

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第9期

Vol.38 No.9

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

中国国道和省道机动车尾气排放特征	王人洁,王堃,张帆,高佳佳,李悦,岳涛(3553)
北偏西大风对北京冬季生物气溶胶的影响	闫威卓,王步英,Oscar Fajardo Montana,蒋靖坤,郝吉明(3561)
不同空气质量等级下环境空气颗粒物及其碳组分变化特征	方小珍,吴琳,张静,李怀瑞,毛洪钧,宋从波(3569)
大气颗粒物及降尘中重金属的分布特征与人体健康风险评价	王永晓,曹红英,邓雅佳,张倩(3575)
2014年6月南京大气复合污染观测	郝建奇,葛宝珠,王自发,张祥志,汤莉莉,徐丹卉(3585)
嘉兴市不同天气条件下大气污染物和气溶胶化学组分的分布特征	王红磊,沈利娟,唐倩,吕升,田旭东,李莉,张孝寒(3594)
应用扩散管测量霾污染期间大气氮硫化合物浓度的方法	田世丽,刘学军,潘月鹏,周焱博,许稳,王跃思(3605)
福建省地级市人为源活性氮排放及其特征分析	张千湖,高兵,黄葳,颜晓妹,崔胜辉(3610)
珠三角某高校室内灰尘重金属含量水平、来源及其健康风险评价	蔡云梅,黄涵书,任露陆,张艳林(3620)
贵金属和助剂负载量对柴油公交车 CDPF 颗粒净化性能的影响	谭丕强,仲益梅,郑源飞,楼狄明,胡志远(3628)
东营市北部海域沉积物中重金属的分布、来源及生态风险评价	刘群群,孟范平,王菲菲,崔鸿武,王曰杰(3635)
基于 MERIS 影像的洪泽湖叶绿素 a 浓度时空变化规律分析	刘阁,李云梅,吕恒,牟蒙,雷少华,温爽,毕顺,丁潇蕾(3645)
太湖蠡河小流域水质的空间变化特征及污染源解析	连慧姝,刘宏斌,李旭东,宋挺,雷秋良,任天志,武淑霞,李影(3657)
黄河高村至利津河段水体和沉积物中不同形态磷的分布特征	赵瞰,贾雁翔,姜兵琦,梅翔宇,李敏(3666)
三峡澎溪河流域消落区与岸边土壤磷形态特征	黄俊杰,王超,方博,冯磊,方芳,李哲,郭劲松(3673)
网湖沉积物正构烷烃分布特征及其记录的环境变化	沈贝贝,吴敬禄,曾海鳌,张永东,金苗(3682)
高地下水位地区透水停车场的水文控制效果	金建荣,李田,王圣思,陈子隽,周佳雯(3689)
北方典型设施蔬菜种植区地下水水质特征	于静,虞敏达,蓝艳,何小松,李敏(3696)
垃圾填埋水溶性有机物组成、演化及络合重金属特征	肖骁,何小松,席北斗,高如泰,李丹,张慧,崔东宇,袁志业(3705)
潜流人工湿地基质结构与微生物群落特征的相关性	李振灵,丁彦礼,白少元,李雪芬,游少鸿,解庆林(3713)
滑石矿开采对着生藻群落结构和水环境的影响	臧小苗,张远,林佳宁,王书平,高欣,赵茜,王靖淇(3721)
高铵条件下绿狐尾藻的生理与氮磷吸收特征	刘少博,冉彬,曾冠军,李宝珍,朱红梅,刘锋,肖润林,吴金水(3731)
活性炭吸附对藻类有机物的去除及其消毒副产物的控制	苗雨,翟洪艳,于珊珊,张婧,史常香(3738)
石墨烯凝胶电极的制备及电吸附 Pb^{2+} 的性能	王瑶,吉庆华,李永峰,胡承志(3747)
电流密度对 BDD 电极电化学矿化吡啶的影响与机制	张佳维,王婷,郑彤,蒋欢,倪晋仁(3755)
黄铁矿光化学氧化降解微囊藻毒素-LR 的机制	周薇,方艳芬,张钰,吴春红,黄应平(3762)
双氧水协同生化法强化处理印染废水	岳秀,唐嘉丽,于广平,吉世明,刘竹寒(3769)
基于 ABR-MBR 组合工艺不同进水 C/N 比对反硝化除磷性能的影响机制	吴鹏,程朝阳,沈耀良,赵诗惠,吕亮(3781)
利用好氧颗粒污泥持续增殖启动高性能亚硝化反应器	高军军,钱飞跃,王建芳,陈希,沈耀良,张泽宇,闫俞廷(3787)
零价铁自养反硝化过程活性污泥矿化及解决措施	张宁博,李祥,黄勇,张文静(3793)
低氧污泥丝状菌膨胀的呼吸图谱特征分析	马智博,李志华,杨成建,贺春博,秋亮,张晶(3801)
市政污泥接种焦化废水好氧降解能力及微生物群落演替的响应分析	刘国新,吴海珍,孙胜利,胡肖怡,吴晓英,陈华勇,范一文,胡成生,韦朝海(3807)
高效反硝化细菌的快速培养及群落结构多样性分析	孟婷,杨宏(3816)
两座污水处理系统中细胞态和游离态抗生素抗性基因的丰度特征	张衍,陈吕军,谢辉,李奥林,代天娇(3823)
生物炭对土壤 CH_4 、 N_2O 排放的影响	周凤,许晨阳,王月玲,林云,王强,张彤彤,耿增超(3831)
江西省耕地土壤碳氮比空间变异特征及其影响因素	江叶枫,郭熙,孙凯,饶磊,李婕,王澜珂,叶英聪,李伟峰(3840)
碳酸钙与生物炭对酸化菜地土壤持氮能力的影响	俞映惊,杨林章,Alfred Oduor Odindo,薛利红,何世颖,段婧婧(3851)
黄土丘陵区小流域不同整地措施长期影响下的土壤水力学特性	冯天骄,卫伟,陈利顶,陈蝶,干洋,杨磊(3860)
有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响	费佳佳,张枝焕,万甜甜,何奉朋(3871)
酸雨区不同用地类型土壤有效态 Cd 含量季节变化及关键影响因子	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,叶长城,周俊驰,雷鸣(3882)
陕西潼关冶金污染土壤的修复评价及应用潜力	王姣,肖然,李荣华,宁西翠,蒋顺成,李晓龙,张增强,沈锋(3888)
甘肃白银东大沟铅锌铜复合污染场地水泥固化稳定化原位修复	吕浩阳,费杨,王爱勤,阎秀兰,李发生,李春萍,杜延军,郑梓铭(3897)
设施栽培对土壤与蔬菜中 PAHs 污染特征及其健康风险评价	金晓佩,贾晋璞,毕春娟,王薛平,郭雪,陈振楼,仇新莲(3907)
镉-铅复合污染下 AM 真菌对玉米生长和镉、铅吸收的影响	常青,郭伟,潘亮,王起凡,周昕南,杨亮,李娥(3915)
秸秆还田对水稻镉积累及其亚细胞分布的影响	段桂兰,王芳,岑况,王伯勋,程旺大,刘跃川,张红梅(3927)
<i>Pantoea</i> sp. IMH 介导土壤中砷锑的形态转化	张林,卢金锁(3937)
生物炭对土壤中重金属铅和锌的吸附特性	王红,夏雯,卢平,布雨薇,杨浩(3944)
浒苔生物炭的特征及其对 Cr(VI) 的吸附特点和吸附机制	陈友媛,惠红霞,卢爽,王报英,王志婕,王楠(3953)
灼烧净水污泥对外源磷的吸附和固定作用	于胜楠,李勇,李大鹏,黄勇(3962)
污泥生物炭制备吸附陶粒	李杰,潘兰佳,余广炜,汪印,尤甫天,谢胜禹(3970)
石墨相氮化碳-碘氧化铋层状异质结的构建及其光催化杀菌性能	黄建辉,林文婷,谢丽燕,陈建琴(3979)
《环境科学》征稿简则(3859) 《环境科学》征订启事(3952) 信息(3644, 3688, 3768)	

有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面残留及迁移的影响

费佳佳^{1,2}, 张枝焕^{1,2*}, 万甜甜^{1,2}, 何奉朋^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249)

摘要: 为了揭示有机碳含量(TOC)对多环芳烃(PAHs)在土壤剖面中迁移的影响, 本文分析了北京地区部分典型的环境功能区(包括自然保护区、耕地、果园、农田、城区及工业区等)土壤剖面中多环芳烃和 TOC 的纵向分布特征, 结合多环芳烃化合物的土柱淋滤实验, 讨论了多环芳烃在土壤剖面上的纵向迁移特征。结果表明, 不同环境功能区土壤剖面的土壤中多环芳烃的含量存在差异, 且与 TOC 之间存在较强的正相关关系; 土柱淋滤实验结果进一步证实, 尽管具有不同 TOC 的土壤剖面中多环芳烃均可能向深层迁移, 但 TOC 对土壤剖面中多环芳烃的残留及纵向迁移能力具有重要的影响, TOC 越高, 多环芳烃富集量越大, 向下迁移量相对减少, 反之相反; 在 TOC 相同的情况下, 多环芳烃的组成或结构特征对其在土壤剖面中的残留与迁移特征有明显的影响, 淋滤水量、淋滤时间和添加 PAHs 量等对其在土壤剖面中的迁移作用也有一定影响。

关键词: 北京地区; 土壤剖面; 多环芳烃(PAHs); 有机碳含量(TOC); 迁移; 淋滤

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)09-3871-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201612264

Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles

FEI Jia-jia^{1,2}, ZHANG Zhi-huan^{1,2*}, WAN Tian-tian^{1,2}, HE Feng-peng^{1,2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China)

Abstract: The effects of total organic carbon content (TOC) on the migration of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the soil were investigated. This study analyzed the vertical properties of the concentrations and distributions of PAHs and TOC at various soil profiles from functionally different environmental regions including nature reserves, ploughs, orchards, farmlands, metropolitan areas, and industrial parks. The vertical migration properties of PAHs in soils were examined by conducting leaching experiments in soil columns. The concentrations of PAHs varied from region to region and showed strong, positive correlations with TOC in the same region. Furthermore, based on the leaching experiments, the transport abilities of PAHs were significantly influenced by TOC, although they could all be transported to the deep layers by TOC in soil columns. The downward migration of PAHs decreased with the increase in TOC and vice versa. The properties of the composition and structure of PAHs also had an obvious influence on their residues and migration in soil profiles at the same TOC conditions. In addition, the transport of PAHs was related to the amount of leaching water, the leaching time, and the additional PAHs.

Key words: Beijing area; soil column; PAHs; TOC; migration; leaching

多环芳烃(PAHs)为含至少 2 个苯环的烃类化合物,相当一部分可致癌、致畸、致突变^[1~7]。多环芳烃可存在于大气、水、土壤及植物等各种介质中,土壤是多环芳烃赋存的主要载体^[2, 8~10]。PAHs 进入土壤后,大部分残留在土壤中并可能受降水和灌溉等过程影响向更深部渗透从而影响到地下水,同时 PAHs 的强亲脂性使其易被富含有机质的土壤吸附,或通过食物链进入人体,对人类健康和生态环境造成不同程度的危害^[11~17],研究土壤中多环芳烃残留特征及其迁移规律对于土壤和地下水保护具有重要意义,同时更关乎到人类健康。

目前国内外很多学者对土壤中多环芳烃进行了研究,结合已有报道^[1, 18~22]及本课题组前期研究成果^[23~26]综合分析表明,不同功能区土壤剖面土壤中

多环芳烃的含量及其分布特征存在不同程度的差异,但主要分布在土壤表层 30~40 cm 以内,40 cm 深度以下含量迅速降低;有机碳含量(TOC)作为反映土壤有机质含量和质量的重要指标^[27],多环芳烃的这种分布特征与其分布有着密切的关系^[2, 22, 28, 29],因此大多数学者认为,由于受土壤中 TOC 影响,PAHs 主要分布在土壤表层。但根据野外土壤剖面多环芳烃的纵向分布特征及土柱淋滤模拟实验结果分析^[24, 25, 30, 31],发现尽管多环芳烃主要富集于剖面表层 30 cm 的范围内,但并不能说明没有

收稿日期: 2016-12-30; 修订日期: 2017-04-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(41373126)

作者简介: 费佳佳(1987~),女,博士研究生,主要研究方向为环境地质地球化学, E-mail: flisa0107@163.com

* 通信作者, E-mail: zhangzh3996@vip.163.com

向深层迁移. 理论上讲,土壤中 PAHs 一般在土壤有机质与孔隙水之间分配,只要到达分配平衡,且 TOC 不变,分布在土壤有机质中 PAHs 的含量就不会增加,如果有外界新的 PAHs 输入,一旦超过土壤的最大容量,必然会向深层迁移,由此推测,PAHs 主要富集在土壤表层或次表层,没有向深部迁移只是假象,需要做进一步分析. 另外,也有报道指出,PAHs 含量未必随 TOC 变化而变化^[22],或者只有当 PAHs 含量达到一定值,如 $2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时,才有较好的对应关系^[32],这也说明了在 PAHs 含量未达到土壤可容纳 PAHs 的最高含量之前,与 TOC 之间不存在正相关关系,只有达到最高含量后 PAHs 含量与 TOC 之间才存在正相关关系. 这同样可以推测,如果 TOC 与 PAHs 含量之间存在正相关关系,土壤中的 PAHs 在有机质与孔隙水之间已达到分配平衡状态,若有新的污染源输入,过量的 PAHs 将有可能向深部迁移. 本论文的研究目的旨在为论证上述推测的合理性打下基础. 此外,如果 TOC 一定时,在具有一定源强度的环境条件下,就有可能存在 PAHs 含量的限量值,由此可知,在污染比较严重的地区,

只要 PAHs 污染源强度较大,PAHs 就有可能向深层迁移,从而污染地下水,因此目前主要根据土壤中残留 PAHs 含量来研究 PAHs 在环境介质中分配与归宿是存在缺陷的,还需同时考虑进入深层地下水中的 PAHs 的量.

为了揭示有机碳含量对多环芳烃在土壤剖面迁移过程中的影响,本文分析了北京地区部分典型的环境功能区(包括自然保护区、耕地、果园、农田、城区及工业区等)土壤剖面中 PAHs 和 TOC 及其纵向分布特征,结合多环芳烃化合物的土柱淋滤实验,讨论了多环芳烃在土壤剖面上的纵向迁移特征.

1 材料与方法

1.1 样品采集

野外土壤剖面样品分别采自北京地区不同功能区(包括郊区公路附近、自然保护区、农田耕地、果园、三环内城区及工业区等),剖面位置及基本信息见图 1(B1 ~ B10)和表 1;用于土柱淋滤实验的土壤样品分别采自门头沟、密云和昌平,采样点(采样剖面)的分布位置见图 1 中 MTG、MY 和 CP.

表 1 北京各环境功能区采样点信息
Table 1 Information of all the sampling sites in each functional district in Beijing

采样点	周边环境	污染情况	功能区划分
B1	延庆县永宁镇东南 5 km 山坡上	一定程度污染	郊区公路附近
B2	密云水库旁 7 km 山坡上	多年无人干扰	自然保护区
B3	昌平区西三旗立汤路旁	有污灌历史	耕地
B4	昌平区崔村镇,几十年柿子园(村有资产)	农药化肥很少	果园
B5	顺义区山里辛庄,十几年李子树园(个人承包)	农药化肥较多	果园
B6	大兴区李村,其旁都是大片农田	河水灌溉,井水灌溉	农田
B7	南三环边花乡镇城区绿地,周边繁华	空气质量明显不佳	三环内城区
B8	通州区,其旁都是大片农田	有污灌历史	农田
B9	昌平区沙河南一村	污灌史,现井水灌溉	农田
B10	房山区燕山石化下风处的小山坡上	常年受石化厂污染	工业区
MTG	门头沟斋堂镇马兰村(N:39°56'; E: 115°41')		
MY	密云不老屯镇永乐村(N:40°32'; E:117°01')		
CP	昌平区天通苑(N:40°05'; E:116°23')		

B1 ~ B10 及 MTG、MY、CP 剖面采样深度均为 100 cm,均进行分层依次采集,各点具体采样深度为:0 ~ 5、5 ~ 10、10 ~ 15、15 ~ 20、20 ~ 25、25 ~ 30、30 ~ 40、40 ~ 50、50 ~ 75、75 ~ 100 cm. 采出的土壤样品,在现场去除树叶、根茎及石块等杂物,装袋并做好标记,再带回实验室处理. 剖面 MTG、MY、CP 样品中 TOC 的分布特征如图 2 所示.

1.2 淋滤实验及样品分析

1.2.1 土柱充填

淋滤实验土柱长度为 100 cm, MTG、MY、CP

这 3 条土柱按照原剖面依次分层填土,由深及浅,每 5 cm 土柱作为一个小段分层,每层容重一致,以免土壤非均质影响溶质迁移过程,且确保最大程度与原土壤剖面的一致性. 用于填土的玻璃柱顶部和底部均用滤纸和玻璃球做铺垫,以保证水流均匀且方便及时排出. 土柱中所添加的模拟 PAHs 污染物如表 2 所示,并对 MTG 和 CP 剖面进行了空白淋滤实验. 具体步骤为:分别选取 MTG、MY、CP 这 3 个剖面 0 ~ 5 cm 原土约 300 g,贴好标签,再分别取一定量模拟污染物,用二氯甲烷溶解后,分别加入到相

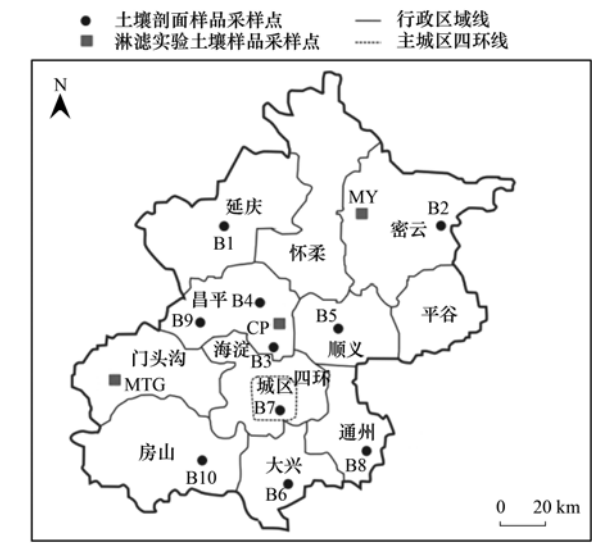


图 1 北京地区土壤剖面采集点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling sites in Beijing area

应土柱的原土样品中,搅拌混匀,放置48 h后,待二氯甲烷基本挥发干净,将已添加PAHs模拟污染物

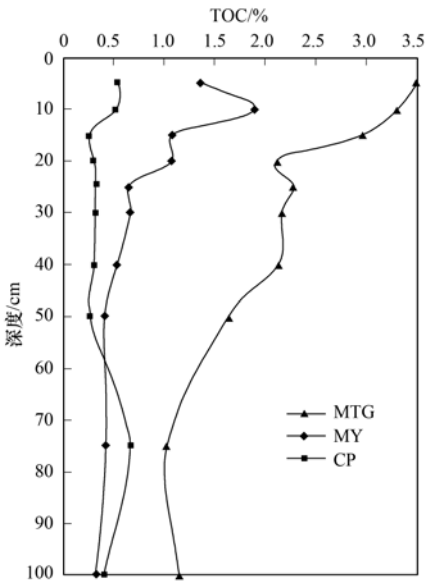


图 2 用于淋滤实验的 3 条土壤剖面 TOC 分布趋势
Fig. 2 Change in TOC of the three soil columns for leaching experiments with depth

表 2 淋滤实验土柱充填方式及添加模拟污染物情况表

Table 2 Packing mode of soil and the addition of simulated pollutants in leaching experiment						
采样点	土柱编号	所选土样	淋滤量/mL	淋滤时间/d	相当于自然降水量的时间/a	添加的污染物
MTG	MTG1	剖面	2 940	10	1	模拟 PAHs 污染物 ¹⁾
	MTG2	剖面	8 820	30	3	
	MTG3	剖面	14 700	50	5	
	MTG	剖面	8 820	30	3	空白
MY	MY1	剖面	2 940	10	1	模拟 PAHs 污染物
	MY2	剖面	8 820	30	3	
	MY3	剖面	14 700	50	5	
CP	CP1	剖面	2 940	10	1	模拟 PAHs 污染物
	CP2	剖面	8 820	30	3	
	CP3	剖面	14 700	50	5	
	CP	剖面	8 820	30	3	空白

1) 模拟污染物 9 种：菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、䓑、苯并[b]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[ghi]芘

土壤填装到对应土柱 0~5 cm 土层,填柱完成.

土柱装好后用 pH 值约为 6.6 的去离子水由上而下慢速淋滤使其达到饱和状态^[25, 33]. 饱和后设定流量计尽可能保持以 1 mL·min⁻¹左右速率淋滤, MTG、MY 和 CP 剖面均分别选取了 10、30 和 50 d 的淋滤时间,对应淋滤水量也依次增大,达到拟定淋滤量后,停止淋滤,放置 3 d 使柱内水分排至近自然状态,再进行后续分析. 模拟实验装置及具体淋滤实验过程可参见文献[34].

1.2.2 样品处理及分析

将所有分层采集的野外剖面土壤样品(B1~B10、MTG、MY、CP)带回实验室后,在室内自然风干,研磨过 2 mm 筛. 从中取部分样品研磨均匀

过 100 目筛进行 TOC 分析,剩余土样进行索氏抽提,将抽提物进行分离及 GC-MS 分析. 对于经过土柱淋滤实验的土壤样品,淋滤实验结束后,拆开土柱,分层切割土体(由上而下按照深度 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~30、30~40、40~50、50~75 及 75~100 cm 依次切割),将切割的各层土样自然风干,分层进行索氏抽提,再进行 GC-MS 分析.

(1) 索氏抽提及分离

取研磨过 100 目筛后的土样 150 g 左右,装入已抽提滤纸筒中,每个土柱随机选取 3~4 个样品加入回收率指示剂氘代菲、氘代䓑及氘代芘各 2 μg (各加入 100 μL,浓度均为 20 μg·mL⁻¹),放置到索

氏抽提器上抽提 36 h. 溶剂采用二氯甲烷: 甲醇(7: 1, 体积比)混合溶液, 加入活化铜片脱硫, 抽提液先经蒸发浓缩至 5 mL, 用二氯甲烷多次洗涤转移至称量瓶中, 自然条件下挥发至近干后放入干燥器内, 待试剂挥发完全后用衡重法定量, 并用传统的硅胶/氧化铝层析柱分离得到饱和烃、芳烃和非烃^[11]. 再将装有芳烃组分的称量瓶在室温(小于 40℃)下自然挥发近干后放入干燥器中, 待溶剂完全挥发后用衡重法定量, 转移至 5 mL 刻度量管中, 之后加入内标物氘代三联苯待 GC-MS 分析.

(2) 气相色谱-质谱(GC-MS)分析

气相色谱质谱(GC-MS)分析采用安捷伦气相色谱-质谱联用仪(Agilent 6890-5975). 检测条件为: ①色谱条件: 采用 HP-5MS 弹性石英毛细柱(60 m × 0.25 mm × 0.25 μm)色谱柱, 载气为 99.999% 的氦气, 流速设定为 1 mL·min⁻¹, 进样口温度设定为 300℃, 采用不分流进样方式; 升温程序初温设置在 80℃, 保持 1 min 后, 以 3℃·min⁻¹ 的速度升温至 310℃, 保持 16 min, 至样品完全流出色谱柱. ②质谱条件: EI 电流源设置在 70 eV, 倍增器电压设定为 2 400 V, 离子源温度为 230℃, 四极杆温度为 150℃, 色谱与质谱的传输线温度均设定为 280℃, 采用选择离子和全扫描同时采集数据方式.

(3) 定量分析及质量控制

利用内外标结合法定量, 外标选用 16 种优控 PAHs 标准物质混标, 内标为氘代三联苯. 将外标配成 6 种不同质量浓度(0.5、1、2、3、6 和 10 μg·mL⁻¹), 并加入 0.6 μg 内标物后, 进行 GC-MS 分析. 根据分析结果做出各物质在不同质量浓度下的回归曲线, 判断是否存在线性关系, 确定数据可信度. 此外, 根据 3 种回收率指示剂与氘代三联苯的峰面积比以及样品中加入的已知氘代三联苯的质量可得到回收率指示剂的绝对量, 结合抽提前加入的质量可得到氘代菲、氘代蒽及氘代芘回收率. 不同质量浓度下回归曲线均呈线性关系, 回归系数为 0.941 6 ~ 0.996 6, 平均值为 0.984 5, 判断数据可信度高. 同时得到氘代菲、氘代蒽及氘代芘回收率分别为 42.45% ~ 130.55%、46.35% ~ 146.9%、52.77% ~ 120.73%, 平均值分别为 76.26%、89.54%、82.71%, 回收率较高.

2 结果与讨论

2.1 土壤剖面 PAHs 与 TOC 的关系

从 B1 ~ B10 这 10 个剖面中选取了 6 个有代表

性的剖面, 其中 B2 采自自然保护区、B3 采自耕地、B4 采自果园、B6 采自农田、B7 采自三环以内城区以及 B10 采自工业区(见图 1 和表 1). 不同土壤剖面中 PAHs 含量和 TOC 均有随深度增大而减小的趋势, 且二者的变化趋势十分一致, 如图 3 所示, 在表层 0 ~ 30 cm 左右不同剖面 PAHs 含量及 TOC 均明显降低, 之后逐渐趋于稳定. 不同剖面表层土中 TOC 和 PAHs 含量均存在较明显的差别, 且表层土中 TOC 较高的剖面 PAHs 含量也明显偏高, 如剖面 B10 表土 TOC 最高, 接近 4%, PAHs 含量也相对较大, 约为 0.7 μg·g⁻¹; 在深部, 不同剖面 TOC 均不高, PAHs 含量也随之降低, 但仍然可观察到, TOC 较高的剖面, 深层土壤中 PAHs 含量也相对较高, 如剖面 B6 在 15 ~ 20 cm 处 TOC 出现小幅增加, 且接近 1%, PAHs 含量也随之增加至约 0.22 μg·g⁻¹, 其他剖面有类似特点, B3 剖面在 50 cm 之后 TOC 相对其他点略高, 接近 0.4%, PAHs 含量也同样较高, 达 0.025 μg·g⁻¹. 剖面 B7 浅层 PAHs 最高可能与污染源有关, 但浅层和深层 PAHs 含量变化特征与 TOC 变化高度一致.

6 个不同剖面中, 不同环数多环芳烃(包括三环的蒽和菲, 四环的蒽、荧蒽和芘, 五环的苯并[a]芘和苯并[b]荧蒽及六环的苯并[a]芘)的含量在土壤剖面中均有随深度增大而降低的变化趋势, 且这种变化趋势与 TOC 的变化趋势接近(图 4). 在剖面深部 TOC 较高的土层中 PAHs 的含量也相对较高, 如剖面 B6 在 20 cm 处土壤中 TOC 小幅增加, 而单体多环芳烃在此深度也有类似变化趋势; 剖面 B7 在 10 cm 处 TOC 出现峰值, 而各单体 PAHs 含量同样在此深度达到最大, 二者之间具有明显的对应关系, 这进一步说明土壤中 TOC 对 PAHs 的分布有着明显的影响.

上述分析表明, 土壤剖面中多环芳烃的含量与 TOC 之间存在较好的正相关关系, 不同单体多环芳烃的含量分布除与 TOC 有关外, 与其自身的组成及结构也存在一定相关性. 本文将通过土柱中 PAHs 淋滤过程的实验室模拟研究, 进一步讨论 PAHs 在土壤剖面纵向上的迁移、滞留作用及与 TOC 的关系.

2.2 表层添加污染物的土柱淋滤过程中 PAHs 含量与 TOC 的相关性

2.2.1 表层土(0 ~ 10 cm)中 PAHs 与 TOC 的相关性

由于在淋滤土柱表层(0 ~ 5 cm)土壤中人工添加的 PAHs 含量比原土中 PAHs 含量均高出 2 ~ 3 个数量级(表 3), 因此原土中多环芳烃对淋滤实验结果的影响基本可忽略.

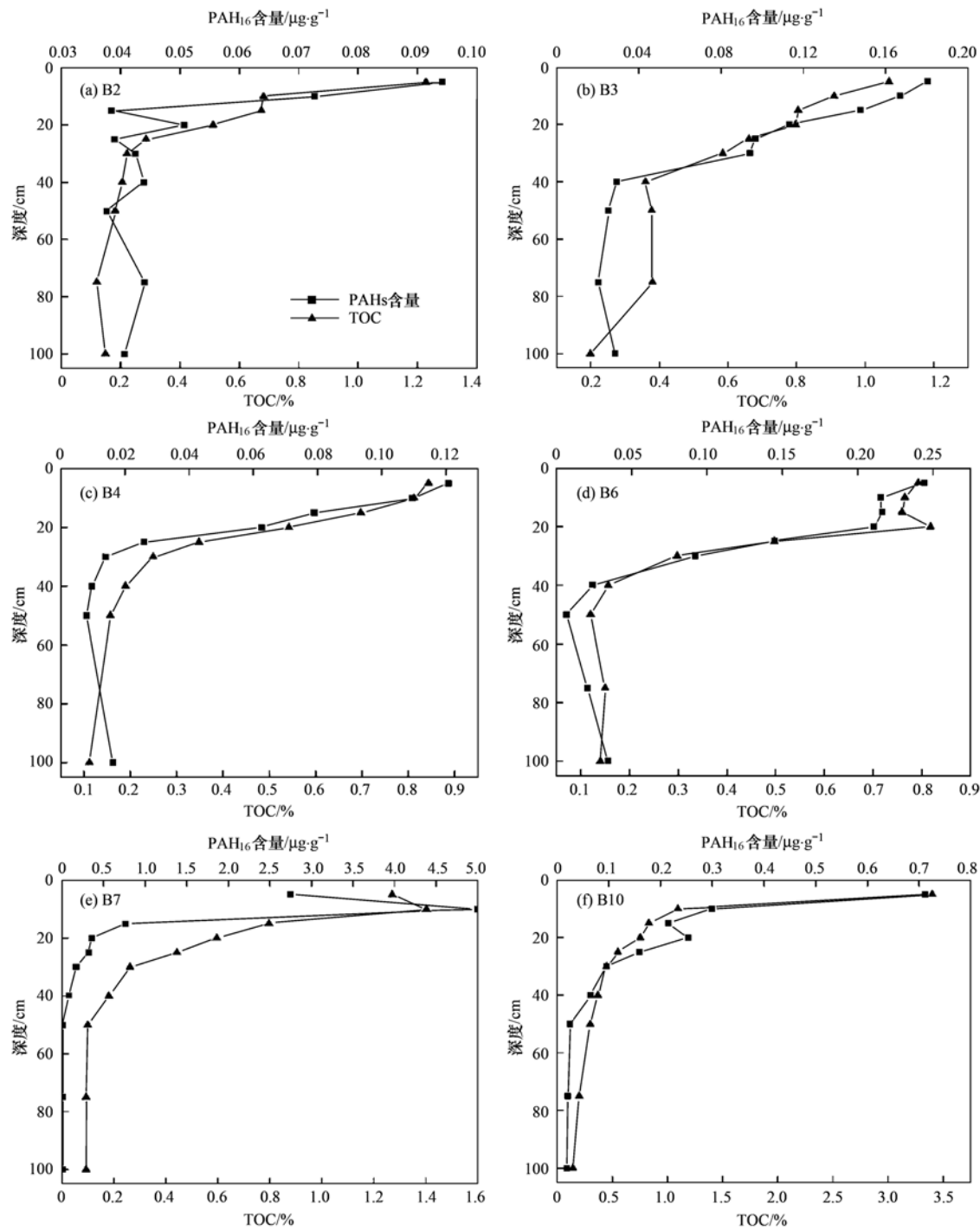
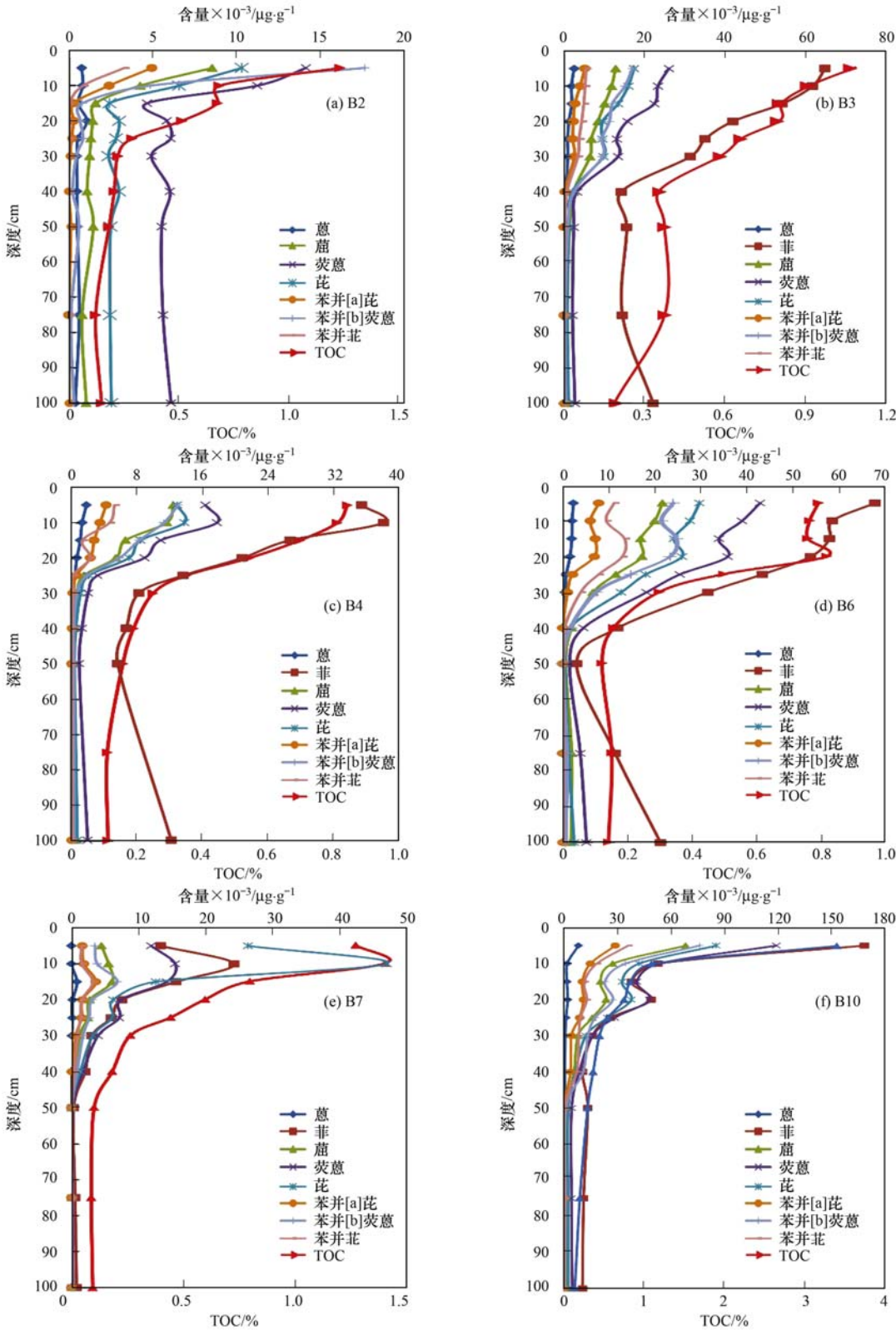


图3 不同功能区 16 种优控 PAHs 总量与 TOC 含量随深度变化趋势
Fig. 3 Change in PAH₁₆ and TOC with depth in different functional districts

表 3 不同剖面表层 0 ~ 5 cm 人工添加 PAHs 含量及淋滤后剩余量¹⁾

Table 3 Total content of artificially added PAHs and the residual quantity after leaching in the layer of 0-5 cm									
剖面	MTG1	MTG2	MTG3	MY1	MY2	MY3	CP1	CP2	CP3
原土/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	0.270 2	0.270 2	0.270 2	0.002 4	0.002 4	0.002 4	0.060 3	0.060 3	0.060 3
添加量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	201.50	186.50	213.25	155.67	153.00	164.33	182.83	196.50	210.93
剩余量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	38.18	37.68	34.75	38.19	20.99	19.40	29.32	22.07	27.92
残留率	0.19	0.20	0.16	0.25	0.14	0.12	0.16	0.11	0.13

1) 残留率为剩余量与添加量的比值



(e) 中 0~5 cm 及 5~10 cm 菲含量数值为原数值的十分之一

图 4 不同功能区各单体 PAH 与 TOC 含量随深度变化趋势

Fig. 4 Change in individual PAH and TOC with depth in different functional regions

经过淋滤实验后,所有土柱表层(0~5 cm)土壤中 PAHs 含量均明显降低,淋滤前后含量差在 100

~200 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间(表 3、图 5),表明通过淋滤,PAHs 均发生了向下迁移,但不同土柱迁移量存在

差异. 相应残留率见表 3,其大小明显受到有机碳含量的控制,如 CP 剖面土壤中 TOC 最低,多环芳烃总体残留率也最低; MTG 剖面土壤中 TOC 最高,多环芳烃总体残留率也较高; MY 剖面土壤中 TOC 居中,多环芳烃残留量介于二者之间,表明 TOC 对 PAHs 的迁移有明显的影响,TOC 越高,对总体多环芳烃吸附能力增强,多环芳烃迁移能力降低,残留量增大,反之相反. 此外,淋滤水量也是影响迁移的一个重要因素,在 TOC 相同的情况下,随水量增加,淋滤前后差值也发生变化(表 3、图 5).

MY、MTG 和 CP 三组土柱中 TOC 均随深度增大而降低(图 2),且土柱浅层土壤中的 TOC 明显高于深层的,因此针对浅层 0 ~ 5 和 5 ~ 10 cm 深度段

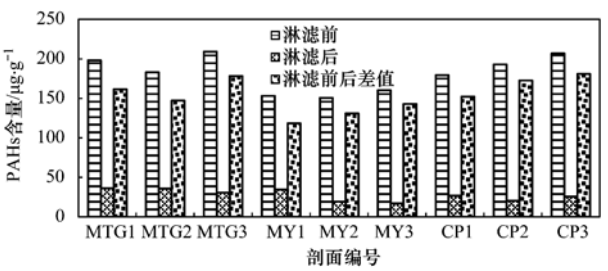


图 5 表层 0 ~ 5 cm 人工加入污染物(9 PAHs)淋滤前后含量变化

Fig. 5 Contents of artificially added nine PAHs before and after leaching in the layer of 0-5 cm

土壤中单体多环芳烃的残留情况进行了探讨. 各土柱表层土(0 ~ 5 cm)中加入的单体多环芳烃含量如表 4 所示.

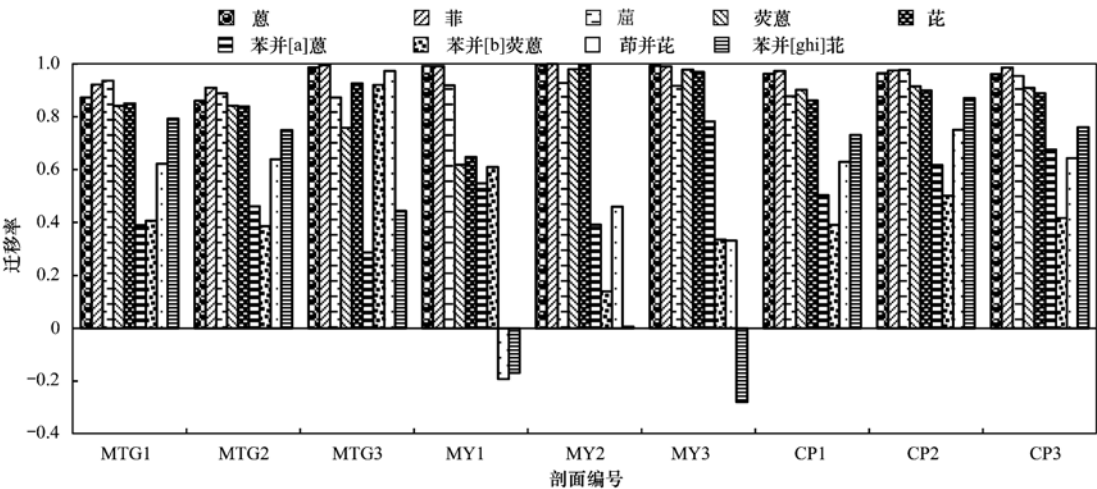
表 4 表层 0 ~ 5 cm 所添加的各单体 PAH 含量

Table 4 Content of each added PAH in the layer of 0-5 cm

化合物名称	表层添加多环芳烃的含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$								
	MTG1	MTG2	MTG3	MY1	MY2	MY3	CP1	CP2	CP3
蒽	31	27	33.33	34	25.67	33.33	30	37.33	30.67
菲	30.33	30.67	28.67	25.67	23.33	27.33	35.67	31.67	32.67
䓛	30.67	21	30.67	20.67	22	22	23.33	30.67	28.67
荧蒽	29	27	27	26.67	28.67	28.67	27.67	28	39
芘	37.33	40	45.67	25	27.67	25.67	25.67	25	32.67
苯并[a]蒽	12.67	10.33	11.33	10.33	11.33	11.33	10	13.33	10.67
苯并[b]荧蒽	9	9	10.8	5	5	4	9	9	10.8
茚并[1,2,3-cd]芘	7.05	7.05	8.46	2	2	3	7.05	7.05	8.46
苯并[ghi]芘	11.1	11.1	13.3	4	5	5	11.1	11.1	13.32

淋滤实验后,各土柱表层土(0 ~ 5 cm)中不同环数多环芳烃的残留和迁移情况如图 6 所示. 根据图 6、图 2 和表 4 综合分析表明,TOC 对淋滤过程中单体 PAHs 的迁移结果有显著影响,但不同分子量

的多环芳烃迁移作用存在明显差异. 对于 TOC 较低的土柱(如 CP 土柱),通过短时间的淋滤作用,蒽、菲、䓛、荧蒽、芘等相对低分子量的多环芳烃大部分被淋滤出土柱剖面,之后迁移量几乎不受淋滤



迁移率为淋滤实验前后多环芳烃含量差与淋滤前含量的比值

图 6 淋滤土柱表层土中(0 ~ 5 cm)不同环数多环芳烃的迁移率

Fig. 6 Transport rate of PAHs with different rings in the layer of 0-5 cm of leaching soil columns

时间的变化而变化;但苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒽、茚并[1,2,3-c,d]芘、苯并[ghi]花等相对高分子量的多环芳烃迁移量明显低于前者,即表明若迁移率相同,则高分子量多环芳烃所需淋滤时间更长. 对于 TOC 中等的土柱(MY),上述低分子量多环芳烃的迁移也存在差异,若迁移率相同,蒽、菲、蒹所需的迁移时间相对荧蒽、芘要短,且各 PAHs 迁移率均低于 TOC 较低的 CP 剖面;淋滤时间相同时,高分子量的茚并芘、苯并[ghi]花等化合物相对迁移量明显低于 CP 剖面. MTG 土柱的 TOC 最高,相对于其他两个土柱,在相同的淋滤条件下,不同环数的多环芳烃在土柱表层的残留量均明显偏高,即迁移率明显偏低,尤其是高环数的多环芳烃. 在 TOC 和淋滤水量相同的情况下,不同单体 PAHs 的迁移率也存在明显的差别,其中菲及四环的蒹、荧蒽、芘迁移率最高,均在 80% 以上;茚并芘和苯并[ghi]花次之,为 60% ~ 80% 之间;苯并[a]蒽和苯并[b]荧蒽的迁移率相对最低,一般小于 60%.

综上所述,各单体多环芳烃在土壤表层向下的迁移过程明显受到 TOC 的影响,TOC 越高,土壤有机质对多环芳烃的吸附(分配作用)能力越强,在相同的淋滤条件下,多环芳烃的迁移能力越差. 不同环数多环芳烃迁移能力也存在差异,蒽、菲、蒹、荧蒽及芘的迁移率较大,苯并[a]蒽和苯并[b]荧蒽偏低,茚并芘和苯并[ghi]花居中,但总体来说,低中环 PAHs 的绝对迁移量要高于高环 PAHs,表明外界添加 PAHs 量对迁移的影响. 此外,淋滤水量对多环

芳烃在土壤剖面中的迁移效率也存在相关性.

5 ~ 10 cm 土层中多环芳烃含量基本均在 $1 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以下,比表层土壤中被淋滤迁移量低一个数量级,可见由表层土壤中向下迁移的多环芳烃大部分没有在该层残留,而是进一步向下迁移至深层(见图 7). 由图 7 中可以看出,随着淋滤时间和淋滤水量的增加,MTG 剖面和 CP 剖面 5 ~ 10 cm 土层中多环芳烃的总残留量均呈现增多的趋势,而 MY 剖面则呈现相反的趋势. 分析其原因为,MY 剖面 5 ~ 10 cm 土层中 TOC 比 0 ~ 5 cm 高(见图 2),因此对多环芳烃的吸附能力增强,吸附量增大,迁移速率相对表层较慢,因此推测在 MY1 中多环芳烃吸附残留量最多,但随着淋滤时间的增长,又不断向下迁移,总量不断减少直至达到平衡状态,而其余两个剖面该层 TOC 均低于表层,迁移速率相对表层较快,因此大量由表层迁移至该层的多环芳烃很快迁移至深层,但也有小部分残留,随淋滤时间增加,残留量不断累积增大,直至平衡. 此外,总得来看,低环的蒽、菲残留量低,迁移量较高,高环的茚并芘和苯并[ghi]花迁移量居中,中高环的荧蒽、芘、苯并[b]蒽及苯并[b]荧蒽残留量较高,迁移量偏低,与 0 ~ 5 cm 情况基本类似,推测与外界加入多环芳烃含量多少有关.

由此可见,该层多环芳烃的含量除与 TOC 有关外,还受淋滤时间和水量的影响,各层多环芳烃总量是表层向下的迁移量与该层向下迁移量的综合作用结果. 不同环数单体多环芳烃随淋滤时间及水量的

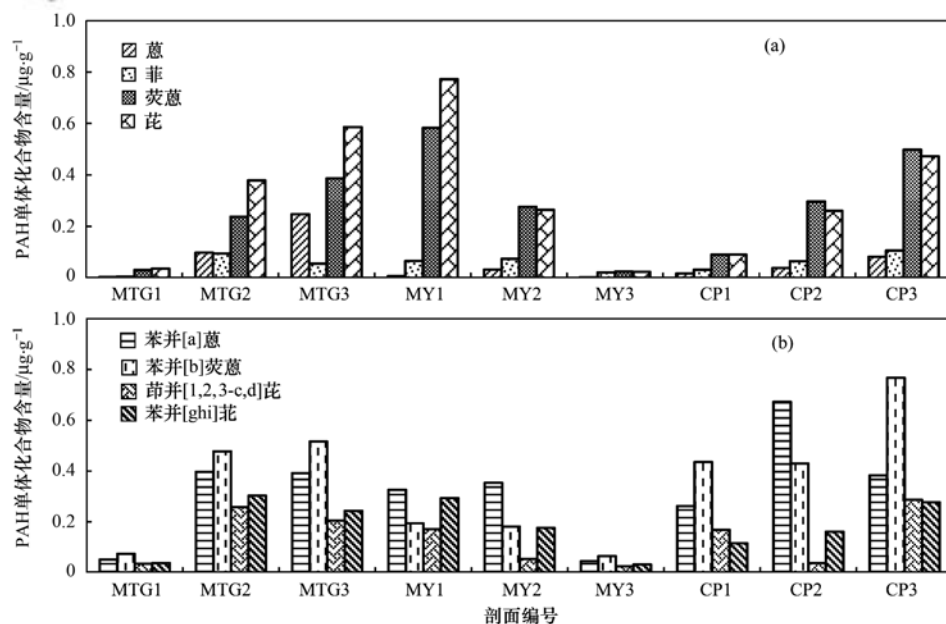


图 7 淋滤实验后 5 ~ 10 cm 土层中不同环数多环芳烃含量分布特征

Fig. 7 Content of PAHs with different rings in the layer of 5-10 cm after leaching

不同,也呈现一定的差异,但基本与 0~5 cm 段各单体多环芳烃迁移量变化情况一致。

2.2.2 深层土(15~100 cm)PAHs 与 TOC 的相关性

选取了 TOC 较高的 MTG 剖面 and TOC 较低的 CP 剖面分析 PAHs 含量在 15~100 cm 深度段的分布特征。

空白及外界添加污染物的土柱中 9 种 PAHs (菲、蒽、荧蒽、芘、苯并[a]蒽、䓛、苯并[b]荧蒽、茚并[1,2,3-cd]芘、苯并[ghi]芘)总量及随深度的变化特征如图 8 所示,从中可以看出,20 cm 以上浅层添加污染物土柱中 9 种 PAHs 总量略高于空白土柱淋滤后总量,分析这是由于 10~20 cm 土壤 TOC 相对深层土壤较高(图 2),对多环芳烃吸附量略增,20~30 cm

以下前者含量均低于后者,而 2.2.1 节中已表明添加的污染物在 10 cm 以上保留量相对较少,大部分已向下迁移至深层,由此表明由浅层迁移至下的多环芳烃并未在深层(15~100 cm)保留住,甚至原土中的多环芳烃也有部分被淋滤出土柱。分析这主要是原土剖面 20~100 cm 土样中 TOC 很低造成,由于 TOC 含量低,土壤对多环芳烃吸附能力明显降低,多环芳烃已经达到吸附平衡,难以被进一步吸附。此外,从图中可以看出,MTG 剖面 9 种 PAH 总量淋滤前后变化率相对 CP 剖面要小,而 MTG 剖面 TOC 高于 CP 剖面,这也进一步说明了土柱深层土壤吸附多环芳烃的能力也明显受到土壤中 TOC 的影响。

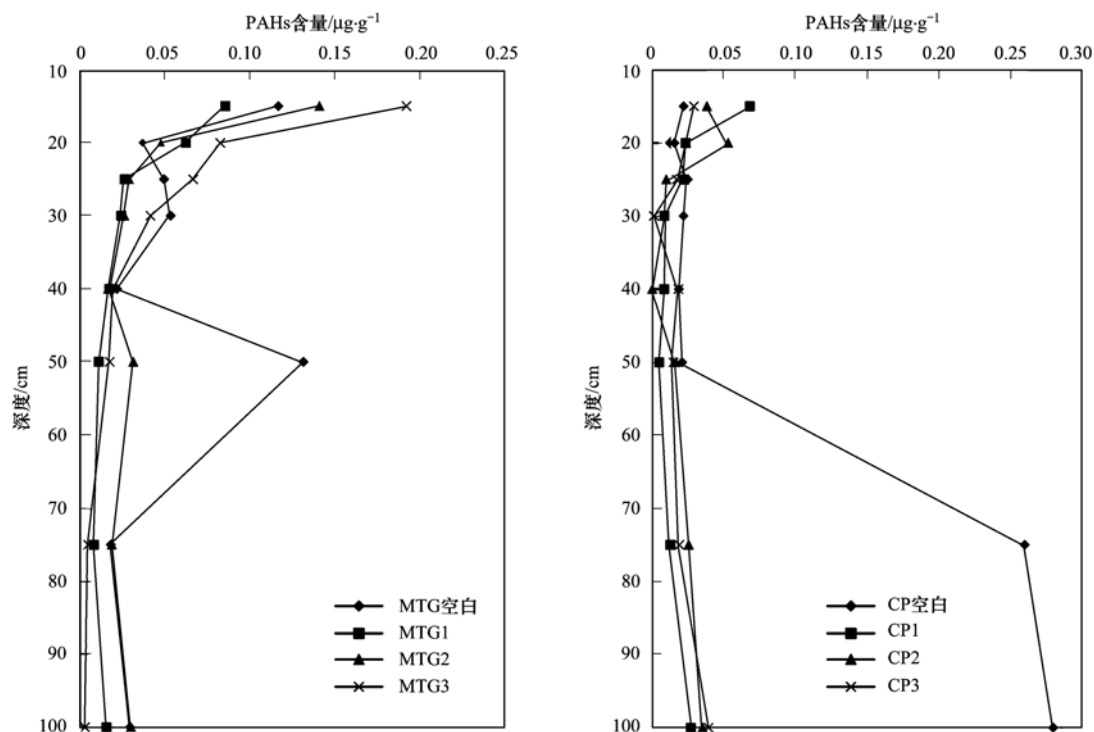


图 8 MTG 及 CP 空白土柱及添加污染物土柱淋滤后 15~100 cm 土壤剖面 9 种多环芳烃总量随深度变化特征

Fig. 8 Content of PAHs of MTG, CP blank soil column, and columns added PAHs after leaching in the layer of 15-100 cm

综上所述,从表层迁移至下的多环芳烃,在剖面深层土壤中的残留量也明显受到 TOC 的影响,TOC 越高,土壤中多环芳烃残留量越高,反之相反。

3 结论

(1)不同功能区土壤剖面中 PAHs 的含量及其分布特征存在不同程度的差异,这种差别主要受土壤中 TOC 的影响,且不同多环芳烃化合物在土壤中的残留量受 TOC 的影响程度不同;在 TOC 相同的情况下,土壤剖面中不同的多环芳烃化合物含量存在明显差别,主要与多环芳烃的组成或结构特征

有关。

(2)多环芳烃土柱淋滤实验结果进一步证实,尽管具有不同 TOC 的土壤剖面中多环芳烃均可能向深层迁移,但 TOC 对土壤剖面不同深度层次土壤中多环芳烃的残留及纵向迁移能力都具有重要的影响,土壤中 TOC 越高,多环芳烃富集量越大,向下迁移量相对减少,反之相反。此外,淋滤水量也是影响多环芳烃在土壤剖面中迁移效率的重要因素。

(3)在相同的淋滤条件下,多环芳烃的组成或结构特征对其在土壤剖面中的残留与迁移特征有明显的影响,其中蒽、菲、䓛、荧蒽及芘的迁移能力较

强,苯并[a]蒽和苯并[b]荧蒽等化合物迁移能力偏低,茚并芘和苯并[ghi]芘等化合物的迁移能力居中。

致谢:重点实验室朱雷及师生宝老师在实验中提供指导,李鹏、丁玥在采样和实验方面提供帮助,万云洋老师在论文作图方面提供帮助,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] Jones K C, Stratford J A, Waterhouse K S, *et al.* Organic contaminants in welsh soils; polynuclear aromatic hydrocarbons [J]. *Environment Science & Technology*, 1989, **23**(5): 540-550.
- [2] Agarwal T. Concentration level, pattern and toxic potential of PAHs in traffic soil of Delhi, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **171**(1-3): 894-900.
- [3] Jenkins B M, Jones A D, Turn S Q, *et al.* Emission factors for polycyclic aromatic hydrocarbons from biomass burning [J]. *Environment Science & Technology*, 1996, **30**(8): 2462-2469.
- [4] Sims R C, Overcash M R. Fate of polynuclear aromatic compounds (PNAs) in soil-plant systems[A]. In: Gunther F A, Gunther J D (Eds.). *Residue Reviews: Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment*[C]. New York: Springer, 1983. 1-68.
- [5] Xue W L, Warshawsky D. Metabolic activation of polycyclic and heterocyclic aromatic hydrocarbons and DNA damage: a review [J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2005, **206**(1): 73-93.
- [6] White P A, Rasmussen J B, Blaise C. Genotoxic substances in the St. Lawrence system I: industrial genotoxins sorbed to particulate matter in the St. Lawrence, St. Maurice, and Saguenay rivers, Canada [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1998, **17**(2): 286-303.
- [7] 万云洋, 杜卫东. 土壤和沉积物石油类污染防治方法与技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017. 4-5.
Wan Y Y, Du W D. New approaches and technologies for prevention and control of petroleum-contaminated soils and sediments[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017. 4-5.
- [8] Wild S R, Jones K C. Polynuclear aromatic hydrocarbons in the United Kingdom environment: a preliminary source inventory and budget[J]. *Environmental Pollution*, 1995, **88**(1): 91-108.
- [9] Zhang H B, Luo Y M, Wong M H, *et al.* Distributions and concentrations of PAHs in Hong Kong soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, **141**(1): 107-114.
- [10] Gocht T, Ligouis B, Hinderer M, *et al.* Accumulation of polycyclic aromatic hydrocarbons in rural soils based on mass balances at the catchment scale[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2007, **26**(4): 591-600.
- [11] 张枝焕, 卢另, 贺光秀, 等. 北京地区表层土壤中多环芳烃的分布特征及污染源分析[J]. *生态环境学报*, 2011, **20**(4): 668-675.
Zhang Z H, Lu L, He G X, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds in topsoil of Beijing, China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, **20**(4): 668-675.
- [12] Maliszewska-Kordybach B. Persistent organic contaminants in the environment: PAHs as a case study[A]. In: Baveye P, Block J C, Goncharuk V V (Eds.). *Bioavailability of Organic Xenobiotics in the Environment* [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1999. 3-34.
- [13] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(7): 1278-1284.
- [14] Vaessen H A M G, Schuller P L, Jekel A A, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in selected foods; analysis and occurrence [J]. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 1984, **7**(4): 297-324.
- [15] Paterson S, Mackay D. A model illustrating the environmental fate, exposure and human uptake of persistent organic chemicals [J]. *Ecological Modelling*, 1989, **47**(1-2): 85-114.
- [16] Xu P J, Tao B, Ye Z Q, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations, compositions, sources, and associated carcinogenic risks to humans in farmland soils and riverine sediments from Guiyu, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, **48**: 102-111.
- [17] Zhang J, Fan S K, Du X M, *et al.* Accumulation, allocation, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil-*Brassica chinensis* System[J]. *PLoS One*, 2015, **10**(2): e0115863.
- [18] Guggenberger G, Pichler M, Hartmann R, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in different forest soils: mineral horizons [J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 1996, **159**(6): 565-573.
- [19] Wilcke W, Müller S, Kanchanakool N, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in hydromorphic soils of the tropical metropolis Bangkok[J]. *Geoderma*, 1999, **91**(3-4): 297-309.
- [20] Krauss M, Wilcke W, Zech W. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in forest soils: depth distribution as indicator of different fate[J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110**(1): 79-88.
- [21] Chen J, Wang X J, Hu J D, *et al.* Modeling surfactant LAS influenced PAHs migration in soil column[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2006, **176**(1-4): 217-232.
- [22] Xiao R, Du X M, He X Z, *et al.* Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Hunpu wastewater-irrigated area in northeast China under different land use patterns [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **142**(1-3): 23-34.
- [23] 张枝焕, 王学军, 陶澍, 等. 天津地区典型土壤剖面多环芳烃的垂向分布特征[J]. *地理科学*, 2004, **24**(5): 562-567.
Zhang Z H, Wang X J, Tao S, *et al.* Vertical distribution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbon compounds from various soil profiles of Tianjin[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, **24**(5): 562-567.
- [24] 何奉朋, 张枝焕, 汪淑洁. 多环芳烃在土壤剖面中迁移行为的土柱淋滤模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(5): 988-996.
He F P, Zhang Z H, Wang S J. Modeling vertical migration characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in soil columns by leaching[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(5): 988-996.
- [25] 万甜甜. 土壤中多环芳烃纵向迁移及生物降解过程的分异作

- 用研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2014. 41-80.
- Wan T T. Differentiation study on the vertical migration and biodegradation progress of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2014. 41-80.
- [26] 卢松. 北京地区典型土壤剖面多环芳烃化合物纵向分异特征及成因机理[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2006. 54-82.
- [27] 杜卫东, 万云洋, 曾勇, 等. 土壤石油污染环境容量的评估与模拟研究[J]. 油气田环境保护, 2012, 22(2): 6-10.
- Du W D, Wan Y Y, Zeng Y, *et al.* Evaluation and simulation research on soil environmental capacity of petroleum pollution [J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2012, 22(2): 6-10.
- [28] 焦文涛, 吕永龙, 王铁宇, 等. 化工区土壤中多环芳烃的污染特征及其来源分析[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 1166-1172.
- Jiao W T, Lü Y L, Wang T Y, *et al.* Characteristics and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface soil from chemical industrial areas [J]. Environmental Science, 2009, 30(4): 1166-1172.
- [29] Rombolaà A G, Meredith W, Snape C E, *et al.* Fate of soil organic carbon and polycyclic aromatic hydrocarbons in a vineyard soil treated with biochar [J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(18): 11037-11044.
- [30] 陈静, 王学军, 陶澍, 等. 天津地区土壤多环芳烃在剖面中的纵向分布特征[J]. 环境科学学报, 2004, 24(2): 286-290.
- Chen J, Wang X J, Tao S, *et al.* Vertical distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils in Tianjin area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2004, 24(2): 286-290.
- [31] He F P, Zhang Z H, Wan Y Y, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in soils of Beijing and Tianjin region: vertical distribution, correlation with TOC and transport mechanism [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(5): 675-685.
- [32] Simpson C D, Mosi A A, Cullen W R, *et al.* Composition and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon contamination in surficial marine sediments from Kitimat Harbor, Canada [J]. Science of the Total Environment, 1996, 181(3): 265-278.
- [33] 何奉朋. 多环芳烃在土壤剖面上迁移行为的土柱淋滤模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2008. 20-22.
- He F P. Modeling migration characteristics of PAHs in soil columns with leaching method[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2008. 20-22.
- [34] 曾丽. 有机碳含量对土壤剖面中多环芳烃残留作用的影响及模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016. 18-20.
- Zeng L. Study on the effect of total organic carbon on the vertical migration of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils by simulation experiment [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016. 18-20.

CONTENTS

Emission Characteristics of Vehicles from National Roads and Provincial Roads in China	WANG Ren-jie, WANG Kun, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3553)
Impact of Gustly Northwesterly Winds on Biological Particles in Winter in Beijing	YAN Wei-zhuo, WANG Bu-ying, Oscar Fajardo Montana, <i>et al.</i> (3561)
Characteristics of Particulate Matter and Carbonaceous Species in Ambient Air at Different Air Quality Levels	FANG Xiao-zhen, WU Lin, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (3569)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric Particulate Matter and Dust	WANG Yong-xiao, CAO Hong-ying, DENG Ya-jia, <i>et al.</i> (3575)
Observational Study of Air Pollution Complex in Nanjing in June 2014	HAO Jian-qi, GE Bao-zhu, WANG Zi-fa, <i>et al.</i> (3585)
Distribution Characteristics of Air Pollutants and Aerosol Chemical Components Under Different Weather Conditions in Jiaxing	WANG Hong-lei, SHEN Li-juan, TANG Qian, <i>et al.</i> (3594)
Observations of Reactive Nitrogen and Sulfur Compounds During Haze Episodes Using a Demuder-based System	TIAN Shi-li, LIU Xue-jun, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> (3605)
Analysis of Anthropogenic Reactive Nitrogen Emissions and Its Features on a Prefecture-level City in Fujian Province	ZHANG Qian-hu, GAO Bing, HUANG Wei, <i>et al.</i> (3610)
Levels, Sources, and Health Risk Assessments of Heavy Metals in Indoor Dust in a College in the Pearl River Delta	CAI Yun-mei, HUANG Han-shu, REN Lu-lu, <i>et al.</i> (3620)
Influence of Noble Metal and Promoter Capacity in CDPF on Particulate Matter Emissions of Diesel Bus	TAN Pi-qiang, ZHONG Yi-mei, ZHENG Yuan-fei, <i>et al.</i> (3628)
Spatial Distribution, Source and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Coastal Sediments of Northern Dongying City	LIU Qun-qun, MENG Fan-ping, WANG Fei-fei, <i>et al.</i> (3635)
Remote Sensing of Chlorophyll-a Concentrations in Lake Hongze Using Long Time Series MERIS Observations	LIU Ge, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (3645)
Analysis of Spatial Variability of Water Quality and Pollution Sources in Lihe River Watershed, Taihu Lake Basin	LIAN Hui-shu, LIU Hong-bin, LI Xu-dong, <i>et al.</i> (3657)
Distribution of Different Phosphorus Species in Water and Sediments from Gaocun to Lijin Reaches of the Yellow River	ZHAO Tun, JIA Yan-xiang, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (3666)
Characterization of Phosphorus Fractions in the Soil of Water-Level-Fluctuation Zone and Unflooded Bankside in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	 HUANG Jun-jie, WANG Chao, FANG Bo, <i>et al.</i> (3673)
Distribution of <i>n</i> -alkanes from Lake Wanghu Sediments in Relation to Environmental Changes	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZENG Hai-ao, <i>et al.</i> (3682)
Hydrological Performance Assessment of Permeable Parking Lots in High Water Areas	JIN Jian-rong, LI Tian, WANG Sheng-si, <i>et al.</i> (3689)
Analysis of the Characteristics of Groundwater Quality in a Typical Vegetable Field, Northern China	YU Jing, YU Min-da, LAN Yan, <i>et al.</i> (3696)
Composition, Evolution, and Complexation of Dissolved Organic Matter with Heavy Metals in Landfills	XIAO Xiao, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3705)
Correlations Between Substrate Structure and Microbial Community in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Zhen-ling, DING Yan-li, BAI Shao-yuan, <i>et al.</i> (3713)
Impact of Talc Ore Mining on Periphyton Community Structure and Water Environment	ZANG Xiao-miao, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (3721)
Physiological Characteristics and Nitrogen and Phosphorus Uptake of <i>Myriophyllum aquaticum</i> Under High Ammonium Conditions	LIU Shao-bo, RAN Bin, ZENG Guan-jun, <i>et al.</i> (3731)
Removal of Algal Organic Matter and Control of Disinfection By-products by Powder Activated Carbon	MIAO Yu, ZHAI Hong-yan, YU Shan-shan, <i>et al.</i> (3738)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of Graphene Hydrogels Electrode	WANG Yao, JI Qing-hua, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (3747)
Influence of Current Densities on Mineralization of Indole by BDD Electrode	ZHANG Jia-wei, WANG Ting, ZHENG Tong, <i>et al.</i> (3755)
Mechanism of Photochemical Degradation of MC-LR by Pyrite	ZHOU Wei, FANG Yan-fen, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3762)
Enhanced Treatment of Printing and Dyeing Wastewater Using H ₂ O ₂ -Biochemical Method	YUE Xiu, TANG Jia-li, YU Guang-ping, <i>et al.</i> (3769)
Effects of Influent C/N Ratios on Denitrifying Phosphorus Removal Performance Based on ABR-MBR Combined Process	WU Peng, CHENG Chao-yang, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (3781)
Start-up of a High Performance Nitrosation Reactor Through Continuous Growth of Aerobic Granular Sludge	GAO Jun-jun, QIAN Fei-yue, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3787)
Activated Sludge Mineralization and Solutions in the Process of Zero-Valent Iron Autotrophic Denitrification	ZHANG Ning-bo, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3793)
Analysis of Respirogram Characteristics of Filamentous Bulking Caused by Low Dissolved Oxygen	MA Zhi-bo, LI Zhi-hua, YANG Cheng-jian, <i>et al.</i> (3801)
Aerobic Degradation and Microbial Community Succession of Coking Wastewater with Municipal Sludge	LIU Guo-xin, WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, <i>et al.</i> (3807)
Rapid Culture, Microbial Community Structure, and Diversity of High-Efficiency Denitrifying Bacteria	MENG Ting, YANG Hong (3816)
Abundance of Cell-associated and Cell-free Antibiotic Resistance Genes in Two Wastewater Treatment Systems	ZHANG Yan, CHEN Lü-jun, XIE Hui, <i>et al.</i> (3823)
Effect of Biochar on CH ₄ and N ₂ O Emissions from Lou Soil	ZHOU Feng, XU Chen-yang, WANG Yue-ling, <i>et al.</i> (3831)
Spatial Variability of C-to-N Ratio of Farmland Soil in Jiangxi Province	JIANG Ye-feng, GUO Xi, SUN Kai, <i>et al.</i> (3840)
Influence of Calcium Carbonate and Biochar Addition on Soil Nitrogen Retention in Acidified Vegetable Soil	YU Ying-liang, YANG Lin-zhang, Alfred Oduor Odindo, <i>et al.</i> (3851)
Comparison of Soil Hydraulic Characteristics Under the Conditions of Long-term Land Preparation and Natural Slope in Longtan Catchment of the Loess Hilly Region	 FENG Tian-jiao, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3860)
Effects of Organic Carbon Content on the Residue and Migration of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil Profiles	 FEI Jia-jia, ZHANG Zhi-huan, WAN Tian-tian, <i>et al.</i> (3871)
Major Factors Influencing the Cd Content and Seasonal Dynamics in Different Land Cover Soils in a Typical Acid Rain Region	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (3882)
Application Potential and Assessment of Metallurgical Contaminated Soil After Remediation in Tongguan of Shaanxi	WANG Jiao, XIAO Ran, LI Rong-hua, <i>et al.</i> (3888)
Effects and Mechanisms of In-situ Cement Solidification/Stabilization on a Pb-, Zn-, and Cd-Contaminated Site at Baiyin, China	LÜ Hao-yang, FEI Yang, WANG Ai-qin, <i>et al.</i> (3897)
Concentrations and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Soils and Vegetables influenced by Facility Cultivation	 JIN Xiao-pei, JIA Jin-pu, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (3907)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Uptake of La and Pb by Maize Grown in La and Pb-Contaminated Soil	CHANG Qing, GUO Wei, PAN Liang, <i>et al.</i> (3915)
Effects of Straw Incorporation on Cadmium Accumulation and Subcellular Distribution in Rice	DUAN Gui-lan, WANG Fang, CEN Kuang, <i>et al.</i> (3927)
Redox Transformation of Arsenic and Antimony in Soils Mediated by <i>Pantoea</i> sp. IMH	 ZHANG Lin, LU Jin-suo (3937)
Adsorption Characteristics of Biochar on Heavy Metals (Pb and Zn) in Soil	WANG Hong, XIA Wen, LU Ping, <i>et al.</i> (3944)
Characteristics of <i>Enteromorpha prolifera</i> Biochars and Their Adsorption Performance and Mechanisms for Cr(VI)	CHEN You-yuan, HUI Hong-xia, LU Shuang, <i>et al.</i> (3953)
External Phosphorus Adsorption and Immobility with the Addition of Ignited Water Purification Sludge	YU Sheng-nan, LI Yong, LI Da-peng, <i>et al.</i> (3962)
Preparation of Adsorption Ceramsite Derived from Sludge Biochar	LI Jie, PAN Lan-jia, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (3970)
Construction of Graphitic Carbon Nitride-Bismuth Oxyiodide Layered Heterostructures and Their Photocatalytic Antibacterial Performance	 HUANG Jian-hui, LIN Wen-ting, XIE Li-yan, <i>et al.</i> (3979)