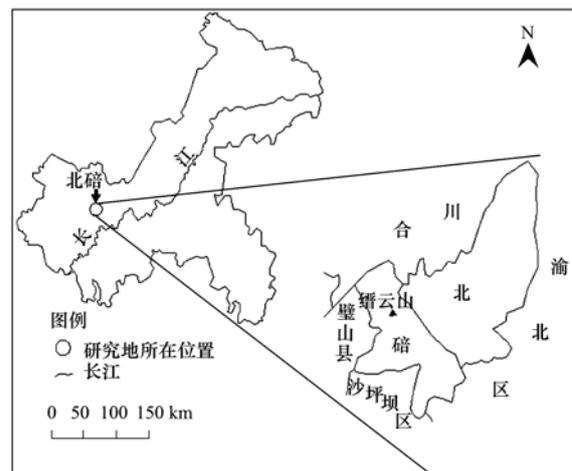


图 1 研究样地地理位置示意

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

### 1.2 试验设计

2014 年 5 月,在海拔 350 ~ 500 m 的马尾松林内选取 3 块面积为 20 m × 20 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 m × 1 m 的小样地(间隔 > 1m 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)。氮添加处理

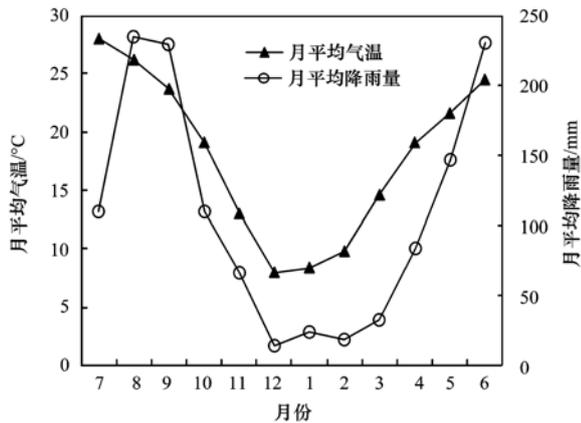


图2 研究区的月平均降水量和空气温度

Fig. 2 Mean precipitation and air temperature in the study area

设置了4个水平:对照  $N_0$  [ $0 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]、低氮  $N_{20}$  [ $20 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]、中氮  $N_{40}$  [ $40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ]和高氮  $N_{60}$  [ $60 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ ],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  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  溶于1 L水中,

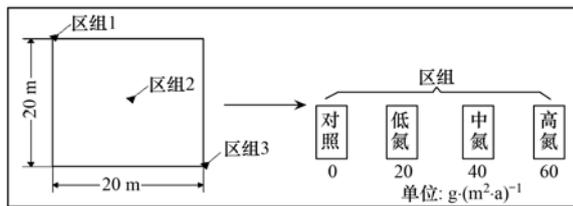


图3 氮沉降样地设计示意

Fig. 3 Schematic design of nitrogen-loaded research plots

采用手提式喷雾器均匀喷洒在每个小样地内,对照样地喷洒等体积清水.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.

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 cm,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. Var. floccosus S. M. Hwang),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 (*Diplopterygium chinense*),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 swinhoei* Hemsl. ex Forb. et Hemsl.),香花崖豆藤 (*Millettia dielsiana* Harms)等.林下土壤基本理化性质特征见表1.

表1 马尾松林土壤理化性质特征

Table 1 Soil physical 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)/%	黏粒 (<0.005 mm)/%
4.34	3.18	0.13	0.32	23.64	88.17	4.81	7.02

### 1.3 样品采集与分析

每次氮沉降处理2 d后(待  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  完全渗入土壤中)采集小样地内0~20 cm深度土样(夏、秋、冬、春采样时间为2014年8月1日、2014年11月14日、2015年2月8日及2015年5月7日),分别混匀同一标准地中相同氮沉降处理的3个土样.当天带回实验室,除去动植物残体,过2 mm筛,储存在4°C用于测定PLFA.

磷脂脂肪酸采用修正的Bligh-Dyer方法<sup>[24]</sup>,以C19:0做内标,用Aligent 6850气相色谱仪测定,用MIDI Sherlock微生物鉴定系统(Version6.1, MIDI, Inc., Newark, DE)分析PLFA图谱从而对脂

肪酸成分进行鉴定.土壤温度和湿度分别采用ACE自动土壤呼吸监测系统配带的2个土壤温度热电阻探头和2个土壤水分探头SM300进行测量.

### 1.4 数据处理与统计分析

数据分析使用SPSS 18.0、Origin 9.0、Microsoft Excel 2007等软件,采用单因素方差分析法(LSD)比较不同数据组间的差异( $P < 0.05$ ).

磷脂脂肪酸含量计算公式:

$$\text{PLFA}(\text{nmol} \cdot \text{g}^{-1}) = \frac{A \times S \times V}{\text{SA} \times D \times R \times W}$$

式中,A和SA分别为样品和标准物质的峰面积,S



$N_{60}$ 组细菌分别比对照组  $N_0$  增加 17.20%、17.67% 及 2.04%，真菌分别比对照组  $N_0$  增加 48.01%、52.49% 及 31.09%，放线菌分别比对照组  $N_0$  增加 77.70%、降低 44.60% 和 62.59%，总 PLFA 则比对照组  $N_0$  分别增加 19.01%、17.24% 及 2.30%。这说明夏季低、中及高氮沉降处理增加了土壤细菌、真菌及总 PLFA，而低氮处理增加了放线菌，中、高氮处理则使其降低。

秋季氮沉降处理后，真菌和放线菌呈先升高后降低的变化趋势， $N_{20}$ 、 $N_{40}$  及  $N_{60}$  组真菌分别比对照组  $N_0$  增加 2.48%、降低 2.73% 和 20.25%，放线菌则分别比对照组  $N_0$  增加 126.53% 和 87.07%、降低 3.40%，细菌和总 PLFA 则均呈直线下降趋势，与对照组相比， $N_{20}$ 、 $N_{40}$  及  $N_{60}$  组细菌分别下降 0.48%、10.13% 及 29.76%，总 PLFA 则分别下降 2.54%、11.58% 及 31.84%。秋季低氮处理使土壤真菌和放线菌含量增加，使细菌和总 PLFA 降低，中氮增加了放线菌含量而降低了真菌、细菌及总 PLFA 含量，高氮使真菌、细菌、放线菌和总 PLFA 含量均降低。

冬季氮沉降处理后，细菌、真菌、放线菌及总 PLFA 均表现为先增加后降低的变化趋势，且最大值均出现在  $N_{40}$  组，分别比对照组  $N_0$  增加了 8.73%、24.04%、131.08% 及 15.10%。细菌、放线菌及总 PLFA 最小值为  $N_{60}$  组，分别降低了 8.79%、13.51% 和 1.30%，而真菌最小值则为对照组  $N_0$ 。说明冬季低氮、中氮处理时土壤微生物含量升高，而高氮使其降低。

## 2.2 模拟氮沉降对土壤微生物群落结构的影响

为进一步确定氮沉降水平和季节变化对土壤微生物的影响，本文引用丰富度指数 ( $S$ )、Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )、Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 来反映土壤微生物群落结构和功能 (表 2)。丰富度指数 ( $S$ ) 和 Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ ) 均为春季最高，冬季最低，而 Pielou 均匀度指数 ( $J$ ) 则表现为秋季最高，夏季最低。

春季氮沉降处理后， $S$  表现为  $N_0 > N_{40} > N_{60} > N_{20}$ ， $H'$  呈  $N_0 > N_{40} > N_{20} > N_{60}$ ， $J$  呈  $N_{20} > N_{40} > N_0 > N_{60}$ ， $S$  和  $H'$  最大均为  $N_0$  处理而  $J$  最大则为  $N_{20}$  处理，说明低、中氮沉降降低了土壤微生物丰富度指数及多样性指数但提高了微生物分布的均匀度指数，而高氮沉降使丰富度指数、多样性指数及均匀度指数均降低；夏季氮沉降处理后， $S$  表现为  $N_0 > N_{20} > N_{40} > N_{60}$ ， $H'$  呈  $N_{20} > N_{40} > N_0 > N_{60}$ ， $J$  呈  $N_{20} > N_{40} > N_{60} > N_0$ ，说明低、中氮沉降提高了土壤微生物多样性指数及均匀度指数但降低了丰富度指数，高氮沉降提高了微生物均匀度指数而使丰富度指数和多样性指数降低；秋季氮沉降处理后， $S$  表现为  $N_{20} > N_{40} = N_0 > N_{60}$ ， $H'$  呈  $N_{20} > N_{40} > N_0 > N_{60}$ ， $J$  呈  $N_{40} > N_0 > N_{20} > N_{60}$ ，说明低、中氮沉降使微生物丰富度指数及多样性指数增加，中氮沉降使均匀指数升高而低氮沉降使其降低，高氮则使微生物丰富度指数、多样性指数及均匀度指数均降低；冬季氮沉降处理后， $S$  和  $H'$  均表现为  $N_{40} > N_{20} > N_{60} > N_0$ ， $J$  则表现为  $N_{60} > N_{40} > N_{20} > N_0$ ，说明冬季低、中、高氮沉降均能提高土壤微生物丰富度指数、多样性指数及均匀度指数。

表 2 不同氮沉降处理对土壤微生物 PLFA 群落多样性的季节性影响<sup>1)</sup>

Table 2 Seasonal effects of different nitrogen deposition on soil microbial PLFA community's diversity

季节	氮沉降处理	丰富度 ( $S$ )	Shannon-Wiener 多样性指数 ( $H'$ )	Pielou 均匀度 ( $J$ )
夏	$N_0$	27 (Ab)	2.675 (Cc)	0.812 (Dd)
	$N_{20}$	26 (ABb)	2.902 (Ab)	0.891 (Aa)
	$N_{40}$	25 (Bc)	2.725 (Bd)	0.847 (Bc)
	$N_{60}$	23 (Cb)	2.638 (Dc)	0.841 (Cc)
秋	$N_0$	22 (Bc)	2.747 (Cb)	0.889 (Ba)
	$N_{20}$	24 (Ac)	2.809 (Ac)	0.884 (Cb)
	$N_{40}$	22 (Bd)	2.762 (Bb)	0.894 (Aa)
	$N_{60}$	20 (Cc)	2.609 (Dd)	0.871 (Da)
冬	$N_0$	22 (Dc)	2.586 (Dd)	0.837 (Cc)
	$N_{20}$	30 (Ba)	2.915 (Ba)	0.857 (Bd)
	$N_{40}$	32 (Aa)	2.990 (Aa)	0.863 (Ab)
	$N_{60}$	25 (Ca)	2.782 (Ca)	0.864 (Ab)
春	$N_0$	31 (Aa)	2.925 (Aa)	0.852 (Bb)
	$N_{20}$	23 (Dc)	2.717 (Cd)	0.867 (Ac)
	$N_{40}$	28 (Bb)	2.755 (Bc)	0.827 (Cd)
	$N_{60}$	25 (Ca)	2.653 (Db)	0.824 (Dd)

1) 大写字母表示同一季节不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )，小写字母表示同一处理不同季节间差异显著 ( $P < 0.05$ )

### 2.3 模拟氮沉降对土壤温度和含水量的影响

氮沉降处理对土壤温度、土壤含水量均有显著影响(表 3)。总体而言,随着氮浓度升高,土壤温度和含水量均显著增大。

### 2.4 土壤微生物与土壤温度、湿度间的相关性分析

土壤微生物群落结构与功能受温度、水分等条件差异的影响。由表 4 可知,细菌与真菌、放

线菌、总 PLFA 及土壤湿度呈极显著正相关,与氮沉降浓度呈极显著负相关;真菌与放线菌和总 PLFA 呈极显著正相关;放线菌与总 PLFA 呈极显著正相关,与土壤温度呈极显著负相关;总 PLFA 与土壤湿度呈极显著正相关,与氮沉降浓度呈显著负相关;土壤温度与土壤湿度呈极显著正相关。

表 3 不同氮沉降处理土壤温度和土壤含水量随季节的变化特征<sup>1)</sup>(平均值±SD)

Table 3 Seasonal dynamics of soil temperature and soil moisture at 0-10 cm depth under different nitrogen deposition(mean±SD)

环境因子	氮沉降处理	夏	秋	冬	春
0~10 cm 土壤温度	N <sub>0</sub>	27.77±1.58(Ba)	21.38±0.16(Db)	13.77±0.43(Dd)	20.19±0.94(Dc)
	N <sub>20</sub>	27.59±1.09(Da)	21.48±0.93(Bb)	14.13±0.24(Bd)	20.49±1.01(Bc)
	N <sub>40</sub>	27.67±1.25(Ca)	21.47±0.21(Cb)	14.14±0.10(Ad)	20.25±0.79(Cc)
	N <sub>60</sub>	27.82±1.56(Aa)	21.58±0.31(Ab)	13.98±0.33(Cd)	20.95±0.71(Ac)
0~10 cm 土壤含水量	N <sub>0</sub>	27.23±2.99(Bb)	13.22±2.13(Cd)	17.14±2.01(Dc)	27.72±0.71(Aa)
	N <sub>20</sub>	26.51±1.34(Cb)	13.69±2.96(Bd)	18.15±1.59(Ac)	27.70±1.13(Ba)
	N <sub>40</sub>	27.23±2.69(Bb)	13.88±1.90(Ad)	17.36±1.42(Cc)	27.56±0.13(Ca)
	N <sub>60</sub>	27.79±1.71(Aa)	13.69±1.31(Bd)	17.40±0.71(Bc)	27.47±1.82(Db)

1) 大写字母表示同一季节不同处理间差异显著( $P < 0.05$ ),小写字母表示同一处理不同季节间差异显著( $P < 0.05$ )

表 4 土壤微生物 PLFA 与环境因子的相关系数<sup>1)</sup>

Table 4 Correlation coefficients between soil microbial PLFA and environment factors

指标	氮沉降浓度	细菌	真菌	放线菌	总 PLFA	土壤温度	土壤湿度
氮沉降浓度	1	**	NS	NS	*	NS	NS
细菌	-0.375	1	**	**	**	NS	**
真菌	0.008	0.636	1	**	**	NS	NS
放线菌	-0.187	0.621	0.648	1	**	**	NS
总 PLFA	-0.359	0.978	0.758	0.696	1	NS	**
土壤温度	0.020	0.185	-0.218	-0.471	0.056	1	**
土壤湿度	0.014	0.593	-0.044	0.144	0.458	0.500	1

1) \*、\*\* 分别表示在 5% 和 1% 水平显著性; NS:不显著

## 3 讨论

土壤微生物是土壤生态系统中所占比例小但却十分活跃的部分,参与了土壤中各种生化反应,对提高土壤养分利用性和林地生产力具有重要作用<sup>[29,30]</sup>。土壤微生物群落组成易受土壤温度和湿度等因素影响,土壤水分参与土壤微生物分解土壤有机质的进程,促进养分形态转化,加快土壤中微生物所需养分的运输,决定土壤含氧量高低进而影响土壤微生物量<sup>[31]</sup>。土壤温度影响土壤水分蒸发速率及某类微生物群落对底物的利用率,在土壤湿度一定时,高温限制了氨基转化为硝基,抑制除真菌标记基因外的其他所有基因的表达<sup>[32]</sup>,从而使微生物群落结构发生改变。本研究发现土壤温度与真菌呈极显著负相关,说明该区域温度对放线菌生物量有明显影响,且随温度增加而降低。诸多研究表明土壤

温度和湿度显著影响土壤微生物活性<sup>[33-35]</sup>,然而也有研究表明土壤温度或土壤湿度并非显著影响土壤微生物,李世清等<sup>[36]</sup>在研究杨陵土垫旱耕人为土时发现土壤微生物与土壤温度呈极显著正相关而与土壤湿度关系不密切。何容等<sup>[37]</sup>在研究武夷山不同海拔植被土壤微生物量季节变化动态时发现不同海拔梯度带土壤微生物量与土壤湿度呈显著正相关,与土壤温度相关性不显著。本试验表明土壤湿度与细菌和总 PLFA 呈极显著正相关,与土壤温度相关性不显著,说明微生物的变化受土壤湿度的影响较大而受土壤温度影响较小。原因是 4~9 月缙云山降雨量丰富,尽管 7~8 月属伏旱期,但缙云山植被覆盖率高,丰富的植物群落形成了独特的地区小气候,降低了林下土壤温度,进而减少土壤水分蒸发,使林地土壤中常年保持丰富的含水量,但过多却限制微生物生长,因此影响此区域土壤微生物变化的

为土壤湿度而非土壤温度。

土壤微生物数量、组成和结构受氮沉降影响显著。刘彩霞等<sup>[13]</sup>研究了氮沉降对江西省分宜县杉木幼龄林土壤微生物群落结构的影响,结果发现氮沉降显著改变土壤微生物群落,高铵态氮沉降促进土壤微生物 PLFA 的数量,低硝态氮沉降促进土壤微生物 PLFA 的数量。这与本试验夏季低、中、高氮和冬季低、中氮沉降处理结果一致,低、中氮沉降增加了土壤中氮元素的有效性,促进微生物对底物的利用,进而改变了土壤微生物群落结构<sup>[38]</sup>。而同时也有相当研究结果表明氮沉降使土壤微生物量降低,Wang 等<sup>[14]</sup>研究发现氮沉降(+N, 20 g·m<sup>-2</sup>)明显降低了土壤 0~10 cm 深处细菌 PLFA, G<sup>-</sup> 及 G<sup>+</sup> 数量,但增加了 10~20 cm 土壤细菌 PLFA 数量,Contosta 等<sup>[15]</sup>研究了同时升温 and 氮沉降情况下土壤微生物量和群落组成的改变,结果发现氮沉降抑制了土壤微生物总量,Treseder<sup>[16]</sup>对 82 个田间施氮试验对土壤微生物的影响进行综合评价,发现氮沉降使微生物生物量平均降低约 15%,长期高氮沉降下细菌和真菌亦有降低的趋势,这与本试验春季低、中、高氮沉降、秋季低、中、高氮沉降及冬季高氮沉降处理结果一致。而相当一部分研究结果也表明氮沉降对土壤微生物影响不明显<sup>[17,18]</sup>。这些结果可能与土壤质地、植被类型、气候(气温、降水等)和地形等综合因素有关。

本研究结果表明 4 个季节高氮沉降使丰富度指数、多样性指数均和均匀度指数降低,而均匀度指数仅在夏季和冬季表现为升高,多样性指数在冬季也表现为升高;在春季和夏季,低、中氮沉降使土壤微生物丰富度指数和多样性降低,使均匀度指数升高;在秋季和冬季,低氮和中氮则使丰富度指数、多样性指数及均匀度指数升高。这可能是由于季节不同环境条件及植物生长状况差异大,秋冬季适量氮沉降有利于土壤微生物的生长,春夏季氮沉降则抑制土壤微生物生长。然而 4 个季节高氮处理均降低了土壤微生物多样性,说明高浓度氮抑制了大部分微生物种群的生长,致使微生物丰富度指数、多样性指数及均匀度指数均下降。袁颖红等<sup>[39]</sup>在研究不同氮沉降水平对杉木人工林土壤微生物的影响中也得出了低氮处理提高土壤微生物多样性指数与均匀度指数,而高氮处理使指数降低。该研究结论部分与本研究结论一致,原因是文献<sup>[39]</sup>的研究时间为 2010 年 3 月,跟本试验春季时间一致,研究结论亦相似。总的说来氮沉降有利有弊且季节不同影

响也不尽相同,说明我国一些地区的高氮沉降对森林土壤微生物群落产生了一定的影响。

#### 4 结 论

(1) 氮沉降和季节变化对马尾松林土壤微生物均有显著影响( $P < 0.05$ ),随季节变化细菌、真菌、放线菌及总 PLFA 均在春季最高,冬季最低。氮沉降对土壤微生物的影响随季节变化而结果各异,总的来说春季和秋季氮沉降低了土壤微生物量,夏季和冬季氮沉降使土壤微生物量升高。

(2) 4 个季节高氮沉降使丰富度指数、多样性指数均和均匀度指数降低,而均匀度指数仅在夏季和冬季表现为升高,多样性指数在冬季也表现为升高;在春季和夏季,低、中氮沉降使土壤微生物丰富度指数和多样性降低,使均匀度指数升高;在秋季和冬季,低氮和中氮则使丰富度指数、多样性指数及均匀度指数升高。

(3) 细菌与真菌、放线菌、总 PLFA 及土壤湿度呈极显著正相关,与氮沉降浓度呈极显著负相关;真菌与放线菌和总 PLFA 呈极显著正相关;放线菌与总 PLFA 呈极显著正相关,与土壤温度呈极显著负相关;总 PLFA 与土壤湿度呈极显著正相关,与氮沉降浓度呈显著负相关;土壤温度与土壤湿度呈极显著正相关。

#### 参 考 文 献:

- [1] Lu C Q, Tian H Q, Liu M L, *et al.* Effect of nitrogen deposition on China's terrestrial carbon uptake in the context of multifactor environmental changes [J]. *Ecological Applications*, 2012, **22** (1): 53-75.
- [2] Erismann 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): 1-9.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Xu Z W, Yu G R, Zhang X Y, *et al.* The variations in soil microbial communities, enzyme activities and their relationships with soil organic matter decomposition along the northern slope of Changbai Mountain [J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, **86**: 19-29.
- [6] 颜慧,蔡祖聪,钟文辉. 磷脂脂肪酸分析方法及其在土壤微生物多样性研究中的应用 [J]. *土壤学报*, 2006, **43**(5): 851-859.
- [7] 李君剑,刘峰,周小梅. 矿区植被恢复方式对土壤微生物和

- 酶活性的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(5): 1836-1841.
- [ 8 ] Van Diepen L T A, Lilleskov E A, Pregitzer K S, *et al.* Simulated nitrogen deposition causes a decline of intra- and extraradical abundance of arbuscular mycorrhizal fungi and changes in microbial community structure in northern hardwood forests[J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(5): 683-695.
- [ 9 ] Jia S X, Zhang X P, Chen X W, *et al.* Long-term conservation tillage influences the soil microbial community and its contribution to soil CO<sub>2</sub> emissions in a Mollisol in Northeast China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016, **16**(1): 1-12.
- [ 10 ] 曾清苹, 何丙辉, 毛巧芝, 等. 缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物 PLFA 沿海拔梯度的变化[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4667-4675.
- [ 11 ] 张于光, 宿秀江, 丛静, 等. 神农架土壤微生物群落的海拔梯度变化[J]. 林业科学, 2014, **50**(9): 161-166.
- [ 12 ] 陈晓娟, 吴小红, 刘守龙, 等. 不同耕地利用方式下土壤微生物活性及群落结构特性分析: 基于 PLFA 和 MicroResp<sup>TM</sup> 方法[J]. 环境科学, 2013, **34**(6): 2375-2382.
- [ 13 ] 刘彩霞, 焦如珍, 董玉红, 等. 应用 PLFA 方法分析氮沉降对土壤微生物群落结构的影响[J]. 林业科学, 2015, **51**(6): 155-162.
- [ 14 ] Wang C T, Wang G X, Wang Y, *et al.* Urea addition and litter manipulation alter plant community and soil microbial community composition in a *kobresia humilis* meadow[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, **70**: 7-14.
- [ 15 ] Contosta A R, Frey S D, Cooper A B. Soil microbial communities vary as much over time as with chronic warming and nitrogen additions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **88**: 19-24.
- [ 16 ] Treseder K K. Nitrogen additions and microbial biomass: a meta-analysis of ecosystem studies [J]. *Ecology Letters*, 2008, **11**(10): 1111-1120.
- [ 17 ] Huang G, Li Y, Su Y G. Divergent responses of soil microbial communities to water and nitrogen addition in a temperate desert [J]. *Geoderma*, 2015, **251-252**: 55-64.
- [ 18 ] Zhao J, Wan S Z, Fu S L, *et al.* Effects of understory removal and nitrogen fertilization on soil microbial communities in *Eucalyptus plantations* [J]. *Forest Ecology and Management*, 2013, **310**: 80-86.
- [ 19 ] 王菲, 袁婷, 谷守宽, 等. 有机无机缓释复合肥对不同土壤微生物群落结构的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(4): 1461-1467.
- [ 20 ] 齐鸿雁, 薛凯, 张洪勋. 磷脂脂肪酸谱图分析方法及其在微生物生态学领域的应用[J]. 生态学报, 2003, **23**(8): 1576-1582.
- [ 21 ] 张秋芳, 刘波, 林营志, 等. 土壤微生物群落磷脂脂肪酸 PLFA 生物标记多样性[J]. 生态学报, 2009, **29**(8): 4127-4137.
- [ 22 ] 黄懿梅. 黄土丘陵区植被自然恢复过程中土壤微生物指标的演变[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [ 23 ] 中国天气网[EB/OL]. <http://cq.weather.com.cn/qxfwcp/yqhpj/index.shtml>.
- [ 24 ] Zelles L, Bai Q Y, Beck T, *et al.* Signature fatty acids in phospholipids and lipopolysaccharides as indicators of microbial biomass and community structure in agricultural soils [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, **24**(4): 317-323.
- [ 25 ] 戈峰. 现代生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 252-254.
- [ 26 ] Magurran A E. *Ecological diversity and its measurement* [M]. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988. 141-162.
- [ 27 ] 孙海新, 刘训理. 茶树根际微生物研究 [J]. 生态学报, 2004, **24**(7): 1353-1357.
- [ 28 ] Frostegård A, Bååth E. The use of phospholipid fatty acid analysis to estimate bacterial and fungal biomass in soil [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1996, **22**(1-2): 59-65.
- [ 29 ] 朱凡, 李天平, 郁培义, 等. 施氮对樟树林土壤微生物碳源代谢的影响[J]. 林业科学, 2014, **50**(8): 82-89.
- [ 30 ] Lewandowski T E, Forrester J A, Mladenoff D J, *et al.* Soil microbial community response and recovery following group selection harvest: temporal patterns from an experimental harvest in a US northern hardwood forest [J]. *Forest Ecology and Management*, 2015, **340**: 82-94.
- [ 31 ] Hedges J I, Oades J M. Comparative organic geochemistries of soils and marine sediments [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**(7-8): 319-361.
- [ 32 ] Wang H, Yang J P, Yang S H, *et al.* Effect of a 10°C -elevated temperature under different water contents on the microbial community in a tea orchard soil [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, **62**: 113-120.
- [ 33 ] Guenet B, Lenhart K, Leloup J, *et al.* The impact of long-term CO<sub>2</sub> enrichment and moisture levels on soil microbial community structure and enzyme activities [J]. *Geoderma*, 2012, **170**: 331-336.
- [ 34 ] Zhang N L, Wan S Q, Guo J X, *et al.* Precipitation modifies the effects of warming and nitrogen addition on soil microbial communities in northern Chinese grasslands [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, **89**: 12-23.
- [ 35 ] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in western Canada [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, **44**(1): 9-20.
- [ 36 ] 李世清, 任书杰, 李生秀. 土壤微生物体氮的季节性变化及其与土壤水分和温度的关系 [J]. 植物营养与肥料学报, 2004, **10**(1): 18-23.
- [ 37 ] 何容, 王国兵, 汪家社, 等. 武夷山不同海拔植被土壤微生物量的季节动态及主要影响因子 [J]. 生态学杂志, 2009, **28**(3): 394-399.
- [ 38 ] Biederbeck V O, Curtin D, Bouman O T, *et al.* Soil microbial and biochemical properties after ten years of fertilization with urea and anhydrous ammonia [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1996, **76**(1): 7-14.
- [ 39 ] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响 [J]. 林业科学, 2012, **48**(9): 8-14.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i>	(3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i>	(3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i>	(3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i>	(3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i>	(3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i>	(3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i>	(3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i>	(3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan	(3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing	(3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i>	(3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i>	(3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i>	(3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i>	(3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i>	(3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i>	(3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i>	(3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i>	(3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i>	(3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i>	(3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i>	(3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i>	(3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i>	(3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo	(3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i>	(3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i>	(3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i>	(3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i>	(3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i>	(3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i>	(3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i>	(3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i>	(3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i>	(3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i>	(3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i>	(3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i>	(3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i>	(3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i>	(3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i>	(3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i>	(3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui	(3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i>	(3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i>	(3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i>	(3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i>	(3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i>	(3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i>	(3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia	(3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i>	(3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong	(3670)

# 《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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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