

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM_{2.5} 中稳定碳同位素组成研究 吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)

太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析 胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)

交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究 罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)

公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性 楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)

兰州及其周边区域大气降水 δ¹⁸O 特征及其水汽来源 陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)

天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析 岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)

O₃/H₂O₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制 何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪 关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)

江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究 李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)

辽河流域非点源污染空间特征遥感解析 王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)

景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究 杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)

金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)

崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探 韩建刚, 曹雪 (3810)

FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性 刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)

中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析 袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)

深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价 孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)

PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源 边璐, 李田, 侯娟 (3840)

三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究 余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)

小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究 李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)

太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟 韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)

湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究 陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)

水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究 周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)

底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响 区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)

区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究 易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)

4 种人工湿地填料的 f₂ 噬菌体吸附特性 陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)

稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究 纪菅雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)

紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究 王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)

基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较 朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)

nTiO₂ 在水中的分散沉降行为研究 陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)

微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响 谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)

两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究 周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)

化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究 周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)

珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价 李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)

污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响 金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)

活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素 李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)

不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响 郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)

生物陶粒反应器的氮自养反硝化研究 陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)

亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究 严俊霞, 李君剑, 王洪建, 张义辉 (3992)

SiB3 模式对作物区 CO₂ 通量的模拟研究 张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)

缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响 徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)

典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例 闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)

苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯 史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)

废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性 吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)

铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究 王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)

典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究 李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)

3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中运移行为研究 方婧, 余博阳 (4050)

多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征 李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)

毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究 白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)

珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究 梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)

江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价 刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)

铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响 张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)

利用高通量测序对封存 CO₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究 田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)

酸性矿山水区域废矿石中真核生物多样性分析 李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)

十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析 常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)

硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)

外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响 刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)

电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析 李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)

《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)

马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪

关暉^{1,2}, 肖化云^{1*}, 朱仁果^{1,2}, 郑能建^{1,2}, 瞿玲露^{1,2}

(1. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 对贵州地区(贵阳)和云南地区(昆明、曲靖)的马尾松针叶组织中的无机硫(S_{SO_4})和总硫(S_T)的含量及其 $\delta^{34}S$ 值进行了测定. 结果表明, 贵阳地区针叶组织中的无机硫和总硫含量明显高于云南地区, 各采样地大气 SO_2 浓度和针叶无机硫含量存在较好的正相关关系, 但和总硫不存在显著相关关系, 说明针叶组织无机硫含量的变化相对于总硫更能可靠地反映大气硫输入. 贵阳地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 平均值为 -7.22‰ , 明显低于云南地区针叶中的无机硫 $\delta^{34}S$ (3.85‰), 这与贵阳地区燃煤的硫同位素组成低于云南燃煤的硫同位素组成有关. 无机硫和总硫含量在昆明钢铁厂和曲靖火电厂附近针叶中都表现为与离工厂距离呈反比, 而 $\delta^{34}S$ 则表现为在昆明钢铁厂附近随距离变大而偏负; 在曲靖火电厂附近随距离变大而偏正, 这主要是由工厂燃煤来源的大气硫沉降所决定的.

关键词: 针叶; 无机硫; 二氧化硫; 硫同位素组成; 来源

中图分类号: X142; X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3777-05

Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of *Pinus massoniana* Lamb. and Source Apportionment

GUAN Hui^{1,2}, XIAO Hua-yun¹, ZHU Ren-guo^{1,2}, ZHENG Neng-jian^{1,2}, QU Ling-lu^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study analyzed the inorganic sulfur (S_{SO_4}) and total sulfur (S_T) content as well as the isotopic signatures ($\delta^{34}S_{SO_4}$ and $\delta^{34}S_T$) in leaves of *Pinus massoniana* Lamb. collected from Guizhou and Yunnan areas. The results indicated that the S_{SO_4} and S_T content in leaves at Guiyang areas was significantly higher than that at Yunnan areas, and the content of inorganic sulfur in the leaves was found to be directly related to the concentration of ambient sulfur dioxide, but no correlation was seen between the S_T content and the ambient sulfur dioxide, showing the S_{SO_4} content in leaves was more reliable to reflect the ambient sulfur input. The average value of $\delta^{34}S_{SO_4}$ in leaves at Guiyang areas (-7.22‰) was significantly lower than that at Yunnan areas (3.85‰), which was related to the fact that the sulfur isotopic composition of coal at Guiyang areas is lower than that at Yunnan areas. The S_{SO_4} and S_T content in leaves around Kunming steel and Qujing power plant was inversely proportional to the distance from the factories, while around Kunming steel plant the value of $\delta^{34}S_{SO_4}$ in leaves became more negative when the distance became larger while around Qujing power plant the value of $\delta^{34}S_{SO_4}$ became more positive when the distance became larger, indicating that the S_{SO_4} content and $\delta^{34}S_{SO_4}$ in leaves around Kunming steel and Qujing power plant were controlled by coal sources of atmospheric sulfur deposition.

Key words: leaves of *Pinus massoniana* Lamb.; inorganic sulfur; sulfur dioxide; $\delta^{34}S$; source apportionment

随着产业经济的发展,因大量人为成因的硫进入大气系统而引起的高大气硫沉降,已成为全球重大的环境问题之一^[1]. SO_2 是导致降水呈酸性的主要原因之一,酸雨污染已给我国经济造成严重损失^[2]. 由化石燃烧排放的大量 SO_2 进入大气后,通过植物气孔进入叶肉细胞产生水合作用,形成 SO_3^{2-} 、 HSO_3^- 和 SO_4^{2-} 等形式. SO_4^{2-} 可以被植物吸收、转化、累积和利用^[3], 并且是主要的 S 利用形式^[4]. 因为大多数植物都有吸收 SO_2 的能力,分析植物组织硫含量具有更好的灵敏度和重现性^[5].

20 世纪 50 年代以来,稳定硫同位素已经成为研究示踪物质来源和走向的有力工具. 苔藓植物硫含量和硫同位素由于其特殊的形态结构和生物学特

性而被广泛应用于大气环境的指示以及大气沉降物质输入的研究中^[6-10]. 然而,由于苔藓植物的生境的特殊性,造成在选取该类植物指示大气硫沉降时受其限制. 近年来,研究者开始利用植物叶片组织(特别是针叶类)中总硫和硫酸盐含量来指示大气硫沉降^[5,11-14]. 因此,本研究拟利用不同地区的松针叶片(马尾松)作为研究对象,对其总硫含量、无机硫含量及其硫同位素组成($\delta^{34}S_T$ 和 $\delta^{34}S_{SO_4}$)进行分析,以了解针叶中硫浓度、同位素组成与大气沉降

收稿日期: 2013-01-28; 修订日期: 2013-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41173027, 41273027)

作者简介: 关暉(1987~),男,博士研究生,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: guanhu007@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xiaohuayun@vip.skleg.cn

的关系,探讨影响植物组织硫同位素组成变化的原因,揭示松针叶片硫含量和硫同位素指示大气硫沉降的可靠性,以期为进一步开展应用植物组织监测大气硫沉降以及研究大气硫沉降的生态环境效应打下理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域

主要研究区域包括贵阳地区(贵阳市区、黔灵山、森林公园),昆明地区(昆明市区、安宁市区、晋宁山区)和曲靖地区。市区的样品主要采集于市中心公园与马路旁,曲靖地区样品主要采集于城郊。此外,还选择了两个特定点源(昆明钢铁厂和曲靖火电厂)按照离工厂的距离进行采样。

1.2 样品采集和处理

选取的植物种类为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),选取树龄相近且生长都超过5 a的植物进行采样。采样时间为2012年2月23日~2012年4月30日,共采集针叶样品56个,植物根际土壤样品23个。采集到的新鲜针叶装入干净的自封袋中,运回实验室后自然风干。用超纯水(Milli-Q)反复冲洗以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物。在70℃烘24 h,用粉碎机粉碎,过100目筛。土壤样品自然风干后,用研钵粉碎,过100目筛。

1.3 浓度和同位素测定

针叶组织硫含量 $\omega(S)$ (%,以干质量计)用元素分析仪(German)测定。通过对Sigmas8626-100 g硫标准样进行分析,其测量精度优于0.1%。针叶中硫酸盐的浓度用湿硝化硫酸钡比浊法分析^[15]。针叶 $\delta^{34}S_r$ 测定采用艾氏卡试剂分离并转化为硫酸钡的方法制备样品^[16],针叶 $\delta^{34}S_{SO_4}$ 测定采用湿硝化硫酸钡比浊法制备样品,然后都用连续流同位素质谱仪CF-IRMS(EA-IsoPrime,型号为Euro3000,GV instruments)测定硫同位素组成。测定数据采用以国际硫同位素CDT标准标定的国家硫同位素标准(硫化银)进行校正,测量误差小于 $\pm 0.2\text{‰}$ ($n=5$)。

2 结果与讨论

2.1 针叶总硫和组织中无机硫含量的变化特征

各地区针叶中无机硫含量的变化范围为0.001%~0.24%,总硫含量的变化范围为0.10%~0.28%。贵阳地区(贵阳市区、黔灵山、森林公园)针叶组织中无机硫含量(平均值0.11%)和总硫含量(平均值0.20%)都明显高于云南地区(曲靖、昆明、安宁、晋宁)针叶组织中无机硫含量(平均值0.04%)和总硫含量(平均值0.16%),见表1。贵阳地区(贵阳市区、黔灵山、森林公园)无机硫含量所占总硫的比例达50%以上,明显高于云南地区(曲靖、昆明、安宁、晋宁)。本研究各地区植物根际土壤总硫含量变化不大。

表1 不同采样点的针叶和土壤的硫含量以及硫同位素组成

Table 1 Sulfur contents and $\delta^{34}S$ values of leaves at different sampling sites

采样点	针叶 S_{SO_4} 含量/%	针叶 $\delta^{34}S_{SO_4}/\text{‰}$	针叶 S_r 含量/%	针叶 $\delta^{34}S_r/\text{‰}$	土壤 S_r 含量/%
贵阳市区	0.12 ± 0.05	-6.20 ± 0.95	0.21 ± 0.04	-3.92 ± 2.45	0.04
黔灵山公园	0.11 ± 0.02	-9.48 ± 1.36	0.19 ± 0.01	-7.55 ± 1.42	0.02 ± 0.003
贵阳森林公园	0.11 ± 0.03	-5.99 ± 0.43	0.20 ± 0.009	-3.89 ± 1.01	0.05 ± 0.03
曲靖市区	0.04 ± 0.03	-2.68 ± 1.19	0.14 ± 0.03	-3.40 ± 1.57	0.05 ± 0.01
昆明市区	0.04 ± 0.02	4.76 ± 0.93	0.15 ± 0.03	4.60 ± 2.04	0.03 ± 0.009
安宁市区	0.06 ± 0.04	1.86 ± 2.44	0.23 ± 0.04	4.00 ± 1.72	0.042
晋宁山区	0.02 ± 0.02	4.93 ± 1.32	0.13 ± 0.02	8.59 ± 1.25	0.01 ± 0.006
昆明钢铁厂(10 m)	0.16	4.95	0.33	8.12	0.023
昆明钢铁厂(1 000 m)	0.02	3.4	0.15	5.88	0.02
昆明钢铁厂(8 000 m)	0.002	3.84	0.1	4.6	0.017
曲靖火电厂(10 m)	0.042	-3.46	0.123	-1.51	0.023
曲靖火电厂(500 m)	0.019	-2.93	0.115	-1.05	0.025
曲靖火电厂(2 000 m)	0.016	-1.87	0.108	-1.28	0.018
曲靖火电厂(10 000 m)	0.006	-1.81	0.113	-0.32	0.034

两个点源附近马尾松针叶中无机硫和总硫含量总体表现为随着离工厂距离的变大而降低,如距离昆明钢铁厂10 m处针叶中无机硫和总硫含量分别为0.16%和0.33%,8 000 m处含量仅为0.002%

和0.10%(图1),这与已有的研究结果相一致^[17,18]。针叶中无机硫含量所占总硫的比例也随着离工厂距离的变大而降低,如离昆明钢铁厂10 m处占50%,而8 000 m处仅占2%。根际土壤总硫含量

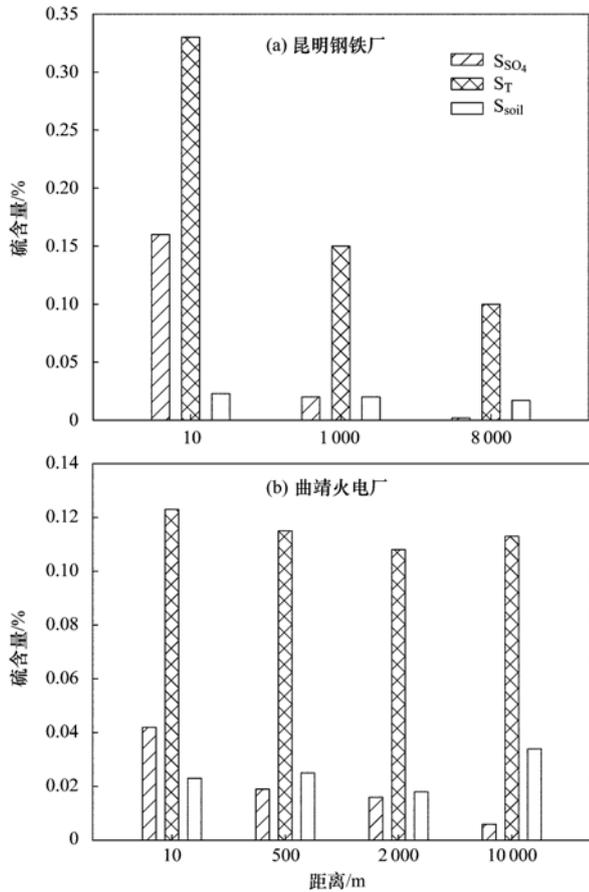


图1 点源附近针叶无机硫、总硫和土壤总硫的含量变化

Fig. 1 Variation of inorganic sulfur and total sulfur concentrations in leaves and total sulfur concentrations in soil near Kunming steel and Qujing power plant

比较稳定,不随着离工厂距离变化而变化。

2.2 针叶组织中无机硫、总硫含量与大气 SO_2 和土壤总硫的关系

结合最近几年该研究区域大气 SO_2 浓度的报道^[19~21],各地区大气 SO_2 浓度和针叶无机硫含量存在较好的正相关关系 ($y = 0.724x + 0.0107$, $P < 0.05$),但各地 SO_2 浓度和针叶总硫含量不存在显著相关关系(图2)。针叶组织无机硫含量的变化相对于总硫更能可靠地反映大气硫输入。Bao等^[22]研究发现,受煤燃烧污染地区的樟树叶片中的无机硫含量比背景区要高出15%,并且在污染区无机硫所占总硫的质量分数达54%,背景区是31%。有研究表明,植物叶片中有机硫反映硫同化,而无机硫则反映叶片中硫的积累。植物长期暴露于高 SO_2 环境中,趋向于增加无机硫的含量和总硫的含量,而有机硫含量通常比较稳定,受到影响较小^[15]。针叶中的无机硫一部分来自于土壤,一部分来自于叶片吸收大气 SO_2 ,在叶绿体内氧化形成 SO_4^{2-} ^[23]。但不同地

区的植物根际土壤的总硫浓度差异不大(表1),钢铁厂和火电厂外植物根际土壤的总硫浓度差异也很小(表1)。因此,从土壤中吸收的硫在不同采样点之间没有明显的不同,叶片无机硫含量的变化可以归因于大气 SO_2 浓度的变化。

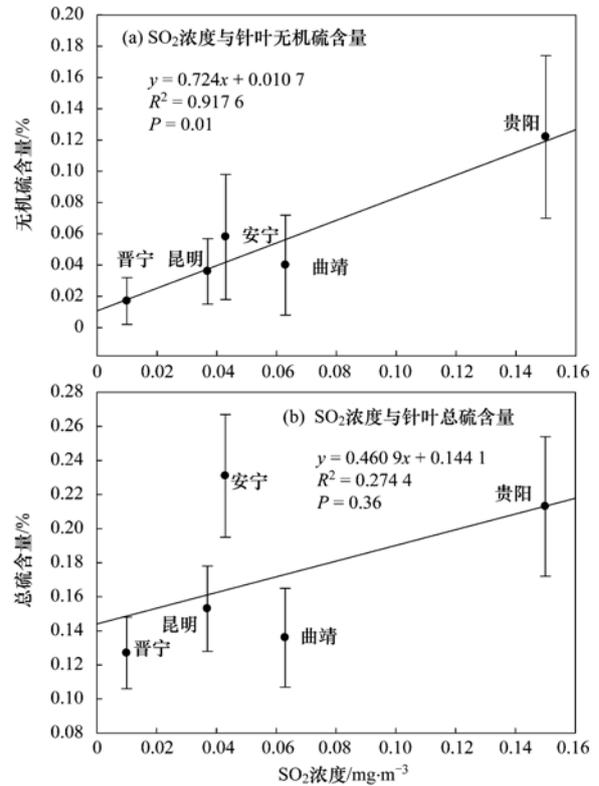


图2 大气 SO_2 浓度与针叶无机硫和总硫含量的关系

Fig. 2 Relationship between SO_2 concentration and inorganic sulfur and total sulfur concentrations in leaves

2.3 针叶中无机硫和总硫的硫同位素组成的变化特征

各地区针叶中无机硫硫同位素组成的变化范围为 $-14.53\text{‰} \sim 7.28\text{‰}$,总硫硫同位素组成的变化范围为 $-10.55\text{‰} \sim 10.81\text{‰}$ 。贵阳地区(贵阳市区、黔灵山、森林公园)的针叶组织中无机硫和总硫硫同位素组成明显偏负,平均值分别为 -7.22‰ 和 -5.12‰ 。云南地区除曲靖外(昆明、安宁、晋宁)的针叶组织中无机硫和总硫硫同位素组成明显偏正,平均值分别为 3.85‰ 和 5.73‰ (表1)。总体来看,针叶中总硫硫同位素组成和无机硫硫同位素组成变化趋势是一致的,总硫硫同位素组成比无机硫硫同位素组成平均高 $1\text{‰} \sim 2\text{‰}$ 。

针叶中无机硫和总硫硫同位素组成表现为随着离钢铁厂的距离变大而降低,距离昆明钢铁厂10 m处针叶中无机硫和总硫硫同位素组成分别 4.95‰

和 8.12‰, 8 km 处硫同位素组成分别为 3.84‰和 4.60‰. 曲靖火电厂附近针叶中无机硫和总硫同位素组成较昆明钢铁厂整体偏负, 而且表现为随距离变大而升高(图 3). 昆明钢铁厂和曲靖火电厂附近针叶中总硫同位素组成和无机硫同位素组成变化趋势是一致的, 总硫同位素组成比无机硫同位素组成高 1‰~3‰.

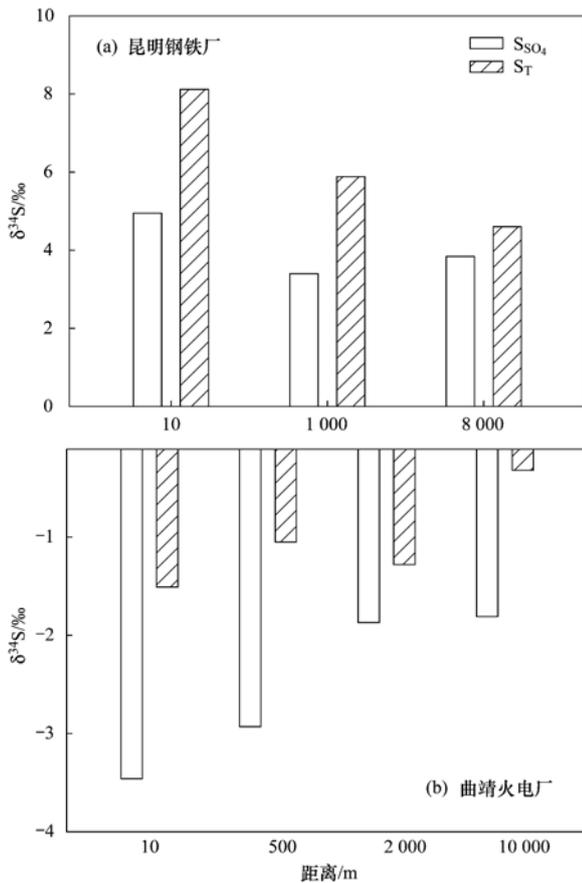


图 3 点源附近针叶中无机硫和总硫同位素组成变化
Fig. 3 Variation of $\delta^{34}S_{SO_4}$ and $\delta^{34}S_T$
in leaves near Kunming steel and Qujing power plant

2.4 硫来源示踪及硫同位素分馏

植物组织在吸收气态和可溶性硫化物一般不会伴随同位素的选择吸收, 基本不发生同位素分馏^[24]. 对实验室培养的绿藻和实地种植的芥蓝的初步研究表明, 植物中 SO_4^{2-} 的同化和还原过程发生很小的同位素的分馏^[25]. 因此植物组织硫同位素组成可以用于指示主要点源或区域硫源的影响.

来自不同地区的燃煤其形成的地质背景不同, 它们的硫同位素组成有很大的差异, 从而造成其燃烧产物中硫同位素组成不同^[26]. 贵阳市燃煤的 $\delta^{34}S$ 为 $-7.5‰$ ^[27], 云南燃煤的 $\delta^{34}S$ 为 $13.8‰ \pm 0.6‰$ ^[28], 明显比贵阳市偏正. 本研究中, 云南地区

针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ (平均值为 $3.85‰$) 也比贵阳地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ (平均值为 $-7.22‰$) 明显偏正, 表明这些地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 主要受到燃煤来源的大气硫沉降的影响. 但是云南地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ ($3.85‰$) 低于燃煤的 $\delta^{34}S$ ($13.8‰ \pm 0.6‰$), 这是由于同时受到了土壤硫来源的影响. Winner 等^[29] 发现在天然气冶炼厂附近针叶 (*Picea glauca* 和 *Abies balsamea*) 的 $\delta^{34}S$ (平均值为 $18‰$) 要低于苔藓 (平均值为 $24‰$), 其原因在于受到土壤来源的硫 ($\delta^{34}S$ $7‰ \sim 12‰$) 的干扰.

昆明钢铁厂附近针叶中无机硫同位素组成表现为随着离钢铁厂的距离变大而降低. 昆明钢铁厂燃煤的 $\delta^{34}S$ 为 $13.8‰$. 越靠近钢铁厂, 大气中 SO_2 浓度越高, 针叶中无机硫含量越高, 针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 受到燃煤来源的大气硫沉降的控制就越大, 因而越高. 而曲靖火电厂位于云南白水, 燃煤来源于富源县 (云贵交界), 燃煤类型与贵州燃煤接近, 燃煤的 $\delta^{34}S$ 偏负, 所以针叶中无机硫同位素组成表现为随着离钢铁厂的距离变大而升高. 这进一步表明了针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 受到燃煤来源的大气硫沉降的控制. 在同一点源, 土壤中 $\delta^{34}S$ 是相近的, 因而不是引起针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 变化的主要原因.

3 结论

(1) 大气 SO_2 浓度和针叶无机硫含量存在较好的正相关关系, 且从土壤中吸收的硫在不同采样点之间没有明显的不同, 因此叶片无机硫含量的变化可以归因于大气 SO_2 浓度的变化. 大气 SO_2 浓度和针叶总硫含量不存在显著相关关系, 说明针叶组织无机硫含量的变化相对于总硫更能可靠地反映大气硫输入.

(2) 贵阳地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ ($-7.22‰$) 与贵阳市燃煤的 $\delta^{34}S$ ($-7.5‰$) 非常接近, 表明针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 受到燃煤来源的大气硫沉降的影响较大. 云南地区针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ ($3.85‰$) 受到云南燃煤来源的大气硫沉降和土壤来源硫的共同影响. 昆明钢铁厂和曲靖火电厂附近针叶中无机硫 $\delta^{34}S$ 主要是由工厂燃煤来源的大气硫沉降所决定的.

参考文献:

- [1] 杨新兴, 高庆先, 曲金枝, 等. 我国 SO_2 排放总量控制方法探索与初步评估[J]. 环境科学研究, 1999, 12(6): 17-20.
- [2] 刘炳江, 郝吉明, 贺克斌, 等. 中国酸雨和二氧化硫污染控制区划及实施政策研究[J]. 中国环境科学, 1998, 18(1): 1-7.
- [3] 潘如圭, 汪嘉熙, 柳福妹, 等. 城市大气二氧化硫与植物含

- 硫量之间关系的研究[J]. 中国环境科学, 1987, **7**(1): 31-34.
- [4] Hüve K, Dittrich A, Kindermann G, *et al.* Detoxification of SO₂ in conifers differing in SO₂ tolerance; A comparison of *Picea abies*, *Picea pungens* and *Pinus sylvestris* [J]. *Planta*, 1995, **195**(4): 578-585.
- [5] Lau O W, Luk S F. Leaves of *Bauhinia blakeana* as indicators of atmospheric pollution in Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(18): 3113-3120.
- [6] Xiao H Y, Tang C G, Xiao H W, *et al.* Stable sulphur and nitrogen isotopes of the moss *Haplocladium microphyllum* at urban, rural and forested sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(34): 4312-4317.
- [7] Vingiani S, Adamo P, Giordano S. Sulphur, nitrogen and carbon content of *Sphagnum capillifolium* and *Pseudevernia furfuracea* exposed in bags in the Naples urban area [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **129**(1): 145-158.
- [8] Nrlagu J O, Glooschenko W A. Isotopic composition of sulfur in mosses across Canada [J]. *Environmental Science and Technology*, 1992, **26**(1): 85-89.
- [9] 刘学炎, 肖化云, 刘丛强, 等. 生长条件对苔藓硫含量和硫同位素组成指示大气硫沉降的影响[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(5): 145-149.
- [10] 朱仁果, 肖化云, 王燕丽, 等. 用苔藓组织硫含量、S/N 比值探讨江西省大气硫沉降[J]. *地球与环境*, 2012, **40**(4): 479-484.
- [11] Dmuchowski W, Bytnerowicz A. Monitoring environmental pollution in Poland by chemical analysis of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needles [J]. *Environmental Pollution*, 1995, **87**(1): 87-104.
- [12] Cicek A, Koparal A S. Accumulation of sulfur and heavy metals in soil and tree leaves sampled from the surroundings of Tuncbilek Thermal Power Plant [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 1031-1036.
- [13] 张苗云, 王世杰, 马国强. 植物硫同位素与大气环境变化[J]. *同位素*, 2010, **23**(1): 59-63.
- [14] 黎建力, 侯恩庆, 左伟东. 陶瓷工业污染区41种植物的硫含量特征[J]. *生态科学*, 2011, **30**(5): 512-517.
- [15] Kaiser W, Dittrich A, Heber U. Sulfate concentrations in Norway spruce needles in relation to atmospheric SO₂: a comparison of trees from various forests in Germany with trees fumigated with SO₂ in growth chambers [J]. *Tree Physiology*, 1993, **12**(1): 1-13.
- [16] 蒋高明, 耿龙年, 陈业材. 植物样品中碳、硫稳定同位素的测试[J]. *植物学通报*, 1995, **12**(S2): 230-237.
- [17] Agrawal M, Singh J. Impact of coal power plant emission on the foliar elemental concentrations in plants in a low rainfall tropical region [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2000, **60**(3): 261-282.
- [18] Sharma A P, Tripathi B D. Biochemical responses in tree foliage exposed to coal-fired power plant emission in seasonally dry tropical environment [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **158**(1-4): 197-212.
- [19] 云南省统计局, 国家统计局云南调查总队. 云南统计年鉴2011[M]. 北京: 中国统计出版社, 2011. 257.
- [20] 王红梅, 黄晓. 20年来昆明市环境空气质量变化趋势及影响因素分析[J]. *环境科学导刊*, 2010, **29**(2): 71-74.
- [21] 叶辉, 李存雄, 张勇, 等. 贵阳市白云区与金阳新区春季主要大气污染物分析[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2012, **30**(6): 20-23.
- [22] Bao L M, Zhang G L, Zhang Y X, *et al.* Transfer characterization of sulfur from coal-burning emission to plant leaves by PIXE and XANES [J]. *Chinese Physics C*, 2009, **33**(11): 1010-1015.
- [23] Kaplan L R, Rittenberg S C. Microbiological fractionation of sulphur isotopes [J]. *Journal of General Virology*, 1964, **34**(2): 195-212.
- [24] Ishii M M. A study of the fractionation of sulphur isotopes in the plant metabolism of sulphates [D]. Canada: McMaster University, 1953.
- [25] Trust B A, Fry B. Stable sulphur isotopes in plants: a review [J]. *Plant, Cell and Environment*, 1992, **15**(9): 1105-1110.
- [26] 郭波莉, 魏益民, 潘家荣. 同位素指纹分析技术在食品产地溯源中的应用进展[J]. *农业工程学报*, 2007, **23**(3): 284-289.
- [27] 洪业汤, 张鸿斌, 朱詠焯, 等. 中国煤的硫同位素组成特征及燃煤过程硫同位素分馏[J]. *中国科学 B 辑*, 1992, **22**(8): 868-873.
- [28] Xiao H Y, Liu C Q. The elemental and isotopic composition of sulfur and nitrogen in Chinese coals [J]. *Organic Geochemistry*, 2011, **42**(1): 84-93.
- [29] Winner W E, Bewley J D, Krouse H R, *et al.* Stable sulfur isotope analysis of SO₂ pollution impact on vegetation [J]. *Oecologia*, 1978, **36**(3): 351-361.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	Ji Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jun-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行