

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 黄成, 安静宇, 鲁君 (3965)

基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 李荔, 张洁, 赵秋月, 李慧鹏, 韩军赞 (3976)

上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 杨静, 陈龙, 刘敏, 孟祥周, 张希 (3987)

广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 孙西勃, 廖程浩, 曾武涛, 张永波, 梁小明, 叶代启 (3995)

重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 李彦沛, 郝庆菊, 温天雪, 吉东生, 刘子锐, 王跃思, 江长胜 (4002)

济南市夏、冬季 PM_{2.5} 中化学组分的季节变化特征及来源解析 刘晓迪, 孟静静, 侯战方, 李静, 邢继钊, 魏本杰, 张二勋, 刘加珍, 董杰 (4014)

聊城冬季一重污染过程 PM_{2.5} 污染特征及成因分析 张敬巧, 吴亚君, 张萌, 王涵, 陈振兴, 胡君, 李慧, 范晓龙, 柴发合, 王淑兰 (4026)

夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 王楠, 马森, 石金辉, 高会旺, 姚小红 (4034)

晋城市冬季环境中挥发性有机物的污染特征及来源解析 杨帆, 闫雨龙, 戈云飞, 李如梅, 李颖慧, 余化龙, 彭林 (4042)

北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 熊秋林, 赵文吉, 李大军, 周涛 (4051)

合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 孟凡昊, 秦敏, 梁帅西, 谢品华, 夏晖晖, 段俊, 方武, 唐科, 李昂, 魏楨, 王凤 (4060)

填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 李昊, 刘彦君, 陈坦, 闫秋鹤, 代辉祥, 王洪涛, 陆文静 (4070)

北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 李贝贝, 韩凯丽, 秦建平, 王鑫, 宋博, 黄玉虎, 张春来 (4078)

基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 高翔, 左锐, 郭学茹, 孟利, 刘鑫, 王朕, 滕彦国, 王金生 (4086)

透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 官曼莉, 左俊杰, 任心欣, 赵洪涛, 罗茜, 廖云杰, 李叙勇 (4096)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸 (4105)

黄河干流宁夏段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 席玥, 王婷, 倪晋仁, 韩鹏, 仪马兰, 郑彤, 蒋咏, 马若琦, 崔锋 (4114)

伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 李柳阳, 邵田田, 张鑫, 宋炎炎, 苏东辉, 王涛 (4122)

马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 王雨山, 韩双宝, 邓启军, 祁晓凡 (4132)

柳江盆地浅层地下水硝态氮水特征和成因分析 徐进, 何江涛, 彭颖, 曾颖 (4142)

地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 张雯, 尹琳, 周念清 (4150)

三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 张志永, 万成炎, 胡红青, 彭建华, 侯娟, 丁庆秋, 袁玉洁 (4161)

蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 刘心愿, 宋林旭, 纪道斌, 刘德富, 李欣, 黄佳维, 赵冲, 唐咏春, 平明明 (4169)

铅改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 何思琪, 张薇, 林建伟, 詹艳慧, 李娟英, 邢云青, 高春梅, 黄宏, 梁舒静 (4179)

洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 李影, 刘宏斌, 雷秋良, 胡万里, 王洪媛, 翟丽梅, 任天志, 连慧妹 (4189)

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 聂家琴, 王东启, 陈杰, 李杨杰, 陈姝, 陈振楼 (4199)

东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 储瑜, 何肖微, 曾中, 赵大勇, 孙强, 曹萍, 吴庆龙 (4206)

处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 汪海波, 马丁, 岳正波, 陶巍, 陈天虎, 王进 (4215)

华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 胡亚茹, 姜蕾, 张天阳, 雷丹丹, 姜巍巍, 张东, 林匡飞, 崔长征 (4222)

制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 花莉, 李璐, 杨春燕 (4229)

人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 赵林丽, 邵学新, 吴明, 姜小三, 陆琳莹 (4236)

城市污水管网中不同生化作用的基质流向 姚翔译, 石炬, 桑浪涛, 金鹏康, 王晓昌 (4242)

微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 王旭东, 石彩霞, 廖正伟, 贺毓淑, 王磊 (4249)

UV 强化草酸络合 Fe³⁺ 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 韩东晖, 李瑛, 李开明, 应光国 (4257)

焦化废水 A/O² 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 吴海珍, 孙胜利, 刘国新, 韦景悦, 吴超飞, 韦朝海, 钟练文, 彭亚环 (4265)

长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 俞小军, 李杰, 周猛, 宋璐, 李维维, 王亚娥, 马娟, 吕慧 (4274)

NaCl 盐度对 A²/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 张兰河, 田蕊, 郭静波, 贾艳萍, 张海丰, 李正, 陈子成 (4281)

温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 陈方敏, 金润, 袁琨, 李祥, 黄勇, 顾澄伟 (4289)

游离氨 (FA) 对氨氧化菌 (AOB) 活性抑制动力学试验 孙洪伟, 于雪, 高宇学, 李维维, 祁国平, 许涓 (4294)

HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 安芳娇, 赵智超, 黄利, 黄剑明, 邵兆伟, 陈永志 (4302)

长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 李田, 魏凡凯, 汪裕昌, 沈耀良, 吴鹏, 宋吟玲 (4310)

广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 宋波, 张云霞, 庞瑞, 杨子杰, 宾娟, 周子阳, 陈同斌 (4317)

紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 罗梅, 田冬, 高明, 黄容 (4327)

秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 李娇, 田冬, 黄容, 徐国鑫, 黎嘉成, 高明, 王子芳 (4338)

低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 谢晓梅, 方至萍, 廖敏, 黄宇, 黄小辉 (4348)

臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 周慧敏, 李品, 高峰, 冯兆忠, 张殿波 (4359)

再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 韩洋, 李平, 齐学斌, 崔丙健, 常迪, 马欢欢 (4366)

黄淮海地区鸡粪有机重金属含量特征及环境风险 李发, 徐应明, 王林, 梁学峰, 孙约兵, 纪艺凝, 栾润宇 (4375)

村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 靳琪, 高红, 岳波, 黄启飞, 王瑜堂, 吴小丹, 於俊颖, 杨惠媛 (4385)

《环境科学》征订启事 (3986) 《环境科学》征稿简则 (4050) 信息 (4085, 4104, 4337)

黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析

赵夏婷, 李珊, 王兆炜, 谢晓芸*

(兰州大学资源环境学院, 兰州 730000)

摘要: 利用紫外-可见吸收光谱、激发发射矩阵荧光光谱(EEMs)并结合平行因子分析(PARAFAC), 分析黄河兰州段水体有色溶解有机质(CDOM)的组成、空间分布以及来源。结果表明, 黄河兰州段水体 CDOM 可能是由芳香性结构的小分子组成, 解析出的 4 个组分中, 类蛋白质(1 个组分)含量最多, 占总荧光强度的 51.06%, 类腐殖质(2 个组分)次之, 占 36.74%, 非类腐殖质(1 个组分)最少, 占 12.20%, 类蛋白质组分和类腐殖质组分来源不同。CDOM 属于“类蛋白质-类腐殖质”复合主导型, 以生物来源的类蛋白质为主。从上游到下游河段, CDOM 的空间分布格局大体有一个先降低再升高再降低的过程, 其趋势主要受到类蛋白质含量变化的影响。类蛋白质的含量受到了居民/商业污水排放、河岸及水上餐饮、娱乐设施、船舶运输以及少量工业企业废水排放等各种高强度人为活动干扰。黄河流经兰州市受到了一定的内源污染, 建议对黄河兰州段水体进行内源污染的控制。

关键词: 有色溶解性有机质; 平行因子分析; 黄河兰州段水体; 吸收特性; 荧光特性; 聚类分析

中图分类号: X131; X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)09-4105-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201711181

Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River

ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, XIE Xiao-yun*

(College of Earth and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in riverine systems can be affected by environmental conditions and land-use, and can thus provide important information regarding anthropogenic activities in surrounding landscapes. It can modify the optical properties of waters and affect the balance and availability of dissolved nutrients and metals in water bodies. However, the characteristics of CDOM in the Lanzhou reach of the Yellow River have not yet been reported. In this study, the optical properties of water samples collected at 32 locations during April 2017 across the Lanzhou reach of the Yellow River were examined using UV-VIS and excitation-emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC), to determine CDOM compositional changes, spatial distribution characteristics, and sources. Cluster analysis was used to categorize samples into groups of similar pollution levels within a study area. Results showed that CDOM was primarily comprised of low molecular weight organic substances with aromatic structure belonging to complex “protein-like-humic-like” substances, and dominated by protein-like substances (organism sources). Two humic-like components (C1, C4), one tryptophan-like component (C2), and one non-humic-like component (C3) were identified by PARAFAC. Tryptophan-like substances were predominant in the components of CDOM, accounting for 51.06% of average total fluorescence intensity. Humic-like materials and non-humic-like substances accounted for 36.74% and 12.20%, respectively. Weak correlations were observed between protein-like substances and humic-like substances, indicating different sources of these components. The distribution of total fluorescence intensity showed a distinct spatial pattern; trends in fluorescence intensity were weak-strong-weak along an upstream to downstream continuum, mainly affected by changes in the content of protein-like substances. The spatial variation of the CDOM in the Lanzhou reach of the Yellow River can therefore be assessed based on protein-like materials dynamics. Public spaces along rivers offer opportunities for community gatherings and recreational activities. However, high-intensity anthropogenic activities strongly influence CDOM concentration and composition in this area in different ways; sources include increased residential/commercial wastewater, catering, water recreation facilities pollution, shipping, and a small amount of industrial discharge. In addition, it was concluded that endogenetic pollution may become the main source of internal loading in the Lanzhou reach of the Yellow River, implying that stronger endogenetic pollution control is needed to alleviate CDOM pollution and improve water quality.

Key words: chromophoric dissolved organic matter (CDOM); parallel factor analysis (PARAFAC); Lanzhou reach of Yellow River; absorption property; fluorescence property; cluster analysis (CA)

收稿日期: 2017-11-19; 修订日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(21307050); 中央高校基本科研业务费专项(lzujbky-2017-212)

作者简介: 赵夏婷(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境污染化学, E-mail: zhaoxt2016@lzu.edu.cn

* 通信作者, E-mail: xiexiaoyun@lzu.edu.cn

有色溶解性有机质 (chromophoric dissolved organic matter, CDOM) 为非均质混合有机物, 是溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 储库中可采用紫外-可见吸收光谱和荧光光谱检测的吸光有机质^[1,2]. 它的主要成分是类腐殖质和类蛋白质, 普遍存在于水生环境中^[3]. CDOM 既可来源于沿岸土壤有机质经地表径流和淋溶的外源输入, 又可来源于水生动植物、微生物或藻类等的新陈代谢及其残体降解的内源贡献, 同时又会受到工业废水、生活污水、农田污水以及水土流失等人为外源因素的影响^[4]. CDOM 在生物地球化学循环中起着重要作用, 其含有的多种功能基团可与水环境中的重金属和有机污染物等相互作用, 进而影响它们的迁移、转化和生物可利用性等^[5]. 此外, 在水文条件和污染程度不同的地区, CDOM 各组分荧光强度的变化还可用来监测水质状况^[6-8].

利用紫外-可见吸收光谱、三维荧光光谱 (EEMs) 结合平行因子分析 (parallel factor analysis, PARAFAC) 研究 CDOM 结构性质及溯源已不断应用于各类水体中^[6, 8-11]. 平行因子分析是已知最为有效的 CDOM 分析技术之一, 可有效解决三维荧光光谱中不能准确识别叠加荧光峰的难题^[12]. 利用平行因子分析对 CDOM 的 EEMs 进行解谱, 可将 CDOM 的各荧光组分较好地“分离”, 进而对不同组

分进行有效的定性分析与定量分析^[13].

城市河流作为地表水重要组成部分, 是珍贵的水资源. 但城市的迅速发展却导致大量各种来源的污染物排放到城市水体中, 包括污水排放、工业排放、汽车、废弃物和被污染的城市景观中的雨水径流等^[8], 因此研究城市河流中 CDOM 的组成、来源以及分布对城市水体保护与治理以及生态修复具有重要意义. 目前针对城市河流中 DOM (CDOM) 的研究相对较少, 如 Huang 等^[14] 对美国波士顿西南部的典型城市 Neponset 河流的 CDOM 进行研究, 发现 CDOM 的变化则取决于土地利用类型、污水排放/降水以及温度等; 邵田田等^[15] 研究辽河下游水体 CDOM 荧光特性发现其表现出较强的类蛋白质荧光, 有明显的季节性变化; 虞敏达等^[16] 研究了典型城市纳污河流 (河北洮河) 水体, 发现 CDOM 主要为新近微生物来源产生, 受人类活动影响较大; Zhao 等^[8] 对中国北部与东北部地区城市水体中 CDOM 进行表征, 发现解析出的 3 种荧光组分会随着空间地域及污染程度变化.

黄河兰州段是兰州市居民生活和工业用水的唯一地表水源, 全长 152 km, 由西向东呈 S 型横穿兰州市, 经新城桥进入, 后经包兰桥流出兰州, 对兰州市社会与经济发展有着极其重要的意义. 然而, 针对黄河兰州段水体 CDOM 的情况鲜有报道. 本研究利用紫外-可见光吸收光谱、三维荧光光谱结合

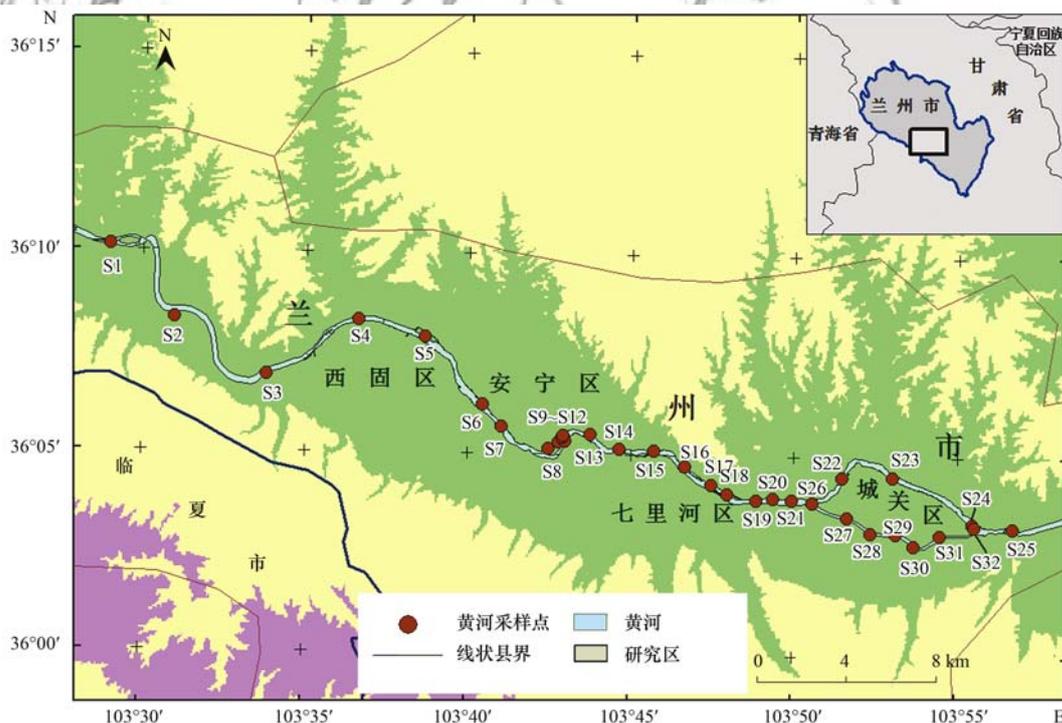


图1 黄河兰州段水体采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling sites along the Lanzhou reach of the Yellow River

平行因子分析,对黄河兰州段水体 CDOM 的组成、分布和来源等情况进行分析,以期进一步丰富城市水体 CDOM 的研究,并为分析黄河流域 DOM 地化特征提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与预处理

2017 年 4 月期间,用 GPS 定位系统对采样点精确定位,在黄河兰州段水体中共采集 32 个表层水样。采样点沿河段均匀布设,具体布设位置如图 1 所示。

将采集的水样黑暗保存,当天送回实验室并用 0.45 μm 玻璃纤维滤膜(标准号 Q/IEFJ01-1997,上海兴亚净化材料厂,置于马弗炉,450 $^{\circ}\text{C}$,5 h)过滤,后装入备好的 50 mL 棕色玻璃瓶(稀硝酸洗液浸泡 24 h,洗净后烘干,置于马弗炉,450 $^{\circ}\text{C}$,5 h)中,4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存。3d 内完成紫外-可见吸收光谱以及荧光光谱分析。

1.2 样品的测定

1.2.1 紫外-可见吸收光谱分析

紫外-可见吸收光谱的测定采用 Evolution 300 紫外可见分光光度计(Thermo Fisher Scientific,美国)。室温下在 1 cm 光程的石英比色皿中,以 Mill-Q 水作空白,扫描水样在 190~800 nm 处的吸光度。

通常将吸光度转化为吸收系数来表征 DOM 特性。转化公式见式(1)与(2)^[17]。

吸收系数的计算公式为:

$$a'_{\lambda} = \frac{2.303 \cdot D_{\lambda}}{r} \quad (1)$$

作散射效应校正的公式为:

$$a_{\lambda} = a'_{\lambda} - \frac{a_{700} \cdot \lambda}{700} \quad (2)$$

式中, a'_{λ} 为波长 λ 未校正的吸收系数, m^{-1} ; D_{λ} 为吸光度; r 为光程路径, m ; a_{λ} 为波长 λ 的吸收系数; λ 为波长, nm 。

光谱斜率比值 S_R 能够定性反映 DOM 地化特征,与 DOM 分子量呈负相关。其值越大,DOM 分子量越小,DOM 被光漂白及微生物降解的反应活性降低^[18]。

光谱斜率 S 的计算公式为:

$$a_{\lambda} = a_{\lambda_0} \cdot \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (3)$$

光谱斜率比值 S_R 的计算公式为:

$$S_R = \frac{S_{275-295}}{S_{350-400}} \quad (4)$$

式中, λ_0 是参照波长; S 为光谱斜率; $S_{275-295}$ 和 $S_{350-400}$ 分别为波长范围 275~295 nm 和 350~400 nm 的 S 值^[12]。

CDOM 相对浓度用吸收系数 $a(355)$ 表示^[19]。用吸收系数 $a(254)$ 表示具有不饱和碳-碳键芳香族化合物的浓度水平,这类化合物通常较难分解^[20]。

1.2.2 荧光光谱分析

荧光激发-发射光谱矩阵(EEMs)的测定采用 Cary Eclipse 型荧光光谱分析仪(美国 Agilent 公司)。基本参数如下:150-W 闪烁氙灯;PMT 电压:700 V;激发与发射的狭缝宽度都为 5 nm;响应时间:自动;扫描速度:1 200 $\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$;扫描光谱进行仪器自动校正。设置激发波长(excitation wavelength, E_x)为 200~450 nm,发射波长(emission wavelength, E_m)为 250~600 nm,用 1 cm 石英荧光样品池测定水样。采用 Mill-Q 水作空白,减少仪器条件和拉曼散射对荧光光谱的影响。

1.3 数据处理

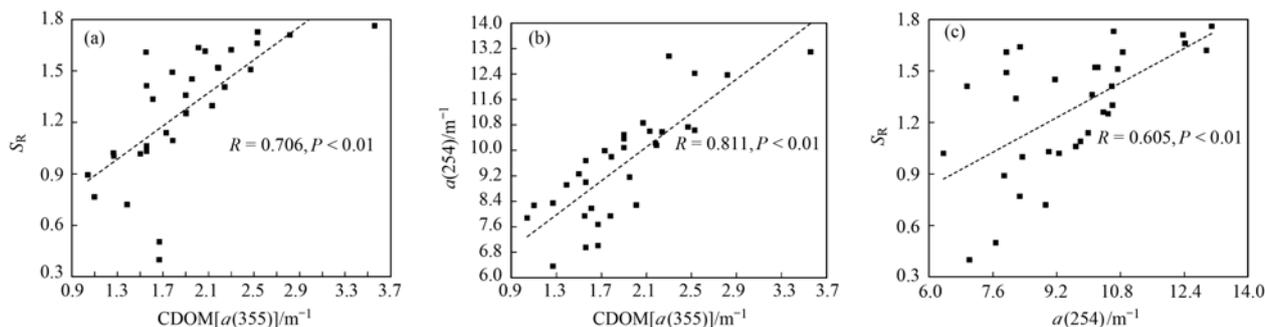
全文图表数据处理采用 Microsoft Excel 2013;全文图表数据统计与数据绘制采用 Origin 8.0;EEMs 光谱的平行因子分析(PARAFAC)采用 MATLAB 7.0 的 DOM 荧光工具箱(www.models.life.ku.dk);相关性分析以及聚类分析采用 SPSS 18.0。

2 结果与讨论

2.1 紫外-可见吸收光谱参数分析

黄河兰州段水体 CDOM 浓度波动范围为 1.04~3.56 m^{-1} ,均值为 $(1.90 \pm 0.15) \text{m}^{-1}$ 。 $a(254)$ 的波动范围为 6.36~13.09 m^{-1} ,均值为 $(9.57 \pm 0.50) \text{m}^{-1}$ 。 S_R 的波动范围为 0.40~1.76,均值为 1.28 ± 0.10 。 S_R 值随着 CDOM 组成和来源的差异而不同^[21],因而黄河兰州段水体不同区域 CDOM 组成与来源存在差异。

如图 2 所示,各样点 CDOM、 S_R 和 $a(254)$ 两两均呈显著正相关($P < 0.01$),说明 CDOM 含有的生色团多为小分子量芳香族化合物组成。较高芳香性 DOM 结构中存在生色团比例可能较大^[22]。自然水体中高分子有机质大多出现在降水量较为丰富的地区^[8],而兰州属于半干旱地区,因此黄河兰州段水体中 CDOM 的生色团可能主要由具有不饱和碳-碳键芳香结构的小分子组成,被光漂白及微生物降解的活性较低。这与 Shao 等^[9]对中国辽河 CDOM 组成以及钱锋等^[20]对太子河本溪城市段 DOM 组成

图 2 CDOM、 S_R 和 $a(254)$ 的相关性分析Fig. 2 Correlations between CDOM, S_R , and $a(254)$

的研究相一致。

2.2 荧光光谱特征分析

2.2.1 CDOM 荧光组分特征分析

利用 PARAFAC 模型解析黄河兰州段水体 32 个水样的三维荧光光谱, 共辨识出 4 个荧光组分 (表 1 和图 3), 分别为 C1 (240/416 nm)、C2 (225/342 nm)、C3 (200, 275/375 nm) 和 C4 (265/494 nm)。

组分 C1 表示紫外类富里酸, 为短波小分子类腐殖质^[12], 在天然水体中普遍存在, 不易光降解和生物降解。主要来源于地表径流、土壤渗滤液、森

林地区和湿地等^[23], 属于典型陆源性有机质, 对应 A 峰。组分 C4 表示腐殖酸, 为大分子疏水性长波类陆源腐殖质^[13]。该组分可光降解和生物降解, 主要来源为陆源, 生物降解和生物活动是潜在的二次来源^[23]。组分 C2 表示类色氨酸物质, 为低激发类蛋白质, 可结合或游离于蛋白质中, 常见于污水和垃圾渗液, 对应 T 峰。代表内源 CDOM 类酪氨酸荧光 B 峰未出现, 说明其降解程度较 T 峰高^[24]。组分 C3 为非类腐殖质, 不稳定, 为水环境下微生物和浮游植物活动产物。常与类色氨酸 T 峰混淆, 对应 N 峰。

表 1 PARAFAC 鉴别出黄河兰州段水体 4 个荧光组分特征

Table 1 Characteristics of the four different components identified by PARAFAC in the Lanzhou reach of the Yellow River

组分	$E_x/E_m/nm$	荧光成分类型	数值/nm	文献
C1	240/416	UVC 类腐殖质 (紫外类富里酸)	C1: <230 ~ 260/400 ~ 500	[23]
			C2: 240, 330/405	[25]
			C1: <250, 340/440	[26]
C2	225/342	类蛋白 (类色氨酸物质)	C1: 220, 285/348	[8]
			C3: 230, 280/340	[12]
			C4: 225, 280/345	[25]
C3	200, 275/375	非类腐殖质 N	C4: 275/380	[1]
			C3: <250, 285/395	[26]
			C2: 240, 305/396	[27]
C4	265/494	类腐殖质 (类腐殖酸)	C4: 270, 360/480	[10]
			C3: 260(370)/490	[13]
			C2: <240 ~ 275, 339 ~ 420/434 ~ 520	[23]

2.2.2 CDOM 荧光强度空间分布特征分析

总荧光强度能够反映 CDOM 含量, 荧光强度的分布差异能够揭示 CDOM 的空间分布。黄河兰州段水体 CDOM 中各组分比例不均衡, 其中类蛋白质最大, 类腐殖质次之, 非类腐殖质最低 (图 4)。从而说明黄河兰州段水体中 CDOM 属于“类蛋白质-类腐殖质”复合主导型, 以类蛋白质为主。从每个组分来看, C2 (类色氨酸) 最多 (51.06% ± 3.73%); C1 (类富里酸) 次之 (30.50% ± 3.33%); 第三为 C3 (非类腐殖质 N) (12.20% ± 2.23%); C4 (类腐殖

酸) 最少 (6.24% ± 1.11%)。人为污染可能导致类色氨酸在 CDOM 组成中占高比例^[28]。因此黄河兰州段水体类色氨酸比例最大的原因可能是由于人类活动产生的各种污染物输入, 使得水体微生物活性增强, 导致 CDOM 的内源输入增强, 表现出类蛋白质荧光峰的相对强度增加^[29]。

从上游到下游 (S1 ~ S25), 总荧光强度大体是一个先降低后升高再降低的过程, CDOM 分布差异较大, 而南河道支流 S26 ~ S32 样点总荧光强度的空间变化较小, CDOM 分布差异不大 [图 4(a)]。

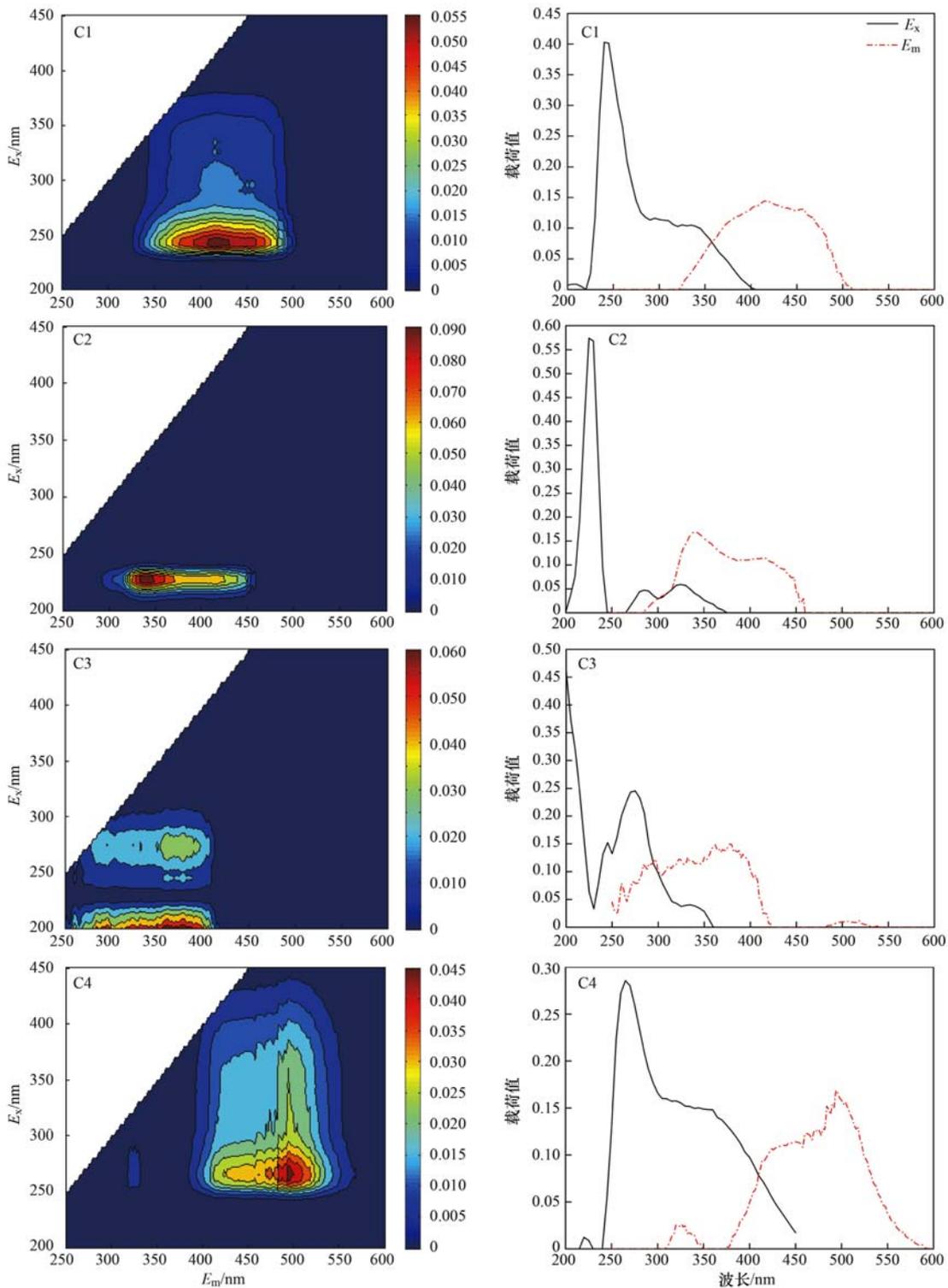


图3 4个荧光组分及其激发/发射波长载荷值

Fig. 3 Four different fluorescent components and their excitation/emission loading

总荧光强度变化主要受到类色氨酸 C2 含量变化的影响，基本与 C2 含量变化一致。类蛋白质荧光强度变化可用来表征河流水质污染状况^[30]，其在天然河流中含量较低，在受到污染(如工业废水和生活污水)的河流中比例会显著增高^[31]。因此 CDOM

的分布差异与河流受到的污染情况有关。S8, S9, S11 和 S12 属于银滩湿地公园样点，S18 和 S19 为两个景区样点，这些地点观赏游玩人员来去流量大，娱乐、商业活动频繁，污染物的输入多而杂。一般大量人为干扰会使水体蛋白质含量增加^[32]，

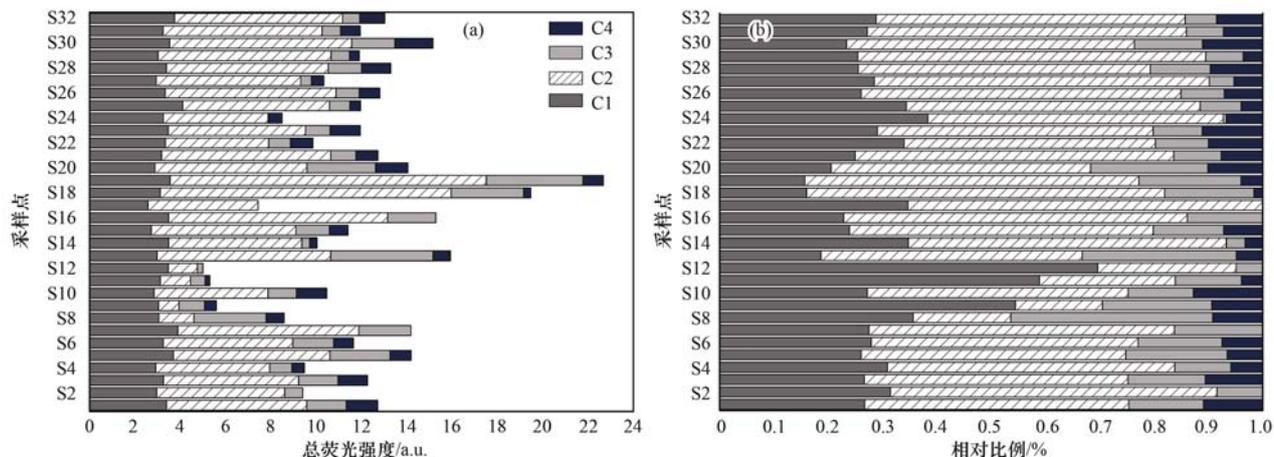


图4 黄河兰州段水体荧光强度空间分布与各荧光组分的相对比例

Fig. 4 Spatial distribution of fluorescence intensity and relative proportions of fluorescent components in the Lanzhou reach of the Yellow River

所以 S18 和 S19 的色氨酸含量很高, 而银滩公园样点的色氨酸含量却很低, 其原因可能是当时湿地受到闸坝拦截, 水体停留时间长, 类蛋白质分解转化程度大于生物以及人为输入程度. 类蛋白质会因生物降解与光化学作用减少^[33].

2.2.3 CDOM 来源分析

黄河兰州段水体 CDOM 的 4 个组分以及 CDOM 浓度相关性分析见表 2. 32 个水样中, 除组分 C2 与组分 C3 显著相关($P < 0.01$)外, 其余组分均无显著相关性($P > 0.01$). 这说明类蛋白质与非类腐殖质存在共源性, 而类蛋白和类腐殖质以及 2 种类腐殖质的来源不同. 这些表明黄河兰州段水体 CDOM 的来源较为复杂. 一方面可能与黄河水源自身流经的周边环境类型多样有关; 另一方面受到水体本身内源的影响; 同时又与高强度的人类活动干扰密不可分. 溶解性有机质的来源会因人类活动的影响而改变^[12]. CDOM 浓度与组分 C2 (类色氨酸)、组分 C3 (非类腐殖质) 显著相关, 说明组分 C2 与组分 C3 对 CDOM 的含量起主要贡献作用. 根据 2.2.1 节对组分 C2 与组分 C3 的特征分析以及实际地域情况, 判断黄河兰州段水体 CDOM 可能主要来源于外源输入的居民/商业污水、沿岸景观景点大量人为活动干扰和少量工业企业、农业废水的排放、污水携带的微生物活动以及水体自身的微生物和浮游植物的作用过程.

不同荧光组分对应的类腐殖质和类蛋白物质的来源具有差异性^[12]. 通过聚类分析分析各样点荧光组分异同, 将特征相似的样本聚为一类, 从而揭示水体 CDOM 来源情况^[34]. 本研究对黄河兰州段水体 4 种荧光组分数据进行分层聚类分析(图 5),

表 2 4 个荧光组分与 CDOM 的相关关系¹⁾

Table 2 Relationship between four different fluorescent components and CDOM

	C1	C2	C3	C4	CDOM
C1	1	0.250	0.065	0.057	0.059
C2		1	0.508 **	0.135	0.375 *
C3			1	0.250	0.544 **
C4				1	0.167

1) ** 表示 $P < 0.01$ 时, 显著相关; * 表示 $P < 0.05$ 时, 显著相关

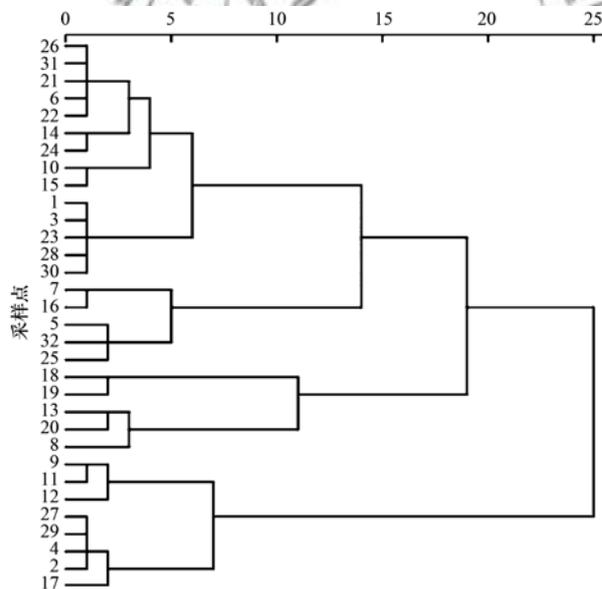


图5 采样点聚类分析结果

Fig. 5 Results of cluster analysis of the sampling sites

可以看出同一区域样点很分散, 即 CDOM 来源并没有明显的区域特征. 造成这种情况的原因可能是一方面所研究河段位于兰州市, 城市内部环境相似; 另一方面所采样点分布较为集中且均匀, 这些地区沿河人口密集, 经济较为发达, 高强度人为干扰因素使得河段中有机质成分并不稳定. 以距离 15 为

基准, 将 32 个样点分为 III 类. III 类中各组分所占比例如表 3 所示.

表 3 III 类中各荧光组分所占比例/%

Table 3 Relative proportions of four different fluorescent components among class III/%

类别	I 类	II 类	III 类
C1(类富里酸)	41.75	28.18	21.32
C2 + C3 (类色氨酸 + 非类腐殖质)	54.76 (46.31 + 8.44)	64.36 (53.80 + 10.56)	72.72 (48.25 + 24.48)
C4(类腐殖酸)	3.50	7.46	5.95

第 I 类包括 S2、S4、S9、S11、S12、S17、S27 和 S29. 相比于其他两类, 组分 C1 所占比例最大, 组分 C2 与组分 C3 所占比例最小, 两者所占比例基本均衡. 当水体受到严重污染时, 荧光强度主要由类色氨酸组分组成^[8]. 这表明 I 类样点所在区域 CDOM 的来源主要来自地表径流和淋溶的外源输入以及水生生物代谢活动等这些自然过程. 这些区域只受到了轻微的内源污染, 受人类活动影响较小.

第 II 类包括样点 S1、S3、S5、S6、S7、S10、S14、S15、S16、S21 ~ S25、S26、S28 和 S30 ~ S32. 组分 C1 所占比例明显变少, 组分 C2 与组分 C3 所占比例增大, 这表明 II 类样点所在区域 CDOM 的来源除自然过程外, 另一部分来自居民/商业污水、少量工业企业、农田废水的排放等. II 类样点占据了绝大部分黄河兰州段区域, 说明黄河兰州段水体绝大部分受到了一定内源污染, 受人类活动影响较大.

第 III 类包括样点 S8、S13、S18、S19 和 S20. 这些点大都位于旅游景点, 人口流量大, 船舶等各种水上交通工具活动频繁, 水上游乐项目多, 餐饮业发达. 组分 C2 与组分 C3 所占比例很大, 表明这些区域 CDOM 来源除自然过程外, 主要受到水上娱乐设施、船舶运输、垃圾食品以及生活/商业污水等的影响. 样点所在区域受到污染比较严重, 受人类活动影响很大.

3 结论

(1) 黄河兰州段水体 CDOM 的生色团可能由具有不饱和碳-碳键的芳香结构的小分子组成, 具体解析出 4 个组分[陆源性紫外类富里酸 C1(240/416 nm)、低激发类色氨酸 C2(225/342 nm)、微生物产物非类腐殖质 C3(200, 275/375 nm)和长波类腐殖酸 C4(265, 494 nm)].

(2) 黄河兰州段水体 CDOM 整体上呈现非均匀分布特征. 在人口流量大, 商业性活动强的餐饮区、景区、娱乐用地处总荧光强度相对略高; 而在

蛋白质降解转化程度大于生物及人为输入程度的银滩湿地公园处较低.

(3) 黄河兰州段水体 CDOM 中的类色氨酸含量多, 类腐殖质含量少, 属于“类蛋白质-类腐殖质”复合主导型, 以类蛋白质为主. 该结果可能与水体周边的污染物输入、人类高强度活动干扰有关. 黄河兰州段水体不同河段受到了不同程度人为活动的影响且在人口密集的旅游景区非常显著.

参考文献:

- [1] 肖晓, 何小松, 高如泰, 等. 垃圾填埋有色溶解性有机质与铜络合机制[J]. 环境科学, 2017, **38**(5): 1873-1880.
Xiao X, He X S, Gao R T, et al. Complexation between copper (II) and colored dissolved organic matter from municipal solid waste landfill[J]. Environmental Science, 2017, **38**(5): 1873-1880.
- [2] He X S, Xi B D, Cui D Y, et al. Influence of chemical and structural evolution of dissolved organic matter on electron transfer capacity during composting[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, **268**: 256-263.
- [3] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, **51**(4): 325-346.
- [4] 刘瑞霞, 李斌, 刘娜娜, 等. 辽河流域与英国中部河湖水体中溶解有机质的荧光特性[J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2321-2328.
Liu R X, Li B, Liu N N, et al. Fluorescence characteristics of dissolved organic matter in freshwaters from Liaohe Basin and Midland of UK [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(9): 2321-2328.
- [5] Lou T, Xie H X, Chen G H, et al. Effects of photodegradation of dissolved organic matter on the binding of benzo(a)pyrene[J]. Chemosphere, 2006, **64**(7): 1204-1211.
- [6] 黄廷林, 方开凯, 张春华, 等. 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[J]. 环境科学, 2016, **37**(9): 3394-3401.
Huang T L, Fang K K, Zhang C H, et al. Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter from Zhoucun Reservoir in summer based on fluorescence Spectroscopy and PARAFAC[J]. Environmental Science, 2016, **37**(9): 3394-3401.
- [7] Kong X Y, Liu Y F, Jian H M, et al. New approach for rapid assessment of trophic status of Yellow Sea and East China Sea using easy-to-measure parameters [J]. Journal of Ocean University of China, 2017, **16**(5): 781-792.

- [8] Zhao Y, Song K S, Li S J, *et al.* Characterization of CDOM from urban waters in Northern-Northeastern China using excitation-emission matrix fluorescence and parallel factor analysis [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(15): 15381-15394.
- [9] Shao T T, Song K S, Jacinthe P A, *et al.* Characteristics and sources analysis of riverine chromophoric dissolved organic matter in Liaohe River, China [J]. *Water Science and Technology*, 2016, **74**(12): 2843-2859.
- [10] Zhu W Z, Zhang H H, Zhang J, *et al.* Seasonal variation in chromophoric dissolved organic matter and relationships among fluorescent components, absorption coefficients and dissolved organic carbon in the Bohai Sea, the Yellow Sea and the East China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, **180**: 9-23.
- [11] Devilbiss S E, Zhou Z Z, Klump J V, *et al.* Spatiotemporal variations in the abundance and composition of bulk and chromophoric dissolved organic matter in seasonally hypoxia-influenced Green Bay, Lake Michigan, USA [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **565**: 742-757.
- [12] 陈永娟, 胡玮璇, 庞树江, 等. 北运河水体中荧光溶解性有机物空间分布特征及来源分析 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(8): 3017-3025.
Chen Y J, Hu W X, Pang S J, *et al.* Spatial distribution characteristics and source analysis of dissolved organic matter in Beiyun River [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(8): 3017-3025.
- [13] 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.
- [14] Huang W, Chen R F. Sources and transformations of chromophoric dissolved organic matter in the Neponset River Watershed [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(G4): G00F05.
- [15] 邵田田, 赵莹, 宋开山, 等. 辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(10): 3755-3763.
Shao T T, Zhao Y, Song K S, *et al.* Seasonal variation in the absorption and fluorescence characteristics of CDOM in downstream of Liaohe River [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(10): 3755-3763.
- [16] 虞敏达, 何小松, 檀文炳, 等. 城市纳污河流有色溶解有机物时空演变特征 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(1): 133-142.
Yu M D, He X S, Tan W B, *et al.* Space-time characteristics of chromophoric dissolved organic matter from typical polluted city river [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(1): 133-142.
- [17] 张春华, 黄廷林, 方开凯, 等. 同温混合初期主库区沉积物间隙水 DOM 的光谱特征——以周村水库为例 [J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(10): 3048-3055.
Zhang C H, Huang T L, Fang K K, *et al.* Spectral characteristics of DOM in sediment interstitial water of the main reservoir area during the initial stage of isothermal mixing: a case study of Zhoucun Reservoir [J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(10): 3048-3055.
- [18] Xiao Y H, Sara-Aho T, Hartikainen H, *et al.* Contribution of ferric iron to light absorption by chromophoric dissolved organic matter [J]. *Limnology and Oceanography*, 2013, **58**(2): 653-662.
- [19] 高洁, 江韬, 李璐璐, 等. 三峡库区消落带土壤中溶解性有机质 (DOM) 吸收及荧光光谱特征 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 151-162.
Gao J, Jiang T, Li L L, *et al.* Ultraviolet-Visible (UV-Vis) and fluorescence spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in soils of water-level fluctuation zones of the Three Gorges Reservoir region [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 151-162.
- [20] 钱锋, 吴婕赟, 于会彬, 等. 多元数理统计法研究太子河本溪城市段水体 DOM 紫外光谱特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3806-3812.
Qian F, Wu J Y, Yu H B, *et al.* UV-Visible spectra properties of DOM from Taizi River in Benxi City section by multivariable analysis [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3806-3812.
- [21] 王齐磊, 江韬, 赵铮, 等. 三峡库区典型农业小流域水体中溶解性有机质的光谱特征 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(6): 2082-2092.
Wang Q L, Jiang T, Zhao Z, *et al.* Spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) in waters of typical agricultural watershed of Three Gorges Reservoir areas [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(6): 2082-2092.
- [22] Kulovaara M, Corin N, Backlund P, *et al.* Impact of UV₂₅₄-radiation on aquatic humic substances [J]. *Chemosphere*, 1996, **33**(5): 783-790.
- [23] Ishii S K L, Boyer T H. Behavior of reoccurring PARAFAC components in fluorescent dissolved organic matter in natural and engineered systems: a critical review [J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, **46**(4): 2006-2017.
- [24] 闫金龙, 江韬, 高洁, 等. 两江交汇处水体溶解性有机质的吸收和荧光光谱特征: 以渠江-嘉陵江、涪江-嘉陵江为例 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 869-878.
Yan J L, Jiang T, Gao J, *et al.* Characteristics of absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter from confluence of rivers: case study of Qujiang River-Jialing River and Fujiang River-Jialing River [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(3): 869-878.
- [25] He X S, Xi B D, Gao R T, *et al.* Insight into the composition and degradation potential of dissolved organic matter with different hydrophobicity in landfill leachates [J]. *Chemosphere*, 2016, **144**: 75-80.
- [26] Singh S, D'Sa E J, Swenson E M. Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) variability in Barataria Basin using excitation-emission matrix (EEM) fluorescence and parallel factor analysis (PARAFAC) [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(16): 3211-3222.
- [27] Holbrook R D, Yen J H, Grizzard T J. Characterizing natural organic material from the Occoquan Watershed (Northern Virginia, US) using fluorescence spectroscopy and PARAFAC [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **361**(1-3): 249-

- 266.
- [28] Bridgeman J, Baker A, Carliell-Marquet C, *et al.* Determination of changes in wastewater quality through a treatment works using fluorescence spectroscopy[J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(23): 3069-3077.
- [29] Massicotte P, Frenette J J. Spatial connectivity in a large river system: resolving the sources and fate of dissolved organic matter [J]. *Ecological Applications*, 2011, **21**(7): 2600-2617.
- [30] 钱锋, 吴婕赟, 于会彬, 等. 荧光光谱结合多元统计分析太子河本溪段水体 DOM 组成及其与水质相关性[J]. *环境化学*, 2016, **35**(10): 2016-2024.
- Qian F, Wu J Y, Yu H B, *et al.* Analysis of the structural composition of dissolved organic matter and its correlation with water quality at Benxi section of Taizi River utilizing fluorescence and multivariate statistics[J]. *Environmental Chemistry*, 2016, **35**(10): 2016-2024.
- [31] 陈雪霜, 江韬, 卢松, 等. 典型水库型湖泊中 CDOM 吸收及荧光光谱变化特征: 基于沿岸生态系统分析[J]. *环境科学*, 2016, **37**(11): 4168-4178.
- Chen X S, Jiang T, Lu S, *et al.* Spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) from a typical reservoir lake from inland of Three Gorges Reservoir areas: in the view of riparian ecosystem analysis[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(11): 4168-4178.
- [32] Huang W, McDowell W H, Zou X M, *et al.* Qualitative differences in headwater stream dissolved organic matter and riparian water-extractable soil organic matter under four different vegetation types along an altitudinal gradient in the Wuyi Mountains of China[J]. *Applied Geochemistry*, 2015, **52**: 67-75.
- [33] Jiang F H, Lee F S C, Wang X R, *et al.* The application of Excitation/Emission Matrix spectroscopy combined with multivariate analysis for the characterization and source identification of dissolved organic matter in seawater of Bohai Sea, China[J]. *Marine Chemistry*, 2008, **110**(1-2): 109-119.
- [34] Baker D A, Inverarity R. Protein-like fluorescence intensity as a possible tool for determining river water quality[J]. *Hydrological Processes*, 2004, **18**(15): 2927-2945.



CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China	HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province	LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai	YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, <i>et al.</i> (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province	SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, <i>et al.</i> (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing	LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of PM _{2.5} During Summer and Winter in Ji'nan City	LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4014)
PM _{2.5} Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City	ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer	WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, <i>et al.</i> (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng	YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, <i>et al.</i> (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing	XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, <i>et al.</i> (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City	MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, <i>et al.</i> (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face	LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, <i>et al.</i> (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing	LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, <i>et al.</i> (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment	GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, <i>et al.</i> (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads	GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, <i>et al.</i> (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River	ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, <i>et al.</i> (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions	XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, <i>et al.</i> (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring	LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin	WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, <i>et al.</i> (4132)
Characteristics and Genesis of NO ₃ Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin	XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, <i>et al.</i> (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir	ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, <i>et al.</i> (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment	LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment	HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin	LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-jiang, <i>et al.</i> (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China	NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, <i>et al.</i> (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu	CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, <i>et al.</i> (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater	WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, <i>et al.</i> (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China	HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes	HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification	ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, <i>et al.</i> (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network	YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, <i>et al.</i> (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process	WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, <i>et al.</i> (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate	HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, <i>et al.</i> (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O ² and A/O/H/O Processes	WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, <i>et al.</i> (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extract on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System	YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, <i>et al.</i> (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A ² /O Process	ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, <i>et al.</i> (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process	CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, <i>et al.</i> (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB)	SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, <i>et al.</i> (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification	AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, <i>et al.</i> (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage	LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, <i>et al.</i> (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi	SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, <i>et al.</i> (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar	LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, <i>et al.</i> (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System	LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, <i>et al.</i> (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite	XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, <i>et al.</i> (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves	ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, <i>et al.</i> (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms	HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, <i>et al.</i> (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment	LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, <i>et al.</i> (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis	JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, <i>et al.</i> (4385)