

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第12期

Vol.35 No.12

2014

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)

北京雾霾天气生物气溶胶浓度和粒径特征	高敏,仇天雷,贾瑞志,韩梅琳,宋渊,王旭明(4415)
杭州大气颗粒物散射消光特性及霾天气污染特征	徐昶,叶辉,沈建东,孙鸿良,洪盛茂,焦荔,黄侃(4422)
太原市采暖季 PM _{2.5} 中元素特征及重金属健康风险评价	李丽娟,温彦平,彭林,白慧玲,刘凤娴,史美鲜(4431)
成都市城区 PM _{2.5} 中二次水溶性无机离子污染特征	李友平,周洪,张智胜,王启元,罗磊(4439)
北京市臭氧的时空分布特征	王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,潘丽波(4446)
南京北郊大气 VOCs 变化特征及来源解析	安俊琳,朱彬,王红磊,杨辉(4454)
祁连山中段降水化学的环境意义研究	李宗杰,李宗省,田青,宋玲玲,贾冰,郭瑞,宋耀选,苏索南,韩春坛(4465)
中亚热带典型林分不同层次氮硫湿沉降动态变化	孙涛,马明,王定勇,黄礼昕(4475)
本底大气 CO ₂ 观测分析过程中 QA/QC 方法的建立与评估	刘立新,周凌晔,夏玲君,王红阳,方双喜(4482)
轻型汽油车 CH ₄ 和 N ₂ O 排放因子研究	何立强,宋敬浩,胡京南,解淑霞,祖雷(4489)
煤燃烧超细微粒粒径谱演变及排放因子的实验研究	孙在,杨文俊,谢小芳,陈秋方,蔡志良(4495)
春、夏季长江口及其邻近海域溶解 N ₂ O 的分布和海-气交换通量	王岚,张桂玲,孙明爽,任景玲(4502)
珠江口水体组分的吸收特性分析	王珊珊,王永波,扶卿华,尹斌,李云梅(4511)
河流汇合处水体磷素形态特征及紫外光照的影响:以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江交汇为例	闫金龙,江韬,魏世强,李玲,郭念,李璐璐,刘江(4522)
基于太湖微囊藻毒素的叶绿素 a 阈值研究	魏代春,苏婧,纪丹凤,伏小勇,王骥,霍守亮,崔驰飞,唐军,席北斗(4530)
百花湖周边城市近郊小流域氮、磷输出时空特征	冯源嵩,林陶,杨庆媛(4537)
自然光照对淹水条件下三峡库区消落带典型土壤磷释放影响	郭念,江韬,魏世强,闫金龙,梁俭,卢松,高洁(4544)
垂直流人工湿地 LDHs 覆膜改性沸石基质强化除磷效果及其机制	张翔凌,陈俊杰,郭露,陈巧珍,王晓晓(4553)
三峡库区消落带 3 种植物淹水后汞的动态变化及其对水体的影响	张翔,张成,孙荣国,王定勇(4560)
纳米 TiO ₂ 对底泥中汞释放及活化的影响	张金洋,李楚娴,王定勇,周雄,孙荣国,张成,梁丽(4567)
首都水源地——洋河流域人为源多环芳烃(PAHs)排放清单估算及其影响分析	高佳佳,罗维,奚晓霞(4573)
石化工业园区有毒废水来源识别研究	杨茜,于茵,周岳溪,陈学民,伏小勇,王淼(4582)
污水处理厂中红霉素抗药性基因的污染特征及选择性因子	李侃竹,吴立乐,黄圣琳,何势,刘振鸿,薛罡,高品(4589)
2 种填料 BAF 深度处理印染废水沿程污染物变化规律研究	刘俊峰,范举红,刘锐,陈吕军,张永明(4596)
硫酸盐还原型甲烷厌氧氧化菌群驯化及其群落特征	席婧茹,刘素琴,李琳,刘俊新(4602)
MBR 处理腈纶废水的效能及微生物群落结构分析	魏健,宋永会,赵乐(4610)
制革废水的厌氧氨氧化 ABR 脱氮工艺研究	曾国驱,贾晓珊(4618)
生物滤池工艺的数值模拟与运行优化	邹宗森,施汉昌,陈向强,谢小青(4627)
气升装置对厌氧氨氧化污泥形态及性能的影响	李祥,黄勇,袁怡,周呈,陈宗短,张大林(4636)
给水厂污泥改良生物滞留填料除磷效果的研究	王建军,李田,张颖(4642)
北京地区不同城镇污水处理厂堆肥污泥的营养含量和重金属污染	白莉萍,齐洪涛,伏亚萍,李萍(4648)
电子垃圾拆解区污染池塘中鱼类多氯联苯及其代谢产物的组织分配及暴露风险	唐斌,罗孝俊,曾艳红,麦碧娴(4655)
广东罗非鱼养殖区水体和鱼体中重金属、HCHs、DDTs 含量及风险评价	谢文平,朱新平,郑光明,马丽莎(4663)
崇明典型水生生物中雌激素含量和分布特征	耿婧婧,叶爱丽,杨毅,刘敏,张婧,周俊良(4671)
啮虫脒光催化降解动力学的优化及其降解产物的分析	周文常,阳海,胡志斌,兰世林(4678)
氮添加对生长季寒温带针叶林土壤有效氮和酸化的影响	陈高起,傅瓦利,罗亚晨,高文龙,李胜功,杨浩(4686)
土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	李鉴霖,江长胜,郝庆菊(4695)
上海市郊设施大棚次生盐渍化土壤盐分含量调查及典型对应分析	唐冬,毛亮,支月娥,张进忠,周培,柴晓彤(4705)
某铅酸蓄电池污染场地表层土壤重金属 Pb 空间分布预测研究	刘庚,牛俊杰,张朝,赵鑫,郭观林(4712)
海泡石对镉-铅复合污染钝化修复效应及其土壤环境质量影响研究	孙约兵,王朋超,徐应明,孙扬,秦旭,赵立杰,王林,梁学峰(4720)
盐碱区不同开发年限水田温室气体排放规律及影响因素	汤洁,方天儒,侯克怡,赵仁竹,梁爽(4727)
不同热解温度生物炭对 Cd(II) 的吸附特性	王震宇,刘国成,Monica Xing,李锋民,郑浩(4735)
碱土金属钙沉积对 Mn-Ce/TiO ₂ 低温 SCR 催化剂脱硝性能的影响	周爱奕,毛华峰,盛重义,谭月,杨柳(4745)
国内外水泥工业大气污染物排放标准比较研究	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4752)
我国水泥工业大气污染物排放标准的修订历程与思考	江梅,李晓倩,纪亮,邹兰,魏玉霞,赵国华,车飞,李刚,张国宁(4759)
《环境科学》第35卷(2014年)总目录	(4767)
《环境科学》征订启事(4617) 《环境科学》征稿简则(4654) 信息(4474, 4529, 4536, 4744)	

珠江口水体组分的吸收特性分析

王珊珊¹, 王永波¹, 扶卿华², 尹斌², 李云梅^{1*}

(1. 南京师范大学教育部虚拟地理环境重点实验室, 南京 210023; 2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广州 510611)

摘要: 水体组分吸收特性是水下光场和水面光谱的主要影响因子, 对其进行研究有助于提高对水体光学特性的认识和水质参数的遥感反演。基于 2013 年 7 月珠江口水体 30 个样本的实测数据, 对珠江口水体总颗粒物、非藻类颗粒物、浮游藻类和 CDOM 的吸收特征进行了分析, 结果表明: ①总颗粒物吸收特征为非藻类颗粒物主导类型; ②非藻类颗粒物的吸收系数遵循指数衰减规律, 主要来源是陆源性输入, 指数斜率 S_d 均值与空间变化幅度高于内陆二类水体; ③多项式关系能较好地表达 $a_{ph}(440)$ 与叶绿素 a 浓度的关系, 而 $a_{ph}(675)$ 与叶绿素 a 浓度存在很好的线性相关, 辅助色素对浮游藻类吸收系数的影响主要在短波波段, 长波波段叶绿素 a 的影响占主导地位, 比吸收系数随叶绿素 a 浓度的增加而减小, 呈现幂指数衰减规律; ④ CDOM 输入以陆源为主, 光谱曲线在紫外波段 250 ~ 290 nm 之间存在一个吸收肩, 按光谱特征分段拟合 S_g 值能够更好地表达 CDOM 吸收特性, M 值与 A 段(240 ~ 260 nm)的斜率 S_g 值呈现较强的正相关, 珠江口水体的 M 值较小, CDOM 中腐殖酸含量较高; ⑤珠江口水体非色素颗粒物吸收在总吸收中占主导地位, 浮游藻类吸收对总吸收的贡献远小于非色素颗粒物, CDOM 吸收对总吸收的贡献最小, 当 CDOM 中腐殖酸含量较高时, CDOM 对水体总吸收的贡献大, 腐殖酸含量较低时, CDOM 对水体总吸收的贡献小。

关键词: 珠江口; 吸收系数; 颗粒物; 浮游植物; CDOM

中图分类号: X87 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)12-4511-11 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.12.013

Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River

WANG Shan-shan¹, WANG Yong-bo¹, FU Qing-hua², YIN Bin², LI Yun-mei¹

(1. Key Laboratory of Virtual Geographic Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. Pearl River Hydraulic Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: Spectral absorption properties of the water constituents is the main factor affecting the light field under the surface of the water and the spectrum above the surface of the water. Thus, the study is useful for understanding of the water spectral property and the remote reversing of water quality parameters. Absorption properties of total suspended particles, non-algal particles, phytoplankton and CDOM were analyzed using the 30 samples collected in July 2013 in the estuary of Zhujiang River. The results indicated that: ① the non-algal particles absorption dominated the absorption of the total suspended particles; ② the absorption coefficient of the non-algal particles, which mainly came from the terrigenous deposits, decreased exponentially from short to long wavelength. In addition, the average value and spatial variation of the slope S_d were higher than those in inland case-II waters; ③ the absorption coefficient of phytoplankton in 440nm showed a better polynomial relationship with chlorophyll a concentration, while the absorption coefficient of phytoplankton in 675 nm linearly related with the chlorophyll a concentration. Moreover, the influence of accessory pigments on phytoplankton absorption coefficient mainly existed in the range of short wavelength, and Chlorophyll a was the main influencing factor for phytoplankton absorption in long wavelength. The specific absorption coefficient of phytoplankton decreased the power exponentially with the increase of the chlorophyll a concentration; ④ CDOM mainly came from the terrigenous sources and its spectral curve had an absorption shoulder between 250-290 nm. Thus, a piecewise S_g fitting function could effectively express CDOM absorption properties, i. e., M value and S_g value in period A (240-260 nm) showed a strong positive correlation. The M value was low, and the humic acid had a high proportion in CDOM; ⑤ the non-algal particles absorption dominated the total absorption in the estuary of Zhujiang River, and the contribution of the phytoplankton absorption to the total absorption was far lower than that of the non-algal particles. While the contribution of the CDOM was the lowest. The contribution of the CDOM absorption to the total absorption was relatively larger when the content of humic acid was higher.

Key words: the estuary of Zhujiang River; absorption coefficient; particles; phytoplankton; colored dissolved organic matter(CDOM)

水体组分主要包括纯水、非藻类颗粒物、浮游藻类和有色可溶性有机物 (colored dissolved organic matter, CDOM), 当太阳光辐射到水中, 水体中各组分对太阳光有不同程度的吸收和散射。水体的吸收系数作为水体主要的固有光学量之一, 与水体组分

收稿日期: 2014-05-12; 修订日期: 2014-07-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41201332); 广州市珠江科技新星专项(2013J2200073); 高分辨率对地观测系统重大专项(05-Y30B02-9001-13/15-6)

作者简介: 王珊珊(1991~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境遥感, E-mail: wshanshan1110@163.com

* 通讯联系人, E-mail: yunmei2009@gmail.com

及其浓度密切相关,是水体光学特性的主要决定因素,因此,在建立水质参数遥感反演的机制模型时,必须考虑水体的吸收特性。

目前,国内外已有许多学者对不同水域水体的吸收特性进行了研究,Babin 等^[1]对欧洲部分沿海水域的浮游植物、非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收系数进行了测量与分析;Bricaud 等^[2]对一类水体颗粒物和叶绿素 a 浓度变化进行分析,认为浮游藻类和非藻类颗粒物的吸收系数与叶绿素 a 浓度存在指数相关性;Allali 等^[3]分析了赤道太平洋水域的浮游植物中叶绿素和光合活性色素吸收系数的空间变化;Blough 等^[4]分析了加勒比海陆源输入的 CDOM 光谱特性及其 S 值与盐度的关系;盖利亚等^[5]利用 2007 年 11 月三峡坝区水体的实测水色要素吸收系数数据,对总颗粒物、浮游植物和 CDOM 的吸收系数特征进行了分析和研究;乐成峰等^[6]根据实测的太湖梅梁湾水体组分吸收系数和水质参数,分析了水体中各组分在不同季节的吸收特性,并讨论了不同季节光谱吸收的主导因子;施坤等^[7]对 2009 年 4 月太湖 52 个样点进行野外采样和室内分析,探讨了太湖水体浮游藻类的吸收系数的空间变化特征及其影响因素;王长风等^[8]对长江中下游三大淡水湖鄱阳湖、太湖和巢湖进行 5 次野外实验,分析了长江中下游大型湖泊水体吸收特性;张红等^[9]基于 2009 年 9 月滇池的野外采样数据,分析了滇池水体中光学活性物质的吸收特性及其空间分布、与水体组分浓度的关系。大量的研究表明,不同区域水体由于其水体组分所包含的成分、浓度不同,导致其吸收特性有较大差别,需要分别加以研究。

河口为河流终点,即河流注入海洋或湖泊的地方。就入海河口而言,它是一个半封闭的海岸水体,与海洋自由沟通,海水在其中被陆域来水所冲淡。入海河口的许多特性影响着近海水域,且由于水体运动的连续性,测验方法和分析技术上的相似,往往把河口和其邻近海岸水体综合起来研究,因此它是海岸带的组成部分。入海河口和其邻近海岸水体由于河流因素和海洋因素的共同作用,有着与内陆二类水体和开阔大洋水体不同的水体光学特征。

珠江口是三角洲网河和残留河口湾并存的河口,毗邻南海,作为近海水域,其吸收特性与内陆典型二类水体和开阔大洋水体的差别是一个值得研究的问题。对于珠江口水体的吸收特性目前也有少量研究,如曹文熙等^[10]对悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式进行了探讨,许晓强等^[11]对珠江口颗粒物

吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系进行了研究;王桂芬等^[12]对珠江口一次藻华过程中水体总吸收系数和水色光谱的变化特性及其相互关系进行了研究。但是这些研究都是针对个别水体组分或者典型的藻华过程,对正常情况下珠江口水体各组分光学特性的研究还比较欠缺。

本研究基于 2013 年 7 月珠江口实测数据,系统地分析了珠江口水体各组分的吸收特性,以为珠江口水体光学特性及参数遥感反演模型的建立提供参考。

1 材料与方法

1.1 采样时间和点位

2013 年 7 月在珠江口进行水样采集,样本分布如图 1 所示。共布置 12 个站点,连续采样 3 d,共获得 36 个样本数据。采集的样品放入存储箱内用冰保存,并于当天带回实验室进行分析处理,测定的参数包括总颗粒物浓度、无机颗粒物浓度、有机颗粒物浓度、总颗粒物吸收系数、叶绿素 a 浓度、非藻类颗粒物吸收系数、浮游藻类吸收系数、CDOM 吸收系数。删除测量失误的 6 个点,最后剩下 30 个样本用于研究。

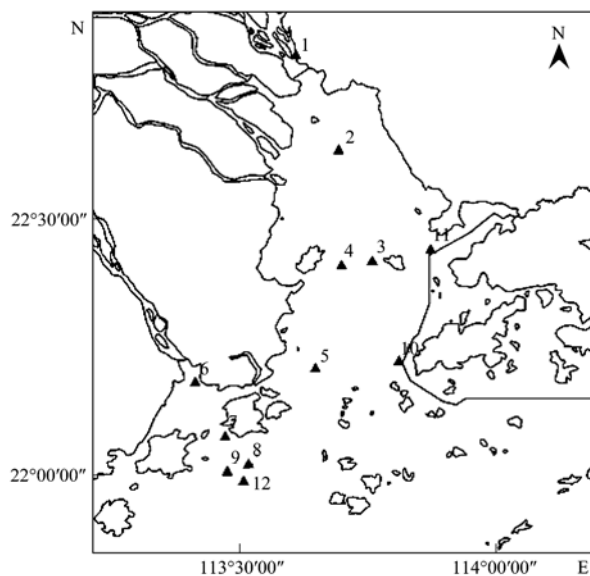


图 1 珠江口 12 个站点分布示意

Fig. 1 Distribution of the 12 sampling sites in the estuary of Zhujiang River

1.2 水质参数测定

总颗粒物的吸收系数采用定量滤膜技术(QFT)测定^[13],用直径为 47 mm 的 GF/F 滤膜(Whatman 公司)过滤 200 ~ 400 mL 水样,在紫外分光光度计下测量滤膜上颗粒物的吸光度,用湿润程度相同的

空白滤膜作为参比,并且以 750 nm 处吸光度为零点进行校正,总颗粒物的光谱吸收系数 $a_p(\lambda)$ 按下式计算得到:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \frac{s}{V} D_s(\lambda) \tag{1}$$

式中, $D_s(\lambda)$ 为校正后的总颗粒物吸光度; V 为被过滤水样的体积; s 为滤膜上总颗粒物的有效面积.

非藻类颗粒物吸收系数的测量方法为用一定体积的次氯酸钠漂白水样中的藻类,漂白 15 min 后用上述同样的方法测定非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$. 根据水体中各类物质吸收光谱的线性叠加原理,总颗粒物吸收系数减去非藻类颗粒物的吸收系数即为浮游藻类的吸收系数 $a_p(\lambda)$.

CDOM 吸收系数的测定采用 0.22 μm 的 Millipore 滤膜过滤已经过滤过颗粒物之后的水样,然后将 CDOM 水样放进比色皿中,用紫外分光光度计测定其吸光度,采样间隔为 1 nm,然后根据 Bricaud 等^[14]的方法进行散射效应的校正,计算得到 $a_g(\lambda)$.

$$a(\lambda') = 2.303 D(\lambda)/r \tag{2}$$

$$a(\lambda) = a(\lambda') - a(750)\lambda/750 \tag{3}$$

式中, $D(\lambda)$ 为吸光度; r 为光程路径(m); $a(\lambda')$ 为波长未校正的吸收系数(m^{-1}); $a(\lambda)$ 为波长的吸收系数(m^{-1}).

叶绿素浓度测量采用陈宇炜等^[15]提出的浮游植物叶绿素 a 测定的“热乙醇法”进行测量,总颗粒物、有机颗粒物、无机颗粒物浓度的测量采用灼烧称重法.

1.3 负指数函数斜率的计算

非藻类颗粒物和 CDOM 的吸收光谱随波长的增加呈指数衰减,其光谱形态可以用负指数函数表示^[16]:

$$a_x(\lambda) = a_x(\lambda_0) \exp[-S(\lambda - \lambda_0)] \tag{4}$$

式中,下标 x 用 d 和 g 表示时,分别代表非藻类颗粒物和 CDOM; $a_x(\lambda)$ 为波长 λ 处的吸收系数; λ_0 为参考波长,取 440 nm; $a_x(\lambda_0)$ 为参考波长处的吸收系数; S 为指数函数斜率,本研究利用最小二乘法拟合 S 值,非藻类颗粒物的拟合波段范围为 400 ~ 700 nm, CDOM 的拟合波段范围为 240 ~ 450 nm.

2 结果与分析

2.1 总颗粒物吸收特性

图 2 是珠江口 30 个样本的总颗粒物吸收光谱曲线,从中可以看出,除了在 675 nm 附近有微弱的

吸收峰以外,总颗粒物吸收系数随波长的增加呈指数衰减规律,不同样本的总颗粒物吸收系数变化较大. 在 440 nm 处总颗粒物吸收系数 $a_p(440)$ 的范围为 0.55 ~ 7.21 m^{-1} ,平均值为 $(2.67 \pm 0.32) \text{m}^{-1}$,在 675 nm 处总颗粒物吸收系数 $a_p(675)$ 的范围为 0.08 ~ 0.85 m^{-1} ,平均值为 $(0.34 \pm 0.04) \text{m}^{-1}$,相应的总颗粒物浓度范围为 4 ~ 62.4 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均值为 23.68 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

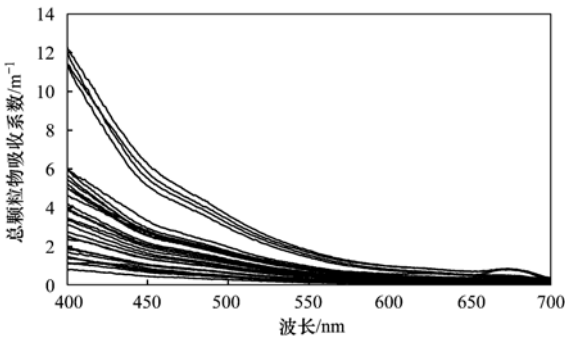


图 2 总颗粒物吸收光谱曲线

Fig. 2 Absorption spectral curves of total suspended particles

从图 2 中可以看到有 4 个样本的吸收光谱曲线明显高于其他样本,这 4 个样本分别为 1 号站点第 1、2 d 数据, 2 号站点第 2 d 数据和 4 号站点第 3 d 数据. 表 1 为 1、2、4 号站点 3 d 测量的总颗粒物浓度统计结果,光谱曲线较高的 4 个样本对应的总颗粒物浓度分别为 48.8、49.2、62.4、53.2 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,明显高于其他 26 个样本的浓度. 1、2、4 号站点 3 d 采样结果总颗粒物浓度均值高于 30 个样本的浓度均值 23.7 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,同一站点不同采样时间得到的样本总颗粒物浓度有较大差别,这主要是由于不同时间风速风向以及水流速度的差异导致的.

表 1 1、2、4 号站点总颗粒物浓度统计/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Statistics of total suspended particles concentrations at sites 1, 2, 4/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

站点	第 1 d	第 2 d	第 3 d	平均值
1 号	48.8	49.2	21.2	39.7
2 号	38.5	62.4	24	41.6
3 号	37.5	33	53.2	41.2

总颗粒物的吸收系数近似于非藻类颗粒物吸收系数与浮游藻类吸收系数之和,因此总颗粒物的吸收一般可以分为两种类型,第一种类型是非藻类颗粒物吸收主导,第二种类型是浮游藻类吸收主导. 图 3 为 $a_p(\lambda)$ 、 $a_d(\lambda)$ 和 $a_{ph}(\lambda)$ 的平均吸收光谱曲线,从中可以看出,珠江口的总颗粒物吸收特征符合第一种类型,除了 675 nm 附近叶绿素吸收峰外,非

藻类颗粒物的吸收系数远大于浮游藻类的吸收系数,总颗粒物的吸收光谱与非藻类颗粒物吸收光谱相似,吸收系数随波长增加呈指数衰减. 根据曹文熙等^[10]对珠江口悬浮颗粒物吸收特性的研究,第一种类型的样本主要分布在盐度介于 15 ~ 27 之间,咸淡水强烈混合的内河口,光谱类型沿河口羽流带逐渐过渡,到近海逐步变为第二种类型. 水体混合方式是驱动河口水体组分变化的重要驱动力,珠江口的盐淡水混合一般为缓混合型,并且本研究采集的样本多靠近内陆河流出口处,河流携带大量陆源性颗粒物,因此非藻类颗粒物的吸收特别强烈,成为总颗粒物吸收的主导因素,这与曹文熙等^[10]和许晓强等^[11]对珠江口总颗粒物吸收系数的研究一致. 另外,在河口海湾等近海水域,潮流对水体组分的输移和扩散也起到一定作用.

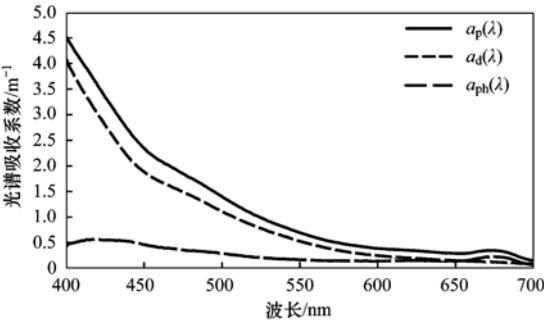


图3 总颗粒物、非藻类颗粒物与浮游藻类的平均吸收光谱曲线
Fig. 3 Average absorption spectral curves of total suspended particles, non-algal particles and phytoplankton

为了进一步分析珠江口非藻类颗粒物和浮游植物对总颗粒物吸收系数的贡献,本研究对所有样本非藻类颗粒物吸收系数和浮游藻类吸收系数在总颗粒物吸收系数中所占的百分比进行了统计分析. 图4为珠江口水体30个样本的非藻类颗粒物和浮游藻类在 PAR 波段内的平均吸收占总颗粒物平均吸

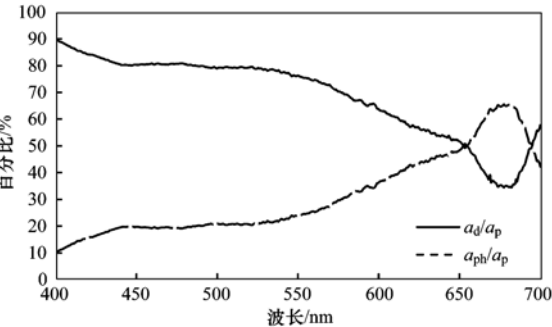


图4 非藻类颗粒物吸收和浮游藻类吸收
对总颗粒物吸收的贡献率

Fig. 4 Contributions of non-algal particles and phytoplankton to the absorption of total suspended particles

收的比例,可以看出,非藻类颗粒物的吸收在总吸收中占主导地位,除了 655 ~ 695 nm 波段范围内浮游藻类吸收系数在总颗粒物吸收中所占比例高于非藻类颗粒物所占的比例,其余波段非藻类颗粒物吸收占总颗粒物吸收的比例都在 50% 以上. 非藻类颗粒物与浮游藻类对总颗粒物吸收的贡献是随波长变化的变量,非藻类颗粒物在短波波段的贡献要大于长波波段的贡献,并随波长的增加大体上呈降低趋势;浮游藻类的贡献变化则相反. 675 nm 附近是浮游藻类的吸收峰,主导了该波段范围内总颗粒物吸收系数的变化.

2.2 非藻类颗粒物吸收特性

图5为非藻类颗粒物的吸收光谱曲线,从中可以看出,非藻类颗粒物的吸收系数随波长的增加而逐渐减小,其光谱特征遵循指数衰减规律. 在短波段各样本的吸收系数差别较大,当波长大于 700 nm 后,吸收系数趋于零. 在 440 nm 处非藻类颗粒物吸收系数 $a_d(440)$ 的范围为 0.29 ~ 5.97 m^{-1} ,平均值为 $(2.16 \pm 0.29) m^{-1}$.

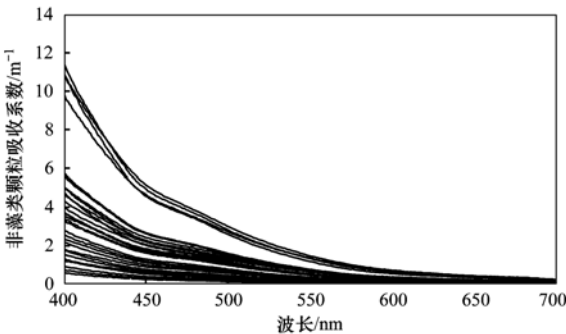


图5 非藻类颗粒物吸收光谱曲线
Fig. 5 Absorption spectral curves of non-algal particles

图5中吸收光谱曲线明显高于其他样本光谱曲线的4个样本与上文总颗粒物吸收光谱曲线较高的样本一致,进一步说明了珠江口水体总颗粒物吸收为非藻类颗粒物主导型,光谱曲线较高的4个样本对应的非藻类颗粒物浓度分别为 43.2、42.8、55.2、50 $mg \cdot L^{-1}$,高于30个样本的浓度均值 19.5 $mg \cdot L^{-1}$ (表2).

表2 1、2、4号站点非藻类颗粒物浓度统计/ $mg \cdot L^{-1}$

Table 2 Statistics of the non-algal particles concentrations at sites 1, 2, 4/ $mg \cdot L^{-1}$				
站点	第1 d	第2 d	第3 d	平均值
1号	43.2	42.8	16	34
2号	32.5	55.2	20.8	36.1
3号	33.5	26.5	50	36.7

利用最小二乘法拟合得到 S_d 值的范围为 0.012 ~ 0.016 5, 平均值为 $0.013 6 \pm 0.000 2$. 表 3 列举了部分内陆水域以及海洋沿岸水域非藻类颗粒物 S_d 值的研究结果^[1, 5, 9, 10, 17], 对比分析可知, 珠江口及其他海洋沿岸水域的 S_d 值比三峡、滇池、太湖这些内陆水体的 S_d 值变化范围大, 这主要是因为 S_d 值主要受非藻类颗粒物组成影响, 不同水体非藻类颗粒的成分不同, 珠江口及海洋沿岸水域不仅受内陆河流注入的影

响, 还受到一定程度的海洋潮流影响, 盐水和淡水的混合导致非藻类颗粒物的来源及成分比较复杂, S_d 值空间变化较大. 另外本研究的珠江口 S_d 值均值相对较大, 说明非藻类颗粒物吸收系数衰减较快, 而曹文熙等^[10]研究的珠江口及其临近水域冬季 S_d 均值为 0.012, 比本文对珠江口夏季水体的研究结果小, 这说明不同年份不同季节同一水域的非藻类颗粒物组成和浓度的不同对吸收系数有一定的影响.

表 3 不同水域 S_d 值统计结果^[1, 5, 9, 10, 17]/nm⁻¹

Table 3 Statistic results of S_d value in different waters/nm⁻¹

区域	S_d 值空间变化范围	S_d 值均值
珠江口夏季(本研究)	0.012 ~ 0.016 5(0.004 5)	0.013 6 ± 0.000 2
珠江口及其临近水域冬季	0.010 1 ~ 0.017 1(0.007)	0.012 0 ± 0.002
太湖春季	0.011 4 ~ 0.014 9(0.003 5)	0.012 2 ± 0.000 7
太湖梅梁湾夏季	0.005 6 ~ 0.009 0(0.003 4)	0.007 0 ± 0.000 8
滇池水域	0.011 66 ~ 0.014 4(0.002 74)	0.012 0 ± 0.002
三峡坝区水域	0.010 14 ~ 0.012 8(0.002 66)	0.011 5 ± 0.001 55
亚得里亚海	0.011 4 ~ 0.016 8(0.005 4)	0.012 8 ± 0.001 1
大西洋	0.008 9 ~ 0.016 1(0.007 4)	0.012 4 ± 0.001 5
波罗的海	0.011 4 ~ 0.014 7(0.003 3)	0.013 0 ± 0.000 7
英吉利海峡	0.009 3 ~ 0.015 5(0.006 2)	0.011 7 ± 0.001 1
地中海	0.010 4 ~ 0.017 8(0.007 4)	0.012 9 ± 0.001 6
北海	0.009 6 ~ 0.013 4(0.003 8)	0.011 6 ± 0.000 7

非藻类颗粒物的来源主要有陆源输入和浮游植物的降解两种, 为了进一步分析珠江口非藻类颗粒物的来源, 本研究以特征波段 440 nm 与 675 nm 为参考波段, 对非藻类颗粒物的吸收系数和总颗粒物浓度、叶绿素浓度的相关性进行了分析, 结果如图 6 所示. 从中可以看出, $a_d(440)$ 和 $a_d(675)$ 都与总颗粒物浓度呈现较好的线性关系, 而与叶绿素浓度的相关性较弱. $a_d(675)$ 与叶绿素浓度的相关性和 $a_d(440)$ 与叶绿素浓度的相关性相比有所提高, $a_d(675)$ 与总颗粒物浓度的相关性和 $a_d(440)$ 与总颗粒物浓度的相关性相比有所降低, 这主要是因为 675 nm 是叶绿素的吸收峰, 一定程度上影响了吸收系数与颗粒物浓度的相关性. 总的说来, 珠江口水体非藻类颗粒物的主要来源是陆源性输入, 浮游植物的降解对非藻类颗粒物的吸收影响不大.

2.3 浮游藻类吸收特性

从图 7 浮游藻类的吸收光谱曲线可以看出, 440 nm 附近由于叶绿素 a 的吸收出现吸收峰, 450 ~ 550 nm 处吸收系数大致随波长的增大而降低, 490 nm 附近的胡萝卜素 β 的吸收峰并不明显, 550 ~ 650 nm 之间浮游藻类吸收系数变化不大, 少数样本在 624 nm 处由于藻蓝素的吸收出现一个小峰值, 该峰值是藻蓝素最显著的特征, 也是反演藻蓝素浓

度的理想波段, 在 675 nm 由于叶绿素 a 的吸收出现了一个明显的峰值, 700 nm 以后便逐渐减小, 在近红外波段可近似忽略. 个别样本在 440 nm 处的吸收峰不明显, 呈现近似非藻类颗粒物的吸收光谱特征, 根据赵巧华等^[18]的研究, 部分浮游藻类吸收系数在 400 ~ 520 nm 范围内具有非藻类颗粒物吸收的特点是由于用色素提取法进行藻类提取时, 将非藻类颗粒物中的其他色素一并提取, 从而系统地放大了浮游藻类的吸收系数造成的, 对于非藻类颗粒物来源丰富的大型浅水湖泊而言, 其放大效应更为明显. 珠江口水体藻类含量较低, 所以非藻类颗粒物吸收系数的放大现象可能成为部分样本在 440 nm 处浮游藻类吸收峰不明显的主要原因.

图 7 中吸收光谱明显较高的 3 个样本分别为 1 号站点第 1、2 d 数据和 2 号站点第 1 d 数据, 对应表 4 叶绿素 a 浓度统计结果, 这 3 个样本对应的叶绿素 a 浓度分别为 29.3、41.85、41.78 mg·m⁻³, 明

表 4 1、2 号站点叶绿素 a 浓度统计/mg·m⁻³

Table 4 Statistic results of chlorophyll a concentrations at sites 1, 2 /mg·m⁻³

站点	第 1 d	第 2 d	第 3 d	平均值
1 号	29.3	41.85	23.02	31.39
2 号	41.78	8.45	14.65	21.63

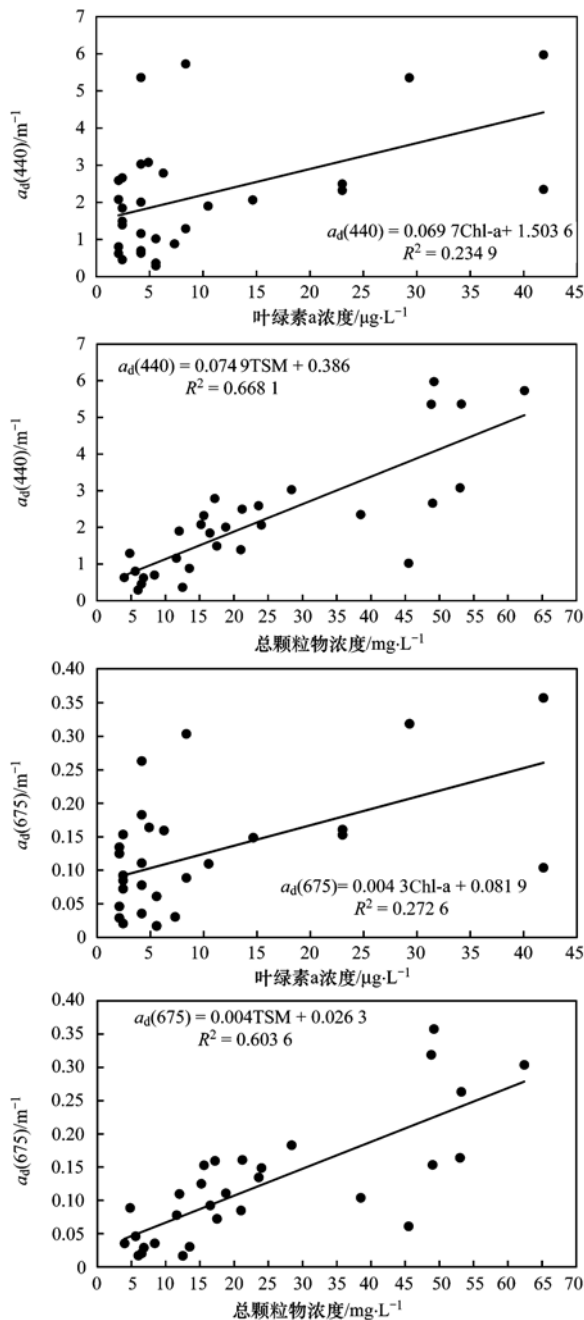


图6 $a_d(440)$ 、 $a_d(675)$ 与叶绿素浓度、总颗粒物浓度的相关性

Fig. 6 Correlation between $a_d(440)$ & $a_d(675)$ and chlorophyll a & total suspended particles concentration

显高于 30 个样本浓度均值。

$a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 的范围分别为 $0.136 8 \sim 1.510 3 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.063 3 \sim 0.745 1 \text{ m}^{-1}$, 平均值分别为 $(0.507 1 \pm 0.061) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.217 7 \pm 0.026 9) \text{ m}^{-1}$, 相应的叶绿素浓度范围为 $2.09 \sim 41.85 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均值为 $9.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。目前已有不少研究结果表明, 由于受色素组成的影响, 浮游植物吸收与叶绿素 a 浓度的关系多数为非线性的。Bricaud

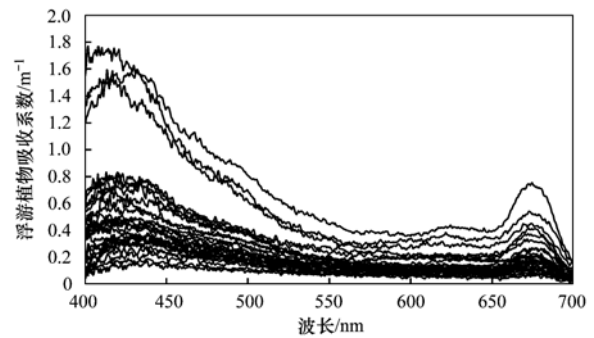


图7 浮游藻类吸收光谱曲线

Fig. 7 Absorption spectral curves of phytoplankton

等^[19]对马尾藻海、河口与海湾、地中海、大西洋等海区的一类和二类水体数据的综合分析结果显示 $a_{ph}(443)$ 与叶绿素 a 浓度存在很好的指数函数关系; 盖利亚等^[5]研究表明对于三峡坝区附近水体, 多项式关系能较好地描述浮游植物吸收与叶绿素 a 的关系; 曹文熙等^[10]发现珠江口水体浮游植物吸收系数与叶绿素 a 浓度存在较好的幂函数关系; 李方等^[20]研究发现用指数函数描述石头口门水库 6 月和 9 月 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 与叶绿素 a 的关系均最佳。

图 8 给出了珠江口水体 30 个样本在 440 nm 和 675 nm 处浮游藻类的吸收系数与叶绿素浓度的相关性, 可以看出 $a_{ph}(440)$ 与叶绿素浓度存在很好的多项式关系, 决定系数为 0.82。 $a_{ph}(675)$ 与叶绿素 a 浓度存在很好的线性关系, 决定系数为 0.92。 675 nm 处吸收系数与叶绿素 a 浓度的相关性比 440 nm 处的相关性要好, 说明珠江口水体辅助色素对浮游藻类吸收系数的影响主要在短波波段, 而长波波段叶绿素 a 的影响占主导地位。

为了进一步分析珠江口水体浮游藻类的色素组成, 采用 440 nm 处的吸收系数与 675 nm 处的吸收系数之比 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 来反映色素的组成情况, 其值越大则辅助色素的比例就越高^[7, 19~21]。 本研究中 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 的值在 $1.232 8 \sim 4.290 9$ 之间, 平均值为 $2.440 4 \pm 0.126 9$, 比李方等^[20]研究的石头口门水库 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 的值稍高, 低于王桂芬等^[21]研究的南海北部水体的值, 也低于 Sosik 等^[22]、Millán-Núñez 等^[23]在加利福尼亚湾流海区的研究结果。 王桂芬等^[21]研究表明该比值在外海的上层水体较大, 而在近海岸水体较小, 珠江口 $a_{ph}(440)/a_{ph}(675)$ 值较小, 辅助色素的比例较低, 对浮游藻类吸收的影响较低, 叶绿素 a 占主导地位,

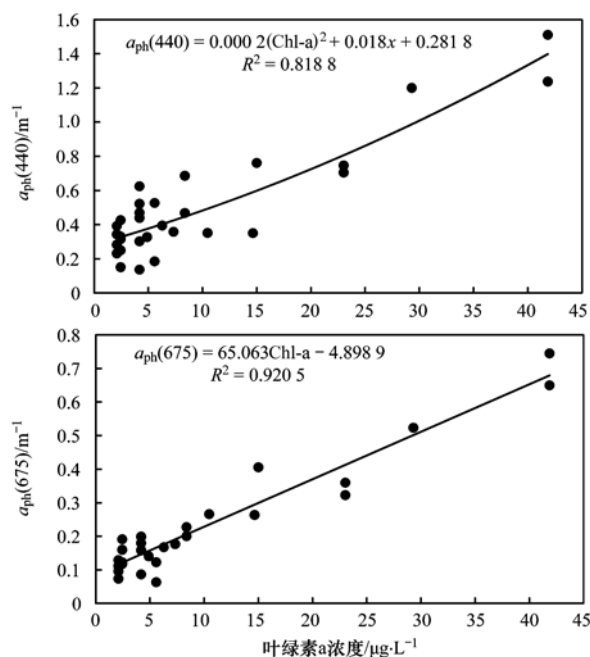
图8 $a_{ph}(440)$ 和 $a_{ph}(675)$ 与叶绿素浓度的相关性

Fig. 8 Correlation between $a_{ph}(440)$ & $a_{ph}(675)$ and chlorophyll a concentration

这主要是因为珠江口河口水体真光层深度一般比大洋水体浅,上层海水光照较弱,但营养盐含量丰富,该环境下浮游植物的色素细胞粒径较大,而且所含的辅助色素较少^[24].

色素组成的变化对浮游植物比吸收系数有着重要的影响,珠江口水体浮游藻类在 440 nm 和 675 nm 处的比吸收系数 $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(675)$ 的范围分别为 $0.0239 \sim 0.1876 \text{ m}^{-1}$ 和 $0.0106 \sim 0.0783 \text{ m}^{-1}$, 平均值分别为 $(0.087 \pm 0.009) \text{ m}^{-1}$ 和 $(0.0359 \pm 0.003) \text{ m}^{-1}$, $a_{ph}^*(440)$ 的变化范围比 $a_{ph}^*(675)$ 的变化范围大,同样表明辅助色素的影响主要集中在短波段. 图 9 为 440 nm 和 675 nm 处的比吸收系数 $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(675)$ 与叶绿素 a 的关系,可以看出比吸收系数随叶绿素 a 浓度的增加而减小,呈现幂指数衰减规律. 另外,比吸收系数的变化还受到多种因素的影响,如沿岸上升流、对流、盐淡水混合及复杂的光场分布等^[24].

2.4 CDOM 吸收特性

CDOM 的吸收主要集中在蓝光和紫外光波段,图 10 为 CDOM 在 240 ~ 450 nm 的吸收光谱曲线,可以看出 CDOM 的吸收光谱呈现随波长的增加而减小的特点,没有明显的峰值和谷值,290 nm 之后的吸收系数遵循指数衰减规律,而在紫外波段的吸收呈现明显的特征,在 250 ~ 290 nm 之间存在一个吸

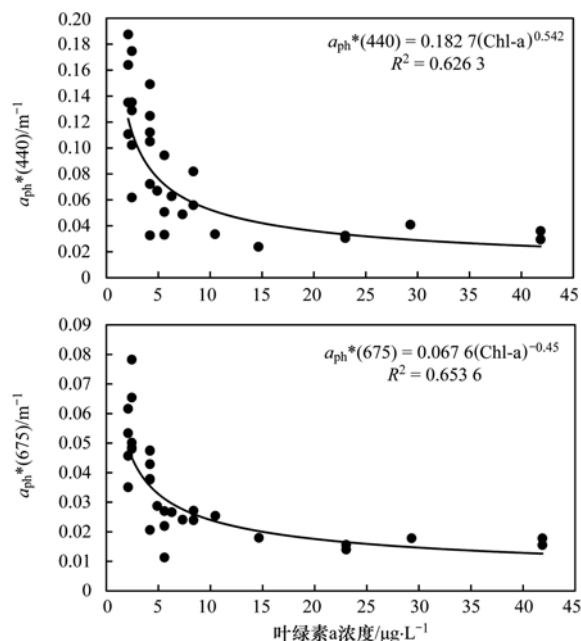
图9 $a_{ph}^*(440)$ 和 $a_{ph}^*(675)$ 与叶绿素 a 浓度的关系

Fig. 9 Correlation between $a_{ph}^*(440)$ & $a_{ph}^*(675)$ and chlorophyll a concentration

收肩,这与文献[25 ~ 28]的研究结果一致. 440 nm 处的 CDOM 吸收系数 $a_g(440)$ 范围为 $0.0461 \sim 0.5067 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(0.2794 \pm 0.0188) \text{ m}^{-1}$.

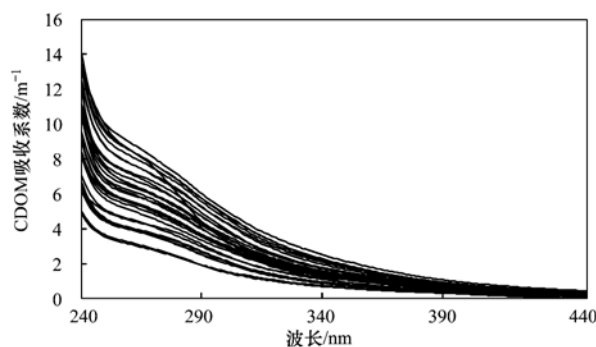


图10 CDOM 吸收光谱曲线

Fig. 10 Absorption spectral curves of CDOM

马荣华等^[29]的研究认为不同波段范围的 S_g 值差异较大,相同波段范围内不同样本之间的 S_g 值差别较小,并表明通过分波段获取的 S_g 值具有较低误差. 为了使 CDOM 吸收参数化更为精确,本研究按照珠江口 CDOM 的吸收特征分段拟合 S_g 值. 图 11 为标准化的 CDOM 吸收光谱曲线,它能够很好地避免 CDOM 浓度对光谱形态的影响^[25, 27]. 根据曲线形态可以把整个光谱区间分成 A(240 ~ 260 nm)、B(261 ~ 290 nm) 和 C(291 ~ 450 nm) 三段,并对这三段分别拟合 CDOM 吸收系数光谱斜率 S_g 值.

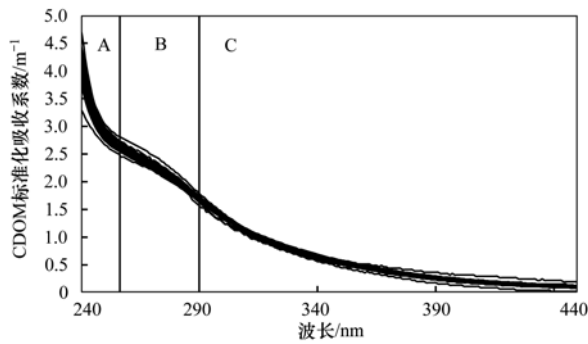


图 11 CDOM 标准化吸收光谱曲线

Fig. 11 Normalized absorption spectral curves of CDOM

图 12 为珠江口水体 CDOM 吸收系数 3 个波段范围内的光谱斜率 S_g 值, A 段 S_g 值的范围为 $0.0157 \sim 0.0292 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(0.0223 \pm 0.0004) \text{ m}^{-1}$; B 段 S_g 值的范围为 $0.0116 \sim 0.0227 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(0.0141 \pm 0.0004) \text{ m}^{-1}$; C 段 S_g 值的范围为 $0.0124 \sim 0.027 \text{ m}^{-1}$, 均值为 $(0.0176 \pm 0.0004) \text{ m}^{-1}$. 珠江口不同波段范围 S_g 值的大小分别为: A 段 $>$ C 段 $>$ B 段, 与施坤等^[25]对太湖水体的研究结果一致, 说明 CDOM 在 A 段 (240 ~ 260 nm) 衰减得更快, 这进一步反映了 S_g 值的取值与波段的选择有关.

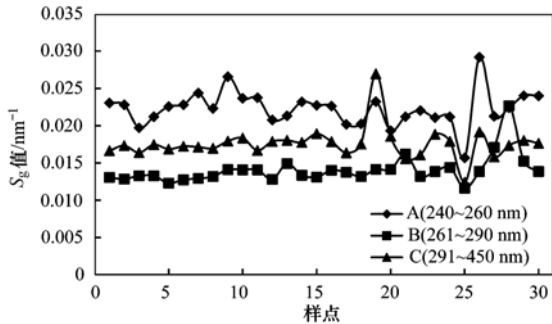


图 12 珠江口水体 S_g 值的空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of S_g values in the estuary of Zhujiang River

根据 De Haan^[30]、Peuravuori 等^[31]的研究, CDOM 相对分子质量大小可以通过 250 nm 和 365 nm 处吸收系数的比值 M 值进行示踪, 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^[32], 腐殖酸的相对分子质量一般较大, 而富里酸则较小. 因此 M 值越大, 则 CDOM 中腐殖酸的相对含量越低, 富里酸的相对含量就越高. 表 5 为不同水体 M 值统计结果^[9, 25], 相比较之下, 本研究中珠江口水体 M 值比内陆水体 M 值小, 说明珠江口水体的 CDOM 中腐殖

酸含量较高. Helms 等^[33]的研究表明, 相对于高盐度海湾区中含有大量低分子量 (< 1000) 富里酸的 CDOM, 低盐度的陆源 CDOM 含有大量的高分子量腐殖酸.

表 5 同水体 M 值统计结果^[9, 25]

Table 5 Statistic results of M values in different waters		
项目	M 值变化范围	M 值均值
本研究	5.45 ~ 9.067	6.974 ± 0.115
滇池	6.443 ~ 10.238	7.678 ± 0.164
巢湖	8.57 ~ 15.22	10.6 ± 1.57
太湖	6.94 ~ 9.88	8.66 ± 0.088

对 S_g 值和 M 值的相关性进行分析, 结果如图 13 所示. M 值与 A 段的 S_g 值呈现较强的线性相关, 决定系数为 0.76, 与 B 段的 S_g 值相关性为 0.67, 与 C 段的 S_g 值相关性最差, 仅为 0.54. 这说明并不是所有波长范围内的 S_g 值都对 CDOM 分子组成具有较强的敏感性, 对于珠江口水体而言, A 段的 S_g 值对 CDOM 分子组成最为敏感. 另外珠江口水体的 S_g 值与 M 值呈现正相关, S_g 值越大, M 值越大, 富里酸含量越高, CDOM 相对分子质量越小; 相反, S_g 值越小, 腐殖酸含量越高, CDOM 相对分子质量越大, 这进一步说明 CDOM 组成是影响 S_g 值的关键因素.

2.5 水体中各组分的贡献

水体的总吸收包括纯水吸收、浮游藻类吸收、非藻类颗粒吸收和 CDOM 吸收, 由于纯水吸收是固定的, 因此本节讨论水体各组分吸收贡献时不考虑纯水吸收. 图 14 为珠江口水体 30 个样本浮游藻类、非藻类颗粒物、CDOM 在 440 nm 处的吸收对总吸收的贡献率, 可以看出非色素颗粒物吸收在总吸收中占主导地位, 所有样本非藻类颗粒物吸收占总吸收的比例都在 47% 以上, 其中最高占 89%, 最低占 47%, 平均占 69%. 浮游藻类吸收对总吸收的贡献远小于非色素颗粒物, 其所占比例最高为 36%, 最低位 4%, 平均为 19%. CDOM 吸收对总吸收的贡献最小, 所有样本的贡献率都在 30% 以下, 其中最高占 28%, 最低占 2%, 平均占 12%. 由此可以看出, 影响珠江口水体吸收特性的主要因素是非藻类颗粒物, 浮游藻类和 CDOM 的影响较小, 因为珠江口水体叶绿素浓度较低, 而非色素颗粒物浓度较高, 是总颗粒物的主要组成部分.

图 15 为 M 值与 CDOM 吸收贡献率之间的关系, 可以看出, M 值越小, CDOM 吸收贡献率越大, 说明当 CDOM 中腐殖酸含量较高时, CDOM 对水体总吸收的贡献大, 相反腐殖酸含量较低时, CDOM 对水

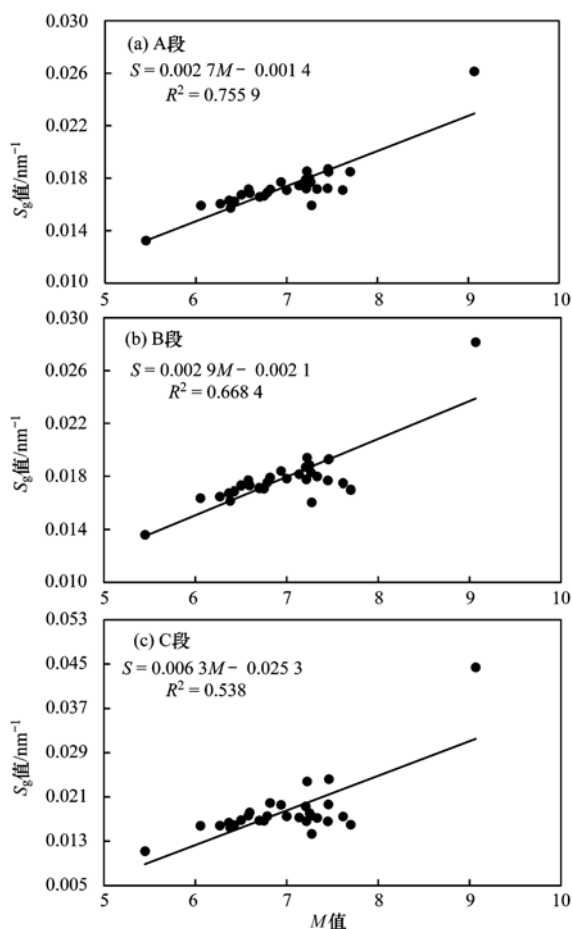
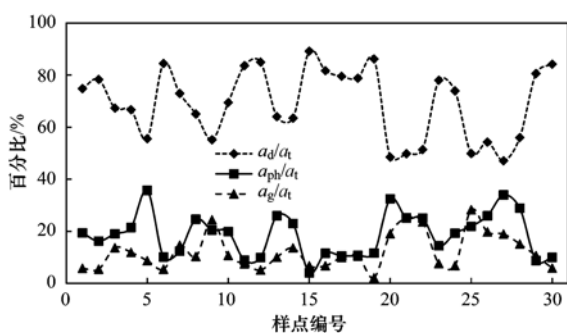
图 13 S_g 值和 M 值的相关性Fig. 13 Correlation between S_g values and M values图 14 440 nm 处 a_d 、 a_{ph} 、 a_g 对总吸收 a_t 的贡献率

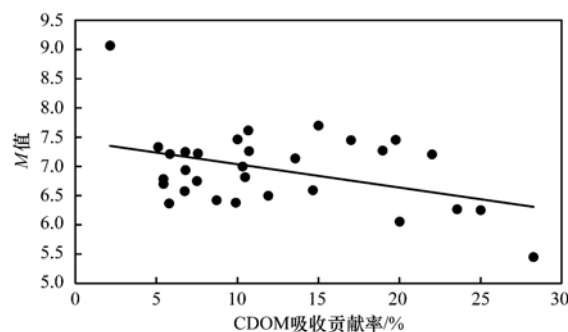
Fig. 14 Contributions of non-algal particles, phytoplankton and CDOM to the total absorption at 440 nm

体总吸收的贡献小。

3 结论

(1) 珠江口的总颗粒物吸收特征为非藻类颗粒物主导类型,除 675 nm 附近有微弱的吸收峰以外,总颗粒物吸收系数随波长的增加呈指数衰减规律。

(2) 非藻类颗粒物的吸收系数遵循指数衰减规

图 15 M 值与 CDOM 吸收贡献率之间的关系Fig. 15 Correlation between M values and contribution of CDOM total absorption

律,其主要来源是陆源性输入, S_d 均值相对较大,空间变化幅度与海洋沿岸水体类似,比内陆水体的 S_d 值变化幅度大,这是由于珠江口及海洋沿岸水域受内陆河流注入和一定程度的海洋潮流影响,河口盐水和淡水的混合导致非藻类颗粒物的来源及成分比较复杂。

(3) 浮游藻类的吸收系数在 440 nm 和 675 nm 处出现叶绿素吸收峰,少数样本在 624 nm 处由于藻蓝素吸收出现小峰值,部分样本在 440 nm 处的吸收峰不明显,呈现近似非藻类颗粒物的吸收光谱特征。多项式关系能较好地表达 a_{ph} (440) 与叶绿素 a 浓度的关系,而 a_{ph} (675) 与叶绿素 a 浓度存在很好的线性相关,辅助色素对浮游藻类吸收系数的影响主要在短波波段,长波波段叶绿素 a 的影响占主导地位。比吸收系数随叶绿素 a 浓度的增加而减小,呈现幂指数衰减规律。

(4) 珠江口水体 CDOM 吸收系数在 290 nm 之后遵循指数衰减规律,在紫外波段 250 ~ 290 nm 之间存在一个吸收肩,按光谱特征分段拟合 S_g 值能够更好地表达 CDOM 吸收特性。相对分子质量 M 值与 A 段 (240 ~ 260 nm) 的斜率 S_g 值呈现较强的正相关,珠江口水体的 M 值较小,CDOM 中腐殖酸含量较高。

(5) 珠江口水体非色素颗粒物吸收在总吸收中占主导地位,浮游藻类吸收对总吸收的贡献远小于非色素颗粒物,CDOM 吸收对总吸收的贡献最小。当 CDOM 中腐殖酸含量较高时,CDOM 对水体总吸收的贡献大,相反腐殖酸含量较低时,CDOM 对水体总吸收的贡献小。

(6) 分析模型以水体光学传输机理为理论基础,通过建立固有光学量、表观光学量和水体组分浓度之间的关系,模拟水中光场分布,进而构建水质

参数遥感反演模型,是水质遥感监测的一种重要方法。吸收系数作为固有光学量之一,是水质参数遥感反演模型构建的重要参数。本研究系统地分析了珠江口水体组分的吸收特性,为珠江口水体水质参数遥感反演模型的建立提供了参考。

参考文献:

- [1] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2003, **108**(C7): 4-1-4-20.
- [2] Bricaud A, Morel A, Babin M, *et al.* Variations of light absorption by suspended particles with chlorophyll a concentration in oceanic (case 1) waters: Analysis and implications for bio-optical models [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1998, **103**(C13): 31033-31044.
- [3] Allali K, Bricaud A, Claustre H. Spatial variations in the chlorophyll-specific absorption coefficients of phytoplankton and photosynthetically active pigments in the equatorial Pacific [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1997, **102**(C6): 12413-12423.
- [4] Blough N V, Zafiriou O C, Bonilla J. Optical absorption spectra of waters from the Orinoco River outflow: Terrestrial input of colored organic matter to the Caribbean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 1993, **98**(C2): 2271-2278.
- [5] 盖利亚, 刘正军, 张继贤. 三峡坝区水体吸收系数的特征研究[J]. *遥感学报*, 2010, **14**(2): 313-332.
- [6] 乐成峰, 李云梅, 查勇, 等. 太湖梅梁湾水体组分吸收特性季节差异分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(9): 2448-2455.
- [7] 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.
- [8] 王长风, 段洪涛, 马荣华, 等. 长江中下游大型湖泊水体固有光学特性: I. 吸收[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(4): 497-504.
- [9] 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.
- [10] 曹文熙, 杨跃忠, 许晓强, 等. 珠江口悬浮颗粒物的吸收光谱及其区域模式[J]. *科学通报*, 2003, **48**(17): 1876-1882.
- [11] 许晓强, 曹文熙, 杨跃忠. 珠江口颗粒物吸收系数与盐度及叶绿素 a 浓度的关系[J]. *热带海洋学报*, 2004, **23**(5): 63-71.
- [12] 王桂芬, 曹文熙, 杨跃忠, 等. 珠江口藻华水体总吸收系数的变化特性及高光谱反演模式[J]. *热带海洋学报*, 2010, **29**(2): 52-58.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 刘忠华, 李云梅, 吕恒, 等. 太湖春季水体固有光学特性及其对遥感反射率变化的影响[J]. *生态学报*, 2012, **32**(2): 438-447.
- [18] 赵巧华, 张运林, 秦伯强. 太湖梅梁湾水体悬浮颗粒物吸收系数的分离[J]. *湖泊科学*, 2006, **18**(4): 356-362.
- [19] 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* (1978-2012), 1995, **100**(C7): 13321-13332.
- [20] 李方, 徐京萍, 何艳芬, 等. 长春市石头口门水库颗粒物光谱吸收特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 280-287.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Babin M, Stramski D, Ferrari G M, *et al.* Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around Europe [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978-2012), 2003, **108**(C7): 3211, doi: 10.1029/2001JC000882.
- [25] 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.
- [26] 黄昌春, 李云梅, 孙德勇, 等. 太湖 CDOM 紫外吸收特性及其分子量时空分布特征[J]. *中国环境科学*, 2009, **29**(3): 261-268.
- [27] 赵巧华, 秦伯强. 太湖有色溶解有机质光谱吸收空间的分异特征[J]. *中国环境科学*, 2008, **28**(4): 289-293.
- [28] Warnock R E, Gieskes W W C, van Laar S. Regional and seasonal differences in light absorption by yellow substance in the Southern Bight of the North Sea [J]. *Journal of Sea Research*, 1999, **42**(3): 169-178.
- [29] 马荣华, 戴锦芳, 张运林. 东太湖 CDOM 吸收光谱的影响因素与参数确定[J]. *湖泊科学*, 2005, **17**(2): 120-126.
- [30] 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.

- [31] Peuravuori J, Pihlaja K. Molecular size distribution and spectroscopic properties of aquatic humic substances [J]. *Analytica Chimica Acta*, 1997, **337**(2): 133-149.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 周虹丽, 韩冰, 李铜基, 等. 南黄海和珠江口海区非色素颗粒光谱吸收特性[J]. *海洋技术*, 2007, **26**(3): 114-117.
- [35] Roesler C S, Perry M J, Carder K L. Modeling in situ phytoplankton absorption from total absorption spectra in productive inland marine waters [J]. *Limnology and Oceanography*, 1989, **34**(8): 1510-1523.
- [36] 孙德勇, 李云梅, 黄家柱, 等. 太湖梅梁湾夏季水体组分光谱吸收特性[J]. *生态学报*, 2008, **28**(2): 749-760.
- [37] 王明殊, 张运林, 刘笑菡, 等. 不同营养水平湖泊浮游植物吸收和比吸收系数变化特征[J]. *湖泊科学*, 2013, **25**(4): 505-513.
- [38] Morris D P, Zagarese H, Williamson C E, *et al.* The attenuation of solar UV radiation in lakes and the role of dissolved organic carbon[J]. *Limnology and Oceanography*, 1995, **40**(8): 1381-1391.
- [39] 王桂芬, 曹文熙, 许大志, 等. 南海北部藻类粒级结构及色素成分对浮游植物吸收系数的影响[J]. *海洋学报*, 2007, **29**(1): 38-48.
- [40] Binding C E, Jerome J H, Bukata R P, *et al.* Spectral absorption properties of dissolved and particulate matter in Lake Erie[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(4): 1702-1711.
- [41] Ma R, Tang J, Dai J, *et al.* Absorption and scattering properties of water body in Taihu Lake, China: Absorption [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, **27**(19): 4277-4304.
- [42] 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.
- [43] 孙德勇, 李云梅, 王桥, 等. 内陆湖泊水体固有光学特性的典型季节差异[J]. *应用生态学报*, 2008, **19**(5): 1117-1124.
- [44] 俞宏, 蔡启铭, 吴敬禄. 太湖水体吸收系数与散射系数的特征研究[J]. *水科学进展*, 2003, **14**(1): 46-49.
- [45] 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.
- [46] 陈楚群, 潘志林, 施平. 海水光谱模拟及其在黄色物质遥感反演中的应用[J]. *热带海洋学报*, 2003, **22**(5): 33-39.
- [47] 朱建华, 李铜基. 探讨黄色物质吸收曲线参考波长选择[J]. *海洋技术*, 2003, **22**(3): 10-14.

CONTENTS

Concentration and Size Distribution of Bioaerosols at Non-haze and Haze Days in Beijing	GAO Min, QIU Tian-lei, JIA Rui-zhi, <i>et al.</i> (4415)
Light Scattering Extinction Properties of Atmospheric Particle and Pollution Characteristics in Hazy Weather in Hangzhou	XU Chang, YE Hui, SHEN Jian-dong, <i>et al.</i> (4422)
Characteristic of Elements in PM _{2.5} and Health Risk Assessment of Heavy Metals During Heating Season in Taiyuan	LI Li-juan, WEN Yan-ping, PENG Lin, <i>et al.</i> (4431)
Pollution Characteristics of Secondary Water-soluble Inorganic Ions of PM _{2.5} in Urban Chengdu, China	LI You-ping, ZHOU Hong, ZHANG Zhi-sheng, <i>et al.</i> (4439)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Ozone in Beijing	WANG Zhan-shan, LI Yun-ting, CHEN Tian, <i>et al.</i> (4446)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Northern Suburb of Nanjing	AN Jun-lin, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4454)
Environmental Significance of Wet Deposition Composition in the Central Qilian Mountains, China	LI Zong-jie, LI Zong-xing, TIAN Qing, <i>et al.</i> (4465)
Dynamics of Nitrogen and Sulfur Wet Deposition in Typical Forest Stand at Different Spatial Levels in Simian Mountain, Mid-subtropical Region	SUN Tao, MA Ming, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4475)
Establishment and Assessment of QA/QC Method for Sampling and Analysis of Atmosphere Background CO ₂	LIU Li-xin, ZHOU Ling-xi, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (4482)
An Investigation of the CH ₄ and N ₂ O Emission Factors of Light-duty Gasoline Vehicles	HE Li-qiang, SONG Jing-hao, HU Jing-nan, <i>et al.</i> (4489)
Experimental Study on the Size Spectra and Emission Factor of Ultrafine Particle from Coal Combustion	SUN Zai, YANG Wen-jun, XIE Xiao-fang, <i>et al.</i> (4495)
Distributions and Air-Sea Fluxes of Dissolved Nitrous Oxide in the Yangtze River Estuary and Its Adjacent Marine Area in Spring and Summer	WANG Lan, ZHANG Gui-ling, SUN Ming-shuang, <i>et al.</i> (4502)
Spectral Absorption Properties of the Water Constituents in the Estuary of Zhujiang River	WANG Shan-shan, WANG Yong-bo, FU Qing-hua, <i>et al.</i> (4511)
Characteristics of Phosphorus Forms and the Effects of UV Light in the Confluences Water of Qujiang-Jialing River and Fujiang-Jialing River	YAN Jin-long, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4522)
Research on the Threshold of Chl-a in Lake Taihu Based on Microcystins	WEI Dai-chun, SU Jing, JI Dan-feng, <i>et al.</i> (4530)
Temporal and Spatial Characteristic of Nitrogen and Phosphorus Output in the Suburb Watershed Around the Baihua Lake	FENG Yuan-song, LIN Tao, YANG Qing-yuan (4537)
Effects of Light Irradiation on Phosphorous Releases from Typical Submerged Soils of Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoirs Areas	GUO Nian, JIANG Tao, WEI Shi-qiang, <i>et al.</i> (4544)
Analysis on the Removal Efficiency and Mechanisms of Phosphorus by Modified Zeolites Substrates Coated with LDHs Reacted by Different Metal Compounds in Laboratory-Scale Vertical-Flow Constructed Wetlands	ZHANG Xiang-ling, CHEN Jun-jie, GUO Lu, <i>et al.</i> (4553)
Mercury Dynamics of Several Plants Collected from the Water-Level Fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Area During Flooding and Its Impact on Water Body	ZHANG Xiang, ZHANG Cheng, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (4560)
Effect of Nano-TiO ₂ on the Release and Activation of Mercury in Sediment	ZHANG Jin-yang, LI Chu-xian, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4567)
Estimation Inventory of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) from Anthropogenic Sources and Its Impacts within the Yanghe Watershed, an Important Water-Source Site of Beijing, China	GAO Jia-jia, LUO Wei, XI Xiao-xia (4573)
Source Identification of Toxic Wastewaters in a Petrochemical Industrial Park	YANG Qian, YU Yin, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (4582)
Investigation of Pollution Characteristics of Erythromycin Resistance Genes in a Sewage Treatment Plant and the Relevant Selective Factors	LI Kan-zhu, WU Li-le, HUANG Sheng-lin, <i>et al.</i> (4589)
Variation of Pollutants Along the Height of Two Media BAF During Advanced Treatment of Dyeing Wastewater	LIU Jun-feng, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i> (4596)
Acclimatization and Characteristics of Microbial Community in Sulphate-Dependent Anaerobic Methane Oxidation	XI Jing-ru, LIU Su-qin, LI Lin, <i>et al.</i> (4602)
Capability and Microbial Community Analysis of a Membrane Bioreactor for Acrylic Fiber Wastewater Treatment	WEI Jian, SONG Yong-hui, ZHAO Le (4610)
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX ABR Process in Tannery Wastewater Treatment	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan (4618)
Numerical Simulation and Operation Optimization of Biological Filter	ZOU Zong-sen, SHI Han-chang, CHEN Xiang-qiang, <i>et al.</i> (4627)
Effect of Gas-lift Device on the Morphology and Performance of ANAMMOX Sludge	LI Xiang, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4636)
Water Treatment Residual as a Bioretention Media Amendment for Phosphorus Removal	WANG Jian-jun, LI Tian, ZHANG Ying (4642)
Nutrient Contents and Heavy Metal Pollutions in Composted Sewage Sludge from Different Municipal Wastewater Treatment Plants in Beijing Region	BAI Li-ping, QI Hong-tao, FU Ya-ping, <i>et al.</i> (4648)
Polychlorinated Biphenyls and Their Methylsulfonyl Metabolites in Fish from an Electronic Waste Recycling Site in South China: Tissue Distribution and Human Dietary Exposure	TANG Bin, LUO Xiao-jun, ZENG Yan-hong, <i>et al.</i> (4655)
Residues and Health Risk Assessment of HCHs, DDTs and Heavy Metals in Water and <i>Tilapia</i> s from Fish Ponds of Guangdong	XIE Wen-ping, ZHU Xin-ping, ZHENG Guang-ming, <i>et al.</i> (4663)
Concentration and Distribution Characteristics of Estrogen in Aquatic Organism from Chongming Island	GENG Jing-jing, YE Ai-li, YANG Yi, <i>et al.</i> (4671)
Photocatalytic Degradation of Acetamiprid by TiO ₂ and Xe Lamp: Kinetics and Degradation Intermediates	ZHOU Wen-chang, YANG Hai, HU Zhi-bin, <i>et al.</i> (4678)
Effects of Nitrogen Addition on Available Nitrogen Content and Acidification in Cold-temperate Coniferous Forest Soil in the Growing Season	CHEN Gao-qi, FU Wa-li, LUO Ya-chen, <i>et al.</i> (4686)
Impact of Land Use Type on Stability and Organic Carbon of Soil Aggregates in Jinyun Mountain	LI Jian-lin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (4695)
Investigation and Canonical Correspondence Analysis of Salinity Contents in Secondary Salinization Greenhouse Soils in Shanghai Suburb	TANG Dong, MAO Liang, ZHI Yue-e, <i>et al.</i> (4705)
Spatial Distribution Prediction of Surface Soil Pb in a Battery Contaminated Site	LIU Geng, NIU Jun-jie, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4712)
Immobilization Remediation of Cd and Pb Contaminated Soil: Remediation Potential and Soil Environmental Quality	SUN Yue-bing, WANG Peng-chao, XU Ying-ming, <i>et al.</i> (4720)
Rules and Impact Factors of Greenhouse Gases Emission in the Saline-Alkali Paddy Fields in Different Years	TANG Jie, FANG Tian-ru, HOU Ke-yi, <i>et al.</i> (4727)
Adsorption of Cd(II) Varies with Biochars Derived at Different Pyrolysis Temperatures	WANG Zhen-yu, LIU Guo-cheng, Monica Xing, <i>et al.</i> (4735)
Poisoning Effect of Ca Depositing Over Mn-Ce/TiO ₂ Catalyst for Low-temperature Selective Catalytic Reduction of NO by NH ₃	ZHOU Ai-yi, MAO Hua-feng, SHENG Zhong-yi, <i>et al.</i> (4745)
A Comparative Study on Domestic and Foreign Emission Standards of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4752)
Revision Process and Thinking of Emission Standard of Air Pollutants for Cement Industry	JIANG Mei, LI Xiao-qian, JI Liang, <i>et al.</i> (4759)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年12月15日 第35卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 12 Dec. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人