

稻虾轮作退水对小流域水污染的污染源贡献

徐 浩 邓 燕 兰道军 石岚梅
成都水自清环保科技有限公司 四川 成都 610000

摘 要：稻虾轮作作为长江中下游地区重要的生态农业模式，其退水排放的面源污染问题日益凸显。本研究以四川丘陵区某典型小流域为对象，基于2023—2025年连续监测数据，系统分析了稻虾退水中化学需氧量（COD_{Cr}）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）、总磷（TP）和氨氮（NH₃-N）的污染特征，并定量估算了其对流域污染的贡献。结果表明：（1）COD_{Mn}和COD_{Cr}是首要超标污染物，平均浓度分别为7.0mg/L和35mg/L，超标率分别约为45%和显著超标，部分点位COD_{Cr}超标达5.6倍；（2）高蛋白饲料投喂（亩均200-300斤/年）是有机物的主要来源，集中排水期（4月下旬）为污染流失关键风险时段；（3）研究区稻虾退水COD年排放量约为7.03t，对流域COD负荷的贡献率约为3%-8%，但在集中排水期可短期上升至25%以上；（4）等标污染负荷分析显示，COD_{Cr}和COD_{Mn}合计占比超过70%。在此基础上，提出了“源头减量—过程拦截—末端治理”相结合的小流域污染管控对策。

关键词：稻虾轮作；退水；化学需氧量；污染源贡献；小流域；面源污染

引言

稻虾综合种养通过水稻种植与小龙虾养殖的有机结合，实现“一田双收、稳粮增效”，全国面积已超千万亩，成为长江中下游重要农业产业。然而，规模扩张导致退水排放的水环境问题日益凸显。稻虾轮作（RCS）是主要模式之一，其氮磷流失关键期为成虾收获排水期，且有机物污染（以COD_{Mn}和COD_{Cr}表征）同样值得关注^[1]。已有研究显示，稻虾轮作尾水中COD浓度显著高于稻田单作，COD排污系数远高于总磷和氨氮，有机物为主要污染贡献因子。不过，现有工作多集中于江汉平原等典型区域，西南丘陵区小流域的相关系统研究尚较薄弱。本文以四川丘陵区某典型小流域为对象，基于2023—2025年监测数据，结合生产流程与投入品特征，系统分析稻虾退水COD_{Cr}、COD_{Mn}等污染物的时空分布，定量估算其对流域污染贡献率，旨在为稻虾产业绿色发展和小流域水环境改善提供科学依据。

1 研究区概况与数据方法

1.1 研究区概况

研究区位于典型丘陵地带，属小流域范畴，集雨面积约350km²，河道总长约60km。区域内以稻虾轮作作为主要种养模式，总面积约3000亩（200hm²）。其完整的生产流程为：头年10月种植水草（苦草、伊乐藻等）→11月投放虾苗（密度30-50斤/亩）→1-3月投喂高蛋白饲料（亩均200-300斤）→3月底开始成虾捕捞→4月底集中排水晒田→5月至9月初种植水稻→9月初水稻收获后晒田消毒，进入下一周期。

1.2 数据来源

水质监测数据来源于2023年6月至2025年12月对研究区各稻虾养殖点位退水的连续采样，监测指标包括氨氮（NH₃-N）、总磷（TP）、高锰酸盐指数（COD_{Mn}）和化学需氧量（COD_{Cr}）。评价标准参照《地表水环境质量标准》（GB3838-2002）Ⅲ类（NH₃-N ≤ 1.0mg/L，TP ≤ 0.2mg/L，COD_{Mn} ≤ 6mg/L，COD_{Cr} ≤ 20mg/L）。

1.3 污染源贡献估算方法

采用排污系数法估算稻虾退水年污染负荷，排污系数主要参考陶玲等的研究结果（COD35.132kg/t，TP0.458kg/t，NH₃-N1.405kg/t）。研究区稻虾年产量按亩产130-150斤估算。流域污染贡献率的估算参考了同类小流域研究成果。等标污染负荷比的计算公式为：

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \times Q$$

其中，P_i为第i种污染物的等标污染负荷，C_i为排放浓度，S_i为评价标准限值，Q为排水量。

2 稻虾退水污染特征分析

2.1 高锰酸盐指数（COD_{Mn}）污染特征

COD_{Mn}是稻虾退水中最为突出的污染物之一。监测期间，其浓度范围为2.3-38.8mg/L，平均值约为7.0mg/L，超标率约为45%。时间序列上，COD_{Mn}浓度呈现与轮作周期高度吻合的季节性波动。2025年污染显著加剧，4月22日龙元稻虾COD_{Mn}高达22.6mg/L（超标2.8倍），5月阳春稻虾达38.8mg/L（超标5.5倍），8月坤华稻虾达27.9mg/L（超标3.7倍）^[2]。这一峰值与4月下旬虾季结束后的集中排水期高度一致，大量富含饲料残渣和排泄物的水体集中排入河道所致。空间上，不同养殖单

元差异显著,管理规范的阳春稻虾浓度相对较低,而光林稻虾、龙元稻虾等点位则频繁出现高值。

2.2 化学需氧量(COD_{Cr})污染特征

COD_{Cr}监测数据进一步证实了有机物污染的严重性。其浓度范围为9-131mg/L,平均值约为35mg/L。时间变化与CODMn高度同步,2025年4月22日龙元稻虾COD_{Cr}高达131mg/L(超标5.6倍),8月坤华稻虾达104mg/L(超标4.2倍)。值得注意的是,COD_{Cr}的超标倍数通常高于CODMn,说明退水中有机物以较难被高锰酸钾氧化的复杂有机质为主,这可能与饲料中蛋白质和脂肪类成分的降解产物有关。

2.3 总磷与氨氮污染特征

总磷(TP)是次要对标超标污染物,浓度范围为0.005-2.725mg/L,平均值约0.220mg/L。2025年污染同样加剧,4月22日龙元稻虾TP高达2.725mg/L(超标12.6倍)。氨氮(NH₃-N)整体达标情况较好,多数监测值在0.1-0.6mg/L之间,但在极端污染事件中(如2025年4月22日龙元稻虾,氨氮达1.542mg/L)仍可出现超标^[3]。总磷和氨氮的时间分布与有机物指标高度一致,说明其具有同源性,均主要来源于饲料投入和生物代谢。

3 稻虾退水污染源贡献分析

3.1 稻虾退水污染负荷估算

基于排污系数法,若研究区年产虾量按200t估算,则COD年排放量约为7.03t,总磷约0.092t,氨氮约0.281t。若采用基于地表径流流失系数的交叉验证法,参考陈玲等的研究(总磷年均流失量 $3.28\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)并按比例推算,COD年流失总量约为50.3t,显著高于排污系数法估算值。差异主要源于径流流失系数涵盖了整个轮作周期,且集中排水时瞬时负荷极高^[4]。综合判断,研究区稻虾退水COD年排放量约为7.0-50t,取较保守的7.03t作为年总量基准。

3.2 饲料投入的有机物输入分析

饲料投喂是污染物的最主要来源。研究区年饲料投入总量约375t(按亩均250斤计),其中粗蛋白约150t,脂肪约45t。据估算,约30%-50%的饲料有机质(约135t)以残饵和粪便形式进入养殖环境,最终在集中排水期排入河道,直接导致CODMn和COD_{Cr}浓度飙升。

3.3 稻虾退水对流域污染的贡献率

参考同类小流域研究成果,研究区流域COD年负荷约为700-1,750t。据此估算,稻虾退水COD对流域年负荷的贡献率约为0.4%-1.0%(基于7.03t)或2.9%-7.2%(基于50.3t)。综合判断,其年贡献率约为3%-8%。但需特别指出,在集中排水期(4月下旬),大量高浓度有机废

水排入正处于枯水期的河道,其瞬时贡献率可短期上升至25%以上,对流域水质构成显著冲击。

3.4 主要污染物等标污染负荷分析

采用等标污染负荷法,以Ⅲ类标准限值为基准,根据监测数据平均浓度计算:CODMn为标准值的1.17倍,COD_{Cr}为1.75倍,TP为1.10倍,NH₃-N为0.35倍。估算结果显示,COD_{Cr}和CODMn的等标污染负荷合计占稻虾退水总等标污染负荷的70%以上,是有机物污染的主要贡献因子,也是污染控制的关键目标。

4 稻虾退水污染的影响因素

稻虾退水污染是多种因素共同作用的结果。(1)饲料投喂与养殖密度:高蛋白、高脂肪饲料的大量投入是根本原因,养殖密度直接决定污染负荷。(2)集中排水制度:“4月底全部放空晾晒”的生产制度是导致污染集中释放的直接原因,形成冲击负荷。(3)小流域水文条件:研究区属丘陵小流域,河道枯水期稀释能力有限,加剧了污染物的累积效应。(4)水草的生态净化功能:尽管种植了水草,但其对有机物的直接去除能力有限,且在排水时连同水体一同排走,净化功能未能充分发挥。

5 小流域稻虾退水污染管控对策

5.1 源头减量:优化饲料投喂与养殖密度

(1)精准投喂,减少饲料浪费。根据小龙虾不同生长阶段的摄食需求,实施分阶段精准投喂,避免过量投喂。建议将饲料投喂量从当前的1~2斤/天/亩优化为根据摄食情况动态调整,减少残饵量。(2)推广环保饲料。在保证小龙虾生长需求的前提下,使用高消化率、低流失率的环保饲料,从源头减少有机物和氮磷的输入。尤其应关注饲料的在水中的稳定性,减少饲料溶失带来的有机污染。(3)优化虾苗投放密度。建议将虾苗投放密度控制在每亩30~40斤(80~100个/斤)的合理范围内,避免盲目追求高密度养殖带来的高污染风险。同时推广“繁养分离”技术,减少因自繁自育导致密度失控带来的饲料过度投入。

5.2 过程拦截:优化排水制度与建设生态拦截系统

(1)实施错峰排水。改变“集中放空”的排水方式,推行分批次、错峰排水,避免污染物在短时间内集中排入河道。可要求养殖单元在排水前将尾水在塘内或生态净化塘中暂存7~10天,利用自然降解降低有机物浓度后再排放。(2)建设生态拦截沟渠。在养殖单元与河道之间建设生态拦截沟渠,利用植物吸收、微生物降解和土壤吸附等协同作用去除退水中的有机物和氮磷污染物^[5]。(3)推广“三池两坝”尾水治理。通过沉淀池、过滤坝、曝气池、生物净化池等设施的组合,对养殖尾

水进行生态化处理,重点降低COD_{Cr}和COD_{Mn}浓度。曝气池的设置对于加速有机物好氧降解尤为关键。

5.3 末端治理:强化监测预警与应急管控

(1) 建立集中排水期专项监测机制。在4月中下旬集中排水期加密监测频次,重点监控COD_{Cr}、COD_{Mn}和溶解氧指标,及时掌握水质动态,发现超标及时预警。(2) 实施排水报备与尾水检测制度。要求养殖主体在集中排水前向主管部门报备,排水前进行尾水检测(尤其关注COD_{Cr}),确保达标排放;对超标排放的养殖单元依法依规处理。(3) 制定区域尾水排放标准。围绕养殖品种、养殖密度、饲料投喂等内容制定稻虾综合种养技术标准和尾水排放标准,明确COD_{Cr}和COD_{Mn}的排放限值。

5.4 基于研究区的具体建议

针对本研究区的实际情况,建议:(1) 分区管控。根据各养殖单元的历史监测数据,将光林稻虾、龙元稻虾、肖家虾塘等COD_{Mn}和COD_{Cr}高频超标点位划为重点管控区,实施差异化管理,优先推进尾水治理设施建设。(2) 总量控制。基于流域水环境容量测算和有机物降解耗氧需求,确定稻虾退水COD和COD_{Mn}排放总量控制目标,将减排任务分解到各养殖单元。(3) 生态补偿与激励。对主动建设尾水处理设施、实现达标排放或循环利用的养殖主体给予政策支持和资金奖补。(4) 推进稻虾轮作模式优化。借鉴“稻-鸭-虾”“稻-鱼-虾”等生态种养模式的经验,引入鸭、鱼等辅助生物,利用其摄食残饵和活动增氧,降低养殖水体中有机物和氮磷含量。同时探索“半封闭循环水养殖”模式,减少尾水外排。

6 结论

(1) 稻虾退水中COD_{Mn}和COD_{Cr}是首要超标污染物,其平均浓度分别为7.0mg/L和35mg/L,部分点位COD_{Cr}超标达5.6倍,总磷和氨氮在极端事件中亦可出现复合型超标。(2) 高蛋白饲料投喂是主要污染来源,年饲料投入约375t,大量有机质以残饵和粪便形式进入水体。(3) 研究区稻虾退水COD年排放量约7.03t,对流域COD年负荷贡献率约为3%-8%,但在集中排水期(4月中下旬)可短期上升至25%以上,对河道水质构成显著冲击。(4) 等标污染负荷分析表明,COD_{Cr}和COD_{Mn}合计占稻虾退水总等标污染负荷的70%以上,是污染控制的关键因子。(5) 建议构建“源头减量—过程拦截—末端治理”三位一体的管控体系,重点加强集中排水期监测预警,优化饲料投喂,推广尾水生态治理设施,以实现稻虾产业与流域水环境保护的协同发展。

参考文献

- [1]陶玲,彭亮,代梨梨,等.稻虾轮作模式面源污染排放特征及其能值评估[J].湖泊科学,2023,35(1):168-180.
- [2]陈玲,范先鹏,黄敏,等.江汉平原稻虾轮作模式地表径流氮、磷流失特征[J].农业环境科学学报,2022.
- [3]张怡杰,庄艳华,张沁菁,等.江汉平原典型稻虾综合种养模式氮磷流失特征及风险[J].湖北农业科学,2024,63(9):28-34.
- [4]胡艳平,等.四湖总干渠水量水质特征及其对农业种养模式变化的响应[C].第九届青年地学论坛,2024.
- [5]小龙虾养殖废水排放特征研究[J].江苏农业科学.