

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第1期

Vol.37 No.1

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

碳质大气颗粒物的扫描质子微探针分析	包良满, 刘江峰, 雷前涛, 李晓林, 张桂林, 李燕 (1)
中国8个城市大气多溴联苯醚的污染特征及人体暴露水平	林海涛, 李琦路, 张干, 李军 (10)
广州城区秋冬季大气颗粒物中 WSOC 吸光性研究	黄欢, 毕新慧, 彭龙, 王新明, 盛国英, 傅家谟 (16)
南京地区大气 PM _{2.5} 潜在污染源硫碳同位素组成特征	石磊, 郭照冰, 姜文娟, 芮茂凌, 曾钢 (22)
青奥会前后南京 PM _{2.5} 重金属污染水平与健康风险评估	张恒, 周自强, 赵海燕, 熊正琴 (28)
南昌市秋季大气 PM _{2.5} 中金属元素富集特征及来源分析	林晓辉, 赵阳, 樊孝俊, 胡恭任, 于瑞莲 (35)
南京北郊冬春季大气能见度影响因子贡献研究	马佳, 于兴娜, 安俊琳, 朱彬, 于超, 朱俊, 夏航 (41)
边界层低空急流导致北京 PM _{2.5} 迅速下降及其形成机制的个例分析	廖晓农, 孙兆彬, 何娜, 赵普生, 马志强 (51)
电厂燃煤烟尘 PM _{2.5} 中化学组分特征	王毓秀, 彭林, 王燕, 张腾, 刘海利, 牟玲 (60)
2014 年 APEC 期间北京市空气质量改善分析	程念亮, 李云婷, 张大伟, 陈添, 孙峰, 李令军, 李金香, 周一鸣, 杨妍妍, 姜磊 (66)
APEC 会议期间北京机动车排放控制效果评估	樊守彬, 田灵娣, 张东旭, 郭津津 (74)
晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析	王燕, 彭林, 李丽娟, 王毓秀, 张腾, 刘海利, 牟玲 (82)
北京市混凝土搅拌站颗粒物排放特征研究	薛亦峰, 周震, 钟连红, 闫静, 曲松, 黄玉虎, 田贺忠, 潘涛 (88)
长株潭地区人为源氨排放清单及分布特征	尤翔宇, 刘湛, 张青梅, 漆燕, 向仁军, 苏艳蓉 (94)
长春城市水体夏秋季温室气体排放特征	温志丹, 宋开山, 赵莹, 邵田田, 李思佳 (102)
查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性	李思佳, 宋开山, 赵莹, 穆光熠, 邵田田, 马建行 (112)
不同地质背景下河流水化学特征及影响因素研究: 以广西大溶江、灵渠流域为例	孙平安, 于爽, 莫付珍, 何师意, 陆菊芳, 原雅琼 (123)
大渡河老鹰岩河段的水生生物群落结构及水质评价	黄允优, 曾燊, 刘守江, 马永红, 胥晓 (132)
西湖龙泓洞流域暴雨径流氮磷流失特征	杨帆, 蒋铁峰, 王翠翠, 黄晓楠, 吴芝菱, 陈琳 (141)
合肥城郊典型农业小流域土壤磷形态及淋失风险分析	樊慧慧, 李如忠, 裴婷婷, 张瑞钢 (148)
辽河入海口及城市段柱状沉积物金属元素含量及分布特征	王维斐, 周俊丽, 裴淑玮, 刘征涛 (156)
水源水库沉积物中营养元素分布特征与污染评价	黄廷林, 刘飞, 史建超 (166)
低分子量有机酸对三峡水库消落区土壤中汞赋存形态及其活性的影响	游蕊, 梁丽, 覃蔡清, 邓吟, 王定勇 (173)
北京市凉水河表层沉积物中砷含量及其赋存形态	王馨慧, 单保庆, 唐文忠, 张超, 王闯 (180)
紫外辐射对小球藻混凝效果作用途径探讨	王文东, 张轲, 许洪斌, 刘国旗 (187)
二氧化钛光催化氧化阿散酸	许文泽, 杨春风, 李静, 李建斐, 刘会芳, 胡承志 (193)
紫外光照下盐酸环丙沙星的光解性能	段伦超, 王凤贺, 赵斌, 陈亚君 (198)
氢氧化钡-天然沸石复合材料对水中低浓度磷酸盐的吸附作用	林建伟, 王虹, 詹艳慧, 陈冬梅 (208)
纳米 TiO ₂ 吸附 HgCl ₂ 水溶液中 Hg(II)	周雄, 张金洋, 王定勇, 覃蔡清, 徐凤, 罗程钟, 杨熹 (220)
好氧生化污水处理厂化学品暴露预测模型构建	周林军, 刘济宁, 石利利, 冯洁, 徐炎华 (228)
3 种苯胺类化学品在好氧污水处理模拟系统中的降解特性	古文, 周林军, 刘济宁, 陈国松, 石利利, 徐炎华 (240)
Fe(II) 活化过硫酸钠深度处理工业园区污水处理厂出水	朱松梅, 周振, 顾凌云, 蒋海涛, 任佳慧, 王罗春 (247)
长江三角洲区域表土中多环芳烃的近期分布与来源	李静雅, 吴迪, 许芸松, 李向东, 王喜龙, 曾超华, 付晓芳, 刘文新 (253)
直链烷基苯指示城市化过程初步研究	徐特, 曾辉, 倪宏刚 (262)
龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征	刘硕, 吴泉源, 曹学江, 王集宁, 张龙龙, 蔡东全, 周历媛, 刘娜 (270)
水分减少与增温处理对冬小麦生物量和土壤呼吸的影响	吴杨周, 陈健, 胡正华, 谢燕, 陈书涛, 张雪松, 申双和, 陈曦 (280)
中水浇灌对土壤重金属污染的影响	周益奇, 刘云霞, 傅慧敏 (288)
生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响	安艳, 姬强, 赵世翔, 王旭东 (293)
3 种工业有机废弃物对铅锌尾矿生物化学性质及植物生长的影响	彭禧柱, 杨胜香, 李凤梅, 曹建兵, 彭清静 (301)
丛枝菌根真菌对镉污染土壤上玉米生长和镉吸收的影响	王芳, 郭伟, 马朋坤, 潘亮, 张君 (309)
珠江三角洲典型区域农产品中邻苯二甲酸酯 (PAEs) 污染分布特征	李彬, 吴山, 梁金明, 邓杰帆, 王珂, 梁文立, 曾彩明, 彭四清, 张天彬, 杨国义 (317)
三峡库区重金属的生物富集、生物放大及其生物因子的影响	韦丽丽, 周琼, 谢从新, 王军, 李君 (325)
起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较	靳振江, 曾鸿鹄, 李强, 程亚平, 汤华峰, 李敏, 黄炳富 (335)
序批式生物反应器填埋场脱氮微生物多样性分析	李卫华, 孙英杰, 刘子梁, 马强, 杨强 (342)
铁氮掺杂碳纳米管/纤维复合物制备及其催化氧还原的效果	杨婷婷, 朱能武, 芦昱, 吴平霄 (350)
运行微生物燃料电池减排稻田土壤甲烷的研究	邓欢, 蔡旅程, 姜允斌, 钟文辉 (359)
通风策略对污泥生物干化过程中含氮气体和甲烷排放的影响	齐鲁, 魏源送, 张俊亚, 赵晨阳, 才兴, 张媛丽, 邵春岩, 李洪枚 (366)
高温生物滤塔处理污泥干化尾气的研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 丁文杰, 李琳, 林坚, 刘俊新 (377)
应用 FCM-qPCR 方法定量检测水中常见病原体	王明星, 柏耀辉, 梁金松, 霍旻, 杨婷婷, 袁林江 (384)
乙腈和正己烷对环境特征污染物免疫传感分析的影响	娄雪宁, 周丽萍, 宋丹, 杨荣, 龙峰 (391)
废弃菌糠资源化过程中的成分变化规律及其环境影响	楼子墨, 王卓行, 周晓馨, 傅瑞琪, 刘榆, 徐新华 (397)

直链烷基苯指示城市化过程初步研究

徐特¹, 曾辉^{1,2*}, 倪宏刚¹

(1. 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055; 2. 北京大学城市与环境学院生态学系, 北京 100871)

摘要: 本研究以深圳市作为典型城市化地区代表, 以直链烷基苯 (LABs) 作为环境分子标志物, 在分析土壤 LABs 空间分布特征基础上, 通过土壤 LABs 污染水平与城市化过程指标的相关分析, 对直链烷基苯指示城市化过程可能性开展初步研究. 结果表明, 城市化过程中人口规模、用水状况、城市建设、收入与消费及产业结构这 5 个方面的因素与土壤中 LABs 污染水平均有相关性, 表明环境 LABs 水平与城市化过程相关, 可以作为环境分子标志物用于指示城市化过程.

关键词: 直链烷基苯; 城市化; 深圳市; 土壤; 分子标志物

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)01-0262-08 DOI: 10.13227/j. hjkx. 2016. 01. 034

Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization

XU Te¹, ZENG Hui^{1,2*}, NI Hong-gang¹

(1. School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China; 2. Department of Ecology, College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In this study, we selected Shenzhen City as a typical region of urbanization and took Linear alkylbenzenes (LABs) as an environmental molecular marker to investigate the relationship between soil LABs levels and urbanization indexes on the basis of analysis of spatial distribution of LABs in surface soil. Our results indicated relations between the LABs levels in soil and the five urbanization indexes, such as the population, water supply, urban construction, income and expenditure, as well as industrial structure. These results suggested that LABs levels were correlated with urbanization and could be used as an environmental molecular indicator for the process of urbanization.

Key words: linear alkylbenzenes (LABs); urbanization; Shenzhen City; soil; molecular marker

城市化被看作是一种人类起源的影响生态系统可持续性的主要胁迫因子^[1]. 特别是在中国, 城市化过程衍生的污染问题已经对城市生态环境产生了巨大影响. 虽然研究者在城市化势必衍生环境问题这方面已达成共识^[2], 但如何结合野外实测数据, 甄别有效城市化水平指标, 构建数值模型以揭示城市化过程与环境污染的影响机制, 目前仍然缺乏足够的基础研究积累. 可能原因是缺乏可靠的技术手段, 例如: 缺乏城市化水平测度和城市化过程的标志物.

近年来, 本课题组对深圳环境中有机污染物污染状况做了一系列调查工作^[3~6], 特别关注有机污染与城市化之间的关联分析. 前期研究发现: 某些有机污染物环境水平与分布可能与城市化过程相关. 例如: 土壤和城市河流表层沉积物中的多溴联苯醚、多环芳烃及其衍生物水平与城市化过程相关^[7~9]. 然而, 这些工作以污染现状与介质分配等现象表述为主, 并未集中研究城市化过程与某种特定污染物间的响应关系, 因此, 这些研究主题显得零散、随意, 缺乏系统性以及可靠的定量表征.

直链烷基苯 (linear alkylbenzenes, LABs) 是工业合成阴离子洗涤剂直链烷基苯磺酸盐的原料. 在合成过程中, 会有部分未被磺化的 LABs 混入洗涤产品中, 该类洗涤剂的使用将 LABs 带入环境中. LABs 具备分子标志物的典型特征 (来源的专属性、使用的广泛性、在环境中残留的长期性), 在相关文献中这类物质一直被作为示踪民用废水的环境分子标志物使用^[10, 11]. 洗涤产品的使用与人群有直接紧密联系, 可以说, LABs 的环境分布与水平也同样蕴含人为活动的重要信息. 城市化过程实际是高强度人为活动的集中反映, 因此, 用 LABs 指示城市化进程理论上具有可行性^[12]. 事实上, 已有研究发现城市化进程与某些特定环境分子标志物之间存在着一定的相关性^[13]. 但在相关研究中, LABs 相关研究一直侧重于以其作为民用废水污染的示踪手段, 还没有讨论其在城市化与环境问题研究中的指示意

收稿日期: 2015-07-16; 修订日期: 2015-08-28

基金项目: 深圳市基础研究项目 (ZDSY20120614145024623)

作者简介: 徐特 (1991 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态规划与生态修复技术, E-mail: 1301213546@sz.pku.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: zengh@pku.edu.cn

义,因此,有必要探究 LABs 对城市化进程的指示价值. 考虑到土地利用类型变化是城市化过程的重要特征^[14],同时也考虑到作为污染物重要汇聚场所的土壤可直接反映人为活动的类型与类别^[15],本研究将以土壤作为环境介质,讨论 LABs 赋存状态与城市化的关系.

深圳是我国快速城市化地区的典型代表,以其作为目标区开展此项研究,对于理清城市化过程与环境问题的响应关系具有重要价值,同时还可以为中国甚至世界上其他类似地区相应的城市发展与环境保护问题提供参考.

1 材料与方法

1.1 试剂与标准品

一级标准品,LAB 的单体标样 1-C_n (*n* 为 10 ~ 13) 由 Sigma-Aldrich Inc. 购得. 二级标准品,LABs 混合标样由宝洁公司得到(中国广州). 内标 1-C₁₅-d₃₆ (1-phenylpentadecane-d₃₆) 和回收率指示物标准品 1-C₁₂-d₃₀ (1-phenyldodecane-d₃₀) 由 C/D/N Isotopes (Pointe-Claire, Quebec, Canada) 购得. 目前只有几种单标(均为 1-C_n)可以购买获得,因此二级标准品不得不利用同碳数一级标准品对其进行标定,标定方法和过程详见先前的研究^[16]. 所有工作溶液均以正己烷作为溶剂.

硅胶(80 ~ 100 目)、氧化铝(100 ~ 200 目)在使用前均先用甲醇抽提 24 h,然后用二氯甲烷抽提 24 h. 实验所需的正己烷、二氯甲烷、甲醇和丙酮在使用前均通过玻璃蒸馏装置进行二次蒸馏纯化.

1.2 样品采集

于 2014 年 11 ~ 12 月在深圳市范围内,依据不同的土地利用类型和空间均匀布点原则,以 4.5 km × 4.5 km 的正方形为基本框架,取正方形中心为样点,共采集表层土壤样品 96 个(图 1). 其中,工业用地 13 个、交通用地 28 个、居民用地 10 个、垃圾堆放点 7 个、林地 14 个、绿地 6 个、农业用地 5 个、未利用地 8 个及饮用水水源地 5 个. 具体依据梅花形布点法采样,以采样点为中心,划定 10 m 正方形地块,在四角及中心位置各采 100 g 表层土壤样品(0 ~ 10 cm),均匀混合. 土壤样品置于 -20℃ 的冰柜中保存,直至后续分析.

1.3 样品前处理

萃取前,将土壤样品进行冷冻干燥,经研磨后过 80 目筛子. 准确称取 20 g 冷冻干燥好的土壤样品,包于干净的滤纸筒,以 200 mL 二氯甲烷:丙酮(体



图 1 深圳市表层土壤采样点分布

Fig. 1 Distribution of surface soil sampling sites in Shenzhen City

积比为 1:1) 作为萃取溶剂,加入一定量的回收率指示物后进行索式抽提 24 h. 将抽提液用旋转浓缩仪(上海,亚荣)浓缩至 1 mL 左右,然后用体积比为 2:1 的中性硅胶氧化铝柱对样品进行净化. 用 70 mL 的正己烷和二氯甲烷(7:3, 体积比)混合液淋洗并收集. 将淋洗液浓缩至 1 mL 左右后,转移至细胞瓶,并在柔和的氮气下,定容至 0.5 mL,加入内标等待上机测定.

1.4 仪器分析

采用岛津 GC/MS-QP2010 色谱质谱联用仪,在电子轰击和选择性离子扫描模式下进行测定. 色谱分离采用 DB-5MS 色谱柱(60 m, J&W Scientific, Folsom, CA, USA),柱子升温程序为:80℃ 以 10℃·min⁻¹ 升至 180℃,并保持 10 min,此后再以 3℃·min⁻¹ 升温速率升温至 270℃. 定性和定量离子为 *m/z* 91、100 和 105. 载气为氦气,采用不分流进样. 以标定过的二级标准品配成标准曲线,采用五点内标法对样品中的 LABs 进行定量分析.

1.5 总有机碳的测定

取研磨后的样品 1 g 左右,于 50℃ 下烘干. 用 1 mol·L⁻¹ 的 HCl 溶液去除无机碳,静置 24 h. 反复 4 ~ 5 次,加入超纯水清洗、离心、倾倒上清液,用 pH 试纸检测直至中性. 接着于 50℃ 烘干至恒重,用锡舟包好称量,采用 Vario ELIII Elementar (Germany) 元素分析仪测定总机碳含量. 以乙酰苯胺 (acetanilide) 作为标准品建立标准曲线,测定 70 个样品后添加 3 个校准标样以监测仪器分析的准确性和可靠性.

1.6 质量控制与保证

分析过程中,样品的平均回收率为 62% ± 9.5% (回收率指示物均于萃取之前加入样品中). 每分析 20 个实际样品,做一组例行实验过程空白. 空白加标的平均回收率为 61% ± 9.7%. 所有报道的 LABs 浓度都是归一化到干重,未经空白校正和

回收率校正. LABs 代表从 C_{10} 到 C_{13} 的直链烷基苯总和.

2 结果与讨论

2.1 土壤中 LABs 的浓度

整体而言,深圳市表层土壤样品具有较低的 LABs 浓度水平(图 2). 根据本研究测定结果,深圳表层土壤 LABs 浓度变化范围为 $5.49 \sim 48.42 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均值为 $13.04 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 比珠三角及其邻近区域土壤中 LABs 浓度($1.20 \sim 122 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $8.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[17] 略高. 与 2009~2010 年深圳市土壤中 LABs 浓度($3.79 \sim 13.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均 $9.27 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[17] 相比,2014 年土壤 LABs 浓度略有增高.

鉴于土壤中 LABs 的报道很少,此处主要参考已有研究中水体沉积物中(与土壤类似,均为固相介质)数据,做简单比较. 从图 2 可以看出,大多数情况下,深圳表层土壤中 LABs 的浓度范围与除珠三角之外的其它地区底泥中的浓度范围有重叠,从平均值来看,均低于底泥中的含量(东莞造纸厂出水, $1\,162 \sim 3\,266 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[18]、雅加达湾, $235 \sim 86\,700 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[19]、日本东京湾, $3.0 \sim 5\,860 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[20]、巴西巴比通格湾底泥, $< \text{LD} \sim 413.3 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[21]),但与珠江三角洲邻近水体底泥浓度水平可以比较(广东海岸底泥, $11.0 \sim 162 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[22]、东江底泥, $1.5 \sim 410 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[18]、南海北部底泥, $2.50 \sim 23.1 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[23]、珠江口底泥, $5.8 \sim 25.8 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ ^[23]).

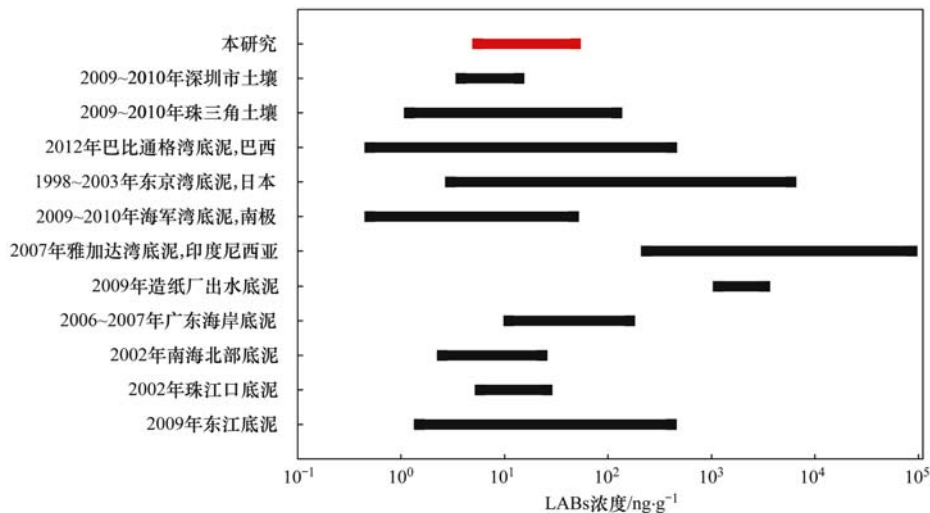


图 2 比较深圳市土壤与其他地区土壤及底泥中直链烷基苯的浓度水平

Fig. 2 Concentrations of total linear alkylbenzenes in soils and coastal sediments around the world

不同的土地利用类型是城市化过程中人为活动空间差异化的表征,深圳市不同土地利用类型土壤中 LABs 浓度如图 3 所示. 利用 Kruskal-Wallis 非参数多独立样本检验方法进行显著性差异分析,不同土地利用类型土壤中 LABs 浓度水平在空间分布上具有显著性差异($P=0.03$). 由红色的均值线可以看出土壤中 LABs 平均浓度水平呈以下趋势:居民用地($19.38 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 工业用地($15.18 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 垃圾堆放点($14.31 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 交通用地($12.85 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 农业用地($12.37 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 林地($11.28 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 饮用水水源地($11.00 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 未利用地($10.45 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$) > 绿地($7.07 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$). 其中,居民用地的样点 LABs 浓度值最高,这与居民区内人为活动强度较大相关. 值得注意的是,本研究中得出的饮用水水源地 LABs 值($7.82 \sim 18.82 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)比珠三角及其邻近区域中饮用水水源地 LABs 的

($1.50 \sim 6.90 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$)^[17] 高,说明深圳市饮用水水源地受到人为活动的干扰较大.

此外,将深圳市土壤中总有机碳(total organic

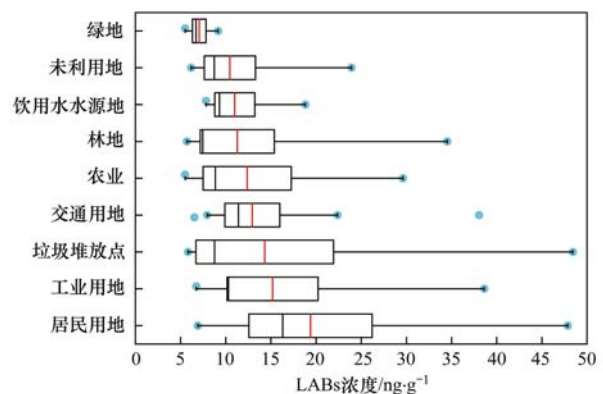


图 3 深圳市土壤中 LABs 在不同土地利用类型中的分布

Fig. 3 Distribution of linear alkylbenzenes in surface soil with different land use types

carbon, TOC)的含量与 LABs 含量做了相关性分析,相关系数 $R^2 = 0.1338$,结果表明两者之间几乎不存在相关关系,这一结果与 Wei 等^[17]在珠三角的研究结论一致,即整个珠三角土壤有机质含量与土壤 LABs 之间也几乎不存在好的相关性.这些现象说明土壤有机质不是影响土壤中 LABs 浓度空间分布的主要因素,至少,在珠江三角洲情况如此.

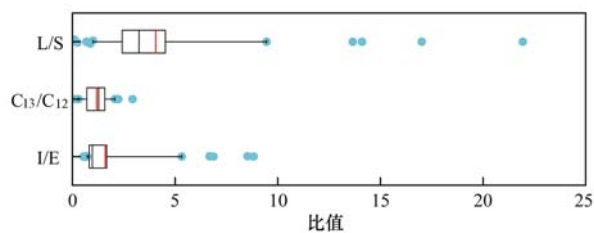
2.2 土壤中 LABs 的降解

深圳表层土壤中不同碳数 LABs 的相对丰度变化特征为: C_{12} -LABs ($38.2\% \pm 5.1\%$) > C_{13} -LABs ($30.7\% \pm 1.3\%$) > C_{11} -LABs ($20.4\% \pm 3.2\%$) > C_{10} -LABs ($10.8\% \pm 2.8\%$). 广东省最为常用的三类洗涤剂(洗衣粉、洗洁精和洗发水)中, C_{12} -LABs ($36.2\% \pm 5.1\%$) 为主要成分,接着是 C_{13} -LABs ($29.9\% \pm 6.8\%$), C_{11} -LABs ($25.6\% \pm 6.1\%$) 和 C_{10} -LABs ($8.19\% \pm 7.2\%$)^[23]. 可以看出,土壤中 LABs 的组成特征与洗涤剂相似,证明土壤中 LABs 主要来源于城市生活对洗涤用品的消耗,这也说明,用土壤 LABs 指示城市化过程人为活动具有合理性.

相关研究表明^[16],降解指数 $(C_{12} + C_{11}) / \sum \text{LAB}$ 会随着 LABs 的降解而减小,本研究中 $(C_{12} + C_{11}) / \sum \text{LAB}$ 的平均值为 54.3%,比洗涤用品中的对应比值 61.8% 略有降低,由此估算土壤中 LABs 发生了一定程度的降解.此外,研究者还提出其它几种用于指示 LABs 降解程度的参数,包括 L/S 值[即 $(5-C_{13} + 5-C_{12}) / (5-C_{11} + 5-C_{10})$], C_{13}/C_{12} 值(即 $C_{13}\text{-LABs}/C_{12}\text{-LABs}$)和 I/E 值[即 $(6-C_{12} + 5-C_{12}) / (4-C_{12} + 3-C_{12} + 2-C_{12})$]^[24, 25],这 3 种参数都会随着 LABs 的降解逐渐增加.本研究计算了土壤中 LABs 的这 3 种降解参数(图 4),其中 L/S 值的变化范围为 0.1 ~ 21.9 (平均值:4.1;中值:3.2)、 C_{13}/C_{12} 值的变化范围为 0.2 ~ 2.9 (平均值:1.2;中值:1.3)、I/E 值的变化范围为 0.5 ~ 8.8 (平均值:1.6;中值:1.0).与洗涤剂中的 3 个参数[L/S 值 (0.2 ~ 3.1;平均值:1.8;中值:1.9)、 C_{13}/C_{12} 值 (0.5 ~ 1.2;平均值:0.8;中间值:0.8)、I/E 值 (0.5 ~ 1.6;平均值:1.0;中间值:1.0)]^[16]相比,土壤中 LABs 的降解参数均高于洗涤剂中的对应值,再次证明 LABs 在土壤环境中发生了降解,与 $(C_{12} + C_{11}) / \sum \text{LAB}$ 指数判断结果一致.

2.3 城市化过程与 LABs 的相关性

根据之前的讨论,土壤中 LABs 可以用作城市



$$\text{L/S 值: } (5-C_{13} + 5-C_{12}) / (5-C_{11} + 5-C_{10});$$

$$\text{I/E 值: } (6-C_{12} + 5-C_{12}) / (4-C_{12} + 3-C_{12} + 2-C_{12});$$

$$C_{13}/C_{12}: \sum i-C_{13} \text{ 与 } \sum i-C_{12} \text{ 的比例}$$

图 4 深圳市土壤中 LABs 的降解参数

Fig. 4 Box plots of L/S, C_{13}/C_{12} and I/E of LABs in surface soil from Shenzhen City

化进程指示物,本节将以此为基础,讨论城市化过程与土壤 LABs 浓度的关系.为此,本研究以深圳市 10 个行政区为单位,从人口规模、用水状况、城市建设、收入与消费及产业结构这 5 个方面对土壤中 LABs 的含量潜在影响进行相关分析(图 5),从而论证土壤中 LABs 含量的空间差异特征及其对城市化进程指示意义.

人口规模变化是城市化进程的重要标志,因此本研究首先从人口规模的角度讨论城市化过程与土壤 LABs 的相互关系.如图 5(a)、5(b)所示,土壤 LABs 浓度水平与常住人口数量^[26]之间存在线性正相关关系,反映出人口规模是影响土壤中 LABs 含量的一个重要因素,与先前研究认为人口规模是决定水环境中 LABs 浓度水平的主要因素结论一致^[16].随着人口密度^[26]的增高,LABs 浓度则出现先增大后减小的趋势,主要是由于人口密度小的地区(如大鹏新区、盐田区)人口少,导致洗涤用品消耗和排放强度较低,故土壤 LABs 的值较低;人口密度中等的地区(如龙岗区、宝安区)人为活动强度有显著增加,输运和处置民用污水的基础设施建设不配套,对污染的处理水平较低,可能导致含有 LABs 的民用废水排放对土壤造成污染,因此 LABs 的浓度水平较高;而人口密度高的地区(如罗湖区、福田区),它们是深圳市的市中心区域,虽然人为活动强度最大,但由于污水排放及处理基础设施比较完善,对生活污水排放有较好的处置,所以土壤中 LABs 的含量比人口密度中等的地区有了显著的降低.

城市用水总量也可以反映城市化过程中的某些变化,本研究从用水状况方面分析了 LABs 与城市化过程的响应关系[图 5(c)、5(d)]^[27~36].结果表明,土壤中 LABs 含量与供水量之间存在线性正相

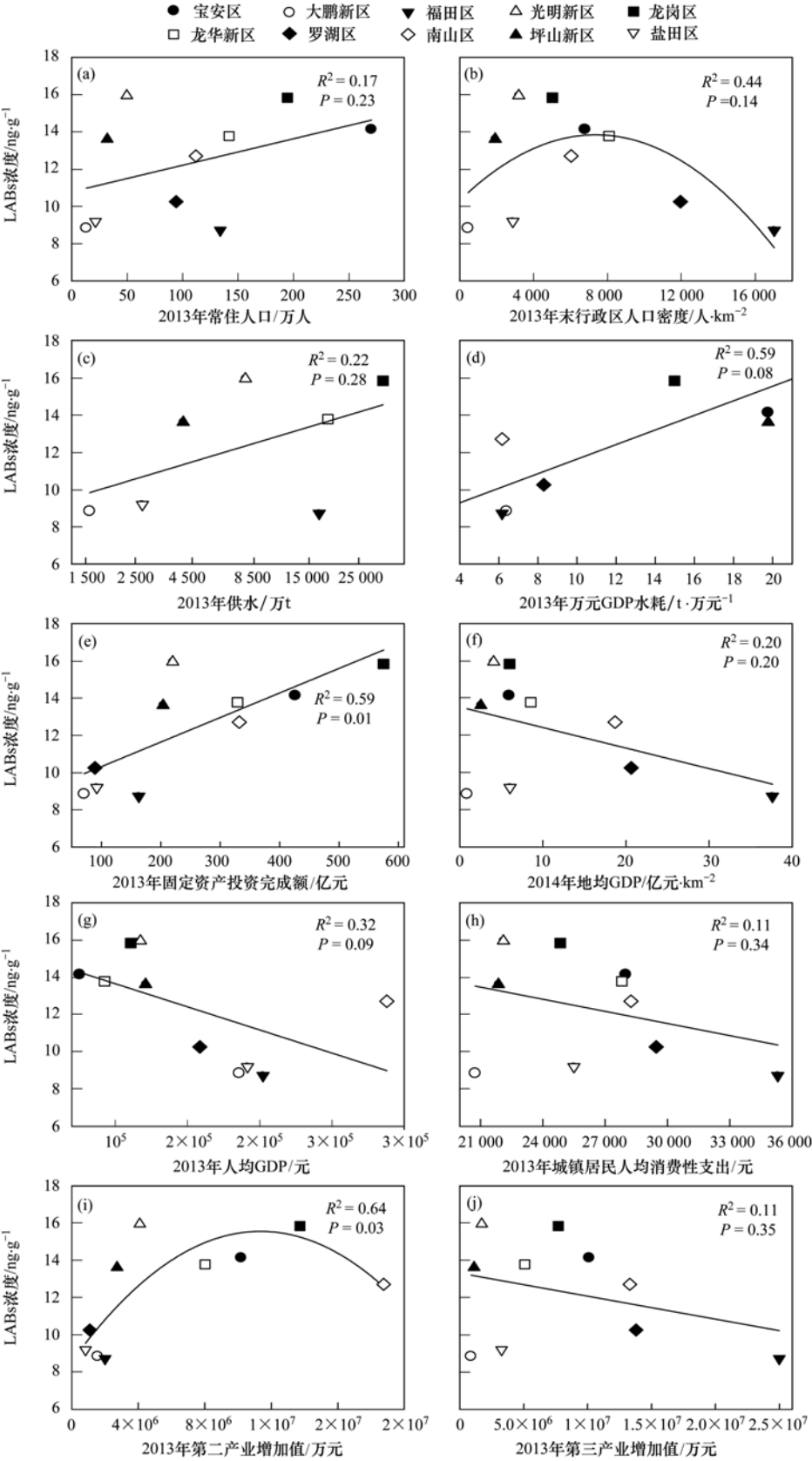


图5 城市化过程中人为活动与 LABs 的关系

Fig. 5 Correlation between linear alkylbenzenes concentration and human activities in the process of urbanization

关关系,供水量的升高会导致 LABs 浓度的增加,再次证实,LABs 是来源于洗涤剂的环境分子标志物. 土壤中 LABs 浓度与万元 GDP 水耗之间的线性正相关,反映出用水效率的提高可以显著降低土壤 LABs 的浓度水平,由此可知,提高城市化中生产过程的技术水平及资源利用效率,能有效地降低与 LABs 有类似性质的憎水性有机物的环境污染水平.

从城市建设的视角,研究发现土壤中 LABs 浓度增长与建设用地密度增大呈同向变化(图 6),按照典型非城市地区(建设用地密度 20% 以下),过渡带(建设用地密度 20% ~ 80%),城市核心区(建设用地密度 80% 以上)的次序^[37],土壤 LABs 浓度依次增大($12.4 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$ 递增至 $13.6 \text{ ng} \cdot \text{g}^{-1}$). 此外,由图 5(e)、5(f)还可以发现,LABs 的浓度与固定资产完成额^[26]之间存在正相关关系,城市化过程中开发利用程度较低的区域(如光明新区、盐田区)土壤 LABs 的浓度水平较低,已经成熟发展的地区(如罗湖区、福田区)LABs 的浓度水平也很低,而正在快速发展的地区(如龙岗区、宝安区)LABs 浓度水平则较高,这充分说明城市化发展阶段是影响 LABs 浓度水平的重要因素. 地均 GDP^[26]是反映土地产出效益的指标,土壤中 LABs 含量与地均 GDP 呈现线性负相关,可以明确地反映出土地利用效率的提高与用水效率的提高一样能有效地降低与 LABs 有类似性质的憎水性有机物污染水平.

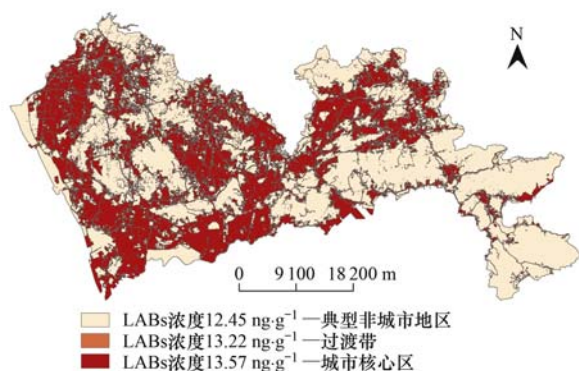


图 6 深圳市不同建设用地区域土壤 LABs 浓度

Fig. 6 Classification map of construction land density and concentration of LABs in Shenzhen City

居民的收入及消费能力也是城市化过程的重要指标,本研究发现,收入与消费同样会对 LABs 的含量水平产生影响[图 5(g)、5(h)],土壤中 LABs 的浓度水平与人均 GDP^[26]、人均消费性支出^[26]之间均存在一定程度的线性负相关. Wei 等^[17]的研究表明,LABs 浓度与人均 GDP 存在正相关关系,与本研究得出的结论正好相反. 本研究认为,LABs 与人均

GDP 之间可能存在“库兹涅茨倒 U 形曲线”^[38]. 即,随着人均 GDP 的增加,LABs 浓度出现先增大后减小的趋势. 具体来说,深圳大多数区域属于经济发展水平较高的地区,故整体处于倒 U 形曲线的后半段,即环境中污染物浓度随着人均 GDP 的增大而减小. LABs 浓度与人均消费支出之间的负相关关系,则反映出人民生活水平的提高会带来生活方式的改变,进而对环境中污染物的含量产生影响. 众所周知,在人均日常洗护产生的排放量基本不变的情况下,生活水平较高的人群会将衣物、汽车等送到专门的地点进行清洁,产生污染的转移,从而降低了本地区污染物的浓度水平.

此外,本研究还发现,LABs 浓度水平还与产业结构^[26]密切相关,结合二、三产的曲线与 LABs 含量的拟合曲线[图 5(i)、5(j)],可以发现,以光明区、盐田区为代表的地区,二、三产业均不发达,人为活动程度较低,因此存在较低的 LABs 浓度水平;以罗湖区、福田区为代表的市中心区,主要以高附加值的第三产业为主,不会对环境产生太大的影响,故 LABs 值也较低;而以龙岗区、宝安区为代表的地区,主要以传统的第二产业为支柱,对环境的破坏及资源的掠夺都是最大的,因此土壤中 LABs 的含量较高;然而,以南山区为代表的地区,是以高新技术产业为核心发展起来的,因此在高产值的情况下仍保持较低的 LABs 浓度水平.

综上所述,城市化过程中人口规模、用水状况、城市建设、收入与消费及产业结构这 5 个方面的因素都会对周边环境中 LABs 污染水平产生影响,表明土壤中 LABs 水平与城市化过程密切相关,也说明 LABs 可以作为环境分子标志物用于指示城市化过程,评价人类活动对土壤生态环境的影响,甚至为以 LABs 浓度为基础,反演城市化过程提供了可能.

需要特别说明,本节讨论的上述相关性并非非常显著,但趋势明确. 引发土壤中 LABs 的含量与城市化过程拟合度较弱的原因可以归结为:①统计数据的不确定性;②野外采样和实验室分析存在偏差;③土壤 LABs 存在不同程度的降解. 随后的研究应该尽量搜集更多数据,相互校验;同时加强野外采样和实验室分析的质量控制与质量保证实际效果.

3 结论

(1) 总体来说,深圳市表层土壤样品中具有较低的 LABs 浓度水平,但比珠三角其他区域土壤

LABs 浓度稍高,同时也比深圳市 2009 ~ 2010 年土壤中 LABs 浓度高,说明在珠三角,深圳具有较高的城市化程度,而且近年来深圳市的快速城市化程度持续增加。

(2)居民用地表层土壤中 LABs 的含量最高,其次是工业用地、垃圾堆放点、交通用地及农业用地,其他用地类型的浓度均较低且差异不大。深圳市饮用水水源地 LABs 值较高,说明受到人为活动的干扰较大,需要引起足够的重视。

(3)深圳市土壤中 LABs 与 10 个行政区的人口规模、用水状况、城市建设、收入与消费及产业结构都存在良好的相关关系,证实 LABs 可以作为环境分子标志物反演城市化过程的整体变化特征。

参考文献:

- [1] Zhang C, Tian H Q, Chen G S, *et al.* Impacts of urbanization on carbon balance in terrestrial ecosystems of the Southern United States[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **164**: 89-101.
- [2] Grimm N B, Faeth S H, Golubiewski N E, *et al.* Global change and the ecology of cities[J]. *Science*, 2008, **319**(5864): 756-760.
- [3] 章迪, 曹善平, 孙建林, 等. 深圳市表层土壤多环芳烃污染及空间分异研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 711-718.
- [4] 孙建林, 常文静, 陈正侠, 等. 深圳大气颗粒物中卤代多环芳烃污染研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(5): 1513-1522.
- [5] 孙建林, 倪宏刚, 丁超, 等. 深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3089-3096.
- [6] 秦佩恒, 倪宏刚, 刘阳生, 等. 深圳市表层土壤中 PBDEs 空间分布特征及蓄积量估算[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, **47**(1): 127-132.
- [7] Sun J L, Ni H G, Zeng H. Occurrence of chlorinated and brominated polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments in Shenzhen, South China and its relationship to urbanization[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(10): 2775-2781.
- [8] Sun J L, Chen Z X, Ni H G, *et al.* PBDEs as indicator chemicals of urbanization along an urban/rural gradient in South China[J]. *Chemosphere*, 2013, **92**(4): 471-476.
- [9] Cao S P, Ni H G, Qin P H, *et al.* Occurrence and human non-dietary exposure of polycyclic aromatic hydrocarbons in soils from Shenzhen, China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2010, **12**(7): 1445-1450.
- [10] Wei G L, Liu L Y, Bao L J, *et al.* Tracking anthropogenic influences on the continental shelf of China with sedimentary linear alkylbenzenes (LABs)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, **80**(1-2): 80-87.
- [11] Ni H G, Shen R L, Zeng H, *et al.* Fate of linear alkylbenzenes and benzothiazoles of anthropogenic origin and their potential as environmental molecular markers in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(12): 3502-3507.
- [12] Overcash M, Sims R C, Sims J L, *et al.* Beneficial reuse and sustainability: The fate of organic compounds in land-applied waste[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(1): 29-41.
- [13] Ni H G, Lu F H, Luo X L, *et al.* Occurrence, phase distribution, and mass loadings of benzothiazoles in riverine runoff of the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(6): 1892-1897.
- [14] 窦磊, 杨国义. 珠江三角洲地区土壤有机氯农药分布特征及风险评价[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2954-2963.
- [15] 张枝焕, 陶澍, 叶必雄, 等. 土壤和沉积物中烃类污染物的主要来源与识别标志[J]. *土壤通报*, 2004, **12**(6): 793-798.
- [16] Ni H G, Lu F H, Wang J Z, *et al.* Linear alkylbenzenes in riverine runoff of the Pearl River Delta (China) and their application as anthropogenic molecular markers in coastal environments[J]. *Environmental Pollution*, 2008, **154**(2): 348-355.
- [17] Wei G L, Bao L J, Guo L C, *et al.* Utility of soil linear alkylbenzenes to assess regional anthropogenic influences with special reference to atmospheric transport[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **487**: 528-536.
- [18] Zhang K, Wang J Z, Liang B, *et al.* Assessment of aquatic wastewater pollution in a highly industrialized zone with sediment linear alkylbenzenes[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, **31**(4): 724-730.
- [19] Rinawati, Koike T, Koike H, *et al.* Distribution, source identification, and historical trends of organic micropollutants in coastal sediment in Jakarta Bay, Indonesia[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, **217-218**: 208-216.
- [20] Isobe K O, Zakaria M P, Chiem N H, *et al.* Distribution of linear alkylbenzenes (LABs) in riverine and coastal environments in South and Southeast Asia[J]. *Water Research*, 2004, **38**(9): 2449-2459.
- [21] Martins C C, Cabral A C, Barbosa-Cintra S C T, *et al.* An integrated evaluation of molecular marker indices and linear alkylbenzenes (LABs) to measure sewage input in a subtropical estuary (Babitonga Bay, Brazil)[J]. *Environmental Pollution*, 2014, **188**: 71-80.
- [22] Liu L Y, Wang J Z, Wong C S, *et al.* Application of multiple geochemical markers to investigate organic pollution in a dynamic coastal zone[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, **32**(2): 312-319.
- [23] Luo X J, Chen S J, Ni H G, *et al.* Tracing sewage pollution in the Pearl River Delta and its adjacent coastal area of South China Sea using linear alkylbenzenes (LABs)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **56**(1): 158-162.
- [24] Gustafsson Ö, Long C M, Macfarlane J, *et al.* Fate of linear alkylbenzenes released to the coastal environment near Boston Harbor[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(10): 2040-2048.
- [25] Takada H, Ishiwatari R. Biodegradation experiments of linear

- alkylbenzenes (LABs): isomeric composition of C_{12} LABs as an indicator of the degree of LAB degradation in the aquatic environment[J]. *Environmental Science & Technology*, 1990, **24**(1): 86-91.
- [26] 深圳市统计局. 深圳统计年鉴 2014[EB/OL]. <http://www.szsj.gov.cn/nj2014/indexce.htm>, 2015-07-05.
- [27] 深圳市盐田区统计局. 2013 年深圳市盐田区统计年报[EB/OL]. <http://www.yantian.gov.cn/cn/zwgk/tj/tjnb/2013n/index.shtml>, 2015-07-06.
- [28] 深圳市坪山新区统计局. 坪山新区 2013 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.psxq.gov.cn/main/a/2014/t26/a20538_32157.shtml, 2014-06-26.
- [29] 深圳市南山区统计局. 2013 年南山统计年鉴[EB/OL]. <http://www.szns.gov.cn/tjj/resource/cms/2015/01/2015012111475411382.pdf>, 2015-07-06.
- [30] 深圳市罗湖区统计局. 深圳市罗湖区 2013 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. http://www.szlh.gov.cn/icatalog/a/2014/e04/a262029_979703.shtml, 2014-10-21.
- [31] 深圳市龙华新区统计局. 深圳市龙华新区 2014 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://www.szlhqx.gov.cn/lhxinqu/xxgk97/tjxx/tjgb41/747950/index.html>, 2015-04-02.
- [32] 深圳市龙岗区统计局. 深圳市龙岗区统计年鉴 2013[EB/OL]. <http://www.tjj.lg.gov.cn/col/col18636/index.html>, 2015-07-06.
- [33] 深圳市光明新区统计局. 深圳市光明新区 2013 年统计年报[EB/OL]. <http://www.szgm.gov.cn/szgm/132100/xwdt17/135200/151221/421655/index.html>, 2015-11-15.
- [34] 深圳市福田区统计局. 深圳市福田区统计年鉴 2013[EB/OL]. http://www.szft.gov.cn/bmxx/qtjj/zwxxgk/tjxx/tjnj/201410/t20141021_431939.html, 2015-07-06.
- [35] 深圳市大鹏新区政府. 大鹏新区 2013 年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. <http://www.dpxq.gov.cn/tjgb/4043.htm>, 2014-04-17.
- [36] 深圳市宝安区统计局. 2013 年宝安统计年鉴[EB/OL]. http://www.baoan.gov.cn/xxgk/tjsj/tjnn/201506/t20150605_640470.html, 2015-06-05.
- [37] 李书娟, 曾辉. 快速城市化地区建设用地沿城市化梯度的扩张特征——以南昌地区为例[J]. *生态学报*, 2004, **24**(1): 55-62.
- [38] Torras M, Boyce J K. Income, inequality, and pollution: a reassessment of the environmental Kuznets Curve[J]. *Ecological Economics*, 1998, **25**(2): 147-160.

CONTENTS

Investigation of Carbonaceous Airborne Particles by Scanning Proton Microprobe	BAO Liang-man, LIU Jiang-feng, LEI Qian-tao, <i>et al.</i> (1)
Atmospheric Polybrominated Diphenyl Ethers in Eight Cities of China; Pollution Characteristics and Human Exposure	LIN Hai-tao, LI Qi-lu, ZHANG Gan, <i>et al.</i> (10)
Light Absorption Properties of Water-Soluble Organic Carbon (WSOC) Associated with Particles in Autumn and Winter in the Urban Area of Guangzhou	 HUANG Huan, BI Xin-hui, PENG Long, <i>et al.</i> (16)
Investigations on Sulfur and Carbon Isotopic Compositions of Potential Polluted Sources in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Region	SHI Lei, GUO Zhao-bing, JIANG Wen-juan, <i>et al.</i> (22)
Pollution Level and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in Nanjing Before and After the Youth Olympic Games	 ZHANG Heng, ZHOU Zi-qiang, ZHAO Hai-yan, <i>et al.</i> (28)
Enrichment Characteristics and Source Analysis of Metal Elements in PM _{2.5} in Autumn in Nanchang City	LIN Xiao-hui, ZHAO Yang, FAN Xiao-jun, <i>et al.</i> (35)
Contributions of Factors That Influenced the Visibility In North Suburb of Nanjing In Winter and Spring	MA Jia, YU Xing-na, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (41)
A Case Study on the Rapid Cleaned Away of PM _{2.5} Pollution in Beijing Related with BL Jet and Its Mechanism	LIAO Xiao-nong, SUN Zhao-bin, HE Na, <i>et al.</i> (51)
Characteristics of Chemical Components in PM _{2.5} from the Coal Dust of Power Plants	WANG Yu-xiu, PENG Lin, WANG Yan, <i>et al.</i> (60)
Improvement of Air Quality During APEC in Beijing in 2014	CHENG Nian-liang, LI Yun-ting, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (66)
Evaluation on the Effectiveness of Vehicle Exhaust Emission Control Measures During the APEC Conference in Beijing	FAN Shou-bin, TIAN Ling-di, ZHANG Dong-xu, <i>et al.</i> (74)
Chemical Compositions and Sources Apportionment of Re-suspended Dust in Jincheng	WANG Yan, PENG Lin, LI Li-juan, <i>et al.</i> (82)
Characteristic of Particulate Emissions from Concrete Batching in Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, ZHONG Lian-hong, <i>et al.</i> (88)
Anthropogenic Ammonia Emission Inventory and Its Spatial Distribution in Chang-Zhu-Tan Region	YOU Xiang-yu, LIU Zhan, ZHANG Qing-mei, <i>et al.</i> (94)
Seasonal Variability of Greenhouse Gas Emissions in the Urban Lakes in Changchun, China	WEN Zhi-dan, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (102)
Absorption Characteristics of Particulates and CDOM in Waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn	LI Si-jia, SONG Kai-shan, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (112)
Hydrochemical Characteristics and Influencing Factors in Different Geological Background; A Case Study in Darongjiang and Lingqu Basin, Guangxi, China	 SUN Ping-an, YU Shi, MO Fu-zhen, <i>et al.</i> (123)
Community Structure of Aquatic Community and Evaluation of Water Quality in Laoyingyan Section of Dadu River	HUANG You-you, ZENG Yu, LIU Shou-jiang, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Losses in Longhong Ravine Basin of Westlake in Rainstorm Runoff	YANG Fan, JIANG Yi-feng, WANG Cui-cui, <i>et al.</i> (141)
Soil Phosphorus Forms and Leaching Risk in a Typically Agricultural Catchment of Hefei Suburban	FAN Hui-hui, LI Ru-zhong, PEI Ting-ting, <i>et al.</i> (148)
Concentrations and Distribution of Metals in the Core Sediments from Estuary and City Section of Liaohe River	WANG Wei-jie, ZHOU Jun-li, PEI Shao-wei, <i>et al.</i> (156)
Distribution Characteristics and Pollution Status Evaluation of Sediments Nutrients in a Drinking Water Reservoir	HUANG Ting-lin, LIU Fei, SHI Jian-chao (166)
Effect of Low Molecular Weight Organic Acids on the Chemical Speciation and Activity of Mercury in the Soils of the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	 YOU Rui, LIANG Li, QIN Cai-qing, <i>et al.</i> (173)
Arsenic Content and Speciation in the Surficial Sediments of Liangshui River in Beijing	WANG Xin-hui, SHAN Bao-qing, TANG Wen-zhong, <i>et al.</i> (180)
Effect of UV Light Radiation on the Coagulation of Chlorella and Its Mechanism	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, XU Hong-bin, <i>et al.</i> (187)
Photocatalytic Oxidation of <i>p</i> -arsanilic Acid by TiO ₂	XU Wen-ze, YANG Chun-feng, LI Jing, <i>et al.</i> (193)
Photodegradation of Ciprofloxacin Hydrochloride in the Aqueous Solution Under UV	DUAN Lun-chao, WANG Feng-he, ZHAO Bin, <i>et al.</i> (198)
Adsorption of Phosphate by Lanthanum Hydroxide/Natural Zeolite Composites from Low Concentration Phosphate Solution	LIN Jian-wei, WANG Hong, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (208)
Experimental Research of Hg(II) Removal from Aqueous Solutions of HgCl ₂ with Nano-TiO ₂	ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (220)
Development of Chemical Exposure Prediction Model for Aerobic Sewage Treatment Plant for Biochemical Wastewaters	ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, SHI Li-li, <i>et al.</i> (228)
Degradation Characteristics of Three Aniline Compounds in Simulated Aerobic Sewage Treat System	GU Wen, ZHOU Lin-jun, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (240)
Advanced Treatment of Effluent from Industrial Park Wastewater Treatment Plant by Ferrous Ion Activated Sodium Persulfate	ZHU Song-mei, ZHOU Zhen, GU Ling-yun, <i>et al.</i> (247)
Recent Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soils from Yangtze River Delta	LI Jing-ya, WU Di, XU Yun-song, <i>et al.</i> (253)
Preliminary Study on Linear Alkylbenzenes as Indicator for Process of Urbanization	XU Te, ZENG Hui, NI Hong-gang (262)
Pollution Assessment and Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Soils of Coal Mining Area in Longkou City	LIU Shuo, WU Quan-yuan, CAO Xue-jiang, <i>et al.</i> (270)
Effects of Reduced Water and Diurnal Warming on Winter-Wheat Biomass and Soil Respiration	WU Yang-zhou, CHEN Jian, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (280)
Effect of Recycled Water Irrigation on Heavy Metal Pollution in Irrigation Soil	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia, FU Hui-min (288)
Effect of Biochar Application on Soil Aggregates Distribution and Moisture Retention in Orchard Soil	AN Yan, JI Qiang, ZHAO Shi-xiang, <i>et al.</i> (293)
Effects of Three Industrial Organic Wastes as Amendments on Plant Growth and the Biochemical Properties of a Pb/Zn Mine Tailings	 PENG Xi-zhu, YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (301)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Ce Uptake of Maize Grown in Ce-contaminated Soils	WANG Fang, GUO Wei, MA Peng-kun, <i>et al.</i> (309)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Phthalic Acid Esters in Agricultural Products Around the Pearl River Delta, South China	 LI Bin, WU Shan, LIANG Jin-ming, <i>et al.</i> (317)
Bioaccumulation and Biomagnification of Heavy Metals in Three Gorges Reservoir and Effect of Biological Factors	WEI Li-li, ZHOU Qiong, XIE Cong-xin, <i>et al.</i> (325)
Comparisons of Microbial Numbers, Biomasses and Soil Enzyme Activities Between Paddy Field and Dryland Origins in Karst Cave Wetland	 JIN Zhen-jiang, ZENG Hong-hu, LI Qiang, <i>et al.</i> (335)
Analysis on Diversity of Denitrifying Microorganisms in Sequential Batch Bioreactor Landfill	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (342)
Synthesis of Fe/nitrogen-doped Carbon Nanotube/Nanoparticle Composite and Its Catalytic Performance in Oxygen Reduction	YANG Ting-ting, ZHU Neng-wu, LU Yu, <i>et al.</i> (350)
Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission from Rice Paddy	DENG Huan, CAI Li-cheng, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (359)
Effect of Aeration Strategies on Emissions of Nitrogenous Gases and Methane During Sludge Bio-Drying	QI Lu, WEI Yuan-song, ZHANG Jun-ya, <i>et al.</i> (366)
Treatment of Flue Gas from Sludge Drying Process by A Thermophilic Biofilter	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (377)
Application of FCM-qPCR to Quantify the Common Water Pathogens	WANG Ming-xing, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (384)
Effect of Acetonitrile and <i>n</i> -hexane on the Immunoassay of Environmental Representative Pollutants	LOU Xue-ning, ZHOU Li-ping, SONG Dan, <i>et al.</i> (391)
Compositional Variation of Spent Mushroom Substrate During Cyclic Utilization and Its Environmental Impact	LOU Zi-mo, WANG Zhuo-xing, ZHOU Xiao-xin, <i>et al.</i> (397)

《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1月15日 第37卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 1 Jan. 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