

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究	苗红妍, 温天雪, 王丽, 李杏茹, 王跃思	(1225)
鼎湖山 PM ₁₀ 中水溶性离子浓度特征分析	赵亚南, 王跃思, 温天雪, 刘全	(1232)
北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征	黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 王跃思	(1236)
深圳市 PM ₁₀ 化学组成与时空分布特征	云慧, 何凌燕, 黄晓峰, 兰紫娟, 李响, 曾立武	(1245)
福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究	易志刚, 黄幸然, 毕峻奇, 郭萍萍, 郑丽丽	(1252)
河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征	丁中原, 毛潇萱, 马子龙, 田慧, 郭强, 黄韬, 高宏, 李军, 张干	(1258)
淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算	薛文博, 王金南, 杨金田, 雷宇, 燕丽, 贺晋瑜, 韩宝平	(1264)
香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析	黄文敏, 朱孔贤, 赵玮, 余博识, 袁希功, 冯瑞杰, 毕永红, 胡征宇	(1270)
变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响	赵微, 林健, 王树芳, 刘记来, 陈忠荣, 寇文杰	(1277)
基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析	邓欧平, 孙嗣咏, 吕军	(1284)
西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探	郭威, 李祥忠, 刘卫国	(1291)
滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应	郭怀成, 向男, 周丰, 王永华, 李发荣, 朱翔, 毛国柱, 于书霞, 李娜, 盛虎, 杨永辉, 何成杰, 王翠榆	(1298)
三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算	牛凤霞, 肖尚斌, 王雨春, 刘德富, 黎国育, 王亮, 纪道斌, 杨正健	(1308)
海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况	辛成林, 任景玲, 张桂玲, 郭亚平, 张国玲, 刘素美	(1315)
黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征	吴斌, 宋金明, 李学刚	(1324)
扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价	叶华香, 臧淑英, 张丽娟, 张玉红	(1333)
上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价	唐庆丽, 程金平, 高昊旻, 姚磊, 蒋真毅, 吴旻, 谢翠松, 梁海, 王鹤, 皮帅帅, 余朝毅	(1340)
我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析	张灿, 陈虹, 余忆玄, 王立军, 韩建波, 陶平	(1345)
江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较	金涛, 吕学敏, 曾一凡, 张冰冰, 马鲲鹏, 姜朴, 唐非	(1351)
北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋	周益奇, 刘云霞	(1357)
降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究	胡园园, 杨娜, 丁毅, 徐文璐, 陈秀荣, 艾奇峰, 陈善佳, 王利鹏, 黄华	(1363)
渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险	安立会, 张燕强, 宋双双, 刘玥, 高俊敏, 陈浩, 赵兴茹, 雷坤, 郑丙辉	(1369)
巨牡蛎 (<i>Crassostrea</i> sp.) 对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积	刘锡尧, 袁东星, 陈耀瑾	(1374)
咪唑盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究	黄若男, 范军杰, 涂宏志, 谭凌燕, 刘惠君, 徐冬梅	(1380)
铝盐混凝除砷影响因素及机制研究	陈桂霞, 胡承志, 朱灵峰, 童华卿	(1386)
混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究	刘冰, 余国忠, 古励, 赵承美, 李清飞, 翟慧敏	(1392)
活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究	王佳裕, 戴启洲, 鱼杰, 颜亦舟, 陈建孟	(1402)
氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究	彭云霞, 何仕均, 龚文琪, 王建龙	(1411)
C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析	袁怡, 黄勇, 邓慧萍, 盛学敏, 潘杨, 李祥	(1416)
以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究	翟晓峰, 蒋成爱, 吴光学, 曾运涛	(1421)
固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选	李斌, 郝瑞霞	(1428)
基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺	卢健聪, 高大文, 孙学影	(1435)
多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟	周振, 吴志超, 王志伟, 杜兴治, 蒋玲燕, 邢灿	(1442)
高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较	赵志瑞, 马斌, 张树军, 李滨, 白志辉, 王晓辉, 庄国强, 张洪勋	(1448)
活性污泥絮体的分形结构分析	阮晓东, 刘俊新	(1457)
负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究	沈娜, 杨昌柱, 濮文虹, 罗应东	(1464)
预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响	熊光城, 濮文虹, 杨昌柱	(1472)
同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究	张超, 陈银广, 顾国维	(1479)
利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性	谢薇薇, 龚伊, 王张伟, 孔繁翔, 史小丽	(1485)
阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用	郭亚丽, 傅海燕, 黄国和, 高攀峰, 柴天, 严滨, 廖欢	(1492)
象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征	朱艺峰, 黄简易, 林霞, 杨莹, 邢超, 严小军	(1498)
环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究	王进, 徐真, 彭书传, 夏明山, 岳正波, 陈天虎	(1510)
铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解	史广宇, 尹华, 叶锦韶, 彭辉, 张娜, 何宝燕	(1517)
酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1 的影响	黄翔峰, 王凯, 黎明霞, 王彩林, 陆丽君, 刘佳	(1524)
玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构	乔江涛, 郭荣波, 袁宪正, 师晓爽, 许晓晖, 范晓蕾, 邱艳玲	(1531)
红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化	刘子旭, 孙力平, 李玉友, 邱春生	(1540)
4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究	杨宾, 李慧颖, 伍斌, 杜晓明, 李发生	(1545)
污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源	姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新	(1553)
呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价	郭伟, 孙文惠, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 张君	(1561)
水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征	李苗苗, 聂三安, 陈晓娟, 罗璐, 朱捍华, 石辉, 葛体达, 童成立, 吴金水	(1568)
亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征	盛浩, 周萍, 袁红, 廖超林, 黄运湘, 周清, 张杨珠	(1576)
施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响	刘翠英, 蒋新	(1583)
螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复	刘霞, 王建涛, 张萌, 王力, 杨亚提	(1590)
不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响	蒋田雨, 姜军, 徐仁扣, 周立祥, 王世梅	(1598)
绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究	蓝丹琳, 彭丹, 郭楚玲, 朱超飞, 薛秀玲, 党志	(1605)
改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO ₄ ³⁻ 的脱除性能	邢坤, 王海增	(1611)
羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响	涂丽杏, 朱能武, 吴平霄, 李平, 吴锦华	(1617)
新型生物质活性炭烟气脱硫研究	刘洁岭, 汤争光, 陈杰, 蒋文举, 江霞	(1623)
城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用	毛建素, 马兰	(1628)
厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷	闫祯, 崔胜辉, 李桂林, 任引, 徐礼来	(1636)
《环境科学》征订启事 (1283) 《环境科学》征稿简则 (1332) 信息 (1350, 1509, 1582, 1644) 专辑征稿通知 (1523)		

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源

姚林林, 张彩香, 李佳乐, 廖小平, 王焰新*

(中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

摘要: 用气相色谱-质谱联用(GC/MS)的方法分析太原市小店污灌区 9 个土壤剖面中 16 种多环芳烃(PAHs)含量及垂直分布特征。结果表明, 小店污灌区表层土(0~10 cm)中 PAHs 平均含量变化趋势为背景区 < 沼泽区 < 清灌区 < 污灌区; 大部分剖面土中 PAHs 含量随土层深度增加呈减少趋势, PAHs 含量变化幅度较大的位置集中在地表以下 0~40 cm 范围内; 高环(4~6 环)PAHs 大量富集在距地表 0~50 cm 土壤内, 清灌区土壤对 4~6 环 PAHs 的富集能力强于污灌区; 不同环数 PAHs 与 TOC 和砂粒呈正相关关系($r_{\max} = 0.791$, $P = 0$; $r_{\max} = 0.882$, $P = 0$), 与 pH 呈负相关关系($r_{\min} = -0.1$, $P = 0.702$); 距地表 0~40 cm 范围内的土壤中 PAHs 的主要污染来源为小店区煤的燃烧; 燃烧产生 PAHs 的污染途径一是直接沉降至土壤中, 二是沉降至水体中, 吸附在固体颗粒表面, 随着灌溉污水流动而在土壤中大量富集。

关键词: 多环芳烃; 剖面土; 污灌区; 垂直分布; 理化性质; 可能来源

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1553-08

Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil

YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, LIAO Xiao-ping, WANG Yan-xin

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Nine profile soil samples were collected from Xiaodian sewage irrigation area, Taiyuan city, China. The concentrations of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed by gas chromatography equipped with a mass spectrometry detector (GC/MS). The rank order of the average concentrations of PAHs in the 0-10 cm upper soil layer was background area < swamp area < groundwater irrigation area < sewage irrigation area. The concentrations of PAHs in most profile soils decreased with the increase of depth, and the PAHs were mainly accumulated in the surface soil layer (0-40 cm). 4-6 rings of PAHs were mainly accumulated in the 0-50 cm soil layer, and the accumulation capacity in groundwater-irrigation area was better than that in sewage irrigation area. The correlation between different rings of PAHs and TOC was positive ($r_{\max} = 0.791$, $P = 0$), and the same situation was found for PAHs and sand ($r_{\max} = 0.882$, $P = 0$). The correlation between PAHs and pH was negative ($r_{\min} = -0.1$, $P = 0.702$). The main source of PAHs in the surface soil layer (0-40 cm) of study area was coal combustion. There were two pollution ways of PAHs in soil, one was settled into soil directly, the other was first settled into water and absorbed on the surface of solid particles, and then got enrichment in soil as irrigation water flew.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); profile soil; sewage irrigation area; vertical distribution; physicochemical properties; possible sources

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是由两个或两个以上苯环连接在一起的芳香族碳氢化合物。多环芳烃除少量自然来源外,主要来源于化石和生物质燃料的不完全燃烧,具有强致癌性、致畸性、致突变性和内分泌干扰作用,长期处于多环芳烃污染的环境中,可引起急慢性伤害^[1~6]。PAHs 具有较强的难降解性和低溶解性,能够强烈地被分配到非水相中,并吸附于颗粒物上,可以在土壤中不断累积^[7,8]。土壤是环境中 PAHs 的重要储库,人类活动产生的 PAHs 通过污水排放、干湿沉降等途径进入土壤,使土壤承载 90% 以上 PAHs 的环境负荷^[9~12]。因此,研究探讨土壤中 PAHs 的分布特征和变化规律具有一定的土壤修复和治理意义。

太原市因为水资源严重缺乏,采取污水灌溉已经有 30 多年的历史,是我国北方大型污灌区之一。小店区位于太原市东南部,原煤占其能源结构的 90% 以上,主要采用污水进行农业灌溉。多年的污灌,虽然缓解了水源危机,但小店区的土壤已受到污水中有害成分不同程度的污染,并直接或间接地影响到作物的质量,甚至危及到人体健康。

本实验在国内外已有研究的基础上,以太原市小店污灌区土壤为研究对象,对研究区剖面土中美国环境保护署(USEPA)优控的 16 种 PAHs 污染情

收稿日期: 2012-07-31; 修订日期: 2012-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(40830748, 40972156)

作者简介: 姚林林(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境有机污染化学,E-mail: llyvivian_cug@gmail.com

* 通讯联系人,E-mail: yx.wang@cug.edu.cn

况进行研究,探讨 PAHs 在土壤剖面上的分布特征以及污水灌溉对土壤富集 PAHs 的影响,以期为污灌区土壤污染特征研究提供实例.

1 材料与方法

1.1 样品采集

太原市小店区内污灌用水主要来自三大排污渠,分别为东干渠、北张退水渠和太榆退水渠,渠内污水主要为生活用水和工业废水. 根据研究区的地势地貌和排污渠的分布情况,于 2010 年 8 月在研究区选取 9 个剖面,每个剖面划分 8 个层位进行土样采集(见图 1). 9 个剖面分布于研究区内 4 种不同土壤功能区中. 清灌区(GS-6)位于小店区东部,接受地下水灌溉;沼泽区(GS-5)位于距汾河河岸 20 m 处;背景区(GS-9)远离工业活动和生活集中地,主要接受雨水灌溉;污灌区(GS-1、GS-2、GS-3、GS-4、GS-7、GS-8)接受污水灌溉. 每个剖面划分 8 个层位,分别为 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~70、70~90 和 90~110 cm,剖面 GS-5 和 GS-9 的部分层位由于采样条件限制未采样品. 用洛阳铲打孔,自地表向下每隔 10 cm 取一份土样,样品收集于洁净干燥的铝盒中,用封口膜密封. 所有样品存放在 -4℃ 的冰箱内等待分析.

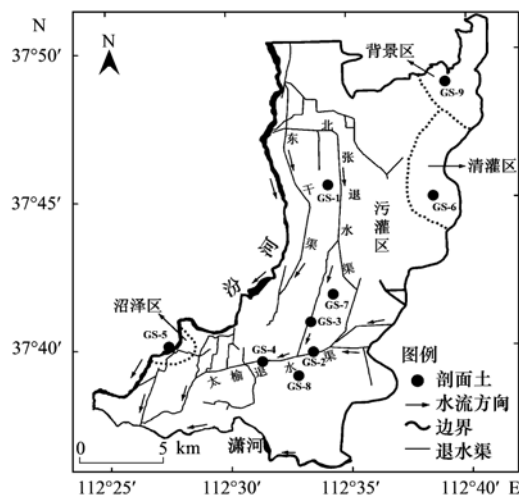


图 1 太原市小店区剖面土采样点分布

Fig. 1 Map of sampling sites and the study area

1.2 主要试剂和分析仪器

主要试剂:多环芳烃标准是由 16 种美国 EPA 优先控制的多环芳烃^[13] (Naphthalence, Nap; Acenaphthylene, Acy; Acenaphthene, Ace; Fluorene, Flo; Phenanthrene, Phe; Anthracene, Ant; Fluoranthene, Fla; Pyrene, Pyr; Benz(a)anthracene,

BaA; Chrysene, Chry; Benzo(b)fluoranthene, BbF; Benzo(k)fluoranthene, BkF; Benzo(a)pyrene, BaP; Indeno(1,2,3-cd)pyrene, InP; Dibenzo(a,h)anthracene, DiA; Benzo(g,h,i)perylene, BghiP)组成的混标;回收率指示剂为 5 种氘代多环芳烃(Naphthalence-d8、Acenaphthene-d10、Phenanthrene-d10、Chrysene-d12、Perylene-d12)组成的混标(美国 Accu Standard 公司);内标为六甲基苯(Hexamethylbenzene,德国 Dr. Ehrenstorfer 公司);无水硫酸钠(天津市福晨化学试剂厂,分析纯)在马弗炉中 450℃ 烘焙 4 h,降至室温后储于干燥器中;硅胶(青岛海洋化工厂分厂,分析纯)和氧化铝(国药集团化学试剂有限公司,分析纯)分别在 180℃ 和 240℃ 条件下活化 12 h,待冷却至室温后再加入其重量 3% 的去离子水降活性,平衡后储于干燥器中;氮气、氦气(武钢氧气气瓶检验厂,99.99%);二氯甲烷、正己烷(美国 Tedia 公司,农残级).

分析仪器:GC/MS 为 Agilent6890-5975N(美国 Agilent 公司),HP6890 气相色谱仪,HP5975 四级杆质谱仪和 AS800 自动进样仪;Liqui TOC 总有机碳分析仪(德国 Elementar 公司);LS230 型全自动粒度分析仪(美国 Beckman Coulter 公司);Sension-2 型 pH 计(美国 Hach 公司);Rotavapor R-210 型旋转蒸发仪(瑞士 Buchi 公司);EFCG-11155-DA 型 12 管氮吹仪(干浴,美国 Organomation 公司);冷却循环水机(美国 Thermo 公司).

1.3 样品预处理

准确称取 10 g 已风干的样品于滤纸中,滤纸已经过二氯甲烷抽提,并在上层覆盖已烘干的无水硫酸钠包好,后加入回收率指示剂(5 种氘代多环芳烃混标)监控回收率. 将土样置于索氏抽提器中抽提 24 h,抽提器下方的平底烧瓶中加入 120 mL 二氯甲烷作为溶剂并加入适量铜片脱硫;提取完成后,利用旋转蒸发仪在恒温水浴条件下旋蒸(二氯甲烷旋蒸条件:30℃,60 r·min⁻¹,630 mbar),后加入正己烷替换溶剂旋蒸(正己烷旋蒸条件:40℃,60 r·min⁻¹,332 mbar)浓缩至 5 mL;浓缩液转移至经过正己烷活化的硅胶/氧化铝/无水硫酸钠(体积比为 6:3:1,共 10 cm 高)层析柱中,用 20 mL 二氯甲烷/正己烷(体积比为 2:3)混合液洗脱至鸡心瓶中;洗脱液经旋转蒸发(二氯甲烷/正己烷混合淋洗液旋蒸条件:35℃,60 r·min⁻¹,350 mbar)浓缩至 0.5 mL 左右,用正己烷转移至 2 mL 棕色细胞瓶中;上机前使用吹氮仪用高纯氮气浓缩至 0.2 mL,再加入 5 μL 质量浓度为 200

$\text{ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 的六甲基苯作为内标, 冷冻保存。

1.4 分析方法

16 种多环芳烃含量分析: 使用 GC/MS 仪器, 色谱柱为 HP-5ms 石英毛细管柱 ($30\text{m} \times 0.25\text{mm ID} \times 0.25 \mu\text{m}$), 载气为氦气, 柱压为 0.08 MPa , 平均线速度为 $40 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 进样量为 $1 \mu\text{L}$, 不分流模式, 进样口和传输线温度为 280°C , 柱温由室温 25°C 升至 80°C , 保持 2 min , 再以 $4^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 速度升至 290°C , 保持 25 min , 质谱质量范围为 $50 \sim 550 \text{ u}$; TOC 含量分析: 使用总有机碳分析仪, 每次上样 0.2000 g , 上样前加 HCl 去除无机碳, 烘干待测; 粒度分析: 使用全自动激光粒度分析仪, 测量范围为 $0.04 \sim 2000 \mu\text{m}$; pH 值分析: 采用电极法, 称取过 20 目筛的土样 10 g 放入 100 mL 取样瓶中, 加入无二氧化碳蒸馏水 25 mL , 剧烈摇动, 使水土充分混合均匀, 放置 30 min 后测定。

1.5 质量保证与质量控制

目标化合物采用单离子监控 (SIM), 内标法定量, 目标离子为: 128.2 (Nap)、 152.2 (Acy)、 154.2 (Ace)、 166.1 (Flo)、 178.1 (Phe)、 178.1 (Ant)、 202.2 (Fla)、 202.1 (Pyr)、 228.2 (BaA)、 228.2 (Chry)、 252.2 (BbF)、 252.2 (BkF)、 276.2 (BaP)、 276.2 (InP)、 278.2 (DiA)、 276.2 (BghiP)。用质量浓度分别为 0.2 、 0.5 、 1 、 5 、 $10 \text{ ng} \cdot \mu\text{L}^{-1}$ 的 16 种多环芳烃混标建立标准曲线, 所有标曲相关系数 R 均大于 0.99 , 目标化合物可以基线分离; 在样品处理和分析过程中, 插入实验室空白与样品空白, 两种空白中均未检测到目标化合物, 表明样品在处理和分析过程中未受到污染; 每个样品中均加入回收率指示剂, 经计算, 5 种氘代多环芳烃的平均回收率分别为 $(55 \pm 15)\%$ (Naphthalence-d8)、 $(66 \pm 12)\%$ (Acenaphthene-d10)、 $(74 \pm 15)\%$ (Phenanthrene-d10)、 $(69 \pm 8)\%$ (Chrysene-d12)、 $(84 \pm 6)\%$ (Perylene-d12), 计算目标化合物含量结果经过回收率校正。

2 结果与讨论

2.1 表层土中 PAHs 分布情况

表 1 所示为 9 个土壤剖面地表土 ($0 \sim 10 \text{ cm}$) 中多环芳烃含量, 所有地表土样中均检测出 16 种目标多环芳烃。∑PAHs (16 种) 含量范围为 $1342.06 \sim 26627.75 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $6969.35 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, ∑PAHs 平均含量变化趋势为背景区 < 沼泽区 < 清灌区 < 污灌区。位于背景区的 GS-9 表层土中的

总多环芳烃含量最低, 这是由于该剖面所在地势较高, 且远离工业区; 位于沼泽区和清灌区的剖面 GS-5 和 GS-6 地表土中 ∑PAHs 含量明显高于背景区, 这说明人类活动对该区域地表土中 ∑PAHs 含量有一定影响; 分别位于污灌区内北张退水渠和太榆退水渠渠首的 GS-1 和 GS-2 剖面比污灌区其他剖面地表土中 ∑PAHs 含量低。

沿排污渠流向, 剖面 GS-7、GS-3、GS-4 地表土中 ∑PAH 含量逐渐增大; 位于污灌区北张退水渠和太榆退水渠交汇处的剖面 GS-8 地表土中 ∑PAHs 含量最高; 这种现象推测为随水流方向, 更多的生活和工业废水排放汇集向下游迁移, 使下游水体中 PAHs 的浓度不断累积, 经过漫灌, 从水中迁移到土壤中富集成含量升高。

2.2 剖面土中 PAHs 的垂直分布特征

图 2 为研究区内 9 个土壤剖面中 ∑PAHs 含量随土层深度的变化情况。从中可知, 除 GS-5 外, 其余剖面中的 ∑PAHs 含量随土层深度增加呈减少趋势, PAHs 含量变化幅度较大的位置集中在地表以下 $0 \sim 40 \text{ cm}$, 说明土壤能够有效地吸附 PAHs, 对深层土壤及地下水起到保护作用; 距地表 70 cm 开始, 大部分土壤剖面中 ∑PAHs 含量变化随深度增加趋于稳定, 结合 TOC 值变化自 70 cm 开始不明显这一现象, 可以推测 PAHs 向土壤深部渗透迁移过程中, 一部分被土壤中的细菌等微生物降解, 而其余难降解的化合物则滞留在土壤中继续向下迁移^[14]。位于沼泽区的 GS-5 剖面随着土层深度增加 ∑PAHs 浓度增大, 尤其在距地表 40 cm 以下, 其 ∑PAHs 浓度相较于其他剖面大大增加, 这在一定程度上与土壤的理化性质有关。根据粒度分析结果, GS-5 剖面自上而下黏粒和粉砂粒逐渐减少而砂粒逐渐增多, 50 cm 处砂粒高达 77.81% , 根据粒度与 ∑PAH 的相关关系分析得到两者呈正相关关系 ($r = 0.238$, $P = 0.376$); 从现场的采样记录得知 GS-5 剖面土壤为沉积相, 从地表以下 5 cm 起即有丰富的黑色有机质存在, PAHs 在沉积物中的分配系数比土壤高^[15]; 以上原因一定程度上导致 GS-5 剖面 ∑PAHs 浓度的变化。

将 16 种 PAHs 分为 2~3 环 (Nap、Acy、Ace、Flo、Phe、Ant)、4 环 (Fla、Pyr、BaA、Chry) 和 5~6

表 1 9 个剖面地表土中 PAHs 的含量¹⁾/ng·g⁻¹

Table 1 Concentrations of PAHs in the surface layer of nine profile soil samples/ng·g ⁻¹										
PAHs	GS-1 ^a	GS-2 ^a	GS-3 ^a	GS-4 ^a	GS-5 ^b	GS-6 ^c	GS-7 ^a	GS-8 ^a	GS-9 ^d	平均值
Nap	49.99	47.09	48.08	58.91	193.18	35.14	121.64	105.97	68.04	80.89
Acy	9.29	7.48	18.34	4.52	34.16	24.88	32.18	32.75	7.37	19.00
Ace	5.67	4.13	20.33	5.61	68.87	8.81	10.33	43.19	1.23	18.68
Flo	19.09	15.70	45.49	14.40	129.09	18.34	28.10	89.24	10.85	41.15
Phe	166.76	140.98	496.35	189.73	367.11	273.01	304.15	1 018.77	130.12	343.00
Ant	14.64	13.19	80.52	13.31	83.11	40.49	42.94	157.60	138.10	64.88
Fla	189.47	190.61	729.04	450.60	343.24	628.54	419.99	2 429.58	99.63	608.97
Pyr	138.00	138.05	527.64	324.47	272.86	488.22	310.09	1 847.66	68.37	457.26
BaA	79.22	56.07	291.56	155.84	133.43	296.85	172.89	1 251.70	22.37	273.33
Chry	352.07	277.14	1 106.70	1 917.24	533.09	900.46	690.34	3 814.89	204.89	1 088.53
BbF	163.86	173.66	746.05	1571.75	281.06	589.34	444.17	2 451.20	121.30	726.93
BkF	159.50	124.66	435.31	699.21	170.98	339.39	263.42	1 287.31	61.48	393.47
BaP	173.91	177.97	904.44	1 095.01	290.88	682.86	505.83	2 758.19	88.48	741.95
InP	261.48	292.03	1 086.92	908.80	399.40	737.10	709.28	4 783.76	147.84	1 036.29
DiA	44.58	42.46	181.36	177.79	90.08	158.99	137.74	871.59	28.01	192.51
BghiP	243.28	241.71	940.82	906.03	426.60	672.35	683.40	3 684.34	143.98	882.50
∑ PAHs	2 070.79	1 942.91	7 658.97	8 493.21	3 817.15	5 894.78	4 876.48	26 627.75	1 342.06	6 969.35

1) a:污灌区; b:沼泽区; c:清灌区; d:背景区

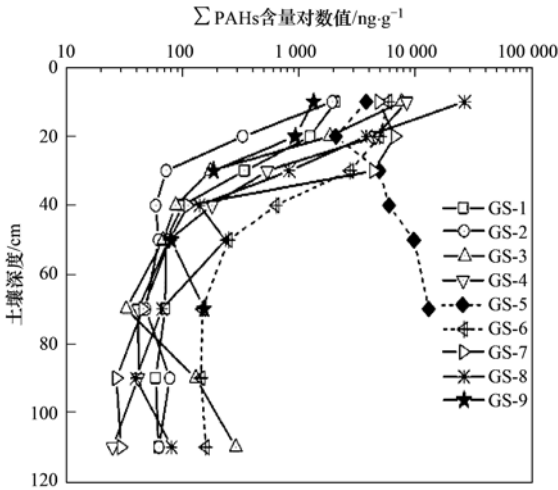


图 2 各剖面土壤中 ∑ PAHs 含量随深度的变化

Fig. 2 Distribution of total PAHs in profile soils versus depth

环(BbF、BkF、BaP、DiA、InP、BghiP)3 组。图 3 为不同剖面随土层深度增加不同环数 PAHs 的相对百分含量(质量分数)变化,由图 3 可知,除 GS-5 剖面外,其他剖面随深度增加,2~3 环 PAHs 相对含量逐渐增加,4~6 环 PAHs 相对含量逐渐减少;地表以下 0~50 cm 范围内各剖面土壤中 4~6 环 PAHs 的百分含量 > 50%,而 50~110 cm 范围内 2~3 环 PAHs 的百分含量 > 50%;GS-6(清灌区)剖面随土层深度增加 4~6 环 PAHs 含量降低幅度相对于污灌区大。说明 4~6 环 PAHs 主要在 0~50 cm 内富集,并没有大量向深层土中迁移,土壤一定程度上保

护地下水免受高环 PAHs 的污染;清灌区土壤相对于污灌区土壤对 4~6 环 PAHs 的富集能力强。对于灌区(清灌区、污灌区),土层中 PAHs 的变化主要是由于污水从上向下的迁移造成的。由于低环溶解度高,高环亲脂性强,在不断的水/土分配过程中,低环 PAHs 不断向下迁移,而高环 PAHs 被土壤中的有机质吸附,造成土层间 PAHs 组成的规律性变化。对于 GS-5 而言,因为处于沼泽区,这种污水从上往下流动的现象不明显,低环和高环 PAHs 从上往下迁移分配的现象不显著,这在一定程度上导致各土层中 PAHs 的相对组成随深度变化的不规则现象。

2.3 PAHs 含量与土壤理化性质关系

选取 GS-5、GS-6、GS-9 和污灌区的 GS-4 剖面进行土壤理化性质分析,图 4 所示为 4 个剖面土壤中不同环数 PAHs 含量变化和 pH、TOC 变化关系。经双变量相关分析可知,砂粒与 TOC、pH 之间存在一定正相关关系($r = 0.236$, $P = 0.347$; $r = 0.344$, $P = 0.162$)。选取 TOC 与 pH 作为控制变量,进行偏相关分析可知,砂粒与低环(2~3 环)PAHs 之间存在显著相关关系($r = 0.882$, $P = 0$),与 4 环和 5~6 环 PAHs 的相关性不显著($r = 0.275$, $P = 0.302$; $r = 0.096$, $P = 0.723$)。选取砂粒作为控制变量,pH 与 PAHs 之间存在负相关关系,其中与 5~6 环 PAHs 之间的负相关关系最为明显($r = -0.1$, $P = 0.702$),这与刘瑞民等^[16]对天津土壤中 PAHs 与

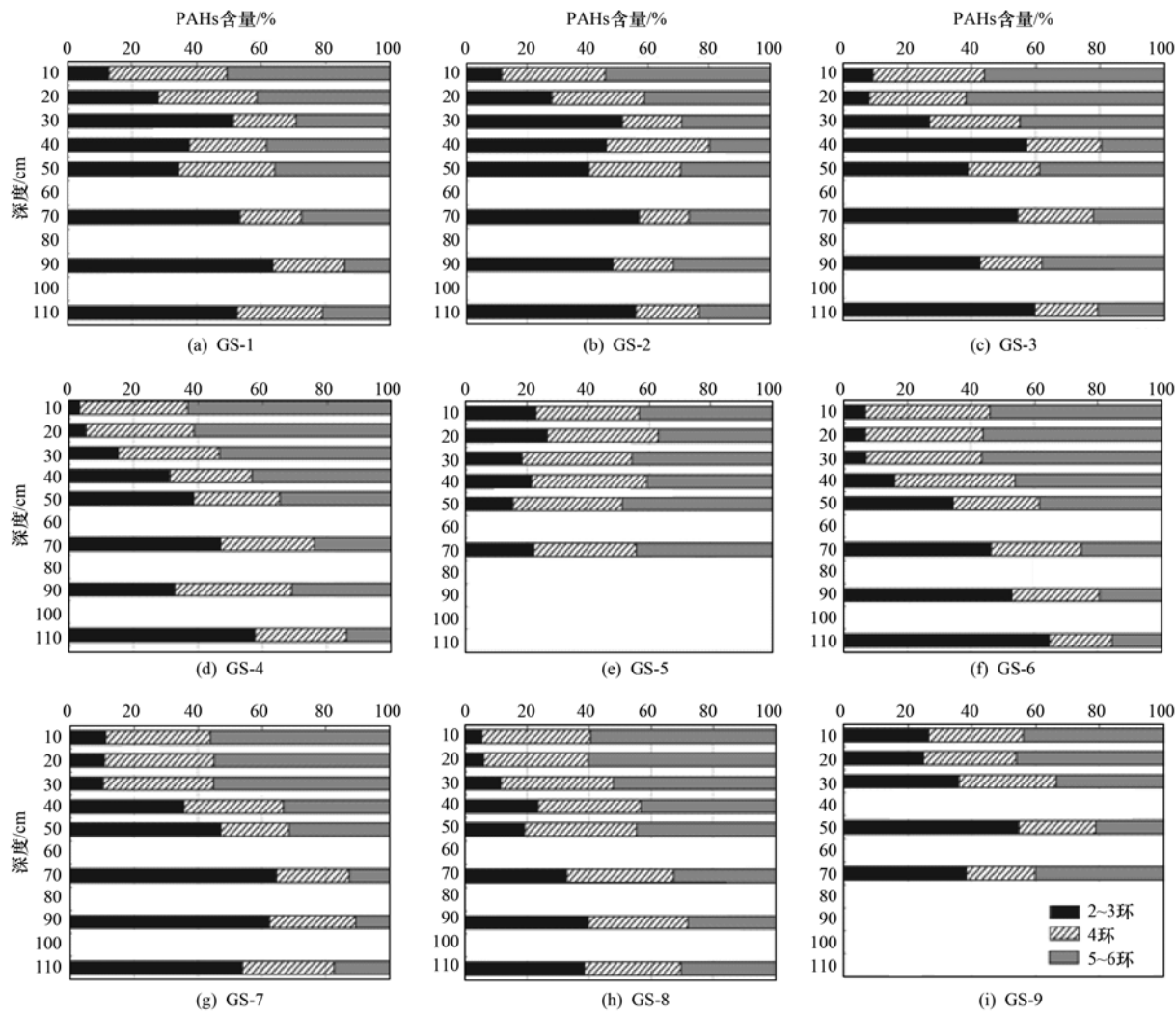


图3 各剖面不同层位不同环数 PAHs 的含量

Fig. 3 Percentage composition of PAHs with different rings in profile soils

pH 呈负相关关系的结论保持一致. GS-4、GS-6、GS-9 剖面随土层深度增加,PAHs 含量降低同时 TOC 降低,GS-5 剖面由于其位置的特殊性相应指标变化不规律. 将砂粒作为控制变量,TOC 与低环 PAHs 的相关关系最高($r=0.791$, $P=0$),与 4 环和 5~6 环 PAHs 之间也存在较高相关关系($r=0.737$, $P=0.001$; $r=0.738$, $P=0.001$),已有研究表明^[17~19],TOC 是影响土壤中 PAHs 迁移的重要因素,本研究结果与此结论相符.

2.4 研究区土壤中 PAHs 来源分析

利用比值法定性指示污染物来源是常用的判断污染物来源的方法^[20~25]. 多环芳烃在环境中的组成分布取决于其来源和传输过程^[26],不同来源的多环芳烃在排放到环境过程中会发生变化,因此在分析实际过程时采用同分异构体的对比值作为来源判别的指示器^[27]. Budzinski 等^[28]研究表明, Ant/

(Ant + Phe) 比值小于 0.1 时通常指示石油源,而大于 0.1 时指示燃烧源. Yunker 等^[29]认为, Fla/(Fla + Pyr) 比值小于 0.4 指示油类排放来源,大于 0.5 指示煤和木柴的燃烧以及草地燃烧来源,之间为石油及精炼产品的燃烧来源; Inp/(Inp + BghiP) 比值小于 0.2 为石油类排放源,大于 0.5 主要是木柴、煤燃烧源,之间为石油燃烧来源. 本文利用以上 3 种比值对研究区 0~40 cm 范围内土壤中 PAHs 来源进行解析.

由图 5 可知,所有剖面 Ant/(Ant + Phe) 比值均大于 0.1,说明研究区内距地表 0~40 cm 土壤中 PAHs 污染来自于燃烧源;除剖面 GS-2,其他所有剖面的 Fla/(Fla + Pyr) 比值均大于 0.5,说明煤、草地和木柴的燃烧是研究区 PAHs 的主要污染来源,GS-2 的 Fla/(Fla + Pyr) 比值为 0.50,处于指示来源的临界点;9 个剖面中有 7 个剖面的 Inp/(Inp +

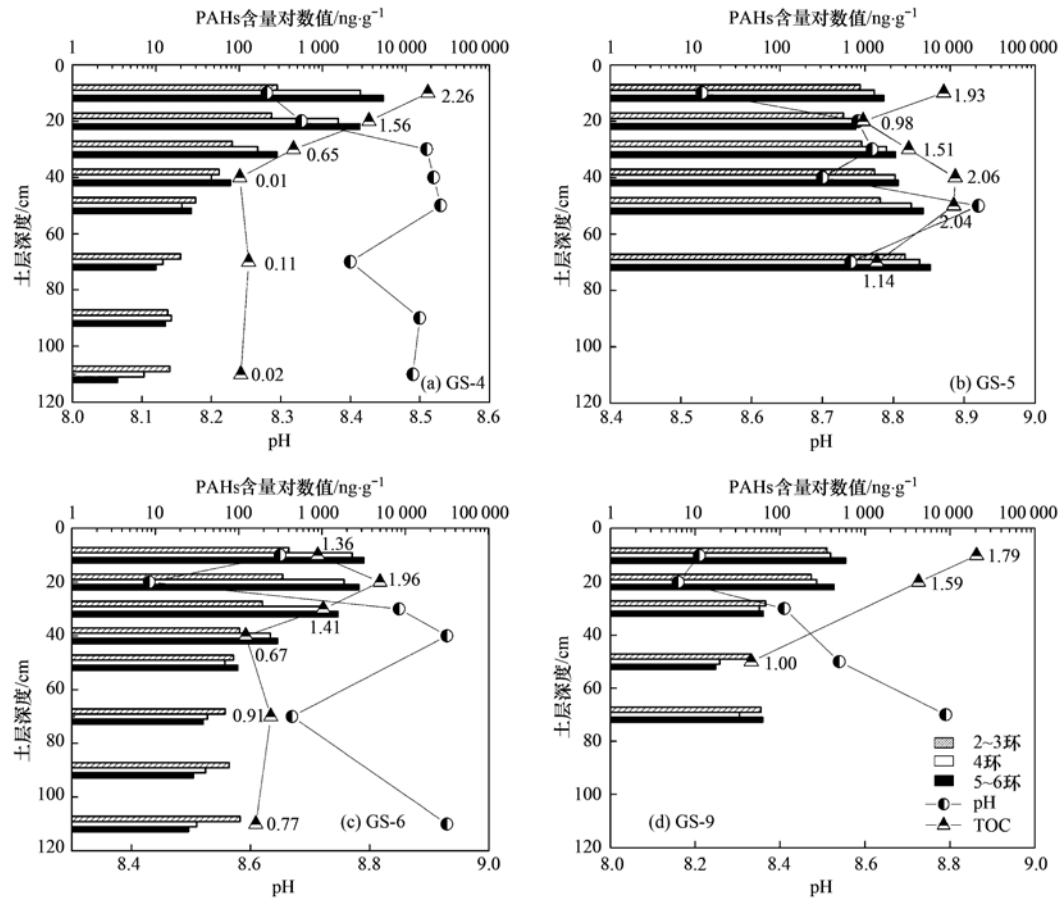


图 4 剖面土中不同环数 PAHs 含量与 pH、TOC 的关系

Fig. 4 Concentrations of PAHs with different rings, pH, TOC in profile soils

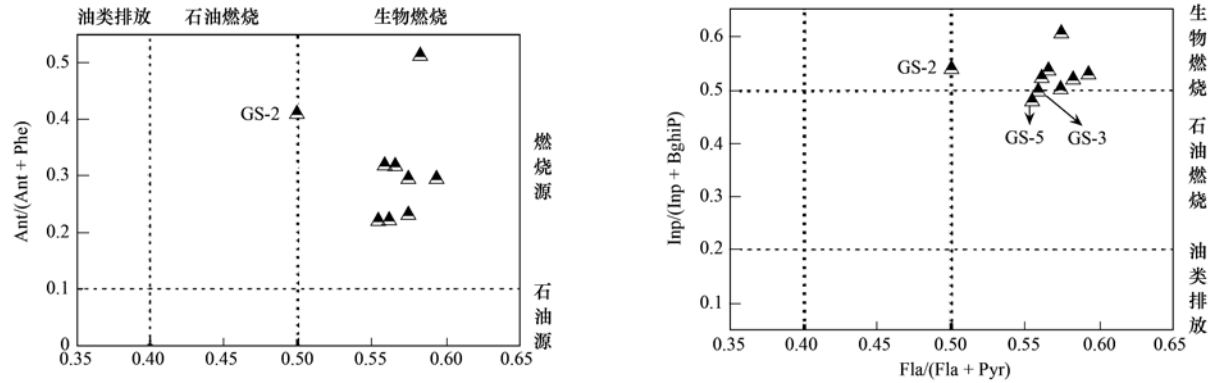


图 5 剖面土中多环芳烃异构体比值

Fig. 5 Isomeric ratios of PAHs in profile soils

BghiP) 比值大于 0.5, 指示研究区 PAHs 的生物燃烧来源, 剖面 GS-3 Inp/(Inp + BghiP) 比值为 0.50, 处于临界点, GS-5 的相应比值为 0.48, 与 0.5 的临界比值偏离不大, 指示生物燃烧和少量石油燃烧的混合来源. 结合小店区能源结构可知, 研究区距地表 0 ~ 40 cm 范围内的土壤中 PAHs 的主要污染来源为小店区煤的燃烧.

研究表明^[30~33], 燃烧过程主要产生高环 PAHs, 高环 PAHs 较易沉降于污染源附近, 分子量越大的 PAHs 水溶解度越小. 研究区土壤中高环 PAHs 的主要污染途径为: 燃煤产生的高环 PAHs 一方面直接沉降于土壤表面, 在地表径流等作用下造成土壤污染; 另一方面通过干湿沉降进入研究区退水渠和汾河河水中并吸附于固体颗粒表面, 小店区接受三

大退水渠污水灌溉,使得吸附在水体中固体颗粒上的高环 PAHs 随污水流动而在土壤中大量富集。

3 结论

(1)所有剖面地表土(0~10 cm)中均检测出16种目标多环芳烃, $\sum$ PAHs (16种)含量范围为1 342.06~26 627.75 ng·g⁻¹,平均值为6 969.35 ng·g⁻¹, $\sum$ PAHs 平均含量变化趋势为背景区<沼泽区<清灌区<污灌区。

(2)大部分剖面中的 $\sum$ PAHs 含量随土层深度增加呈减少趋势,PAHs 含量变化幅度较大的位置集中在地表以下0~40 cm,说明土壤能够有效地吸附 PAHs,对深层土壤及地下水起到保护作用。

(3)研究区高环(4~6环)PAHs 大量富集距地表0~50 cm 土壤内,并没有大量向深层土中迁移,土壤一定程度上保护地下水免受高环 PAHs 的污染;清灌区土壤相对于污灌区土壤对4~6环 PAHs 的吸附能力强。

(4)砂粒与低环 PAHs 呈显著正相关关系,而与高环 PAHs 的相关性不够明显,在一定程度上有利于土壤吸附 PAHs;pH 与 PAHs 含量呈负相关关系;TOC 与16种 PAH 均存在较高正相关关系,是影响土壤中 PAHs 迁移的重要因素。

(5)研究区距地表0~40 cm 范围内的土壤中 PAHs 的主要污染来源为小店区煤的燃烧;主要污染途径:一是直接沉降于土壤表面;二是沉降于研究区水体中并吸附于固体颗粒表面,研究区接受污水灌溉,使得水相中固体颗粒上的 PAHs 随污水流动在土壤中富集。

参考文献:

- [1] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [2] Grote M, Schüttümann G, Altenburger R. Modeling photoinduced algal toxicity of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(11): 4141-4149.
- [3] Menzie C A, Potocki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 1992, **26**(7): 1278-1284.
- [4] Durant J L, Busby W F, Lafleur A L, *et al.* Human cell mutagenicity of oxygenated, nitrated and unsubstituted polycyclic aromatic hydrocarbons associated with urban aerosols [J]. *Mutation Research*, 1996, **371**(3): 123-157.
- [5] Environmental Health Criteria No 202, Selected Non-heterocyclic Polycyclic Aromatic Hydrocarbons[S].
- [6] Santodonato J. Review of the estrogenic and antiestrogenic activity of polycyclic aromatic hydrocarbons: Relationship to carcinogenicity[J]. *Chemosphere*, 1997, **34**(4): 835-848.
- [7] Sun J H, Wang G L, Chai Y, *et al.* Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in Henan Reach of the Yellow River, Middle China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, **72**(5): 1614-1624.
- [8] 彭驰,王美娥,欧阳志云,等. 北京科教园区绿地土壤中多环芳烃的残留特征与潜在风险[J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 592-598.
- [9] Willeke W. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil: a review[J]. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 2000, **163**(3): 229-248.
- [10] 段永红,陶澍,王学军,等. 天津表层土壤中多环芳烃的主要来源[J]. *环境科学*, 2006, **27**(3): 524-527.
- [11] 王学彤,贾英,孙阳昭,等. 典型污染区农业土壤中 PAHs 的分布、来源及生态风险[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(11): 2433-2439.
- [12] 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.
- [13] Patnaik P. *Handbook of Environmental Analysis* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1997. 165.
- [14] 杜斌,龚娟,李佳乐. 太原市污水灌溉对水土环境的有机污染研究[J]. *人民长江*, 2010, **41**(17): 58-61.
- [15] 罗雪梅,刘昌明,何孟常. 土壤与沉积物对多环芳烃类有机物的吸附作用[J]. *生态环境*, 2004, **13**(3): 394-398.
- [16] 刘瑞民,王学军,陶澍,等. 天津表土 PAHs 不同组分和土壤理化参数的多尺度空间关系[J]. *农业环境科学学报*, 2006, **25**(4): 929-933.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Isaacson P J, Frink C R. Nonreversible sorption of phenolic compounds by sediment fractions: the role of sediment organic matter[J]. *Environmental Science & Technology*, 1984, **18**(1): 43-48.
- [20] Yuan D X, Yang D N, Terry L W, *et al.* Status of persistent organic pollutants in the sediment from several estuaries in China [J]. *Environmental Pollution*, 2001, **114**(1): 101-111.
- [21] Simoneit B R. Application of molecular marker analysis to vehicle exhaust for source reconciliations [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1985, **22**(3-4): 203-233.
- [22] Benner B A, Wise S A, Currie L A, *et al.* Distinguishing the contributions of residential wood combustion and mobile source emissions using relative concentrations of dimethylphenanthrene

- isomers[J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, **29**(9): 2382-2389.
- [23] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**(1-2): 121-127.
- [24] Chen L G, Ran Y, Xing B S, *et al.* Contents and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in vegetable soils of Guangzhou, China[J]. *Chemosphere*, 2005, **60**(7): 879-890.
- [25] Liu S, Xia X, Yang L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in urban soils of different land uses in Beijing, China: Distribution, sources and their correlation with the city's urbanization history[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **177**(1-3): 1085-1092.
- [26] Neff J M. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the aquatic environment: sources, fates and biological effects[M]. London: Applied Science Publishers, 1979. 262.
- [27] 倪沁颜, 杨冬雪, 孔德贤, 等. 福建省茶园土壤中多环芳烃的分布、来源分析及生态风险评价[J]. *中国环境监测*, 2009, **25**(6): 90-93.
- [28] Budzinski H, Jones I, Bellocq J, *et al.* Evaluation of sediment contamination by polycyclic aromatic hydrocarbons in the Gironde estuary[J]. *Marine Chemistry-MAR CHEM*, 1997, **58**(1): 85-97.
- [29] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al.* PAHs in the Fraser River basin: a critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. *Organic Geochemistry*, 2002, **33**(4): 489-515.
- [30] Wang Z, Chen J W, Qiao X L, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons from urban to rural soils: A case study in Dalian, China[J]. *Chemosphere*, 2007, **68**(5): 965-971.
- [31] Nam J J, Thomas G O, Jaward F M, *et al.* PAHs in background soils from Western Europe: Influence of atmospheric deposition and soil organic matter[J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(9): 1596-1602.
- [32] Aichner B, Glaser B, Zech W. Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorinated biphenyls in urban soils from Kathmandu, Nepal[J]. *Organic Geochemistry*, 2007, **38**(4): 700-715.
- [33] Feng C L, Xia X H, Shen Z Y, *et al.* Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in Wuhan section of the Yangtze River, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, **133**(1-3): 447-458.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-rui, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changhe River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorous in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Flocs	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Flocs	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-xue, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行