

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第5期

Vol.38 No.5

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京工业区夏冬季节二次有机气溶胶浓度估算及来源解析 刘静达,安俊琳,张玉欣,师远哲,林旭 (1733)

南京北郊大气细粒子在人体呼吸系统沉积特性 梁静舒,安俊琳,王红磊,张玉欣,王俊秀,施双双,王潇 (1743)

广西北海涠洲岛春季大气颗粒物浓度特征及影响因素 高元官,张凯,王体健,陈志明,耿红,孟凡 (1753)

神农架大九湖大气中的多环芳烃 金梦云,邢新丽,柯艳萍,郑煌,胡天鹏,孙焰,丁洋,李绘,张泽洲,祁士华 (1760)

沧州市春季 NMHCs 空间分布特征 段菁春,周雪明,张鹤丰,谭吉华,胡京南,柴发合 (1769)

北京市民用燃煤烟气中气态污染物排放特征 梁云平,张大伟,林安国,马召辉,邹晓东 (1775)

生活垃圾堆肥设施 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析 邵珠泽,郑国砥,王元刚,高定,朱彦莉,陈同斌,聂二旗 (1783)

低温等离子体对复合 CVOCs 的降解特性 姜理英,张迪,郭海倩,缪晶晶,陈怡伶,李慧 (1792)

运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析 武媛媛,李如梅,彭林,端允,王海京,李颖慧,白慧玲,牟玲 (1799)

高架道路周边建筑物灰尘重金属污染风险:以常州市为例 姚静波,王明新,齐今笛,孙向武,张文艺 (1807)

上海降水中氢氧同位素特征及与 ENSO 的关系 董小芳,邓黄月,张杰,朱志鹏,王琳,郑祥民,周立旻 (1817)

DOC + CDPF 对重型柴油车排放特性的影响 张允华,楼狄明,谭丕强,胡志远 (1828)

我国重点城市饮用水中砷健康累积风险评价 张秋秋,潘申龄,刘伟,张昱,安伟 (1835)

基于 Monte Carlo 模拟法对水源水体中微囊藻毒素的健康风险评估 王阳,徐明芳,耿梦梦,黎明,陈耕南 (1842)

北京城区水体中 PPCPs 的分布特征及潜在风险 张盼伟,周怀东,赵高峰,李昆,赵晓辉,刘巧娜,任敏,赵丹丹,李东佼 (1852)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素 孙语嫣,白莹,苏荣国,石晓勇 (1863)

垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制 肖骁,何小松,高如泰,席北斗,张慧,黄彩红,李丹,袁志业 (1873)

3 种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用 李立青,胡楠,刘雨情,涂声亮,陈华超 (1881)

三峡库区小流域稻田空间格局对氮磷流失影响 陈成龙,高明,倪九派,谢德体,邓华 (1889)

NO₃⁻-N 负荷对树皮填料人工湿地早期反硝化及释碳速率的影响 姜应和,李瑶,张莹,张翔凌 (1898)

湿地基质及阴极面积对人工湿地型微生物燃料电池去除偶氮染料同步产电的影响 李薛晓,程思超,方舟,李先宁 (1904)

阳极材料对 6 L 微生物燃料电池性能及有机废水处理效果的影响 丁为俊,于立亮,陈杰,成少安 (1911)

臭氧-混凝交互作用对水体有机物的影响 刘海龙,付晶森,郭雪峰,柴建恬,张忠民 (1918)

紫外线和次氯酸钠对 *Escherichia coli* 和 Poliovirus 的消毒作用 徐丽梅,张崇森,王晓昌,吉铮,周进宏 (1928)

不同沉淀 pH 值条件下制备的水合氧化铝对水中磷酸盐的吸附作用 王星星,林建伟,詹艳慧,张志斌,邢云青,姜博汇,储鸣 (1936)

树脂基纳米钛铝氧化物复合吸附剂同步去除水中磷和氟 陈家凯,聂广泽,刘志英,姚远,徐炎华 (1947)

灼烧净水污泥投加方式对磷吸附和磷形态的影响 朱培颖,李大鹏,于胜楠 (1957)

城市污水管网中污染物冲刷与沉积规律 桑浪涛,石烜,张彤,付博文,金鹏康 (1965)

11 种邻苯二甲酸酯在好氧污水处理系统中的归趋 周林军,古文,刘济宁,石利利,徐炎华 (1972)

反硝化抑制硫酸盐还原的工艺特性 金鹏康,杨珍瑞,李蓉,李岩,周立辉 (1982)

Fe⁽⁰⁾-活性炭强化短程反硝化脱氮及影响因素 吕永涛,刘婷,曾玉莲,孙婷,张瑶,王磊 (1991)

两种不同抑制策略下部分亚硝化系统运行特性比较 李惠娟,彭党聪,陈国燕,王博,姚倩,卓杨 (1997)

基质比对 ABR 厌氧氨氧化工艺脱氮性能的影响 闰刚,徐乐中,沈耀良,吴鹏,张婷, Samwine Thomas (2006)

温度对 SCSC-S/Fe 复合系统脱氮除磷及微生物群落特性的影响 范军辉,郝瑞霞,朱晓霞,万京京,刘思远,王丽沙 (2012)

SCAR 处理城市生活污水的效能及其微生物群落动态分析 杨波,徐辉,冯修平,李方,田晴,马春燕 (2021)

喹啉降解菌 *Ochrobactrum* sp. 的好氧降解特性及其在焦化废水中的生物强化作用 徐伟超,吴翠平,张玉秀,张琪,张怡鸣 (2030)

锰氧化菌 *Arthrobacter* sp. HW-16 的锰氧化特性和氧化机制 万文结,薛芷筠,张泽文,何冬兰 (2036)

温度对海洋厌氧氨氧化菌脱氮效能的影响 周同,于德爽,李津,吴国栋,王晓静 (2044)

包埋固定化活性污泥脱氮特性与微生物群落分析 许晓毅,尤晓露,吕晨培,王斌,胡碧波 (2052)

强化两相污泥高固厌氧消化系统的微生物群落 曹知平,吴静,左剑恶,王晓璐,王翀,王广启,王凯军,钱易 (2059)

三峡库区城乡消落带人工植被恢复土壤放线菌多样性特征 秦红,任庆水,杨文航,李昌晓 (2065)

川中丘陵区农田源头沟渠玉米季中氧化亚氮排放及其影响因素 田琳琳,朱波,汪涛,赵原,董宏伟,任光前,胡磊 (2074)

双氰胺对冬闲稻田和油菜地 N₂O 排放的影响 伍延正,张苗苗,秦红灵,陈春兰,王娟,魏文学,李勇 (2084)

生物炭介导的不同地表条件下土壤 N₂O 的排放特征 邹娟,胡学玉,张阳阳,张迪,陈威,王向前,陈窈君,刘扬 (2093)

垄作秸秆覆盖下西南地区蚕豆田土壤呼吸与有机碳特征 熊瑛,王龙昌,杜娟,赵琳璐,周泉,张赛 (2102)

广东省土壤 Cd 含量空间分布预测 孙慧,郭治兴,郭颖,袁宇志,柴敏,毕如田,杨静 (2111)

宿鸭湖沉积物重金属空间分布及潜在生态风险评价 张鹏岩,康国华,庞博,郭依,何坚坚,秦明周 (2125)

腐殖酸活性组分及其比例对紫色潮土中铅形态转化和有效性演变动态的影响 王青清,蒋珍茂,王俊,魏世强 (2136)

紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征 李秋言,赵秀兰 (2146)

生物炭增强黄绵土对西替利嗪的吸附作用 吴志娟,毕二平 (2154)

两种木材生物炭对铜离子的吸附特性及其机制 王彤彤,马江波,曲东,张晓媛,郑纪勇,张兴昌 (2161)

牛粪源粪炭及其生物炭对 Pb²⁺、Cd²⁺ 的吸附特性 杜文慧,朱维琴,潘晓慧,沈旭阳,陈思远,陈可乐,坎吉汗·木沙拉,张杭君,丁颖 (2172)

C₃N₄/BiOBr 复合可见光催化剂的性能及其作用机制 鲍玥,周旻昀,邹骏华,史宇滨,万先凯,史惠祥 (2182)

《环境科学》征稿简则(2020) 《环境科学》征订启事(2035) 信息(1782, 1798, 1827)

长江口及邻近海域春夏季有色溶解有机物时空分布特征及主要影响因素

孙语嫣, 白莹, 苏荣国*, 石晓勇

(中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 利用三维荧光光谱(EEMs)-平行因子(PARAFAC)分析技术对长江口及邻近海域春季(2015年3月)和夏季(2015年7月)有色溶解有机物(CDOM)的荧光组成及分布特征进行分析。共识别出2类4个荧光组分,即类腐殖质组分C1(370/495 nm)、C2(330/405 nm)、C3(365/440 nm)及类蛋白质组分C4(295/345 nm)。春夏季各层4个荧光组分分布模式基本一致,从长江口到邻近海域逐渐降低。春季类腐殖质组分的高值区分布在长江口内,而类蛋白组分高值区位于南槽附近区域,表层的CDOM主要来源于陆源输入和人类活动;中层荧光强度值比表层低,受陆源影响减弱;底层荧光强度值比中层略高,是由沉积物再悬浮造成的。各荧光组分在岱山县附近海域均有一个较高值,这与岛上的居民活动有关。夏季荧光组分高值区与春季相似,各层荧光组分值接近,说明夏季研究区域水体混合较均匀。春夏季腐殖化指数(HIX)在长江口较高,而生物指数(BIX)在邻近海域较高。将4个荧光组分(C1~C4)、吸收系数(a_{355})与盐度(S)、溶解有机碳(DOC)、总氮(TN)、总磷(TP)、叶绿素a(Chl-a)、溶解氧(DO)做冗余分析。结果表明,4个荧光组分(C1~C4)与总氮(TN)、总磷(TP)主要受陆源输入、人类活动的影响,溶解有机碳(DOC)受陆源与海源的共同影响。本文利用三维荧光光谱-平行因子分析(EEMs-PARAFAC)技术结合多元统计方法解析了CDOM组成,清晰揭示了长江口及邻近海域CDOM的来源及主要影响因子,可为河口海域生源要素海洋生物地球化学研究提供有益的补充。

关键词: 有色溶解有机物;三维荧光光谱;平行因子分析;冗余分析;长江口

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)05-1863-10 DOI: 10.13227/j.hjx.201611173

Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas

SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo*, SHI Xiao-yong

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The composition and distribution characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) of Changjiang Estuary and its adjacent waters in spring (March 2015) and summer (July 2015) were evaluated by excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) in combination with parallel factor (PARAFAC) analysis. Three humic-like components [C1 (370/495 nm), C2 (330/405 nm), C3 (365/440 nm)] and one protein-like component [C4 (295/345 nm)] were identified. The distribution patterns of the four components in spring and summer were almost the same, showing a decreasing trend from Changjiang Estuary to adjacent waters. In spring, the high value areas of three humic-like components were located inside of Changjiang Estuary, and the high value areas of the protein-like component were located in the South Passage of Changjiang Estuary. In the surface layer, the CDOM was mainly from terrestrial input and human activities; the influence of terrestrial weakened in the middle layer because of the lower fluorescence intensity values; and in the bottom layer the fluorescence values were higher than those in the middle layer, which was caused by sediment resuspension. There were high value areas in the Daishan Island, which were related to human activities. In summer, the high value areas of CDOM were almost the same as those in spring, and all layers had similar fluorescence intensity values, which indicated that they were mixed evenly. CDOM in spring and summer had high humification index (HIX) values in the Changjiang Estuary, whereas for biological index (BIX), its high values appeared in the adjacent waters. Four components (C1-C4), a_{355} and DOC, TN, TP, DO, Chl-a, Salinity were evaluated by redundancy analysis (RDA), which indicated that C1-C4 and TN, TP were mainly affected by terrestrial input and human activities, and DOC was affected by terrestrial and marine source together. The use of EEMs-PARAFAC in combination with multivariate analysis to parse the composition of CDOM revealed the source of CDOM and main influencing factors in Changjiang Estuary and adjacent waters, and plays an important role in the biogeochemical research of biogenic

收稿日期: 2016-11-22; 修订日期: 2016-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402101); 国家自然科学基金项目(41376106)

作者简介: 孙语嫣(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为海洋中有色溶解有机物的生物地球化学循环, E-mail: ml17864277357@163.com

* 通信作者, E-mail: surongguo@ouc.edu.cn

elements in estuarine waters.

Key words: chromophoric dissolved organic matter; excitation-emission matrix spectroscopy; parallel factor analysis; redundancy analysis; Changjiang Estuary

有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)广泛存在天然水体中,其主要的成分是人类腐殖质和类蛋白质^[1,2],在碳的生物地球化学循环中起着重要作用^[3],而且对环境污染物的形态特征及迁移转化过程具有重要影响^[4,5]. CDOM在紫外和可见光区具有强烈的吸收特性,特别对紫外光的吸收尤为强烈,一方面,通过吸收紫外光来保护水生生物^[6];另一方面,CDOM吸收可见光从而限制初级生产力对光的利用^[7]. 在河口海域,CDOM的来源主要有两种:在近岸海域来自于河流输入和人类活动排放;在远岸海域主要为沉积物的再悬浮和浮游生物活动产生^[8-10].

三维荧光光谱(excitation-emission matrix spectroscopy, EEMs)是研究CDOM组成和来源的一种简单而有效的方法. 三维荧光光谱结合平行因子(parallel factor, PARAFAC)分析技术能够根据CDOM各组分的性质、来源、迁移转化途径等的不同,更好地解析CDOM^[8,11-13],已在地下水、河口、海洋CDOM研究中得到广泛应用^[3,9,12,14],是研究水环境中CDOM动态的一种极其有用的方法. 冗余分析(redundancy analysis, RDA)是一种多元直接梯度分析方法,能够以统计学的角度评价一个或一组变量与另一组变量之间的关系^[15]. 在EEMs-PARAFAC技术解析CDOM荧光组成的基础上,可利用RDA分析各环境因子之间的相互关系以及它们对各荧光组分的影响程度.

长江口是我国最大的河口,属于中等强度的潮汐河口,其邻近海域是一个典型的陆架海,毗邻的长江三角洲地区是我国经济最发达地区之一,大量生活污水、工业废水等排入海,对长江口及邻近海域的环境造成很大压力^[16-18]. 长江口及邻近海域陆海相互作用强烈,生物活动旺盛,是碳、氮等生源要素海洋生物地球化学过程最为复杂重要的区域. 本研究利用EEMs-PARAFAC分析技术结合RDA对长江口及邻近海域两个航次的CDOM样品进行分析,以揭示长江口及邻近海域CDOM的组成、来源、分布特征、季节变化及主要影响因子,并对溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、总氮(total nitrogen, TN)和总磷(total phosphorus, TP)的分布

特征及其与CDOM的关系进行了阐释.

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

2015年3月和7月在长江口及邻近海域分别进行两个航次的现场采样,采样范围均为:121°~124°E、29°~33°N的70个站位(图1). 由于采样区域的海水深度最深处不足70m,所以在长江口内只采集了表层和底层的海水样品,在长江口外采集了表层、中层、底层的海水样品,3月和7月采样个数均为193个. 各层水样均采用Niskin采水器采集,在采集水样后,立即用GF/F玻璃纤维膜过滤(预先于马弗炉中450℃下灼烧4.5h)过滤样品并分别收集于40 mL和60 mL的棕色玻璃瓶中(预先于马弗炉中450℃下灼烧4.5h)冷冻保存,40 mL的水样用于DOC的测定,60 mL的水样测定样品中CDOM的吸收和荧光光谱. 过滤后的滤膜用锡纸包好后冷冻保存用于测样品中叶绿素a(Chlorophyll a, Chl-a)的浓度. 另外,取未过滤的海水于100 mL的棕色试剂瓶中(预先于马弗炉中450℃下灼烧4.5h)冷冻保存,用于样品中TN和TP的测定. 样品分析前均需解冻至室温.

站位图、荧光组分等的平面分布图均使用Surfer 11.0软件绘制.

1.2 CDOM光学特性

1.2.1 吸收光谱的测定

将样品解冻至室温,用0.2 μm的一次性聚醚砜针头滤器过滤. 吸收光谱采用UV-2500紫外可见分光光度计(日本岛津)进行测定,光谱范围250~700 nm,配5 cm两通石英比色皿,以Milli-Q水(用0.2 μm的一次性聚醚砜滤膜过滤)做参比液. 采用680~700 nm之间吸收的平均值进行零点校正. 将所测每一波长校正后的吸光度值 $D(\lambda)_{\text{corr}}$ 转化为特定波长下的吸收系数 $a(\lambda)$,利用以下方程式^[12]计算:

$$a(\lambda) = 2.303 \times [D(\lambda)_{\text{corr}}/L]$$

式中, L 是光程,即比色皿的长度.

1.2.2 三维荧光光谱的测定

将样品解冻至室温,用0.2 μm的一次性聚醚砜针头滤器过滤. 荧光分析仪器用Fluorolog3-11荧

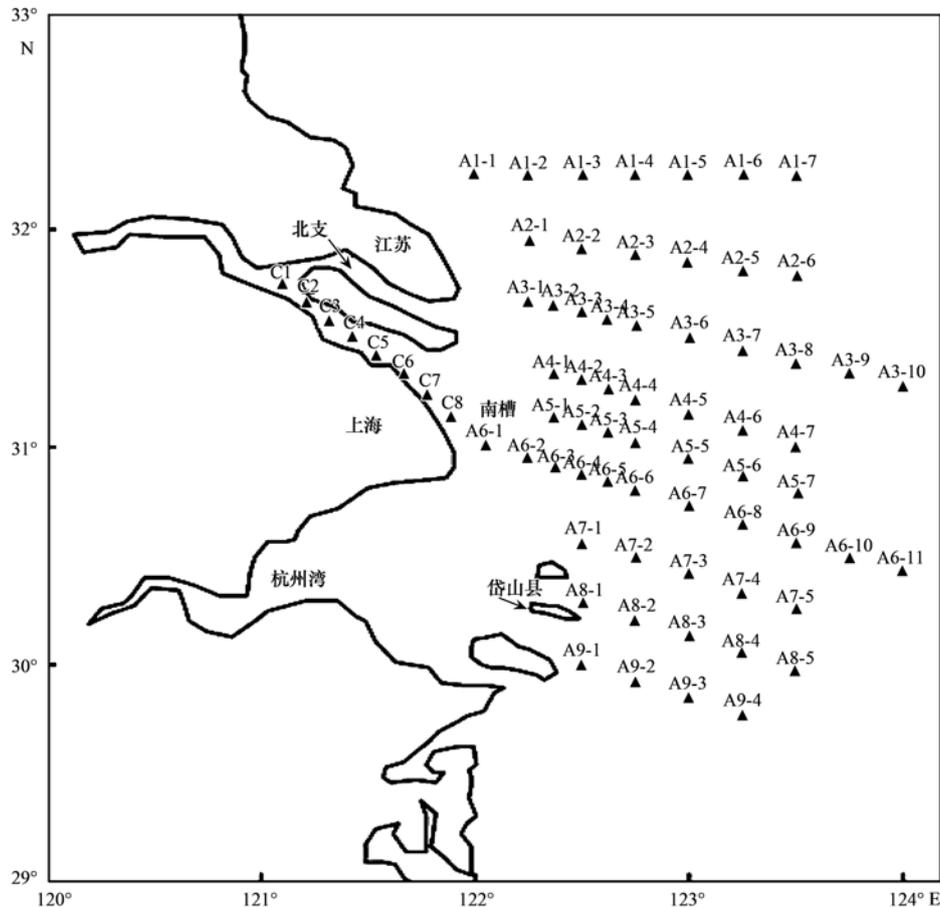


图 1 采样站示意图

Fig. 1 Map of sampling stations

光分光光度计 (JobinYvon, France), 采用 1 cm 的四通石英比色皿, 光源为 450 W 的氙灯, 以 Milli-Q 水为空白, 进行扫描. 其激发波长为 240 ~ 480 nm, 发射波长为 250 ~ 580 nm, 步长和狭缝宽度均为 5 nm, 扫描信号积分时间是 0.05 s. 荧光强度采用 0.05 mg·L⁻¹ 硫酸奎宁溶解在稀硫酸溶液进行定标^[19].

1.3 腐殖化指数和生物指数

腐殖化指数 (humification index, HIX) 用来表征 CDOM 的腐殖化程度及来源等特征, 在激发波长 254 nm 处 (本文选用 255 nm 处的激发波长), 用发射波长 435 ~ 480 nm 的区域积分值除以发射波长 300 ~ 345 nm 的区域积分值^[20~23], 得到腐殖化指数值, HIX 值越大, CDOM 腐殖化程度越高, 稳定性越好, 其在环境中存在时间较长, 一般 HIX 值较大的 CDOM 以陆源为主, 而水体自生或人为来源 CDOM 的 HIX 值较低. 生物指数 (biological index, BIX) 用来衡量生物生产的贡献, 在激发波长 310 nm 处, 发射波长 380 nm 处的荧光强度值与发射波长 430 nm 处的荧光强度值的比值^[21~23], 即得到 BIX 值, 其值越高表示 CDOM 的生物来源越强, 较低则主要来自

陆源输入.

1.4 Chl-a 的测定

将冷冻的滤膜取出, 放入具塞离心管中, 加入 10 mL 90% 的丙酮溶液, 振荡, 静置冰箱冷藏室萃取 24 h, 期间振荡样品管 2 ~ 3 次. 将萃取液置于 1 cm 的两通石英比色皿中, 以 90% 的丙酮溶液作参比, 用紫外可见光光度计测量萃取液在 400 ~ 800 nm 处的吸光度. 按 Jeffrey-Humphrey 的方程计算 Chl-a 的浓度^[24]:

$$\text{Chlorophylla} (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = [11.85 \times (E_{664} - E_{750}) - 1.54 \times (E_{647} - E_{750}) - 0.08 \times (E_{630} - E_{750})] \times V_e / (L \times V_f)$$

式中, L 为比色皿的长度 (cm), V_e 为提取液的体积 (mL), V_f 为过滤样品的体积 (L), E 为吸光度.

1.5 DOC 的测定

将冷冻的样品解冻至室温, 利用 Multi N/C 3100 总氮/总碳分析仪对海水样品的 DOC 浓度进行测定. 样品用 3 mol·L⁻¹ 的盐酸酸化后再用高纯氧纯化以除去溶液中的无机碳. 对样品进行测量时每次的进样量均为 300 μL, 测量 2 ~ 3 次取平均值.

1.6 TN、TP 的测定

取出样品解冻至室温,利用含硼酸的过硫酸钾氧化消解海水样品,采用镉-铜还原法测定 TN 的浓度,用磷钼蓝法测定 TP 的浓度.

1.7 数据转换及散射去除

利用 Origin 8.0 软件将得到的 SPC 格式的样品光谱数据转换为 TXT 格式,并运用 Matlab 7.6 软件处理 CDOM 三维荧光光谱 (EEMs) 数据. 采用 Delaunay 三角形插值法来消除 EEMs 产生的散射峰^[25]. 该技术先将散射区域数据置零,然后以散射峰邻近的数据为基准进行三维插值,它能有效地恢复散射区域的荧光信号.

1.8 EEMs 的平行因子分析

1.8.1 平行因子模型

利用 PARAFAC 分析将 EEMs 解析成为单独的荧光组分,该分析利用 Matlab 7.6 中 DOMFluor 工具箱进行,通过残差分析得出组分数并用折半分析对得到的组分数验证^[12].

1.8.2 荧光强度的计算

通过平行因子分析模型可得到每种成分的荧光强度,其计算公式是:

$$I_n = \text{Score}_n \times E_{\lambda_n}(\lambda_{\max}) \times E_{m_n}(\lambda_{\max})$$

式中, I_n 代表第 n 种组分的荧光强度, Score_n 代表第 n 种组分的相对荧光强度, $E_{\lambda_n}(\lambda_{\max})$ 代表第 n 种组分激发负载的最大值, $E_{m_n}(\lambda_{\max})$ 代表第 n 种组分发射负载的最大值.

总荧光强度和每种组分所占比例 P_n 的计算公式如下:

$$\text{TFI} = \sum_1^n I_n, P_n = I_n / \text{TFI}$$

式中, TFI 代表总荧光强度, I_n 代表第 n 种组分的荧光强度.

1.9 RDA 分析

按照自然环境、人为干扰因素选用盐度 (salinity, S)、溶解氧 (dissolved oxygen, DO)、Chl-a、DOC、TN、TP 共 6 个变量作为解释各荧光组分及吸收系数的指标,相应的响应变量即为由平行因子分析得到的荧光组分和在 355 波长下的吸收系数 (a_{355}). 首先对各荧光组分与吸收系数进行去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA), 来确定其属于单峰型还是线性分布^[26]. DCA 结果表明,春夏季表中底 3 层的各排序轴最大梯度长度均小于 3, 所以适合选用基于线性的 RDA^[26]. 上述统计分析均在 CANOCO 4.5 版本中进行.

2 结果与讨论

2.1 CDOM 的荧光组分特征

将长江口及邻近海域两个航次 CDOM 样品的三维荧光光谱做平行因子分析,鉴别出 4 种荧光组分 (图 2), 经过与已有研究的对比^[2,8,27~32], 其中 3 种为类腐殖质组分, 1 种为类蛋白质组分 (表 1), 分别命名为 C1、C2、C3 和 C4. C1 的最大激发和发射波长分别为 370 nm 和 495 nm, 它代表了具有最宽的激发带和发射带的荧光组分, 被认为结构中含有高分子量的芳香烃的陆源腐殖质组分^[27], Yamashita 等^[8] 认为它有可能在陆源颗粒有机物的生物地球化学循环过程中产生. Kowalczyk 等^[28] 研究表明 C2 属于海源类腐殖质组分, 并且可以由微生物产生, 也有研究者发现它是陆源类腐殖质组分^[29]. 最大激发和发射波长分别为 365 nm 和 440 nm 的组分 C3, 与 Coble^[2] 发现的类腐殖质荧光峰 C 类似, Yamashita 等^[8] 发现的陆源类腐殖质组分 C2 (345/433 nm) 与该研究中 C3 组分极为相似. C4 的最大激发和发射波长的位置分别为 295 nm 和 345 nm, 被认为是一种自生的类色氨酸荧光峰 T^[30], 有研究者在地下水 CDOM 组成中也发现了该组分^[31], 主要来源为人类活动、微生物产生及陆源输入^[32].

表 1 长江口及邻近海域 CDOM 荧光组分特征

Table 1 Fluorescent component characteristics of CDOM in Changjiang Estuary and neighboring sea area

荧光组分	$E_x/E_m/\text{nm}$	荧光组分类型	来源
C1	370/495	陆源类腐殖质	C2; 385/504 ^[27] C3; 390/479 ^[8]
C2	330/405	陆源类腐殖质	C3; 250(310)/400 ^[28] C2; 320/410 ^[29]
C3	365/440	陆源类腐殖质	Peak C; 350/420-480 ^[2] C2; 345/433 ^[8]
C4	295/345	类蛋白质	Peak T; 275/340 ^[31] C2; 230(280)/340 ^[32]

2.2 CDOM 分布特征及季节变化

2.2.1 长江口及邻近海域春季 CDOM 分布特征

4 种荧光组分在长江口及邻近海域的表层、中层和底层分布模式相似, 即由长江口向邻近海域逐渐递减, 且与总荧光强度 (total fluorescence intensity, TFI) 的分布相吻合, 同时与盐度呈相反数的分布趋势 (限于篇幅, 图 3 中仅给出各层 C1、C4、TFI 与盐度的分布), 表明该区域 CDOM 主要受陆源输入和人类活动的影响^[32]. 表层 3 种类腐殖质荧光组分最大值位于长江口沿岸区域, 这是由于黄浦

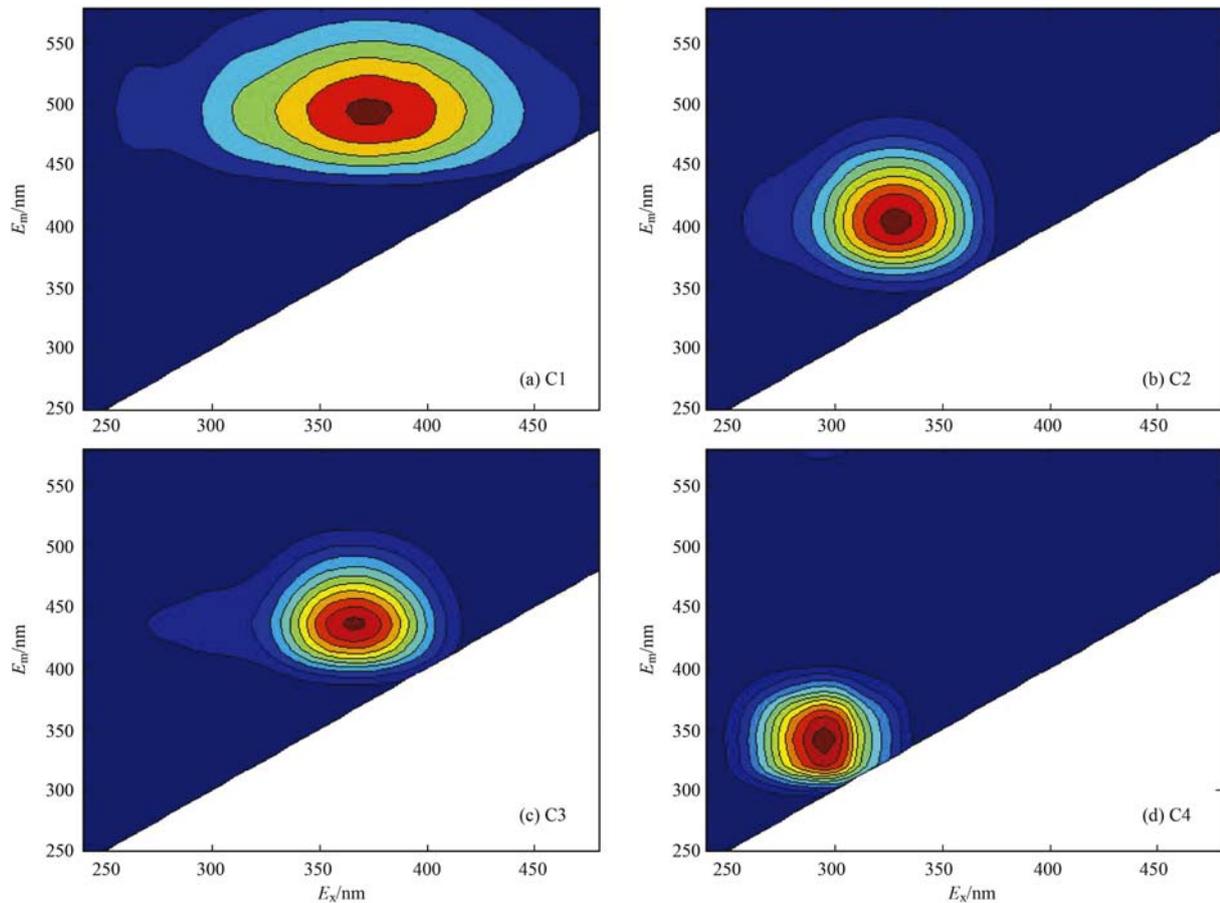


图2 PARAFAC 鉴别出长江口及邻近海域 CDOM 的 4 个荧光组分

Fig. 2 Four fluorescent components of CDOM in Changjiang Estuary identified by PARAFAC model

江及众多支流流经苏沪经济发达、人口密集地区, 将工业废水, 生活污水, 农田径流带入长江口, 类蛋白组分在表层分布的高值区位于长江口南槽区域^[17], 在此区域附近是居民居住区及农场, 所以人类活动是类蛋白质组分的主要来源. 在研究海区南部岱山县附近 4 种荧光组分均有一个较高值, 这是受岛上人类活动影响造成的, 同时杭州湾输出也产生部分影响. CDOM 在中层的分布与在表层分布相似, 但是表层的荧光值大于中层, 中层低盐度区范围明显缩小, 这表明中层受长江冲淡水输入影响减弱. 在底层, 4 种荧光组分的分布与表层、中层分布类似, 底层的荧光值大于中层, 说明了底层沉积物再悬浮产生了重要影响^[9].

2.2.2 长江口及邻近海域夏季 CDOM 分布特征

夏季 4 种荧光组分在表层、中层和底层分布模式相同, 与盐度的分布呈相反关系, 其中类蛋白质组分在南槽有一个明显的高值区, 表明该区域的 CDOM 主要由陆源输入和人类活动影响, 同时与总荧光强度的分布模式相吻合 (限于篇幅, 图 4 仅给出 4 种荧光组分、TFI 与盐度的表层分布), 即从长

江口向邻近海域逐渐减小. 在表层、中层和底层, 4 种荧光组分的荧光值近似相等, 说明长江冲淡水在此区域混合均匀. 与春季一样, 类蛋白质和 3 种类腐殖质荧光组分的高值区的位置分别位于南槽区域和长江口沿岸, 与附近城镇排放的生活污水, 工业废水等有关, 另外, 在研究区域西南岱山县附近也出现了荧光强度高值区, 主要受岛上的居民活动及杭州湾输出影响.

春季 4 种荧光组分在表层的分布明显比夏季向北扩展的范围大, 这主要与春夏季长江冲淡水走向变化、春季东南风盛行以及东海沿岸流有关. 由于夏季降水量充沛, 河流径流量大, 陆源输入强度大, 造成夏季表、中、底 3 层 4 种荧光组分的荧光值均比春季的高. 在中层, 夏季 C1、C2 和 C3 在长江口门附近的荧光强度分别比春季约增加了 40%、41% 和 36%. 夏季长江口沿岸底层的 3 种类腐殖质组分的荧光值比春季约增加 28% ~ 31%, 而在南槽区域, 底层类蛋白质组分的荧光值比春季高 17%.

2.3 长江口及邻近海域 CDOM 的 HIX 和 BIX 分布

春季, 表层、中层和底层 CDOM 的 HIX 均呈现

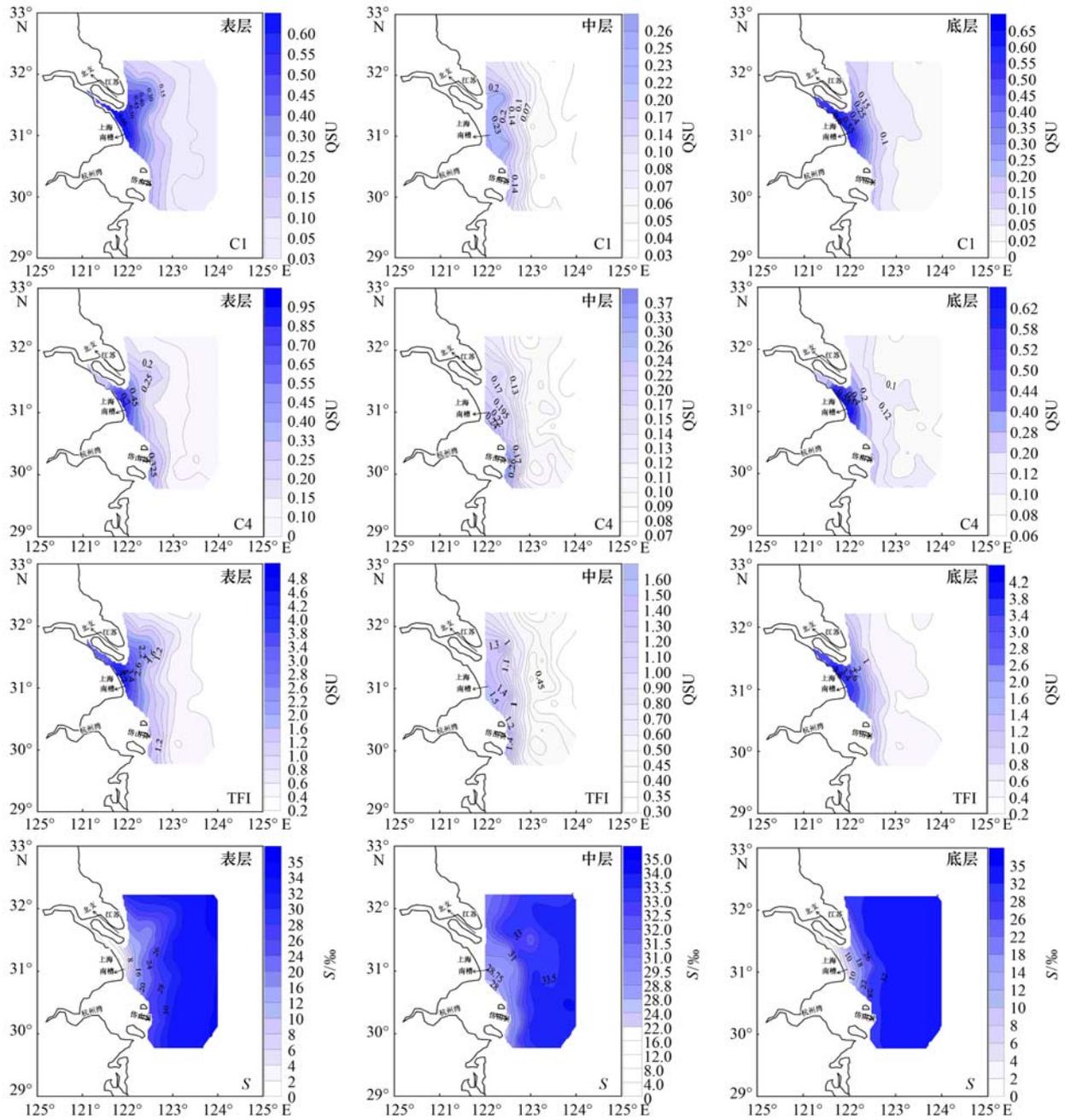


图3 春季长江口及邻近海域 CI、C4、TFI 与 S 的分布

Fig. 3 Distributions of component 1, component 4, total fluorescence intensity and Salinity in Changjiang Estuary and neighboring sea area in spring

长江口高, 邻近海域低的趋势, 与盐度的分布呈相反关系, 而 BIX 的分布趋势正好相反. 在表层, HIX 的高值区位于长江口内沿岸以及北支口外附近^[17], 而 BIX 在此区域有低值, 说明了 CDOM 的来源以陆源输入为主; 在底层 HIX 分布与表层相似, 高值区位于长江口沿岸及口门南部, 但 HIX 值低于表层, 表明底层受陆源输入的影响减小. BIX 在表层、中层和底层的分布相似, 在位于长江口门南槽区域有一个相对较高的值, 反映了该区域受人类活动(生活

污水、工业废水)的影响明显, 而在邻近海域 BIX 普遍较高, 生物活动是重要影响因素.

夏季, HIX 和 BIX 的分布模式与春季类似. HIX 的高值区位于长江口沿岸以及口门南部, 说明了这些区域主要以陆源输入为主, 底层的 HIX 值比中层高, 是由沉积物的再悬浮造成的. BIX 在表层、中层和底层的值依次降低, 其在底层的高值区与 AOU 分布的高值区相似, 而在中层其高值区与 Chl-a 的高值区相似, 表明浮游植物初级生产以及微生物活动

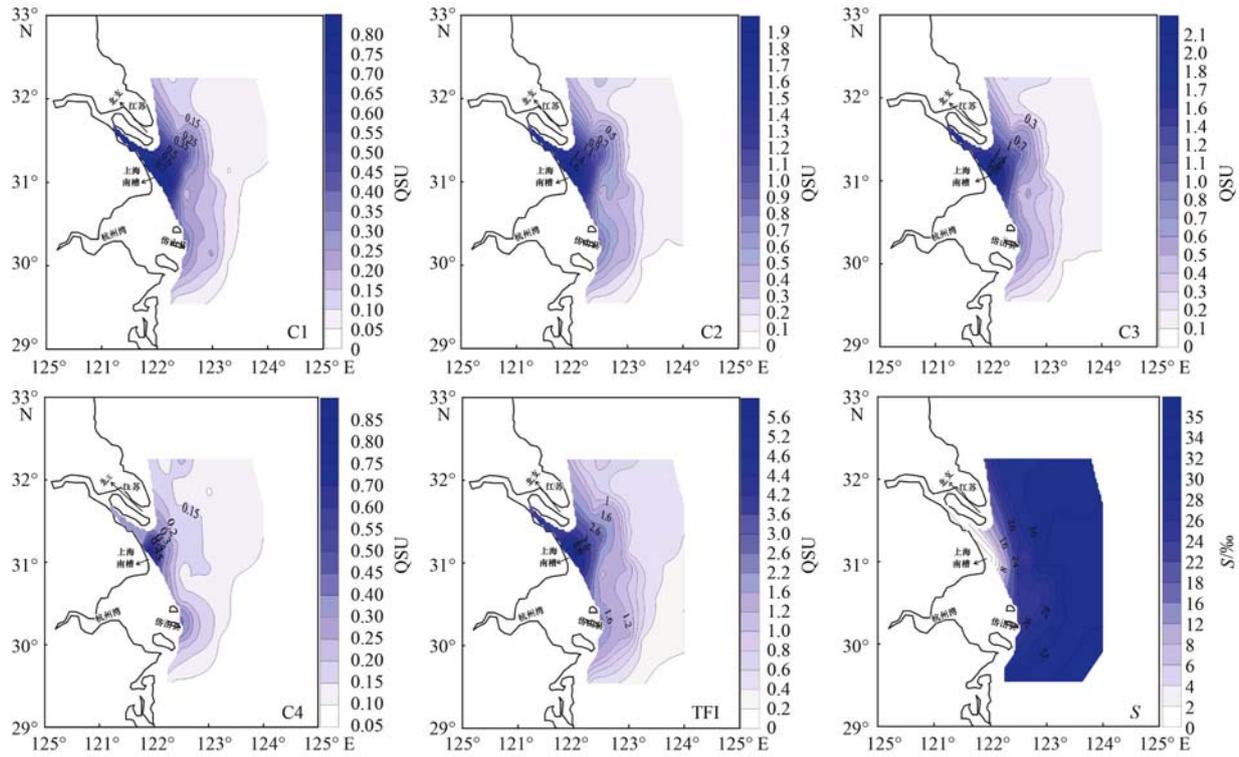


图 4 夏季长江口及邻近海域 4 个荧光组分、TFI 与 S 的表层分布

Fig. 4 Surfer distributions of four fluorescent components, total fluorescence intensity and Salinity in Changjiang Estuary and neighboring sea area in summer

对 CDOM 有一定的贡献。另外, BIX 在长江口南槽区域有一个较高值, 主要受人类活动的影响。

春季表层和底层 HIX 的分布范围与春季各层 4 种荧光组分的分布范围相似, 均比夏季向北有所扩展; 而底层春季 HIX 的高值区分布范围与夏季相似, 夏季 HIX 值比春季高约 16%。春季与夏季 HIX

值均偏高, 表明该区域 CDOM 主要受陆源影响, 腐殖化程度高, 在环境中存在的时间长。春夏季各层 BIX 的分布相似, 夏季表层、中层和底层的 BIX 值分别比春季的高约 23%、14% 和 7% (表 2), 这是由于夏季温度适宜, 浮游生物大量产生所致。Sun 等^[33]在长江口及邻近海域也有类似的研究结果。

表 2 长江口及邻近海域 CDOM 的 HIX 和 BIX 范围

Table 2 Ranges of HIX and BIX in Changjiang Estuary and neighboring sea area

项目	春季		夏季	
	HIX	BIX	HIX	BIX
表层	0.980 ~ 7.539	0.771 ~ 1.200	0.850 ~ 7.425	0.616 ~ 1.556
中层	1.010 ~ 5.643	0.861 ~ 1.151	1.068 ~ 6.171	0.626 ~ 1.264
底层	0.903 ~ 6.880	0.761 ~ 1.163	1.104 ~ 7.874	0.614 ~ 1.124

2.4 RDA 排序结果

分别对春夏季长江口及邻近海域的表层、中层和底层的 4 种荧光组分与 a_{355} 进行 DCA 分析^[26], 结果表明, 各层的排序轴最大梯度长度均小于 3, 所以选择了基于线性模型的 RDA。由于表层的 DO 易受海气交换的影响, 所以 DO 在表层的分析中暂不考虑。Monte Carlo 置换检验排序轴均达到显著水平 ($P < 0.05$), 说明排序效果理想。将春夏季表、中、底这 3 层的 CDOM (4 种荧光组分 C1 ~ C4、 a_{355}) 和

变量 (S、DO、DOC、TN、TP、Chl-a) 的排序结果用排序图表示, 能够直观地显示它们之间的关系, 变量箭头之间的夹角表示他们之间的相关性, 夹角越小, 相关性越大。一个变量的箭头与某个荧光组分的箭头方向相同, 表明该荧光组分与该变量的正的相关性很强, 同时变量箭头的长短反映其对荧光组分影响的程度大小^[34]。

从春季 CDOM 荧光组分、 a_{355} 与各变量的 RDA 图 (图 5) 可以看出, 各荧光组分及 a_{355} 的箭头之间的

夹角很小,表明它们之间的相关性很强. 在表、中、底这3层,各荧光组分及 a_{355} 与盐度箭头方向相反且二者箭头均较长,表明陆源输入是 CDOM 的主要来源;TN、TP的箭头长度较长,其方向与4个荧光组分的方向相同,表明 TN、TP 陆源输入的重要性; DOC 箭头长度较短,且与 a_{355} 的箭头之间的夹角均较大,相关性较差,说明了 DOC 海源影响的重要性^[35,36];

Chl-a箭头与各荧光组分箭头之间的夹角较大,箭头长度小于 S,且表层 Chl-a 箭头的相对长度大于中、底层,表明4种荧光组分也与浮游植物的初级生产有关,且表层浮游植物对 CDOM 的影响大于中底层. 在中层和底层,DO 箭头与 CDOM 荧光组分箭头之间的夹角大于 Chl-a 与各荧光组分之间的夹角,说明了微生物活动对4种荧光组分的影响较小.

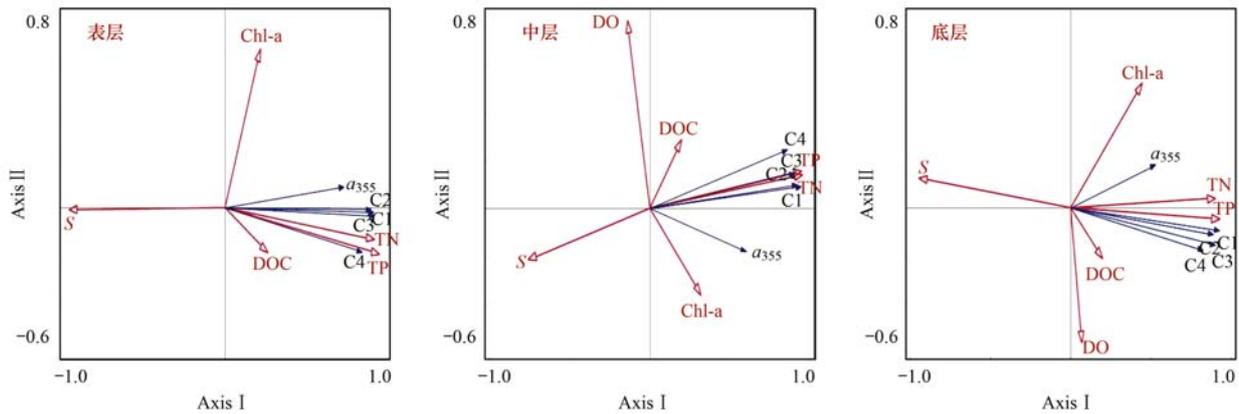


图5 春季长江口4个荧光组分、 a_{355} 与环境因子 RDA 排序

Fig. 5 RDA ordination diagram of four fluorescent components, a_{355} and environmental factors in Changjiang Estuary in spring

夏季表、中、底这3层 RDA 图(图6)显示各层的 CDOM 荧光组分箭头之间夹角较小,说明相关性很强. 在各层 Chl-a 与各荧光组分之间的关系与春季相似,夏季表层 Chl-a 对各荧光组分影响程度大于中底层. DO 在中层与各荧光组分的夹角小于底层,表明中层的微生物活动与荧光组分的相关性大于底层,中层 DO 箭头的相对长度小于底层,说明了底层影响程度较大. 在表层、中层和底层,TN 与 TP 的箭头方向和各荧光组分箭头的方向相同,其与 CDOM 的同源性. DOC 箭头在各层与 a_{355} 箭头之间的夹角皆较大,相关性较弱说明

DOC 除受陆源影响外,海源因素的影响也较为显著^[35,36].

夏季表层 Chl-a 的箭头相对长度明显长于春季,说明夏季表层浮游植物的初级生产对 CDOM 的影响程度大;春季中层 DO 箭头的相对长度强于夏季中层,说明春季中层生物活动对 CDOM 的影响程度大,底层 DO 恰好相反说明春季底层 DO 对 CDOM 的影响程度小于夏季底层. 春季 DO 在中层和底层与各荧光组分之间的夹角大于夏季与各荧光组分的夹角,反映了夏季微生物活动与 CDOM 的相关性强于春季.

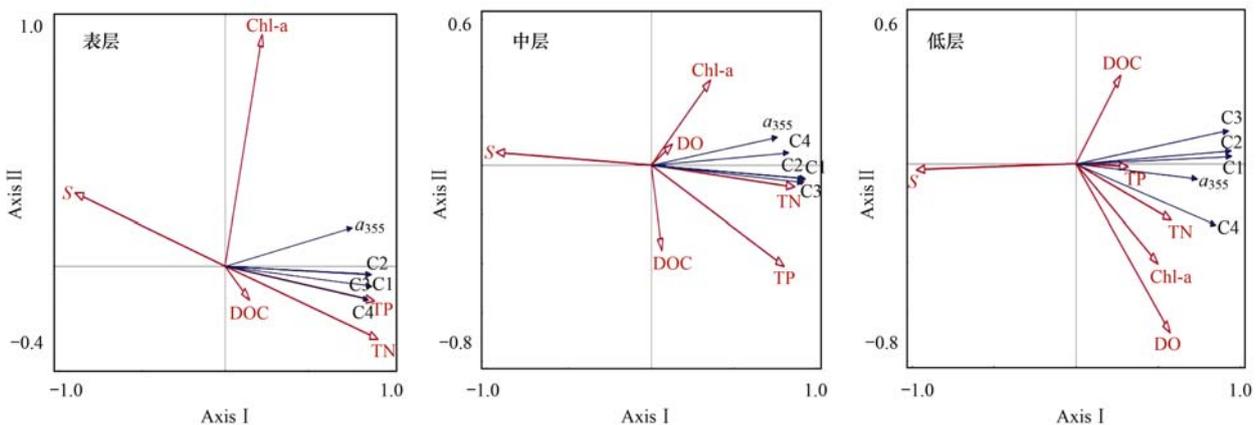


图6 夏季长江口4个荧光组分、 a_{355} 与环境因子 RDA 排序

Fig. 6 RDA ordination diagram of four fluorescent components, a_{355} and environmental factors in Changjiang Estuary in summer

3 结论

利用 EEMs-PARAFAC 分析法解析出 2015 年春季和夏季长江口及邻近海域共有 4 个荧光组分: 3 个类腐殖质组分 (C1、C2、C3) 和 1 个类蛋白质组分 (C4)。春夏两季各层的 4 种荧光组分的水平分布与总荧光强度分布相吻合, 呈现由长江口向邻近海域逐渐减小的趋势。春季各层 CDOM 高值区主要分布在长江口内及口门附近海域, 分析表明春季表层 CDOM 主要由陆源输入、人类活动产生, 中层受其影响减弱, 而底层除了陆源输入影响还与底层沉积物再悬浮有关。夏季各层混合较均匀, 高值区的分布与春季相似, 分析表明该区域主要受陆源输入、人类活动的影响。RDA 的结果表明春夏季各层的荧光组分主要来源于陆源输入, 部分受微生物活动和底层沉积物再悬浮的影响, 而 TN、TP 主要受陆源影响, DOC 则受陆源与海源的共同影响。

参考文献:

- [1] Blough N V, Del Vecchio R. Chromophoric DOM in the coastal environment [A]. In: Hansell D A, Carlson C A. (Eds.). Biogeochemistry of Marine Dissolved Organic Matter [M]. Cambridge: Academic Press, 2002; 509-546.
- [2] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, **51**(4): 325-346.
- [3] Bai Y, Su R G, Shi X Y. Assessing the dynamics of chromophoric dissolved organic matter in the southern Yellow Sea by excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. Continental Shelf Research, 2014, **88**: 103-116.
- [4] Tang W W, Zeng G M, Gong J L, *et al.* Impact of humic/fulvic acid on the removal of heavy metals from aqueous solutions using nanomaterials: a review [J]. Science of the Total Environment, 2014, **468-469**: 1014-1027.
- [5] 陈蕾, 沈超峰, 王郑, 等. 天然有机质对环境污染物的转化过程的介导作用 [J]. 生态环境学报, 2013, **22**(7): 1244-1249.
- Chen L, Shen C F, Wang Z, *et al.* Transformation of environmental pollutants mediated by natural organic matter [J]. Ecology and Environment Sciences, 2013, **22**(7): 1244-1249.
- [6] Kowalczyk P, Durako M J, Young H, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: interannual variability [J]. Marine Chemistry, 2009, **113**(3-4): 182-196.
- [7] Mei Z P, Saucier F J, Le Fouest V, *et al.* Modeling the timing of spring phytoplankton bloom and biological production of the Gulf of St. Lawrence (Canada): effects of colored dissolved organic matter and temperature [J]. Continental Shelf Research, 2010, **30**(19): 2027-2042.
- [8] Yamashita Y, Jaffé R, Maie N, *et al.* Assessing the dynamics of dissolved organic matter (DOM) in coastal environments by excitation emission matrix fluorescence and parallel factor analysis (EEM-PARAFAC) [J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53**(5): 1900-1908.
- [9] Guo W D, Yang L Y, Zhai W D, *et al.* Runoff-mediated seasonal oscillation in the dynamics of dissolved organic matter in different branches of a large bifurcated estuary—the Changjiang estuary [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, **119**(5): 776-793.
- [10] Zhang Y L, Liu X H, Wang M Z, *et al.* Compositional differences of chromophoric dissolved organic matter derived from phytoplankton and macrophytes [J]. Organic Geochemistry, 2013, **55**: 26-37.
- [11] Murphy K R, Stedmon C A, Graeber D, *et al.* Fluorescence spectroscopy and multi-way techniques. PARAFAC [J]. Analytical Methods, 2013, **5**(23): 6557-6566.
- [12] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, **82**(3-4): 239-254.
- [13] Stedmon C A, Bro R. Characterizing dissolved organic matter fluorescence with parallel factor analysis: a tutorial [J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2008, **6**(11): 572-579.
- [14] 何小松, 张慧, 黄彩红, 等. 地下水中溶解性有机物的垂直分布特征及成因 [J]. 环境科学, 2016, **37**(10): 3813-3820.
- He X S, Zhang H, Huang C H, *et al.* Vertical distribution characteristics of dissolved organic matter in groundwater and its cause [J]. Environmental Science, 2016, **37**(10): 3813-3820.
- [15] Borcard D, Legendre P, Drapeau P. Partialling out the spatial component of ecological variation [J]. Ecology, 1992, **73**(3): 1045-1055.
- [16] 林晶. 长江口及其毗邻海区溶解有机碳和颗粒有机碳的分布 [D]. 上海: 华东师范大学, 2007. 27-32.
- [17] 朱伟健, 沈芳, 洪官林. 长江口及邻近海域有色溶解有机物 (CDOM) 的光学特性 [J]. 环境科学, 2010, **31**(10): 2292-2298.
- Zhu W J, Shen F, Hong G L. Optical characteristics of colored dissolved organic material (CDOM) in Yangtze estuary [J]. Environmental Science, 2010, **31**(10): 2292-2298.
- [18] 郑晓琴, 丁平兴, 胡克林. 长江口及邻近海域夏季温盐分布特征数值分析 [J]. 华东师范大学学报 (自然科学版), 2008, (6): 14-23.
- Zheng X Q, Ding P X, Hu K L. Numerical analysis of characteristics of temperature-salinity distributions at the Changjiang Estuary and its adjacent areas in summer [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2008, (6): 14-23.
- [19] Wada S, Aoki M N, Tsuchiya Y, *et al.* Quantitative and qualitative analyses of dissolved organic matter released from *Ecklonia cava* Kjellman, in Oura Bay, Shimoda, Izu Peninsula, Japan [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2007, **349**(2): 344-358.
- [20] Ohno T. Fluorescence inner-filtering correction for determining the humification index of dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2002, **36**(4): 742-746.
- [21] 肖隆庚, 陈文松, 陈国丰, 等. 中国南海 CDOM 三维荧光光谱特征研究 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(1): 160-167.
- Xiao L G, Chen W S, Chen G F, *et al.* Fluorescence excitation-

- emission matrix spectroscopy of chromophoric dissolved organic matter in the South China Sea [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(1): 160-167.
- [22] Salve P R, Lohkare H, Gobre T, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in rainwater using fluorescence spectrophotometry [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2012, **88**(2): 215-218.
- [23] 周倩倩, 苏荣国, 白莹, 等. 舟山渔场有色溶解有机物 (CDOM) 的三维荧光-平行因子分析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 163-171.
- Zhou Q Q, Su R G, Bai Y, *et al.* Characterization of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Zhoushan Fishery using excitation-emission matrix spectroscopy (EEMs) and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 163-171.
- [24] Jeffrey S W, Humphrey G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae, and natural phytoplankton[J]. *Biochemie and Physiologie der Pflanzen*, 1975, **167**: 191-194.
- [25] Zepp R G, Sheldon W M, Moran M A. Dissolved organic fluorophores in southeastern US coastal waters: correction method for eliminating Rayleigh and Raman scattering peaks in excitation-emission matrices[J]. *Marine Chemistry*, 2004, **89**(1-4): 15-36.
- [26] Šmilauer P, Lepš J. *Multivariate analysis of ecological data using CANOCO5* (2nd ed.) [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 1-269.
- [27] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. *Limnology and Oceanography*, 2005, **50**(2): 686-697.
- [28] Kowalczyk P, Cooper W J, Durako M J, *et al.* Characterization of dissolved organic matter fluorescence in the South Atlantic Bight with use of PARAFAC model: relationships between fluorescence and its components, absorption coefficients and organic carbon concentrations[J]. *Marine Chemistry*, 2010, **118**(1-2): 22-36.
- [29] Guéguen C, Granskog M A, McCullough G, *et al.* Characterisation of colored dissolved organic matter in Hudson Bay and Hudson Strait using parallel factor analysis[J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, **88**(3): 423-433.
- [30] Coble P G, Del Castillo C E, Avril B. Distribution and optical properties of CDOM in the Arabian Sea during the 1995 Southwest Monsoon[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 1998, **45**(10-11): 2195-2223.
- [31] 何小松, 席北斗, 张鹏, 等. 地下水中溶解性有机物的季节变化特征及成因[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(3): 862-870.
- He X S, Xi B D, Zhang P, *et al.* The seasonal distribution characteristics and its reasons of dissolved organic matter in groundwater[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(3): 862-870.
- [32] Wang Y, Zhang D, Shen Z Y, *et al.* Characterization and spacial distribution variability of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yangtze Estuary [J]. *Chemosphere*, 2014, **95**: 353-362.
- [33] Sun Q Y, Wang C, Wang P F, *et al.* Absorption and fluorescence characteristics of chromophoric dissolved organic matter in the Yangtze Estuary[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(5): 3460-3473.
- [34] 于文婧, 孙丹峰, 曲葳. 基于冗余分析的宁夏平罗耕地土壤盐渍化特征研究[J]. *中国农业大学学报*, 2015, **20**(5): 103-110.
- Yu W J, Sun D F, Qu W. Study of the characteristics of soil salinization based on redundancy analysis in Pingluo, Ningxia [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, **20**(5): 103-110.
- [35] Astoreca R, Rousseau V, Lancelot C. Coloured dissolved organic matter (CDOM) in Southern North Sea waters: optical characterization and possible origin[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2009, **85**(4): 633-640.
- [36] 陈欣, 张霄宇, 雷惠. 长江口 CDOM 的光谱吸收特征以及 DOC 物源示踪意义[J]. *海洋环境科学*, 2012, **31**(5): 625-630.
- Chen X, Zhang X Y, Lei H. Optical absorption properties of CDOM and tracing implication of DOC in the Changjiang estuary [J]. *Marine Environmental Science*, 2012, **31**(5): 625-630.

CONTENTS

Estimating the Secondary Organic Aerosol Concentration and Source Apportionment During the Summer and Winter in the Nanjing Industrial District	LIU Jing-da, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1733)
Modeled Deposition of Fine Particles in Human Airway in Northern Suburb of Nanjing	LIANG Jing-shu, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (1743)
Concentration Characteristics and Influencing Factors of Atmospheric Particulate Matters in Spring on Weizhou Island, Beihai, Guangxi Province	GAO Yuan-guan, ZHANG Kai, WANG Ti-jian, <i>et al.</i> (1753)
Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Dajiuhe, Shennongjia, China	JIN Meng-yun, XING Xin-li, KE Yan-ping, <i>et al.</i> (1760)
Spatial Distribution Characteristics of NMHCs in Spring in Cangzhou City	DUAN Jing-chun, ZHOU Xue-ming, ZHANG He-feng, <i>et al.</i> (1769)
Emission Characteristics of Residential Coal Combustion Flue Gas in Beijing	LIANG Yun-ping, ZHANG Da-wei, LIN An-guo, <i>et al.</i> (1775)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs from a Municipal Solid Waste Composting Plant	SHAO Zhu-ze, ZHENG Guo-di, WANG Yuan-gang, <i>et al.</i> (1783)
Degradation Characteristics of Composite CVOCs by Non-thermal Plasma	JIANG Li-ying, ZHANG Di, GUO Hai-qian, <i>et al.</i> (1792)
Chemical Compositions and Source Apportionment of Road Dust in Yuncheng	WU Yuan-yuan, LI Ru-mei, PENG Lin, <i>et al.</i> (1799)
Pollution Risk of Heavy Metals in Dust from the Building Along Elevated Road; A Case Study in Changzhou	YAO Jing-bo, WANG Ming-xin, QI Jin-di, <i>et al.</i> (1807)
Characteristics of Stable Isotope in Precipitation and Its Relationship with ENSO in Shanghai	DONG Xiao-fang, DENG Huang-yue, ZHANG Luan, <i>et al.</i> (1817)
Effects of DOC + CDPF on Emission Characteristics of Heavy-duty Diesel Vehicle	ZHANG Yun-hua, LOU Di-ming, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (1828)
Accumulated Health Risk Assessment of Arsenic in Drinking Water of Major Cities of China	ZHANG Qiu-qiu, PAN Shen-ling, LIU Wei, <i>et al.</i> (1835)
Health Risk Assessment of Microcystins from Drinking Water Source by Monte Carlo Simulation Method	WANG Yang, XU Ming-fang, GENG Meng-meng, <i>et al.</i> (1842)
Potential Risk and Distribution Characteristics of PPCPs in Surface Water and Sediment from Rivers and Lakes in Beijing, China	ZHANG Pan-wei, ZHOU Huai-dong, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (1852)
Assessment of the Spatial-temporal Distribution Characteristics and Main Affecting Factors of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Spring and Summer at the Changjiang Estuary and Adjacent Areas	SUN Yu-yan, BAI Ying, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (1863)
Complexation Between Copper(II) and Colored Dissolved Organic Matter from Municipal Solid Waste Landfill	XIAO Xiao, HE Xiao-song, GAO Ru-tai, <i>et al.</i> (1873)
Effects of Three Bioretention Configurations on Dissolved Nitrogen Removal from Urban Stormwater	LI Li-qing, HU Nan, LIU Yu-qing, <i>et al.</i> (1881)
Influence of Spatial Pattern of Paddy Field on the Losses of Nitrogen and Phosphorus in Three Gorges Reservoir Area	CHEN Cheng-long, GAO Ming, NI Jiu-pai, <i>et al.</i> (1889)
Effects of NO ₃ ⁻ -N Loading on the Early-Period Efficiency of Denitrification and Carbon Releasing in Constructed Wetland Filled with Bark	JIANG Ying-be, LI Yao, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (1898)
Effects of Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland with Different Support Matrix and Cathode Areas on the Degradation of Azo Dye and Electricity Production	LI Xue-xiao, CHENG Si-chao, FANG Zhou, <i>et al.</i> (1904)
Effects of Anode Materials on Electricity Generation and Organic Wastewater Treatment of 6 L Microbial Fuel Cells	DING Wei-jun, YU Li-liang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1911)
Effects of Joint-reaction Combined by Ozonation and Coagulation on Aquatic Organic Matters	LIU Hai-long, FU Jing-miao, GUO Xue-feng, <i>et al.</i> (1918)
Disinfection Action of Ultraviolet Radiation and Chlorination on <i>Escherichia coli</i> and Poliovirus	XU Li-mei, ZHANG Chong-miao, WANG Xiao-chang, <i>et al.</i> (1928)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solution on Hydrous Zirconium Oxides Precipitated at Different pH Values	WANG Xing-xing, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (1936)
Performance of Polymer-based Titanium and Zirconium Oxides Composite Adsorbent for Simultaneous Removal of Phosphorus and Fluorine from Water	CHEN Jia-kai, NIE Guang-ze, LIU Zhi-ying, <i>et al.</i> (1947)
Effect of Different Adding Means of Ignited Water Purification Sludge on Phosphorus Adsorption and Forms	ZHU Pei-ying, LI Da-peng, YU Sheng-nan (1957)
Law of Pollutant Erosion and Deposition in Urban Sewage Network	SANG Lang-tao, SHI Xuan, ZHANG Tong, <i>et al.</i> (1965)
Fate of Eleven Phthalic Acid Esters in Aerobic Sewage Treatment System	ZHOU Lin-jun, GU Wen, LIU Ji-ning, <i>et al.</i> (1972)
Characteristics of Denitrification Inhibiting Sulfate Reducing Process	JIN Peng-kang, YANG Zhen-rui, LI Rong, <i>et al.</i> (1982)
Enhanced Short-cut Denitrification by Fe ⁽⁰⁾ -activated Carbon and Its Influencing Factors	LÜ Yong-tao, LIU Ting, ZENG Yu-lian, <i>et al.</i> (1991)
Comparison of Operating Performance of Partial Nitritation Systems with Two Different Inhibition Strategies	LI Hui-juan, PENG Dang-cong, CHEN Guo-yan, <i>et al.</i> (1997)
Effect of Substrate Ratio on Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX in ABR	LÜ Gang, XU Le-zhong, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i> (2006)
Effects of Temperature on the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Removal and Microbial Community in SCSC-S/Fe	FAN Jun-hui, HAO Rui-xia, ZHU Xiao-xia, <i>et al.</i> (2012)
Analysis on Performance and Microbial Community Dynamics of a Strengthened Circulation Anaerobic Reactor Treating Municipal Wastewater	YANG Bo, XU Hui, FENG Xiu-ping, <i>et al.</i> (2021)
Aerobic Degradation Characteristics of the Quinoline-Degrading strain <i>Ochrobactrum</i> sp. and Its Bioaugmentation in Coking Wastewater	XU Wei-chao, WU Cui-ping, ZHANG Yu-xiu, <i>et al.</i> (2030)
Manganese Oxidation Characteristics and Oxidation Mechanism of a Manganese-Oxidizing Bacterium <i>Arthrobacter</i> sp. HW-16	WAN Wen-jie, XUE Zhi-jun, ZHANG Ze-wen, <i>et al.</i> (2036)
Effect of Temperature on Nitrogen Removal Performance of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	ZHOU Tong, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2044)
Nitrogen Removal Performance and Microbial Community Analysis of Activated Sludge Immobilization	XU Xiao-yi, YOU Xiao-lu, LÜ Chen-pei, <i>et al.</i> (2052)
Microbial Structure of an Enhanced Two-phase High-solid Anaerobic Digestion System Treating Sludge	CAO Zhi-ping, WU Jing, ZUO Jian-e, <i>et al.</i> (2059)
Comparative Studies on Soil Actinobacterial Biodiversity After Re-vegetation in the Urban and Rural Hydro-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir Region	QIN Hong, REN Qing-shui, YANG Wen-hang, <i>et al.</i> (2065)
Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors from an Agricultural Headwater Ditch During a Maize Season in the Hilly Area of Central Sichuan Basin	TIAN Lin-lin, ZHU Bo, WANG Tao, <i>et al.</i> (2074)
Effect of Dicyandiamide on N ₂ O Emission in Fallow Paddy Field and Rape Cropping	WU Yan-zheng, ZHANG Miao-miao, QIN Hong-ling, <i>et al.</i> (2084)
Characteristics of Biochar-mediated N ₂ O Emissions from Soils of Different Surface Conditions	ZOU Juan, HU Xue-yu, ZHANG Yang-yang, <i>et al.</i> (2093)
Characteristics of Soil Respiration and Soil Organic Carbon in Fava Bean Farmland Under Ridge Tillage and Straw Mulching in Southwest China	XIONG Ying, WANG Long-chang, DU Juan, <i>et al.</i> (2102)
Prediction of Distribution of Soil Cd Concentrations in Guangdong Province, China	SUN Hui, GUO Zhi-xing, GUO Ying, <i>et al.</i> (2111)
Spatial Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Suya Lake	ZHANG Peng-yan, KANG Guo-hua, PANG Bo, <i>et al.</i> (2125)
Effects of the Active Components of Humic Acids and Their Proportions on the Dynamics of Lead Transformation and Availability in Purple Alluvial Soil	WANG Qing-qing, JIANG Zhen-mao, WANG Jun, <i>et al.</i> (2136)
Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Particulate Organic Matter of Purple Paddy Soil	LI Qiu-yan, ZHAO Xiu-lan (2146)
Enhanced Sorption of Cetrizine to Loessial Soil Amended with Biochar	WU Zhi-juan, BI Er-ping (2154)
Characteristics and Mechanism of Copper Adsorption from Aqueous Solutions on Biochar Produced from Sawdust and Apple Branch	WANG Tong-tong, MA Jiang-bo, QU Dong, <i>et al.</i> (2161)
Adsorption of Pb ²⁺ and Cd ²⁺ from Aqueous Solution Using Vermicompost Derived from Cow Manure and Its Biochar	DU Wen-hui, ZHU Wei-qin, PAN Xiao-hui, <i>et al.</i> (2172)
Performance and Mechanism Study of Visible Light-driven C ₃ N ₄ /BiOBr Composite Photocatalyst	BAO Yue, ZHOU Min-yun, ZOU Jun-hua, <i>et al.</i> (2182)