

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第5期

Vol.33 No.5

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

区域空气质量模拟中查表法的应用研究 谢旻,王体健,江飞,李树,蔡彦枫,庄炳亮(1409)

长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用 苏继峰,朱彬,康汉青,王红磊,王体健(1418)

北京及周边城市一元脂肪酸大气颗粒物干沉降通量及来源分析研究 徐小娟,李杏茹,王跃思,刘晨书,潘月鹏,王英锋(1425)

上海大气超细颗粒物和工业纳米颗粒的表征及细胞毒性的比较研究 张睿,吕森林,尚羽,易飞,任晶晶,郝晓洁,安静,吴明红(1431)

青岛市大气PM_{2.5}元素组成及来源研究 李秀镇,盛立芳,徐华,屈文军(1438)

冬季天津家庭室内空气颗粒物中邻苯二甲酸酯污染研究 王夫美,陈丽,焦姣,张雷波,姬亚芹,白志鹏,张利文,孙增荣,张星梅(1446)

再悬浮装置在大气PM_{2.5}源谱分析中的应用 段恒轶,钱冉冉,吴水平,印红玲(1452)

黔西南煤燃烧产物微量元素分布特征及富集规律研究 魏晓飞,张国平,李玲,项萌,蔡永兵(1457)

三峡水库不同运行状态下支流澎溪河水-气界面温室气体通量特征初探 蒋滔,郭劲松,李哲,方芳,白镭,刘静(1463)

香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析 王亮,肖尚斌,刘德富,陈文重,王雨春,陈小燕,段玉杰(1471)

臭氧浓度升高与土壤湿度对农田土壤微生物呼吸温度敏感性的影响 陈书涛,张勇,胡正华,史艳妹,沈小帅(1476)

托木尔峰青冰滩72号冰川径流水化学特征初步研究 赵爱芳,张明军,李忠勤,王飞腾,王圣杰(1484)

五大连池水溶性有机磷矿化特性的研究 张斌,席北斗,赵越,魏自民,白雪,王曼林(1491)

7条环太湖河流沉积物氮含量沿程分布规律 卢少勇,远野,金相灿,焦伟,吴瑶洁,任德有,周羽化,陈雷(1497)

巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 李如忠,李峰,周爱佳,童芳,钱家忠(1503)

北运河系地表水近10年来水质变化及影响因素分析 郭婧,荆红卫,李金香,李令军(1511)

东莞运河排涝对东江河水水质影响分析 孙磊,毛献忠,黄旻旻(1519)

北京平原区地下水污染源识别与危害性分级 陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮(1526)

地下水曝气修复过程的三维数值模拟 李恒震,胡黎明,王建,武晓峰,刘培斌(1532)

垂向水动力扰动机的蓝藻控制效应数值实验研究 邹锐,周璟,孙永健,嵇晓燕,岳佳,刘永(1540)

新型生物岛栅中污染物去除的微生物机制研究 高明瑜,谢慧君,王文兴(1550)

营养盐水平对念珠藻胞外有机物产生的影响 齐飞,刘晓媛,徐冰冰,黄岳,封莉,张立秋(1556)

水网藻种植水对铜绿微囊藻生长的抑制作用研究 傅海燕,柴天,赵坤,刘智峰,张明真,侯明,许鹏成(1564)

酞酸酯在模拟海河菹草微宇宙中的消减和分布特征 迟杰,杨青(1570)

电子束辐射对铜绿微囊藻毒素产生和释放的抑制作用研究 刘书宇,吴明红,姜钦鹏(1575)

青铜峡灌区典型排水沟水污特征解析 李强坤,胡亚伟,罗良国(1579)

四溴双酚A的辐照降解研究 李杰,徐殿斗,马玲玲,吴明红(1587)

污泥基活性炭催化臭氧氧化降解水中微量布洛芬的效能研究 王红娟,齐飞,封莉,张立秋(1591)

高水力负荷对人工湿地处理精养虾塘排水效果的影响 李怀正,章星异,陈卫兵,叶剑峰(1597)

城市污水生物脱氮系统出水经氯胺消毒形成NDMA的影响因素研究 尚晓玲,李咏梅(1604)

利用淀粉基共混物作为反硝化固体碳源的研究 沈志强,吴为中,杨春平,陈佳利,王建龙(1609)

好氧污泥颗粒化过程中Zeta电位与EPS的变化特性 王浩宇,苏本生,黄丹,崔晓娟,竺建荣(1614)

活性污泥对病毒的生物吸附特性 周玉芬,郑祥,雷洋,陈迪(1621)

阴离子型聚丙烯酰胺在离子交换膜上的吸附规律 邓梦洁,于水利,时文歆,衣雪松(1625)

两性修饰膨润土对苯酚的吸附及热力学特征 李婷,孟昭福,张斌(1632)

表面活性剂对苯并[a]芘在黑炭表面吸附解吸的影响 张景环,陈春溶,张玮航,栗桂州(1639)

南京市4个污水处理厂的活性污泥中细菌的分离鉴定和抗生素耐药性分析 葛峰,郭坤,周广灿,张会娟,刘济宁,戴亦军(1646)

焦化废水中苯酚降解菌筛选及其降解性能 陈春,李文英,吴静文,李静(1652)

Xanthobacter flavus DT8降解二噁英的特性研究 金小君,陈东之,朱润晔,陈静,陈建孟(1657)

未开发油气田地表烃氧化菌空间定量分布 满鹏,齐鸿雁,呼庆,马安周,白志辉,庄国强(1663)

矿化垃圾中氧化甲烷兼性营养菌的筛选与生物特性研究 赵天涛,项锦欣,张丽杰,全学军,赵由才(1670)

长江中游干流及22条支流表层水中多氯联苯的分布特征及其潜在风险 李昆,赵高峰,周怀东,曾敏,廖柏寒,吴正勇,张盼伟,郝红(1676)

典型血吸虫病区表层水中酚类化合物的污染特征及潜在风险 吴正勇,赵高峰,周怀东,李科林,曾敏,李昆,张盼伟,郝红(1682)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究 陈卫锋,倪进治,杨红玉,魏然,杨玉盛(1687)

三峡库区蓄水运用期表层沉积物重金属污染及其潜在生态风险评价 王健康,高博,周怀东,陆瑾,王雨春,殷淑华,郝红,袁浩(1693)

典型电器工业区河涌沉积物中重金属的分布和潜在生态风险 邓代永,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1700)

密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价 高彦鑫,冯金国,唐磊,朱先芳,刘文清,季宏兵(1707)

湘西花垣矿区土壤重金属污染及其生物有效性 杨胜香,袁志忠,李朝阳,龙华,唐文杰(1718)

基于GIS的某训练场土壤重金属污染评价 刘玉通,方振东,杨琴,谢朝新,王大勇,毛华军(1725)

土壤质地和湿度对SVE技术修复苯污染土壤的影响 刘少卿,姜林,姚玉君,李艳霞,刘希涛,林春野(1731)

蒙脱土、高岭土和针铁矿对DNA吸附与解吸特征 王慎阳,饶伟,王代长,张亚楠,李腾,唐冰培,杨世杰(1736)

LNAPL在砂质含水层中动态迁移的电阻率法监测试验研究 潘玉英,贾永刚,郭磊,李进军,单红仙(1744)

亚临界水解预处理稻草秸秆制备活性炭及表征 董宇,申哲民,雷阳明,王茜,刘婷婷(1753)

蓝藻好氧堆肥及其氮素损失控制的研究 任云,崔春红,刘奋武,占新华,周立祥(1760)

固定化微生物技术修复PAHs污染土壤的研究进展 钱林波,元妙新,陈宝梁(1767)

《环境科学》征订启事(1483) 《环境科学》征稿简则(1620) 信息(1490,1496,1586,1743)

闽江福州段沉积物中多环芳烃的空间分布异质性研究

陈卫锋^{1,2}, 倪进治^{1,3*}, 杨红玉^{1,3}, 魏然^{1,3}, 杨玉盛^{1,3}

(1. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程省部共建重点实验室, 福州 350007; 2. 福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007; 3. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007)

摘要: 多环芳烃(PAHs)是环境中一典型的持久性有机污染物,为探明 PAHs 在闽江福州段沉积物中的空间分布规律,采用传统统计学和地统计学相结合的方法对 PAHs 的空间异质性进行了研究. 结果表明,PAHs 含量变异系数(CV)在 39%~90% 之间,属于中等强度变异. 3 环 PAHs 含量的块金值与基台值之比 $[C_0/(C+C_0)]$ 为 0.307,具有中等强度的空间相关性,其余不同环数 PAHs 以及 PAHs 总量的 $C_0/(C+C_0)$ 值都小于 0.25,具有强烈的空间相关性. 低环 PAHs 的分维数 D 值高于高环 PAHs,空间异质性较高. 3 环及 3 环以上 PAHs 的 Moran's I 系数随距离的增大而下降,且在 0~25.0 km 之间其空间自相关性随间隔距离的增大而减弱;而 Moran's I 系数分析结果进一步说明了 2 环 PAHs 的空间变异特征的复杂性. 受到水流影响,PAHs 含量在南-北方向的半方差函数值与其它方向有所不同,但在东北-西南、东南-西北和东-西方向上的半方差函数值重合性较好,近似各向同性. 用交叉验证法检验的结果表明,普通克里插值法能够很好地预测闽江福州段沉积物中 PAHs 的空间分布情况,PAHs 含量沿水流流向大致呈下降的趋势.

关键词: 空间变异; 空间相关性; 地统计学; 多环芳烃; 闽江福州段; 沉积物

中图分类号: X131.2 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)05-1687-06

Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City

CHEN Wei-feng^{1,2}, NI Jin-zhi^{1,3*}, YANG Hong-yu^{1,3}, WEI Ran^{1,3}, YANG Yu-sheng^{1,3}

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a typical persistent organic pollutants in environment. In order to explore the spatial distribution pattern of PAHs in the sediment of Minjiang River in Fuzhou City, the spatial heterogeneity analyses of PAHs in the sediment were studied with traditional statistics and geostatistics. The results showed that the variation degree of PAHs concentrations was moderate, the coefficient of variations (CV) ranged from 39% to 90%. The nugget/sill ratio of 3-ring PAH concentration was 0.307, which indicated a moderate spatial correlation, while the nugget/sill ratios of other PAHs were less than 0.25, which indicated strongly spatial correlations. The fractal dimension values and Moran's I values indicated that the spatial heterogeneity of lower-ring PAHs was stronger than those of high-ring PAHs. Moran's I values of three or more ring PAHs decreased with the increase of the distance. And as the distance ranged from 0 to 25.0 km, their spatial autocorrelations were weaken with the distance. A good superposition and the approximate isotropic of the semivariogram values in the northeast-southwest, southeast-northwest and east-west were observed. However, with the effect of water flow, the semivariation values of the PAHs concentrations in the south-north were different from those in the other three directions. The result of cross-validation showed that the ordinary Kriging interpolation method can well predict the spatial distribution of PAHs in the sediment of Minjiang river in Fuzhou City. The PAH concentrations approximately showed a downward trend with the water flow direction.

Key words: spatial variability; spatial correlation; geostatistics; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); Minjiang River in Fuzhou City; sediment

多环芳烃(PAHs)作为典型的累积性有机污染物,其显著的三致作用和持久性,对生态环境危害严重. 河流沉积物在 PAHs 的生物地球化学循环中起着非常重要的作用,它是水体环境中 PAHs 的重要归宿,同时在一系列的物理、化学和生物过程的作用下,河流沉积物中的 PAHs 可以通过再悬浮作用进入水体,对水体环境造成二次污染,并可以通过食物链进入生物圈,最终危害人体健康^[1,2]. 因此,研究

河流沉积物中的 PAHs 含量对河流生态环境的监测与保护具有重要的意义.

闽江作为福建省的第一大河流,对福建省的水

收稿日期: 2011-07-27; 修订日期: 2011-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971265); 福建省自然科学基金项目(2007J0124)

作者简介: 陈卫锋(1986~),男,硕士,主要研究方向为环境污染化学, E-mail: fengweichen1986@163.com

* 通讯联系人, E-mail: nijz@fjnu.edu.cn

源供给、气候调节和生态稳定性的维持都起着非常重要的作用。福州作为福建省的省会城市,也是闽江下游的重要工业城市。近年来,随着海西建设口号的提出,作为海西建设核心城市的福州工业化进程明显加快,对闽江下游的生态环境造成一定压力,闽江福州段流域的环境质量受到极大的关注,为保证闽江流域生态环境和沿岸人群的安全,国内许多学者对闽江福州段的环境质量进行了大量的研究^[3-7],但大多集中于水体环境中的重金属,病菌和悬浮污染物以及水体环境评价的研究,而对沉积物中 PAHs 空间变异性的研究还未见报道。

国内外已有的研究表明^[8-10],地统计学可以基于批量样本来探索和预测样品的空间分布规律,该方法已经广泛运用于面状区域中空间分布上具有结构性和随机性的自然现象研究,如在土壤科学^[11]和海洋科学^[12]中的应用已较为成熟,但在带状区域如河流中的运用还很少。本研究利用 GIS 工具,采用传统统计学和地统计学相结合的方法,对整个闽江福州段沉积物中的 PAHs 含量进行了地统计分析,探讨其空间分布特征,以为分析闽江福州段沉积物中 PAHs 含量的空间分布格局,以及闽江生态环境的监测和管理提供支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区域概况

本研究中的闽江福州段水域西起闽侯白沙,东至川石,汇入东海,流域全长 90 km,水深 < 25 m。该区域位于 E119.00° ~ 119.68°, N25.95° ~ 26.22°,属亚热带海洋性季风气候类型,气候温和,雨量充沛。近年来福州工业发展迅速,城市化进程加快,闽江周边地域大规模开发,闽江流域环境受到城市污水排放、农业化肥的使用,船舶等污染源的影响,其水体中存在不同程度的重金属、有机物以及病菌污染,闽江河口湿地生态也遭到严重的破坏,闽江福州段水环境质量有所下降,其环境的生态调节和自我恢复功能大幅降低,生态系统稳定性减弱,生态环境质量在总体上呈现出下降的趋势^[3-7]。

1.2 样品采集

于 2009 年 8 ~ 9 月利用掘式采样器在闽江福州段采集表层沉积物样品,样品采集采用均匀布点,同时根据闽江福州段区域的地理自然条件和纳污口分布,在人为活动较为频繁的流域布点也更为密集,样点距离在 2 ~ 4 km 之间。从白沙镇到川石入海口共设置了 37 个采样点,用 GPS 对采样点进行定位,采

样点分布如图 1。采集样品用保鲜袋封装,并送至实验室在 4℃ 下冷藏,备用。

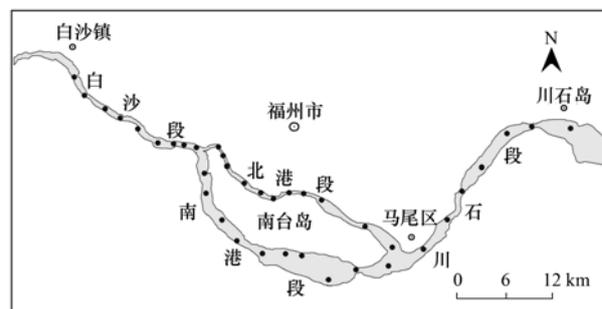


图 1 采样点分布的示意

Fig. 1 Schematic map of the distribution of sampling sites

1.3 样品分析

称取冷冻干燥后的沉积物样品 5.00 g,用二氯甲烷索式提取 24 h,提取液在旋转蒸发仪上浓缩至 20 mL 左右,转移并定容至 25 mL,移取 2 mL 溶液到试管中,氮气吹干,乙腈定容至 1.0 mL,在旋混仪上混匀 3 min,然后转移到超高效液相色谱的样品瓶中,PAHs 的测定采用 Waters 公司的超高效液相色谱系统 (UPLC),UPLC 荧光检测器,色谱柱为 ACQUITY UPLC® BEH Shield RP C18 (150 mm × 2.1 mm, 1.7 μm),柱温为 45℃,流动相为乙腈和水,进行梯度洗脱,流速为 0.4 mL·min⁻¹^[13]。实验分析的美国环境保护署 (USEPA) 优控的 15 种 PAHs 是萘(2 环),苊(3 环),芴(3 环),菲(3 环),蒽(3 环),荧蒽(4 环),芘(4 环),苯并[a]蒽(4 环),䓑(4 环),苯并[b]荧蒽(5 环),苯并[k]荧蒽(5 环),苯并[a]芘(5 环),二苯并[a,h]蒽(5 环),苯并[g,h,i]芘(6 环),茚并[1,2,3-cd]芘(6 环)。

1.4 数据分析软件应用

利用 SPSS 15.0 软件对数据进行均值、标准差、变异系数、偏度、峰度分析,正态性检验 (Shapiro-Wilk: S-W) 利用 Origin 7.5 软件进行。地图数字化和格式转化分别采用 Mapinfo 7.5 和 Arcview 3.3 软件,地统计空间分析采用 GS + 3.0 软件,克里格插值采用 Arcgis 10 软件。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中 PAHs 的描述性统计

采用传统的统计学方法对闽江福州段沉积物中 PAHs 含量进行分析(表 1),15 种 PAHs 总量的变异系数 CV 为 43%,属于中等强度的变异。不同环数的 PAHs 含量变异系数 CV 也在 10% ~ 100% 之间,属于中等强度变异^[14]。其中,2 环 PAHs 空间分布差异

表 1 沉积物中 PAHs 含量的描述性统计/ $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$

PAHs	标准偏差	算术平均值	变异系数 /%	最小值	最大值	中值	几何平均值	$P_{s,w}^{1)}$	对数转换 $P_{s,w}$	峰度	偏度
2 环	9.2	10.2	90	2.5	45.6	7.7	7.9	0.000	0.240	0.36	0.51
3 环	50.6	111.0	46	43.1	308.0	104.1	101.5	0.001	0.819	0.01	0.04
4 环	101.2	256.7	39	81	459.7	237.8	236.6	0.134	0.280	-0.43	-0.38
5 环	54.0	121.9	44	38.9	232.7	110.7	109.8	0.029	0.071	-0.91	-0.30
6 环	84.1	131.0	64	32.7	339.6	105.1	107.5	0.001	0.292	-0.97	0.05
总量	272.6	630.9	43	241.5	1310.8	610.2	575.3	0.053	0.400	-0.91	-0.07

1) $P_{s,w} > 0.05$ 表示服从正态分布

性较大,其最大值和最小值相差 18 倍,变异系数 CV 达 90%,这可能由于其易挥发性和易降解性使得其容易在不同的环境介质中转化,进而降低了其在沉积相中的迁移性所导致.其它环数的 PAHs 含量在空间分布上均匀性则更为明显.

样本的正态分布 Shapiro-Wilk (S-W) 检验表明,只有 PAHs 总量和 4 环 PAHs 含量符合正态分布,其余 PAHs 含量不符合正态分布(表 1).利用非正态分布的数据将导致变异函数的波动大,估计误差增大,所以,要进行数据转换^[15].经对数转换后沉积物中的 PAHs 含量数据都趋于正态分布,满足地统计分析要求.因此,计算 PAHs 含量变异函数值时用对数转换后的数据.

2.2 沉积物中 PAHs 含量的趋势分析

沉积物中 PAHs 含量的趋势效应见图 2,其中 O 为原点位置,X 轴表示正东方向,Y 轴表示正北方向,Z 轴表示 PAHs 含量值($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$).左后投影面上的曲线表示东西方向全局性趋势效应变化情况,右后投影面上的曲线表示南北向全局性趋势效应的变化情况.一般把趋势效应分为无趋势效应,常量趋势效应,一阶趋势效应和二阶或多阶趋势效应^[16].从图 2 可以看出,除 2 环 PAHs 含量在东西方向上呈直线下降低外,其余 PAHs 含量以及 PAHs 总量在东西方向和南北方向上都呈曲线多项式下降变化,因此闽江福州段沉积物中 PAHs 含量变化都属于二阶或多阶趋势效应,本研究最优化趋势参数选取结果见表 2.

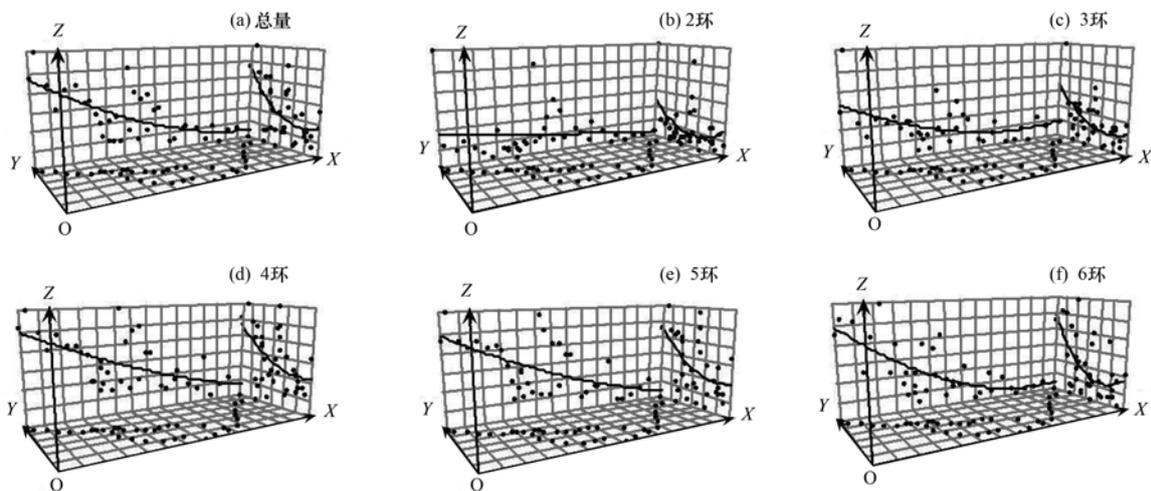


图 2 PAHs 含量趋势效应分析

Fig. 2 Trend analysis of PAHs concentrations

2.3 沉积物中 PAHs 含量的空间分析

在对半方差函数进行拟合优化时,首先要考虑决定系数(R^2)和残差(RSS),当 R^2 越接近 1 而 RSS 越接近 0,说明拟合效果最好,本研究除 2 环 PAHs 选择指数模型,其余 PAHs 以及 PAHs 总量都选择线性模型进行拟合,此时拟合的模型都具有较高的决定系数 R^2 和较小的残差 RSS,拟合效果最优,结果

见表 2.

沉积物中 PAHs 含量空间分布的异质性由结构性因素和随机性因素共同作用引起,结构性因素包括沉积物类型、地形以及水流等,而随机性因素包括污染源排放、采沙等人为活动,随机因素是造成 PAHs 含量空间相关性减弱的主要原因. C_0 为块金值, $C + C_0$ 为基台值, C 为结构方差,当 $C_0/$

$(C + C_0) < 0.25$ 表示具有强烈的空间相关性,当 $0.25 < C_0/(C + C_0) < 0.75$ 表示具有中等的空间相关性,当 $C_0/(C + C_0) > 0.75$ 表明空间相关性较弱^[17]. 从表 2 可以看出 PAHs 总量,以及 2 环、4 环、5 环和 6 环 PAHs 含量的 $C_0/(C + C_0)$ 值都小于 0.25,具有强烈的空间相关性,空间变异小; 3 环 PAHs 含量的 $C_0/(C + C_0)$ 值为 0.307,具有中等强度的空间相关性,沉积物随水流在同一方向上的迁移是造成沉积物中 PAHs 含量空间自相关性较强的重要因素.

空间变异程度可以用分维数 D 来表征,分维数 D 的计算由变异函数和间隔距离 h 之间的关系确定. 分维数 D 表示变异函数曲线的曲率,不同变量 D

值之间的比较可以确定空间异质性的程度^[18]. 从表 2 可以看出,PAHs 总量以及不同环数 PAHs 含量的分维数 D 依次为 2 环 > 3 环 > 6 环 > 4 环 > 5 环 = 总量,分维数较高的 2 环和 3 环 PAHs, D 值分别为 1.88 和 1.80,说明随机因素引起的空间异质性大,分布复杂,这可能与低环 PAHs 自身的易挥发和易降解性有关,易受外界因素干扰的影响. 5 环 PAHs 含量和 PAHs 总量的 D 值较低,为 1.64,说明随机因素引起的空间异质性小,分布简单. 高环 PAHs 的分维数 D 值都低于低环 PAHs 的分维数 D 值,表明低环 PAHs 易受外界随机因素的影响,空间分布更为复杂,高环 PAHs 性质相对稳定,不易受外界活动的干扰,均一性更为明显.

表 2 沉积物中 PAHs 含量变异函数的参数

Table 2 Parameters of semivariogram for the concentrations of PAHs in sediment

PAHs	趋势效应	数据转化	拟合模型	块金值 C_0	基台值 $C + C_0$	$C_0/(C + C_0)$	变程 /km	决定系数 R^2	残差 RSS	分维数 D
2 环	三阶	对数转化	指数	0.051	0.480	0.108	15.2	0.704	0.025	1.88
3 环	二阶	对数转化	线性	0.082	0.267	0.307	38.5	0.920	0.002	1.80
4 环	二阶	对数转化	线性	0.020	0.307	0.065	38.5	0.896	0.008	1.68
5 环	三阶	对数转化	线性	0.031	0.396	0.078	38.5	0.902	0.011	1.64
6 环	三阶	对数转化	线性	0.031	0.761	0.041	38.5	0.890	0.051	1.69
总量	三阶	对数转化	线性	0.017	0.343	0.050	38.5	0.905	0.009	1.65

Moran's I 系数可定量描述研究变量在空间上的依赖关系, I 的取值为 $-1 \sim 1$, $I > 0$ 表示变量在空间上呈现正相关, $I < 0$ 表示研究变量在空间上呈现负相关, $I = 0$ 表示研究变量在空间依赖性小或空间随机变异较大^[19]. 图 3 是 Moran's I 系数分析结果,揭示了空间自相关随距离的变化,2 环 PAHs 含量的空间自相关性随距离变化情况与其它 PAHs 含量的变化情况具有明显不同的趋势,2 环 PAHs 含量在间隔距离 < 10.0 km 时,为正的空间自相关,在 $10.0 \sim 25.0$ km 时为负的自相关,且在 20.0 km 时, $I = -0.348$,负自相关性最强,当距离 < 25.0 km 时,又出现正的空间自相关关系. 这表明 Moran's I 系数和分维数 D 值两者一致地说明了 2 环 PAHs 的空间变异特征的复杂性. 其余 PAHs 含量具有相似的空间相关趋势, Moran's I 系数虽然有小幅波动,但整体上趋于下降态势. 当距离 < 25.0 km 时为正的空间自相关关系,且在 3.1 km 时正的空间自相关性最强, I 为 $0.265 \sim 0.532$; 当距离 > 25.0 km 时,开始出现负的空间自相关关系,且在 38.5 km 时达到最大, I 为 $-0.459 \sim -0.726$. 该结果表明,间隔距离在 $0 \sim 25.0$ km 时,随间隔距离的增大,PAHs 总量、3 环、4 环、5 环和 6 环 PAHs 含量的空间自相关性减弱,空间变异性增强;当间隔距离 > 25.0 km 时,以上 PAHs 含量的空间自相关性随间隔距离的增大而增

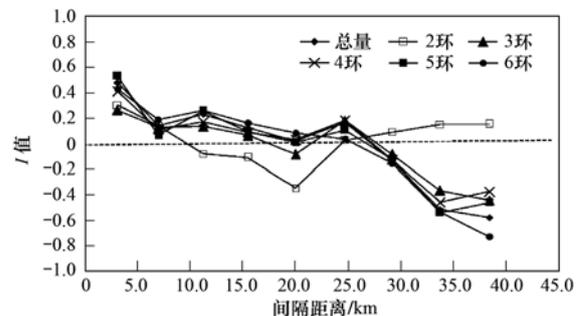


图 3 闽江福州段沉积物中 PAHs 含量的空间自相关图

Fig. 3 Spatial correlograms of PAHs concentrations in the sediment of Minjiang River in Fuzhou City

强,空间变异性减弱.

2.4 沉积物中 PAHs 含量的空间变异的各向异性分析

河流沉积物中 PAHs 含量的空间变异由于主要受到水流和地形的影响,通常表现出一定的方向性. 为了进一步分析流域 PAHs 含量在不同方向、不同尺度上所受到的影响,更加深入地探明各变量指标沿不同方向上的空间变异特征,利用 GS + 3.0 软件分别计算沿南-北、东北-西南、东南-西北、东-西这 4 个方向上的半变异函数. 容忍角设为 22.5° ,通过选择的角度值将二维空间分为 4 个独立的区域,分别为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 这 4 个方位进行计算,结果如图 4 所示. PAHs 总量以及不同环数 PAHs 含量在

南-北方向上的半方差函数值在间隔距离 < 22.5 km 时才有,明显区别于其它 3 个方向上的半方差函数. PAHs 总量、2 环含量、4 环含量、5 环含量和 6 环含量在东北-西南、东南-西北和东-西方向上半变异函数重合性较好,差异微弱,可以近似认为在东北-西南、东南-西北和东-西方向上同性. 由于闽江福州段水流整体呈东-西走向,同时不同河段也出现一定程度的东北-西南和东南-西北走向(图 1),因此

这 3 个方向表现出同性,可见水流方向是影响闽江南-北方向上沉积物中 PAHs 含量空间分布不同于其它方向的主要原因. 3 环含量在间隔距离 < 33.8 km 时,东北-西南、东南-西北和东-西这 3 个方向上的半变异函数值重合性较好,而当间隔距离 > 33.8 km 时,在东南-西北方向的半方差函数值出现明显的上扬,东北-西南和东-西方向上半方差函数值却出现下降的趋势,表现出各向异性.

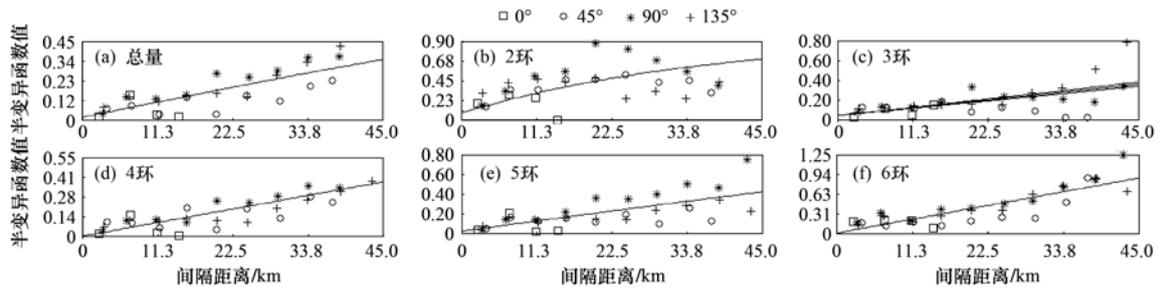


图 4 各向异性下 PAHs 含量的半方差图

Fig. 4 Semivariogram of PAHs concentration in anisotropic

2.5 沉积物中 PAHs 含量的克里格插值分析

由于闽江福州段沉积物中多种 PAHs 的含量在东北-西南、东南-西北和东-西这 3 个方向上表现出各向同性,因此本文选择各向同性进行克里格插值分析. 对于利用普通克里格法进行空间插值的精度而言,可根据交叉验证中的几个指标来评价,当标准平均值误差(MSE)的绝对值接近于 0; 均方根预测

误差(RMSE)最小; 平均标准误差(AME)最接近于均方根预测误差(RMSE),标准均方根(RMSE)接近于 1 等均可表明空间插值的精度较高^[16]. 表 3 的检验结果表明,采用普通克里格法对河流沉积物中 PAHs 空间插值预测可靠性较高. 本研究插值结果见图 5, PAHs 总量在闽江福州段整体上呈下降的趋势,最高含量在白沙段,北港段在经过福州市区时有

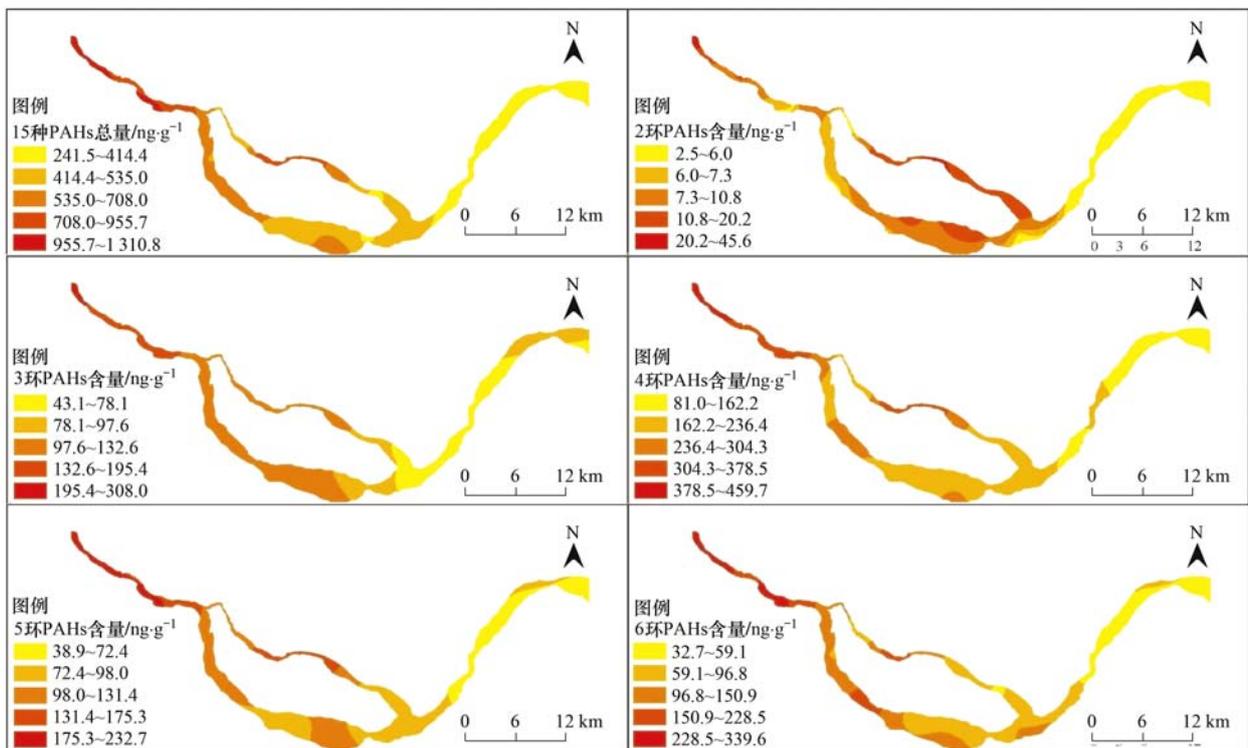


图 5 沉积物中 PAHs 的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of PAHs in sediment

表 3 克里格法空间插值的交叉检验误差

PAHs	MSE	RMSE	AME	RMSSE
2 环	-0.090	8.6	7.7	1.05
3 环	-0.017	45.2	49.2	0.93
4 环	-0.021	67.9	79.9	1.06
5 环	-0.113	33.8	52.7	1.08
6 环	-0.088	59.2	111.1	0.76
总量	-0.081	161.0	219.6	0.97

突增的现象可能是受到福州市区内河污染物排放的影响。2 环 PAHs 含量分布的变化趋势不同于 PAHs 总量分布情况,其最高含量出现在闽江的北港段和南港段,其次是白沙段,含量最低为川石段。3 环、4 环、5 环和 6 环 PAHs 总量的空间分布趋势和 PAHs 总量具有相似性,白沙到川石呈下降的趋势,同时在北港段也有突增的现象。由此可见,闽江福州段沉积物中 PAHs 主要是受到上游以及福州市区污染物排放的影响。

3 结论

(1) PAHs 含量变异系数 CV 都在 10% ~ 100% 之间,属于中等强度变异,其中 2 环 PAHs 含量变异系数 CV 最大,为 90%,空间分布较为复杂,其它 PAHs 含量分布均匀性则较高。

(2) 除 3 环 PAHs 含量的 $C_0/(C + C_0)$ 值为 0.307,具有中等强度的空间相关性外;其余环数 PAHs 含量的 $C_0/(C + C_0)$ 值都小于 0.25,具有强烈的空间相关性;2 环和 3 环 PAHs 含量的分维数分别为 1.88 和 1.80,空间异质性较大,且明显高于高环 PAHs; Moran's I 系数分析结果显示 3 环及 3 环以上的 PAHs 空间自相关随距离变化的趋势相似。

(3) 由于受到水流方向的影响,PAHs 含量在南北方向上的半方差函数值明显区别于其它 3 个方向上的半方差函数值;同时 PAHs 总量以及 2 环、4 环、5 环和 6 环 PAHs 含量在东北-西南、东南-西北和东西这 3 个方向上近似各向同性;对克里格插值精度进行交叉检验,结果表明普通克里插值法能够很好地预测闽江福州段沉积物中 PAHs 的空间分布情况,PAHs 含量沿水流流向大致呈下降的趋势。

参考文献:

- [1] Feng J L, Shen Z Y, Niu J F, *et al.* The role of sediment resuspension duration in release of PAHs[J]. Chinese Science

Bulletin, 2008, **53**(18): 2777-2782.

- [2] Domagalski J L, Kuivila K M. Distribution of pesticides and organic contaminants between water and suspended sediment, San Francisco Bay, California[J]. Estuaries, 1993, **16**(3A): 416-426.
- [3] 温小乐,徐涵秋. 近 20 年闽江福州段水域悬浮物时空变化的遥感分析[J]. 环境科学学报, 2009, **29**(3): 648-654.
- [4] 郑耀通,林奇英,谢联辉. 闽江流域福州过境段水体病毒污染调查分析[J]. 中国环境监测, 2004, **20**(5): 39-43.
- [5] 杨利民,倪志鑫,李晓波,等. 闽江水体镉的络合容量和配合物易变性常数[J]. 环境化学, 2008, **27**(6): 795-799.
- [6] 张祖麟,洪华生,陈伟琪,等. 闽江口水、间隙水和沉积物中有机氯农药的含量[J]. 环境科学, 2003, **24**(1): 117-120.
- [7] 曹宇峰. 2002~2006 年福建省闽江口以南近岸海域水质状况评价[J]. 海洋环境科学, 2009, **28**(增刊 1): 40-42.
- [8] Hani A, Pazira E. Heavy metals assessment and identification of their sources in agricultural soils of Southern Tehran, Iran[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **176**(1-4): 677-691.
- [9] Basistha A, Arya D S, Goel N K. Spatial distribution of rainfall in Indian Himalayas - A case study of Uttarakhand region[J]. Water Resources Management, 2008, **22**(10): 1325-1346.
- [10] Astel A M, Chepanova L, Simeonov V. Soil contamination interpretation by the use of monitoring data analysis[J]. Water Air Soil Pollution, 2011, **216**(1-4): 375-390.
- [11] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——地统计学方法[J]. 地理学报, 1997, **52**(2): 184-192.
- [12] 严立文,黄海军,刘艳霞. 基于 GIS 空间分析的海底表层沉积物粒度分布特征插值研究[J]. 海洋科学, 2010, **34**(1): 58-64.
- [13] 倪进治,王军,李小燕,等. 超高效液相色谱荧光检测器测定土壤中多环芳烃[J]. 分析实验室, 2010, **29**(5): 25-28.
- [14] 王玉刚,肖笃宁,李彦. 流域尺度绿洲土壤盐分的空间异质性[J]. 生态学报, 2007, **27**(12): 5262-5270.
- [15] 王政权. 地统计学及在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [16] 陆红娜,唐泽军,冯绍元,等. 北京市顺义区浅层土壤硝态氮的空间变异特征分析[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(12): 2563-3570.
- [17] Cambardell C A, Moorman T B, Parkin T B, *et al.* Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1994, **58**(5): 1501-1511.
- [18] 李晓燕,张树文,王宗明,等. 吉林省德惠市土壤特性空间变异特征与格局[J]. 地理学报, 2004, **59**(6): 989-997.
- [19] 张朝生,章申,何建邦. 长江水系沉积物重金属含量空间分布特征研究——空间自相关与分形方法[J]. 地理学报, 1998, **53**(1): 89-96.

CONTENTS

Using Look-up Table Method in the Simulation of Regional Atmospheric Environment	XIE Min, WANG Ti-jian, JIANG Fei, <i>et al.</i> (1409)
Applications of Pollutants Released from Crop Residues at Open Burning in Yangtze River Delta Region in Air Quality Model	SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (1418)
Atmospheric Dry Deposition Flux and Sources of Monocarboxylic Acids in Beijing and Surrounding Cities	XU Xiao-juan, LI Xing-ru, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (1425)
Comparison of Physicochemical Characterization of Shanghai Ambient Ultrafine Particles and Engineered Nano Particles and Their Cytotoxicity	ZHANG Rui, LÜ Sen-lin, SHANG Yu, <i>et al.</i> (1431)
Element Compositions and Source of PM _{2.5} Aerosols in Qingdao	LI Xiu-zhen, SHENG Li-fang, XU Hua, <i>et al.</i> (1438)
Phthalate Esters Pollution in Household Indoor Air Particles of Tianjin in Winter	WANG Fu-mei, CHEN Li, JIAO Jiao, <i>et al.</i> (1446)
Application of a Resuspension Test Chamber in PM _{2.5} Source Profile Analysis	DUAN Heng-yi, QIAN Ran-ran, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1452)
Distribution and Enrichment of Trace Elements in Coal Combustion Products from Southwestern Guizhou	WEI Xiao-fei, ZHANG Guo-ping, LI Ling, <i>et al.</i> (1457)
Air-Water Surface Greenhouse Gas Flux in Pengxi River at Different Operational Stages of the Three Gorges Reservoir	JIANG Tao, GUO Jing-song, LI Zhe, <i>et al.</i> (1463)
Fluxes of Greenhouse Gases from Xiangxi River in Summer and Their Influencing Factors	WANG Liang, XIAO Shang-bin, LIU De-fu, <i>et al.</i> (1471)
Effects of Elevated Ozone Concentration and Soil Moisture on Temperature Sensitivity of Soil Microbial Respiration in a Cropland	CHEN Shu-tao, ZHANG Yong, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (1476)
Hydrochemical Characteristics in the Glacier No. 72 of Qingbingtan, Tomur Peak	ZHAO Ai-fang, ZHANG Ming-jun, LI Zhong-qin, <i>et al.</i> (1484)
Mineralization Characteristics of Dissolved Organic Phosphorous in Wudalianchi Lake, China	ZHANG Bin, XI Bei-dou, ZHAO Yue, <i>et al.</i> (1491)
Speciation Distribution of Nitrogen in Sediments of 7 Rivers around Taihu Lake	LU Shao-yong, YUAN Ye, JIN Xiang-can, <i>et al.</i> (1497)
Distribution and Bioavailability of Nitrogen and Phosphorus Species in the Sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia, <i>et al.</i> (1503)
Surface Water Quality of Beiyun Rivers Basin and the Analysis of Acting Factors for the Recent Ten Years	GUO Jing, JING Hong-wei, LI Jin-xiang, <i>et al.</i> (1511)
Water Quality Impact of Dongjiang River Network Caused by Dongguan Canal Drainage	SUN Lei, MAO Xian-zhong, HUANG Min-min (1519)
Groundwater Pollution Sources Identification and Grading in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (1526)
3D Numerical Simulation of Air Sparging Remediation Process	LI Heng-zhen, HU Li-ming, WANG Jian, <i>et al.</i> (1532)
Numerical Experiment Study on the Algae Suppression Effect of Vertical Hydrodynamic Mixers	ZOU Rui, ZHOU Jing, SUN Yong-jian, <i>et al.</i> (1540)
Microbial Mechanism of Pollutants Removal in New Biological Island Grid	GAO Ming-yu, XIE Hui-jun, WANG Wen-xing (1550)
Effect of Nutrition Level of Phosphorus and Nitrogen on the Metabolism of the Extracellular Organic Matter of <i>Nostoc flagelliforme</i>	QI Fei, LIU Xiao-yuan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1556)
Inhibitory Effects of Liquor Cultured with <i>Hydrodictyon reticulatum</i> on the Growth of <i>Microcystis aeruginosa</i>	FU Hai-yan, CHAI Tian, ZHAO Kun, <i>et al.</i> (1564)
Removal and Distribution of Phthalate Acid Esters in <i>Potamogeton crispus</i> L. Microcosm of Haihe River	CHI Jie, YANG Qing (1570)
Control and Removal of Microcystin Production of <i>Microcystis aeruginosa</i> by Irradiation of Electron Beam	LIU Shu-yu, WU Ming-hong, JIANG Qin-peng (1575)
Source Characteristics Analysis of Discharge and Pollutants in Typical Drainage Ditch of Qingtongxia Irrigation District	LI Qiang-kun, HU Ya-wei, LUO Liang-guo (1579)
Degradation of TBBPA by Electron Beam Radiolysis	LI Jie, XU Dian-dou, XU Gang, <i>et al.</i> (1587)
Catalytic Ozonation of Ibuprofen in Aqueous Solution by Activated Carbon Made from Sludge and Corn Cob	WANG Hong-juan, QI Fei, FENG Li, <i>et al.</i> (1591)
Effect of High Hydraulic Loading on Intensive Shrimp Aquaculture Wastewater Treatment Performance in Constructed Wetland	LI Huai-zheng, ZHANG Xing-yi, CHEN Wei-bing, <i>et al.</i> (1597)
Factors Influencing the Formation of NDMA During Chloramination Disinfection of Effluent from Biological Nitrogen Removal System for the Treatment of Municipal Sewage	SHANG Xiao-ling, LI Yong-mei (1604)
Denitrification Using Starch/PCL Blends as Solid Carbon Source	SHEN Zhi-qiang, WU Wei-zhong, YANG Chun-ping, <i>et al.</i> (1609)
Profiles of Zeta Potential and EPS in Granulation Process of Aerobic Sludge	WANG Hao-yu, SU Ben-sheng, HUANG Dan, <i>et al.</i> (1614)
Biosorption Characteristics of f2 Bacteriophage onto Activated Sludge	ZHOU Yu-fen, ZHENG Xiang, LEI Yang, <i>et al.</i> (1621)
Adsorption of Anionic Polyacrylamide on the Surface of Ion Exchange Membranes	DENG Meng-jie, YU Shui-li, SHI Wen-xin, <i>et al.</i> (1625)
Adsorption of Amphoteric Modified Bentonites to Phenol and Its Thermodynamics	LI Ting, MENG Zhao-fu, ZHANG Bin (1632)
Effect of Surfactants on Sorption and Desorption of Benzo[a]pyrene onto Black Carbon	ZHANG Jing-huan, CHEN Chun-rong, ZHANG Wei-hang, <i>et al.</i> (1639)
Isolation and Identification of Bacteria in the Activated Sludge from Four Sewage Treatment Plants in Nanjing City and Its Antibiotic Resistance Analysis	GE Feng, GUO Kun, ZHOU Guang-can, <i>et al.</i> (1646)
Screening and Characterization of Phenol Degrading Bacteria for the Coking Wastewater Treatment	CHEN Chun, LI Wen-ying, WU Jing-wen, <i>et al.</i> (1652)
Characteristics of 1,4-Dioxane Degradation by <i>Xanthobacter flavus</i> DTS	JIN Xiao-jun, CHEN Dong-zhi, ZHU Run-ye, <i>et al.</i> (1657)
Spatial Quantitative Distribution of Hydrocarbon-Oxidizing Bacteria of Unexploited Oil and Gas Fields	MAN Peng, QI Hong-yan, HU Qing, <i>et al.</i> (1663)
Screening and Biological Characteristics of Amphitrophic Methane-Oxidizing Bacteria from Aged-Refuse	ZHAO Tian-tao, XIANG Jin-xin, ZHANG Li-jie, <i>et al.</i> (1670)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from 22 Tributaries and Mainstream in Middle Reaches of Yangtze River	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1676)
Pollution Characteristics and Potential Risks of Phenolic Compounds in Schistosomiasis Epidemic Areas	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1682)
Spatial Heterogeneity and Autocorrelation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediment of Minjiang River in Fuzhou City	CHEN Wei-feng, NI Jin-zhi, YANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1687)
Heavy Metals Pollution and Its Potential Ecological Risk of the Sediments in Three Gorges Reservoir During Its Impounding Period	WANG Jian-kang, GAO Bo, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (1693)
Investigation on the Distribution and Potential Ecological Risk of Heavy Metal in the Sediments from Typical Electrical Industrial Zone	DENG Dai-yong, SUN Guo-ping, GUO Ju, <i>et al.</i> (1700)
Fraction Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Iron and Gold Mine Soil of Miyun Reservoir Upstream	GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, <i>et al.</i> (1707)
Heavy Metal Contamination and Bioavailability in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, LI Zhao-yang, <i>et al.</i> (1718)
Evaluation of Heavy Metal Pollution in Soils from a Training Ground Based on GIS	LIU Yu-tong, FANG Zhen-dong, YANG Qin, <i>et al.</i> (1725)
Effects of Soil Texture and Water Content on Remediation of SVE on Soils Contaminated by Benzene	LIU Shao-qing, JIANG Lin, YAO Yu-jun, <i>et al.</i> (1731)
Characteristics of DNA Adsorption and Desorption in Montmorillonite, Kaoline and Goethite	WANG Shen-yang, RAO Wei, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (1736)
LNAPL Migration Monitoring in Simulated Sand Aquifer Using Resistivity Method	PAN Yu-ying, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (1744)
Preparation and Characterization of Activated Carbon from Rice Straw Pre-treated by the Subcritical Hydrolysis	DONG Yu, SHEN Zhe-min, LEI Yang-ming, <i>et al.</i> (1753)
Study on Composting of Cyanobacteria Amended with Different N Loss Inhibitor	REN Yun, CUI Chun-hong, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (1760)
Research Progress About Bioremediation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Contaminated Soil with Immobilized Microorganism Technique	QIAN Lin-bo, YUAN Miao-xin, CHEN Bao-liang (1767)

《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5月15日 33卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 5 May 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@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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行