

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第8期

Vol.36 No.8

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于16S rRNA 基因测序法分析北京霾污染过程中 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 细菌群落特征..... 王步英,郎继东,张丽娜,方剑火,曹晨,郝吉明,朱昕,田埂,蒋靖坤 (2727)

北京城区冬季降尘微量元素分布特征及来源分析 熊秋林,赵文吉,郭道宇,陈凡涛,束同同,郑晓霞,赵文慧 (2735)

北京市典型餐饮企业油烟中醛酮类化合物污染特征 程婧晨,崔彤,何万清,聂磊,王军玲,潘涛 (2743)

基于实际道路交通流信息的北京市机动车排放特征 樊守彬,田灵娣,张东旭,曲松 (2750)

夏季珠江三角洲地区 PM_{2.5} 化学组分特征及其对大气能见度的影响 杨毅红,瞿群,刘随心,李雄,钟佩仪,陶俊 (2758)

隧道工人的 PM₁₀ 职业暴露特征调查分析及其健康风险评价 向华丽,杨俊,仇珍珍,雷万雄,曾婷婷,兰志财 (2768)

基于在线监测的江苏省大型固定燃煤源排放清单及其时空分布特征 张英杰,孔少飞,汤莉莉,赵天良,韩永翔,于红霞 (2775)

柴达木盆地东部降水氢氧同位素特征与水汽来源 朱建佳,陈辉,巩国丽 (2784)

长江口-浙闽沿岸沉积色素的分布特征及其指示意义 李栋,姚鹏,赵彬,王金鹏,潘慧慧 (2791)

“引江济太”过程中中江-望虞河-贡湖氮、磷输入特征研究 潘晓雪,马迎群,秦延文,邹华 (2800)

重庆市典型城镇区地表径流污染特征 王龙涛,段丙政,赵建伟,华玉妹,朱端卫 (2809)

调水调沙对黄河下游颗粒有机碳运输的影响 张婷婷,姚鹏,王金鹏,潘慧慧,高立蒙,赵彬,李栋 (2817)

青藏高原冰川区可溶性有机碳含量和来源研究 严芳萍,康世昌,陈鹏飞,柏建坤,李洋,胡召富,李潮流 (2827)

岩溶区地下水补给型水库表层无机碳时空变化特征及影响因素 李建涛,蒲俊兵,袁道先,刘文,肖琼,于爽,张陶,莫雪,孙平安,潘谋成 (2833)

室内模拟不同因子对岩溶作用与碳循环的影响 赵瑞一,吕现福,段逸凡 (2843)

新乡市地表水体 HCHs 和 DDTs 的分布特征及生态风险评价 冯精兰,余浩,刘书卉,刘梦琳,孙剑辉 (2849)

青木关地下河系统中不同含水介质下正构烷烃对比研究 梁作兵,孙玉川,王尊波,江泽利,廖昱,谢正兰,张媚 (2857)

三峡库区长寿湖水体不同形态汞的空间分布特征 白薇扬,张成,赵锋,唐振亚,王定勇 (2863)

燃煤电厂周围渔业养殖行为对水生生态环境中汞形态变化的影响 梁鹏,王远娜,尤琼智,高云飞,何杉杉 (2870)

运用硫同位素、氮氧同位素示踪里湖地下河硫酸盐、硝酸盐来源 李瑞,肖琼,刘文,郭芳,潘谋成,于爽 (2877)

藻华聚集的生态效应:对凤眼莲叶绿素和光合作用的影响 刘国锋,何俊,杨轶中,韩士群 (2887)

DOM 对被动采样技术的影响与应用 于尚云,周岩梅 (2895)

蛋白质对 PVDF 超滤膜污染行为的界面微观作用力解析 王旭东,周森,孟晓荣,王磊,黄丹曦,夏四清 (2900)

水环境中碳纳米管对沙丁胺醇光降解的影响 汪祺,韩佳芮,魏博凡,周磊,张亚,杨曦 (2906)

β-In₂S₃ 的制备及其太阳光下降解土霉素 艾翠玲,周丹丹,张嵘嵘,邵享文,雷英杰 (2911)

排水管道沉淀物氮释放特性的研究 陈红,卓琼芳,许振成,王劲松,魏清伟 (2918)

生物膜 CANON 反应器中沉积物影响及其成因分析 付昆明,王会芳,左早荣,仇付国 (2926)

ABR-MBR 一体化工艺节能降耗措施优化研究 吴鹏,陆爽君,徐乐中,刘捷,沈耀良 (2934)

两个 CANON 污水处理系统中氨氧化古菌的丰度和多样性研究 高景峰,李婷,张树军,樊晓燕,潘凯玲,马谦,袁亚林 (2939)

ABR 耦合 CSTR 一体化工艺好氧颗粒污泥形成机制及其除污效能研究 巫恺澄,吴鹏,徐乐中,李月寒,沈耀良 (2947)

珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价 窦磊,杨国义 (2954)

广西都安县耕地土壤重金属污染风险评价 吴洋,杨军,周小勇,雷梅,高定,乔鹏炜,杜国栋 (2964)

开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险 段海静,蔡晓强,阮心玲,全致琦,马建华 (2972)

我国西南地区氮饱和和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应 刘文静,康荣华,张婷,朱婧,段雷 (2981)

黄土高原纬度梯度上的植物与土壤碳、氮、磷化学计量学特征 李婷,邓强,袁志友,焦峰 (2988)

开顶式气室原位研究水稻稻富集对大气汞浓度升高的响应 陈剑,王章玮,张晓山,秦普丰,陆海军 (2997)

接种丛枝菌根真菌对蜈蚣草吸收砷的影响 郑文君,王明元 (3004)

水稻种植对黑土微生物生物量和碳源代谢功能的影响 赵志瑞,崔丙健,侯彦林,刘上千,王岩 (3011)

固定化菌剂载体材料腐解产物对污染土壤中砷解吸的影响 全冬丽,双生晴,李晓军,邓万荣,赵然然,贾春云,巩宗强 (3018)

零价铁和碱激发矿渣稳定/固定化处理铬渣研究 陈忠林,李金春子,王斌远,樊磊涛,沈吉敏 (3026)

Fe³⁺ 负载凹凸棒土 (Fe/ATP) 结构表征及其稳定化修复镉 (Cd) 机制研究 杨蓉,李鸿博,周永莉,陈静,王琳玲,陆晓华 (3032)

原位生物修复提高多环芳烃污染土壤农作安全性 焦海华,潘建刚,徐圣君,白志辉,王栋,黄占斌 (3038)

镉-八氯代二苯并呋喃复合污染土壤中紫茉莉对镉的修复能力 张杏丽,邹威,周启星 (3045)

不同水分条件对蜈蚣草修复砷污染土壤的影响 刘秋辛,阎秀兰,廖晓勇,林龙勇,杨静 (3056)

磷矿粉和腐熟水稻秸秆对土壤铅污染的钝化 汤帆,胡红青,苏小娟,付庆灵,朱俊 (3062)

洛克沙肿在青菜及土壤中的残留及降解特性 邵婷,姚春霞,沈源源,张玉洁,苏楠楠,周守标 (3068)

3 种典型有机污染物对 2 种水生生物的急性毒性及安全评价 杨扬,李雅洁,崔益斌,李梅 (3074)

石油污染物对海底微生物燃料电池性能的影响及加速降解效应 孟瑶,付玉彬,梁生康,陈伟,柳昭慧 (3080)

Cu-Mn-Ce/分子筛催化剂吸附甲苯后的微波原位再生及床层温度分布探究 虎雪姣,卜龙利,梁欣欣,孟海龙 (3086)

热处理对猪粪高固厌氧消化产甲烷能力的影响 胡玉瑛,吴静,王士峰,曹知平,王凯军,左剑恶 (3094)

磷石膏对麦田 CO₂ 排放和小麦产量的影响及其经济环境效益分析 李季,吴洪生,高志球,尚小厦,郑培慧,印进,Kakpa Didier,任迁琪, Ogou Katchele Faustin,陈素云,徐亚,姚童言,李炜,钱景珊,马世杰 (3099)

全氟和多氟烷基化合物的环境风险评估研究现状、不确定性与趋势分析 郝薛文,李力,王杰,曹燕,刘建国 (3106)

《环境科学》征订启事 (2757) 《环境科学》征稿简则 (2767) 信息 (2734,2783,3073,3079)

我国西南地区氮饱和马尾松林土壤和植物¹⁵N自然丰度对长期氮施加的响应

刘文静¹, 康荣华², 张婷¹, 朱婧², 段雷^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 国家环境保护大气复合污染来源与控制重点实验室, 北京 100084; 2. 挪威生命科学大学环境科学学院, 奥斯 NO-1432, 挪威)

摘要: 我国快速增长的氮沉降可能造成森林生态系统的氮饱和, 进而导致一系列严重的环境后果. 为了深入研究氮沉降对我国森林生态系统的影响, 进而评价和预测森林生态系统的氮状态, 本研究选取我国西南地区典型的马尾松林生态系统, 对土壤和植物的¹⁵N自然丰度($\delta^{15}\text{N}$)进行了测定, 探讨用¹⁵N富集因子(ϵ_{pvs})作为氮状态指标的可行性. 对该马尾松林连续 7 a 施加 NH_4NO_3 或 NaNO_3 的控制实验结果表明, 长期的高氮输入显著增加了土壤和植物的 $\delta^{15}\text{N}$. 同时, 该生态系统对不同形态的氮输入有不同的响应, 即在 NH_4^+ 沉降下 $\delta^{15}\text{N}$ 显著高于 NO_3^- 沉降下的值. ¹⁵N富集因子与氮沉降量、净硝化速率和淋溶量均呈显著的正相关关系, 特别是本研究与之前研究的所有马尾松林的¹⁵N富集因子与氮沉降量之间线性相关, 表明¹⁵N富集因子可用来表征氮状态. 由于在相同氮沉降的情况下, NH_4^+ 的效应强于 NO_3^- , 建议我国在未来控制氮氧化物排放的同时也应当重视氨的排放控制.

关键词: ¹⁵N自然丰度; 氮饱和; 马尾松林; N沉降; ¹⁵N富集因子

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)08-2981-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.08.034

Responses of Soil and Plant ¹⁵N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated *Pinus massoniana* Forest in Southwest China

LIU Wen-jing¹, KANG Rong-hua², ZHANG Ting¹, ZHU Jing², DUAN Lei^{1*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Sources and Control of Air Pollution Complex, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Environmental Sciences, Norwegian University of Life Sciences, Ås NO-1432, Norway)

Abstract: Increasing N deposition in China will possibly cause N saturation of forest ecosystem, further resulting in a series of serious environmental problems. In order to explore the response of forest ecosystem to N deposition in China, and further evaluate and predict the N status of ecosystem, the ¹⁵N natural abundance ($\delta^{15}\text{N}$) of soil and plants was measured in a typical Masson pine (*Pinus massoniana*) forest in southwest China to examine the potential use of ¹⁵N enrichment factor (ϵ_{pvs}) as an effective indicator of N status. Long-term high N addition could significantly increase $\delta^{15}\text{N}$ of soil and plants, which was suggested by an on-going N fertilizing experiment with NH_4NO_3 or NaNO_3 for 7 years. Meanwhile, $\delta^{15}\text{N}$ of soil and plants under NH_4^+ deposition was significantly higher than that under NO_3^- deposition, suggesting different responses of ecosystem to different N-forms of deposition. The ¹⁵N enrichment factor (ϵ_{pvs}) had positive correlations with N deposition, N nitrification, and N leaching in the soil water. Linear correlation between ¹⁵N enrichment factor and N deposition was found for all Masson pine forests investigated in this and previous studies in China, demonstrating that ¹⁵N enrichment factor could be used as an indicator of N status. The NH_3 emission control should also be carried out accompanying with NO_x emission control in the future, because NH_4^+ deposition had significantly greater impact on the forest ecosystem than NO_3^- deposition with the same equivalence.

Key words: ¹⁵N natural abundance; N saturation; masson pine forest; N deposition; ¹⁵N enrichment factor

全球范围内大气活性态氮(N_r , 主要包括氮氧化物 NO_x 和氨 NH_3)排放量的持续增加, 导致欧洲、北美和东亚许多地区很高的大气氮沉降量^[1]. 氮素是森林生态系统的主要营养元素之一, 较低的氮沉降能促进森林的生长; 但当氮沉降超过生态系统可以利用的限度时, 就会发生氮饱和^[2], 进而导致其他严重的环境问题, 包括地下水 NO_3^- 污染、地表水富营养化、土壤酸化、森林生产力下降、生物多样性

减少以及温室气体 N_2O 的排放量增加等^[3~5].

欧美自 20 世纪 80 年代以来开展了许多有关森林生态系统对氮沉降响应的研究^[3~8], ¹⁵N 稳定同位素技术也被广泛地应用于表征森林生态系统的氮循

收稿日期: 2015-01-24; 修订日期: 2015-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(21221004)

作者简介: 刘文静(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: wenjingliuthu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lduan@tsinghua.edu.cn

环特征^[9~11]. 氮同位素分馏,即土壤微生物和植物在利用和转化氮素时倾向于利用更轻的¹⁴N,从而使得流失到生态系统之外的含氮物质(比如经过硝化反应产生的NO₃⁻和反硝化作用产生的N₂O)是¹⁵N贫化的,而被固持和离子交换到土壤中的有机氮和NH₄⁺(进而被植物吸收)则是¹⁵N富集的^[10~12],导致土壤和植被的¹⁵N自然丰度值(δ¹⁵N)出现差异^[11]. 不少研究发现,氮沉降量增加、硝化作用增强和氮淋溶增加都会使生态系统的δ¹⁵N增加,进而提出土壤和植物的δ¹⁵N可用来表征生态系统的氮状态^[9~13].

我国近些年Nr排放量激增^[14,15],并由此导致氮沉降量的显著增加^[16],尤其是我国东部和南部的氮沉降量普遍高于3 g·(m²·a)⁻¹,与欧美地区的最高值相当或者更高^[15,17]. 有研究表明氮饱和在我国南方的热带森林^[18]和亚热带森林^[19]均有发生,但关于这些生态系统在持续高氮输入下的氮循环机制和氮转化过程仍需深入研究. 为此,本研究通过对我国西南地区典型的亚热带森林生态系统土壤和植物¹⁵N自然丰度(δ¹⁵N)的分析,探讨长期的模拟氮沉降(施加氮肥)对该生态系统氮饱和状态的影响.

1 材料与方法

1.1 实验样地

本研究在重庆铁山坪林场一片马尾松林内开展. 马尾松林是我国亚热带地区分布最广且资源最大的森林群落^[20]. 该点(106°41.24'E, 29°37.42'N)位于重庆市东北,距城中心约20 km,海拔450 m,属典型的亚热带季风气候,年均降水量为1 028 mm,年均温度为18.2℃,土壤是山地黄壤. 该地区年均降水的pH值(2001~2004年)为4.0~4.2^[19],氮沉降量(2001~2010年)超过4 g·(m²·a)⁻¹,其中NH₄⁺-N的比例在一半以上^[21],马尾松林可能已经发生氮饱和^[19,22].

1.2 实验设置

在同一片马尾松林内设立9块14×14 m²的样地,2005年1月至今开展施加不同氮肥(未标记¹⁵N)的野外控制实验^[23],用以模拟不同形态氮沉降的影响. 3块平行处理的样地喷洒NH₄NO₃溶液(记为AN样地),另外3块平行处理的样地喷洒NaNO₃溶液(SN样地),剩下3块作为对照样地喷洒与施氮样地相同体积的水(REF样地). 氮肥施加的具体方法是在每月初分别将200 g NH₄NO₃或400 g NaNO₃溶解在10 L去离子水中(相当于每月仅增加

0.6 mm的降水量),并以背式喷洒器均匀喷洒在森林土壤上. 施氮样地(AN和SN)的总施加量均为4 g·(m²·a)⁻¹,这与当地氮沉降量相当. 在施加氮肥之前,各样区土壤的pH值无明显差异,在3.6~4.2之间(主要是不同土层的差异),土壤盐基交换容量和总氮量也无明显差异^[24]. 在模拟氮沉降实验开展7 a后,即2011年开展不同处理样地¹⁵N自然丰度的研究.

1.3 样品采集与分析

2011年11月初,对各样地土壤有机层和矿质层进行分层采集,每个样地内随机取5个剖面. 有机层包括表层枯落物层(L)和腐殖质层(O),厚度分别在1~2 cm左右;矿质层用土钻(内径5 cm)进行取样,分0~10 cm、10~20 cm和20~30 cm共3层. 将同层的5个平行样混合为一个样品进行化学分析.

同时,对各样地的主要植物进行采集,包括马尾松地上部分(针叶和当年生树芯)、主要地表植物的地上部分和新生细根. 其中,针叶和树芯采集自每个样地内两棵最高的马尾松;针叶包括当年生和一年生针叶,其中一年生针叶只用于生物量的统计而不进行化学分析. 细根的采集,是在各样地上述两棵马尾松之一的周围3个方向上,每个方向距离树干0.5、1和1.5 m分别安装内生长土芯,分0~10、10~20和20~30 cm这3层分别收集称重. 主要地表植物包括芒(*Miscanthus sinensis*)、黑足鳞毛蕨(*Dryopteris fuscipes*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)和狗脊蕨(*Woodwardia japonica*),这4种植物占地表草本植物总生物量的95%以上.

土壤样品自然状态下风干,对矿质层进行过筛(<2 mm). 植物样品在70℃烘干至少48 h后称重. 所有土壤和植物样品磨细后(植物磨碎后用四分法,土壤过100目筛以保证混合均匀,减小¹⁵N自然丰度的测量误差),分别测定总氮(TN,凯氏定氮法)和¹⁵N/¹⁴N的原子百分比(同位素质谱仪EA-IRMS, Thermo Scientific DELTA V Advantage, USA).

1.4 数据分析

样品中的¹⁵N自然丰度值用δ¹⁵N表示:

$$\delta^{15}\text{N} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}} - 1) \times 1000\text{‰} \quad (1)$$

式中, R_{sample} 和 R_{standard} 分别表示样品和大气N₂中的¹⁵N/¹⁴N的原子百分比, $R_{\text{standard}} = 0.003\ 676\ 5$ ^[25].

¹⁵N富集因子($\epsilon_{\text{p/s}}$),通常是指反应产物与底物之间δ¹⁵N的差值,这里具体指植物与土壤的δ¹⁵N差值^[26]:

$$\epsilon_{\text{p/s}} = \delta^{15}\text{N}_{\text{叶片}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{土壤}} \quad (2)$$

在本研究中,植物选取当年生的针叶,土壤选取 0~10 cm 层。

计算各种处理的平均 $\delta^{15}\text{N}$,以不同处理为变量,进行单因素方差分析(基于 SPSS 17.0 数据分析软件), $P \leq 0.05$ 时认为具有显著差异。

2 结果与分析

2.1 土壤 TN 含量与 $\delta^{15}\text{N}$

无论对对照样地(REF)还是长期施氮样地(AN 和 SN),土壤各层 TN 均随土壤深度增加而逐渐降低,由 L 层的 $10.6 \sim 12.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少到 20~30 cm 层的 $0.16 \sim 0.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 1)。但是,土壤各层 $\delta^{15}\text{N}$ 则一般随土壤深度的增加而逐渐升高;REF 样

地由 L 层的 $-6.52\% \pm 0.35\%$ 增加到 20~30 cm 层的 $4.51\% \pm 0.00\%$; AN 和 SN 样地分别由 L 层的 $-4.33\% \pm 0.11\%$ 和 $-5.83\% \pm 0.05\%$ 增加到 10~20 cm 层的 $4.81\% \pm 0.28\%$ 和 $3.21\% \pm 0.13\%$,但 20~30 cm 层有所下降,分别为 $3.42\% \pm 0.62\%$ 和 $1.90\% \pm 0.55\%$ (图 1)。

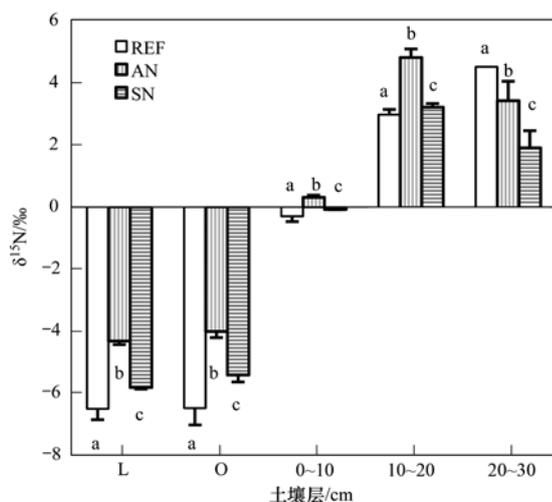
比较不同处理之间的差别,施氮样地(AN 和 SN)除了在 20~30 cm 层的 $\delta^{15}\text{N}$ 明显低于对对照样地之外,其余各层均显著高于对对照样地的相应值;同时,AN 样地土壤各层的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均显著高于 SN 样地各层(图 1)。REF 和 SN 样地的有机层(L 和 O 层)和矿质上层(0~10 cm 层)均为¹⁵N 贫化($\delta^{15}\text{N} < 0$),而 AN 样地仅在有机层为¹⁵N 贫化($\delta^{15}\text{N} < 0$)。

表 1 各样地土壤和植物 TN 含量与 $\delta^{15}\text{N}$

Table 1 TN and $\delta^{15}\text{N}$ values of soils and plants among different treatments

项目	TN/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$			$\delta^{15}\text{N}/\%$		
	REF	AN	SN	REF	AN	SN
L	12.4a(0.35)	11.2ab(0.93)	10.6b(0.45)	-6.52a(0.35)	-4.33b(0.11)	-5.83c(0.05)
O	9.71a(0.40)	9.25a(0.46)	9.30a(0.48)	-6.50a(0.54)	-4.02b(0.20)	-5.42c(0.23)
土壤 0~10 cm	1.12a(0.07)	1.15a(0.22)	1.20a(0.28)	-0.31a(0.16)	0.30b(0.07)	-0.08c(0.01)
10~20 cm	0.14a(0.12)	0.11a(0.14)	0.13a(0.03)	2.96a(0.18)	4.81b(0.28)	3.21c(0.13)
20~30 cm	0.16a(0.06)	0.17a(0.17)	0.19a(0.10)	4.51a(0.00)	3.42b(0.62)	1.90c(0.55)
针叶(当年生)	11.8a(0.7)	12.1a(0.7)	12.3a(0.6)	-6.56a(0.34)	-3.36b(0.39)	-5.27c(0.13)
地表植物	16.9a(1.6)	17.6a(1.0)	16.3a(1.2)	-6.00a(0.29)	-2.46b(0.46)	-4.49c(0.28)
植物 新生细根 0~10 cm	13.7ab(1.4)	16.7a(1.4)	14.0b(0.0)	-5.38a(0.21)	-1.68b(0.04)	-3.09c(0.53)
新生细根 10~20 cm	15.3a(1.6)	16.9a(2.0)	14.5a(2.0)	-6.38a(0.00)	-5.70b(0.04)	-2.69c(0.31)
新生细根 20~30 cm	14.5a(1.5)	16.8a(0.1)	14.8a(1.8)	-9.56a(0.00)	-6.94b(0.00)	-3.78c(0.78)
树芯(当年生)	n. d.	n. d.	n. d.	-12.2a(1.3)	-5.11b(1.10)	-9.44c(0.07)

1) 括号内为标准差;先对各样地的 4 种主要植物取均值之后,再对平行处理的样地取均值;n. d. 表示数据缺失;均值后面不同字母表示不同处理之间的差异显著(one-way ANOVA, $P \leq 0.05$)



误差线表示标准差,字母表示不同处理的差异显著(one-way ANOVA, $P \leq 0.05$)

图 1 不同处理样地内土壤各层的 $\delta^{15}\text{N}$

Fig. 1 $\delta^{15}\text{N}$ in soil horizons among different treatments

2.2 植物 TN 含量与 $\delta^{15}\text{N}$

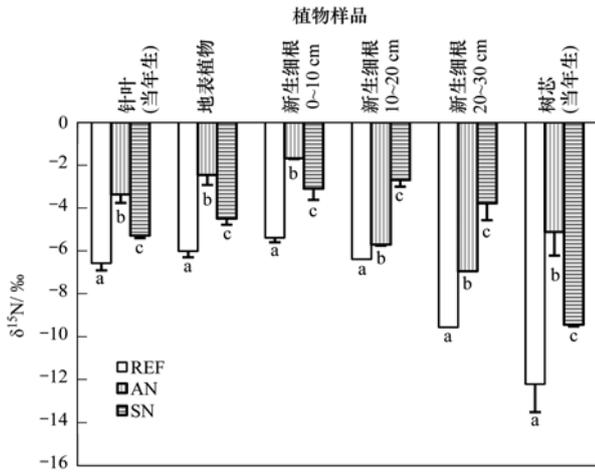
各样地当年生针叶的 TN 含量范围是 $11.8 \sim 12.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,地表植物为 $16.3 \sim 17.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,新生细根分别为 $13.7 \sim 16.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (0~10 cm 层)、 $14.5 \sim 16.9 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (10~20 cm 层) 和 $14.5 \sim 16.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (20~30 cm 层)。其中,除 0~10 cm 层细根 AN 样地显著高于 SN 样地之外,其余植物样品在不同的处理间没有显著差异(表 1)。

无论对对照样地还是施氮样地, $\delta^{15}\text{N}$ 在各植物样品(针叶、树芯、地表植物和新生细根)中均呈负值。总体来看, $\delta^{15}\text{N}$ 呈现趋势:新生细根 > 地表植物 > 当年生针叶 > 当年生树芯(AN 样地土壤中下层细根最低为例外)。新生细根 $\delta^{15}\text{N}$ 随土壤层深度的增加而升高(SN 样地 10~20 cm 层最高为例外),见图 2。

施氮样地(AN 和 SN)的 $\delta^{15}\text{N}$ 在各植物样品均显

著高于对照样地(REF);同时,AN样地的 $\delta^{15}\text{N}$ 在土壤中层(10~20 cm)和下层(20~30 cm)的新生细根中显著低于SN样地,而在其他各植物样品中均显著地高于SN样地(图2)。

利用土壤和植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 计算各样地的富集因子($\epsilon_{p/s}$),其中REF样地为 $-6.2\text{‰} \pm 0.5\text{‰}$,显著低于AN样地($-3.7\text{‰} \pm 0.3\text{‰}$)和SN样地($-5.2\text{‰} \pm 0.1\text{‰}$),而AN样地显著高于SN样地。



误差线表示标准差,字母表示不同处理的差异显著(one-way ANOVA, $P \leq 0.05$)

图2 不同处理样地的植物 $\delta^{15}\text{N}$

Fig. 2 $\delta^{15}\text{N}$ in plant species among different treatments

3 讨论

3.1 土壤与植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 及其影响因素

通常土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 随土壤深度的增加而升高^[9~12,27~32],对照样地(REF)结果基本如此,但是施氮样地(AN和SN)下层土壤(20~30 cm)的 $\delta^{15}\text{N}$ 低于中层土壤(10~20 cm),原因是施氮样地已经

氮饱和,下层土壤中的 NO_3^- 大多没有被植物和微生物利用,因此未经同位素分馏直接被淋溶,导致了该层 $\delta^{15}\text{N}$ 的下降^[10,11]。

各样地土壤有机层的 $\delta^{15}\text{N}$ ($-6.5\text{‰} \sim -4.0\text{‰}$)普遍低于欧美的温带森林土壤($-6.0\text{‰} \sim 3.3\text{‰}$)^[27,28,33],也低于我国东北的温带森林土壤($-4.9\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$)^[30]和我国南部的亚热带($-1.7\text{‰} \sim -1.3\text{‰}$)和热带森林土壤($-1.8\text{‰} \sim -1.0\text{‰}$)^[31,32]。原因可能有两方面:一是该地区降水和穿透水中的 NH_4^+ 是 ^{15}N 贫化的(分别为 -5.2‰ 和 -3.3‰)^[34];二是受林中凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 较低的影响,该地区的凋落物通量较高,为 $5.96 \text{ t} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$,且其中针叶的比例(48.4%)很高^[35],凋落物 $\delta^{15}\text{N}$ 低于土壤表层(由于凋落物在被微生物分解过程中发生 ^{15}N 分馏)^[10,11]。本研究中针叶 $\delta^{15}\text{N}$ 低于土壤表层,与之相符。

各处理样地的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 均为负值(表1和图2),这与欧洲已有的一些研究结果相似^[11~13,28,29]。尽管国外大部分热带森林叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 为正($3.7\text{‰} \pm 3.5\text{‰}$, $n = 73$),并显著高于许多温带森林($-2.8\text{‰} \pm 2.0\text{‰}$, $n = 90$)^[27],但我国华南^[31]和台湾^[36]的亚热带森林,以及海南岛^[32]的热带森林叶片 $\delta^{15}\text{N}$ 多为负值,这与我国热带和亚热带森林土壤有较低的 $\delta^{15}\text{N}$ 相一致^[31,32]。

对于植物在不同组织间的 $\delta^{15}\text{N}$ 差异(新生细根 > 地表植物叶片 > 针叶 > 树芯),与欧美已有的一些研究结果相符^[12,29,33,37],这一差异表明植物在输送和利用氮的过程中发生了 ^{15}N 的分馏^[11,37]。

如图3所示,通过对植物与土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的比较,发现各样地的植物 $\delta^{15}\text{N}$ 均低于土壤矿质层 $\delta^{15}\text{N}$,并且矿质上层(0~10 cm)细根 $\delta^{15}\text{N}$ 与该层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 之间有

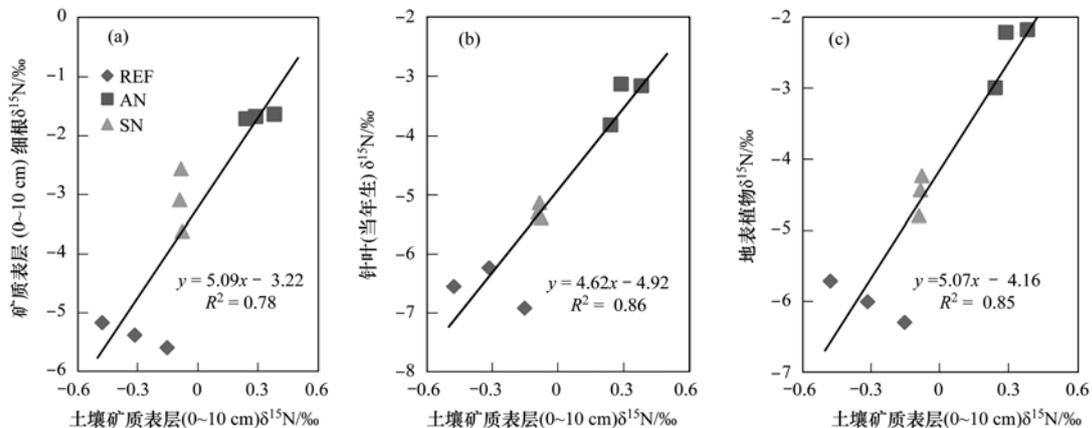


图3 细根、针叶和地表植物 $\delta^{15}\text{N}$ 与土壤矿质上层 $\delta^{15}\text{N}$ 的相关关系

Fig. 3 Correlation of $\delta^{15}\text{N}$ in fine roots, current needle, and ground vegetation respectively with $\delta^{15}\text{N}$ in upper mineral soil

显著的正相关关系[图 3(a)],针叶和地表植物的 $\delta^{15}\text{N}$ 也分别与矿质上层(0~10 cm)土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 呈现显著的正相关关系[图 3(b)和 3(c)],这与之前的研究结果相似^[9,10,13,33,37],表明植物 $\delta^{15}\text{N}$ (特别是叶片和细根的 $\delta^{15}\text{N}$)能作为一种指标来表征氮来源,以及土壤的氮状态^[11~13,33,37,38].

3.2 氮循环对氮沉降的响应

3.2.1 氮沉降增加的影响

长期施氮样地(AN和SN)的土壤和植物 $\delta^{15}\text{N}$ 均显著地高于只接受了自然氮沉降的对照样地(REF),这与很多针对森林的长期施氮研究结论相符^[12,13,31,33,38],即氮输入的增加会提高土壤和植物中的 $\delta^{15}\text{N}$.这主要是两方面的原因:一是无机氮(主要是 NH_4^+)输入的增加,提高了硝化速率(表2),造成更多¹⁵N贫化的 NO_3^- 的淋溶,以及更多¹⁵N富集的 NH_4^+ 被固持在土壤中,进而被植物利用,因此较高的硝化速率和淋溶导致了土壤和植物中¹⁵N的富集^[11~13,29,31];二是在高氮输入下,反硝化速率增加^[11,13,31],反应产生¹⁵N贫化的 N_2O 被排放到系统外,而¹⁵N富集的 NO_3^- 被留在土壤内,造成土壤的¹⁵N富化^[11,13,31],同样导致植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的增加.

3.2.2 不同形态氮沉降的影响

同样是接受长期持续的高氮输入,土壤和植物 $\delta^{15}\text{N}$ 在施加 NH_4NO_3 (同时增加 NH_4^+ 和 NO_3^-)和 NaNO_3 (仅增加 NO_3^-)下却存在显著差异.这说明该生态系统对不同形式的氮输入具有不同的响应. NH_4^+ 沉降导致各层土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 均显著高于同剂量(按氮计)的 NO_3^- 沉降,原因是土壤中有更多的 NH_4^+ 硝化(表2)产生¹⁵N贫化的 NO_3^- 被淋溶(AN和SN样地的 NO_3^- 淋溶通量相当),而¹⁵N富集的 NH_4^+ 被留在土壤中.

由于植物在吸收氮的过程中与土壤的氮状态有密切的关系(图3),因此不同形态氮沉降造成的土

壤 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异进一步导致了植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的显著差异^[11,13,38].AN样地植物更多利用的是土壤中¹⁵N富集的 NH_4^+ ,而SN样地植物利用的更多是¹⁵N相对贫化的 NO_3^- ,从而导致了植物 $\delta^{15}\text{N}$ 的差异^[37].

3.3 ¹⁵N富集因子及其影响因素

各处理样地的¹⁵N富集因子(ε_{pvs})与其氮输入量、净硝化速率和氮淋溶量(主要是 NO_3^- 淋溶)均呈显著的正相关关系(表2),而这些通量又与生态系统是否氮饱和有着密切关系(例如,大部分氮输入被淋溶,表明这些样地已经氮饱和)^[2].不少研究尝试用¹⁵N富集因子来表征森林系统的氮状态,因为不论是相对封闭的系统^[9,11,12,28,38],还是新近研究的氮淋溶很高的亚热带、热带地区的开放森林生态系统^[31,32],都证实了富集因子与氮通量之间的显著相关性.Emmett等^[12]通过总结欧洲4个地区温带森林的¹⁵N自然丰度值,发现了富集因子(ε_{pvs})与氮沉降量之间存在显著的正相关关系($R^2=0.98, P<0.01$;图4),但是该研究只是针对欧洲的温带森林系统,且氮沉降量在 $1\sim 6\text{ g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间.

本研究得到REF、AN和SN样地的 ε_{pvs} 分别为 $-6.2\text{‰}\pm 0.5\text{‰}$ 、 $-3.7\text{‰}\pm 0.3\text{‰}$ 和 $-5.2\text{‰}\pm 0.1\text{‰}$ (表2).对中外其他地区的研究结果进行分析,这些地区包括美国北部的温带森林^[28,38]和南部的热带森林^[9],中国东北大兴安岭地区的寒温带森林^[30],以及中国南部的亚热带森林^[31,39]和热带森林^[32],发现所有马尾松林(包括本研究TSP、广东鼎湖山DHS和贵州鹿冲关LCG)的富集因子和氮沉降量有着显著的线性相关关系($R^2=0.74, P\leq 0.05$),不同于欧洲森林的结果^[12],而我国和美国的另外一些森林类型则可能满足其他的关系(图4).以上不同研究结果的对比初步表明,富集因子可用来表征生态系统的氮状态,不过还要同时考虑森林类型等其他因素,这需更多观测结果的支持.

表2 各处理样地的氮通量与富集因子¹⁾

Table 2 N fluxes and ¹⁵N enrichment factor in different treatments

项目	REF	AN	SN	R^2
氮沉降量(自然沉降+施加氮肥)/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	5.0	9.0	9.0	0.61
净氮矿化速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1.7	3.8	3.7	0.80
净硝化速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	1.5	3.6	2.4	0.94
土壤水(30cm) NO_3^- 淋溶通量/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$	3.9	7.0	6.5	0.68
¹⁵ N富集因子/‰	-6.2	-3.7	-5.2	

1)表中净氮矿化速率、净硝化速率和 NO_3^- 淋溶通量为2005~2010年均值,见文献[40]; R^2 为富集因子与各氮循环指标的相关关系系数($n=9, P\leq 0.05$)

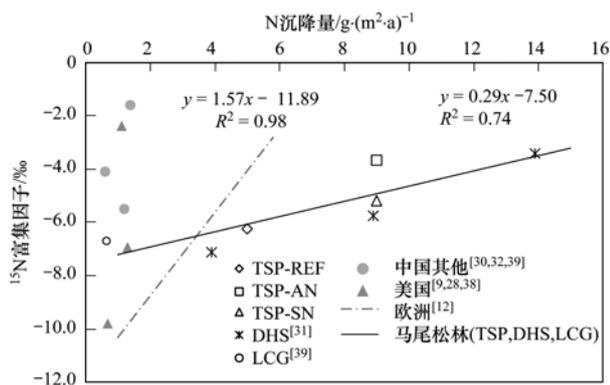


图4 ^{15}N 富集因子与氮沉降量之间的关系

Fig. 4 Relationship between ^{15}N enrichment factor and N deposition

4 结论

(1)通过对我国西南地区典型马尾松林的土壤和植物 ^{15}N 自然丰度进行分析和比较,表明长期持续的高氮输入会增加土壤和植物的 ^{15}N 自然丰度值.氮沉降的增加同样会提高森林生态系统的富集因子. ^{15}N 富集因子有可能作为表征生态系统的氮状态的指标,不过还需更多的观测结果的支持.

(2)该森林系统对于不同形式的氮沉降(NH_4^+ 或 NO_3^-)有着不同的响应,植物和土壤的 $\delta^{15}\text{N}$ 在同剂量(按氮计)的 NH_4^+ 沉降下显著高于 NO_3^- 沉降情况.考虑到 NH_4^+ 沉降的效应更明显,而我国目前的氮沉降控制主要针对 NO_x 排放削减(降低 NO_3^- 沉降),因此建议同时重视 NH_3 排放的削减,从而降低 NH_4^+ 沉降.

参考文献:

- [1] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, *et al.* Transformation of the nitrogen cycle: recent trends, questions, and potential solutions [J]. *Science*, 2008, **320**(5878): 889-892.
- [2] Aber J D, McDowell W H, Nadelhoffer K J, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems: hypotheses revisited [J]. *BioScience*, 1998, **48**(11): 921-934.
- [3] Aber J D, Magill A H. Chronic nitrogen additions at the Harvard Forest (USA): the first 15 years of a nitrogen saturation experiment [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, **196**(1): 1-5.
- [4] Kreuzer K, Butterbach-Bahl K, Rennenberg H, *et al.* The complete nitrogen cycle of an N-saturated spruce forest ecosystem [J]. *Plant Biology*, 2009, **11**(5): 643-649.
- [5] 袁颖红, 樊后保, 李燕燕, 等. 模拟氮沉降对土壤酸化和土壤盐基离子含量的影响 [J]. *应用与环境生物学报*, 2011, **17**(4): 461-466.
- [6] 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.
- [7] Emmett B A, Boxman D, Bredemeier M, *et al.* Predicting the effects of atmospheric nitrogen deposition in conifer stands: evidence from the NITREX ecosystem-scale experiments [J]. *Ecosystems*, 1998, **1**(4): 352-360.
- [8] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, *et al.* Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests [J]. *Ecosystems*, 2000, **3**(3): 238-253.
- [9] Garten C T. Variations in foliar ^{15}N abundance and the availability of soil nitrogen on Walker Branch Watershed [J]. *Ecology*, 1993, **74**(7): 2098-2113.
- [10] Nadelhoffer K J, Fry B. Nitrogen isotope studies in forest ecosystems [A]. In: Michener K L A R H, (ed). *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science* [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publishers, 1994. 22-44.
- [11] Högborg P. Tansley review No. 95: ^{15}N natural abundance in soil-plant systems [J]. *New Phytologist*, 1997, **137**(2): 179-203.
- [12] Emmett B A, Kjonaas O J, Gundersen P, *et al.* Natural abundance of ^{15}N in forests across a nitrogen deposition gradient [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, **101**(1-3): 9-18.
- [13] Pardo L H, Templer P H, Goodale C L, *et al.* Regional assessment of N saturation using foliar and root $\delta^{15}\text{N}$ [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **80**(2): 143-171.
- [14] Zhao Y, Duan L, Xing J, *et al.* Soil acidification in China: is controlling SO_2 emissions enough? [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(21): 8021-8026.
- [15] Liu X J, Duan L, Mo J M, *et al.* Nitrogen deposition and its ecological impact in China: an overview [J]. *Environmental Pollution*, 2011, **159**(10): 2251-2264.
- [16] Liu X J, Zhang Y, Han W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China [J]. *Nature*, 2013, **494**(7438): 459-462.
- [17] Lü C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: synthesis of observational data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, **112**(D22): D22S05.
- [18] Lu X K, Mao Q G, Gilliam F S, *et al.* Nitrogen deposition contributes to soil acidification in tropical ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(12): 3790-3801.
- [19] Larssen T, Duan L, Mulder J. Deposition and leaching of sulfur, nitrogen and calcium in four forested catchments in China: implications for acidification [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **45**(4): 1192-1198.
- [20] 吴征镒. 中国植被 [M]. 北京: 科学出版社, 1980. 235.
- [21] 余德祥, 马萧萧, 谭炳全, 等. 重庆市铁山坪 2001~2010 年酸沉降变化 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 60-65.
- [22] Chen X Y, Mulder J. Indicators for nitrogen status and leaching in subtropical forest ecosystems, South China [J]. *Biogeochemistry*, 2007, **82**(2): 165-180.
- [23] 段雷, 周益, 杨永森, 等. 酸化及化学修复剂对森林土壤有机物淋溶的影响 [J]. *环境科学*, 2008, **29**(2): 440-445.

- [24] 杨永森, 段雷, 靳腾, 等. 石灰石和菱镁矿对酸化森林土壤修复作用的研究 [J]. 环境科学, 2006, **27**(9): 1878-1883.
- [25] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural $\delta^{15}\text{N}$ abundance measurements [J]. Nature, 1983, **303**(5919): 685-687.
- [26] Mariotti A, Germon J C, Hubert P, *et al.* Experimental determination of nitrogen kinetic isotope fractionation: some principles; illustration for the denitrification and nitrification processes [J]. Plant and Soil, 1981, **62**(3): 413-430.
- [27] Martinelli L A, Piccolo M C, Townsend A R, *et al.* Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: tropical versus temperate forests [J]. Biogeochemistry, 1999, **46**(1-3): 45-65.
- [28] Templer P H, Arthur M A, Lovett G M, *et al.* Plant and soil natural abundance $\delta^{15}\text{N}$: indicators of relative rates of nitrogen cycling in temperate forest ecosystems [J]. Oecologia, 2007, **153**(2): 399-406.
- [29] Koopmans C J, Van Dam D, Tietema A, *et al.* Natural ^{15}N abundance in two nitrogen saturated forest ecosystems [J]. Oecologia, 1997, **111**(4): 470-480.
- [30] Cheng S L, Fang H J, Yu G R, *et al.* Foliar and soil ^{15}N natural abundances provide field evidence on nitrogen dynamics in temperate and boreal forest ecosystems [J]. Plant and Soil, 2010, **337**(1-2): 285-297.
- [31] Fang H J, Yu G R, Cheng S L, *et al.* Nitrogen-15 signals of leaf-litter-soil continuum as a possible indicator of ecosystem nitrogen saturation by forest succession and N loads [J]. Biogeochemistry, 2011, **102**(1-3): 251-263.
- [32] Wang A, Fang Y T, Chen D X, *et al.* Variations in nitrogen-15 natural abundance of plant and soil systems in four remote tropical rainforests, southern China [J]. Oecologia, 2014, **174**(2): 567-580.
- [33] Högborg P, Högbom L, Schinkel H, *et al.* ^{15}N abundance of surface soils, roots and mycorrhizas in profiles of European forest soils [J]. Oecologia, 1996, **108**(2): 207-214.
- [34] 余龙飞, 李炳文, 张逸, 等. 我国一些站点降雨和森林穿冠水中铵态氮的同位素丰度 [J]. 环境化学, 2012, **32**(9): 1599-1603.
- [35] 王轶浩, 王彦辉, 于澎涛, 等. 重庆酸雨区马尾松林凋落物特征及对干旱胁迫的响应 [J]. 生态学报, 2013, **33**(6): 1842-1851.
- [36] Liu C P, Yeh H W, Sheu B H. N isotopes and N cycle in a 35-year-old plantation of the Guandaoshi subtropical forest ecosystem, central Taiwan [J]. Forest Ecology and Management, 2006, **235**(1-3): 84-87.
- [37] Pardo L H, Semaoune P, Schaberg P G, *et al.* Patterns in $\delta^{15}\text{N}$ in roots, stems, and leaves of sugar maple and American beech seedlings, saplings, and mature trees [J]. Biogeochemistry, 2013, **112**(1-3): 275-291.
- [38] Pardo L H, Hemond H F, Montoya J P, *et al.* Natural abundance ^{15}N in soil and litter across a nitrate output gradient in New Hampshire [J]. Forest Ecology and Management, 2007, **251**(3): 217-230.
- [39] 蒋春来, 张晓山, 肖劲松, 等. 我国西南地区氮沉降量不同的森林小流域中土壤自然 ^{15}N 丰度的分布特征 [J]. 岩石学报, 2009, **25**(5): 1291-1296.
- [40] 马萧萧. 化学修复与模拟氮沉降对酸化森林土壤的影响 [D]. 北京: 清华大学, 2011.

CONTENTS

Characterizing Beijing's Airborne Bacterial Communities in PM _{2.5} and PM ₁₀ Samples During Haze Pollution Episodes Using 16S rRNA Gene Analysis Method	WANG Bu-ying, LANG Ji-dong, ZHANG Li-na, <i>et al.</i> (2727)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Dustfall Trace Elements During Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, GUO Xiao-yu, <i>et al.</i> (2735)
Pollution Characteristics of Aldehydes and Ketones Compounds in the Exhaust of Beijing Typical Restaurants	CHENG Jing-chen, CUI Tong, HE Wan-qing, <i>et al.</i> (2743)
Emission Characteristics of Vehicle Exhaust in Beijing Based on Actual Traffic Flow Information	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (2750)
Chemical Compositions in PM _{2.5} and Its Impact on Visibility in Summer in Pearl River Delta, China	YANG Yi-hong, QU Qun, LIU Sui-xin, <i>et al.</i> (2758)
Health Risk Assessment of Tunnel Workers Based on the Investigation and Analysis of Occupational Exposure to PM ₁₀	XIANG Hua-li, YANG Jun, QIU Zhen-zhen, <i>et al.</i> (2768)
Analysis on Emission Inventory and Temporal-Spatial Characteristics of Pollutants from Key Coal-Fired Stationary Sources in Jiangsu Province by On-Line Monitoring Data	ZHANG Ying-jie, KONG Shao-fei, TANG Li-li, <i>et al.</i> (2775)
Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Precipitation and Its Water Vapor Sources in Eastern Qaidam Basin	ZHU Jian-jia, CHEN Hui, GONG Guo-li (2784)
Distribution Characteristics of Sedimentary Pigments in the Changjiang Estuary and Zhe-Min Coast and Its Implications	LI Dong, YAO Peng, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (2791)
Nutrients Input Characteristics of the Yangtze River and Wanguyu River During the "Water Transfers on Lake Taihu from the Yangtze River"	PAN Xiao-xue, MA Ying-qun, QIN Yan-wen, <i>et al.</i> (2800)
Pollution Characteristics of Surface Runoff of Typical Town in Chongqing City	WANG Long-tao, DUAN Bing-zheng, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (2809)
Effect of Water and Sediment Regulation on the Transport of Particulate Organic Carbon in the Lower Yellow River	ZHANG Ting-ting, YAO Peng, WANG Jin-peng, <i>et al.</i> (2817)
Concentration and Source of Dissolved Organic Carbon in Snowpits of the Tibetan Plateau	YAN Fang-ping, KANG Shi-chang, CHEN Peng-fei, <i>et al.</i> (2827)
Variations of Inorganic Carbon and Its Impact Factors in Surface-Layer Waters in a Groundwater-Fed Reservoir in Karst Area, SW China	LI Jian-hong, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2833)
Modeling the Influencing Factors of Karstification and Karst Carbon Cycle in Laboratory	ZHAO Rui-yi, LÜ Xian-fu, DUAN Yi-fan (2843)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of HCHs and DDTs in Surface Water Bodies in Xinxiang	FENG Jing-lan, YU Hao, LIU Shu-hui, <i>et al.</i> (2849)
Comparison Study of the Alkanes in Different Aquifer Medium Under Qingmuguan Underground System	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (2857)
Spatial Distribution Characteristics of Different Species Mercury in Water Body of Changshou Lake in Three Gorges Reservoir Region	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (2863)
Influence of Marine Aquaculture Around Coal Power Plant on Mercury Species Change in Aquatic Ecological Environment	LIANG Peng, WANG Yuan-na, YOU Qiong-zhi, <i>et al.</i> (2870)
Using $\delta^{34}\text{S}\text{-SO}_4^{2-}$ and $\delta^{15}\text{N}\text{-NO}_3^-$, $\delta^{18}\text{O}\text{-NO}_3^-$ to Trace the Sources of Sulfur and Nitrate in Lihu Lake Underground Water, Guangxi, China	LI Rui, XIAO Qiong, LIU Wen, <i>et al.</i> (2877)
Ecological Effects of Algae Blooms Cluster; The Impact on Chlorophyll and Photosynthesis of the Water Hyacinth	LIU Guo-feng, HE Jun, YANG Yi-zhong, <i>et al.</i> (2887)
Influence of Natural Dissolved Organic Matter on the Passive Sampling Technique and Its Application	YU Shang-yun, ZHOU Yan-mei (2895)
Adhesion Force Analysis of Protein Fouling of PVDF Ultrafiltration Membrane Using Atomic Force Microscope	WANG Xu-dong, ZHOU Miao, MENG Xiao-rong, <i>et al.</i> (2900)
Influence of CNTs on Photodegradation of Salbutamol in Water Environment	WANG Qi, HAN Jia-ru, WEI Bo-fan, <i>et al.</i> (2906)
Preparation of $\beta\text{-In}_2\text{S}_3$ and Catalytic Degradation of Oxytetracycline Under Solar Light Irradiation	AI Cui-ling, ZHOU Dan-dan, ZHANG Rong-rong, <i>et al.</i> (2911)
Nitrogen Release Performance of Sediments in Drainage Pipeline	CHEN Hong, ZHUO Qiong-fang, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (2918)
Analysis of Precipitation Formation in Biofilm CANON Reactor and Its Effect on Nitrogen Removal	FU Kun-ming, WANG Hui-fang, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i> (2926)
Optimization of Energy Saving Measures with ABR-MBR Integrated Process	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2934)
Abundance and Community Composition of Ammonia-Oxidizing Archaea in Two Completely Autotrophic Nitrogen Removal over Nitrite Systems	GAO Jing-feng, LI Ting, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (2939)
Formation Mechanism of Aerobic Granular Sludge and Removal Efficiencies in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, XU Yue-zhong, <i>et al.</i> (2947)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Surface Soil of Pearl River Delta Economic Zone	DOU Lei, YANG Guo-yi (2954)
Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Farmland Soil in Du'an Autonomous County of Guangxi Zhuang Autonomous Region, China	WU Yang, YANG Jun, ZHOU Xiao-yong, <i>et al.</i> (2964)
Assessment of Heavy Metal Pollution and Its Health Risk of Surface Dusts from Parks of Kaifeng, China	DUAN Hai-jing, CAI Xiao-qiang, RUAN Xin-ling, <i>et al.</i> (2972)
Responses of Soil and Plant ^{15}N Natural Abundance to Long-term N Addition in an N-Saturated <i>Pinus massoniana</i> Forest in Southwest China	LIU Wen-jing, KANG Rong-hua, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (2981)
Latitudinal Changes in Plant Stoichiometric and Soil C, N, P Stoichiometry in Loess Plateau	LI Ting, DENG Qiang, YUAN Zhi-You, <i>et al.</i> (2988)
Open-top Chamber for <i>in situ</i> Research on Response of Mercury Enrichment in Rice to the Rising Gaseous Elemental Mercury in the Atmosphere	CHEN Jian, WANG Zhang-wei, ZHANG Xiao-shan, <i>et al.</i> (2997)
Influence of Uranium in <i>Pteris vittata</i> L. Inoculated by Arbuscular Mycorrhizal Fungus	ZHENG Wen-jun, WANG Ming-yuan (3004)
Impact on the Microbial Biomass and Metabolic Function of Carbon Source by Black Soil During Rice Cultivation	ZHAO Zhi-rui, CUI Bing-jian, HOU Yan-lin, <i>et al.</i> (3011)
Effect of Decomposing Products of Immobilized Carries on Desorption of Pyrene in Contaminated Soil	TONG Dong-li, SHUANG Sheng-qing, LI Xiao-jun, <i>et al.</i> (3018)
Solidification/Stabilization of Chromite Ore Processing Residue (COPR) Using Zero-Valent Iron and Lime-Activated Ground Granulated Blast Furnace Slag	CHEN Zhong-lin, LI Jin-chunzi, WANG Bin-yuan, <i>et al.</i> (3026)
Stabilization of Cadmium Contaminated Soils by Ferric Ion Modified Attapulgite (Fe/ATP): Characterizations and Stabilization Mechanism	YANG Rong, LI Hong-bo, ZHOU Yong-li, <i>et al.</i> (3032)
Improving Agricultural Safety of Soils Contaminated with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by In Situ Bioremediation	JIAO Hai-hua, PAN Jian-gang, XU Sheng-jun, <i>et al.</i> (3038)
Competence of Cd Phytoremediation in Cd-OCDF Co-contaminated Soil Using <i>Mirabilis jalapa</i> L.	ZHANG Xing-li, ZOU Wei, ZHOU Qi-xing (3045)
Effects of Soil Moisture on Phytoremediation of As-Contaminated Soils Using As-Hyperaccumulator <i>Pteris vittata</i> L.	LIU Qiu-xin, YAN Xiu-lan, LIAO Xiao-yun, <i>et al.</i> (3056)
Effects of Phosphate Rock and Decomposed Rice Straw Application on Lead Immobilization in a Contaminated Soil	TANG Fan, HU Hong-qing, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3062)
Residue and Degradation of Roxarsone in the System of Soil-Vegetable	SHAO Ting, YAO Chun-xia, SHEN Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3068)
Acute Toxicity and Safety Assessment of Three Typical Organic Pollutants to Two Aquatic Organisms	YANG Yang, LI Ya-jie, CUI Yi-bin, <i>et al.</i> (3074)
Effects of Oil Pollutants on the Performance of Marine Benthonic Microbial Fuel Cells and Its Acceleration of Degradation	MENG Yao, FU Yu-bin, LIANG Sheng-kang, <i>et al.</i> (3080)
Microwave In-situ Regeneration of Cu-Mn-Ce/ZSM Catalyst Adsorbed Toluene and Distribution of Bed Temperature	HU Xue-jiao, BO Long-li, LIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (3086)
Impact of Thermal Treatment on Biogas Production by Anaerobic Digestion of High-solid-content Swine Manure	HU Yu-ying, WU Jing, WANG Shi-feng, <i>et al.</i> (3094)
Impact of Phosphogypsum Wastes on the Wheat Growth and CO ₂ Emissions and Evaluation of Economic-environmental Benefit	LI Ji, WU Hong-sheng, GAO Zhi-qiu, <i>et al.</i> (3099)
Status Quo, Uncertainties and Trends Analysis of Environmental Risk Assessment for PFAS	HAO Xue-wen, LI Li, WANG Jie, <i>et al.</i> (3106)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年8月15日 第36卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 8 Aug. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行