

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第10期

Vol.39 No.10

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国典型城市环境大气挥发性有机物特征比值	王鸣, 陈文泰, 陆思华, 邵敏 (4393)
2015年北京大气 VOCs 时空分布及反应活性特征	张博韬, 安欣欣, 王琴, 闫贺, 刘保献, 张大伟 (4400)
北京市建筑类涂料 VOCs 排放清单编制技术方法及应用	邓子钰, 高美平, 王庆玮, 聂磊 (4408)
基于实测的建筑类涂料挥发性有机物 (VOCs) 含量水平及组分特征	高美平, 邓子钰, 聂磊, 邵霞, 安小栓 (4414)
2014~2016年京津冀沿山城市空气质量首要污染物特征分析	王晓彦, 王帅, 朱莉莉, 许荣, 李健军 (4422)
北京市大气环境 PM _{2.5} 和 PM ₁ 及其碳质组分季节变化特征及来源分析	樊啸辰, 郎建奎, 程水源, 王晓琦, 吕喆 (4430)
南京春季北郊地区大气 PM _{2.5} 中主要化学组分及碳同位素特征	周一鸣, 韩珣, 王瑾瑾, 陈善莉, 沈潇雨, 章炎麟, 朱彬, 郭照冰 (4439)
热脱附法快速分析大气细颗粒物中非极性有机物	马英歌, 吴霞, 彭梦梦, 冯加良, 郁建珍, 乔利平, 周敏, 朱书慧, 李莉 (4446)
杭州市空气细颗粒物浓度与哮喘就诊人次的关系	王安旭, 陈曦, 宋从波, 应颂敏, 李倩, 吴琳, 毛洪钧 (4457)
基于远程通讯技术的混动公交车 SCR 系统运行及 NO _x 排放特征	杨强, 胡馨遥, 黄成, 陈昀, 刘佳栋, 李莉, 熊忠亮, 唐伟 (4463)
基于环境风险排序的流域优先污染物筛选	李奇峰, 吕永龙, 王佩, 张悦清 (4472)
重庆远郊丰都雪玉洞流域大气无机氮湿沉降变化特征与来源分析	段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 胡刘婵, 曾泽, 吕现福 (4479)
黑龙江凉水国家级自然保护区大气氮沉降特征	宋蕾, 田鹏, 张金波, 金光泽 (4490)
脱甲河水系 N ₂ O 关键产生过程及氮素来源探讨	赵强, 吕成文, 秦晓波, 吴红宝, 万运帆, 廖育林, 鲁艳红, 李健陵 (4497)
生物炭添加对曝气人工湿地脱氮及氧化亚氮释放的影响	王宁, 黄磊, 罗星, 梁岩, 王燕, 陈玉成 (4505)
黑麦草对水体中镉-壬基酚复合污染的生理响应及修复	史广宇, 李中义, 张路, 程媛媛, 陈宏伟, 施维林 (4512)
城市黑臭水体的吸收特性分析	丁潇蕾, 李云梅, 吕恒, 朱利, 温爽, 雷少华 (4519)
岷江上游水体中 DOM 光谱特征的季节变化	范诗雨, 秦纪洪, 刘堰杨, 孙辉 (4530)
防渗型生物滞留中试系统降雨径流水质与三维荧光特征	林修咏, 王书敏, 李强, 谢云成 (4539)
基于δ ¹⁵ N和δ ¹⁸ O的农业区地下河硝酸盐污染来源	盛婷, 杨平恒, 谢国文, 洪爱花, 曹聪, 谢世友, 时伟宇 (4547)
垃圾填埋场地下水溶解性有机物光谱特征	彭莉, 虞敏达, 何小松, 刘思佳, 张鹏 (4556)
铅负载颗粒沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附行为	梁舒静, 林建伟, 詹艳慧, 汪振华, 李雅灵, 何思琪, 陈海洋, 唐凤霞, 李志强 (4565)
基于紫外光谱分析的腐殖质混凝控制	张北辰, 张晓蕾, 秦兰兰, 黄海鸥 (4576)
AAO 工艺联合臭氧削减污水中微量有机污染物及遗传毒性	李默, 汪震哲, 陈志强, 温沁雪 (4584)
抗生素抗性基因在两级废水处理系统中的分布和去除	李奥林, 陈吕军, 张衍, 代天娇, 田金平, 刘锐, 温东辉 (4593)
磁性壳聚糖凝胶球固定厌氧氨氧化菌对废水氨氮去除的影响	刘志文, 陈琛, 彭晓春, 谢武明, 黄镇扬, 韩庆吉 (4601)
海藻糖强化厌氧氨氧化耦合反硝化工艺处理高盐废水的脱氮除碳效能	杨振琳, 于德爽, 李津, 王晓霞, 冯莉 (4612)
低温下 A ² /O-BAF 反硝化除磷脱氮特性	黄剑明, 赵智超, 郑隆举, 邵兆伟, 安芳娇, 陈永志 (4621)
O ₃ -BAC 深度处理石化废水厂尾水的特性及菌群结构分析	张超, 单明皓, 许丹宁, 古明哲, 代蓓蓓, 纪轩, 孙井梅 (4628)
基于 MBR 不同种泥短程硝化启动的微生物群落结构分析	吴鹏, 陈亚, 张婷, 沈耀良, 徐乐中 (4636)
3 种不同工艺切换下活性污泥菌群结构及代谢产物对污泥沉降性能的影响	温丹丹, 袁林江, 陈希, 王洋, 申童童, 刘小博 (4644)
硫酸盐还原菌活性污泥胞外聚合物对环丙沙星的吸附机制	张会群, 贾妍艳, 方荷婷, 阴琳婉, 吕慧 (4653)
包埋活性污泥反硝化性能的快速提高及群落分析	杨宏, 徐富, 孟琛, 苏姗, 袁星 (4661)
中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析	尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红 (4670)
典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价	马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 曾庆良, 王锐 (4684)
秸秆与化肥减量配施对菜地土壤温室气体排放的影响	黄容, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 吕盛, 罗梅 (4694)
不同肥料施用对设施蔬菜地 NH ₃ 挥发和 N ₂ O 排放的影响	山楠, 韩圣慧, 刘继培, 陈清, 袁玉玲, 王立刚, 李虎 (4705)
施肥类型和水热变化对农田土壤氮素矿化及可溶性有机氮动态变化的影响	田飞飞, 纪鸿飞, 王乐云, 郑西来, 辛佳, 能惠 (4717)
长期不同施肥量对全程氨氧化细菌丰度的影响	王梅, 王智慧, 石孝均, 蒋先军 (4727)
典型绿洲不同土壤类型有机碳含量及其稳定碳同位素分布特征	陈新, 贡璐, 李杨梅, 安申群, 赵晶晶 (4735)
凹凸棒石及其改性材料对土壤镉生物有效性的影响与机制	陈展祥, 陈传胜, 陈卫平, 焦文涛 (4744)
天然有机物活化过硫酸盐降解土壤有机污染物效果	刘琼枝, 廖晓勇, 李尤, 龚雪刚, 曹红英, 罗俊鹏 (4752)
水分管理和外源硒对水稻吸收累积铅的影响	万亚男, 刘哲, Aboubacar Younoussa Camara, 余垚, 王琪, 李花粉 (4759)
窖水中微生物降解污染物的关键细菌	杨浩, 杨晓妮, 张国珍, 王宝山, 张翔, 李健 (4766)
砷氧化菌对胡敏酸络合 As(Ⅲ) 的氧化作用	李泽姣, 崔岩山, 尹乃毅, 蔡晓琳, 都慧丽, 王鹏飞 (4778)
海域高温油田 1 株耐高温耐盐硫酸盐还原菌的筛选与生理特性及活性抑制	杨春璐, 苑美玉, 史荣久, 闫鹏举, 赵峰, 韩斯琴, 张颖 (4783)
1 株耐盐异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Zobellella</i> sp. B307 的分离及脱氮特性	白洁, 陈琳, 黄潇, 胡春辉, 赵阳国, 李岍然 (4793)
1 株镰刀菌属 KY123915 的分离及其对 17β-雌二醇的降解特性	吴蔓莉, 祝长成, 祁燕云, 时艺馨, 徐会宁, 杨瑾如 (4802)
氟喹诺酮对垂直流人工湿地性能及微生物群落的影响	李新慧, 郑权, 李静, 王晓慧, 海热提 (4809)
林可霉素菌渣堆肥微生物群落多样性分析	任省涛, 郭夏丽, 芦阿度, 张倩倩, 郭笑盈, 王岩, 王连忠, 张宝宝 (4817)
DEP 对蚯蚓抗氧化酶系的影响及 DNA 损伤	平令文, 李现旭, 张翠, 宋佩佩, 王金花, 朱鲁生, 王军 (4825)
生活垃圾焚烧灰灰矿物学特性及重金属分布	李建陶, 曾鸣 (4834)
《环境科学》征订启事 (4429) 《环境科学》征稿简则 (4471) 信息 (4529, 4777, 4816)	

城市黑臭水体的吸收特性分析

丁潇蕾¹, 李云梅^{1*}, 吕恒¹, 朱利², 温爽¹, 雷少华¹

(1. 南京师范大学江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

摘要: 黑臭水体是城市水环境的一个严重问题, 对城市黑臭水体光学特性进行分析, 是利用遥感技术手段进行黑臭识别的前提与基础。2016~2017 年采集了长沙、南京和无锡的城市黑臭水体共计 85 个样点, 非黑臭水体共计 80 个样点, 并对水样的悬浮物等水质参数浓度以及水体组分的吸收系数进行了测量。结果表明: ①黑臭水体的总颗粒物吸收系数、非色素颗粒物吸收系数总体上高于非黑臭水体。②黑臭水体与非黑臭水体的 CDOM 吸收系数有明显的差异。由此可用 CDOM 吸收特征波段 440 nm 和不同波段范围内拟合的吸收系数曲线斜率对黑臭水体进行区分。城市黑臭水体吸收特性的分析, 将为黑臭水体的遥感识别和监测提供有效的技术支撑。黑臭水体中的高 CDOM 浓度, 可以作为遥感识别黑臭水的一个重要参考。

关键词: 水色遥感; 城市黑臭水体; 吸收特性; 水质参数; CDOM; 光谱斜率

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)10-4519-11 DOI: 10.13227/j.hjxx.201802014

Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water

DING Xiao-lei¹, LI Yun-mei^{1*}, LÜ Heng¹, ZHU Li², WEN Shuang¹, LEI Shao-hua¹

(1. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

Abstract: The urban black-odor water body has become a serious problem of urban water environment and identifying their optical characteristics in urban areas is the prerequisite and basis for their detection by remote sensing. A total of 85 samples of urban black-odor water, from Changsha, Nanjing, and Wuxi, were collected from 2016 to 2017, and a total of 80 samples were collected from non-black-odor (smelly) water samples. The water quality parameters such as suspended matter and the absorption coefficient were measured. The results showed that: ①The total black-odor water body particulate matter absorption coefficients and non-pigmented particulate matter absorption coefficients were generally higher than those for non-black-odor water bodies and they had a certain degree of discrimination at 440 nm, but their effect was not significant. The absorption of relatively high levels of particulate matter in black-odor water was mainly due to high absorption of non-pigmented particles. In the data collected, non-pigmented particles in black-odor water accounted for more than 50% of the total particles. ②The Colored Dissolved Organic Matter (CDOM) absorption coefficients for black-odor water bodies and non-black-odor water bodies differed. The average absorption coefficient of CDOM at 440 nm for black-odor water bodies was 1.7 times higher than that for non-black-odor water bodies. Thus, the black-odor water body can be distinguished by using the slope of the absorption coefficient curve fitted in the characteristic wavelength band of 440 nm, as well as in different wavelength bands; the overall effect is good. However, as the wavelength increases, the discrimination effect decreases. Analysis of the absorption characteristics of urban black-odor water bodies will provide effective technical support for their detection by remote sensing and supervision, and the density of CDOM in black-odor water was generally high, which could be used as an important reference for identification.

Key words: water color remote sensing; urban black-odor water body; absorption characteristics; water quality parameters; CDOM; spectral slope

城市水体的黑臭现象是人们通过视觉和嗅觉对水体的一种综合感观, 通常是指散发出刺鼻、恶心的气味, 呈现黑色或灰黑色, 生态功能丧失的水体^[1]。随着我国城市化进程的加快, 城市河流的生态系统也面临着重大的挑战。由于工业废水和生活污水的排放, 许多水体发黑发臭, 严重影响了人们的生活环境。

目前已有许多学者开展了城市黑臭水体形成机制的研究^[2,3], 认为当水体遭受严重有机污染时, 有机物的好氧分解使水体中耗氧速率大于复氧速

率, 造成水体缺氧, 致使有机物降解不完全、速度减缓, 厌氧生物降解过程生成硫化氢、胺、氨、硫醇等发臭物质, 同时形成 FeS、MnS 等黑色物质, 致使水体发黑发臭。此外, 水体有机负荷、Fe 和 Mn 等金属污染、底泥污染和水动力条件等环境因素的复杂性, 影响了黑臭水体形成的生物化学过

收稿日期: 2018-02-02; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503902)

作者简介: 丁潇蕾(1994~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水色遥感, E-mail: dingxiaolei_94@163.com

* 通信作者, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

程,导致黑臭水体的水质参数指标、颜色、气味等具有差异性^[4,5].因此,有学者尝试建立黑臭水体的评价模型,如刘成等对目前国内外各类河道黑臭评价模型进行比较,筛选出多个模型进行分析,比较后认为值得推广研究的评价模型有多元线性回归模型和综合水质标识指数法.阮仁良等在水质评价方法里筛选出污染指数法、有机污染综合评价法、溶解氧值法进行比较,并提出有机污染综合评价法是水质黑臭评价的最佳方法^[6,7].

上述研究主要从致黑致臭的水质参数指标研究黑臭水体的形成和识别,并不能实现对全区域黑臭水体的识别和监测,因此,有学者尝试利用遥感技术,从水色指标变化的角度开展对黑臭水体识别的研究.这方面最早的研究是关于“黑水团”的研究.

黑水团(在内陆湖泊中也被称为湖泛)是指在适当的气象条件下,由于藻类的高度聚积使得水体突然发黑发臭的水污染现象.黑水团现象的发生,可以看作是湖泊环境诸多要素对重度湖泊富营养化的一种剧烈响应.黑水团具有水体发黑发臭,水生生物大量死亡,水体含氧量低、高营养盐负荷等一些显著的特征^[8,9].Duan等^[10]分析了太湖黑水团的吸收特性,认为浮游植物和有色可溶性有机物的高吸收,以及较低的后向散射,使水体呈现黑色.张思敏等^[11]对比分析了太湖黑水团区与其他区域的吸收特性,认为黑水团的颗粒物吸收系数和有色可溶性有机物(CDOM)吸收系数均高于正常水体.此外,温爽等^[12]构建了基于GF-2影像的城市黑臭水体遥感识别算法,并分析了南京市主城区黑臭水体的空间分布和环境特点.靳海霞等^[13]基于水体岸线提取结果和反演的各类水质参数的指数分布,结合水体黑臭程度遥感判别指标,对北京市9处河段进行判别,其黑臭水体识别与官方公布的结果基本一致.

由于遥感技术宏观性的特点,使其可以同步对城镇河网黑臭水体进行监测,因此,研发黑臭水体遥感识别模型,必将在城镇黑臭水体监管中发挥重要的作用.然而,目前对黑臭水体遥感监测的研究才刚刚起步,对黑臭水体光学特征的研究还不够深入,对水质参数和固有光学特性对遥感信息的影响机制的研究还开展得很少,研究主要集中在遥感反射率对黑臭水体的分类识别,算法缺少机制性的支持.

本研究拟通过对长沙、南京、无锡这3个城市的河流进行现场采样和室内分析,探讨城市黑臭水

体中色素颗粒物、非色素颗粒物、有色可溶性有机物的吸收特性,通过水体组分吸收特征的变化,揭示黑臭水体与其它水体的差异性,寻找黑臭水体与其它水体的识别指标,以期构建黑臭水体遥感识别模型提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区与样点分布

2016~2017年在长沙、南京、无锡进行地面遥感实验,采集水样并进行水质参数和水体吸收系数测量.样点分布见图1,采样时间与采样数量见表1.

长沙市位于中国中南部的长江以南地区(东经111°53′~114°5′,北纬27°51′~28°40′),城市中主要河流有湘江、浏阳河、捞刀河、靳江等.2016年6月19日在长沙市建成区进行采样,共计34个样点,属于黑臭水体的有15个.

南京市位于长江下游中部地区,江苏省西南部(东经118°22′~119°14′,北纬31°14′~32°37′),有秦淮河、金川河、玄武湖等大小河流湖泊,境内共有大小河道120条.2016年1月19日起至2017年5月10日止,共计采集85个样点,属于黑臭水体的有61个.

无锡市位于江苏南部,地处长江三角洲平原(东经119°31′~120°36′,北纬31°07′~32°02′).无锡水网密集,市区以京杭大运河为中轴构成河网水系,并通达江湖,共计采集46个样点,属于黑臭水体的有9个.

表1 采样时间与采样点数量

Table 1 Time and number of sampling points			
采样城市	采样日期(年-月-日)	采样数目	黑臭水样数目
长沙	2016-06-19	34	15
南京	2016-01-19	22	10
南京	2016-04-08	6	6
南京	2016-04-10	13	13
南京	2016-04-19	13	13
南京	2016-12-31	4	4
南京	2017-05-10	27	15
无锡	2017-08-05	46	9

1.2 数据采集

本实验数据的采集主要包括室外实验和室内实验两部分.室外实验主要包括水样的采集,同时记录对应点位的pH、溶解氧、氧化还原电位等信息.室内实验包括叶绿素浓度等水质参数和水体组分吸收系数的测量.

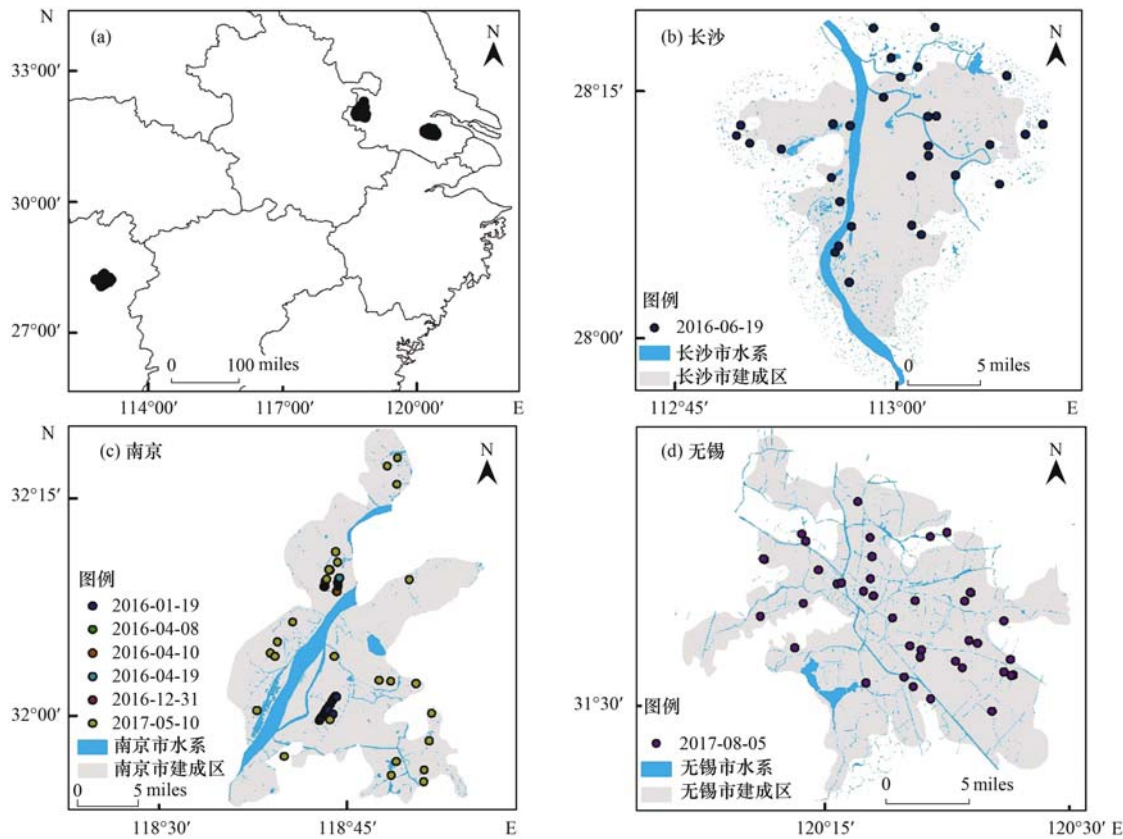


图 1 采样点分布示意
Fig. 1 Distribution of sampling points

1.2.1 黑臭水体判别

在实际采样过程中，根据住建部 2015 年发布的《城市黑臭水体整治工作指南》^[14]，同时结合感官(嗅觉上为恶臭，视觉上呈现黑色)对河段进行分类，将城市河段区分为黑臭水体和正常水体。《指南》以透明度、溶解氧、氧化还原电位

和氨氮为指标，将黑臭水体细分为“轻度黑臭”和“重度黑臭”，其分级标准和相关指标测定方法见表 2。本研究中轻度黑臭与重度黑臭的数据量差异较大，重度黑臭水体仅有 5 个样本，因而将轻度黑臭与重度黑臭统一归为黑臭水体进行研究。

表 2 城市黑臭水体污染程度分级标准

Table 2 Urban black-odor water body pollution grading standards

特征指标	轻度黑臭	重度黑臭	测定方法	备注
透明度/cm	10 ¹⁾ ~25	<10	塞氏盘	现场原位测量
溶解氧/mg·L ⁻¹	0.2 ~2.0	<0.2	电化学法	现场原位测量
氧化还原电位/mV	-200 ~50	<-200	电极法	现场原位测量
氨氮/mg·L ⁻¹	8.0 ~15	>15	纳氏试剂光度法	水样经 0.45 μm 过滤后测量

1) 水深不足 25 cm 时，该指标按水深的 40% 取值

1.2.2 水质参数测量

水质参数包括现场测量和实验室分析测量两部分，其中，现场测量的参数包括透明度、溶解氧和氧化还原电位。

实验室分析测量的水质参数主要包括总悬浮物(TSM)、无机悬浮物(ISM)、有机悬浮物(OSM)、叶绿素 a(Chla)、溶解性有机碳(DOC)、总磷(TP)、总氮(TN)。

悬浮物浓度测量使用煅烧法。用直径为 47 mm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)在 450℃ 的高温下煅烧 4~6 h，将膜冷却并进行称量，过滤一定体积的水样后在恒温烘干箱中以 110℃ 烘 4~6 h。烘干称重得到质量，减去空白膜的质量，即为总悬浮物的质量。高温煅烧烘干后的膜，称重减去空白膜的质量得到无机悬浮物的质量。最后计算得到总悬浮物(TSM)、无机悬浮物(ISM)、有机悬浮物浓度

(OSM)^[15].

叶绿素 a 浓度测量使用“热乙醇法”^[16]. 用 47 mm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤水样, 并将滤膜冷冻 48 h 以上. 用 90% 的热乙醇萃取并使用分光光度计测量 665 nm、750 nm 处的吸光度, 加入一滴 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的稀盐酸酸化 1 min, 测定酸化后的消光度, 从而计算叶绿素 a 浓度.

溶解性有机碳采用总有机碳分析仪测量. 首先用直径为 47 mm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤一定的水样, 然后利用岛津总有机碳分析仪测量溶解性有机碳.

总氮采用过硫酸钾高压消解法测定^[17]. 加入过硫酸钾和氢氧化钠的混合溶液到一定体积的水样中, 在 120℃ 下加热分解 30 min, 冷却至室温, 水样中的氨氮、亚硝酸盐、有机氮被氧化成硝酸盐. 配置不同浓度梯度的氮标, 测量其吸光度. 取上清液, 用紫外分光光度计测量 210 nm 处的吸光度, 根据氮标的浓度与吸光度之间的线性关系计算得出总氮的浓度.

总磷采用钼锑抗分光光度法^[18]. 在酸性条件下, 水样中的正磷酸盐与钼酸铵、酒石酸锑钾反应, 生成磷钼杂多酸. 将消解的水样冷却至一定温度后, 取部分样品, 加入抗坏血酸溶液, 充分混匀, 生成磷钼蓝(蓝色络合物), 然后测量 700 nm 处的吸光度值, 以超纯水做参比, 进而计算水中的总磷浓度值.

1.2.3. 水体组分吸收系数的测量

水体组分的吸收系数包括总颗粒物吸收系数(a_p)、色素颗粒物吸收系数(a_{ph})、非色素颗粒物吸收系数(a_d)和有色可溶性有机物(colored dissolved organic matter, CDOM)的吸收系数(a_g).

总颗粒物的吸收系数使用定量滤膜技术(QFT)测定^[19]. 用直径为 25 mm 玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤水样, 用同样湿润程度的空白滤膜作为参比, 在紫外分光光度计下测量滤膜上颗粒物的吸光度, 并且以 750 nm 处吸光度为零值校正, 得到总颗粒物的吸收系数.

用一定体积的次氯酸钠溶液漂白滤膜上的色素颗粒物, 漂白 15 min 后用超纯水淋洗. 使用紫外分光光度计测定非色素颗粒物的吸收系数. 总颗粒物吸收系数减去非色素颗粒物的吸收系数即为色素颗粒物的吸收系数.

CDOM 吸收系数采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜对滤液进行二次过滤, 以超纯水做参比, 用紫外分

光光度计测定其吸光度, 并且以 700 nm 处的吸光度为零值进行散射效应的校正, 计算得到 CDOM 的吸收系数^[19].

2 结果与讨论

2.1 城市黑臭水体水质参数特征

2016 ~ 2017 年采集了长沙、南京和无锡的城市黑臭水体共计 85 个样点, 非黑臭水体共计 80 个样点.

表 3 为实验采集水体的水质参数数据. 从表中看出, 黑臭水体与非黑臭水体的 Chla 浓度变化范围都较大, 分别为 $1.23 \sim 272.15 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.02 \sim 343.05 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, 二者的 Chla 均值分别为 $(28.56 \pm 28.88) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 与 $(29.22 \pm 51.36) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$.

黑臭水体与非黑臭水体的总悬浮物浓度差异不大, 但黑臭水体中的有机悬浮物浓度较高. 黑臭水体中的有机悬浮物浓度高达 57%, 而非黑臭水体中有机悬浮物浓度则仅占总悬浮物浓度的 32%.

黑臭水体与非黑臭水体均值差异较大的水质参数是溶解性有机碳和总氮总磷. 其中, 黑臭水体中的溶解性有机碳浓度均值是非黑臭水体均值的两倍, 这表明水体中含有更高的生物降解的碎屑物质. 推测其产生的原因是城市水体中的富营养化现象导致藻类等浮游植物大量繁殖, 在藻类的降解过程中消耗了大量的氧气, 使水体表层处于厌氧状态, 同时释放大量的溶解性有机碳^[5]; 黑臭水体的总氮浓度均值 $(21.53 \pm 13.00) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 比非黑臭水体高 3 倍. 类似地, 黑臭水体的总磷浓度均值 $(1.63 \pm 1.11) \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 也比非黑臭水体高出 3 倍多. 正是由于黑臭水体中具有相对较高的氮磷浓度, 使得氮磷物质与一般的碳水化合物一起参与耗氧过程, 而含氮有机物降解的耗氧量远大于含碳有机物的耗氧量, 这使得水体中的溶解氧快速降低, 导致水质恶化, 发黑发臭^[4].

表 4 为 2016 ~ 2017 长沙、南京和无锡这 3 个城市实测的黑臭水体的水质参数. 不同城市黑臭水体的 Chla 浓度也略有差异. 无锡黑臭水体的 Chla 浓度均值最高 $[(80.61 \pm 90.13) \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}]$, 变化范围较大. 可能的原因是无锡的多条河流与太湖相连通, 而采样时间处于夏季, 该季节太湖的浮游藻类较多导致河道中 Chla 浓度增大. 长沙、南京和无锡市黑臭水体中的 DOC 浓度与悬浮物浓度较为接近. 其中, 南京黑臭水体的有机悬浮物占比最高, 达到 62%, 无锡黑臭水体的有机悬浮物占比最低, 仅为

36%。南京市黑臭水体中的总氮浓度最高, 均值达到 $(26.00 \pm 12.60) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 明显高于长沙市 $[(14.08 \pm 7.89) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 和无锡市 $[(9.69 \pm 5.27) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}]$ 的总氮浓度均值。3 个城市黑臭水体的水质参数存在一定的差异, 但并无明显的区域性特点。

表 3 实验观测的城市黑臭与非黑臭水体的水质参数

项目	黑臭		非黑臭	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
Chla/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.23 ~ 272.15	28.56 $\pm$ 28.88	0.02 ~ 343.05	29.22 $\pm$ 51.36
DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	2.04 ~ 27.67	9.18 $\pm$ 4.50	1.85 ~ 17.10	5.08 $\pm$ 2.08
TSM/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	6.91 ~ 297.50	47.67 $\pm$ 42.03	4.00 ~ 337.00	43.55 $\pm$ 58.60
ISM/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	0.25 ~ 241.67	20.52 $\pm$ 37.16	1.07 ~ 315.50	29.42 $\pm$ 51.97
OSM/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.91 ~ 57.25	27.15 $\pm$ 13.70	1.00 ~ 116.40	14.13 $\pm$ 15.67
TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.37 ~ 47.81	21.53 $\pm$ 13.00	0.46 ~ 30.35	7.38 $\pm$ 5.47
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.19 ~ 4.05	1.63 $\pm$ 1.11	0.04 ~ 2.30	0.52 $\pm$ 0.44

表 4 不同城市黑臭水体的水质参数

项目	长沙		南京		无锡	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
Chla/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.23 ~ 21.13	7.41 $\pm$ 5.64	3.05 ~ 122.76	32.43 $\pm$ 29.64	13.72 ~ 272.15	80.61 $\pm$ 90.13
DOC/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.94 ~ 23.60	9.06 $\pm$ 5.59	2.04 ~ 27.67	10.21 $\pm$ 4.37	3.98 ~ 19.55	7.03 $\pm$ 4.33
TSM/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	12.40 ~ 70.90	33.29 $\pm$ 17.62	6.91 ~ 297.50	47.08 $\pm$ 44.50	7.85 ~ 91.67	44.29 $\pm$ 29.36
ISM/ $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	1.40 ~ 31.20	16.86 $\pm$ 10.58	0.25 ~ 241.67	17.86 $\pm$ 40.47	2.32 ~ 76.25	28.40 $\pm$ 26.67
OSM/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	7.93 ~ 49.30	16.43 $\pm$ 12.42	1.91 ~ 57.25	29.22 $\pm$ 13.43	4.30 ~ 50.00	15.88 $\pm$ 12.15
TN/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	3.20 ~ 28.94	14.08 $\pm$ 7.89	0.37 ~ 47.81	26.00 $\pm$ 12.60	3.54 ~ 21.27	9.69 $\pm$ 5.27
TP/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	0.21 ~ 2.69	1.36 $\pm$ 0.85	0.30 ~ 4.05	1.90 $\pm$ 1.13	0.55 ~ 2.51	1.31 $\pm$ 0.54

2.2 城市黑臭水体吸收特征

进入水体的光被水体组分吸收, 形成衰减, 水体对光的吸收作用可以用吸收系数表示^[20]。影响内陆水体吸收特性的物质主要有 4 种: 纯水 (pure water)、浮游植物 (phytoplankton)、非色素悬浮物 (tripton) 及黄色物质 (CDOM)。某一波段的吸收系数可表示为各组分吸收系数之和, 即:

$$a = a_w + a_{ph} + a_d + a_g \tag{1}$$

式中, a_w 、 a_{ph} 、 a_d 和 a_g 分别为纯水、色素颗粒物、非色素颗粒物和黄色物质的吸收系数 (m^{-1})^[21]。

不同城市间黑臭水体的吸收系数差异较小 (表 5), 但是其主要影响因素不同, 长沙与南京两市以非色颗粒物吸收占主导, 而无锡市则是色素颗粒物吸收比例较高, 这与太湖的浮游藻类较多有一定关系。不同城市的吸收系数光谱特征并未呈现明显的区域性特点, 因而在之后的分析中将各城市样点混

表 5 不同城市黑臭水体的吸收系数/ m^{-1}

项目	长沙		南京		无锡	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
$a_p(440)$	1.46 ~ 11.63	3.57 $\pm$ 2.99	1.65 ~ 18.08	3.67 $\pm$ 3.06	2.25 ~ 13.96	5.74 $\pm$ 3.21
$a_d(440)$	0.55 ~ 5.38	2.17 $\pm$ 1.41	0.83 ~ 13.94	2.77 $\pm$ 2.55	1.04 ~ 4.65	2.50 $\pm$ 1.16
$a_{ph}(440)$	1.08 ~ 3.78	2.21 $\pm$ 0.90	0.05 ~ 4.60	0.80 $\pm$ 1.05	0.83 ~ 9.90	3.25 $\pm$ 2.61
$a_g(440)$	0.18 ~ 1.28	0.61 $\pm$ 0.41	0.41 ~ 2.94	1.84 $\pm$ 0.54	0.53 ~ 2.59	1.55 $\pm$ 0.63

合在一起进行讨论。

2.2.1 总颗粒物吸收特征

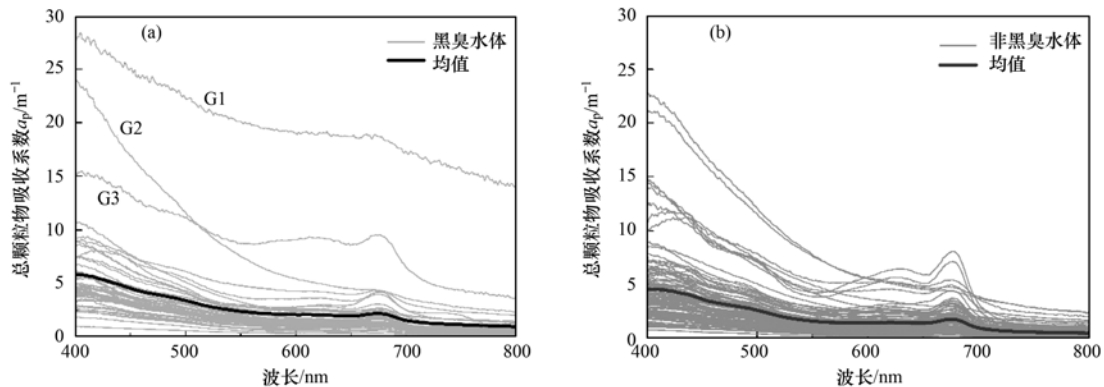
总颗粒物吸收系数近似等于非色素颗粒物吸收系数与色素颗粒物吸收系数之和。图 2 为黑臭水体与非黑臭水体的总颗粒物吸收系数光谱曲线, 加粗的曲线是总颗粒物平均吸收系数光谱曲线。城市水体大多样点在 675 nm 有一个吸收峰, 而在 400 ~ 500

nm 随波长增加呈现指数衰减, 少数几个样点则在 440 nm、675 nm 附近有吸收峰, 表现出明显的藻类吸收特征, 而这些样点较多位于无锡市 (图 2)。黑臭水体与非黑臭水体在 440 nm 处的范围是 0.81 ~ 25.62 m^{-1} 、0.60 ~ 18.60 m^{-1} , 平均值分别为 $(4.88 \pm 4.08) \text{ m}^{-1}$ 、 $(3.98 \pm 2.96) \text{ m}^{-1}$ 。此外, 图 2(a) 中有 3 条曲线明显高于其他黑臭水体的曲线, 将这 3 条曲

线对应的样点分别编号为 G1、G2 和 G3, 其中, G1、G2 是 5 月 10 日在南京市采集的样点, G3 是 8 月 5 日在无锡市采集的样点, 这 3 个点现场判别均为重度黑臭. G1 和 G2 号点均含有较高浓度的悬浮物(分别为 $297.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $127.27 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$). 总颗粒物吸收系数曲线随波长增加呈指数衰减, 说明非色素悬浮物质对吸收系数有着更大的影响^[22]. 而 G3 号点 DOC 浓度为 $19.55 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 与黑臭水体的均值相比

明显偏高. 考虑到采样的河流位于无锡, 且与太湖相连通, 采样时间在 8 月, 推测 G3 号点产生黑臭与藻华的产生与降解有一定关系^[10].

黑臭水体的总颗粒物吸收系数均值稍高于非黑臭水体, 但是二者的吸收系数取值范围存在较大程度的交叉. 非黑臭水体中也存在总颗粒物吸收系数较高的样点, 这说明城市水体的情况较为复杂, 颗粒物吸收系数并非两者最主要的区别.



(a) 黑臭水体, G1、G2 分别是 5 月 10 日在南京市采集的重度黑臭水体, G3 是 8 月 5 日在无锡市采集的重度黑臭水体; (b) 非黑臭水体

图 2 黑臭与非黑臭水体总颗粒物吸收系数光谱曲线

Fig. 2 Spectral curves of the absorption coefficient of total particles for urban black-odor water and non-black-odor water

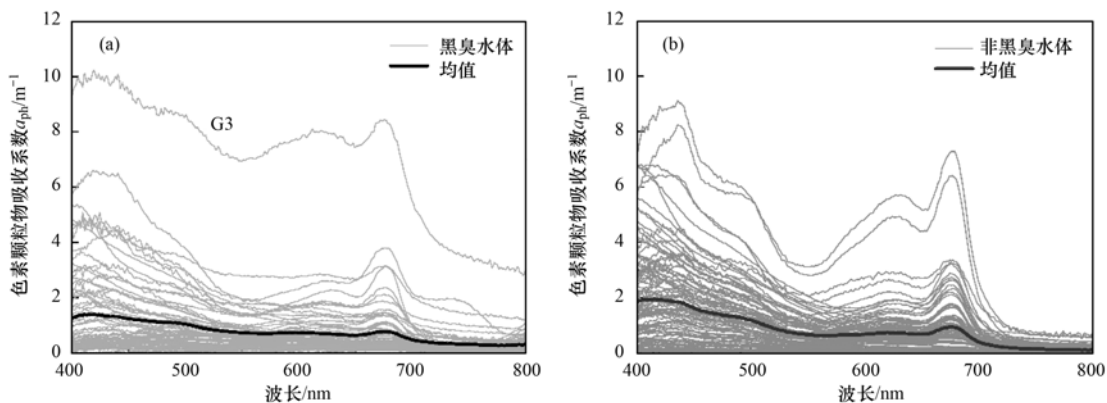
2.2.2 色素颗粒物吸收特征

图 3 为黑臭水体与非黑臭水体的色素颗粒物吸收系数光谱曲线, 加粗的曲线是色素颗粒物平均吸收系数光谱曲线. 色素颗粒物吸收曲线由叶绿素 a 和其他辅助色素浓度决定. 在 $450 \sim 550 \text{ nm}$ 范围内, 吸收系数随着波长的增加而降低. 与非黑臭水体相比, 黑臭水体在 $400 \sim 550 \text{ nm}$ 范围内的变化趋势更为平缓, 其色素颗粒物吸收系数均值较低. 黑臭水体与非黑臭水体在 675 nm 处的范围是 $0.01 \sim 8.45 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.01 \sim 7.25 \text{ m}^{-1}$, 平均值分别为 $(0.77 \pm$

$1.16) \text{ m}^{-1}$ 、 $(1.96 \pm 1.16) \text{ m}^{-1}$. 图 2 中吸收系数偏高的 G3 号点在图 3 中同样表现突出, 其值远远高于其它黑臭水体的吸收系数. 此外, 图 2 中呈现较明显的双峰 (440 nm 和 675 nm) 吸收特征的样点, 说明采样区水体含有较多藻类颗粒物.

2.2.3 非色素颗粒物吸收特征

图 4 为黑臭水体与非黑臭水体的非色素颗粒物吸收系数光谱曲线, 加粗的曲线是非色素颗粒物平均吸收系数光谱曲线. 非色素颗粒物的吸收系数随着波长的增加而减小, 其光谱特征大致遵循指数衰



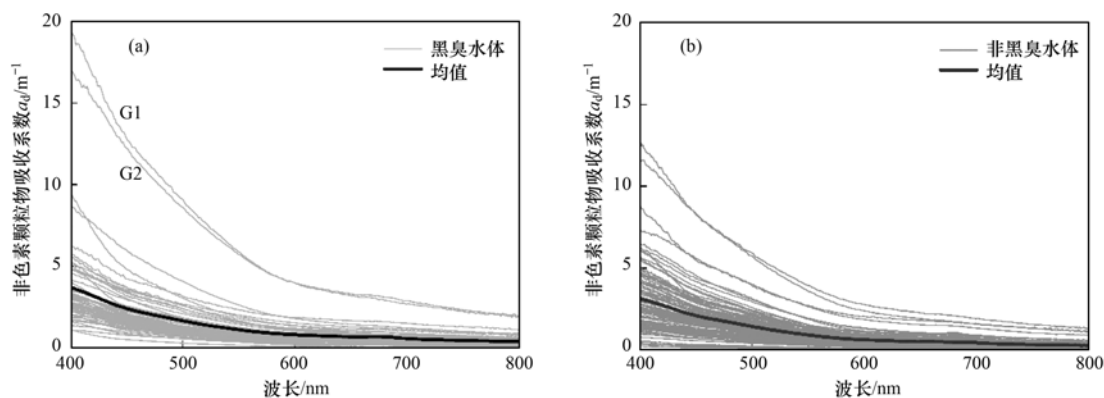
(a) 黑臭水体, G3 是 8 月 5 日在无锡市采集的重度黑臭水体; (b) 非黑臭水体

图 3 黑臭与非黑臭水体色素颗粒物吸收系数光谱曲线

Fig. 3 Spectral curve of absorption coefficient of pigment particles of urban black-odor water and non-black-odor water

减的规律. 城市黑臭水体与非黑臭水体的非色素颗粒物平均吸收系数在量级上有所差异. 黑臭水体与非黑臭水体在 440 nm 处的吸收系数的平均值分别为 $(5.68 \pm 4.19) \text{ m}^{-1}$ 、 $(4.44 \pm 2.95) \text{ m}^{-1}$, 分布范围为 $0.55 \sim 13.94 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.23 \sim 9.06 \text{ m}^{-1}$. 黑臭水体与非黑臭水体在 675 nm 处的吸收系数的平均值分别为 $(0.67 \pm 0.53) \text{ m}^{-1}$ 、 $(0.48 \pm 0.37) \text{ m}^{-1}$, 分布范围为 $0.67 \sim 3.16 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.07 \sim 2.10 \text{ m}^{-1}$. 在短波区域, 黑臭水体与非黑臭水体的吸收系数差异更大. 黑臭

水体中有两条曲线出现高值, 分别对应于图 2 中的 G1 和 G2 号样点, 结合图 2~4 分析可知, 黑臭水体的高吸收可能由于水体中高悬浮颗粒浓度导致(如南京的样点 G1 和 G2), 而在高藻类浓度的水体, 也可能由色素颗粒物的高吸收所引起(如无锡的样点 G3). 此外, 从图 2~4 可以看出, 黑臭水体相对较高的颗粒物吸收主要是由于非色素颗粒物的高吸收所导致的, 本研究所采集的数据中, 多数黑臭水体的非色素颗粒物的吸收占总颗粒物吸收的 50% 以上.



(a) 黑臭水体, G1、G2 分别是 5 月 10 日在南京市采集的重度黑臭水体; (b) 非黑臭水体

图 4 黑臭与非黑臭水体非色素颗粒物吸收系数光谱曲线

Fig. 4 Spectral curve of absorption coefficient of non-pigment particles of urban black-odor water and non-black-odor water

2.2.4 CDOM 吸收特征

CDOM 主要由陆源有机物质的输入和内源浮游植物的降解形成, 在紫外和蓝光波段有较强的吸收, 随着波长增大, 吸收迅速减小. 不同水体的 CDOM 吸收系数在短波处的差异较大, 通常用 440 nm 处的吸收系数来表征 CDOM 浓度^[23]. 图 5 为 240~600 nm 波段范围内的黑臭水体与非黑臭水体的 CDOM 吸收光谱曲线, 黑色加粗的曲线是 CDOM 平均吸收系数光谱曲线. CDOM 的吸收光谱曲线随波长增加呈现指数衰减的规律. 黑臭和非黑臭水体在 440 nm 处的 CDOM 吸收系数 $a_g(440)$ 范围分别

在 $0.18 \sim 2.94 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.04 \sim 2.21 \text{ m}^{-1}$, 均值分别是 $(1.72 \pm 0.63) \text{ m}^{-1}$ 和 $(1.00 \pm 0.39) \text{ m}^{-1}$. 比较 440 nm 处的吸收系数的平均值可以看出, 黑臭水体的 CDOM 吸收系数比非黑臭水体的吸收系数高出 1.7 倍左右.

2.3 吸收特征对城市黑臭水体的可分性分析

2.3.1 基于吸收系数曲线的黑臭水体可分性分析

从 2.2 节的分析可知, 黑臭水体与非黑臭水体的水体组分吸收系数总体上存在差异, 但是其取值范围并没有明显的分界. 因此, 为了考察是否可利用吸收特征对黑臭水体进行区分, 需对特征波段处

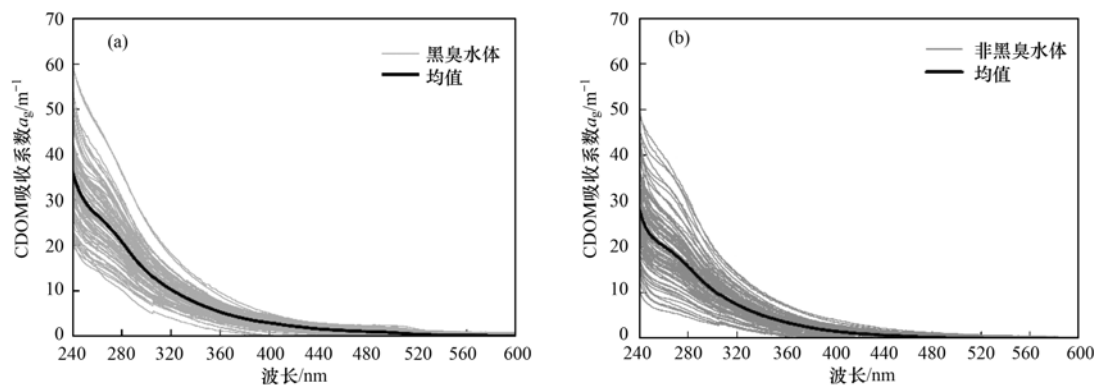
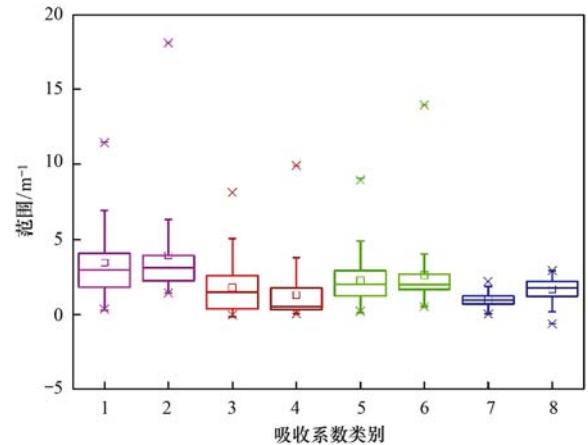


图 5 黑臭与非黑臭水体 CDOM 吸收系数光谱曲线

Fig. 5 Spectral curve of CDOM absorption coefficient of urban black-odor water and non-black-odor water

的吸收系数进一步分析(图 6). 非黑臭水体与黑臭水体在颗粒物吸收系数上区别稍小, 数值范围有 50% 以上的重合度, 因此, 仅仅依靠颗粒物吸收系数的曲线难以将黑臭与非黑臭水体进行有效地区分. 而 CDOM 吸收系数则表现出显著的差异: 黑臭水体与非黑臭水体在 440 nm 处的 CDOM 吸收系数的中位数分别为 1.78 m^{-1} 与 0.97 m^{-1} , 二者相差



1、2 分别对应非黑臭水体与黑臭水体在 440 nm 处的总颗粒物吸收系数, 3、4 对应色素颗粒物吸收系数, 5、6 对应非色素颗粒物吸收系数, 7、8 对应 CDOM 吸收系数

图 6 颗粒物吸收系数与 CDOM 吸收系数在 440 nm 处的箱型图

Fig. 6 Box figures for particle absorption coefficients and CDOM absorption coefficients at 440 nm

表 6 黑臭与非黑臭水体 CDOM 参数化模型的 S 值¹⁾

Table 6 The S value of CDOM parametric model for urban black-odor water and non-black-odor water

项目	黑臭		非黑臭	
	范围	平均值 $\pm$ 标准差	范围	平均值 $\pm$ 标准差
S_1	0.012 8 ~ 0.023 7	0.015 8 $\pm$ 0.001 6	0.014 7 ~ 0.032 3	0.017 8 $\pm$ 0.002 1
S_2	0.011 3 ~ 0.026 1	0.014 7 $\pm$ 0.002 3	0.013 2 ~ 0.042 9	0.017 4 $\pm$ 0.003 8
S_3	0.007 8 ~ 0.033 6	0.014 1 $\pm$ 0.004 1	0.004 4 ~ 0.036 1	0.015 9 $\pm$ 0.004 8

1) S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示 CDOM 参数化模型在 275 ~ 295、350 ~ 400 以及 400 ~ 600 nm 处的曲线斜率

图 7 是黑臭与非黑臭水体斜率值和 $a_g(440)$ 的散点图. 对于图 7(a), 以 $S_1 = 0.0165$ 为阈值划线时, 165 个样点数据中, 非黑臭水体有 81% 的样点位于直线上方, 黑臭水体中有 78% 的样点位于直线下方, 由此说明, 当以 0.0165 为阈值进行区分时, 正确识别非黑臭水体 65 个、黑臭水体 66 个, 区分的正确率可达 79.39%; 对于图 7(b), 以 $S_2 = 0.016$ 为阈值划线时, 165 个样点数据中, 非黑臭水体有 66% 的样点位于直线上方, 黑臭水体中有 78% 的样点位于直线下方, 由此说明, 当以 0.016 为阈值进行区分时, 正确识别非黑臭水体 53 个、黑臭水体 66 个, 区分的正确率可达 72.12%; 对于图

7(c), 以 $S_3 = 0.0175$ 为阈值划线时, 165 个样点数据中, 非黑臭水体有 30% 的样点位于直线上方, 黑臭水体中有 90% 的样点位于直线下方, 由此说明, 当以 0.0175 为阈值进行区分时, 正确识别非黑臭水体 24 个、黑臭水体 72 个, 区分的正确率可达 58.18%; 对于图 7(d), 以 $a_g(440) = 1.25$ 为阈值划线时, 165 个样点数据中, 非黑臭水体有 76% 的样点位于直线下方, 黑臭水体中有 81% 的样点位于直线上方, 由此说明, 当以 1.25 为阈值进行区分时, 正确识别非黑臭水体 61 个、黑臭水体 65 个, 区分的正确率可达 76.36%. 从以上分析可以看出, 利用 S_1 和 $a_g(440)$ 对黑臭和非黑臭水体有较高的

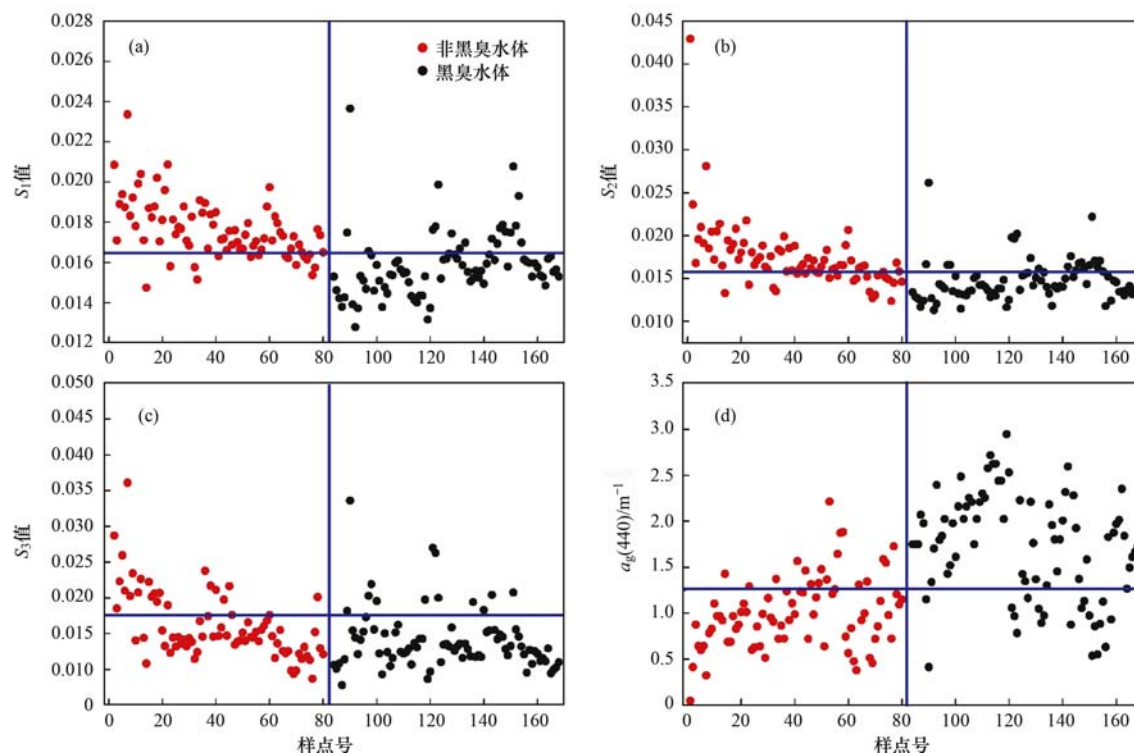
2.3.2 基于 CDOM 吸收系数参数化模型的黑臭水体可分性分析

黑臭与非黑臭水体的 CDOM 吸收系数在 440 nm 处取值范围有一定的差异, 但是, 对比其吸收系数曲线发现, 仅利用 CDOM 吸收系数的绝对数值依然难以将黑臭与非黑臭水体区分开来. 考虑到 CDOM 吸收系数通常采用形如公式(2)的参数化模型表示^[24]:

$$a_g(\lambda) = a_g(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \quad (2)$$

式中, 下标 g 代表 CDOM; $a_g(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数(m^{-1}); λ_0 为参考波长, 取 440 nm; $a_g(\lambda_0)$ 为参考波长处的吸收系数(m^{-1}); S 为指数函数斜率. S 值的大小与 CDOM 的相对分子质量相关, 是反映不同区域水质的间接指标^[25]. 因此, 尝试建立 CDOM 吸收系数的参数化模型, 并分析利用 S 值进行黑臭水体识别的可行性.

在 CDOM 吸收系数参数化模型的研究中, 有学者通过分段建立参数化模型, 提高了模型拟合的精度^[26,27]. 本研究参照前人的经验, 将波段划分为 275 ~ 295、350 ~ 400 以及 400 ~ 600 nm, 分别拟合 CDOM 吸收系数光谱斜率 S 值^[28]. 表 6 为黑臭与非黑臭水体 CDOM 参数化模型的 S 值.



S_1 、 S_2 和 S_3 分别表示 CDOM 参数化模型在 275 ~ 295、350 ~ 400 以及 400 ~ 600 nm 处的曲线斜率,

$a_g(440)$ 表示在 440 nm 处 CDOM 的吸收系数

图7 参数化模型区分效果

Fig. 7 Effects of parameterization model

区分度, 而不同斜率值对两类水体的区分度则随着波长的增加而降低。

图8显示了 S_1 值与 $a_g(440)$ 较高的相关性, 说明利用 S_1 值或 $a_g(440)$ 都有可能对两类水体进行区分和识别。

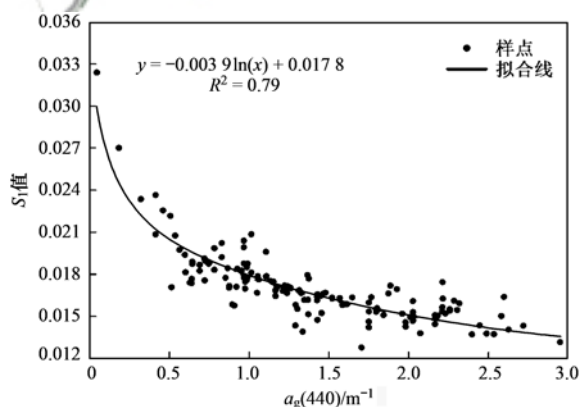


图8 S_1 值与 $a_g(440)$ 的相关性

Fig. 8 Correlation between S_1 value and $a_g(440)$

3 结论

(1) 与非黑臭水体相比, 黑臭水体具有有机悬浮物浓度、总氮、总磷浓度和可溶性有机碳浓度较高的特点, 而两者叶绿素 a 浓度较为接近。

(2) 黑臭水体与非黑臭水体的水体组分吸收系数总体上存在差异, 黑臭水体的总颗粒物吸收系数和非色素颗粒物吸收系数总体略高于非黑臭水体。黑臭水体的 CDOM 值比非黑臭水体的 CDOM 值高约 1.7 倍左右, 说明黑臭水体的 CDOM 吸收特性与非黑臭水体存在着较为显著的差异。黑臭水体的高 CDOM 吸收特性在黑臭水体的识别与监测方面具有应用潜力。

(3) CDOM 吸收系数参数化模型在不同波段范围内拟合得到的斜率值 S 对黑臭水体与非黑臭水体具有一定的区分性。不同斜率值对两类水体的区分度随着波长的增加而降低: 275 ~ 295 nm 拟合的斜率 S_1 值、350 ~ 400 nm 拟合的斜率 S_2 值和 $a_g(440)$ 的区分精度分别为 79.39%、72.12%、76.36%。

致谢: 感谢杜成功、吴志明、苗松、毕顺、牟蒙等同学辛苦的野外采样和室内分析。

参考文献:

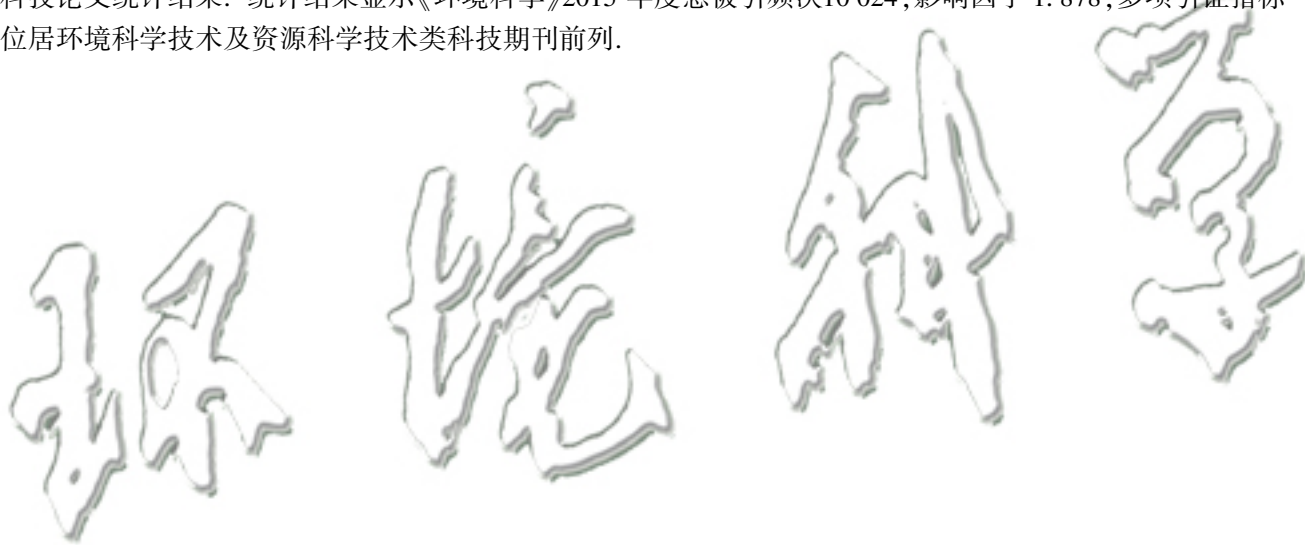
- [1] 谢飞, 吴俊锋. 城市黑臭河流成因及治理技术研究[J]. 污染防治技术, 2016, 29(1): 1-3, 15.
Xie F, Wu J F. Causes of malodorous black rivers in cities and the study on treatment technologies [J]. Pollution Control Technology, 2016, 29(1): 1-3, 15.
- [2] 于玉彬, 黄勇. 城市河流黑臭原因及机理的研究进展[J].

- 环境科技, 2010, **23**(S2): 111-114.
- Yu Y B, Huang Y. Review of reason and mechanism of black and stink in urban rivers [J]. *Environmental Science and Technology*, 2010, **23**(S2): 111-114.
- [3] 曹承进, 陈振楼, 黄民生. 城市黑臭河道富营养化次生灾害形成机制及其控制对策思考[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2015, **3**(2): 9-20.
- Cao C J, Chen Z L, Huang M S. Study on formation mechanism, and control and preventive measures of eutrophication secondary disasters in urban malodorous-back river [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2015, **3**(2): 9-20.
- [4] 吕佳佳, 杨娇艳, 廖卫芳, 等. 黑臭水形成的水质和环境条件研究[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2014, **48**(5): 711-716.
- Lv J J, Yang J Y, Liao W F, *et al.* Study on the water quality and environmental conditions of the formation of black-odorous water [J]. *Journal of Huazhong Normal University (Natural Sciences)*, 2014, **48**(5): 711-716.
- [5] 卢信, 冯紫艳, 商景阁, 等. 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[J]. *环境科学*, 2012, **33**(9): 3152-3159.
- Lu X, Feng Z Y, Shang J G, *et al.* Black water bloom induced by different types of organic matters and forming mechanisms of major odorous compounds [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(9): 3152-3159.
- [6] 刘成, 胡湛波, 郝晓明, 等. 城市河道黑臭评价模型研究进展[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2011, **1**(1): 43-54.
- Liu C, Hu Z B, Hao X M, *et al.* Progress in the development of black-odour prediction models for urban rivers [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2011, **1**(1): 43-54.
- [7] 阮仁良, 黄长缨. 苏州河水水质黑臭评价方法和标准的探讨[J]. *上海水务*, 2002, (3): 32-36.
- [8] 陆桂华, 马倩. 2009年太湖水域“湖泛”监测与分析[J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(4): 481-487.
- Lu G H, Ma Q. Monitoring and analysis on “black water aggregation” in Lake Taihu, 2009 [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(4): 481-487.
- [9] 陆桂华, 马倩. 太湖水域“湖泛”及其成因研究[J]. *水科学进展*, 2009, **20**(3): 438-442.
- Lu G H, Ma Q. Analysis on the causes of forming black water cluster in Taihu Lake [J]. *Advances in Water Science*, 2009, **20**(3): 438-442.
- [10] Duan H T, Ma R H, Loisselle S A, *et al.* Optical characterization of black water blooms in eutrophic waters [J]. *Science of the total Environment*, 2014, **482-483**: 174-183.
- [11] 张思敏, 李云梅, 王桥, 等. 富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(9): 3402-3412.
- Zhang S M, Li Y M, Wang Q, *et al.* Absorption and reflection characteristics of black water blooms in the eutrophic water [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(9): 3402-3412.
- [12] 温爽, 王桥, 李云梅, 等. 基于高分影像的城市黑臭水体遥感识别: 以南京为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(1): 57-67.
- Wen S, Wang Q, Li Y M, *et al.* Remote sensing identification of urban black-odor water bodies based on high-resolution images: a case study in Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(1): 57-67.
- [13] 靳海霞, 潘健. 基于高分二号卫星融合数据的城镇黑臭水体遥感监测研究[J]. *国土资源科技管理*, 2017, **34**(4): 107-117.
- Jin H X, Pan J. Urban black odor water body remote sensing monitoring based on GF-2 satellite data fusion [J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2017, **34**(4): 107-117.
- [14] 住房和城乡建设部, 环境保护部. 住房城乡建设部 环境保护部 关于印发城市黑臭水体整治工作指南的通知[EB/OL]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/201509/t20150911_224828.html, 2015-08-28.
- [15] Ma R, Tang J, Dai J. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4305-4328.
- [16] 陈宇炜, 陈开宁, 胡耀辉. 浮游植物叶绿素a测定的“热乙醇法”及其测定误差的探讨[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(5): 550-552.
- Chen Y W, Chen K N, Hu Y H. Discussion on possible error for phytoplankton chlorophyll-a concentration analysis using hot-ethanol extraction method [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, **18**(5): 550-552.
- [17] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. *土壤*, 1990, **22**(5): 258-262.
- [18] 金筱青, 周慧. 过硫酸钾-钼锑抗分光光度法测定地表水中总磷的若干影响因素[J]. *环境监测管理与技术*, 2002, **14**(1): 38.
- [19] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) [J]. *Proceedings of SPIE*, 1990, **1302**: 137-149.
- [20] Kirk J T O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems (2nd ed.) [M]. Cambridge, Britain: Cambridge University Press, 1994. 50-97.
- [21] 戴永宁, 李素菊, 王学军. 巢湖水体固有光学特性研究[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(5): 173-177.
- Dai Y N, Li S J, Wang X J. Inherent optical properties of water body of Chao Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(5): 173-177.
- [22] 王珊珊, 王永波, 扶卿华, 等. 珠江口水体组分的吸收特性分析[J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4511-4521.
- Wang S S, Wang Y B, Fu Q H, *et al.* Spectral absorption properties of the water constituents in the estuary of Zhujiang river [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4511-4521.
- [23] Bricaud A, Morel A, Prieur L. Absorption by dissolved organic matter of the sea (yellow substance) in the UV and visible domains [J]. *Limnology and Oceanography*, 1981, **26**(1): 43-53.
- [24] 段洪涛, 马荣华, 孔维娟, 等. 太湖沿岸水体CDOM吸收光谱特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 242-247.
- Duan H T, Ma R H, Kong W J, *et al.* Optical properties of chromophoric dissolved organic matter in Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 242-247.
- [25] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral

- slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter[J]. *Limnology and Oceanography*, 2008, **53**(3): 955-969.
- [26] 张运林, 秦伯强, 杨龙元. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物和 CDOM 的吸收特性[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- Zhang Y L, Qin B Q, Yang L Y. Spectral absorption coefficients of particulate matter and chromophoric dissolved organic matter in Meiliang Bay of Lake Taihu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, **26**(12): 3969-3979.
- [27] 施坤, 李云梅, 王桥, 等. 太湖、巢湖水体 CDOM 吸收特性和组成的异同[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1183-1191.
- Shi K, Li Y M, Wang Q, *et al.* Similarities and differences in absorption characteristics and composition of CDOM between Taihu Lake and Chaohu Lake [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(5): 1183-1191.
- [28] Xu J, Wang Y Q, Gao D, *et al.* Optical properties and spatial distribution of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Poyang Lake, China [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2017, **43**(4): 700-709.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2017 年 10 月 31 日, 中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了 2016 年度中国科技论文统计结果. 统计结果显示《环境科学》2015 年度总被引频次 10 024, 影响因子 1.878, 多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Ratios of Volatile Organic Compounds in Ambient Air of Various Cities of China	WANG Ming, CHEN Wen-tai, LU Si-hua, <i>et al.</i> (4393)
Temporal Variation, Spatial Distribution, and Reactivity Characteristics of Air VOCs in Beijing 2015	ZHANG Bo-tao, AN Xin-xin, WANG Qin, <i>et al.</i> (4400)
Research and Application of the Technical Method for the Compilation of VOCs Emission Inventories from Architectural Coatings in Beijing	DENG Zi-yu, GAO Mei-ping, WANG Qing-wei, <i>et al.</i> (4408)
Content Levels and Compositions Characteristics of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from Architectural Coatings Based on Actual Measurement	GAO Mei-ping, DENG Zi-yu, NIE Lei, <i>et al.</i> (4414)
Characteristics of Primary Pollutants of Air Quality in Cities Along the Taihang Mountains in Beijing-Tianjin-Hebei Region During 2014-2016	WANG Xiao-yan, WANG Shuai, ZHU Li-li, <i>et al.</i> (4422)
Seasonal Variation and Source Analysis for PM _{2.5} , PM ₁ and Their Carbonaceous Components in Beijing	FAN Xiao-chen, LANG Jian-lei, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (4430)
Chemical Constitution and Carbon Isotopic Compositions of PM _{2.5} in the Northern Suburb of Nanjing in Spring	ZHOU Yi-ming, HAN Xun, WANG Jin-jin, <i>et al.</i> (4439)
Analysis of Non-polar Organic Compounds in PM _{2.5} by Rapid Thermo-desorption Method Coupled with GC/MS	MA Ying-ge, WU Xia, PENG Meng-meng, <i>et al.</i> (4446)
Association Between Fine Particulate Matter and Asthma Hospital Outpatient Visits in Hangzhou	WANG An-xu, CHEN Xi, SONG Cong-bo, <i>et al.</i> (4457)
Hybrid Electric Bus SCR System Operation and NO _x Emission Characteristics Based on Remote Communication Technology	YANG Qiang, HU Qing-yao, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (4463)
Selection of Priority Contaminants in a Watershed Using Risk Ranking Methodology	LI Qi-feng, LÜ Yong-long, WANG Pei, <i>et al.</i> (4472)
Characteristics and Sources of Atmospheric Inorganic Nitrogen Wet Deposition in Xueyu Cave Watershed, Outer Suburbs of Chongqing City	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, <i>et al.</i> (4479)
Characteristics of Nitrogen Deposition in Heilongjiang Liangshui National Nature Reserve	SONG Lei, TIAN Peng, ZHANG Jin-bo, <i>et al.</i> (4490)
Key Production Process of Nitrous Oxide and Nitrogen Sources in Tuojia River	ZHAO Qiang, LÜ Cheng-wen, QIN Xiao-bo, <i>et al.</i> (4497)
Impact of Biochar on Nitrogen Removal and Nitrous Oxide Emission in Aerated Vertical Flow Constructed Wetland	WANG Ning, HUANG Lei, LUO Xing, <i>et al.</i> (4505)
Physiological Responses of Ryegrass in Cadmium-Nonylphenol Co-contaminated Water and the Phytoremediation Effects	SHI Guang-yu, LI Zhong-yi, ZHANG Lu, <i>et al.</i> (4512)
Analysis of Absorption Characteristics of Urban Black-odor Water	DING Xiao-lei, LI Yun-mei, LÜ Heng, <i>et al.</i> (4519)
Seasonal Variations of DOM Spectral Characteristics in the Surface Water of the Upstream Minjiang River	FAN Shi-yu, QIN Ji-hong, LIU Yan-yang, <i>et al.</i> (4530)
Water Quality and Three-Dimensional Fluorescence of Stormwater Runoff from Lined Bioretention Field Cells	LIN Xiu-yong, WANG Shu-min, LI Qiang, <i>et al.</i> (4539)
Nitrate-Nitrogen Pollution Sources of an Underground River in Karst Agricultural Area Using ¹⁵ N and ¹⁸ O Isotope Technique	SHENG Ting, YANG Ping-heng, XIE Guo-wen, <i>et al.</i> (4547)
Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter in Landfill Groundwater	PENG Li, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4556)
Adsorption Behavior of Phosphate from Water on Zirconium-loaded Granular Zeolite-amended Sediment	LIANG Shu-jing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (4565)
Control of Coagulant Dosing for Humic Substances Based on Ultraviolet Spectrum Analysis	ZHANG Bei-chen, ZHANG Xiao-lei, QIN Lan-lan, <i>et al.</i> (4576)
Reduction of Wastewater Organic Micro-pollutants and Genotoxicity in a Hybrid Process Involving Anaerobic-anoxic-oxic and Ozonation Treatments	LI Mo, WANG Zhen-zhe, CHEN Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4584)
Distribution and Removal of Antibiotic Resistance Genes in Two Sequential Wastewater Treatment Plants	LI Ao-lin, CHEN Li-jun, ZHANG Yan, <i>et al.</i> (4593)
Effect of Magnetic Chitosan Hydrogel Beads with Immobilized Feamnox Bacteria on the Removal of Ammonium from Wastewater	LIU Zhi-wen, CHEN Chen, PENG Xiao-chun, <i>et al.</i> (4601)
Enhanced Nitrogen and Carbon Removal Performance of Simultaneous ANAMMOX and Denitrification (SAD) with Trehalose Addition Treating Saline Wastewater	YANG Zhen-lin, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (4612)
Characteristics of Denitrifying Phosphorus Removal by A ² /O-BAF at Low Temperatures	HUANG Jian-ming, ZHAO Zhi-chao, ZHENG Long-ju, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics of Advanced Treatment of Treated Petrochemical Water by O ₃ -BAC and Analysis of Consortium Structure	ZHANG Chao, SHAN Ming-hao, XU Dan-ning, <i>et al.</i> (4628)
Microbial Community Characteristics of Shortcut Nitrification Start-up in Different MBR-Inoculated Sludges	WU Peng, CHEN Ya, ZHANG Ting, <i>et al.</i> (4636)
Effect of Microbial Community Structure and Metabolites on Sludge Settling Ability Under Three Different Switching Condition Processes	WEN Dan-dan, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4644)
Adsorption Mechanisms of Ciprofloxacin by Extracellular Polymeric Substances of Sulfate-reducing Bacteria Sludge	ZHANG Hui-qun, JIA Yan-yan, FANG He-ting, <i>et al.</i> (4653)
Rapid Improvement of Denitrification Performance of Embedded Activated Sludge and Community Analysis	YANG Hong, XU Fu, MENG Chen, <i>et al.</i> (4661)
Spatial-Temporal Trends and Pollution Source Analysis for Heavy Metal Contamination of Cultivated Soils in Five Major Grain Producing Regions of China	SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, <i>et al.</i> (4670)
Spatial Interpolation Methods and Pollution Assessment of Heavy Metals of Soil in Typical Areas	MA Hong-hong, YU Tao, YANG Zhong-fang, <i>et al.</i> (4684)
Effect of Straw Residues in Combination with Reduced Fertilization Rate on Greenhouse Gas Emissions from a Vegetable Field	HUANG Rong, GAO Ming, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (4694)
Emission of NH ₃ and N ₂ O from Spinach Field Treated with Different Fertilizers	SHAN Nan, HAN Sheng-hui, LIU Ji-pei, <i>et al.</i> (4705)
Effects of Various Combinations of Fertilizer, Soil Moisture, and Temperature on Nitrogen Mineralization and Soluble Organic Nitrogen in Agricultural Soil	TIAN Fei-fei, JI Hong-fei, WANG Le-yun, <i>et al.</i> (4717)
Long-term Fertilization Effects on the Abundance of Complete Ammonia Oxidizing Bacteria(Comammox <i>Nitrospira</i>) in a Neutral Paddy Soil	WANG Mei, WANG Zhi-hui, SHI Xiao-jun, <i>et al.</i> (4727)
Spatial Variation of Soil Organic Carbon and Stable Isotopes in Different Soil Types of a Typical Oasis	CHEN Xin, GONG Lu, LI Yang-mei, <i>et al.</i> (4735)
Effect and Mechanism of Attapulgite and Its Modified Materials on Bioavailability of Cadmium in Soil	CHEN Zhan-xiang, CHEN Chuan-sheng, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4744)
Persulfate Oxidation Effect of Soil Organic Pollutants by Natural Organic Matters	LIU Qiong-zhi, LIAO Xiao-yong, LI You, <i>et al.</i> (4752)
Lead Uptake and Accumulation in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) with Water Management and Selenite Fertilization	WAN Ya-nan, LIU Zhe, Aboubacar Younoussa Camara, <i>et al.</i> (4759)
Key Bacteria for the Microbial Degradation of Pollutants in Cellar Water	YANG Hao, YANG Xiao-ni, ZHANG Guo-zhen, <i>et al.</i> (4766)
Oxidation of Humic Acid Complexing As(III) by As(III)-Oxidizing Bacteria	LI Ze-jiao, CUI Yan-shan, YIN Nai-yi, <i>et al.</i> (4778)
A Thermotolerant and Halotolerant Sulfate-reducing Bacterium in Produced Water from an Offshore High-temperature Oilfield in Bohai Bay, China: Isolation, Phenotypic Characterization, and Inhibition	YANG Chun-lu, YUAN Mei-yu, SHI Rong-jiu, <i>et al.</i> (4783)
Isolation and Nitrogen Removal Characteristics of Salt-tolerant Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacteria <i>Zobellella</i> sp. B307	BAI Jie, CHEN Lin, HUANG Xiao, <i>et al.</i> (4793)
Isolation, Identification and Degradation Characteristics of a 17 β -estradiol Degrading Strain <i>Fusarium</i> sp. KY123915	WU Man-li, ZHU Chang-cheng, QI Yan-yun, <i>et al.</i> (4802)
Effect of Fluoroquinolones on Performance and Microbial Community of a Vertical Flow Constructed Wetland	LI Xin-hui, ZHENG Quan, LI Jing, <i>et al.</i> (4809)
Microbial Community Diversity Analysis During Lincomycin Mycelia Dreg with Manure	REN Sheng-tao, GUO Xia-li, LU A-qian, <i>et al.</i> (4817)
Oxidative Stress and DNA Damage Induced by DEP Exposure in Earthworms	PING Ling-wen, LI Xian-xu, ZHANG Cui, <i>et al.</i> (4825)
Mineralogy Characteristics and Heavy Metal Distribution of MSWI Fly Ash	LI Jian-tao, ZENG Ming (4834)