

DOI: 10.20103/j.stxb.202412273187

张政, 刘梅, 周聃, 张宇, 邹松保, 倪蒙, 许定达, 原居林. 浙北地区不同品种养殖池塘温室气体排放时空特征与影响因素分析. 生态学报, 2025, 45 (19): - .

Zhang Z, Liu M, Zhou D, Zhang Y, Zou S B, Ni M, Xu D D, Yuan J L. Spatial-temporal characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions from different breeding ponds in northern Zhejiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45 (19): - .

# 浙北地区不同品种养殖池塘温室气体排放时空特征与影响因素分析

张 政<sup>1</sup>, 刘 梅<sup>1</sup>, 周 聃<sup>1</sup>, 张 宇<sup>2</sup>, 邹松保<sup>1</sup>, 倪 蒙<sup>1</sup>, 许定达<sup>3</sup>, 原居林<sup>1,\*</sup>

1 浙江省淡水水产研究所/农业农村部淡水渔业健康养殖重点实验室/浙江省淡水水产遗传育种重点实验室, 湖州 313001

2 安徽科技学院, 凤阳 233100

3 内江师范学院, 内江 641100

**摘要:**以浙江北部地区五种不同养殖品种青鱼 (*Mylopharyngodon piceus*)、乌鳢 (*Channa argus*)、翘嘴鲌 (*Culter alburnus*)、大口黑鲈 (*Micropterus salmoides*) 和中华绒螯蟹 (*Eriocheir sinensis*) 为研究对象, 基于不同养殖周期采用静态浮箱法测定池塘水-气界面温室气体二氧化碳 (CO<sub>2</sub>, Carbon dioxide)、甲烷 (CH<sub>4</sub>, Methane) 和氧化亚氮 (N<sub>2</sub>O, Nitrous oxide) 通量, 同时对气象因子 (气温、压强等) 及水体理化指标 (水温、pH、溶氧和无机盐等) 进行分析, 以探讨五个养殖池塘温室气体排放特征及其共性影响因素。结果表明, 各养殖池塘温室气体通量呈明显时间变化特征。CO<sub>2</sub> 排放通量总体上呈现出随温度升高而增加的趋势, 均在高温月份 (7 月至 8 月) 出现峰值; CH<sub>4</sub> 通量也随温度变化呈现与 CO<sub>2</sub> 通量相似的趋势, 大口黑鲈养殖塘除外, 其余养殖塘均在 7 月至 8 月达到最高值; 相反, N<sub>2</sub>O 排放则表现为随温度升高而降低。不同养殖品种池塘的温室气体排放存在显著差异, 观测期间 CO<sub>2</sub> 排放平均通量呈现乌鳢>大口黑鲈>青鱼>翘嘴鲌>中华绒螯蟹, 其中乌鳢养殖塘的平均 CO<sub>2</sub> 通量最高 (7473.85±1606.48) μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 显著高于翘嘴鲌养殖塘 ( $P < 0.05$ ); CH<sub>4</sub> 平均通量呈现中华绒螯蟹>大口黑鲈>乌鳢>青鱼>翘嘴鲌, 最高平均 CH<sub>4</sub> 通量出现在中华绒螯蟹养殖塘 (182.13±133.34) μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>; 而青鱼养殖塘则记录了最高平均 N<sub>2</sub>O 通量 (2.52±2.46) μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>, 整体排放规律呈现青鱼>翘嘴鲌>乌鳢>大口黑鲈>中华绒螯蟹。就增温潜势而言, 所有养殖池塘均为温室气体排放源, 其排序为: 乌鳢>大口黑鲈>青鱼>中华绒螯蟹>翘嘴鲌; 单位产量的增温潜势排放系数排序为: 中华绒螯蟹>大口黑鲈>青鱼>翘嘴鲌>乌鳢。相关性分析显示, 水温和气温是影响养殖池塘温室气体排放的重要因素, 除翘嘴鲌养殖塘外, 其余池塘的排放通量均与温度呈显著相关性 ( $P < 0.05$ ); 此外, 除中华绒螯蟹养殖塘外, 其余池塘的温室气体通量均与 pH 存在显著相关性; 同时, 水体中无机盐浓度与池塘 N<sub>2</sub>O 通量密切相关。

**关键词:** 温室气体; 浙北地区; 养殖池塘; 时空差异

## Spatial-temporal characteristics and influencing factors of greenhouse gas emissions from different breeding ponds in northern Zhejiang Province

ZHANG Zheng<sup>1</sup>, LIU Mei<sup>1</sup>, ZHOU Dan<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>2</sup>, ZOU Songbao<sup>1</sup>, NI Meng<sup>1</sup>, XU Dingda<sup>3</sup>, YUAN Julin<sup>1,\*</sup>

1 Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries/Key Laboratory of Freshwater Fishery Health Aquaculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Key Laboratory of Freshwater Aquaculture Genetics and Breeding, Huzhou 313001, China

2 Anhui Science and Technology University, Fengyang 233100, China

3 Neijiang Normal University, Neijiang 641100, China

**Abstract:** This study investigated greenhouse gas (GHG) emissions from five representative aquaculture species in northern

**基金项目:** 浙江省重点研发计划项目 (2022C02027); 湖州市公益项目 (2022GZ24); 浙江省淡水水产研究所开放课题基金 (ZJK202413)

**收稿日期:** 2024-12-27; **网络出版日期:** 2025-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuanjulin1982@126.com

Zhejiang, China: black carp (*Mylopharyngodon piceus*), snakehead (*Channa argus*), topmouth culter (*Culter alburnus*), largemouth bass (*Micropterus salmoides*), and Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*). GHG fluxes of carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ), methane ( $\text{CH}_4$ ), and nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) were measured at the water—air interface using the static floating chamber method across different culture stages. Simultaneously, meteorological parameters (e.g., air temperature and atmospheric pressure) and water physicochemical properties (e.g., water temperature, pH, dissolved oxygen, and inorganic ion concentrations) were monitored to explore emission characteristics and their environmental drivers. The results revealed significant temporal variation in GHG fluxes across all aquaculture systems.  $\text{CO}_2$  emissions generally increased with temperature, peaking during the hottest months (July and August).  $\text{CH}_4$  emissions showed a similar temperature-dependent pattern, with the highest values recorded in July and August for all ponds except those culturing *M. salmoides*. In contrast,  $\text{N}_2\text{O}$  emissions tended to decrease with rising temperatures. GHG emissions varied significantly among the five cultured species. The average  $\text{CO}_2$  fluxes ranked as: *C. argus* > *M. salmoides* > *M. piceus* > *C. alburnus* > *E. sinensis*, with the highest mean flux in *C. argus* ponds ( $(7473.85 \pm 1606.48) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), significantly greater than that in *C. alburnus* ponds ( $P < 0.05$ ). For  $\text{CH}_4$ , the ranking was: *E. sinensis* > *M. salmoides* > *C. argus* > *M. piceus* > *C. alburnus*, with *E. sinensis* ponds showing the highest average flux ( $(182.13 \pm 133.34) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ). The highest average  $\text{N}_2\text{O}$  flux was observed in *M. piceus* ponds ( $2.52 \pm 2.46 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ), followed by: *M. piceus* > *C. alburnus* > *C. argus* > *M. salmoides* > *E. sinensis*. All ponds were net sources of GHGs in terms of global warming potential (GWP), with total GWP ranked as: *C. argus* > *M. salmoides* > *M. piceus* > *E. sinensis* > *C. alburnus*. When normalized by production yield, the GWP emission factors showed a different ranking: *E. sinensis* > *M. salmoides* > *M. piceus* > *C. alburnus* > *C. argus*. Correlation analysis indicated that water and air temperature were the main environmental drivers of GHG emissions. For all species except *C. alburnus*, GHG fluxes were significantly correlated with temperature ( $P < 0.05$ ). Additionally, GHG emissions in all ponds except *E. sinensis* showed significant correlations with water pH. Moreover, the concentration of inorganic salts in water was strongly associated with  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes across different aquaculture systems.

**Key Words:** greenhouse gas; Northern Zhejiang province; culture pond; spatio-temporal difference

中国作为世界上最大的水产品生产国,在 2023 年的淡水水产品产出量高达 3414.01 万吨<sup>[1]</sup>,占全球水产养殖总产量的 15%<sup>[2]</sup>,并且每年以超过 2% 的速度增长。池塘养殖是我国淡水水产品的主要生产方式<sup>[1]</sup>,养殖池塘相比水库等大水面水域面积小、水深浅,并且由于人工投饵和鱼类代谢产生的废物累计,造成其水体富营养化程度高。再加上排水、曝气等一系列人工干预措施,使得池塘的带来的环境问题被更多学者关注<sup>[3-4]</sup>。

二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是池塘养殖水域和大气交互的温室气体,对于全球变暖有着很大的贡献。在 100a 的时间范围内  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  的全球变暖潜力值为  $\text{CO}_2$  的 32 倍和 263 倍<sup>[5]</sup>。淡水养殖系统作为重要的人为排放源,近年来受到更多学者的广泛关注,并且实现了初步研究。林海(2013)等对江苏高淳蟹塘的夏季温室气体排放规律进行了原位观测,并估算了综合增温潜势<sup>[6]</sup>;Liu 等(2016)探究了江苏兴化的稻转鱼—蟹混养塘的  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  排放的时空特征以及驱动因素<sup>[7]</sup>;马煜春(2018)等对江苏常熟太湖区域的混养鱼塘与蟹塘的  $\text{CH}_4$  排放通量进行比较<sup>[8]</sup>;贾磊(2021)等探究了安徽滁州鱼蚌混养塘  $\text{CH}_4$  通量时空变化特征以及影响因素<sup>[9]</sup>。

目前,我国关于养殖池塘温室气体排放通量时空变化和影响因素分析的研究主要集中在太湖、长江和黄河流域,分布在江苏、安徽、湖北等地。浙江省淡水水产品产量全国第 9<sup>[10]</sup>,但是淡水增养殖水域温室气体排放的研究数据较少<sup>[11]</sup>,无法为准确估算区域性温室气体排放通量提供数据支撑。另外,由于气候、管理模式以及养殖品种不同,池塘养殖模式温室气体排放通量以及驱动因素存在区域差异,在绘制淡水养殖池塘排放清单时也会造成误差。本研究以浙江湖州市的五种不同养殖品种(乌鳢、青鱼、翘嘴鲌、大口黑鲈、中华绒螯蟹)养殖池塘为研究对象包括,利用静态浮箱法对养殖期间的各类池塘温室气体排放规律及其影响因素同时

进行研究,克服了区域气候带来的影响,为制作淡水养殖池塘排放清单提供数据支持,为尽早实现农业“碳中和、碳达标”提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

本研究选取了浙北地区不同养殖品种的池塘作为温室气体排放通量的观测对象。位于浙江省湖州市(119°14'—120°29'N,30°22'—31°11'E)境内,太湖南岸(图1),属于典型亚热带季风型气候。季风显著、四季分明,年平均气温12.2—17.3℃;雨热同季、降水充沛,年降水量761—1780 mm,降水日数116—153 d;气候温和、空气湿润,年平均相对湿度均在80%以上。(数据来源:<https://www.huzhou.gov.cn/col/col1229213503/index.html>)

乌鳢养殖塘选取湖州德清禹越某水产养殖家庭农场作为实验点(图1),实验进行周期为2022年4—11月;放养乌鳢越冬鱼种规格( $310.25 \pm 27.72$ ) g,密度为5000—5300尾/hm<sup>2</sup>分别投喂配合饲料(粗蛋白和脂肪含量分别为48.17%和6.21%)和冰鲜鱼,日投喂量依水温和摄食情况而定。

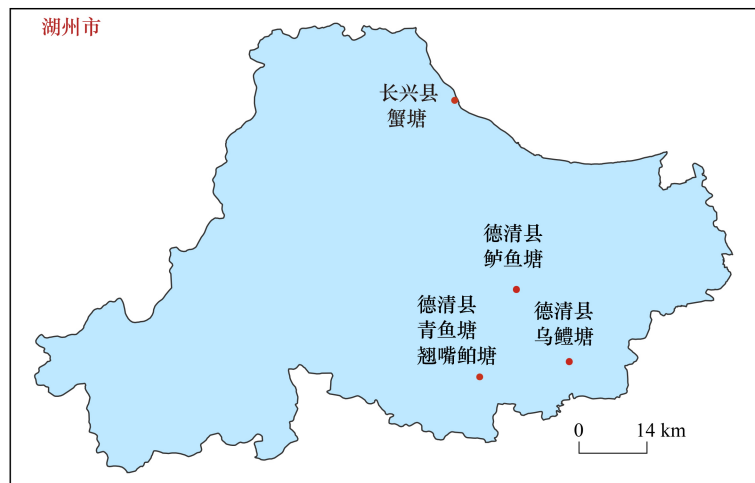


图1 采样点分布

Fig.1 The sampling sites

河蟹塘选取湖州长兴某家庭农场(图1),实验周期为2022年6—10月;池塘种植苦草、伊乐藻、轮叶黑藻等水草,覆盖率高可达60%。初始放养蟹种规格80—100只/kg,密度10 kg/hm<sup>2</sup>;投喂河蟹专用配合饲料(蛋白和脂肪的分别为含量35.69%和7.46%),日投喂量依据水温与摄食情况适当增减。

青鱼、翘嘴鲈选取德清某水产养殖场为实验点(图1),青鱼实验周期为2021年10月—2022年7月;青鱼放养规格为500—700 g/尾,放养密度300—400尾/hm<sup>2</sup>;采用冰鲜鱼+配合饲料(蛋白含量32%)的喂养方式,每天于8:30—10:00和15:00—16:30两个时间段投饵,根据天气情况科学投喂。

翘嘴鲈实验进行周期为2021年9月—2022年7月;放养规格250 g/尾,3000尾/hm<sup>2</sup>;养殖过程投喂全价颗粒饲料(蛋白水平40%以上),投喂量按照存塘鱼重量的2%—5%制定,随着鱼体长大可降低至1.5%,要根据天气、水质、鱼活动等情况适时调整。

传统鲈鱼塘实验点同样在德清的某家庭农场,实验进行的周期为2022年4月—10月;选择驯化后的鲈鱼苗种,规格体长4—5 cm,传统养殖塘放养密度4000尾/hm<sup>2</sup>;两者养殖过程中均选择鲈鱼专用膨化漂浮饲料(粗蛋白含量42%),每天投喂两次,适时增减。

截至试验结束,乌鳢塘产出106500 kg/hm<sup>2</sup>,蟹塘1520 kg/hm<sup>2</sup>,翘嘴鲈24000 kg/hm<sup>2</sup>,青鱼21000 kg/hm<sup>2</sup>,

传统鲈鱼养殖塘产量 26250 kg/hm<sup>2</sup>。

## 1.2 样品采集

中华绒螯蟹养殖塘在 2021 年 2 月放养,6 月开始采集温室气体,至十月出塘停止实验。青鱼、翘嘴鲇塘从 2021 年 9 月开始观测,直至 2022 年 7 月份出塘结束实验;黑鱼、传统鲈鱼塘均从 2022 年开始,实验起止根据不同养殖周期而定(4—11 月之间)。使用有机玻璃采水器采集每个采样点表层水样 500 mL 并装入无菌采样袋中,用于测定常规理化指标。每个采样点的气体收集与水样采集同步进行,使用静态浮箱法对水-气界面温室气体进行原位采集。

静态浮箱主要由泡沫浮板和聚乙烯气室两部分组成,泡沫浮板便于漂浮,基本尺寸为 41 cm×27 cm,聚乙烯气室容积约 0.033 m<sup>3</sup>,并覆盖反光铝带,最大限度地减少阳光对内部的加热。将自制浮箱倒扣在水面,通过内部风扇的搅动使密闭箱室内的空气混合均匀,每次采集时间间隔 8 min,分别在 0 min, 8 min, 16 min, 24 min, 32 min 时抽取密闭箱室的气体 0.2 L,转移到气体采样袋(常德比克曼生物科技有限公司,中国)样品低温避光保存,在 24 h 内送回实验室。用手持气象站(Kestrel 3500,美国)测定风速、压强及气温等指标。同时利用便携哈希水质分析仪(HQ40D,美国),检测各采样点的 pH、溶氧量(DO)和水温。

## 1.3 样品分析方法

水样总氮(TN)、总磷(TP)采用碱性过硫酸钾氧化,使用紫外可见分光光度计(Cary 50,日本)测定。无机氮的测定用 0.45 μm 滤膜(Whatman GF/F)过滤,硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)用紫外分光光度法测定,铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)采用纳氏试剂光度法,总有机碳(TOC)采用燃烧氧化—非分散红外法,所有分析方法参考《水和废水监测分析方法》(第四版)。

## 1.4 排放通量与增温潜势计算

静态箱法,是通过测定静态箱内温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、CH<sub>4</sub>)气体浓度变化率来计算水-气界面的温室气体交换通量,计算公式如下<sup>[12]</sup>:

$$\text{Flux} = \frac{\text{Slope} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times V}{S} \quad (1)$$

Slope 是温室气体浓度随时间变化的斜率; $F_1$  为转化系数(40); $F_2$  是时间转化系数,将分钟转化为小时(60)、天(1440)等; $V$  为静态浮箱的容积, $S$  是浮箱底部与水面接触的面积; $F_3$  是 mol 到 μmol 的转化系数(1000);Flux 为交换通量(μmol m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>)。

全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)是衡量温室气体对全球变暖产生影响大小的一种重要手段,用来表示相同质量的不同温室气体与 CO<sub>2</sub> 相比对温室效应增强的相对辐射效应,1990 年 IPCC 将 GWP 定义为瞬间释放 1 kg 温室气体在一定时间段产生的辐射强迫与对应于 1 kg CO<sub>2</sub> 辐射强迫的比值<sup>[13]</sup>。全球增温潜势在 100 a 的时间尺度上,单位质量的 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的全球增温潜势分别为 CO<sub>2</sub> 的 32 倍和 263 倍<sup>[7]</sup>。根据池塘温室气体通量,推算出年排放量( $C_{\text{CO}_2}$ 、 $C_{\text{CH}_4}$ 、 $C_{\text{N}_2\text{O}}$ )GWP 计算式:

$$\text{GWP} = (C_{\text{CO}_2} + C_{\text{CH}_4} \times 32 + C_{\text{N}_2\text{O}} \times 263) \quad (2)$$

## 1.5 数据分析与处理

用 Microsoft Excel 2016 软件进行实验数据处理与基本计算,采用 ArcGIS 10.8.1 软件(ESRI Inc.,美国)对不同养殖池塘分布进行绘图描述。采用 SPSS Statistics 27 软件(SPSS Inc.,美国)中的 Pearson 分析法检验环境因子与各池塘水-气界面温室气体通量的相关性。采用 SPSS Statistics 27 软件中的单因素方差分析对不同研究区域水-气界面温室气体通量进行差异性分析。采用 Canoco 5 制作水-气界面温室气体通量和环境因子冗余分析的 RDA 图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同养殖池塘养殖期水样理化性质

表 1 列出了不同养殖塘主要气象、环境因子平均值与标准差。温室气体观测期间,由于养殖塘都位于浙

北区域,气象因子并未表现出差异性。而水质参数中,由于不同养殖塘的管理模式差异,个别池塘之间 DO、TN、COD 等指标存在显著差异 ( $P<0.05$ )。乌鳢塘 DO 低于其他养殖塘,与翘嘴鲃塘 ( $P<0.01$ ) 和蟹塘 ( $P<0.05$ ) 存在显著差异;水体无机氮和 TN 浓度最高出现在乌鳢养殖塘,最低出现在蟹塘,两者间均存在显著性差异 ( $P<0.01$ );青鱼、翘嘴鲃水体 COD 的浓度高于其余养殖塘,与乌鳢塘、蟹塘存在显著差异 ( $P<0.01$ )。部分池塘 pH、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  见图 2。

表 1 不同养殖池塘气象因子及水样理化性质

Table 1 Meteorological factors and physicochemical properties of water samples in each pond

| 因素<br>Factor           | 指标<br>Index                      | 研究鱼塘 Research pond    |                           |                                 |                                  |                                |
|------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
|                        |                                  | 乌鳢<br>Channa<br>argus | 翘嘴鲃<br>Culter<br>alburnus | 青鱼<br>Mylopharyngodon<br>piceus | 大口黑鲈<br>Micropterus<br>salmoides | 中华绒螯蟹<br>Eriocheir<br>sinensis |
| 气象参数<br>Meteorological | 气温/℃                             | 23.13±9.23a           | 20.91±8.87a               | 19.49±9.13a                     | 27.30±5.41a                      | 29.72±7.19a                    |
|                        | 风速/(m/s)                         | 2.80±1.65a            | 5.01±3.29a                | 5.76±3.62a                      | 6.37±3.15a                       | 4.78±1.94a                     |
|                        | 湿度/%                             | 69.15±12.47a          | 60.88±15.56a              | 60.86±16.77a                    | 66.50±18.08a                     | 61.58±13.44a                   |
|                        | 压强/hPa                           | 1014.99±9.45a         | 1019.26±10.05a            | 1020.40±9.69a                   | 1012.34±6.08a                    | 1009.38±13.11a                 |
| 水质参数<br>Water quality  | DO/(mg/L)                        | 3.54±0.84b            | 7.69±2.65a                | 6.71±3.21ab                     | 5.63±2.41ab                      | 7.76±0.53a                     |
|                        | pH                               | 7.48±0.65a            | 7.73±0.38a                | 7.75±0.54a                      | 7.76±0.73a                       | 8.40±0.70a                     |
|                        | 水温/℃                             | 26.53±6.47a           | 19.93±8.37a               | 18.78±8.44a                     | 27.21±3.61a                      | 28.46±6.72a                    |
|                        | TP/(mg/L)                        | 1.25±0.25ab           | 0.83±0.34bc               | 1.33±2.07ab                     | 2.50±0.99ab                      | 0.71±0.56ab                    |
|                        | TN/(mg/L)                        | 10.35±0.87a           | 8.52±2.83ab               | 7.37±3.36ac                     | 6.17±2.38bc                      | 1.18±0.72d                     |
|                        | $\text{NH}_4^+\text{-N}$ /(mg/L) | 1.72±1.14a            | 0.58±0.57ab               | 1.27±1.50ab                     | 1.09±0.98ab                      | 0.06±0.005b                    |
|                        | $\text{NO}_3^-\text{-N}$ /(mg/L) | 6.88±2.29a            | 4.61±2.95ab               | 4.00±1.94ac                     | 3.11±2.72bc                      | 1.32±1.62c                     |
|                        | COD/(mg/L)                       | 27.75±5.99b           | 55.45±13.66a              | 55.00±11.65a                    | 47.57±13.28ac                    | 29.80±4.38bc                   |
|                        | $\text{NO}_2^-\text{-N}$ /(mg/L) | 0.11±0.05ab           | 0.24±0.13ab               | 0.25±0.17ab                     | 0.29±0.22a                       | 0.01±0.01b                     |

DO:溶氧 Dissolved Oxygen;pH:酸碱度/氢离子浓度指数 power of hydrogen;TP:总磷 Total Phosphorus;TN:总氮 Total Nitrogen; $\text{NH}_4^+\text{-N}$  铵态氮 Ammonium Nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ :硝酸盐氮 Nitrate Nitrogen;COD:化学需氧量 Chemical Oxygen Demand; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ :亚硝酸盐氮 Nitrite Nitrogen;不同小写字母表示不同类型水体组之间存在显著差异性 ( $P<0.05$ )

## 2.2 不同养殖塘水-气界面温室气体通量

翘嘴鲃塘水-气界面  $\text{CO}_2$  通量范围为:  $(-279.14—2661.54) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量为  $(1304.91 \pm 1026.22) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{CH}_4$  通量范围为:  $(-3.10—51.27) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(9.77 \pm 16.22) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  通量范围为:  $(0.14—5.30) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(2.20 \pm 1.61) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。青鱼塘  $\text{CO}_2$  通量范围为:  $(-1123.26—5006.13) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量为  $(1775.07 \pm 1843.45) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{CH}_4$  通量范围为:  $(1.79—123.74) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(21.57 \pm 37.72) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  通量范围为:  $(0.07—7.62) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(2.52 \pm 2.46) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。整个观测期间,青鱼塘与翘嘴鲃塘温室气体通量变化趋势相似(图 3),总体上青鱼塘温室气体通量高于翘嘴鲃塘。翘嘴鲃塘  $\text{CO}_2$  的最小通量出现在 2021 年 10 月,表现出对大气  $\text{CO}_2$  的吸收  $(-279.14 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ , 同时青鱼也表现为对  $\text{CO}_2$  的吸收。但青鱼塘最低通量出现在 2022 年 3 月,为  $-1123.16 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。两者鱼塘  $\text{CH}_4$  通量变化总体呈现先减后增的趋势,在前期 9 月、10 月开始降低,到了观测中期出现低谷(图 3)。翘嘴鲃塘最小值出现在 11 月,表现为对大气中  $\text{CH}_4$  的吸收  $(-3.10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ ;青鱼塘在整个观测期间都是  $\text{CH}_4$  的排放源,最低通量出现在 2 月  $(1.79 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ 。在整个研究周期中,青鱼塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量总体上是先增后减的状态,峰值出现 2 月  $(7.62 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ 。翘嘴鲃塘  $\text{N}_2\text{O}$  的最高通量也出现在二月  $(5.30 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ , 但是在一月骤降,因此没有出现同青鱼塘相似的规律(图 3)。

观测期间,乌鳢塘与蟹塘温室气体的变化趋势相似。 $\text{CO}_2$  与  $\text{CH}_4$  的通量都呈现有规律的先增后减的单峰,在 8 月出现峰值(图 3)。乌鳢塘水-气界面  $\text{CO}_2$  通量范围为:  $(5968.67—10103.30) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量

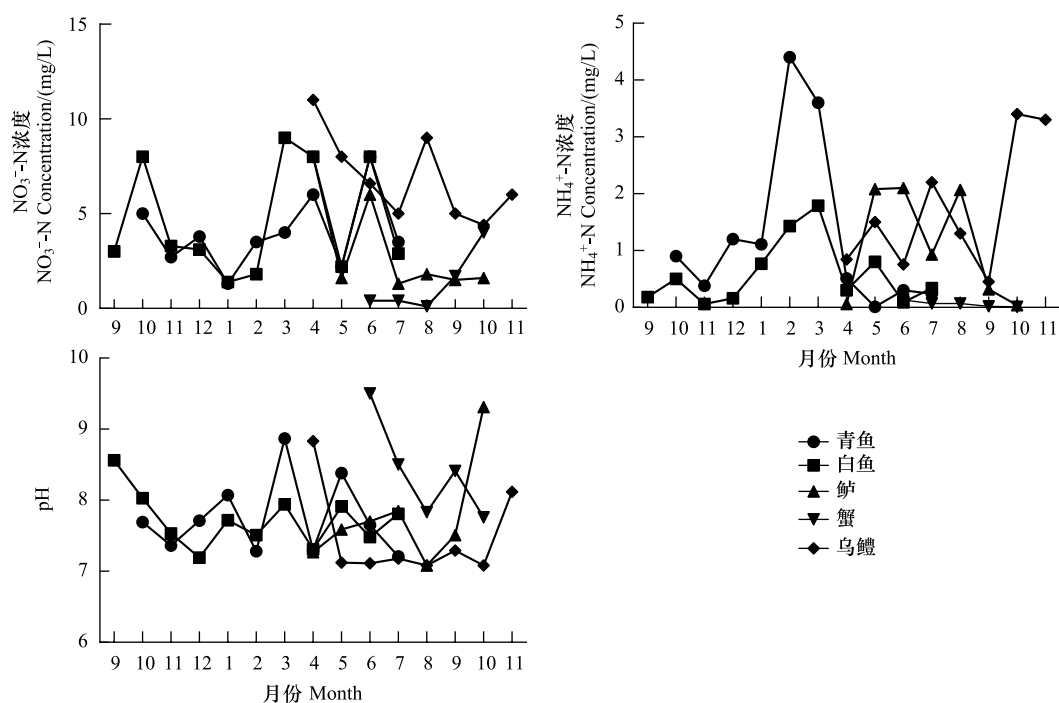


图2 池塘水体硝酸盐氮、铵态氮和 pH 值月变化趋势

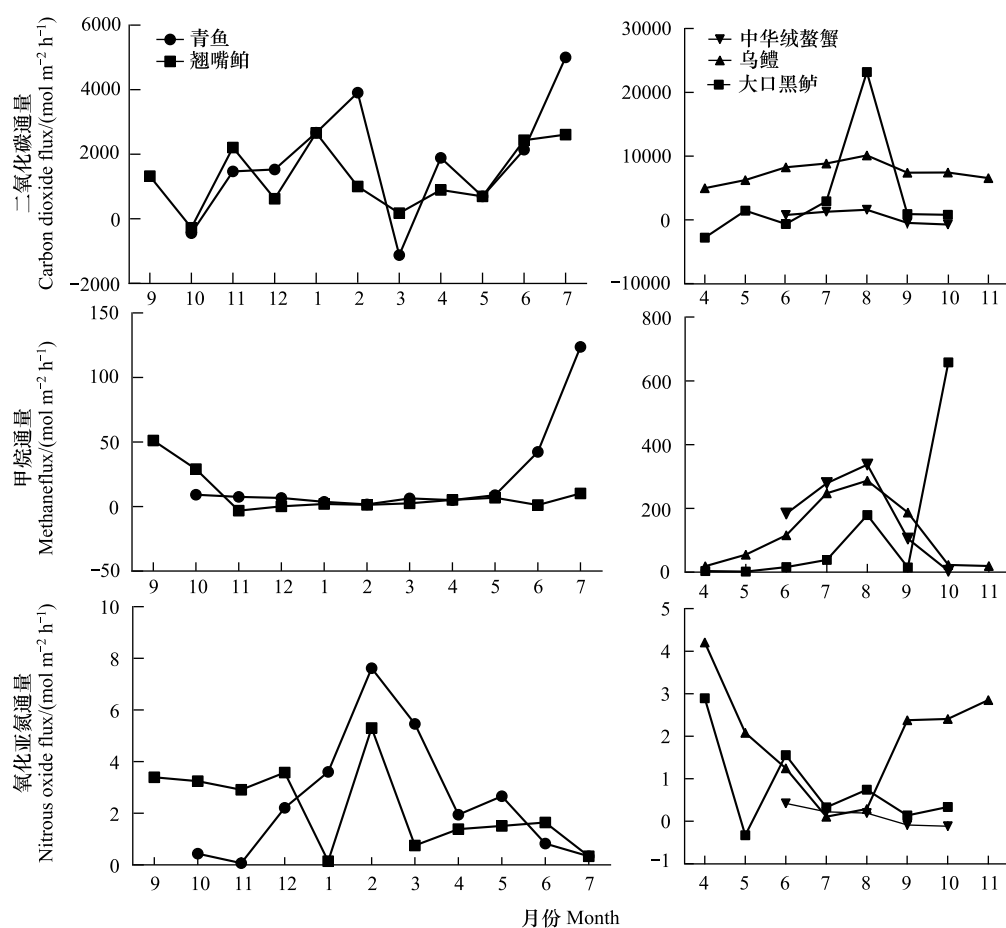
Fig.2 Monthly variation trends of  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N and pH value in ponds

图3 各个养殖池塘温室气体排放通量月变化

Fig.3 Monthly variation of GHGs emission fluxes in each pond

为  $(7473.85 \pm 1606.48) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{CH}_4$  通量范围为:  $(18.63—287.25) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(119.26 \pm 108.67) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; 蟹塘水-气界面  $\text{CO}_2$  通量范围为:  $(-728.76—1591.88) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量为  $(484.92 \pm 1042.49) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;  $\text{CH}_4$  通量范围为:  $(4.25—337.57) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(182.13 \pm 133.34) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。  $\text{N}_2\text{O}$  的通量规律相反, 乌鳢塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量范围为:  $(0.11—4.21) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(1.95 \pm 1.36) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。乌鳢塘在 7 月出现最低值, 呈现出先减后增的低谷形态; 而蟹塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量范围为:  $(-0.11—4.21) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 平均通量  $(0.13 \pm 0.23) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。在观测期间  $\text{N}_2\text{O}$  通量递减, 到 9 月、10 月表现为对大气中  $\text{N}_2\text{O}$  的吸收(图 3)。

大口黑鲈养殖塘温室气体的平均通量分别为  $\text{CO}_2$ :  $(3690.04 \pm 8777.86) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $\text{CH}_4$ :  $(130.36 \pm 240.95) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ :  $(0.81 \pm 1.09) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ; 通量范围分别为  $\text{CO}_2$ :  $(-2774.47—23182.38) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $\text{CH}_4$ :  $(1.90—658.11) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ :  $(-0.33—2.89) \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。其变化规律与乌鳢塘相似,  $\text{CO}_2$  通量最高峰值出现在 8 月, 为  $23182.38 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ 。但  $\text{CH}_4$  通量的最大值出现在了 10 月  $(658.11 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ ;  $\text{N}_2\text{O}$  的通量大体上是逐步降低的趋势, 但是最低通量出现在了 5 月, 表现出对大气  $\text{CH}_4$  的吸收  $(-0.33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1})$ 。

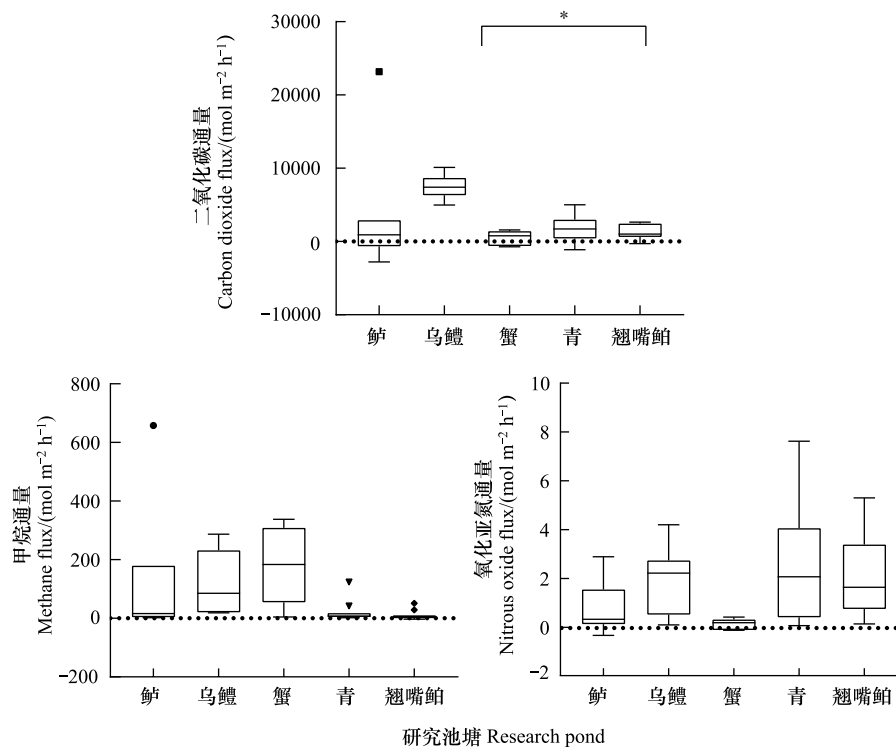


图 4 各个养殖塘温室气体排放通量

Fig.4 Greenhouse gas emission fluxes in each pond

## 2.3 养殖塘温室气体的增温潜势与产量排放系数

### 2.3.1 养殖池塘增温潜势

淡水养殖池塘对温室气体排放吸收是内陆碳、氮循环的重要途径。本次实验中不同养殖塘总体表现为对 3 种温室气体的排放。由于  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  温室效应各不相同, 需要计算增温潜势对各池塘的综合效应进行评价。因此通过公式(2) 计算得到增温潜势(表 2)。黑鱼养殖塘的增温潜势最高  $(412.43 \pm 107.29) \text{CO}_2\text{-eq mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ , 显著高于翘嘴鲈塘 ( $P < 0.05$ ), 整体上, 各池塘增温潜势呈现: 乌鳢 > 大口黑鲈 > 青鱼 > 中华绒螯蟹 > 翘嘴鲈 > 的趋势。

### 2.3.2 养殖池塘单位产量排放系数

结合各个池塘的增温潜势与产量,计算不同养殖塘在周期内单位面积每产出 1 kg 的水产品时产生增温效应的产量排放系数(表 2)。单位面积每产出 1 kg 水产品,中华绒螯蟹养殖塘造成的温室效应最高( $2824.02 \pm 2803.24$ )  $\text{CO}_2\text{-eq g kg}^{-1}$ ,且显著高于其余养殖塘( $P < 0.05$ )。

表 2 各个养殖池塘增温潜势(GWP)与产量排放系数

Table 2 Warming potential (GWP) and yield emission coefficient in each pond

| 参考系数<br>Reference coefficient                                         | 研究池塘 Research pond          |                             |                              |                               |                               |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                                                                       | 乌鳢<br>Channa argus          | 翘嘴鲇<br>Culter alburnus      | 青鱼<br>Mylopharyngodon piceus | 大口黑鲈<br>Micropterus salmoides | 中华绒螯蟹<br>Eriocheir sinensis   |
| 增温潜势 $\text{CO}_2\text{-eq/}$<br>( $\text{mg m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) | $412.43 \pm 107.29\text{a}$ | $87.89 \pm 41.18\text{b}$   | $118.29 \pm 96.20\text{ab}$  | $238.47 \pm 415.40\text{ab}$  | $116.06 \pm 115.2\text{ab}$   |
| 产量排放系数/<br>( $\text{CO}_2\text{-eq g kg}^{-1}$ )                      | $226.37 \pm 58.89\text{b}$  | $294.07 \pm 137.77\text{b}$ | $411.21 \pm 344.40\text{b}$  | $465.10 \pm 840.20\text{b}$   | $2824.02 \pm 2803.24\text{a}$ |

$\text{CO}_2\text{-eq}$ : 二氧化碳当量 Carbon dioxide equivalent; 不同小写字母表示不同类型水体组之间存在显著差异性 ( $P < 0.05$ )

### 2.4 环境因子与池塘温室气体通量的相关性

相关性分析结果表明,乌鳢养殖塘  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  都与气温 ( $P < 0.01$ )、水温 ( $P < 0.05$ ) 存在显著相关性。水温和气温是影响养殖塘温室气体通量的重要因素。除翘嘴鲇塘外,其余养殖塘的温室气体排放几乎都受到温度的影响(表 3)。乌鳢养殖塘  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  都与气温 ( $P < 0.01$ )、水温 ( $P < 0.05$ ) 存在显著相关性。青鱼塘  $\text{CH}_4$  通量与气温呈正相关,  $\text{N}_2\text{O}$  通量与水温呈负相关 ( $P < 0.05$ ); 鲈鱼养殖塘的  $\text{CO}_2$  通量与气温呈正相关 ( $P < 0.05$ )。

表 3 各个养殖池塘温室气体通量与环境因子的 Pearson 相关性分析

Table 3 Pearson's Correlation analysis between GHGs fluxes and environmental factors in each pond

| 研究池塘<br>Research pond | 温室气体<br>GHGs         | 气温<br>Air<br>temperature | 水温<br>Water<br>temperature | 酸碱度<br>pH | 湿度<br>Humidity | 气压<br>Pressure | 风速<br>Wind<br>speed | 溶氧<br>DO  | 总磷<br>TP | 硝酸盐氮<br>$\text{NO}_3\text{-N}$ | 亚硝酸盐氮<br>$\text{NO}_2\text{-N}$ | 铵态氮<br>$\text{NH}_4\text{-N}$ |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------------------------|-----------|----------------|----------------|---------------------|-----------|----------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 乌鳢                    | $\text{CO}_2$        | 0.877 **                 | 0.823 *                    | -0.719 *  | -0.118         | -0.909 **      | 0.012               | -0.071    | -0.506   | -0.306                         | -0.226                          | -0.010                        |
| Channa argus          | $\text{CH}_4$        | 0.896 **                 | 0.878 *                    | -0.518    | -0.177         | -0.950 **      | -0.086              | -0.249    | -0.709 * | -0.098                         | 0.125                           | -0.357                        |
|                       | $\text{N}_2\text{O}$ | 0.870 **                 | 0.907 **                   | 0.776 *   | 0.224          | 0.883 **       | -0.199              | 0.043     | 0.545    | 0.314                          | 0.355                           | 0.013                         |
| 翘嘴鲇                   | $\text{CO}_2$        | 0.086                    | 0.014                      | -0.146    | 0.418          | 0.027          | 0.218               | 0.807 *** | 0.436    | -0.407                         | -0.357                          | -0.395                        |
| Culter alburnus       | $\text{CH}_4$        | 0.464                    | 0.527                      | 0.831 **  | -0.212         | -0.057         | -0.0486             | -0.096    | -0.604   | 0.019                          | 0.071                           | -0.215                        |
|                       | $\text{N}_2\text{O}$ | -0.301                   | -0.439                     | -0.055    | 0.465          | 0.140          | -0.332              | -0.474    | 0.174    | -0.204                         | 0.644 *                         | -0.024                        |
| 青鱼                    | $\text{CO}_2$        | 0.026                    | 0.061                      | -0.692 *  | 0.682 *        | 0.036          | -0.291              | -0.358    | -0.419   | -0.101                         | 0.150                           | -0.061                        |
| Mylopharyngodon       | $\text{CH}_4$        | 0.684 *                  | 0.627                      | 0.481     | -0.356         | -0.562         | -0.439              | -0.477    | -0.123   | 0.020                          | 0.650 *                         | -0.292                        |
| piceus                | $\text{N}_2\text{O}$ | -0.571                   | -0.635 *                   | 0.337     | -0.064         | 0.442          | 0.467               | 0.799 **  | -0.345   | -0.266                         | -0.577                          | 0.896 **                      |
| 大口黑鲈                  | $\text{CO}_2$        | 0.762 *                  | 0.792                      | -0.346    | 0.271          | -0.754         | 0.760 *             | -0.136    | 0.477    | -0.391                         | 0.630                           | 0.475                         |
| Micropterus           | $\text{CH}_4$        | 0.056                    | -0.073                     | 0.848 *   | 0.073          | 0.253          | -0.390              | 0.686     | 0.460    | -0.322                         | -0.338                          | -0.364                        |
| salmoides             | $\text{N}_2\text{O}$ | -0.678                   | -0.511                     | -0.300    | -0.300         | 0.458          | -0.202              | 0.345     | 0.009    | 0.947 **                       | -0.249                          | -0.233                        |
| 中华绒螯蟹                 | $\text{CO}_2$        | 0.871 *                  | 0.916 *                    | 0.184     | 0.306          | -0.743         | -0.718              | -0.631    | -0.639   | -0.883 *                       | -0.849                          | 0.695                         |
| Eriocheir sinensis    | $\text{CH}_4$        | 0.941 *                  | 0.968 **                   | 0.097     | 0.482          | -0.696         | -0.763              | -0.730    | -0.747   | -0.949 *                       | -0.949 *                        | 0.572                         |
|                       | $\text{N}_2\text{O}$ | 0.660                    | 0.692                      | 0.710     | 0.203          | -0.928 *       | -0.744              | -0.565    | -0.560   | -0.503                         | -0.503                          | 0.989 **                      |

$\text{CO}_2$ : 二氧化碳 Carbon dioxide;  $\text{CH}_4$ : 甲烷 Methane;  $\text{N}_2\text{O}$ : 氧化亚氮 Nitrous oxide; \* 表示  $P < 0.005$ ; \*\* 表示  $P < 0.01$ ; \*\*\* 表示  $P < 0.001$

pH 也是影响池塘温室气体排放通量的重要因素。除了中华绒螯蟹塘外,其余养殖塘都存在温室气体的通量与 pH 显著相关性;乌鳢塘、青鱼塘  $\text{CO}_2$  排放通量与 pH 呈负相关;同时翘嘴鲇塘和鲈鱼塘  $\text{CH}_4$  的排放与 pH 呈正相关。乌鳢塘、青鱼塘的  $\text{CO}_2$  排放通量与 pH 呈负相关 ( $P < 0.05$ );同时 pH 还分别与乌鳢塘、翘嘴鲇塘的  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CH}_4$  呈正相关 ( $P < 0.05$ )。结合线性回归分析(表 4),温度(水温、气温)、pH 是影响本次实验池塘养殖

系统的重要因子。RDA 冗余分析也显示 pH 对实验池塘温室气体排放的解释率最高达到 30%; 气温、水温能解释 16.7% 和 27.4% 的池塘温室气体排放通量变化 (图 5)。相关性分析与线性回归分析都显示压强对乌鳢塘、鲈鱼养殖塘的温室气体排放通量存在影响 (表 3), 冗余分析表明压强能解释本研究的所有池塘中 21.9% 温室气体通量变化。

除此之外, DO、无机氮 ( $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N) 等也是影响池塘温室气体排放的因素 (表 3)。DO 对翘嘴塘  $\text{CO}_2$  通量、青鱼塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量变化呈正相关 ( $P < 0.05$ )。除乌鳢塘外, 无机氮影响着实验养殖塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量, 并呈正相关。青鱼塘与中华绒螯蟹塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放均与  $\text{NH}_4^+$ -N 呈正相关, 线性回归方程 (表 4-4) 中  $\text{NH}_4^+$ -N 也是重要的回归变量; 翘嘴塘、大口黑鲈塘的  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量也分别与  $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 呈正相关。

表 4 各个养殖塘温室气体通量与环境因子之间的回归方程

Table 4 Regression equations between greenhouse fluxes and environmental factors in each pond

| 研究池塘<br>Research pond             | 温室气体<br>Greenhouse gases | 回归方程<br>The regression equation                                                                                           |
|-----------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 乌鳢 <i>Channa argus</i>            | $\text{CO}_2$            | $Y = 164331.179 - 154.541X_{\text{压强}}$                                                                                   |
|                                   | $\text{CH}_4$            | $Y = 3755.472 - 13.871X_{\text{压强}} + 59.229X_{\text{pH}}$                                                                |
|                                   | $\text{N}_2\text{O}$     | $Y = 8.677 - 0.223X_{\text{水温}} - 0.474X_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$                                                        |
| 翘嘴鲈 <i>Culter alburnus</i>        | $\text{CO}_2$            | $Y = -1099.35 + 312.463X_{\text{DO}}$                                                                                     |
|                                   | $\text{CH}_4$            | $Y = -261.086 + 35.056X_{\text{pH}}$                                                                                      |
|                                   | $\text{N}_2\text{O}$     | $Y = 0.431 + 0.296X_{\text{TN}} - 0.49X_{\text{COD}} + 8.049X_{\text{NO}_2^--\text{N}}$                                   |
| 青鱼 <i>Mylopharyngodon piceus</i>  | $\text{CO}_2$            | $Y = 20047.876 - 2357.173X_{\text{pH}}$                                                                                   |
|                                   | $\text{CH}_4$            | $Y = 5811.892 - 5.684X_{\text{压强}} + 12.616X_{\text{TP}} + 17.143X_{\text{pH}} + 6.690X_{\text{DO}}$                      |
|                                   | $\text{N}_2\text{O}$     | $Y = 139.72 - 4.984X_{\text{pH}} - 1.083X_{\text{DO}} + 1.41X_{\text{NH}_4^+-\text{N}} - 4.902X_{\text{NO}_2^--\text{N}}$ |
| 大口黑鲈 <i>Micropterus salmoides</i> | $\text{CO}_2$            | $Y = -367431.431 + 1235.219X_{\text{气温}}$                                                                                 |
|                                   | $\text{CH}_4$            | $Y = -2036.695 + 279.311X_{\text{pH}}$                                                                                    |
|                                   | $\text{N}_2\text{O}$     | $Y = -0.371 + 0.379X_{\text{NO}_3^--\text{N}}$                                                                            |
| 中华绒螯蟹 <i>Eriocheir sinensis</i>   | $\text{CO}_2$            | $Y = -1845.013 - 56.102X_{\text{水温}} + 202.985X_{\text{气温}} - 0.246X_{\text{压强}}$                                         |
|                                   | $\text{CH}_4$            | $Y = -1006.790 + 31.65X_{\text{水温}} + 210.278X_{\text{TP}} + 2.255X_{\text{温度}}$                                          |
|                                   | $\text{N}_2\text{O}$     | $Y = -0.153 + 4.663X_{\text{NH}_4^+-\text{N}}$                                                                            |

COD: 化学需氧量 Chemical oxygen demand

### 3 讨论

#### 3.1 养殖塘温室气体排放通量的时间差异

##### 3.1.1 各个养殖塘 $\text{CO}_2$ 通量时间差异

5 种养殖塘在观测期间总体上都表现为温室气体的排放源, 且在不同的月份存在一定的排放差异。相关分析证实了实验中的大部分养殖塘  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  通量与气温和水温存在显著正相关, 在温度高的季节排放特征更为明显 (图 3)。一方面温度是影响  $\text{CO}_2$  产生的重要因素。在养殖的中后期, 特别是 7、8 月温度达到采样周期内最高。随着各个养殖品种生长达到旺盛期, 大量饵料投入使得夏季沉积物累计<sup>[14]</sup>。高温促使养殖塘底部沉积的饵料、生物残骸分解矿化, 加快了  $\text{CO}_2$  的产生速率<sup>[7, 15]</sup>。另一方面, 高温能促进养殖鱼类活动, 之前的研究证明鱼蟹的呼吸代谢等生理活动对  $\text{CO}_2$  的产生也有正向促进<sup>[16]</sup>。本次研究中, 乌鳢塘和鲈鱼养殖塘  $\text{CO}_2$  通量与压强呈负相关, 这与之前 Yang 等 (2020) 的研究结果一致<sup>[17]</sup>。一些研究表明压强越高, 温室气体越容易从大气进入水体<sup>[18]</sup>。大气压随温度升高而降低, 这也是导致两个养殖塘  $\text{CO}_2$  通量存在时间差异的另一重要原因。pH 值增加可能促进游离态  $\text{CO}_2$ 、 $\text{HCO}_3^-$  等转化为  $\text{CO}_3^{2-}$ , 降低水中  $\text{CO}_2$  浓度<sup>[19-20]</sup>。养殖过程中 pH 值受鱼类代谢、饵料投入等诸多影响造成一定波动, 但是与养殖塘  $\text{CO}_2$  变化趋势相似 (图 2), 尤其在乌鳢塘、青鱼塘、鲈鱼养殖塘中  $\text{CO}_2$  的时间变化规律主要受 pH 值影响。

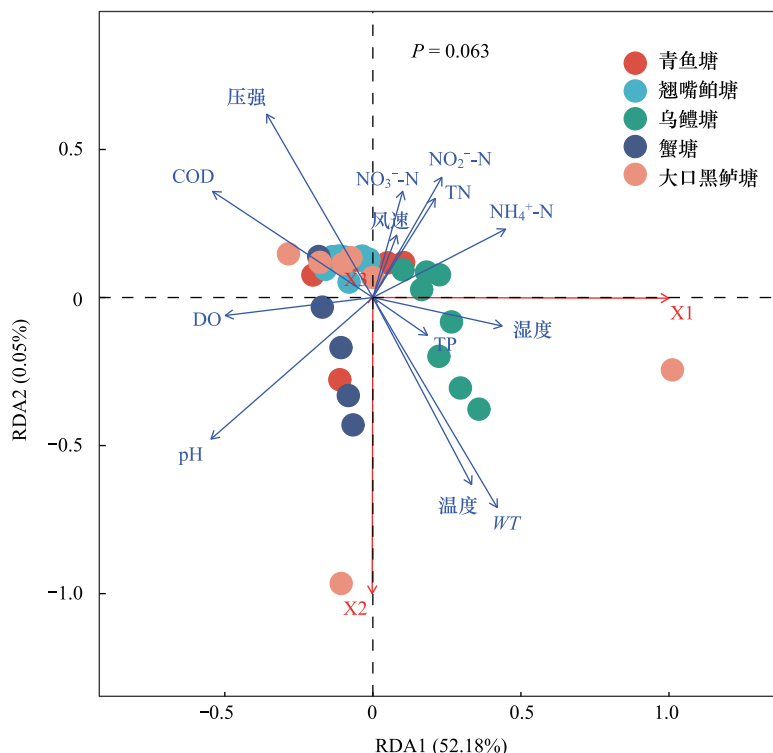


图 5 各个养殖塘环境因子与温室气体通量的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis of environmental factors and greenhouse gas fluxes in each breeding pond

X1: 二氧化碳通量 X2: 甲烷通量 X3: 氧化亚氮通量; ABCDE 分别代表青鱼塘、翘嘴鲮塘、乌鳢塘、蟹塘、大口黑鲈塘

### 3.1.2 养殖塘 $\text{CH}_4$ 通量时间差异

$\text{CH}_4$  的产生、运输等同样受温度的影响<sup>[21]</sup>。高温月份, 沉积物中产  $\text{CH}_4$  作用被强化<sup>[22]</sup>; 池塘气泡传输受到影响加速  $\text{CH}_4$  从水中逃逸<sup>[9]</sup>, 同时提高浮游植物光合作用效率, 增加水中的 DO 浓度<sup>[23]</sup>, 增强  $\text{CH}_4$  传输过程中的氧化。相关性分析显示(表 3), 本研究中的各个池塘  $\text{CH}_4$  排放都与温度(气温、水温)相关, 尤其在乌鳢、青鱼和中华绒螯蟹塘中有显著正相关( $P < 0.05$ ), 因此几类养殖塘随着温度变化  $\text{CH}_4$  排放通量在时间上存在差异。影响产  $\text{CH}_4$  作用的另一项重要因素是 pH 值。结合相关性分析、线性回归方程和冗余分析, 本次研究养殖池塘  $\text{CH}_4$  排放通量也受 pH 影响, 且在大口黑鲈和翘嘴鲮养殖塘中  $\text{CH}_4$  的变化趋势受池塘水质 pH 值变化调控, 两者呈显著正相关( $P < 0.05$ )。之前的研究发现产  $\text{CH}_4$  菌容易受到 pH 值的影响, 在大于 6.1 时对产  $\text{CH}_4$  作用有促进作用<sup>[18]</sup>。本研究的五个品种养殖塘在养殖过程中 pH 都稳定在 7—9 的弱碱区间, 为产  $\text{CH}_4$  菌工作提供了良好的环境。

### 3.1.3 养殖塘 $\text{N}_2\text{O}$ 通量时间差异

各个池塘的  $\text{N}_2\text{O}$  通量时间变化规律相似(图 3), 这种变化是多种因素共同作用的结果。水体中无机氮的浓度在多个养殖塘都表现出与  $\text{N}_2\text{O}$  排放的正相关性(表 3)。池塘中氮源输入同样也是依赖于饵料, 在高温、饲料利用程度高的月份, 水体中无机氮浓度会稍有降低(图 2)。水体的无机氮( $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N)是反硝化反应与硝化反应的重要原料和中间产物<sup>[24]</sup>。硝化反应与反硝化反应基质减少, 便会造成  $\text{N}_2\text{O}$  通量存在时间上的差异(图 3)。例如青鱼塘和翘嘴鲮塘在 2 月是出现了  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度陡增的现象, 导致该月  $\text{N}_2\text{O}$  排放量也出现增加的趋势(图 2)。相比  $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  两种温室气体, 温度对本实验的几类鱼塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量的影响程度更小, 但同样在青鱼塘与  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量呈负相关, 与乌鳢塘  $\text{N}_2\text{O}$  通量呈正相关。之前也有研究分析证实温度对  $\text{N}_2\text{O}$  的影响存在两种情况<sup>[25]</sup>。一些研究认为温度对  $\text{N}_2\text{O}$  的排放起促进作用<sup>[26]</sup>; 另一些研究认为温度

对于  $\text{N}_2\text{O}$  的产生起积极作用<sup>[27-28]</sup>; 这取决于温度对  $\text{N}_2\text{O}$  产生过程的影响程度; 当温度达到 25—30 °C 时, 对硝化与反硝化反应的进程起促进作用; 温度高于 30 °C 或者低于 10 °C 时, 便会抑制硝化细菌、反硝化细菌<sup>[29]</sup>。例如本研究在 8 月份时, 大多数养殖池塘  $\text{N}_2\text{O}$  处于较低水平。而乌鳢养殖池塘研究周期是 4—10 月; 青鱼的研究周期是 10 月到次年 7 月份, 在气温变化上呈现相反的趋势, 所以导致温度在两种池塘中与  $\text{N}_2\text{O}$  呈现出完全相反的相关性。

### 3.2 不同养殖塘温室气体排放通量差异

尽管所有养殖塘都处于同一经纬度和同一气候类型, 但养殖管理、饵料投喂以及不同养殖品种生长习性的差异, 导致温室气体排放通量出现差异(图 3)。本次观测研究的 5 种养殖塘  $\text{CO}_2$  平均通量表现为: 乌鳢养殖塘>大口黑鲈养殖塘>青鱼养殖塘>翘嘴鲌养殖塘>中华绒螯蟹养殖塘, 并且乌鳢塘  $\text{CO}_2$  平均通量显著高于翘嘴鲌塘(图 4)。造成乌鳢塘高  $\text{CO}_2$  通量其显著高于其他养殖塘的水体营养化程度密不可分(表 1), 而中华绒螯蟹养殖塘水草覆盖率达 60%, 之前的研究表明水生植物覆盖能显著减少养殖塘  $\text{CO}_2$  的排放, 在夏季高温季节尤其显著<sup>[7]</sup>, 这使得蟹塘  $\text{CO}_2$  通量远低于其他养殖塘。 $\text{CH}_4$  平均通量从小到大依次为: 中华绒螯蟹养殖塘>大口黑鲈养殖塘>乌鳢养殖塘>青鱼养殖塘>翘嘴鲌养殖塘(图 4)。 $\text{CH}_4$  不仅需要在无氧或者缺氧条件下产生, 也容易被氧化生成  $\text{CO}_2$ <sup>[30]</sup>。螃蟹塘水草的大面积种植, 水生态环境得到充分改善, 温室气体产生与排放的过程也会受到影响。之前的研究发现, 水生植物覆盖的中华绒螯蟹养殖塘年  $\text{CH}_4$  排放通量会高出 14%<sup>[31]</sup>。相对于其他品种的养殖池塘, 水生植物的光合作用与根系呼吸作用会消耗一部分  $\text{DO}$ , 这样有利于  $\text{CH}_4$  在池塘中的产生、运输和排放<sup>[26]</sup>, 本研究也证实了种植的水生植物的作用会增加蟹塘的  $\text{CH}_4$  通量。另外, 蟹塘的研究周期处于夏秋高温月份, 产  $\text{CH}_4$  作用得到促进, 使得蟹塘  $\text{CH}_4$  通量水平得到进一步增强。而翘嘴鲌与青鱼研究周期涵盖了多个低温月份, 受温度对微生物产  $\text{CH}_4$  作用的制约, 值得两者  $\text{CH}_4$  平均通量略低于其他品种养殖池塘。 $\text{N}_2\text{O}$  平均浓度: 青鱼养殖塘>翘嘴鲌养殖塘>乌鳢养殖塘>大口黑鲈养殖塘>中华绒螯蟹养殖塘(图 4)。结合相关性分析与池塘  $\text{N}_2\text{O}$  的产生来源<sup>[29]</sup>, 本研究中肉食性鱼类养殖池塘水体富营养化程度普遍高于其他品种池塘(表 1), 尤其是无机氮平均浓度存在显出差异( $P<0.05$ )。由于中华绒螯蟹养殖塘中水生植物的种植能吸收及时水体中富集的无机氮, 降低  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NH}_4^+$ -N 浓度(图 2), 使得蟹塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量远低于其他品种的养殖池塘<sup>[32]</sup>。翘嘴鲌、大口黑鲈养殖塘的  $\text{NO}_3^-$ -N 浓度虽然不存在显著差异, 但是翘嘴鲌塘拥有更高的  $\text{N}_2\text{O}$  通量。

### 3.3 浙北养殖池塘与其余水域温室气体排放差异

本次研究的几类鱼塘  $\text{CO}_2$  排放通量处于较高水平, 5 个实验组最低平均  $\text{CO}_2$  通量出现在蟹塘(( $484.92 \pm 1042.29$ )  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ )(表 6), 也明显高于江汉平原的混养塘<sup>[31]</sup>和江苏高淳的蟹塘<sup>[37]</sup>, 特别是排放通量最高的乌鳢塘, 高于位于湖北武汉混养塘近千倍; 之前有研究发现海水养殖池塘  $\text{CO}_2$  的通量低于内陆淡水湖泊<sup>[33]</sup>, 而本研究结果显示, 除了部分肉食性鱼类养殖塘(乌鳢塘与鲈鱼塘)  $\text{CO}_2$  排放通量较高外, 其余养殖塘平均  $\text{CO}_2$  通量低于海水养殖模式下的南美白对虾养殖塘<sup>[34-35]</sup>。本研究中所有养殖池塘  $\text{CH}_4$  排放处于正常水平, 介于湖北混养池塘和江苏兴化的混养中华绒螯蟹养殖塘<sup>[7,36]</sup>与苏州、高淳的单养蟹塘之间<sup>[6,37]</sup>。造成这一结果的原因是兴化的蟹塘套养的鱼类对水体尤其是底泥的搅动, 减少无氧条件下  $\text{CH}_4$  的产生和氧化。鲢鳙等滤食性鱼类的混养也能降低水体富营养化程度, 对于净化水质和碳的减排具有重要作用<sup>[38]</sup>; 同时我们的结果也证实了之前研究对于水草覆盖会增加中华绒螯蟹养殖塘  $\text{CH}_4$  通量的结论<sup>[7]</sup>。本研究中的四个养殖鱼塘  $\text{N}_2\text{O}$  的排放水平与其它淡水养殖池塘或者福建、天津等地的海水养殖的虾塘相比都是处于较高水平<sup>[39]</sup>, 与北方地区的鲤鱼养殖塘  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量相当。而无论是本研究的中华绒螯蟹塘或者江苏苏州的单养蟹塘, 由于水生植物对水体无机氮的利用造成蟹塘的  $\text{N}_2\text{O}$  排放水平都较低。

## 4 结论

(1) 各个养殖鱼塘存在时间上的变化差异。总体上呈现与季节动态相关的, 在高温月份各养殖塘  $\text{CO}_2$  通

量高于其余月份。 $\text{CH}_4$ 排放规律  $\text{CO}_2$ 相似,但鲈鱼养殖塘最高通量出现在了10月。 $\text{N}_2\text{O}$ 的排放在高温月份通量低于其余月份;青鱼、翘嘴鲌最高通量出现在了2月,大口黑鲈、乌鳢塘最高通量出现在4月,中华绒螯蟹  $\text{N}_2\text{O}$  通量随温度升高递减。

表6 水产养殖池塘水-气界面温室气体排放通量比较

Table 6 Comparison of greenhouse gas fluxes ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) across water-atmosphere interface in aquaculture ponds

| 水域类型<br>Type | 研究地点<br>Site | 养殖品种<br>Variety | 温室气体通量 Flux of greenhouse gases                               |                                                               |                                                                    | 参考文献<br>References |
|--------------|--------------|-----------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------|
|              |              |                 | $\text{CO}_2$ 通量/<br>( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) | $\text{CH}_4$ 通量/<br>( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) | $\text{N}_2\text{O}$ 通量/<br>( $\text{nmol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) |                    |
| 淡水养殖         | 浙江湖州         | 翘嘴鲌             | -279.14—2661.54<br>(1304.91±1026.22)                          | -3.10—51.27<br>(9.77±16.22)                                   | 144.14—5303.16<br>(2201.48±1605.29)                                |                    |
| Freshwater   | 浙江湖州         | 青鱼              | -1123.26—5006.13<br>(1775.07±1843.46)                         | 1.79—123.74<br>(21.57±37.72)                                  | 72.69—7621.83<br>(2518.64±2455.65)                                 |                    |
| aquaculture  | 浙江湖州         | 乌鳢              | 4968.67—10103.30<br>(7473.85±1606.48)                         | 18.63—287.25<br>(119.26±108.67)                               | 109.09—4207.95<br>(1945.70±1360.48)                                |                    |
|              | 浙江湖州         | 中华绒螯蟹           | -728.76—1591.88<br>(484.92±1042.29)                           | 4.25—337.57<br>(182.13±133.35)                                | -115.68±421.82<br>(126.86±226.07)                                  |                    |
|              | 浙江湖州         | 大口黑鲈            | -2774.74—23182.38<br>(3690.04±8777.86)                        | 1.90—658.11<br>(130.36±240.95)                                | -329.98—2891.36<br>(808.82±1088.25)                                |                    |
|              | 湖北武汉         | 三角鲂;鳊;鳙         | 21.19                                                         | 0.026                                                         | 2.81                                                               | [31]               |
|              | 江苏高淳         | 中华绒螯蟹           | -1132.73—3621.36                                              | 6.06—526.88                                                   |                                                                    | [37]               |
|              | 山东济南         | 鲤               |                                                               |                                                               | 2054.55                                                            | [26]               |
|              | 江苏兴化         | 中华绒螯蟹(混养)       |                                                               | 30.0                                                          | 1050.0                                                             | [8]                |
|              | 江苏兴化         | 中华绒螯蟹(混养)       |                                                               | 42.5—103.13                                                   |                                                                    | [36]               |
|              | 江苏苏州         | 中华绒螯蟹           |                                                               | 563.75                                                        | 33.41                                                              | [38]               |
|              |              |                 |                                                               | 893.75                                                        | 85.91                                                              |                    |
|              |              |                 |                                                               | 591.25                                                        | 50.23                                                              |                    |
| 海水养殖         | 福建福州         | 凡纳滨对虾           | -1452.95±147.5—<br>1877.27±230<br>(397.05±285.68)             | 345.63±27.5—<br>11836.25±2211.25<br>(5375.63±1190.63)         |                                                                    | [34]               |
| Marine       |              | 凡纳滨对虾           | -219.77±248.86—<br>1310.91±77.05<br>(350±432.73)              | 158.75±102.5—<br>1471.25±961.25<br>(602.5±333.75)             |                                                                    |                    |
| aquaculture  | 福建福州         | 凡纳滨对虾           | 136.36—4545.45<br>(2795.45±1090.91)                           |                                                               | 250—590.91<br>(386.36±68.18)                                       | [35]               |
|              | 天津           | 凡纳滨对虾           | 127±5.2—<br>332.9±2.6                                         | 1.5±0.1—<br>5.5±0.4                                           | 155.5±1.1—<br>315.4±0.6                                            | [39]               |
|              |              | 凡纳滨对虾           | 15.7±10—<br>119.8±18.6                                        | 2.2±0.1—<br>9.2±0.8                                           | 162.7±0.4—<br>365.6±1.1                                            |                    |

(2) 各个养殖塘之间存在温室气体排放通量的差异。 $\text{CO}_2$ 通量以肉食性物种为导向, $\text{CO}_2$ 平均通量表现为:乌鳢>大口黑鲈>青鱼>翘嘴鲌>中华绒螯蟹; $\text{CH}_4$ 平均通量从小到大依次为:中华绒螯蟹>大口黑鲈>乌鳢>青鱼>翘嘴鲌; $\text{N}_2\text{O}$ 平均浓度:青鱼>翘嘴鲌>乌鳢>大口黑鲈>中华绒螯蟹。

(3) 5种养殖品种池塘中,乌鳢塘增温潜势最高,总体上呈现出乌鳢>大口黑鲈>青鱼>中华绒螯蟹>翘嘴鲌;同时乌鳢塘亩产最高,蟹塘产量最低,使得单位面积上每产出1 kg水产品,中华绒螯蟹塘对大气温室效应影响更大。

(4) 水温、气温是影响池塘温室气体排放的重要因素; 此外压强、pH 与乌鳢、鲈鱼养殖过程中温室气体通量存在相关性;  $\text{N}_2\text{O}$  的通量更多的受到无机氮的调控。

#### 参考文献 (References):

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴-农业出版社, 2024: 17.
- [2] FAO. 2024. The State of World Fisheries and Aquaculture 2024. Towards Blue Transformation. Rome, FAO.
- [3] 贾冰婵. 河蟹池塘养殖底泥污染特征与底质改良模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023.
- [4] 齐凌艳, 张帅, 熊爱玲, 黄佳聪, 贾蔡, 支俊俊, 吴凤文. 长江流域养殖池塘氮磷污染负荷估算. 环境科学学报, 2022, 42(12): 156-170.
- [5] Neubauer S C, Magonigal J P. Moving beyond global warming potentials to quantify the climatic role of ecosystems. Ecosystems, 2015, 18(6): 1000-1013.
- [6] 林海, 周刚, 李旭光, 周军, 张彤晴, 王桂民. 夏季池塘养殖中华绒螯蟹生态系统温室气体排放及综合增温潜势. 水产学报, 2013, 37(3): 417-424.
- [7] Liu S W, Hu Z Q, Wu S, Li S Q, Li Z F, Zou J W. Methane and nitrous oxide emissions reduced following conversion of rice paddies to inland crab-fish aquaculture in southeast China. Environmental Science & Technology, 2016, 50(2): 633-642.
- [8] 马煜春, 孙丽英, 刘翠英, 杨波, 汪方圆, 周伟. 太湖地区两种典型水产养殖系统  $\text{CH}_4$  排放研究. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1269-1275.
- [9] 贾磊, 张弥, 蒲旖旎, 赵佳玉, 王娇, 谢燕红, 张圳, 肖薇, 石婕, 邱吉丽. 养殖塘  $\text{CH}_4$  通量时空变化特征及其影响因素. 中国环境科学, 2021, 41(6): 2910-2922.
- [10] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会编制. 中国渔业统计年鉴—2023. 北京: 中国农业出版社, 2023: 18.
- [11] Li F B, Feng J F, Zhou X Y, Xu C C, Haissam Jijakli M, Zhang W J, Fang F P. Impact of rice-fish/shrimp co-culture on the  $\text{N}_2\text{O}$  emission and  $\text{NH}_3$  volatilization in intensive aquaculture ponds. Science of The Total Environment, 2019, 655: 284-291.
- [12] Lambert M, Fréchet J L. Analytical techniques for measuring fluxes of  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  from hydroelectric reservoirs and natural water bodies// Greenhouse Gas Emissions — Fluxes and Processes. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005: 37-60.
- [13] Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J C U P. Climate change: the IPCC Scientific Assessment. Environment International, 1990, 17(5): 498.
- [14] Post W M. Report of a workshop on climate feedbacks and the role of peatlands, tundra, and boreal ecosystems in the global carbon cycle. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, 1990: 1-37.
- [15] Yang P, He Q H, Huang J F, Tong C. Fluxes of greenhouse gases at two different aquaculture ponds in the coastal zone of southeastern China. Atmospheric Environment, 2015, 115: 269-277.
- [16] 张逸飞. 闽江河口养虾塘水体甲烷和二氧化碳溶存浓度与通量研究[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [17] Yang P, Zhang Y, Bastviken D, Lai D Y F, Yang H, Zhang Y F, Guo Q Q, Tan L S, Tong C. Large increase in diffusive greenhouse gas fluxes from subtropical shallow aquaculture ponds during the passage of typhoons. Journal of Hydrology, 2020, 583: 124643.
- [18] 韩洋. 南京市河流温室气体排放通量及其影响因素的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013.
- [19] Gruca-Rokosz R, Bartoszek L, Koszelnik P. The influence of environmental factors on the carbon dioxide flux across the water-air interface of reservoirs in south-eastern Poland. Journal of Environmental Sciences, 2017, 56: 290-299.
- [20] Tremblay A, Roehm C, Varfalvy L, Garneau M. Greenhouse gas emissions-fluxes and processes: hydroelectric reservoirs and natural environments. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [21] Zhao J Y, Zhang M, Pu Y N, Jia L, Xiao W, Zhang Z, Ge P, Shi J, Xiao Q T, Lee X H. Dynamic and high methane emission flux in pond and lake aquaculture. Journal of Hydrology, 2025, 653: 132765.
- [22] Descoux S, Chanudet V, Serca D, Guérin F. Methane and nitrous oxide annual emissions from an old eutrophic temperate reservoir. Science of The Total Environment, 2017, 598: 959-972.
- [23] Treat C C, Wollheim W M, Varner R K, Grandy A S, Talbot J, Frolking S. Temperature and peat type control  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  production in Alaskan permafrost peats. Global Change Biology, 2014, 20(8): 2674-2686.
- [24] 金宝石, 杨平, 赵宽, 仝川, 曾从盛. 闽江河口养殖塘水体溶存氧化亚氮浓度及扩散通量研究. 环境科学学报, 2019, 39(7): 2296-2305.
- [25] 安桐彤, 许潇方, 高强, 刘彦琪, 胡蓓蓓. 我国养殖水体  $\text{N}_2\text{O}$  排放特征及其影响因素研究进展. 生态学杂志, 2021, 40(1): 266-277.
- [26] 邹艺娜. 鱼菜共生系统中氮素迁移转化及  $\text{N}_2\text{O}$  释放初步研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [27] 兰晶. 养殖水体温室气体的溶存与排放及其影响因素研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [28] Paudel S R, Choi O, Khanal S K, Chandran K, Kim S, Lee J W. Effects of temperature on nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) emission from intensive

- aquaculture system. *Science of The Total Environment*, 2015, 518: 16-23.
- [29] Stein L Y, Klotz M G. Research on nitrification and related processes, part B. preface. *Methods in Enzymology*, 2011, 496: xi x-xxx.
- [30] Gruca-Rokosz R, Tomaszek J A. Methane and carbon dioxide in the sediment of a eutrophic reservoir: production pathways and diffusion fluxes at the sediment-water interface. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2015, 226(2): 16.
- [31] Ma Y C, Sun L Y, Liu C Y, Yang X Y, Zhou W, Yang B, Schwenke G, Liu D L. A comparison of methane and nitrous oxide emissions from inland mixed-fish and crab aquaculture ponds. *Science of The Total Environment*, 2018, 637/638: 517-523.
- [32] 张怡彬, 徐洋, 王洪媛, 王绍蓬, 翟丽梅, 刘宏斌. 稻蟹共生系统温室气体排放特征及其影响因素. *农业资源与环境学报*, 2022, 39(5): 931-939.
- [33] Chen Y, Dong S L, Wang F, Gao Q F, Tian X L. Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds. *Environmental Pollution*, 2016, 212: 489-497.
- [34] Yang P, Zhang Y F, Lai D Y F, Tan L S, Jin B S, Tong C. Fluxes of carbon dioxide and methane across the water-atmosphere interface of aquaculture shrimp ponds in two subtropical estuaries: The effect of temperature, substrate, salinity and nitrate. *Science of The Total Environment*, 2018, 635: 1025-1035.
- [35] Yang P, Bastviken D, Lai D Y F, Jin B S, Mou X J, Tong C, Yao Y C. Effects of coastal marsh conversion to shrimp aquaculture ponds on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2017, 199: 125-131.
- [36] Hu Z, Lee J W, Chandran K, Kim S, Sharma K, Khanal S K. Influence of carbohydrate addition on nitrogen transformations and greenhouse gas emissions of intensive aquaculture system. *Science of The Total Environment*, 2014, 470: 193-200.
- [37] Yuan J J, Liu D Y, Xiang J, He T H, Kang H, Ding W X. Methane and nitrous oxide have separated production zones and distinct emission pathways in freshwater aquaculture ponds. *Water Research*, 2021, 190: 116739.
- [38] 杨健, 苏彦平, 刘洪波, 戈贤平. 内陆渔业生态系统的碳循环特征及碳汇机制. *水产学报*, 2012, 36(5): 794-800.
- [39] Hu B B, Xu X F, Zhang J F, Wang T L, Meng W Q, Wang D Q. Diurnal variations of greenhouse gases emissions from reclamation mariculture ponds. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 237: 106677.