

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.3
第41卷 第3期

目次

长江经济带 PM_{2.5} 分布格局演变及其影响因素 黄小刚, 赵景波, 曹军骥, 辛未冬 (1013)

中国东海近海岛屿冬季与夏季气溶胶中水溶性离子化学组分特征及来源解析 方言, 曹芳, 范美益, 章炎麟 (1025)

阳泉市秋冬季 PM_{2.5} 化学组分及来源分析 王成, 闫雨龙, 谢凯, 李如梅, 徐扬, 彭林 (1036)

泰安市夏季 PM_{2.5} 中正构烷烃和糖类化合物的化学组成及其来源 衣雅男, 侯战方, 杨千才, 刘晓迪, 李政, 孟静静, 燕丽, 魏本杰, 伏梦璇 (1045)

黄山秋季大气颗粒物理化特性 卞逸舒, 银燕, 王红磊, 陈魁 (1056)

北碚区气溶胶光学厚度特征及其与颗粒物浓度的相关性 曾唯, 郝庆菊, 赵仲婧, 熊维霞, 陈俊江, 辛金元, 江长胜 (1067)

淄博市重点工业行业 VOCs 排放特征 王雨燕, 王秀艳, 杜森, 白瑾丰, 杨文 (1078)

鄂州市大气 VOCs 污染特征及来源解析 付昱萌, 杨红刚, 卢民瑜, 曾颜, 邹迎新 (1085)

浙江省汽车整车制造业挥发性有机物产排污系数 滕富华, 杨忠平, 董事壁, 付超, 缪孝平, 顾震宇 (1093)

基于工艺过程的金属包装业 VOCs 污染特征 王迪, 聂磊, 赵文娟, 张玮琦, 党鸿雁, 邵霞, 张新民 (1099)

薪柴和经济作物秸秆燃烧 VOCs 排放特征 牛真真, 孔少飞, 严沁, 郑淑睿, 郑煌, 曾昕, 姚立全, 吴剑, 张颖, 吴方琪, 程溢, 覃思, 刘玺, 甄莹莹, 祁士华 (1107)

精细化工园区工艺过程 VOCs 产生量核算方法 叶茵韵, 田金平, 陈吕军 (1116)

2017 年春季常州 HONO 观测及对大气氧化能力影响的评估 施晓雯, 戈逸峰, 张玉婵, 马嫣, 郑军 (1123)

中国工程机械使用特征及其尾气排放趋势 庞莉莉, 张凯山, 马帅, 王帆 (1132)

京津冀机场群飞机 LTO 大气污染物排放清单 韩博, 孔魏凯, 姚婷玮, 王愚 (1143)

在用汽油和柴油车排放颗粒物的粒径分布特征实测 王瑞宁, 胡馨遥, 任洪娟, 马冬, 徐冲, 赵奎乾, 王孟昊, 徐为标, 安静宇, 黄成 (1151)

参数选取对畜禽养殖业大气气排放的影响: 以长三角地区为例 张琪, 黄凌, 殷司徒, 王倩, 李红丽, 王杨君, 王军, 陈勇航, 李莉 (1158)

乌海市煤矿区及周边春季降尘污染特征及来源分析 吴红璇, 史常青, 张艳, 赵廷宁, 胡平, 刘韵, 陈童 (1167)

长江中下游地区丰水期河、湖水氢氧同位素组成特征 李静, 吴华武, 周永强, 赵中华, 王晓龙, 蔡永久, 贺斌, 陈雯, 孙伟 (1176)

伊洛河流域河水来源及水化学组成控制因素 刘松韬, 张东, 李玉红, 杨锦媚, 邹霜, 王永涛, 黄兴宇, 张忠义, 杨伟, 贾保军 (1184)

城镇化进程中新疆塔城盆地浅层地下水化学演变特征及成因 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 朱亮, 陈坚 (1197)

基于 Sentinel-2 MSI 影像的河湖系统水体悬浮物空间分异遥感监测: 以安徽省升金湖与连接长江段为例 王行行, 王杰, 崔玉环 (1207)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素 梁晓文, 邵田田, 王涛 (1217)

人工强制混合充氧及诱导自然混合对水源水库水质改善效果分析 温成成, 黄廷林, 李楠, 张海涵, 林子深, 李衍庆, 杨尚业, 董亚军 (1227)

滤速与水质对低温含铁锰氨地下水中氨去除的影响 张杰, 梅宁, 刘孟浩, 叶雪松, 李冬 (1236)

太湖梅梁湾浮游动物群落结构长期变化特征 (1997 ~ 2017 年) 杨佳, 周健, 秦伯强, 权秋梅, 黎云祥 (1246)

汤旺河水生硅藻群落及其与环境因子的关系 薛浩, 王业耀, 孟凡生, 郑丙辉, 张铃松, 程佩璋 (1256)

盐龙湖水源生态净化系统 FG 和 MBFG 演替特征及水质响应性评价 王莲, 李璇, 马卫星, 邹立航, 赵强强, 丁成, 吴向阳 (1265)

三峡库区石盘丘小流域氮磷输出形态及流失通量 陈仕奇, 龙翼, 严冬春, 高明, 黎嘉成, 徐国鑫, 黄容 (1276)

化肥减量配施生物炭对紫色土坡耕地磷流失的影响 罗东海, 王子芳, 龙翼, 严冬春, 徐国鑫, 李娇, 高明 (1286)

利用铁改性方解石作为活性覆盖材料控制水体内源磷的释放 柏晓云, 林建伟, 詹艳慧, 常明玥, 辛慧敏, 吴俊麟 (1296)

茶渣生物炭制备及其对溶液中四环素的去除特性 范世锁, 刘文浦, 王锦涛, 胡红梅, 杨伊宁, 周娜 (1308)

3 种典型多孔高温改性固废材料对磺胺二甲嘧啶的吸附特性 王静, 朱晓丽, 韩自玉, 胡健, 秦之瑞, 焦文涛 (1319)

新制和老化微塑料对多溴联苯醚的吸附 徐鹏程, 郭健, 马东, 葛蔚, 周震峰, 柴超 (1329)

三峡库区支流汝溪河沉积物重金属空间分布及生态风险 方志青, 王永敏, 王训, 谢德体, 王定勇 (1338)

固城湖及出入河道表层水体、沉积物和鱼体中有机氯农药分布及风险评估 阙可聪, 谷孝涛, 李红敏, 陈辉辉, 毛志刚, 曾庆飞 (1346)

衡水湖沉积物中典型持久性有机污染物污染特征与风险评估 张嘉雯, 魏健, 吕一凡, 段亮, 刘利, 王俭, 孟淑锦 (1357)

北京某污水处理厂及接纳水体中典型有机磷酸酯的污染特征和风险评估 张振飞, 吕佳佩, 裴莹莹, 王春英, 郭昌胜, 徐建 (1368)

基于短程反硝化厌氧氨氧化的低碳源城市污水深度脱氮特性 马斌, 许鑫鑫, 高茂鸿, 委燕, 彭永臻 (1377)

PD-DPR 系统处理城市污水与高硝酸盐废水实现稳定亚硝酸盐积累和磷去除的特性 王秋颖, 于德爽, 赵骥, 王晓霞, 袁梦飞, 巩秀珍, 楚光玉, 何彤晖 (1384)

中试 MBBR 反应器启动 CANON 工艺及其短程硝化 付昆明, 杨宗玥, 廖敏辉, 靳怡然, 张晓航 (1393)

抗生素对耐药型反硝化菌反硝化过程及微生物群落结构的影响 代莎, 李彭, 彭五庆, 刘玉学, 王拯, 何义亮, 沈根祥, 胡双庆 (1401)

多次进水-曝气的好氧颗粒污泥系统实验 张杰, 王玉颖, 李冬, 刘志诚, 曹思雨 (1409)

剩余污泥碱性发酵产物对硝化过程及性能的影响 邱圣杰, 刘瑾瑾, 李夕耀, 彭永臻 (1418)

硫酸盐对污泥高级厌氧消化过程中甲基汞迁移转化的影响 何湘琳, 刘吉宝, 阴永光, 谭颖锋, 朱爱玲, 左壮, 高山, 解立平, 魏源送 (1425)

工业城市农田土壤重金属时空变异及来源解析 李艳玲, 卢一富, 陈卫平, 杨阳, 蔡斌 (1432)

耕地土壤重金属健康风险空间分布特征 姬超, 侯大伟, 李发志, 包广静, 邓爱萍, 沈红军, 孙华 (1440)

黄河三角洲盐碱土根际微环境的微生物多样性及理化性质分析 赵娇, 谢慧君, 张建 (1449)

不同土地利用方式对土壤细菌分子生态网络的影响 李冰, 李玉双, 魏建兵, 宋雪英, 史荣久, 侯永侠, 刘△瑶 (1456)

红壤丘陵区土壤有机碳组分对土地利用方式的响应特征 章晓芳, 郑生猛, 夏银行, 胡亚军, 苏以荣, 陈香碧 (1466)

有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 廖霞, 丁维新 (1474)

冬小麦吸收重金属特征及与影响因素的定量关系 王怡雯, 芮玉奎, 李中阳, 苏德纯 (1482)

钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响 鄢德梅, 郭朝晖, 黄凤莲, 冉洪珍, 张鹏 (1491)

桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 朱义年, 李超, 张立浩 (1498)

外源亚精胺对 As⁵⁺ 胁迫下水稻种子萌发和 As 吸收积累的影响 刘书锦, 黄益宗, 保琼莉, 黄永春, 张盛楠, 韩甘, 刘玉荣, 胡红青 (1505)

《环境科学》征订启事 (1024) 《环境科学》征稿简则 (1092) 信息 (1226, 1264, 1417)

黄土高原高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素

梁晓文^{1,2}, 邵田田^{1*}, 王涛^{1,2}

(1. 河南大学黄河文明与可持续发展研究中心暨黄河文明传承与现代文明建设省部共建协同创新中心, 开封 475001; 2. 河南大学环境与规划学院, 开封 475004)

摘要: 为确定黄土高原地区高浑浊水体有色溶解有机物 (CDOM) 组成来源及研究环境因素对其的影响, 本文基于 2018 年 5 月陕蒙黄土高原地区河流与湖泊 (咸水湖和淡水湖) 的实测数据对 CDOM 光学吸收特性, 各组分对水体吸收的贡献, 光谱斜率 $S_{275-295}$ 及水质参数与 CDOM 光学特征参数的相关性进行分析。结果表明, 陕蒙黄土高原区河湖 CDOM 吸收光学特性差异显著 ($P < 0.01$), 湖泊 CDOM 吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(440)$ (8.45 m^{-1}) 高于河流 (2.70 m^{-1}), 咸水湖 CDOM 浓度 (13.52 m^{-1}) 高于淡水湖 (3.38 m^{-1}), 淡水湖对光的有效利用率高于咸水湖和浑浊河流。河流与湖泊、咸淡水湖之间酸碱度 (pH) 和溶解有机碳 (DOC) 差异均呈显著水平 ($P < 0.01$); 河湖水体电导率 (EC)、浊度 (Tur) 和总悬浮物浓度 (TSM) 差异显著; 排除极大值点, 咸水湖与淡水湖叶绿素 a (Chla) 相接近。基于 $S_{275-295}$ 分析发现, 湖泊 CDOM 分子量小于河流, 咸水湖分子量小于淡水湖; 由 SUVA_{254} 得出, 河流陆源腐殖质输入比湖泊多, 淡水湖陆源腐殖质输入较咸水湖多。通过冗余分析 (RDA) 发现, 河流与湖泊水质参数累积方差解释率分别为 35.2% 和 61.4%, 咸淡水湖均达到 100%; 溶解氧 (DO)、水温和 EC 对河流 CDOM 光学特性影响较大 ($P < 0.01$), 而 DOC、TSM 和 Tur 对湖泊 CDOM 光学特性影响较大 ($P < 0.01$); 咸水湖水体中 DOC 以及淡水湖水体的 pH 与 CDOM 吸收系数相关性较强 ($P < 0.05$)。

关键词: 黄土高原; 有色溶解有机物 (CDOM); 光学特性; 水质参数; 冗余分析 (RDA)

中图分类号: X143 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)03-1217-10 DOI: 10.13227/j.hjlx.201908244

CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau

LIANG Xiao-wen^{1,2}, SHAO Tian-tian^{1*}, WANG Tao^{1,2}

(1. Key Research Institute of Yellow River Civilization and Sustainable Development and Collaborative Innovation Center on Yellow River Civilization, Henan University, Kaifeng 475001, China; 2. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475004, China)

Abstract: Chromophoric dissolved organic matter (CDOM) optical absorption characteristics, CDOM spectral slopes ($S_{275-295}$), contribution of each component to water absorption, and the effects of environmental factors on them were analyzed to determine the sources and composition of CDOM in high-turbidity waters on the Loess Plateau. Samples in rivers and lakes (saline and freshwater) in the Loess Plateau area of Shaanxi and Inner Mongolia were collected in May 2018. The results demonstrated significant differences in CDOM absorption optical characteristics between rivers and lakes. The average $a_{\text{CDOM}}(440)$ (CDOM concentration, 8.45 m^{-1}) in lakes was higher than that of rivers (2.70 m^{-1}), and the saline lakes showed a higher CDOM concentration (13.52 m^{-1}) than the freshwater lakes (3.38 m^{-1}). Moreover, the light utilization efficiency of freshwater lakes is higher than that of saline lakes and turbid rivers. Great differences in pH and dissolved organic carbon (DOC) were observed between different types of water ($P < 0.01$). The differences in electrical conductivity (EC), turbidity (Tur), and total suspended matter concentration (TSM) were significant with no statistical significances ($P > 0.1$). The chlorophyll a concentration (Chla) in saline lakes was close to the Chla concentration in freshwater lakes if extreme values were excluded. In addition, the CDOM molecular weights of lake water were lower than those in the rivers, while CDOM molecular weights in saline lakes were lower than those in freshwater lakes based on the $S_{275-295}$. Analyses of specific ultraviolet absorbance (SUVA_{254}) were also conducted to determine the sources of CDOM in different water types, and the results showed that the more terrigenous humus were brought into the rivers and saline lakes compared with the freshwater lakes. Redundancy analysis (RDA) indicated that river and lake water quality parameters of the cumulative variance explained rates were 35.2% for river samples and 61.4% for lake samples, and 100% for samples in the saline and freshwater lakes individually. The results of RDA showed that dissolved oxygen (DO), water temperature, and EC exerted significant effects on CDOM optical properties of the river ($P < 0.01$), while DOC, TSM, and Tur had a great influence on the CDOM optical properties of lakes ($P < 0.01$). There was a strong correlation between pH and CDOM in the saline lakes, while DOC was significantly correlated with CDOM in the freshwater lakes ($P < 0.05$).

Key words: Loess Plateau; chromophoric dissolved organic matter (CDOM); optical properties; water quality parameters; redundancy analysis (RDA)

收稿日期: 2019-08-30; 修订日期: 2019-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(41601377); 河南省科技发展计划项目(192400410083)

作者简介: 梁晓文(1995~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水色遥感, E-mail: liangxwhemu2018@163.com

* 通信作者, E-mail: shaott2010@yeah.net

有色溶解有机物(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)、悬浮物(total suspended matter, TSM)和叶绿素 a 浓度(chlorophyll a, Chla)是水色遥感的主要研究对象^[1-3]. CDOM 光谱吸收是水体固有光学特征的重要组成部分,其在蓝光部分的吸收与叶绿素的吸收重叠,影响着叶绿素浓度以及水体初级生产力精确的遥感反演^[4]. 相对于悬浮物和叶绿素的反演模型而言^[5-7], CDOM 反演研究较少,而且多集中于海洋、湖泊水体,对于内陆高浑浊水体的研究相对匮乏^[8]. 高浑浊水体中悬浮颗粒物或浮游植物光谱吸收占据主导, CDOM 在水体中的光谱信号受其它光学活性物质的影响更大,光谱更弱,从而造成遥感反演精度偏低^[9]. 因此,对高浑浊水体 CDOM 光学特性及影响因素进行研究,为建立高精度 CDOM 遥感反演模型具有重要意义.

CDOM 主要由腐殖酸、富里酸、芳烃聚合物等物质组成^[10]. 内陆水体 CDOM 含量较高,组分复杂,表现出较高的空间异质性,受陆源和内源影响较大^[11]. CDOM 光学特性因区域、季节、环境因素的变化而表现出不同的光学特性及物质组成^[12]. 有研究表明, CDOM 光学特征与水质参数之间关系密切. 如 CDOM 与水中溶解有机碳(dissolved organic carbon, DOC)浓度存在较好的相关性,因此,水色遥感中通常选用 CDOM 与 DOC 浓度建立一定的模型关系,实现对水体 DOC 浓度的估算^[13]. 有学者研究表明内陆湖泊水库水体 CDOM 与 Chla 和 TSM 浓度正线性相关^[14],对于悬浮泥沙光谱特征明显的河流水体, CDOM 吸收相近,而 Chla 光谱特征明显的水样, CDOM 吸收差异较大^[15]. CDOM 与总氮(total nitrogen, TN)、盐度等水质参数之间也存在显著相关关系^[16,17].

目前对于高原地区水体,特别是高原地区高浑

浊水体 CDOM 的光学特性及来源等研究相对较少,同时对高海拔地区环境因素对 CDOM 特性的作用尚不完全清楚. 陕蒙黄土高原区处于半干旱气候地区,生态环境脆弱,水土流失严重,水体蒸发强烈,矿化度较高,存在大量盐碱型湖泊,不同类型水体中 CDOM 浓度及组成结构差异较大. 本文利用陕蒙黄土高原区不同类型水体 CDOM 光学特征参数分析其组成来源,并对河湖水质参数和 CDOM 光学特征参数之间的关系进行分析. 通过明确高浑浊水体水质参数对 CDOM 光学特性与组成的影响,以期为不同水环境的 CDOM 遥感反演模型提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原(100°54'~114°33'E, 33°43'~41°16'N)位于黄河中上游,是干旱、半干旱气候的过渡区,具有典型的大陆性季风气候特征. 河流水系众多,海拔高度 800~3 000 m,地面起伏较大,沟壑纵横,水土流失严重,植被覆盖度低,生态环境十分脆弱. 本文选取位于陕蒙黄土高原的黄河干流、大黑河、无定河、典型淡水湖(乌梁素海、哈素海、红碱淖等)和咸水湖(铁面哈达、杭盖斯布口湖泊等)作为研究对象. 无定河是黄河中游的一级支流,全长 491 km,流域面积 30 261 km². 大黑河是黄河水系流经河套平原最大的支流,干流长 236 km,流域面积 17 673 km². 哈素海是大黑河系的外流湖泊,是黄河变迁遗留的牛轭湖,湖水面积 29.7 km²; 乌梁素海是黄河流域最大的湖泊,湖水面积约 293 km²; 而咸水湖多位于鄂尔多斯高原的内流区.

1.2 野外测量与样品采集

于 2018 年 5 月 8~18 日对陕蒙黄土高原区水系及典型湖泊进行采样,共采集数据 70 组(图 1).

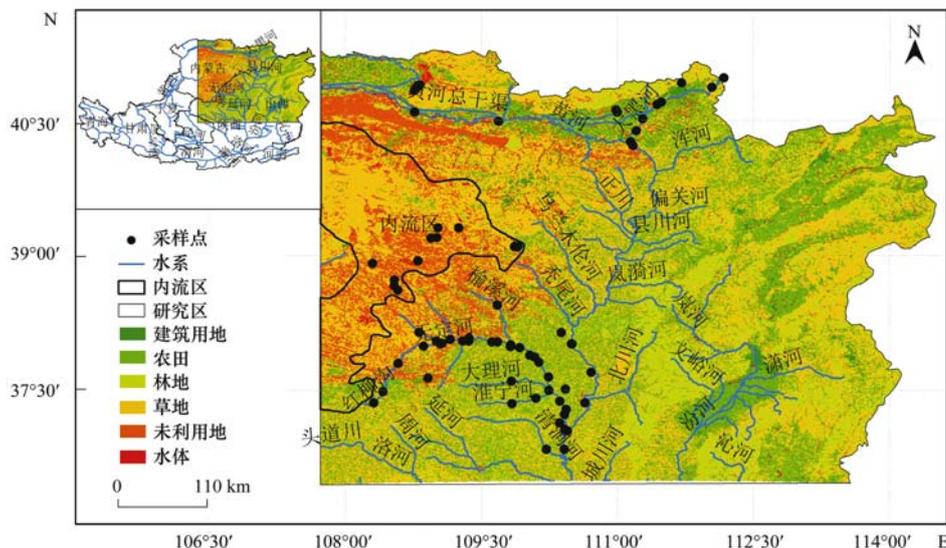


图 1 陕蒙黄土高原采样点分布及土地利用类型

Fig. 1 Distribution of sampling points and land-use types in the Loess Plateau of Shaanxi and Inner Mongolia

采集前用待测水样润洗采样瓶 2 遍, 每个样品采集 2 L 水样, 采集完毕后置于车载冰箱中冷藏, 并尽快运回实验室进行分析测试, 整个实验室测试过程需要 2 ~ 3 d. 野外采集的同时利用温度计、塞氏盘、测深仪、手持式 GPS、pH 计、便携式水质分析仪分别测量温度、透明度、水深、定点经纬度、高程、酸碱度 (pH)、溶解氧 (dissolved oxygen, DO) 以及电导率 (electrical conductivity, EC).

1.3 参数测定

CDOM 的测定: 经 0.22 μm 微孔聚碳酸酯膜过滤得到待测样品后, 利用岛津-紫外分光光度计 UV-3600 测得 200 ~ 800 nm 波长处的吸光度. 根据式 (1) 进行计算得到 CDOM 的吸收系数:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda') = 2.303D(\lambda)/l \quad (1)$$

式中, $a_{\text{CDOM}}(\lambda')$ 为未校正的 CDOM 吸收系数 (m^{-1}), $D(\lambda)$ 为吸光度; l 为光路径 (m). 为消除过滤液中残留细小颗粒物的散射, 利用 750 nm 进行零点校正^[18], 得到校正后的吸收系数 $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$.

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda') - a_{\text{CDOM}}(750)(\lambda/750) \quad (2)$$

总悬浮颗粒物的吸收采用定量滤膜技术 (QFT)^[19] 测定. 用直径为 0.7 μm 的 GF/F 玻璃纤维滤纸 (Whatman) 过滤 300 ~ 500 mL 的水样, 同时用两张空白 GF/F 滤膜作为参考. 在紫外分光光度计下测定其 380 ~ 800 nm 吸光度, 然后进行校正, 消除仪器间的差异, 再根据式 (3) 计算总悬浮颗粒物的吸收系数 $a_p(\lambda)$:

$$a_p(\lambda) = 2.303 \times \frac{S}{V} \times D_s(\lambda) \quad (3)$$

式中, V 为过滤水样的体积 (m^3), S 为过滤在滤膜上的有效面积 (m^2), $D_s(\lambda)$ 为滤膜上悬浮颗粒物的吸光度.

采用 0.1% 的 NaClO 溶液对测试过的 $a_p(\lambda)$ 过滤膜进行漂白, 然后测量每张过滤膜的吸光度, 根据式 (3) 计算出非藻类颗粒物的吸收系数 $a_d(\lambda)$, 浮游藻类的吸收系数 $a_{\text{ph}}(\lambda)$ 通过式 (4) 得出.

$$a_{\text{ph}}(\lambda) = a_p(\lambda) - a_d(\lambda) \quad (4)$$

Chla 浓度的测定: 通过 90% 丙酮溶液进行萃取, 并采用 UV-3600 紫外分光光度计测定波长为 630、647、664 和 750 nm 的吸光度, 进而计算 Chla 浓度^[20]. DOC 浓度的测定采用岛津 TOC 仪来测定. 悬浮物浓度通过灼烧称重法测定^[21]. 浊度 (turbidity, Tur) 通过紫外分光光度计测定.

1.4 数据预处理

基于最小二乘法进行非线性拟合得到 CDOM 在某段波长的吸收曲线斜率 (S)^[18], 如计算公式

(5) 所示:

$$a_{\text{CDOM}}(\lambda) = a_{\text{CDOM}}(\lambda_0) \exp[S(\lambda_0 - \lambda)] \quad (5)$$

式中, $a_{\text{CDOM}}(\lambda)$ 为 CDOM 在特定波长的吸收系数; λ_0 为参考波长, λ 为波长; 本文选用 275 ~ 295 nm 波段得到 $S_{275-295}$.

SUVA₂₅₄: 为在 254 nm 处 UV 的吸光度与 DOC 浓度之比^[22], 计算方法如式 (6) 所示:

$$\text{SUVA}_{254} = A(254)/\text{DOC} \quad (6)$$

1.5 统计与分析

采用 SPSS 25.0 软件进行数据统计分析, 使用单因素方差分析 (ANOVA) 检验差异的显著性; Orgin 9.0 进行相关性分析和统计分析; CANOCO 5.0 软件进行冗余分析; S 值则是基于 Matlab 计算得出.

2 结果与讨论

2.1 水质状况

陕蒙黄土高原区水体水质参数存在显著差异 (图 2). 该区水体的 pH 偏高, 特别是鄂尔多斯高原内流区的咸水湖, 均值为 9.61, 显著高于淡水湖 ($P < 0.01$). 主要是由于黄土高原位于半干旱气候地区, 降雨量少, 蒸发强烈, 水体矿化程度高造成水体 pH 整体偏高. 河流 Chla 变化显著, 最大值为 156.57 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 最小值接近于 0 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 河流 Chla 浓度出现一个极大值点, 位于芦河, 其流经靖边县、横山县, 主要是因为该点周边处于人口聚居区, 受农业施肥、工业及生活污水排放的影响较大, 水体污染严重, 导致该点 Chla 浓度较高^[23]. 若排除该点, 河流 Chla 均值为 5.02 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 仍高于湖泊 Chla 浓度 4.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, 咸水湖 Chla 浓度 (4.55 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 与淡水湖 (4.54 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) 数值相近. 湖泊 EC (8 899.61 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 高于河流 (1 075.67 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), 咸水湖则明显高于淡水湖, 与前人研究结果一致^[24]. EC 是反映水体中含盐量的重要指标^[25], 受气候条件影响, 湖泊含盐量大, 矿化度高. 陕蒙黄土高原地区河湖 DOC 浓度差异显著 ($P < 0.01$), 湖泊 DOC 浓度 (117.89 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 远大于河流 (17.55 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), 而咸水湖 (219.51 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 明显高于淡水湖 (16.25 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). 前人研究表明, 半干旱气候地区水体中 DOC 与碱度、EC 正相关^[26], 咸水湖的高碱度增加了溶解有机物的溶解度从而导致 DOC 浓度较高^[27]. 受黄土高原地区蒸发浓缩与降雨的影响, 本文水体 DOC 浓度高于处于湿润季风气候的太湖 (12.09 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)^[28]. 另外, 采样点周围土地利用类型多为草地, 有机质含量较高, 土壤中的有机碳随地表径流和下渗作用造成水体中 DOC 浓度较高. 不同

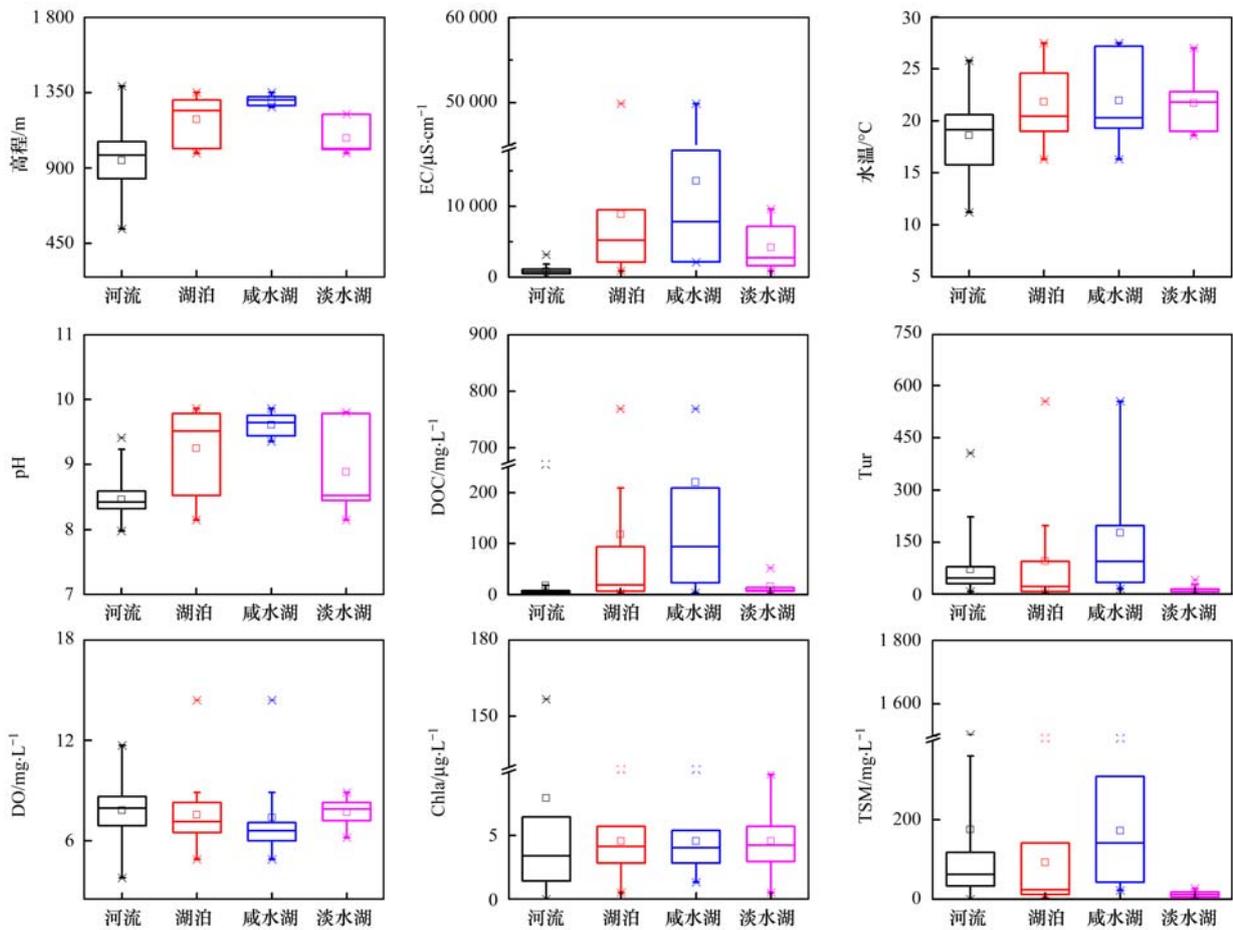


图 2 河流、湖泊、咸水湖和淡水湖水质参数的统计

Fig. 2 Statistics of water quality parameters of rivers and lakes (including saline and freshwater lakes)

类型水体 TSM 与 Tur 浓度的差异十分显著, 湖泊浊度(95.59)高于河流(70.91), 咸水湖浊度(177.26)明显高于淡水湖(13.93) ($P < 0.01$). 河流 TSM 浓度为 $176.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 高于湖泊($92.82 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$); 咸水湖 TSM 浓度为 $172.66 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 远高于淡水湖($12.98 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 但并不具有统计学上的显著性($P > 0.1$). 陕蒙黄土高原区水体悬浮物具有浓度偏高, 变化范围大的特点, 与前人研究结果差异显著^[29]. 这主要是由于本研究区位于黄河中游, 受降雨和季风影响为粗沙多沙区, 水土流失严重, 水体含沙量较大^[30]; 陕蒙黄土高原沙尘天气较频繁, 春季平均风速较大, 强风造成水底沉积物的再悬浮, 使得 TSM 浓度较高^[31].

2.2 CDOM 的吸收特征

陕蒙黄土高原地区河流与湖泊 CDOM 吸收光谱曲线变化趋势基本一致, 即在短波段(280 ~ 500 nm)之间随波长的增加呈指数衰减, 在 750 nm 之后基本为 0(图 3). 河流与湖泊、咸淡水湖之间 CDOM 吸收特性表现出较大的差异性, 咸水湖 CDOM 吸收变化幅度显著, 而淡水湖 CDOM 吸收变化幅度较小. 本文以 CDOM 在 440 nm 处的吸收系数表

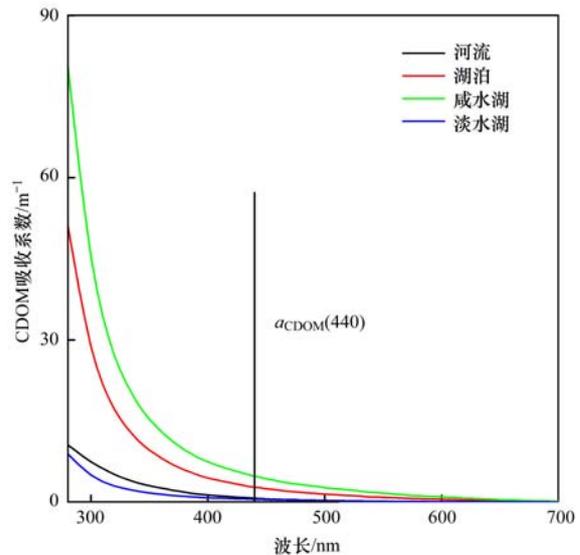


图 3 河流、湖泊、咸水湖和淡水湖 CDOM 光谱曲线

Fig. 3 CDOM spectral absorption characteristics of rivers and lakes (including saline and freshwater lakes)

CDOM 的浓度, 通过对比分析发现河流 CDOM 浓度明显低于湖泊, 而咸水湖 CDOM 浓度高于淡水湖. CDOM 浓度较高的样品多采集于鄂尔多斯内流区的咸水湖, 出现这种现象的主要原因是内流区地形封

闭,地势略高,咸水湖没有外源河流的注入,主要靠少量降雨和地下水补给,加之蒸发较大,使得咸水湖 CDOM 得以浓缩,表现出较高的 CDOM 浓度。

本文利用各组分对水体的吸收贡献率来研究高浑浊水体中 CDOM 吸收在总吸收中所占比例的大小。水体对光的吸收受纯水、浮游藻类、非藻类颗粒物和 CDOM 共同作用,在 440 nm 波段,纯水的吸收是常数且非常小,可以忽略不计,因此本文只考虑 CDOM、非藻类颗粒物及浮游藻类吸收对水体吸收的贡献率(图 4)。对于陕蒙黄土高原区水体来说,在 440

nm 处,对河流水体的总吸收起决定性作用的是非藻类颗粒物,其次是 CDOM,贡献率为 31%;咸水湖水体主要是以非藻类颗粒物和 CDOM 的贡献为主,CDOM 对咸水湖水体总吸收的贡献率为 40%;CDOM 对淡水湖水体总吸收的贡献达 44%,是主要的贡献者。另外,河流与咸水湖泊浮游藻类对水体吸收贡献率均为 11%,淡水湖浮游藻类对水体吸收贡献率为 19%,说明不同组分吸收贡献率从一定程度上衡量太阳光的有效利用率^[32],进而可以说明淡水湖对太阳光的有效利用率高于咸水湖,高于浑浊河流。

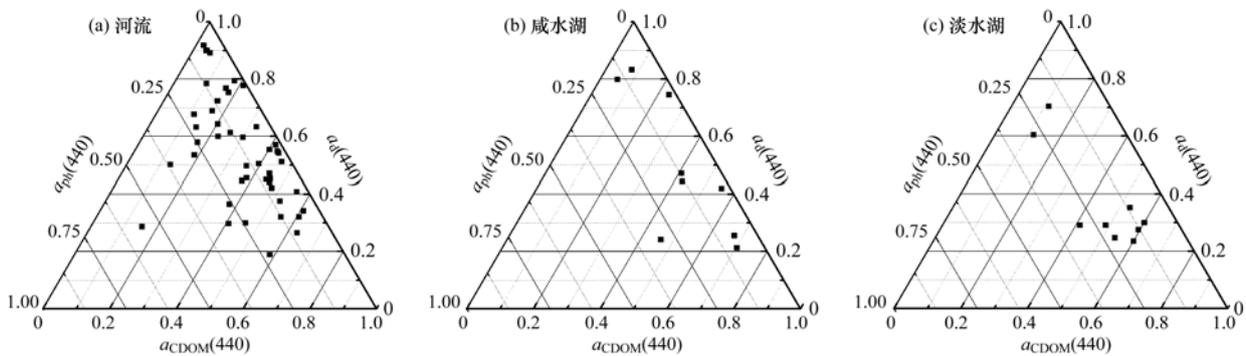


图 4 河流、咸水湖、淡水湖各组分吸收系数在 440 nm 处对总吸收系数的相对贡献率

Fig. 4 Relative contribution rate of the absorption coefficient of each component of rivers, saline lakes, and freshwater lakes to the total absorption coefficient at 440 nm

2.3 CDOM 来源分析

本文基于 CDOM 吸收光谱斜率 S 值和 $SUVA_{254}$ 对 CDOM 的组成和来源进行解析。根据前人研究, S 值可以反映 CDOM 组成物质的分子量大小,进而表征 CDOM 来源的差异^[33],而 $SUVA_{254}$,则可以反映 CDOM 的芳香性程度和腐殖质程度^[22,34]。不同吸收波段及拟合方法所获得的 CDOM 的 S 值相差较大,较短波段的拟合对 CDOM 光谱变化较敏感,特别是在 280 nm 附近紫外波段的 CDOM 吸光度的衰减明显,因此本文选用 $S_{275-295}$ 表征 CDOM 的组成和来源。本文中河流与湖泊的 $S_{275-295}$ 的变化范围(均值)分别为 $0.012 \sim 0.022 \text{ nm}^{-1}$ (0.017 nm^{-1}) 和 $0.011 \sim 0.031 \text{ nm}^{-1}$ (0.021 nm^{-1}), $P < 0.01$, 见图 5。表

明湖泊 CDOM 的分子量小于河流。河流流经范围广,地表径流携带大量土壤中的有机质进入河流,进而使河流表现出较大的分子量;而湖泊受外源输入影响较小,从而表现出较河流小的分子量。咸、淡水湖 $S_{275-295}$ 变化范围(均值)分别为 $0.011 \sim 0.031 \text{ nm}^{-1}$ (0.022 nm^{-1}) 和 $0.018 \sim 0.025 \text{ nm}^{-1}$ (0.021 nm^{-1}),说明咸水湖 CDOM 的分子量较淡水湖更小,与前人研究结果一致,即湖泊中盐分含量越大,水体中 CDOM 的分子量越小^[35]。另外,咸水湖位于内流区,海拔较高,紫外辐射强烈,光漂白作用较强,将大分子的 CDOM 分解成小分子物质^[36]。与其他高原河流对比发现,本研究中河流 $S_{275-295}$ 小于呼伦贝尔高原河流的 $S_{275-295}$ (0.019 nm^{-1}),主要是因为黄土高

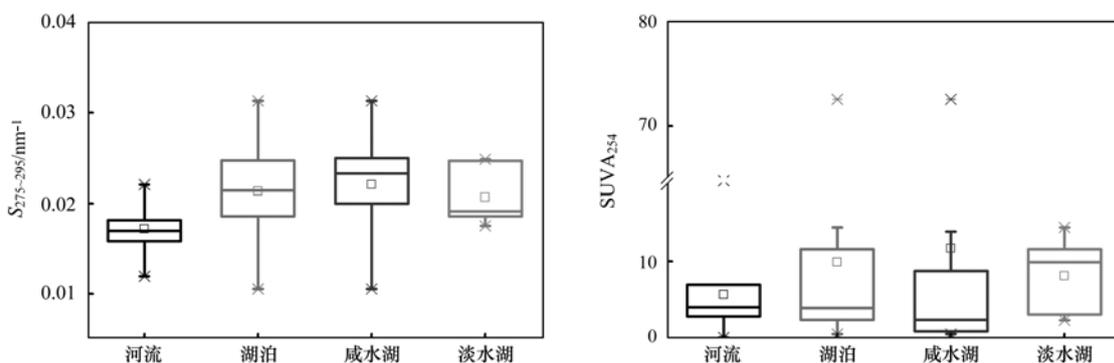


图 5 河流、湖泊、咸水湖和淡水湖的 $S_{275-295}$ 和 $SUVA_{254}$

Fig. 5 The $S_{275-295}$ and $SUVA_{254}$ in rivers and lakes (including saline and freshwater lakes)

原植被覆盖率低,水土流失严重,土壤中大分子腐殖质物质对河流的输入导致分子量较大^[24].另外,陕蒙黄土高原河流 $S_{275-295}$ 与川西高原河流白河 $S_{275-295}$ 变化范围(0.012 ~ 0.018 nm^{-1}) 相接近^[37].陕蒙黄土高原河湖水体 SUVA_{254} 差异较大,但不具有显著性差异.河流 SUVA_{254} 明显高于湖泊,淡水湖 SUVA_{254} 高于咸水湖,说明河流 CDOM 的芳香性和腐殖性高于湖泊,而淡水湖 CDOM 的芳香性和腐殖性则高于咸水湖,进而表明河流 CDOM 分子量大于湖泊,咸水湖 CDOM 分子量小于淡水湖,与 $S_{275-295}$ 得到的结果一致.

2.4 水质参数对 CDOM 光学特性的影响

为确定水质参数对 CDOM 光学特性的影响,本文基于 CANOCO5.0 软件对水质参数与表征 CDOM 光学特性的参数进行冗余分析(redundancy analysis, RDA),找出对 CDOM 影响较为显著的水质参数.为了使参数呈现正态分布,本文对原始数据进

行 $\lg(x+1)$ 的转换,并剔除偏相关系数大于 0.8 和膨胀因子大于 20 的水质因子^[38-40],同时用 999 次的 Monte Carlo 检验来验证变量的显著性.根据 RDA 分析结果显示(图 6),河流与湖泊第一排序轴特征值分别为 29.4% 和 54.2%,第二排序轴特征值为 5.8% 和 7.2%;咸水湖与淡水湖第一排序轴特征值分别为 67.9% 和 95.3%,第二排序轴为 32.1% 和 4.7%.

本研究结果表明,河流 Chla 与 CDOM 正相关(表 1),说明河流 CDOM 部分来源于浮游植物的降解产物.湖泊 Chla 与 CDOM 不存在相关性,主要是因为湖泊较高的 pH 抑制浮游植物的生长,浑浊水体的 TSM、Tur 影响水下光照条件,从而影响湖泊中浮游植物的初级生产力^[41].陕蒙高原河湖水体 DOC 与 CDOM 之间表现出不同的相关性,河流 DOC 与 CDOM 之间不存在相关性,而湖泊 DOC 与 CDOM 相关性显著,特别是咸水湖(表 2).不同类型水体 DOC

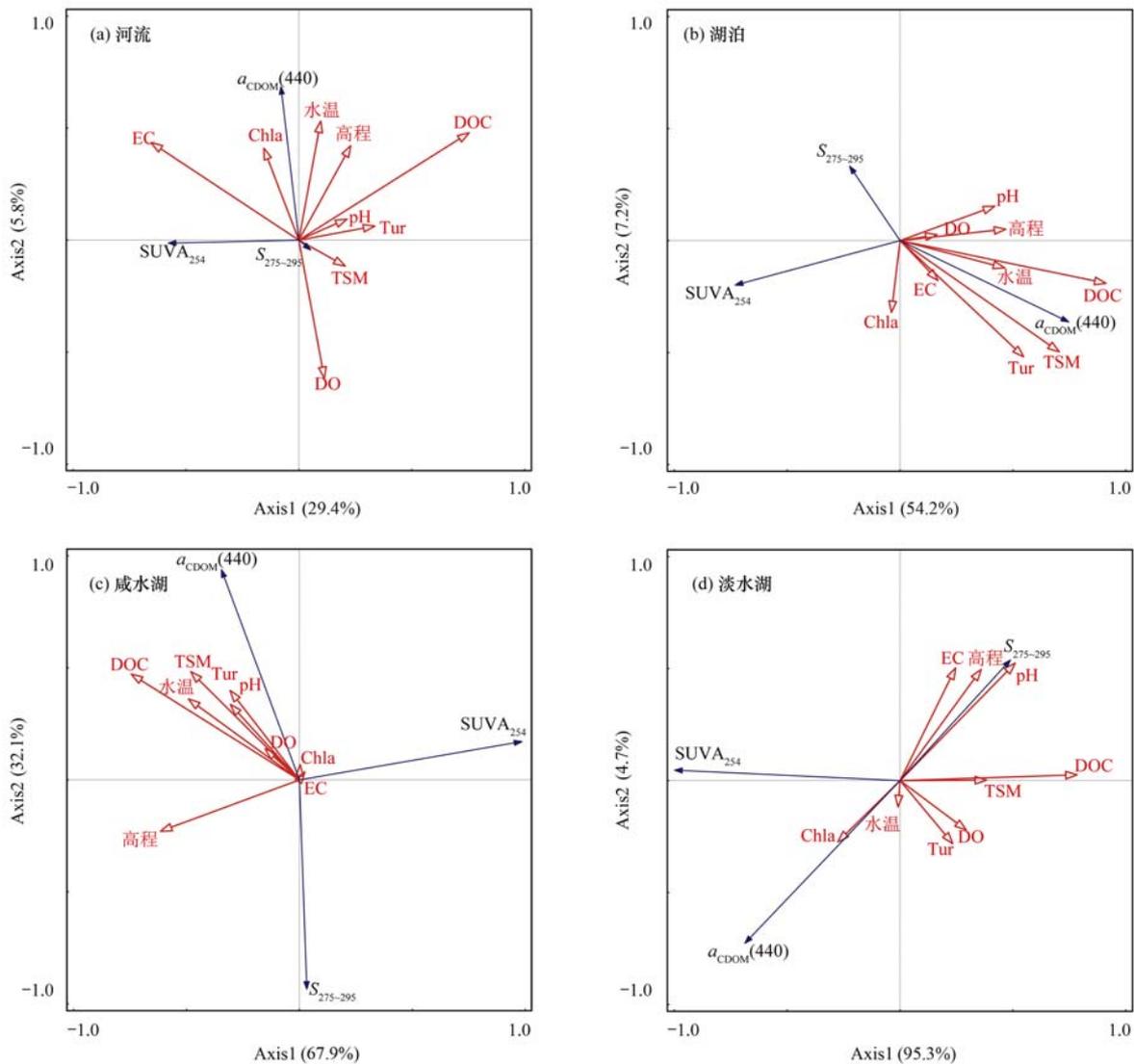


图 6 河流、湖泊、咸水湖和淡水湖 CDOM 光学参数与水质参数的冗余分析

Fig. 6 Redundancy analysis of CDOM optical parameters and water quality parameters of rivers and lakes (including saline and freshwater lakes)

与 CDOM 之间相关性的差异主要是因为强烈紫外辐射引起的光漂白作用,使 CDOM 降解产生更多无色的 DOC^[42],从而影响 DOC 与 CDOM 之间关系.对于海洋、近岸水体及内陆水体 CDOM 与 DOC 的相关性来说,其相关程度因区域特征而异^[43].此外也有研究表明,DOC 与 CDOM 的相关性与 DOM 的来源有关^[44].

表 1 河流、湖泊 CDOM 光学特征参数与水质参数相关分析¹⁾

Table 1 Correlations between CDOM optical characteristic parameters and water quality parameters of rivers and lakes

参数	河流/湖泊		
	$a_{\text{CDOM}}(440)$	$S_{275-295}$	SUVA_{254}
高程	0.27/0.28	-0.17/0.41	0.03/0.01
pH	0.04/0.23	0.10/0.39	-0.21/-0.02
DO	-0.47**/0.15	0.12/0.03	-0.23/-0.15
水温	0.40**/0.40	0.08/-0.29	0.11/-0.18
DOC	0.26/0.77**	0.06/-0.18	0.21/-0.29
Chla	0.31*/0.03	0.03/-0.25	0.01/0.08
EC	0.38**/0.03	0.01/0.16	0.37**/0.22
Tur	-0.02/0.60**	-0.12/-0.21	-0.17/-0.02
TSM	-0.11/0.69**	-0.17/-0.18	-0.15/-0.06

1) ** 表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著,* 表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著,下同

表 2 咸水湖、淡水湖 CDOM 光学特征参数与水质参数相关分析

Table 2 Correlations between CDOM optical characteristic parameters and water quality parameters of saline and freshwater lakes

参数	咸水湖/淡水湖		
	$a_{\text{CDOM}}(440)$	$S_{275-295}$	SUVA_{254}
高程	0.19/-0.59	0.40/0.97**	-0.37/-0.27
pH	0.32/-0.71*	-0.20/0.996**	-0.12/-0.43
DO	0.19/-0.02	0.00/0.37	-0.13/-0.31
水温	0.49/0.08	-0.16/-0.73*	-0.22/-0.06
DOC	0.74*/-0.55	-0.35/0.77*	-0.39/-0.72*
Chla	0.04/0.36	-0.08/-0.62	0.07/0.24
EC	-0.10/-0.52	0.02/0.95**	0.20/-0.17
Tur	0.54/0.02	-0.37/-0.36	-0.09/-0.27
TSM	0.66/-0.29	-0.37/-0.32	-0.16/-0.39

Tur 可反映水体中悬浮物的变化,Tur 不仅与水体中泥沙有关,还与水中浮游植物、微生物有关^[45].前人研究表明,Tur 与 TSM 浓度具有正线性关系,可利用浊度建立模型反演悬浮物的浓度,分析悬浮物浓度的分布规律^[46,47],本文中 Tur 与 TSM 具有显著正相关,与前人研究结果一致.河流 TSM、Tur 与 CDOM 无显著相关性,但较高的 TSM 浓度说明陆源是河流 CDOM 来源之一.湖泊 TSM、Tur 与 CDOM 显著相关,而咸、淡水湖 TSM、Tur 与 CDOM 均无相关性.这可能是因为本文在咸水湖、淡水湖选取采样点数据量较少,数据间梯度较小,影响了咸淡水湖 TSM、Tur 与 CDOM 之间的关系.

河流 CDOM 和 DO 呈现显著负相关,主要是因

为 CDOM 光降解的小分子物质被浮游植物吸收利用,而浮游植物的新陈代谢及有机物的降解均需耗氧,影响 CDOM 吸收.本文中河流 EC 与 CDOM 和 SUVA_{254} 均呈显著正相关,与前人研究结果一致^[48].淡水湖 EC 与 $S_{275-295}$ 呈显著正相关($P < 0.01$).淡水湖来源主要靠黄河补给,补给水中的含大分子物质对 Cl^- 离子具有较强的吸附能力^[49].咸水湖 EC 与 $S_{275-295}$ 无明显相关性是由于咸水湖为内流湖,无河水补给;另外,咸水湖中较高的 Tur 会对水中颗粒物 and CDOM 的聚合与分解产生影响,从而间接影响 EC 与 CDOM 的相关性^[24].

3 结论

(1) 陕蒙黄土高原河流与湖泊、咸淡水湖之间 pH 和 DOC 均呈现显著差异($P < 0.01$);而河湖水体 EC、Tur 和 TSM 差异显著,但不具有统计学上的显著性($P > 0.1$).

(2) 陕蒙黄土高原区河湖 CDOM 吸收光谱曲线变化趋势相似,CDOM 光学吸收特性差异显著.湖泊 CDOM 浓度高于河流,而咸水湖 CDOM 浓度高于淡水湖.淡水湖对光的有效利用率高于咸水湖,高于浑浊河流.

(3) 基于 $S_{275-295}$ 分析发现,分子量因高程而异,湖泊分子量小于河流,咸水湖分子量小于淡水湖.由 SUVA_{254} 得出,河流陆源腐殖质输入比湖泊多,淡水湖陆源腐殖质输入比咸水湖多.

(4) 通过冗余分析发现,河流和湖泊水质参数累积方差解释率分别为 35.2% 和 61.4%,咸淡水湖均达到 100%;DO、水温和 EC 对河流 CDOM 光学特性影响大($P < 0.01$)而 DOC、TSM 和 Tur 对湖泊 CDOM 光学特性的影响较大($P < 0.01$);咸水湖水体 DOC 以及淡水湖水体的 pH 对 CDOM 吸收系数存在较强影响($P < 0.05$).

参考文献:

- [1] 张柳青,彭凯,周蕾,等.南水北调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征[J].环境科学,2019,40(7):3018-3029.
Zhang L Q, Peng K, Zhou L, et al. Characterizing chromophoric dissolved organic matter in key lakes in the middle reaches of the east route of the South-North Water Diversion Project [J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3018-3029.
- [2] 谢旭,陈芸芝.基于 PSO-RBF 神经网络模型反演闽江下游水体悬浮物浓度[J].遥感技术与应用,2018,33(5):900-907.
Xie X, Chen Y Z. Retrieval of total suspended matter in the lower of Minjiang River based on PSO-RBF [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 900-907.
- [3] 郭子扬,李畅游,史小红,等.寒旱区呼伦湖水体叶绿素 a 含量的时空分布特征及其影响因子分析[J].生态环境学报,2019,28(7):1434-1442.

- Guo Z Y, Li C Y, Shi X H, *et al.* Spatial and temporal distribution characteristics of chlorophyll a content and its influencing factor analysis in Hulun Lake of cold and dry areas [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, **28**(7): 1434-1442.
- [4] 周亚明. 典型内陆水体有色可溶性有机物遥感反演[D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- Zhou Y M. Remote sensing inversion chromophoric dissolved organic matter in typical inland water [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2015.
- [5] 刘振宇, 崔廷伟, 李佳, 等. 黄河口悬浮物浓度 Landsat8 OLI 多波段反演研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1579-1585.
- Liu Z Y, Cui T W, Li J, *et al.* Suspended particle concentration retrieval in Yellow River Estuary using multi-band of Landsat8 OLI[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1579-1585.
- [6] 周媛, 郝艳玲, 刘东伟, 等. 基于 Landsat 8 影像的黄河口悬浮物质量浓度遥感反演[J]. *海洋学研究*, 2018, **36**(1): 35-45.
- Zhou Y, Hao Y L, Liu D W, *et al.* Estimation of suspended particulate matter concentration based on Landsat 8 data in the Yellow River Estuary[J]. *Journal of Marine Sciences*, 2018, **36**(1): 35-45.
- [7] 张棋斐, 吴志峰, 解学通. 河口及近岸海域水体叶绿素浓度反演方法综述[J]. *生态科学*, 2017, **36**(5): 215-222.
- Zhang Q F, Wu Z F, Xie X T. Research progress of the inversion algorithm of chlorophyll-a concentration in estuaries and coastal waters[J]. *Ecological Science*, 2017, **36**(5): 215-222.
- [8] 冯龙庆. 基于高光谱遥感的太湖水体藻蓝素和 CDOM 浓度估算模型研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
- Feng L Q. Modelling phycocyanin and CDOM concentration from hyperspectral reflectance data in Lake Taihu [D]. Nanning: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [9] 孙璐. 基于 GOCI 影像的长江口及邻近海域有色溶解有机物 (CDOM) 遥感反演及其逐时变化分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- Sun L. Remote sensing inversion in the Yangtze Estuary and adjacent waters and its diurnal variation analysis of CDOM based on GOCI image data [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [10] Rochelle-Newall E J, Fisher T R. Chromophoric dissolved organic matter and dissolved organic carbon in Chesapeake Bay [J]. *Marine Chemistry*, 2002, **77**(1): 23-41.
- [11] 苏文, 姜广甲, 孔繁翔, 等. 内陆水体有色溶解有机物的变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, **24**(1): 114-121.
- Su W, Jiang G J, Kong F X, *et al.* Characteristics of chromophoric dissolved organic matter in inland waters [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2015, **24**(1): 114-121.
- [12] Loiselle S A, Bracchini L, Dattilo A M, *et al.* The optical characterization of chromophoric dissolved organic matter using wavelength distribution of absorption spectral slopes [J]. *Limnology and Oceanography*, 2009, **54**(2): 590-597.
- [13] 赵莹. 内陆水体 CDOM 荧光特性及遥感反演研究[D]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所), 2018.
- Zhao Y. Research on fluorescence properties and remote retrieval of CDOM in inland waters[D]. Changchun: Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [14] 殷燕, 吴志旭, 张运林, 等. 新安江水库夏季 CDOM 吸收光谱特征及来源分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3207-3214.
- Yin Y, Wu Z X, Zhang Y L, *et al.* Absorption characteristics and sources analysis of CDOM in Xin'anjiang Reservoir in summer [J]. *China Environmental Science*, 2014, **34**(12): 3207-3214.
- [15] 邵田田, 李柳阳, 王涛, 等. 辽河流域河流秋季 CDOM 光学特性及影响因素研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(4): 1558-1568.
- Shao T T, Li L Y, Wang T, *et al.* CDOM optical characteristics and influences factors affected on them for rivers in Liaohe River watershed in autumn[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(4): 1558-1568.
- [16] 张运林, 张恩楼, 刘明亮. 云南高原湖泊有色可溶性有机物和颗粒物光谱吸收特性[J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(2): 255-263.
- Zhang Y L, Zhang E L, Liu M L. Spectral absorption properties of chromophoric dissolved organic matter and particulate matter in Yunnan Plateau lakes[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(2): 255-263.
- [17] Ferrari G M, Dowell M D. CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the Southern Baltic Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1998, **47**(1): 91-105.
- [18] 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.
- [19] Mitchell B G. Algorithms for determining the absorption coefficient for aquatic particulates using the quantitative filter technique[A]. In: *Proceedings of SPIE 1302, Ocean Optics X* [C]. Orlando, FL: SPIE, 1990. 137-148.
- [20] Song K S, Li L, Tedesco L P, *et al.* Remote estimation of chlorophyll-a in turbid inland waters: three-band model versus GA-PLS model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, **136**: 342-357.
- [21] 张运林, 秦伯强, 陈伟民, 等. 太湖水体中悬浮物研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2004, **13**(3): 266-271.
- Zhang Y L, Qin B Q, Chen W M, *et al.* A study on total suspended matter in Lake Taihu[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2004, **13**(3): 266-271.
- [22] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(20): 4702-4708.
- [23] 杨海江, 王建宇, 石磊, 等. 模糊数学评价法在芦河水质评价中的应用[J]. *现代农业科技*, 2016, (10): 178-180.
- Yang H J, Wang J Y, Shi L, *et al.* Application of fuzzy mathematical method in assessment of Lo River water quality[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016, (10): 178-180.
- [24] Wen Z D, Song K S, Zhao Y, *et al.* Influence of environmental factors on spectral characteristics of chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in Inner Mongolia Plateau, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2015, **12**(6): 5895-5929.
- [25] 崔凤丽, 李畅游, 史小红, 等. 乌梁素海主要离子季节变化特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, **27**(8): 137-142.
- Cui F L, Li C Y, Shi X H, *et al.* Seasonal changing

- characteristics of the major ions in the lake Wuliangshui[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, **27**(8): 137-142.
- [26] Song K S, Zang S Y, Zhao Y, *et al.* Spatiotemporal characterization of dissolved carbon for inland waters in semi-humid/semi-arid region, China[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, **17**(10): 4269-4281.
- [27] Curtis P J, Adams H E. Dissolved organic matter quantity and quality from freshwater and saltwater lakes in east-central Alberta [J]. *Biogeochemistry*, 1995, **30**(1): 59-76.
- [28] 江俊武, 李帅东, 沈胤胤, 等. 夏季太湖 CDOM 光学特性空间差异及其来源解析[J]. *环境科学研究*, 2017, **30**(7): 1020-1030.
Jiang J W, Li S D, Shen Y Y, *et al.* Spatial differences of optical properties of CDOM and their source apportionment in Taihu Lake in summer[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, **30**(7): 1020-1030.
- [29] 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.
Sun D Y, Li Y M, Wang Q, *et al.* Differences of inherent optical properties of inland lake water body in typical seasons [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, **19**(5): 1117-1124.
- [30] 汪丽娜, 穆兴民, 张晓萍, 等. 黄河流域粗泥沙集中来源区径流及输沙特征分析[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(10): 60-65.
Wang L N, Mu X M, Zhang X P, *et al.* The changing characters of water and sediment in coarse sand source regions of the Loess Plateau[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, **22**(10): 60-65.
- [31] 池梦雪, 张宝林, 王涛, 等. 2000~2018 年黄土高原沙尘天气遥感监测及尘源分析[J]. *科学技术与工程*, 2019, **19**(18): 380-388.
Chi M X, Zhang B L, Wang T, *et al.* Remote sensing and source analysis of Aeolian dust in Loess Plateau during 2000-2018[J]. *Science Technology and Engineering*, 2019, **19**(18): 380-388.
- [32] 柳彩霞, 郭子祺, 张宝钢, 等. 太湖流域昆承湖春季颗粒物和有可溶性有机物吸收特性[J]. *湖泊科学*, 2011, **23**(5): 773-782.
Liu C X, Guo Z Q, Zhang B G, *et al.* Absorption characteristics of particulates and the CDOM in spring in Lake Kuncheng, Taihu Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2011, **23**(5): 773-782.
- [33] 姚昕, 吕伟伟, 刘延龙, 等. 东平湖 CDOM 吸收光谱特性及其来源解析[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(8): 3079-3086.
Yao X, Lü W W, Liu Y L, *et al.* Absorption characteristics and source analysis of the CDOM in Dongping Lake [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(8): 3079-3086.
- [34] Chin Y P, Aiken G, O'Loughlin E. Molecular weight, polydispersity, and spectroscopic properties of aquatic humic substances[J]. *Environmental Science & Technology*, 1994, **28**(11): 1853-1858.
- [35] 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.
- [36] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis[J]. *Water Research*, 2019, **150**: 403-417.
- [37] 刘堰杨, 秦纪洪, 孙辉. 川西高海拔河流中溶解性有机质 (DOM) 紫外-可见光吸收光谱特征[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(9): 3662-3671.
Liu Y Y, Qin J H, Sun H. UV-VIS spectral characteristics of dissolved organic matter (DOM) of the natural alpine rivers in the western Sichuan Province [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(9): 3662-3671.
- [38] 王涛, 邵田田, 梁晓文, 等. 夏季高原河流 CDOM 光学特性、组成及来源研究[J]. *环境科学学报*, 2019, **39**(3): 668-678.
Wang T, Shao T T, Liang X W, *et al.* Optical characteristics, composition and sources of colored dissolved organic matter in plateau rivers in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, **39**(3): 668-678.
- [39] 李然然, 章光新, 张蕾. 查干湖湿地浮游植物与环境因子关系的多元分析[J]. *生态学报*, 2014, **34**(10): 2663-2673.
Li R R, Zhang G X, Zhang L. Multivariate analysis of the relations between phytoplankton assemblages and environmental factors in Chagan Lake Wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(10): 2663-2673.
- [40] 张树梓, 李梅, 张树彬, 等. 塞罕坝华北落叶松人工林天然更新影响因子[J]. *生态学报*, 2015, **35**(16): 5403-5411.
Zhang S Z, Li M, Zhang S B, *et al.* Factors affecting natural regeneration of *Larix principis-rupprechtii* plantations in Saihanba of Hebei, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(16): 5403-5411.
- [41] 李照. 长江口邻近海域浮游植物群落特征及其碳沉降研究 [D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
Li Z. Phytoplankton community and its related carbon sinking in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent waters [D]. Qingdao: The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2018.
- [42] 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.
Zhang Y L, Qin B Q. Feature of CDOM and its possible source in Meiliang bay and Da Taihu Lake in Taihu lake in summer and winter [J]. *Advances in Water Science*, 2007, **18**(3): 415-423.
- [43] 李思佳, 宋开山, 赵莹, 等. 查干湖和新立城水库秋季水体悬浮颗粒物和 CDOM 吸收特性[J]. *环境科学*, 2016, **37**(1): 112-122.
Li S J, Song K S, Zhao Y, *et al.* Absorption characteristics of particulates and CDOM in waters of Chagan Lake and Xinlicheng Reservoir in Autumn [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(1): 112-122.
- [44] 姜广甲, 马荣华, 段洪涛. 利用 CDOM 吸收系数估算太湖水体表层 DOC 浓度[J]. *环境科学*, 2012, **33**(7): 2235-2243.
Jiang G J, Ma R H, Duan H T. Estimation of DOC concentrations using CDOM absorption coefficients: a case study in Taihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(7): 2235-2243.
- [45] 周莉, 冯胜, 李忠玉, 等. 夏季太湖浊度分布特征及其在水-沉积物界面识别中的应用[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(10): 3108-3116.
Zhou L, Feng S, Li Z Y, *et al.* Characteristics of turbidity in summer in Lake Taihu and its application to the identification of water-sediment interface [J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(10): 3108-3116.
- [46] 翟世奎, 张怀静, 范德江, 等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. *环境科学学报*, 2005, **25**(5):

- 693-699.
Zhai S K, Zhang H J, Fan D J, *et al.* Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang Estuary and adjacent sea area [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, **25**(5): 693-699.
- [47] 鲍献文, 李真, 王勇智, 等. 冬、夏季北黄海悬浮物分布特征[J]. *泥沙研究*, 2010, (2): 48-56.
Bao X W, Li Z, Wang Y Z, *et al.* Sediment distribution features in the North Yellow Sea during summer and winter[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010, (2): 48-56.
- [48] Sieczko A, Peduzzi P. Origin, enzymatic response and fate of dissolved organic matter during flood and non-flood conditions in a river-floodplain system of the Danube (Austria) [J]. *Aquatic Sciences*, 2014, **76**(1): 115-129.
- [49] 张馨月, 马沛明, 高千红, 等. 三峡大坝上下游水质时空变化特征[J]. *湖泊科学*, 2019, **31**(3): 633-645.
Zhang X Y, Ma P M, Gao Q H, *et al.* Spatial-temporal variations of water quality in upstream and downstream of Three Gorges Dam[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, **31**(3): 633-645.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2019年11月19日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2018年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2018年度总被引频次11 644,影响因子2.130,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Evolution of the Distribution of PM _{2.5} Concentration in the Yangtze River Economic Belt and Its Influencing Factors	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, CAO Jun-ji, <i>et al.</i>	(1013)
Chemical Characteristics and Source Apportionment of Water-Soluble Ions in Atmosphere Aerosols over the East China Sea Island During Winter and Summer	FANG Yan, CAO Fang, FAN Mei-yi, <i>et al.</i>	(1025)
Analysis of Chemical Components and Sources of PM _{2.5} During Autumn and Winter in Yangquan City	WANG Cheng, YAN Yu-long, XIE Kai, <i>et al.</i>	(1036)
Chemical Compositions and Sources of <i>n</i> -Alkanes and Saccharides in PM _{2.5} from Taian City During the Summer	YI Ya-nan, HOU Zhan-fang, YANG Qian-cai, <i>et al.</i>	(1045)
Physical and Chemical Characteristics of Atmospheric Particles in Autumn in Mt. Huangshan	BIAN Yi-shu, YIN Yan, WANG Hong-lei, <i>et al.</i>	(1056)
Characteristics of Aerosol Optical Depth in the Urban Area of Beibei and Its Correlation with Particle Concentration	ZENG Wei, HAO Qing-ju, ZHAO Zhong-jing, <i>et al.</i>	(1067)
Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from Typical Industries in Zibo	WANG Yu-yan, WANG Xiu-yan, DU Miao, <i>et al.</i>	(1078)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of Atmospheric VOCs in Ezhou City	FU Yu-meng, YANG Hong-gang, LU Min-yu, <i>et al.</i>	(1085)
Producing Coefficients and Emission Coefficients of Volatile Organic Compounds from the Automobile Manufacturing Industry in Zhejiang Province	TENG Fu-hua, YANG Zhong-ping, DONG Shi-bi, <i>et al.</i>	(1093)
Pollution Characteristics of Volatile Organic Compounds Emission from the Metal Packaging Industry Based on Analysis of Process	WANG Di, NIE Lei, ZHAO Wen-juan, <i>et al.</i>	(1099)
Profile Characteristics of VOCs from Wood and Economic Crop Burning	NIU Zhen-zhen, KONG Shao-fei, YAN Qin, <i>et al.</i>	(1107)
Accounting Methods of VOCs Emission Associated with Production Processes in a Fine Chemical Industrial Park	YE Han-yun, TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun	(1116)
HONO Observation and Assessment of the Effects of Atmospheric Oxidation Capacity in Changzhou During the Springtime of 2017	SHI Xiao-wen, GE Yi-feng, ZHANG Yu-chan, <i>et al.</i>	(1123)
Analysis of Activity and Its Emissions Trend for Construction Equipment in China	PANG Kai-li, ZHANG Kai-shan, MA Shuai, <i>et al.</i>	(1132)
Air Pollutant Emission Inventory from LTO Cycles of Aircraft in the Beijing-Tianjin-Hebei Airport Group, China	HAN Bo, KONG Wei-kai, YAO Ting-wei, <i>et al.</i>	(1143)
Particle Size Distribution of PM Emission from In-use Gasoline and Diesel Vehicles	WANG Rui-ning, HU Qing-yao, REN Hong-juan, <i>et al.</i>	(1151)
Impact of Parameterization on the Estimation of Ammonia Emissions: A Case Study over the Yangtze River Delta	ZHANG Qi, HUANG Ling, YIN Si-jia, <i>et al.</i>	(1158)
Characteristics and Source Apportionment of Dustfall Pollution in the Coal Mine Area and Surrounding Areas of Wuhai City in Spring	WU Hong-xuan, SHI Chang-qing, ZHANG Yan, <i>et al.</i>	(1167)
Variations of Stable Oxygen and Deuterium Isotopes in River and Lake Waters During Flooding Season Along the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Regions	LI Jing, WU Hua-wu, ZHOU Yong-qiang, <i>et al.</i>	(1176)
Water Sources and Factors Controlling Hydro-chemical Compositions in the Yiluo River Basin	LIU Song-tao, ZHANG Dong, LI Yu-hong, <i>et al.</i>	(1184)
Chemical Evolution of Groundwater in the Tacheng Basin of Xinjiang in the Process of Urbanization	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i>	(1197)
Remote Sensing Monitoring on Spatial Differentiation of Suspended Sediment Concentration in a River-Lake System Based on Sentinel-2 MSI Imaging: A Case for Shengjin Lake and Connected Yangtze River Section in Anhui Province	WANG Hang-hang, WANG Jie, CUI Yu-huan	(1207)
CDOM Optical Characteristics and Related Environmental Factors of High-turbidity Waters on the Loess Plateau	LIANG Xiao-wen, SHAO Tian-tian, WANG Tao	(1217)
Effects of Artificial Destratification and Induced-natural Mixing on Water Quality Improvement in a Drinking Water Reservoir	WEN Cheng-cheng, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i>	(1227)
Effect of Filter Speed and Water Quality on Ammonia Removal in Groundwater Containing Iron, Manganese, and Ammonia at Low Temperature	ZHANG Jie, MEI Ning, LIU Meng-hao, <i>et al.</i>	(1236)
Long-term Variation Characteristics of Zooplankton Community Structure in Meiliang Bay, Lake Taihu	YANG Jia, ZHOU Jian, QIN Bo-qiang, <i>et al.</i>	(1246)
Community of Benthic Diatoms and Their Relationship with Aquatic Environmental Factors in the Tangwang River, China	XUE Hao, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i>	(1256)
Succession Characteristics and Water Quality Responsiveness Evaluation of FG and MBFG in Yanlong Lake Water Source Ecological Purification System	WANG Lian, LI Xuan, MA Wei-xing, <i>et al.</i>	(1265)
Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Output and Loss Flux in the Shipanqiu Watershed, Three Gorges Reservoir Area	CHEN Shi-qi, LONG Yi, YAN Dong-chun, <i>et al.</i>	(1276)
Effect of Optimized Fertilization and Biochar Application on Phosphorus Loss in Purple Soil Sloping Farmland	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LONG Yi, <i>et al.</i>	(1286)
Use of Iron-modified Calcite as an Active Capping Material to Control Phosphorus Release from Sediments in Surface Water Bodies	BAI Xiao-yun, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i>	(1296)
Preparation of Tea Waste Biochar and Its Application in Tetracycline Removal from Aqueous Solution	FAN Shi-suo, LIU Wen-pu, WANG Jing-tao, <i>et al.</i>	(1308)
Adsorption Characteristics of Sulfamethazine on Three Typical Porous High-temperature Modified Solid Waste Materials	WANG Jing, ZHU Xiao-li, HAN Zi-yu, <i>et al.</i>	(1319)
Sorption of Polybrominated Diphenyl Ethers by Virgin and Aged Microplastics	XU Peng-cheng, GUO Jian, MA Dong, <i>et al.</i>	(1329)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Ruxi Tributary of the Three Gorges Reservoir	FANG Zhi-qing, WANG Yong-min, WANG Xun, <i>et al.</i>	(1338)
Distribution and Risk Assessment of OCPs in Surface Water, Sediments, and Fish from Lake Gucheng and Inflow and Outflow Rivers	KAN Ke-cong, GU Xiao-hong, LI Hong-min, <i>et al.</i>	(1346)
Occurrence and Ecological Risk Assessment of Typical Persistent Organic Pollutants in Hengshui Lake	ZHANG Jia-wen, WEI Jian, LÜ Yi-fan, <i>et al.</i>	(1357)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Typical Organophosphate Esters in Beijing Municipal Wastewater Treatment Plant and the Receiving Water	ZHANG Zhen-fei, LÜ Jia-pei, PEI Ying-ying, <i>et al.</i>	(1368)
Advanced Nitrogen Removal Characteristics of Low Carbon Source Municipal Wastewater Treatment via Partial-denitrification Coupled with ANAMMOX	MA Bin, XU Xin-xin, GAO Mao-hong, <i>et al.</i>	(1377)
Stable Nitrite Accumulation and Phosphorus Removal from High-nitrate and Municipal Wastewaters in a Combined Process of Partial Denitrification and Denitrifying Phosphorus Removal (PD-DPR)	WANG Qiu-ying, YU De-shuang, ZHAO Ji, <i>et al.</i>	(1384)
Start-up of CANON Process and Short-cut Nitrification in a Pilot-scale MBBR Reactor	FU Kun-ming, YANG Zong-yue, LIAO Min-hui, <i>et al.</i>	(1393)
Influence of Antibiotics on the Denitrification Process of Antibiotic Resistant Denitrifying Bacteria and the Analysis of Microbial Community Structure	DAI Sha, LI Peng, PENG Wu-qing, <i>et al.</i>	(1401)
Aerobic Granular Sludge System with Multiple Influent-Aeration Operation Strategy	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, <i>et al.</i>	(1409)
Effect of Alkaline Sludge Fermentation Products on the Nitrification Process and Performance	QIU Sheng-jie, LIU Jin-jin, LI Xi-yao, <i>et al.</i>	(1418)
Effect of Sulfate on the Migration and Transformation of Methylmercury in Advanced Anaerobic Digestion of Sludge	HE Xiang-lin, LIU Ji-bao, YIN Yong-guang, <i>et al.</i>	(1425)
Spatial-temporal Variation and Source Change of Heavy Metals in the Cropland Soil in the Industrial City	LI Yan-ling, LU Yi-fu, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i>	(1432)
Assessment and Spatial Characteristics Analysis of Human Health Risk of Heavy Metals in Cultivated Soil	Ji Chao, HOU Da-wei, LI Fa-zhi, <i>et al.</i>	(1440)
Microbial Diversity and Physicochemical Properties of Rhizosphere Microenvironment in Saline-alkali Soils of the Yellow River Delta	ZHAO Jiao, XIE Hui-jun, ZHANG Jian	(1449)
Effects of Different Land Use Types on the Molecular Ecological Network of Soil Bacteria	LI Bing, LI Yu-shuang, WEI Jian-bing, <i>et al.</i>	(1456)
Responses of Soil Organic Carbon Fractions to Land Use Types in Hilly Red Soil Regions, China	ZHANG Xiao-fang, ZHENG Sheng-meng, XIA Yin-hang, <i>et al.</i>	(1466)
Effect of Organic Fertilizer and Inorganic Fertilizer Application on N ₂ O Emissions from Fluvo-aquic Soil in the North China Plain	SUN He-yang, WAN Zhong-mei, LIU De-yan, <i>et al.</i>	(1474)
Characteristics of Heavy Metal Absorption by Winter Wheat and Its Quantitative Relationship with Influencing Factors	WANG Yi-wen, RUI Yu-kui, LI Zhong-yang, <i>et al.</i>	(1482)
Effect of Calcium Magnesium Phosphate on Remediation Paddy Soil Contaminated with Cadmium Using Lime and Sepiolite	YAN De-mei, GUO Zhao-hui, HUANG Feng-lian, <i>et al.</i>	(1491)
Passivation and Remediation Effects and Mechanisms of Plant Residual Modified Materials on Lead-Contaminated Soils	FANG Ya-li, ZHU Zong-qiang, ZHAO Ning-ning, <i>et al.</i>	(1498)
Effects of Exogenous Spermidine on Seed Germination and As Uptake and Accumulation of Rice Under As ⁵⁺ Stress	LIU Shu-jin, HUANG Yi-zong, BAO Qiong-li, <i>et al.</i>	(1505)