

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析 曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)

基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价 孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)

云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响 孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)

深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律 陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)

典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险 邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)

珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价 谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)

扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别 苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)

汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究 赵建刚,乔永民(1823)

氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验 黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)

春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布 王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)

滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析 陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)

四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究 杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)

五氯酚对稀有鮑肌卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应 熊力,马永鹏,张晓峥,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)

全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响 程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)

水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究 陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)

MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析 杨建,高金华,常江(1878)

XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制 姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)

栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性 马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)

氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究 王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)

合成氨废水短程反硝化特性研究 李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)

基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制 李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)

采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性 李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)

酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究 袁光环,周兴求,伍健东(1918)

小回流比条件下污泥浓度分区试验研究 史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)

非离子表面活性剂对污泥调理脱水效果的影响 侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)

中国空气污染指数变化特征及影响因素分析 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)

南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究 张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)

深圳市郊区大气中 PM_{2.5} 的特征分析 戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)

餐饮业油烟的颗粒物分析 谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)

Fe-MnO_x-CeO₂/ZrO₂ 低温催化还原 NO 性能研究 刘荣,杨志琴(1964)

自然型氨基酸及其钾盐的 CO₂ 吸收和再生特性 晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)

耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放的影响 张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)

垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素 上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)

添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N₂O 排放的影响 孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)

某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析 余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究 罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)

岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系 张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)

废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收 施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)

铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响 王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)

湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征 杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)

增施 CO₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响 慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)

生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析 乔琳,赵宏,王建龙(2052)

A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系 邝斌宇,史青, Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)

石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测 吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)

武汉市儿童多途径铅暴露风险评估 郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)

电子鼻预处理装置的开发及适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)

ToxTell 生物传感器在 Cu²⁺、Cd²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用 王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)

环境样品免疫检测基质效应分析与控制 盛建武,何苗,施汉昌(2095)

热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究 张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)

城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究 吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)

厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究 韩智勇,刘丹,李启彬(2118)

处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究 唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)

基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究 龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)

北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析 陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)

《环境科学》征稿简则(1877) 《环境科学》征订启事(1890) 信息(1822,1857,1896,2138)

脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究

罗遥¹, 康荣华¹, 余德祥², 谭炳全², 段雷^{1*}

(1. 清华大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100084; 2. 重庆市沙坪坝气象局, 重庆 400030)

摘要: 以电厂脱硫石膏为修复剂, 选取重庆铁山坪地区典型的酸化森林土壤为修复对象, 进行了为期 1 a 的修复效果研究. 对不同土层土壤溶液 pH 值、主要阴阳离子和重金属浓度的动态变化展开观测, 并对土壤和脱硫石膏的重金属含量进行分析, 以评价脱硫石膏的修复效果及存在的风险. 结果表明, 与对照样地相比, 修复样地各层土壤溶液 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 的浓度随时间依次升高, pH 值也略有上升, 且年均 $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ 摩尔比从 2.16、1.35 和 0.88 升高到 2.58、1.52 和 1.12. 土壤溶液中 As、Cu、Cr、Ni 和 Zn 的浓度并未检测到明显上升, 只是 Cr、Ni 和 Zn 在土壤上层出现了轻微富集. 脱硫石膏的处理对酸化土壤起到了改良作用, 且未造成土壤溶液重金属浓度明显的升高, 但重金属在土壤层的积累会造成潜在的风险, 需要进一步开展研究.

关键词: 酸化; 土壤修复; 脱硫石膏; $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ 摩尔比; 重金属

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-2006-07

Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil

LUO Yao¹, KANG Rong-hua¹, YU De-xiang², TAN Bing-quan², DUAN Lei¹

(1. State Joint Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Chongqing Shapingba Weather Bureau, Chongqing 400030, China)

Abstract: Effect of flue gas desulfurization gypsum (FGDG) application on remediation of a typical acidified forest soil was studied through field experiments at Tieshanping, Chongqing in southwest China for one year. To evaluate the effect and risk of FGDG application, pH value, major ions and heavy metal of soil water in different soil layers were observed dynamically, and heavy metal contained in soil and FGDG were measured. Results showed that Ca^{2+} and SO_4^{2-} concentration of soil water in FGDG plots increased with time, pH value was elevated slightly, and $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ value of annual average increased from 2.16, 1.35 and 0.88 to 2.58, 1.52 and 1.12 compared with control plots. The concentration of As, Cu, Cr, Ni and Zn in soil water was not elevated significantly. However, slight enrichment of Cr, Ni and Zn in some upper soil layers was observed. Consequently, FGDG application can improve acidified forest soil, without obviously heavy metal increasing in soil water. However, risk for heavy metal enrichment still exists, which is need for further study.

Key words: acidification; soil remediation; flue gas desulfurization gypsum; $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ molar ratio; heavy metal

酸沉降(俗称酸雨)是我国现阶段及今后较长时间内所面临的重大的区域环境问题,而土壤酸化是酸沉降可能产生的最严重危害^[1]. 为避免发生严重的生态破坏,对一些酸化土壤进行修复是必要的. 目前,国内外通常采用施加石灰石或白云石(主要成分为钙镁的碳酸盐)的方法^[2~5],而利用固体废弃物,如脱硫石膏,目前仅国外有少量研究^[6~8]. 研究结果表明适量施加脱硫石膏能改良酸化土壤并提高土壤生产力^[7~9],作用机制主要有以下 3 点:①脱硫石膏微溶于水,能在短时间内增加土壤的 Ca^{2+} 浓度,从而缓解 Al^{3+} 的毒害作用^[10]; ②脱硫石膏中含有一定量的未完全反应的 CaCO_3 ^[11],能中和降雨的 H^+ ,提高土壤 pH 值; ③脱硫石膏与少量飞灰混合后,会含有某些微量元素(如 B^[6]),对缺乏此类微量元素的土壤具有改良的作用. 但是,脱硫石膏可能产生一些副作用,如重金属的溶出^[6,12,13]和土壤溶

液电导率的升高^[14]等,特别是重金属的溶出是大部分研究所关心的问题,也是最有可能产生的风险. 除了用于酸性土壤的修复之外,脱硫石膏更多用于碱性土壤改良. 我国在一些盐碱地进行了较大规模的现场实验,效果良好^[11,15]. 改良的机制主要是用二价阳离子 Ca^{2+} 交换土壤中的大量 Na^+ ,从而改善土壤结构^[15]; 而且由于碱性土壤 pH 值较高,重金属的污染迁移问题并不严重^[11].

脱硫石膏主要来自于燃煤电厂的烟气脱硫过程. 随着我国对 SO_2 排放控制力度的不断加大,脱硫石膏的产量迅速增加,其已成为燃煤电厂继粉煤灰后的第二大固体废弃物^[16]. 若能利用脱硫石膏改良

收稿日期: 2011-08-22; 修订日期: 2011-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(20877047)

作者简介: 罗遥(1987~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染控制, E-mail: y-luo09@mails.tsinghua.edu.cn

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

酸化森林土壤,则能在某种程度上同时解决森林土壤酸化及脱硫石膏的处置问题,这对上述环境问题的解决具有重要意义.本研究选取我国典型的酸化森林土壤,对施加脱硫石膏后 1 a 内土壤溶液 pH 值及主要阴阳离子和重金属浓度的动态变化展开了观测,以评价脱硫石膏的修复效果及可能存在的重金属污染风险.

1 材料与方法

1.1 实验样地

在我国酸沉降污染较严重的重庆市开展野外控制实验,样地位于铁山坪林场内的一片马尾松林内.该地区的自然条件及土壤性质参见文献[5].

设立 6 块 $10 \times 10 \text{ m}^2$ 的样地,随机分成 2 组(每组 3 个),分别投加脱硫石膏(记为 FG DG)和不做任何处理作为对照(记为对照).每个样地内安装 7 个土壤水收集器和 4 个穿透水收集器.土壤水收集器按土壤的自然分层置于不同的深度,其中最上面一个置于枯落物层之下,为平板采样器,记为 S0.矿质土层 5、15 和 30 cm 分别记为 S1、S2 和 S3,各安装 2 个 Rhizon 土壤水采样器(<http://www.rhizosphere.com/rhizons>).该采样器由有机聚合物制成,对重金属和有机物的吸附很弱,与传统的陶杯式土壤水采样器相比,更适于进行重金属的研究.土壤水采样器的安装方法参见文献[5].穿透水采样器则置于样地四角.

穿透水和矿质土层水样收集器分成 2 组,分别采集样品进行主要阴阳离子分析和重金属含量分析.为避免重金属的沉淀和被瓶壁吸附,重金属组的采样瓶中需预先加入 10 mL 的 $6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 盐酸溶液^[17].

1.2 实验方法

本研究所用的脱硫石膏来自重庆某电厂,其主要化学组成如表 1 所示.2009 年底在每个 FG DG 样地表面一次性施撒 6.34 kg 脱硫石膏,该投加量相当于使样地自然条件下的 Ca 年沉降量翻倍.投加量的确定一方面考虑到改良土壤的需要,一方面为了模拟大气钙沉降对酸化森林土壤的影响(中国的大气沉降与脱硫石膏具有相似性,即具有很高的硫酸根和钙离子含量^[18]).国外同类修复实验中,脱硫石膏投加量与本研究相近,每平方米为几十 g^[19].从 2010 年 1 月起开展土壤水的观测和采样.每周采集土壤水样品,4 周样品集中成一个进行分析.不加酸样品测定 pH 值(使用 pH 计)、各主要阴阳离子

浓度(采用离子色谱法)和铝离子浓度(采用分光光度法^[20]);加酸样品用于分析重金属浓度(使用 ICP-AES).

表 1 脱硫石膏的主要化学组成/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 1 Main chemical composition of the FG DG/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$						
Ca	S	Al	Mg	K	Na	CO_3^{2-}
209.12	164.40	3.81	0.81	0.43	0.14	45.08

2010 年年底,即脱硫石膏施加 1 a 后,对森林枯落物和土壤进行垂直分层采样:枯落物层被分为枯落物 A 层(未分解的枯落物)与枯落物 B 层(中度分解的枯落物),土壤矿质层被分为 0~2 cm、2~5 cm、5~15 cm 和 15~30 cm 共 4 层.枯落物与土壤样品置于阴凉处干燥后,分别磨碎(其中土壤过 200 目筛),然后经微波消解,用 ICP-AES 测定重金属含量.

2 结果与讨论

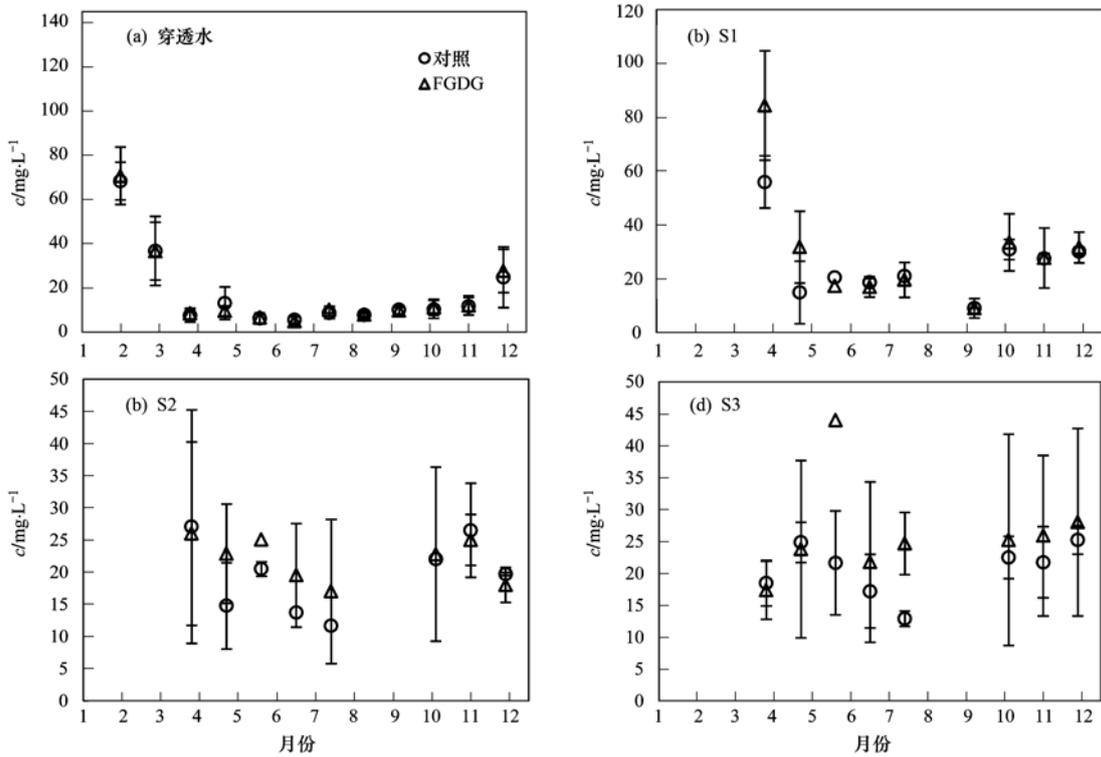
2.1 脱硫石膏的修复效果

2.1.1 对土壤溶液 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的影响

脱硫石膏中主要成分 CaSO_4 微溶于水,随着降水的溶解势必增加土壤的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 输入量,图 1 和图 2 分别给出了 2 类样地穿透水和各矿质土层土壤中 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度的月变化.不同处理下穿透水中 Ca^{2+} 浓度非常接近,说明 Ca^{2+} 的大气输入没有明显差异性.脱硫石膏的加入并未导致矿质土层中 Ca^{2+} 浓度的成倍提高,原因可能在于 CaSO_4 的微溶性.事实上,如果 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 浓度剧烈增加,可能导致土壤溶液电导率的快速升高,进而会对生物和土壤造成危害^[7, 12],因此使用 CaSO_4 比其他易溶盐类更具合理性.S1、S2 和 S3 层土壤溶液中 Ca^{2+} 浓度呈现一个随着时间的推移依次升高的趋势(S1 层水 Ca^{2+} 平均浓度的升高为 4~5 月,S2 层为 5~8 月,S3 层为 6~12 月),表明修复逐步起效.而用石灰石(CaCO_3)修复土壤时,土壤水中 Ca^{2+} 浓度表现出较稳定的升高^[5].

由图 1 和图 2 可以看出, SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 浓度的月变化趋势相似,说明土壤上层(包括有机层)对 SO_4^{2-} 的吸附可能并不强,这与该地区长期高硫沉降条件下土壤对 SO_4^{2-} 的吸附达到饱和^[21]是一致的. SO_4^{2-} 浓度的提高并无毒性^[8],且能与铝离子(Al^{3+})形成配合物,使 Al^{3+} 毒性降低^[7].

2.1.2 对土壤溶液 pH 值和 $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ 摩尔比的影响



误差线表示标准差; 8 和 9 月由于降水量小, 未采集到土壤水样品, 下同

图 1 2010 年土壤溶液中 Ca^{2+} 浓度的月变化

Fig. 1 Monthly variation of Ca^{2+} concentration in soil water in 2010

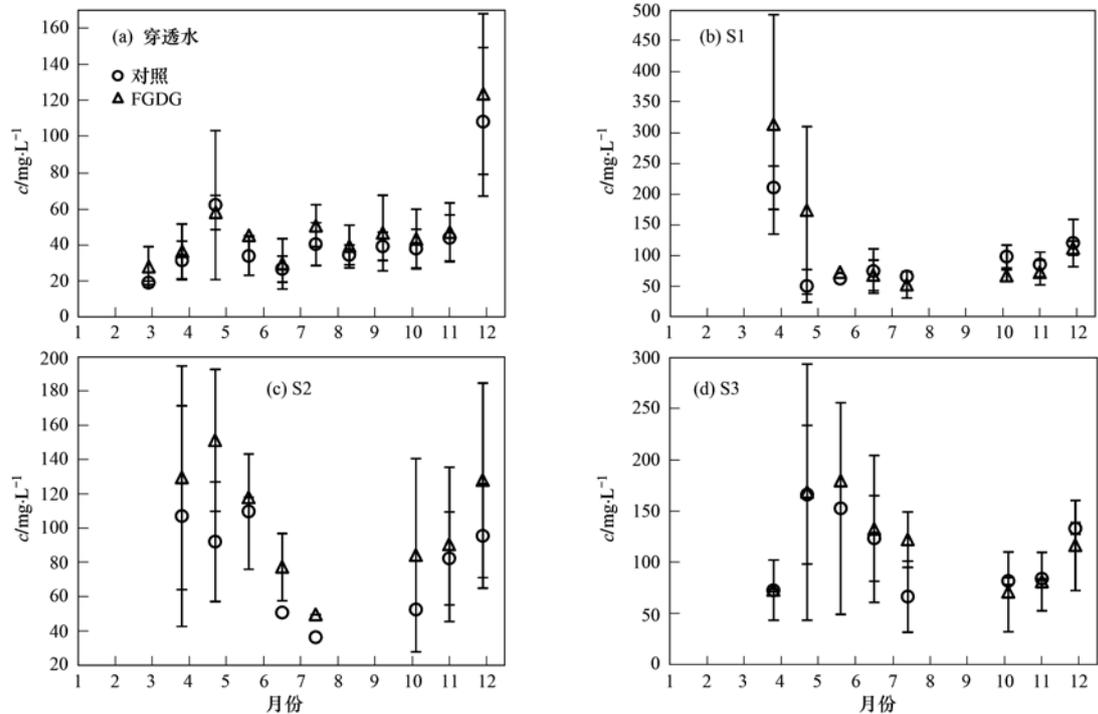


图 2 2010 年土壤溶液中 SO_4^{2-} 浓度的月变化

Fig. 2 Monthly variation of SO_4^{2-} concentration in soil water in 2010

土壤溶液的 pH 值是评价修复效果的主要指标, pH 值的提高能显著降低土壤溶液中 Al^{3+} 的活化, 从而降低土壤酸化对植物根系的危害^[10]. 图 3 给出了 2

类样地穿透水和各矿质土层土壤溶液 pH 值的月变化. 各层土壤溶液中, 除个别月份外, 处理样地较对照样地略有提高, 但并不显著(置信度 0.05, 下同).

主要原因是脱硫石膏中含有少量未反应的石灰石 (CaCO_3), 能中和 H^+ , 提高土壤水 pH 值. 也有研究指出, 脱硫石膏的施加能显著提高土壤的 pH 值, 但对土壤水的 pH 值影响不大, 原因是土壤中的离子交换作用, 即土壤溶液中浓度升高的 Ca^{2+} 交换出土

壤颗粒表面吸附的 H^+ ^[14]. 而施加石灰石的修复实验中, 土壤水的 pH 值有较大幅度提高, 上层土壤尤其明显^[5].

图 4 给出了 2 类样地穿透水和各矿质土层土壤溶液中 $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ 的月变化. 研究表明, 土壤

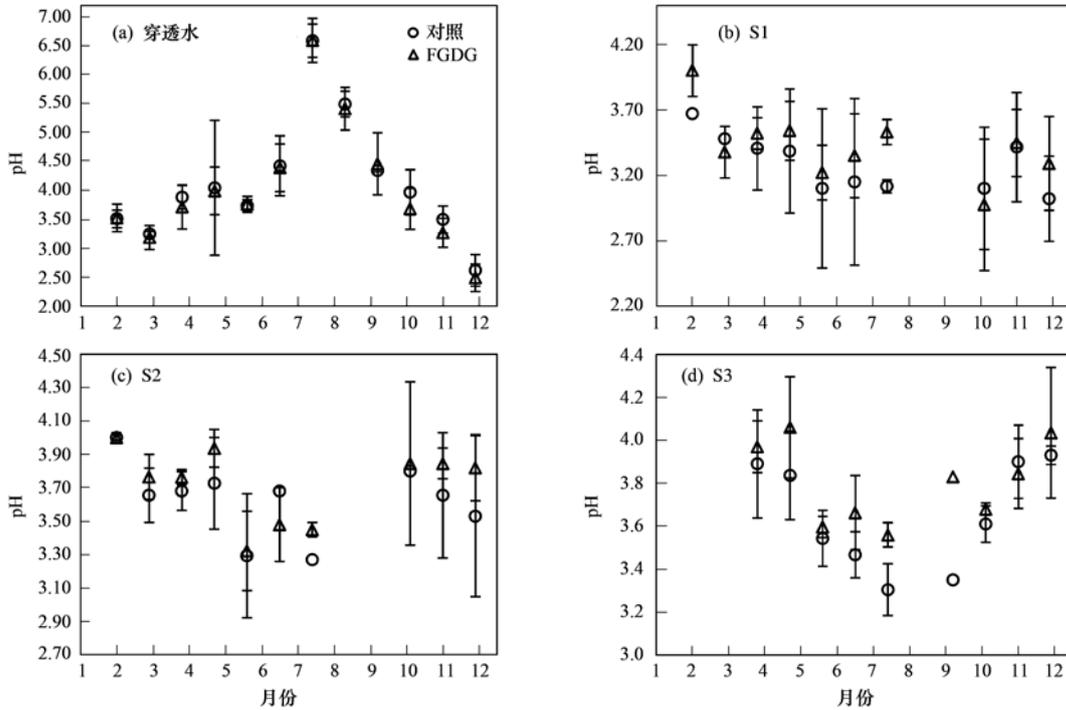
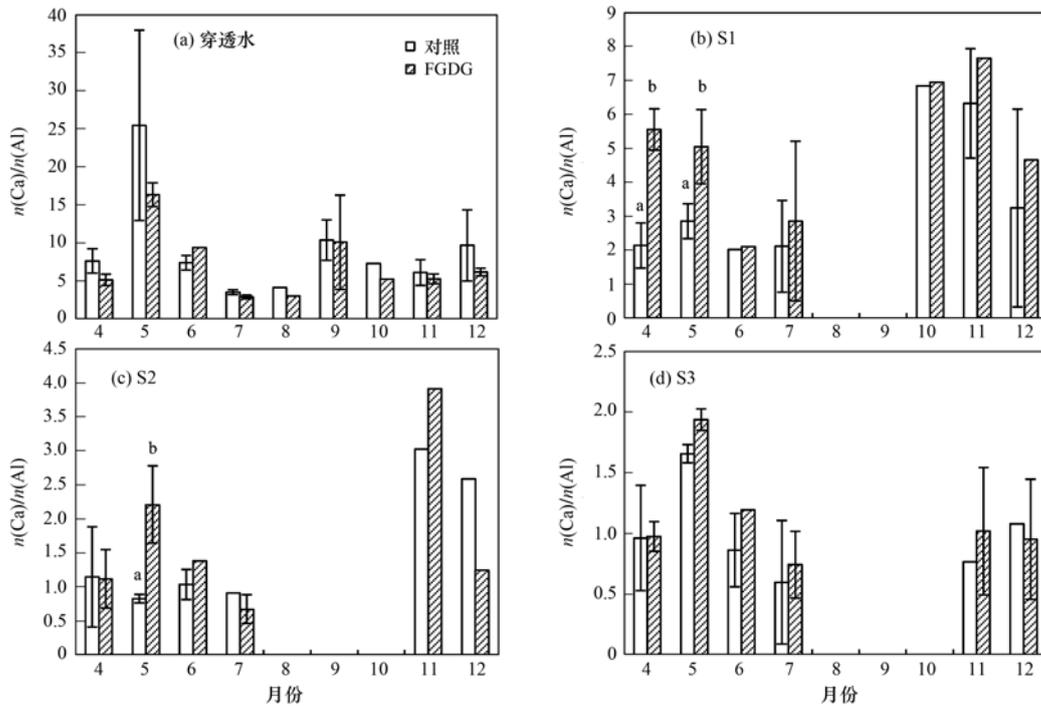


图 3 2010 年土壤溶液 pH 值的月变化

Fig. 3 Monthly variation of pH value of soil water in 2010



样地间的差异经成对 t 检验, 不同字母表示差异显著, 置信度 0.05

图 4 2010 年土壤溶液 $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ 的月变化

Fig. 4 Monthly variation of $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$ molar ratio of soil water in 2010

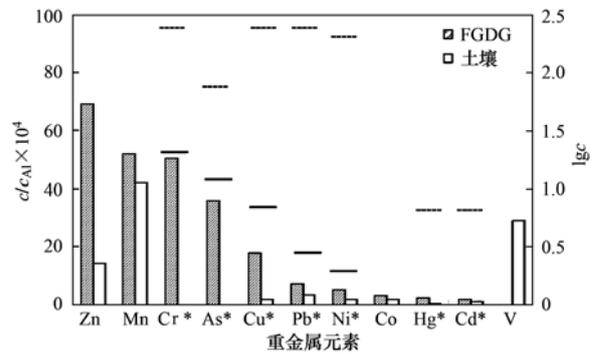
酸化对植被产生危害的主要原因是土壤中 Al^{3+} 浓度的增加,而 Ca^{2+} 等盐基阳离子的存在则会缓解其危害,因此欧洲通常把 BC/Al 作为判断酸沉降是否危害植被的指标,其值 < 1.0 表示已经产生危害^[10]. 处理样地 4、5 月 S1 层土壤溶液与 5 月 S2 层土壤溶液的 $n(Ca)/n(Al)$ 较对照样地有显著提高,且处理样地 2010 年 S1、S2 和 S3 层土壤溶液年均 $n(Ca)/n(Al)$ 较对照样地从 2.16、1.35 和 0.88 升高到 2.58、1.52 和 1.12,表明脱硫石膏对酸化土壤起到了修复作用.

2.2 脱硫石膏的重金属污染风险

2.2.1 对土壤溶液重金属浓度的影响

通常燃煤电厂的飞灰中含有一定量的重金属,而脱硫石膏中往往混有飞灰^[6],因此其中可能含有重金属. 图 5 给出了本研究中使用的脱硫石膏和对照样地土壤中主要的重金属元素含量. 下面选取 Cu、Zn、Ni、Cr 和 As 这 5 种(Hg 的结果将在另文中发表)脱硫石膏中相对于 Al 的含量远高于土壤的元素进行分析.

实验结果表明,土壤溶液样品中的 As 含量基本未检出,而 Cr、Cu、Zn 及 Ni 这 4 种重金属的变化特征相似,在此仅选取了其中的 Cr 进行结果分析,其在土壤溶液中浓度的月变化如图 6 所示. 除了在施加脱硫石膏后的最初 2 个月,处理样地 S0 层土壤溶



*《农用粉煤灰中污染物控制标准》(GB 8173-1987)中规定的重金属,虚线为标准值,实线为 FGDG 中含量(Hg、Cd 含量 $< 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 远低于标准,未标出),用图右的纵轴表示;图左的纵轴表示 FGDG 与土壤中重金属元素相对于 Al 的含量

图 5 脱硫石膏和土壤中重金属含量

Fig. 5 Heavy metal content in FGDG and soil

液的 Cr 含量较对照样地高外,其它月份各层 2 种处理的结果相近,甚至处理样地较低. 有研究指出,脱硫石膏中重金属的大量溶出多发生在施加后的较短时间内,若不扰动土壤,溶出的重金属很快会被上层的腐殖层或土壤吸附^[8]. 此外,土壤溶液中的重金属浓度与 pH 值有很强的相关性^[22],pH 值越高,重金属的活动性就越弱,因而处理样地重金属浓度的下降很有可能是由于 pH 值的升高引起的. 在以往的研究中同样发现了随脱硫石膏施加量的提高,土壤溶液中 Ni、Zn 和 Mn 等元素含量下降的现象^[23].

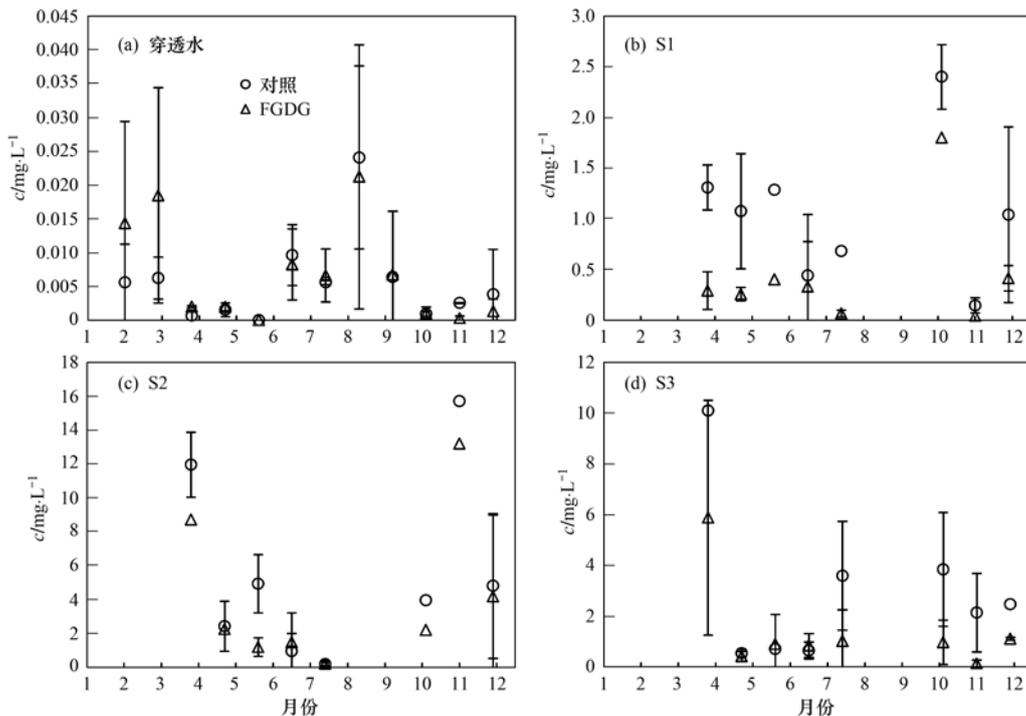


图 6 2010 年土壤溶液中 Cr 浓度的月变化

Fig. 6 Monthly variation of Cr concentration in soil water in 2010

总的来说,脱硫石膏的施加暂时未给土壤溶液造成重金属的污染,这与以往的研究结果是一致的^[9-11,24].

2.2.2 重金属在土壤各层的富集状况

土壤对重金属的吸附作用会造成重金属在土壤层的富集,表 2 给出了脱硫石膏施加 1 a 后 2 类样地土壤各层重金属的含量.除了枯落物 B 层的 Cr 含量、0~2 cm 土壤的 Ni 含量以及 5~15 cm 土壤的

Zn 含量处理样地要明显高于对照样地之外,2 类样地各层的 5 种元素含量并没有明显差别.总的来说,短期内用脱硫石膏改良酸性土壤出现了一些重金属元素的轻微积累,因而存在重金属污染的风险,但这种风险较小.以 Cr 为例,假设脱硫石膏中的 Cr 全部吸附于土壤表层(0~2 cm),则土壤含量仅上升 1.48%.不同元素的富集层不同可能是由于不同元素的迁移能力不同引起的.

表 2 脱硫石膏施加 1 a 后土壤各层重金属的平均含量¹⁾/mg·kg⁻¹

Table 2 Average concentration of heavy metal in different soil layers one year after application/mg·kg⁻¹

土壤层	处理	Cr	As	Cu	Ni	Zn
枯落物 A	对照	7.60 (2.23)	2.52 (3.74)	6.27 (0.86)	2.94 (1.17)	58.0 (1.4)
	FGDG	7.31 (1.87)	3.73 (4.87)	7.14 (0.81)	2.46 (1.30)	55.0 (2.8)
枯落物 B	对照	11.1 ^a (1.2)	5.43 (3.92)	6.40 (0.84)	1.49 (0.42)	29.6 (2.4)
	FGDG	18.1 ^b (3.0)	6.90 (3.45)	7.23 (1.15)	1.79 (0.22)	26.3 (1.7)
0~2 cm	对照	44.4 (9.4)	15.6 (0.7)	8.22 (1.24)	2.58 ^a (0.75)	43.1 (1.5)
	FGDG	45.9 (6.9)	20.3 (7.1)	8.65 (1.46)	3.78 ^b (0.63)	42.5 (1.0)
2~5 cm	对照	54.1 (17.1)	22.8 (15.6)	4.67 (1.33)	4.60 (3.35)	42.8 (11.1)
	FGDG	57.9 (16.5)	30.1 (18.6)	4.17 (2.18)	5.43 (3.47)	42.4 (11.6)
5~15 cm	对照	51.1 (15.9)	17.0 (6.8)	5.53 (2.34)	2.82 (2.58)	39.8 ^a (6.2)
	FGDG	52.0 (22.4)	12.8 (4.8)	5.12 (1.20)	3.10 (1.95)	46.1 ^b (5.1)
15~30 cm	对照	69.3 (21.2)	13.5 (9.5)	5.52 (1.98)	5.68 (3.73)	51.1 (4.3)
	FGDG	63.8 (10.0)	16.2 (10.1)	5.43 (2.39)	8.60 (2.05)	56.4 (14.0)

1) 括号内为标准差; 样地间的差异经成对 *t* 检验,不同的上标字母表示差异显著,置信度 0.05

3 结论

(1) 脱硫石膏的施加能提高矿质土层中土壤溶液 Ca²⁺ 浓度及 pH 值,并降低土壤溶液 Al³⁺ 浓度,从而提高 $n(\text{Ca})/n(\text{Al})$,降低土壤酸化对植物根系的可能伤害.同时,短期脱硫石膏的使用并没有造成土壤溶液重金属浓度的明显增加.

(2) 由于脱硫石膏主要成分 CaSO₄ 的微溶性,可以适当提高施加量来达到更好的效果.但是更多的施加可能引起重金属在土壤中富集,从而存在潜在的风险,需要进一步开展长期的观测.

参考文献:

[1] 冯宗炜. 中国酸雨对陆地生态系统的影响和防治对策 [J]. 中国工程科学, 2000, 2(9): 5-11.

[2] Hütt R F, Zöttl H W. Liming as a mitigation tool in Germany's declining forests-reviewing results from former and recent trials [J]. Forest Ecology and Management, 1993, 61(3-4): 325-338.

[3] Lundström U S, Bain D C, Taylor A F S, et al. Effects of acidification and its mitigation with lime and wood ash on forest soil processes: a review [J]. Water, Air, and Soil Pollution: Focus, 2003, 3(4): 5-28.

[4] Hindara A, Wright R F, Nilsen P, et al. Effects on stream water chemistry and forest vitality after whole-catchment application of

dolomite to a forest ecosystem in southern Norway [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1-3): 509-525.

[5] 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.

[6] Crews J T, Dick W A. Liming acid forest soils with flue gas desulfurization by-product: growth of Northern red oak and leachate water quality [J]. Environmental Pollution, 1998, 103(1): 55-61.

[7] Clark R B, Baligar V C. Growth of forage legumes and grasses in acidic soil amended with flue gas desulfurization products [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2003, 34(1-2): 157-180.

[8] Clark R B, Zeto S K, Ritchey K D, et al. Growth of forages on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products [J]. Fuel, 1997, 76(8): 771-775.

[9] Clark R B, Zeto S K, Ritchey K D, et al. Maize growth and mineral acquisition on acid soil amended with flue gas desulfurization by-products and magnesium [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1997, 28(15-16): 1441-1459.

[10] Sverdrup H, Warfvinge P, Frogner T, et al. Critical loads for forest soils in the Nordic countries [J]. AMBIO, 1992, 21(5): 348-355.

[11] Sakai Y, Matsumoto S, Sadakata M. Alkali soil reclamation with flue gas desulfurization gypsum in China and assessment of metal content in corn grains [J]. Soil and Sediment Contamination,

- 2004, **13**(1): 65-80.
- [12] Gissel-Nielsen G, Bertelsen F. Inorganic element uptake by barley from soil supplemented with flue gas desulphurization waste and fly ash [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 1988, **10**(1): 21-25.
- [13] Clark R B, Baligar V C. Mineral concentrations of forage legumes and grasses grown in acidic soil amended with FGD products [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2003, **34**(11-12): 1681-1707.
- [14] Punshon T, Adriano D C, Weber J T. Effect of flue gas desulfurization residue on plant establishment and soil and leachate quality [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**(3): 1071-1080.
- [15] Wang S J, Chen C H, Xu X C, *et al.* Amelioration of alkali soil using flue gas desulfurization byproducts; productivity and environmental quality [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **151**(1): 200-204.
- [16] 田贺忠, 郝吉明, 赵喆, 等. 燃煤电厂烟气脱硫石膏综合利用途径及潜力分析 [J]. *中国电力*, 2006, **39**(2): 64-69.
- [17] Wang Z W, Zhang X S, Xiao J S, *et al.* Mercury fluxes and pools in three subtropical forested catchments, southwest China [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(3): 801-808.
- [18] Aas W, Shao M, Jin L, *et al.* Air concentrations and wet deposition of major inorganic ions at five non-urban sites in China, 2001-2003 [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(8): 1706-1716.
- [19] Chen L, Dick W A, Nelson S. Flue gas desulfurization by-products additions to acid soil: alfalfa productivity and environmental quality [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(2): 161-168.
- [20] Barnes R B. The determination of specific forms of aluminum in natural water [J]. *Chemical Geology*, 1975, **15**(3): 177-191.
- [21] 仇荣亮, 尧文元, 潘蓉. 南方酸沉降区土壤硫酸根吸附解吸特性及其数值拟合 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 2001, **40**(6): 86-90.
- [22] Tipping E, Rieuwerts J, Pan G, *et al.* The solid-solution partitioning of heavy metals (Cu, Zn, Cd, Pb) in upland soils of England and Wales [J]. *Environmental Pollution*, 2003, **125**(2): 213-225.
- [23] Lee Y B, Bigham J M, Dick W A, *et al.* Influence of soil pH and application rate on the oxidation of calcium sulfite derived from flue gas desulfurization [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2007, **36**(1): 298-304.
- [24] Sloan J J, Dowdy R H, Dolan M S, *et al.* Plant and soil responses to field-applied flue gas desulfurization residue [J]. *Fuel*, 1999, **78**(2): 169-174.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and Fluorescence Characteristics of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行