

池塘内循环流水养殖模式对养殖塘上覆水-沉积物-间隙水磷时空分布特征及释放通量的影响

刘梅 原居林 练青平 倪蒙 郭爱环 张雷鸣 顾志敏

EFFECTS OF INNER-CIRCULATION POND AQUACULTURE ON DISTRIBUTION AND RELEASE FLUX OF PHOSPHORUS IN THE OVERLAYING-SEDIMENT-INTERSTITIAL WATER

LIU Mei, YUAN Ju-Lin, LIAN Qing-Ping, NI Meng, GUO Ai-Huan, ZHANG Lei-Min, GU Zhi-Min

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7541/2021.2020.158>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响

EFFECTS OF VARYING ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON RELEASE OF SEDIMENT PHOSPHORUS IN WEST LAKE, HANG ZHOU, CHINA

水生生物学报. 2017, 41(6): 1354–1361 <https://doi.org/10.7541/2017.167>

腐殖酸对沉积物中纳米银的释放及其毒性的影响研究

THE RELEASE OF SEDIMENT-ASSOCIATED SILVER NANOPARTICLES BY HUMIC ACID AND ITS TOXICITY ON ZEBRAFISH

水生生物学报. 2020, 44(5): 1119–1129 <https://doi.org/10.7541/2020.130>

硝化细菌对加州鲈池塘水质影响及底质净化作用

STUDY OF WATER QUALITY AND SEDIMENT PURIFICATION BY NITRIFYING BACTERIA IN A CALIFORNIA PERCH (*MICROPTERUS SALMOIDES*) POND

水生生物学报. 2020, 44(2): 399–406 <https://doi.org/10.7541/2020.048>

大口黑鲈池塘工程化循环水养殖系统的溶解氧时空变化及菌群响应特征

TEMPORAL AND SPATIAL VARIATION OF DISSOLVED OXYGEN AND REACTION OF BACTERIAL COMMUNITY IN IN-POND RACEWAY SYSTEM (IPRS) OF LARGEMOUTH BASS (*MICROPTERUS SALMOIDES*)

水生生物学报. 2019, 43(6): 1290–1299 <https://doi.org/10.7541/2019.153>

基于Miseq测序技术分析黄颡鱼不同养殖模式下池塘微生物群落结构多样性

BACTERIAL DIVERSITY OF POND WATER AND SEDIMENT IN DIFFERENT CULTURE SYSTEMS OF YELLOW CATFISH (*PELTEOBAGRUS FULVIDRACO*) REVEALED BY MISEQ SEQUENCING

水生生物学报. 2020, 44(4): 781–789 <https://doi.org/10.7541/2020.094>

缢蛏养殖池塘氨氧化微生物的季节变化特征

SEASONAL VARIATION OF AMMONIA-OXIDIZING MICROORGANISMS IN *SINONOVACULA CONSTRICTA* POND

水生生物学报. 2020, 44(4): 862–868 <https://doi.org/10.7541/2020.103>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

doi: 10.7541/2021.2020.158

池塘内循环流水养殖模式对养殖塘上覆水-沉积物-间隙水磷 时空分布特征及释放通量的影响

刘梅¹ 原居林¹ 练青平¹ 倪蒙¹ 郭爱环¹ 张雷鸣^{1,2} 顾志敏^{1,2}

(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. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 为了揭示池塘内循环流水养殖模式(Inner-circulation Pond Aquaculture, IPA)上覆水-沉积物-间隙水不同磷形态时空分布特征, 探讨沉积物-水界面磷的释放通量及其主要影响因素, 在IPA一条水槽前后端设置6个采样点, 共设置4条, 同时对常规传统池塘(Usual Pond Aquaculture, UPA)设置5个采样点, 采用SMT(磷形态标准测试程序)法测量沉积物中磷的形态组成, 对上覆水-沉积物-间隙水磷时空分布特征进行了分析, 统计了磷释放通量及主要影响环境因子的关系。结果表明: (1)从整体上, IPA上覆水及间隙水中不同形态磷含量低于UPA, 且IPA水体磷空间分布差异较大, 水槽后端沉积物向上覆水释放, 水槽前端则表现为上覆水向沉积物汇集; (2)在养殖中后期, 空间上, IPA水槽后端沉积物不同磷形态随着距离增加逐渐降低, 且均低于UPA; 时间上, 2种模式TP、IP、OP和Fe/Al-P随着养殖的进行而显著增加, Ca-P呈先降低后增加的趋势; (3)UPA基本表现为沉积物对磷的吸收, 而IPA磷释放通量时空差异较大, 养殖初期, 水槽前端表现对磷的吸收, 水槽后端10 m内则少量释放; 至养殖中后期, 槽后端10 m内表现对磷的大量释放; 而后端20和30 m在养殖初期磷通量较小, 至养殖中期均转变为对磷的吸收, 至养殖末期则转变为对磷的释放; (4)2种模式磷通量和环境因子的关系基本一致, TP、IP释放通量和pH呈显著正相关, 各形态磷释放通量和沉积物Eh呈显著负相关, 其中温度的升高对各沉积物不同形态磷的释放有显著的促进作用。综上所述, IPA沉积物磷组分时空差异较大, 主要集中在水槽后端10 m内, 且在养殖中后期向上覆水大量集中释放。研究旨在为IPA改进固体颗粒物拦截方法、提高残饵和粪便的收集效率及养殖水环境调控提供理论依据。

关键词: 池塘内循环流水养殖; 上覆水; 沉积物; 间隙水; 磷含量; 释放通量

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2021)05-1045-12



养殖池塘系统磷主要分布在上覆水-沉积物-间隙水中, 其中沉积物即是磷的“源”又是磷的“汇”, 因此研究养殖池塘沉积物-水界面的不同形态磷含量及释放通量的变化规律, 对指导养殖水环境调控具有重要的指导意义^[1, 2]。目前, 养殖池塘沉积物-水界面营养盐通量的研究主要集中在网箱鱼类养殖^[3]和虾蟹类传统常规养殖池塘等方面, 如Cheng等^[4]报道了大亚湾不同养殖网箱区域氮磷扩散规律, 卢光明等^[5]初步研究了锯缘青蟹(*Scylla serrata*)养殖池塘中沉积物磷释放的规律, 杨平等^[6]

开展了九龙江河口区养虾塘沉积物-水界面营养盐交换通量特征的研究, 这些研究均为养殖水环境调控及环境污染控制提供了借鉴。而淡水鱼类传统常规养殖池塘相对较少^[7, 8], 并且不同养殖模式水体及沉积物磷含量差异较大, 尤其是近年来兴起的池塘内循环流水养殖模式(Inner-circulation pond aquaculture, IPA)相关方面的研究尚未见报道。

IPA是2012年从美国引进, 主要技术原理是通过将养殖池塘进行工程化改造, 建立养殖集中区(流水槽)和水质净化区(套养滤食性鱼、虾、贝类

收稿日期: 2020-07-09; **修订日期:** 2020-10-24

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFD0900105); 浙江省农业重大技术协同推广项目(2020XTTGSC01); 湖州市公益性重点应用研究(2019GZ17)资助 [Supported by National Key R & D Program (2020YFD0900105); Zhejiang Major Agricultural Technology Cooperative Extension Project (2020XTTGSC01); Huzhou Public Welfare Key Applied Research Project (2019GZ17)]

作者简介: 刘梅(1988—), 女, 博士, 助理研究员; 研究方向为养殖水域生态修复。E-mail: liumei@zju.edu.cn

通信作者: 顾志敏(1963—), 研究员。E-mail: guzhiming2006@126.com

或种植水生植物)两大功能区域,利用推水、曝气设备和吸污装置使池塘养殖水体流动且饲料残饵和粪便集中清除,实现养殖水体的循环利用。与传统养殖池塘模式(Usual Pond Aquaculture, UPA)相比,具有水资源利用效率高、节地高效、水体水质好和操作方便等优势^[9, 10],由于其清洁生产理念契合了水生态环境保护的要求,近年来,在我国各地得到广泛推广。据不完全统计,截至2019年底,全国建成的池塘IPA系统就有2000条以上,推广面积近1000 ha。经过团队近几年的IPA养殖探索,已证明大口黑鲈是最适宜养殖的主要品种之一^[11],取得了较好的经济和生态效益。

目前,IPA在实际生产中存在抽吸式集污效率不高的问题,只能做到回收残饵及粪便总量的30%左右,剩余大量有机颗粒在水槽后端随着水流速度降低而大量集中沉降下来,且IPA采取流水区高密度养殖,使养殖形式由传统池塘的“散养”变为集中“圈养”模式,改变了原有池塘的营养物质迁移转化特征。因此,通过比较IPA和UPA两种模式上覆水-沉积物-间隙水中不同磷形态含量变化特征,分析水流速度对残饵粪便磷组分溶失、分布与沉降的影响,确定沉积物磷的沉降及释放规律,为IPA模式固体颗粒物收集改进和水环境调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验池塘介绍

在浙江省湖州市菱湖镇勤劳村设施化鱼类养殖基地进行,1口水深2.3 m、面积2.2 hm²经过工程化改造后布设有4条IPA系统的池塘和旁边1口水深2.3 m、面积0.67 hm²的常规池塘作为试验塘开展养殖试验。鲈鱼苗投放密度为3万尾/hm²,放养规格(7.8±0.6) g/尾,其中IPA总投放6.6万尾,将其平均

分布在4条水槽中,每条水槽投放量为1.65万尾,水槽前端水流速度设置(0.30±0.05) m/s。大口黑鲈种投放前先做好相关驯食活动,停食3d后投放IPA养殖系统中和常规池塘中。实验期间水位保持在(2.0±0.1) m。试验从2018年4月7日开始在水槽内进行鲈鱼苗驯食,驯食成功后于5月20日按照上述放养密度进行准确投放,于2018年12月31日结束。试验所用配合饲料购自浙江联兴饲料科技有限公司,其干物质主要成分:粗蛋白质(43.25±0.29)%、粗脂肪(6.24±0.72)%、粗纤维(5.12±0.26)%和灰分(15.21±0.18)%,每天7:00和16:00各投喂1次,最初投喂的日饵料量约占鱼总体重的2%—3%,以后视前1天的摄食量和天气情况作适当调整,并做好相关生产记录。

其中循环水槽主体采用玻璃钢,规格为长25.0 m×宽21.0 m×深2.5 m,由4条独立水槽组成,每条水槽的规格为长22.0 m×宽5.0 m×深2.5 m,集污槽在流水槽后部,规格为长21.0 m×宽3.0 m×深2.5 m。池塘靠近水槽的一侧建有1个集污池,规格为长5 m×宽3 m×深2 m,连接1条长20 m×宽0.6 m×深0.5 m的过滤渠,过滤渠内铺设火山石滤料。池塘循环水槽养殖系统设备主要有4套气提式推水增氧系统,1套底层增氧系统,1套吸污系统组成,图1a为IPA整体示意图。

1.2 样品的采集与分析

分别在养殖初期5月20日、养殖中期8月20日和养殖末期11月20日早上10点左右采用SEABA KLL-Q2便携式多参数水质仪现场测定各采样点水深1.5 m处上覆水Eh、DO、T和pH,底泥采用奥地利原位柱状采泥器CORER-60(管内径86 mm×长600 mm)采集沉积物样品,其中UPA采用五点法取样,IPA则在水槽前端30 m、水槽后端2、5、10、20和30 m处取样,具体采样位置如图1所示。采泥

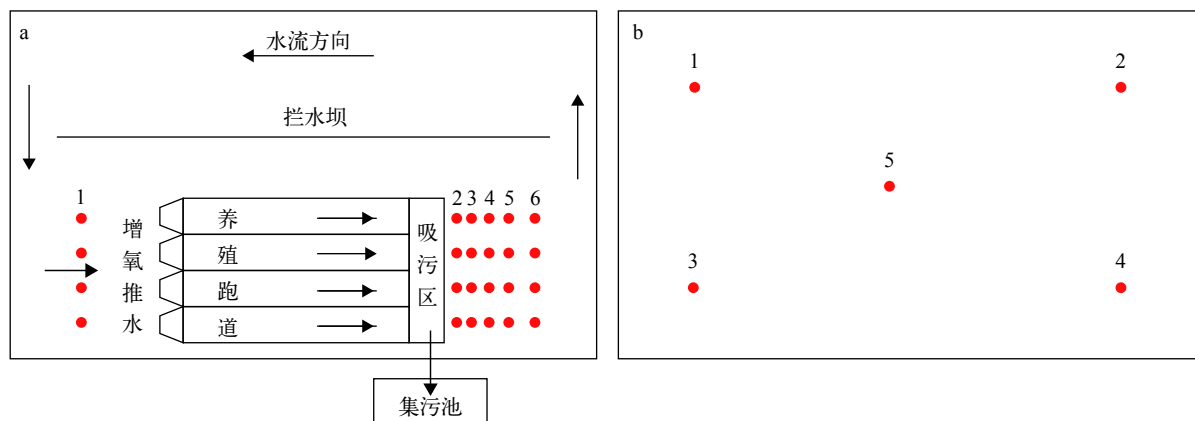


图1 IPA (a)和UPA (b)模式采样点示意图

Fig. 1 Sample points of IPA (a) and UPA (b) modes

器原理为依靠自身重力垂直采集沉积物,在采泥管彻底捕获沉积物后垂直提升采泥器到划船上进行取样,每个采样位置取底泥2根,一根采取虹吸法抽掉上覆水后对底泥进行分层取样,另一根保持垂直用来沉积物-水界面交换通量的测定,并现场取下层上覆水20 L。

沉积物池塘边现场取样,取样时垂直放置采泥管,用活塞缓慢、均匀地将底泥顶出,沉积物按照0—10(表层)、10—20(中层)、20—30 cm(下层)进行现场分层。沉积物现场测量Eh值后用干净聚乙烯自封袋密封保存,排尽袋中的空气,上覆水立即装入300 mL聚乙烯采样瓶中,4℃密封保存后带回实验室。将各层底泥尽快运回实验室。然后取每个沉积物样品一部分置于离心管中,以4000 r/min的转速离心20min,将上清液转移到10 mL离心管,最后经过0.45 μm玻璃纤维滤膜过滤上清液,此即为间隙水,并立即测定间隙水的Eh和pH。各水样品均保存在4℃冰箱中且于24h内测定完各指标。沉积物样品经自然风干磨碎后过100目筛,去除动植物残体及其他粗粒杂质并充分混匀,静置备用。

剩下采泥管运回实验室后,同样缓慢移动活塞移除底部多余底泥使培养底泥深度为20 cm,并采用虹吸法吸取部分多余水体使培养水体水深统一达到30 cm,并取出静置1h后,采用原位孵化法模拟养殖池塘沉积物-水界面通量的交换过程。即把沉积物采样柱放置在实验室恒温培养箱中培养24h,培养过程均在黑暗条件下进行,设定温度为使培养水体达到每个养殖阶段现场采样时测定的上覆水体温度的气温,对上覆水微充气(位于沉积物上方10 cm处),用螺旋止水夹控制充气量,使培养水体DO和现场测定的DO尽量保持一致(偏差不超过10%)。根据实测的上覆水体不同磷形态浓度变化,计算磷在沉积物水界面的扩散通量。另外将上覆水加入另一个没有沉积物的PVC管中,作为现场养殖水空白对照,以减少培养过程中的误差。培养开始前和结束时取得的水样经0.45 μm的微孔滤膜过滤后测定相关指标。

1.3 样品的分析

上覆水和间隙水理化指标按照《水和废水监测分析方法》(2002)测定^[12]:氨态氮采用纳氏试剂比色法(GB7479-87)测定,亚硝态氮采用盐酸萘乙二胺分光光度法(GB7493-87)测定,硝态氮采用酚二磺酸分光光度法(GB7480-87)测定,总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(GB11894-89)测定,上覆水中总磷(TP)、颗粒态磷(PP)、溶解性活性磷(SRP)、溶解态有机磷(DOP)及间隙水中TP、

SRP和DOP浓度采用钼酸铵分光光度法(GB11893-89)测定。沉积物中的TP采用碱熔-钼锑抗比色法测定,TN和TC采用元素分析仪(Vario ELIII,德国)测定。

沉积物磷形态分析采用SMT(Standards measurements and testing program of the European commission)磷分级分离方法^[13,14],该法具有操作简单,各形态磷的测定相对独立,准确性好的特点,而且测定值之间可以互相检验。该法将磷形态分为5种,即铁铝磷(Fe/Al-P,主要是吸附在沉积物表面的弱吸附态磷,Al、Fe、Mn氧化物和水化物结合的磷)、钙磷(Ca-P,主要是与Ca结合的磷)、无机磷(IP)、有机磷(OP)和总磷(TP)。采用钼锑抗分光光度法测定沉积物各形态磷含量。

1.4 计算方法

沉积物-水界面可溶性无机磷交换通量的计算公式如下:

$$F = \frac{\Delta C \cdot V}{A \cdot t}$$

式中, F 表示营养盐通量(mg/m²/d); ΔC 表示培养前后培养管中上覆水营养盐浓度的变化(同时用空白对照校正); V 表示培养器中上覆水的体积(m³); A 表示培养管的横截面积(m²); t 表示培养时间(d)。计算结果若为正值,表示营养盐由沉积物向上覆水释放;若为负值,表示营养盐被沉积物吸收。

1.5 统计分析

采用Excel 2010、Origin 8.0和SPSS 20.0数据分析软件对试验结果进行图表绘制和统计分析,时间变化差异和空间变化差异用单因素方差分析(One-way ANOVA),方差分析前先进行方差齐性检验,以 $P < 0.05$ 作为差异显著水平。

2 结果

2.1 养殖塘上覆水和间隙水理化性质

从整体上,养殖池塘pH和DO的变化趋势同水体温度较一致(图2),即养殖前期(4、5和6月),pH和DO随着温度的升高而呈显著增加趋势($P < 0.05$),至养殖中期(7和8月),三者均达到最大,然后开始呈下降趋势。从图2可以看出,UPA和IPA养殖模式的上覆水pH前期上升最快,从4月的7.5迅速升高至8月的8.9和8.6,然后UPA在9月迅速下降至8.2,其后维持在8.0左右,而IPA在11月迅速下降至7.4,至12月升至7.6;2种模式间隙水的变化规律和上覆水类似,但波动趋势则较平缓。IPA和UPA两种模式上覆水中DO较为充足,其变化分别为5.4—8.9 mg/L和5.8—9.5 mg/L,且到7月达到最

大, 其后开始缓慢下降。

从总体上, UPA的Eh高于IPA模式(图3), 其中UPA和IPA上覆水Eh分别是72.1—168.9 mV和70.5—154.2 mV, 沉积物Eh在-87.5—164.7 mV和-102.5—194.3 mV, 上覆水Eh处于氧化性环境, 且养殖中期氧化性最强, 而沉积物处于还原性环境, 养殖中期还原性最强。

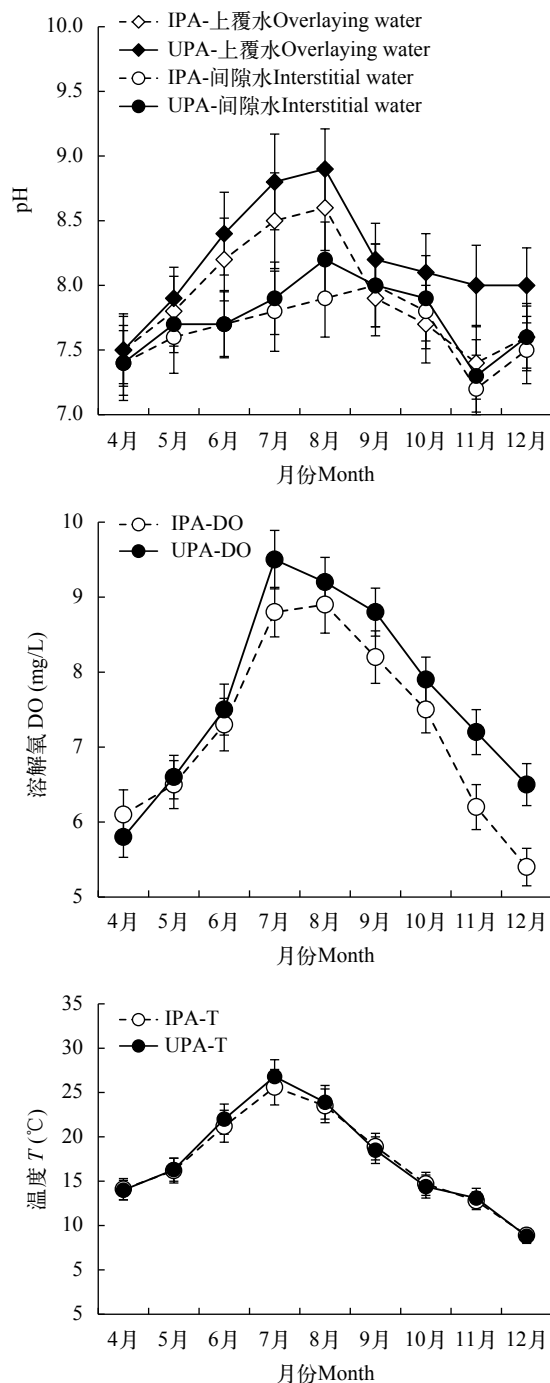


图2 养殖期内pH、溶解度和温度变化趋势

Fig. 2 The change trend of pH, DO and T in the aquaculture period

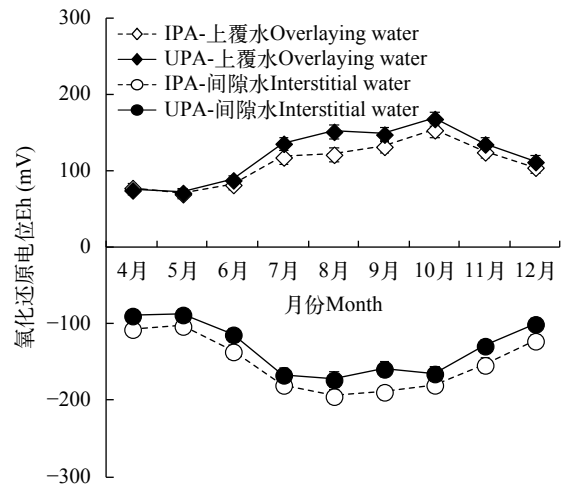


图3 养殖期内氧化还原电位变化趋势

Fig. 3 Changes of Eh in the aquaculture period

2.2 养殖塘上覆水和间隙水磷时空分布特征

在养殖初期, UPA和IPA上覆水中TP、IP和OP浓度最低, 均低于沉积物表层间隙水, 说明存在沉积物磷向上覆水释放的风险。在养殖中后期, UPA上覆水TP浓度(0.42 mg/L)高于表层间隙水(0.32 mg/L), IPA模式除水槽前端30 m处的上覆水TP浓度高于间隙水外, 水槽后端的上覆水TP浓度均低于表层间隙水。在养殖中期, 同TP一样, UPA上覆水IP浓度高于表层间隙水, IPA模式中IP变化则和TP相反, 即水槽前端30 m处的上覆水IP浓度低于间隙水外, 后端采样点均高于间隙水。至养殖后期, 2种模式所有监测点上覆水中IP浓度均低于沉积物表层间隙水IP。在养殖中期UPA上覆水中OP浓度(0.2 mg/L)高于沉积物表层(0.14 mg/L), 同TP类似, 与IP相反, 到养殖后期, 2种模式所有监测点上覆水OP浓度均低于沉积物表层间隙水(图4)。

在垂向分布上, 养殖初期, UPA和IPA两种模式间隙水TP、IP和OP变化波动较小。在养殖中期, UPA间隙水TP、IP和OP浓度在10—20 cm处最大, IPA除水槽前端30 m和后端30 m处10—20 cm处最大, 后端2、5、10和20 m处则是0—10 cm间隙水浓度最高。在养殖末期, UPA、IPA水槽前端30 m处及养殖水槽后端30 m处TP、IP和OP浓度在10—20 cm处最高, IPA水槽后端TP和OP浓度在2、5、10和20 m处表层沉积物浓度最高, 而IP浓度在表层最低。在养殖后期, UPA间隙水TP、IP和OP浓度在表层沉积物最高, IPA水槽前端30 m处TP浓度则在表层沉积物最低, 水槽后端各采样点TP浓度则是表层间隙水最高, IP和OP浓度变化规律不明显(图5)。

2.3 养殖池塘沉积物磷时空分布特征

在养殖初期, UPA和IPA沉积物TP、IP和OP均

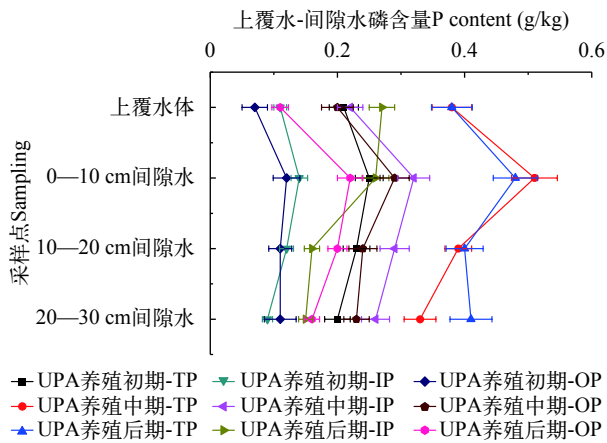


图4 UPA养殖池塘上覆水-间隙水磷垂向特征

Fig. 4 Vertical characteristics of phosphorus from overlaying-interstitial water in UPA

比较低且差异不显著($P>0.05$), 到养殖中后期, UPA沉积物TP、IP和OP显著增加($P<0.05$; 图6), 而IPA不同采样点增加幅度相差较大, 其中均值呈UPA>水槽后端2 m>水槽后端5 m>水槽后端10 m>水槽后端20 m>水槽后端30 m>水槽前端30 m(图7), 且水槽后端2、5和10 m显著高于水槽前端30 m和后端30 m($P<0.05$), 说明IPA沉积物磷空间分布受水流方向影响较大。2种模式Fe/Al-P随着养殖的进行基本呈显著增加趋势($P<0.05$), Ca-P呈先降低后增加的趋势。

UPA不同深度沉积物TP、IP和OP和间隙水变化规律较一致, 即呈现“中间高两头低”的现象, 而IPA沉积物TP、IP和OP变化在不同养殖时期和不同采样点存在较大差异, 两者的Fe/Al-P和Ca-P均随

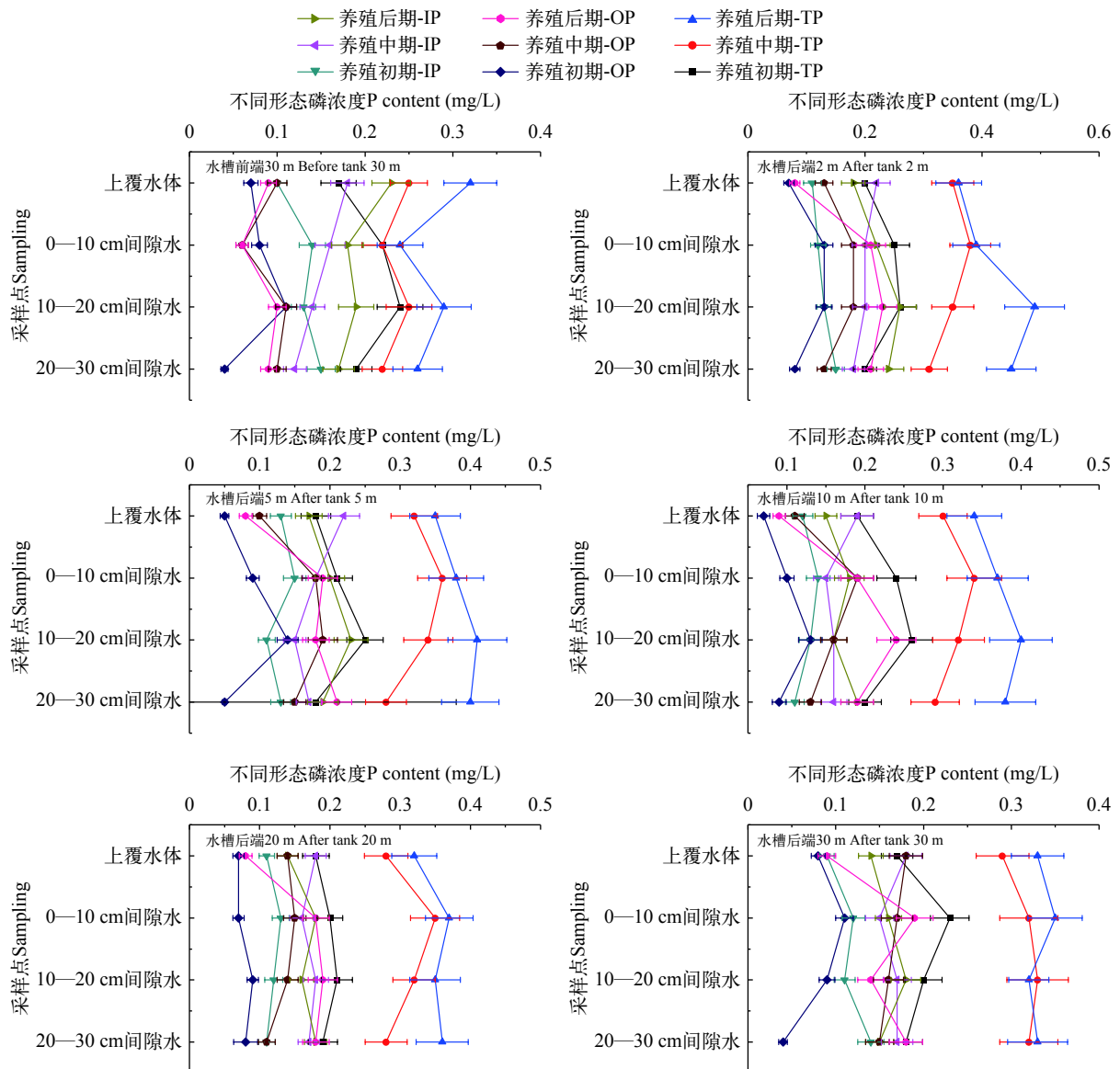


图5 IPA养殖池塘上覆水-间隙水磷空间特征

Fig. 5 Spatial characteristics of phosphorus from overlaying-interstitial water in IPA

着深度的增加而降低。在养殖初期, IPA所有采样点不同深度磷含量波动较小; 在养殖中期, 水槽前端30 m和后端30 m沉积物TP和OP浓度在10—20 cm最高, 而水槽后端2、5和10 m处在0—10 cm最高, 该模式所有采样点表层沉积物IP最高。至养殖后期, UPA沉积物TP、IP和OP均显著增加($P<0.05$), 且均高于IPA, 其中10—20 cm处最高; 而IPA沉积物TP、IP和OP顺序依次为水槽后端2 m>水槽后端5 m>水槽后端10 m>水槽后端20 m>水槽后端30 m>水槽前端30 m, 且水槽后端2、5和10 m处沉积物磷含量显著大于其他3个采样点($P<0.05$), 尤其是OP达到极显著水平($P<0.01$), 水槽后端2、5和10 m处中下层(10—30 cm)OP含量最高, 最高值分别为1.02、1.17和1.08 mg/L, 而后端20和30 m处表层(0—10 cm)含量最高, 其值分别为0.072和0.42 mg/L。

2.4 养殖池塘上覆水-沉积物界面磷释放通量估算

总体上磷通量变化情况 养殖初期磷的通量最低, 而到了中期和后期则磷通量大幅增加, 尤其养殖中期磷通量最大(图8)。UPA整个养殖期基本表现为沉积物对磷的吸收; IPA空间差异较大, 水槽前端30 m处沉积物则基本表现为对磷的吸收, 水槽后端2、5和10 m沉积物在养殖初期基本为少量吸收, 而到养殖中后期, 则转变为对磷的大量释放, 水槽后端20和30 m在养殖初期磷通量较小, 至养殖中期均转变为对磷的吸收, 至养殖末期则转变为对磷的释放。

不同形态磷通量变化情况 养殖初期, UPA和IPA水槽前端30 m和后端30 m沉积物对TP表现为释放, 各组之间无显著性差异($P>0.05$), 而水槽后端2、5、10和20 m处则表现为TP释放, 其变化范围为-4.1—9.3 mg/(m²·d); 2种模式采样点均表现为沉积物对IP的吸收, IP通量为-7.2—11.1 mg/(m²·d), 各

组之间无显著性差异($P>0.05$), 而对OP均表现为沉积物对OP的吸收, UPA采样点通量为12.9 mg/(m²·d), 接近IPA水槽前端30 m和后端30 m, 而显著低于水槽后端2、5、10和20 m($P<0.05$)。至养殖中期, UPA沉积物表现为对TP、IP和OP的释放, 其通量值分别175.6、111.5和64.1 mg/(m²·d), 而IPA不同采样点磷的通量值存在较大差异, 水槽前端30 m、后端20和30 m均表现为对磷的吸收, 水槽后端2、5和10 m则表现为释放。至养殖末期, 除水槽前端30 m处对TP、IP和OP表现为少量吸收外, 其他各采样点均表现为对磷的大量释放, 且释放量随着距离增加显著降低($P<0.05$), 对于TP和IP通量, 水槽后端2和5 m显著高于后端10 m($P<0.05$), 后端10 m又显著高于后端20和30 m($P<0.05$), 而OP释放通量则是水槽后端2和5 m处显著高于后端10、20和30 m处($P<0.05$)。

2.5 不同形态磷通量与环境因子的相互关系

将不同形态磷通量与上覆水体DO、Eh、pH、T及间隙水的pH和Eh进行相关性分析(表1)。结果表明, 不同养殖模式磷通量变化和环境因子存在一定差异, UPA和IPA两种模式TP通量同上层水pH、间隙水pH和上层水T呈显著正相关($P<0.05$), 和间隙水Eh呈显著负相关关系($P<0.05$)。2种模式IP通量和除上层水DO以外的其余5种环境因子均呈显著相关($P<0.05$), 且和T呈极显著正相关($P<0.01$)。UPA沉积物OP通量仅和上层水T呈显著正相关($P<0.05$), IPA沉积物OP通量同上层水T呈显著正相关($P<0.05$), 而和间隙水Eh呈显著负相关($P<0.05$)。

3 讨论

3.1 养殖池塘上覆水及间隙水TP、IP与OP时空变化

时间尺度方面 在养殖初期, 2种养殖模式

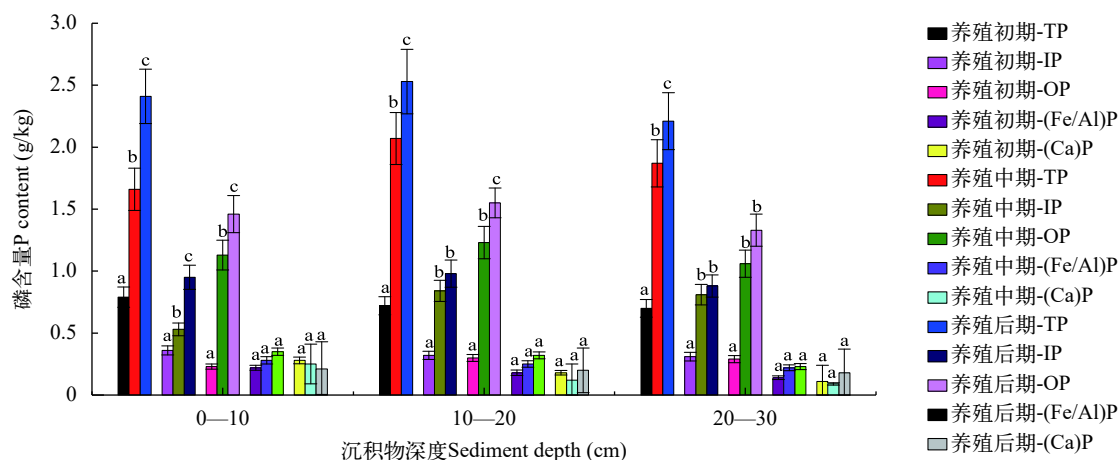


图6 UPA养殖塘沉积物不同形态磷含量分布特征

Fig. 6 Characteristics of phosphorus content distribution from sediments in UPA

所有采样点上覆水及间隙水磷含量均比较低。主要是由于放苗前,养殖池塘会清除多余淤泥、泼洒生石灰和暴晒等前期准备工作,一方面清除部分原有富含氮磷的淤泥,另一方面经过干湿交替及氧化还原过程使底泥中的有机磷分解矿化^[15],释放出大量磷酸根,与生石灰中的钙、铁和镁等矿物质结合沉淀,固定在底泥的团聚体中,有效降低底泥有效磷含量,减少了向间隙水和上覆水释放。到养殖中期,UPA上覆水和间隙水磷含量显著增加,且间隙水磷浓度显著大于上覆水,主要是由于池塘沉积物中随着养殖生产的进行积累了较多的残饵粪便,且养殖中期为大口黑鲈生长旺季,较高温度加速沉积物中有机物分解矿化,致使沉积物间隙水中各形态磷含量显著增加,同时上层鱼类游泳的扰动作用,加速了间隙水磷向上覆水水体释放,进一步增加了

上覆水中磷含量。至养殖后期,尽管沉积物中积累较多有机物质,但温度较低,鱼类摄食率下降,微生物代谢较慢等诸多因素导致沉积物中有机质矿化分解变慢,致使间隙水磷含量并未显著增加。上覆水由于前期养殖对象快速生长,投喂饵料和排泄物均显著增加,致使上覆水体中溶解态磷积累呈增加趋势。传统池塘类似变化规律已在多个研究中得到证实^[7,16]。

空间尺度方面 在养殖初期,同UPA一样,IPA空间变异不大;至养殖中后期,IPA则呈现较大的空间变异性,即水槽前端上覆水TP和IP浓度高于间隙水,而水槽后端均低于沉积物表层间隙水,水槽后端各形态磷变化和UPA模式规律一致,分析原因主要是由于IPA模式水体从水槽前端向后端推出,小部分被吸污机吸出多余的残饵粪便(约占

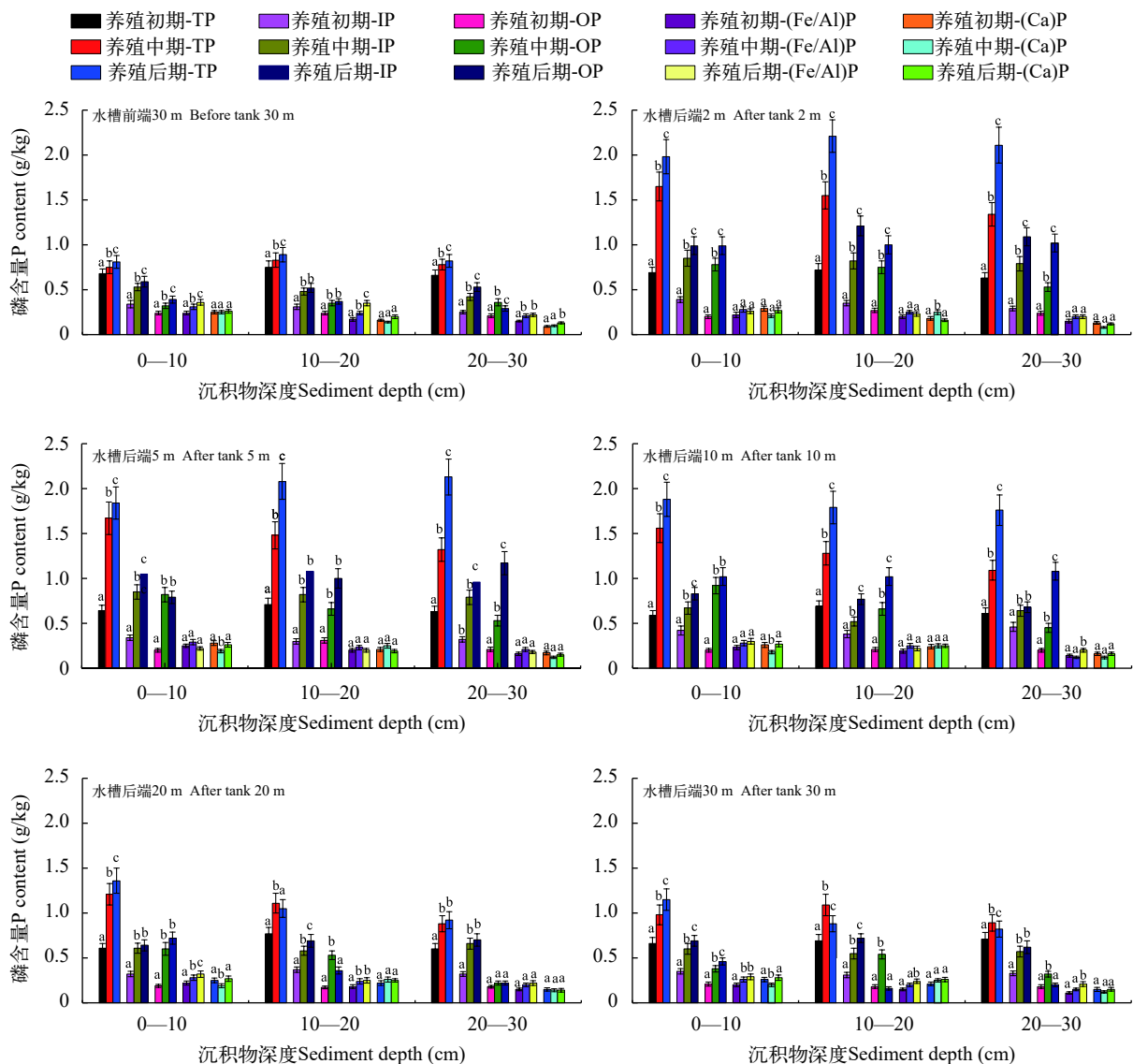


图7 IPA养殖塘沉积物不同形态磷含量分布特征

Fig. 7 Characteristics of phosphorus content distribution from sediments in IPA

30%), 大部分则随水流的方向在水槽后端沉积, 温度较高时, 微生物代谢活动较强, 有机质分解快, 矿化后的可溶性磷首先释放到间隙水中^[17], 使其浓度明显增高, 而水槽前端残饵粪便积累较少, 间隙水中的磷浓度较低。对于OP浓度, UPA整个养殖周期内均是上覆水浓度低于间隙水, 且在垂向分布上, 随着深度的增加而降低, 可能是由于残饵粪便在沉积物表层不断积累, 这些有机质首先分解成细微颗粒向间隙水迁移, 进而释放到上覆水中, 致使其表层OP含量显著升高, 而中下层含量变化不大。而IPA养殖模式, 水槽前端残饵粪便积累较少, 间隙水OP浓度较低, 而后端OP浓度则显著升高, 且随着水

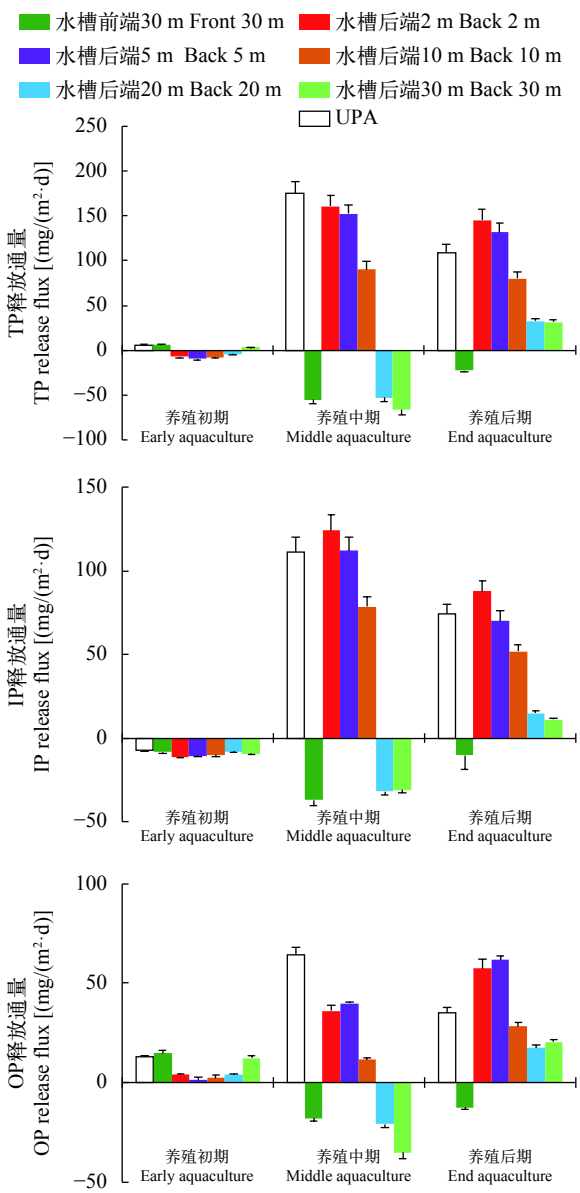


图 8 不同形态磷释放通量空间分布特征

Fig. 8 Spatial characteristics of phosphorus emission flux from sediments in UPA and IPA

表 1 两种模式不同形态磷通量与环境因子的相关性分析

Tab. 1 The relationship between environmental factors and phosphorus emission fluxes of different forms in UPA and IPA

环境因子 Environmental factor	UPA			IPA(槽后端沉积物 Sediment at the back of tank)		
	TP	IP	OP	TP	IP	OP
上覆水pH Overlaying water pH	0.48*	0.55*	0.42	0.51*	0.55*	0.48
间隙水pH Interstitial water pH	0.66*	0.58*	0.51	0.55*	0.54*	0.58
上覆水Eh Overlaying water Eh	0.47	0.52*	0.39	0.49	0.51*	0.47
沉积物Eh Sediment Eh	-0.54*	-0.68*	-0.44	-0.58*	-0.58*	-0.47*
上覆水DO Overlaying water DO	0.61*	0.58	0.53	0.54	0.61	0.45
上覆水T Overlaying water T	0.65*	0.76**	0.61*	0.67*	0.78**	0.64*

注: *代表显著相关($P<0.05$), **代表极显著相关($P<0.01$)

Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$). ** indicates extremely significant correlation ($P<0.05$)

流方向呈降低趋势, 主要受水力沉积有关。因此, 可考虑开发适合IPA养殖特点的粪便易成型低磷饵料, 降低粪便随水流的扩散距离, 提高该系统固体颗粒物的收集效率, 减少氮磷沉积, 有效改善养殖水环境。

3.2 养殖池塘沉积物不同深度磷赋存形态变化

沉积物中TP的含量和分布特征, 能够表征池塘底泥中磷的污染累积程度, 并不能够直接说明沉积物磷的生物稳定性及释放潜力, 沉积物磷释放活力、迁移能力和生态效应主要取决于沉积物磷赋存形态^[18]。因此, 非常有必要对沉积物磷形态进一步分析, 深入剖析底泥中磷的生物可利用性及可能对养殖池塘上覆水构成的释放风险。UPA沉积物不同深度的TP、OP和IP随着养殖的进行, 整体上呈增加趋势, 且中层增加幅度大于上层和下层, 造成这种差异的可能主要原因是鱼类游动和摄食等生物扰动作用^[19, 20], 引起表层底泥再悬浮, 进而促进底泥中溶解性磷酸根和有机碎屑颗粒向上覆水体流出; 同时生物扰动增强了表层沉积物微生物的活性, 其代谢过程释放出有机酸会降低微环境的pH, 使得吸附态磷在弱酸环境中产生释放, 释放到间隙水中的磷一部分扩散到上覆水, 一部分则经过复杂的生物化学作用进入中下层沉积物中。李大鹏等^[21]研究证明在再悬浮条件下(风浪和生物扰动等作用), 水体中IP呈逐渐增加趋势, 郑余琦等^[22]研究发现缢蛏的生物扰动下表层沉积物微生物活性

增强, 磷含量显著减少。而IPA模式则基本是沉积物表层TP、OP和IP最高, 同样是由于IPA养殖的鱼都被集中圈养在水槽中, 水槽后端不会存在强烈鱼类扰动再悬浮作用。同间隙水一样, IPA沉积物中磷的空间分布受水流的影响较大, IPA水槽后端沉积物磷含量随着距离的增加而逐渐降低, 主要是推水作用导致沉积物在水槽后端堆积较多, 且随着距离增加沉降量逐渐降低。基于此, 可以通过将现在集污区3 m长度增加至6 m, 同时将现有的单向单轨吸污装备升级改造为对向双轨吸污装备, 以进一步提高集污区固体颗粒物的收集效率。

Fe/Al-P是可被生物潜在利用的磷, 在适当的氧化还原条件下可被生物利用^[23]。本研究结果表明, 随着沉积物TP含量的增加, 其Fe/Al-P含量呈升高趋势, 且表层含量最高。主要是由于下层的沉积物, 微生物不断消耗DO分解有机质, 使沉积物环境变得相对还原, 金属磷矿物被还原溶解, 释放出的溶解磷酸盐在浓度梯度的驱使下向上扩散迁移至表层沉积物, 该层氧化还原电位较高, 重新形成矿物而沉淀下来, 造成Fe/Al-P矿物在沉积物表层富集的现象。这与罗玉红等^[24]研究发现香溪河沉积物由于夏季受外源污染严重而呈现磷“表层富集”现象相一致。Ca-P主要为与钙质结合的P部分, 分为Ca₂-P、Ca₆-P、Ca₈-P和Ca₁₀-P等形态, 除Ca₂-P外, 其他溶解性均很低, 被认为是生物不可利用的磷^[25,26]。本研究中Ca-P在养殖初期含量较高, 主要是由于晒塘时泼洒大量生石灰, 池塘底泥及间隙水中磷与生石灰中的钙结合形成磷酸钙沉积下来, 引起表层沉积物Ca-P增加, 尤其是生物利用性强的Ca₂-P增加。至养殖中期, UPA和IPA水槽后端由于表层沉积物主要是残饵粪便堆积形成, Ca-P较低, 而养殖初期富含Ca-P的沉积物进入下层, 因此, 表层沉积物Ca-P低于中层; 到养殖后期, 随着表层有机质被分解矿化, 致使其中的有机钙转化为游离态的钙离子, 与沉积物中的磷酸根重新结合, 形成新的Ca-P沉积下来, 增加了表层Ca-P^[27]。因此, 在生产实际中, 尤其是IPA水槽后端20 m内可以种植一定面积的盆栽荷花或者菱角, 通过水生植物的根部吸收和茎叶的拦截, 减少不同形态内源磷的集中释放, 降低外塘水质净化压力。

3.3 环境因子对上覆水-沉积物界面磷释放通量的影响

沉积物-水界面水体中营养物质的交换通量是多个因素共同耦合的结果^[28,29]。研究表明, 底泥-水界面磷的释放通量受微生物活动的影响, 微生物可把底泥中的有机磷分解为无机磷, 将不溶性磷转化

为可溶性磷, 从而增加磷的释放^[30], 其中温度和溶解氧与微生物生命活动密切相关。如Jiang等^[31]研究表明随着温度的升高, 微生物活性增强, 从而促进底泥磷的释放。本研究中磷的释放通量在养殖中期达到最高, 主要是由于温度升高, 沉积物与水体之间发生剧烈化学反应, 同时微生物活性增强加速了有机质的分解, 加强了沉积物中磷的释放与溶解。且随着水体氮磷迅速增加, 水体中的藻类快速增殖, 光合作用强烈, 导致水体DO、pH和Eh升高, 该环境条件有利于沉积物磷的释放。卢光明等^[5]研究发现, 微生物组沉积物磷的释放量要明显高于灭菌组, 磷释放通量随着温度的升高而显著增加。另外, 养殖中期时表层水体温度较高, 大口黑鲈主要集中在水体下层游动, 加剧了沉积物表层有机物悬浮与再悬浮作用, 促进了沉积物间隙水中的磷的释放, 这与Nicholaus等^[32]研究结果一致。因此, 各形态磷通量与温度均成显著的正相关性, 尤其是IP磷通量呈极显著相关性。鉴于此, 为有效降低水体IP, 避免蓝藻爆发引起养殖对象应激, 夏季时应在水槽后端适当位置放置若干浮床, 通过发达的植物根系吸收溶解性磷。

此外, 本研究表明磷通量对表层沉积物的Eh变化非常敏感, 与沉积物Eh呈显著负相关关系。相关研究表明Eh<0的强还原性条件能够促进底泥中的磷大量释放, 且底泥中释放的磷是以Fe/Al-P为主^[33,34]。Eh受养殖环境DO影响较大^[34], 沉积物由于微生物耗氧分解有机质, DO较低, Eh也较低, 呈还原状态, 从而使被Fe/Al吸附的磷酸盐转变成溶解态析出, 沉积物P释放量增加。在实际生产中, 养殖塘底部建议安装一定数量的纳米曝气盘, 增加下层水体的DO, 降低内源磷的释放。

pH也是影响磷通量变化的一个重要因素^[34]。研究表明, 溶解P的释放量与pH呈U型相关, 即pH升高或降低均会促进磷的释放^[35,36]。当pH为3—7时, 磷主要以HPO₄²⁻和H₂PO₄⁻形式存在, 使得磷酸根离子从镁盐、硅酸盐、铝硅酸盐及氢氧化铁胶体中解吸附, 释放到养殖水体中; 当pH为8—10时, 水体中OH⁻与无定形Fe-Al发生交换, 使沉积物中磷释放量增加, 因此, pH升高有利于底泥中磷的释放。在本试验中, 上覆水和间隙水中pH从养殖初期中性到养殖中期显著升高到碱性状态, 至养殖末期波动下降至中性状态, 而磷通量变化趋势基本和pH一致, 因此, 2种养殖模式磷的释放量和pH呈显著正相关性。可见, 在养殖对象生长旺季可通过添加微生物制剂抑制藻类的过度繁殖, 如泼洒乳酸菌制剂中和碱性物质, 同时使用腐殖酸钠, 提高水体缓冲力,

降低磷的释放量,达到有效改善养殖水环境的目的。

4 结论

本文通过比较IPA和UPA池塘不同磷形态时空分布特征及释放通量,表明工程化改造明显改变了原有池塘的营养物质迁移转化特征,能够使残饵粪便等固体颗粒物集中沉积下来,更易于收集转移出养殖水体。根据沉积规律及释放特点,当前的IPA系统可以将原有长3 m的集污区增加到6 m,同时将现有的单向单轨吸污装备升级改造为对向双轨吸污装备,提高固体颗粒物的收集效率;可以在集污区后端20 m内种植水生植物,通过根部吸收和茎叶拦截,减少内源磷的释放;同时安装底增氧装置以及施用有益微生物制剂等多种措施,最终达到有效改善养殖水环境的目的。

参考文献:

- [1] Havens, Karl E. Phosphorus-algal bloom relationships in large lakes of South Florida: implications for establishing nutrient criteria [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2003, **19**(3): 222-228.
- [2] Abell J M, Özkundakci D, Hamilton D P. Nitrogen and phosphorus limitation of phytoplankton growth in New Zealand lakes: implications for eutrophication control [J]. *Ecosystems*, 2010, **13**(7): 966-977.
- [3] Guo Y J, Shen Y P, Wang F, *et al.* Nutrient fluxes across sediment-water interface in different grass carp polyculture enclosures [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2013, **37**(4): 595-605. [郭永坚, 沈勇平, 王芳, 等. 草鱼不同养殖模式实验围隔内沉积物-水界面营养盐通量的研究 [J]. *水生生物学报*, 2013, **37**(4): 595-605.]
- [4] Cheng X, Zeng Y, Guo Z, *et al.* Diffusion of nitrogen and phosphorus across the sediment-water interface and in seawater at aquaculture areas of Daya Bay, China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014(11): 1557-1572.
- [5] Lu G M, Le G Z, Zhong M J, *et al.* Phosphorus release in *Scylla serrata* (Forsk.) ponds' sediment [J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, **17**(5): 1115-1120. [卢光明, 乐观宗, 钟明杰, 等. 锯缘青蟹养殖池塘中沉积物磷释放的初步研究 [J]. *中国水产科学*, 2010, **17**(5): 1115-1120.]
- [6] Yang P, Jin B S, Tan L S, *et al.* Temporal variation of nutrients fluxes across the sediment-water interface of shrimp ponds and influencing factors in the Jiulong River Estuary [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(1): 192-203. [杨平, 金宝石, 谭立山, 等. 九龙江河口区养虾塘沉积物-水界面营养盐交换通量特征 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(1): 192-203.]
- [7] Zhao L, Wang F, Sun D, *et al.* Distribution of nutrients in the pore water and overlying water in grass carp *Ctenopharyngodon idellus* polyculture system [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, **32**(2): 70-77. [赵蕾, 王芳, 孙东, 等. 草鱼复合养殖系统间隙水与上覆水中营养盐分布特征 [J]. *渔业科学进展*, 2011, **32**(2): 70-77.]
- [8] Pi K, Zhang M, Li B M, *et al.* Diffusion fluxes of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in different aquaculture model ponds [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, **42**(2): 246-256. [皮坤, 张敏, 李保民, 等. 主养草鱼与主养黄颡鱼池塘沉积物—水界面氮磷营养盐通量变化及与环境因子的关系 [J]. *水产学报*, 2018, **42**(2): 246-256.]
- [9] Tang R J, Chen S Q, Liang P Y, *et al.* Research and application of the basic technology of circulating water culture in ponds [J]. *Scientific Fish Farming*, 2017(3): 21-22. [唐仁军, 成世清, 梁培义, 等. 池塘内循环流水养殖集成技术研究与应用 [J]. *科学养鱼*, 2017(3): 21-22.]
- [10] Guo S R, Wang L, Chen L Y, *et al.* Experiment of pond circulation "flume type" herrings cultivation [J]. *Scientific Fish Farming*, 2017(6): 18-19. [郭水荣, 王力, 陈凌云, 等. 池塘内循环“水槽式”养殖青鱼试验 [J]. *科学养鱼*, 2017(6): 18-19.]
- [11] Yuan J L, Liu M, Ni M, *et al.* Effects of different culture models on growth performances, morphological traits and nutritional quality in muscles of *Micropterus salmoides* [J]. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2018, **40**(6): 1276-1285. [原居林, 刘梅, 倪蒙, 等. 不同养殖模式对大口黑鲈生长性能、形体指标和肌肉营养成分影响研究 [J]. *江西农业大学学报*, 2018, **40**(6): 1276-1285.]
- [12] State Environmental Protection Administration of China Editor Committee of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods (4th edition) [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002: 240-300. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法(第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 240-300.]
- [13] Hedley M J, Stewart J W B, Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1982, **46**(5): 970-976.
- [14] Carter M R, Gregorich E G. Soil Sampling and Methods of Analysis (2nd edition) [M]. Florida: CRC Press, 2007: 75-86.
- [15] Xu Y, Chen J, Wang J F, *et al.* The micro-scale investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake Hongfeng [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2016, **28**(1): 68-74. [徐洋, 陈敬安, 王敬富, 等. 氧化还原条件对红枫湖沉积物磷释放影响的微尺度分析 [J]. *湖泊科学*, 2016, **28**(1): 68-74.]
- [16] Guo Y J, Wang F, Liu H C, *et al.* Study on nutrients in sediment interstitial water and overlying water in different grass carp polyculture enclosures [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, **42**(7-8): 82-89. [郭永坚, 王芳, 刘红彩, 等. 草鱼不同养殖模式底泥间隙水与

- 上覆水营养盐的分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2012, **42**(7-8): 82-89.]
- [17] Dalila S, Pedro P F, Miguel C, *et al.* Modelling of biogeochemical processes in fish earth ponds: model development and calibration [J]. *Ecological Modelling*, 2012(247): 286-301.
- [18] Wang S R. Process of Lake Sediment-water Interface: Nitrogen and Phosphorus Biogeochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-25. [王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程: 氮磷生物地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-25.]
- [19] Li J W, Zhu C B, Guo Y J, *et al.* Influence of bioturbation of *Sipunculus nudus* on the nutrients of sediment and pore water in the polyculture system of *S. nudes* and *Mugil cephalus* [J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, **36**(1): 103-110. [李俊伟, 朱长波, 郭永坚, 等. 光裸方格星虫(*Sipunculus nudus*)生物扰动对混养系统沉积物及间隙水中营养物质的影响 [J]. 渔业科学进展, 2015, **36**(1): 103-110.]
- [20] Li D P, Huang Y. Sedimentary phosphorus fractions and bioavailability as influenced by repeated sediment resuspension [J]. *Ecological Engineering*, 2010, **36**(7): 968-962.
- [21] Li D P, Huang Y, Li W G. Transformation of phosphorus forms in the sediments under the conditions of sediments resuspension [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(5): 1289-1294. [李大鹏, 黄勇, 李伟光. 再悬浮条件下底泥中磷赋存形态的转化研究 [J]. 环境科学, 2008, **29**(5): 1289-1294.]
- [22] Zhen Y G, Zhen Z M, Qin W J. Effects of bioturbation by razor clam *sinonovacula constricta* on vertical distribution of phosphorus form in sediment in an aquaculture wastewater treatment ecosystem [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2017, **48**(1): 161-170. [郑余琦, 郑忠明, 秦文娟. 缢蛏(*Sinonovacula constricta*)生物扰动对养殖废水处理系统中沉积物磷赋存形态垂直分布的影响 [J]. 海洋与湖沼, 2017, **48**(1): 161-170.]
- [23] Xu Y. The investigation on the effect of redox condition on the release of the sediment phosphorus in Lake [D]. Guiyang: Guizhou University, 2015: 3-30. [徐洋. 氧化还原环境制约湖泊沉积物内源磷释放过程的研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2015: 3-30.]
- [24] Luo Y H, Nie X Q, Li X L, *et al.* Distribution and emission flux estimation of phosphorus in the sediment and interstitial water of Xiangxi Rive [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2345-2354. [罗玉红, 聂小倩, 李晓玲, 等. 香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算 [J]. 环境科学, 2017, **38**(6): 2345-2354.]
- [25] Mlo A, Snl B, Al C. Spatial and temporal variation in sedimentary phosphorus species in Lake Champlain (Vermont, New York, Québec) [J]. *Journal of Great Lakes Research*, 2020, **46**(5): 1277-1291.
- [26] Zhang R, Yin A, Gao C. Sediment phosphorus fraction and release potential in the major inflow rivers of Chao-hu Lake, Eastern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, **78**(4): 117.
- [27] Yang Y Q, Chen J A, Wang J F, *et al.* Research progress of sediments phosphorus in-situ inactivation [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, **28**(6): 674-684. [杨永琼, 陈敬安, 王敬富, 等. 沉积物磷原位钝化技术研究进展 [J]. 地球科学进展, 2013, **28**(6): 674-684.]
- [28] Song H X, Xing R L, Chen L H, *et al.* Effects of temperature and pH on release of nutrient in sediment from the ponds breeding *Apostichopus japonicus* [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, **54**(4): 835-842. [宋洪旭, 邢荣莲, 陈丽红, 等. 温度和pH对刺参养殖池塘沉积物营养盐释放的影响 [J]. 湖北农业科学, 2015, **54**(4): 835-842.]
- [29] Zhang S, An W, Li X. Research on phosphorus loads and characteristic of adsorption and release in surface sediments of Nanyang Lake and Weishan Lake in China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, **187**(1): 1-7.
- [30] Liu C, Shao S, Shen Q, *et al.* Effects of riverine suspended particulate matter on the post-dredging increase in internal phosphorus loading across the sediment-water interface [J]. *Environmental Pollution*, 2016(211): 165-172.
- [31] Jiang X, Jin X C, Yao Y, *et al.* Effects of biological activity, light, temperature and oxygen on phosphorus release processes at the sediment and water interface of Taihu Lake [J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 2251-2259.
- [32] Nicholas R, Zheng Z. The effects of bioturbation by the Venus clam *Cyclina sinensis* on the fluxes of nutrients across the sediment-water interface in aquaculture ponds [J]. *Aquaculture International*, 2014, **22**(2): 913-924.
- [33] Huang T L, Zhou R Y, Xia C, *et al.* Effects of oxidation-reduction potential and microorganism on the release of phosphorus from sediments [J]. *Environmental Chemistry*, 2014, **33**(6): 930-936. [黄廷林, 周瑞媛, 夏超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响 [J]. 环境化学, 2014, **33**(6): 930-936.]
- [34] Zhang Y, Liu Z S, Zhang Y L, *et al.* Effects of varying environmental conditions on release of sediment phosphorus in west lake, Hangzhou, China [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, **41**(6): 1354-1361. [张义, 刘子森, 张珪磊, 等. 环境因子对杭州西湖沉积物各形态磷释放的影响 [J]. 水生生物学报, 2017, **41**(6): 1354-1361.]
- [35] Xu J, Xu L G, Gong R, *et al.* Adsorption and release characteristic of phosphorus and influential factors in Poyang Lake sediment [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(4): 630-635. [徐进, 徐力刚, 龚然, 等. 鄱阳湖沉积物中磷吸附释放特性及影响因素研究 [J]. 生态环境学报, 2014, **23**(4): 630-635.]
- [36] Yuan H Z, Shen J, Liu E F, *et al.* Characteristic of phosphorus release with the control of pH of sediments from

Meiliang Bay, Lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2009, **21**(5): 663-668. [袁和忠, 沈吉, 刘恩峰, 等. 模拟

水体pH控制条件下太湖梅梁湾沉积物中磷的释放特征 [J]. *湖泊科学*, 2009, **21**(5): 663-668.]

EFFECTS OF INNER-CIRCULATION POND AQUACULTURE ON DISTRIBUTION AND RELEASE FLUX OF PHOSPHORUS IN THE OVERLAYING-SEDIMENT-INTERSTITIAL WATER

LIU Mei¹, YUAN Ju-Lin¹, LIAN Qing-Ping¹, NI Meng¹, GUO Ai-Huan¹, ZHANG Lei-Min^{1,2} and GU Zhi-Min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Healthy Freshwater Aquaculture, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Freshwater Aquaculture Genetic and Breeding of Zhejiang Province, Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China;

2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To reveal the spatial and temporal distribution characteristics of different phosphorus forms in the overlying-sediment-interstitial water, the release flux of phosphorus at sediment-water interface as well as relevant main influence factors from the Inner-circulation Pond Aquaculture (IPA), 4 IPA tanks were sampled to measure the composition of phosphorus forms in sediment by the Standards Measurements and Testing Program of the European commission (SMT method). Each IPA tank has 6 sampling points at the front and rear ends, and the Usual Pond Aquaculture (UPA) has 5 sampling points. The results showed that: (1) different forms of phosphorus content from overlying and interstitial water of IPA were lower than those of UPA, and the spatial distribution of phosphorus in IPA water body was quite different. The P at the front of water tank diffused from the sediment to overlaying water, while the P at the rear end of water tank collected from overlaying water into sediment. (2) In the middle and later stage of aquaculture, different phosphorus forms in the sediment at the back of IPA tank gradually decreased with the increase of distance, which were lower than those in the UPA. TP, IP, OP and Fe/AL-P increased significantly with the proceeding of agriculture under both modes, while Ca-P showed a trend of first decreasing and then increasing. (3) In the UPA mode, phosphorus was basically absorbed by the sediment, while in the IPA mode, phosphorus release flux varied greatly with time and space. In the early stage of aquaculture, phosphorus was absorbed at the front end of water tank, and a small amount of phosphorus was released within 10 m from the back end of water tank. In the middle or late stages of aquaculture, a large amount of phosphorus were released from sediment within 10 m from the back end of water tank. At 20 m and 30 m from the rear end, the initial phosphorus flux was small, and phosphorus was absorbed in the middle stage of agriculture, and phosphorus was released at the end of aquaculture. (4) The relationship between phosphorus flux and environmental factors was generally consistent in both models. There was a significant positive correlation between TP/IP release flux and pH, while there was a significant negative correlation between release flux for forms of phosphorus and sediment Eh. The increase of T significantly promoted the release of various inorganic forms of phosphorus. IPA sediment was significantly different in time and space. Sediments were mainly distributed within 10 m from the rear end of water tank, and a large amount of P was released upward into the overlying water in the middle or late stage of aquaculture. This study provides a theoretical support for improving solid particle interception method, promoting efficiency for collection of residual bait and feces, and regulating aquaculture water environment under IPA mode.

Key words: Inner-circulation pond aquaculture (IPA); Overlying water; Sediment; Interstitial water; Phosphorus content; Release flux