ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

# 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

中国期刊方阵 双奖期刊 中华人民共和国新闻出版总署

环境科学 (HUANJING KEXUE) ENVIRONMENTAL SCIENCE 第33卷 第9期 2012年9月15日

# 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,周凌晞,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$H_2S$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,路凤,杨延钊,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,张娴,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,林岿璇,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控区划不确定性分析 …… 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,胡晓凤(3124)
改性活性炭对水中PFOS的吸附去除研究 …… 童锡臻,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(VOSCs)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)
*Geobacter sulfurreducens* 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)
环境激素氯氰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转化特征 …… 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)

# 南四湖流域种植业面源污染氮磷源解析研究

刘静[1,2],路凤[2],杨延钊[3],徐娜[2],王田妮[2]
(1. 山东大学化学博士后科研流动站,济南 250100; 2. 山东建筑大学市政与环境工程学院,济南 250101; 3. 山东大学化学与化工学院,济南 250100)

**摘要**: 利用田间径流池采集南四湖流域种植业农田地表径流样品,分析其不同形态的氮磷数据,汇总数据得到南四湖流域种植业的氮磷源成分谱; 并在南四湖区 11 条主要入湖河流入湖口处采集水样,测定氮磷含量,利用主成分分析法对南四湖流域种植业面源污染氮磷来源进行了源解析. 结果表明,南四湖流域氮磷种植业面源污染来源有 3 种,3 个主成分累积方差贡献率为 95.275%. 第一类污染途径为降雨淋溶小麦-玉米轮作农田产生的地表径流对河流产生的污染,这种污染的范围广且贡献率较大为 50.220%; 第二类污染途径为降雨淋溶大蒜-玉米轮作农田产生的地表径流流入南四湖入湖河流引起的,影响面也较广,贡献率为 25.119%; 第三类污染途径为自然降雨时,小麦-水稻轮作农田产生的地表径流对河流的污染,贡献率为 19.937%.

**关键词**:南四湖流域; 种植业面源污染; 氮磷; 主成分分析; 源解析
**中图分类号**: X513 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)09-3070-06

# Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin

LIU Jing[1,2], LU Feng[2], YANG Yan-zhao[3], XU Na[2], WANG Tian-ni[2]
(1. Chemical Post-Doctoral Research Center, Shandong University, Ji'nan 250100, China; 2. School of Municipal and Environmental Engineering, Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250101, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250100, China)

**Abstract**: Field runoff pools were used to collect the field surface runoff samples of different cropping systems in Nansi Lake region, and different forms of nitrogen (N) and phosphorus (P) data were analyzed. The source profiles of N and P in different cropping systems were also obtained by summarizing the experimental data measured in the current study. Samples were also collected from the 11 main rivers of Nansi Lake basin and the concentrations of N and P were determined. Principle component analysis (PCA) was applied to obtain cropping non-point pollution sources of N and P. The result showed that three types of N and P contamination sources were apportioned in Nansi Lake basin, explaining 95.275% of the total variance. The first source was from field surface runoff of wheat-maize rotation with a wide pollution range and a larger contribution, and it contributed 50.220% of the total contamination burden; the second type of N and P source was the water runoff pollution from garlic-maize rotation, were 25.119% contribution; the third source was the surface runoff from wheat-rice rotation, and it contributed 19.937%.

**Key words**: Nansi Lake basin; cropping non-point source pollution; nitrogen and phosphorus; principal component analysis (PCA); source apportionment

在全球范围内,农业面源污染正在成为水体污染的主要原因. 在中国水体污染严重的流域,农田、农村畜禽养殖和城乡结合部的生活排污是造成水体氮、磷富营养化的主要原因,其贡献率大大超过来自城市生活污水和工业废水的点源污染[1]. 南四湖是南水北调东线工程的重要调蓄湖泊和输水通道,其水质状况直接影响南水北调水质. 近年来,流域的点源污染已得到有效的控制,面源污染特别是农业面源污染成为南四湖流域治理水体富营养化问题的关键,控制和消除流域污染源是防治污染的根本措施. 因此,分析环境水体中污染物来源是有效控制水环境污染的前提. 目前针对南四湖流域的研究,主要包括南四湖的形成及水环境演变[2]、水污染状况及变化趋势[3]、水环境问题及整治[4]、地质问题[5]、湿地生态[6,7]、表层沉积物[8]、水环境修复[9]等许多方面,但对南四湖流域农业面源污染的来源解析缺乏系统研究.

污染物的源解析方法得到了国内外学者的广泛研究,目前应用于水环境污染物的源解析方法主要有化学质量平衡法[10,11]、主成分分析法[12,13]、因子分析法[14,15]、聚类分析法[16]、判别分析[17]、混合方法[18,19]等. 本研究利用田间径流池采集南四湖流

**收稿日期**: 2011-11-15; **修订日期**: 2011-12-26
**基金项目**: "十一五"科技支撑计划项目(2007BAD87B05)
**作者简介**: 刘静(1969~),女,博士,副教授,主要研究方向为环境监测与分析,E-mail:liujing99@sdu.edu.cn

域农田地表径流样品，采用离子色谱及国家标准方法测定了径流样品中不同形态氮磷含量，运用主成分分析法（PCA 法）对南四湖流域种植业面源污染氮磷进行源解析，以期为南四湖流域氮磷污染的防治和管理提供数据支撑.

## 1　材料与方法

### 1.1　样品的采集

#### 1.1.1　农田地表径流水样采样

南四湖区种植业的主要种植模式是小麦-水稻、小麦-玉米和大蒜-玉米这 3 种轮作模式，每种轮作模式都有试验区，3 种试验区分散地分布在南四湖流域周围（图 1），对于研究种植业农田地表径流对南四湖流域水体氮磷污染的影响具有典型的代表性. 分别在 3 种不同种植模式的试验区，选择地势平坦的田地，划分出试验小区，小区面积为 36 $m^2$，长 12 m，宽 3 m. 试验小区对应一个径流池，用来收集小区径流水，该研究的径流池长为 150 cm、宽 100 cm、深 120 cm，地表以下池深为 100 cm，地表以上高度为 20 cm，试验区径流池装置见图 2. 试验区的施肥均按照当地的常规施肥方式进行，施肥情况见表 1，农田径流先汇入各支流再进入南四湖水体. 每次降雨产流后，及时收集径流水，采集径流水样时，先将径流池内的水搅拌均匀，再用径流水将清洗干净的采样瓶洗涮 3 次，采集 3 个平行水样，每瓶 500 mL 左右，然后滴入浓硫酸 2 ~ 3 滴，水样带回实验室后放入 4℃的冰箱冷藏并编号，以待测定分析. 2009 年 6 月 ~2010 年 6 月期间，在试验区径流池收集径流水 8 次.

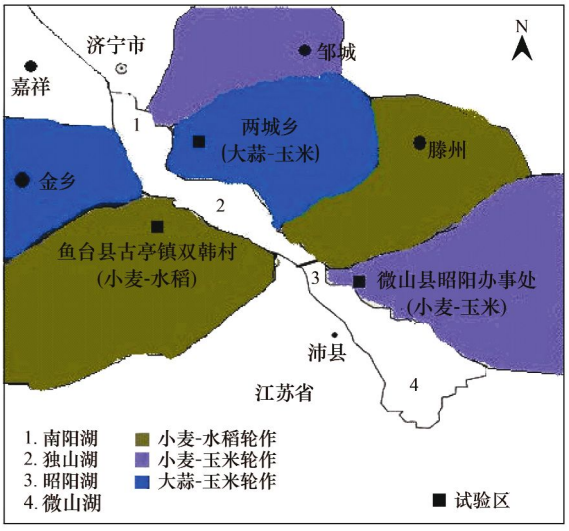


**图 1　不同种植模式试验区**

Fig. 1　Study area of different planting patterns

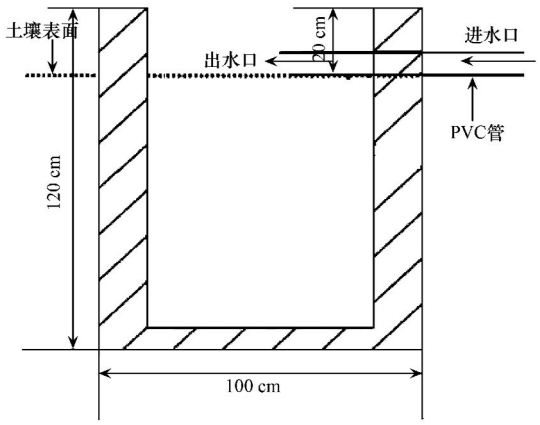


**图 2　研究区径流池装置设计示意**

Fig. 2　Schematic diagram of runoff pond in the study area

**表 1　试验区常规施肥量及肥料种类**

Table 1　Amount of conventional fertilization in the study area

| 项目 | | 小麦-水稻 | 小麦-玉米 | 大蒜-玉米 |
|---|---|---|---|---|
| 施肥量 | $N/kg\cdot hm^{-2}$ | 315 | 345 | 362 |
| | $P_2O_5/kg\cdot hm^{-2}$ | 81 | 11.5 | 23.1 |
| | $K_2O/kg\cdot hm^{-2}$ | 36 | 0 | 65.8 |
| 肥料种类 | | 氮肥为尿素<br>磷肥为重钙<br>钾肥是氯化钾 | 氮肥为尿素<br>磷肥为重钙<br>不施用钾肥 | 氮肥为尿素<br>磷肥为磷酸铵<br>钾肥为硫酸钾 |

#### 1.1.2　南四湖主要入湖河流水样采集

南四湖流域汇水面积较大的河流主要有光府河、泗河、新白马河、新薛河、城郭河、梁济运河、洙赵新河、万福河、东鱼河、复新河、大沙河 11 条，入湖河流监测点位置均设置在各河流的入湖口处，于入湖口处水面下 0.5 m 处用容器直接采样. 南四湖区主要入湖河流采样点布设如图 3 所示.

### 1.2　试验材料和方法

$NO_3^-$、$PO_4^{3-}$ 标准储备溶液（1 000 $mg\cdot L^{-1}$，购自

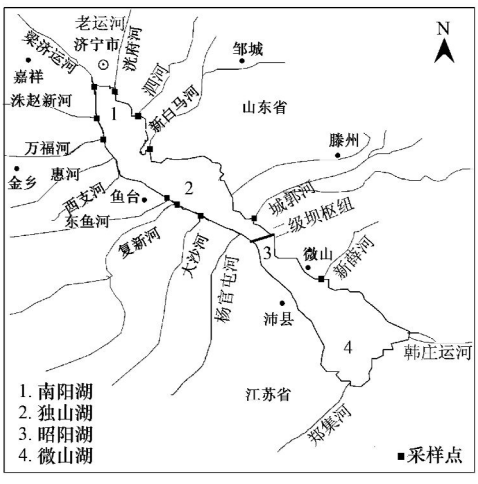


**图 3　南四湖区监测点位分布示意**

Fig. 3　Location of sampling sites in Nansi Lake basin

国家标准物质研究中心,北京);无氨水(每 L 水中加入 1 mL 浓硫酸,蒸馏制得)或用新制备的去离子水、氢氧化钠、过硫酸钾、盐酸(1 +9)、硝酸钾、三氯甲烷、碘化钾、碘化汞、酒石酸钾钠、氯化铵、过硫酸钾、硫酸(1 +1)、抗坏血酸、钼酸铵、酒石酸锑氧钾、磷酸二氢钾;焦磷酸钠标准储备液(2 $g\cdot L^{-1}$,SIGMA);三聚磷酸钠标准储备液(2 $g\cdot L^{-1}$,SIGMA);三偏磷酸钠标准储备液(1 $g\cdot L^{-1}$,SIGMA);三氟乙酸(20%,天津市科密欧化学试剂有限公司).

测定径流水中总氮、硝态氮、铵态氮、总磷、可溶磷和磷酸根,方法参照文献[20],采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB 11894-89)测定总氮(TN),纳氏试剂分光光度法(HJ 535-2009)测定铵态氮($NH_4^+$-N),离子色谱法(U. S. EPA METHOD 300.1)测定硝态氮($NO_3^-$-N)和磷酸根($PO_4^{3-}$-P),钼锑抗分光光度法(GB 11893-89)测定总磷(TP),过硫酸钾氧化-钼蓝比色法(GB 11893-89)测定可溶磷(DP).

### 1.3 质量保证和质量控制

在色谱条件相同的情况下,采用标准样品和实际样品的平行方法,对每一样品重复测定 10 次,用相对标准偏差检验方法的精密度;在样品分析过程中,分别以 $NO_3^-$、$NH_4^+$、$PO_4^{3-}$ 标准溶液为加标样品,对相应环境水样进行加标回收试验,每个样均做 3 个平行样,计算几种被测阴离子的回收率来检验方法的准确度;采用方法空白和空白加标试验检验从制样到样品分析测定的整个分析过程的污染程度;确保分析结果符合方法所要求的质量保证参数. 通过对标准样品溶液和加标空白的多次测定,计算出仪器检测限和方法检出限,确定良好的线性范围.

## 2 结果与讨论

### 2.1 水样中氮磷含量

#### 2.1.1 径流水样中氮磷含量

南四湖流域种植业 3 种不同种植模式下,农田地表径流水样中不同形态氮磷的平均浓度见表 2. 从中可见,3 种不同轮作模式下,农田地表径流水样中不同形态氮磷浓度相差较大,其总量范围为 7.69 ~25.31 $mg\cdot L^{-1}$.

#### 2.1.2 主要入湖河流中氮磷含量

南四湖区 11 条主要入湖河流水样中氮磷浓度见表 3. 从中可见,各入湖河流的氮磷浓度差别较大,这主要与各河流的纳污情况有关,其中,光府河、城郭河、东鱼河主要功能是纳污、行洪,污染非常严重;梁济运河、泗河主要用于灌溉、航运,污染相对较轻.

**表 2 农田径流水样中氮磷平均浓度/$mg\cdot L^{-1}$**

Table 2 Average concentration of N and P in the field runoff/$mg\cdot L^{-1}$

| 项目 | 小麦-水稻 | 小麦-玉米 | 大蒜-玉米 |
|---|---|---|---|
| TN | 4.33 | 10.54 | 11.37 |
| $NO_3^-$-N | 1.81 | 5.81 | 6.24 |
| $NH_4^+$-N | 0.76 | 3.93 | 3.54 |
| TP | 0.287 | 0.158 | 0.225 |
| DP | 0.205 | 0.089 | 0.143 |
| $PO_4^{3-}$-P | 0.155 | 0.059 | 0.115 |
| 总量 | 7.69 | 16.36 | 25.31 |

**表 3 南四湖区主要入湖河流水样中氮磷平均浓度/$mg\cdot L^{-1}$**

Table 3 Average concentration of N and P in the main rivers of Nansi Lake/$mg\cdot L^{-1}$

| 采样点 | TN | $NO_3^-$-N | $NH_4^+$-N | TP | DP | $PO_4^{3-}$-P |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 光府河 | 21.48 | 14.92 | 4.69 | 1.19 | 0.666 | 0.443 |
| 泗河 | 5.89 | 3.22 | 1.98 | 0.282 | 0.177 | 0.145 |
| 新白马河 | 7.64 | 4.14 | 2.64 | 0.254 | 0.158 | 0.129 |
| 新薛河 | 8.48 | 2.84 | 1.83 | 0.592 | 0.333 | 0.219 |
| 城郭河 | 14.61 | 10.10 | 3.22 | 0.247 | 0.139 | 0.093 |
| 梁济运河 | 4.11 | 3.69 | 0.64 | 0.337 | 0.232 | 0.158 |
| 洙赵新河 | 6.77 | 3.71 | 2.09 | 0.260 | 0.165 | 0.132 |
| 万福河 | 5.13 | 2.77 | 1.75 | 0.602 | 0.384 | 0.307 |
| 东鱼河 | 12.94 | 5.78 | 2.28 | 0.361 | 0.256 | 0.194 |
| 复新河 | 11.34 | 5.16 | 2.06 | 0.443 | 0.316 | 0.239 |
| 大沙河 | 12.76 | 5.75 | 2.26 | 0.397 | 0.284 | 0.215 |

### 2.2 源解析

#### 2.2.1 主成分分析法

本研究采用主成分分析法定量解析南四湖流域种植业面源污染氮磷的来源. 主成分分析法是一种降维的统计方法,它借助于一个正交变换,将其分量相关的原随机向量转化成其分量不相关的新随机向量,这在代数上表现为将原随机向量的协方差阵变换成对角形阵,在几何上表现为将原坐标系变换成新的正交坐标系,使之指向样本点散布最开的 P 个正交方向,然后对多维变量系统进行降维处理,使之能以一个较高的精度转换成低维变量系统,再通过构造适当的价值函数,进一步把低维系统转化成一维系统. 主成分的提取方法一般有 2 种:特征值 >1 或累计方差贡献率 >0.85,本研究选用累计贡献率 >0.85 的方法.

本研究的数据处理采用数理统计分析软件 PASW Statistics 18.0.

#### 2.2.2 特征值

采用 PASW Statistics 18.0 软件，进行主成分分析，为了使具有较大因子载荷量的变量个数减到最低限度，采用方差最大的正交旋转. 经主成分降维分析，得到成分特征曲线和方差分析结果，分别见图 4、表 4.

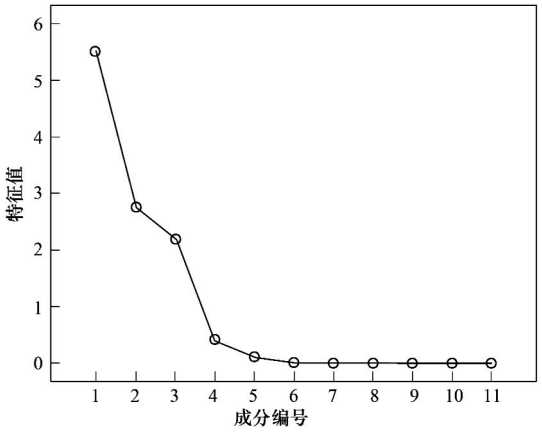


**图 4　特征值曲线**

Fig. 4　Plot of eigenvalues

**表 4　方差分析结果**

Table 4　Results of eigenvalues analysis

| 主成分 | 特征值 | 方差贡献率/% | 累积方差贡献率/% |
|---|---|---|---|
| 1 | 5.524 | 50.220 | 50.220 |
| 2 | 2.763 | 25.119 | 75.339 |
| 3 | 2.193 | 19.937 | 95.275 |

可以看出，根据提取主成分的要求，可以提取出 3 个主成分，即影响南四湖流域氮磷污染的主要农业面源成分有 3 个，也就是说有 3 种农业面源污染的化学过程途径可以说明该地区的污染成因. 它们对研究区污染的贡献率分别为：50.220%、25.119% 和 19.937%. 得到的 3 个主成分可以概括原始变量所包含信息的 95.275% 以上，对于其他成分的方差贡献率可以忽略. 结合表 6，$NH_4^+$-N在主成分 1 上得分较高，可以认为主成分 1 是氨氮污染物；对于主成分 2，TN 得分较高，认为主成分 2 是氮营养盐污染物；DP、$PO_4^{3-}$-P在主成分 3 上得分较高，因此认为主成分 3 是磷营养盐污染物.

**2.2.3**　主成分特征分析

采用主成分提取方法，采用具有 Kaiser 标准化的正交旋转法旋转得到的主成分载荷列于表 5 和图 5，根据表 5 数据，可以写出每个原始变量（标准化值）的因子表达式：

$$X(m,\ \text{泗河}) \approx 0.156\ F1 + 0.924\ F2 - 0.271\ F3$$

$$X(m,\ \text{新白马河}) \approx -0.636\ F1 + 0.763\ F2 - 0.076\ F3$$

……

式中，$X(m,\ n)$是组分 $m$ 在样品 $n$ 的浓度标准化值；主成分 $F(s,n)$前的系数为变量在主成分上的载荷，表示该主成分对变量的影响程度.

**表 5　主成分载荷**

Table 5　Principle component matrix loading

| 采样点 | 主成分 | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| 泗河 | 0.156 | 0.924 | −0.271 |
| 新白马河 | −0.636 | 0.763 | −0.076 |
| 光府河 | 0.973 | 0.030 | −0.207 |
| 城郭河 | −0.986 | −0.010 | 0.101 |
| 新薛河 | 0.700 | −0.570 | −0.399 |
| 梁济运河 | 0.758 | −0.561 | −0.188 |
| 洙赵新河 | −0.071 | 0.825 | −0.051 |
| 万福河 | 0.157 | −0.839 | −0.505 |
| 东鱼河 | −0.505 | 0.005 | 0.860 |
| 复新河 | 0.677 | −0.071 | 0.732 |
| 大沙河 | −0.150 | −0.043 | 0.987 |

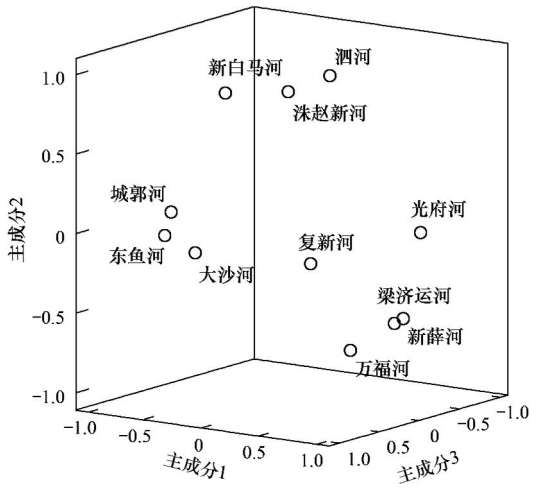


**图 5　主成分载荷空间成分**

Fig. 5　Space plot of principle component loading

主成分载荷数据（表 5 和图 5）表明：光府河、城郭河、新薛河、梁济运河在第 1 主成分上聚类，泗河、新白马河、洙赵新河、万福河在第 2 主成分上聚类，东鱼河、复新河、大沙河在第 3 主成分上聚类. 这说明，南四湖地区有 3 个重要且影响面较广的农业污染面源，在第 1 主成分上聚类的采样点分布在南四湖地区小麦-玉米轮作模式分布广泛的区域，所以认定第 1 类污染途径为小麦-玉米轮作降雨淋溶农田产生的地表径流对河流产生的污染；泗河、新白马河、洙赵新河、万福河采样点分布在南四湖地区大蒜-玉米轮作模式分布广泛的区域，所以认为第 2 类污染途径主要为降雨时大蒜-玉米轮作农田产生的地表径流对河流产生的污染；第 3 主成

分上聚类的东鱼河、复新河、大沙河采样点分布在南四湖地区小麦-水稻轮作模式分布广泛的区域,河流水质受种植业中小麦-水稻轮作模式的污染影响较大.

马喜君等[21]将主成分分析运用于盐城自然保护区近海海域的水质污染分析,分析结果认为,氮磷污染占的比重最大,方差贡献率最大,总体上属于面源污染类型,主要是陆源排放,其次是以 TOC、苯酚为主的化学污染,主要来源于当地的化学工业排放源. 马溪平等[22]利用主成分分析法对辽河流域主要干流水体中污染物进行来源解析,结果表明,辽河流域典型污染物有 3 种,第 1 主成分为耗氧有机污染物,贡献率最大达 56.851%,主要排放源为造纸废水和畜牧业废水,与本研究结果不同. 国外学者在这方面研究也很多,Kazi 等[23]将主成分分析和类聚分析应用于 Manchar Lake 水质评价. Razmkhah 等[24]对 Jajrood River 的研究表明,有 5 个主成分影响河流水质,主成分 1 与 EC、TDS、Ca、Cl、Na、K 对应,是无机物污染,贡献率最大; 主成分 2、3、4 主要是人类活动造成的污染和矿物污染. 由于地域等方面的不同,研究结果存在差别.

**2.2.4** 主成分组成分析

统计分析所计算的主成分得分结果列于表 6. 利用主成分得分来研究所得的主成分的主要组成,从而可阐明污染物样品中的各种污染源的类别.

**表 6 主成分得分**

Table 6 Component scores of samples

| 变量 | 主成分 1 | 主成分 2 | 主成分 3 |
|---|---|---|---|
| TN | -0.230 00 | 1.712 62 | -0.702 24 |
| $NO_3^-$-N | -1.038 68 | -0.548 45 | -1.189 72 |
| $NH_4^+$-N | 1.768 28 | -0.658 62 | -0.748 92 |
| TP | -0.813 86 | -1.047 51 | 0.513 19 |
| DP | 0.035 30 | 0.060 99 | 1.021 21 |
| $PO_4^{3-}$-P | 0.278 96 | 0.480 98 | 1.106 48 |

对于主成分 1,$NH_4^+$-N取值较大( >0.9),其余成分取值不大,这与小麦-玉米轮作农田径流水中$NH_4^+$-N含量较高的特征相符合,再次证明了主成分 1 与小麦-玉米轮作污染来源有直接关系. 对于主成分 2,TN 取值较大( >0.9),其余成分取值不大,从污染源成分谱中可以看出,3 种不同轮作模式下,大蒜-玉米轮作农田径流水中 TN 含量最高,因此主成分 2 与大蒜-玉米轮作污染来源有关. 主成分 3 中,DP、$PO_4^{3-}$-P取值较大( >0.9),其余成分取值不大,这与小麦-水稻轮作农田径流水中 DP、$PO_4^{3-}$-P含量较高的特征相对应,因此可以认为,南四湖流域水体中主成分 3 的污染是由小麦-水稻轮作农田径流水流入入湖河流造成的.

Su 等[25]利用主成分分析等其他多元统计方法解析了钱塘江污染物来源,研究得到,钱塘江水体污染主要有 3 种污染类型,TP、$NH_4^+$-N、高锰酸盐指数、$BOD_5$、DO 在第 1 污染类型中载荷较高. 而主成分分析认为影响淮河干流水质的主要因子为$NH_4^+$-N、高锰酸盐指数、$BOD_5$、挥发酚以及 $Hg^{2+}$、$Pb^{2+}$等重金属离子[26]; 柴超等[27]分析了长江口水域富营养化特性,主成分分析表明,主成分 1 在$NH_4^+$-N、TN 等方面有较高的载荷,主成分 3 在 TP、$PO_4^{3-}$-P上有较高的载荷,这与本研究结论相似.

## 3 结论

(1)主成分特征分析表明: 南四湖流域有 3 个影响面较广的农业面源污染源,这 3 种面源污染的污染途径不同,第一类污染途径为降雨淋溶小麦-玉米轮作农田产生的地表径流对河流产生的污染,这种污染的范围广且贡献率较大为 50.220%; 第二类污染的途径为降雨淋溶大蒜-玉米轮作农田产生的地表径流流入南四湖入湖河流引起的,影响面也较广,贡献率为 25.119%; 第三类污染污染途径为自然降雨时,小麦-水稻轮作农田产生的地表径流对河流的污染,贡献率为 19.937%.

(2)南四湖流域的面源污染主要是由小麦-玉米轮作模式下,降雨农田地表径流造成的,主要成分与农田径流水中$NH_4^+$-N相对应; 另外 2 个面源污染的成分也不同,其中之一主要成分与大蒜-玉米轮作农田径流水中 TN 含量最高的特征相符合; 另一种污染源的主要成分与小麦-水稻轮作农田径流水中 DP、$PO_4^{3-}$-P含量较高的特征相对应.

**参考文献:**


[1] 张维理, 武淑霞, 冀宏杰, 等. 中国农业面源污染形势估计及控制对策 I. 21 世纪初期中国农业面源污染的形势估计[J]. 中国农业科学, 2004, **37**(7): 1008-1017.

[2] 张祖陆, 沈洁, 孙庆义, 等. 南四湖的形成及水环境演变[J]. 海洋与湖沼, 2002, **33**(3): 314-321.

[3] 武周虎, 慕金波, 谢刚, 等. 南四湖及入出湖河流水环境质量变化趋势分析[J]. 环境科学研究, 2010, **23**(9): 1167-1173.

[4] 路洪海, 陈诗越. 南水北调山东段湖泊水环境问题及整治对策[J]. 安徽农业科学, 2011, **39**(4): 2206-2208.

[5] 鲁孟胜, 韩宝平, 吴恩江, 等. 南四湖流域环境地质问题及其治理对策[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2003, **22**(2): 41-44.

[6] 彭艳红，靖玉明，刘道行，等. 南四湖新薛河湖滨带湿地修复效果评价[J]. 中国人口·资源与环境，2010，**20**(1)：134-137.

[7] 古小治，张雷，柏祥，等. 南四湖湿地沉积物及孔隙水基本特性研究[J]. 环境科学，2010，**31**(4)：939-945.

[8] 刘恩峰，沈吉，杨丽原，等. 南四湖及主要入湖河流表层沉积物重金属形态组成及污染研究[J]. 环境科学，2007，**28**(6)：1377-1383.

[9] 陈磊，裴海燕，解军. 改善南四湖水质的关键问题分析[J]. 中国给水排水，2007，**23**(20)：6-10.

[10] 杨俊鹏，孟凡雪，李亚繁，等. 辽河双台子河口淤泥质沉积物来源探析[J]. 世界地质，2011，**30**(1)：46-50.

[11] Li A，Jang J K，Scheff P A. Application of EPA CMB8. 2 model for source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet，Chicago[J]. Environmental Science and Technology，2003，**37**(13)：2958-2965.

[12] Mandal U K，Warrington D N，Bhardwaj A K，*et al*. Evaluating impact of irrigation water quality on a calcareous clay soil using principal component analysis[J]. Geoderma，2008，**144**(1-2)：189-197

[13] Shrestha S，Kazama F. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques：A case study of the Fuji river basin，Japan[J]. Environmental Modelling & Software，2007，**22**(4)：464-475.

[14] Huang F，Wang X Q，Lou L P，*et al*. Spatial variation and source apportionment of water pollution in Qiantang River (China) using statistical techniques[J]. Water Research，2010，**44**(5)：1562-1572.

[15] Christensen E R，Arora S. Source apportionment of PAHs in sediments using factor analysis by time records：application to Lake Michigan，USA[J]. Water Research，2007，**41**(1)：168-176.

[16] Hussain M，Ahmed S M，Abderrahman W. Cluster analysis and quality assessment of logged water at an irrigation project，eastern Saudi Arabia[J]. Journal of Environmental Management，2008，**86**(1)：297-307.

[17] Spencer P G M，Baker A，Ahad J M E，*et al*. Discriminatory classification of natural and anthropogenic waters in two U. K. estuaries[J]. Science of the Total Environment，2007，**373**(1)：305-323.

[18] Zushi Y，Masunaga S. GIS-based source identification and apportionment of diffuse water pollution：Perfluorinated compound pollution in the Tokyo Bay basin[J]. Chemosphere，2011，**85**(8)：1340-1346.

[19] Pekey H，Karakaş D，Bakoglu M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses[J]. Marine Pollution Bulletin，2004，**49**(9-10)：809-818.

[20] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 北京：中国环境科学出版社，2002.

[21] 马喜君，陆兆华，姚文俊. 基于SPSS的盐城自然保护区近海海域水质污染状况的分析[J]. 环境科学与管理，2007，**32**(7)：35-38.

[22] 马溪平，吕晓飞，张利红，等. 辽河流域水质现状评价及其污染源解析[J]. 水资源保护，2011，**27**(4)：1-4，73.

[23] Kazi T G，Arain M B，Jamali M K，*et al*. Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques：A case study[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety，2009，**72**(2)：301-309.

[24] Razmkhah H，Abrishamchi A，Torkian A. Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques：A case study on Jajrood River (Tehran，Iran)[J]. Journal of Environmental Management，2010，**91**(4)：852-860.

[25] Su S L，Zhi J J，Lou L P，*et al*. Spatio-temporal patterns and source apportionment of pollution in Qiantang River (China) using neural-based modeling and multivariate statistical techniques[J]. Physics and Chemistry of the Earth，Parts A/B/C，2011，**36**(9-11)：379-386.

[26] 张雷. 主成分分析法和模糊综合分析法在水质评价中的实例比较[J]. 环境科学与管理，2011，**36**(8)：178-181.

[27] 柴超，余志明，宋秀贤，等. 长江口水域富营养化特性的探索性数据分析[J]. 环境科学，2007，**28**(1)：53-58.

# HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 9

Sep. 15, 2012


## 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, *et al.* (2917)

Characteristics of Stable Isotopes in Precipitation over Northeast China and Its Water Vapor Sources ····· LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, MA Qian, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2939)

Improvement and Application of the Method for Determination of OCEC Split ····· WANG Li-hua, DONG Hua-bin, YAN Cai-qing, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2979)

Performance of Cross Flow Trickling Filter for $H_2S$ Gas Treatment ····· LIU Chun-jing, LI Jian, LIU Jia, *et al.* (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 Chaohu and Assessment of Its Applicability ··· LIU Zhong-hua, LI Yun-mei, TAN Jing, *et al.* (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 *Alternanthera philoxeroides* 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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3064)

Source Apportionment of Nitrogen and Phosphorus from Cropping Non-point Source Pollution in Nansi Lake Basin ····· LIU Jing, LU Feng, YANG Yan-zhao, *et al.* (3070)

Relationship Between Dissolved Organic Carbon and DBP in the Pearl River Water ····· HE Hong-wei, ZHOU Da-cheng, WANG Bao-qiang, *et al.* (3076)

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Township Water Sources in Dongjiang River Basin ····· WANG Ruo-shi, XU Qiu-jin, ZHANG Xian, *et al.* (3083)

Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Sediments of Maozhou River, Shenzhen ····· SUN Jian-lin, NI Hong-gang, DING Chao, *et al.* (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, *et al.* (3097)

Study on the Changes of Macrobenthos Communities and Their Causes in Bohai Bay ····· CAI Wen-qian, LIU Lu-san, QIAO Fei, *et al.* (3104)

Construction of Groundwater Contamination Prevention Mapping System ····· WANG Jun-jie, HE Jiang-tao, LU Yan, *et al.* (3110)

Uncertainty Analysis of Groundwater Protection and Control Zoning in Beijing Plain ····· LU Yan, HE Jiang-tao, WANG Jun-jie, *et al.* (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, *et al.* (3124)

Adsorption of Perfluorooctanesulfonate(PFOS) onto Modified Activated Carbons ····· TONG Xi-zhen, SHI Bao-you, XIE Yue, *et al.* (3132)

Investigation of the Oxidation Reaction of $O_3$ with Bromide Ion in Aqueous Solution ····· YU Xiao-ting, ZHANG Jia-hui, PAN Xun-xi, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (3167)

Denitrification on Secondary Effluent of Acrylic Fiber Wastewater by Tri-Stage Biofilm Advanced Reactor ····· XU Shao-yang, JIANG Jin-yuan, ZHOU Yue-xi, *et al.* (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, *et al.* (3182)

Model of Regularity of Ammonia Transformation Along Marine Biological Aerated Filter ····· LUO Rong-qiang, HOU Sha-sha, SHEN Jia-zheng, *et al.* (3189)

Aerobic Granular Sludge Bulking Due to the Lack of Nutrient and Its Recovery ····· ZHANG Zhu, GAO Da-wen, YUAN Xiang-juan, *et al.* (3197)

Enhanced Hydrolysis of Waste Activated Sludge by Biosurfactant ····· YI Xin, LUO Kun, YANG Qi, *et al.* (3202)

Enrichment and Identification of Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria ····· LIU Dong-ying, QIU Yan-ling, YUAN Xian-zheng, *et al.* (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, *et al.* (3220)

Screening and Identification of Microorganisms for Decolorization of Molasses Spent Wash ····· LI Bi-jin, LIU You-yan, HE Kai, *et al.* (3228)

Analysis of Microbial Community Structure in Lactic Acid Fermentation from Kitchen Waste ····· LIU Jian-guo, WANG Qun-hui, WANG Shuang, *et al.* (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, *et al.* (3241)

Research on Mercury Methylation by *Geobacter sulfurreducens* and Its Influencing Factors ····· ZOU Yan, SI You-bin, YAN Xue, *et al.* (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, *et al.* (3253)

Distribution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Farming Domestic Muscovy Duck Originated from Au/Cu Mining and Smelting Activites ····· HANG Xiao-shuai, LIANG Bin, WANG Wen-lin, *et al.* (3261)

Effects of the Environmental Hormone Cypermethrin on the Reproduction of *Brachionus calyciflorus* ····· DONG Xue-xing, YANG Jia-xin, LÜ Lin-lan, *et al.* (3266)

Research on Anti-Corrosion of *Thiobacillus* for the Geopolymer Solidification MSWI Fly Ash ····· JIN Man-tong, SUN Xin, DONG Hai-li, *et al.* (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, *et al.* (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）<br>北京市环境保护科学研究院<br>清 华 大 学 环 境 学 院 | **Co-Sponsored** by | Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection<br>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<br>北京市 2871 信箱（海淀区双清路 18 号，邮政编码：100085）<br>电话：010-62941102，010-62849343<br>传真：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn | **Edited** by | The Editorial Board of Environmental Science（HUANJING KEXUE）<br>P. O. Box 2871, Beijing 100085, China<br>Tel：010-62941102, 010-62849343；Fax：010-62849343<br>E-mail：hjkx@ rcees. ac. cn<br>http://www. hjkx. ac. cn |
| 出　　版 | 科 学 出 版 社<br>北京东黄城根北街 16 号<br>邮政编码：100717 | **Published** by | Science Press<br>16 Donghuangchenggen North Street,<br>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<br>电话：010-64017032<br>E-mail：journal@ mail. sciencep. com | **Distributed** by | Science Press<br>Tel：010-64017032<br>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<br>（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