

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

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(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估	罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)
南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析	秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)
南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征	师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)
苏州市 PM _{2.5} 中水溶性离子的季节变化及来源分析	王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沐,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)
成都西南郊区春季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属潜在生态风险评价	杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)
泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析	张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)
青奥会期间基于 $\delta^{13}\text{C}$ 观测的大气 CO ₂ 来源解析	徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)
民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析	韩博,黄佳敏,魏志强(4524)
畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究	张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)
有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物	邢奕,王骥,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)
基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性	楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)
亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征	龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎晨,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)
浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析	马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)
太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应	高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)
利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性	黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)
三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估	杨兵,何丙辉,王德宝(4586)
太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价	武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)
滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义	余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)
洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性	王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)
蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化	赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)
三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究	卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)
模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险	刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)
有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验	张思,何江涛,朱晓婧(4651)
无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例	李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)
清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应	吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)
南方典型农田区浅层地下水污染特征	郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)
水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用	马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)
粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果	沈庆然,侯娟,李田(4700)
超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝	赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)
QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO ₂ 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制	姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)
群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能	赵畅,王文昭,徐期勇(4720)
水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性	王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)
外加微量 N ₂ H ₄ 下 SBR 中硝化微生物特性	肖凡颖,张代钧,卢培利(4734)
部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析	鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)
典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响	姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)
生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析	张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)
开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析	吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)
全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性	李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)
水肥用量对玉米季土壤 CO ₂ 排放的综合影响	杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)
福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性	姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)
基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估	杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)
北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系	柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)
准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征	刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)
河北平原潮土中微生物对氮降解特征	张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)
砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响	廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)
碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力	蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)
不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响	孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲峰,展惠英(4857)
南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征	田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)
Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能	汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)
铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂	付军,范芳,李海宁,张高生(4882)
不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性	王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)
《环境科学》第37卷(2016年)总目录	(4899)
《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)	

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征：以中国运河苏州段为例

李倩倩^{1,2}, 潘杨^{1,2*}, 贡丹燕^{1,2}, 黄勇¹, 夏侯刚³

(1. 苏州科技大学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 215009; 2. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009; 3. 苏州市环境应急与事故调查中心, 苏州 215009)

摘要: 基于悬浮颗粒物粒度分布特性能为水环境表观质量研究提供重要信息, 以流经苏州市市内运河水为研究对象, 探讨无机型城市景观水体中不同表观污染程度下水中悬浮颗粒物的粒度分布特性及其影响因素, 从悬浮颗粒物的粒径角度来解释无机型景观水体表观污染机制. 结果表明, 无机型水中悬浮颗粒物以单峰分布为主, 中值粒径范围 13 ~ 25.2 μm , 组分 II (粒径 3.8 ~ 16 μm) 是优势组分, 体积分数范围 29.4% ~ 59.6%; 水体表观污染的敏感组分为组分 II (粒径 3.8 ~ 16 μm) 和组分 IV (粒径 32 ~ 64 μm), 表观污染指数 (SPI) 与组分 II 和组分 IV 体积分数关系具有分段性, 分段节点是浊度为 45NTU 处, 浊度小于 45NTU 时, SPI 值与组分 II 体积分数呈显著正相关, 与组分 IV 体积分数呈显著负相关; 当浊度大于或等于 45NTU 时关系相反. 影响苏州运河水粒径分布的因素主要是生物因子和水动力条件, 生物因子的作用主要表现为藻类的增加, 水动力条件的作用是使水体发生再悬浮, 导致水中大颗粒物质的增加.

关键词: 悬浮颗粒物; 城市景观水体; 表观污染效应; 粒度; 组分

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4662-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201604003

Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example

LI Qian-qian^{1,2}, PAN Yang^{1,2*}, GONG Dan-yan^{1,2}, HUANG Yong¹, XIA Hou-gang³

(1. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Institute of Environmental Biotechnology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 3. Environmental Emergency and Accident Investigation Center, Suzhou 215009, China)

Abstract: Grain size distribution characteristics of suspended particulate matter (SPM) provides important information for water environment apparent quality. The size distribution characteristics and influencing factors of suspended particulate matter under different apparent pollution levels in the inorganic type urban landscape water were discussed taking the canal which is flowing through Suzhou as the research object. The apparent pollution mechanism of inorganic type urban landscape water was explained from the aspect of the size of the suspended particles. The results showed that: SPM had mainly a uni-modal distribution in the inorganic type water, and the median particle diameter range was 13-25.2 μm . The component II was predominant, and the particle size range was 3.8-16 μm (with an average volume fraction of 29.4% -59.6%). Sensitive components of the apparent polluted water were component II and component IV (particle size range 32-64 μm). The relation of the sensation pollution index (SPI) and component II was segmented, and the node was 45NTU. When the turbidity was less than 45NTU, SPI value and volume fraction of component II had a significant positive correlation, and volume fraction of component IV had a significant negative correlation with SPI value; when the turbidity was equal to or greater than 45NTU, the correlation was the opposite. The influencing factors of particle size distribution of Suzhou canal mainly included organisms and hydrodynamic conditions. The biological factors mainly led to increase of the algae and the hydrodynamic condition caused resuspension and increased the large particles.

Key words: suspended particulate matter; urban landscape water; apparent pollution; grain size; component

城市景观水体是指流经城市的河流、城区的湖泊和水库、公园水系、人工运河和人工湖等^[1,2], 而无机型城市水体一般呈黄色或者土黄色, 黏土、泥沙等无机颗粒物含量较高, 通常为流经城市的运河水. 目前, 随着公路网化^[3]及人们对生活品质的追求, 运河水的航运功能逐渐被弱化, 景观及生态功能渐渐凸显. 但是, 随着我国城镇化、工业化的快速发展, 运河作为城市生

活污水和工业废水的受纳体, 其透明度降低, 颜色异常, 并且有异味, 水体表观污染严重^[4~7].

收稿日期: 2016-04-01; 修订日期: 2016-07-21

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50938005); 江苏省特色优势学科二期立项项目; 江苏省水处理技术与材料协同创新中心项目

作者简介: 李倩倩 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为地表水体表观污染, E-mail: 941978050@qq.com

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

非溶解态颗粒物是造成水体表观污染的主要原因^[8], 颗粒物的组成和含量决定着水体表观污染类型和程度, 而粒度分布是表征颗粒物的重要参数, 能反映悬浮颗粒物的组分信息和含量信息^[8~15]. 目前针对水体中悬浮颗粒物的研究主要涉及河口^[11~15]、湖泊^[16,17] 以及海洋^[18~21] 等不同生境, 国内外学者通过对水中悬浮物粒度的组成、分布及变化规律的研究来揭示水体的物质组分、水动力环境、表观污染机制^[22] 和污染物迁移转化机制等. 目前虽然无机型城市景观水体作用的渐渐凸显, 但其表观污染机制尚不明确, 而其是否与悬浮颗粒物之间存在关联性也并不知道.

京杭运河(苏州段)水体颜色呈现黄色, 黏土、泥沙等无机颗粒物含量较高, 属于典型的无机型水

体. 本文以苏州运河为研究对象, 探究无机型水体中悬浮颗粒物粒度分布特征, 并结合水体表观质量和悬浮颗粒物粒度分布的影响因素来揭示无机型城市景观水体表观污染机制, 以期在城市河道的治理提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 采样点分布

本文以流经苏州城区内运河为研究对象, 水体常年呈黄色, 浑浊度高. 研究区域主要涉及高新区和吴中区, 在研究区域内共设了 13 个采样点, 其中 5 个是常规监测点. 本研究于 2015 年 7~9 月对 5 个采样点进行持续监测, 共 90 组数据. 常规采样点位置如图 1 所示.

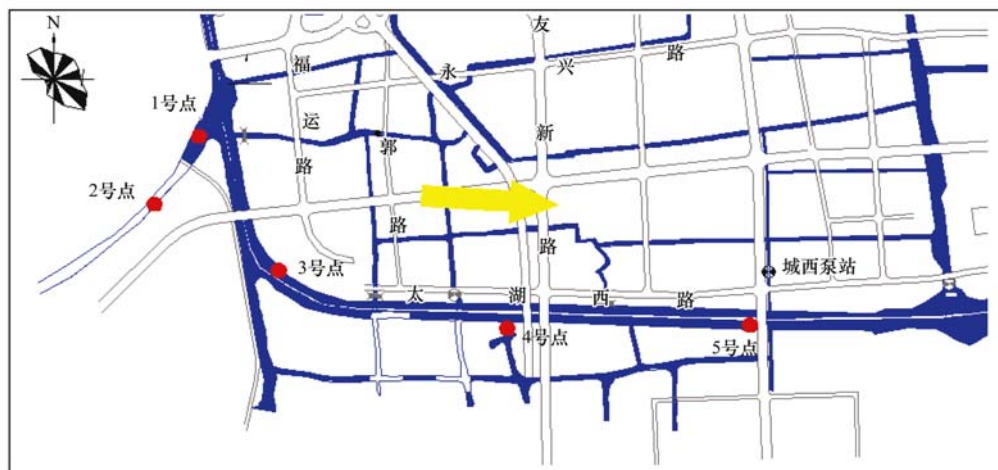


图1 京杭运河苏州段采样点分布示意

Fig. 1 Map of Suzhou section of Jinghang canal and distribution of sampling sites

1.2 测定方法

本研究所测的水质指标主要有总悬浮物浓度(SS)、浊度、叶绿素 a(Chl-a)、高锰酸盐指数、总氮(TN). 水质指标测定采用国标法^[23]. SS 采用英国 Partech740 污泥浓度计测量, 浊度采用 HACH2100N 浊度仪, 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, 高锰酸盐指数采用高锰酸钾酸性法, 总有机碳(TOC)和总氮(TN)采用 Multi3100N/C 测量, 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马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer 3000, Malvern, Britain).

表观污染指数的测定采用吸收光谱法^[24], 即:

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

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. 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)这 5 个表观污染等级.

1.3 悬浮颗粒物粒度特征参数的获得

不同种颗粒系统具有不同的粒度分布, 因此用于表征粒度分布的函数种类很多. Kostadinov 等^[25] 指出, 当颗粒物中无机成分占主导时, 粒径分布一般遵循荣格普分布. 本研究水体中悬浮颗粒物是以无机颗粒物为主导, 用幂指数模型可以较好地描述其粒度分布特征. 图 2 是几组典型的此类水体中悬浮颗粒物粒度频率分布, 用幂函数对全样品进行数学分离. 幂函数见方程(2), 以各粒级的粒径为自变量, 以该粒级的筛下累计含量为分布函数值. 对该方程两边取对数, 双对数坐标下, 二者呈线性关系,

见方程(3). 以拟合误差最小为目标对样品进行了粒度频率曲线拟合,如图3所示(Origin 7.0),拟合效果良好.

筛下累计分布公式:

$$y(x) = 1 - z(x) = \left(\frac{x}{x_{\max}}\right)^m \quad (2)$$

式(2)方程两边取对数,可得:

$$\lg y(x) = m \lg x + c \quad (3)$$

式中:

$$c = -m \lg x_{\max} \quad (4)$$

因而,以 $y(x)$ 为纵坐标, x 为横坐标的双对数图上二者呈线性,其直线的斜率为 m ,截距为 c .

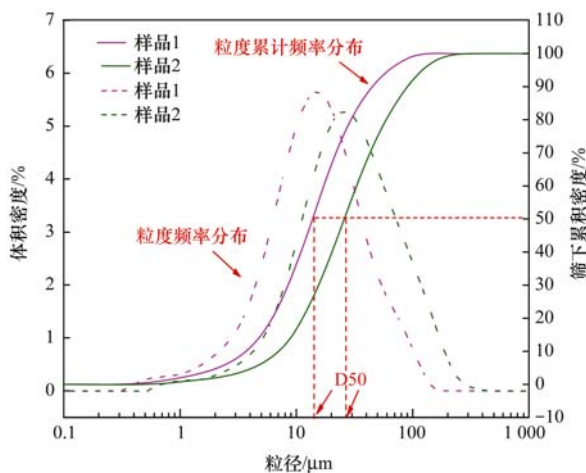


图2 悬浮颗粒物粒径频率分布

Fig. 2 Frequency spectrum of the SPM grain size

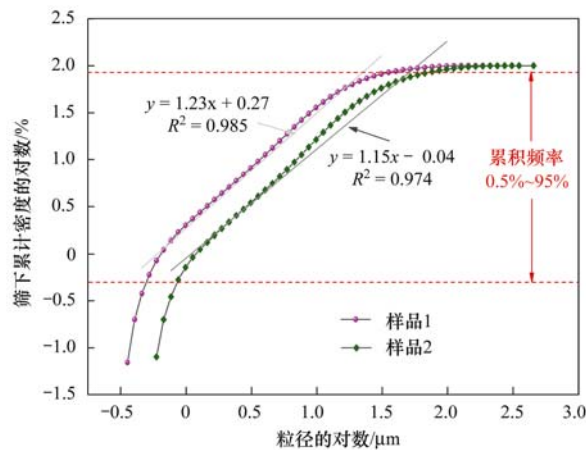


图3 悬浮颗粒物粒径累计频率分布对数拟合

Fig. 3 Logarithm fitting of cumulative frequency distribution of the SPM grain size

2 结果与讨论

2.1 研究区内水体表观污染程度分布特征

各采样点水体表观质量变化具有时间差异性,

研究期内 SPI 值范围为 39.1 ~ 84.2 (图 4). 7 月底到 8 月初期间,除 4 号点和 5 号点在 7 月中下旬出现跃低值,此时 SPI 值分别为 39.1 和 40.3,其他采样点 SPI 值有上升趋势,8 月期间则开始下降,而 4 号点和 5 号点在此期间则是先上升后下降,在 8 月中旬 SPI 出现峰值;9 月以后 SPI 值整体上升,达到 70 以上,水体表观质量处于重污染水平. 表 1 显示,在整个研究时间内, SPI 值与 DO、浊度、SS 和高锰酸盐指数均在 ($P < 0.01$) 水平下显著正相关,相关系数分别为 0.654、0.857、0.82 和 0.50,与温度在 ($P < 0.05$) 水平下显著负相关,相关系数为 -0.357,与 Chl-a 和 F_v/F_m 无显著相关关系. 李功振等^[26]研究指出,京杭大运河底泥的成分主要有石英、石膏,部分或少量的长石、方解石和黏土矿物等无机颗粒,并且运河水层浅,河床高,加上航船的扰动,很容易发生再悬浮,导致水中 SS 和浊度增加,影响藻类的光合作用,从而对水中的藻类起到抑制作用,所以此时叶绿素并没有呈现出一定的相关性. 而随着城市经济的快速发展,运河渐渐成为生活污水的受纳体,从而导致水中 COD 的含量也在增加,对水体表观产生影响.

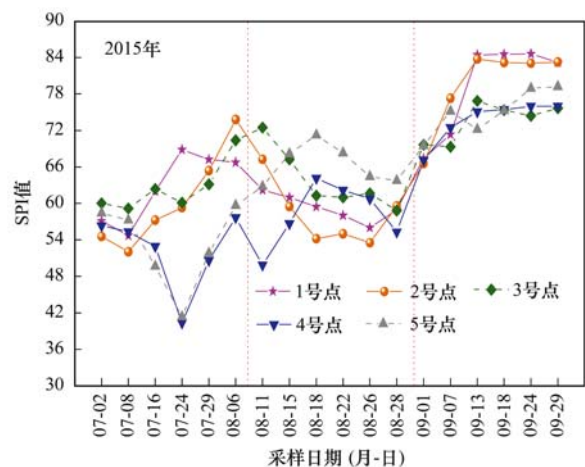


图4 采样点的 SPI 值比较(2015 年)

Fig. 4 Comparison with SPI value in all sampling sites(2015)

2.2 水中悬浮颗粒物粒度分布特征及与水体表观质量相关性分析

2.2.1 水中悬浮颗粒物粒度组成特征

悬浮颗粒物的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体积分数差异. 因而有必要分析不同表观污染水体中悬浮颗粒物的组分分布,对于科学地控制和治理水体表观污染具有重要意义. 因为运河水中的悬浮颗粒物主要以无机颗粒为主,所以

表 1 SPI 值和水质指标的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 1 Pearson's correlation coefficient of SPI and water quality index										
项目	温度	DO	浊度	SS	Chl-a	F_v/F_m	TOC	TN	高锰酸盐指数	高锰酸盐指数/浊度
SPI 值	-0.357 *	0.654 **	0.857 **	0.820 **	-0.115	-0.279	0.295	0.299	0.500 **	-0.035

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

本研究按照乌氏粒级标准^[10]把无机悬浮颗粒物分为 7 个粒级,即 7 个组分,各组分粒径范围分别为:小于 3.8 μm 、3.8 ~ 16 μm 、16 ~ 32 μm 、32 ~ 64 μm 、64 ~ 122 μm 、122 ~ 280 μm 、大于 280 μm . 图 5 是水体中悬浮颗粒物各粒级组分体积分数分布,结果表明,组分 II 体积分数在所有组分中最高(体积分数范围为 29.4% ~ 59.6%),是优势组分. 组分 III 和组分 IV 体积分数次之,体积分数范围分别为 8.98% ~ 32.36% 和 2.3% ~ 23.05%; 组分 I 和组分 V 体积分数范围是 3.78% ~ 32.88% 和 0.21% ~ 10.16%; 后两个组分在较多样品中消失,体积分数为零. 这一现象与底质类型主要为粉砂质类型有关,即使再悬浮带入的物质亦为粉砂颗粒,各组分体积分数在样品中表现出较大的差异性,这也预示着

悬浮颗粒物粒度控制因素的复杂性.

从上述分析可以看出,不同表观污染下悬浮颗粒物的组分体积分数不一致,但颗粒物组分改变仍会导致水体表观差异. 同时,不同表观污染下各组分体积分数对水体表观质量的贡献率不一样,对其与水体表观质量的相关性分析可以获取不同组分对表观污染潜力,找出水体表观敏感颗粒物组分,从而有针对性地控制某一粒级范围内颗粒物. 表 2 显示,水体表观质量主要与组分 I、组分 II、组分 III、组分 IV (粒径 $< 64 \mu\text{m}$) 体积分数表现出显著相关性,表明对水体表观产生影响的是粒径 $< 64 \mu\text{m}$ 的颗粒物,其中又以组分 II 和组分 IV 的影响最大. 但这种相关性具有分段性,节点为浊度等于 45 NTU. 当浊度小于 45 NTU 时, SPI 值与组分 II 含量在

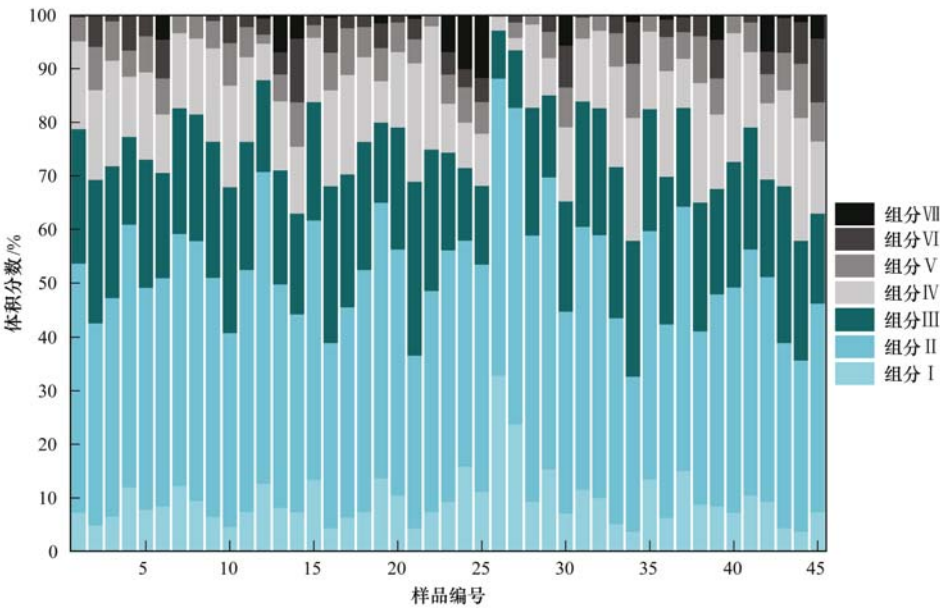


图 5 水中悬浮颗粒物各粒级组分含量

Fig. 5 Size-fractionated components content of SPM in water

表 2 SPI 值和各组分含量的皮尔逊相关系数¹⁾

Table 2 Pearson's correlation coefficient of SPI value and all components content								
项目	类型/NTU	组分 I	组分 II	组分 III	组分 IV	组分 V	组分 VI	组分 VII
SPI 值	浊度 < 45	0.715 **	0.892 **	-0.810 **	-0.764 **	-0.372	-0.156	0.053
	浊度 ≥ 45	-0.429	-0.650 *	0.281	0.650 *	0.502	0.581 *	0.853 **
SS	浊度 < 45	0.301	0.579 *	-0.437	-0.537 *	0.138	-0.003	0.262
	浊度 ≥ 45	-0.441	-0.666 *	0.307	0.643 *	0.511	0.605 *	0.924 **

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

($P < 0.01$) 水平下呈显著正相关, 与组分Ⅳ含量在 ($P < 0.05$) 水平下显著负相关. 当浊度大于等于 45NTU 时, SPI 值与上两个组分体积分数的关系与浊度小于 45NTU 时完全相反, SPI 值与组分Ⅱ体积分数在 ($P < 0.01$) 水平下呈显著负相关, 与组分Ⅳ呈现出显著正相关. 图6显示了 SPI 值与组分Ⅱ和组分Ⅳ的散点分布状况. 能更清楚详细地反映组分含量与 SPI 值的相关性. SS 是表征水体质量好与否

的重要指标, 它们与水体表观质量相关性很强, 所以研究中同时分析了 SS 和粒级组分体积分数的关系. 结果表明, 它们与各组分体积分数的关系具有很好的一致性, 当水中悬浮物质增加, 浊度大于等于 45NTU 时, 主要是大颗粒物质占比增加, 相反, 当浊度小于 45NTU 时, 则是小颗粒物质占比增加, 即在不同的悬浮物浓度下, 对水体表观质量产生影响的组分也是不同的.

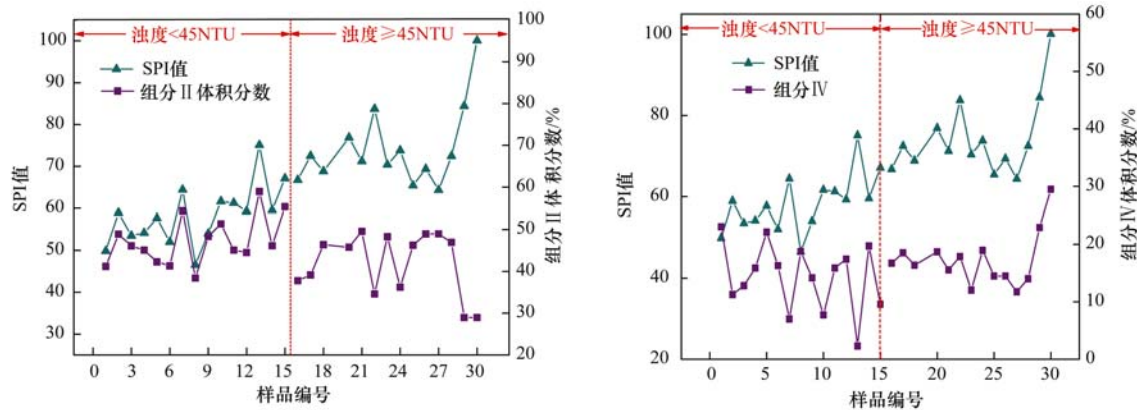


图 6 SPI 与各组分关系散点图
Fig. 6 Scatter plots of SPI and content of components

2.2.2 水中悬浮颗粒物各组分粒度参数特征

中值粒径 D_{50} 、粒径累计频率双对数曲线斜率 m 以及截距 c 等粒度参数是经常用来表征粒度分布特征的重要粒度参数. 利用幂函数拟合水体中悬浮颗粒物粒径分布(图7)可以得到各组分的中值粒径 D_{50} 、斜率 m 以及截距参数 c . 样品中 D_{50} 的范围是 13 ~ 25.2 μm , c 的范围是 -0.06 ~ 0.48, 而 m 的范围则是 1.02 ~ 1.31. 图7显示, 各粒度参数间也有一定的相关性, D_{50} 与 c 、 m 呈负相关, 表明从总体上说 D_{50} 表示的中值粒径越小, 截距和斜率越大, 粒度分布越往小粒径方向偏.

不同表观污染下悬浮颗粒物的体积分数的变化可以表征水体表观污染的情况, 而粒径参数可以更加宏观地看出他们之间的联系. 表3表明, 水样中 SPI 值与 D_{50} 和 c 关系显著. 但这种关系也是在浊度等于 45NTU 节点处发生改变, 当浊度小于 45NTU 时, SPI 值与 D_{50} 呈显著负相关, 与 c 呈显著正相关, 均在 ($P < 0.01$) 水平下; 当浊度大于等于 45NTU 时, SPI 值与 D_{50} 呈显著正相关, 相关系数为 0.847 ($P < 0.01$), 与 c 呈显著负相关, 相关系数为 -0.744 ($P < 0.01$). 相应地也作了 SPI 值与 D_{50} 和 c 散点图(图8), 可以更加直观地看出表观污染指数和粒径参数之间的关系. 表3也做了 SS 与粒度参

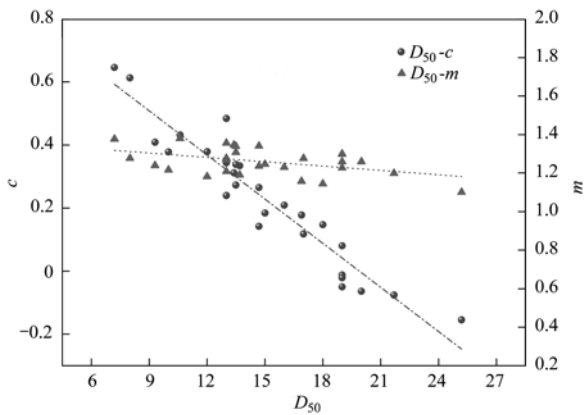


图 7 粒度参数间关系散点图
Fig. 7 Scatter plots of three grain size parameters

数之间的相关性, 结果表明 SS 只在悬浮颗粒物超过一定数量时(浊度大于等于 45NTU)与 D_{50} 相

表 3 SPI 值与粒度参数皮尔逊相关系数¹⁾

Table 3 Pearson's correlation coefficient of SPI and grain size parameters				
项目	类型	D_{50}	c	m
SPI 值	浊度 < 45	-0.700 **	0.676 **	0.413
	浊度 ≥ 45	0.847 **	-0.744 **	0.465
SS	浊度 < 45	-0.354	0.268	0.13
	浊度 ≥ 45	0.792 **	-0.647 *	0.34

1) * 为 $P < 0.05$, ** 为 $P < 0.01$

相关性才显著, 相关系数为 0.792. SS 与 c 的显著相关性也是在浊度大于等于 45 NTU 才显现, 均在 ($P < 0.05$) 水平下显著负相关, 相关系数 -0.647. 由图 9 可以看出, 在 9 月初, 水中悬浮颗粒物浓度出现

激增的过程, 所以当浊度逐渐增大的时候, 沉降在河底的大颗粒物由于水动力等因素大量悬浮到上层水面, 导致水中的悬浮颗粒物的粒径朝大粒径的趋势变化, 水体表观污染严重.

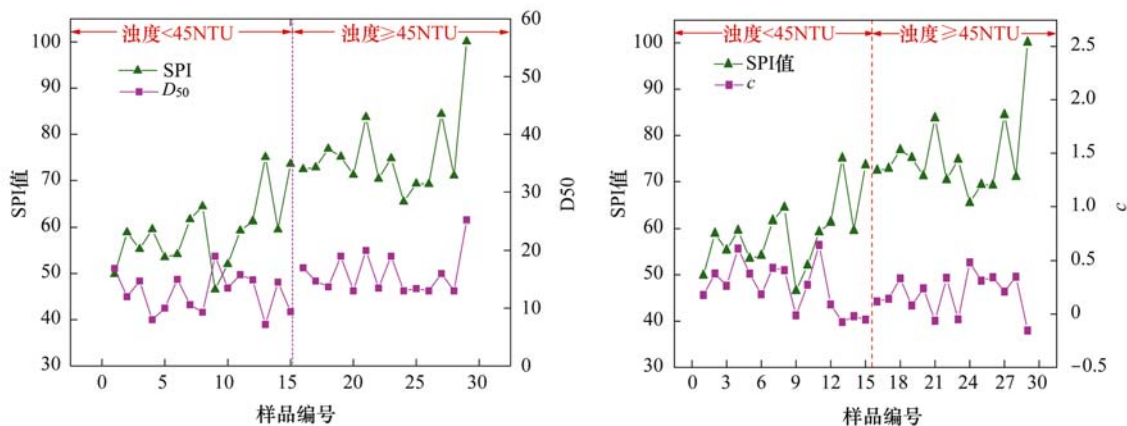


图 8 SPI 与粒度参数的散点关系

Fig. 8 Scatter plots of SPI and grain size parameters

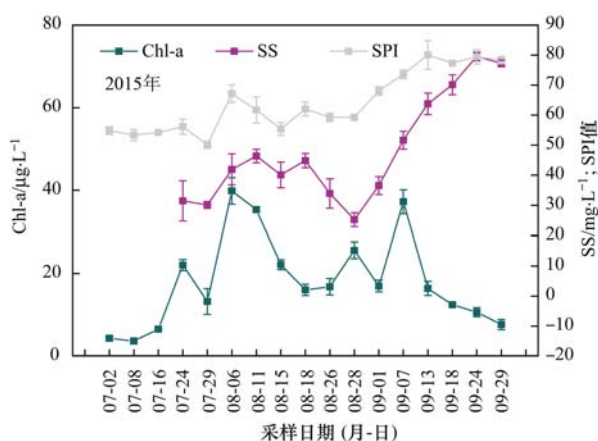


图 9 SPI、Chl-a 和 SS 的分布 (2015 年)

Fig. 9 Distribution diagram of SPI, Chl-a, SS (2015)

2.3 表观污染水体中悬浮颗粒物粒度分布的影响因素

2.3.1 生物作用的影响

Kostadinov 等^[25]指出, 当颗粒物中无机成分占主导时, 粒径分布一般遵循荣格普分布, 当夏季生物作用明显时, 水中存在大量浮游藻类絮体, 粒度分布则会呈现双峰或其他复杂分布. 已有研究表明, 藻类可以生长的温度区间为 15 ~ 35℃, 而最适宜藻类生长的水体温度为 29 ~ 30℃^[27]. 在 7 月底和 9 月初, 水体温度范围为 27.7 ~ 33.3℃, 平均温度为 29.3℃, 此时藻类生长速度较快, 各个采样点的悬浮颗粒物粒度分布曲线尾部出现了一个上升峰, 如图 10 中混合水样悬浮颗粒物粒度分布曲线, 同时 Chl-a 浓度也达到 40 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 左右 (如图 9), 用格筛把絮凝

藻类进行筛出后继续测量水中悬浮颗粒物的粒度分布, 筛除后即图 10 中无藻水样的粒度分布曲线, 从中可以看出尾部的上升峰消失. 为进一步验证这一结果, 文中对大量絮凝藻类的水体进行粒度检测, 粒度分布结果如图 10 所示, 纯藻的出峰位置和之前尾部上升峰的位置大致相同, 表明在这个时期藻类的生长等生物絮凝物对水中悬浮颗粒物粒度分布产生了一定的影响. 在这两个阶段 SPI 也相应地发生了改变. 表明生物作用对粒度分布产生影响时, 水体表观也有一致的响应. 图 4 中的 4 号点和 5 号点处于运河支流段, 河水流量较小, 并且船只较少, 水力扰动也小, 相比其他 3 个点, 可能更适合藻类的生长. 在 7 月底, 雨水频繁, 雨水的冲刷影响了藻类的

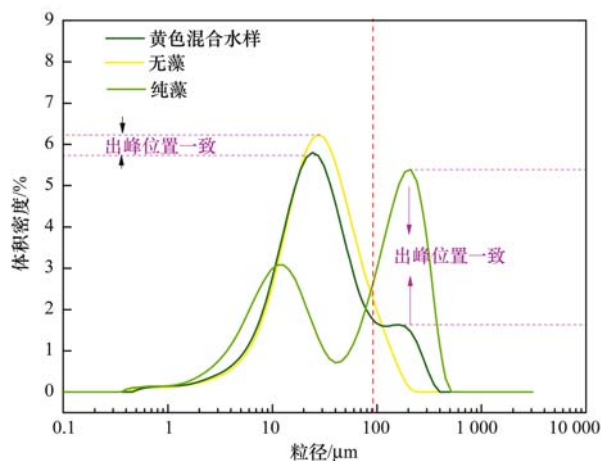


图 10 水中悬浮颗粒物粒度分布

Fig. 10 Frequency spectrum of the SPM grain size in water

聚集,并对水体中的污染物起到一定的稀释作用,使水体表观质量出现跃低值。但9月后期,水中浮游藻类含量降低,水中总悬浮颗粒物含量仍持续上升,表明还有其他作用对水中颗粒物产生了影响。

2.3.2 水动力条件的影响

运河水区域底质再悬浮作用很强,底层颗粒在强烈的水动力作用下发生再悬浮进入水体,一方面加大了水体中悬浮颗粒物的浓度,另一方面改变了悬浮颗粒物原有的粒度组分,因此有无再悬浮直接影响着水体表观和悬浮颗粒物粒度分布特征。

$C-M$ 图是帕塞加提出的^[28],该图是应用每个样品的 C 值(μm)为纵坐标和 M 值(μm)为横坐标绘成的双对数坐标图形。 C 值是粒度分析资料筛上累积曲线上颗粒含量1%处对应的粒径, M 值是累积曲线上50%处对应的粒径,即粒度中值。 C 值与样品中最粗颗粒的粒径相当,代表了水动力搅动开始搬运的最大能量; M 是中值,代表了水动力的平均能量。 $C-M$ 图可以提供关于悬浮颗粒物搬运状态和水动力强弱的信息^[12]。

渐变悬浮指在流体中悬浮颗粒物由下而上粒度

逐渐变细,密度逐渐变低。它常位于水流底部,一般由于涡流发育造成^[29];均匀悬浮常是渐变悬浮之上的上层水流搬运方式。在弱水流中可能不存在渐变悬浮,而是由均匀悬浮直接与底床接触。从图4可以看出,9月开始,表观污染指数持续增加,说明水体表观越来越差,而图9显示,9月以后,水中的SS也突然增大,并且主要是大颗粒物质的增加,所以本研究以9月为临界点做 $C-M$ 图,图11是9月前后颗粒物 $C-M$ 图,从图11(a)可以看出该长条形区域与 $C=M$ 直线平行, C 与 M 值成比例增减,说明9月以前,悬浮颗粒物主要是渐变悬浮,还未发生再悬浮作用;从图11(b)可以看出,在9月以后不仅有渐变悬浮,还存在均匀悬浮,表明由于再悬浮作用,悬浮物质已有部分达到表层,对样点所在水体的悬浮颗粒物粒度分布产生影响。从图9可以看出,在9月以后藻含量没有增加时,SPI值仍在增大,表明这个期间SPI的增大不是由于藻含量增加引起,而主要是再悬浮导致底质迁移至水体中,因此水中SS含量增加,SPI值增大。这也解释了9月以后水中悬浮颗粒物浓度持续上升,水体表观质量SPI值增大。

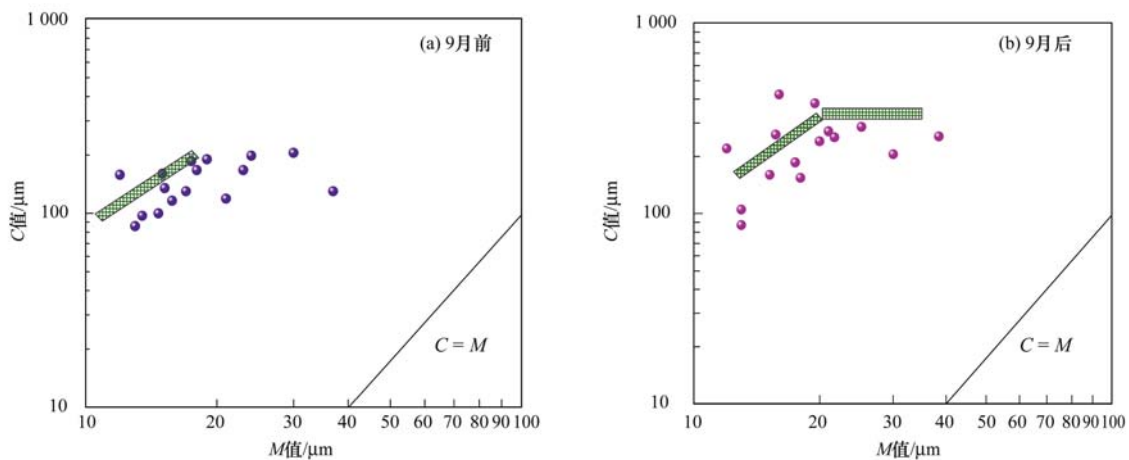


图 11 水中悬浮颗粒物表层 $C-M$ 图

Fig. 11 $C-M$ charts of SPM in water

3 结论

(1) 无机型城市景观水体中悬浮颗粒物具有相似的粒度分布特征,粒度分布以单峰分布为主。按照乌氏粒级标准,把它划分为7个组分,各组分粒级范围分别为小于 $3.8 \mu\text{m}$ 、 $3.8 \sim 16 \mu\text{m}$ 、 $16 \sim 32 \mu\text{m}$ 、 $32 \sim 64 \mu\text{m}$ 、 $64 \sim 122 \mu\text{m}$ 、 $122 \sim 280 \mu\text{m}$ 、大于 $280 \mu\text{m}$ 。

(2) 无机型城市景观水体中悬浮颗粒物对水体表观敏感组分是组分 II (粒级 $3.8 \sim 16 \mu\text{m}$) 和组分

IV (粒级 $32 \sim 64 \mu\text{m}$),SPI 值与组分 II 和组分 IV 体积分数关系具有分段性,分段节点是浊度为 45NTU 处。浊度小于 45NTU 时,SPI 值与组分 II 体积分数呈显著正相关,与组分 IV 体积分数呈显著负相关;当浊度大于等于 45NTU 时关系相反。通过对 SPI 与中值粒径及粒径参数的相关性分析得出,悬浮颗粒物浓度的增加主要是大颗粒物质的增加,表明水体发生了再悬浮作用。

(3) 生物作用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。生物因

子的影响主要表现为藻类等生物絮凝物的生长进而影响水体的粒度组分含量,造成水体表观污染;水动力条件的影响则是使水体底质发生再悬浮,部分沉降在底部的大颗粒物进入水体,导致水体的悬浮物浓度升高,表观污染严重。

参考文献:

- [1] 李如雪, 张震, 王振健, 等. 城市景观水体的开发与利用研究——以中国江北水城(聊城)为例[J]. 资源开发与市场, 2008, **24**(9): 831-833.
Li R X, Zhang Z, Wang Z J, *et al.* Study on development and sustainable utilization of urban landscape water in Liaocheng city [J]. Resource Development & Market, 2008, **24**(9): 831-833.
- [2] 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.
Li R Z, Liu K F, Qian J, *et al.* Nitrogen and phosphate pollution characteristics and eutrophication evaluation for typical urban landscape waters in Hefei city [J]. Environmental Science, 2014, **35**(5): 1718-1726.
- [3] 叶文尧. 京杭运河苏州段整治效益及港口调整设想[J]. 江苏交通, 2000, (10): 9-11.
Ye W Y. Suzhou section of the Beijing-Hangzhou canal management benefits and the idea of port adjustment[J]. Jiangsu Transportation, 2000, (10): 9-11.
- [4] 朱广伟. 运河(杭州段)沉积物污染特征、释放规律及其环境效应的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [5] 戴成华, 吴海霞, 张洪荣. 京杭运河(杭州城区段)水环境现状及整治措施[J]. 中国给水排水, 2014, **30**(9): 73-77.
Dai C H, Wu H X, Zhang H R. Current water environment of Hangzhou section of Beijing-Hangzhou grand canal and its improvement measures[J]. China Water & WasteWater, 2014, **30**(9): 73-77.
- [6] 范今朝, 汪波. 运河(杭州段)功能的历史变迁及其对杭州城市发展的作用[J]. 浙江大学学报(理学版), 2001, **28**(5): 583-590.
Fan J Z, Wang B. Historical changes of functions of the grand canal (Hangzhou section) and its role in development of Hangzhou city [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2001, **28**(5): 583-590.
- [7] 李君. 杭州市运河水系氮磷污染及底泥磷释放水动力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [8] 申杰. 城市景观水体表观污染的吸收光谱表征方法研究[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2012.
- [9] 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.
Chen M, Pan Y, Huang Y. Effect of non-dissolved substances on landscape water's apparent pollution of Suzhou [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, **8**(9): 3689-3694.
- [10] 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.
Zhou L B, Tan Y H, Huang L M, *et al.* The advances in the aquatic particle/biomass size spectra study [J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, **30**(12): 3319-3333.
- [11] 王飞. 近期长江河口最大浑浊带河道潮流和悬沙特性及泥沙再悬浮研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
- [12] 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.
Zeng M, Fan D J, Sun X G, *et al.* The grain-size distribution of the suspended particulate matter in the Huanghe estuary and its adjacent area in winter [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, **32**(4): 129-138.
- [13] Li X G, Song J M, Yuan H M, *et al.* CO₂ flux and seasonal variability in the turbidity maximum zone and surrounding area in the Changjiang river estuary [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2015, **33**(1): 222-232.
- [14] Yang Y P, Li Y T, Sun Z H, *et al.* Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze river estuary: the trends and causes [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, **24**(1): 129-142.
- [15] 严肃庄, 曹沛奎. 长江口悬浮体的粒度特征[J]. 上海地质, 1994, (3): 50-58.
Yan S Z, Cao P K. The grain-size characteristics of the suspended matters in the Changjiang estuary [J]. Shanghai Geology, 1994, (3): 50-58.
- [16] 黄珏, 陈晓玲, 陈莉琼, 等. 鄱阳湖高浑浊水体悬浮颗粒物粒径分布及其对遥感反演的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, **34**(11): 3085-3089.
Huang J, Chen X L, Chen L Q, *et al.* Particles size distribution and its influence on remote sensing retrieval of turbid Poyang lake [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, **34**(11): 3085-3089.
- [17] 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.
Zhang L, Chen X L, Huang J, *et al.* The distribution pattern of the mass concentration and grain size of the suspended particulate matters of the Poyang lake in wet and dry seasons [J]. Journal of Huazhong Normal University (Natural Science), 2014, **48**(5): 743-750.
- [18] 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.
- [19] 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. 海洋学报, 1992, **14**(2): 81-90.
Yang Z S, Guo Z G, Wang Z X, *et al.* The macro pattern of the suspension carrying from yellow sea and the east sea in China continental shelf to the eastern sea area [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, **14**(2): 81-90.
- [20] 庞重光, 韩丹岫, 赵恩宝. 黄东海悬浮泥沙浓度的垂向分布特征及其回归模型[J]. 泥沙研究, 2009, (5): 69-75.
Pang C G, Han D X, Zhao E B. Characteristics and regression equations for vertical distribution of suspended sediment concentration in the yellow sea and east China sea [J]. Journal of Sediment Research, 2009, (5): 69-75.
- [21] 李建超, 乔璐璐, 李广雪, 等. 基于 LISST 数据的冬季南海悬浮体分布[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, **33**(5): 13-25.

- Li J C, Qiao L L, Li G X, *et al.* Distribution of winter suspended particulate matters in the south yellow sea based on LISST data[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, **33**(5): 13-25.
- [22] 贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 等. 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[J]. *环境科学*, 2016, **37**(3): 970-979.
- Gong D Y, Pan Y, Huang Y, *et al.* Grain size distribution characteristics of suspended particulate matter as influenced by the apparent pollution in the eutrophic urban landscape water body[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(3): 970-979.
- [23] 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.
- [24] 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.
- Pan Y, Huang Y, Shen J, *et al.* Absorption spectrometry characterization for the apparent pollution of urban water[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2014, **21**(1): 42-47.
- [25] Kostadinov T S, Siegel D A, Maritorena S. Retrieval of the particle size distribution from satellite ocean color observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(C9): C09015.
- [26] 李功振, 许爱芹. 京杭大运河(徐州段)砷的形态的分步特征研究[J]. *环境科学与技术*, 2008, **31**(1): 69-71.
- Li G Z, Xu A Q. Components of sediments and species of arsenic in Beijing -Hangzhou grand canal at northern section of Jiangsu province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **31**(1): 69-71.
- [27] 黄钰铃, 陈明曦, 刘德富, 等. 不同氮磷营养及光温条件对蓝藻水华生消的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2008, **36**(9): 93-100.
- Huang Y L, Chen M X, Liu D F, *et al.* Effect of nitrogen, phosphor, light and water temperature on the formation and disappearance of blue-green algae bloom [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2008, **36**(9): 93-100.
- [28] 宫智凯, 杨兴. C-M 图在判别沉积环境中的应用[J]. *科技创业家*, 2011, (5): 166.
- Gong Z K, Yang X. Application of C-M diagram in distinguishing sedimentary environment [J]. *Technological Pioneers*, 2011, (5): 166.
- [29] Fettweis M, Francken F, Pison V, *et al.* Suspended particulate matter dynamics and aggregate sizes in a high turbidity area[J]. *Marine Geology*, 2006, **235**(1-4): 63-74.

CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM _{2.5} at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring	 YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
¹³ C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO ₂ During Youth Olympic Games, Nanjing	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions	 LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs	 HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons	 WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization	 ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area	 ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example	LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO ₂ Using QCM-D and AFM	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N ₂ H ₄ Addition	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits	 WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA)	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO ₂ Emission from Soils of Summer-maize Field	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City	 CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin	 LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvio-aquic Soil of Hebei Plain	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration	 CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSWI Fly Ash with Various Particle Sizes	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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
赵进才 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12月15日 第37卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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