

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第9期

Vol.37 No.9

**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

1960~2013年我国霾污染的时空变化 ..... 符传博, 唐家翔, 丹利, 何媛 (3237)

太原大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 ..... 王璐, 温天雪, 苗红妍, 高文康, 王跃思 (3249)

石家庄秋季一次典型霾污染过程水溶性离子粒径分布特征 ..... 刘景云, 刘子锐, 温天雪, 魏俊龙, 黄小娟, 乔宝文, 王莉莉, 杨洋, 徐仲均, 王跃思 (3258)

南京北郊大气颗粒物的粒径分布及其影响因素分析 ..... 吴丹, 曹双, 汤莉莉, 夏俊荣, 陆建刚, 刘刚, 杨孟, 李凤英, 盖鑫磊 (3268)

南京北郊黑碳气溶胶污染特征及影响因素分析 ..... 肖思晗, 于兴娜, 朱彬, 何稼祺 (3280)

上海崇明地区大气分形态汞污染特征 ..... 李舒, 高伟, 王书肖, 张磊, 李智坚, 王龙, 郝吉明 (3290)

三峡库区典型农田系统大气汞浓度及不同自然界面释汞通量 ..... 王永敏, 赵铮, 孙涛, 王娅, 薛金平, 张成, 王定勇 (3300)

长白山背景站大气 VOCs 浓度变化特征及来源分析 ..... 吴方堃, 孙杰, 余晔, 唐贵谦, 王跃思 (3308)

铅冶炼厂无组织排放源不同颗粒物中铅含量特征 ..... 刘大钧, 汪家权 (3315)

祁连山东段降水的水化学特征及离子来源研究 ..... 贾文雄, 李宗省 (3322)

三峡库区(重庆—宜昌段)沉积物中钒的污染特征及生态风险评价 ..... 郭威, 殷淑华, 徐建新, 徐东昱, 高丽, 郝红, 高博 (3333)

太湖不同富营养化水域磷的分布特征及其环境影响因素 ..... 车霏霏, 王大鹏, 甄卓, 颜昌宙, 王灶生 (3340)

太湖表层沉积物中 PPCPs 的时空分布特征及潜在风险 ..... 张盼伟, 周怀东, 赵高峰, 李昆, 刘巧娜, 任敏, 赵丹丹, 李东佼 (3348)

岩溶地下河系统中有机氯的分布特征与来源分析 ..... 张媚, 孙玉川, 谢正兰, 余琴, 徐昕 (3356)

西南典型岩溶地下河系统水文地球化学特征对比:以重庆市青木关、老龙洞为例 ..... 詹兆君, 陈峰, 杨平恒, 任娟, 张海月, 刘黛薇, 蓝家程, 张宇 (3365)

不同水源补给情形的溪流沟渠沉积物磷形态及释放风险分析 ..... 李如忠, 秦如彬, 黄青飞, 耿若楠 (3375)

滇池柱状沉积物磷形态垂向变化及对释放的贡献 ..... 李乐, 王圣瑞, 焦立新, 余佑金, 丁帅, 王跃杰 (3384)

荧光光谱结合平行因子分析研究夏季周村水库溶解性有机物的分布与来源 ..... 黄廷林, 方开凯, 张春华, 周石磊, 曾明正, 刘飞, 夏超, 丛海兵 (3394)

富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析 ..... 张思敏, 李云梅, 王桥, 朱利, 王旭东, 温爽 (3402)

基于微生物生物完整性指数的地下水生态系统健康评价:以包钢稀土尾矿库周边地下水生态系统为例 ..... 安新丽, 陈廷廷, 赵晗, 张又弛, 侯艳伟, 蔡超 (3413)

于桥水库水源地水体沉积物重金属空间分异与景观格局的关系 ..... 王祖伟, 王玮玮, 侯迎迎, 包姗姗, 王子璐, 王倩倩 (3423)

人工湿地构型对水产养殖废水含氮污染物和抗生素去除影响 ..... 刘佳, 易乃康, 熊永娇, 黄翔峰 (3430)

共生细菌对盐生小球藻富集和转化磷酸盐的影响 ..... 许平平, 刘聪, 王亚, 郑燕恒, 张春华, 葛滢 (3438)

模拟水体硝态氮对黄菖蒲生长及其氮吸收的影响 ..... 王兵, 温春翔, 肖波 (3447)

对羟基联苯在黄河兰州段底泥上的吸附行为 ..... 周琦, 蒋煜峰, 孙航, 慕仲锋, 张振国, 展惠英 (3453)

多级 A/O 工艺强化处理城市污水的效果研究 ..... 尹子华, 盛晓琳, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (3460)

某微污染源自来水厂的纳滤深度处理效果研究 ..... 吴玉超, 陈吕军, 兰亚琼, 刘锐 (3466)

Fe<sup>0</sup>-PRB 去除Cr(VI)反应动力学及影响机制 ..... 卢欣, 李森, 唐翠梅, 辛佳, 林朋飞, 刘翔 (3473)

EDTA-nSiO<sub>2</sub> 纳米颗粒对 Cd<sup>2+</sup> 的吸附 ..... 蒋顺成, 秦睿, 李满林, 李荣华, 张增强, Amjad Ali, 梁文 (3480)

硝酸-PPy/AQDS 联合处理改善阳极性能的分析表征 ..... 沈伟航, 朱能武, 尹富华, 吴平霄, 张彦鸿 (3488)

人工合成水铁矿对含磷废水的吸附性能 ..... 崔蒙蒙, 王殿升, 黄天寅, 刘锋 (3498)

生物沸石人工湿地处理分散养猪冲洗水性能 ..... 牟锐, 沈志强, 周岳溪, 陈学民, 伏小勇, 谭蕾蕾, 瞿畏 (3508)

甘油基混合培养物合成 PHA 及其与 OUR 的关系 ..... 刘东, 张小婷, 张代钧, 曾善文, 卢培利 (3518)

光催化体系中噻虫胺降解动力学及机制 ..... 胡倩, 阳海, 石妮, 胡乐天, 易兵 (3524)

宁夏干旱地区工业区对农田土壤重金属累积的影响 ..... 王美娥, 彭驰, 陈卫平 (3532)

北方某大型钢铁企业表层土壤中多环芳烃污染特征与健康风险评价 ..... 董捷, 黄莹, 李永霞, 张厚勇, 高甫威 (3540)

红壤剖面重金属分布特征及对有机碳响应 ..... 贾广梅, 马玲玲, 徐殿斗, 成杭新, 周国华, 杨国胜, 罗敏, 路雨楠, 刘志明 (3547)

外源锌刺激水稻对土壤镉的累积效应 ..... 辜娇峰, 杨文骏, 周航, 张平, 彭佩钦, 廖柏寒 (3554)

改性生物炭材料对稻田原状和外源镉污染土钝化效应 ..... 杨兰, 李冰, 王昌全, 刘倾城, 张庆沛, 肖瑞, 李一丁 (3562)

生物淋滤联合类 Fenton 反应去除污染土壤中重金属的效果 ..... 周普雄, 严颀, 余震, 王跃强, 朱艺, 周顺桂 (3575)

长期石油污染对盐碱化土壤中微生物群落分子生态网络的影响 ..... 赵慧慧, 肖娴, 裴孟, 赵远, 梁玉婷 (3582)

应用 PLFA 法分析氮沉降对缙云山马尾松林土壤微生物群落结构的影响 ..... 曾清苹, 何丙辉 (3590)

三江平原不同退化阶段小叶章湿地土壤真菌群落结构组成变化 ..... 隋心, 张荣涛, 许楠, 刘赢男, 柴春荣, 王继丰, 付晓玲, 钟海秀, 倪红伟 (3598)

外源氮、硫添加对闽江河口湿地 CH<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub> 排放的短期影响 ..... 胡敏杰, 任鹏, 黄佳芳, 仝川 (3606)

模拟条件下侵蚀-沉积部位土壤 CO<sub>2</sub> 通量变化及其影响因素 ..... 杜兰兰, 王志齐, 王蕊, 李如剑, 吴得峰, 赵慢, 孙棋棋, 高鑫, 郭胜利 (3616)

太原晋祠地区果园土壤呼吸的年际变化及其温度敏感性 ..... 严俊霞, 郝忠, 荆雪雷, 李洪建 (3625)

生物炭对壤土土壤温室气体及土壤理化性质的影响 ..... 王月玲, 耿增超, 王强, 尚杰, 曹胜磊, 周凤, 李鑫, 刘福义, 张萍 (3634)

氮沉降对臭氧胁迫下青杨光合特性和生物量的影响 ..... 辛月, 尚博, 陈兴玲, 冯兆忠 (3642)

冠层辐射温度对冬小麦生态系统碳通量的影响 ..... 李洪建, 杨艳, 严俊霞 (3650)

堆肥过程水溶性有机物组成和结构演化研究 ..... 李丹, 何小松, 席北斗, 高如泰, 张慧, 黄彩红, 党秋玲 (3660)

酸碱改性活性炭及其对甲苯吸附的影响 ..... 刘寒冰, 杨兵, 薛南冬 (3670)

《环境科学》征订启事 (3517)      《环境科学》征稿简则 (3561)      信息 (3289, 3321, 3422)

# 富营养化水体中黑水团的吸收及反射特性分析

张思敏<sup>1</sup>, 李云梅<sup>1,2\*</sup>, 王桥<sup>3</sup>, 朱利<sup>3</sup>, 王旭东<sup>1</sup>, 温爽<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023; 2. 江苏省地理信息资源开发与利用协同创新中心, 南京 210023; 3. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100029)

**摘要:** 对黑水团水体光学特性进行研究, 是利用遥感技术监测和评估黑水团事件的前提. 针对 2015 年 7 月在太湖发生的黑水团现象, 采集了太湖黑水团区(区域一)、蓝藻水华区(区域二)、清水区(区域三)共 36 个水样, 对这 3 个区域的水体遥感反射率以及吸收特性进行对比分析. 结果表明: ①区域一水体的总颗粒物、色素颗粒和非色素颗粒物吸收系数比区域二、区域三高出 1~2 倍, 在 400~500 nm 之间, 区域一 CDOM 吸收系数相比另外两个区域的水体高出 2 倍左右. 导致黑水团区域水体具有很低的遥感反射率, 被人眼感知时呈现为黑色; ②黑水团区域水体  $M$  值低于滇池、巢湖和太湖的  $M$  值变化范围, 说明黑水团中 CDOM 的腐殖酸含量较高. 此外, 叶绿素 a 浓度与 CDOM 在 350 nm 处吸收系数之间具有很好的相关性, 表明蓝藻的降解可能是黑水团中 CDOM 的一个主要来源; ③在 380 nm 之后, 黑水团区域的水体总吸收以色素颗粒物占主导, 但在短波 350~380 nm 处, CDOM 对总吸收的贡献率高于色素颗粒和非色素颗粒.

**关键词:** 太湖; 黑水团; 水质参数; 遥感反射率; 吸收系数

中图分类号: X122 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)09-3402-11 DOI: 10.13227/j.hjx.2016.09.019

## Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water

ZHANG Si-min<sup>1</sup>, LI Yun-mei<sup>1,2\*</sup>, WANG Qiao<sup>3</sup>, ZHU Li<sup>3</sup>, WANG Xu-dong<sup>1</sup>, WEN Shuang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 2. Jiangsu Center for Collaborative Innovation in Geographical Information Resource Development and Application, Nanjing 210023, China; 3. Satellite Environment Application Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Studying on optical properties of black water blooms, is the precondition for using remote sensing technology to monitor and evaluate the black water blooms event. Black water blooms occurred in Taihu Lake in July 2015. A total of 36 water samples were observed in the three water regions of Taihu Lake, the region 1 with black water blooms characteristics, region 2 with cyanobacterial bloom characteristics, and regional 3 with characteristics of clean lake water. The reflectance spectra and absorption coefficient of these three regions were analyzed, and the results show that: ① The absorption coefficients of the total particles, the pigment particles and the non-pigment particles in black water blooms are 1 to 2 times higher than the other two areas. The absorption coefficient of CDOM between 400-500 nm in region 1 is about 2 times higher than the other two areas, which lead the black water area with a very lower reflectance, and presents as black color. ② The range of  $M$  value in black water blooms is lower than Dianchi Lake and Chaohu Lake, which means the humic acid content of CDOM with black water characteristics is higher. A significant positive correlation is found between chlorophyll a (Chl-a) and the CDOM absorption coefficient at 350 nm, indicating that algae degradation is likely to be the primary source of CDOM in black waters. ③ The contribution of each optically active component indicates that the water absorption of region 1 strongly controlled by CDOM below 380 nm, but by Chla absorption between 380 nm and 700 nm.

**Key words:** Taihu Lake; black water blooms; water quality parameter; remote sensing reflectance; absorption coefficient

黑水团(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,水体含氧低、高营养盐负荷等一些显著的特征<sup>[1,2]</sup>. 在不同的区域,黑水团发生的原因和条件有所不同,例如,美国 Big Pit 湖和 Lower Mystic 湖发生的黑水团主要是受污染水体在缺氧厌氧的环境生成黑色金属硫化物而发黑所导致<sup>[3]</sup>; 在巴西亚马逊区域 Lago Tupé

湖<sup>[4]</sup>和印度尼西亚苏门答腊的 Siak 河<sup>[5]</sup>发生的黑水团则是由土壤中腐殖质等深色或者黑色有机颗粒物经过长期淋溶作用迁移进入水体而形成的; 意大利的 Garda 湖则是由某种原生生物或者微型生物突然暴发而造成水体视觉上的黑色效应<sup>[6]</sup>.

已经有许多学者开展了有关黑水团的特

收稿日期: 2016-02-19; 修订日期: 2016-04-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271343); 江苏省科技型企业技术创新项目(BC2015001)

作者简介: 张思敏(1992~),女,硕士研究生,主要研究方向为水环境遥感监测, E-mail: ml8705188726@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: liyunmei@njnu.edu.cn

征<sup>[7,8]</sup>、发生过程<sup>[9]</sup>、可能的成因<sup>[1,2,10]</sup>、环境影响因素<sup>[11~13]</sup>和防控措施<sup>[14,15]</sup>等方面的研究。但是,由于黑水团具有发生地点不确定、持续时间短等原因,使得难以对黑水团的发生发展过程进行全程监测,此外,常规的地面采样监测难以划定黑水团发生范围,也给黑水团监测带来了困难。遥感技术以其宏观、大面积同步观测以及持续重复观测的特点,为黑水团监测提供了一种新的技术手段。目前对黑水团的遥感监测研究才刚刚起步,Duan 等<sup>[16]</sup>对太湖黑水团的光学特性进行分析,认为溶解性有机物和浮游植物的高吸收,以及水体低的后向散射,导致黑水团区域的水体呈现黑色。Zhou 等<sup>[17]</sup>通过室内模拟实验和野外实验探讨黑水团中的可溶性有机物质,认为黑水团中 CDOM 浓度要比正常水体高,CDOM 大部分来源于蓝藻的降解。Berthon 等<sup>[18]</sup>对波罗的海最北部黑水的生物光学特性分析,研究表明黑水中有色可溶性有机物质吸收系数高,后向散射与吸收系数的比值在可见光蓝光波段呈现出低值,这导致在可见光波段水体呈现黑色。Battin<sup>[19]</sup>认为委内瑞拉的奥里诺科河的黑水中主要物质是 CDOM,认为 CDOM 在可见光短波段吸收增加,由此导致上行辐照度的减少和总体衰减的增加,这些光学特性导致水体呈现黑色。这些研究为黑水团的光学特性以及黑水团遥感监测研究积累了经验。由于黑水团具有突然暴发、持续时间短的特点,造成实

验观测的困难,影响了该领域研究的发展。

本研究捕捉到 2015 年 7 月在太湖发生的黑水团现象,通过现场采样,观测黑水团中色素颗粒物、非色素颗粒物、可溶性有机物等的吸收系数,并对比分析黑水团水体与非黑水团水体的遥感反射率,以期为遥感监测黑水团发生事件提供经验和方法支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区及样点分布

太湖位于长江三角洲的南部(东经 119°52'32"~120°36'10",北纬 30°55'40"~31°32'58"),流域面积 36 900 km<sup>2</sup>。太湖是中国第三大淡水湖,不仅具有灌溉、蓄水的功能,而且也是周边居民的重要饮用水源地,其水质状况一直备受关注。随着工业发展和城市化加剧,太湖富营养化已经十分严重,近年来,太湖年年有水华发生,严重时甚至出现黑水团现象。2007 年无锡太湖南泉水厂和 2008 年太湖竺山湖发生了大面积的“藻源性”黑水团现象<sup>[20]</sup>,导致无锡市超过一百万居民没有饮用水可以利用。

2015 年 7 月太湖靠西部湖岸发生了黑水团现象,项目组于 7 月 28 日和 7 月 29 日对太湖进行了地面实验,在全湖和河道共采集样点 36 个,其中有 12 个样点分布于黑水团水域。采集的样点代表了 3 种水体类型,其中区域一为黑水团水域,主要集中在太湖西部的大浦口附近和大港口的入口处,共有 12

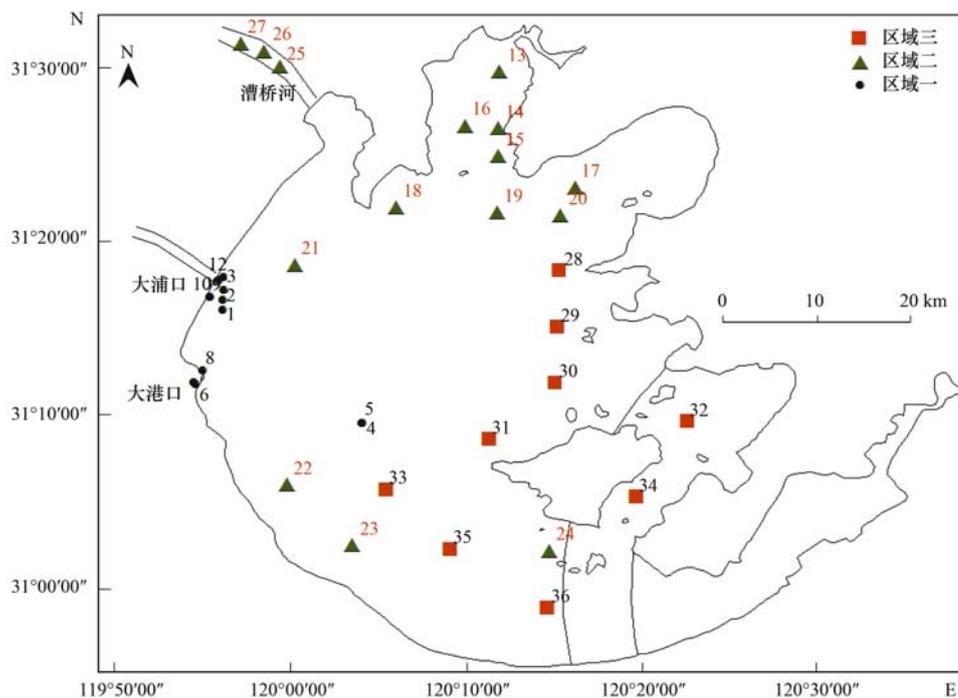


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points

个样点;区域二主要分布在太湖北部的梅梁湾和竺山湾北部漕桥河河道内部,该区域主要为蓝藻水华水体,叶绿素 a 浓度偏高,共有 15 个样点;区域三的水体主要分布在东太湖,为清水区,叶绿素 a 浓度偏低,共有 9 个样点. 野外实验的样点分布见图 1.

## 1.2 数据采集

实验观测包括室外实验和室内实验两个部分,室外实验包括对样点的遥感反射率测量和水样采集,并同时记录 GPS 点位、风速、气压及天气状况等情况. 室内实验包括水质参数与水体组分吸收系数的测量.

### 1.2.1 水面遥感反射率观测

水面光谱数据测量使用的仪器是美国 ASD 公司生产的 ASD FieldSpec Pro 便携式光谱辐射计,其波段范围是 350 ~ 1 050 nm. 首先仪器探头垂直对准灰板中心,避免阴影、杂散光,测量标准灰板的辐亮度( $L_p$ );其次对准水体测量辐亮度( $L_{sw}$ ),尽量要避开太阳直射反射和船舶阴影对光场的破坏,然后将仪器向上旋转 90°对准天空测量辐亮度( $L_{sky}$ );最后再垂直对准灰板测量标准灰板的辐亮度. 水面光谱数据按照唐军武等<sup>[21]</sup>介绍的方法换算成水面遥感反射率.

### 1.2.2 水质参数测量

实测的水质参数包括总悬浮物浓度(TSM)、无机悬浮物浓度(ISM)、有机悬浮物浓度(OSM)、叶绿素 a 浓度(Chla)、溶解性有机碳(DOC)、总磷(TP)总氮(TN)浓度.

总悬浮物浓度测定使用直径为 47 mm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F),先进行煅烧处理(去除膜上原附有的有机质以及水分). 将冷却后的膜进行称量,用来过滤一定体积的水样,残留在膜上的物质就是总悬浮物,烘干称重后,用含有总悬浮物的膜的质量减去膜的质量得到总悬浮物的质量. 然后,550℃高温烘烤载有总悬浮物的膜,去除有机悬浮物,称量得到无机悬浮物的质量. 再分别计算得到总悬浮物(TSM)、无机悬浮物(ISM)和有机悬浮物浓度(OSM)<sup>[22]</sup>.

叶绿素浓度测量采用陈宇炜等<sup>[23]</sup>提出的“热乙醇法”,叶绿素 a 测量采用紫外分光光度计测量,用直径为 47 mm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤水样,将滤膜放入冰箱冷冻 48 h 以上,取出用 90% 的乙醇萃取,然后用岛津 UV2250 分光光度计测量 665 nm、750 nm 处的吸光度,并加入 1 滴 1 mol·L<sup>-1</sup>稀盐酸进行酸化,1 min 后计算 665 nm、750

nm 的消光度,计算叶绿素 a 的浓度.

用直径为 47 mm 的玻璃纤维滤膜(Whatman GF/F)过滤水样,利用岛津总有机碳分析仪(Shimadzu TOC-V CPN)测量溶解性有机碳(DOC)浓度<sup>[24]</sup>.

取适量的水样,加入过硫酸钾(K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>)溶液,在 120℃下加热氧化分解 30 min,水样中的含磷化合物被氧化分解成正磷酸盐. 将被消解的水样冷却至一定温度后,分别取部分试样,加入 1 mL 的抗坏血酸溶液,30 s 后加入 2 mL 的钼酸铵溶液,充分混匀,生成磷钼蓝,然后在 700 nm 波长处测量吸光度值,进而计算水中的总磷(TP)浓度值<sup>[25,26]</sup>.

取适量的水样,加入过硫酸钾溶液和 NaOH 溶液,在 120℃下加热氧化分解 30 min,水样中含氮化合物被分解成硝酸根;被消解的水样冷却至一定温度后分取一部分试样,加盐酸调节 pH 值至 2 ~ 3,用紫外分光光度计分别测量波长 220 nm 和 275 nm 处的吸光度(A),按  $A = A_{220} - 2A_{275}$  计算硝酸盐氮的吸光度值,从而计算总氮(TN)的含量<sup>[25,26]</sup>.

### 1.2.3 水体组分吸收系数测量

实测的水体组分吸收系数包括有色可溶性有机物质(CDOM)的吸收系数[ $a_g(\lambda)$ ]与总悬浮颗粒物[ $a_p(\lambda)$ ]、色素颗粒物[ $a_{ph}(\lambda)$ ]与非色素颗粒物吸收系数[ $a_d(\lambda)$ ].

CDOM 吸收系数的测定,首先采用孔径为 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤水样,然后利用紫外分光光度计测量其吸光度,采样间隔为 1 nm,最后根据 Bricaud 等<sup>[27]</sup>的方法进行散射效应的校正,计算得到 CDOM 的吸收系数[ $a_g(\lambda)$ ].

总颗粒物吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)测定<sup>[28]</sup>,首先用直径 25 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 ~ 400 mL 水样,其次用分光光度计测定滤膜上总颗粒物的吸光度,用同样湿润程度的空白滤膜做参比,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,测量总颗粒物的吸收系数[ $a_p(\lambda)$ ]. 用次氯酸钠滴入样品滤膜周围去除样品色素,然后用分光光度计测得非色素颗粒物的吸收系数[ $a_d(\lambda)$ ],将计算得到的总颗粒物吸收系数减去非色素颗粒物吸收系数得到色素颗粒物吸收系数[ $a_{ph}(\lambda)$ ]<sup>[29~31]</sup>.

## 2 结果与分析

此次黑水团事件发生在 2015 年的 7 月 28 日与 7 月 29 日,在大浦口和大港口附近发现两处黑

水团现象. 7 月上半旬, 受梅雨及第 9 号“灿鸿”台风影响, 在 7 月 27 日之前太湖宜兴附近一直持续阴雨天气, 7 月 24 日之后温度持续上升, 在 7 月 27 日和 7 月 28 日这两天温度达到了最高峰. 这样持续的高温天气有利于蓝藻的大量暴发, 加上太湖 7 月正盛行东南风, 使蓝藻在太湖西部大量聚集, 有利于黑水团的形成. 此次实验, 观测到黑水团面积不少于  $1 \text{ km}^2$ . 黑水团发生区域的水体呈现黑色,

与邻近水体有清晰的界限, 水表面有恶臭味, 湖面时有气泡冒出, 湖面可见死亡的生物残体, 如死鱼、湖鳅等.

## 2.1 黑水团水体与其它水体水质参数对比分析

表 1 所示是 2015 年 7 月不同区域水体的实测水质参数数据, 从中看出, 黑水团区(区域一)、蓝藻水华区(区域二)、清水区(区域三)的水质参数含量有着显著的区别.

表 1 2015 年 7 月太湖 3 个不同水体区域水质参数<sup>1)</sup>/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality parameters of three different regions in Taihu Lake in July 2015/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	区域一		区域二		区域三	
	平均值	范围	平均值	范围	平均值	范围
DOC	$4.89 \pm 0.26$	4.61 ~ 5.33	$4.03 \pm 0.42$	2.98 ~ 4.59	$3.21 \pm 0.25$	2.91 ~ 3.58
TP	$0.240 \pm 0.047$	0.188 ~ 0.367	$0.098 \pm 0.037$	0.051 ~ 0.143	$0.030 \pm 0.008$	0.020 ~ 0.041
TN	$2.965 \pm 0.589$	2.310 ~ 4.509	$2.026 \pm 0.78$	0.997 ~ 3.354	$1.354 \pm 0.354$	1.087 ~ 2.070
Chla	$141.05 \pm 24.45$	108.81 ~ 172.98	$58.16 \pm 22.37$	30.69 ~ 80.91	$6.20 \pm 3.63$	2.79 ~ 11.16
TSM	$21.54 \pm 3.92$	15.90 ~ 28.46	$19.37 \pm 6.63$	9.60 ~ 30.3	$9.19 \pm 5.43$	2.60 ~ 16.20
OSM	$18.27 \pm 3.56$	9.80 ~ 33.93	$14.18 \pm 4.13$	7.10 ~ 19.6	$6.86 \pm 2.44$	4.00 ~ 8.90
ISM	$3.20 \pm 0.145$	1.90 ~ 14.80	$5.19 \pm 3.24$	0.20 ~ 13.80	$2.33 \pm 0.22$	1.40 ~ 10.10

1) Chla 的单位  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

藻类细胞在高温下大量聚集后, 在细胞的代谢和降解的过程中, 会消耗掉大部分水体中的氧气, 使水体表层沉积物处于缺氧、甚至厌氧的状态, 同时也会释放出大量的溶解性有机碳(DOC). 因此, 黑水团区域的 DOC 高于正常水体, 黑水团区域 DOC 的均值为  $(4.89 \pm 0.26) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 而在东太湖清水区域水体中的 DOC 均值为  $(3.21 \pm 0.25) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

蓝藻的降解过程也是导致氮和磷集聚的重要阶段<sup>[32]</sup>, 因此, 黑水团区域的总磷总氮浓度高于正常水体. 本次样本数据显示, 黑水团水体中总氮的均值为  $(2.965 \pm 0.589) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 与区域三的东西太湖水体相比高出 2 倍左右. 黑水团水体中总磷的均值为  $(0.240 \pm 0.047) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 与具有蓝藻水华特征的区域二相比, 高出近 3 倍左右, 也比区域三的东西太湖水体高出近 8 倍左右.

黑水团区域水体与另外两个特征区域水体相比, 此次黑水团具有叶绿素 a 和 OSM 值高的特征. 3 个不同区域叶绿素浓度范围分别为 108.81 ~ 172.98、30.69 ~ 80.91、2.79 ~ 11.16  $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ . 叶绿素 a 的浓度在区域一最高, 均值为  $(141.05 \pm 24.45) \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ , 是区域二的 3 倍, 其中区域三中叶绿素 a 的浓度最低.

总悬浮物浓度(TSM)在 3 个不同区域范围值分别为 15.90 ~ 28.46、9.60 ~ 30.30、2.60 ~ 16.20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值分别为  $(21.54 \pm 3.92)$ 、 $(19.37 \pm$

$6.63)$ 、 $(9.19 \pm 5.43) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 区域一黑水团中总悬浮物浓度高于另外两个区域, 其中有机悬浮物(OSM)占总悬浮物的质量分数约为 85%, 高于区域二和区域三.

## 2.2 黑水团水体与其它水体遥感反射对比分析

图 2 分别为黑水团区域与不同区域水体的遥感反射率光谱, 可以看出黑水团的遥感反射率在数值和光谱斜率上与其他不同区域的水体都有明显的区别.

在 400 ~ 800 nm 范围内, 黑水团区域水体的遥感反射率整体低于  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ , 其平均遥感反射率远低于其它区域水体. 在 400 ~ 570 nm 波段范围内, 遥感反射率随着波长的增长呈现逐渐上升的趋势, 这主要是由于叶绿素、胡萝卜素等光合色素的弱吸收和无机悬浮物、浮游植物细胞壁的散射作用形成的. 与其他区域水体相似, 区域一黑水团水体的遥感反射率在 555 nm 出现一个小的峰值(小于  $0.008 \text{ sr}^{-1}$ ), 但是其波峰宽度大于另外两种不同类型的水体. 区域二和区域三的遥感反射率在 555 nm 处出现最高峰, 其峰值约是黑水团区域的 5 ~ 4 倍. 通过  $R_{rs}(555 \text{ nm})/R_{rs}(412 \text{ nm})$  比值在一定程度上可以看出遥感反射率在 555 nm 处的峰值大小,  $R_{rs}(555 \text{ nm})/R_{rs}(412 \text{ nm})$  的比值在区域二最高(约 4.43), 其次是区域三(约 2.70), 黑水团的区域一最低(约 1.80).

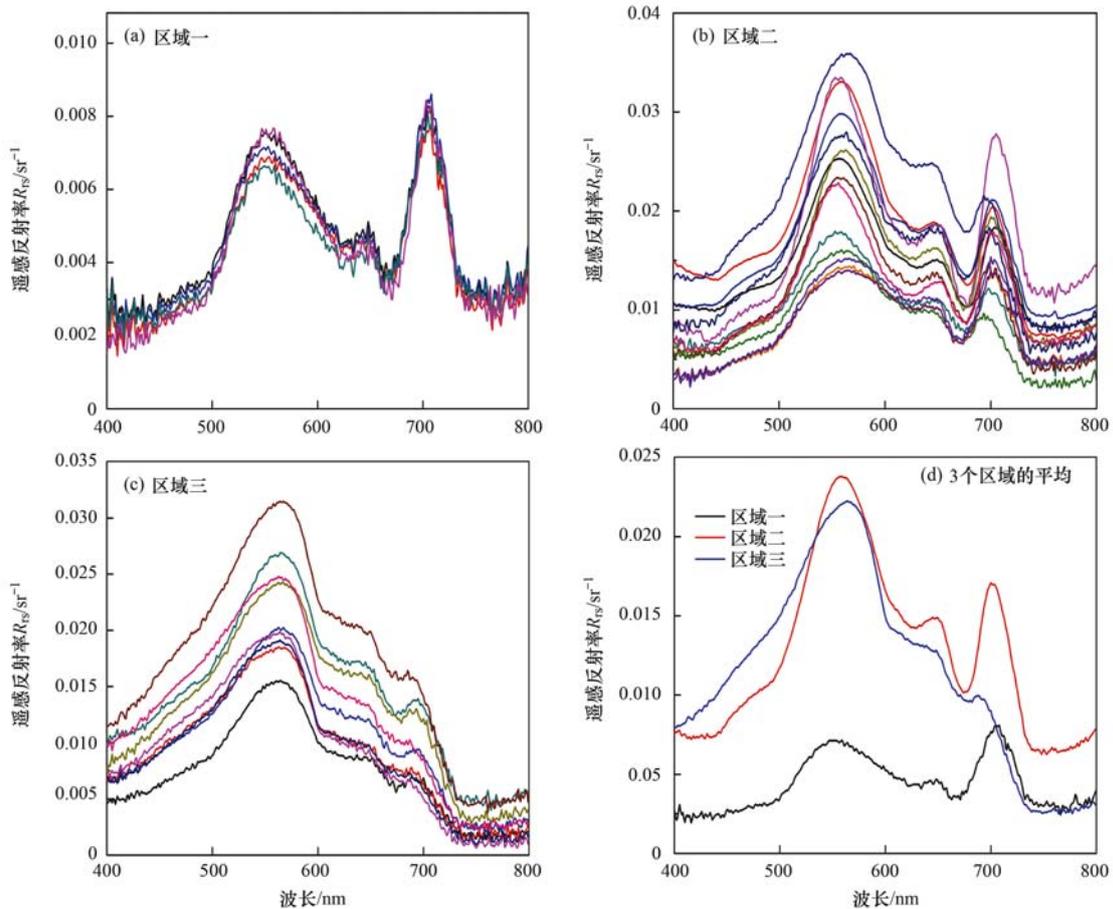


图2 水体表面的遥感反射率光谱在区域一、区域二、区域三及3个区域的平均遥感反射率光谱

Fig. 2 Reflectance spectra for surface waters from stations in zone 1, zone 2, and zone 3, and average reflectance spectra of zone 1-3

与区域二相似,黑水团区域遥感反射率在 625 nm 附近出现一个低的反射谷值,这主要是由于藻蓝蛋白的吸收作用导致,而这一谷值在藻蓝蛋白浓度低的清水区域则没有出现;在 650 ~ 700 nm 之间有个很低的吸收谷,这主要是由于这两类水体含有较高的叶绿素 a 浓度,其浮游藻类细胞中含有的光合作用色素强吸收导致的. 由于黑水团水体的叶绿素浓度远远高于其他水体,使得其在 710 nm 附近的遥感反射率峰值高度比区域二水体明显.

黑水团发生区域,水体中叶绿素 a 浓度相比区域二和区域三要高很多. 在 440 nm 附近由于叶绿素 a 的吸收,会出现一个吸收谷,680 nm 处由于藻蓝蛋白的吸收,反射率会有一个吸收谷,叶绿素 a 浓度与 440 nm、680 nm 处的吸收系数呈现正相关关系,黑水团在 440 nm、680 nm 反射率减小,吸收峰增加. 黑水团中叶绿素 a 浓度与位于 700 nm 附近的反射峰高度呈正相关关系,也与 690 ~ 740 nm 区间的荧光峰位置红移呈正相关关系. 同时,黑水团

区域水体在近红外波段具有明显的植被“陡坡效应”特征,反射率升高.

### 2.3 黑水团水体与其它水体颗粒物吸收特性对比分析

#### 2.3.1 总颗粒物吸收特性

总颗粒物的吸收系数近似于非色素颗粒物吸收系数与色素颗粒物吸收系数之和. 图 3 为区域一、二、三的总颗粒物平均吸收系数光谱曲线. 从中可以看出,总颗粒物吸收系数在具有黑水团特性的区域一明显高于区域三所在的东太湖水体,也比蓝藻水华区的区域二高,在 443 nm 和 675 nm 附近存在反射的峰值.

在 3 个不同的区域,443 nm 处总颗粒物吸收系数  $a_p(443 \text{ nm})$  的范围分别为 3.90 ~ 9.47、2.03 ~ 6.73、1.34 ~ 2.50  $\text{m}^{-1}$ ,平均值分别为  $(6.51 \pm 1.40)$ 、 $(3.92 \pm 1.34)$ 、 $(1.92 \pm 0.50) \text{m}^{-1}$ ; 675 nm 处总颗粒物吸收系数  $a_p(675 \text{ nm})$  的范围分别为 1.87 ~ 5.42、0.89 ~ 3.37、0.51 ~ 1.38  $\text{m}^{-1}$ ,平均值分别为  $(3.54 \pm 1.53)$ 、 $(1.89 \pm 0.68)$ 、 $(0.93 \pm 0.34) \text{m}^{-1}$ .

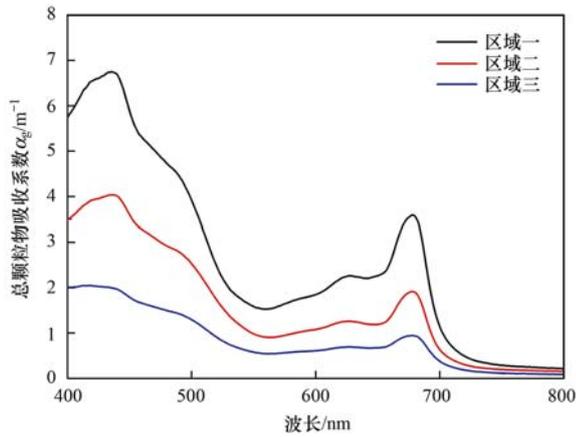


图3 2015年7月太湖3个不同区域总颗粒物平均吸收系数光谱曲线

Fig. 3 Average absorption spectra of the total particulate matter in three different regions of Taihu Lake in July 2015

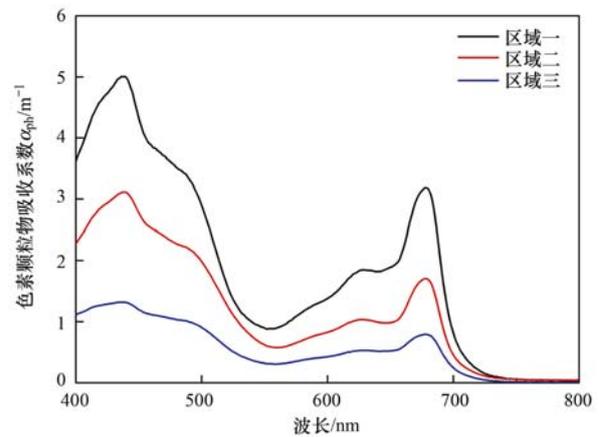


图4 2015年7月太湖3个不同区域色素颗粒物平均吸收系数光谱曲线

Fig. 4 Average absorption spectra of pigment particles of Taihu Lake in the three different regions in July 2015

### 2.3.2 色素颗粒物吸收特性

图4为3个不同区域水体色素颗粒物平均吸收系数光谱曲线,3个区域水体色素颗粒物平均吸收系数都具有双峰特征:在443 nm附近由于叶绿素a的吸收出现了吸收峰,450~550 nm处吸收系数大致随着波长的增加而下降,在490 nm附近 $\beta$ 胡萝卜素的吸收峰并不明显,在624 nm处由于藻蓝蛋白的吸收出现一个小峰值,在670 nm附近由于叶绿素a的吸收出现了一个明显的峰值,在近红外波段近似于0.从区域一到区域三,色素颗粒物平均吸收系数在整个谱段都呈现下降的趋势,色素颗粒物吸收系数由于在443 nm存在叶绿素a的吸收峰,443 nm处的色素颗粒物吸收系数在3个不同区域的平均值分别为 $(4.85 \pm 2.23)$ 、 $(3.04 \pm 1.22)$ 和 $(1.29 \pm 0.41) \text{ m}^{-1}$ .色素颗粒物吸收系数在具有黑水团特性的区域一明显高于区域三所在的东太湖水体,也比蓝藻水华区的区域二高.

### 2.3.3 非色素颗粒物吸收特性

图5为非色素颗粒物在太湖3个不同区域的平均吸收系数光谱曲线,从中可以看出,非色素颗粒物吸收系数随着波长的增加而逐渐减小,其光谱特征遵循指数衰减的规律.在短波波段3个不同区域的非色素颗粒物吸收系数差别较大,当波长大于700 nm后,吸收系数趋于零.在443 nm,非色素颗粒物吸收系数在3个不同的区域平均值分别为 $(1.66 \pm 0.28)$ 、 $(0.88 \pm 0.19)$ 、 $(0.63 \pm 0.17) \text{ m}^{-1}$ ,分布范围分别为1.22~2.01、0.64~1.33、0.28~0.90  $\text{ m}^{-1}$ .其中区域一黑水团中的非色素颗粒物吸收系数是区域二的2倍、约是区域三的3倍.

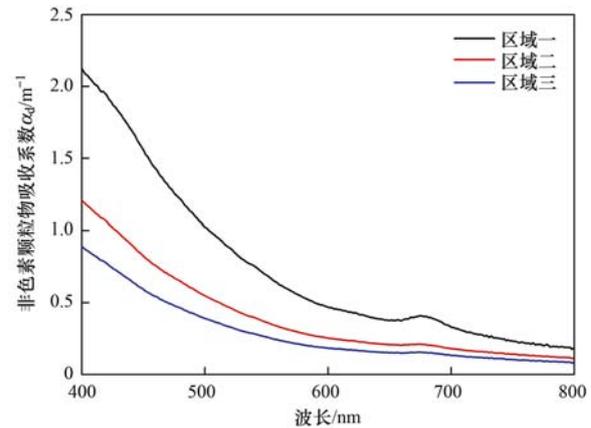


图5 2015年7月太湖3个不同区域非色素颗粒物平均吸收系数光谱曲线

Fig. 5 Average absorption spectra of non-pigment particles of Taihu Lake in the three different regions in July 2015

## 2.4 黑水团水体与其它水体CDOM吸收特性对比分析

CDOM作为水体中一个重要的光吸收物质,其浓度和组成对水下光场有较大的影响<sup>[33]</sup>,不同水体的CDOM吸收系数在短波处差异较大,通常用443 nm波长处的吸收系数 $a_g(443 \text{ nm})$ 来表征CDOM浓度<sup>[34]</sup>.CDOM的吸收主要集中在蓝光和紫外光波段,图6为CDOM在300~800 nm之间3个不同区域的平均吸收光谱曲线,可以看出CDOM的吸收光谱随着波长的增加呈现指数衰减的规律.区域一、二和三在443 nm处的CDOM吸收系数 $a_g(443 \text{ nm})$ 范围分别在0.35~1.55、0.23~1.09和0.12~0.58  $\text{ m}^{-1}$ ,均值分别为 $(1.21 \pm 0.31)$ 、 $(0.65 \pm 0.23)$ 、 $(0.36 \pm 0.19) \text{ m}^{-1}$ .比较3个不同区域在

443 nm 处 CDOM 吸收系数的平均值可以看出,发生黑水团的区域一比太湖蓝藻水华的区域二高出 2 倍左右,比东太湖水体的区域三高出 4 倍左右.

## 2.5 黑水团水体吸收系数的影响因子分析

### 2.5.1 颗粒物吸收系数影响因子分析

颗粒物吸收系数受水体组分及其浓度影响,本研究从总颗粒物、非色素颗粒物、色素颗粒物吸收与叶绿素、悬浮物的相关性分析其影响因素.

通过黑水团的遥感反射率中可以看出在 443 nm 附近由于叶绿素 a 的吸收,会出现一个吸收谷,675 nm 处由于藻蓝蛋白的吸收,反射率会有一个吸收谷,对叶绿素 a、悬浮物浓度与 443 nm、675 nm 处的颗粒物吸收系数之间的相关性进行分析.

表 2 分别为 443 nm、675 nm 处总颗粒物吸收系数、色素颗粒物吸收系数和非色素颗粒物吸收系数与悬浮物、叶绿素 a 之间的相关性. 从中可以看出黑水团水体在 443 nm、675 nm 处总颗粒物吸收 [ $a_p(443 \text{ nm})$ 、 $a_p(675 \text{ nm})$ ] 与叶绿素 a 浓度 (Chla)、有机悬浮物 (OSM) 之间都存在着很好的相

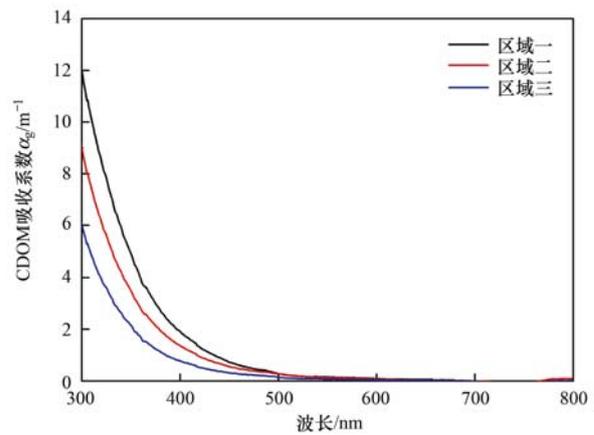


图 6 2015 年 7 月太湖 3 个不同区域 CDOM 平均吸收系数光谱曲线

Fig. 6 Average absorption spectra of CDOM of Taihu Lake in the three different regions in July 2015

关性,  $R^2$  值高于 0.85, 但是 [ $a_p(443 \text{ nm})$ 、 $a_p(675 \text{ nm})$ ] 与总悬浮物 (TSM) 相关性弱,  $R^2$  值为 0.60 左右,  $a_p(675)$  与无机悬浮物浓度之间几乎不存在相关性. 在总颗粒物吸收系数中主要以叶绿素 a 的贡献占主导地位.

表 2 颗粒物吸收系数与悬浮物、叶绿素 a 浓度之间的相关关系

Table 2 Relationship between absorption of particulate, concentrations of suspended matter and chlorophyll-a

	$a_p(443 \text{ nm})$	$a_p(675 \text{ nm})$	$a_{ph}(443 \text{ nm})$	$a_{ph}(675 \text{ nm})$	$a_d(443 \text{ nm})$	$a_d(675 \text{ nm})$
Chla	0.94	0.94	0.76	0.94	0.72	0.32
TSM	0.60	0.64	0.22	0.42	0.27	0.31
ISM	0.59	0.16	0.12	0.41	0.20	0.17
OSM	0.86	0.86	0.73	0.85	0.77	0.42

443 nm 处色素颗粒物吸收系数  $a_{ph}(443 \text{ nm})$  与叶绿素 a 浓度 (Chla) 和有机悬浮物浓度 (OSM) 相关性较好,  $R^2$  分别为 0.76 和 0.73, 而 675 nm 处色素颗粒物吸收系数  $a_{ph}(675 \text{ nm})$  与叶绿素 a 浓度具有显著的线性相关性 ( $R^2 = 0.93$ ), 与有机悬浮物浓度 (OSM) 也存在着很强的相关性 ( $R^2 = 0.85$ ). 说明色素颗粒物吸收系数的变化主要由叶绿素 a 浓度和有机悬浮物浓度 (OSM) 变化引起, 受总悬浮物浓度 (TSM) 和无机悬浮物浓度 (ISM) 的影响较小. 此外, 675 nm 处色素颗粒物吸收系数与叶绿素 a 浓度的相关关系优于 443 nm, 说明 443 nm 色素颗粒物的吸收系数作用受非色素颗粒物掩盖, 而到了 675 nm 附近, 非色素颗粒物的吸收系数很小, 色素颗粒物吸收峰非常明显, 色素颗粒物吸收作用占主导地位.

色素颗粒物中的色素组成决定其吸收系数, 一般采用比值  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  来反映色素的组成

情况, 其值越大说明辅助色素的比例越高<sup>[35-37]</sup>. 本研究中, 黑水团水体  $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$  的值在 1.5108 ~ 1.7007 之间, 平均值为  $1.5933 \pm 0.058$ , 该值低于王桂芬等<sup>[37]</sup> 研究的南海北部水体的值 (1.69 ~ 5.19), 也低于 Sosik 等<sup>[38]</sup>、Millán-Núñez 等<sup>[39]</sup> 在加利福尼亚湾流海区 (1.75 ~ 3.66) 的研究结果, 说明黑水团中辅助色素的比例较低, 叶绿素 a 占主导地位.

### 2.5.2 CDOM 吸收系数影响因子分析

CDOM 作为黑水团中一个重要的物质, 可以来源于陆地有机物质的输入<sup>[32]</sup>, 也可以来源于当地水生植物的降解包括蓝藻的降解<sup>[40-42]</sup>. 如图 7 所示, CDOM 在 350 nm 处吸收系数与叶绿素 a 之间的相关性达到 0.74, 但是 CDOM 与悬浮物等其它水质参数之间的相关性并不明显, 说明太湖黑水团中 CDOM 可能很大部分来源于蓝藻的降解. 内源型的 CDOM 由腐殖酸和富里酸等物质组成. 根据 De

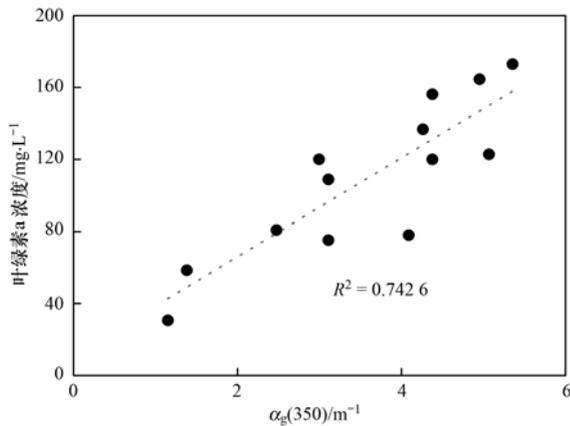


图7 CDOM 吸收系数与叶绿素 a 之间相关性

Fig. 7 Relationship between CDOM absorption at 350 nm and chlorophyll-a

Haan 等<sup>[43]</sup>、Peuravuori 等<sup>[44]</sup>的研究, CDOM 的相对分子质量可以通过 250 nm 和 365 nm 处吸收系数的比值  $M$  值进行跟踪,  $M$  值越大, 对应的相对分子质量越小, 而相对分子质量可以反映腐殖酸和富里酸在 CDOM 中的比例<sup>[45]</sup>, 腐殖质的相对分子质量一般较大, 而富里酸则较小. 因此  $M$  值越小, 则 CDOM 腐殖酸的相对含量越高, 富里酸的相对含量就越低. 表 3 显示了 4 个不同区域水体  $M$  值统计结果, 相比较之下<sup>[46,47]</sup>, 本研究具有黑水团特征的区域一的  $M$  值低于滇池、巢湖和太湖的  $M$  值变化范围, 说明具有黑水团特征的水体中的 CDOM 中腐殖酸含量较高, 其中太湖水体中的腐殖酸很大一部分来源于植物的遗骸, 是经过微生物的分解和转化形成的有机物质, 这也进一步证明了太湖黑水团中 CDOM 可能很大部分是来源于当地大量的蓝藻降解.

表 3 不同水体  $M$  值

Table 3 The  $M$  values in different water

研究区	$M$ 值范围	$M$ 值平均值
区域一	3.16 ~ 9.53	5.60 ± 0.56
区域二	2.80 ~ 10.35	6.38 ± 2.70
区域三	3.03 ~ 11.82	5.52 ± 0.15
滇池	6.44 ~ 10.24	7.68 ± 0.16
巢湖	8.57 ~ 15.22	10.60 ± 1.57
太湖	6.94 ~ 9.88	8.66 ± 0.09

### 2.5.3 不同水体组分对黑水团吸收系数的贡献分析

水体的遥感反射率主要是受后向散射与水体总吸收系数之间的比值控制<sup>[48]</sup>:

$$R_{rs}(\lambda) = f \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)} \quad (1)$$

式中,  $f$  为水体属性和受光照条件影响的参数, Dekker<sup>[49]</sup>通过对 19 个不同内陆水体的吸收和后向

散射以及表观光学属性进行测量后, 计算得到的  $f$  值的范围是 0.12 ~ 0.56, 平均值为 0.29, 是一个定值. 水体的总吸收 ( $a$ ) 包括纯水吸收、色素颗粒物吸收、非色素颗粒物吸收和 CDOM 吸收, 由于纯水吸收是固定的, 因此讨论黑水团区域水体吸收贡献率时不考虑纯水吸收.

为了区分每个光学活性物质的贡献率要对遥感反射率传输模型进行转换:

$$R_{rs}(\lambda)^{-1} = \frac{1}{R_{rs}(\lambda)} = \gamma(\lambda)^{-1} \times \frac{b_b(\lambda) + a_g(\lambda) + a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) + a_w(\lambda)}{b_b(\lambda)} \quad (2)$$

其中  $\gamma(\lambda)$  为一个湖泊特定的光谱校正因子, 取决于每个光学活性物质和遥感反射率的测量, 可以看做是一个定值. 如果  $b_b(\lambda)$  看做一个定值, 那么水体中各种活性物质的总吸收系数与遥感反射率之间存在负相关的关系, 当水体的总吸收系数增加, 遥感反射率会下降, 如图 8 所示. 从中可以看出总吸收系数在一定程度影响着黑水团的遥感反射率, 探究每个光学活性物质的吸收系数对总吸收系数的贡献率, 在一定程度也反映了黑水团中色素颗粒物、非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数对水体遥感反射率的影响.

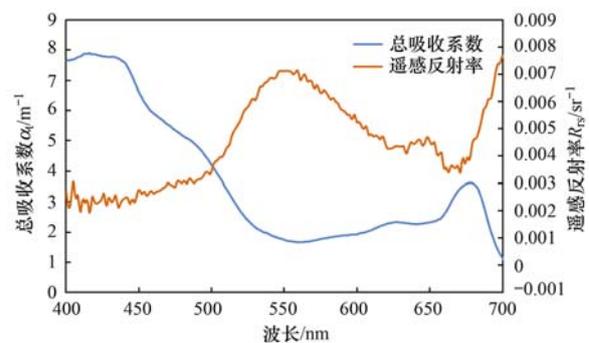


图 8 2015 年 7 月黑水团区域水体的遥感反射率与总吸收系数

Fig. 8 Remote sensing reflectance and total absorption coefficient the black water blooms area water in July 2015

以色素颗粒物、非色素颗粒物和 CDOM 吸收系数的平均值与总吸收系数的比值作为色素颗粒物、非色素颗粒物和 CDOM 对总吸收作用的贡献率.

图 9 为黑水团区域的色素颗粒物、非色素颗粒物和 CDOM 平均吸收系数在 350 ~ 700 nm 范围内对总吸收的贡献率. 从中可以看出, 在 380 ~ 700 nm 范围内色素颗粒物吸收系数在总吸收中占主导作用, 色素颗粒物吸收对总吸收的贡献率都在 60% 以

上. 非色素颗粒物吸收对总吸收的贡献率远小于色素颗粒物. CDOM 吸收系数对总吸收的贡献率在此波段范围内低, 贡献率都在 30% 以下. 380 ~ 700 nm 范围内不同组分对总吸收的贡献大小为: 色素颗粒物 > 非色素颗粒物 > CDOM.

在短波 350 ~ 380 nm 波段范围, CDOM 对总吸收的贡献率高于非色素颗粒物吸收的贡献率, 非色素颗粒物吸收对总吸收的贡献率高于色素颗粒物, 即 CDOM > 非色素颗粒物 > 色素颗粒物.

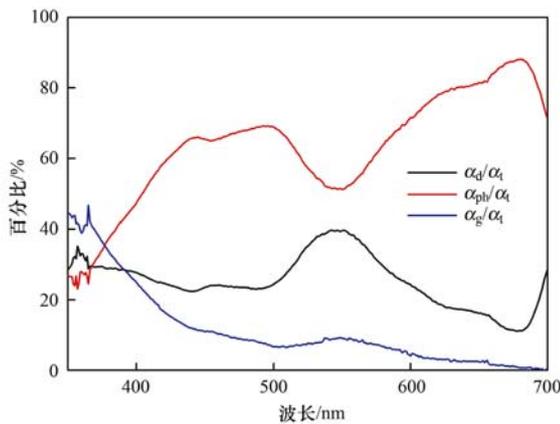


图 9 2015 年 7 月黑水团区域水体非色素颗粒物、色素颗粒物和 CDOM 对总吸收的贡献率

Fig. 9 Contributions of individual optical components total in absorption coefficient in black water blooms in July 2015

CDOM 中成分组成在一定程度上也会影响 CDOM 对总吸收系数的贡献率, 图 10 为  $M$  值与 CDOM 吸收系数贡献率之间的关系, 由此可以看出,  $M$  值越小, 即 CDOM 中腐殖酸含量较高时, CDOM 对水体总吸收的贡献大.  $M$  值的大小与 CDOM 对水体总吸收的贡献率之间存在着一定的负相关关系. 太湖黑水团的  $M$  值低于滇池、巢湖和太湖的  $M$  值变化

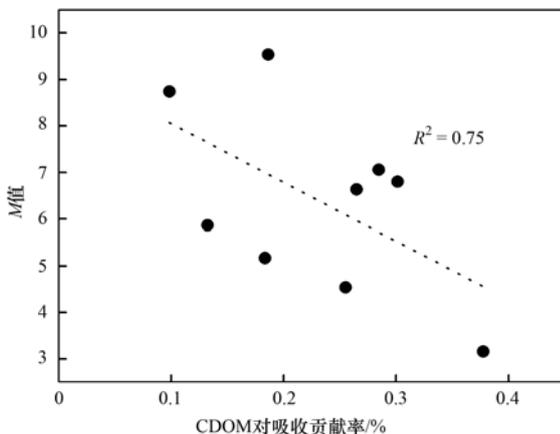


图 10 黑水团区域水样  $M$  值与 CDOM 吸收贡献率之间的关系

Fig. 10 Correlation between  $M$  values and contribution of CDOM total absorption in black water blooms

范围, 黑水团 CDOM 中腐殖酸含量较高, 黑水团中 CDOM 对总吸收系数的贡献率也高于其他水体.

### 3 结论

(1) 与另外两个特征区域的水质参数相比, 此次黑水团具有叶绿素浓度和有机悬浮物浓度高的特征. 其中有机悬浮物占总悬浮物浓度分数为 85%, 高于区域二和区域三. 黑水团中总氮、总磷、可溶性有机碳的浓度异常偏高.

(2) 太湖黑水团与周围的湖水相比, 有着较低的遥感反射率, 在 400 ~ 800 nm 范围内遥感反射率整体低于  $0.01 \text{ sr}^{-1}$ , 是蓝藻水华水体和清水区水体的 1/5 ~ 1/4. 此外, 黑水团区域在 500 ~ 550 nm 的峰值宽于其他不同类型的水体

(3) 总颗粒物吸收系数、色素颗粒物吸收系数和非色素颗粒物吸收系数在具有黑水团特性的区域一明显高于区域三所在的东太湖水体, 也比蓝藻水华区的区域二高. 在区域一黑水团中 CDOM 值在 400 ~ 500 nm 范围内比太湖蓝藻水华的区域二高 2 倍左右, 比东太湖水体的区域三要高 4 倍左右.

(4) 黑水团水体中  $a_{ph}(443 \text{ nm})$  与叶绿素 a 浓度、有机悬浮物浓度之间存在很好的相关性,  $a_{ph}(440 \text{ nm})/a_{ph}(675 \text{ nm})$  值较小, 说明水体中辅助色素的比例较低, 主要是叶绿素 a 占主导地位.

(5)  $M$  值为 250 nm 和 365 nm 处 CDOM 吸收系数的比值, 黑水团中  $M$  值低, 说明 CDOM 中腐殖酸含量较高, 富里酸的相对含量低. 此外, CDOM 在 350 nm 处吸收系数与叶绿素 a 之间的相关性达到 0.74, 表明太湖黑水团中 CDOM 很大部分来源于蓝藻的降解.

(6) 在短波 350 ~ 380 nm 波段范围, 黑水团水体不同组分对总吸收的贡献大小为: CDOM > 非色素颗粒物 > 色素颗粒物. 在 380 ~ 700 nm 范围内, 不同组分对总吸收的贡献大小为: 色素颗粒物 > 非色素颗粒物 > CDOM. 在 380 ~ 700 nm 范围内, 色素颗粒物吸收系数在总吸收中占主导作用, 色素颗粒物吸收对总吸收的贡献率都在 60% 以上.

致谢: 感谢太湖野外实验的参与者刘阁、郑著彬、杜成功、王帅、雷少华, 室内实验数据分析参与者王艳楠、金琦、时蕾、冯池、赵丽娜. 非常感谢南京地理与湖泊研究所对部分实验数据的测量.

### 参考文献:

- [1] 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.

- [ 2 ] 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.
- [ 3 ] Duval B, Ludlam S D. The black water chemocline of meromictic Lower Mystic Lake, Massachusetts, U. S. A [J]. International Review of Hydrobiology, 2001, **86**(2): 165-181.
- [ 4 ] Rai H, Hill G. Physical and chemical studies of Lago Tupé; a central Amazonian Black Water “Ria Lake” [J]. Internationale Revue der Gesamten Hydrobiologie und Hydrographie, 1981, **66**(1): 37-82.
- [ 5 ] Rixen T, Baum A, Pohlmann T, *et al.* The Siak, a tropical black water river in central Sumatra on the verge of anoxia [J]. Biogeochemistry, 2008, **90**(2): 129-140.
- [ 6 ] Pucciarelli S, Buonanno F G, Pellegrini G, *et al.* Biomonitoring of Lake Garda: identification of ciliate species and symbiotic algae responsible for the “black-spot” bloom during the summer of 2004 [J]. Environmental Research, 2008, **107**(2): 194-200.
- [ 7 ] Yang M, Yu J, Li Z, *et al.* Taihu Lake not to blame for Wuxi’s woes [J]. Science, 2008, **319**(5860): 158.
- [ 8 ] 刘国锋, 钟继承, 何俊, 等. 太湖竺山湾藻华黑水团区沉积物中 Fe、S、P 的含量及其形态变化 [J]. 环境科学, 2009, **30**(9): 2520-2526.
- [ 9 ] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 太湖梅梁湾 2007 年蓝藻水华形成及取水口污水团成因分析与应急措施建议 [J]. 湖泊科学, 2007, **19**(4): 357-358.
- [ 10 ] 陈荷生. 太湖宜兴近岸水域“湖泛”现象初析 [J]. 水利水电科技进展, 2011, **31**(4): 33-37.
- [ 11 ] 刘国锋, 何俊, 范成新, 等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面处 Fe、Mn、S 循环影响 [J]. 环境科学, 2010, **31**(11): 2652-2660.
- [ 12 ] 刘国锋, 申秋实, 张雷, 等. 藻源性黑水团环境效应: 对水-沉积物界面氮磷变化的驱动作用 [J]. 环境科学, 2010, **31**(12): 2917-2924.
- [ 13 ] 刘国锋, 范成新, 张雷, 等. 藻源性黑水团环境效应 III: 对水-沉积物界面处 Fe-S-P 循环的影响 [J]. 中国环境科学, 2014, **34**(12): 3199-3206.
- [ 14 ] He W, Shang J G, Lu X, *et al.* Effects of sludge dredging on the prevention and control of algae-caused black bloom in Taihu Lake, China [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(3): 430-440.
- [ 15 ] Shen Q S, Liu C, Zhou Q L, *et al.* Effects of physical and chemical characteristics of surface sediments in the formation of shallow lake algae-induced black bloom [J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, **25**(12): 2353-2360.
- [ 16 ] Duan H T, Ma R H, Loisel S A, *et al.* Optical characterization of black water blooms in eutrophic waters [J]. Science of the Total Environment, 2014, **482-483**: 174-183.
- [ 17 ] Zhou Y Q, Jeppesen E, Zhang Y L, *et al.* Chromophoric dissolved organic matter of black waters in a highly eutrophic Chinese lake: freshly produced from algal scums? [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, **299**: 222-230.
- [ 18 ] Berthon J F, Zibordi G. Optically black waters in the northern Baltic Sea [J]. Geophysical Research Letters, 2010, **37**(9): L09605.
- [ 19 ] Battin T J. Dissolved organic matter and its optical properties in a black water tributary of the upper Orinoco river, Venezuela [J]. Organic Geochemistry, 1998, **28**(9-10): 561-569.
- [ 20 ] Guo L. Ecology. Doing battle with the green monster of Taihu Lake [J]. Science, 2007, **317**(5842): 1166-1166.
- [ 21 ] 唐军武, 田国良, 汪小勇, 等. 水体光谱测量与分析 I: 水面以上测量法 [J]. 遥感学报, 2004, **8**(1): 37-44.
- [ 22 ] 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, 2007, **27**(19): 4305-4328.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 姜广甲, 马荣华, 段洪涛. 利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度 [J]. 环境科学, 2012, **33**(7): 2235-2243.
- [ 25 ] 龚绍琦, 黄家柱, 李云梅, 等. 水体氮磷高光谱遥感实验研究初探 [J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(4): 839-842.
- [ 26 ] 王继国, 冯莉霞, 史晓慧. 总氮总磷联合测定方法研究 [J]. 中国环境监测, 1995, **11**(6): 62-64.
- [ 27 ] 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.
- [ 28 ] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the Quantitative Filter Technique [A]. In: Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering [C]. Orlando, FL, United State: SPIE, 1990. 137.
- [ 29 ] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique [A]. In: Proceedings of SPIE 1302, Ocean Optics X. Orlando, FL, United States: SPIE, 1990. 137-148.
- [ 30 ] Exterkate F A. A modified colorimetric method for the determination of pyrrolidone carboxyl peptidase activity in bacteria [J]. Analytical Biochemistry, 1973, **53**(1): 321-326.
- [ 31 ] Yentsch C S. Measurement of visible light absorption by particulate matter in the ocean [J]. Limnology and Oceanography, 1962, **7**(2): 207-217.
- [ 32 ] Hansell D A, David K, Bates N R. Degradation of terrigenous dissolved organic carbon in the western Arctic Ocean [J]. Science, 2004, **304**(5672): 858-861.
- [ 33 ] Diaz R J, Rosenberg R. Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems [J]. Science, 2008, **321**(5891): 926-929.
- [ 34 ] Del Castillo C E, Coble P G. Seasonal variability of the colored dissolved organic matter during the 1994-95 NE and SW Monsoons in the Arabian Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2000, **47**(7-8): 1563-1579.
- [ 35 ] 施坤, 李云梅, 杨煜, 等. 太湖水体浮游藻类吸收系数及影响因素分析 [J]. 光谱学与光谱分析, 2010, **30**(8): 2223-2227.
- [ 36 ] Bricaud A, Babin M, Morel A, *et al.* Variability in the chlorophyll-specific absorption coefficients of natural phytoplankton: analysis and parameterization [J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [ 37 ] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部水体浮游植物比吸收系数的变化 [J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(5): 1-10.

- [38] Sosik H M, Mitchell B G. Light absorption by phytoplankton, photosynthetic pigments and detritus in the California Current System [ J ]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 1995, **42**(10): 1717-1748.
- [39] Millán-Núñez E, Sieracki M E, Millán-Núñez R, *et al.* Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current [ J ]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2004, **51**(6-9): 817-826.
- [40] Stedmon C A, Thomas D N, Granskog M, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter in Baltic coastal sea ice: allochthonous or autochthonous origins? [ J ]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41**(21): 7273-7279.
- [41] Zhang Y L, van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence [ J ]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [42] Castillo C R, Sarmiento H, Álvarez-Salgado X A, *et al.* Production of chromophoric dissolved organic matter by marine phytoplankton [ J ]. *Limnology and Oceanography*, 2010, **55**(1): 446-454.
- [43] De Haan H. Solar UV-light penetration and photodegradation of humic substances in peaty lake water [ J ]. *Limnology and Oceanography*, 1993, **38**(5): 1072-1076.
- [44] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [ J ]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [45] 张运林, 秦伯强. 梅梁湾、大太湖夏季和冬季 CDOM 特征及可能来源分析 [ J ]. *水科学进展*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [46] 张红, 黄家柱, 李云梅, 等. 滇池水体光学物质的吸收特性研究 [ J ]. *环境科学*, 2011, **32**(2): 452-463.
- [47] 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.
- [48] Gordon H R, Morel A Y. Remote assessment of ocean color for interpretation of satellite visible imagery: a review [ M ]. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [49] Dekker A G. Detection of optical water quality parameters for eutrophic waters by high resolution remote sensing [ D ]. Amsterdam, The Netherlands: Amsterdam Vrije Universiteit, 1993.

## CONTENTS

Temporal and Spatial Variation of Haze Pollution over China from 1960 to 2013 .....	FU Chuan-bo, TANG Jia-xiang, DAN Li, <i>et al.</i> (3237)
Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Aerosol Particles in Taiyuan, Shanxi .....	WANG Lu, WEN Tian-xue, MIAO Hong-yan, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of the Size Distribution of Water Soluble Inorganic Ions During a Typical Haze Pollution in the Autumn in Shijiazhuang .....	LIU Jing-yun, LIU Zi-rui, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (3258)
Variation of Size Distribution and the Influencing Factors of Aerosol in Northern Suburbs of Nanjing .....	WU Dan, CAO Shuang, TANG Li-li, <i>et al.</i> (3268)
Characteristics of Black Carbon Aerosol and Influencing Factors in Northern Suburbs of Nanjing .....	XIAO Si-han, YU Xing-na, ZHU Bin, <i>et al.</i> (3280)
Characteristics of Speciated Atmospheric Mercury in Chongming Island, Shanghai .....	LI Shu, GAO Wei, WANG Shu-xiao, <i>et al.</i> (3290)
Total Gaseous Mercury and Mercury Emission from Natural Surface at One Typical Agricultural Region in Three Gorges Reservoir .....	WANG Yong-min, ZHAO Zheng, SUN Tao, <i>et al.</i> (3300)
Variation Characteristics and Sources Analysis of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Changbai Mountain Station .....	WU Fang-kun, SUN Jie, YU Ye, <i>et al.</i> (3308)
Characterization of Particle Size Distributions of the No-organized Lead Emission for a Lead and Zinc Smelter .....	LIU Da-jun, WANG Jia-quan (3315)
Hydrochemical Characteristics and Sources of Ions in Precipitation at the East Qilian Mountains .....	JIA Wen-xiong, LI Zong-xing (3322)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Vanadium in Sediments of the Three Gorges Reservoir (Chongqing-Yichang Section) .....	GUO Wei, YIN Shu-hua, XU Jian-xin, <i>et al.</i> (3333)
Distributions of Arsenic Species in Different Eutrophic Waters of Lake Taihu and Their Relations to Environmental Factors .....	CHE Fei-fei, WANG Da-peng, ZHEN Zhuo, <i>et al.</i> (3340)
Spatial, Temporal Distribution Characteristics and Potential Risk of PPCPs in Surface Sediments from Taihu Lake .....	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3348)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in the Karst Groundwater System .....	ZHANG Mei, SUN Yu-chuan, XIE Zheng-lan, <i>et al.</i> (3356)
Comparison on the Hydrogeochemical Characteristics of Typical Karst Groundwater System in Southwest China, a Case of Qingmuguan and Laolongdong in Chongqing .....	ZHAN Zhao-jun, CHEN Feng, YANG Ping-heng, <i>et al.</i> (3365)
Fractions and Release Risk of Phosphorus in Surface Sediments of Three Headwater Streams with Different Styles of Water Supply .....	LI Ru-zhong, QIN Ru-bin, HUANG Qing-fei, <i>et al.</i> (3375)
Vertical Variation of Phosphorus Forms in Lake Dianchi and Contribution to Release .....	LI Le, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (3384)
Analysis of Distribution Characteristics and Source of Dissolved Organic Matter from Zhoucun Reservoir in Summer Based on Fluorescence Spectroscopy and PARAFAC .....	HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (3394)
Absorption and Reflection Characteristics of Black Water Blooms in the Eutrophic Water .....	ZHANG Si-min, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3402)
Assessment of Ecosystem Health of Baogang Tailings Groundwater Based on Microbiome Index of Biotic Integrity (M-IBI) .....	AN Xin-li, CHEN Ting-ting, ZHAO Han, <i>et al.</i> (3413)
Relationship Between Landscape Pattern and Spatial Variation of Heavy Metals in Aquatic Sediments in Headwaters Area of Yuqiao Reservoir .....	WANG Zu-wei, WANG Yi-wei, HOU Ying-ying, <i>et al.</i> (3423)
Effect of Constructed Wetland Configuration on the Removal of Nitrogen Pollutants and Antibiotics in Aquaculture Wastewater .....	LIU Jia, YI Nai-kang, XIONG Yong-jiao, <i>et al.</i> (3430)
Effects of a Symbiotic Bacterium on the Accumulation and Transformation of Arsenate by <i>Chlorella salina</i> .....	XU Ping-ping, LIU Cong, WANG Ya, <i>et al.</i> (3438)
Effects of Nitrate in Water on the Growth of <i>Iris pseudacorus</i> L. and Its Adsorption Capacity of Nitrogen in a Simulated Experiment .....	WANG Bing, WEN Fen-xiang, XIAO Bo (3447)
Adsorption Behavior of <i>p</i> -hydroxy Biphenyl onto Sediment of the Yellow River in Lanzhou .....	ZHOU Qi, JIANG Yu-feng, SUN Hang, <i>et al.</i> (3453)
Enhanced Pollutants Removal in a Municipal Wastewater Treatment Plant with Multistage A/O Process .....	YIN Zi-hua, SHENG Xiao-lin, LIU Rui, <i>et al.</i> (3460)
Performance of Nanofiltration for Improving the Drinking Water Quality in a Water Supply Plant with Micropolluted Water Resource .....	WU Yu-chao, CHEN Li-jun, LAN Ya-qiong, <i>et al.</i> (3466)
Reaction Kinetics and Impacting Mechanism of Cr(VI) Removal in Fe <sup>0</sup> -PRB Systems .....	LU Xin, LI Miao, TANG Cui-mei, <i>et al.</i> (3473)
Adsorption Cd <sup>2+</sup> from Solution by EDTA-modified Silicate Nanoparticles .....	JIANG Shun-cheng, QIN Rui, LI Man-lin, <i>et al.</i> (3480)
Analysis and Characterization of Multi-modified Anodes via Nitric Acid and PPY/AQDS in Microbial Fuel Cells .....	SHEN Wei-hang, ZHU Neng-wu, YIN Fu-hua, <i>et al.</i> (3488)
Adsorption Characteristics of Phosphorus Wastewater on the Synthetic Ferrihydrate .....	CUI Meng-meng, WANG Dian-sheng, HUANG Tian-yin, <i>et al.</i> (3498)
Performance of Bio-zeolite Constructed Wetland in Dispersed Swine Wastewater Treatment .....	MOU Rui, SHEN Zhi-qiang, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3508)
Polyhydroxyalkanoate (PHA) Synthesis by Glycerol-based Mixed Culture and Its Relation with Oxygen Uptake Rate (OUR) .....	LIU Dong, ZHANG Xiao-ting, ZHANG Dai-jun, <i>et al.</i> (3518)
Kinetics and Mechanistic Investigation of the Photocatalytic Degradation of Clothianidin .....	HU Qian, YANG Hai, SHI Ni, <i>et al.</i> (3524)
Impacts of Industrial Zone in Arid Area in Ningxia Province on the Accumulation of Heavy Metals in Agricultural Soils .....	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping (3532)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Soils of a Large Steel enterprise in the North of China .....	DONG Jie, HUANG Ying, LI Yong-xia, <i>et al.</i> (3540)
Vertical Distribution of Heavy Metals and Its Response to Organic Carbon in Red Soil Profile .....	JIA Guang-mei, MA Ling-ling, XU Dian-dou, <i>et al.</i> (3547)
Provoking Effects of Exogenous Zn on Cadmium Accumulation in Rice .....	GU Jiao-feng, YANG Wen-tao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3554)
Effect of Modified Biochars on Soil Cadmium Stabilization in Paddy Soil Suffered from Original or Exogenous Contamination .....	YANG Lan, LI Bing, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (3562)
Performance of Bioleaching Combined with Fenton-like Reaction in Heavy Metals Removal from Contaminated Soil .....	ZHOU Pu-xiong, YAN Xie, YU Zhen, <i>et al.</i> (3575)
Effect of Long-term Oil Contamination on the Microbial Molecular Ecological Networks in Saline-alkali soils .....	ZHAO Hui-hui, XIAO Xian, PEI Meng, <i>et al.</i> (3582)
Effect of Nitrogen Deposition on Soil Microbial Community Structure Determined with the PLFA Method Under the Masson Pine Forest from Mt. Jinyun, Chongqing .....	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui (3590)
Fungal Community Structure of Different Degeneration <i>Deyeuxia angustifolia</i> Wetlands in Sanjiang Plain .....	SUI Xin, ZHANG Rong-tao, XU Nan, <i>et al.</i> (3598)
Short-term Effects of Nitrogen and Sulfate Addition on CH <sub>4</sub> and CO <sub>2</sub> Emissions in the Tidal Marsh of Min River Estuary .....	HU Min-jie, REN Peng, HUANG Jia-fang, <i>et al.</i> (3606)
Variation of Soil CO <sub>2</sub> Flux and Environmental Factors Across Erosion-Deposition Sites Under Simulation Experiment .....	DU Lan-lan, WANG Zhi-qi, WANG Rui, <i>et al.</i> (3616)
Interannual Variations of Soil Respiration and Its Temperature Sensitivity in an Orchard in Jimci Region of Taiyuan City .....	YAN Jun-xia, HAO Zhong, JING Xue-kai, <i>et al.</i> (3625)
Influence of Biochar on Greenhouse Gases Emissions and Physico-chemical Properties of Loess Soil .....	WANG Yue-ling, GENG Zeng-chao, WANG Qiang, <i>et al.</i> (3634)
Effects of Elevated Ozone and Nitrogen Deposition on Photosynthetic Characteristics and biomass of <i>Populus cathayana</i> .....	XIN Yue, SHANG Bo, CHEN Xing-ling, <i>et al.</i> (3642)
Effects of Canopy Temperature on Carbon Dioxide Exchange of Winter Wheat in Taiyuan Basin .....	LI Hong-juan, YANG Yan, YAN Jun-xia (3650)
Composition and Evolution Characteristics of Dissolved Organic Matter During Composting Process .....	LI Dan, HE Xiao-song, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (3660)
Effects of Acidic and Basic Modification on Activated Carbon for Adsorption of Toluene .....	LIU Han-bing, YANG Bing, XUE Nan-dong (3670)

# 《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9月15日 第37卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 9 Sep. 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