ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第10期
2012年10月15日

目 次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立 …… 李小平,陈小华,董旭辉,董志,孙敦平(3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性 …… 席北斗,张亚丽,许秋瑾(3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻荧光识别测定中的应用 …… 张翠,苏荣国,宋志杰,张珊珊,王修林(3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析 …… 张红,黄勇,李堃(3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究 …… 姜林,钟茂生,贾晓洋,夏天翔,姚珏君,樊艳玲,张丽娜,唐振强(3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价 …… 杜秀萍,孟范平,王志峰,李祥蕾,杨菲菲,程凤莲,杨跃志,李正炎(3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算 …… 吴家林,方倩,石晓勇,李克强,张传松,王修林(3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响 …… 于娟,张瑜,杨桂朋,田延旺(3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布 …… 孟佳,姚庆祯,陈洪涛,于志刚(3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究 …… 余居华,钟继承,张银龙,范成新,何伟,张雷,唐阵武(3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析 …… 杨平恒,刘子琦,贺秋芳(3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较 …… 张佳磊,郑丙辉,刘录三,王丽婧,吴光应(3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应 …… 曾立雄,黄志霖,肖文发,田耀武(3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究 …… 李立青,单保庆,赵建伟,郭树刚,高勇(3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中Se元素赋存状态及其生态效应研究 …… 张秀芝,马忠社,王荫楠,王志军,谢伟民(3404)
西藏地表水中砷的分布 …… 王明国,李社红,王慧,肖唐付,郑宝山(3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布 …… 薛丽洋,吴锦奎,张明泉,丁永建,叶柏生(3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险 …… 卢晓霞,张姝,陈超琪,侯珍,杨君君(3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价 …… 聂海峰,赵传冬,刘应汉,彭敏,李括,杨柯,刘飞(3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征 …… 李涛,侯立军,刘敏,赵迪,尹国宇,郑艳玲,赵慧(3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征 …… 杨玉玮,高学鲁,李培苗(3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义 …… 姚鹏,尹红珍,姚庆祯,陈洪涛,刘月良(3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究 …… 彭章娥,冯劲梅,何淑英,吴峰(3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性GAC催化H_2O_2氧化橙黄Ⅳ …… 张瑛洁,徐淑芬,廖霞,曹天静,杨榕,李大鹏(3473)
Pd/CMK-3的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究 …… 还中科,宗恩敏,魏丹,万海勤,郑寿荣,许昭怡(3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究 …… 李怀正,姚淑君,徐祖信,陈卫兵(3484)
以亲水化改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究 …… 王玉晓,孔秀琴,冯权,卢海涛,王德源,唐黎明,邢新会(3489)
光催化降解渗滤液DOM不同组分的相对分子质量变化特征 …… 贾陈忠,王焰新,张彩香(3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究 …… 孙迎雪,徐栋,田媛,李燕飞(3501)
CANON反应器运行稳定性及温度冲击的影响 …… 付昆明,张杰,曹相生,李冬,孟雪征(3507)
MUCT工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究 …… 曾薇,王向东,张立东,李博晓,彭永臻(3513)
活性污泥胞外聚合物(EPS)的分层组分及其理化性质的变化特征研究 …… 袁冬琴,王毅力(3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响 …… 刘孟媛,周丹丹,高琳琳,马德方,张予萌,李克宇(3529)
厌氧污泥降解萘动力学与生物多样性研究 …… 曹新垲,杨琦,郝春博(3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪DOM对吸附的影响 …… 张丰松,李艳霞,黄泽春,杨明(3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究 …… 张晓蕾,薛文平,徐恒振,马新东(3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其STOMP模拟研究 …… 韩春媚,冉娟,张慧,李发生,李雁,谷庆宝(3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性 …… 王芳丽,宋宁宁,赵玉杰,张长波,沈跃,刘仲齐(3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的Pb、Cd …… 汤民,张进忠,张丹,陈舜,张训,刘万平,余建(3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例 …… 谷蕾,仝致琦,宋博,马建华(3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险 …… 卢再亮,李九玉,姜军,徐仁扣(3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响 …… 吴艳阳,吴群河,黄珊,叶嘉欣,张恒军,张仁铎(3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精DNA在重金属作用下的保护作用研究 …… 唐旖旎,吴平霄,朱能武(3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对As(Ⅲ)吸附的影响 …… 梁剑茹,李浙英,刘奋武,周立祥(3606)
铜绿假单胞菌ZGKD2的重金属耐性机制研究 …… 张玉秀,王姣,柴团耀,张倩,刘金光,李霞,白志强,苏增健(3613)
1株1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究 …… 王小春,陈东之,金小君,陈建孟(3620)
PCBs降解菌的筛选及其降解特性研究 …… 史舜燕,冯流,龚吉(3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究 …… 彭青,谢冰,袁琦,黄智婷,崔璐璐,王文婷(3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田N_2O交换通量的研究 …… 裴淑玮,张圆圆,刘俊锋,伦小秀,牟玉静(3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析 …… 王飞,朱彬,康汉清,高晋徽,王瑛,江琪(3647)
济南市夏季环境空气VOCs污染特征研究 …… 刘泽常,张帆,侯鲁健,刘玉堂,吕波(3656)
活性炭分解臭氧机制研究 …… 刘海龙,张智烨,张忠明,焦茹媛,王瑞军(3662)
大气O_3浓度升高对2种基因型矮菜豆丛枝菌根(AM)结构及球囊霉素蛋白产生的影响 …… 王鹏腾,刁晓君,王曙光(3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响 …… 王明霞,黄建国,袁玲,周志峰(3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染 …… 郑冬梅,李昕馨,罗庆(3680)
《环境科学》征订启事(3313)　《环境科学》征稿简则(3322)　信息(3328,3512,3561,3640)

第 33 卷第 10 期
2012 年 10 月
环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE
Vol. 33, No. 10
Oct. ,2012

聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性

王芳丽[1], 宋宁宁[1], 赵玉杰[2],张长波[1],沈跃[3],刘仲齐[1*]
(1. 农业部环境保护科研监测所生态毒理与环境修复研究中心,天津 300191; 2. 农业部环境监测总站,天津 300191; 3. 农业部环境保护科研监测所科技处,天津 300191)

摘要: DGT 技术一直以固态结合相原位采集和测量水体、土壤或沉积物中有效态重金属,液态结合相的 DGT 主要应用于现场水体中金属离子的检测. 本研究分别采用固态结合相梯度扩散薄膜(chelex100-DGT)装置和改进的液态结合相梯度薄膜扩散(CDM-PAAS-DGT)装置,对广西甘蔗田土壤中有效态 Cd 进行了测定. 结果表明,2 种装置提取的土壤有效态 Cd 含量与甘蔗(根、茎、叶)体内 Cd 含量都呈极显著正相关,改进的 CDM-PAAS-DGT 装置对土壤中有效态 Cd 的提取能力更强; 融合土壤 pH、阳离子交换量(CEC)、有机质(OM%)和土壤颗粒组成等理化指标影响,运用多元统计分析,提取出 2 种主成分因子,建立了多元回归模型. 液态结合相 DGT 技术能较好地预测甘蔗田土壤中 Cd 的生物有效性,拓展了其应用范围.

关键词:梯度扩散薄膜技术(DGT); 聚丙烯酸钠(PAAS); 镉(Cd); 生物有效性; 甘蔗; 广西
中图分类号: X825; X835 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)10-3562-07

Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate

WANG Fang-li[1], SONG Ning-ning[1], ZHAO Yu-jie[2], ZHANG Chang-bo[1], SHEN Yue[3], LIU Zhong-qi[1]
(1. Centre for Research in Ecotoxicology and Environmental Remediation, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Agro-Environmental Monitoring Station, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 3. Division of Science and Technology, Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China)

Abstract: The diffusive gradients in thin films (DGT) technique with solid-state binding phases has been widely used for *in situ* collection and measurement of available heavy metals in waters, soils or sediments, whereas DGT with liquid binding phase is primarily used in the *in situ* analysis of heavy metals in waters. In this paper, rhizosphere soils of sugarcane were collected in Guangxi and the concentrations of cadmium (Cd) were determined by DGT with a solid-state binding phase of chelex100 (chelex100-DGT) and modified DGT with a liquid binding phase of sodium polyacrylate (CDM-PAAS-DGT). The result showed that the Cd contents in soils measured by DGT with both binding phases and Cd in the roots, leaves and unpolished stems of sugarcane had significant positive correlation. The extraction ability of the CDM-PAAAS-DGT was much higher than that of the chelex100-DGT. In addition, multivariate analyses were used to assess the impact of pH, cation exchange capacity (CEC), soil organic matter (OM) and texture. Two principal components were extracted and the linear regression models were established. The Cd bioavailability in soils could be accurately predicted by the CDM-PAAAS-DGT technique, which expanded its applicable area.

Key words: diffusive gradients in thin films (DGT); sodium Polyacrylate (PAAS); cadmium (Cd); bioavailability; sugarcane; Guangxi

探寻土壤镉植物有效态含量监测技术一直是农业环境科研领域研究的热点[1],近年来发展起来的梯度扩散薄膜技术(DGT)[2]是由 Bill Davison 和张昊等科研人员研制的,该技术可以用于研究土壤/沉积物重金属植物有效性,是金属从固相到液相的释放通量的一个重要方法[3]. DGT 同时考虑了土壤溶液中重金属含量和重金属在土壤固-液相的动态供应过程,可有效模拟农作物对土壤重金属的吸收. DGT 技术的核心主要由扩散相和结合相两部分组成,扩散相是 DGT 技术定量的基础,结合相分子结构中含有一些可提供配位电子的官能团[4],这些官能团可以与重金属离子发生配位反应,可分为固态[5]和液态[6].

固态结合相的 DGT 技术一般采用具有一种强官能团(亚氨基二乙酸)Chelex 100 作为吸附剂,测量重金属元素的生物有效态,它比自然界中的大部分络合剂对金属的吸附效果强得多[7],已经用于研究土壤/沉积物中重金属的生物有效性或迁移特性,

收稿日期: 2011-12-15; **修订日期**: 2012-03-21
作者简介: 王芳丽(1986~),女,硕士研究生,主要研究方向为污染环境生态修复与重金属生物有效性,E-mail: flwang0603@163.com
* 通讯联系人,E-mail: zqliu733@yahoo.com.cn

在评价牧草、小麦、水稻、土豆等多种植物对重金属的吸收时取得了较好的效果[8~11]. 目前有关液态结合相的研究较少[12],液态结合相可以与扩散相完美地连接,具有提高 DGT 装置测量的重现性、简化后处理的操作步骤等优点[13,14],近几年得到了进一步的研究. Li 等[15]使用 0.020 $mol\cdot L^{-1}$的聚对苯乙烯磺酸钠(PSS)溶液为结合相,Fan 等[16]使用聚丙烯酸钠(PAAS)溶液为结合相,累积和测量了水体中有效态的 Cu 和 Cd,提高了 DGT 装置的准确性和精密度. 液态结合相的 DGT 虽然也已经被应用,但多是应用于实验室和现场水体中金属离子的检测[17,18].

迄今尚未发现有报道将改进的 CDM-PAAS-DGT 技术应用于分析大田条件下土壤-甘蔗作物系统中重金属生物有效性的研究报道. 本研究在对广西污染土壤进行实地考察和采样分析时,创新地运用 CDM-PAAS-DGT 技术评价土壤中 Cd 的生物有效性,并与 chelex100-DGT 技术测定结果相比较,分析土壤 pH、CEC、有机质含量等理化性质分别对这 2 种方法提取的 Cd 含量与台糖 25 体内 Cd 含量之间关系的影响.

1　材料与方法

1.1　实验材料

以广西典型能源作物台糖 25 为研究对象,在台糖 25 收获期,利用全球定位系统 (GPS) 定位,沿环江流域采集 18 个点,土壤和植物样品各 72 个.

将收获的甘蔗分为地下部分(根)、地上可食部分(茎)和不可食部分(叶),用自来水充分冲洗以去除粘附于植物样品上的泥土和污物,然后再用去离子水冲洗,用滤纸吸干,分别用不锈钢刀剁碎,混匀后取 1/4 装入样品袋. 在 103℃杀青 10 min,然后在 70℃下烘干至恒重,将植物样品粉碎过 1 mm 筛备用. 微波消解法消解:精确称取 0.25 ~0.30 g 的植物样,放入消化罐中,加入 7 mL 浓 HNO_3 和 1 mL 30% H_2O_2. 开盖预消化 2 h 后,拧紧罐盖,放入微波消解炉中,按设定的程序进行微波消解,微波消解结束后在微波自动冷却系统中降温至 65℃以下,取出,缓慢打开放气阀,待消化罐中的气压和外界大气压相平后,开罐,30 min 后,将试液倒出,用 2% 稀硝酸溶液反复洗涤,试液与洗涤液合并定容至 50 mL,溶液转移至塑料瓶保存并放入冰箱中冷藏、待测. 同时做样品空白.

抖根法采集植物的相应根际土,风干后过 2 mm 筛,混匀,备用. 测定不同土壤的基本理化性质及重金属含量, 测定方法参见文献[19]. 土壤中重金属全量采用微波消解法:精确称取 0.25 ~0.30 g 的土样,放入消化罐中,加入 7 mL 浓 HNO_3、2 mL HF 和 1 mL 30% H_2O_2. 消解步骤同植物消解过程. 开罐 30 min 后,将试液倒出,用 2% 稀硝酸溶液反复洗涤,试液与洗涤液合并转移至聚四氟乙烯于电热板上赶出剩余 HF,用 2% 稀硝酸溶液洗入容量瓶中,定容后转移到样品瓶中,塑料瓶保存并放入冰箱中冷藏、待测. 同时做样品空白.

采用微波消解仪(美国 CEM 公司,Mars: 240/50)消解,微波消解仪工作条件如表 1 所示. ICP-MS (美国 Agilent 公司 7500A)测定 Cd 含量. 消解以及测量过程中以 GBW 10016 (GSB-7)茶叶生物成分分析标准物质(北京恒元启天化工技术研究院)和 Cd 标准品(Fluka, Switzerland)进行测量质量控制,以保证测量的准确度.

表 1　微波消解仪工作条件

Table 1　Working conditions of microwave digestion

阶段	功率/W	升温时间/min	最高温度/℃	保持时间/min
1	800	6	120	2
2	1 600	3	150	3
3	1 600	5	190	20
4			冷却	

1.2　DGT 实验

1.2.1　固态结合相 chelex100-DGT 技术测定土壤 Cd 生物有效性

称取过 2 mm 筛的风干土 200.00 g,放入 400 mL 塑料容器中,使土层厚度为 1.5 cm. 添加超纯水使待测土壤中土壤持水量达到 60%,混匀,密封后放置 48 h. 再次添加超纯水使土壤持水量达到 80%,混匀,使土壤呈黏糊状且表面光滑; 密封后放置土壤 24 h,使土壤达到平衡. 将 DGT 装置(DGT Research Ltd., Lancaster, UK)用超纯水冲洗后,用少量待测土壤轻轻涂抹于 DGT 装置的窗口(滤膜处)表面,用手轻轻扭转将装置压入土壤表面,确保 DGT 装置和土壤接触良好. 立即记录时间和环境温度. 放置 24 h 后,迅速(几分钟内)取出 DGT 装置,用超纯水缓缓冲洗 DGT 装置,再用滤纸将装置表面的水分擦去. 移去 DGT 盖帽,剥离滤纸和扩散相层,使结合相露出. 取 1.5 mL 离心管,加入 0.8 mL 的1 $mol\cdot L^{-1}$ HNO_3溶液,将结合相移入到离心管中,使之完全浸没于硝酸溶液中,静置 24 h 待用. 从离心管中取部分溶液,用超纯水稀释 10 倍后,用 ICP-

MS 分析待测液. 具体方法参考文献[20]. 按照公式计算土壤中重金属生物有效性含量[21].

利用方程式(1)结算结合相层(M)富集的重金属量:

$$M = c_e(V_{HNO_3} + V_{gel})/f_e \tag{1}$$

式中, c_e: 1 $mol\cdot L^{-1}$ HNO_3 溶液中重金属浓度($\mu g\cdot L^{-1}$); V_{HNO_3}:浸泡结合相的1 $mol\cdot L^{-1}$ HNO_3 溶液体积(mL); V_{gel}:结合相体积,一般为 0.15 mL; f_e:每种金属的洗脱因子,一般为 0.8.

利用方程式(2)计算 DGT 测量通量(F):

$$F = M/(t \times A) \tag{2}$$

式中,t:放置时间(s); A:装置(膜)接触面积,A = 2.54 cm^2.

利用方程式(3)计算 DGT 富集的重金属浓度:

$$c_{DGT} = F\Delta g/D \tag{3}$$

式中,Δg:扩散层的厚度(0.08 cm)-滤膜厚度(0.014 cm); D:凝胶层中重金属的扩散系数(10^{-6},$cm^2\cdot s^{-1}$).

1.2.2 液态结合相 CDM-PAAS-DGT 技术测定 Cd 生物有效性

将约 1.5 cm 厚度的土放置在盒中. 实验前按步骤 1.2.1 节对土壤进行平衡,按照 Fan 等[16]预处理扩散相-渗析膜、纯化结合相以及组装 DGT 装置,将 DGT 装置轻轻放入土壤中,24 h 后取出. 取出后,用 5 mL 的注射器将透析膜挑破,将 DGT 装置内所有溶液(用 1% HNO_3 反复清洗)全部转移到容量瓶中,定容后用 ICP-MS 进行测定,按照公式计算土壤中 Cd 含量[22].

方程式如下:

$$M = c_{MF}D_{MF}At/\Delta g$$

式中,M:富集在结合相上的金属离子含量(μg); c_{MF}:自由的金属离子浓度($\mu g\cdot L^{-1}$); D_{MF}:自由金属离子的扩散系数(10^{-6}, $cm^2\cdot s^{-1}$); A:扩散面积(cm^2); t:一定的扩散时间(s); Δg:扩散边界层(DBL) 厚度(cm).

1.3 统计分析

运用 EXCEL 2007、SPSS 16.0 对所得数据进行整理与分析,运用 Origin 8.0 进行绘图.

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和台糖 25 对 Cd 的富集

采样点用 GPS 定位,沿广西环江流域,分别在横向和纵向流域采集农田中甘蔗样品,土壤理化性质如表 2 所示. 采集的土壤样品 pH 范围为:3.88 ~ 7.41,有机质含量范围为:1.62% ~6.07%,CEC 范围为:13.19 ~16.17 $mol\cdot kg^{-1}$,土壤颗粒组成为:黏粒 8.41% ~38.14%、粉粒 10.71% ~67.31%、沙粒 10.62% ~70.84%,土壤中的全量 Cd 范围为:0.16 ~2.70 $mg\cdot kg^{-1}$,根据文献[23],其中,低于国家二级标准(0.3 $mg\cdot kg^{-1}$)的点共有 6 个,介于国家二级标准与三级标准(1 $mg\cdot kg^{-1}$)之间的点共有 10 个,高于国家三级标准的 2 个.

表 2 土壤理化性质

Table 2 Physico-chemical characteristics of selected soil

采样点	pH	OM/%	CEC /$mol\cdot kg^{-1}$	土壤质地			总 Cd /$mg\cdot kg^{-1}$
				黏粒/%	粉粒/%	沙粒/%	
1	7.01	4.07	15.10	18.45	10.71	70.84	0.16
2	4.07	2.99	14.10	20.89	22.14	56.97	0.84
3	5.93	3.56	14.75	28.97	16.90	54.13	0.22
4	7.41	5.84	16.17	16.93	17.17	65.90	0.26
5	3.86	2.55	13.19	36.72	20.14	43.14	2.70
6	5.84	6.07	14.21	29.17	13.93	56.90	0.24
7	4.62	5.62	14.26	8.41	67.31	24.28	0.48
8	5.49	5.04	14.34	35.71	13.93	50.36	0.47
9	5.94	3.03	15.12	23.93	54.68	21.39	0.30
10	6.73	3.91	16.10	25.59	35.72	38.69	0.78
11	6.78	2.97	16.10	30.07	35.87	34.06	0.36
12	6.62	4.55	15.13	18.83	42.34	38.83	0.85
13	3.94	4.49	14.31	21.97	23.93	54.10	0.30
14	3.88	1.62	14.47	21.84	20.71	57.45	0.67
15	6.68	2.84	14.77	15.02	25.08	59.90	0.30
16	4.60	4.68	15.03	15.29	31.48	53.23	0.38
17	6.19	5.70	14.30	38.14	51.24	10.62	0.61
18	5.52	4.72	14.89	18.10	16.41	65.49	1.25

台糖 25 对 Cd 的富集如图 1 所示. 台糖 25 体内 Cd 含量的范围为：根（0.09 ± 0.00）~（0.53 ± 0.01）$mg \cdot kg^{-1}$、茎（0.03 ± 0.00）~（0.50 ± 0.01）$mg \cdot kg^{-1}$ 和叶（0.02 ± 0.00）~（0.12 ± 0.00）$mg \cdot kg^{-1}$. 台糖 25 对 Cd 的富集能力呈现如下规律：根 > 茎 > 叶. 在土壤 pH 分别为 7.01、7.41 和 6.68，土壤 Cd 总量分别为 0.16、0.26 和 0.30 $mg \cdot kg^{-1}$时，台糖 25 对 Cd 的富集能力表现为茎最低；在土壤 pH 分别为 4.62 和 3.94，土壤 Cd 总量分别为 0.48 $mg \cdot kg^{-1}$和 0.30 $mg \cdot kg^{-1}$时，台糖 25 对 Cd 的富集能力表现为茎最高.

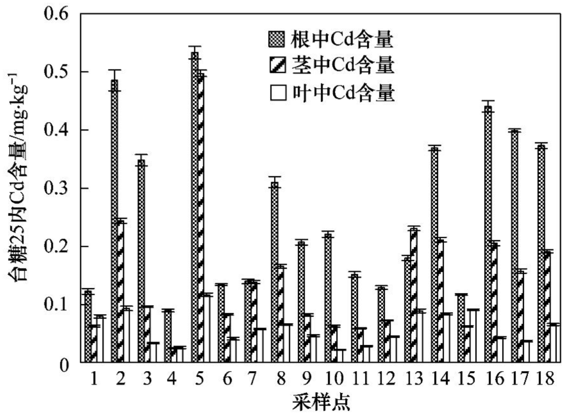

图 1　台糖 25 对 Cd 的富集

Fig. 1　Accumulation of Cd to sugarcane

2.2　植物体内 Cd 含量与土壤中 Cd 有效态含量之间关系

台糖 25（根、茎和叶）中 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量之间关系分别如图 2 ~ 4（其中小图为散点分布图）所示. CDM-PAAS-DGT 和 chelex100-DGT 提取的土壤有效态 Cd 含量范围为：12.05 ~ 97.76 $\mu g \cdot L^{-1}$和 4.28 ~ 54.86 $\mu g \cdot L^{-1}$，CDM-PAAS-DGT 对 Cd 的提取能力显著强于 chelex100-DGT. 台糖 25 中 Cd 含量与 DGT 提取的 Cd 有效态之间关系做简单相关分析，线性方程为：

root-Cd（根） = 0.005 7 PAAS-DGT-Cd + 0.076 1
　　　　　　 = 0.005 7 chelex100-DGT-Cd + 0.097 3
stem-Cd（茎） = 0.005 7 PAAS-DGT-Cd − 0.041 5
　　　　　　 = 0.01chelex100-DGT-Cd − 0.024 2
leaf-Cd（叶） = 0.01 PAAS-DGT-Cd + 0.025 2
　　　　　　 = 0.000 1 chelex100-DGT-Cd − 0.000 2

台糖 25 中 Cd 含量与 DGT 提取的 Cd 有效态含量之间相关系数如表 3 所示. 简单相关分析表明，在 $\alpha < 0.01$ 显著水平下，台糖 25 体内（根、茎和叶）Cd 含量与 2 种结合相 DGT 提取的有效态 Cd 含量之间极显著相关；从台糖 25 体内 Cd 含量与土壤从相关系数看，与茎的相关性显著强于与根和叶；从相关系数来看：

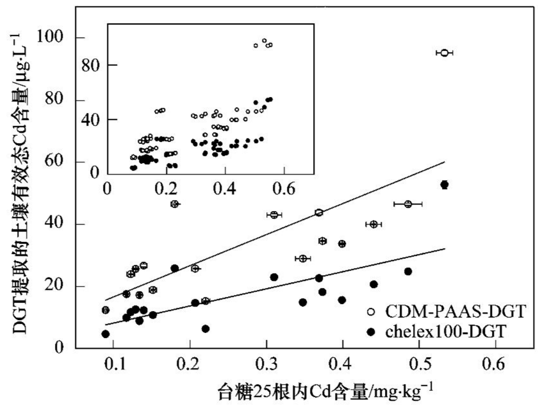

图 2　甘蔗根内 Cd 含量与土壤中 Cd 有效态含量之间关系

Fig. 2　Relationships between Cd concentrations in roots and available Cd in soils

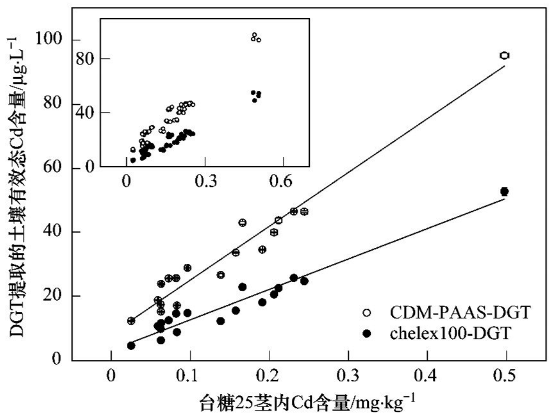

图 3　甘蔗茎中 Cd 含量与土壤中 Cd 有效态含量之间关系

Fig. 3　Relationships between Cd concentrations in stems and available Cd in soils

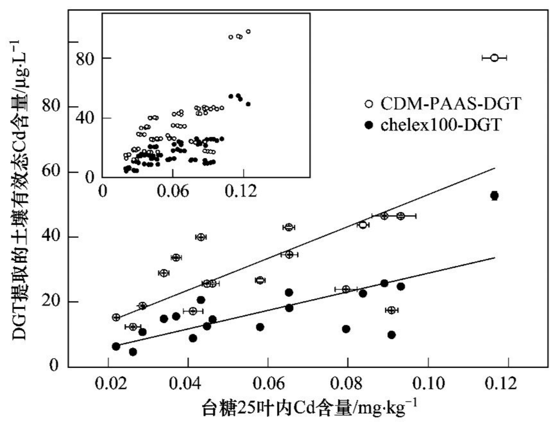

图 4　甘蔗叶内 Cd 含量与土壤中 Cd 有效态含量之间关系

Fig. 4　Relationships between Cd concentrations in leaves and available Cd in soils

根：$r_{CDM-PAAS-DGT} = 0.754 > r_{chelex100-DGT} = 0.731$

茎：$r_{CDM-PAAS-DGT} = 0.979 > r_{chelex100-DGT} = 0.971$

叶：$r_{chelex100-DGT} = 0.727 > r_{CDM-PAAS-DGT} = 0.709$

表3 台糖25中Cd含量与DGT提取的Cd有效态含量之间相关系数[1)]（$n=72$）

Table 3 Correlation coefficients obtained from linear regression plots of accumulations in sugarcane and DGT measurements of Cd

项目	根	茎	叶
PAAS-DGT	0.754**	0.979**	0.709**
chelex100-DGT	0.731**	0.971**	0.727**

1）**代表双尾检验 $\alpha<0.01$ 显著水平

由于当地台糖25主要用来制糖，少量用做能源底料，所以，在实际应用中，对台糖25可食部分中Cd含量的监测尤为重要，本研究分析了台糖25可食部分Cd含量与2种结合相提取的Cd含量. 如前所述，CDM-PAAS-DGT对土壤有效态Cd的提取能力显著强于chelex100-DGT，可以认为CDM-PAAS-DGT比chelex100-DGT有更好的应用效果. 但是，目前尚未见有液态结合相DGT在土壤有效态Cd含量提取的应用方面报道，而固态结合相DGT在土壤有效态Cd含量提取的应用方面已经取得了较大发展，为了进一步确定液态结合相DGT评价结果的准确有效性，本研究中做了2种结合相DGT之间的相关性分析，如图5所示. 对2种结合相的DGT提取的有效态Cd含量之间的相关关系进行简单分析，得如下关系：

chelex100-Cd = 0.55 CDMA-PAAS-DGT-Cd − 1.30

相关系数 $r=0.996$，在 $\alpha<0.01$ 显著水平下，二者极显著相关.

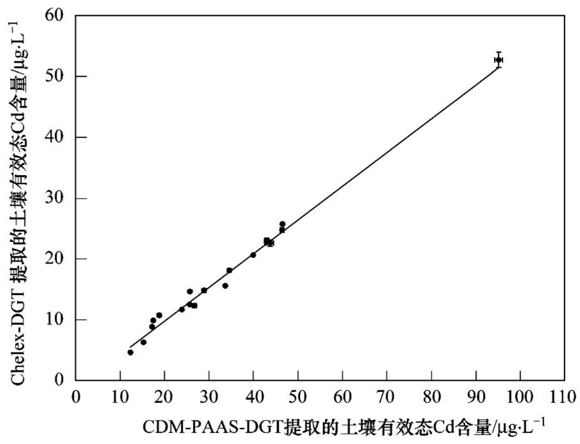

图5 2种结合相DGT提取Cd含量值相关关系

Fig. 5 Linear regression of Cd in soils analyzed by PAAS-DGT and chelex100-DGT

2.3 土壤理化指标对甘蔗中Cd含量与2种有效态Cd之间关系的影响

运用主成分分析法研究土壤理化指标pH、有机质含量、CEC和土壤黏粒含量与台糖25可食部分(茎)Cd含量之间相关性，设特征值数值为1，主成分得分方差>1的因子被保留，这些指标被提取为2种主成分因子，第一主成分和第二主成分的方差百分比分别为46.81%和25.12%，与土壤pH、OM%、CEC和土壤黏粒组成的载荷值分别为：0.89、0.40、0.90、−0.33和0.27、0.42、−0.14、0.86. 表明第一主成分与土壤pH和CEC之间相关程度较高，在本研究中定义为代表土壤中影响重金属生物有效性的“无机指标”(I)；第二主成分则与OM%和土壤黏粒组成之间相关程度较高，在本研究中定义为代表土壤中影响重金属生物有效性的“有机指标”(O).

运用逐步回归分析法分别探讨2种主成分对2种结合相提取的土壤有效态Cd含量与台糖25可食部分中Cd含量(stem-Cd)之间关系的影响，并建立多元回归模型. 2种主成分因子、DGT提取的土壤有效态Cd含量都分别与台糖25可食部分中Cd的含量之间回归极显著，对二者决定系数进行差异显著性检验，结果为无显著差异. 如方程1～2所示，2种结合相的DGT多元回归模型都包含了2种主成分因子的影响.

$$\text{stem-Cd} = 0.01\text{chelex100-DGT-Cd} - 0.30\ \mathrm{I} - 0.42\ \mathrm{O} - 0.24 \quad (R^2 = 0.97^{***}) \qquad (1)$$

$$\text{stem-Cd} = 0.006\ \text{PAAS-DGT-Cd} - 2.50\ \mathrm{I} - 0.05\ \mathrm{O} - 0.04 \quad (R^2 = 0.95^{***}) \qquad (2)$$

3 讨论

从所提取重金属含量高低来看，CDM-PAAS-DGT提取的土壤有效态Cd含量显著高于chelex100-DGT，说明以PAAS为结合相的DGT装置比以chelex100为结合相的DGT装置有着更好的结合性质，分析其原因为：液体的流动性可以使扩散相与结合相之间总是有新的官能团替代已经与金属离子结合的官能团位置. 而且，液态结合相DGT装置相较于固态结合相有以下优势：更换了机械强度较高的扩散相，测定时不需要洗脱，操作方便[24].

运用DGT提取出来的有效态可以评估土壤中Cd的有效性，表示元素的有效态同台糖25对Cd吸收相关，而不是表示DGT提取的有效态就是植物所吸收的那一部分. 而且，除了提取能力外，提取量与植物吸收累积量还需有良好的相关性，这是本研究筛选有效态Cd评价方法的目的和主要的检验

方法.

简单相关分析表明,台糖25(根、茎、叶)中 Cd 含量与 2 种结合相提取的土壤有效态 Cd 含量之间关系都是极显著相关；从相关系数来看,与茎的相关性显著强于与根和叶的. 而 Tian 等[11]研究则表明,水稻根与糙米中 Cd 含量与各分析方法提取的 Cd 含量相关系数接近,分析其原因为甘蔗属于糖料作物,含糖量较高,且植物样品成分较为复杂,生长过程中极易受虫害等各种因素影响,尤其是根际区域微生物、根系分泌物等影响了土壤中 Cd 形态的转化,而 DGT 提取态镉与交换态碳酸盐及铁锰结合态的镉存在较强的相关关系,提取的 Cd 有效态有可能受到干扰.

2 种结合相的 DGT 提取的土壤有效态 Cd 含量之间极显著相关,CDM-PAAS-DGT 部件满足在实验条件下,扩散相无性质和结构上的改变,与待测离子之间无明显作用、无吸附现象,孔径适当；PAAS 是一种合适配位 Cd 的活性基团,分子量等因素适合；其原理遵循 Fick 第一定律,回收率已被在实验室或水体中得到有效验证[16,18].

多元回归预测模型表明, 2 种结合相的 DGT 测量的土壤有效态 Cd 含量都包含了本实验所选定的土壤基本理化指标参数,考虑到了土壤 pH、有机质含量、CEC、土壤质地等土壤理化指标的影响,这与文献[25 ~ 27]的研究结果一致. 且回归关系极显著,二者模型决定系数无显著差异. 液态结合相是可以用来测定土壤 Cd 生物有效性的.

4　结论

（1）对土壤有效态 Cd 含量提取能力,CDM-PAAS-DGT 显著强于 chelex100-DGT.

（2）简单相关分析表明,2 种结合相的 DGT 提取的土壤有效态 Cd 含量与甘蔗(根、茎和叶)中 Cd 含量之间呈极显著正相关；从相关系数大小来看,与茎的相关性显著强于根和叶,同时与根和茎的相关性液态结合相强于固态结合相,而与叶的相关性则相反.

（3）多元回归预测模型表明, 2 种结合相的 DGT 技术都包含了土壤 pH、CEC、有机质和土壤质地等理化指标对土壤有效态 Cd 含量的影响,且回归关系极显著.

（4）液态结合相 DGT 技术可以应用于土壤有效态 Cd 含量的测定,能较好地预测甘蔗田土壤中 Cd 的生物有效性,扩展了其应用范围.

参考文献：

[1] Gupta A K, Sinha S. Assessment of single extraction methods for the prediction of bioavailability of metals to *Brassica juncea* L. Czern. (var. Vaibhav) grown on tannery waste contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **149**(1): 144-150.

[2] Popovic O, Almås Å R, Manojlovic M, *et al*. Chemical speciation and bioavailability of Cd, Cu, Pb and Zn in Western Balkan soils[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science, 2011, **61**(8): 730-738.

[3] Harper M P, Davison W, Zhang H, *et al*. Kinetics of metal exchange between solids and solutions in sediments and soils interpreted from DGT measured fluxes [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998, **62**(16): 2757-2770.

[4] Davison W, Zhang H. In situ speciation measurements of trace components in natural waters using thin-film gels[J]. Nature, 1994, **367**(6364): 546-548.

[5] Zhang H, Davison W. Performance characteristics of diffusion gradients in thin films for the in situ measurement of trace metals in aqueous solution[J]. Analytical Chemistry, 1995, **67**(19): 3391-3400.

[6] Li W J, Zhao H J, Teasdale P R, *et al*. Metal speciation measurement by diffusive gradients in thin films technique with different binding phases[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, **533**(2): 193-202.

[7] Zhang H, Davison W, Miller S, *et al*. In situ high resolution measurements of fluxes of Ni, Cu, Fe, and Mn and concentrations of Zn and Cd in porewaters by DGT [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, **59**(20): 4181-4192.

[8] Zhang H, Zhao F J, Sun B, *et al*. A new method to measure effective soil solution concentration predicts copper availability to plants[J]. Environmental Science and Technology, 2001, **35**(12): 2602-2607.

[9] Duquène L, Vandenhove H, Tack F, *et al*. Diffusive gradient in thin FILMS (DGT) compared with soil solution and labile uranium fraction for predicting uranium bioavailability to ryegrass [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2010, **101**(2): 140-147.

[10] Pérez A L, Anderson K A. DGT estimates cadmium accumulation in wheat and potato from phosphate fertilizer applications[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(18): 5096-5103.

[11] Tian Y, Wang X R, Luo J, *et al*. Evaluation of holistic approaches to predicting the concentrations of metals in field-cultivated rice [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(20): 7649-7654.

[12] 范洪涛, 孙挺, 薛明智, 等. 巯基改性聚乙烯醇为结合相的薄膜扩散梯度技术[J]. 分析化学, 2009, **36**(9): 1379-1381.

[13] Li W, Zhao H, Teasdale P R, *et al*. Trace metal speciation measurements in waters by the liquid binding phase DGT device [J]. Talanta, 2005, **67**(3): 571-578.

[14] 范洪涛, 隋殿鹏, 陈宏, 等. 原位被动采样技术[J]. 化学进展, 2010, **22**(8): 1672-1678.

[15] Li W J, Teasdale P R, Zhang S Q, *et al.* Application of a poly (4-styrenesulfonate) liquid binding layer for measurement of Cu^{2+} and Cd^{2+} with the diffusive gradients in thin-films technique[J]. Analytical Chemistry, 2003, **75**(11): 2578-2583.

[16] Fan H T, Sun T, Li W J, *et al.* Sodium polyacrylate as a binding agent in diffusive gradients in thin-films technique for the measurement of Cu^{2+} and Cd^{2+} in waters[J]. Talanta, 2009, **79**(5): 1228-1232.

[17] Li W, Zhao H, Teasdale P R, *et al.* Synthesis and characterisation of a polyacrylamide-polyacrylic acid copolymer hydrogel for environmental analysis of Cu and Cd[J]. Reactive and Functional Polymers, 2002, **52**(1): 31-41.

[18] 范洪涛, 孙挺, 隋殿鹏, 等. 聚丙烯酸钠为结合相的薄膜扩散梯度技术对水中重金属的选择性测量[J]. 环境化学, 2009, **28**(2): 247-250.

[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[20] Campbell K M, Root R, Day P A, *et al.* A gel probe equilibrium sampler for measuring arsenic porewater profiles and sorption gradients in sediments: I. laboratory development [J]. Environmental Science and Technology, 2008, **42**(2): 497-503.

[21] Fitz W J, Wenzel W W, Zhang H, *et al.* Rhizosphere characteristics of the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. and monitoring of phytoremoval efficiency [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(21): 5008-5014.

[22] 范洪涛,孙挺,隋殿鹏,等. 环境监测中两种原位被动采样技术—薄膜扩散平衡技术和薄膜扩散梯度技术[J]. 化学通报, 2009, **72**(5): 421-426.

[23] GB 15618-1995,国家土壤环境质量标准[S].

[24] 隋殿鹏, 孙挺, 范洪涛, 等. 薄膜扩散梯度技术-一种原位富集采样技术[J]. 化学通报, 2007, **70**(12): 954-960.

[25] Pelfrêne A, Waterlot C, Douay F. In vitro digestion and DGT techniques for estimating cadmium and lead bioavailability in contaminated soils: Influence of gastric juice pH[J]. Science of the Total Environment, 2011, **409**(23): 5076-5085.

[26] Bade R, Oh S, Shin W S, *et al.* Diffusive gradients in thin films (DGT) for the prediction of bioavailability of heavy metals in contaminated soils to earthworm (*Eisenia foetida*) and oral bioavailable concentrations [J]. Science of the Total Environment, 2012, **416**(2): 127-136.

[27] Kovarikova V, Docekalova H, Docekal B, *et al.* Use of the diffusive gradients in thin films technique (DGT) with various diffusive gels for characterization of sewage sludge-contaminated soils[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, **389**(7-8): 2303-2311.

HUANJING KEXUE

Vol. 33 No. 10

Environmental Science (monthly)

Oct. 15, 2012

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake ··· LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, *et al.* (3301)

Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau ··· XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)

Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis ··· ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, *et al.* (3314)

Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data ··· ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)

Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway ··· JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, *et al.* (3329)

Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index ··· DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, *et al.* (3336)

Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea ··· WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, *et al.* (3344)

Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae ··· YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, *et al.* (3352)

Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea ··· MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, *et al.* (3361)

Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake: A Simulation Study ··· YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, *et al.* (3368)

Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event ··· YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)

Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment ··· ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, *et al.* (3382)

Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area ··· ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, *et al.* (3390)

Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring ··· LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, *et al.* (3397)

Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan ··· ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, *et al.* (3404)

Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet ··· WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, *et al.* (3411)

Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin ··· XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, *et al.* (3417)

Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area ··· LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, *et al.* (3426)

Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin ··· NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, *et al.* (3434)

Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary ··· LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, *et al.* (3443)

Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China ··· YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)

Composition of *n*-Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators ··· YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, *et al.* (3457)

Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae ··· PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, *et al.* (3466)

Degradation of Orange Ⅳ Dye Solution Catalyzed by $Fe(NO_3)_3$-$(NH_4)_2S_2O_8$ Modified GAC in the Presence of H_2O_2 ··· ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, *et al.* (3473)

Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation ··· HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, *et al.* (3479)

Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside ··· LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, *et al.* (3484)

Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers ··· WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, *et al.* (3489)

Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation ··· JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)

Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter ··· SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, *et al.* (3501)

Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact ··· FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, *et al.* (3507)

Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation ··· ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, *et al.* (3513)

Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties ··· YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)

Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor ··· LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, *et al.* (3529)

Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity ··· CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)

Sorption of 17β-estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM ··· ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, *et al.* (3542)

Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment ··· ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, *et al.* (3547)

Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvo-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model ··· HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, *et al.* (3554)

Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polyacrylate ··· WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, *et al.* (3562)

In Situ Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants ··· TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, *et al.* (3569)

Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time: A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway ··· GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, *et al.* (3577)

Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk ··· LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, *et al.* (3585)

Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments ··· WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, *et al.* (3592)

Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals ··· TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)

Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(Ⅲ) Absorption ··· LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, *et al.* (3606)

Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in *Pseudomonas aeruginosa* ZGKD2 ··· ZHANG Yu-xiu, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, *et al.* (3613)

Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain ··· WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, *et al.* (3620)

Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain ··· SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)

Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period ··· PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, *et al.* (3634)

N_2O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain ··· PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, *et al.* (3641)

Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing ··· WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, *et al.* (3647)

Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer ··· LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, *et al.* (3656)

Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon ··· LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, *et al.* (3662)

Effect of Elevated O_3 on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean ··· WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)

Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress ··· WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, *et al.* (3675)

Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting ··· ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

环境科学
(HUANJING KEXUE)
(月刊　1976年8月创刊)
2012年10月15日　33卷　第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE
(Monthly　Started in 1976)
Vol. 33　No. 10　Oct. 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