

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建宇 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对堆好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素

王强^{1,2}, 宋娇艳^{1,3}, 曾微^{1,2}, 王法^{1,2}

(1. 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400716; 2. 重庆市农业资源与环境研究重点实验室, 重庆 400716; 3. 西南计算机有限责任公司, 重庆 400060)

摘要: 以三峡库区典型土壤——紫色土为供试土壤, 采用土柱淋溶试验方法, 研究了紫色土对受邻苯二甲酸二甲酯 (DMP) 污染水体中 DMP 的吸持作用机制与影响因素。结果表明, 抛物线方程是描述紫色土对受污染水体中 DMP 的吸持动力学的最佳方程; 淋溶液 DMP 浓度对紫色土吸持 DMP 的影响显著, 紫色土对 DMP 吸持量随着淋溶液 DMP 浓度增加呈线性增长; 淋溶液离子强度和淋溶液 pH 对紫色土吸持 DMP 的影响显著, 总体上离子强度的增加对 DMP 的吸持起到抑制作用, pH 5.0~7.0 条件下的吸持量高于其他 pH 下的吸持量。在紫色土中添加有机质增加了紫色土对 DMP 的吸持; 但当外源有机质含量过高, 超过 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 吸持量反而低于其他添加量的吸持量。在紫色土中添加表面活性剂 SDBS 增加了紫色土对 DMP 的吸持, 当 SDBS 添加量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 紫色土对 DMP 的吸持量最大, 而随着添加量的增加, 对 DMP 的吸持量虽然仍高于对照组, 但吸持量逐渐降低, 当 SDBS 添加量为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 紫色土对 DMP 的吸持量与对照接近。持续淋溶时间影响土柱中 DMP 的垂直分布, 当淋溶时间较短, 上层土壤吸持 DMP 较多, 随着淋溶时间的延长, 土柱上下层 DMP 含量逐渐接近。

关键词: 紫色土; 邻苯二甲酸二甲酯 (DMP); 淋溶; 吸持; 影响因子

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0726-08 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.02.043

Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil

WANG Qiang^{1,2}, SONG Jiao-yan^{1,3}, ZENG Wei^{1,2}, WANG Fa^{1,2}

(1. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Chongqing, Chongqing 400716, China; 3. Southwest Computer Corporation Limited, Chongqing 400060, China)

Abstract: The typical soil-purple soil in Three Gorges Reservoir was the tested soil, the characteristics of adsorption leaching of dimethyl phthalate (DMP) in contaminated water by the soil, and the influencing factors in the process were conducted using soil column leaching experiment. The results showed that the parabolic equation was the best equation describing adsorption kinetics of DMP by soils. The concentration of DMP in the leaching solution had significant effect on the adsorption amounts of DMP. With the increasing concentration of DMP in the leaching solution, the adsorption capacities of DMP by purple soil increased linearly. The ionic strength and pH in leaching solution had significant effects on adsorption of DMP. On the whole, increasing of the ionic strength restrained the adsorption. The adsorption amounts at pH 5.0-7.0 were more than those under other pH condition. The addition of exogenous organic matter (OM) in purple soil increased the adsorption amount of DMP by purple soil. However, the adsorption amount was less than those with other addition amounts of exogenous OM when the addition of exogenous OM was too high ($\geq 30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The addition of surfactant sodium dodecylbenzene sulfonic acid (SDBS) in purple soil increased the adsorption amount of DMP by purple soil. The adsorption amount was maximal when the addition amount of SDBS was $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. However, the adsorption amounts decreased with increasing addition amounts of SDBS although the adsorption amounts were still more than that of the control group, and the adsorption amount was almost equal to that of the control group when the addition amount of SDBS was $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Continuous leaching time affected the vertical distribution of DMP in the soil column. When the leaching time was shorter, the upper soil column adsorbed more DMP, while the DMP concentrations in upper and lower soil columns became similar with the extension of leaching time.

Key words: purple soil; dimethyl phthalate (DMP); leaching; adsorption; influencing factors

邻苯二甲酸酯类化合物 (PAEs) 是一类增塑剂, 具有致畸性、致突变、致癌性和较强的雌激素效应^[1-3], 由于近年来工业生产和塑料制品的大量使用, PAEs 不断进入环境, 威胁人类的健康^[4,5]。为了控制 PAEs 的污染及其危害, 美国环保署已将邻苯二甲酸二甲酯 (DMP)、邻苯二甲酸二丁酯 (DBP)、邻苯二甲酸二己酯 (DEHP) 等 6 种 PAEs 列为优先

控制的有毒污染物^[6], 我国也将 DMP 等 3 种确定为环境优先污染物^[7]。

PAEs 污染已呈现全球化的趋势, 我国土壤、沉

收稿日期: 2015-07-23; 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371211); 西南大学生态学重点学科“211 工程”建设项目

作者简介: 王强 (1970~), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为环境科学与工程, E-mail: wqiang0496@aliyun.com

积物、水环境和大气中均广泛地检出该类物质,尤其是太湖、黄河、松花江、珠江、长江等几大水域均检出了较高浓度的 PAEs 污染^[8]. 三峡库区也不例外,如长江重庆段水相中 PAEs 含量 53.2 ~ 343.0 ng·L⁻¹,部分支流如嘉陵江污染程度比长江干流更为严重,水相中 DMP、DBP、DEHP 含量分别为 35.3 ~ 292.2、13.3 ~ 66.8 和 3.5 ~ 11.7 ng·L⁻¹^[9],长江武汉段水体中 DMP、DBP、DEHP 含量分别为 0 ~ 295、14 ~ 134、11 ~ 28 ng·L⁻¹,丰、枯水期干流沉积相中 $\sum$ PAEs 含量分别高达 151.7 ~ 450.0 mg·kg⁻¹ 和 76.3 ~ 275.9 mg·kg⁻¹^[10],已具有一定的健康风险^[11]. 水-土界面是有机污染物相互作用较频繁的环境介质,是影响污染物质迁移转化归趋的重要场所,研究污染物在土-水界面的迁移转化及其机制具有重要的意义,也是目前研究的热点之一,然而对于 PAEs 在三峡库区典型土壤与水体界面的迁移转化机制的还鲜见报道. DMP, K_{ow} 远低于其他同系物,而水溶性则相反,因而 DMP 在水体和土壤之间的迁移转化作用更为强烈,研究水-土界面 DMP 的迁移转换规律对于揭示其污染机制十分必要. 基于此,前期工作中,课题组研究了 PAEs 在三峡库区土-水界面的静态迁移及其影响因素,获得了较为新颖的研究结果^[12,13];在此基础上,进一步研究 PAEs 在三峡库区土-水界面的动态迁移及其影响因素,对于全面深刻阐明 PAEs 在三峡库区土-水界面的迁移转化特征具有重要的作用. 紫色土是由紫色母岩发

育而成的幼年土,是长江上游极为重要的耕地资源,集中分布在四川省与重庆市(三峡库区)^[14],具有易受侵蚀、持水性较差等特点,与有机碳具有较为特殊的相互作用^[15]. 因而本研究以三峡库区典型土壤紫色土为供试土壤,采用土柱动态淋溶试验方法,探究紫色土对受 DMP 污染水体中 DMP 的吸持作用机制与影响因素,从土壤、水体性质及土-水界面化学性质变化等综合作用角度出发,揭示紫色土-水体 DMP 的动态迁移规律与机制及其影响因素,研究结果对于阐明三峡库区紫色土及水环境 PAEs 污染风险及其控制具有重要指导意义.

1 材料与方法

1.1 主要试剂及仪器设备

邻苯二甲酸二甲酯(成都市科龙化工试剂厂,分析纯,含量 >99.5%) 和腐殖酸(聚峰科技化学公司,上海),等级符合 Q/JFC 043-2004 标准;十二烷基苯磺酸钠(SDBS,成都市科龙化工试剂厂,含量 ≥ 90.0%) 为分析纯.

带可见紫外检测器(日本岛津,SPD-20AL)的高效液相色谱仪(日本岛津,LC-20AT),色谱柱(Inertsil ODS-SP).

1.2 土样制备

选取三峡库区典型土壤——紫色土为供试土样,去除其中的石块、树枝、落叶等杂物,自然风干,磨碎过 2 ~ 4 mm 筛后,玻璃罐中储存备用,其理化性质见表 1.

表 1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the study						
pH	有机质 /g·kg ⁻¹	胡敏酸 /g·kg ⁻¹	富里酸 /g·kg ⁻¹	CEC /cmol·kg ⁻¹	DMP /mg·kg ⁻¹	pH _{zpc}
8.32	13.97	0.56	2.98	6.13	未检出	6.83

1.3 试验方法

1.3.1 淋溶试验装置

淋溶柱 35 cm 高,直径约 5 cm,按照原位土壤容重将采集并制备好的土壤样品装入淋溶柱,每个土柱中土壤质量 800 g,土柱高约 30 cm. 装柱时每装 10 cm 土壤用适量纯水润湿土壤. 在土壤上层和底层,分别装入 1 cm 高的预先经酸洗、水洗的 10 目石英砂,并在底端石英砂上、下两层,均放 3 层纱布,以防土粒流失,并使淋溶液均匀入渗、均匀流出土壤. 试验前先使土壤达到饱和持水量,24 h 后再进行试验. 采用连续性淋溶法,淋溶液经装有调速装置的管道连续不断的流经土柱,淋溶液流速为 1.0

mL·min⁻¹,为排除土壤微生物对 DMP 的干扰,在淋溶液中加入 0.2% 的生物抑制剂 NaN₃. 在淋溶的不同时段,定期取收集滤出液,直至滤出液中 DMP 浓度相对稳定,淋溶液总体积为 5.0 L. 滤出液过 0.22 μm 的有机滤膜,以高效液相色谱法进行测定 DMP 浓度,同时测定滤出液的 pH 变化;设置 3 组平行.

1.3.2 紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及其影响因素

(1) 淋溶液 DMP 浓度对紫色土吸持 DMP 的影响. 向淋溶液中添加外源 DMP 浓度 25、50、75、100、150 mg·L⁻¹ 共 5 个水平,按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,探讨土壤对不同水平 DMP 淋溶液的

吸持能力.

(2)淋溶液离子强度对紫色土吸持 DMP 的影响.采用氯化钙电解质调节淋溶液中的离子强度(氯化钙含量)分别为:0、1、2、3、4、5 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,探讨淋溶液离子强度对紫色土吸持 DMP 作用的影响.

(3)淋溶液 pH 对紫色土吸持 DMP 性能的影响.调节淋溶液的 pH 分别为:3.0、4.0、5.0、6.0、7.0 以及原液 pH(不调节 pH),按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,探讨淋溶液的 pH 对紫色土吸持 DMP 作用的影响.

(4)紫色土有机质含量对紫色土吸持 DMP 作用的影响.在紫色土样中添加不同含量的商品腐殖酸,陈化 30 d,使土壤中外源有机质含量分别为 0、5、10、15、20、30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$.按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,探讨土壤有机质含量对吸持 DMP 作用的影响.

(5)紫色土中表面活性剂含量对紫色土吸持 DMP 的影响.在紫色土样中添加不同含量的典型表面活性剂——十二烷基苯磺酸钠(SDBS),陈化 30 d.按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,探讨土壤中活性剂 SDBS 含量对吸持 DMP 作用的影响.

(6)持续淋溶对土柱 DMP 垂直迁移的影响.淋溶液 DMP 浓度 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,其它条件不加以调节,按照 1.3.1 节的方法进行淋溶试验,分别于淋溶液总体积 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 L 时,将土柱中土壤等距分段成 5 层,并测定各土层中 DMP 含量,探讨持续淋溶对土柱 DMP 垂直迁移的影响.

1.4 水体 DMP 的测定方法

采用液-液萃取-高效液相色谱法测定水体 DMP 浓度.水样收集后,首先用玻璃砂芯抽滤装置对水样进行抽滤,然后过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的有机滤膜,清液直接上液相色谱仪进行测定.流动相: $V(\text{甲醇}):V(\text{超纯水})=80:20$,流动相流速 $1\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,检测波长 224 nm ,检测池温度 40°C ,单次进样体积 $15\text{ }\mu\text{L}$,单次运行时间 5 min .DMP 检测限为 $0.038\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$,精密度为 2.33% 加标回收率为 $84.96\% \sim 96.93\%$,符合要求.

2 结果与讨论

2.1 紫色土对 DMP 的吸持动力学特征

图 1 表明了不同 DMP 浓度淋溶液淋溶条件下,紫色土对 DMP 的吸持动力学特征.从中可以看出,该吸持反应在最初的约 10 h 的较短时间内,随着时

间的延长,吸持量增加幅度较快;当反应时间超 10 h,吸持量缓慢增加.由于反应初期,土壤上的吸持点位较多,高能点的点位也较多,当 DMP 淋溶液经过土壤时,大量 DMP 分子很快被吸持到土壤颗粒表面,并逐渐向土壤内部转移;而随着反应的进行,其吸持点位越来越少,高能点的位点数也越来越少,使得其能够吸持的量越来越少,因而吸持速率减慢,最后吸持量趋于稳定.

为了深刻描述吸持过程,采用常用动力学方程进行拟合,结果如表 2 所示,从中可以看出,方程拟合的相关性大小为: $R_{\text{抛物线}} > R_{\text{双常数}} > R_{\text{Elovich}} > R_{\text{一级动力学}} > R_{\text{二级动力学}}$,拟合效果最好的是抛物线方程,相关系数 R 均为 0.99 以上,二级动力学方程拟合效果最差.表明淋溶时间和吸持量之间不是简单的线性关系,这是由于该过程是一个复杂的物理化学过程,包括污染物的纵向迁移、横向水平扩散、溶解作用、吸持、解吸、水解、配位等反应^[16].

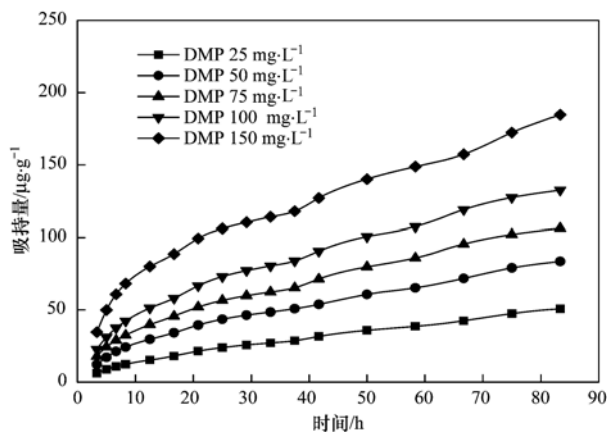


图 1 淋溶液不同 DMP 浓度吸持动力学曲线

Fig. 1 Adsorption kinetic curves of leaching solution with different concentrations of DMP

抛物线方程常用于描述离子的颗粒内扩散过程,其常数 b 可用来解释离子的表观扩散速率^[17].随着淋溶液中 DMP 浓度的增加,其 b 值逐渐减小(参见表 2),表明随着淋溶液中 DMP 浓度增加,土壤对其吸持速率将逐渐降低,即当淋溶液中 DMP 浓度增加,土柱中定量的土壤对 DMP 离子的表观扩散速率逐渐减小.原因是当土壤吸持位点有限时,溶液中 DMP 浓度越高,吸附质分子之间形成竞争吸附,分子间的碰撞也增加,而有效的吸持作用将减少,而造成表观吸持速率的降低.

2.2 淋溶液 DMP 浓度对紫色土吸持作用的影响

图 2 显示了淋溶液中不同 DMP 浓度梯度下,紫色土对 DMP 吸持量和吸持率随淋出液体积变化曲线.

表 2 紫色土对不同浓度 DMP 淋溶液吸持动力学的拟合方程¹⁾

动力学方程	DMP 浓度/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
	25	50	75	100	150
一级动力学 $\ln Q_t = \ln Q_e + kt$	$\ln Q_t = 2.18 + 2.56 \times 10^{-2}t$ ($R = 0.873\ 8$)	$\ln Q_t = 2.86 + 2.32 \times 10^{-2}t$ ($R = 0.857\ 6$)	$\ln Q_t = 3.19 + 2.20 \times 10^{-2}t$ ($R = 0.865\ 1$)	$\ln Q_t = 3.44 + 2.15 \times 10^{-2}t$ ($R = 0.858\ 6$)	$\ln Q_t = 3.89 + 1.95 \times 10^{-2}t$ ($R = 0.829\ 2$)
二级动力学 $1/Q_t = 1/Q_e + kt$	$1/Q_t = 0.13 - 1.8 \times 10^{-3}t$ ($R = 0.632\ 2$)	$1/Q_t = 0.065 - 0.9 \times 10^{-3}t$ ($R = 0.6263$)	$1/Q_t = 0.045 - 0.6 \times 10^{-3}t$ ($R = 0.643\ 7$)	$1/Q_t = 0.035 - 0.5 \times 10^{-3}t$ ($R = 0.642\ 0$)	$1/Q_t = 0.023 - 0.3 \times 10^{-3}t$ ($R = 0.607\ 0$)
Elovich 方程 $Q_t = a + b \ln t$	$Q_t = -10.84 + 11.89 \ln t$ ($R = 0.951\ 9$)	$Q_t = -14.39 + 19.34 \ln t$ ($R = 0.965\ 8$)	$Q_t = -16.32 + 24.56 \ln t$ ($R = 0.965\ 7$)	$Q_t = -19.11 + 30.63 \ln t$ ($R = 0.970\ 9$)	$Q_t = -17.76 + 40.29 \ln t$ ($R = 0.979\ 3$)
双常数方程 $\ln Q_t = a + b \ln t$	$\ln Q_t = 0.66 \ln t + 1.02$ ($R = 0.995\ 4$)	$\ln Q_t = 0.60 \ln t + 1.78$ ($R = 0.991\ 7$)	$\ln Q_t = 0.57 \ln t + 2.18$ ($R = 0.992\ 5$)	$\ln Q_t = 0.56 \ln t + 2.44$ ($R = 0.991\ 7$)	$\ln Q_t = 0.52 \ln t + 2.95$ ($R = 0.979\ 8$)
抛物线方程 $Q_t/Q_e = a + bt^{1/2}$	$Q_t/Q_e = -10.10 \times 10^{-2} + 11.52 \times 10^{-2}t^{1/2}$ ($R = 0.996\ 7$)	$Q_t/Q_e = -5.30 \times 10^{-2} + 11.22 \times 10^{-2}t^{1/2}$ ($R = 0.997\ 9$)	$Q_t/Q_e = -3.46 \times 10^{-2} + 11.21 \times 10^{-2}t^{1/2}$ ($R = 0.997\ 9$)	$Q_t/Q_e = -2.23 \times 10^{-2} + 11.15 \times 10^{-2}t^{1/2}$ ($R = 0.998\ 1$)	$Q_t/Q_e = -3.15 \times 10^{-2} + 10.38 \times 10^{-2}t^{1/2}$ ($R = 0.993\ 2$)

1) Q_t 为吸持过程任意时刻的吸持量, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; Q_e 为试验平衡时土壤对 DMP 的吸持量, $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$; t 为淋溶试验的时间, h; a 、 b 、 k 为与吸持性能有关的参数

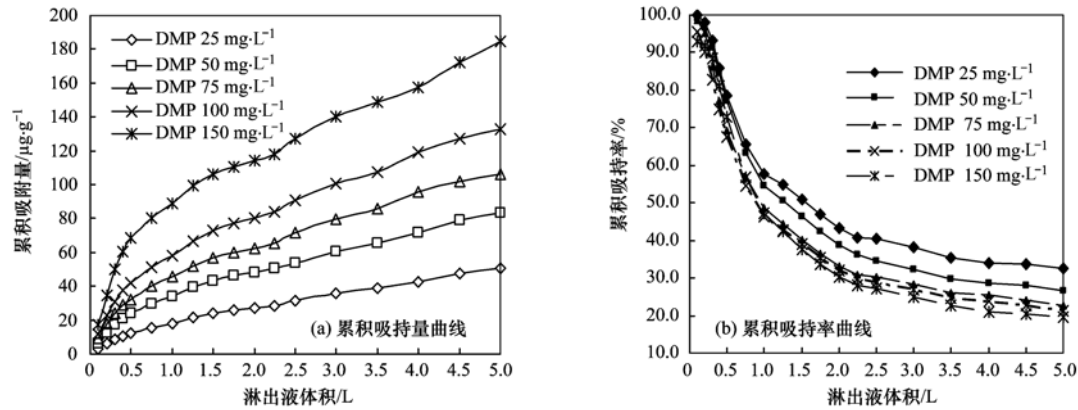


图 2 淋溶液 DMP 浓度对紫色土柱吸持 DMP 的影响

Fig. 2 Effect of DMP concentration on the adsorption of DMP in purple soil column

由图 2(a) 可知,对于不同浓度 DMP 淋溶液,当淋溶液体积在 1.0 L 以内时,随淋出液体积增加,吸持量均是先快速上升;而当淋溶液体积超过 1.0 L 以上时,吸持量慢速上升,最后当淋溶液总体积 5.0 L 时基本趋于稳定;同时可以看出,淋溶液中 DMP 浓度越高,其吸持量稳定值越高,在土壤吸持位点数不变的条件下,淋溶液 DMP 浓度越高,被土壤吸持的 DMP 分子数越多,因而吸持量越高. 图 2(b) 可知,当淋溶液体积在 1.0 L 以内时,随着淋溶液体积的增加,累积吸持率均是先快速下降;而当淋溶液体积超过 1.0 L 以上时,累积吸持率慢速下降,最后达到一个较低的吸持率而基本趋于稳定;初始淋溶液 DMP 浓度越高,累积吸持率越低,其原因是 DMP 浓度较大时,尽管绝对吸持量增加,但由于吸持量增加的比例低于浓度增加的比例,因而累积吸持率反而降低.

图 3 显示了在相同淋溶液体积,不同 DMP 淋溶浓度条件下,紫色土对 DMP 累积吸持量关系,从中可知,当淋溶液体积分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 L 条件下,累积吸持量随淋溶液 DMP 的浓度增长呈线性变化,其拟合后决定系数 R^2 高达 0.99 以上,达到极显著相关($n = 5, P = 0.01$). 说明该试验条件下,淋溶液 DMP 浓度对紫色土吸持量影响显著;当 DMP 淋溶液浓度为 $150\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,淋溶体积为 5.0 L 时,紫色土柱对 DMP 的累积吸持量为 $184.8\ \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,与张楚通过等温吸附法测定的紫色土对 DMP 的最大吸附量为 $0.193\ 0\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 十分接近^[18]. 研究结果同时表明一旦水体遭受比较严重的 DMP 污染,DMP 将会大量迁移进入紫色土,使相应的土壤遭受比较严重的 DMP 污染.

2.3 淋溶液离子强度对紫色土吸持 DMP 的影响

图 4 显示了淋溶液 DMP 浓度均为 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,

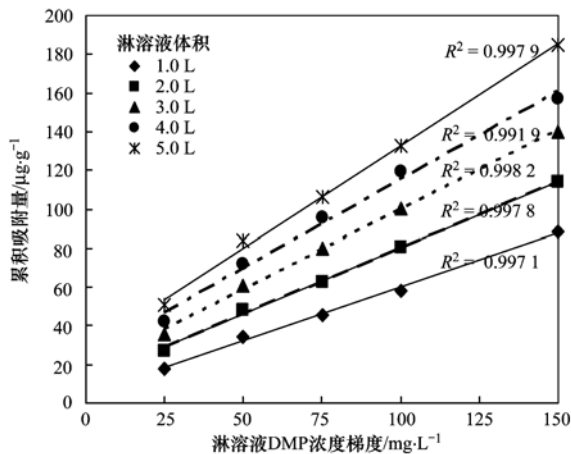


图3 淋溶液 DMP 浓度与土壤吸持量关系

Fig. 3 Relationship between concentration of DMP and adsorption by purple soil

淋溶液中离子强度对紫色土吸持 DMP 的影响. 从中可以看出,淋溶液未添加 CaCl_2 的对照组,紫色土对 DMP 的吸持量最高;当淋溶液氯化钙浓度为 $0 \sim 3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随离子强度增加吸持量减少;氯化钙浓度为 $3 \sim 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,随离子强度增加吸持量增加. 总体上一定浓度的离子强度对 DMP 的吸持起到抑制作用,原因可能包括以下 4 个方面:①支持电解质氯化钙可能对土壤胶粒双电层产生了压缩作用,影响土壤胶粒的厚度,因此对吸持作用产生了影响^[19];②氯化钙分子与 DMP 分子竞争土壤中的活性位点^[20],削弱了土壤颗粒对淋溶液中 DMP 分子的吸持作用;③氯化钙可能与土壤胶体发生离子缔合形成离子对,土壤胶体的有效浓度降低,进而导致吸持 DMP 作用的减弱,吸持量减少;④电解质的加入,可能改变体系的静电作用,减弱了土壤颗粒与 DMP 分子之间的相互作用力,因而吸持量比对照组低^[21]. 从试验结果分析当离子强度为 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,紫色土对 DMP 的吸持量是最大的,可能是上述几种原因综合的结果,即当氯化钙的添加量低于 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时或高于 $3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,其对吸持的影响较大. 离子强度对吸附的影响还有助于判断反应过程是专性吸持还是非专性吸持^[17]. 一般认为,专性吸附是土壤表面的官能团与吸附质结合形成单核或双核的络合离子基团,如果吸附量受离子强度影响较小或随离子强度的增加而上升则吸附以专性吸附为主;非专性吸附是靠吸附剂表面的物理作用力,一般随离子强度的增大吸附量减小. 因而根据离子强度对紫色土吸持 DMP 的影响来分析,紫色土对 DMP 的吸持主要是物理作用,这与前述

动力学分析结论是一致的.

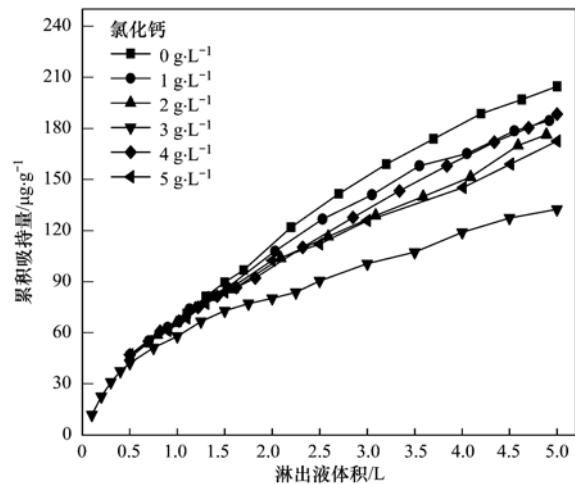


图4 淋溶液离子强度对紫色土柱吸持 DMP 的影响

Fig. 4 Effect of leaching solution ionic strengths on the adsorption of DMP in purple soil column

2.4 淋溶液 pH 对紫色土吸持 DMP 的影响

图5显示了淋溶液 DMP 浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 淋溶液 pH 对紫色土吸持 DMP 的影响特征. 从中可知,在不同 pH 下,其吸持量变化趋势一致,在快速反应阶段没有明显差异,而在反应后期淋溶液体积超过 2.0 L , pH 对吸持量存在一定的影响,大致的规律是 pH 5.0、6.0、7.0 条件下的吸持量大于 pH 为 3.0、4.0 和 7.6 的吸持量. 在反应前期,土柱自身酸碱缓冲作用较强,使得淋溶液的酸性(或碱性)离子被土壤快速中和,因而不同 pH 的淋溶液经土壤较强的缓冲作用后其酸碱性质也就较为一致,这可以从前期流出液的 pH 基本相同(数据未列出)加以证实,所以 pH 3.0~7.6 条件下,吸持反应初期 pH 对吸持量几乎没有产生影响. 而随着反应的进行,土壤缓冲性能降低,淋溶液未及时被土壤中和,所以对吸持过程产生一定的影响. $\text{pH} \leq 4$ 的酸性介质条件下,随着 H^+ 的增加,使土壤表面负电荷减少,正电荷增加,从而对 DMP 分子中的带正电荷的邻苯二甲酸离子吸持减少^[22]; H^+ 对吸持位点的竞争,也会使土壤对 DMP 的吸持量降低;碱性条件下,土粒中羧基和羟基大量离解,它们均带有负电荷,相互排斥,使土壤中有机质构型伸展,亲水性强,趋于溶解,使土壤中部分有机质向溶液迁移, DMP 分子更容易停留在水相中,因此土壤对 DMP 的吸持降低^[23]. 淋溶液在中性至弱酸性($\text{pH} 5.0 \sim 7.0$)时吸持量最大,吸持作用较强,可能的原因是供试土壤胶体电荷零点在此区间^[24],此时土壤胶体电性及电荷数量、土壤有机质构型等方面受到的影响最小,对中性

DMP 分子或正电性 DMP 离子吸附力最强, 因而吸持量较大. 经测定本试验供试土壤电荷零点为 6.83, 验证了该解释的合理性. 于爱琛等^[25]在研究有机污染物毒死蜱在土壤中的淋溶迁移时也得到了相似的结论.

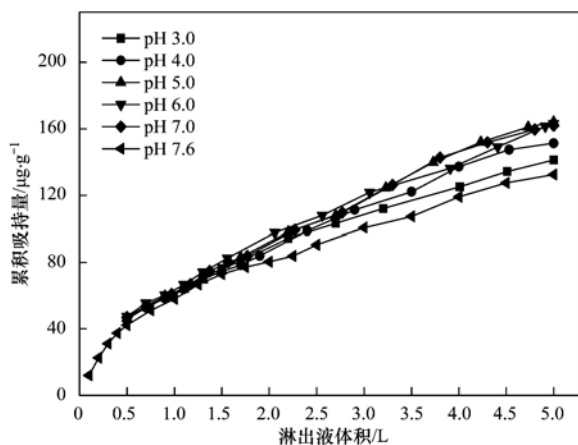


图5 淋溶液 pH 对紫色土中 DMP 累积吸持量的影响

Fig. 5 Effects of leaching solution pH on adsorption of DMP in the purple soil

2.5 紫色土有机质含量对 DMP 吸持量的影响

图6显示了淋溶液 DMP 浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在紫色土中添加不同有机质含量对吸附 DMP 的影响. 可以看出, 在紫色土中添加有机质处理的试验组吸持量均高于对照组; 当淋溶液总体积为 5 L 时, 对照组对 DMP 吸持量基本达到平衡状态, 而试验组曲线斜率依然较大, 吸持作用远未达平衡, 表明有机质的添加显著地增加了紫色土对 DMP 的吸持, 其影响达到显著水平 ($P < 0.05$). 当土壤中有机质含量低于 0.1% 时, 黏粒以及黏土矿物的含量对有机物

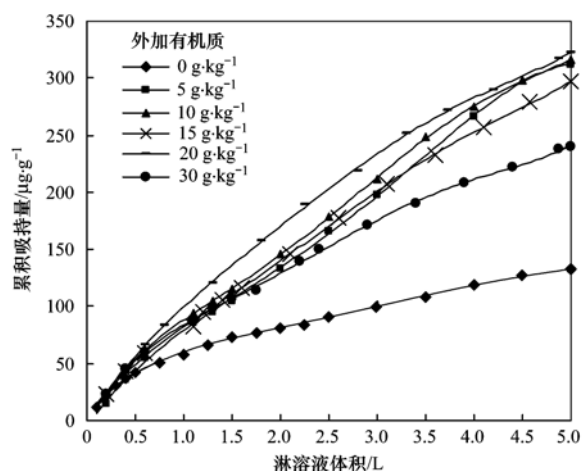


图6 土壤中有机质含量对土壤吸持 DMP 的影响

Fig. 6 Effect of organic matter contents in the soils on adsorption of DMP in the purple soil

的吸持起主要作用, 当有机质含量大于 0.1% 时, 有机质含量对土壤吸持有机污染物起主要作用, 并且对吸持影响显著^[18]. 随着土壤中有机质含量的增加, 对有机污染物的吸附位点增多, 吸持量增加. 从图6还可以看出, 当外源有机质含量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 吸持量反而低于其他添加试验组, 表明吸持量的增加并非与外源有机质添加量完全成正比. 其原因可能是当有机质添加量过高, 在土壤颗粒表面和内部分配饱和以后, 过多的有机质将溶解在淋溶液中, 反而使 DMP 分子更容易保留在淋溶液中, 因而土壤对有机污染物的吸持量反而降低.

2.6 紫色土中表面活性剂含量对吸持 DMP 的影响

图7显示了淋溶液 DMP 浓度均为 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在紫色土中添加表面活性剂 SDBS 对土柱吸持 DMP 的影响. 可以看出, 添加不同浓度的 SDBS, 紫色土对 DMP 的吸持量存在显著差异. 当 SDBS 添加量为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 紫色土对 DMP 的吸持量最大, 明显高于其他处理的吸持量, 而随着添加量的增加, 对 DMP 的吸持量虽然仍高于对照组, 但吸持量逐渐降低, 当 SDBS 添加量为 $800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 紫色土对 DMP 的吸持量与对照接近. 适量表面活性剂促进了土壤对 DMP 的吸持作用, 使得其吸持量增加, 其机制是表面活性剂的加入, 增加了 DMP 的可溶性, 使之更容易迁移进入土壤颗粒内部, 与土壤吸附位点接触, 所以导致吸持量的增加; 另一方面, 表面活性剂使土壤表观有机碳含量增加, 进而使得其对有机污染物的吸持作用增加^[26,27]. 但当土壤中表面活性剂含量太高, 紫色土对 DMP 的吸持量反而逐渐下降. 这与表面活性剂临界胶束浓度密切相关, 当 SDBS 达到临界胶束浓度时, 形成疏水基团为核心、亲水基团向外的

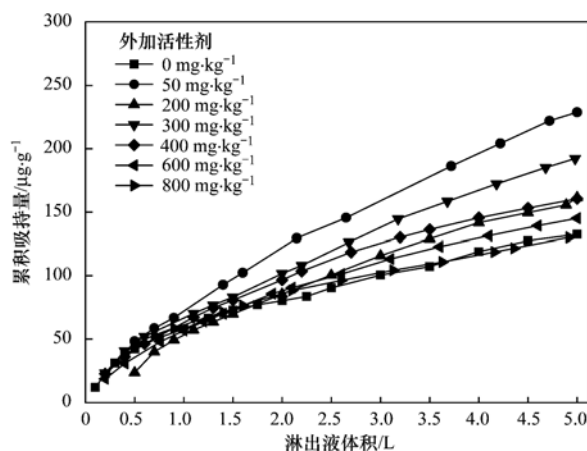


图7 表面活性剂含量对紫色土吸持 DMP 的影响

Fig. 7 Effect of surfactant contents in soils on adsorption of DMP in the purple soil

球形结构,具有最佳的增溶效果和最佳表面活性特性,可以有效地增加土壤与有机污染物之间的相互作用;而当 SDBS 含量或浓度过高,增溶效果反而降低,过多的表面活性剂分子将与有机污染物形成竞争,同时,过多的 SDBS 分子可能溶解在淋溶液中,反而使 DMP 分子更容易停留在水相中,因而土壤对有机污染物的吸持量反而降低^[28,29]。

2.7 持续淋溶对土柱 DMP 垂直迁移的影响。

图 8 显示了淋溶液 DMP 浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 条件下,淋溶液总体积分别为 1.0、2.0、3.0、4.0、5.0 L 时,土柱中 DMP 垂直分布特征。可以看出,淋溶时间长短(淋溶液总体积)大小影响土柱中 DMP 的垂直分布,当淋溶时间较短,淋溶总体积较少时,上层土壤吸持 DMP 较多,随着土壤层次的下移,土壤吸持的 DMP 逐渐减少;而随着淋溶时间的延长,淋溶总体积的增加,土柱上下层 DMP 含量逐渐接近,当淋溶液总体积 5.0 L 时,土柱中各层次 DMP 含量非常接近,没有显著的差别。这是因为随着淋溶时间的延长,淋溶总体积的增加,上层土壤吸持逐渐达到饱和,淋溶液中多余的 DMP 分子逐渐下移造成的。

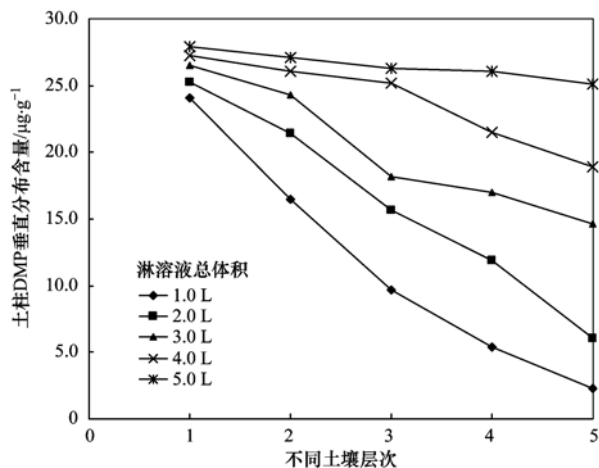


图 8 持续淋溶时间/体积对土柱 DMP 垂直迁移的影响

Fig. 8 Effect of continuous leaching time/volume on the vertical distribution of DMP in the purple soil column

3 结论

(1) 动力学试验表明抛物线方程可以较好地拟合紫色土对淋溶液中 DMP 的动态吸持过程。

(2) 淋溶液 DMP 浓度对紫色土吸持 DMP 的影响显著,土壤对 DMP 吸持量随着淋溶液 DMP 浓度增加呈线性增长。但随着淋溶液 DMP 浓度升高,紫色土对其吸持率逐渐降低。

(3) 淋溶液离子强度对紫色土吸持 DMP 的影响显著,总体上离子强度的增加对 DMP 的吸持起到

抑制作用。

(4) 淋溶液 pH 对紫色土吸持 DMP 的影响明显,pH 5.0 ~ 7.0 条件下的吸持量较大。

(5) 紫色土中添加外源有机质对紫色土吸持 DMP 的影响显著,在紫色土中添加有机质增强了紫色土对 DMP 的吸持。但当外源有机质含量过高,超过 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,吸持量反而低于其他添加量的吸持量。

(6) 紫色土中添加表面活性剂 SDBS 对紫色土吸持 DMP 影响显著,总体上 SDBS 的添加增加了紫色土对 DMP 的吸持量,但 SDBS 添加量太高,对 DMP 的吸持量逐渐降低。

(7) 持续淋溶时间长短影响土柱中 DMP 的垂直分布,当淋溶时间较短,上层土壤吸持 DMP 较多,随着淋溶时间的延长,土柱上下层 DMP 含量逐渐接近。

参考文献:

- [1] Kessler W, Numtip W, Völkel W, *et al.* Kinetics of di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) and mono (2-ethylhexyl) phthalate in blood and of DEHP metabolites in urine of male volunteers after single ingestion of ring-deuterated DEHP [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2012, **264**(2): 284-291.
- [2] Maradonna F, Evangelisti M, Gioacchini G, *et al.* Assay of vtg, ERs and PPARs as endpoint for the rapid *in vitro* screening of the harmful effect of Di-(2-ethylhexyl)-phthalate (DEHP) and phthalic acid (PA) in zebrafish primary hepatocyte cultures [J]. *Toxicology in Vitro*, 2013, **27**(1): 84-91.
- [3] Cirillo T, Fasano E, Esposito F, *et al.* Di (2-ethylhexyl) phthalate (DEHP) and di-n-butyl phthalate (DBP) exposure through diet in hospital patients [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2013, **51**: 434-438.
- [4] Han S W, Lee H, Han S Y, *et al.* An Exposure assessment of Di-(2-Ethylhexyl) phthalate (DEHP) and Di-n-butyl phthalate (DBP) in human semen [J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A: Current Issues*, 2009, **72**(21-22): 1463-1469.
- [5] Zheng Z, He P J, Shao L M, *et al.* Phthalic acid esters in dissolved fractions of landfill leachates [J]. *Water Research*, 2007, **41**(20): 4696-4702.
- [6] 莫测辉,蔡全英,吴启堂,等. 我国城市污泥中邻苯二甲酸酯的研究[J]. *中国环境科学*, 2001, **21**(4): 362-366.
- [7] 曹莹. 北京公园水环境中邻苯二甲酸酯的分析检测及污染研究[D]. 北京:北京工业大学,2008.
- [8] 刘册家,向兰,杨美华. 我国环境中邻苯二甲酸酯类分布状况研究进展[J]. *中国现代中药*, 2008, **10**(3): 37-40.
- [9] 杜炯,罗固源,许晓毅. 长江重庆段两江水相、间隙水和沉积物中邻苯二甲酸酯的分布与分配[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(2): 557-562.
- [10] 王凡,沙玉娟,夏星辉,等. 长江武汉段水体邻苯二甲酸酯

- 分布特征研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1163-1169.
- [11] 陈济安, 邱志群, 舒为群, 等. 我国水环境中邻苯二甲酸酯污染现状及其生物降解研究进展[J]. 癌变·畸变·突变, 2007, **19**(3): 212-214.
- [12] 宋娇艳, 木志坚, 王强, 等. 环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 143-150.
- [13] 王法, 王强, 木志坚, 等. 三峡库区消落带土壤邻苯二甲酸二丁酯静态释放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(7): 2453-2458.
- [14] 李太魁, 王小国, 朱波. 紫色土可溶性有机碳的吸附-解吸特征[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(4): 721-727.
- [15] 赵景波, 贺秀斌, 邵天杰. 重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J]. 土壤学报, 2012, **49**(2): 212-219.
- [16] 黄进. 模拟酸雨淋溶对土壤镉迁移的影响[J]. 淮阴师范学院学报(自然科学版), 2006, **5**(3): 223-228.
- [17] 黄艺. 酸雨条件下成都市区土壤镉的释放及固液相平衡研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [18] 张楚. 黄壤和紫色土对优先控制邻苯二甲酸酯吸附特性的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [19] 吴志坚, 刘海宁, 张慧芳. 离子强度对吸附影响机理的研究进展[J]. 环境化学, 2010, **29**(6): 997-1003.
- [20] Abate G, Masini J C. Influence of pH and ionic strength on removal processes of a sedimentary humic acid in a suspension of vermiculite [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical Engineering Aspects, 2003, **226**(1-3): 25-34.
- [21] 邹献中, 徐建民, 赵安珍, 等. 离子强度和 pH 对可变电荷土壤与铜离子相互作用的影响[J]. 土壤学报, 2003, **40**(6): 845-851.
- [22] 雷婷. 鄱阳湖南矶山湿地土壤对氮的吸附与释放特性初步研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008.
- [23] 戴树桂. 环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [24] 付春平, 钟成华, 邓春光. pH 与三峡库区底泥氮磷释放关系的试验[J]. 重庆大学学报, 2004, **27**(10): 125-127.
- [25] 于爱琛, 侯宪文, 李勤奋, 等. 毒死蜱在海南几种典型土壤中的淋溶迁移[J]. 热带农业科学, 2012, **32**(7): 63-66, 74.
- [26] 陈宝梁, 朱利中, 林斌, 等. 阳离子表面活性剂增强固定土壤中的苯酚和对硝基苯酚[J]. 土壤学报, 2004, **41**(1): 148-151.
- [27] Gullick R W, Weber W J Jr. Evaluation of shale and organoclays as sorbent additives for low-permeability soil containment barriers [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(7): 1523-1530.
- [28] 陈敏婷. 表面活性剂强化 PAHs 污染土壤微生物修复的研究进展[J]. 广东化工, 2013, **40**(8): 77-78.
- [29] 姜霞, 高学晟, 应佩峰, 等. 表面活性剂的增溶作用及在土壤中的行为[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(11): 2072-2076.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行