

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20242135

长江干流 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 的时空分布及与环境因子的关系

孙文秀¹, 吴文强¹, 钱宝², 周怀东¹, 张剑楠¹, 张易凡¹, 董飞¹

(1. 中国水利水电科学研究院水生态环境研究所, 北京 100038; 2. 水利部长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为了估算长江干流 CO_2 分压(p_{CO_2})、水—空气界面 CO_2 通量(F_{CO_2})的时空特征, 自上而下选取长江干流 8 个监测点位, 基于 2020~2022 年水质数据, 通过 CO_2SYS 软件计算了水体 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 值, 分析了长江干流 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 的时空变化, 并运用 Mantel test 方法研究了 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 与环境因子的关系。结果表明, 2020~2022 年长江干流 p_{CO_2} 范围为 450.02~3 615.88 μatm , 高于 2020~2022 年全球大气中 CO_2 的平均分压(414.78 μatm), 空间上 p_{CO_2} 分布特征为中游>上游>入海口; 2020~2022 年水—气 F_{CO_2} 平均值分别为 40.25、74.74、61.85 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 空间上表现为上游>中游>入海口。长江干流水体 p_{CO_2} 处于过饱和状态, 2020~2022 年水—气 F_{CO_2} 整体呈上升趋势; p_{CO_2} 与水温、溶解氧、pH 值呈显著正相关, F_{CO_2} 与 pH 值、溶解氧、电导率浓度呈正相关。

关键词: 长江; CO_2 分压; CO_2 通量; 时空特征; 相关性

中图分类号: X832

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2025)09-0047-05

1 引言

CO_2 对温室效应贡献在温室气体中约占 70%, 其来源及控制成为应对气候变化的重要基础。相关研究表明^[1-2] 大部分内陆水体具有过饱和的 CO_2 浓度, 是大气中 CO_2 的重要来源。河流每年向海洋输送的过程中至少 $0.8 \times 10^3 \text{Tg C}$, 通过气体交换以 CO_2 的形式释放返回到大气^[3-4]。有研究估算^[5] 全球每年从陆地汇入内陆水域的碳总量约为 $5.1 \times 10^3 \text{Tg}$, 其中约 $3.9 \times 10^3 \text{Tg C}$ 以 CO_2 的形式释放到大气中。水—气界面 CO_2 交换通量与 HCO_3^- 密切相关, 普遍存在于不同气候带的水体中^[6]。近年来, SANCHEZ-CARRILLO S 等^[7-9] 分析了不同区域的内陆水体, 结果表明不同区域水体 CO_2 的释放通量存在差异。目前对于 p_{CO_2} 和水—气 F_{CO_2} 的研究主要集中在长江某一段区域, 很少涵盖上游到入海口的空间变化^[10-11]。为了弥补当前针对长江流域研究中范围和内容的不足, 本文选取了长江干流 8 个点位涵盖了上、中、下游, 基于 2020~

2022 年水质数据, 通过 CO_2SYS 软件估算了不同区域 p_{CO_2} 及水—气 F_{CO_2} , 同时运用 Mantel test 方法分析了其与环境因子的关系。

2 材料与方法

2.1 研究区域

长江发源于“世界屋脊”青藏高原, 干流先后流经青海、四川、西藏、云南、重庆、湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海共 11 个省、自治区和直辖市, 最后注入东海, 全长 6 300 km, 是世界第三长河, 也是中国最长的河流。其流域位于 $25^\circ\text{N} \sim 35^\circ\text{N}$ 、 $90^\circ\text{E} \sim 122^\circ\text{E}$ 之间, 总面积为 $181 \times 10^4 \text{km}^2$, 约占我国面积的 1/5(图 1)。流域内亚热带季风气候十分典型, 年平均温度与年降水量时空分布不均匀, 平均降雨量 $724 \pm 52 \text{mm}$ 。按地理条件和水文特征差异, 长江划分为上、中、下游 3 段, 其中河源—湖北宜昌为上游, 宜昌—江西湖口为中游, 湖口以下为下游。

2.2 数据收集

收集主干流 8 个点位的水质数据, 其中上游 4 个点位 C1(朱沱)、C2(寸滩)、C3(清溪场)、C4

收稿日期: 2024-11-14, **修回日期:** 2024-12-16

基金项目: 水利部重大科技项目(SKS-2022058)

作者简介: 孙文秀(1993-), 女, 博士研究生, 研究方向为水环境监测与污染防治, E-mail: sunwenxiuemail@126.com

通讯作者: 吴文强(1977-), 男, 博士、正高级工程师, 研究方向为水环境模拟与规划, E-mail: wwqemail@126.com

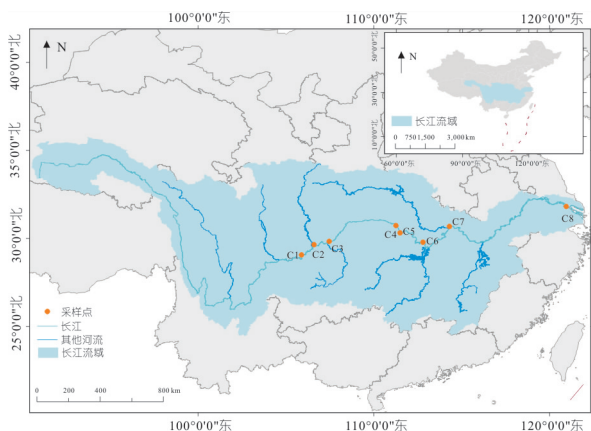


图 1 研究区域采样点位

Fig. 1 Sampling points in the study area

(宜昌);中游 3 个点位 C5(枝城)、C6(监利)、C7(37 码头);下游 1 个点位入海口 C8(徐六泾)。水质数据包括温度、pH 值、溶解氧(DO)、电导率、总磷(TP)和总氮(TN)。数据来源于中华人民共和国生态环境部公布的国家地表水水质自动监测实时数据。

2.3 水体 CO₂ 分压计算

通过“CO₂ SYS”软件利用 pH 值、温度和碱度数据计算可确定河流 p_{CO_2} 。收集的数据中无碱度数据,因此碱度值参照已建立的方程进行计算^[12]:

$$C_{Conductivity} = 7.76 + 2A_{Alkalinity} \quad (1)$$

式中, $C_{Conductivity}$ 为电导率, $\mu S/cm$; $A_{Alkalinity}$ 为碱度, mg/L 。

为了验证该方法的可靠性,选取 2023 年在长江一级支流汉江监测部分点位的碱度值与方程计算值进行了比较,结果见图 2。由图 2 可知,大多数检测值与观测值高度一致,证明了与该计算方法的一致性和可靠性。UPADHYAY P 等^[13]也检验了该方法的可靠性,与本文研究验证结果一致。

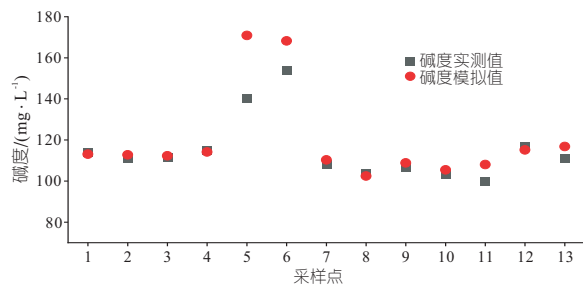


图 2 长江支流碱度实测值与模拟值对比

Fig. 2 Comparison of measured and simulated alkalinity values in tributaries of Yangtze River

2.4 水—气界面 CO₂ 交换通量计算

水—空气界面 CO₂ 交换通量(F_{CO_2})可根据体积扩散模型计算,其计算公式为:

$$F_{CO_2} = k_{CO_2} K_h (p_{CO_2-water} - p_{CO_2-air}) \quad (2)$$

式中, k_{CO_2} 为水—气界面 CO₂ 的传输速率, m/d ; K_h 为 CO₂ 的亨利常数; $p_{CO_2-water}$ 为所选研究区 CO₂ 水面分压; p_{CO_2-air} 为大气中 CO₂ 的分压,采用 2020~2022 年全球大气年平均值,2020、2021、2022 年大气 CO₂ 分压分别为 412.455、414.738、417.154 μatm (数据来源: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>); $p_{CO_2-water} - p_{CO_2-air}$ 为水—气 CO₂ 的浓度梯度,正值代表水体向大气中释放 CO₂,负值表示水体从空气中吸收 CO₂。

采用水温为 20 °C 下的 S_C 值进行归一化,然后使用流速和坡度计算 k_{600} ,利用 Raymond 方法计算 k_{CO_2} 值^[8],其计算公式为:

$$k_{CO_2} = k_{600} (S_C/600)^{-0.5} \quad (3)$$

其中

$$k_{600} = 2841 VS + 2.02 \quad (4)$$

$$S_C = 1911.1 - 118.11T + 3.4527T^2 - 0.041320T^3 \quad (5)$$

式中, S_C 为实际水温下 CO₂ 的施密特数,20 °C 时为 600; V 、 S 分别为河流流速、采样点的坡度; T 为温度。

式(4)、(5)中流速来自于长江航道局的统计数据,坡度数据在地理空间数据云下载 DEM 坡度数据并通过 Arcgis 软件处理后得到。

3 结果与分析

3.1 长江干流水质参数时空变化

图 3 为 2020~2022 年长江干流水质参数。由图 3(a)可知,研究区域水温均值范围在 18.47~21.74 °C 之间,2020~2022 年年际间波动较小,其中,2020 年上游、中游、入海口平均水温分别为 20.17、20.43、18.47 °C,2021 年上游、中游、入海口平均水温分别为 20.74、21.01、21.67 °C,2022 年上游、中游、入海口平均水温分别为 20.04、20.72、21.29 °C,空间上由上游到入海口整体呈增加趋势,变化范围较小;由图 3(b)可知,pH 值范围为 7.63~8.95,2020 年上游、中游、入海口 pH 值平均值分别为 7.99、7.80、7.74,2021 年上游、中游、入海口 pH 值平均值分别为 7.88、7.68、7.99,2022 年上游、中游、入海口 pH 平均值分别为 7.87、7.77、7.85,时间序列 pH 值变化不明显,空间上 2020 年由上游到入海口 pH 值呈减小趋势,2021、2022 年由上游到入海口 pH 值整体呈先减小后增加的趋势;由图 3(c)可知,溶解氧浓度平均值范围为 7.44~9.67 mg/L ,时间上表现为 2020 年较高,2020 年上游、中游、

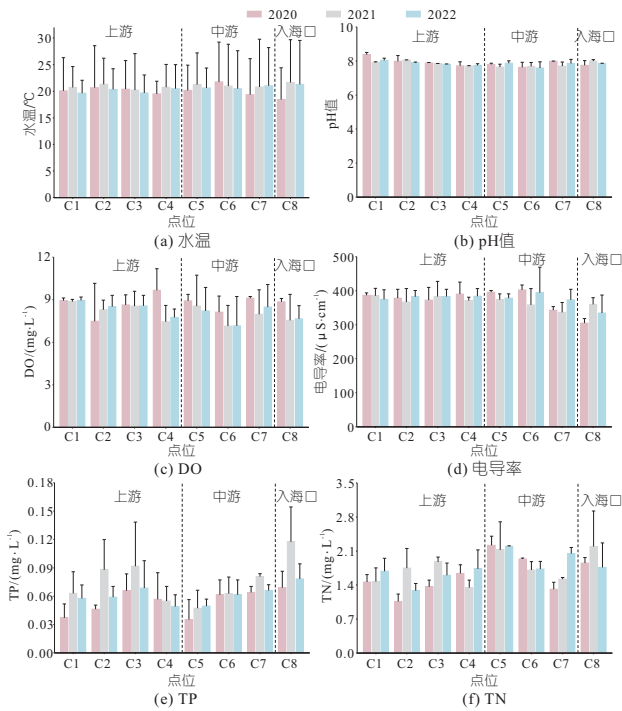


图 3 2020~2022 年长江干流水质参数

Fig. 3 Water quality parameters of the main stream of the Yangtze River from 2020 to 2022

入海口溶解氧平均浓度分别为 8.68、8.71、8.85 mg/L,2021 年上游、中游、入海口溶解氧平均浓度分别为 8.29、7.89、7.56 mg/L,2022 年上游、中游、入海口溶解氧平均浓度分别为 8.44、7.95、7.65 mg/L,空间上 2020 年由上游到入海口溶解氧整体呈增加趋势,2021、2022 年溶解氧呈减小的趋势。由图 3(d)可知,电导率浓度平均值范围在 304.58~401.69 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 之间,年际间相差较小,2020 年上游、中游、入海口电导率平均浓度分别为 381.56、380.13、304.58 $\mu\text{S}/\text{cm}$,2021 年上游、中游、入海口电导率平均浓度分别为 376.39、356.11、359.56 $\mu\text{S}/\text{cm}$,2022 年上游、中游、入海口电导率平均浓度分别为 380.87、381.63、334.59 $\mu\text{S}/\text{cm}$,空间上 2020 年由上游到入海口电导率呈减小趋势,2021、2022 年电导率表现为上游高于中游和入海口。由图 3(e)可知,TP 浓度平均值范围为 0.020~0.118 mg/L,年际间波动较大,整体表现为 2021 年>2022 年>2020 年,空间上由上游到入海口 TP 呈先减小后增加的趋势。由图 3(f)可知,TN 浓度平均值范围为 1.06~2.21 mg/L,其时间上变化趋势与 TP 相似,整体表现为 2021 年 TP 浓度相对较高,空间上由上游到入海口 TP 呈先增加后减小的趋势。

3.2 水体 CO_2 分压及释放通量时空分布特征

图 4 为长江干流 p_{CO_2} 分压及 F_{CO_2} 。由图 4(a)可知,研究区域 2020~2022 年 p_{CO_2} 范围为

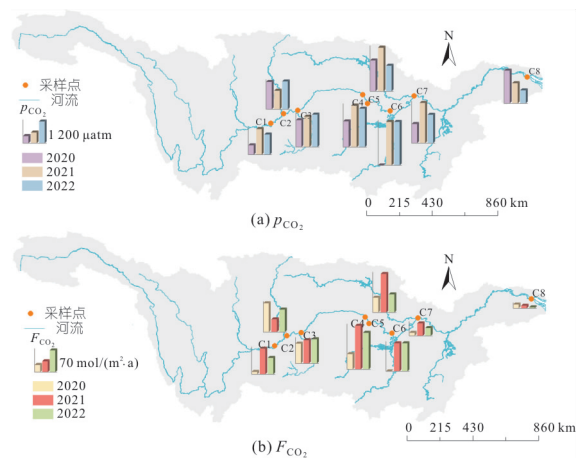


图 4 长江干流 p_{CO_2} 分压及 F_{CO_2}

Fig. 4 p_{CO_2} partial pressure and F_{CO_2} in Yangtze River main stream

514.52~2 400.09 μatm 。年际变化整体表现为上游和中游区域 p_{CO_2} 呈增加趋势,入海口呈逐年减小趋势。其中 2020 年上游、中游、入海口 p_{CO_2} 平均值分别为 1 231.02、1 374.66、1 803.59 μatm ;与 2020 年相比,2021 年上游和中游 p_{CO_2} 均有所增加,上游约为其 1.3 倍(1 597.00 μatm),中游约为其 1.7 倍(2 337.46 μatm),入海口的 p_{CO_2} 减小为 2020 年的 0.91 倍(1 120.93 μatm);2022 年上游、中游、入海口 p_{CO_2} 平均值分别为 1 635.00、1 786.52、720.65 μatm 。2020~2022 年 p_{CO_2} 空间上分布特点为中游>上游>入海口,且 2020~2022 年全球大气中 CO_2 的平均分压分别为 412.46、414.74、417.15 μatm ,均小于水体 CO_2 分压,表明水体中 CO_2 处于过饱和状态。长江中游地区是中国重要的工业、农业生产基地,人口密度大,人类的生产生活能够影响土壤有机质的呼吸作用产生的 CO_2 通过径流、壤中流和洪泛等水文过程输入到水体中,从而导致河流 p_{CO_2} 升高。

由图 4(b)可知,2020 年上游、中游、入海口水—气 F_{CO_2} 平均值分别为 53.13、23.08、12.19 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;2021 年上游水—气 F_{CO_2} 增加,为 2020 年同一区域的 1.58 倍(84.11 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$),中游水—气 F_{CO_2} 平均值高达 65.37 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,为 2020 年的 2.83 倍,入海口水—气 F_{CO_2} 减少,为 2020 年的 0.69 倍(8.38 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$),2022 年上游、中游、入海口水—气 F_{CO_2} 平均值分别为 79.77、43.93、3.42 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,2020~2022 年水—气 F_{CO_2} 平均值分别为 40.25、74.74、61.85 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,研究区域空间上由上游到入海口呈先增加后减小的

趋势。文献[14]估算长江上游支流龙川江水一气 F_{CO_2} 范围为 $27 \sim 50 \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 与本文研究估算的数值相近。较高的流速通常会加速水气界面之间的 CO_2 交换, 使水体中的 CO_2 更容易释放到大气中。此外, 长江上游区域因地形陡峭, 河道坡度较大, 流速相对较快, 有利于增加水体与大气之间的气体交换面积, 进而增加了 CO_2 的释放通量。

3.3 水体 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 与环境因子的关系

长江干流 p_{CO_2} 、水—气 F_{CO_2} 的空间分布特征与环境因素有着密切联系。通过相关性分析表明(图 5), 主要影响 p_{CO_2} 的环境因素有水温、pH 值、溶解氧和电导率。不同区域水体的温度、pH 值、电导率等水质参数会影响水体的碳酸平衡。温度升高会增加水体中 p_{CO_2} , 电导率的大小会影响碱度浓度, pH 值和碱度的改变直接影响水体中碳酸盐的平衡, 在酸性环境中, CO_2 的溶解度增加, 更多的 CO_2 以溶解状态存在于水中, 从而增加了水体中的 p_{CO_2} 。 p_{CO_2} 与 TN、TP 呈负相关, 原因可能是在氮磷较充足的水体中, 促进了水生植物的生长, 同时有利于光合作用的增强, 从而消耗水中的 CO_2 , 导致水体中 p_{CO_2} 下降。水—气 F_{CO_2} 与水温、溶解氧、pH 值相关性较强。温度对水体中微生物的代谢活动和有机物的分解速率有显著影响, 较高温度和充足的溶解氧浓度, 均可促进微生物分解有机物的速率, 导致更多的 CO_2 释放到水体中, 促进 CO_2 从水体向大气的释放, 增加水—气 F_{CO_2} 。长江干流从西向东跨越多个气候带, 不同地区温度等环境因素存在一定差异, 而且流域内土壤盐碱化导致河流 pH 值的空间差异, 对长江 p_{CO_2} 、水—气 F_{CO_2} 的空间格局也具有一定的控制作用。

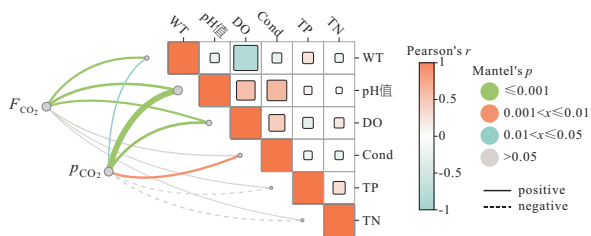


图 5 p_{CO_2} 、 F_{CO_2} 与环境因子的相关性

Fig. 5 Correlation between p_{CO_2} , F_{CO_2} and environmental factors

3.4 长江干流 CO_2 释放通量差异分析

长江干流 CO_2 释放通量的变化受到多种因素的综合影响, 包括水温、坡度、流速及外源有机物输入等。水温通过影响 CO_2 在水中的溶解度、

微生物活性及水生植物的光合作用和呼吸作用, 进而影响 CO_2 的产生过程^[15]。坡度与流速则通过改变水体与大气之间的气体交换速率, 直接影响 CO_2 的释放。外源输入的有机物不仅可提高水体中的 CO_2 浓度, 还能为微生物提供额外的碳源, 促进有机物的分解, 进一步加剧水体中 CO_2 的积累。

在时间维度上, 2021 年水温略高于 2020、2022 年(图 3(a)), 根据相关性分析结果表明, CO_2 释放通量与水温呈显著正相关关系(图 5), 因此, 2021 年 CO_2 释放通量整体高于 2020、2022 年。在空间维度上, 不同区域的影响因素对 CO_2 释放通量存在显著差异。长江上游多为峡谷河流, 水动力学特性对 CO_2 释放通量具有重要影响, 由于该区域地形坡度较大, 流速较快, 水体与大气之间的 CO_2 交换速率较高, 促进了水气间 CO_2 的交换。相比之下, 长江中游地区虽坡度小, 但该区域人类活动频繁, 外源有机物的输入量较多, 促进了有机物积累和微生物分解过程。因此, 长江干流上游、中游 CO_2 释放通量较高。长江入海口区域地形趋于平坦, 流速缓慢, 颗粒物絮凝沉降加速, 且入海口水体盐度升高, 抑制了枯落物分解 CO_2 的释放, 导致 CO_2 释放通量显著下降^[16]。

4 结论

a. 2020~2022 年长江干流水体 p_{CO_2} 、水—气 F_{CO_2} 整体呈现空间异质性, 且变化趋势为上中游区域的 p_{CO_2} 逐年增加, 而入海口区域则逐年减小; 该期间 F_{CO_2} 整体呈增加趋势, 空间上自上而下呈先增加后减小趋势。

b. 相关性分析表明, 水温、pH 值、溶解氧等环境因素均对 p_{CO_2} 、水—气 F_{CO_2} 具有显著影响, 较高的水温促进有机物的分解和 CO_2 释放, 溶解氧和 pH 值的变化影响 CO_2 的分压。这些环境因素的相互作用表现了长江不同区域水体空间差异性, 也为大江大河 CO_2 分压和通量的估算提供了重要参考。

参考文献:

[1] RAYMOND P A, HARTMANN J, LAUERWALD R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters[J]. Nature, 2013, 503(7476): 355-359.
 [2] LIU S D, KUHN C, AMATULLI G, et al. The importance of hydrology in routing terrestrial car-

- bon to the atmosphere via global streams and rivers [J]. Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America, 2022, 119(11): e2106322119.
- [3] PROBST J L, MORTATTI J, TARDY Y. Carbon river fluxes and weathering CO_2 consumption in the Congo and Amazon river basins[J]. Applied geochemistry, 1994, 9(1): 1-13.
- [4] COLE J J, PRAIRIE Y T, CARACO N F, et al. Plumbing the global carbon cycle: Integrating inland waters into the terrestrial carbon budget[J]. Ecosystems, 2007, 10(1): 172-185.
- [5] DRAKE T W, RAYMOND P A, SPENCER R G M. Terrestrial carbon inputs to inland waters: A current synthesis of estimates and uncertainty[J]. Limnology and oceanography letters, 2018, 3(3): 132-142.
- [6] HOTCHKISS E R, HALL R O Jr, SPONSELLER R A, et al. Sources of and processes controlling CO_2 emissions change with the size of streams and rivers[J]. Nature geoscience, 2015, 8(9): 696-699.
- [7] SÁNCHEZ-CARRILLO S, ALCOCER J, VARGAS-SÁNCHEZ M, et al. Greenhouse gas emissions from Mexican inland waters: First estimation and uncertainty using an upscaling approach[J]. Inland waters, 2022, 12(2): 294-310.
- [8] RAN L S, BUTMAN D E, BATTIN T J, et al. Substantial decrease in CO_2 emissions from Chinese inland waters due to global change[J]. Nature communications, 2021, 12(1): 1730.
- [9] SCOFIELD V, MELACK J M, BARBOSA P M, et al. Carbon dioxide outgassing from Amazonian aquatic ecosystems in the Negro River basin[J]. Biogeochemistry, 2016, 129(1): 77-91.
- [10] WANG J L, WANG X F, LIU T T, et al. p_{CO_2} and CO_2 evasion from two small suburban rivers: Implications of the watershed urbanization process [J]. Science of the total environment, 2021, 788: 147787.
- [11] 李岩, 张龙军, 苏征, 等. 长江口淡水端淡、盐水混合表层 p_{CO_2} 的急剧变化及其影响机制[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2006, 36(2): 295-298.
- [12] PROULX C L, KILGOUR B W, FRANCIS A P, et al. Using a conductivity - alkalinity relationship as a tool to identify surface waters in reference condition across Canada [J]. Water quality research journal, 2018, 53(4): 231-240.
- [13] UPADHYAY P, PRAJAPATI S K, KUMAR A. Deciphering carbon dioxide fluxes and interactions in the Ganga river Basin of South Asia[J]. Environmental research, 2024, 252: 118902.
- [14] LI S, LU X, HE M, et al. Daily CO_2 partial pressure and CO_2 outgassing in the upper Yangtze River Basin: A case study of the Longchuan River, China [J]. Journal of hydrology, 2012, 466: 141-150.
- [15] SCHRIER-UIJL A P, VERAART A J, LEFFELAAR P A, et al. Release of CO_2 and CH_4 from lakes and drainage ditches in temperate wetlands [J]. Biogeochemistry, 2011, 102(1): 265-279.
- [16] 胡伟芳, 曾从盛, 张美颖, 等. 盐度和水淹对短叶荇荇枯落物分解和二氧化碳释放的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(10): 4011-4018.

Spatiotemporal Distribution of p_{CO_2} and F_{CO_2} in the Mainstream of the Yangtze River and Its Relationship with Environmental Factors

SUN Wen-xiu¹, WU Wen-qiang¹, QIAN Bao², ZHOU Huai-dong¹,
ZHANG Jian-nan¹, ZHANG Yi-fan¹, DONG Fei¹

(1. Department of Water Ecology and Environment, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Hydrology Bureau of Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China)

Abstract: To estimate the spatiotemporal characteristics of CO_2 partial pressure (p_{CO_2}) and water-air interface CO_2 flux (F_{CO_2}) along the Yangtze River, this study selected eight monitoring sections along the main channel of the river from upstream to downstream. Based on water quality data from 2020 to 2022, p_{CO_2} and F_{CO_2} were calculated using the CO_2 SYS software. The spatiotemporal variations of p_{CO_2} and F_{CO_2} were analyzed, and the relationships between p_{CO_2} , F_{CO_2} , and environmental factors were assessed using the Mantel test. The results show that from 2020 to 2022, p_{CO_2} in the Yangtze River ranged from 450.02 to 3 615.88 μatm , which was higher than the global atmospheric CO_2 average partial pressure of 414.78 μatm during the same period. Spatially, the distribution of p_{CO_2} was as follows: midstream > upstream > estuary. The average values of water-air F_{CO_2} during 2020-2022 were 40.25 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 74.74 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, and 61.85 $\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively, with a spatial distribution of upstream > midstream > estuary. The Yangtze River is in a state of CO_2 oversaturation, and that the water-air F_{CO_2} flux showed an overall increasing trend from 2020 to 2022. p_{CO_2} exhibited a significant positive correlation with water temperature, dissolved oxygen, and pH, while F_{CO_2} was positively correlated with pH, dissolved oxygen, and conductivity.

Key words: Yangtze River; p_{CO_2} ; F_{CO_2} ; spatiotemporal characteristics; correlation