

东太湖不同植被类型湿地 CO₂产生 潜力对温度变化的响应

杨玲玲^{1,3}, 周琦^{1,2,3}

(1.江苏开放大学 环境生态学院, 江苏 南京 210036; 2.南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037; 3.江苏省生态环境保护城乡水环境治理低碳发展工程技术中心, 江苏 南京 210036)

摘要: [目的] 探索不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应规律, 为精确估算 CO₂ 产生和温室气体排放提供依据。[方法] 针对 3 种不同植被类型湿地土壤(荷花、芦苇、开放水面), 进行 120 d 的室内模拟培养试验, 分别设置 15, 25, 35 °C 处理, 观察不同植被类型湿地土壤产 CO₂ 潜力的差异及其对温度变化的响应。[结果] 东太湖不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生速率在 35 °C 培养下最快。35 °C 培养条件下芦苇、开放水面 CO₂ 产生速率随 DOC 增加而增加, 其余均呈负相关关系。荷花、芦苇土壤最大产 CO₂ 潜力表现为 35 °C > 15 °C > 25 °C, 开放水面表现为: 15 °C > 25 °C > 35 °C。荷花、芦苇湿地产 CO₂ 潜力与培养温度呈正相关, 开放水面呈显著负相关关系。比较温度敏感系数 Q₁₀ 值发现, 只有荷花土壤的升温 Q₁₀ 值大于降温 Q₁₀ 值。[结论] 高温能加快不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生速率, 加剧 DOC 变化。比较同温度、不同植被土壤产 CO₂ 潜力发现, 芦苇、开放水面对降温更敏感。湿地植物及其土壤对温室气体的产生受外界温度影响较大, 在未来城市水生态管理中应予以更多的关注。

关键词: 太湖; 湿地; 植被; CO₂ 产生潜力; 温度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0262-09

中图分类号: S154.4

文献参数: 杨玲玲, 周琦. 东太湖不同植被类型湿地 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 262-270. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.05.028; Yang Lingling, Zhou Qi. Response of CO₂ production potential of wetland with different vegetation types in East Taihu Lake to temperature change [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 262-270.

Response of CO₂ Production Potential of Wetland with Different Vegetation Types in East Taihu Lake to Temperature Change

Yang Lingling^{1,3}, Zhou Qi^{1,2,3}

(1. College of Environment and Ecology, Jiangsu Open University, Nanjing, Jiangsu 210036, China; 2. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China; 3. Ecological Environmental Protection, Urban Rural Water Environment Governance and Low-carbon Development Engineering Technology Center of Jiangsu Province, Nanjing, Jiangsu 210036, China)

Abstract: [Objective] Soil CO₂ production potential of different vegetation types in response to temperature change was analyzed in order to provide the basis for accurate estimation of CO₂ production and greenhouse gas emissions. [Methods] A simulated culture experiment was conducted for 120 days for three different types of wetland soil (*Nelumbo nucifera*, *Phragmites australis* and open water), and the treatment was set at 15, 25, and 35 °C to observe the difference in the CO₂ production potential of the wetland soil of different vegetation types and evaluate their response to temperature change. [Results] The fastest soil CO₂ production rate among the different vegetation types in East Taihu Lake was recorded in the 35 °C culture treatment. Under the culture temperature of 35 °C, the CO₂ production rate of *P. australis* and open water

收稿日期: 2024-04-15

修回日期: 2024-06-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于大数据的城市道路绿化景观再设计的理论与方法研究: 以南京为例”(31770752); 江苏省高校自然科学基金资助项目“珍贵水生花卉香水莲花花色形成机理与应用研究”(20KJB220006); 江苏省高校哲学社会科学基金项目(2023SJB0781); 江苏省自然科学基金项目(BK20240218)

第一作者: 杨玲玲(1997—), 女(汉族), 江苏省无锡市人, 硕士研究生, 研究方向为湿地温室气体排放。Email: yanglingling@njfu.edu.cn.

通信作者: 周琦(1988—), 女(汉族), 江苏省溧阳市人, 博士, 副教授, 主要从事园林植物应用与生理生态研究。Email: zhouq@jsou.cn.

surface increased with an increase in dissolved organic carbon (DOC) but that of the rest were negatively correlated. The maximum CO₂ production potential of *N. nucifera* and *P. australis* soil was in the order as follows: 35 °C > 15 °C > 25 °C and that of open water surface was 15 °C > 25 °C > 35 °C. The CO₂ production potential of *N. nucifera* and *P. australis* wetlands was positively correlated with culture temperature, whereas that of the open water surface was significantly negatively correlated. Comparising all of the temperature sensitivity coefficient Q_{10} values, it was found that only *N. nucifera* soil temperature rise $Q_{10} >$ temperature drop Q_{10} . [Conclusion] High temperature can accelerate CO₂ production rate and increase DOC change in different vegetation types. Regarding the CO₂ production potential of soil with the same temperature and different vegetation, it was found that *P. australis* and open water surface were more sensitive to cooling. The greenhouse gas production of wetland plants and the soil was greatly affected by external temperature; therefore, more attention should be paid to future urban water ecological management.

Keywords: Taihu Lake; wetland; vegetation; CO₂ production potential; temperature

二氧化碳(CO₂)是长寿命温室气体,也是影响地球辐射平衡最主要的碳氧化物。21 世纪末,全球大气 CO₂ 浓度将达到 700 μmol/mol,导致全球气温上升 1.5~2 °C^[1]。全球湖泊 CO₂ 排放总量为 0.32 Pg,排放热点地区与中国拥有大面积水域的华东、华南地区相似,这说明湖泊湿地内可能贮藏着重要碳源^[2]。CO₂ 主要由生物在厌氧环境中生产,湖泊沉积层中碳的生物地球化学循环过程相对缓慢,因此湖泊湿地内可能积累了大量的有机碳^[3]。中国东部平原湖区湖泊普遍存在水力停留时间较短和碳代谢转化较快的现象^[4],因此,研究湖泊湿地产 CO₂ 潜力具有重要意义。

温度是影响 CO₂ 产生的关键因素之一。大多专性厌氧菌属温和型微生物,最适生长温度为 20~30 °C。对地处亚热带季风气候的流域水系研究发现,夏秋季时水体 CO₂ 释放潜力大^[5]。对三江平原淡水湿地的研究发现,CO₂ 吸收量随升温而增加,这说明温度是影响净生态系统交换的首要因子^[6]。研究南极东部湖泊 CO₂ 排放通量与气温、水温的关系,也可以得出相似规律^[7]。温度变化会引起 CO₂ 与 CH₄ 的相互转换。进行稻麦轮作研究时发现,大多 CO₂ 至水稻生长后期被还原为 CH₄^[8]。在意大利稻田的研究也发现,当培养温度为 45 °C 时,CO₂ 全部还原为 CH₄^[9]。前人研究大多只关注环境因子对湿地土壤 CO₂ 排放的影响,而同时调查温度变化对不同植被类型湿地 CO₂ 产生潜力的研究鲜有报告。本研究的创新之处在于通过室内模拟培养试验实现了不同植被类型湿地产 CO₂ 对温度变化的实时连续监测,而非固定时间用气袋采样后的单一固定数值。

近年来,国内外单独就温度或不同类型湿地 CO₂ 产生潜力的研究已初见规模,但关于不同植被类

型湿地 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应研究相对较少。中国多样的气候类型致使湖泊分布和湿地植被资源不均,湖泊间 CO₂ 产生潜力可能存在巨大差异。因此,积极进行不同植被类型湖泊湿地土壤 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应研究有助于为探索湿地 CO₂ 产生机理与估算温室气体排放提供理论支持和基础数据。

太湖是东部平原湖区具有重要代表性的亚热带湖泊之一,区域内主要优势植物为荷花(*Nelumbo nucifera*)和芦苇(*Phragmites australis*),为研究不同植被类型湿地 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应提供了较为适宜的场所。本研究通过室内模拟培养试验,旨在探索不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生潜力对温度变化的响应规律,同时还计算了不同植被类型湿地土壤 CO₂ 对温度变化的敏感系数。以期评估太湖湿地碳收支平衡,深入认识不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生潜力对温室气体排放的贡献提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 底泥样品的采集和测定方法

太湖位于江苏省南部,其平均水深为 1.9 m。该区气候属亚热带季风气候,年平均气温为 16.0~18.0 °C,年降水量为 931.1~1 376 mm。2021 年 7 月 11 日,在太湖东山湖区(31°00'N, 120°20'E)的开放水面、荷花、芦苇各设置 1 个采样点,采集表层(0~20 cm)底泥样品。先在采样点下放箱式抓斗采泥器,完全抓取土壤后上捞并静置片刻待水分渗出,再剔除大型植物根系、藻类、贝壳、垃圾等杂物后分装入自封袋并进行样品标记。将运回实验室的土壤样品混合均匀并平均分为 3 份,一份样品在自然风干后用研磨棒捣碎经 2,0.25,0.149 mm 的筛网过筛,一份新鲜土壤加入试

验处理用于室内培养,一份置于 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 超低温冰箱冷藏备用。

土壤基本理化性质测定方法分别为:pH 值采用电位法;有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法;溶解有机碳(DOC)采用岛津 TOC-L CPH 总有机碳分析

仪;总氮(TN)采用凯氏定氮法;铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)由 2 mol/L KCl 溶液浸提后采用靛酚蓝比色法和紫外分光光度法;全磷(TP)采用酸溶钼锑抗比色法。具体步骤参见书目《土壤农化分析》^[10]。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 采样点土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil at sampling point

植被类型	pH 值	TN/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{NO}_3^-\text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$\text{NH}_4^+\text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	SOC/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	DOC/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	TP/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
荷花	4.00 ± 0.02^c	4.89 ± 0.05^a	1.36 ± 0.92^a	128.22 ± 23.75^a	43.47 ± 2.88^a	327.89 ± 42.47^a	0.44 ± 0.03^a
芦苇	8.31 ± 0.02^a	1.10 ± 0.00^c	-0.31 ± 0.31^b	1.23 ± 0.80^b	11.09 ± 0.07^c	107.97 ± 24.57^b	0.21 ± 0.10^b
开放水面	6.73 ± 0.15^b	1.62 ± 0.03^b	0.17 ± 0.17^b	21.38 ± 0.73^b	15.89 ± 0.85^b	105.33 ± 2.73^b	0.21 ± 0.02^b

注:表中数据均为平均值±标准误差($n=3$);同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

1.2 试验设计

经查阅文献发现,植物、底物、pH 值、硫酸盐浓度等均能影响 CO_2 产生,其中温度是调控 CO_2 产生的最大因素^[11-12]。本研究设置 $15, 25, 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱,进行室内暗室淹水培养。培养试验开始于 2021 年 8 月 4 日,结束于 2021 年 12 月 1 日,共培养 120 d。

试验共分为 9 组处理,每组处理设置 3 个重复。取新鲜土样 20 g 置于 150 ml 培养瓶内,瓶内土水比设置为 1:3,搅拌使瓶中土壤呈泥浆状,加入橡皮塞和 703 硅橡胶密封培养瓶口。在橡胶塞中心打一个通气孔,里面插上玻璃管,在管外壁套上一截硅胶软管,再用岛津进样隔垫塞紧硅胶软管使之密封,以此硅胶塞作为样品采集口。培养瓶经 3 次抽真空与充入高纯氮气(N_2)后分别置于 $15, 25$ 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的恒温培养箱连续培养 120 d,分别于第 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120 d 测定气体成分与浓度。

另取新鲜土样 40 g 于 250 ml 培养瓶内,瓶内土水比设置为 1:3,搅拌使瓶中土壤呈泥浆状,加盖后并用保鲜膜缠绕密封。经 3 次抽真空、充 N_2 后置于 $15, 25, 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱连续培养 120 d,分别于培养的第 15, 30, 60, 90, 120 d 天测定土壤基础理化性质含量变化。

1.3 CO_2 产生速率与温度敏感系数 Q_{10} 值的计算

气样采用岛津 GC-2014B 气相色谱仪测定,采用氢焰离子化检测器(FID)检测 CO_2 浓度,设置检测器温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。以 N_2 为载体、 H_2 为燃气、空气为助燃气,设置色谱柱温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

CO_2 产生潜力计算公式为^[13]:

$$F = \rho \times \frac{V}{W} \times \frac{dc}{dt} \times \frac{273}{273 + T} \quad (1)$$

式中: F 为 CO_2 产生潜力 [$\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$]; ρ 为标准状

态下 CO_2 的密度 (kg/m^3); V 为培养瓶上部空间体积 (m^3); W 为培养瓶内烘干土重 (kg); dc/dt 为单位时间内培养瓶内 CO_2 浓度变化量; T 为培养温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

土壤产生 CO_2 温度敏感性 Q_{10} 值是指土壤微生物分解有机物时对外界温度变化的感受性,土壤呼吸通常随温度增加而增加^[14]。

温度敏感系数 Q_{10} 值计算公式为^[15]:

$$Q_{10} = (k_2/k_1)^{10/(T_2-T_1)} \quad (2)$$

式中: k_1 和 k_2 分别是在 T_1 和 T_2 温度下的产 CO_2 潜力值 F 。

1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2003 对原始数据进行处理、SPSS 18.0 统计中的单因素方差(ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行多重比较,检验显著水平为 $\alpha=0.05$,并利用 Origin 2019 辅助作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型湿地产 CO_2 速率动态变化

不同植被土壤 CO_2 产生速率在不同温度培养下的动态变化情况如图 1 所示。由图 1 可知,荷花土壤 CO_2 产生速率呈先减小再增大最终趋于稳定的变化趋势。培养 5 d 时,各处理下的荷花土壤 CO_2 产生速率均达到峰值。其中, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养条件下的 CO_2 产生速率最高,分别为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 处理下的 1.29, 1.05 倍。培养 7 d 时,不同温度处理下的荷花土壤 CO_2 产生速率具有显著性差异($p<0.05$)。培养 10 d 时,与 25 和 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相比, $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的 CO_2 产生速率差异显著($p<0.05$)。由图 1 可知,荷花土壤 CO_2 产生速率在 $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 培养条件下最快。

$35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,芦苇土壤 CO_2 产生速率呈先增大再减小并趋于稳定的变化趋势。培养 2 d 时,与 15 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 相

比, 35 °C 培育条件下的 CO₂ 产生速率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。培养 5 d 时, 25 °C 下的 CO₂ 产生速率略高于 35 °C。培育 7 d 时, 25 °C 下的 CO₂ 产生速率是 35 °C 的 1.24 倍。培养 10 d 时, 与 15 和 35 °C 相

比, 25 °C 培育条件下的 CO₂ 产生速率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。培养 10 d, 15 d 时, 与 15 和 25 °C 相比, 35 °C 下的 CO₂ 产生速率差异显著 ($p < 0.05$)。由图 1 可知, 芦苇土壤 35 °C 下的 CO₂ 产生速率略高于 25 °C。

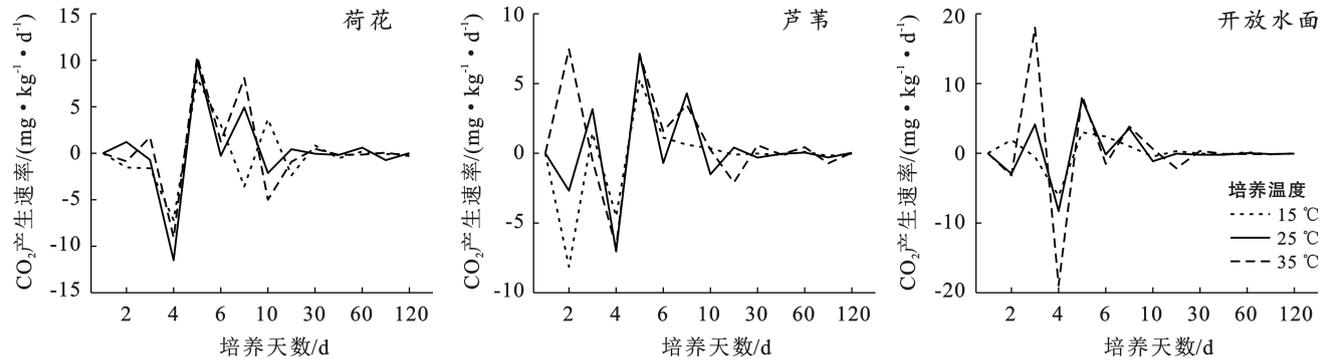


图 1 不同植被土壤 CO₂ 产生速率在不同温度培养下的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of CO₂ production rate in soil of different vegetation under different temperature cultures

开放水面土壤 CO₂ 产生速率呈先增大再减小再增大最终趋于稳定的变化趋势。培养 3 d 时, 35 °C 培养条件下的 CO₂ 产生速率最高, 与 15 和 25 °C 相比具有显著性差异 ($p < 0.05$)。培养 5, 6 和 7 d 时, 与 25 和 35 °C 相比, 15 °C 培育条件下的 CO₂ 产生速率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。培养 10 d 时, 不同温度处理下的开放水面土壤 CO₂ 产生速率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。培养 15 d 时, 与 15 和 25 °C 相比, 35 °C 培育条件下的 CO₂ 产生速率具有显著性差异 ($p < 0.05$)。由图 1 可知, 开放水面土壤在 35 °C 培育条件下的 CO₂ 产生速率显著高于 15 °C 和 25 °C。

2.2 不同植被类型湿地最大产 CO₂ 潜力

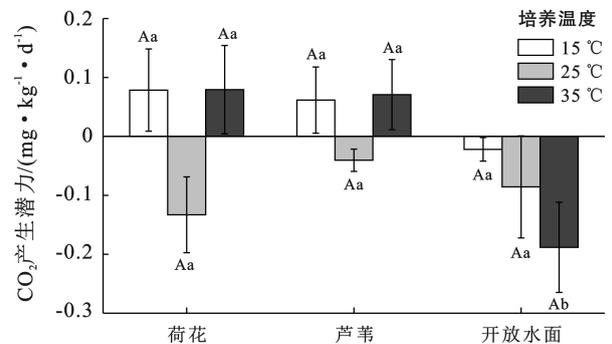
荷花土壤在 35 °C 培养条件下的产 CO₂ 潜力最高, 为 0.08 mg/(kg·d) (以 CO₂ 计), 是 15 °C 培养下的 1.01 倍 (图 2)。芦苇土壤在 35 °C 培养条件下的产 CO₂ 潜力最高为 0.07 mg/(kg·d) (以 CO₂ 计), 比 15 °C 培育条件下的产 CO₂ 潜力高 15.06%。比较荷花、芦苇土壤产 CO₂ 潜力, 表现为: 35 °C > 15 °C > 25 °C。

相比荷花和芦苇土壤在不同温度培养下产 CO₂ 潜力, 发现开放水面各处理下的产 CO₂ 潜力随温度升高而降低, 在 35 °C 培育条件下的产 CO₂ 潜力比 25 °C 的低 50%。比较不同植被类型湿地土壤在 15, 35 °C 培养下发现, 开放水面最大产 CO₂ 潜力最低。

2.3 不同植被类型湿地产 CO₂ 潜力与温度的关系

荷花土壤在 15, 25 和 35 °C 培养条件下的产 CO₂ 潜力平均值分别为 0.07, -0.13, 0.08 mg/(kg·d) (以 CO₂ 计), 产 CO₂ 潜力与培养温度呈正相关 (图 3)。与荷花土壤相似, 芦苇土壤产 CO₂ 潜力随培

养温度增加而上升。而开放水面在 15 °C 培养下的产 CO₂ 潜力最高达 -0.02 mg/(kg·d) (以 CO₂ 计), 在 35 °C 培养下最低达 -0.19 mg/(kg·d) (以 CO₂ 计) 与培养温度呈显著负相关关系 ($p < 0.05$)。



注: 不同大写字母表示同植被不同温度差异显著 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示同温度不同植被差异显著 ($p < 0.05$)。

图 2 不同植被土壤 CO₂ 产生潜力在不同温度培养下的最大值
Fig.2 Maximum CO₂ production potential of different vegetation soils under different temperature cultures

2.4 不同植被类型湿地产 CO₂ 潜力对温度的敏感性

由表 2 可知, 当培养温度上升时, 荷花土壤产 CO₂ 潜力对温度的敏感性为 -0.60, 是降温培养下的 2.82 倍。与荷花土壤相反, 芦苇土壤降温时的温度敏感性系数是升温时的 2.65 倍。开放水面土壤 Q₁₀ 值相差最大。

比较同一植被在不同温度土壤下的 Q₁₀ 值, 发现仅荷花湿地土壤在升温状态下的 Q₁₀ 值大于降温 (以 25 °C 为对照)。而比较同一温度条件下不同植被类型湿地土壤的 Q₁₀ 值发现, 开放水面 Q₁₀ 值在降温和升温状态下均高于其他植被类型湿地。研究不同植

被类型湿地土壤产 CO_2 潜力对温度的敏感性特征能探究古菌—温室气体产生的反应原理,有助于提高对

不同湿地植被带土壤及土壤不同深度的古菌群落结构、数量的研究。

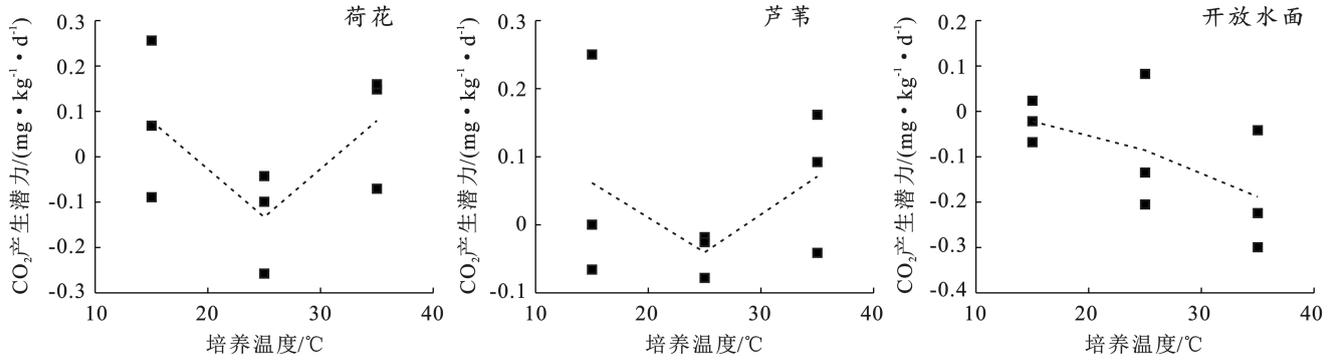


图 3 不同植被土壤 CO_2 产生潜力与培养温度的关系

Fig.3 Relationship between CO_2 production potential of different vegetation soils and culture temperatures

表 2 不同植被类型湿地土壤产 CO_2 潜力的温度敏感性特征

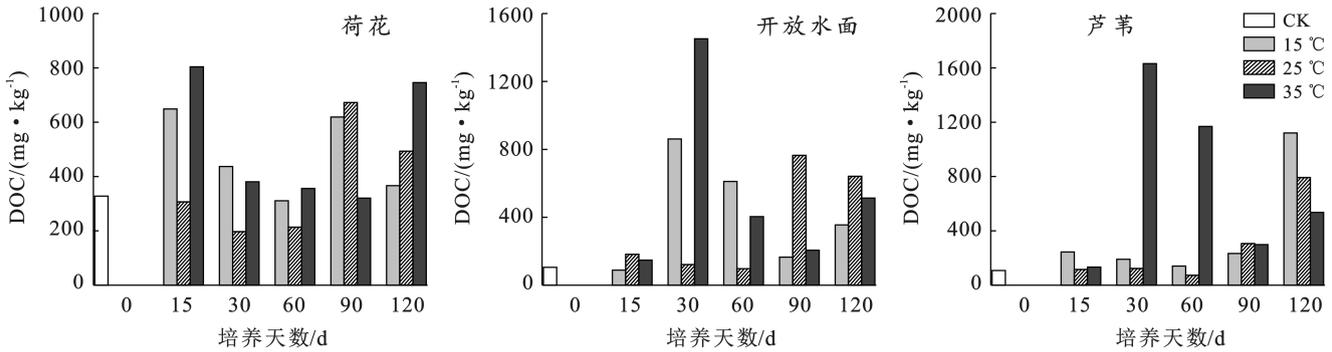
Table 2 Sensitivity characteristics of CO_2 production potential of different vegetation soil

植被类型	Q_{10} 值	
	15~25 °C	25~35 °C
荷花	-1.69	-0.60
芦苇	-0.66	-1.75
开放水面	3.90	2.20

2.5 不同植被土壤溶解性有机碳(DOC)动态变化

不同植被土壤 DOC 动态变化如图 4 所示。由图

4 可知,荷花土壤在 15 °C 培养条件下,除培养第 90 d,土壤 DOC 呈逐渐下降趋势。其中,培养第 15 天时,DOC 最高为 648.60 mg/kg,是最低值的 2.09 倍。荷花土壤 25 °C 下的 DOC 范围为 196.92~672.48 mg/kg,培养第 120 天的 DOC 比培养第 15 d 增加了 60.81%。35 °C 下荷花 DOC 呈先升高—降低—升高的变化趋势。由图 4 可知,荷花土壤 DOC 在不同温度培养期间的剧烈变化程度表现为 35 °C > 25 °C > 15 °C。



注:CK 为未经培养的原始土样。

图 4 不同植被土壤溶解性有机碳(DOC)在不同温度培养下的动态变化

Fig.4 Dynamic changes of dissolved organic carbon in soil of different vegetation in different temperature cultures

15 °C, 25 °C 培养时,芦苇土壤 DOC 呈缓慢上升的变化趋势。芦苇土壤在 15 °C 下的 DOC 为 140.58~1 120.41 mg/kg,而 25 °C 培养下的 DOC 最高为 792.31 mg/kg,最低值仅为 73.01 mg/kg。培养温度为 35 °C 时,芦苇土壤 DOC 在培养前期快速上升,至第 30, 60 d 较第 15 d 净增 1 121.85%, 775.36%, 随后又急剧下降,培养第 90, 120 d 的 DOC 较峰值净降 81.70%, 67.16%。由图 4 可知,35 °C 条件下 DOC 变化幅度是 15 °C, 25 °C 的 1.53, 2.08 倍。

培养温度为 15 °C 时,开放水面 DOC 呈现先升高后下降的变化,培养第 30 d 较第 15 d 上升了 872.91%, 而培养 90 d 则较第 30 d 下降了 80.81%。开放水面 25 °C 培养下的 DOC 逐渐下降,除第 90 d 较为特殊,出现峰值 764.61 mg/kg,是第 15 d 的 4.21 倍。35 °C 培养时,开放水面 DOC 呈明显的先升后降趋势,第 30 d 达到峰值为 1 451.33 mg/kg。由图 4 可知,开放水面 DOC 在 35 °C 培养条件下变化最剧烈。

2.6 不同植被土壤产 CO₂ 速率与 DOC 的关系

荷花湿地土壤 CO₂ 产生速率均随 DOC 增加而减小(图 5)。在 15 °C 培养下的 CO₂ 产生速率最高值为 0.83 mg/(kg · d)(以 CO₂ 计),是 25, 35 °C 培养下的

1.37, 1.75 倍。当培养温度为 25 °C 时,CO₂ 产生速率的峰、谷值分别为 0.60, -0.74 mg/(kg · d)(以 CO₂ 计)。当培养温度为 35 °C 时,荷花土壤 DOC 对 CO₂ 产生速率影响最大。

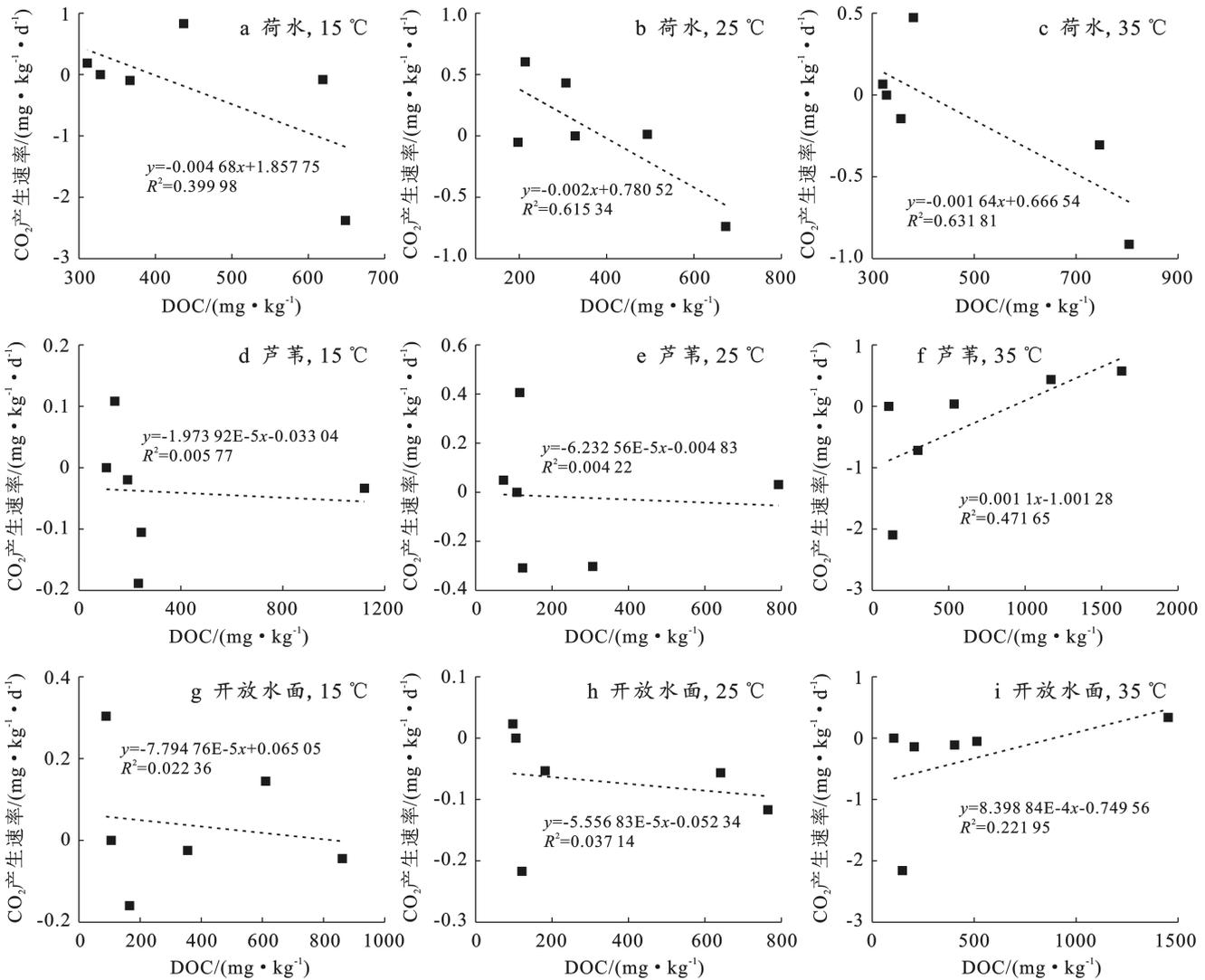


图 5 不同温度培养条件不同植被土壤 CO₂ 产生速率与溶解性有机碳(DOC)的关系

Fig.5 Relationship between CO₂ production rate and dissolved organic carbon of different vegetation under different temperature culture conditions

除芦苇土壤在 35 °C 培养下的 CO₂ 产生速率与 DOC 呈正相关,15, 25 °C 处理下的 CO₂ 产生速率均随 DOC 增加而减少。芦苇土壤在 15, 25, 35 °C 培养下的 CO₂ 产生速率最高值分别为 0.11, 0.41, 0.58 mg/(kg · d)(以 CO₂ 计)。35 °C 培养下的芦苇土壤 DOC 对 CO₂ 产生速率影响最大为 47.16%, 分别是 15, 25 °C 培养下的 81.31, 112.29 倍。

当培养温度为 15, 25 °C 时,开放水面 CO₂ 产生速率与 DOC 呈负相关。在 15 °C 培养下的 CO₂ 产生速率最高值为 0.30 mg/(kg · d)(以 CO₂ 计),是 35 °C 培养下的 89.96%。25 °C 培养下的芦苇土壤 DOC 对

CO₂ 产生速率影响比 15 °C 的大 1.66 倍。开放水面在 35 °C 培养条件下的 CO₂ 产生速率随 DOC 增加而增加。

3 讨论

3.1 植物对土壤产 CO₂ 潜力的影响

东太湖土壤产 CO₂ 潜力表现为:荷花 > 芦苇 > 开放水面。植物生物量的差异和地上部分的呼吸作用是 CO₂ 排放通量的主要贡献者,但也有研究^[16]发现植物生物量与湿地 CO₂ 排放通量之间无显著相关性。王晓锋等^[17]研究发现,水生植物分布水体 CO₂ 排放

通量普遍高于开敞水体。本研究结果符合普遍规律,即大部分水生植物增强水体温室气体排放^[18]。荷花、芦苇茎内中空,发达的不定根可深入土壤厌氧层从而避免 CO₂ 在水中氧化。维管束除具有向上运输水分功能外,同时还能向下传输碳源。对瑞士东部湿地排除表土原因后研究发现,活体植物的根分泌物和根腐烂是导致该湿地产生温室气体的原因之一^[19]。本研究中有植被区域土壤产 CO₂ 潜力高于无植被区域土壤,这可能与采样时部分植物体已凋落有关。若植物残体未及时打捞入湖,植物衰亡过程中的碳源很有可能已被贮藏,铃铛湖的睡莲和莲藕区也证明了这一点^[20]。此外,芦苇的根系体积大、木质素分解缓慢,强抗分解能力使产 CO₂ 菌能直接利用的小分子物质十分有限,这也可解释荷花、芦苇湿地产 CO₂ 潜力的不同。

3.2 温度对土壤产 CO₂ 潜力的影响

本研究发现,不同培养温度下,东太湖荷花、芦苇湿地土壤产 CO₂ 潜力表现为:35 °C > 15 °C > 25 °C。温度是影响 CO₂ 产生过程中的关键因素之一。有研究指出,土壤温度与 CO₂ 排放通量呈极显著正相关关系^[21],采样箱内温度和土壤温度与 CO₂ 排放通量关联度较高^[22]。然而也有研究^[23]发现,大气增温并未改变黑土有机碳含量和稳定性。太湖属亚热带季风气候,采样期平均水温为 25 °C,产 CO₂ 潜力可能与培养温度的高低存在关系。当培养温度较低时,土壤中电子受体还原反应较为缓慢、产 CO₂ 菌活性也会受到一定抑制,CO₂ 产生量也可能长期处于较低水平,因此产 CO₂ 潜力也不高。而随培养温度升高,氧化还原过程加快,产 CO₂ 菌活性逐渐恢复。但也有研究发现土壤在 5, 15 °C 下的 CO₂ 累积排放量都较大^[24]。此外,湖滨带因栽种植物而产生的温度变化与湖心区常年水温平稳也能解释不同植被类型湿地产 CO₂ 潜力的差异。温度也受土地利用方式影响,稻田土壤温室气体排放对全球变暖贡献最大、温度敏感度最高^[25]。

杨平等^[26]研究发现闽江河口不同植被带产 CH₄ 潜力 Q₁₀ 值范围符合一般规律,但平均值较大。CH₄ 和 CO₂ 排放的温度敏感性之差(EM : C)取决于土壤 C : N 化学计量比,当 EM : C 为负值时,则表明在升温条件下 CO₂ 的排放量增加^[27]。本研究中,不同植被类型土壤在升温条件下的 Q₁₀ 值相对较小。土壤产 CO₂ 的 Q₁₀ 值受多种因素综合影响,关键的有土壤 C : N 以及 DOC : SOC 之比^[28]。

3.3 溶解有机碳对土壤产 CO₂ 潜力的影响

DOC 可分为内源和外源性碳源,会影响细菌的生物可利用性和碳素在食物网中的传递效率^[29]。

DOC 能为 CO₂ 产生提供直接碳源,影响 CO₂ 排放。本研究结果表明荷花土壤 DOC 高于芦苇、开放水面,最大产 CO₂ 潜力也大于芦苇、开放水面。这与其他研究结果一致,例如湖滨可溶性有机碳质量比是湖心的 1.37 倍,湖滨产 CH₄ 速率显著大于湖心^[30]。冻融作用能降低土壤团聚体稳定性和促进 DOC 释放,这就解释 15 °C 下荷花、芦苇土壤最大产 CO₂ 潜力高于 25 °C^[31]。尤其在富营养水体中,DOC 中的芳香蛋白类物质和溶解性微生物代谢产物是 CO₂ 产生的主要来源^[32]。本研究分析了 DOC 与 CO₂ 产生速率的关系。结果表明,CO₂ 产生速率与 DOC 存在或正或负的相关关系。CO₂ 产生过程中的碳源大多来源于植物体和土壤有机质,植物土壤有机碳含量越高,产 CO₂ 潜力越大。从 DOC 上看,荷花湿地是芦苇湿地、开放水面的 3.04 和 3.11 倍,芦苇湿地、开放水面分别为荷花湿地的 25.51% 和 36.55%,本研究的 CO₂ 产生速率符合一般规律。此外,水分因素控制着 DOC 的输入和输出,特别是在干湿交替的环境中,DOC 的生物化学和水文学过程会随着水流迁移过程存在空间异质性^[33]。

4 结论

通过室内模拟培养试验,对东太湖不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生潜力对温度的响应进行了研究,主要结论如下。

(1) 东太湖不同植被类型湿地土壤 CO₂ 产生速率在 35 °C 培养条件下最快。3 种植被土壤 DOC 在 35 °C 下变化最剧烈。大多湿地土壤 CO₂ 产生速率随 DOC 增加而下降,CO₂ 产生速率与 DOC 的关系受 35 °C 培养条件影响最大。

(2) 荷花、芦苇湿地土壤在 35 °C 培养条件下产 CO₂ 潜力最大,而开放水面土壤在 15 °C 条件下最大。比较同植被、不同温度土壤 Q₁₀ 值发现,只有荷花湿地土壤升温 > 降温。

湖泊湿地是全球碳循环的重要组成部分,本文研究内容相对独立,缺乏与全球气候变化的有机联系。在今后的研究中可以进一步探索不同季节、不同地理位置湿地植被土壤产 CO₂ 潜力的差异,结合古菌群落结构特征、基因丰度等进行深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 梁媚聪,秦圆圆,樊星,等. IPCC 第六次评估报告第三工作组报告主要结论解读及对策建议[J]. 环境保护, 2022, 50(13): 72-76.
- Liang Meicong, Qin Yuanyuan, Fan Xing, et al. Interpretation of the main conclusions and suggestions of

- IPCC AR6 working group III report [J]. Environmental Protection, 2022,50(13):72-76.
- [2] Raymond P A, Hartmann J, Lauerwald R, et al. Global carbon dioxide emissions from inland waters [J]. Nature, 2013,503(7476):355-359.
- [3] Song Kaishan, Wen Zhidan, Xu Yijun, et al. Dissolved carbon in a large variety of lakes across five limnetic regions in China [J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 143-154.
- [4] Catalán N, Marcé R, Kothawala D N, et al. Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters [J]. Nature Geoscience, 2016, 9:501-504.
- [5] 梁佳辉,田琳琳,周钟昱,等.太湖流域上游南苕溪水系夏秋季水体溶存二氧化碳和甲烷浓度特征及影响因素[J].环境科学,2021,42(6):2826-2838.
Liang Jiahui, Tian Linlin, Zhou Zhongyu, et al. Characteristics and drivers of dissolved carbon dioxide and methane concentrations in the nantiaoxi river system in the upper reaches of the Taihu Lake basin during summer-autumn [J]. Environmental Science, 2021,42(6): 2826-2838.
- [6] Song Changchun, Sun Li, Huang Yao, et al. Carbon exchange in a freshwater marsh in the Sanjiang Plain, Northeastern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2011,151(8):1131-1138.
- [7] Zhu Renbin, Liu Yashu, Xu Hua, et al. Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica [J]. Atmospheric Environment, 2010,44 (3):304-311.
- [8] Zhang Guangbin, Ji Yang, Ma Jing, et al. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH₄ in paddy fields determined with stable carbon isotope technique [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,52:108-116.
- [9] Liu Pengfei, Klose M, Conrad R. Temperature effects on structure and function of the methanogenic microbial communities in two paddy soils and one desert soil [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018,124:236-244.
- [10] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil Agrochemical Analysis (3rd Edition) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [11] 刘德燕,丁维新.天然湿地土壤产甲烷菌及其影响因素研究进展[J].地理科学,2011,31(2):136-142.
Liu Deyan, Ding Weixin. Progress on spatial variation of methanogens and their influencing factors in natural wetlands [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31 (2):136-142.
- [12] 王晓锋,袁兴中,陈槐,等.河流 CO₂与 CH₄排放研究进展[J].环境科学,2017,38(12):5352-5366.
Wang Xiaofeng, Yuan Xingzhong, Chen Huai, et al. Review of CO₂ and CH₄ emissions from rivers [J]. Environmental Science, 2017,38(12):5352-5366.
- [13] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates [J]. Plant and Soil, 1998,203(2):227-237.
- [14] Yang Yang, Li Ting, Pokharel P, et al. Global effects on soil respiration and its temperature sensitivity depend on nitrogen addition rate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022,174:108814.
- [15] Inglett K S, Inglett P W, Reddy K R, et al. Temperature sensitivity of greenhouse gas production in wetland soils of different vegetation [J]. Biogeochemistry, 2012,108(1):77-90.
- [16] 刘胜,陈宇炜.退水期鄱阳湖藨草(*Carex cinerascens*)和藜蒿(*Artemisia selengensis*)洲滩湿地 CO₂通量变化及其影响因子[J].湖泊科学,2017,29(6):1412-1420.
Liu Sheng, Chen Yuwei. Variations and impact factors of CO₂ fluxes of *Carex cinerascens*-dominated and *Artemisia selengensis*-dominated wetland in Lake Poyang during drawdown periods [J]. Journal of Lake Sciences, 2017,29(6):1412-1420.
- [17] 王晓锋,龙雨行,余乐乐,等.不同水生植物对景观水体 CO₂与 CH₄排放通量的影响[J].生态学报,2023,43 (9):3592-3606.
Wang Xiaofeng, Long Yuhang, Yu Lele, et al. Effects of aquatic plants on the spatio-temporal variations of CO₂ and CH₄ fluxes in urban landscape waters [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(9):3592-3606.
- [18] 龚小杰,袁兴中,刘婷婷,等.水生植物对淡水生态系统温室气体排放的影响研究进展[J].地球与环境,2020, 48(4):496-509.
Gong Xiaojie, Yuan Xingzhong, Liu Tingting, et al. Review on effects of aquatic plants on the greenhouse gas emission from freshwater ecosystems [J]. Earth and Environment, 2020,48(4):496-509.
- [19] Bhullar G S, Edwards P J, Olde Venterink H. Variation in the plant-mediated methane transport and its importance for methane emission from intact wetland peat mesocosms [J]. Journal of Plant Ecology, 2013,6 (4):298-304.
- [20] 邓焕广,张智博,刘涛,等.城市湖泊不同水生植被区水体温室气体溶存浓度及其影响因素[J].湖泊科学, 2019,31(4):1055-1063.
Deng Huanguang, Zhang Zhibo, Liu Tao, et al. Dissolved greenhouse gas concentrations and the influen-

- cing factors in different vegetation zones of an urban lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(4):1055-1063.
- [21] 王金龙, 李艳红, 李发东. 博斯腾湖人工和天然芦苇湿地土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放通量[J]. *生态学报*, 2018, 38(2):668-677.
Wang Jinlong, Li Yanhong, Li Fadong. Emission fluxes of CO_2 , CH_4 , and N_2O from artificial and natural reed wetlands in Bosten Lake, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(2):668-677.
- [22] 牛翠云, 王树涛, 郭艳杰, 等. 白洋淀芦苇型水陆交错带湿地 CH_4 和 CO_2 的排放特征[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(15):209-213.
Niu Cuiyun, Wang Shutao, Guo Yanjie, et al. Emission characteristics of CH_4 and CO_2 from *Phragmites australis*-dominated land/inland water ecotones in Baiyangdian Wetland [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(15):209-213.
- [23] 薛海清, 岳娅, 冯茜, 等. 大气温度和 CO_2 增加对黑土有机碳稳定性的影响[J]. *水土保持通报*, 2023, 43(3):366-373.
Xue Haiqing, Yue Ya, Feng Qian, et al. Effects of elevated temperature and CO_2 enrichment on stability of soil organic carbon storage in mollisols [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023, 43(3):366-373.
- [24] 曹晓霁, 刘华民, 张睿, 等. 春季解冻条件下乌梁素海湖滨带土壤温室气体排放室内模拟研究[J]. *湿地科学*, 2022, 20(1):34-48.
Cao Xiaojie, Liu Huamin, Zhang Rui, et al. Laboratory simulation of greenhouse gas emissions from soils in lakeshore of Ulansu Lake under spring thawing conditions [J]. *Wetland Science*, 2022, 20(1):34-48.
- [25] 桑文秀, 杨华蕾, 唐剑武. 不同土地利用类型土壤温室气体排放对温湿度的响应[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2021(4):109-120.
Sang Wenxiu, Yang Hualei, Tang Jianwu. Response of soil greenhouse gas emissions to temperature and moisture across different land-use types [J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2021(4):109-120.
- [26] 杨平, 何清华, 仝川. 闽江口不同沼泽植被带土壤甲烷产生潜力的温度敏感性[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(3):879-888.
Yang Ping, He Qinghua, Tong Chuan. Temperature sensitivity of soil methane production potential in different marsh vegetation zones in the Min River Estuary [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(3):879-888.
- [27] Hu Han, Chen Ji, Zhou Feng, et al. Relative increases in CH_4 and CO_2 emissions from wetlands under global warming dependent on soil carbon substrates [J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17:26-31.
- [28] Chen Ji, Luo Yiqi, Sinsabaugh R L. Subsoil carbon loss[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(4):284-285.
- [29] 叶琳琳, 孔繁翔, 史小丽, 等. 富营养化湖泊溶解性有机碳生物可利用性研究进展[J]. *生态学报*, 2014, 34(4):779-788.
Ye Linlin, Kong Fanxiang, Shi Xiaoli, et al. The bioavailability of dissolved organic carbon in the eutrophic lakes [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4):779-788.
- [30] 程锦萍, 郭欢, 刘宇昂, 等. 洪泽湖底泥产甲烷速率及其对温度变化的响应[J]. *湿地科学*, 2023, 21(3):439-448.
Cheng Jinping, Guo Huan, Liu Yuang, et al. Methane production rate of the sediment in Hongze Lake and its response to temperature change [J]. *Wetland Science*, 2023, 21(3):439-448.
- [31] 王旭, 李斐, 赵世翔. 冻融交替对土壤 CO_2 排放影响的研究进展[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3):728-737.
Wang Xu, Li Fei, Zhao Shixiang. Freeze-thaw regime effects on soil CO_2 emission: A review [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3):728-737.
- [32] 刘艺, 许浩廉, 毛羽丰, 等. 铜绿微囊藻衰亡过程中产甲烷动态及关键影响因子[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(5):132-140.
Liu Yi, Xu Haolian, Mao Yufeng, et al. Methane-producing dynamics and key influencing factors during the decay of *Microcystis aeruginosa* [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(5):132-140.
- [33] 胥超, 林成芳, 刘小飞, 等. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(1):84-92.
Xu Chao, Lin Chengfang, Liu Xiaofei, et al. Effects of forest conversion on concentrations and fluxes of dissolved organic carbon in runoff [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(1):84-92.