

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征

贡丹燕^{1,2}, 潘杨^{1,2*}, 黄勇¹, 包伟^{1,2}, 李倩倩^{1,2}

(1. 苏州科技学院环境生物技术研究所, 江苏省环境科学与工程重点实验室, 苏州 215011; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 苏州 215011)

摘要: 悬浮颗粒物粒度分布特征反映城市景观水体表观污染状况, 为研究富营养化城市景观水体表观污染与悬浮颗粒物粒度分布的内在联系及其影响因素, 在苏州市市内的典型富营养化河道: 枫津河, 选取 5 个代表性取样点, 测定水中悬浮颗粒物粒度分布、表观污染指数 (SPI) 及水质指标, 并分析其相关性。结果表明, 富营养型水体中悬浮颗粒物具有相似的粒度分布特征, 粒度分布存在多峰, 且出峰位置大致相同, 悬浮颗粒物的粒度分布由多个组分叠加构成。悬浮颗粒物粒度分布最多可分为 6 个组分, 各组分粒径范围分别为 $<1.5\ \mu\text{m}$ 、 $1.5\sim8\ \mu\text{m}$ 、 $8\sim35\ \mu\text{m}$ 、 $35\sim186\ \mu\text{m}$ 、 $186\sim516\ \mu\text{m}$ 、 $>516\ \mu\text{m}$ 。组分 III 是优势组分 (体积分数均值 $38.3\%\sim43.2\%$)。组分 III 体积分数与 SPI 值、Chl-a 浓度呈显著正相关, 组分 III 体积分数的增大是该类水体表观污染程度加深的粒度结果表征, 该组分体积分数的增大主要来自于藻含量增加; 组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数在有外源时明显高于无外源时, 无外源时组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数与 SPI 值显著负相关, 有外源时组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数与 SPI 值存在较弱的正相关但未达到显著水平。环境因子 (F_v/F_m 和 DO) 和外源因子作用水体主要表观污染物质藻类的含量, 进而影响悬浮颗粒物各组分的体积分数和水质表观质量; 水动力条件作用悬浮颗粒物粒径, 较大水动力使中值粒径增大, 对水质表观质量未产生显著影响。

关键词: 城市景观水体; 表观污染; 悬浮颗粒物; 粒度; 多组分; 影响因素

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0970-10 DOI: 10.13227/j.hjks.2016.03.023

Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body

GONG Dan-yan^{1,2}, PAN Yang^{1,2*}, HUANG Yong¹, BAO Wei^{1,2}, LI Qian-qian^{1,2}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China)

Abstract: Grain size distribution characteristics of suspended particulate matter (SPM) reflects the apparent polluted condition of the urban landscape water. In order to explore the internal relationship between the eutrophication of urban landscape water's apparent pollution and grain size distribution of SPM, and its influencing factors, this paper selected five representative sampling sites in Feng Jin River which is a typical eutrophication river in Suzhou City, measured the grain size distribution of SPM, sensation pollution index (SPI) and water quality index, and analyzed their correlation. The results showed that: The rich nutrient water possessed a similar characteristics in grain size distribution. The grain size distribution of SPM in water was multimodal, and the peak position was roughly the same; the grain size distribution of SPM was composed by multiple components. It could be roughly divided into six parts with the particle size range of every group being $<1.5\ \mu\text{m}$, $1.5\sim8\ \mu\text{m}$, $8\sim35\ \mu\text{m}$, $35\sim186\ \mu\text{m}$, $186\sim516\ \mu\text{m}$, $>516\ \mu\text{m}$. The component III was superior (with an average volume fraction of $38.3\%\sim43.2\%$), and its volume fraction had a significant positive relation with the SPI value and the Chl-a content. The increase of component III volume fraction was the reflection of particle size's result of increasing SPI value. The increase of component III volume fraction was mainly derived from the increasing algal content. The volume fraction of group IV + group VI + group V was significantly higher under the condition of exogenous enter. When there was no exogenous component, the volume fraction of group IV + group VI + group V had a significant negative correlation with SPI value; when there were exogenous components, the volume fraction of group IV + group VI + group V had a weak positive correlation with SPI value, but the correlation did not reach a significant level. Environmental factors (F_v/F_m and DO) and exogenous factors had an influence by functioning on the algal content which signified the polluted material, and then affected the volume fraction of particle

收稿日期: 2015-08-03; 修订日期: 2015-10-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50938005)

作者简介: 贡丹燕 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地表水体表观污染, E-mail: gongdanyan900201@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: panyang@mail.usts.edu.cn

size's components and the quality of apparent water. Hydrodynamic conditions mainly had a certain influence on the median particle size, and had no effect on the apparent polluted condition of water.

Key words: urban landscape water; apparent pollution; suspended particulate matter; grain size; multicomponent; impact factors

城市景观水体是指城市中具有景观功能的水体,包括城市中的河道、湖泊、公园水体等^[1,2]。作为景观功能水体,良好的表现应是其具有的最基本特性^[3],然而,水体表观恶化,颜色异常、藻类疯长乃至藻华现象在城市中屡见不鲜。富营养化亦是最常见的城市水体表观污染类型,根据国家环境保护总局 2013 年发布的资料,我国 75% 的湖泊出现了不同程度的富营养化^[4]。

国内外研究表明悬浮颗粒物是引起水体表观污染最主要原因^[5~7],它是水体的重要组成部分,主要指呈悬浮状态的颗粒物的总称,包括各种矿物碎屑颗粒、微体浮游生物及生物残骸、有机胶膜和一些有机、无机物聚集成絮凝体等^[8~12]。水中悬浮颗粒物的物质组分和含量决定着水体表观污染的种类和程度^[6]。粒度分布是水体悬浮颗粒物的重要性质之一,粒度分布特征包含悬浮颗粒物的组分信息和含量信息^[13],因而,悬浮颗粒物的粒度分布特征反映水体表观污染状况。

针对水中悬浮颗粒物粒度特征研究已涉及湖泊、港湾、海口等不同生境,研究集中在利用粒度级别分类、含量组成以及粒度参数来揭示水体物质成分、水动力环境及污染物迁移转化机制^[12,14~18]。前人对粒度特征的分析更多是基于混合全样粒度参数,富营养化城市景观水体中悬浮颗粒物表现出多组分粒度分布特征,因而有必要对此类水体中悬浮颗粒物粒度组分进行分离,并充分利用各个组分粒度参数信息。本研究从富营养型景观水体入手,以苏州市河道水为对象,系统分析不同程度表观污染下悬浮颗粒物多组分粒度分布特征,结合水体表观质量和悬浮颗粒物粒度分布的影响因素,探讨此类水体的表观污染粒度特征及表观污染机制。加深对悬浮颗粒物作用水体表观污染的认识,对于解析水体表观污染历程以及城市水体污染治理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 采样点分布

本次研究以苏州城区内若干富营养型缓流水体为研究对象,研究区域是苏州科技学院江枫校区,在研究区域内共设 5 个采样点(北门桥、东门桥、孺子桥、问钟桥、望师桥),按照采样点特性分为 3

类,采样点分类及具体位置见图 1。研究区域内每条河道有效水深均低于 3 m,只采集表层(距水面 0.5 m)水样;实验期间内水体呈深绿色,按照水体富营养化评价标准^[19],水体富营养化程度介于中度富营养化和重度营养化之间,样品点详细描述见表 1。从 2015 年 3~7 月对 5 个采样点水样进行持续监测,共 120 组数据。



图 1 苏州科技学院江枫校区采样点分布示意

Fig. 1 Map of Suzhou University of Science and Technology (Jangfeng Campus) and distribution of sampling sites

1.2 测定方法

水体表观污染的表征采用吸收光谱法^[20]:该法用表观污染指数 (sensation pollution index, SPI) 方程(1) 计算出可反映表观污染程度的 SPI 值,根据 SPI 值将表观污染分为清洁(0~10)、微污染(10~25)、轻污染(25~45)、中污染(45~70)以及重污染(>70)共 5 个表观污染等级。

$$SPI = a \cdot \ln(\beta x) - b \quad (1)$$

式中, SPI 为表观污染指数; a, b 为常数; β 为修正系数; x 为水样抽滤前后扫描曲线面积差。

水质指标测定采用国标法^[21],总磷(TP)采用过硫酸钾消解钼酸铵分光光度法(HACH DR2800),总有机碳(TOC)和总氮(TN)采用 Multi3100N/C 测量,叶绿素 a(Chl-a)和最大光化学效率(F_v/F_m)采用荧光法(water pam, 叶绿素荧光测定仪)测定,浊度采用 HACH2100N 浊度仪,水温及溶解氧(DO)采用 YSI 便携式溶氧仪。

悬浮颗粒物的粒度测量采用的是英国马尔文公司生产的 Malvern3000 激光粒度分析仪,该仪器测量

是基于不同粒径颗粒物对激光束的散射角度不同,并运用 Mie 和 Fraunhofer 散射理论,从数学上反推散射数据而获得颗粒物 0.01 ~ 3 500 μm 范围内共

100(用户可调)个粒级的体积分数分布^[22]. 该仪器用于水体中悬浮颗粒物测量,在国内外已经得到广泛应用.

表 1 采样点分类及具体描述
Table 1 Classifications and description of sampling sites

采样点位置	采样点分类	采样点描述
北门桥	A 类	无外源,有底泥,无水质交换,流速约 0.03 m·s ⁻¹
问钟桥		无外源,有大量底泥,无水质交换,流速约 0.03 m·s ⁻¹
东门桥	B 类	无外源,有底泥,与外界有少量水质交换,流速约 0.09 m·s ⁻¹
孺子桥	C 类	有较多生活污水,有较多底泥,水质交换少,流速约 0.03 m·s ⁻¹
望师桥		有大量生活污水,有底泥,水质交换少,流速约 0.03 m·s ⁻¹

1.3 悬浮颗粒物粒度组分分离的方法

悬浮颗粒物的粒度分布是由污染物成分和环境作用共同决定的,在这些作用下,水体中的悬浮颗粒物产生了粒度分布多组分的现象,并反映在粒度分布曲线上^[22,23]. 通过对采样点中大量不同表现污染程度的水体样品的悬浮颗粒物粒度分布曲线观察分析,此类水体中悬浮颗粒物粒度大多呈现双峰或多峰分布,尽管表现污染程度不同,但出峰位置大致相同,图 2 是几组典型悬浮颗粒物粒度频率分布,从中可见,悬浮颗粒物粒径最多呈现出 6 个峰,因而本研究把它分为 6 个组分,各组分粒径范围分别为 <1.5 μm、1.5 ~ 8 μm、8 ~ 35 μm、35 ~ 186 μm、186 ~ 516 μm、>516 μm. 用高斯函数对全样品进行数学分离. 高斯函数方程(2)以各粒级的粒径对数为自变量,以该粒级的体积分数为分布函数值,以拟合误差最小为目标对样品进行了粒度频率曲线拟合 (Origin 7.0).

$$y = \sum \left(y_0 + \frac{A}{W \sqrt{\pi/2}} \right) e^{-\frac{(\lg x - \lg x_c)^2}{W^2}} \quad (2)$$

式中,y 为体积分数(%); y₀ 为初始值; A 为峰面积; W 为两倍标准偏差及峰宽; x 为中值粒径(μm); x_c 为悬浮颗粒物等效球径(μm). 依据方程(2)对各组样品粒度测量结果进行拟合,拟合效果见图 3,从而将各组分分离出来.

2 结果与分析

2.1 研究区域内水质因子的分布特征

研究期内水体水温变化范围 10.3 ~ 31.3℃,由于研究区地理位置集中,水温在所有采样点位间差异不大;溶解氧(DO)变化范围 0.41 ~ 11.28 mg·L⁻¹,具有明显的时间差异,3、4 月较高,但波动也最大,5 ~ 7 月较低. 采样点位间 DO 也存在差异,A 类水样 2.5 ~ 11.28 mg·L⁻¹,B 类水样 1.34 ~

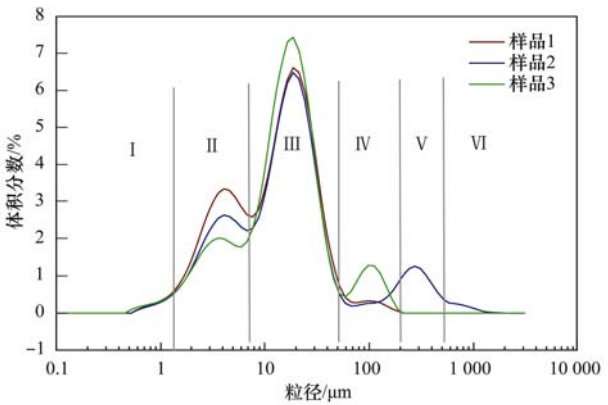


图 2 悬浮颗粒物粒度频率分布
Fig. 2 Frequency spectra of the SPM grain size

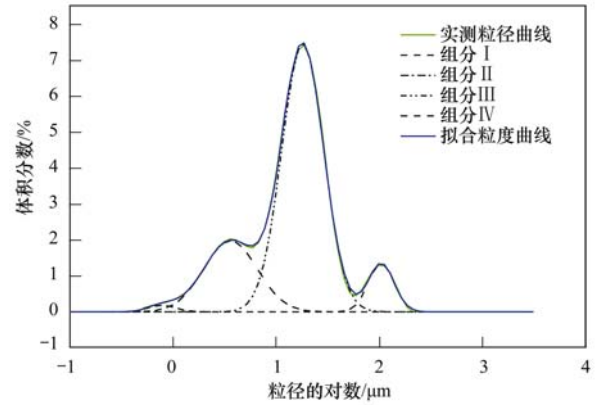


图 3 悬浮颗粒物粒度正态分布拟合
Fig. 3 Logarithm normal school initiation of the SPM grain size

7.21 mg·L⁻¹,C 类水样最低 0.41 ~ 7.01 mg·L⁻¹; 营养盐具有相似的时间变化规律,各类水样中总磷(TP)在 4 月底出现较大值 0.56 ~ 1.23 mg·L⁻¹(均值 0.89 mg·L⁻¹),其他时间含量基本在 0.59 mg·L⁻¹左右. 采样点位间,C 类水样 TP 含量 0.49 ~ 1.23 mg·L⁻¹最高,A 类水样 0.41 ~ 1.09 mg·L⁻¹次之,C 类水样 0.37 ~ 0.88 mg·L⁻¹最低;水样中总氮(TN)较大值亦出现在 4 月底,平均浓度达 11.87

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,对比各类采样点间 TN 含量,C 类(均值 $10.47\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于 A 类(均值 $9.70\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)高于 B 类(均值 $9.25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

TOC 含量除 5 月中旬和 6 月下旬出现峰值[图 4(a)],其他时间稳定在 $16\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,点位间 C 类水样波动最大且均值 $23.9\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 最高,A、B 类水样

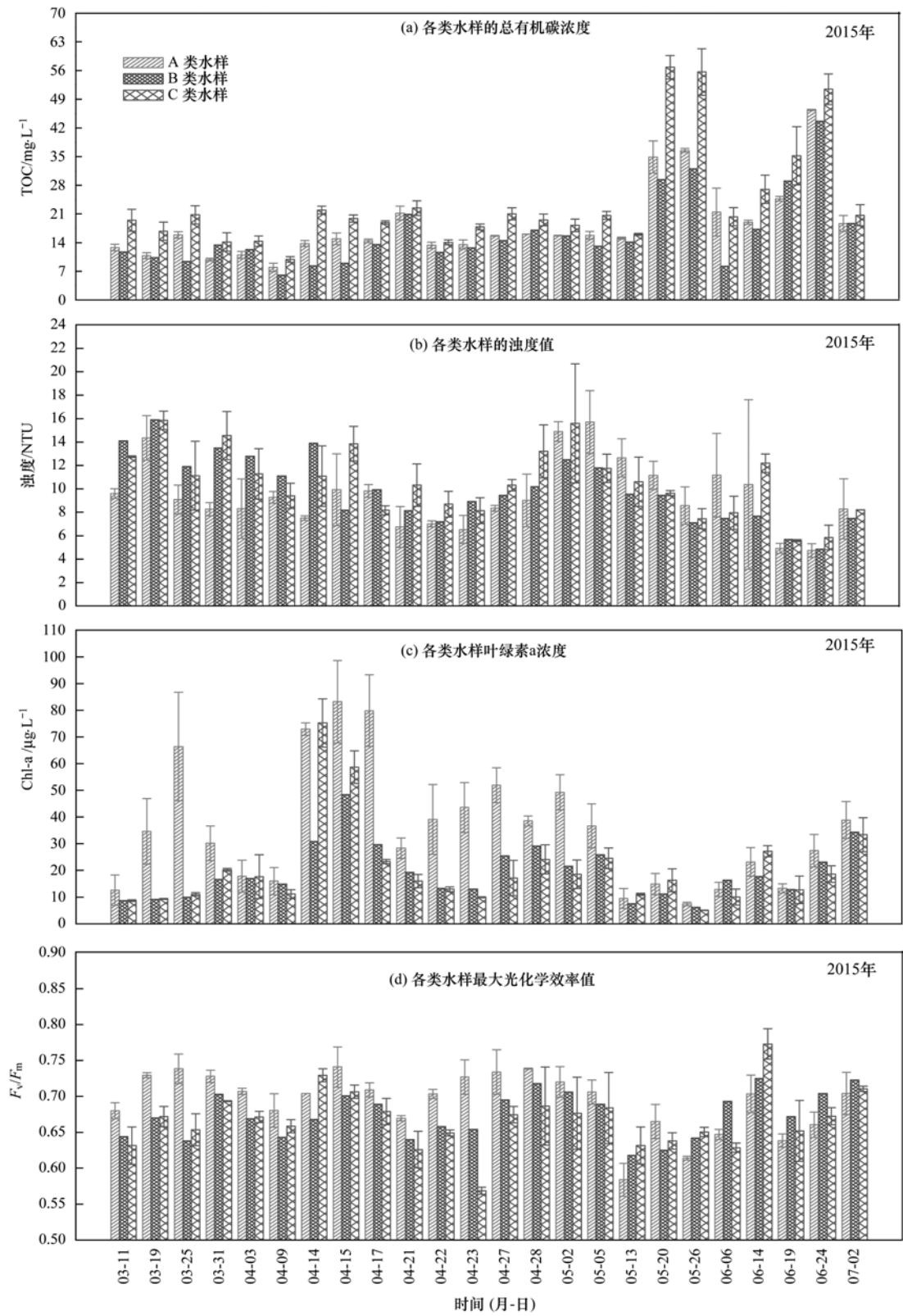


图 4 各类水样水质指标比较

Fig. 4 Comparison of water quality index in all kinds of water

均值相差不大, 分别为 $17.3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $16.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 浊度在不同类型水样间有一定的差异[图 4(b)], C 类水样浊度均值最高 10.7 NTU , A 类水样均值为 9.4 NTU 略低于 B 类水样均值 9.6 NTU .

Chl-a 含量具有明显的时间动态规律[图 4(c)], Chl-a 浓度最大值出现在 4 月中旬, Chl-a 浓度有数日达到 $60 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上(除 B 类水样), 此时气温回升, 适宜藻类生长, 同时可能由于该时期温度波动大及降雨影响, 一定程度抑制藻类生长, 之后 Chl-a 浓度处于较低水平, 6 月后 Chl-a 浓度有上升趋势; Chl-a 随时间变化外还呈现出点位间差异, A 类水样 Chl-a 浓度总体较高, 均值达 $35.7 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, B 类和 C 类水样的 Chl-a 浓度则较低, 均值分别为 $20.5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $19.3 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 最大光化学效率(F_v/F_m)能反映藻类生长环境良好与否^[24], 它在时间和

点位间上变化趋势与 Chl-a 浓度变化具有一致性[图 4(d)].

2.2 研究区内水体表观污染程度分布特征

研究期内水体表观污染程度范围介于轻污染与中污染间(图 5), SPI 值最大值出现在 5 月初. 对比不同类型水样的水体表观污染程度, C 类水样中 SPI 值处于最高水平, SPI 均值为 35.1, 明显高于 A 类和 B 类水样中 SPI 均值量, 两类水样 SPI 均值分别为 32.7 和 31.2.

表 2 显示, 不同类型水样的 SPI 值与水质指标的相关性具有相似性, SPI 值与 DO、Chl-a、 F_v/F_m 、浊度均显著正相关, 与水温 and 营养盐(TP、TN)无相关关系; A、B 两类水样 SPI 值与 TOC 未显现出显著相关性, 而 C 类水样 SPI 值与 TOC 呈正相关($P < 0.05$).

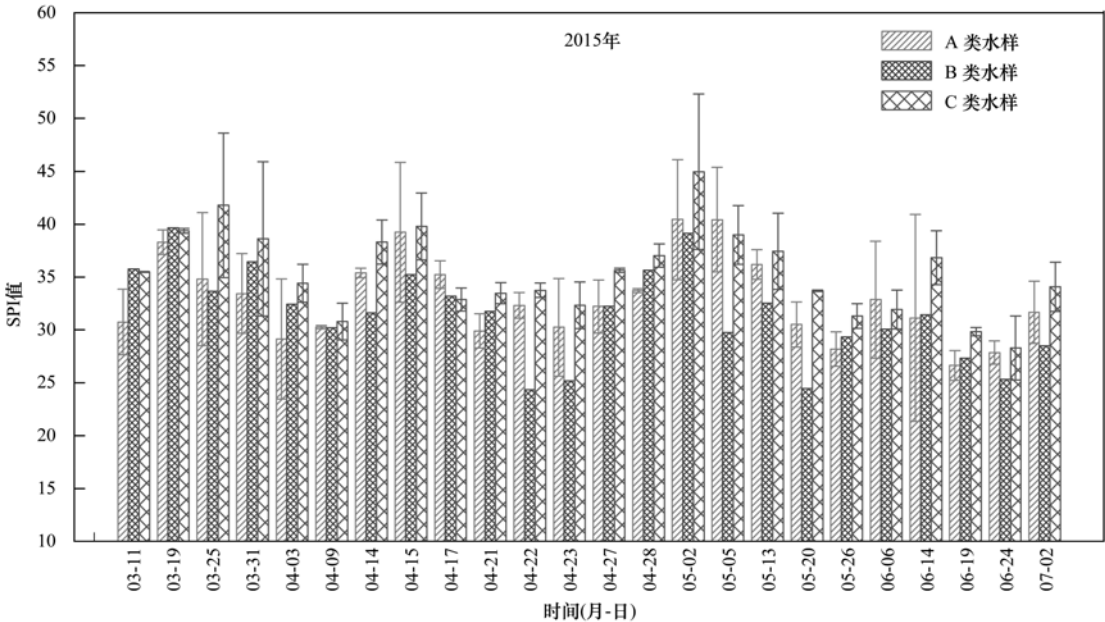


图 5 各类水样 SPI 值比较

Fig. 5 Comparison of SPI value in all kinds of water

表 2 SPI 值和水质指标的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficient of SPI value and water quality index

项目	类型	水温	DO	Chl-a	最大光化学效率	浊度	TP	TN	TOC
SPI 值	A 类	0.289	0.697 **	0.724 **	0.646 **	0.802 **	0.223	0.101	0.274
	B 类	0.104	0.701 **	0.688 **	0.511 **	0.834 **	0.307	0.243	0.492
	C 类	0.322	0.619 **	0.631 **	0.489 **	0.869 **	0.117	0.275	0.403 *

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.3 研究区内水中悬浮颗粒物粒度组成及粒度分布特征

2.3.1 水中悬浮颗粒物粒度组成特征

污染物质成分含量不同比率混合在水体表观上

会表现出 SPI 值差异, 在粒度分布曲线上则会表现出粒度组分含量差异. 将粒度曲线数据按照先前划分的 6 个粒级, 作各类水样时间尺度上各粒级组分体积分数分布图(图 6), 时间尺度上, 各类水样组分

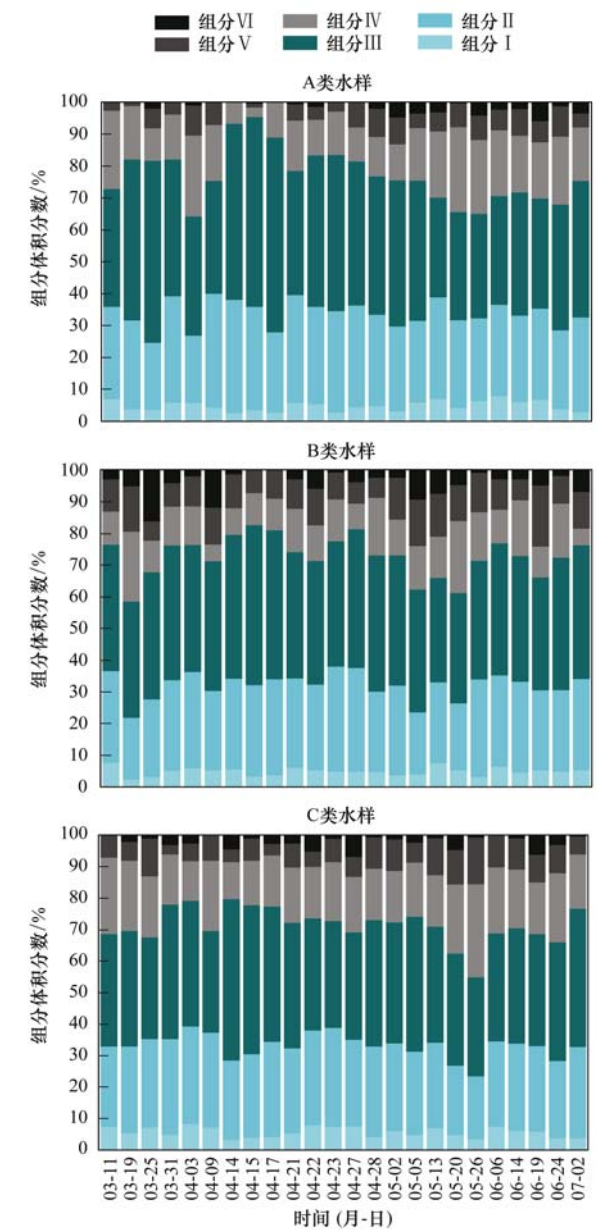


图6 各类水样悬浮颗粒物各粒级组分体积分数时间变化

Fig. 6 Temporal variations of volume fraction of size-fractionated components of SPM in all kinds of water

I + 组分 II 体积分数无明显变化,基本保持在 30% 左右; 组分 III 体积分数虽有波动但始终保持优势组分,4 月中旬达到最大; 后 3 个组分体积分数没有明显规律性变化. 对比三类水样间各粒级组分体积分数,A 类水样中优势组分 III 体积分数均值为 43.2% 最高,B 类水样均值为 40.5%,C 类水样均值为 38.3%; 而后 3 个组分体积分数 A 类水样低于 B、C 两类水样,后 3 个组分中,A、C 类水样以组分 IV 为主,而 B 类水体中组分 V 体积分数也较大; 三类水样间组分 I 和组分 II 体积分数差异性较小,组分 I 体积分数均值分别为 4.3%、4.8% 和 4.6%,组分 II 体积分数为 A 类水体(平均 30.7%)略高于 B 类水样(平均 29.2%),高于 C 类水样(28%).

表 3 显示,水体表观质量与多个粒级组分体积分数呈显著相关. A 类和 B 水样中,SPI 值与组分 III 体积分数均在 ($P < 0.01$) 水平下呈显著正相关,与组分 IV 和组分 V 体积分数在 ($P < 0.05$) 水平下显著负相关,组分 I、组分 II 和组分 VI 体积分数与 SPI 值无相关关系. C 类水样中,SPI 值与前 3 个组分体积分数的关系与 A、B 类水样基本一致,SPI 值与组分 III 体积分数呈显著正相关,与组分 I、组分 II 不相关,与后 3 个组分体积分数的关系同 A、B 类水样有所差异,呈现出较弱的正相关但未达到显著水平. 三类水样中前 2 个组分体积分数和后 3 个组分体积分数与 SPI 值的关系具有一致性,因而,把前 2 个组分和后 3 个组分进行了合并,A 类和 B 类水样中,组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数与 SPI 值呈显著负相关. 富营养化水体表观污染的主要污染物质是藻类^[10]. 叶绿素 a(Chl-a)可以用来对水体中藻类含量进行表征^[25,26]. Chl-a 浓度和 SPI 值与各粒级组分体积分数关系具有高度一致性(表 4).

表 3 SPI 值和各组分体积分数的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient of SPI value and volume fraction of all components									
项目	类型	组分 I	组分 II	组分 III	组分 IV	组分 V	组分 VI	组分 I + 组分 II	组分 IV + 组分 V + 组分 VI
SPI 值	A 类	-0.086	0.095	0.650 **	-0.451 *	-0.462 *	-0.168	-0.012	-0.530 **
	B 类	-0.059	0.34	0.477 **	-0.625 *	-0.458 *	-0.296	-0.296	-0.371 *
	C 类	-0.112	0.172	0.338 **	0.063	0.215	0.439	0.154	0.362

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

表 4 Chl-a 与各组分体积分数的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 4 Pearson's correlation coefficient of Chl-a and volume fraction of all components									
项目	类型	组分 I	组分 II	组分 III	组分 IV	组分 V	组分 VI	组分 I + 组分 II	组分 IV + 组分 V + 组分 VI
Chl-a 浓度	A 类	-0.328 *	-0.148	0.631 **	-0.478 **	-0.309 *	-0.246	-0.219	-0.441 **
	B 类	-0.037	-0.165	0.541 **	-0.557 *	-0.314 *	-0.396	-0.253	-0.389 *
	C 类	-0.135	0.222	0.341 **	-0.013	0.178	0.442	0.117	0.109

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

2.3.2 水中悬浮颗粒物各组分粒度参数特征

中值粒径 x 、峰宽 W 以及峰面积 A 等粒度参数是经常用来表征粒度分布特征的数值. 利用高斯函数拟合水体中悬浮颗粒物粒径分布图可以得到各组分的中值粒径 x 、峰宽 W 以及峰面积 A (表 5), 比较 A、B、C 三类水样中粒度参数, 组分 I 平均中值粒径 0.72 ~ 0.74 μm , 组分 II 平均中值粒径 4.24 ~ 4.57 μm , 两者差异很小, 峰宽和峰面积相差亦不大. A 类水样和 C 类水样组分 III 平均中值粒径分别为 18.48 μm 和 18.28 μm , B 类水样组分 III 平均中值粒径 15.79 μm 小于 A、C 类水样; A 类水样组分 III

峰宽(平均 0.64)大于 C 类水样(平均 0.59)大于 B 类水样(平均 0.49); A 类水样组分 III 峰面积(平均 3.33)大于 B 类水样(平均 2.89)大于 C 类水样(平均 2.74); C 类水样后 3 个组分平均中值粒径、峰宽和峰面积大于 B 类水样大于 A 类水样.

表 6 表明, A、B、C 三类水样中 SPI 值与各组分中值粒径均无显著相关关系; SPI 值仅与组分 IV 峰宽显著负相关; SPI 值与三类水样组分 III 峰面积均在 ($P < 0.05$) 水平下显著正相关, A 类水样 SPI 值与组分 IV 峰面积显著正相关, 而 C 类水样 SPI 值与组分 IV 峰面积显著负相关.

表 5 悬浮颗粒物各组分粒度参数

Table 5 SPM grain size parameters of different components

类型	组分名称	中值粒径 $x/\mu\text{m}$			峰宽 W			峰面积 A		
		均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值
A 类	组分 I	0.74	1.08	0.51	0.27	0.35	0.20	0.18	0.25	0.09
	组分 II	4.27	7.25	3.24	0.61	0.91	0.46	1.81	2.46	1.27
	组分 III	18.28	21.77	15.09	0.64	0.97	0.45	3.33	4.07	2.67
	组分 IV	136.24	155.12	98.87	0.38	0.61	0.25	0.71	1.99	0.41
	组分 V	351.25	409.87	271.65	0.30	0.41	0.23	0.46	0.75	0.31
	组分 VI	839.74	899.36	647.79	0.22	0.25	0.19	0.05	0.09	0.03
B 类	组分 I	0.72	0.92	0.61	0.36	0.38	0.31	0.2	0.45	0.11
	组分 II	4.57	7.29	3.14	0.59	0.91	0.42	1.86	2.26	0.72
	组分 III	15.79	19.79	12.40	0.49	0.82	0.37	2.89	3.77	1.29
	组分 IV	142.87	161.84	99.88	0.44	0.51	0.28	0.44	1.01	0.20
	组分 V	375.50	452.12	329.95	0.36	0.39	0.23	0.52	0.56	0.47
	组分 VI	1 010.64	1 302.01	931.67	0.29	0.32	0.21	0.18	0.33	0.11
C 类	组分 I	0.72	0.75	0.62	0.33	0.36	0.21	0.20	0.28	0.14
	组分 II	4.24	5.03	3.57	0.53	0.71	0.42	1.68	2.04	1.03
	组分 III	18.48	24.53	14.84	0.59	0.86	0.44	2.74	4.15	1.76
	组分 IV	152.82	194.12	110.23	0.69	0.75	0.54	1.17	2.46	0.79
	组分 V	426.7	477.29	365.42	0.36	0.60	0.21	0.58	0.69	0.35
	组分 VI	1 278.44	1 807.41	871.28	0.32	0.39	0.27	0.18	0.26	0.14

表 6 各组分粒度参数与 SPI 值皮尔逊相关系数¹⁾

Table 6 Pearson's correlation coefficient of grain size parameters of different components and SPI value

项目	类型	组分 I / x	组分 II / x	组分 III / x	组分 IV / x	组分 V / x	组分 VI / x	组分 I / W	组分 II / W	组分 III / W
SPI 值	A 类	0.015	-0.412	-0.26	-0.061	0.332	0.132	-0.341	0.059	0.062
	B 类	0.411	-0.218	0.25	0.632	0.622	0.211	0.563	-0.227	0.052
	C 类	0.221	0.232	-0.287	-0.411	0.012	-0.018	-0.075	-0.133	-0.144
项目	类型	组分 IV / W	组分 V / W	组分 VI / W	组分 I / A	组分 II / A	组分 III / A	组分 IV / A	组分 V / A	组分 VI / A
SPI 值	A 类	-0.477 *	-0.138	-0.231	0.325	0.156	0.684 *	-0.505 *	-0.041	-0.119
	B 类	0.398	-0.048	-0.318	0.533	-0.073	0.421 *	-0.25	-0.055	-0.021
	C 类	0.142	-0.148	-0.051	0.36	0.228	0.366 *	0.401 *	0.101	0.006

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

3 讨论

3.1 水体表面污染与悬浮颗粒物粒度分布关系

SPI 值与多个组分体积分数呈显著相关(表 3),

表明悬浮颗粒物粒度分布对水体表面质量产生影响, 其中组分 III、组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数对 SPI 值影响最大, 且不同的环境条件其影响不一致. 组分 I + 组分 II、组分 III、组分 IV + 组分 V

+ 组分Ⅵ的体积分数三角图(图 7)可以反映各组分体积分数与 SPI 值动态变化规律。不受外源影响时即 A、B 类水样[图 7(a)], SPI 值低于 30 时, 组分Ⅳ+组分Ⅴ+组分Ⅵ占优势, SPI 值增加到 35 时, 优势组分逐渐过渡到组分Ⅲ, 组分Ⅳ+组分Ⅴ+组分Ⅵ体积分数降低; 当 SPI 值高于 35 时, 组分Ⅲ明显成为优势组分; 有外源影响时即 C 类水样[图 7(b)], 随着 SPI 值的增加, 组分Ⅲ体积分数逐渐增

大, 与 A、B 类水样变化规律性一致, 但增大幅度明显小于 A、B 类水样, 同时组分Ⅳ+组分Ⅴ+组分Ⅵ体积分数是随着 SPI 值的增大而增大的, 表明组分Ⅳ+组分Ⅴ+组分Ⅵ体积分数的增大主要来自于外源的输入。藻类是富营养型水体中主要表观污染物质, 组分Ⅲ体积分数与 Chl-a 浓度呈显著正相关(表 4), 表明组分Ⅲ体积分数的增大主要来自于藻类的增加。

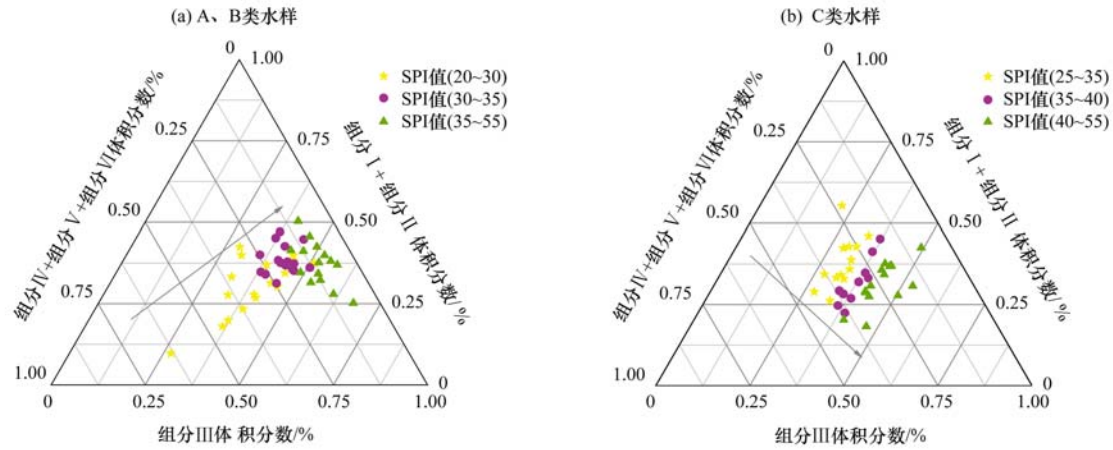


图 7 悬浮颗粒物组分体积分数三角图

Fig. 7 Percentage triangle map for volume fraction of SPM components

3.2 水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征影响因素

A 类水样粒度分布和 SPI 值时间尺度上的差异表明环境因子对粒度分布和表观污染产生了一定的影响, 环境因子与粒度特征参数、SPI 值的相关性及其与 Chl-a 浓度相关性具有一致性(表 7), F_v/F_m 和 DO 与组分Ⅲ体积分数、SPI 值、Chl-a 浓度的相关系数分别为 0.545、0.646、0.794 和 0.706、0.697、0.812, 均在 ($P < 0.01$) 水平下呈显著正相关, 说明这些环境因子是通过作用藻类含量影响粒度分布和在水体表观污染, 在粒度分布上体现为组分Ⅲ体积分数的增大, 在水体表观污染上则是 SPI 值的增大。

F_v/F_m 和 DO 与组分Ⅲ中值粒径均无相关关系, 说明未对颗粒大小产生显著影响; 除 F_v/F_m 和 DO 外, 水温 and 氮磷浓度也会影响藻类。本研究中水温与粒度参数、SPI 值及 Chl-a 浓度无相关关系, 这可能与研究期内水温已经达到藻类生长需要有关, 春夏季 Chl-a 浓度变化的主要影响因子不是水温^[27]。TN、TP 与粒度参数、SPI 值及 Chl-a 浓度亦无相关关系, 这可能与研究区域内水体中氮磷浓度 ($TP > 0.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $TN > 6.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 均超过了藻类生长的限制浓度有关(当溶解性的氮 $\geq 0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、磷 $\geq 0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 氮磷不再是藻类生长的限制因素)^[28]。

表 7 组分Ⅲ粒度特征参数、Chl-a 和 SPI 值与水质指标皮尔逊相关系数¹⁾

Table 7 Pearson's correlation coefficient of grain size parameters of component Ⅲ, Chl-a, SPI value and water quality indexes					
项目	DO	水温	最大光化学效率	TP	TN
组分Ⅲ体积分数	0.706 **	0.125	0.545 **	0.097	0.27
组分Ⅲ中值粒径	-0.338	-0.051	0.156	0.214	-0.362
Chl-a 浓度	0.812 **	0.323	0.794 **	0.174	0.084
SPI 值	0.697 **	0.289	0.646 **	0.223	0.101

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

A 类水样和 B 类水样除水动力条件不同, 其他环境条件和主要污染物质基本相同, 而 A、B 两类水样各组分体积分数和中值粒径有明显差异(图 6

和表 5), 反映了水动力条件是影响粒度分布的重要因子。B 类水样中组分Ⅳ、组分Ⅴ和组分Ⅵ体积分数、中值粒径、峰宽和峰面积都高于 A 类水样, B

类水样中相对大颗粒要多于 A 类水样,这可能由于流速快的河道由于水体自身的夹带功能,使得大颗粒物得不到沉降,而流速缓慢水体中,水动力条件弱,大悬浮颗粒物能得以沉降,使悬浮颗粒物的粒径得到细化^[8,13].

A 类水样和 C 类水体营养盐水平差异不明显,河道形态比较类似,环境条件不同主要在于是否有外源进入.而两类水样中水体表观质量(图 5)以及各粒度组分体积分数与 SPI 值、Chl-a 浓度关系存在差异(表 3 和表 4),表明外源作用亦是影响粒度分布和水体表观污染的重要因子.对比 A、C 两类采样点水质指标(图 4),A 类水样的 Chl-a 浓度 $7.5 \sim 83.2 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 明显高于 C 类水样的 Chl-a 浓度 5.0

$\sim 75.3 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,而 TOC 浓度 $7.9 \sim 38.4 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、浊度 $4.7 \sim 15.7 \text{ NTU}$ 和 SPI 值 $26.6 \sim 41.4$ 低于 C 类水样 TOC 浓度 $9.9 \sim 56.8 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、浊度 $5.6 \sim 16.1 \text{ NTU}$ 和 SPI 值 $28.3 \sim 47.0$.可能由于外源的不定期进入会导致水体环境不稳定,水质波动大^[27],对藻类生长产生一定的抑制作用,同时又带入一部分污染物质.图 8 是 A、C 两类水样各组分体积分数,粒度分布差异主要体现在组分 III 和组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数上,A 类水样中组分 III 体积分数高于 C 类水样,组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数低于 C 类水样.表明外源因子对悬浮颗粒物粒度分布的影响,表现为组分 III 体积分数相对降低,组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数的相对增大.

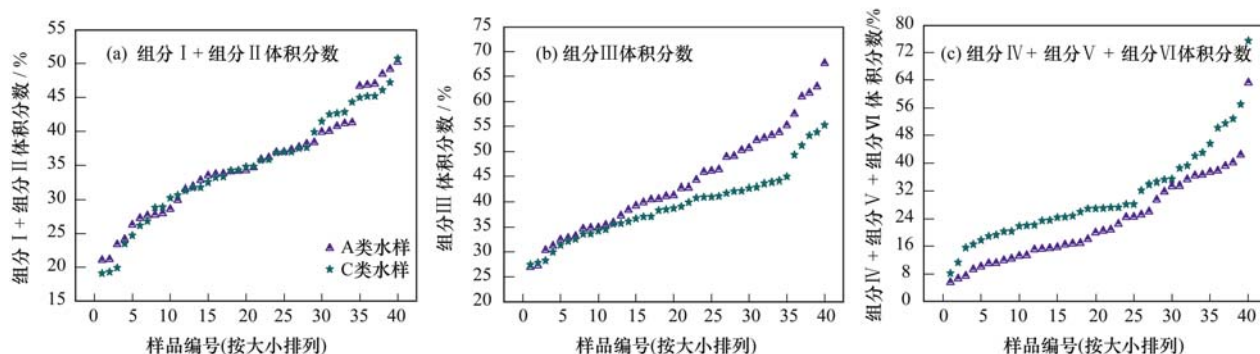


图 8 A 类和 C 类水样中悬浮颗粒物各组分体积分数对比

Fig. 8 Comparison of volume fraction of different components in class A and class C water samples

4 结论

(1) 富营养型水体中悬浮颗粒物具有相似的粒度分布特征,粒度分布存在多峰,且出峰位置大致相同,悬浮颗粒物的粒度分布由多个组分叠加构成,反映多组分粒度分布特征,最多有 6 个组分,各组分的粒径范围是: $<1.5 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \sim 8 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 35 \mu\text{m}$ 、 $35 \sim 186 \mu\text{m}$ 、 $186 \sim 516 \mu\text{m}$ 、 $>516 \mu\text{m}$.

(2) 悬浮颗粒物各粒度组分中,组分 III 是优势组分,平均体积分数为 $38.3\% \sim 43.2\%$,组分 III 体积分数与 SPI 值、Chl-a 浓度呈显著正相关,组分 III 体积分数的增大是该类水体表观污染程度加深的粒度结果表征,该组分体积分数的增大主要来自于藻含量增加;组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数在有外源时明显高于无外源时,无外源影响时组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数与 SPI 值显著负相关,有外源影响时组分 IV + 组分 V + 组分 VI 体积分数与 SPI 值存在较弱的正相关但未达到显著水平.

(3) 环境因子 (F_v/F_m 和 DO)、外源因子和水动力条件是影响水中悬浮颗粒物粒度分布和水体表

观质量的重要因素.环境因子和外源因子作用水体主要表观污染物质藻类的含量,进而影响悬浮颗粒物各组分的体积分数和水体表观质量;水动力条件作用悬浮颗粒物粒径,较大水动力使中值粒径增大,对水体表观质量未产生显著影响.

参考文献:

- [1] 李如忠,刘科峰,钱靖,等.合肥市典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价[J].环境科学,2014,35(5):1718-1726.
- [2] 郭迎庆.城市景观水体的污染控制和修复技术[J].环境科学与技术,2005,28(S1):148-150.
- [3] 李飞鹏,张海平,陈玲.小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究[J].环境科学,2013,34(10):3854-3861.
- [4] 国家环境保护总局.2013 年度全国城市环境管理与综合整治年度报告(一)[R].北京:国家环境保护总局,2013.1-2.
- [5] Lick W, Rapaka V. A quantitative analysis of the dynamics of the sorption of hydrophobic organic chemicals to suspended sediments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 1996, 15(7):1038-1048.
- [6] 陈鸣,潘杨,黄勇.非溶解态物质对苏州市景观水体表观污染的影响[J].环境工程学报,2014,8(9):3689-3694.

- [7] Lartiges B S, Deneux-Mustin S, Villemain G, *et al.* Composition, structure and size distribution of suspended particulates from the Rhine river[J]. *Water Research*, 2001, **35**(3): 808-816.
- [8] Fettweis M, Baeye M, Lee B J, *et al.* Hydro-meteorological influences and multimodal suspended particle size distributions in the Belgian nearshore area(southern North Sea)[J]. *Geo-Marine Letters*, 2012, **23**(2): 123-137.
- [9] Turner A, Millward G E. Suspended particles: their role in estuarine biogeochemical cycles[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2002, **55**(6): 857-883.
- [10] Bhaskar P V, Grossart H P, Bhosle N B, *et al.* Production of macroaggregates from dissolved exopolymeric substances (EPS) of bacterial and diatom origin[J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, **53**(2): 255-264.
- [11] 秦蕴珊, 李凡, 徐善民, 等. 南黄海海水中悬浮体的研究[J]. *海洋与湖沼*, 1989, **20**(2): 101-112.
- [12] 张琰, 陈晓玲, 黄珏, 等. 鄱阳湖丰、枯水期悬浮体浓度及其粒径分布特征[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **48**(5): 743-750.
- [13] 周林滨, 谭烨辉, 黄良民, 等. 水生生物粒径谱/生物量谱研究进展[J]. *生态学报*, 2010, **30**(12): 3319-3333.
- [14] Ahn J H. Size distribution and settling velocities of suspended particles in a tidal embayment[J]. *Water Research*, 2012, **46**(10): 3219-3228.
- [15] 庞重光, 于炜, 杨扬. 长江口海域悬浮物的粒度特征与成因分析[J]. *环境科学*, 2010, **31**(3): 618-625.
- [16] 黄建东, 洪华生. 厦门港湾悬浮物粒度特征初探[J]. *海洋通报*, 1995, **14**(6): 61-67.
- [17] Astoreca R, Doxaran D, Ruddick K, *et al.* Influence of suspended particle concentration, composition and size on the variability of inherent optical properties of the Southern North Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, **35**: 117-128.
- [18] Papenmeier S, Schrottke K, Bartholomä A. Over time and space changing characteristics of estuarine suspended particles in the German Weser and Elbe estuaries[J]. *Journal of Sea Research*, 2014, **85**: 104-115.
- [19] 尚佰晓, 王莉, 王爽, 等. 铁岭莲花湖水体富营养化评价[J]. *湿地科学*, 2014, **12**(1): 97-101.
- [20] 潘杨, 黄勇, 申杰, 等. 吸收光谱法表征城市水体表观污染[J]. *安全与环境工程*, 2014, **21**(1): 42-47.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [22] 牛占, 和瑞勇, 李静, 等. 激光粒度分析仪应用于黄河泥沙颗粒分析的实验研究[J]. *泥沙研究*, 2002, (5): 6-14.
- [23] 曾明, 范德江, 孙效功, 等. 冬季黄河口及邻近海域悬浮体粒级组成和分布研究[J]. *海洋学报*, 2010, **32**(4): 129-138.
- [24] 薛峰. 缓流景观水体藻类水华的消长规律及其影响因素[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2011.
- [25] Jørgensen B J, Weber A, Zopfi J. Sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in Black Sea sediments[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2001, **48**(9): 2097-2120.
- [26] 郑炳辉, 曹承进, 张佳磊, 等. 三峡水库支流大宁河水华特征研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(11): 3218-3226.
- [27] 钱昊钟, 赵巧华, 钱培东, 等. 太湖叶绿素 a 浓度分布的时空特征及其影响因素[J]. *环境化学*, 2013, **32**(5): 789-796.
- [28] 赵孟绪, 韩博平. 汤溪水库蓝藻水华发生的影响因子分析[J]. *生态学报*, 2005, **25**(7): 1554-1561.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行