

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

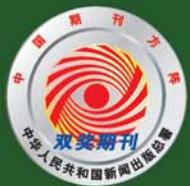
第34卷 第10期

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 纪莹雪,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)

生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究 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)

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^{1,2}, 肖化云^{1,2,3*}, 陈永忠⁴, 周丹^{1,2}, 罗笠^{1,2}, 吴代赦¹

(1. 南昌大学环境与化学工程学院, 南昌 330031; 2. 南昌大学鄱阳湖环境与资源利用教育部重点实验室, 南昌 330031; 3. 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; 4. 南昌师范高等专科学校, 南昌 330103)

摘要: 为探讨土壤受大气硫源的影响, 采集了江西省北部地区的表层森林土壤样品, 分别测定了土壤不同形态硫(总硫、水溶态硫、吸附态硫和有机硫)的含量以及同位素组成. 并随机采集土壤样品附近的石生苔藓样品, 测定其硫含量和同位素组成, 再与土壤样品进行比较. 江西省苔藓组织硫含量平均为 $0.34\% \pm 0.20\%$, 同位素组成除丰城外 (-3.31%), 均偏正, 平均为 $5.64\% \pm 2.23\%$. 土壤总硫平均含量在 $189.0 \sim 793.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 有机硫是土壤硫的主要形态, 水溶态硫含量最少. 土壤总硫同位素值在 $4.45\% \sim 10.28\%$ 之间变化. 各形态硫同位素值均偏正, 有机硫同位素值最大, 水溶态硫与吸附态硫的同位素值接近. 土壤总硫含量明显低于苔藓硫含量, 且与苔藓硫含量无明显相关. 除有机硫外 ($R=0.50, P>0.05$), 土壤总硫、水溶态硫、吸附态硫均与苔藓硫同位素值有着较为显著的线性关系 (R 均在 0.7 以上, $P<0.01$), 即随着苔藓硫同位素值的增大而增大, 说明土壤总硫、 SO_4^{2-} 受大气硫源的影响较大, 而有机硫受大气硫的影响较小.

关键词: 表层土壤; 苔藓; 硫含量; 硫同位素; 大气硫

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-3782-06

Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province

LI Nan^{1,2}, XIAO Hua-yun^{1,2,3*}, CHEN Yong-zhong⁴, ZHOU Dan^{1,2}, LUO Li^{1,2}, WU Dai-she¹

(1. Environmental and Chemical Engineering College, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Poyang Lake Environment and Resource Utilization of Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. Nanchang Teachers College, Nanchang 330103, China)

Abstract: In order to study the influence of atmospheric sulfur on soil sulfur, the forest surface soil samples and moss samples were collected in north areas of Jiangxi province. Contents and isotopes of sulfur in different forms (total sulfur, water-soluble sulfur, absorbed sulfur and organic sulfur) were determined. The average sulfur content of mosses was $0.34\% \pm 0.20\%$. All of the $\delta^{34}\text{S}$ values except at Fengcheng (-3.31%) were positive, the average was $5.64\% \pm 2.23\%$. The average contents of soil total sulfur were between $189.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and $793.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The organic sulfur was the main sulfur form in surface soils and the contents of water-soluble sulfur were the lowest. The $\delta^{34}\text{S}$ values of total sulfur were in the range of $4.45\% \sim 10.28\%$. The highest soil $\delta^{34}\text{S}$ values were determined for organic sulfur and the $\delta^{34}\text{S}$ values of water-soluble and absorbed sulfur were similar. The contents of soil total sulfur were much lower than those of the mosses. Except for organic sulfur ($R=0.50, P>0.05$), the $\delta^{34}\text{S}$ values of total sulfur, water-soluble sulfur and absorbed sulfur were all significantly correlated with those of moss sulfur ($R>0.7, P<0.01$). These results indicated that atmospheric sulfur directly affected the total sulfur, water-soluble sulfur and absorbed sulfur, but not the organic sulfur.

Key words: surface soil; moss; sulfur content; sulfur isotope; atmospheric sulfur

硫是自然界重要的生命元素之一, 土壤是为植物提供硫的重要媒介^[1,2]. 土壤中的硫受多种因素影响^[3]. 苔藓由于其特殊的形态结构, 对于环境中的 SO_2 、重金属和多环芳烃等都有很好的指示监测作用^[4-6]. 硫稳定同位素值具有“指纹”效应, 可以根据硫同位素组成的不同, 辨识大气、土壤、河流沉积物等硫的不同来源. 硫同位素技术的地球化学研究开始于 20 世纪 40 年代末^[7,8], 如今已被广泛地应用于各种领域.

苔藓植物在吸收同化硫的过程中没有明显的同位素分馏现象^[9], 因此, 苔藓硫同位素技术可以很

好地指示其生长环境的大气硫来源^[10,11]. 而硫同位素技术在土壤研究中的应用, 弥补了过去传统的化学手段不能很好地阐明硫在土壤中的迁移转化的不足, 硫同位素组成中蕴含的丰富信息, 如今已被广泛地应用于土壤硫来源和硫循环的研究^[12-14].

本研究对江西北部部分地区表层森林土壤不同形态硫以及苔藓硫含量和硫同位素组成进行测定,

收稿日期: 2013-01-27; 修订日期: 2013-04-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41273027, 41173027)

作者简介: 李男(1986~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为硫同位素地球化学, E-mail: goodlinan@163.com

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

并将两者进行比较,探讨土壤受大气硫源的影响,以期为硫稳定同位素技术的地球化学研究提供信息和依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

本研究选取江西北部一些森林地区的苔藓和表层土壤样品进行了采集(图1),采集的时间为2010年5月。土壤样品采集时要避免树木遮盖,并除去表面覆盖的落叶或动物粪便等,采集深度为土壤表层以下5 cm。并随机在所采土壤样品附近采集石生苔藓样品,同样要避免遮盖物,避免地表水的冲击。

采集的土壤和苔藓样品装入干净的自封袋中带回实验室。将苔藓样品自然风干,后用镊子挑除枯枝,落叶,小石块等杂物,Million-Q水反复冲洗以彻底去除表面吸附的尘土和颗粒物,70℃下烘干,粉碎机粉碎后过100目筛。土壤样品同样风干除杂后,取20 g过100目筛,过筛后的土壤和苔藓样品用于硫含量和同位素值的测定。

另取100 g土壤过约1 mm筛,以水土比5:1混合,振荡1~2 h,离心,经0.45 μm滤膜抽滤,保留上清液。抽滤后的土壤再以水土比5:1与0.016 mol·L⁻¹ Ca(H₂PO₄)₂溶液混合^[15],同样振荡、离心、过滤,取上清液。上清液用于水溶态、吸附态硫酸根含量与同位素值的测定(在贵溪和横峰采集的土壤量少,未进行硫形态分析)。

1.2 元素含量分析及同位素测定

土壤和苔藓的总硫含量ω(S)(以干质量计,%)均采用元素分析仪(Elementar Vario macro, German)进行测定,其精度高于0.1%。

土壤硫酸根浓度测定采用离子色谱法。

土壤有机硫含量这里采用估算:

$$\text{含量} = \text{总硫} - \text{水溶态硫} - \text{吸附态硫}$$

土壤总硫和SO₄²⁻同位素以及苔藓组织硫同位素测定采用艾氏卡分离并转化为硫酸钡的方法^[16]制备样品,然后用连续流同位素质谱仪(CF-IRMS, Euro 3000, GV instruments)测定硫同位素值。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,编号分别为GBW-4414 [δ³⁴S = -0.07‰]和GBW-4415 [δ³⁴S = 22.15‰],测量误差小于±0.2‰(n=5)。

δ³⁴S定义:

$$\delta^{34}\text{S} = [(R_{\text{样品}}/R_{\text{标准}}) - 1] \times 1000\text{‰}$$

式中,R为³⁴S与³²S的自然丰度比。

有机硫同位素值采用同位素质量平衡法估计:

$$\delta^{34}\text{S}_{\text{有机}} = (\delta^{34}\text{S}_{\text{总硫}} \times W_{\text{总硫}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{水溶态硫}} \times W_{\text{水溶态硫}} - \delta^{34}\text{S}_{\text{吸附态硫}} \times W_{\text{吸附态硫}}) / W_{\text{有机硫}}$$

式中,W代表不同形态硫的含量,mg·kg⁻¹。

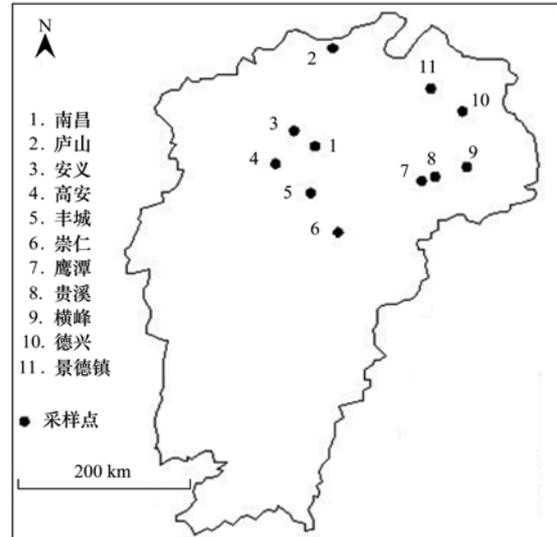


图1 采样点分布示意

Fig. 1 Map showing sampling locations in Jiangxi Province

2 结果与讨论

2.1 苔藓组织硫含量及硫同位素值特征

本研究中测得的苔藓组织硫含量以及硫同位素值见表1。江西省苔藓的平均硫含量为0.34% ± 0.20%,取值范围在0.20%~0.89%之间。高于在浙江温岭市、路桥区农村和云南曲靖市农村以及贵阳市磊庄采集苔藓样品的平均硫含量(本人未发表数据),也明显高于加拿大纽芬兰Alectoria sarmentosa地区苔藓硫含量(0.005%~0.015%)^[17]。由苔藓硫含量与大气硫沉降量的正相关关系可知,江西省的大气硫沉降要高于浙江、云南曲靖、贵阳磊庄以及加拿大纽芬兰Alectoria sarmentosa地区。

从表1也可看出,江西省苔藓硫含量最高出现在贵溪,为0.89% ± 0.18%,除丰城、德兴也较大之外,其余地区相差不大。根据Xiao等^[18]测得的位于中国四川海拔3276 m的贡嘎山苔藓硫含量0.20% ± 0.04%作为不受人为硫影响的硫含量背景值,可见江西省几乎全部地区均受到不同程度的人为因素的影响。贵溪苔藓高的沉降量可能是由于贵溪作为江西省重要的工业园区,以加工铜而著名,其所属的贵溪冶炼厂是亚洲最大的铜冶炼企业,每年排放大量的硫氧化物。

表 1 苔藓组织硫含量和同位素值
Table 1 Sulfur contents and $\delta^{34}\text{S}$ of mosses

地区	硫含量/%	$\delta^{34}\text{S}/\text{‰}$
高安	0.20	5.65
前湖	0.26	0.55
庐山	0.31	7.38
丰城	0.43 ± 0.02	-3.31 ± 0.43
崇仁	0.23 ± 0.03	6.56 ± 0.72
鹰潭	0.23	6.55
贵溪	0.89 ± 0.18	5.83 ± 0.46
横峰	0.22	9.17
德兴	0.36 ± 0.04	4.10 ± 1.78
景德镇	0.27	7.14
安义	0.21	5.96
台州温岭 ^[19]	0.22 ± 0.04	10.53 ± 1.17
台州路桥区 ^[19]	0.21 ± 0.03	9.87 ± 1.21
云南曲靖 ^[19]	0.27 ± 0.04	2.27 ± 1.06

江西省苔藓硫同位素值平均为 $5.64\text{‰} \pm 2.23\text{‰}$, 除丰城外 ($-3.31\text{‰} \pm 0.43\text{‰}$), 其余均偏正. 较小正值出现在南昌大学前湖校区和德兴 (0.55‰ 和 4.1‰), 较大正值出现在庐山和景德镇 (7.38‰ 和 7.14‰), 其他地区 (高安、崇仁、鹰潭和安义) 相差不大, 范围在 $5.64\text{‰} \sim 6.56\text{‰}$ 之间. 江西省苔藓硫同位素值低于同时期采集的浙江台州温岭 ($10.53\text{‰} \pm 1.17\text{‰}$) 和路桥区 ($9.87\text{‰} \pm 1.21\text{‰}$) 苔藓硫同位素值, 但却高于云南曲靖苔藓的硫同位素值. 本研究结果与贵阳郊区苔藓的硫同位素值 ($-5.3\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$)^[20] 差别较大, 但却略小于武汉 ($7.5\text{‰} \pm 2.8\text{‰}$)、合肥 ($7.9\text{‰} \pm 4.0\text{‰}$) 城郊的苔藓硫同位素值^[21], 其平均值也处于 Nriagu 等^[11] 对加拿大境内大量苔藓同位素值的测定范围 ($1.1\text{‰} \sim 16\text{‰}$) 之内.

2.2 土壤硫形态含量与硫同位素值特征

一般认为, 在南方气候和土壤环境条件下, 除去有效硫之外, 土壤中的硫主要是有机硫^[22], 因此本研究有机硫含量采用总硫除去有效硫后的估算值. 由图 2 可以看出, 土壤总硫含量最高为鹰潭, $793.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其次为庐山 $591.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 含量最低的为安义, 只有 $189.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他地区相差不大, 基本处于 $300 \sim 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间. 由图 2 也可看出, 对于大部分土壤来说, 有机硫是土壤硫的主要形态, 在 $54.1\% \sim 91.2\%$ 之间, 低于我国湿润地区表层土壤的 $85\% \sim 94\%$ ^[23]. 只有安义地区, 吸附态硫占土壤硫的质量分数最高 (47.7%), 有机硫略低 (45.0%). 土壤中含量最少的是水溶态硫, 质量分数在 $0.9\% \sim 7.3\%$ 之间, 其中安义地区比例最高, 鹰潭地区则含量最少, 均低于俄罗斯北部科拉半岛

表层森林土壤水溶态硫占总硫的质量分数 8% ^[24]. 吸附态硫含量则居中, 除安义外, 在 $7.9\% \sim 40.5\%$ 之间, 平均含量最少的也是鹰潭. 本研究结果远远高于陕西黄绵土 (0.66%)、黑垆土 (0.66%) 和黄泥巴 (2.22%) 中吸附态硫占总硫的质量分数^[25].

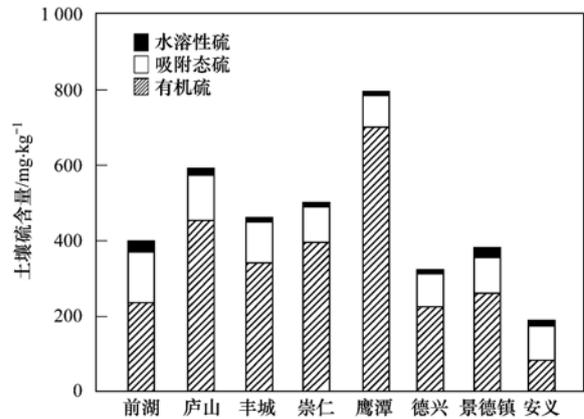


图 2 江西省不同地区不同形态硫含量组成比较

Fig. 2 Content comparisons of sulfur forms in Jiangxi Province

江西省土壤不同形态硫的同位素值均为正值 (表 2), 其中总硫同位素值在 $4.45\text{‰} \sim 10.28\text{‰}$ 之间, 明显高于张伟等^[13] 对贵州喀斯特坡地石灰土表层土壤总硫同位素值 ($0.68\text{‰} \sim 4.48\text{‰}$). 平均值最大为安义 (9.88‰) 和崇仁 (9.80‰), 最小为南昌前湖 (6.02‰) 和丰城 (6.67‰). 江西省土壤总硫同位素值具有连续性, 趋向正态分布, 主要分布在 $6.5\text{‰} \sim 9.5\text{‰}$ 之间 (图 3).

水溶态硫和吸附态硫的同位素值分别在 $1.34\text{‰} \sim 5.61\text{‰}$ 和 $1.10\text{‰} \sim 5.61\text{‰}$ 之间, 二者相近. 这与 Fuller 等^[26] 研究 HBEF 地区土壤水溶态硫的同位素值 ($5.8\text{‰} \pm 1.5\text{‰}$) 与吸附态硫的同位素值 ($4.3\text{‰} \pm 3.4\text{‰}$) 十分接近相一致. 此类研究再次证明土壤中 SO_4^{2-} 的吸附与解吸并不会发生同位素的分馏现象^[27,28]. 经比较可知, 水溶态与吸附态硫的同位素值明显小于土壤总硫同位素值, 几乎只有总硫同位素值的一半.

土壤有机硫同位素值 (除鹰潭外) 是土壤各种形态硫同位素值中最大的, 在 $6.60\text{‰} \sim 12.65\text{‰}$ 之间, 与英国设得兰群岛 (Shetland Isles) 泥炭沼泽地土壤有机硫同位素值接近 ($3.3\text{‰} \sim 15.4\text{‰}$)^[29], 但是高于石灰土表层土壤有机硫的同位素值 ($2.76\text{‰} \sim 6.12\text{‰}$)^[13] 和北京永乐店土壤有机硫的同位素值 ($4.3\text{‰} \sim 5.6\text{‰}$)^[14]. 由于有机硫是土壤中硫的主要存在形态, 因此, 有机硫同位素组成对总硫同位素组成有相当重要的影响^[30].

表 2 江西省表层土壤硫同位素值

Table 2 Value of sulfur isotopes in surface soil in Jiangxi Province

地区	硫同位素取值范围/‰			
	总硫	水溶态硫	吸附态硫	有机硫
高安	6.66~7.71	2.20~2.58	—	—
前湖	4.45~7.18	0.76~2.00	0.36~1.78	6.60~12.49
庐山	6.46~10.28	3.00~4.88	2.97~4.81	7.73~14.92
丰城	6.41~6.93	1.69~3.73	1.66~3.50	7.30~9.09
崇仁	9.43~10.16	4.94~6.27	4.69~6.53	10.26~11.51
鹰潭	8.47	3.85	4.94	8.95
德兴	8.50	4.32	4.13	10.36
景德镇	7.48	3.86	3.52	9.25
安义	9.88	3.84	3.54	17.59

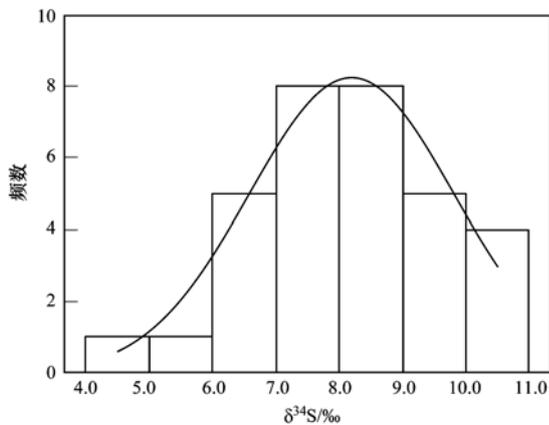
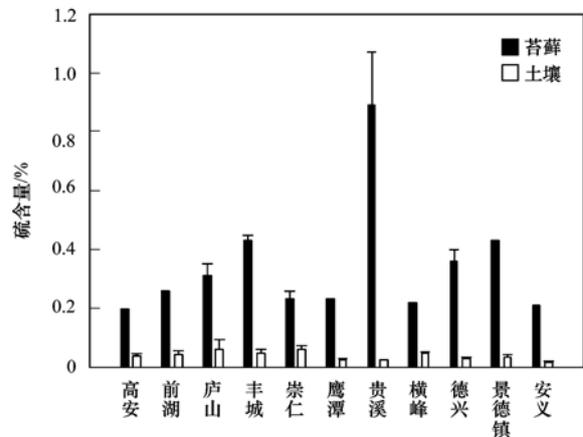
图 3 江西省土壤总硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值的直方分布示意Fig. 3 Histogram distribution of soil total sulfur $\delta^{34}\text{S}$ in Jiangxi Province

图 4 江西省苔藓与土壤总硫含量比较

Fig. 4 Comparison of the sulfur contents between mosses and soils in Jiangxi Province

2.3 江西省土壤与苔藓硫含量及 $\delta^{34}\text{S}$ 值的比较

2.3.1 硫含量比较

比较江西省土壤总硫与苔藓组织中硫含量(图4),可知,土壤中硫的含量远远小于苔藓组织中的硫含量,但苔藓硫含量高的地区,土壤总硫含量并不一定较高.由于苔藓硫含量可以指示其生长环境大气硫沉降量,且在一定范围内,苔藓硫含量随着大气硫沉降的增加而增加.江西省城市苔藓硫含量和大气 SO_2 大气浓度呈显著线性正相关($R^2 = 0.95$, $P = 0.003$)^[19].因此,土壤硫含量与大气沉降间并不存在明显关系.

Novák 等^[31]对欧洲中部表层土壤硫含量与大气硫沉降量关系的研究表明,表层土壤总硫含量与大气硫沉降正相关. Koptsik 等^[24]对欧洲科拉半岛土壤硫含量与大气硫沉降关系研究表明,该地区土壤硫含量与大气硫沉降量之间线性关系并不显著.这与本研究结果一致,可能由于地球成因学,与土壤母质、类型有关.

2.3.2 硫同位素值比较

苔藓硫同位素值则可以指示其大气硫的不同来源. Bottrell 等^[32]研究苔藓(*Sphagnum*)的硫同位素值(4.2‰)与当地大气输入中硫酸盐的同位素值(4.8‰)接近. 贵阳城市苔藓硫同位素值($-4.9\text{‰} \pm 1.0\text{‰}$)也与当地大气中 SO_2 同位素值(平均 -4.3‰ ,取值范围 $-7.8\text{‰} \sim 2.7\text{‰}$)十分接近^[20]. Case 等^[10]测得 Teepee Creek 工厂附近苔藓硫同位素值为23.5‰,与该工厂排放出的 SO_2 气体同位素值(23‰~24‰)几乎相同.可见,可以苔藓硫同位素值反映大气硫的不同来源.

从图5可见,苔藓硫同位素值均低于土壤总硫的同位素值,更低于土壤有机硫同位素值,但与土壤 SO_4^{2-} 同位素值较为接近.对苔藓与土壤不同形态硫同位素值进行相关性显著性分析,结果表明,除有机硫外($P > 0.05$),土壤总硫、水溶态硫、吸附态硫均与苔藓硫同位素值有着较为显著的线性关系($P < 0.01$),即随着苔藓硫同位素值的增大而增大,且与总硫相比,土壤 SO_4^{2-} 与苔藓硫同位素值线性关系更为显著,说明土壤总硫、 SO_4^{2-} 受大气硫源的直

接影响较大,而有机硫受大气硫的直接影响较小。

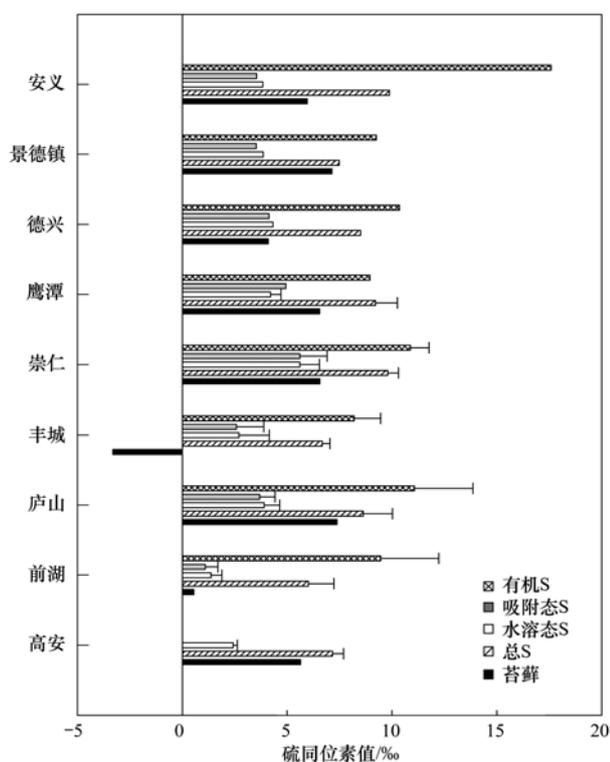


图5 江西省苔藓与土壤不同形态硫 $\delta^{34}\text{S}$ 值比较

Fig. 5 Comparison of $\delta^{34}\text{S}$ between mosses and soil sulfur in different forms in Jiangxi Province

3 结论

(1) 江西省苔藓平均硫含量为 $0.34\% \pm 0.20\%$, 取值范围在 $0.20\% \sim 0.89\%$ 之间。而硫同位素值除丰城外 (-3.31‰) 普遍偏正, 平均为 $5.64\text{‰} \pm 2.23\text{‰}$ 。

(2) 江西省土壤总硫含量在 $189.0 \sim 793.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间, 且大部分以有机硫形态存在; 水溶态硫含量最少, 吸附态硫含量居中。总硫同位素值在 $4.45\text{‰} \sim 10.28\text{‰}$ 之间, 具有连续性, 有机硫同位素值最高, 水溶态硫与吸附态硫同位素值接近, 证明硫酸根的吸附与解析几乎不发生同位素的分馏。

(3) 土壤总硫含量明显低于苔藓组织硫的含量, 且与苔藓硫含量间无明显相关。除有机硫外, 土壤总硫、水溶态硫以及吸附态硫与苔藓硫同位素值之间不同程度的相关关系说明三者均受到大气硫同位素组成的直接影响, 其中 SO_4^{2-} 所受影响较大。

参考文献:

[1] 王庆仁, 崔岩山. 不同轮作制对农田生态系统中土壤硫攫取与归还途径的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(6): 935-940.
[2] 王凡, 朱云集, 路玲. 土壤中的硫素及其转化研究综述[J].

中国农学通报, 2007, 23(5): 249-253.

- [3] 马强. 土壤与植物中的硫素营养研究进展[J]. 农技服务, 2011, 28(2): 165-167.
[4] 孙秋雨. 利用苔藓(紫花苜蓿)对大气污染(SO_2)指示作用研究——对包头市重工业环境进行监测[J]. 科技信息, 2010, (1): 7-8.
[5] 曹同, 路勇, 吴玉环, 等. 苔藓植物对鞍山市环境污染生物指示的研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(6): 635-639.
[6] 许春晖, 卢龙. 苔藓植物监测大气多环芳烃研究进展[J]. 广东化工, 2010, 37(3): 181-183.
[7] Thode H G, Macnamara J, Collins C B. Natural variations in the isotopic content of sulphur and their significance[J]. Canadian Journal of Research, 1949, B27(4): 361-373.
[8] Trofim A. Isotopic composition of sulfur in meteorites and terrestrial objects[J]. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1949, 66: 181-184.
[9] Mektiyeva V L, Gavrilo E Y, Pankina R G. Sulfur isotopic composition in land plants [J]. Geochemistry International, 1976, 13: 85-88.
[10] Case J W, Krouse H R. Variations in sulphur content and stable sulphur isotope composition of vegetation near a SO_2 source at Fox Creek, Alberta, Canada [J]. Oecologia, 1980, 44(2): 248-257.
[11] Nriagu J O, Glooschenko W A. Isotopic composition of sulfur in mosses across Canada [J]. Environmental Science and Technology, 1992, 26(1): 85-89.
[12] Novák M, Buzek F, Harryson A F, et al. Similarity between C, N and S stable isotope profiles in European spruce forest soils: implications for the use of $\delta^{34}\text{S}$ as a tracer [J]. Applied Geochemistry, 2003, 18(5): 765-779.
[13] 张伟, 刘从强, 刘涛泽, 等. 喀斯特坡地石灰土硫形态分布及其同位素组成特征[J]. 地球化学, 2010, 39(3): 251-257.
[14] 郭庆军, 陈同斌, 杨军, 等. 利用不同形态硫同位素组成辨识土壤污染过程的方法初探[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1730-1735.
[15] 于泽民, 付国臣. 土壤中硫的形态分析及其测定方法研究进展[J]. 内蒙古环境科学, 2009, 21(4): 94-96.
[16] Xiao H Y, Tang C G, Zhu R G, et al. Tracing sources of coal combustion using stable sulfur isotope ratios in epilithic mosses and coals from China [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(8): 2243-2249.
[17] Wadleigh M A, Blake D M. Tracing sources of atmospheric sulphur using epiphytic lichens [J]. Environmental Pollution, 1999, 106(3): 265-271.
[18] Xiao H Y, Tang C G, Liu X Y, et al. Sulphur isotopic ratios in mosses indicating atmospheric sulphur sources in southern Chinese mountainous areas [J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(19), L19807, doi: 10.1029/2008GL034255.
[19] 李男. 表层土壤硫含量和硫同位素组成以及与苔藓植物的对比研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
[20] Liu X Y, Xiao H Y, Liu C Q. Physiological and isotopic signals

- in epilithic mosses for indicating anthropogenic sulfur on the urban-rural scale [J]. *Ecological Indicators*, 2011, **11** (5): 1245-1250.
- [21] Xiao H Y, Tang C G, Xiao H W, *et al.* Tissue S/N ratios and stable isotopes ($\delta^{34}\text{S}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of epilithic mosses (*Haplocladium microphyllum*) for showing air pollution in urban cities in Southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(5): 1726-1732.
- [22] 刘崇群, 陈国安, 曹淑卿, 等. 我国南方土壤硫素状况和硫酸肥施用[J]. *土壤学报*, 1981, **18**(2): 185-193.
- [23] 刘崇群, 曹淑卿, 陈国安, 等. 中国南方农业中的硫[J]. *土壤学报*, 1990, **27**(4): 398-404.
- [24] Koptsik G, Alewell C. Sulphur behaviour in forest soils near the largest SO_2 emitter in northern Europe [J]. *Applied Geochemistry*, 2007, **22**(6): 1095-1104.
- [25] 曲东, 尉庆丰. 陕西几种代表性土壤硫形态与土壤性质的关系[J]. *土壤通报*, 1996, **27**(1): 16-18.
- [26] Fuller R D, Mitchell M J, Krouse H R, *et al.* Stable sulfur isotope ratios as a tool for interpreting ecosystem sulfur dynamics [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, **28**(1-2): 163-171.
- [27] 张伟, 刘从强, 李晓东, 等. 喀斯特坡地土壤硫同位素变化指示的土壤硫循环[J]. *环境科学*, 2010, **31**(2): 415-422.
- [28] Van Stempvoort D R, Reardon E J, Fritz P. Fractionation of sulfur and oxygen isotopes in sulfate by soil sorption [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, **54** (10): 2817-2826.
- [29] Bottrell S H, Coulson J P. Preservation of environmental sulfur isotope records in maritime peats: a test of baseline pre-anthropogenic signal and diagenetic effects in a mid-Pleistocene peat[J]. *Chemical Geology*, 2003, **201**(3-4): 185-190.
- [30] Alewell C, Novak M. Spotting zones of dissimilatory sulfate reduction in a forested catchment: the ^{34}S - ^{35}S approach [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **112**(3): 369-377.
- [31] Novák M, Bottrell S H, Fottová D A, *et al.* Sulfur isotope signals in forest soils of central Europe along an air pollution gradient[J]. *Environmental Science and Technology*, 1996, **30** (12): 3473-3476.
- [32] Bottrell S H, Hatfield D, Bartlett R, *et al.* Concentrations, sulfur isotopic compositions and origin of organosulfur compounds in pore waters of a highly polluted raised peatland[J]. *Organic Geochemistry*, 2010, **41**(1): 55-62.

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