

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

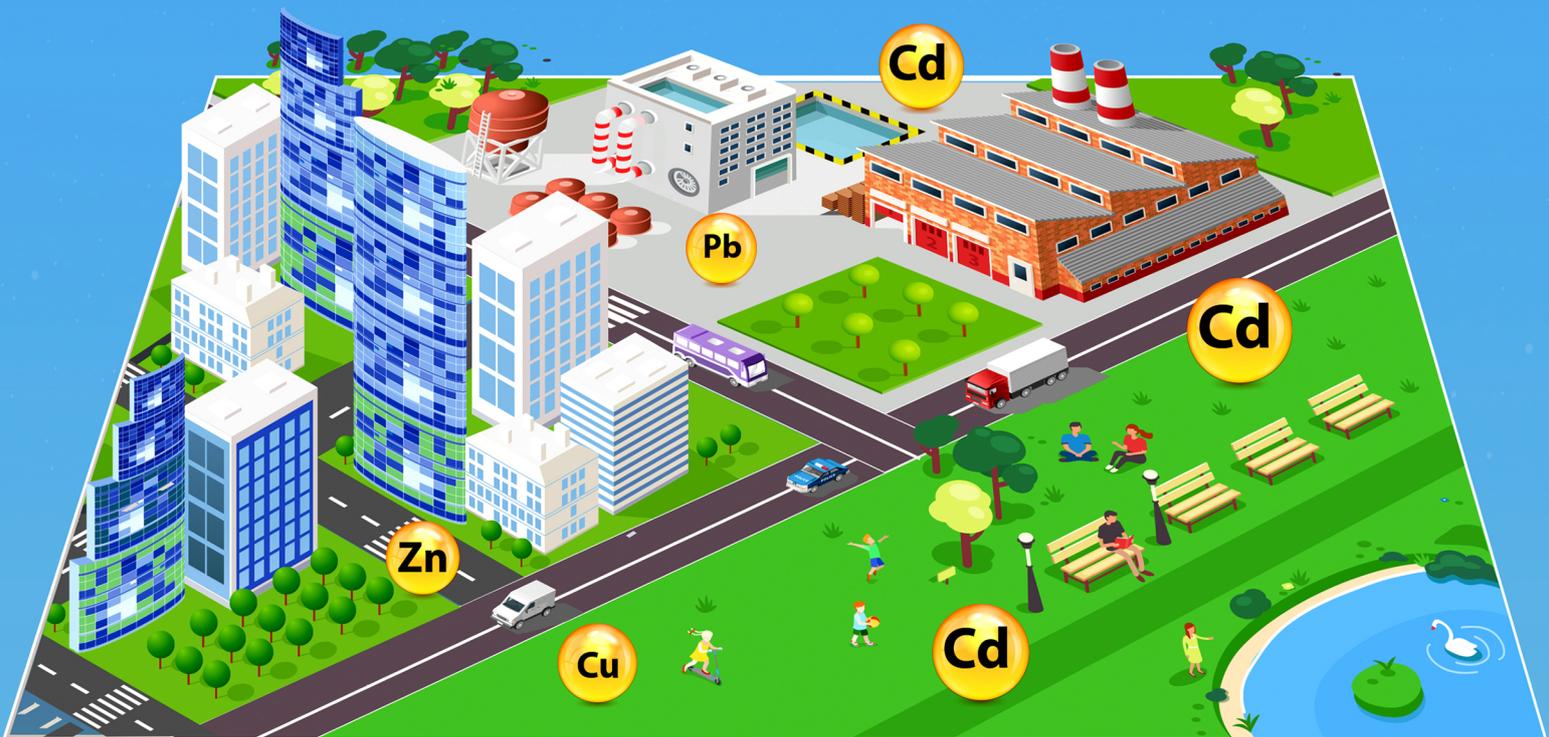
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价

彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年1月

第43卷 第1期

Vol.43 No.1

目次

中国主要城市土壤重金属累积特征与风险评价 彭驰, 何亚磊, 郭朝晖, 肖细元, 张严 (1)

植物生长调节剂在土壤中的环境行为综述 陈亮, 侯杰, 胡晓蕾, 张纪兆, 王浩达 (11)

基于铁泥的磁性水处理材料制备及应用进展 曾辉平, 翟龙雪, 李冬, 张杰 (26)

不同臭氧度量指标对我国人群总死亡影响的 Meta 分析 阮芳芳, 刘纪新, 陈芷薇, 曾贤刚 (37)

北京市海坨山冬季不同污染过程下气溶胶化学组分及其潜在来源分析 赵德龙, 王飞, 刘丹彤, 田平, 盛久江, 周崑, 肖伟, 杜远谋, 卢俐, 黄梦宇, 何晖, 丁德平 (46)

武汉冬季大气 PM_{2.5} 小时分辨率源贡献识别及潜在影响域分析 蒋书凝, 孔少飞, 郑煌, 曾昕, 陈楠, 祁士华 (61)

运城市 PM_{2.5} 时空分布特征和潜在源区季节分析 王姝涛, 张强, 温肖宇, 冀乃超, 赵文婷, 罗淑贞, 陈志, 翟程凯 (74)

中国东部冷锋推进中的 PM_{2.5} 三维结构变化特征 牟南南, 朱彬, 卢文 (85)

粤港澳大湾区大气中硝基多环芳烃污染特征与风险评估 李彦希, 谢丹平, 黎玉清, 金梦, 丁紫荣, 闫雅楠, 赵波 (93)

西南地区大型综合工业区和周边区域大气 VOCs 污染特征及健康风险评估 李陵, 张丹, 胡伟, 徐芹, 吴虹, 袁睿, 蒲茜, 郝宇杭, 唐志欣, 赖明敏 (102)

拉萨市挥发性有机物的组成特征、季节变化和来源解析 余家燕, 韩燕, 陈木兰, 张惠芳, 陈阳, 刘建国 (113)

杭州 COVID-19 期间大气 VOCs 体积分数变化特征 林旭, 严仁嫦, 金嘉佳, 许凯儿, 何曦, 叶辉, 何纪平 (123)

上海城郊夏季大气 VOCs 在臭氧生成中的作用 金丹 (132)

铜川市秋冬季大气 VOCs 特征及其 O₃ 和 SOA 形成势分析 易宵霄, 李姜豪, 李光华, 路珍珍, 孙智钢, 高健, 邓顺熙 (140)

电子垃圾拆解回收 VOCs 排放特征与排放因子 谢丹平, 黄忠辉, 刘旺, 聂鹏, 黄钟坤, 贺辉, 陈晓燕 (150)

不同传输通道下珠江三角洲臭氧与前体物非线性响应关系 伍永康, 陈伟华, 颜丰华, 毛敬英, 袁斌, 王伟文, 王雪梅 (160)

淄博市城郊臭氧污染特征及影响因素分析 王雨燕, 杨文, 王秀艳, 王帅, 白瑾丰, 程颖 (170)

昭通市周边扬尘重金属污染特征及健康风险 庞晓晨, 韩新宇, 史建武, 包宇斋, 宁平, 张朝能, 向峰 (180)

城市路面积尘微塑料污染特征 方芹, 牛司平, 陈予东, 于江华 (189)

塔里木河流域东部降水稳定同位素特征与水汽来源 宋洋, 王圣杰, 张明军, 石玉东 (199)

赤水河流域水体抗生素污染特征及风险评估 吴天宇, 李江, 杨爱江, 李彦澄, 陈瑀, 何强, 马凯, 胡霞, 王斌, 艾佳, 钟雄 (210)

无定河流域地表地下水的水化学特征及控制因素 李书鉴, 韩晓, 王文辉, 李志 (220)

白洋淀府河影响区沉积物营养盐和重金属污染特征及风险评估 陈兴宏, 李立青, 张美一, 张伟军, 王东升, 王洪杰 (230)

九龙江口红树林湿地表层沉积物中微塑料赋存特征与重金属的关系 刘倡君, 罗专溪, 闫钰, 林惠荣, 胡恭任, 于瑞莲 (239)

北京市北运河水系底栖动物群落与水环境驱动因子的关系及水生态健康评价 胡小红, 左德鹏, 刘波, 黄振芳, 徐宗学 (247)

城市河道再生水特征水质因子空间变异机制分析 刘全忠, 彭柯, 苏振华, 邸琰茗, 郭道宇 (256)

苏州景观河道表层沉积物间隙水-上覆水中 DOM 特性分析 李超男, 何杰, 朱学惠, 李学艳 (267)

苏州城区雨水管道沉积物典型污染物分布特征 叶蓉, 盛铭军, 姜永波, 武宇圣, 黄天寅 (277)

信号分子强化改性挂膜沸石持续抑制沉积物中氨氮释放 徐金兰, 许洋, 李修民, 国森, 刘成海 (285)

三峡水库调度对支流水体叶绿素 a 和环境因子垂向分布的影响 田盼, 李亚莉, 李莹杰, 李虹, 王丽婧, 宋林旭, 纪道斌, 赵星星 (295)

李家河水库春季分层期 nirS 型反硝化菌群特征分析 梁伟光, 黄廷林, 张海涵, 杨尚业, 刘凯文, 李程遥, 温成成, 李伟涛, 蔡晓春 (306)

岗南水库沉积物好氧反硝化菌群落时空分布特征 张紫薇, 陈召莹, 张甜娜, 周石磊, 崔建升, 罗晓 (314)

宁夏地区地下水金属元素分布特征及健康风险评估 王晓东, 田伟, 张雪艳 (329)

快速城镇化三角洲地区高碘地下水赋存特征及驱动因素:以珠江三角洲为例 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 周冰, 李备 (339)

长三角一体化示范区青浦区水环境中 22 种 PPCPs 的多介质分布特征及风险评估 张智博, 段艳平, 沈嘉豪, 俞文韬, 罗鹏程, 涂耀仁, 高峻 (349)

洞庭湖及入湖河流中 209 种多氯联苯同类物分布特征与风险评估 黄智峰, 郑丙辉, 尹大强, 崔婷婷, 赵兴茹 (363)

基于流量和溶存浓度的河流水系氧化亚氮释放量估算 李冰清, 胡敏鹏, 王铭烽, 张育福, 吴昊, 周佳, 吴锴彬, 戴之舟, 陈丁江 (369)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探 秦宇, 欧阳常悦, 王雨潇, 方鹏 (377)

功能化凹凸棒吸附材料的制备及其对重金属废水中 Pb²⁺ 的吸附行为 廖晓峰, 钟静萍, 陈云嫩, 邱延省, 任嗣利 (387)

铁氮共掺杂生物炭对二级水溶解性有机物的吸附特性与长效性评价 吴晨曦, 许路, 金鑫, 石烜, 金鹏康 (398)

沸石悬浮填料生物移动床的亚硝化特性 邓翠兰, 郭露, 汪晓军, 陈振国 (409)

温度对 ANAMMOX 生物膜工艺的脱氮影响与菌群结构分析 吴珊, 王淑雅, 王芬, 季民 (416)

填料对 ANAMMOX 污泥活性恢复的影响及菌群特征 罗景文, 杨津津, 李绍康, 赵昕宇, 杨一飞, 韩嘉琛, 李翔 (424)

基于 PMF 模型的宁南山区小流域土壤重金属空间分布及来源解析 夏子书, 白一茹, 王幼奇, 高小龙, 阮晓晗, 钟艳霞 (432)

浙中典型硫铁矿田土壤重金属含量特征及健康风险 成晓梦, 孙彬彬, 吴超, 贺灵, 曾道明, 赵辰 (442)

农产品视角的城郊黑土地田土壤重金属风险分区 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉 (454)

基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 李龙, 陈同斌 (463)

调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应 李林峰, 王艳红, 李义纯, 唐明灯, 李奇, 艾绍英 (472)

设施叶菜类蔬菜重金属镉、铅和砷累积特征及健康风险评估 董俊文, 高培培, 孙洪欣, 周昶, 张香玉, 薛培英, 刘文菊 (481)

电子垃圾拆解固废渣-土壤-蔬菜中多氯联苯污染特征与健康风险评估 张亚萍, 吕占禄, 王先良, 张晗, 郭凌川, 丁秀丽, 张金良 (490)

雷州半岛南部典型农用地土壤-作物的有机氯农药残留特征和健康风险评估 梁晓晖, 解启来, 郑芊, 杨北辰, 叶金明, 唐成金 (500)

重金属含量对城市土壤真菌群落结构的影响 郭大陆, 张建, 申思, 余子洁, 杨军顺, 罗红燕 (510)

长期施肥对黄土高原梯田土壤养分特征和微生物资源限制的影响 吴春晓, 高小峰, 闫本帅, 梁彩群, 陈佳瑞, 王国梁, 刘国彬 (521)

土地利用变化后不同种植年限香榧土壤微生物群落的组成及多样性 姜霓雯, 梁辰飞, 张勇, 蒋仲龙, 董佳琦, 吴家森, 傅伟军 (530)

化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响 杨文娜, 余添, 罗东海, 熊子怡, 王莹燕, 徐曼, 王子芳, 高明 (540)

秦岭中段撂荒地植被恢复过程中土壤微生物代谢特征 薛悦, 康海斌, 杨航, 冰德叶, 晁志, 张凯, 王得祥 (550)

全生物降解地膜原料颗粒对土壤性质、小麦生长和养分吸收转运的影响 闵文豪, 王春丽, 王莉玮, 易廷辉, 卞京军, 支梅, 孙琪惠, 宿锦锦, 赵秀兰 (560)

秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 白鹤, 杨学云, 顾江新 (569)

三峡库区万州段河流水-气界面 CO₂ 通量支干流对比及影响机制初探

秦宇¹, 欧阳常悦¹, 王雨潇¹, 方鹏²

(1. 重庆交通大学河海学院, 环境水利工程重庆市工程实验室, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学机电与车辆工程学院, 重庆 400074)

摘要: 以三峡库区万州段干流及典型支流澎溪河为研究对象, 监测 2019 年 4~9 月水华期间水体中 CO₂ 浓度以及 12 个环境指标, 估算水-气界面 CO₂ 通量并进行支干流对比. 将 12 个环境指标分为气候因子、水环境因子、碳源因子、营养因子和沉积物因子, 探讨 5 类因子对 CO₂ 通量的影响途径和贡献率, 进一步为控制水库温室气体排放提供数据积累和理论支持. 结果表明, 监测期间内高阳、黄石和万州平均 CO₂ 通量分别为 (1.445 ± 1.739)、(3.118 ± 2.963) 和 (2.899 ± 1.144) mmol·(m²·h)⁻¹, 表现为: 澎溪河支流高阳 < 干流万州 < 澎溪河支流黄石. 从变化幅度来看, 支流水体 CO₂ 通量变幅较大, 干流水体变化幅度则相对较小, 是较稳定的 CO₂ “源”. 长江干流作为陆地向海洋的生源物质运输枢纽, 相比其支流碳含量和流速更高, 这使得通常情况下干流 CO₂ 通量大于支流. 但水文情势的不同使得同一支流不同点位 CO₂ 通量具有明显空间差异, 支流高阳点位于库湾处利于浮游植物生长使 CO₂ 通量较低, 支流黄石点位于流速较快的河道, 受干流回水顶托和倒灌作用使 CO₂ 通量显著大于干流万州点位. 各指标对 CO₂ 通量的影响在支干流也存在较大差异, 水温 (T)、溶解氧 (DO)、溶解有机碳 (DOC) 和溶解无机碳 (DIC) 对支流 CO₂ 通量的影响显著, 氨氮 (NH₄⁺-N) 则对干流 CO₂ 通量影响显著. 营养元素因子和碳源因子对 CO₂ 通量的贡献率分别为 32.37% 和 27.25%, 总占比过半, 之后依次为气候因子、水环境因子和沉积物因子, 分别为 18.81%、13.49% 和 8.08%. 水库 CO₂ 的排放控制可以着重从控制水体富营养化和控制碳源入手, 全球变暖和底泥淤积等宏观现象也会对水库 CO₂ 排放有一定的影响.

关键词: 三峡库区; CO₂ 通量; 支干流对比; 随机森林算法; 影响机制

中图分类号: X16 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)01-0377-10 DOI: 10.13227/j.hjkk.202104107

Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area

QIN Yu¹, OUYANG Chang-yue¹, WANG Yu-xiao¹, FANG Peng²

(1. Engineering Laboratory of Environmental Hydraulic Engineering of Chongqing Municipal Development and Reform Commission, College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The main stream of the Three Gorges Reservoir area in Wanzhou and its tributary (the Pengxi River) were selected as a survey area to monitor the CO₂ concentration. Twelve related indicators were selected during the blooming period from April to September 2019, which were divided into Climate factors, Water environment factors, Carbon source factors, Nutrient factors, and Sediment factors. These factors were considered for further discussion of the impact pathways and contribution to CO₂ flux. The average CO₂ fluxes of Gaoyang (the Pengxi River), Huangshi (the Pengxi River), and Wanzhou (the main stream) were (1.445 ± 1.739), (3.118 ± 2.963), and (2.899 ± 1.144) mmol·(m²·h)⁻¹, respectively, showing that Gaoyang < Wanzhou < Huangshi. The CO₂ flux of tributary showed a large variation, while the main stream had a relatively small variation, which is a stable “source” of CO₂. The main stream of the Yangtze River, as a hub for the transportation of biomass from land to sea, has higher carbon concentration and higher flow rate than its tributaries, which makes the CO₂ flux of the main stream usually larger than that of the tributary. However, the difference in hydrological conditions result in spatial differences in CO₂ flux at different points of the same tributary. Gaoyang is located in the reservoir bay, which is conducive to the growth of phytoplankton and the CO₂ flux is lower; Huangshi is located in a river with a faster flow rate. The backwater support and backflow of the main stream make the CO₂ flux significantly greater than that at Wanzhou. The effects of various indicators on the CO₂ flux are also markedly different in the tributary and main stream. Temperature (T), DO, dissolved organic carbon (DOC), and dissolved inorganic carbon (DIC) have significant effects on CO₂ fluxes in the tributary, while NH₄⁺-N has a significant impact on CO₂ fluxes in the main stream. Nutrient factors and carbon source factors contribute 32.37% and 27.25%, respectively, to CO₂ flux, accounting for more than half of the total, followed by climate factors, water environment factors, and sediment factors, which contribute 18.81%, 13.49%, and 8.08%, respectively. Reservoir CO₂ emission control can focus on controlling the eutrophication and carbon sources; phenomena such as global warming and sedimentation will also have a certain impact on the CO₂ emission of reservoirs.

Key words: Three Gorges Reservoir area; CO₂ flux; comparison of tributary and main stream; random forest algorithm; influence mechanism

全球变暖已经成为如今世界各国普遍关注的环
境问题之一, 其主要原因是大气中温室气体浓度增
加. 水电一直以来被认为是清洁的能源, 直到 Rudd

收稿日期: 2021-04-12; 修订日期: 2021-06-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51609026)

作者简介: 秦宇 (1981~), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水生态治
理, E-mail: qinyu54001@163.com

等^[1]发布了南美热带雨林地区水库 CO₂ 和 CH₄ 释放通量的数据,水库温室气体释放成为了国际学术界争论的核心问题。

三峡水库自 2003 年蓄水以来,在防洪、发电和供水等各个方面发挥重要作用,拦河筑坝改变了河流的水文环境及水动力条件等,使得以前的河流型生态系统演变为水库型生态系统^[2]。水库蓄水后,三峡库区江段从天然河道变成了河道型和季调型水库。作为一个典型的河道型水库,三峡水库水动力特性在空间上存在显著的差异,库区干流一维流动特征显著,仍然保持着天然河流的特性,流速基本不满足藻类水华形成的必要条件。而在支流库湾,蓄水改变了水文水动力条件及河道地形,难以简单概括为一维特征,在深度上长期具有复杂的分层异向流动特征^[3],三峡水库支干流水体理化性质和水文水动力条件的差异性明显。

近年来,大量关于水库温室气体通量研究的重心在于宏观监测及其时空变化规律上^[4-7],而对于温室气体通量的支干流空间对比研究较少^[8-10],对其影响机制的研究更为罕见。本研究以三峡库区万州段干流和典型支流澎溪河为研究对象,监测 4~9 月期间水体中 CO₂ 浓度以及 12 个环境指标,估算水-气界面 CO₂ 通量,分析其支干流的空间差异性,再利用相关性分析和随机森林算法分析其主要影响因素,并对 CO₂ 通量的影响途径及机制进行初步探讨,以期水库温室气体的控制提供一定的数据积累和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

三峡水库是举世瞩目的超大型水利工程,兼顾防洪、发电和航运等多种功能。水库东起湖北省宜昌市,西至重庆江津区,范围包括了重庆、长寿、涪陵、丰都、忠县、万州、云阳和奉节等 21 个市县,属于河道型水库。水库正常蓄水水位高程为 175 m,水域面积 1 084 km²,总库容 393 × 10⁸ m³。大坝建成后,库区反季节的蓄水与泄水,改变了库区支干流的天然水流条件。一些库湾以及长期处于三峡水库回水淹没区的支流,受干流顶托作用,水流流速减缓,水体滞留时间变长,营养物质及有机质含量升高,富营养化趋势增加。而库区干流一维流动特征显著,仍然保持着天然河流的特性。

1.2 样品采集

根据前期相关研究资料与实地考察,结合三峡水库调度运行方案和水生态特征等,本研究选择了位于三峡水库万州段的 3 个采样监测点:高阳

(N31°06'14", E108°40'26")、黄石(N30°59'50", E108°40'51")和万州(N30°54'40", E108°31'18"),如图 1 所示。其中高阳点位位于长江支流澎溪河 145 m 回水区中段,是较具独特性的水域,其上下游河段均为峡谷型河道,而高阳平湖水域则是在上述两峡谷之间面积为 4~5 km² 的开阔水域,近似于过水型湖泊,是澎溪河流域水华暴发最严重的区域之一,采样点位设于高阳库湾处。黄石点位则位于高阳下游的峡谷型河道,采样点设于黄石镇沿河处。万州点位位于长江上游地区、重庆东北部,处三峡库区腹心,采样点位于万州中部小周镇沿河处。

本研究采样为 2019 年 4~9 月的逐月跟踪监测,所有采样点监测时间控制在每月的下旬(20~22 日),3 个断面的样品采集工作在 1~2 d 内完成。由于温室气体通量存在时空差异,在同一点位不同时间的温室气体通量也会发生变化,为获得较为准确的数据,本研究采样时间尽量控制在 09:00~11:00。采样周期处于春夏季,正是容易暴发水华时期,且水库调度运行处于泄水期向低水位转变过程。

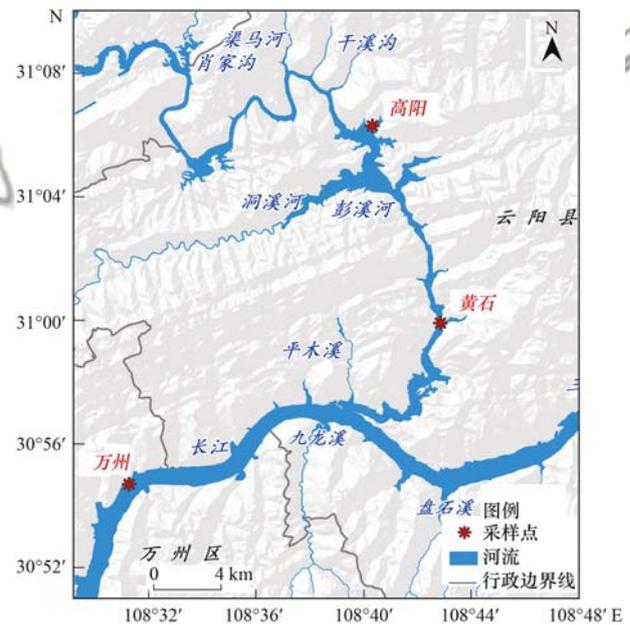


图 1 三峡库区万州段采样点位示意

Fig. 1 Sampling points in the Wanzhou section in the Three Gorges reservoir area

采样时到达河道深泓线处(航标船附近),采用 5 L 分层采水器采集表层水体(0.5 m 以下),水温(T)、pH 和溶解氧(DO)使用多参数水质分析仪现场测定。将 50 mL 顶空瓶置于采水器中,以淹没状态进行密封,剩余的水样装入聚乙烯瓶(用采集水样润洗多次),最后用彼德森采泥器采集表层沉积物样品,装入聚乙烯密封袋中。为了保证采集样品的代表性和准确性,样品采集与保存均按照文献^[11]

中相关规范进行,且所有采样点都会在周围采集 3 个平行样品. 在整个采样过程同时记录相关环境指标:气温、气压和风速等(用于薄边界模型法估算水-气界面温室气体通量). 野外测量仪器在采样工作前都已经过标准校正程序. 所有现场采集完成的样品(水样、顶空瓶和沉积物)用保温箱低温保存,当天运回实验室等待进一步处理. 水样样品带回实验室后在 2 d 内完成溶解性总氮(DTN)、溶解性总磷(DTP)、氨氮(NH₄⁺-N)、溶解性有机碳(DOC)和溶解性无机碳(DIC)的测定. 沉积物去除动物残体和植物碎屑后自然风干,再装入聚乙烯密封袋中,测定总有机碳(TOC)、总氮(TN)

和总磷(TP).

1.3 样本处理与分析方法

1.3.1 水样、表层沉积物

水样低温运回实验室,过 47 μm 的 Whatman® GF/F 玻璃纤维滤膜(450℃ 烘干 4 h),对滤液进行相关指标测定. 自然风干后的沉积物用瓷研钵将其研磨成粉末,分别过 100 目和 200 目的不锈钢筛,最后将处理后的样品分别装入聚乙烯密封袋中,用于化学分析,所有土样指标采样测试方法均参照文献[12]进行. 本文将所采集的 12 个指标归为 5 类因子,方便探讨 CO₂ 通量的影响途径,分类结果及测定方法如表 1 所示.

表 1 相关指标分类与测定方法

Table 1 Classification and methods for measurement of related indicators

相关指标	相关指标分类	测定方法
CO ₂ 通量	因变量	见 1.3.2 节
T(水温)	气候因子	DZB-718 多参数分析仪现场测定
DO(溶解氧); pH	水环境因子	DZB-718 多参数分析仪现场测定
DOC(溶解有机碳); DIC(溶解无机碳)	碳源因子	启赜 CD-800 总有机碳分析仪
NH ₄ ⁺ -N(氨氮)	营养因子	纳氏试剂分光光度法
NO ₃ ⁻ -N(硝态氮)		紫外分光光度法
DTN(溶解总氮)		碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法
DTP(溶解总磷)		钼酸铵分光光度法
沉积物中 TOC(沉积物中总有机碳)		沉积物因子
沉积物中 TN(沉积物中总氮)	碱性过硫酸钾氧化-紫外分光光度法	
沉积物中 TP(沉积物中总磷)	硫酸钾氧化-分光光度法	

1.3.2 气样

1.3.2.1 水体 CO₂ 浓度及分压

将充满水样的顶空瓶从保温箱中取出,放至室温. 首先倒置顶空瓶,并同时插入两支注射针头,其中一支为装有确定量 20 mL 高纯氮的针管(带有三通阀),在向顶空瓶中注入氮气后,从而产生压力差,使多余水样通过另一支针头排出(注射氮的针头应略高于排水针头),待高纯氮完全注入后,顶空瓶中为 30 mL 测水样和 20 mL 高纯氮(顶空气液体积比为 2:3). 密封顶空瓶,将其放入摇床内振荡 20 min; 最后待顶空瓶中的气相和液相达到平衡后,用针管(带有三通阀)抽取顶空瓶内上方的气体,送入气相色谱仪测定 CO₂ 浓度. 经 TDX-01 色谱柱分离,用 FID 检测器进一步检验得到 CO₂ 浓度,再根据顶空平衡法得到待测水体中 CO₂ 分压,其计算公式为^[13]:

$$p(\text{Gas}) = \frac{p_{\text{final}} \cdot K_{\text{equilibrium}}}{K_{\text{sample}}} + \frac{(H/S)(p_{\text{final}} - p_{\text{initial}})/V_m}{K_{\text{sample}}} \quad (1)$$

式中, $p(\text{Gas})$ 为测水样中气体分压(Pa); p_{initial} 和 p_{final} 为平衡前后瓶内上方空气中待测气体分压(Pa); H/S 为瓶内气体与水体体积比; V_m 为气体

浓度(mol·L⁻¹); K_{sample} 和 $K_{\text{equilibrium}}$ 为采样时和样品分析前瓶内水温条件下对应的待测气体溶解度[mol·(L·Pa)⁻¹].

气体亨利系数 K_0 可通过下式计算^[14]:

$$\ln K_0(\text{CO}_2) = -58.0931 + 90.5069 \frac{100}{T_k} + 22.294 \ln\left(\frac{T_k}{100}\right) + S \left(0.027766 - 0.02588 \frac{T_k}{100} + 0.0050578 \frac{T_k^2}{100}\right) \quad (2)$$

式中, T_k 为水体绝对温度(K); S 为盐度(mg·L⁻¹),在淡水中该值可为 0.

1.3.2.2 水-气界面 CO₂ 通量

目前水-气界面温室气体监测常用两种方法,一种是静态箱法-气相色谱法,另一种是顶空平衡法-气相色谱法与 TBL 模型估算法结合. 但静态箱-气相色谱法在有风或流动水体的观测条件下,箱体与表层水体的摩擦引起的扰动,可能导致额外的温室气体排放,影响观测结果的准确性,且劳动强度大,不适宜开展大区域、长期的观测. 考虑本研究采样点之间距离较远以及长江干流点位水流较为湍急,因此采用薄边界模型(TBL)估算法研究水-气界面

CO₂ 通量^[15]. 根据 Fick 定律,对于淡水水体,水-气界面气体交换通量(正为释放、负为吸收)可由下式计算得出:

$$F_{\text{CO}_2} = k_x (c_{\text{water}} - c_{\text{air}}) \quad (3)$$

式中, F_{CO_2} 为 CO₂ 扩散通量 [$\text{mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$]; k_x 为气体交换系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); c_{water} 为气体在水中的浓度 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$); c_{air} 为现场温度及压力下大气中 CO₂ 的饱和浓度 ($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$), 参考长江流域的相关研究^[16], 本研究取大气 CO₂ 浓度 $390.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

对于交换系数 k_x 的估算, 绝大多数采用的是 1989 年 Jähne 等^[17] 建立的数学经验公式:

$$k_x = k_{600} \times 600 / S_c \quad (4)$$

式中, k_{600} 为六氟化硫 (SF₆) 气体的交换系数 ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); S_c 为 t (°C) 下 CO₂ 的 Schmidt 常数.

考虑采样点均属于已建成水电站的库区范围, 本研究采用对于湖泊、水库生态系统的交换系数, 选用 Cole 等在 1998 年建立的经验公式^[18]:

$$k_{600} = 2.07 + 0.215 U_{10}^{1.7} \quad (5)$$

式中, U_{10} 为水面上方 10 m 处的风速.

通常水体上方 1 m 风速 U_1 可用下式进行换算^[49], 参考三峡库区风速的相关研究^[20], 取平均风速 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$:

$$U_{10} = 1.22 U_1 \quad (6)$$

对于淡水而言, 可按下式进行计算 S_c ^[21,22]:

$$S_c = 1911.1 - 118.11t + 3.4527t^2 - 0.04132t^3 \quad (7)$$

监测得到的温室气体在水中的分压乘以亨利系数, 就可以得到温室气体在水中的饱和浓度 (c_{water}), 计算公式为^[20,23]:

$$c_{\text{water}} = K_0 \cdot p(\text{Gas}) \quad (8)$$

式中, K_0 为亨利系数, 即气体溶解度 [$\text{mol} \cdot (\text{L} \cdot \text{Pa})^{-1}$]; $p(\text{Gas})$ 为当前水温下的气体分压 (Pa).

1.4 数据处理

将现场监测数据、化学实验数据及计算数据输入 Origin9.0 软件绘制 CO₂ 浓度及通量的时空变化图; 输入 JASP 软件绘制干支流 CO₂ 通量相关性热图; 输入 Python3.6 编程软件 (软件框架为基于 Keras 深度学习工具的 Tensorflow 框架) 计算各因子的贡献百分比, 最后用 Visio 软件将分析结果绘制成 CO₂ 通量影响机制图.

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度及通量时空变化

监测期间内 3 个观测点 CO₂ 的浓度和通量时空变化如图 2 所示. 监测期间内高阳、黄石和万州平均 $c(\text{CO}_2)$ 分别为 (0.072 ± 0.065) 、 (0.092 ± 0.073) 和 $(0.127 \pm 0.057) \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, 平均 CO₂ 通量分别为 (1.445 ± 1.739) 、 (3.118 ± 2.963) 和 $(2.899 \pm 1.144) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 两者的时间变化趋势基本一致, CO₂ 通量表现为: 澎溪河支流高阳 < 干流万州 < 澎溪河支流黄石. 4、5 和 6 月水体 CO₂ 的浓度和通量处于相对较高水平, 库区呈现出 CO₂ “源” 的特征; 7 月和 8 月水体 CO₂ 的浓度和通量明显减少, 高阳和黄石 CO₂ 通量在 7 月达到监测期内的最低值 $-0.372 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 和 $-0.427 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 表现为 CO₂ “汇”, 万州在 8 月达到监测期内最低值 $1.811 \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 表现为 CO₂ “源”; 9 月三峡水库开始进入蓄水期, 水位抬升同时气温降低, 水华逐渐消失, 水体 CO₂ 的浓度和通量回升至同一水平. 从变化幅度来看, 支流水体 CO₂ 的浓度和通量变幅较大, 尤其在 5、6 和 7 月内 CO₂ 通量变幅较猛, 支流两点位 5 月处于整个研究期内 CO₂ “源” 的最大值, 而在 7 月均达到负值, 处于 CO₂ “汇” 的状态. 干流水体变化幅度则相对较小, 是较稳定的 CO₂ “源”.

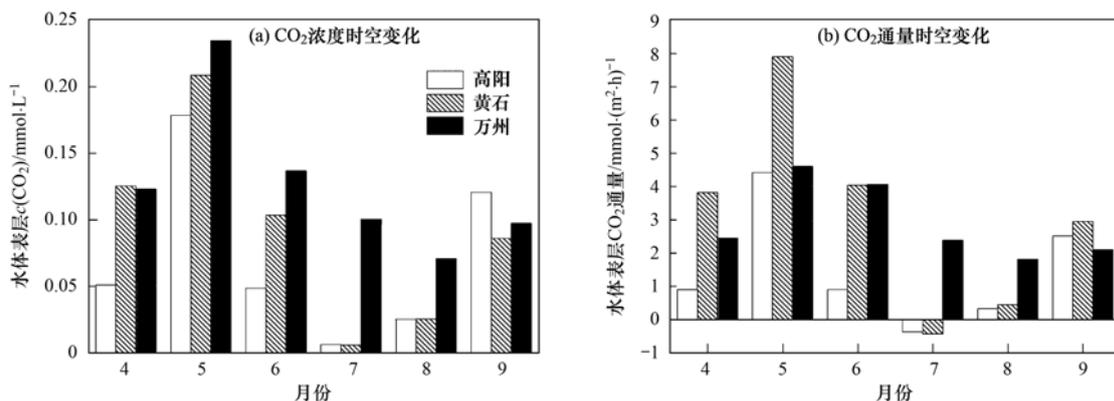


图2 CO₂ 的浓度和通量时空变化

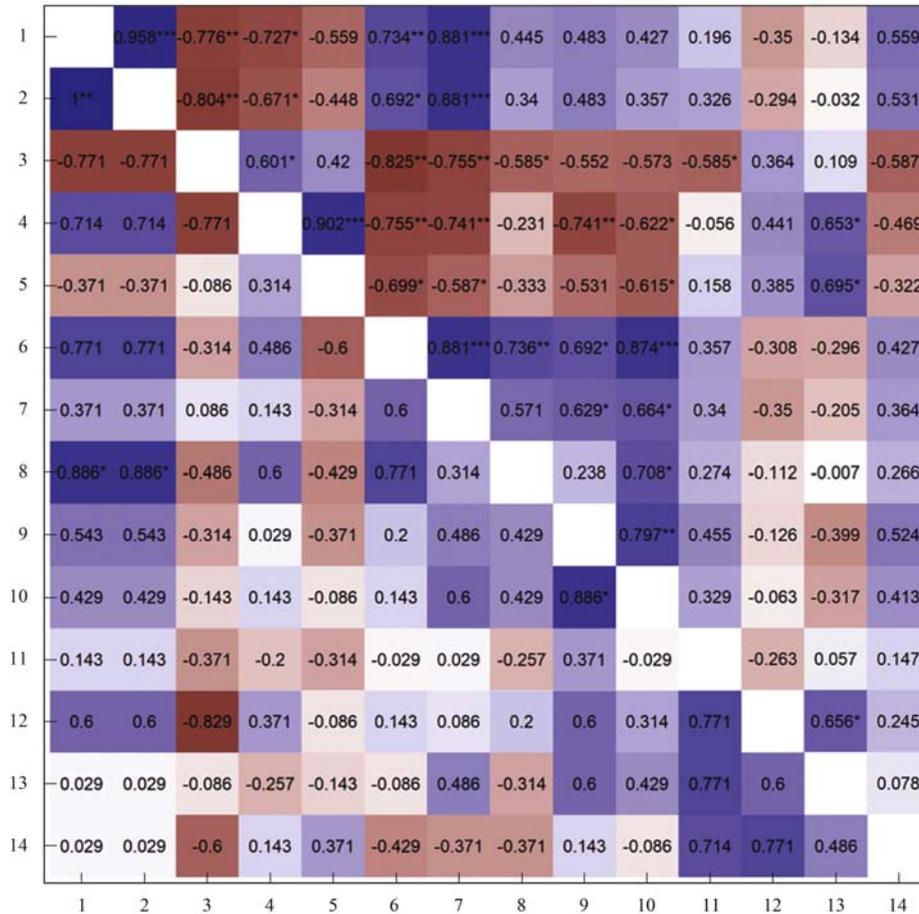
Fig. 2 Spatio-temporal changes in CO₂ concentration and fluxes

2.2 相关性分析

将支流、干流数据分别导入 JASP 软件进行 Spearman 相关系数计算, 将得到相关系数矩阵和显

著性检验结果进行可视化分析, 生成相关性热图如图 3 所示。

从图 3 的逐月变化情况来看, 可能因为受到风



1. CO₂ 通量, 2. CO₂ 浓度, 3. 水温 (T), 4. 溶解氧 (DO), 5. pH, 6. 溶解有机碳 (DOC), 7. 溶解无机碳 (DIC), 8. 氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$), 9. 硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$), 10. 总溶解氮 (DTN), 11. 总溶解磷 (DTP), 12. 沉积物中 TOC, 13. 沉积物中 TN, 14. 沉积物中 TP; 上三角区域为支流, 下三角区域为干流; * 表示 Sig. < 0.05, ** 表示 Sig. < 0.01, *** 表示 Sig. < 0.001

图 3 支干流 CO₂ 通量与各指标相关性分析

Fig. 3 Correlation analysis of tributary and main stream CO₂ fluxes and other indicators

速等其他因素影响, 造成水体中 $c(\text{CO}_2)$ 相近条件下, CO₂ 通量也会出现较大差异[5 月高阳、黄石表层水体 $c(\text{CO}_2)$ 相接近, 通量却差异较大, 很有可能是因为风速影响了水-气界面 CO₂ 的扩散], 因此本研究主要分析水体 CO₂ 通量与其他水环境指标的关系。

各指标对 CO₂ 通量的影响在支干流存在较大差异, T 、DO、DOC 和 DIC 对支流 CO₂ 通量的影响显著, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 则对干流 CO₂ 通量影响显著。这可能是因为通常情况下, 支流流速相对缓慢, 而干流流速较大, 受水力扰动较强, 大部分指标对 CO₂ 通量的影响在支流更突出。而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对于 CO₂ 通量的影响与藻类有很大的关系, 监测期间干流万州、支流高阳和支流黄石的平均 $\rho(\text{DTN})$ 分别为 (2.476 ± 0.607) 、 (1.115 ± 0.628) 和 (1.139 ± 0.463)

$\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 干流总氮浓度超过国际公认富营养化阈值标准 [$\rho(\text{TN}) = 1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$], 对藻类繁殖的影响远大于支流, 从而进一步显著影响了 CO₂ 通量。

3 讨论

3.1 支干流 CO₂ 通量对比

三峡水库蓄水后, 三峡库区河流从天然河道变成了河道型及季调型水库, 且三峡水库水动力特性在空间上存在显著的差异。三峡库区不同河流的 CO₂ 通量如表 2 所示。李双等^[8] 的研究表明梅溪河支流地区受干流顶托及地形限制, 为浮游植物的生长创造了条件, 水体光合作用得到增强, 显著降低了水体中溶解 CO₂ 分压, 库区支流因此表现为大气 CO₂ 的“汇”, 而干流水体往往有着很高流速与湍流度, 加速了水体中 CO₂ 分压向大气的扩散速率, 因

此表现为明显的“源”. 吴学谦等^[9]的研究发现夏季三峡坝区干流 CO₂ 释放通量明显高于支流草堂河也是类似的原因. 程瑶等^[10]的研究表明三峡库区 3 月 CO₂ 通量表现为: 朱衣河支流 < 库区干流 < 草堂河支流, 推测是因为朱衣河与长江干流呈 60° 角, 可顺势汇入, 而草堂河的流向为 240° 与长江干流相逆, 干流水体倒灌量大, 对草堂河扰动较强不利于浮游植物的形成从而影响 CO₂ 通量. 李哲等^[24]的研究表明三峡库中回水区澎溪河 CO₂ 通量显著低于三峡库尾回水区龙溪河, 且由两方面造成: ① 澎溪河回水区云阳段经过 4 a 季节性调蓄后水体滞留时间较长, 为浮游植物生长创造了相对于龙溪河回水区更为适宜的条件. ② 龙溪河流域的污染负荷水平与淹没陆域 SOM 和 STN 等重要指标均显著高于澎溪河流域, 有机污染负荷增加势必提高细菌对有机质的降解, 刺激龙溪河的温室气体通量水平总体上显著高于澎溪河.

本研究中 2019 年 4 ~ 9 月三峡中段河流 CO₂ 通量表现为: 澎溪河支流高阳 < 干流万州 < 澎溪河支流黄石, 推测主要由以下两点原因造成: ① DIC 和 DOC 都是表明水中含碳量的指标, DIC 包含许多无机碳例如 CO₂、H₂CO₃、HCO₃⁻ 和 CO₃²⁻ 等, DOC 则为大部分细菌和微生物的代谢提供了有机碳源, 从元素转换和物质守恒角度来说, 碳源对 CO₂ 的影响是最根本的. 长江干流作为陆地生源要素向海洋输送的重要枢纽, 携带了大量流域内有机质, 为最终转化为 CO₂ 提供了重要碳源. 研究期间内高阳、黄石和万州的水体平均 ρ (DOC) 分别为 19.009、21.972 和 24.187 mg·L⁻¹, 平均 ρ (DIC) 分别为 10.690、11.267 和 11.732 mg·L⁻¹, 均表现为干流大于支流, 且万州段干流由于流速较大加强了水体 CO₂ 向大气的扩散速率, 这与大部分学者研究的干流 CO₂ 通量通常大于支流结论相符. ② 高阳平湖是澎溪河 145 m 回水区中段较具独特性的水域, 其上游(养鹿杨家坝-小江电站)、下游(代李子-牛栏溪)河段均为峡谷型河道, 高阳平湖水域则是在上述两峡谷之间水域面积为 4 ~ 5 km² 的开阔水域, 湖沼特征上近似于过水型湖泊, 流速相对缓慢, 黄石点位虽然也位于澎溪河支流, 但其河道相对狭长, 水流流速更快, 更靠近干流, 且澎溪河支流与长江干流呈 180° 夹角逆向汇入, 干流的回水顶托和倒灌作用明显, 对黄石点位影响较大, 不利于浮游植物的形成, 导致支流黄石点位水文情势复杂, CO₂ 浓度及通量高于干流万州.

3.2 影响因子探讨

3.2.1 气候因子

水温 (T) 与 CO₂ 通量的相关系数在支流中为

-0.776 (Sig. < 0.01), 在干流相关性不显著. 国内外许多学者研究了水温对 CO₂ 通量的影响: Rantakari 等^[25]的研究表明较高的水温能提高微生物酶的活性, 促进有机质加速分解, 引起水体 CO₂ 分压升高, 增加水体 CO₂ 向大气释放. 曹玉平等^[26]的研究表明马岭河河口段的 CO₂ 分压 (p CO₂) 与水温相关性为 -0.57, 表现为显著负相关 ($P < 0.05$). 赵登忠等^[5]的研究表明隔河岩水库水体温度是影响水气界面 CO₂ 交换的主要因素, 呈现为反相关关系 ($R^2 = 0.49$), 且该水库夏季 CO₂ 通量较低而秋冬季较高.

表 2 三峡库区不同河流 CO₂ 通量

Table 2 CO₂ fluxes of different rivers in the Three

Gorges Reservoir area			
研究地点	研究时间	CO ₂ 通量 /mmol·(m ² ·d) ⁻¹	文献
澎溪河支流高阳	4~9月	34.68	本研究
澎溪河支流黄石	4~9月	74.832	
三峡万州段干流	4~9月	69.576	
梅溪河支流	5月	-7.487	[8]
三峡坝区干流	5月	39.585	[9]
草堂河支流	5~7月	14.13	
干流	5~7月	45.827	[10]
朱衣河支流	3月	-51.07	
草堂河支流	3月	102.577	[24]
毗邻干流	3月	85.01	
澎溪河支流	2010~2011年	17.04	[24]
龙溪河支流	2010~2011年	175.2	

本研究认为水温对 CO₂ 通量的影响分为 3 个方面: ① 温度会影响水中 CO₂ 的溶解度, CO₂ 溶解度随温度升高而降低, 水温较高时溶解的 CO₂ 以气泡的形式逸出水面. ② DOC 为微生物代谢提供了有机碳, 当温度较高时微生物活性增加, 代谢增强使水体 CO₂ 浓度上升. ③ 水温较高时多为夏季, 光照强度较强, 藻类与水生植物光合作用吸收 CO₂ 释放氧气使得 CO₂ 浓度减少. 本文研究区域为光能资源丰富的三峡库区, 且研究时间为 4 ~ 9 月春夏季水华期间, 较强太阳辐射引发藻类强光合作用对 CO₂ 通量的影响可能占主导地位, 使水温与 CO₂ 通量总体而言呈反相关.

3.2.2 水环境因子

支流 DO 与 CO₂ 通量相关性为 -0.727 (Sig. < 0.05), 而支流 pH、干流 DO 和干流 pH 与 CO₂ 通量相关性不显著. 本研究认为 DO 与 CO₂ 通量的关系主要受水生植物和水生生物活动的共同影响, 可以进一步地理解为呼吸作用与光合作用的关系. 一方面植物与微生物呼吸作用氧化分解有机物生成 CO₂, 另一方面植物的光合作用会将水中 CO₂ 转化为氧气, 两者显然呈反向变动, 文献[16, 27]有类似

的研究结果. 另外, 水中的无机碳构成水体碳酸盐平衡 ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- \rightleftharpoons 2\text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$), 理论上 pH 可以通过改变该平衡从而影响水体 CO₂ 浓度.

3.2.3 碳源因子

DOC 和 DIC 与 CO₂ 通量相关性在支流分别为 0.734 (Sig. <0.01) 和 0.881 (Sig. <0.001), 在干流相关性不显著. DIC 和 DOC 都是表明水中含碳量的指标, DIC 包含许多无机碳例如 CO₂ 和 H₂CO₃ 等, DOC 则为大部分细菌和微生物代谢产生的 CO₂ 提供了有机碳源. 从元素转换和物质守恒角度来说, 虽然碳素转化为 CO₂ 的途径受许多因素共同影响, 但碳源对其影响是最根本的.

水体中 DIC 主要来源于 3 个方面^[28]: ①土壤 CO₂ (包括土壤有机质和硅酸盐分解); ②碳酸盐岩矿物; ③降雨输入, 而大气降水中 DIC 含量通常很低 (1 ~ 50 μmol·L⁻¹)^[29], 因此本研究忽略降水的贡献. 植物呼吸作用和土壤有机质分解产生 CO₂ 时没有分馏现象产生, 而当 CO₂ 通过土壤气孔时, 由于 ¹³C 和 ¹²C 的扩散系数有差异, 从而导致 ¹³C 大量富集^[28], 因此可通过 δ¹³C 来确定库区水体碳来源. 本课题组团队在 2020 年 6 月监测了三峡库区水体的 δ¹³C_{DIC}、δ¹³C_{DOC}、ρ(DIC) 和 ρ(DOC) (另文数据), 其变化范围分别为 -8.57‰ ~ -6.60‰、-28.20‰ ~ -24.12‰、94.28 ~ 126.73 mg·L⁻¹ 和 1.31 ~ 2.57 mg·L⁻¹, 平均值分别为 -7.22‰、-27.10‰、113.11 mg·L⁻¹ 和 1.74 mg·L⁻¹. 库区水体 DIC 来源贡献可根据 ¹³C 质量平衡原则计算:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{car}} \times R_c - \delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2} \times R_s = \delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}} \quad (9)$$

$$R_c + R_s = 1 \quad (10)$$

式中, δ¹³C_{car}、δ¹³C_{CO₂} 和 δ¹³C_{DIC} 依次表示碳酸盐岩溶解、土壤 CO₂ 和库区水体的 δ¹³C 值; R_c 和 R_s 分别表示碳酸盐矿物和土壤产生的 DIC 所占比例, 取土壤的年均 δ¹³C_{DIC} 值约为 -17‰^[30,31]、碳酸盐溶解形成的 DIC 同位素值为 0‰^[32]. 计算得到土壤 CO₂ 和碳酸盐岩对三峡库区水体 DIC 贡献占比分别为 42.98% 和 57.02%, 且支流碳酸盐岩的贡献度平均值为 50.15%, 明显低于干流 58.74%, 很可能是由于长江干流流速较大带来的沉积岩冲刷效应导致.

水库河流 DOC 可以分为外源 DOC 和内源 DOC, 外源 DOC 的主要输入途径有降雨径流带来的土壤侵蚀、岸线污水输入等, 而内源 DOC 一般指的是 POC 的降解产物等^[33,34]. 三峡库区水体 δ¹³C_{DOC} 组成的分布范围为 -28.20‰ ~ -24.12‰, 河岸土壤 δ¹³C_{DOC} 组成的分布范围为 -28.9‰ ~

-24.3‰^[35], 重叠区域基本处于土壤有机质的优势范围内, 反映库区水体 DOC 主要来源于土壤有机质侵蚀. 污水厂出厂生活污水的 δ¹³C_{DOC} 范围一般为 -25‰ ~ -27‰, 表明生活污水排放也是 DOC 的重要贡献源. 而水体 DOC 含量与 POC 含量、δ¹³C_{DOC} 与 δ¹³C_{POC} 并无显著相关性, 证明 POC 的转化不是三峡库区水体 DOC 的主要来源.

3.2.4 营养因子

在干流, NH₄⁺-N 与 CO₂ 通量相关系数为 0.886 (Sig. <0.05), NO₃⁻-N、DTN 和 DTP 与 CO₂ 通量相关性不显著; 而在支流, 所有营养指标与 CO₂ 通量相关性均不显著. 监测期间干流万州平均 ρ(DTN) 为 (2.476 ± 0.607) mg·L⁻¹, 富营养化状态的水体给浮游植物的加速繁殖提供了有利条件. 本研究认为浮游植物对 CO₂ 通量表现为促进或抑制主要取决于以下两方面: 一是水体总光合作用和总呼吸作用的强度差, 二是浮游植物的存活状态. 一般认为藻类能够通过初级生产固定大量 CO₂ 成为水体的碳汇, 富营养化通过增加藻类生物量促进碳汇也有报道^[36,37]. 但这些研究只关注了藻类生长阶段所固定的 CO₂, 忽视了藻类死亡被细菌分解后所释放的 CO₂、CH₄. 秦宇等^[38] 在高阳平湖的原位实验研究表明, 水华期间采集的大部分水样从第 2 d 开始水中藻类逐渐死亡, 沉积在实验桶的底部或附着在侧面, 淤积的藻类尸体为微生物代谢提供了充足的有机物, 藻类越多产生的温室气体就越多.

Huttunen 等^[39] 的研究通过对芬兰不同营养水平的湖泊调查发现, 富营养湖泊 CO₂ 的释放量变化幅度很大, 且其中大多数比贫营养、中营养湖泊的 CO₂ 释放量都多. 水体中生源物质浓度改变, 会影响水生植物初级生产力和浮游生物新陈代谢过程, 从而间接影响水体中 CO₂ 浓度和水气界面 CO₂ 释放通量^[40]. 张丽华等^[41] 的研究也表明, 氮素输入加强水生生态系统 CO₂ 的释放强度.

3.2.5 沉积物因子

本研究中沉积物因子与 CO₂ 通量的相关性在支干流均不显著, 但理论上沉积物释放的 CH₄ 可能对水体 CO₂ 有一定的影响. 水体中的 CH₄ 来自水底淤泥中厌氧环境下的产甲烷菌, 通过植物传输、气泡排放和扩散等方式进入大气^[41]. 底泥有机碳在厌氧分解时会为产甲烷菌提供反应底物: 乙酸和 H₂/CO₂, 一般认为沉积物有机碳含量与 CH₄ 产量呈正相关性^[42]. Bastviken 等^[43] 的研究发现, 沉积物产生的 CH₄ 通过扩散方式上升到水面

的过程中,大部分 CH_4 被甲烷氧化菌氧化,文献 [44] 也有类似的研究结论. 基于上述学者的研究结论可以推测出,当沉积物 TOC 含量越高产生的 CH_4 越多,而甲烷在上升过程被甲烷氧化菌大量氧化,导致水环境因子中的 DO 减少,最终影响 CO_2 通量.

3.3 水-气界面 CO_2 通量影响机制初探

相关性分析能很好地表现各指标分别与 CO_2 通量的相关程度,但难以较全面地表明其对 CO_2 通量的贡献大小,本研究采用随机森林算法计算各指标对 CO_2 通量的贡献率,即特征重要性评估,其实质即计算每个特征在随机森林中的每颗决策树上的贡献值. 在 Python3.6 编程软件中(软件框架为基于 Keras 深度学习工具的 Tensorflow 框架),从 sklearn 库里调用 RandomForestClassifier 算法,对相关指标及 CO_2 通量进行敏感因子路径解析,可得到各指标

对其重要性百分比.

随机森林算法中,自变量数据集间的自相关性越大,随机森林的错误率越高,因此需要适当筛选独立特征. T 、DO、DOC、DIC 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 CO_2 通量呈显著相关,但 DOC 与 DIC 自相关性过高,考虑到 DIC 相较于 DOC 是 CO_2 更直接的来源,保留 T 、DO、DIC 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. 考虑到微生物通常以 5:1 的比例进行代谢 N 和 P,增加 DTP 指标. 沉积物因子与 CO_2 通量相关性不显著,但 3.2.5 节分析表明沉积物中 TOC 对 CO_2 通量可能存在一定的影响,故增加沉积物 TOC 指标. 将 T 、DO、DIC、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、DTP 和沉积物中 TOC 这 6 个指标作为自变量, CO_2 通量作为因变量输入随机森林算法,得到这 6 个指标对 CO_2 通量的贡献百分比分别为:18.81%、13.49%、27.25%、22.58%、9.79%和 8.08%,将所有分析整理后绘制图 4.

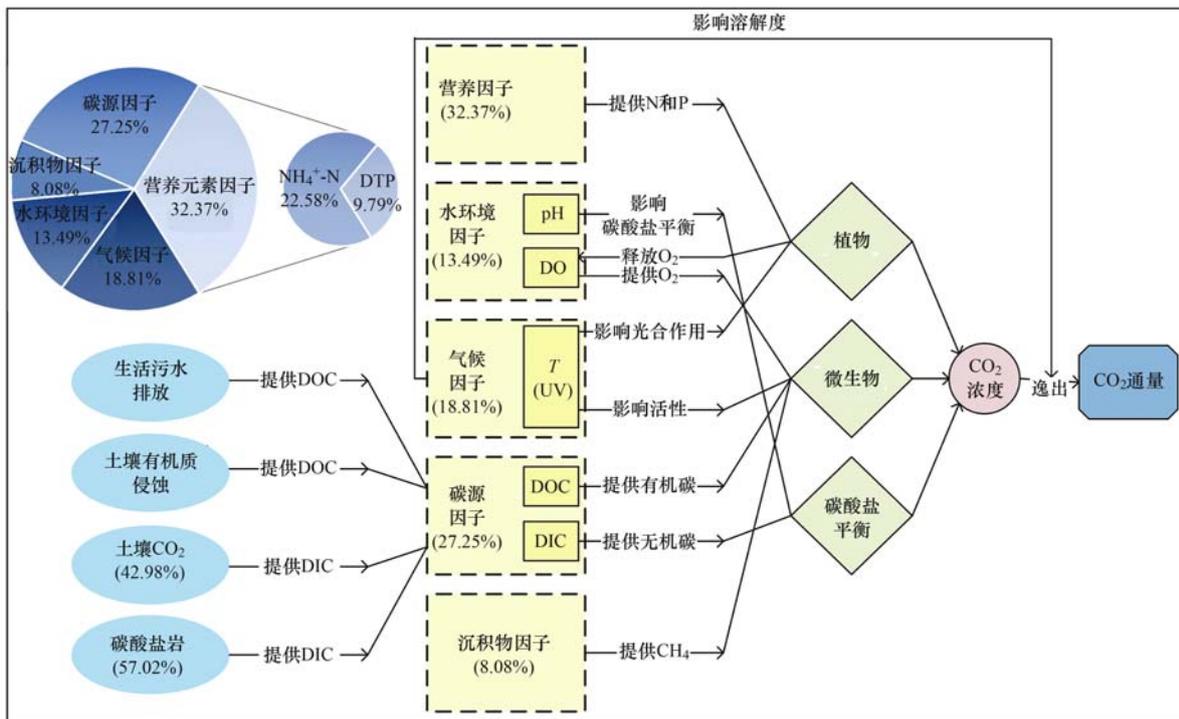


图 4 三峡库区水-气界面 CO_2 通量影响机制

Fig. 4 Influence mechanism of CO_2 fluxes at the water-gas interface in the Three Gorges reservoir area

生活污水排放和土壤有机物侵蚀、土壤 CO_2 和碳酸盐岩分别为三峡库区水体提供了 DOC 和 DIC 的主要来源,为水体 CO_2 排放提供物质基础,而其余 4 类因子通过影响藻类植物光合作用、细菌微生物代谢作用和碳酸盐电离平衡这 3 条途径从而影响水体 CO_2 浓度,气候因子还可以影响 CO_2 的溶解度从而影响水-气界面 CO_2 通量. 营养元素因子和碳源因子对 CO_2 通量的贡献百分比分别为 32.37% 和 27.25%,总占比过半,之后依次为气候因子、水环

境因子和沉积物因子,分别为 18.81%、13.49% 和 8.08%. 这表明水库 CO_2 的排放控制可以着重从控制水体富营养化和控制碳来源入手,全球变暖和底泥淤积等宏观现象也会对 CO_2 通量有一定的影响.

4 结论

(1) 监测期间内高阳、黄石和万州平均 CO_2 通量为 (1.445 ± 1.739) 、 (3.118 ± 2.963) 和 $(2.899 \pm 1.144) \text{ mmol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$,表现为:澎溪河支流高阳

<干流万州 < 澎溪河支流黄石. 从变化幅度来看, 支流水体 CO₂ 的浓度和通量变幅较大, 干流水体变化幅度则相对较小, 是较稳定的 CO₂“源”.

(2) 相关性分析表明, 各指标对 CO₂ 通量的影响在支干流存在较大差异, T、DO、DOC 和 DIC 对支流 CO₂ 通量的影响显著, NH₄⁺-N 对干流 CO₂ 通量影响显著.

(3) 由于长江干流碳含量和流速一般比支流更高, 通常情况下干流 CO₂ 通量大于支流. 但水文情势的不同使得同一支流不同点位 CO₂ 通量具有明显空间差异, 支流高阳点位位于库湾处利于浮游植物生长使 CO₂ 通量较低, 支流黄石点位位于流速较快的河道, 受干流回水顶托和倒灌作用使 CO₂ 通量显著大于干流万州点位.

(4) 营养元素因子和碳源因子对 CO₂ 通量的贡献率分别为 32.37% 和 27.25%, 总占比过半, 其后依次为气候因子、水环境因子和沉积物因子, 分别为 18.81%、13.49% 和 8.08%, 这表明水库 CO₂ 的排放控制可以着重从控制水体富营养化和控制碳来源入手, 全球变暖、底泥淤积等宏观现象也会对水库 CO₂ 排放有一定的影响.

参考文献:

- [1] Rudd J W M, Harris R, Kelly C A, *et al.* Are hydroelectric reservoirs significant sources of greenhouse gases? [J]. *AMBIO*, 1993, **22**(4): 246-248.
- [2] 杨正健, 刘德富, 纪道斌, 等. 防控支流库湾水华的三峡水库潮汐式生态调度可行性研究[J]. *水电能源科学*, 2015, **33**(12): 48-50, 109.
Yang Z J, Liu D F, Ji D B, *et al.* Feasibility study on tide-type ecological operation method to control algal bloom in tributaries of Three Gorges Reservoir[J]. *Water Resources and Power*, 2015, **33**(12): 48-50, 109.
- [3] 纪道斌, 刘德富, 杨正健, 等. 三峡水库香溪河库湾水动力特性分析[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2010, **40**(1): 101-112.
Ji D B, Liu D F, Yang Z J, *et al.* Hydrodynamic characteristics of Xiangxi bay in Three Gorges Reservoir [J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2010, **40**(1): 101-112.
- [4] 秦宇, 苏友恒, 李哲, 等. 三峡水库中段库底水体 CH₄ 浓度变化及其主要影响因素[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(1): 299-308.
Qin Y, Su Y H, Li Z, *et al.* CH₄ variation and main influencing factors of bottom water column in the middle section of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(1): 299-308.
- [5] 赵登忠, 谭德宝, 李翀, 等. 隔河岩水库二氧化碳通量时空变化及影响因素[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 954-963.
Zhao D Z, Tan D B, Li C, *et al.* Tempo-spatial variations and influential factors of carbon dioxide emissions from the Geheyan Reservoir over the Qingjiang River basin, China [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 954-963.
- [6] 秦宇, 蒋成勇, 张渝阳, 等. 三峡水库不同运行工况下中段干流碳源气体释放通量研究[J]. *重庆大学学报*, 2020, **43**(8): 97-106.
- Qin Y, Jiang C Y, Zhang Y Y, *et al.* Study on the release fluxes of carbon source gases under different operating conditions in the middle reach of the main stream of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, **43**(8): 97-106.
- [7] 王亮, 肖尚斌, 刘德富, 等. 香溪河库湾夏季温室气体通量及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1471-1475.
Wang L, Xiao S B, Liu D F, *et al.* Fluxes of greenhouse gases from Xiangxi River in summer and their influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1471-1475.
- [8] 李双, 王雨春, 操满, 等. 三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量[J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 885-891.
Li S, Wang Y C, Cao M, *et al.* Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the mainstream and tributary of the central Three Gorges Reservoir in summer [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(3): 885-891.
- [9] 吴学谦, 操满, 傅家楠, 等. 三峡水库夏季干流、支流(草堂河)水体的二氧化碳分压及扩散通量[J]. *上海大学学报(自然科学版)*, 2015, **21**(3): 311-318.
Wu X Q, Cao M, Fu J N, *et al.* Partial pressure and diffusion flux of dissolved carbon dioxide in the main stream of the Three Gorge Reservoir and the Caotang River in summer [J]. *Journal of Shanghai University (Natural Science)*, 2015, **21**(3): 311-318.
- [10] 程瑶, 王雨春, 胡明明. 三峡水库支流水文情势差异对水-气界面二氧化碳释放通量特征的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, **36**(1): 216-223.
Cheng Y, Wang Y C, Hu M M. Influence of different water regimes of tributaries in Three Gorges Reservoir on air-water interface CO₂ fluxes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2017, **36**(1): 216-223.
- [11] 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. 243-285.
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 1999.
- [13] United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Hydropower Association. GHG measurement guidelines for freshwater reservoirs [M]. Paris: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, International Hydropower Association, 2010.
- [14] Weiss R F. Carbon dioxide in water and seawater; the solubility of a non-ideal gas [J]. *Marine Chemistry*, 1974, **2**(3): 203-215.
- [15] 秦宇, 杨博道, 李哲, 等. 夏季金沙江下游水-气界面 CO₂、CH₄ 通量特征初探[J]. *湖泊科学*, 2017, **29**(4): 991-999.
Qin Y, Yang B X, Li Z, *et al.* CO₂ and CH₄ flux across water-air interface in summer in the downstream of Jinsha River, Southwest China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2017, **29**(4): 991-999.
- [16] 秦宇, 王紫薇, 李哲, 等. 三峡水库澎溪河水-气界面 CO₂ 与 CH₄ 通量特征及影响因素初探[J]. *地球环境学报*, 2019, **10**(2): 177-189.
Qin Y, Wang Z W, Li Z, *et al.* CO₂ and CH₄ flux across water-air interface and environmental factors in Pengxi River of the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Earth Environment*, 2019, **10**(2): 177-189.
- [17] Jähne B, Libner P, Fischer R, *et al.* Investigating the transfer processes across the free aqueous viscous boundary layer by the controlled flux method [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1989, **41**(2): 177-195.
- [18] Cole J J, Caraco N F. Atmospheric exchange of carbon dioxide in

- a low-wind oligotrophic lake measured by the addition of SF₆[J]. *Limnology and Oceanography*, 1998, **43**(4): 647-656.
- [19] 王雨潇. 三峡库区万州段干流、典型支流 CO₂、CH₄ 通量变化特征研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2020.
Wang Y X. Study on the variation characteristics of CO₂ and CH₄ fluxes in the main stream and typical tributaries of Wanzhou section of the Three Gorges Reservoir [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2020.
- [20] 王川隘. 三峡库区风效应下的船舶操纵运动数值模拟研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2019.
Wang C A. Numerical simulation of ship maneuvering with wind effect in Three Gorges reservoir area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [21] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1992, **97**(C5): 7373-7382.
- [22] Roehm C L, Prairie Y T, Giorgio P A D. The pCO₂ dynamics in lakes in the boreal region of northern Québec, Canada [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, **23**(3), doi: 10.1029/2008GB003297.
- [23] Andersen C B. Understanding carbonate equilibria by measuring alkalinity in experimental and natural systems [J]. *Journal of Geoscience Education*, 2002, **50**(4): 389-403.
- [24] 李哲, 白镭, 郭劲松, 等. 三峡水库两条支流水-气界面 CO₂、CH₄ 通量比较初探[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1008-1016.
Li Z, Bai L, Guo J S, *et al.* Comparative study on water-air CO₂, CH₄ flux in two tributaries in the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1008-1016.
- [25] Rantakari M, Kortelainen P. Interannual variation and climatic regulation of the CO₂ emission from large boreal lakes [J]. *Global Change Biology*, 2005, **11**(8): 1368-1380.
- [26] 曹玉平, 焦树林, 邓飞艳, 等. 马岭河河口段水-气界面二氧化碳排放特征[J]. *环境科学与技术*, 2018, **41**(12): 195-199, 205.
Cao Y P, Jiao S L, Deng F Y, *et al.* Characteristics of air-water CO₂ exchange in estuary of Malinghe River [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, **41**(12): 195-199, 205.
- [27] 罗佳宸, 毛璐, 李思悦. 三峡库区主要河流秋季 pCO₂ 及其影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3134-3141.
Luo J C, Mao R, Li S Y. pCO₂ in the main rivers of the Three Gorges Reservoir and its influencing factors [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3134-3141.
- [28] Li X D, Liu C Q, Liu X L, *et al.* Identification of dissolved sulfate sources and the role of sulfuric acid in carbonate weathering using dual-isotopic data from the Jialing River, Southwest China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, **42**(3): 370-380.
- [29] 李甜甜, 季宏兵, 江用彬, 等. 赣江上游河流水化学的影响因素及 DIC 来源[J]. *地理学报*, 2007, **62**(7): 764-775.
Li T T, Ji H B, Jiang Y B, *et al.* Hydro-geochemistry and the sources of DIC in the upriver tributaries of the Ganjiang River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(7): 764-775.
- [30] Conley D J. Biogeochemical nutrient cycles and nutrient management strategies [J]. *Hydrobiologia*, 1999, **410**: 87-96.
- [31] Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, *et al.* Human impacts on the large world rivers: Would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration? [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999, **13**(4): 1099-1105.
- [32] 李思亮, 刘丛强, 丁虎, 等. δ¹³C-DIC 在河流风化和碳生物地球化学过程中的应用[J]. *地球环境学报*, 2012, **3**(4): 929-935.
Li S L, Liu C Q, Ding H, *et al.* The application of δ¹³C-DIC on weathering and biogeochemical processes of carbon in rivers [J]. *Journal of Earth Environment*, 2012, **3**(4): 929-935.
- [33] 邱雨生, 陈敏, 黄奕普, 等. 南极普里兹湾及其邻近海域溶解有机碳的分布[J]. *海洋学报*, 2004, **26**(3): 38-46.
Qiu Y S, Chen M, Huang Y P, *et al.* Distribution of dissolved organic carbon in and near the Prydz Bay, Antarctica [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004, **26**(3): 38-46.
- [34] 王保栋, 王桂云, 郑昌洙, 等. 南黄海冬季生源要素的分布特征[J]. *黄渤海海洋*, 1999, **17**(1): 40-45.
Wang B D, Wang G Y, Zheng Z C, *et al.* Distribution features of bioactive elements in seawater in the southern Yellow Sea in winter [J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1999, **17**(1): 40-45.
- [35] Wu Y, Zhang J, Liu S M, *et al.* Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, **71**(1-2): 13-25.
- [36] Trolle D, Staehr P A, Davidson T A, *et al.* Seasonal dynamics of CO₂ flux across the surface of shallow temperate lakes [J]. *Ecosystems*, 2012, **15**(2): 336-347.
- [37] Anderson N J, Bennion H, Lotter A F. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe [J]. *Global Change Biology*, 2014, **20**(9): 2741-2751.
- [38] 秦宇, 张渝阳, 李哲, 等. 三峡澎溪河水华期间水体 CH₄ 浓度及其通量变化特征初探[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1578-1588.
Qin Y, Zhang Y Y, Li Z, *et al.* CH₄ fluxes during the algal bloom in the Pengxi River [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1578-1588.
- [39] Huttunen J T, Alm J, Liikanen A, *et al.* Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions [J]. *Chemosphere*, 2003, **52**(3): 609-621.
- [40] 杨平, 全川, 何清华, 等. 闽江口鱼虾混养塘水-气界面温室气体通量及主要影响因子[J]. *环境科学学报*, 2013, **33**(5): 1493-1503.
Yang P, Tong C, He Q H, *et al.* Greenhouse gases fluxes at water-air interface of aquaculture ponds and influencing factors in the Min River estuary [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33**(5): 1493-1503.
- [41] 张丽华, 宋长春, 王德宣. 氮输入对沼泽湿地碳平衡的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(7): 1257-1263.
Zhang L H, Song C C, Wang D X. Effects of nitrogen fertilization on carbon balance in the freshwater marshes [J]. *Environmental Science*, 2006, **27**(7): 1257-1263.
- [42] 李玲玲, 薛滨, 姚书春. 湖泊沉积物甲烷的产生和氧化研究的意义及应用[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, **35**(4): 634-645.
Li L L, Xue B, Yao S C. The significance and application of the research on production and oxidation of methane in lake sediments [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, **35**(4): 634-645.
- [43] Bastviken D, Ejlertsson J, Tranvik L. Measurement of methane oxidation in lakes: a comparison of methods [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(15): 3354-3361.
- [44] 秦宇, 黄璜, 李哲, 等. 内陆水体好氧甲烷氧化过程研究进展[J]. *湖泊科学*, 2021, **33**(4): 1004-1017.
Qin Y, Huang H, Li Z, *et al.* Research progress of aerobic methane oxidation process in inland waters [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2021, **33**(4): 1004-1017.

CONTENTS

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Urban Soils of Major Cities in China	PENG Chi, HE Ya-lei, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (1)
Environmental Behaviors of Plant Growth Regulators in Soil; A Review	CHEN Liang, HOU Jie, HU Xiao-lei, <i>et al.</i> (11)
Preparation and Application of Magnetic Water Treatment Materials Based on Iron Sludge	ZENG Hui-ping, ZHAI Long-xue, LI Dong, <i>et al.</i> (26)
Meta-analysis of the Impact of Different Ozone Metrics on Total Mortality in China	RUAN Fang-fang, LIU Ji-xin, CHEN Zhi-wei, <i>et al.</i> (37)
Variation Characteristics and Potential Sources of the Mt. Haituo Aerosol Chemical Composition in Different Pollution Processes During Winter in Beijing, China	ZHAO De-long, WANG Fei, LIU Dan-tong, <i>et al.</i> (46)
Real-time Source Apportionment of PM _{2.5} and Potential Geographic Origins of Each Source During Winter in Wuhan	JIANG Shu-ning, KONG Shao-fei, ZHENG Huang, <i>et al.</i> (61)
Spatiotemporal Distribution and Seasonal Characteristics of Regional Transport of PM _{2.5} in Yuncheng City	WANG Yun-tao, ZHANG Qiang, WEN Xiao-yu, <i>et al.</i> (74)
Three-dimensional Structure Variation of PM _{2.5} During Cold Front Advance in Eastern China	MOU Nan-nan, ZHU Bin, LU Wen (85)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nitrated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Atmosphere of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	LI Yan-xi, XIE Dan-ping, LI Yu-qing, <i>et al.</i> (93)
Atmospheric VOCs Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Large-scale Integrated Industrial Area and Surrounding Areas in Southwest China	LI Ling, ZHANG Dan, HU Wei, <i>et al.</i> (102)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient VOCs in Lhasa	YU Jia-yan, HAN Yan, CHEN Mu-lan, <i>et al.</i> (113)
Variation Characteristics of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) Volume Fraction During Hangzhou COVID-19 Period	LIN Xu, YAN Ren-chang, JIN Jia-jia, <i>et al.</i> (123)
Role of Atmospheric VOCs in Ozone Formation in Summer in Shanghai Suburb	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (132)
Characteristics of VOCs and Formation Potentials of O ₃ and SOA in Autumn and Winter in Tongchuan, China	YI Xiao-xiao, LI Jiang-hao, LI Guang-hua, <i>et al.</i> (140)
Emission Characteristics and Emission Factors of Volatile Organic Compounds from E-waste Dismantling and Recycling Processes	XIE Dan-ping, HUANG Zhong-hui, LIU Wang, <i>et al.</i> (150)
Nonlinear Response Relationship Between Ozone and Precursor Emissions in the Pearl River Delta Region Under Different Transmission Channels	WU Yong-kang, CHEN Wei-hua, YAN Feng-hua, <i>et al.</i> (160)
Characteristics of Ozone Pollution and Influencing Factors in Urban and Suburban Areas in Zibo	WANG Yu-yan, YANG Wen, WANG Xiu-yan, <i>et al.</i> (170)
Pollution Characteristics and Health Risk of Heavy Metals in Fugitive Dust Around Zhaotong City	PANG Xiao-chen, HAN Xin-yu, SHI Jian-wu, <i>et al.</i> (180)
Characteristics of Microplastic Present in Urban Road Dust	FANG Qin, NIU Si-ping, CHEN Yu-dong, <i>et al.</i> (189)
Stable Isotopes of Precipitation in the Eastern Tarim River Basin and Water Vapor Sources	SONG Yang, WANG Sheng-jie, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (199)
Characteristics and Risk Assessment of Antibiotic Contamination in Chishui River Basin, Guizhou Province, China	WU Tian-yu, LI Jiang, YANG Ai-jiang, <i>et al.</i> (210)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water and Groundwater in Wuding River Basin	LI Shu-jian, HAN Xiao, WANG Wen-hui, <i>et al.</i> (220)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Nutrients and Heavy Metals in Sediments of the Fuhe River Influenced Area, Baiyangdian Lake	CHEN Xing-hong, LI Li-qing, ZHANG Mei-yi, <i>et al.</i> (230)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Mangrove Sediments in the Jiulong River Estuary and the Association with Heavy Metals	LIU Chang-jun, LUO Zhuan-xi, YAN Yu, <i>et al.</i> (239)
Quantitative Analysis of the Correlation Between Macroenthos Community and Water Environmental Factors and Aquatic Ecosystem Health Assessment in the North Canal River Basin of Beijing	HU Xiao-hong, ZUO De-peng, LIU Bo, <i>et al.</i> (247)
Analysis on the Spatial Variability Mechanism of the Characteristic Water Quality Factors of Urban River Channel Reclaimed Water	LIU Quan-zhong, PENG Ke, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (256)
DOM Characteristics Analysis of Surface Sediment-overlying Water in Suzhou Landscape River Course	LI Chao-nan, HE Jie, ZHU Xue-hui, <i>et al.</i> (267)
Distribution of Typical Pollutants from Rainwater Sewer Sediments in Suzhou City	YE Rong, SHENG Ming-jun, JIANG Yong-bo, <i>et al.</i> (277)
Persistent Inhibition of Ammonium Released from Contaminated Sediments Through a Modified Zeolite and Biofilm System Enhanced by Signaling Molecules	XU Jin-lan, XU Yang, LI Xiu-min, <i>et al.</i> (285)
Effects of the Three Gorges Reservoir Operation on Vertical Distribution of Chlorophyll a and Environmental Factors in Tributaries	TIAN Pan, LI Ya-li, LI Ying-jie, <i>et al.</i> (295)
Characteristic Analysis of <i>nirS</i> Denitrifying Bacterial Community in Lijiahe Reservoir During Stratification	LIANG Wei-guang, HUANG Ting-lin, ZHANG Hai-han, <i>et al.</i> (306)
Spatial and Temporal Distribution of Aerobic Denitrification Bacterial Community in Sediments of Gangan Reservoir	ZHANG Zi-wei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (314)
Distribution Characteristics and Health Risk Assessment of Metal Elements for Groundwater in the Ningxia Region of China	WANG Xiao-dong, TIAN Wei, ZHANG Xue-yan (329)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of High-Iodine Groundwater in Rapidly Urbanized Delta Areas: A Case Study of the Pearl River Delta	LU Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (339)
Multimedia Distribution Characteristics and Risk Assessment of 22 PPCPs in the Water Environment of Qingpu District, Yangtze River Delta Demonstration Area	ZHANG Zhi-bo, DUAN Yan-ping, SHEN Jia-hao, <i>et al.</i> (349)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of 209 Polychlorinated Biphenyls in Dongting Lake and the Inflow Rivers	HUANG Zhi-feng, ZHENG Bing-hui, YIN Da-qiang, <i>et al.</i> (363)
Estimation of Nitrous Oxide Emission from River System Based on Water Discharge and Dissolved Nitrous Oxide Concentration	LI Bing-qing, HU Min-peng, WANG Ming-feng, <i>et al.</i> (369)
Comparison Between Tributary and Main Stream and Preliminary Influence Mechanism of CO ₂ Flux Across Water-air Interface in Wanzhou in the Three Gorges Reservoir Area	QIN Yu, OUYANG Chang-yue, WANG Yu-xiao, <i>et al.</i> (377)
Preparation of Functional Attapulgite Composite and Its Adsorption Behaviors for Congo Red	LIAO Xiao-feng, ZHONG Jing-ping, CHEN Yun-nen, <i>et al.</i> (387)
Adsorption Characteristics and Long-term Effectiveness Evaluation of Iron-nitrogen Co-doped Biochar for Secondary Water-Soluble Organic Matter	WU Chen-xi, XU Lu, JIN Xin, <i>et al.</i> (398)
Nitritation Performance of Zeolite Moving Bed Biofilm Reactor for Ammonium Wastewater Treatment	DENG Cui-lan, GUO Lu, WANG Xiao-jun, <i>et al.</i> (409)
Effect of Temperature on ANAMMOX Process in Sequencing Batch Biofilm Reactors; Nitrogen Removal Performance and Bacterial Community	WU Shan, WANG Shu-ya, WANG Fen, <i>et al.</i> (416)
Effects of Carriers on ANAMMOX Sludge Activity Recovery and Microbial Flora Characteristics	LUO Jing-wen, YANG Jin-jin, LI Shao-kang, <i>et al.</i> (424)
Spatial Distribution and Source Analysis of Soil Heavy Metals in a Small Watershed in the Mountainous Area of Southern Ningxia Based on PMF Model	XIA Zi-shu, BAI Yi-ru, WANG You-qi, <i>et al.</i> (432)
Heavy Metal Concentration Characteristics and Health Risks of Farmland Soils in Typical Pyrite Mining Area of the Central Zhejiang Province, China	CHENG Xiao-meng, SUN Bin-bin, WU Chao, <i>et al.</i> (442)
Risk Zoning of Heavy Metals in a Peri-urban Area in the Black Soil Farmland Based on Agricultural Products	WU Song-ze, WANG Dong-yan, LI Wen-bo, <i>et al.</i> (454)
Main Control Factors of Cadmium Content in Rice in Carbonate Rock Region of Guangxi Based on the DGT Technique	SONG Bo, XIAO Nai-chuan, MA Li-jun, <i>et al.</i> (463)
Inhibitory Effects of Soil Amendment Coupled with Water Management on the Accumulation of Cd and Pb in Double-Cropping Rice	LI Lin-feng, WANG Yan-hong, LI Yi-chun, <i>et al.</i> (472)
Characteristics and Health Risk Assessment of Cadmium, Lead, and Arsenic Accumulation in Leafy Vegetables Planted in a Greenhouse	DONG Jun-wen, GAO Pei-pei, SUN Hong-xin, <i>et al.</i> (481)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyls in E-waste Disposal Residue-Soil-Vegetable	ZHANG Ya-ping, LU Zhan-lu, WANG Xian-jiang, <i>et al.</i> (490)
Soil-crop Distribution and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides on Typical Agricultural Land in Southern Leizhou Peninsula	LIANG Xiao-hui, XIE Qi-lai, ZHENG Qian, <i>et al.</i> (500)
Effects of Heavy Metal Content on Fungal Community Structure in Urban Soil	GUO Da-lu, ZHANG Jian, SHEN Si, <i>et al.</i> (510)
Effects of Long-term Fertilization on Soil Nutrient Characteristics and Microbial Resource Restrictions in a Terrace on the Loess Plateau	WU Chun-xiao, GAO Xiao-feng, YAN Ben-shuai, <i>et al.</i> (521)
Microbial Composition and Diversity in Soil of <i>Torreya grandis</i> cv. <i>Merrillii</i> Relative to Different Cultivation Years After Land Use Conversion	JIANG Ni-wen, LIANG Chen-fei, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (530)
Effect of Combined Application of Biochar with Chemical Fertilizer and Organic Fertilizer on Soil Phosphatase Activity and Microbial Community	YANG Wen-na, YU Luo, LUO Dong-hai, <i>et al.</i> (540)
Extracellular Enzyme Stoichiometry and Microbial Metabolism Limitation During Vegetation Restoration Process in the Middle of the Qinling Mountains, China	XUE Yue, KANG Hai-bin, YANG Hang, <i>et al.</i> (550)
Effects of Biodegradable Film Raw Material Particles on Soil Properties, Wheat Growth, and Nutrient Absorption and Transportation	MIN Wen-hao, WANG Chun-li, WANG Li-wei, <i>et al.</i> (560)
Effects of Stalk Incorporation on Soil Carbon Sequestration, Nitrous Oxide Emissions, and Global Warming Potential of a Winter Wheat-Summer Maize Field in Guanzhong Plain	WAN Xiao-nan, ZHAO Ke-yue, WU Xiong-wei, <i>et al.</i> (569)