

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第9期

Vol.33 No.9

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

我国4个WMO/GAW本底站大气CH ₄ 浓度及变化特征	方双喜,周凌晔,许林,姚波,刘立新,夏玲君,王红阳	(2917)
我国东北地区大气降水稳定同位素特征及其水汽来源	李小飞,张明军,马潜,李亚举,王圣杰,汪宝龙	(2924)
2010年广州亚运期间空气质量与污染气象条件分析	李婷苑,邓雪娇,范绍佳,吴兑,李菲,邓涛,谭浩波,蒋德海	(2932)
厦门市冬春季灰霾期间大气PM ₁₀ 中多环芳烃的污染特征及来源分析	钱冉冉,闫景明,吴水平,王新红	(2939)
气溶胶OCEC切割点确定方法改进及应用	王莉华,董华斌,闫才青,曾立民,郑玫,张延君,刘久萌,Weber R J	(2946)
松花江上游夹皮沟金矿土壤与大气汞污染特征	张刚,王宁,王媛,刘特,艾建超	(2953)
河北农居环境颗粒态汞污染特征及健康评估研究	赵亚娟,龚巍巍,栾胜基	(2960)
印刷电路板(PCB)厂挥发性有机物(VOCs)排放指示物筛选	马英歌	(2967)
烹调油烟中挥发性有机物的排放初探	何万清,田刚,聂磊,曲松,李靖,王敏燕	(2973)
生物滴滤塔降解甲苯废气长期运行生物膜相特性研究	胡俊,郑江玲,吴越新,张丽丽,陈建孟	(2979)
分期布液生物滴滤床净化H ₂ S废气性能研究	刘春敬,李坚,刘佳,彭淑婧,李超,陈英,何洪	(2987)
粉煤灰综合利用过程中汞的二次释放规律研究	孟阳,王书肖	(2993)
太湖、巢湖水体总悬浮物浓度半分析反演模型构建及其适用性评价	刘忠华,李云梅,檀静,郭宇龙,周莉,刘阁	(3000)
巢湖水质与流域农业投入的关联性研究	张燕,高翔,张洪	(3009)
巢湖十五里河水花生生长区沉积物及间隙水中营养盐的基本特性	李如忠,李峰,周爱佳	(3014)
巢湖沉积物中磷蓄积时空变化及人为污染定量评价	刘恩峰,杜臣昌,羊向东,沈吉	(3024)
巢湖周边表土中有机质、全氮和全磷空间分布及其相关性	陈书琴,储昭升,胡社荣,刘俊,王长春,王曼	(3031)
丹江口水库典型入库支流氮磷动态特征研究	雷沛,张洪,单保庆	(3038)
水温分层对三峡水库香溪河库湾春季水华的影响	刘流,刘德富,肖尚斌,孔松,陈媛媛,方小凤	(3046)
平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究	杨晓英,罗兴章,郑正,方淑波	(3051)
江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析	刘涛,胡志新,杨柳燕,肖琳,席北斗,许其功	(3057)
太湖西岸湖滨带沉积物氮磷有机质分布及评价	甘树,卢少勇,秦普丰,金相灿,焦伟,王佩	(3064)
南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究	刘静,路风,杨廷钊,徐娜,王田妮	(3070)
珠江水体中有机物分布、组成及与消毒副产物生成的关系	何洪威,周达诚,王保强,梁艳红	(3076)
东江流域典型乡镇饮用水源地重金属污染健康风险评价	王若师,许秋瑾,张炯,魏群山,颜昌宙	(3083)
深圳茅洲河表层沉积物卤代多环芳烃污染研究	孙建林,倪宏刚,丁超,曾辉	(3089)
福建罗源湾潮间带沉积物重金属含量空间分布及其环境质量影响	高文华,杜永芬,王丹丹,高抒	(3097)
渤海湾大型底栖生物群落结构变化及原因探讨	蔡文倩,刘录三,乔飞,林岍璇,周娟	(3104)
地下水污染防治区划体系构建研究	王俊杰,何江涛,陆燕,刘丽雅,张小亮	(3110)
北京市平原区地下水污染防治区划不确定性分析	陆燕,何江涛,王俊杰,刘丽雅,张小亮	(3117)
川东平行岭谷区典型岩溶含水系统中NO ₃ ⁻ 的存储和运移	杨平恒,袁道先,任幼蓉,谢世友,贺秋芳,胡晓风	(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究	董锡臻,石宝友,解岳,王东升	(3132)
水溶液中臭氧和溴离子的反应研究	俞潇婷,张家辉,潘循哲,张仁熙,侯惠奇	(3139)
HPSEC-UV-TOC联用技术测定有机物相对分子质量分布	张晗,董秉直	(3144)
不同有机基质诱发的水体黑臭及主要致臭物(VOCs)产生机制研究	卢信,冯紫艳,商景阁,范成新,邓建才	(3152)
不同pH下纳米铁镍颗粒对生物降解苯酚的影响	况烨,周琰,王清萍,陈祖亮	(3160)
多级微氧生物流化床预处理高浓度丙烯酸废水	李莎,郑盛之,宋玉栋,周岳溪,朱长军,刘淑玲,潘玲,蒲文晶	(3167)
三级生物膜深度处理腈纶废水生化出水的脱氮研究	徐少阳,蒋进元,周岳溪,崔俊涛,段妮妮	(3172)
改性花生壳对水中镉的动态吸附研究	龙腾,易筱筠,党志	(3177)
硫氰酸根在粒状镁铝复合氧化物上的吸附性能	王秀娟,王海增,孙宝维,韩文军	(3182)
海水生物滤器氨氮沿程转化规律模型	罗荣强,侯沙沙,沈加正,陈珠,刘鹰	(3189)
营养物质缺乏引起的好氧颗粒污泥膨胀及其恢复	张著,高大文,袁向娟,勾倩倩	(3197)
生物表面活性剂强化污泥水解的研究	易欣,罗琨,杨麒,李小明,邓伟光,张植平	(3202)
厌氧氨氧化菌的富集培养与分子鉴定	刘冬英,邱艳玲,袁宪正,师晓爽,郭荣波	(3208)
阿特拉津降解菌株的分离、鉴定及降解特性研究	李绍峰,朱静,李铁晶	(3214)
农业废物堆肥中高产漆酶新菌株的分离鉴定及酶学性质研究	任秀娟,范长征,鲁伦慧,王聪,曾光明	(3220)
糖蜜酒精废水脱色微生物的筛选及鉴定	李必金,刘幽燕,贺锴,滕芳明,何熙璞,李青云	(3228)
餐厨垃圾乳酸发酵过程中的微生物多样性分析	刘建国,汪群慧,王爽,孙晓红,仇天雷,李焕	(3236)
共价功能化对单壁碳纳米管产生DNA损伤和活性氧的影响研究	吴仁人,陶雪琴,党志,李开明,蔡美芳	(3241)
<i>Geobacter sulfurreducens</i> 对汞的甲基化及其影响因素研究	邹嫣,司友斌,颜雪,陈艳	(3247)
单一与复合胁迫下油菜对镉、铅的吸收效应	武文飞,南忠仁,王胜利,赵转军,周婷	(3253)
金铜矿下游农户家养番鸭体内重金属分布特征及其评价	杭小帅,梁斌,王文林,王霞,李维新	(3261)
环境激素氯菊酯对萼花臂尾轮虫繁殖的影响	董学兴,杨家新,吕林兰,赵卫红,於叶兵	(3266)
地聚物固化生活垃圾焚烧飞灰固化体抗氧化硫杆菌腐蚀性能的研究	金漫彤,孙鑫,董海丽,金赞芳	(3272)
焚烧飞灰高温过程中重金属的挥发及其氯化特征	刘敬勇,孙水裕	(3279)
城市废弃物处理温室气体排放研究:以厦门市为例	于洋,崔胜辉,林剑艺,李飞	(3288)
NPEOs及其代谢产物在城市污水处理厂中的归趋分析	连静,刘俊新	(3295)
《环境科学》征订启事(3037)	《环境科学》征稿简则(3151)	信息(2999,3030,3096,3227)

平水期和丰水期殷村港污染物浓度时空变异比较研究

杨晓英¹, 罗兴章¹, 郑正¹, 方淑波^{1,2*}

(1. 复旦大学环境科学与工程系, 上海 200433; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 殷村港是太湖的重要入湖河流之一。本研究在2010年4月(平水期)和6月(丰水期)对其从上游漏湖到下游太湖入口进行了2次全程高密度水质监测,并以化学需氧量(COD)和总氮(TN)为例,采用基于河流水系距离的地统计方法分析殷村港沿程污染物浓度的时空变化特征。结果表明:① COD和TN在平水期和丰水期呈现显著的时空差异。6月COD浓度显著低于4月,TN浓度变化截然相反。② 2次监测期间,COD入河负荷较为稳定。4月和6月的COD浓度半变异函数皆呈指数型空间相关结构。该时期COD浓度变化主要受水文环境影响。③ 2次监测期间,源于农业的氮素负荷显著增加。大量无序的个体农户施肥行为使得6月TN浓度无显著空间相关性。6月TN浓度变化受农业施肥和水文环境的双重影响。鉴于太湖流域水情复杂,污染严重,地统计方法是研究该区域河流污染物浓度分布特征和预测污染物浓度的有力工具。

关键词: 面源污染; COD; TN; 半变异函数; 太湖; 空间相关; 河流水系距离

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)09-3051-06

Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China

YANG Xiao-ying¹, LUO Xing-zhang¹, ZHENG Zheng¹, FANG Shu-bo^{1,2}

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. School of Fishery and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Two high-density snap-shot samplings were conducted along the Yincungang canal, one important tributary of the Lake Tai, in April (low flow period) and June (high flow period) of 2010. Geostatistical analysis based on the river network distance was used to analyze the spatial and temporal patterns of the pollutant concentrations along the canal with an emphasis on chemical oxygen demand (COD) and total nitrogen (TN). Study results have indicated: ① COD and TN concentrations display distinctly different spatial and temporal patterns between the low and high flow periods. COD concentration in June is lower than that in April, while TN concentration has the contrary trend. ② COD load is relatively constant during the period between the two monitoring periods. The spatial correlation structure of COD is exponential for both April and June, and the change of COD concentration is mainly influenced by hydrological conditions. ③ Nitrogen load from agriculture increased significantly during the period between the two monitoring periods. Large amount of chaotic fertilizing by individual farmers has led to the loss of the spatial correlation among the observed TN concentrations. Hence, changes of TN concentration in June are under the dual influence of agricultural fertilizing and hydrological conditions. In the view of the complex hydrological conditions and serious water pollution in the Lake Taihu region, geostatistical analysis is potentially a useful tool for studying the characteristics of pollutant distribution and making predictions in the region.

Key words: non-point source pollution; COD; TN; semi-variogram; Lake Taihu; spatial correlation; river network distance

太湖是我国第三大淡水湖。尽管太湖流域只占全国面积的0.4%和人口的2.9%,但其国民生产总值占全国的14%^[1]。伴随着太湖流域快速的经济发展是当地水质的急剧恶化。据2010年中国环境公报,太湖水质总体为劣V类。太湖环湖河流的88个国控监测断面中,Ⅳ类、Ⅴ类和劣Ⅴ类水质的断面比例分别为33%、12%和12%^[2]。太湖流域的水污染控制任务非常艰巨。

掌握水体污染物时空分布特征,明晰污染物的来源和迁移转化规律,是制定有效水污染控制方案的基础。在太湖区域,已经进行了一些有关污染物时空变化特征的研究。例如,殷燕等^[3]基于2009年全太湖32个站点的四季监测数据,分析了太湖化学

需氧量(COD)、生物需氧量(BOD)的时空分布特征。卢少勇等^[4]对环太湖29条主要河流进行监测,分析其时空变化特征。在我国其他流域,也进行了一些类似的水质时空分布特征研究。例如,杨丽蓉等^[5]在温榆河流域设置了17个监测断面,根据监测结果,分析了温榆河水质的时空差异。蒋艳等^[6]选取淮河流域的82个水质监测站,利用各站点的历史

收稿日期: 2011-11-23; 修订日期: 2012-03-20

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-04); 上海自然科学基金项目(11ZR1402900); 复旦大学“985工程”三期项目(2012SHKXQN009); 国家自然科学基金项目(41101172)

作者简介: 杨晓英(1977~),女,博士,讲师,主要研究方向为流域污染控制, E-mail: xiaoying@fudan.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: bsfang@fudan.edu.cn

水质监测数据,分析流域内水污染物浓度的时空变异特征. 付金沐等^[7]根据涡河干流的污染特点,在涡河自上游至下游设置 5 个监测断面,分析河流主要水质参数的时空变化特征.

已有的污染物时空分布特征研究多采用图表对比分析污染物浓度时空差异的方法. 部分研究采用聚类分析^[5]和相关分析^[8]等统计方法. 地统计学是由南非地质学家 Krige 于 1951 年首次提出并应用于南非采矿业矿藏勘察计算中. 经过几十年的发展,其应用已扩展到土壤^[9]、气象^[10]、环境污染^[11]等研究领域. 在水环境研究中,地统计方法的应用多集中于地下水^[12],在河流地表水研究中应用较少. 究其原因,可能是尽管河流的水文和理化特征是连续变化的,但其观测值或数学模拟结果大都是一维或多维离散^[13]. 在传统的地统计研究中,半变异函数值往往通过直线距离进行计算. 由于直线距离无法反映河流水系的连通性和拓扑结构^[14,15],将直线距离应用于河流方面的研究,有一定的局限性. 本研究尝试应用半变异函数的地统计方法研究河流污染物浓度的空间分布特征,但通过采用河流水系距离的度量方法,即衡量监测点之间沿着河流流经的距离,在一定程度上解决了上述问题.

此外,在以往研究中,尽管污染物浓度数据来源

各异,既有采用已有站点的历史监测数据,也有自设断面进行监测,但其共同特征是研究区域范围较广,监测点间距较大,因而研究结果反映的多为不同地区之间的区域差异. 与以往研究不同,本研究选取一条全长为 20 km 的太湖入湖河流——殷村港,分别在平水期和丰水期对该河进行全程高密度水质监测,并利用地统计方法比较分析其水质时空变化特征,进而探究影响该河污染物浓度的主要影响因素. 在本研究中,密集的水质监测允许对殷村港的水质及其时空变化特点进行深入分析. 同时,殷村港流程较短,流域背景条件相对均质,有利于排除过多干扰因子的影响和解析流域污染负荷来源、影响因子和影响强度,以为当地的水污染控制提供参考依据.

1 研究区域

殷村港源于溇湖,注入太湖,是 20 世纪 70 年代为泄洪而开挖的人工运河. 殷村港全长 20 km,途径宜兴市的 3 个镇:和桥、万石和周铁(图 1). 根据 3 个镇的 2009 年统计年鉴,2008 年三镇的总人口为 154 893 人,农村人口占 60% 以上.

作为太湖的 15 条主要入湖河流之一,殷村港平均年径流量达 11 亿 m^3 ,入湖污染负荷量位居各主要入湖河流的首位. 据估算,殷村港所携带的污染

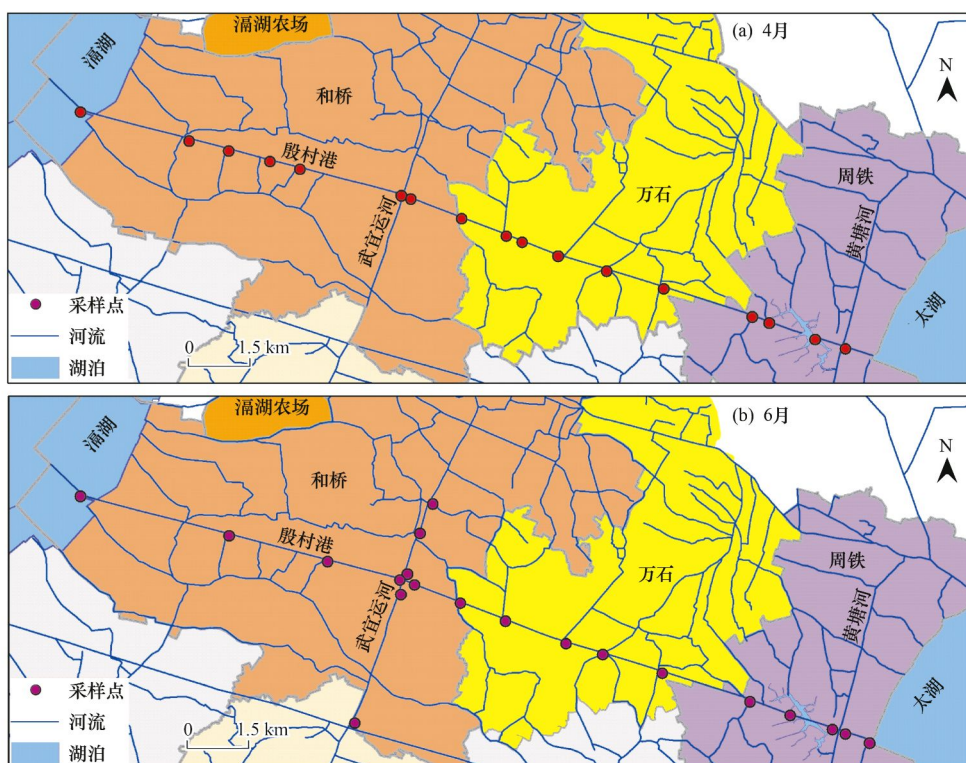


图 1 研究区域示意

Fig. 1 Study area

物占太湖氨氮入湖负荷的 20.1%, 总磷负荷的 19.7%, 和总氮(TN)负荷的 17.8%^[16]。

殷村港流域属于北亚热带季风性气候, 四季分明。全年平均温度 15.7℃, 年平均降雨量 1 177 mm, 气候温和, 适于农业生产。目前, 该区域的农业种植面积约占镇总面积的 48.3%。

2 研究方法

在 2010 年的 4 月下旬和 6 月中旬, 分别对殷村港沿河进行了 2 次高密度连续水质监测。所有水质样本采集工作在数小时之内完成。4 月采样包括 17 个样点, 6 月采样包括 15 个样点。此外, 根据当地水环境专家的建议, 与殷村港在万石镇交界的武宜运河对殷村港水质有一定影响。在 6 月的水质采样中, 沿武宜运河也布置了 5 个采样点。采样点位置的具体空间分布见图 1。所采水样的 TN 浓度和化学需氧量(COD)浓度分别通过 HACH DR2800 分光光度计和 HACH DRB200 COD 消解仪测量。

殷村港的 TN 和 COD 浓度空间分布特征可以用半变异函数进行描述, 其公式如下:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N_h} \sum_{i=1}^{N_h} (Z_{S_i+h} - Z_{S_i})^2 \quad (1)$$

式中, $\gamma(h)$ 为滞后距离为 h 的半变异函数值; N_h 为滞后距离为 h 的观测值的对数; Z_{S_i+h} 和 Z_{S_i} 为滞后距离为 h 的 2 个观测值。

鉴于直线距离的局限性, 一些研究尝试利用河流距离来衡量河流监测点之间的空间相关性^[17~20]。本研究采用的是对称性河流距离来计算半变异函数。对称性河流距离指的是 2 个监测点之间沿着河流水道的最近距离^[15]。

考虑到污染物浓度观测值的空间相关性, 可用以下空间回归模型检验 2 个月的污染物浓度是否存在显著差异:

$$Y = \alpha + \beta X_1 + \varepsilon, \quad \varepsilon = \lambda W_\varepsilon + \xi \quad (2)$$

式中, Y 代表污染物观测浓度; X_1 为分类指示变量, 如果观测值为 4 月浓度值, 则 X_1 值为 1, 否则为 0; ε 为随机误差项; λ 为自相关回归系数; 为空间滞后误差项; ξ 为独立齐次误差项。

在回归模型结果中, 如果 X_1 统计显著, 则表示 4 月与 6 月污染物浓度存在显著差异, 否则 2 个月间的污染物浓度无显著差异。

3 结果与分析

从上游太湖到下游太湖入湖口, 殷村港的 COD

和 TN 浓度空间变化情况如图 2 所示。沿着武宜运河的 5 个监测点的监测结果也显示在图 2 上。这 5 个点距离上游太湖的距离定为 2 条运河相交点的距离。由图 2 可见, 殷村港 COD 和 TN 呈现不同的时空变化特征。从上游到下游, 4 月 COD 浓度在前 5 km 呈上升趋势, 然后持平, 变化幅度范围在 52 ~ 79 mg·L⁻¹。6 月 COD 浓度在两运河的交界处明显下降, 然后持平, 变化幅度范围在 15 ~ 40 mg·L⁻¹。与 COD 不同, 2 个月的 TN 浓度的沿程变化大体呈随机波动特征, 无明显规律可循。

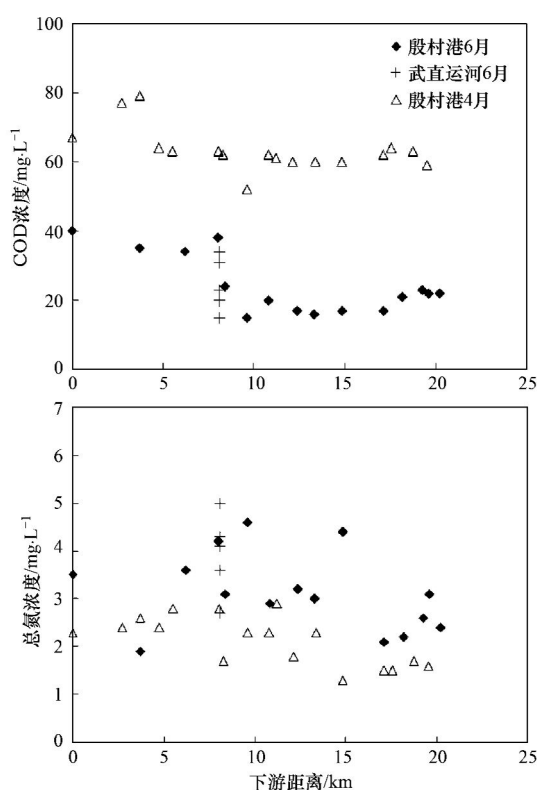


图 2 2010 年 4 月和 6 月 COD 和 TN 浓度观测值

Fig. 2 Observed COD and TN concentration in April and June, 2010

从时间上看, 6 月 COD 浓度比 4 月低, 而 6 月 TN 浓度比 4 月高。利用 GeoDa 软件^[21]估算的空间回归模型系数及其统计量列于表 1。从中可见, 指示变量 X_1 在 COD 和 TN 空间回归模型中均为显著变量, 因此 COD 和 TN 浓度在 4 月和 6 月间均具有显著性差异。

图 3 和图 4 是利用对称河流距离计算的 COD 和 TN 半变异函数图。鉴于 6 月沿着殷村港的观测点较少且有证据表明武宜运河对殷村港的水质有一定的影响, 武宜运河的 5 个观测点也用于计算 6 月的半变异函数。

表 1 4 月和 6 月 COD 和 TN 浓度差异比较¹⁾

Table 1 Comparison of COD and TN concentration between April and June

污染指标	月平均浓度 /mg·L ⁻¹	月平均浓度 /mg·L ⁻¹	Z 值 ¹⁾	双侧检验 P ¹⁾
COD	63.4	24.1	15.5	<0.000 01
TN	2.1	3.1	-4.3	0.000 02

1) 空间回归模型类别指示变量的统计量

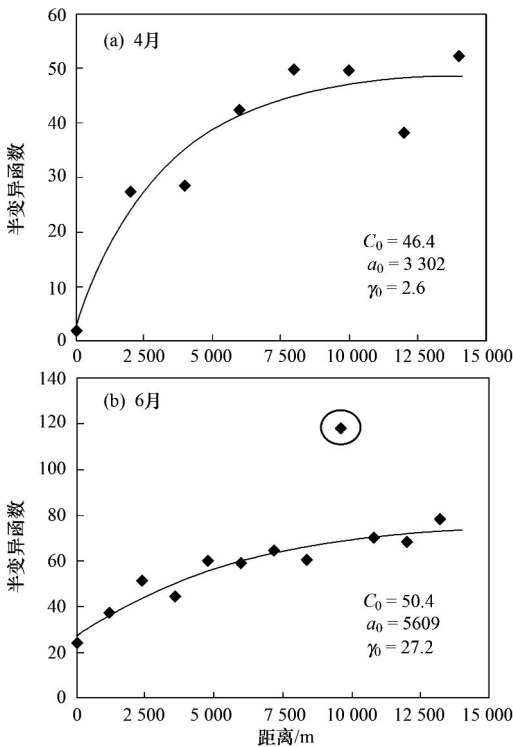


图 3 4 月和 6 月 COD 浓度半变异函数
Fig. 3 Estimated sem-variograms for COD concentration in April and June

由图 3 可见,如果摒除 6 月的一个点,4 月和 6 月 COD 浓度均可用指数型半变异函数估计,具体公式如式(3)所示. 非线性拟合结果显示,与 4 月 COD 浓度的半变异函数模型相比,6 月 COD 浓度模型具有更高的自相关阈值、块金值和基台值.

$$\gamma(h) = C_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a_0}\right) \right] + \gamma_0 \quad (3)$$

式中, $\gamma(h)$ 为距离 h 的半变异函数值; C_0 为基台值; γ_0 为块金值; $3a_0$ 为自相关阈值.

由图 4 可见,4 月和 6 月 TN 浓度的半变异函数图截然不同. 4 月 TN 浓度的半变异函数模型仍处于上升阶段,模型参数难以准确估计. 如果把基台值定为 10,自相关阈值大致估算为 442 km,这至少表明 4 月 TN 浓度的半变异函数模型具有很高的自相关阈值,远长于殷村港. 与 4 月不同,6 月 TN 浓

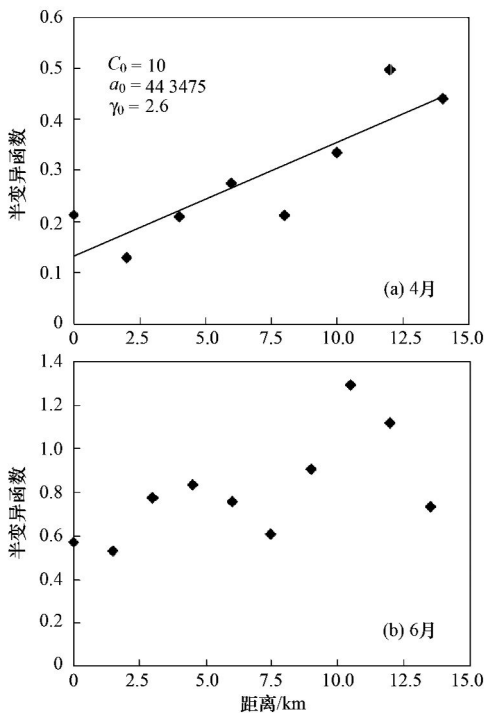


图 4 4 月和 6 月 TN 浓度半变异函数
Fig. 4 Estimated sem-variograms for TN concentration in April and June

度的半变异函数模型呈“纯块金”现象,表明 6 月各观测点的 TN 浓度不具有显著的空间相关性.

4 讨论

监测和分析结果表明,殷村港在平水期和丰水期呈现显著不同的污染物浓度和空间分布特征. 造成这些显著差异的原因可以从污染源、水文环境条件和外界来水等影响因素进行分析.

2 次采样的水文条件迥异. 殷村港地区属季风性气候,超过一半的年降雨量集中在 6~9 月(丰水期). 因此,本研究的 2 次采样,一次在平水期,另一次在丰水期. 事实上,在 6 月采样的前几天有连续降雨,造成殷村港的水位和径流量明显增高.

外界来水对殷村港的影响主要包括上游漏湖来水和与其垂直相交的武宜运河的影响. 除外界来水污染负荷外,殷村港流域内的污染源包括农田废水,农村生活污水,畜禽养殖废水,城市污水处理厂尾水

和工业废水等。自 20 世纪 90 年代以来,从中央到地方政府采取了一系列的措施治理太湖流域的水环境污染。目前为止,当地的点源已经大体得到有效治理^[22]。殷村港二岸的畜禽集中养殖场已关闭或搬迁至距河岸 1 km 以外的非敏感区域,当地的农村生活垃圾也已实现有效收集和集中处理。

然而,殷村港沿岸的农村生活污水和农田废水等面源污染源尚未得到有效控制。绝大部分农户沿袭着传统习惯,沿河而居^[23]。大量的农户生活污水未经处理就直接就近排入河中。对当地农民的随机抽样调查结果表明大部分农民都不再施用农家有机肥,而是施用化肥,且未采取深度施肥、缓释肥等最佳施肥和养分管理方式,其化肥施用量(以纯氮计)远超过推荐的每季作物 $200 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的标准^[24,25]。

殷村港沿岸的农田大都实施水稻-小麦轮作:即 6 月中旬到 10 月下旬种植水稻,11 月上旬到次年 5 月种植小麦。由于 4 月和 6 月的采样时间恰好处于作物交替期,因此在 2 次采样点之间的时间段,农业污染排放强度会有所改变。由于本研究中 2 次采样间隔时间较短,可以假定在此期间除了农业生产以外,其它污染源的污染负荷大致不变。

4.1 COD 浓度时空变化

由于作物秸秆相对稳定,其所含的有机物分解需要时间,因此尽管处于收割期,在 4 月和 6 月 2 次采样间隔期间,农田废水的 COD 负荷不会有显著增加,进入殷村港的总 COD 负荷相对稳定。2 次采样间,COD 浓度和空间分布特征发生的变化可以主要归结于水文条件和外界来水负荷的差异。

在 6 月,径流量明显增加,稀释作用使得 6 月 COD 浓度显著低于 4 月,这包括:①稀释作用使得太湖上游来水 COD 浓度显著降低。②在 2 条运河的交界处,武宜运河大量来水的稀释作用使得殷村港的 COD 浓度进一步下降。此外,武宜运河还携带走殷村港的部分 COD 负荷。监测结果表明,与殷村港交界前,武宜运河的 COD 浓度为 $23 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,交界后则上升为 $34 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (图 2)。

4 月和 6 月 COD 浓度的半变异函数模型结构总体相似,不过 6 月函数的块金值和自相关阈值都比 4 月高。在处于平水期的 4 月,水流和污染物的传输相对缓慢。在处于丰水期的 6 月,快速水流促进了污染物的传输,这使得局部区域的扰动和浓度变异性(块金值)增加;同时远距离观测点间的污染物浓度比较接近,空间相关性(自相关阈值)增强。

4.2 TN 浓度时空变化

TN 与 COD 的污染浓度变化情况显著不同。尽管 6 月河流水位上涨、流量增加,6 月 TN 的浓度要高于 4 月,这是由于 6 月当地农民在种植水稻时施用大量尿素等氮肥造成的。为了保证产量,当地农民的化肥施用量远远超过了专家推荐的施肥标准。大量化肥未经植物吸收利用,便随着地表径流迅速进入周边水体,造成 6 月 TN 负荷的明显增加^[26]。此外,在 6 月,殷村港对武宜运河的 TN 浓度起到稀释作用。在与殷村港交界前,武宜运河的 TN 浓度有 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,交界后则降为不到 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

4 月和 6 月 TN 浓度所呈现的半变异函数模型结构完全不同。4 月 TN 浓度半变异函数模型仍处于上升阶段,其自相关阈值远远高于 COD。在 4 月,农业施肥很少,高自相关阈值显示了上游来水和殷村港两岸地下基流、大气沉降等连续性氮源是殷村港入河氮负荷的主要来源,因而呈远距离的空间相关性^[27~29]。

与 4 月不同,6 月 TN 浓度的半变异函数模型呈“纯块金”现象,无显著空间相关特征。如上所述,6 月农田废水对殷村港氮素的输入大量增加。然而,农民施肥属个体行为,其施肥时间、地点和强度各异,氮素从各农田迁移到殷村港的途径也有差异。因此,从总体上看,由施肥造成的氮负荷显著增加,但相当无序,破坏了 TN 浓度原来的空间结构,使得 6 月殷村港沿程的 TN 浓度不再具有显著的空间相关性。

5 结论

(1)在 2010 年 4 月(平水期)和 6 月(丰水期),沿着殷村港分别进行了 2 次高密度水质监测。监测和分析结果表明殷村港的 COD 和 TN 浓度在平水期和丰水期呈现显著的时空差异,且彼此特征各异。

(2)在 2 次监测期间,COD 入河负荷相对稳定。由于稀释作用,丰水期 COD 的浓度显著低于平水期。水流的快速传输作用,使得丰水期 COD 浓度的局部变异性性和远距离相关性比平水期高。

(3)在 2 次监测期间,来自于农业生产的氮素入河负荷显著增加,造成丰水期 TN 浓度显著高于平水期。由于农民个体无序的高强度施肥行为,6 月 TN 浓度的空间相关结构消失,被随机变化取代。

(4)河流污染物浓度多呈显著空间相关性。太湖流域水网密布,人工运河纵横交错,水流方向受风向、降雨、人工疏浚等多种因素影响,流域界限难以确定,因此在当地应用回归分析和面源污染模型等方法困难较大。针对其水质污染严重、水质监测数据有限

等现状,地统计方法在该地区研究河流污染物浓度分布特征和预测污染物浓度方面具有应用价值。

参考文献:

- [1] Zhang T X, Wang X R, Jin X C. Variations of alkaline phosphatase activity and P fractions in sediments of a shallow Chinese eutrophic lake (Lake Taihu) [J]. Environmental Pollution, 2007, **150**(2): 288-294.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2010 中国环境状况公报[R]. 2011, Available from: <http://www.mep.gov.cn/gzfw/xzzx/>.
- [3] 殷燕, 张运林, 时志强, 等. 太湖化学耗氧量和生化需氧量的时空分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(12): 2544-2552.
- [4] 卢少勇, 焦伟, 王强, 等. 环太湖河流水质时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2011, **24**(11): 1220-1225.
- [5] 杨丽蓉, 孙然好, 陈利顶. 流域地表水体污染过程的时空差异及其影响机制分析: 以温榆河中上游地区为例[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 73-79.
- [6] 蒋艳, 彭期冬, 骆辉煌, 等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报, 2011, **42**(11): 1283-1288.
- [7] 付金沐, 刘敏, 史志刚, 等. 涡河干流水污染时空分布特征与水质动态评价[J]. 水土保持研究, 2007, **14**(4): 82-88.
- [8] 杨丽娜, 李正炎, 张学庆. 大辽河近入海河段水体溶解氧分布特征及低氧成因的初步分析[J]. 环境科学, 2011, **32**(1): 51-57.
- [9] 戴明新, 师荣光, 赵玉杰, 等. 四川泸县农业土壤 Cd 含量空间变异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, **26**(3): 1093-1099.
- [10] 孙然好, 刘清丽, 陈利顶. 基于地统计学方法的降水空间插值研究[J]. 水文, 2010, **30**(1): 14-17, 58.
- [11] 赵文慧, 宫辉力, 赵文吉, 等. 基于地统计学的北京市可吸入颗粒物时空变异性及气象因素分析[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(11): 2154-2163.
- [12] 闫金凤, 郭全军, 陈曦, 等. 新疆三工河流域绿洲地下水水质空间变异特征分析[J]. 资源科学, 2009, **31**(10): 1710-1716.
- [13] 陈晓宏, 张蕾, 时钟. 珠江三角洲河网区水位特征空间变异性研究[J]. 水利学报, 2004, (10): 36-42.
- [14] Peterson E E, Urquhart N S. Predicting water quality impaired stream segments using landscape-scale data and a regional geostatistical model: A case study in Maryland [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, **121**(1-3): 613-636.
- [15] Yang X Y, Jin W. GIS-based spatial regression and prediction of water quality in river networks: A case study in Iowa[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(10): 1943-1951.
- [16] 马倩, 刘俊杰, 高明远. 江苏省入太湖污染量分析(1998 ~ 2007 年)[J]. 湖泊科学, 2010, **22**(1): 29-34.
- [17] Cressie N, Frey J, Harch B, *et al.* Spatial prediction on a river network [J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 2006, **11**(2): 127-150.
- [18] Ganio L M, Torgersen C E, Gresswell R E. A geostatistical approach for describing spatial pattern in stream networks[J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2005, **3**(3): 138-144.
- [19] Gardner B, Sullivan P J, Lembo A J Jr. Predicting stream temperatures: Geostatistical model comparison using alternative distance metrics[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2003, **60**(3): 344-351.
- [20] Money E, Carter G P, Serre M L. Using river distances in the space/time estimation of dissolved oxygen along two impaired river networks in New Jersey [J]. Water Research, 2009, **43**(7): 1948-1958.
- [21] Anselin L. GeoDa 0. 9 User's Guide. 2003, Spatial Analysis Laboratory (SAL) [M]. Department of Agricultural and Consumer Economics, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL.
- [22] Qin B Q, Xu P Z, Wu Q L, *et al.* Environmental issues of Lake Taihu, China[J]. Hydrobiologia, 2007, **581**(1): 3-14.
- [23] Yang X Y, Jiang G M, Luo X Z, *et al.* Preliminary mapping of high-resolution rural population distribution based on imagery from Google Earth: A case study in the Lake Tai basin, eastern China[J]. Applied Geography, 2012, **32**(2): 221-227.
- [24] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, *et al.* Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China [J]. AMBIO: A Journal of the Human Environment, 2004, **33**(6): 300-305.
- [25] Zhao X, Xie Y X, Xiong Z Q, *et al.* Nitrogen fate and environmental consequence in paddy soil under rice-wheat rotation in the Taihu lake region, China [J]. Plant and Soil, 2009, **319**(1-2): 225-234.
- [26] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, *et al.* Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in Taihu Lake Region, China [J]. Pedosphere, 2007, **17**(4): 445-456.
- [27] Chen X M, Wo F, Chen C, *et al.* Seasonal changes in the concentrations of nitrogen and phosphorus in farmland drainage and groundwater of the Taihu Lake region of China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, **169**(1-4): 159-168.
- [28] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, **106**(9): 3041-3046.
- [29] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China - Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2002, **63**(2-3): 117-127.

CONTENTS

CH ₄ Concentrations and the Variation Characteristics at the Four WMO/GAW Background Stations in China	FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, XU Lin, <i>et al.</i> (2917)
Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (2924)
Study on Air Quality and Pollution Meteorology Conditions of Guangzhou During the 2010 Asian Games	LI Ting-yuan, DENG Xue-jiao, FAN Shao-jia, <i>et al.</i> (2932)
Characteristics and Sources of PM ₁₀ -bound PAHs During Haze Period in Winter-Spring of Xiamen	QIAN Ran-ran, YAN Jing-ming, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (2939)
Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split	WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, <i>et al.</i> (2946)
Characteristics of Mercury Pollution in Soil and Atmosphere in Songhua River Upstream Jia-pi-gou Gold Mining Area	ZHANG Gang, WANG Ning, WANG Yuan, <i>et al.</i> (2953)
Pollution Characteristics and Health Assessment of Particulate Mercury in Hebei Rural Households	ZHAO Ya-juan, GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (2960)
Composition and Characteristics of Volatile Organic Chemicals Emission from Printed Circuit Board Factories	MA Ying-ge (2967)
Preliminary Study Concerning Emissions of the Volatile Organic Compounds from Cooking Oils	HE Wan-qing, TIAN Gang, NIE Lei, <i>et al.</i> (2973)
Characteristics of Biofilm Phase During the Long-term Degradation of a Toluene-contaminated Gas Stream Using BTF	HU Jun, ZHENG Jiang-ling, WU Yue-xin, <i>et al.</i> (2979)
Performance of Cross Flow Trickling Filter for H ₂ S Gas Treatment	LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, <i>et al.</i> (2987)
Study on Mercury Re-emissions During Fly Ash Utilization	MENG Yang, WANG Shu-xiao (2993)
Construction of Semi-analytical Model for Inversing Total Suspended Matter in Lake Taihu and Assessment of Its Applicability	LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, <i>et al.</i> (3000)
Association Study Between Water Quality of Chaohu Lake and Resources Input in Agriculture of Basin	ZHANG Yan, GAO Xiang, ZHANG Hong (3009)
Sediment and Pore Water Nutrient Characteristics in Growing Zones of <i>Alternanthera philoxeroides</i> in the Shiwuli River, Chaohu Lake	LI Ru-zhong, LI Feng, ZHOU Ai-jia (3014)
Enrichment Characteristic of Phosphorus in Surface and Core Sediments of Chaohu Lake and the Pollution Quantification	LIU En-feng, DU Chen-chang, YANG Xiang-dong, <i>et al.</i> (3024)
Spatial Distribution Characteristics and Correlation Analysis of Organic Matter, Total Nitrogen and Total Phosphorus in Topsoil Around Chaohu Lake	CHEN Shu-qin, CHU Zhao-sheng, HU She-rong, <i>et al.</i> (3031)
Dynamic Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in the Representative Input Tributaries of Danjiangkou Reservoir	LEI Pei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (3038)
Effects of Thermal Stratification on Spring Blooms in Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	LIU Liu, LIU De-fu, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (3046)
Explore the Spatial and Temporal Patterns of Water Pollution in the Yincungang Canal of the Lake Taihu Basin, China	YANG Xiao-ying, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (3051)
Analysis on the Forms and Release Potential of Nutrients in Sediments from Lakes in the West Jiangsu Province	LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, <i>et al.</i> (3057)
Spatial Distribution and Evaluation of Nitrogen, Phosphorus and Organic Matter in Surface Sediments from Western Lakeside Belt of Lake Taihu	GAN Shu, LU Shao-yong, QIN Pu-feng, <i>et al.</i> (3064)
Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin	LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, <i>et al.</i> (3070)
Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water	HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, <i>et al.</i> (3076)
Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin	WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, <i>et al.</i> (3083)
Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen	SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, <i>et al.</i> (3089)
Distribution Patterns of Heavy Metals in Surficial Sediment and Their Influence on the Environment Quality of the Intertidal Flat of Luoyuan Bay, Fujian Coast	GAO Wen-hua, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (3097)
Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay	CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, <i>et al.</i> (3104)
Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System	WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, <i>et al.</i> (3110)
Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain	LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, <i>et al.</i> (3117)
Nitrate Storage and Transport Within a Typical Karst Aquifer System in the Paralleled Ridge-valley of East Sichuan	YANG Ping-heng, YUAN Dao-xian, REN You-rong, <i>et al.</i> (3124)
Adsorption of Perfluorooctanesulfonate (PFOS) onto Modified Activated Carbons	TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, <i>et al.</i> (3132)
Investigation of the Oxidation Reaction of O ₃ with Bromide Ion in Aqueous Solution	YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, <i>et al.</i> (3139)
Determination of the Distribution of Relative Molecular Mass of Organic Matter by High Pressure Size Exclusion Chromatography with UV and TOC Detectors	ZHANG Han, DONG Bing-zhi (3144)
Black Water Bloom Induced by Different Types of Organic Matters and Forming Mechanisms of Major Odorous Compounds	LU Xin, FENG Zi-yan, SHANG Jing-ge, <i>et al.</i> (3152)
Effect of Fe and Fe/Ni Nanoparticles on the Biodegradation of Phenol by BFN at Different pH Values	KUANG Ye, ZHOU Yan, WANG Qing-ping, <i>et al.</i> (3160)
Pretreatment of High-Concentration Acrylic Acid Wastewater by the Multi-Stage Microaerobic Biological Fluidized Bed Reactor	LI Sha, ZHENG Sheng-zhi, SONG Yu-dong, <i>et al.</i> (3167)
Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor	XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3172)
Dynamic Adsorption of Cadmium (II) in Water on Modified Peanut Shells	LONG Teng, YI Xiao-yun, DANG Zhi (3177)
Adsorption Properties of Thiocyanate Anion on Granular Mg/Al Mixed Oxides	WANG Xiu-juan, WANG Hai-zeng, SUN Bao-wei, <i>et al.</i> (3182)
Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter	LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, <i>et al.</i> (3189)
Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery	ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, <i>et al.</i> (3197)
Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant	YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, <i>et al.</i> (3202)
Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria	LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (3208)
Isolation, Identification and Characterization of an Atrazine Degrading Bacterium	LI Shao-feng, ZHU Jing, LI Tie-jing (3214)
Isolation, Identification and Enzymological Characterization of a New Fungal with High Laccase Production from Agricultural Waste Composting	REN Xiu-juan, FAN Chang-zheng, LU Lun-hui, <i>et al.</i> (3220)
Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash	LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, <i>et al.</i> (3228)
Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste	LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, <i>et al.</i> (3236)
Effect of Covalent Functionalization on DNA Cleavage Activity and ROS Formation of Single-Walled Carbon Nanotubes	WU Ren-ren, TAO Xue-Qin, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3241)
Research on Mercury Methylation by <i>Geobacter sulfurreducens</i> and Its Influencing Factors	ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, <i>et al.</i> (3247)
Uptake Effect of Cd and Pb by Rape Under Single Cd/Pb and Cd-Pb Combined Stress	WU Wen-fei, NAN Zhong-ren, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (3253)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activities	HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, <i>et al.</i> (3261)
Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, <i>et al.</i> (3266)
Research on Anti-Corrosion of <i>Thiobacillus</i> for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash	JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, <i>et al.</i> (3272)
Chlorination Transformation and Volatilization of Heavy Metals in Fly Ash from the Incineration During the Disposal Process with Higher Temperature	LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3279)
Study on Greenhouse Gas Emissions from Urban Waste Disposal System; A Case Study in Xiamen	YU Yang, CUI Sheng-hui, LIN Jian-yi, <i>et al.</i> (3288)
Fate Analysis of NPEOs and Their Metabolites in Municipal Wastewater Plants	LIAN Jing, LIU Jun-xin (3295)

《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9月15日 33卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol.33 No.9 Sep. 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

国内外公开发售