

水位波动对蒲草湿地土壤碳排放的影响研究

吕海波¹, 万 伟²

¹渭南师范学院, 陕西省河流湿地生态与环境重点实验室, 陕西 渭南

²渭南师范学院环境与生命科学学院资源环境系, 陕西 渭南

收稿日期: 2025年2月11日; 录用日期: 2025年4月3日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

为了研究黄河中游水位波动对蒲草湿地土壤碳排放的影响, 利用室内培养法分析不同水位变化后的CO₂排放速率。结果表明: 低水位水平下蒲草湿地土壤CO₂排放速率变化于0~0.035 mmol·m⁻²·h⁻¹, 平均水平为0.017 mmol·m⁻²·h⁻¹。高水位下蒲草湿地土壤CO₂排放速率变化于0.005~0.035 mmol·m⁻²·h⁻¹, 平均水平为0.020 mmol·m⁻²·h⁻¹。低水平水位下土壤CO₂排放速率波动幅度大于高水平状态。水位变化对蒲草湿地土壤CO₂排放速率的影响与土壤、植被的环境适应过程以及排放环境紧密相关。

关键词

水位波动, 蒲草湿地, 土壤呼吸, 黄河中游

Study on the Effect of Water Level Fluctuation on Soil Carbon Emission in Cattail Wetland

Haibo Lyu¹, Wei Wan²

¹Key Laboratory for Eco-Environment of Multi-River Wetlands in Shaanxi Province, Weinan Normal University, Weinan Shaanxi

²Department of Resource & Environment Science, College of Environment and Life Sciences, Weinan Normal University, Weinan Shaanxi

Received: Feb. 11th, 2025; accepted: Apr. 3rd, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

In order to study the influence of water level fluctuation in the middle reaches of the Yellow River on soil carbon emission in cattail (*Typha angustifolia*) wetland, the CO₂ emission rate of different water level

作者简介: 吕海波, 出生于1980年, 男, 教授, 博士, 主要从事气候变化研究, Email: lhboboo@163.com

文章引用: 吕海波, 王伟. 水位波动对蒲草湿地土壤碳排放的影响研究[J]. 水资源研究, 2025, 14(2): 194-198.

DOI: 10.12677/jwrr.2025.142020

changes was collected by static alkaline absorption method. The results showed that under low water levels, the CO₂ emission rate of soil in cattail wetland varied from 0 to 0.035 mmol·m⁻²·h⁻¹, with an average level of 0.017 mmol·m⁻²·h⁻¹. Under high water level, the CO₂ emission rate of soil in cattail wetland varied from 0.005 to 0.035 mmol·m⁻²·h⁻¹, with an average level of 0.020 mmol·m⁻²·h⁻¹. The fluctuation amplitude of soil CO₂ emission rate under low-level water level was greater than that under high-level state. The effect of water level changes on soil CO₂ emission rate in cattail wetland is closely related to the environmental adaptation process of soil and vegetation and the emission environment.

Keywords

Water Level Fluctuation, Cattail Wetland, Soil Respiration, Middle Reaches of the Yellow River

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

湿地生态系统是地球生态环境中最重要的组成成分之一，并享有“地球之肾”的美誉。湿地是陆地重要的碳汇集地，其固碳能力在地球碳循环中发挥不容忽视的作用。在湿地植物不断生长和土壤有机质不断积累过程中，植物和土壤的呼吸作用使得碳的释放不断增加，一方面湿地植物和部分滋养型微生物会利用大部分碳进行碳的固定并释放氧气，使之进入碳循环；另一方面因黄河特殊的水文影响，伴随着泥沙等湿地沉积物不断增加被埋入更深的土层，虽不利于这一部分有机质的降解和碳的利用，但却使这些沉积物在土壤中处于稳定的状态，从而持续碳的稳定固定和储存，并有效抑制 CH₄ 的排放[1]。目前水位变化对湿地土壤 CO₂ 排放的影响尚未形成一致的结论，如吕海波等[2]在对黄河中游芦苇群落湿地的土壤 CO₂ 排放的研究过程中发现，随水位上升，CO₂ 排放速率逐渐下降，但成熟群落在相对水位为-10~10 cm 时有上升波动，低矮芦苇群落土壤的 CO₂ 排放速率下降幅度大于成熟群落的；李新鸽[3]发现在正常情况下，湿地土壤 5~7 月中水位下的 CO₂ 排放通量最高，其次是低水位(下的排放通量，高水位下的排放通量最低；9~10 月的二氧化碳排放通量随水位降低而增加。

黄河中游的禹门口至潼关段是天然及人工设置的湿地，也是该地域内碳排放的重要开关，受上游来水影响，该区域水位变化频繁，显著影响了土壤 CO₂ 排放速率。本文结合该流域内湿地的实际情况，通过对水位对黄河中游滨河湿地碳排放的影响的研究，运用实验及相关分析，探寻水位波动对湿地土壤高碳排放的影响规律。

2. 研究方法

2.1. 研究区概况

陕西省韩城市的禹门口至西安市的临潼区之间，位于北纬 34°35'~35°49'、东经 110°15'~110°38'之间，黄河河道长 125 km，河宽 3~15 km，河道面积达 1107 km²，滩面宽阔且滩槽明显，是陕西省境内较为活跃的黄河水流域(图 1)。研究地区所处的流域分支较多，主要以北边水文特征走向汾河等，南边水文特征走向渭河、洛河、泾河等为主。该地域海拔相对较低，且为淤积性河道，随着近年来河流治理，虽然河道泥沙淤积明显减少，但仍出现“揭河底”[4]的特殊高泥沙含量水文活动现象，进而在河道两岸形成了典型的滨河湿地，同时水文条件随着自然和人类活动的不断干预，在湿地上形成了面积大小不等的积水，进而促进了滨河湿地的进一步发展和扩大。

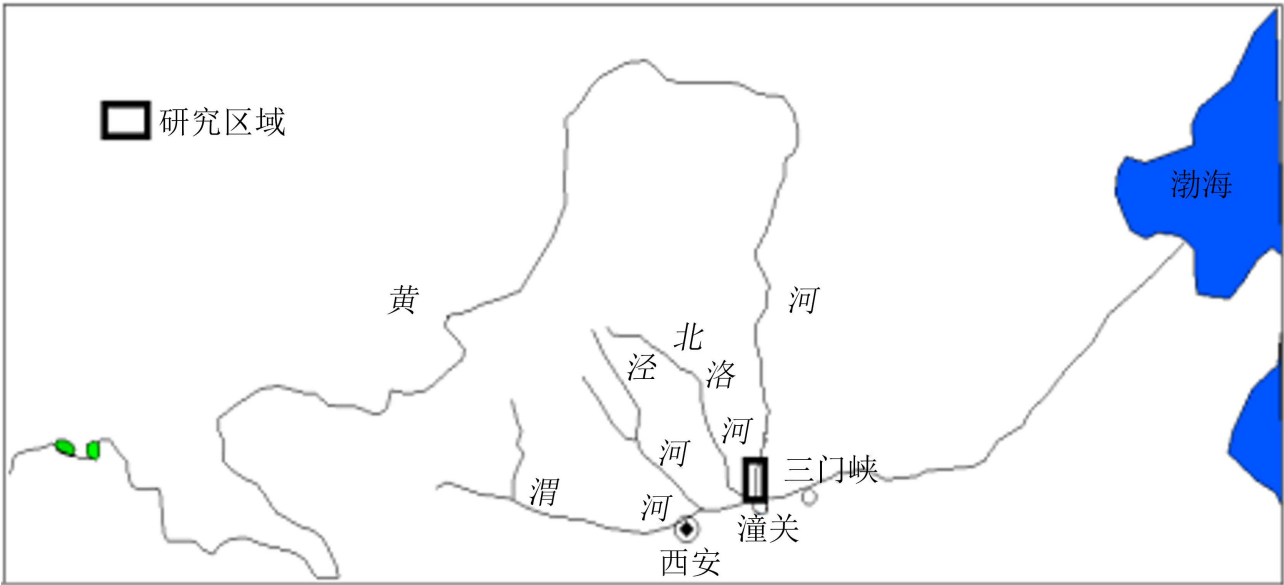


图 1. 采样点位置示意图

2.2. 研究方法

研究选取禹潼河段滨河湿地中，蒲草长势良好的区域，于 2021 年 11 月初对其进行野外考察，采集原始土壤并进行室内培养。人工控制水位进行长期监测，野外采集蒲草放置室内一个月以恢复生长状态，在水槽中进行水位控制试验。在水槽中放置 6 盆蒲草后注水至 16.5 cm 水位，3 盆盆底刚刚接触，保持水位为 0，为保持土壤的生物活性，在监测 407.65 h (坐标 664.03 h) 后进行一次补水，注水至 14 cm 深度后自然下渗；另 3 盆保持 10 cm 以上水位，期间通过人工补水保持水位，用碱液吸收法测定土壤 CO_2 含量，提前测试 NaOH 溶液的适宜浓度和采样持续时间。将桶内的绿色植物齐地减掉后，放入装有 5 ml 0.2 mol/L 的 NaOH 溶液的 10 ml 小烧杯中，用口径 0.78 cm 的 250 ml 烧杯倒扣在土表，压实以隔绝外界空气。经前期试验，碱液吸收最佳期限为 3~8 h，据此来控制时间间隔，监测同时设置 1 个封闭的空白样以作对比。监测时间为 2022 年 11 月 11 日至 12 月 26 日，持续 1161 h，共采集 97 组数据，监测过程中 5 cm 深度土温保持在 $15^\circ\text{C}\sim 20^\circ\text{C}$ 。

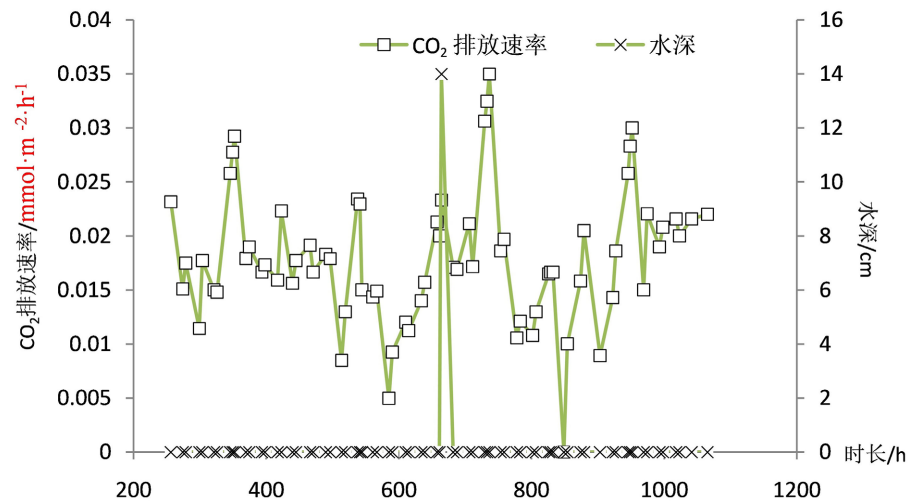


图 2. 低水位 CO_2 的排放速率

3. 研究结果

低水位下蒲草湿地土壤 CO_2 排放速率在监测初期为 $0.023 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。监测过程中 CO_2 排放速率变化于 $0 \sim 0.035 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，平均为 $0.017 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 2)，呈明显周期性波动。相较于监测初期(256.38 h)，水位下降 69.72 h 内(至 326.1 h) CO_2 排放速率明显下降，达 $0.011 \sim 0.017 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，但在 345.9 h 时又土壤升高至 $0.026 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，持续 6 h(至 352.4 h)后又开始下降，之后表现出 100~160 h 时长的重复升降特征，在 664.03 h 补水后出现 CO_2 排放速率上升现象，在 736.2 h 时达到最高值。监测过程中 CO_2 排放速率呈略微上升趋势。

高水位下蒲草湿地土壤 CO_2 排放速率在监测初期为 $0.025 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，监测过程中变化于 $0.005 \sim 0.035 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，平均水平为 $0.020 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，呈明显周期性波动(图 3)。相较于监测初期，水位上升 69.72 h 内造成 CO_2 排放速率明显下降，达 $0.017 \sim 0.019 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，但在 345.9 h 时又土壤升高至 $0.026 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，持续 6 h(至 352.4 h)后又开始下降，同样表现出 100~160 h 时长的重复升降特征。监测过程中 CO_2 排放速率呈略微上升趋势。

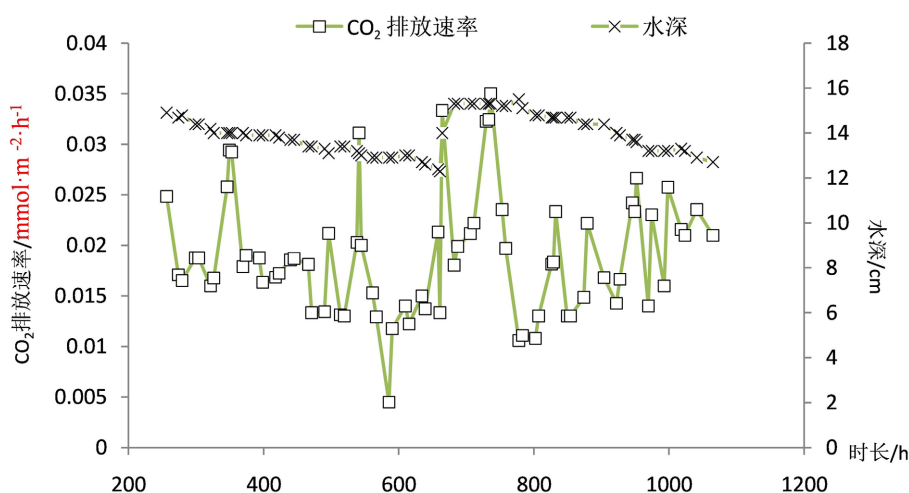


图 3. 高水位水平 CO_2 的排放速率

4. 讨论

水分条件是决定湿地土壤碳排放的关键因素之一，同时也对湿地土壤中微生物的结构、植物群落等的分布有着重要的空间排布和生长呼吸等方面的影响[5]。在正常的温度条件下，在适宜的范围内，水位的升高有利于湿地土壤中微生物的生长和繁殖，加快生物分解，同时也可促进植物的呼吸作用，对湿地土壤 CO_2 排放和排放速率有一定的促进作用，水位的升高和降低对湿地土壤 CO_2 排放成相反的变化趋势[6]。与此相同的，在水位波动研究过程中发现，水位波动会影响消落带土壤碳氮物质含量，即消落带植被淹水后腐烂会向水体内分解并释放碳氮物质，这一外界因素也会使土壤碳排放的增加，且其他的相关研究者也有相似的研究结论[7]。本研究发现，两种水位下土壤 CO_2 排放速率变化特征及周期呈同步状态，表明在同样环境下，气温、光照、生物群落等非水分条件对土壤呼吸影响明显，本试验采用的对比法有效消除了非水位因素对试验结果的影响。通过对比发现，高水位下土壤 CO_2 排放速率平均为 $0.020 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，略高于低水位 $0.017 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ ，但波动幅度变小，推测原因为高水位良好的植物生长状态有利于根系呼吸和微生物群落发育，使得 CO_2 排放速率较高，但饱水对 CO_2 产生溶解和释放阻力可能造成了波动幅度变小，低水位监测 664.03 h 的补水也发现了同样的规律。低水位状态下由于水分缺乏导致蒲草生长状态、微生物发育程度受到影响， CO_2 排放速率较低，研究结果反映了在环境抑制生物生长时， CO_2 排放速率随水位上升而下降的规律受到影响。在正常情况下，水位上升对黄河禹

潼河段土壤中微生物、蒲草植物等的呼吸作用受到抑制,进而导致湿地土壤 CO_2 排放量和排放速率降低,而在水位逐渐下降的过程中,湿地土壤中的氧得到了适度的调节,进而使湿地土壤 CO_2 排放速率的增高,增大了湿地土壤的含碳率。但水位下降到生物耐受范围后,生物生长收到抑制,根系呼吸及土壤生物群落生存环境受到影响,土壤 CO_2 排放速率随水位变化规律收到影响,随水位下降,土壤 CO_2 排放速率呈下降趋势,同理,当湿地高水位状态持续时间超过群落耐受范围,群落厌氧微生物大量繁殖,腐殖质厌氧分解生成 CH_4 ,排放后与空气中氧气反应生成 CO_2 ,也会造成湿地土壤 CO_2 排放速率随水位上升而增加,这一现象在相关研究中有报道[8]-[10]。

5. 总结

水位变化对蒲草湿地土壤 CO_2 排放速率的影响与土壤环境、土表植被的环境适应过程相联系,饱水有利于湿生植物生长,根系呼吸活跃,造成高水位水平下 CO_2 排放速率处于较高水平,平均水平达到 $0.020 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,饱水条件也使得土壤环境变化小,进而造成 CO_2 排放速率波动小。土壤干旱条件下,植物生长受到抑制,但好氧环境有利于土壤有机质的分解, CO_2 易于通过土壤孔隙散发,造成低水位平均水平为 $0.017 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,但易受外界影响而造成较大波动。水位对土壤呼吸的影响需要对水位水平、波动变化及持续时间进行进一步的相关研究。

基金项目

陕西省教育厅创新团队项目(陕西高校青年创新团队 21JP041)资助。

参考文献

- [1] 李永涛,杜振宇,等. 黄河三角洲自然保护区湿地生态服务功能价值评估[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(5): 761-768.
- [2] 吕海波,谢恒星. 黄河中游芦苇群落土壤 CO_2 排放及其影响因素[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 62-65.
- [3] 李新鸽. 模拟降雨量变化对黄河三角洲滨海湿地土壤碳排放的影响[D]: [硕士学位论文]. 开封: 河南大学, 2019.
- [4] 胡天军,张苗. 黄河中游“揭河底”冲刷机理分析[J]. 人民黄河, 2017, 39(3): 14-16.
- [5] 侯翠翠. 水文条件变化对三江平原沼泽湿地土壤碳蓄积的影响[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2012.
- [6] 刘敏,金会军,罗栋梁,等. 青藏高原土壤碳排放研究进展[J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1544-1554.
- [7] 李晓晴. 乌江洪家渡水库消落带土壤和植被淹水后碳氮释放量研究[D]: [硕士学位论文]. 拉萨: 西藏大学, 2021.
- [8] ZHANG, Y. J., GUO, S. L., ZHAO, M., et al. Soil moisture influence on the interannual variation in temperature sensitivity of soil organic carbon mineralization in the Loess Plateau. Biogeosciences, 2015, 12(11): 3655-3664.
<https://doi.org/10.5194/bg-12-3655-2015>
- [9] BIRCH, H. F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. Plant and Soil, 1958(10): 9-31.
<https://doi.org/10.1007/bf01343734>
- [10] 李冰,朱湾湾,韩翠,等. 降水量变化下荒漠草原土壤呼吸及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1310-1321.