

百方知库
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



2019

Vol.40 No.4
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM_{2.5}中碳质气溶胶污染特征 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM_{2.5}化学组分特征与来源解析 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM_{2.5}中元素特征及重金属健康风险评价 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O₃分析 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM_{2.5}中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘富雷, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化镧改性介孔稻壳生物炭除磷性能 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N₂O)浓度特征及影响因素 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH₄吸收规律 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明哈, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

生态净化系统中 DOM 光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例

马睿^{1,2}, 李璇^{1*}, 王莲^{1,2}, 王家新¹, 马卫星¹, 丁成^{1*}, 吴向阳²

(1. 盐城工学院环境科学与工程学院, 盐城 224000; 2. 江苏大学环境与安全工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了探究生态净化系统中溶解性有机物(DOM)的光学特性、空间分布特征及主要影响因子. 以盐龙湖生态净化系统为例, 取2017、2018年春季数据进行研究. 结果表明, 盐龙湖春季总磷、总氮、高锰酸盐指数浓度变化范围分别为0.05~0.25、1.25~2.75、3.99~7.17 mg·L⁻¹, 出水溶解氧升高至(11.93±1.31) mg·L⁻¹、浊度降低至(13.23±2.24) NTU, 而高锰酸盐指数变化不显著. 主成分分析(PCA)表明盐龙湖原水、预处理区水质与外源汇入有关; 而沉水植物区和深度净化区水质依赖于内源影响. 荧光指数、腐殖化指数及生物源指数分析综合发现水体中DOM主要是源于陆生植物与土壤输入, 腐殖化程度较低且新生的自生源DOM较多. PARAFAC模型将DOM可分为紫外光区类富里酸(239 nm, 304 nm/407 nm), 可见光区类富里酸(256 nm, 352 nm/439 nm), 色氨酸类蛋白质(276 nm/327 nm)和胡敏酸(292 nm, 395 nm/491 nm). 紫外吸收指数表明盐龙湖原水、预处理单元、挺水植物区DOM光谱强度波动较大, 沉水植物区、深度净化区DOM光谱强度较稳定. 水质参数中对DOM光学特性有影响的因素主要是透明度、溶解氧、电导率、总氮和藻细胞数.

关键词: 春季; 溶解性有机物(DOM); 生态净化系统; 光学特性; 影响因素

中图分类号: X122; X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1742-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808135

Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring

MA Rui^{1,2}, LI Xuan^{1*}, WANG Lian^{1,2}, WANG Jia-xin¹, MA Wei-xing¹, DING Cheng^{1*}, WU Xiang-yang²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224000, China; 2. School of Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: An investigation the optical properties and spatial distribution of dissolved organic matter (DOM) in an ecological purification system and the primary factors that affect the optical properties of the DOM was conducted. Taking the Yanlong Lake ecological purification system as an example, data from spring 2017 and 2018 were compared. The results show that the concentrations of total phosphorus and total nitrogen and the permanganate index in Yanlong Lake were 0.05-0.25, 1.25-2.75, and 3.99-7.17 mg·L⁻¹, respectively. In addition, the dissolved oxygen in the effluent of Yanlong Lake increased to (11.93±1.31) mg·L⁻¹, and the turbidity decreased to (13.23±2.24) NTU, while the change in the permanganate index was not significant. Principal component analysis (PCA) showed that the water quality of the Yanlong Lake raw water and water in the pre-treatment area was closely related to the inflow of exogenous sources, while the water quality in submerged plant areas and deep purification areas was dependent on endogenous effects. According to the fluorescence index, humification index, and biological source index analysis, it was found that there are new spontaneous sources of DOM in this body of water, the degree of humification is lower, and endogenous biological DOM is dominant. The PARAFAC model can be used to classify DOM into UV- fulvic acid-like components (239 nm, 304 nm/407 nm), visible light fulvic acid-like components (256 nm, 352 nm/439 nm), tryptophan-like protein (276 nm/327 nm) and humic acid (292 nm, 395 nm/491 nm). The UV absorption index indicates that the spectral intensity of DOM in the raw water, pretreatment unit, and emergent water plant area of Yanlong Lake fluctuates greatly, and the DOM spectral intensity of the submerged plant area and deep purification area is relatively stable. The factors affecting the optical properties of the DOM in terms of water quality parameters are mainly transparency, dissolved oxygen, conductivity, total nitrogen, and algae cell number.

Key words: spring; dissolved organic matter (DOM); ecological purification system; optical properties; influencing factor

溶解性有机物(dissolved organic matter, DOM)是天然水体的重要化学组分之一, 主要由一些具有芳香结构和脂肪链的碳氢化合物组成^[1,2]. 其主要有2个来源: 一是由水体微型生物经光合作用形成的内源DOM, 二是陆生植被腐烂降解后由河流等携带进入水体的陆源物质以及人类生产活动产生的DOM. 不同来源的DOM在物质化学结构组成和分子量级等方面存在显著差异, 进而影响细菌的可利

用性和碳素在水体中的迁移转化^[3]. He等^[4]的研究表明, 水体(如湖泊、水库以及河口)中的DOM呈季节性的空间变化, 同时非生物(水文因素、气

收稿日期: 2018-08-16; 修订日期: 2018-11-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51608466); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20160438, BK20160439)

作者简介: 马睿(1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微污染水源水处理, E-mail: maryjiangsu@163.com

* 通信作者, E-mail: lixuan8781687626@sohu.com; ycdingc@163.com

象参数和人类活动)和生物因素对淡水湿地的 DOM 分子组成有耦合作用. 目前,国内外有关 DOM 检测方法的研究中,三维荧光光谱和紫外吸收广受欢迎,其能够在不破坏原样品结构的条件下可以快速获取详细全面的 DOM 光谱学信息,同时具有操作方便、灵敏度高、选择性好等优点,是 DOM 表征方法的研究热点^[5,6]. 因为 DOM 关系着饮用水处理的多个方面,也是有害消毒副产物(DBPs)的主要前驱物^[7,8]. 因此 DOM 的光学特征的研究越来越多地应用于水源水体的水质监测中^[9,10].

以人工湿地为核心的水源生态净化系统拥有土壤、人工介质、植物及微生物的物理、化学与生物这 3 种协同作用的功能,其独特的生态环境使其水体 DOM 具有独特的性质和演化过程^[11]. 近年来,人们对人工湿地水体 DOM 的动态过程研究已有一些报道,但仍存在许多方面的不足. 第一,已有的研究结果主要是基于水库、河流、湖泊或自然湿地等得出的,少有对以人工湿地为主的生态净化系统进行探究. 第二,大多数研究只涉及 DOM 的光学性质,少有对水质参数中生态净化系统 DOM 产生主要作用的因子识别的研究^[12,13]. 盐龙湖为国内首座在平原上开挖的人工湿地湖泊,也是我国目前规模最大的饮用水源地源水生态净化工程. 由于春季水量较大且运行稳定,所以本文对春季盐龙湖中主要水质因子与 DOM 的光学因子进行测定,并基于 PARAFAC 模型对 DOM 三维荧光光谱进行分析,以期探求生态净化系统中 DOM 的组成与来源,最后利用 Pearson 相关性分析,找出对 DOM 光学特性影响较大的要素,这对保障饮用水水质安全具有重要的现实意义.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

盐龙湖水源生态净化系统位于江苏省盐城市的盐都区龙冈镇境内,占地面积 222.87 hm²,净化水量为 600 000 m³·d⁻¹,如图 1 所示,该系统先通过泵站引取蟒蛇河原水,然后经过预处理区、生态湿地净化区(包括挺水植物区和沉水植物区),最后进入深度净化区蓄水并通过输水泵站向市区水厂供水. 预处理区占地面积 20.34 hm²(305 亩),分为增氧区、沉淀区、人工介质区等,停留时间 48 h. 挺水植物净化区采用国内首创的立体复合式表流湿地,占地面积 41.27 hm²(619 亩),分为 A、B、C 这 3 个区梯级控制,顺水流方向逐步加大水深,停留时间 12 h. 沉水植物净化区占地面积 40 hm²(600 亩),停留时间 55.2 h. 深度净化区占地面积

109.34 hm²(1640 亩),有效库容 4 580 000 m³,停留时间 367.2 h.



图 1 盐龙湖生态净化系统采样点示意图

Fig. 1 Map of the sampling points of the Yanlong Lake ecological purification system

1.2 野外测样与样品采集

根据盐龙湖各单元水深变化,沿水流方向布置 8 个采样点:W1~W8,分别代表盐龙湖进水,预处理区进水,预处理区出水,挺水植物区出水,挺水植物区出水,沉水植物区出水和深度净化区出水. 样品采集及现场测定于 2017、2018 年 3~4 月进行,共采集 10 次样品,样品采用 4 个 500 mL 纯净的聚乙烯瓶盛装(其中 1 瓶用饱和氯化汞固定),不留气泡,封装后运回实验室冰箱 4℃ 保存,并尽快测定光学参数及水质参数. 在野外样品采集的同时,利用塞氏盘、哈希水质多参数数字化分析仪、哈希浊度仪分别现场测定透明度(SD)、酸碱度(pH)、溶解氧(DO)、电导率(Cond)、氧化还原电位(ORP)、水温及浊度.

1.3 测样方法

水样总磷(TP)、总氮(TN)、氨氮(NH₄⁺-N)和硝酸盐氮(NO₃⁻-N)测定分别采用钼锑抗分光光度法、过硫酸钾氧化+紫外分光光度法、纳氏试剂光度法和紫外分光光度法^[14]. 高锰酸盐指数、叶绿素 a(Chla)、藻细胞数分别采用酸性法、丙酮法、细胞计数法测定^[14]. 德国耶拿 TOC 分析仪、耶拿火焰原子吸收分光光度计和哈希 BOD₅ 测定仪分别测定溶解性总有机碳(DOC),铁(Fe)、锰(Mn)及五日生化需氧量(BOD₅)^[14].

采用 HORIBA 同步吸收-三维荧光仪同时测量

三维荧光 EEM (E_x 为 239 ~ 500 nm/ E_m 为 245 ~ 800 nm) 和紫外吸收光谱 (239 ~ 500 nm). 通过从样品的 EEM 中减去纯水的 EEM, 自动纠正了 EEMs 的瑞利散射和拉曼散射, 通过软件使用适用的吸光度数据纠正了内滤效应, 同时利用硫酸奎宁进行荧光定标.

1.4 数据处理

本实验数据主要采用 Origin 2016、Matlab、SPSS 19.0 及 R 语言软件进行统计检验、分析和绘图. 其中在 Matlab 中使用 DOMFluor 工具箱运行 PARAFAC 模型对样点的三维荧光数据进行分析.

2 结果与讨论

2.1 盐龙湖生态净化系统春季基本水质状况

通过对盐龙湖生态净化系统各单元基础水质指标进行监测, 并进行统计分析后发现(表 1), 盐龙湖春季水温在 8 ~ 21°C 范围之内. DO (7.26 ~ 13.24 mg·L⁻¹) 基本高于国家地表水 II 类水质标准, 挺水植物区 DO 下降, 其他各处理单元 DO 明显提升. 付融冰等研究发现春季挺水植物区植物根部部分时段处于耗氧状态, 导致 DO 降低^[15]. 盐龙湖水体 pH 处于 7 ~ 9 的范围内, 满足《国家地表水环境质量标准 GB 3838-2002》^[16] 中规定的限值. Henderson 等^[17] 的研究发现天然水体中 pH 主要取决于碳酸平衡体系中二氧化碳、碳酸氢根、碳酸根之间的对比关系, 碳源作为浮游植物的重要营养成分, 在藻类繁殖过程中, 消耗水中的碳可能会导致水中 pH 的升高, 所以盐龙湖沉水植物区之后的 pH 升高

(pH > 8) 可能与藻类繁殖有关. 盐龙湖原水浊度较大 (35 ~ 50 NTU), 沿水流方向浊度逐渐降低, 同时盐龙湖透明度随水流方向逐渐上升, 表明盐龙湖各单元对水中悬浮物有一定的沉降作用.

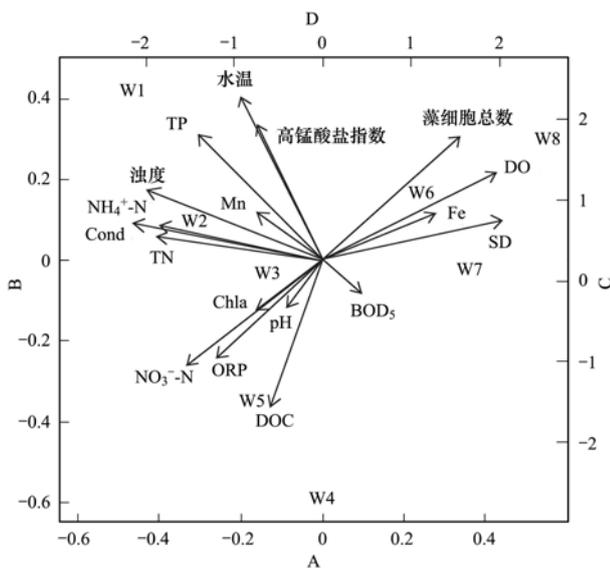
营养盐是导致水体富营养化的关键因子, 盐龙湖水体中 TP 浓度 (0.05 ~ 0.25 mg·L⁻¹) 处于国家 III 类到 V 类水质标准之间, 去除率为 32%; NH₄⁺-N (0.2 ~ 1.2 mg·L⁻¹) 处于国家 I 类到 IV 类水质标准之间, 并顺水流方向有降低的趋势, 去除率为 33%; TN (1.25 ~ 2.75 mg·L⁻¹) 污染较严重, 为 IV 类水质, 去除率为 16%. 高锰酸盐指数春季总含量在 I 类到 IV 类水质标准之间, 进水至出水去除率为 6%. BOD₅ (3 ~ 16 mg·L⁻¹) 变化较大, 其中挺水植物区、深度净化区含量相对较高, 表明挺水植物区和深度净化区微生物活动较其他几个单元剧烈. DOC 代表水体中总溶解性有机物, 与 BOD₅ 不同, DOC 随水流方向浓度有下降的趋势. 各单元的藻细胞数在 2 ~ 32 × 10⁶ 个·L⁻¹ 之间, 其中沉水植物区与深度净化区变化较大, 这在一定程度上表明藻类在这两个单元繁殖速度和生物量的增加.

本文对各水质参数进行 Scale 标准化, 再进行主成分分析 (PCA), 结果如图 2 所示. 前两个主成分的方差贡献率达到 61.6% (PC1: 41.3%; PC2: 20.3%). 温度、Cond、ORP、TN、TP、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 在 PC1 上表现出负载荷, 这些因子都与水体污染物外源汇入有关; 而 DO、温度、浊度、TP、高锰酸盐指数、藻细胞密度等在 PC2 中所占比重较大, 因此 PC2 可看作内源的因素. 对比不同的处理

表 1 盐龙湖生态净化系统中各单元基本水质参数浓度

Table 1 Basic water quality parameter concentration of each unit in the Yanlong Lake ecological purification system

项目	采样点							
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
DO/mg·L ⁻¹	8.09 ± 0.83	8.67 ± 1.27	9.13 ± 1.30	8.30 ± 2.66	7.48 ± 1.48	10.60 ± 1.23	10.45 ± 1.26	11.93 ± 1.31
pH	7.93 ± 0.46	7.76 ± 0.47	7.96 ± 0.49	7.96 ± 0.44	7.81 ± 0.38	8.26 ± 0.26	8.13 ± 0.24	7.30 ± 0.2
水温/°C	14.75 ± 4.48	14.20 ± 4.48	14.30 ± 4.30	13.68 ± 4.86	13.96 ± 4.83	14.11 ± 4.85	13.79 ± 4.59	14.31 ± 4.36
浊度/NTU	40.45 ± 5.08	39.33 ± 8.86	20.28 ± 5.60	18.90 ± 2.41	21.63 ± 6.59	16.53 ± 3.80	16.70 ± 3.72	13.23 ± 2.24
Cond/μS·cm ⁻¹	528.92 ± 104.95	503.13 ± 85.86	509.70 ± 69.73	506.75 ± 67.38	503.88 ± 81.98	521.71 ± 62.71	543.55 ± 61.73	481.54 ± 50.01
ORP/mV	169.75 ± 1.75	171.00 ± 5.30	161.05 ± 7.05	180.30 ± 24.70	164.90 ± 15.20	161.70 ± 20.70	162.60 ± 7.60	157.80 ± 9.90
SD/cm	32.50 ± 4.79	32.50 ± 4.79	36.67 ± 5.53	36.67 ± 9.86	38.17 ± 4.84	39.17 ± 5.34	46.67 ± 12.13	58.33 ± 6.24
TP/mg·L ⁻¹	0.19 ± 0.04	0.15 ± 0.04	0.14 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.15 ± 0.02	0.10 ± 0.03	0.13 ± 0.09
TN/mg·L ⁻¹	2.15 ± 0.52	1.91 ± 0.31	2.00 ± 0.40	1.93 ± 0.40	1.93 ± 0.37	1.76 ± 0.33	1.86 ± 0.36	1.80 ± 0.43
NO ₃ ⁻ -N/mg·L ⁻¹	0.74 ± 0.21	0.75 ± 0.24	0.81 ± 0.20	0.76 ± 0.14	0.82 ± 0.15	0.65 ± 0.16	0.70 ± 0.22	0.65 ± 0.27
NH ₄ ⁺ -N/mg·L ⁻¹	0.63 ± 0.31	0.80 ± 0.34	0.56 ± 0.29	0.48 ± 0.29	0.55 ± 0.28	0.46 ± 0.27	0.45 ± 0.26	0.42 ± 0.21
高锰酸盐指数/mg·L ⁻¹	5.74 ± 1.43	5.36 ± 1.70	5.68 ± 1.64	5.19 ± 1.20	5.17 ± 1.41	5.53 ± 1.35	5.22 ± 1.22	5.41 ± 1.15
DOC/mg·L ⁻¹	38.15 ± 27.22	35.70 ± 0.58	56.20 ± 14.2	82.10 ± 36.61	50.68 ± 6.94	31.06 ± 14.34	22.98 ± 15.61	35.22 ± 11.04
BOD ₅ /mg·L ⁻¹	5.40 ± 2.00	8.35 ± 4.65	8.50 ± 4.50	8.80 ± 4.20	8.60 ± 0.9	11.80 ± 3.2	3.60 ± 0.5	9.30 ± 4.7
Chla/mg·m ⁻³	47.00 ± 3.68	47.79 ± 3.68	41.84 ± 12.27	60.97 ± 6.40	32.44 ± 19.21	49.43 ± 10.20	44.27 ± 18.68	47.00 ± 6.10
藻细胞总数 × 10 ⁶ /个·L ⁻¹	11.82 ± 1.29	10.61 ± 1.00	9.36 ± 5.42	9.57 ± 2.43	12.12 ± 3.31	14.96 ± 10.12	17.29 ± 12.29	11.82 ± 15.44
Fe/mg·L ⁻¹	0.09 ± 0.03	0.08 ± 0.05	0.09 ± 0.05	0.08 ± 0.07	0.08 ± 0.07	0.10 ± 0.08	0.10 ± 0.07	0.09 ± 0.07
Mn/mg·L ⁻¹	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00	0.01 ± 0.00	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.02 ± 0.01	0.01 ± 0.00



A、B 坐标对应环境因子, C、D 坐标对应采样点

图2 盐龙湖各单元基本水质参数的主成分分析双标图

Fig. 2 Biplot of the principal component analysis of the basic water quality parameters of each unit in Yanlong Lake

单元,可以发现,盐龙湖原水 W1、预处理区进水 W2 及预处理区出水 W3 样品处于 PC1 的负方向,这说明这些采样点水质与外源的汇入息息相关;而沉水植物区出水 W6 和深度净化区出水 W8 处于 PC2 的正方向,说明 W6 与 W8 依赖于内源影响。

2.2 春季盐龙湖 DOM 的光学特性

2.2.1 盐龙湖春季水体中 DOM 的荧光指数分析

FI 指数是 E_x 为 370 nm 时, E_m 在 470 nm 和 520 nm 处的荧光强度比值,被用于表征 DOM 中腐殖质组分的来源。FI > 1.90 表明 DOM 主要来自细菌和藻类活动,自生源特征相对明显,FI < 1.30 表明 DOM 源于陆生植物和土壤有机质,属于外源输入^[18]。BIX 指数是 $E_x = 310$ nm 时, E_m 在 380 nm 与 430 nm 处荧光强度比值,可以作为沉积物 DOM 溯源的一个指标。BIX 值越高,说明新近自生源组分的比例越高, BIX 值越低表示主要来自陆源输入,有研究认为 BIX 在 0.80 ~ 1.00 之间,表示样本中存在新生的自生源 DOM 较多;而 0.60 ~ 0.80 之间表示自生源贡献较少^[19]。HIX 指数 $E_x = 255$ nm 时, E_m 在 435 ~ 480 nm 荧光强度积分值和 300 ~ 345 nm 荧光强度积分值之比,是评价 DOM 腐殖化程度的重要指标。FI 指数和 HIX 指数都能够较好地反映出体系中 DOM 特征和来源的变化规律,但 HIX 指数指示作用更敏感。HIX 值越高,表明 DOM 腐殖化程度越高。在 Huguet 等^[20]提出的地球化学领域 HIX 指标溯源体系中, HIX 被分为 4 个等级:① HIX < 4 为生物内源占主导;② 4 < HIX < 6 为较强的生物内源和较弱的陆地外源;③ 6 < HIX < 10

为较弱的生物内源和较强的陆地外源;④ HIX > 16 为陆地外源占主导。

如图 3(a)所示,春季盐龙湖水体中 FI 指数介于 1.30 ~ 1.38 之间,均值为 1.34,接近 1.3,从进水到出水的 FI 先降低后升高,表明水体中 DOM 既有陆生植物和土壤的输入,也有水体中自身微生物的贡献,但主要是前者,其中挺水植物区陆生植物贡献更多。这与一些研究中水库(1.57 ~ 1.74)^[21]、岩溶水(1.71 ~ 1.95)^[19]、海洋(0.94 ~ 1.35)^[22]不同,而与河流的 FI(0.95 ~ 1.3)^[18]相似,却高于河流。如图 3(b)所示,盐龙湖春季 BIX 指数介于 0.84 ~ 0.92 之间,且 W5 达到顶峰,且各单元变化趋势不明显,这表明样本中存在新生的自生源 DOM 较多。水库(0.93 ~ 0.97)、岩溶水(> 0.8)、海洋(> 0.76)同样是自生源 DOM 较多,而河流则表现为不同区域 BIX 存在显著差异(0.6 ~ 1)。如图 3(c)所示,盐龙湖春季 HIX 指数介于 1.50 ~ 3.50 之间,并且从进水到出水 HIX 变化不明显,表明春季盐龙湖 DOM 腐殖化程度较低,生物内源占主导。其中岩溶水(0.70 ~ 0.84)、海洋(0.80 ~ 2.64)与之相似,而水库(10 ~ 16)、河流(> 10)腐殖化程度较高。总的来说盐龙湖春季 DOM 主要来自陆生植物与土壤输入,腐殖化程度较低且新生的自生源 DOM 较多。与其他研究相比春季盐龙湖荧光指数反映的 DOM 较为特殊,也为研究这种半人工半自然的生态系统提供了现实意义。

2.2.2 盐龙湖春季水体中 DOM 的三维荧光光谱特征

利用 PARAFAC 模型对盐龙湖水体中的三维荧光光谱矩阵数据进行分析^[23],主要解析出 4 个荧光组分,并通过裂半分析、残差分析检验,结果证明该模型有效,水体各荧光组分的荧光光谱及组分最大激发、发射波长分布如表 2 和图 4 所示。

三维荧光图谱中, $E_m < 380$ nm 代表类蛋白组分, $E_m > 380$ nm 代表类腐殖质组分^[24],盐龙湖水体组分图谱中主要存在 3 个类腐殖质组分和 1 个类蛋白组分。组分 1、组分 2、组分 4 都代表类腐殖质, Koivula 等^[25]将腐殖质按溶解性不同分为胡敏酸、富里酸和胡敏素。Cory 等^[26]指出由于胡敏酸的芳香性大于富里酸,其激发和发射波长存在一定的红移,组分 1、组分 2 发射波长较短表示为类富里酸;组分 4 则反映了长波类腐殖质的荧光特性,表示为胡敏酸。组分 1 在 239 nm 和 304 nm 处存在两个明显激发波长,最大发射波长在 407 nm 处,主要来源于腐殖质中的紫外光区类富里酸物质;组分 2 在 256 nm 和 352 nm 处有明显的激发波长,最大发

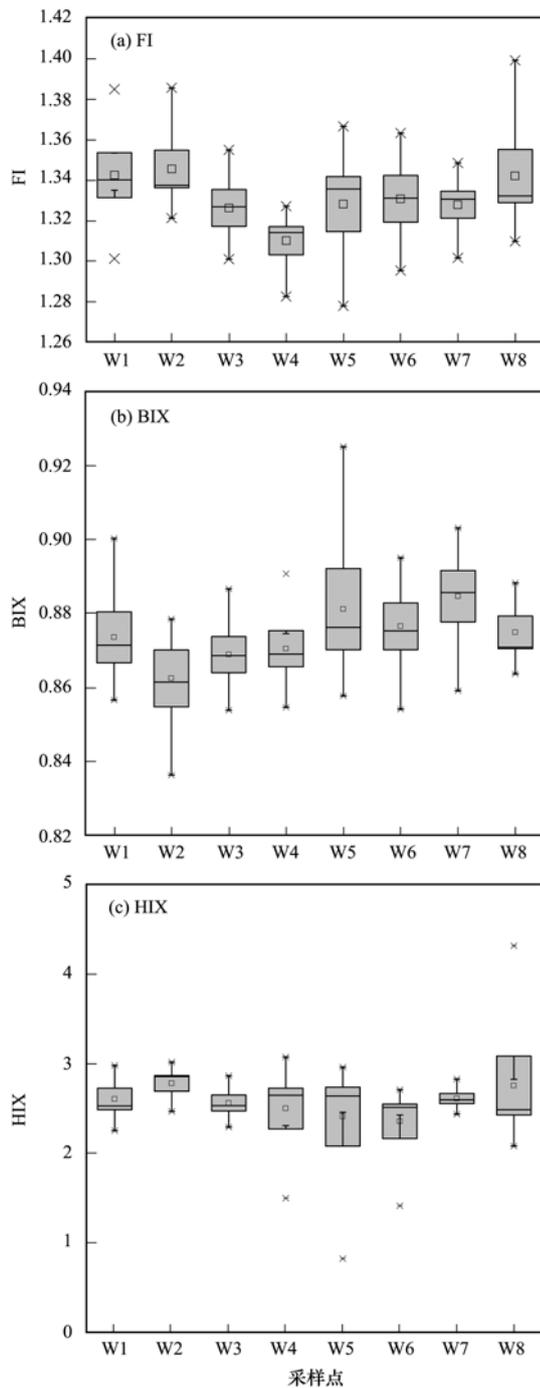


图3 盐龙湖各单元荧光指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the fluorescence index of each unit in Yanlong Lake

表2 PARAFAC 解析出盐龙湖春季 DOM 中 4 个荧光组分的特征

Table 2 PARAFAC analysis of the characteristics of four fluorescent components of the DOM in Yanlong Lake in the spring

组分	E_x/nm	E_m/nm	物质	主要来源	参考文献中物质对应的波长/nm
1	239/304	407	类腐殖质(紫外光区类富里酸)	外源汇入, 浮游植物生长过程中所产生	220~235/380~440 ^[27]
2	256/352	439	类腐殖质(可见光区类富里酸)	外源汇入, 浮游植物生长过程中所产生	310~360/370~450, <250(360)/440 ^[21, 28]
3	276	327	类蛋白质(色氨酸)	自生源类, 生物降解, 陆生植物	270~280/320~350 ^[29] , 270~280(<240)/330~370 ^[30]
4	292/395	491	类腐殖质(胡敏酸)	陆源植物, 土壤有机质	260/380~460, 270(390)/530 ^[21, 31]

射波长在 439 nm 处, 主要来源于腐殖质中的可见光区类富里酸; 组分 3 在激发波长、发射波长分别在 276 nm 与 327 nm 处, 主要成分为类色氨酸, 来源于水中微生物和浮游植物等残体分解; 组分 4 在 292 nm 与 395 nm 处存在两个激发波长, 在 491 nm 处为发射波长, 主要成分为胡敏酸, 通常认为是陆源类腐殖质, 一般通过陆源植物降解以及人类活动影响产生。

图 5 表示盐龙湖春季各处理单元最大荧光强度的变化, 各单元总 F_{\max} 在 0~1.8 之间, 顺水流方向总 F_{\max} 值有下降的趋势, 但在挺水植物区出水 W4 强度有轻微的上升; 4 个组分中, 组分 1 荧光信号最大, 而组分 4 荧光信号最小. 这表明盐龙湖春季各单元顺水流方向水体中 DOM 的荧光信号有下降的趋势. 某个组分 A 的荧光信号大于组分 B 并不代表 A 的浓度大于 B, 这是由于荧光强度不仅与浓度相关, 还与摩尔吸光度和量子产率有关, 而这通常是未知的. 综合各单元 F_{\max} 可见: 盐龙湖春季水体中类富里酸浓度较高, 这与外源 DOM 的汇入和春季浮游植物生长过程中产生的 DOM 有关, 表明盐龙湖春季 DOM 主要来源于外源汇入和浮游植物生长; 类蛋白质中的色氨酸在水体中占有一定的比例, 表明春季浮游植物进入稳定生长期后, 其释放的 DOM 再经微生物分解产生类腐殖质, 微生物的自身活动释放类蛋白质物质。

2.2.3 盐龙湖春季水体中 DOM 的紫外吸收光谱特征

对水体中 DOM 的紫外吸收光谱特征分析表明: 相对分子质量越大其 UV_{254} 越高, 特别是相对分子质量大于 3 000 以上的 DOM 是水中紫外吸收的主体, 而小于 500 的有机物紫外吸收很弱^[32]. 图 6 (a) 可见, 盐龙湖各单元 UV_{254} 处于 0.058~0.12 之间, 顺水流方向有上升的趋势, 这可能与盐龙湖中植物的作用有关. $a(355)$ 为 DOM 中有颜色部分 (CDOM) 的浓度^[3], 由图 6 (b) 可见原水至挺水植物区 CDOM 浓度波动较大, 沉水植物区至深度净化区 CDOM 浓度较稳定, 这可能与各单元水力停留时

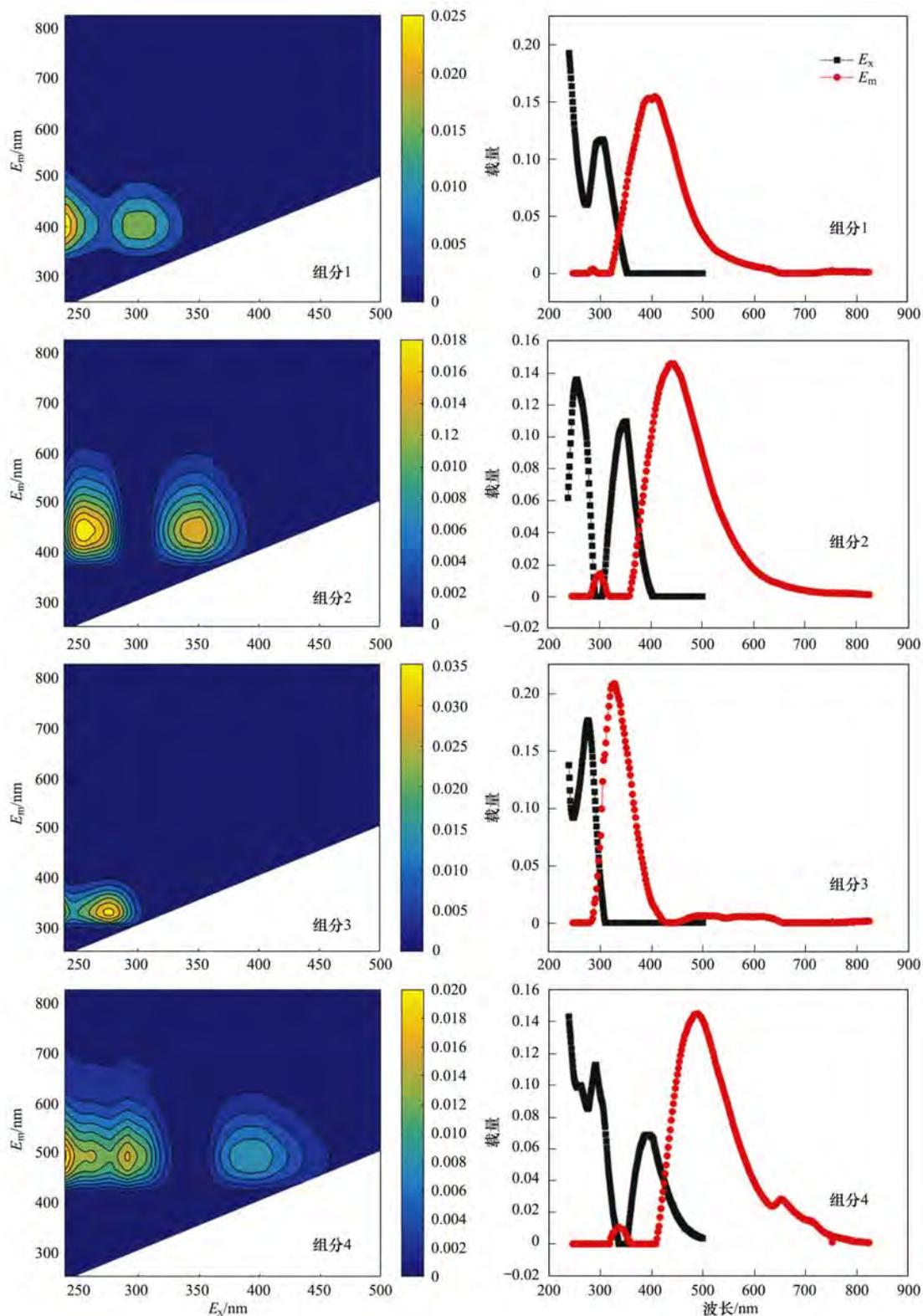


图 4 PARAFAC 解析出的盐龙湖 4 个荧光组分及其激发发射波长位置

Fig. 4 Four fluorescence components and their excited emission wavelength locations in Yanlong Lake, analyzed by PARAFAC

间有关. DOM 的分子量特征参数值 A_{250}/A_{365} 为 250 nm 和 365 nm 波长处吸收系数的比值, 可以用来估算 DOM 分子量的大小, 值越小对应的分子量就越大, 值越大对应的分子量就越小. 一般腐殖酸平均分子量较大, 而富里酸平均分子量则较小, 因而 DOM 分子量越大腐殖酸的比例就越高, DOM 分子

量越小富里酸的比例就越高^[3]. 图 6(c) 可知, 春季盐龙湖原水 A_{250}/A_{365} 在 2 ~ 14 范围内, 波动较大, 可能与外来水体携带陆源有机碳中 DOM 有关; 盐龙湖内部顺水流方向, 沉水植物区与深度净化区较稳定 (A_{250}/A_{365} 为 5 ~ 7), A_{250}/A_{365} 相对较小, 表明腐殖酸比例较高.

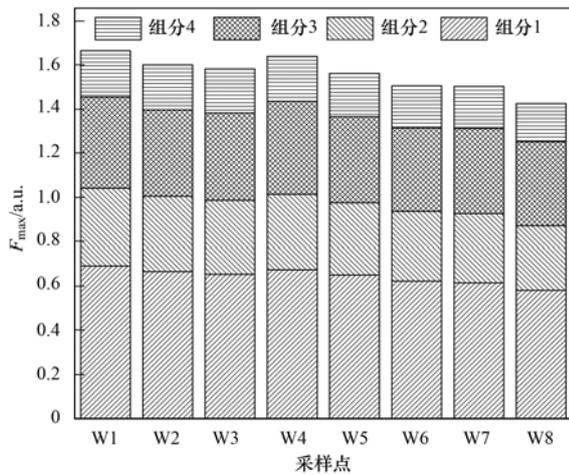


图5 盐龙湖不同单元最大荧光强度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the fluorescence intensity in different units of Yanlong Lake

2.3 DOM 的光学特性与水质参数之间的关系

通过 SPSS 19.0 对盐龙湖春季水体紫外吸收、荧光特性与生物、非生物因子的相互关系进行 Pearson 相关性分析, 得到盐龙湖春季水体光学特性与主要理化因子的相互关系如表3所示, 组分1、组分2的最大荧光强度都与浊度、电导率、总氮呈显著正相关($P < 0.05$, $P < 0.01$), 而与溶解氧、透明度、藻细胞数呈显著负相关($P < 0.05$, $P < 0.01$); 组分3最大荧光强度与 TN、DOC 显著正相关($P < 0.05$); 组分4最大荧光强度与浊度、电导率、TN 显著正相关($P < 0.05$), 而与 DO、SD、藻细胞数显著负相关($P < 0.05$, $P < 0.01$). 关于荧光指数中, 只有 FI 与温度显著正相关, 与 DOC 显著负相关($P < 0.05$). 对于紫外吸收参数中, UV_{254} 、 $a(355)$ 与浊度、Fe 显著正相关($P < 0.05$, $P < 0.01$), 与 $NH_4^+ - N$ 显著负相关($P < 0.05$); 与 A_{250}/A_{365}

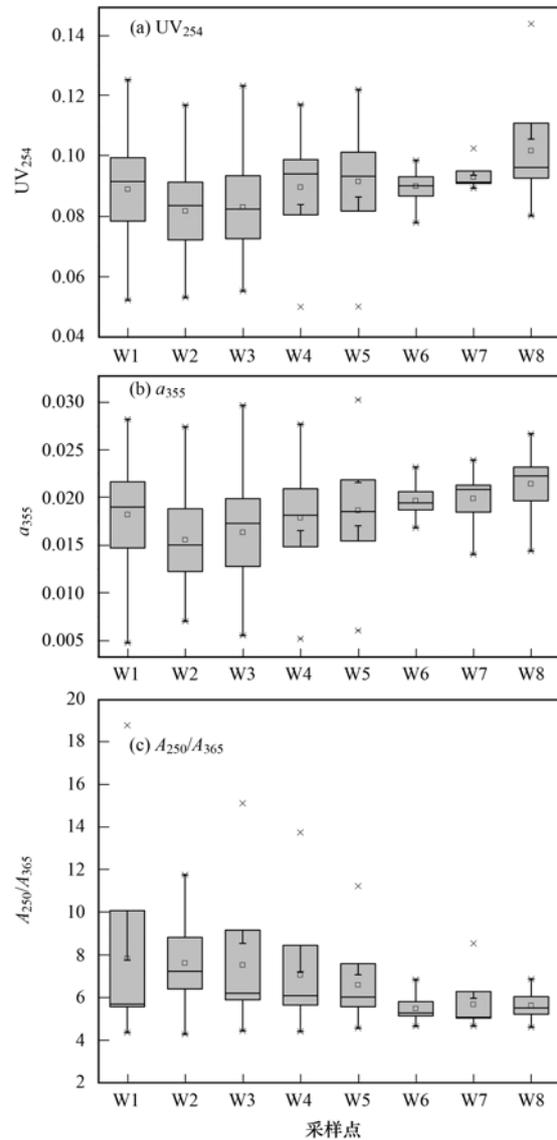


图6 盐龙湖春季 DOM 紫外吸收指数空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the DOM ultraviolet absorption index in the spring in Yanlong Lake

表3 盐龙湖春季水体光学特性与理化因子的相关关系¹⁾

Table 3 Relationship between optical properties and physical and chemical factors in spring water of Yanlong Lake

	FI	BIX	HIX	PC1	PC2	PC3	PC4	UV_{254}	$a(355)$	A_{250}/A_{365}
DO	0.233	0.229	0.276	-0.896 **	-0.858 **	-0.651	-0.861 **	0.602	0.676	-0.755 *
温度	0.742 *	-0.31	0.338	0.196	0.222	0.023	0.155	-0.098	-0.107	0.413
浊度	0.53	-0.524	0.354	0.741 *	0.758 *	0.413	0.742 *	-0.588	-0.638	0.782 *
Cond	0.32	-0.27	0.018	0.842 **	0.834 *	0.503	0.829 *	-0.543	-0.566	0.775 *
SD	0.109	0.451	0.281	-0.920 **	-0.935 **	-0.532	-0.954 **	0.877 **	0.827 *	-0.759 *
TP	0.598	-0.484	0.181	0.464	0.485	0.242	0.434	-0.316	-0.284	0.523
TN	0.086	-0.264	0.106	0.807 *	0.810 *	0.717 *	0.768 *	-0.447	-0.525	0.857 **
$NO_3^- - N$	-0.32	-0.227	-0.165	0.667	0.651	0.484	0.636	-0.581	-0.699	0.713 *
$NH_4^+ - N$	0.491	-0.663	0.398	0.637	0.666	0.217	0.655	-0.739 *	-0.810 *	0.758 *
高锰酸盐指数	0.423	-0.331	0.08	0.211	0.269	0.058	0.216	-0.274	-0.184	0.363
DOC	-0.720 *	-0.343	-0.281	0.491	0.44	0.726 *	0.387	-0.221	-0.37	0.437
Chla	0.052	0.259	0.099	0.179	0.141	0.061	0.146	-0.019	-0.168	0.282
藻细胞数	0.51	0.282	0.566	-0.798 *	-0.771 *	-0.56	-0.782 *	0.68	0.68	-0.596
Fe	-0.078	0.506	0.214	-0.311	-0.350	0.192	-0.359	0.771 *	0.710 *	-0.373

1) ** 表示在 0.01 水平上显著相关 * 表示在 0.05 水平上显著相关

A_{365} 显著正相关参数较多, 如浊度、电导率、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 与 A_{250}/A_{365} 呈显著负相关的参数为 DO、SD ($P < 0.05$, $P < 0.01$). 其他光学特性与理化因子无明显相关性.

3 结论

(1) 盐龙湖春季水温处于 $8 \sim 21^\circ\text{C}$ 范围之内, DO 高于国家地表水 II 类水质标准, pH 处于 $7 \sim 9$ 的范围内, 盐龙湖对水体悬浮物有去除效果, 但水体中营养盐波动较大. 高锰酸盐指数处于 I 类到 IV 类之间, 各单元变化不明显; 顺水流方向, DOC 浓度降低、BOD 浓度波动较大. Chla 范围在 $25 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间; 藻细胞总数在 $2 \times 10^6 \sim 32 \times 10^6$ 个 $\cdot \text{L}^{-1}$ 之间. 通过 PCA 分析表明盐龙湖原水 W1、预处理区进水 W2 及预处理区出水 W3 水质与外源的汇入息息相关; 而沉水植物区出水 W6 和深度净化区出水 W8 依赖于内源影响.

(2) 春季盐龙湖水体中 FI 指数介于 $1.30 \sim 1.38$ 之间, DOM 既有陆生植物和土壤的输入, 也有水体中自身微生物的贡献. BIX 指数介于 $0.84 \sim 0.92$ 之间, 水体中存在新生的自生源 DOM 较多. HIX 指数介于 $1.50 \sim 3.50$ 之间, DOM 腐殖化程度较低, 生物内源占主导. 运用 PARAFAC 分析的方法解析出盐龙湖春季水体中 DOM 可分为紫外光区类富里酸 (239 nm , $304 \text{ nm}/407 \text{ nm}$)、可见光区类富里酸 (256 nm , $352 \text{ nm}/439 \text{ nm}$)、色氨酸类蛋白质 ($276 \text{ nm}/327 \text{ nm}$) 和胡敏酸 (292 nm , $395 \text{ nm}/491 \text{ nm}$) 四类. DOM 主要与外源 DOM 的汇入和春季浮游植物生长过程中产生的 DOM 有关, 此外春季浮游植物进入稳定生长期后, 其释放的 DOM 再经微生物分解产生类腐殖质, 微生物的自身活动释放类蛋白质. 但总体来看, 春季盐龙湖各单元对水体中 DOM 有一定去除效果. 紫外吸收指数中, UV_{254} 处于 $0.06 \sim 0.12$ 之间, 顺水流方向 DOM 分子量增大; $a(355)$ 在原水 W1 至挺水植物区 W4 中 CDOM 浓度波动较大, 沉水植物区至深度净化区 CDOM 浓度较稳定; A_{250}/A_{365} 在 $2 \sim 14$ 范围内, 波动较大, 可能与外来水体携带陆源有机碳中 DOM 有关; 盐龙湖内部顺水流方向, 沉水植物区与深度净化区较稳定 ($5 \sim 7$), A_{250}/A_{365} 相对较小, 腐殖酸比例较高.

(3) 水质参数中 DO、浊度、Cond、SD、TN、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DOC 及藻细胞数对 DOM 荧光特征的影响较大, 参数中 DO、浊度、Cond、SD、TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 及 Fe 对 DOM 紫外吸收的影响较大. 因此水质参数中对 DOM 光学特性有影响的因素主要是透明度、溶解氧、电导率、总氮和藻细胞数.

参考文献:

- [1] Gonsior M, Schmitt-Kopplin P, Stavraklin H, *et al.* Changes in dissolved organic matter during the treatment processes of a drinking water plant in Sweden and formation of previously unknown disinfection byproducts [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **48**(21): 12714-12722.
- [2] Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: a review of the field experience [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **407**(13): 3911-3922.
- [3] 卢晓漩, 李强, 靳振江, 等. 桂林五里峡水库丰水期溶解有机碳特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2075-2085.
Lu X X, Li Q, Jin Z J, *et al.* Water chemistry and characteristics of dissolved organic carbon during the wet season in wulixia reservoir, SW China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2075-2085.
- [4] He W, Choi I, Lee J J, *et al.* Coupling effects of abiotic and biotic factors on molecular composition of dissolved organic matter in a freshwater wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2016, **544**: 525-534.
- [5] Vera M, Cruz S, Boleda M R, *et al.* Fluorescence spectroscopy and parallel factor analysis as a dissolved organic monitoring tool to assess treatment performance in drinking water trains [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **584-585**: 1212-1220.
- [6] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. *Marine Chemistry*, 1996, **51**(4): 325-346.
- [7] Wang X, Zhang H F, Zhang Y H, *et al.* New Insights into trihalomethane and haloacetic acid formation potentials: correlation with the molecular composition of natural organic matter in source water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **51**(4): 2015-2021.
- [8] Yang Y L, Lu J L, Yu H K, *et al.* Characteristics of disinfection by-products precursors removal from micro-polluted water by constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2016, **93**: 262-268.
- [9] Wu S B, Kusch P, Brix H, *et al.* Development of constructed wetlands in performance intensifications for wastewater treatment: a nitrogen and organic matter targeted review [J]. *Water Research*, 2014, **57**: 40-55.
- [10] Wang R Y, Korboulewsky N, Prudent P, *et al.* Feasibility of using an organic substrate in a wetland system treating sewage sludge: Impact of plant species [J]. *Bioresource Technology*, 2010, **101**(1): 51-57.
- [11] Pinney M L, Westerhoff P K, Baker L. Transformations in dissolved organic carbon through constructed wetlands [J]. *Water Research*, 2000, **34**(6): 1897-1911.
- [12] Du X L, Xu Z X, Li J Q, *et al.* Characterization and removal of dissolved organic matter in a vertical flow constructed wetland [J]. *Ecological Engineering*, 2014, **73**: 610-615.
- [13] Saeed T, Sun G Z. A review on nitrogen and organics removal mechanisms in subsurface flow constructed wetlands: dependency on environmental parameters, operating conditions and supporting media [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, **112**: 429-448.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 付融冰, 朱宜平, 杨海真, 等. 连续流湿地中 DO、ORP 状况及与植物根系分布的关系 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(10): 2036-2041.
Fu R B, Zhu Y P, Yang H Z, *et al.* DO and ORP conditions

- and their correlation with plant root distribution in a continuous-flow constructed wetland treating eutrophic water [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(10): 2036-2041.
- [16] GB 3838-2002, 地表水环境质量标准[S].
- [17] Henderson R K, Baker A, Parsons S A, *et al.* Characterisation of algogenic organic matter extracted from cyanobacteria, green algae and diatoms[J]. *Water Research*, 2008, **42**(13): 3435-3445.
- [18] 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.
- [19] 张连凯, 刘朋雨, 覃小群, 等. 溶解性有机质在岩溶水系统中的迁移转化及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2104-2116.
- Zhang L K, Liu P Y, Qin X Q, *et al.* Migration and transformation of dissolved organic matter in karst water systems and an analysis of their influencing factors[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2104-2116.
- [20] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde Estuary [J]. *Organic Geochemistry*, 2009, **40**(6): 706-719.
- [21] 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.
- [22] 药怡良. 黄东海水体及沉积物中有色溶解有机物的研究[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2016.
- Yao Y L. Study on the colored dissolved organic matter in water and sediment of the Yellow-East Sea [D]. Qingdao: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Ocean Institute), 2016.
- [23] 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.
- [24] Chen W, Westerhoff P, Leenheer J A, *et al.* Fluorescence excitation-emission matrix regional integration to quantify spectra for dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(24): 5701-5710.
- [25] Koivula N, Hänninen K. Concentrations of monosaccharides in humic substances in the early stages of humification [J]. *Chemosphere*, 2001, **44**(2): 271-279.
- [26] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39**(21): 8142-8149.
- [27] 曹昌丽, 梁梦琦, 何桂英, 等. 城镇化河流溶解性有机质的荧光特性与水质相关性; 以宁波市北仑区芦江为例[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- Cao C L, Liang M Q, He G Y, *et al.* Fluorescent dissolved organic matter and its correlation with water quality in a urban river; a case study of the Lujiang River in Beilun, Ningbo[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1560-1567.
- [28] 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.
- [29] 陈俊伊, 王书航, 姜霞, 等. 蠡湖表层沉积物荧光溶解性有机质(FDOM)荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 70-77.
- Chen J Y, Wang S H, Jiang X, *et al.* Fluorescence spectral characteristics of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in the surface sediments from Lihu Lake [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 70-77.
- [30] Ohno T, Bro R. Dissolved organic matter characterization using multiway spectral decomposition of fluorescence landscapes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(6): 2028-2037.
- [31] 任保卫, 赵卫红, 王江涛, 等. 胶州湾围隔实验中溶解有机物三维荧光特征[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 712-718.
- Ren B W, Zhao W H, Wang J T, *et al.* Three-dimensional fluorescence characteristic of dissolved organic matter in Marine mesocosm experiment in Jiaozhou Bay, China[J]. *Environmental Science*, 2007, **28**(4): 712-718.
- [32] Li W T, Jin J, Li Q, *et al.* Developing LED UV fluorescence sensors for online monitoring DOM and predicting DBPs formation potential during water treatment[J]. *Water Research*, 2016, **93**: 1-9.

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM _{2.5} in Xi'an	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM _{2.5} During Winter in Taiyuan	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM _{2.5} in a Suburb of Zhuhai City	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM _{2.5} in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM _{2.5} Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO ₂ Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N ₂ O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH ₄ Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)