

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第4期

Vol.33 No.4

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

碳同位素比技术定量估算城市大气 CO₂ 的来源 刘卫, 位楠楠, 王广华, 姚剑, 曾友石, 范雪波, 耿彦红, 李燕 (1041)

广州大气降水中稳定同位素对 2008 年初华南地区冰雪灾害期间水汽来源的反映 廖聪云, 钟巍, 马巧红, 薛积彬, 尹焕玲, 龙昆 (1050)

北京雾霾天气期间气溶胶光学特性 于兴娜, 李新妹, 登增然登, 德庆央宗, 袁帅 (1057)

白马泉风景区夏季大气 PM_{2.5} 中二次有机物的初步研究 代东决, 李黎, 刘子芳, 赵敏, 冯加良, 赖玮, 曾燕梅, 周宇, 刘露云, 邓仕槐 (1063)

机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性 乔月珍, 王红丽, 黄成, 陈长虹, 苏雷燕, 周敏, 徐骅, 张钢锋, 陈宜然, 李莉, 陈明华, 黄海英 (1071)

法国梧桐叶片氮含量及氮同位素对城市大气湿沉降氮的响应研究 王燕丽, 肖化云, 肖红伟 (1080)

胶州湾及邻近海域表层海水中一氧化氮浓度分布及其影响因素探讨 薛超, 刘春颖, 杨桂朋, 祝陈坚, 张洪海 (1086)

基于不确定性分析的太湖水体多环芳烃的生态风险评价 郭广慧, 吴丰昌, 何宏平, 冯承莲, 张瑞卿, 李会仙 (1091)

流域水质时空分布特征及其影响因素初析 黄金良, 黄亚玲, 李青生, 周增荣, 冯媛, 张祯宇 (1098)

潮白河周丛生物群落元素组成与水质变化的生态计量学关系研究 崔经国, 单保庆, 王帅 (1108)

春季盘溪河水质日变化规律及水质评价 张千千, 王效科, 郝丽岭, 逯非, 欧阳志云, 侯培强 (1114)

西南喀斯特流域风化作用季节性变化研究 肖琼, 沈立成, 杨雷, 伍坤宇, 陈展图 (1122)

三峡水库开县消落区水域冬季蓄水期间藻类群落结构与水质评价 郭劲松, 谢丹, 李哲, 陈园, 孙志禹, 陈永柏, 龙曼 (1129)

淀山湖水华高发期浮游植物群落变化特征研究 徐春燕, 杨洁, 马明睿, 胡雪芹, 由文辉 (1136)

三峡库区典型消落带草本植物氮磷养分浸泡释放实验 王建超, 朱波, 汪涛, 易礼军 (1144)

沂蒙山区典型小流域特殊降雨的磷素输出特征 李振炜, 于兴修, 刘前进, 井光花 (1152)

合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性 李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠 (1159)

鹤地水库沉积物营养盐及重金属分布和污染特征分析 张华俊, 陈修康, 韩博平, 罗勇, 杨浩文, 曾艳, 陈敬安 (1167)

三门峡库区河流湿地沉积物重金属赋存形态和风险评价 敖亮, 单保庆, 张洪, 唐文忠 (1176)

黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 李萍, 朱龙海 (1182)

竺山湾重金属污染底泥环保疏浚深度的推算 姜霞, 王雯雯, 王书航, 金相灿 (1189)

雷州近海、流沙湾和深圳湾沉积物 PAHs 污染特征分析 赵利容, 孙省利, 柯盛 (1198)

中国与印度典型城市道路街尘中多环芳烃与黑碳的对比研究 潘苏红, 张千, 孙亚莉, 解启来 (1204)

三江平原典型灌区井灌地下水中铁的随水迁移特征 邹元春, 于晓菲, 霍莉莉, 吕宪国, 姜明 (1209)

海水淡化水在既有管网输配的铁释放控制研究 田一梅, 刘扬, 赵鹏, 单金林, 杨所印, 刘伟 (1216)

新生态铁的混凝作用探索 杨雪, 张景成, 关小红 (1221)

饮用水中甲羟孕酮的臭氧氧化降解研究 岳婵媛, 缪恒锋, 任洪艳, 阮文权 (1227)

核壳式磁性碳纳米吸附剂的制备及其对水环境中金霉素的吸附研究 王懿萱, 张娣, 牛红云, 孟昭福, 蔡亚岐 (1234)

络合-超滤耦合工艺去除水中镍离子的研究 秦妹, 邵嘉慧, 何义亮, 李雯奎 (1241)

赤铁矿光助类 Fenton 降解有毒有机污染物 张钰, 顾彦, 杨慧, 何燕, 李瑞萍, 黄应平, 张爱清 (1247)

掺氮 Ta₂O₅ 诱发可见光-类 Fenton 体系降解阿特拉津研究 赵璐, 邓一荣, 杜瑛珣, 傅翔 (1252)

O₃/H₂O₂ 降解水中扑灭通效能研究 李绍峰, 孙楚 (1260)

Pr-N 共掺杂 TiO₂ 光电催化降解孔雀石绿动力学 沙爽, 周少奇, 张小娜, 周晓 (1267)

铜陵相思谷尾矿用于处理酸性矿山排水的实验研究 张楠, 陈天虎, 周跃飞, 黎少杰, 金杰, 王延明 (1272)

聚合铝铁对 A²/O 系统 EPS 及生物絮凝性能的影响 温沁雪, 刘爱翠, 陈志强, 施汉昌, 吕炳南 (1278)

温度对污水脱氮系统污染物去除效果及氧化亚氮释放的影响 张婷婷, 张建, 杨芳, 谢慧君, 胡振, 李一冉 (1283)

温度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能稳定性的影响 李祥, 黄勇, 郑宇慧, 袁怡, 李大鹏, 潘杨, 张春蕾 (1288)

好氧颗粒污泥处理制糖工业废水厌氧出水的除磷特性研究 王硕, 于水利, 时文歆, 暴瑞玲, 衣雪松, 李建政 (1293)

除磷颗粒污泥系统中不同粒径颗粒的理化特性分析 李志华, 张玉蓉, 杨帆, 李胜, 姬晓琴 (1299)

利用氧化亚氮还原酶基因 (nosZ) 评价人工湿地系统中的反硝化菌 王晓君, 陈少华, 张兆基, 肖俊超 (1306)

紫外诱变法提高好氧反硝化菌降解性能的研究 于佳佳, 陈浚, 杨宣, 陈建孟 (1313)

1 株异养硝化菌胞外聚合物的研究 陈哲, 张斌, 湛志强, 邱志刚, 郭迎庆, 李君文, 王景峰 (1318)

氨氮对稀有鮎鲫胚胎及卵黄囊期仔鱼的毒性效应研究 王志坚, 鲁增辉, 石萍 (1323)

多年蔬菜连作对土壤氨氧化微生物群落组成的影响 孟德龙, 杨扬, 伍延正, 吴敏娜, 秦红灵, 朱亦君, 魏文学 (1331)

生物质炭施用对土壤中氯虫苯甲酰胺吸附及消解行为的影响 王廷廷, 余向阳, 沈燕, 张超兰, 刘贤进 (1339)

水稻光合同化碳向土壤有机碳库输入的定量研究:¹⁴C连续标记法 聂三安, 周萍, 葛体达, 童成立, 肖和艾, 吴金水, 张杨珠 (1346)

油田污染土壤残留油组成与特征参数分析 王坚, 张旭, 李广贺 (1352)

挥发性氯代烃在湿润土壤中的平衡吸附研究 孟凡勇, 刘锐, 小林刚, 万梅, 余素林, 陈吕军 (1361)

田间土壤外源铜镍在小麦中的累积及其毒害研究 黄锦孙, 韦东普, 郭雪雁, 马义兵 (1369)

中国磷消费结构的变化特征及其对环境磷负荷的影响 马敦超, 胡山鹰, 陈定江, 李有润 (1376)

基于 3MRA 模型的填埋场安全填埋废物污染物阈值评估方法与应用研究 袁英, 席北斗, 何小松, 魏自民, 李鸣晓, 姜永海, 苏婧, 安达 (1383)

填埋垃圾初始含水率对渗滤液产量的影响及修正渗滤液产量计算公式 兰吉武, 詹良通, 李育超, 陈云敏 (1389)

生物反应器填埋场中邻苯二甲酸二丁酯的迁移转化 方程冉, 龙於洋, 沈东升 (1397)

岩溶区峰丛洼地植被指数的克里格分析 杨奇勇, 蒋忠诚, 马祖陆, 曹建华, 罗为群, 李文军, 段晓芳 (1404)

《环境科学》征订启事(1062) 《环境科学》征稿简则(1107) 信息(1135, 1215, 1396)

合肥城区地表灰尘氮磷形态分布及生物有效性

李如忠, 周爱佳, 童芳, 李峰, 钱家忠

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 为了解合肥市城区地表灰尘氮磷形态分布特征及其生物有效性, 在城市不同功能用地的不透水地面采集 52 份灰尘样品. 利用化学提取方法, 分析测得氨氮 ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)、易交换态磷 (Ex-P)、铝结合态磷 (Al-P)、铁结合态磷 (Fe-P)、闭蓄态磷 (Oc-P)、钙结合态磷 (Ca-P)、碎屑磷 (De-P) 和有机磷 (Or-P) 等各形态氮磷及总氮 (TN) 和总磷 (TP) 含量. 在此基础上, 开展各形态氮磷的空间分布特征、相关关系及生物有效性分析. 结果表明, 合肥市地表灰尘中氮的主要组成为有机氮 (Or-N)、磷的主要组分为无机磷 (IP); 各形态氮和磷的空间分布受城市土地利用类型影响较大, 部分氮磷形态表现出了较为显著的相关性; 在工业区、商业区、居住区、文教区、交通区和公园绿地等功能区, 生物有效性氮含量分别占 TN 的质量分数为 8.87%、9.60%、6.68%、9.37%、8.20% 和 8.17%, 生物有效性磷含量分别占 TP 的质量分数为 6.70%、18.19%、10.10%、9.69%、10.64% 和 14.03%.

关键词: 地表灰尘; 氮磷形态; 生物有效性; 非点源; 合肥市

中图分类号: X502 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)04-1159-08

Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City

LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, LI Feng, QIAN Jia-zhong

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To find out the distribution and bioavailability of nitrogen (N) and phosphorus (P) species in the urban dusts of Hefei City, 52 samples were collected from impervious areas with six different urban land-use types. The contents of ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- \text{-N}$), exchangeable P (Ex-P), Al-bound P (Al-P), Fe-bound P (Fe-P), occluded P (Oc-P), Ca-bound P (Ca-P), detrital apatite P (De-P), organic P (Or-P) as well as total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) were measured by sequential extraction methods. The studies on spatial distribution, correlation and bioavailability of nitrogen and phosphorus species were made according to the analyzed data. The results show that the TN is composed mainly of organic nitrogen (Or-N) while the TP consists chiefly of inorganic phosphorus (IP) in the urban dusts of Hefei City, and the spatial variability of nitrogen and phosphorus species contents are greatly affected by the mode of urban land-use type. In addition, there are significant correlations among partial nitrogen and phosphorus forms in dusts. Corresponding to different urban land-use types such as industrial area, commercial area, residential area, educational area, traffic area and public landscapes and city squares, the average ratios of bioavailable nitrogen content (the sum of $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ and $\text{NO}_3^- \text{-N}$) to TN are 8.87%, 9.60%, 6.68%, 9.37%, 8.20% and 8.17%, respectively, while the mean ratios of bioavailable phosphorus content (the sum of Ex-P, Al-P and Fe-P) to TP, are equal to 6.70%, 18.19%, 10.10%, 9.69%, 10.64% and 14.03%, respectively.

Key words: urban dusts; nitrogen (N) and phosphorus (P) species; bioavailability; non-point pollution source; Hefei City

城市中不透水地面的迅速增加改变了地表污染物的累积和冲刷规律, 使得非点源污染的“源”、“过程”、“汇”等都发生了变化^[1]. 作为污染物的重要载体, 地表灰尘是典型的非点源污染之一, 与水环境污染和大气污染密切相关. 一方面, 在降水条件下, 地表灰尘借助雨水的冲刷作用, 通过地表径流的途径进入水体, 给城市水环境造成直接的污染, 并且灰尘最终沉积到水体底部, 成为沉积物中氮磷营养盐的一个重要来源; 另一方面, 在风力、车流、人流等的作用下, 地表灰尘较易扬起, 并与大气颗粒物发生相互转化, 从而成为潜在污染源, 对环境和人体健康产生巨大影响^[2]. 因此, 城市地表灰尘污染问题受到

人们的关注^[3~5].

当前, 国内外大多数城市都不同程度面临着水体富营养化的困扰^[6,7]. 在控制外源负荷输入的过程中, 科学认识和评估城市地表灰尘的氮磷污染贡献及其生物有效性, 是一项很有实际意义的工作. 从近年来国内外相关研究的情况看, 重金属、难降解有毒有害物质等污染特征及其环境健康风险是城市地表灰尘污染研究的热点^[8~10], 而对诱发水体富营养化的灰

收稿日期: 2011-05-27; 修订日期: 2011-09-02

基金项目: 安徽省科技攻关计划重点项目(07010302165); 合肥工业大学创新群体基金项目(2009HGXX0233)

作者简介: 李如忠(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境保护与环境风险评价, E-mail: Lrz1970@163.com

尘中氮磷赋存形态及其生物有效性问题,似乎关注不多.目前,合肥市的主要城市水体基本上都已实现沿岸污水管道截污,但水体污染和富营养化状况依旧很严重,究其原因,可能与城市非点源污染有着密切联系.从水环境保护角度,本研究拟对合肥市区地表灰尘氮磷营养物赋存形态、空间分布特征及生物有效性开展分析,以期为该市非点源污染负荷估算、污染贡献评估及控制对策制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

合肥市为安徽省省会,地处长江、淮河之间,濒临巢湖水体.全市总面积为 838.52 km²,其中建成区面积 320 km²,市区常住人口 328 × 10⁴ (2010 年).近些年来,随着城市道路改造、工程项目建设及机动车数量的快速增加,该市水体和大气环境质量有明显下降趋势,特别是主城区.根据 2009 年合肥市环境状况公报,作为城市主要水体的南淝河水质为劣 V 类,主要污染物为 COD、TN、TP 和 NH₄⁺-N; 十五里河为劣 V 类,主要污染物为 NH₄⁺-N. 2009 ~ 2010 年,本课题组分多次对市区主要景观水体开展水质采样、分析,得到包河景区、西山景区、银河景区等水体 TN 分别为 6.71、4.36 和 2.89 mg·L⁻¹,TP 分别为 0.442、0.34 和 0.36 mg·L⁻¹,而且上述水体在夏季都不同程度地发生“水华”现象.截至 2010 年底,合肥市城市污水处理率已达 90%,处于全国先进行列,但对城市非点源污染,仍未引起必要的重视.

1.2 灰尘样品的采集及预处理

为了使收集的样品具有典型性和代表性,考虑将采样点主要布置在城市活动相对较为剧烈的二环以内,并在部分新建城区的重要地段也设置一定的采样点.按居住区(JZ)、商业区(SY)、工业区(GY)、文教区(WJ)、交通区(JT)和公园绿地(GL)等 6 个功能类别,共计安排 52 个采样点位(见图 1).

2010 年 4 月底至 7 月初,在至少连续 7 d 不降雨的条件下,利用毛刷和塑料铲收集不透水地面灰尘.在每个点位的 5 ~ 7 m² 范围内,随机选取 5 个点采集灰尘,充分混合后代表该点位的样品.将样品在实验室自然风干,剔除杂物并过 100 目尼龙筛后,装袋密封、干燥保存.

1.3 氮磷形态的测定

过筛后的样品分别用 2 mol·L⁻¹ KCl 溶液和 2 mol·L⁻¹ CaSO₄ 溶液浸提,取适量提取液进行分析测试,其中 NH₄⁺-N 含量以纳氏试剂光度法、NO₃⁻-N

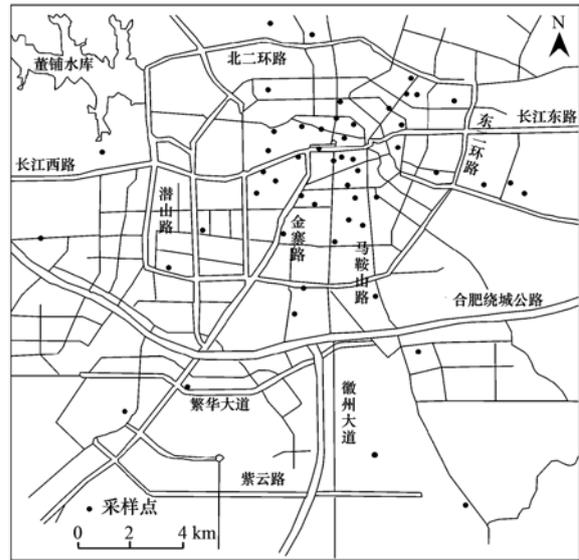


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites

以酚二磺酸法测定; TN 采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定^[11].考虑到地表灰尘中亚硝态氮(NO₂⁻-N)易被空气氧化,故仅将 NH₄⁺-N 与 NO₃⁻-N 之和作为无机氮(IN)含量,有机氮(Or-N)含量可由 TN 减去 IN 得到. TOC 采用重铬酸钾容量法-水合热法测定.

磷形态分析所采用的化学连续提取法是在李悦^[12]、朱广伟^[13,14]等研究的基础上稍加改进而来的,具体步骤和方法见表 1.除有机磷(Or-P)外,每步所得残渣均以去离子水清洗一次,合并得到 60 mL 提取液后,采用钼锑抗分光光度法测定磷含量.因 Al-P 含量非常低,分析时舍去步骤中的水提部分,即提取液为 30 mL.

2 结果与分析

2.1 灰尘中各种形态氮磷营养物含量

2.1.1 氮营养物含量

从合肥城区地表灰尘各形态氮含量的基本情况(表 2)可以看出,TN 变化范围为 260.58 ~ 3 247.74 mg·kg⁻¹,平均值为 1 418.21 mg·kg⁻¹. NH₄⁺-N 平均含量为 70.79 mg·kg⁻¹,约占 TN 的质量分数为 5.39%; NO₃⁻-N 平均值为 29.0 mg·kg⁻¹,仅占 TN 的 2.80%.由于 Or-N 占 TN 的 91.81%,表明地表灰尘中氮的主要化学形态为有机态,这与水体沉积物情形相似^[15,16].就变异系数来看,NO₃⁻-N > NH₄⁺-N > Or-N ≈ TN,且系数均超过 50%,表明各形态氮的空间分布差异性大.由表 2 可以看出,合肥市地表灰尘

表 1 磷形态的化学连续提取方法

Table 1 Sequential extraction method of phosphorus species

步骤	形态	提取方法
第 1 步	易交换态磷 (Ex-P)	取 0.3 g 地表灰尘, 加 30 mL 1 mol·L ⁻¹ MgCl ₂ (pH = 8) 振荡提取 2 h, 5 000 r·min ⁻¹ 离心 20 min, 用 30 mL 的去离子水再提取 1 次, 合并提取液, 提取液过滤后用钼锑抗比色法测定提取液磷的浓度
第 2 步	铝结合磷 (Al-P)	第 1 步提取后残渣加 30 mL 0.5 mol·L ⁻¹ NH ₄ F (pH = 8.2), 振荡 1 h, 5 000 r·min ⁻¹ 离心 20 min, 用 30 mL 去离子水再提取 1 次, 合并提取液并过滤, 用钼锑抗比色法测定磷浓度
第 3 步	铁结合磷 (Fe-P)	第 2 步提取后残渣加 30 mL 0.5 mol·L ⁻¹ NaOH-0.05 mol·L ⁻¹ Na ₂ CO ₃ 混合提取液, 振荡提取 4 h, 5 000 r·min ⁻¹ 离心 20 min, 用 30 mL 的去离子水再提取 1 次, 合并提取液并过滤, 用钼锑抗比色法测定磷浓度
第 4 步	闭蓄态磷 (Oc-P)	第 3 步提取后残渣加 24 mL 0.3 mol·L ⁻¹ 柠檬酸钠、1 mol·L ⁻¹ NaHCO ₃ 及 0.675 g Na ₂ S ₂ O ₄ 配成的混合提取剂 (pH = 7.6), 搅拌 15 min 后再加入 6 mL 0.5 mol·L ⁻¹ NaOH, 振荡提取 8 h, 其后步骤同上
第 5 步	钙结合态磷 (Ca-P)	第 4 步提取后残渣加 30 mL 1 mol·L ⁻¹ NaAc-HAc (pH = 4) 缓冲溶液, 振荡提取 6 h, 其后步骤同上
第 6 步	碎屑磷 (De-P)	第 5 步提取后残渣加 30 mL 1 mol·L ⁻¹ HCl, 振荡提取 16 h, 其后步骤同上
第 7 步	有机磷 (Or-P)	第 6 步残渣转移到瓷坩埚烘干, 在马弗炉中 550℃ 灼烧 2 h, 冷却后加 30 mL 1 mol·L ⁻¹ HCl 振荡提取 16 h, 离心 20 min, 提取液过滤后用钼锑抗比色法测定磷浓度

表 2 合肥城区地表灰尘中各形态氮营养物含量 (n = 52)

Table 2 Statistical values of nitrogen species contents in the urban dusts of Hefei City (n = 52)

统计参数	ω (氮形态)/mg·kg ⁻¹				文献
	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	Or-N	TN	
最大值	309.32	132.19	2 997.93	3 247.74	
最小值	4.97	2.73	224.89	260.58	
平均值	70.79	29.00	1 318.42	1 418.21	本研究
变异系数/%	77.24	85.17	54.94	53.22	
占 TN 的质量分数/%	5.39	2.80	91.81	100	
重庆市	8 ~ 300			330 ~ 2 560 (平均值 1 330)	[17]
乌鲁木齐市				455.78	[18]
保定市				2.92 ~ 10.75 (平均值 5.35)	[19]
上海市	18.67	54.83			[20]

NH₄⁺-N、TN 含量与重庆市^[17]相当, TN 平均值明显高于乌鲁木齐市^[18]的城市土壤含量, 且远超过保定市^[19]地表灰尘. 与上海市^[20]相比, 合肥市地表灰尘 NH₄⁺-N 平均值明显偏高, 而 NO₃⁻-N 则低得多. 与陈凯龙等^[21]测得的合肥市绿地土壤 TN (1 380 mg·kg⁻¹) 相比, 地表灰尘的 TN 含量略高一些.

2.1.2 磷营养物含量

由表 3, 合肥城区地表灰尘 TP 含量为 356.11 ~

1 557.55 mg·kg⁻¹, 平均 948.34 mg·kg⁻¹, 与十五里河表层沉积物 TP 相近^[22]. 7 种磷形态平均含量的排序为: Ca-P > De-P > Ex-P > Or-P > Fe-P > Oc-P > Al-P, 而由 Or-P 仅占 TP 的 3.21%, 表明地表灰尘中磷是以无机磷 (IP) 为主要组分. 这里, 各组分占 TP 的质量分数相差悬殊, 最高值 (Ca-P) 是最低值 (Al-P) 的 623 倍. 由于 Ca-P 占 TP 质量分数为 56.11%, 表明 IP 主要以 Ca-P 形态存在. 各形态磷的变异系

表 3 合肥城区地表灰尘中各形态磷营养物含量 (n = 52)

Table 3 Statistical values of phosphorus species contents in the urban dusts of Hefei City (n = 52)

统计参数	ω (磷形态)/mg·kg ⁻¹								文献
	Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	Or-P	TP	
最大值	695.61	2.04	110.83	18.26	937.32	597.05	84.23	1 557.55	
最小值	16.71	0.29	3.48	0.37	109.28	29.17	0.18	356.11	
平均值	93.07	0.82	23.66	9.72	525.06	265.95	30.07	948.34	本研究
变异系数/%	108.24	44.74	88.29	46.91	34.62	54.15	63.78	29.30	
占 TP 的质量分数/%	9.11	0.09	2.70	1.15	56.11	27.63	3.21	100	
重庆市					257.24			850.0	[17]
乌鲁木齐市	20.21	67.79 ¹⁾		497.23	533.85	127.01		1 243.19	[18]
保定市								666.0	[19]
上海市	0.06	19.06 ²⁾		255.48	496.57	131.59		914.98	[20]

1) Al-P 与 Fe-P 含量之和; 2) Al-P 与 Fe-P 含量之和

数大小排序为: Ex-P > Fe-P > Or-P > De-P > Oc-P > Al-P > Ca-P > TP, 其中 Ex-P、Fe-P、Or-P 和 De-P 均超过 50%, 表明这 4 种形态磷的空间异质性显著. 相较于 TN, 似乎 TP 的变异系数更低, 即 TP 空间分布更趋均匀.

与国内其它城市相比, 合肥市地表灰尘的 TP 含量明显高于保定市, 稍高于重庆市, 与上海市较为接近, 但明显低于乌鲁木齐市. 与乌鲁木齐市土壤相比, 除 Ex-P 含量明显偏高和 Ca-P 基本接近外, 合肥市其它各形态磷均明显偏低. 而且, 两市虽都以 Ca-P 含量最高, 但合肥市含量次高的无机磷是 De-P 而非 Oc-P. 与上海市地表灰尘相比, 两者的 Al/Fe-P 含量之和、Ca-P 含量都较为接近, 但

合肥市 Ex-P 是上海市的 1 551 倍, 而 Oc-P 和 Or-P 含量则又明显低于上海市. 由文献[21], 合肥市城区绿地土壤 TP 为 $1\ 009.3\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 略高于地表灰尘.

2.2 地表灰尘氮磷营养物分布特征

2.2.1 不同形态氮的分布特征

各功能区地面灰尘 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、Or-N 和 TN 的含量特征见图 2. 显然, NH_4^+-N 和 NO_3^--N 在不同功能区内空间分布的均匀性相对较好, 而 Or-N 和 TN 空间变化性较为明显, 这与表 2 的全市总体情况存在出入. 在 6 种功能区, 工业区和文教区各形态氮分布相对均匀, 而商业区和公园绿地的差异性则相对较大.

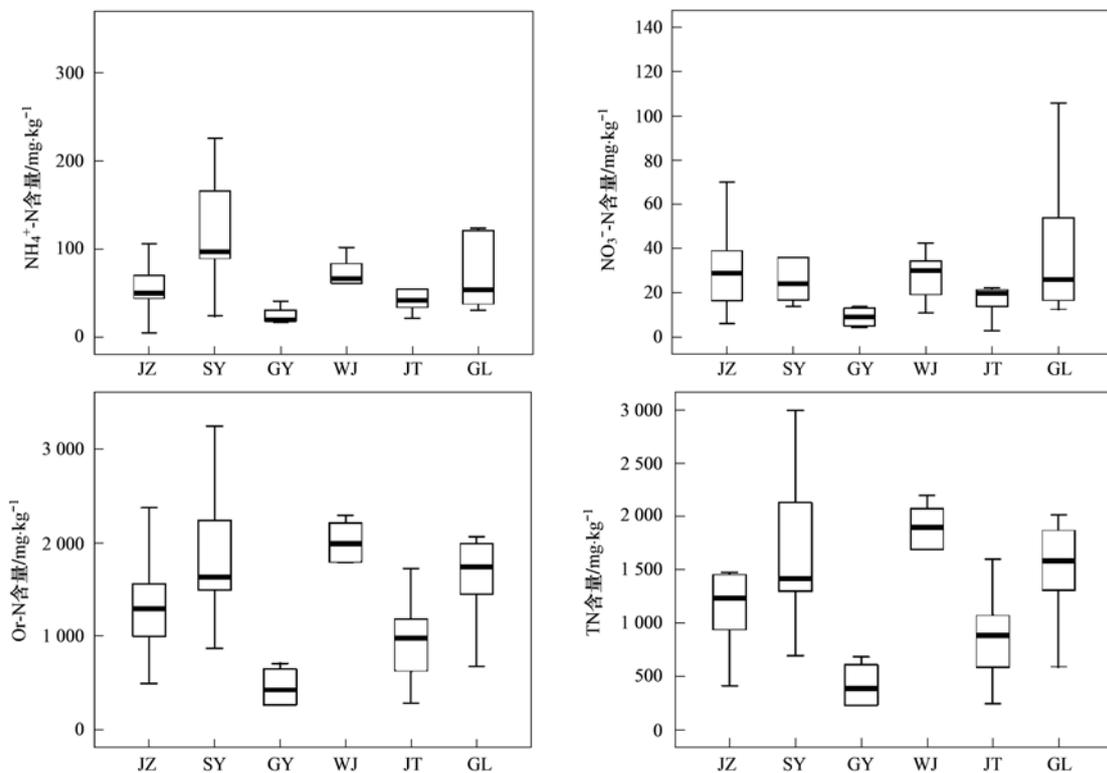


图 2 不同功能区地表灰尘各形态氮含量箱状图

Fig. 2 Boxplots of nitrogen fractions contents in urban dust for different land-use types of Hefei City

地表灰尘 TN 最大值 ($3\ 247.74\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 出现在中心城区三孝口商业圈, 最小值 ($260.58\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 则位于城市东部边缘的中盐红四方化工集团厂区大门口. NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 Or-N 的变化范围分别为 $4.97 \sim 309.32$ 、 $2.73 \sim 132.19$ 和 $224.89 \sim 2\ 997.93\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值分别为 70.79 、 29.00 和 $1\ 318.42\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 其中, NH_4^+-N 最大值出现在公园绿地, NO_3^--N 和 Or-N 则均出现在商业区. 不同功能区 NH_4^+-N 含量排序为: 商业区 > 公园绿地 > 文教

区 > 居住区 > 交通区 > 工业区; NO_3^--N 为: 商业区 > 公园绿地 > 居住区 > 文教区 > 交通区 > 工业区; Or-N 为: 文教区 > 商业区 > 公园绿地 > 居住区 > 交通区 > 工业区; TN 与 NH_4^+-N 情况相同. 很显然, 商业区的 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 TN 含量均最高, Or-N 也位列第二. 究其原因, 可能与一部分地表灰尘来自生活垃圾或街边大量的流动饮食摊点有关. 公园绿地的各项指标基本都位列第二或第三, 其原因与商业区相似; 而工业区的各项指标则均为最低.

2.2.2 不同形态磷的分布特征

合肥市不同功能区地表灰尘各形态磷的分布情况见表 4。不难发现,各形态磷的最大值散落在不同功能区内,而且除 Oc-P 和 De-P 外,其它形态磷的最小值都出现在工业区。

(1) Ex-P 最高值出现在商业区(百脑汇电子商城, $695.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最低值在文教区(合肥大学城, $16.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),平均含量高低排序为:商业区 > 公园绿地 > 交通区 > 居住区 > 文教区 > 工业区,且各功能区含量差异显著。由 Ex-P 变异系数得到空间分布的差异性,即商业区 > 交通区 > 居住区 > 文教区 > 公园绿地 > 工业区。

(2) 虽然文教区的 Al-P 平均含量稍高一些,工业区略低一些,但总体上不同功能区之间相差不大;而且除居住区的变异系数稍大一些外,其它各功能区均不超过 45% 且大小较为接近。

(3) 样本的 Fe-P 最高值出现在明珠广场 ($110.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),最小值在当涂路桥 ($3.48 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。各功能区平均含量高低排序为:公园绿地 > 居住区 > 交通区 \approx 商业区 > 文教区 > 工业区;空间分布的差异性排序为:交通区 > 公园绿地 > 居住区 > 商业区 > 工业区 > 文教区。而且,交通区、公

园绿地和居住区的 Fe-P 空间分布差异性异常显著。

(4) 除工业区稍高外,其它功能区的 Oc-P 平均含量相差不大。总体上,工业区和公园绿地的变异系数相对较小,空间分布的均匀性较好,而其它功能区的不均匀性相对较大。

(5) 居住区、商业区和公园绿地的 Ca-P 平均含量相对较高且相差不大,文教区和交通区 Ca-P 含量较为接近,工业区 Ca-P 含量相对最低且变异系数也最小。

(6) De-P 平均含量较为接近的是居住区、文教区和公园绿地,其它 3 个功能区含量稍高,且彼此相差也不大;由各功能区 De-P 变异系数较为接近,表明空间分布的异质性不大。

(7) 工业区和交通区的 Or-P 平均含量相对较低,但变异系数却相对较大,其它各功能区无论是含量还是变异性都较为接近。

合肥市不同功能区的 TP 平均含量排序为:商业区 > 公园绿地 > 交通区 > 居住区 > 文教区 > 工业区,这与乌鲁木齐市土壤 TP 在各功能区的分布特征一致^[23]。而且,除文教区和交通区的 TP 变异系数稍高外,其它功能区均不超过 30%,表明地表灰尘 TP 空间分布一致性较好。

表 4 不同功能区地表灰尘中磷营养物含量

Table 4 Statistical values of phosphorus species contents in the urban dusts corresponding to different land-use types

功能区	统计参数	$\omega(\text{磷形态})/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$							
		Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	Or-P	TP
居住区 ($n=15$)	最大值	163.01	2.04	84.41	15.15	937.32	418.26	84.23	1 557.55
	最小值	20.61	0.29	7.37	0.37	270.31	80.55	13.42	477.75
	平均值	65.52	0.79	26.15	9.08	564.57	192.34	36.55	895.00
	变异系数/%	56.79	59.22	74.26	50.44	30.59	47.67	55.98	29.83
商业区 ($n=9$)	最大值	695.61	1.26	36.18	12.03	756.25	597.05	61.64	1 469.51
	最小值	50.16	0.48	5.82	3.48	259.42	147.40	11.85	719.46
	平均值	196.06	0.81	20.25	7.11	564.79	327.76	27.89	1 144.66
	变异系数/%	104.22	31.93	55.85	42.05	35.55	53.03	58.23	24.12
工业区 ($n=4$)	最大值	52.52	0.87	16.70	17.49	415.01	423.85	22.76	853.76
	最小值	22.15	0.29	5.82	9.71	348.34	103.83	3.69	588.67
	平均值	41.62	0.58	10.29	14.96	391.87	312.32	11.47	783.11
	变异系数/%	32.08	43.43	47.13	23.80	7.74	45.64	75.94	16.57
文教区 ($n=6$)	最大值	110.13	1.65	29.17	17.49	617.07	367.80	65.57	1 104.60
	最小值	16.71	0.68	9.71	3.48	273.70	29.17	11.47	356.11
	平均值	59.91	1.10	17.36	9.71	488.08	202.08	36.57	814.82
	变异系数/%	54.20	36.19	43.89	57.16	34.04	58.22	48.24	37.17
交通区 ($n=10$)	最大值	173.07	1.65	65.71	18.26	748.22	588.49	41.82	1 412.40
	最小值	24.49	0.48	3.48	2.70	109.28	156.01	0.18	450.95
	平均值	76.14	0.79	20.83	9.86	445.38	359.66	17.57	930.23
	变异系数/%	65.35	42.05	115.84	51.93	47.84	44.54	66.99	31.89
公园绿地 ($n=8$)	最大值	177.08	1.26	110.83	15.15	765.86	488.30	76.79	1 276.42
	最小值	63.36	0.48	8.93	6.59	344.10	132.62	15.35	597.04
	平均值	100.63	0.82	37.81	11.07	600.17	242.02	40.39	1 032.91
	变异系数/%	35.03	32.89	86.64	29.72	26.04	48.43	51.65	22.02

2.3 不同形态氮磷的相关性分析

采用 SPSS 13.0 软件,对地表灰尘氮磷形态开展相关性分析,得到 Spearman 相关系数矩阵,见表 5. 可以看出, NH_4^+ -N 与 Or-N、TN、TOC 均表现出极显著相关性,相关系数分别为 0.69、0.73、0.53,表明 NH_4^+ -N 可能主要由 TOC 和 Or-N 转化而来或彼此具有同源性. 由 NH_4^+ -N 与 Ex-P、Fe-P 和 Or-P 也呈现极显著的相关性,暗示 NH_4^+ -N 与它们可能具有同源性. NO_3^- -N 与 NH_4^+ -N 表现出显著相关性 ($R = 0.33$),表明两者间存在转化关系或同源性. 除此之外, NO_3^- -N 与其它形态氮磷以及 TOC 都没有表现出较强的相关关系. TN 与 Ex-P、Fe-P、Or-P 的极显著相关关系以及与 TP 的显著相关性,似乎也都表明它们在来源上具有某种内在联系.

由表 5 可见, Ex-P 与 De-P、Or-P 和 TP 具有极显著相关性,相关系数分别为 0.42、0.51 和 0.71;

与 Ca-P 和 TOC 表现出显著相关性,相关系数分别为 0.36 和 0.34. 值得一提的是,在水体沉积环境下通常发生的磷生物地球化学反应,在干燥的城市不透水地面,由于缺乏水的媒介作用,磷形态之间的转化作用受到了制约. 因此,这里 Ex-P 与其它形态磷的显著相关性,更多地可能还是体现在来源的一致性方面. 由 Fe-P 与 Or-P 和 TOC 表现出显著相关性,传达了 Fe-P 与有机污染物关系密切的信号. Ca-P、De-P 和 Or-P 都与 TP 具有极显著的相关关系. 由 Or-P 与 TOC 之间的极显著相关性,表明彼此具有一定的同源性. 而 Al-P、Oc-P 则与各形态氮和磷都没有较强的相关性,表明两者的含量具有相对独立性,即可能有不同的来源. TN 与 TOC 具有极显著相关性,而 TP 与 TOC 的相关性较弱. TOC 与部分氮磷形态间存在的显著相关关系,表明 TOC 的输入影响地表灰尘中部分形态氮磷营养物的分布.

表 5 地表灰尘中不同形态氮磷的相关关系¹⁾ ($n = 52$)

Table 5 Correlation coefficient matrix for nitrogen and phosphorus species

	NH_4^+ -N	NO_3^- -N	Or-N	TN	Ex-P	Al-P	Fe-P	Oc-P	Ca-P	De-P	Or-P	TP	TOC
NH_4^+ -N	1												
NO_3^- -N	0.33*	1											
Or-N	0.69**	0.19	1										
TN	0.73**	0.22	0.99**	1									
Ex-P	0.51**	0.15	0.51**	0.53**	1								
Al-P	0.06	0.11	0.04	0.04	0.02	1							
Fe-P	0.39**	0.10	0.33*	0.36**	0.25	-0.08	1						
Oc-P	-0.16	-0.12	-0.21	-0.19	-0.13	0.13	0.12	1					
Ca-P	0.21	0.25	0.20	0.22	0.36*	0.13	0.05	-0.19	1				
De-P	-0.12	-0.16	-0.01	-0.02	0.42**	0.04	-0.22	0.06	0.11	1			
Or-P	0.50**	0.13	0.79**	0.78**	0.51**	0.13	0.34*	-0.05	0.31*	0.05	1		
TP	0.27	0.15	0.31*	0.32*	0.71**	0.10	0.05	-0.13	0.74**	0.60**	0.37**	1	
TOC	0.53**	0.07	0.87**	0.86**	0.34*	-0.08	0.28*	-0.14	0.08	0.01	0.71**	0.18	1

1) * 表示显著相关 ($P < 0.05$); ** 表示极显著相关 ($P < 0.01$)

3 讨论

城市地表灰尘在雨水的冲刷作用下,通过地表径流或雨水管网系统汇入水体,成为城市水体氮磷营养物的重要来源. 但不同结合形态的氮和磷,往往具有不同的活性和生物有效性,因此弄清地表灰尘中有效氮磷含量对于科学评估地表灰尘的水体富营养化污染贡献具有重要意义. 同水体沉积物一样,地表灰尘的生物有效性氮也主要来自于无机氮中的 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N. 在合肥市地表灰尘中, NH_4^+ -N 占 TN 的质量分数为 1.02% ~ 18.53% (平均为 5.39%), NO_3^- -N 占 TN 的质量分数为 0.44% ~ 15.20% (平均为 2.80%). 总体上,生物有效性氮

(NH_4^+ -N 与 NO_3^- -N 两者之和) 占 TN 的质量分数为 2.35% ~ 31.46%, 平均值为 8.19%. 其中,工业区、商业区、居住区、文教区、交通区和公园绿地等功能区,地表灰尘生物有效性氮含量分别占 TN 的质量分数为 8.87%、9.60%、6.68%、9.37%、8.20% 和 8.17%, 与淮河中游的瓦埠湖^[24]、长江中下游广大浅水湖泊^[25] 等水体沉积物极为接近. 这里,居住区地表灰尘的生物有效性氮占 TN 的质量分数最低,而且各种形态氮含量在 6 种功能区中也都仅是处于中下游水平. 笔者以为,这可能由于本研究中居住区采样点基本上都选择在规模相对较大的生活小区,而这些小区的综合环境卫生条件往往又相对较好的缘故.

生物有效性磷是指可为生物直接利用或通过自然过程可转化为生物可吸收形态的磷,一般包括 Ex-P、Al-P 和 Fe-P 等形态^[16]。其中,Ex-P 可能主要来自于生物碎屑的再生,被誉为最具生物有效性的磷;Al-P 和 Fe-P 主要指易与铁铝氧化物或氢氧化物结合的磷,具有潜在的生物有效性。在水体沉积物中,Al-P 和 Fe-P 可以随氧化还原环境的变化而转化为可溶性磷,并可能进入上覆水,具有很强的释放活性,因此也称为活性磷。地表灰尘在进入水体后,生物有效性磷可直接为藻类及其它水生植物利用,从而增大城市缓流水体富营养化风险。合肥市地表灰尘中,Ex-P、Al-P 和 Fe-P 占 TP 的质量分数分别为 9.11%、0.09% 和 2.70%,即生物有效性磷(Ex-P、Al-P 和 Fe-P 三者之和)占 TP 的质量分数为 11.90%。其中,工业区、商业区、居住区、文教区、交通区和公园绿地等生物有效性磷占 TP 的质量分数分别为 6.70%、18.19%、10.10%、9.69%、10.64% 和 14.03%,明显高于南四湖(2.84%)^[26]和乌梁素海表层沉积物(2%~7%)^[27],而与长江中下游广大浅水湖泊沉积物(不足 10%)较为接近^[13]。显然,商业区的生物有效性磷所占比例明显高于其它功能区。不仅如此,商业区的 Ex-P 和 TP 含量也都高于其他各功能区。实地调查发现,合肥市各主要商业区街道都存在大量的固定或流动饮食摊点(特别是夜间沿街大排档),煎烤、烹炸食物以及餐具洗涮等活动对地面的污染较为明显,生活垃圾也还缺乏规范化管理,这可能是商业区的 Ex-P、TP 含量及生物有效性磷所占比例偏高的主要原因。

同自然环境一样,城市 Or-P 也可能来自各种动植物残体及腐殖质类有机物中的磷。在随地表径流进入水体后,Or-P 能够通过微生物的矿化作用转变为无机磷,再通过参与生物循环而逐渐被生物所利用。因此,Or-P 有时也同 Ex-P、Al-P 和 Fe-P 一起归入潜在生物有效性磷范畴^[28, 29]。由此,可知合肥市地表灰尘的潜在生物有效性磷含量平均达 147.62 mg·kg⁻¹,占 TP 的质量分数为 15.57%。较高的氮磷负荷及其生物有效性,对流动性相对较差的城市水体水环境保护和富营养化控制,构成了现实威胁,因此应引起相关部门的重视。

4 结论

(1)对合肥市城区地表灰尘氮磷赋存形态及含量进行分析,由 Or-N 占 TN 的 91.81%,表明合肥市地表灰尘氮的主要化学形态为有机氮;由 Or-P 仅

占 TP 的 3.21%,表明地表灰尘中磷是以无机磷为主要组分。地表灰尘中,7 种磷形态的含量高低排序为:Ca-P > De-P > Ex-P > Or-P > Fe-P > Oc-P > Al-P,并以 Ca-P 和 De-P 为主要存在形态。

(2)对不同功能区地表灰尘氮磷形态分布特征的分析表明,NO₃⁻-N 空间分布相对均匀,其次是 NH₄⁺-N,而 Or-N 和 TN 的空间差异性较大。不同形态磷的空间分布差异性排序为:Ex-P > Fe-P > Or-P > De-P > Oc-P > Al-P > Ca-P > TP,且 Ex-P、Fe-P、Or-P 和 De-P 的变异系数均超过 50%。由于 TP 的变异系数明显低于 TN,表明合肥市地表灰尘中 TP 的空间分布均匀性高于 TN。

(3)相关性分析表明,NH₄⁺-N 与 TN、TOC、Or-N、Ex-P、Fe-P 和 Or-P 等均呈现出极显著的相关性,而 NO₃⁻-N 仅与 NH₄⁺-N 表现出显著相关关系,与其它形态氮磷及 TOC 的相关性都较弱,表明 NO₃⁻-N 在来源上有一定的特殊性;Ex-P 与 De-P、Or-P 和 TP 具有极显著相关性,Fe-P 与 Or-P、TOC 等也表现出了显著的相关性;此外,TOC 与多种氮磷形态间存在着显著的相关关系。

(4)地表灰尘氮磷的生物有效性分析表明,工业区、商业区、居住区、文教区、交通区和公园绿地等功能用地的生物有效性氮分别占 TN 的质量分数为 8.87%、9.60%、6.68%、9.37%、8.20% 和 8.17%,与江淮地区湖泊沉积物相近;生物有效性磷分别占 TP 的质量分数为 6.70%、18.19%、10.10%、9.69%、10.64% 和 14.03%,稍高于一般湖泊沉积物。

参考文献:

- [1] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响 [J]. 环境科学, 2004, 25(6): 32-39.
- [2] 常静, 刘敏, 侯立军, 等. 城市地表灰尘的概念、污染特征与环境效应 [J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 1153-1158.
- [3] Zhao H T, Yin C Q, Chen M X, *et al.* Size distribution and diffuse pollution impacts of PAHs in street dust in urban streams in the Yangtze River Delta [J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(2): 162-167.
- [4] Dong T T T, Lee B K. Characteristics, toxicity, and source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in road dust of Ulsan, Korea [J]. Chemosphere, 2009, 74(9): 1245-1253.
- [5] 徐素娟, 郑娜, 刘景双, 等. 有色冶金区街道灰尘中 As 和 Pb 的空间分布特征及其生态风险 [J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1141-1146.
- [6] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, *et al.* Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: results of a 37-year whole-ecosystem experiment [J]. Proceedings of the

- National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, **105**(32): 11254-11258.
- [7] 荆红卫, 华蕾, 孙成华, 等. 北京城市湖泊富营养化评价与分析 [J]. 湖泊科学, 2008, **20**(3): 357-363.
- [8] Ferreira-Baptista L, De Miguel E. Geochemistry and risk assessment of street dust in Luanda, Angola: a tropical urban environment [J]. Atmospheric Environment, 2005, **39**(25): 4501-4512.
- [9] 方凤满, 蒋炳言, 王海东, 等. 芜湖市地表灰尘中重金属粒径效应及其健康风险评价 [J]. 地理研究, 2010, **29**(7): 1193-1202.
- [10] 向丽, 李迎霞, 史江红, 等. 北京城区道路灰尘重金属和多环芳烃污染状况探析 [J]. 环境科学, 2010, **31**(1): 159-167.
- [11] Lü X X, Song J M, Li X G, *et al.* Geochemical characteristics of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments [J]. Journal of Marine Systems, 2005, **56**(1-2): 17-27.
- [12] 李悦, 乌大年, 薛永先. 沉积物中不同形态磷提取方法的改进及其环境地球化学意义 [J]. 海洋环境科学, 1998, **17**(1): 15-20.
- [13] 朱广伟, 秦伯强. 沉积物中磷形态的化学连续提取法应用研究 [J]. 农业环境科学学报, 2003, **22**(3): 349-352.
- [14] 朱广伟, 秦伯强, 高光, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物中磷的形态及其与水相磷的关系 [J]. 环境科学学报, 2004, **24**(3): 381-388.
- [15] Wang S R, Jin X C, Jiao L X, *et al.* Nitrogen fractions and release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River Area, China [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2008, **187**(1-4): 5-14.
- [16] 李辉, 潘学军, 史丽琼, 等. 湖泊内源氮磷污染分析方法及特征研究进展 [J]. 环境化学, 2011, **30**(1): 281-292.
- [17] 朱旻航, 王学良, 陈玉成. 重庆市主城区街道灰尘中氮、磷污染研究 [J]. 环境化学, 2009, **28**(2): 306-307.
- [18] 刘玉燕, 刘敏. 乌鲁木齐城市土壤性质及污染研究 [J]. 干旱区研究, 2007, **24**(1): 66-69.
- [19] 郑小康, 李春晖, 黄国和, 等. 保定城区地表灰尘污染物分布特征及健康风险评价 [J]. 环境科学学报, 2009, **29**(10): 2195-2202.
- [20] 蒋海燕. 上海城市土壤、地表灰尘环境特征分析及其管理体系研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2005. 29-40.
- [21] 陈凯龙, 邵慧琳. 合肥市绿地土壤氮磷有效性特点 [J]. 南方农业 (园林花卉版), 2010, **4**(2): 25-27.
- [22] 李如忠, 洪齐齐, 罗月颖. 巢湖十五里河沉积物污染特征及来源分析 [J]. 环境科学研究, 2010, **23**(2): 144-151.
- [23] 刘玉燕, 刘敏. 乌鲁木齐城市表层土壤中磷的空间分布及赋存形态 [J]. 干旱区研究, 2008, **25**(2): 179-182.
- [24] 叶琳琳, 潘成荣, 张之源, 等. 瓦埠湖沉积物氮的赋存特征以及环境因子对 NH_4^+ -N释放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2006, **25**(5): 1333-1336.
- [25] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(1): 37-43.
- [26] 张志斌, 张学杨, 张波, 等. 南四湖微山湖区沉积物磷形态分布特征 [J]. 环境科学, 2009, **30**(5): 1345-1350.
- [27] 吕昌伟, 何江, 孙惠民, 等. 乌梁素海沉积物中磷的形态分布特征 [J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(3): 878-885.
- [28] De Jonge V N, Engelkes M M, Bakker J F. Bio-availability of phosphorus in sediments of the western Dutch Wadden Sea [J]. Hydrobiologia, 1993, **253**(1-3): 151-163.
- [29] 侯立军, 陆健健, 刘敏, 等. 长江口沙洲表层沉积物磷的赋存形态及生物有效性 [J]. 环境科学学报, 2006, **26**(3): 488-494.

CONTENTS

Quantitative Estimation Source of Urban Atmospheric CO ₂ by Carbon Isotope Composition	LIU Wei, WEI Nan-nan, WANG Guang-hua, <i>et al.</i> (1041)
Moisture Sources of Guangzhou During the Freezing Disaster Period in 2008 Indicated by the Stable Isotopes of Precipitation	LIAO Cong-yun, ZHONG Wei, MA Qiao-hong, <i>et al.</i> (1050)
Optical Properties of Aerosol During Haze-Fog Episodes in Beijing	YU Xing-na, LI Xin-mei, DENG Zen-grandeng, <i>et al.</i> (1057)
Secondary Organic Tracers in Summer PM _{2.5} Aerosols from Baima Spring Scenic Area, Yaan, Sichuan Province	DAI Dong-jue, LI Li, LIU Zi-fang, <i>et al.</i> (1063)
Source Profile and Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds from Vehicle Exhaust	QIAO Yue-zhen, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1071)
<i>Platanus orientalis</i> Foliar N% and δ ¹⁵ N Responses to Nitrogen of Atmospheric Wet Deposition in Urban Area	WANG Yan-li, XIAO Hua-yun, XIAO Hong-wei (1080)
Distribution and Controlling Factors of Nitric Oxide Concentrations in Surface Seawater of Jiaozhou Bay and Adjacent Waters	XUE Chao, LIU Chun-ying, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (1086)
Uncertainty Characterization Approaches for Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Taihu Lake	GUO Guang-hui, WU Feng-chang, HE Hong-ping, <i>et al.</i> (1091)
Preliminary Analysis of Spatiotemporal Variation of Water Quality and Its Influencing Factors in the Jiulong River Watershed	HUANG Jin-liang, HUANG Ya-ling, LI Qing-sheng, <i>et al.</i> (1098)
Ecological Stoichiometric Relationships of Periphyton Community Elemental Composition and Variations of Water Quality in the Chaobai River CUI Jing-guo, SHAN Bao-qing, WANG Shuai (1108)
Diurnal Variation and Evaluation of Water Quality of Panxi River in Spring	ZHANG Qian-qian, WANG Xiao-ke, HAO Li-ling, <i>et al.</i> (1114)
Weathering Seasonal Variations in Karst Valley in Southwest China	XIAO Qiong, SHEN Li-cheng, YANG Lei, <i>et al.</i> (1122)
Algal Community Structure and Water Quality Assessment on Drawdown Area of Kaixian Waters in Three Gorges Reservoir During Winter Storage Period GUO Jing-song, XIE Dan, LI Zhe, <i>et al.</i> (1129)
Characteristics of Phytoplankton Community Changes in Dianshan Lake During Peak Period of Algal Blooms	XU Chun-yan, YANG Jie, MA Ming-rui, <i>et al.</i> (1136)
Nitrogen and Phosphorus Release from Herbaceous Vegetation Under Simulated Inundation Experiment of Water-Level Fluctuation Zone in the Three Gorges Reservoir Area WANG Jian-chao, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (1144)
Output Characteristics of Non-point Phosphorus from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area Under the Special Rainfall	LI Zhen-wei, YU Xing-xiu, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (1152)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Urban Dusts from Hefei City	LI Ru-zhong, ZHOU Ai-jia, TONG Fang, <i>et al.</i> (1159)
Distribution and Pollution Characteristics of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of Hedi Reservoir	ZHANG Hua-jun, CHEN Xiu-kang, HAN Bo-ping, <i>et al.</i> (1167)
Heavy Metals Distribution and Risk Assessment of Sediments in the Riverine Wetland of Sanmenxia Reservoir	AO Liang, SHAN Bao-qing, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1176)
Regional Distribution and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals in Surface Sediments from Coastal Wetlands of the Yellow River Delta LIU Zhi-jie, LI Pei-ying, ZHANG Xiao-long, <i>et al.</i> (1182)
Calculation of Environmental Dredging Depth of Heavy Metal Polluted Sediments in Zhushan Bay of Taihu Lake	JIANG Xia, WANG Wen-wen, WANG Shu-hang, <i>et al.</i> (1189)
Characteristics of PAHs Pollution in Sediments from Leizhou Coastal Marine Area, Liusha Bay and Shenzhen Bay	ZHAO Li-rong, SUN Sheng-li, KE Sheng (1198)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Black Carbon in Road Dusts from Typical Cities of China and India	PAN Su-hong, ZHANG Gan, SUN Ya-li, <i>et al.</i> (1204)
Waterborne Iron Migration by Groundwater Irrigation Pumping in a Typical Irrigation District of Sanjiang Plain	ZOU Yuan-chun, YU Xiao-fei, HUO Li-li, <i>et al.</i> (1209)
Research on Controlling Iron Release of Desalted Water Transmitted in Existing Water Distribution System	TIAN Yi-mei, LIU Yang, ZHAO Peng, <i>et al.</i> (1216)
Exploration of Newly-Formed Ferric as the Coagulant	YANG Xue, ZHANG Jing-cheng, GUAN Xiao-hong (1221)
Degradation of Medroxyprogesterone in Drinking Water by Ozone Oxidation	YUE Chan-yuan, MIAO Heng-feng, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (1227)
Synthesis of Core/Shell Structured Magnetic Carbon Nanoparticles and Its Adsorption Ability to Chlortetracycline in Aquatic Environment WANG Yi-xuan, ZHANG Di, NIU Hong-yun, <i>et al.</i> (1234)
Removal of Nickel from Aqueous Solutions Using Complexation-Ultrafiltration Process	QIN Shu, SHAO Jia-hui, HE Yi-liang, <i>et al.</i> (1241)
Degradation of Organic Pollutants by Photo-Fenton-Like System with Hematite	ZHANG Yu, GU Yan, YANG Hui, <i>et al.</i> (1247)
Study on the Degradation of Atrazine in Photo-Fenton-Like System Under Visible Light Irradiation Promoted by N-doped Ta ₂ O ₅	ZHAO Lu, DENG Yi-rong, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1252)
Degradation of Prometon by O ₃ /H ₂ O ₂	LI Shao-feng, SUN Chu (1260)
Photoelectrocatalytic Degradation Kinetics of Malachite Green by Pr-N Co-doped TiO ₂ Photocatalyst	SHA Shuang, ZHOU Shao-qi, ZHANG Xiao-na, <i>et al.</i> (1267)
Experimental Study on Acid Mine Drainage Treatment Using Mine Tailings of Xiangsi Valley, Tongling, China	ZHANG Nan, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (1272)
Effect of Polymeric Aluminum-iron on EPS and Bio-flocculation in A ² /O System	WEN Qin-xue, LIU Ai-cui, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1278)
Effect of Temperature on Pollutant Removal and Nitrous Oxide Emission of Wastewater Nitrogen Removal System	ZHANG Ting-ting, ZHANG Jian, YANG Fang, <i>et al.</i> (1283)
Effect of Temperature on Stability of Nitrogen Removal in the ANAMMOX Reactor	LI Xiang, HUANG Yong, ZHENG Yu-hui, <i>et al.</i> (1288)
Phosphorus Removal Characteristics by Aerobic Granules in Normal Molasses Wastewater After Anaerobic Treatment	WANG Shuo, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1293)
Physicochemical Characteristics of Granules with Different Size in a Granular Sludge System for Phosphorus Removal	LI Zhi-hua, ZHANG Yu-rong, YANG Fan, <i>et al.</i> (1299)
Denitrifying Bacteria of Constructed Wetland System Based on Nitrous Oxide Reductase Gene (<i>nosZ</i>)	WANG Xiao-jun, CHEN Shao-hua, ZHANG Zhao-ji, <i>et al.</i> (1306)
Improving Degradation Ability of an Aerobic Denitrifier by Ultraviolet Mutagenesis	YU Jia-jia, CHEN Jun, YANG Xuan, <i>et al.</i> (1313)
Characteristics of the Extracellular Polymeric Substances of a Heterotrophic Nitrifying Bacterium Strain	CHEN Zhe, ZHANG Bin, SEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1318)
Study on Toxic Effects of Ammonia on Embryonic and Yolk-sac Stage Larvae of Rare minnow WANG Zhi-jian, LU Zeng-hui, SHI Ping (1323)
Effects of Continuous Cropping of Vegetables on Ammonia Oxidizers Community Structure	MENG De-long, YANG Yang, WU Yan-zheng, <i>et al.</i> (1331)
Impact of Biochar Amendment on the Sorption and Dissipation of Chlorantraniliprole in Soils	WANG Ting-ting, YU Xiang-yang, SHEN Yan, <i>et al.</i> (1339)
Quantifying Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Photo-assimilated Carbon Input into Soil Organic Carbon Pools Following Continuous ¹⁴ C Labeling	NIE San-an, ZHOU Ping, GE Ti-da, <i>et al.</i> (1346)
Compositions and Diagnostic Ratios of Heavily Degraded Crude Oil Residues in Contaminated Soil in Oilfields	WANG Jian, ZHANG Xu, LI Guang-he (1352)
Study on Equilibrium Adsorption of Volatile Chlorinated Hydrocarbons on Humid Soils	MENG Fan-yong, LIU Rui, Kobayashi Takeshi, <i>et al.</i> (1361)
Toxicity and Accumulation of Copper and Nickel in Wheat Plants Cropped on Alkaline and Acidic Field Soils	HUANG Jin-sun, WEI Dong-pu, GUO Xue-yan, <i>et al.</i> (1369)
Change Traits of Phosphorous Consumption Structure in China and Their Effects on Environmental Phosphorous Loads	MA Dun-chao, HU Shan-ying, CHEN Ding-jiang, <i>et al.</i> (1376)
Research Based on 3MRA Model About the Risk Assessment Methods and Applications of the Landfill Waste	YUAN Ying, XI Bei-dou, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (1383)
Impacts of Initial Moisture Content of MSW Waste on Leachate Generation and Modified Formula for Predicting Leachate Generation	LAN Ji-wu, ZHAN Liang-tong, LI Yu-chao, <i>et al.</i> (1389)
Transformation of Dibutyl Phthalate in Bioreactor Landfill	FANG Cheng-ran, LONG Yu-yang, SHEN Dong-sheng (1397)
Kriging Analysis of Vegetation Index Depression in Peak Cluster Karst Area	YANG Qi-yong, JIANG Zhong-cheng, MA Zu-lu, <i>et al.</i> (1404)

《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)

2012年4月15日 33卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 4 Apr. 15, 2012

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人