

金 晶, 毛 星, 戴红君, 等. 基于分布滞后非线性模型的蟹塘水质受投喂量影响的关系分析[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(4): 994-1002.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2022.04.016

基于分布滞后非线性模型的蟹塘水质受投喂量影响的关系分析

金 晶, 毛 星, 戴红君, 刘 杨, 任 妮

(江苏省农业科学院信息中心, 江苏 南京 210014)

摘要: 为明晰投喂量与蟹塘水质变化之间的关系, 基于 2020 年宜兴市中华绒螯蟹养殖试验池塘的水质、气象和投喂数据, 采用分布滞后非线性模型分析饲料投喂量对溶解氧质量浓度、pH 值等 6 个水质指标的影响。结果表明: 水质变化与饲料投喂量之间存在长期滞后效应。相对于投喂量的中位数, 在高投喂量下, 溶解氧质量浓度在 75% 的观测点呈现显著减少的趋势, 滞后期内最大负效应达 -1.781 mg/L (95% 置信区间: $-2.916 \sim -0.647 \text{ mg/L}$)。氨氮质量浓度、电导率、pH 值在部分滞后期显著减小, 浊度显著上升。在低投喂量下, 氨氮质量浓度和浊度在部分滞后期显著增加, 其余指标显著减少。但高、低两种投喂量情景下叶绿素质量浓度变化的滞后效应均不显著。另外, 同一深度不同位置及同一位置不同深度的溶解氧质量浓度受投喂量影响的滞后效应模式有所不同。研究结果可为生产环境下投喂量对水质变化的影响分析和水质调节策略制定提供支撑。

关键词: 饲料投喂; 水质; 中华绒螯蟹; 分布滞后非线性模型

中图分类号: S966.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2022)04-0994-09

Analysis of the relationship between water quality of crab pond and feeding amount of feedstuff based on distributed lag non-linear model

JIN Jing, MAO Xing, DAI Hong-jun, LIU Yang, REN Ni

(Information Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To understand the relationship between feeding amount of feedstuff and water quality variation in crab pond, impacts of feeding amount of feedstuff on six water quality indicators including mass concentration of dissolved oxygen, pH value, mass concentration of ammonia nitrogen, mass concentration of chlorophyll, turbidity and conductivity were analyzed by using distributed lag non-linear model, based on data including water quality, weather and feeding from the experimental pond for *Eriocheir sinensis* breeding in Yixing City in 2020. The results showed that, there was a long-term lag effect between water quality change and feeding amount of feedstuff. Compared with the median feeding amount, under the condition of high feeding amount, mass concentration of dissolved oxygen showed significant decrease trend in 75% of all the observation points and the maximum negative effect during the lag period reached -1.781 mg/L (95% confidence interval: $-2.916 \sim -0.647 \text{ mg/L}$). Mass concentration of ammonia nitrogen, conductivity and pH value decreased significantly, while turbidity increased significantly during part of the lag periods. Under the condition of low feeding amount, concentration of ammonia nitrogen and turbidity increased significantly, while other indices decreased significantly during part of the lag periods. However, the lag effect of high or low feeding amount on

mass concentration change of chlorophyll was not significant.

In addition, the lag effect modes for the mass concentration of dissolved oxygen at the same depth of different positions and at the same position of different depths affected by feeding amount were different. This results can support analysis of the impact of feeding on water quality changes in the production

收稿日期: 2021-12-13

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(19)1003]

作者简介: 金 晶 (1993-), 女, 江苏南京人, 博士, 助理研究员, 主要从事农业大数据分析利用研究。(E-mail) 20210101@jaas.ac.cn

通讯作者: 任 妮, (E-mail) m@jaas.ac.cn

environment and making strategies for water quality adjustment.

Key words: feedstuff feeding; water quality; *Eriocheir sinensis*; distributed lag non-linear model

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*),俗名大闸蟹,是中国淡水养殖的重要水产品种,因其风味独特、营养丰富而受到消费者的喜爱^[1-2]。2020年全国中华绒螯蟹养殖面积超过 $6.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$,总产量达到 $7.8 \times 10^5 \text{ t}$ ^[3-4]。中华绒螯蟹养殖产业已成为渔业养殖的重要收入来源,对乡村振兴战略的实施具有积极意义^[5]。中华绒螯蟹养殖对环境要求较高,在高密度养殖的背景下,投喂方式直接影响养殖对象的产量和品质,并可能对养殖区域的生态环境造成威胁^[6-7]。因此,明确中华绒螯蟹的饲料投喂对养殖水质的影响,能够降低养殖风险,对水质的及时调节和中华绒螯蟹的标准化、绿色化生产具有重要意义。

饲料投喂对中华绒螯蟹个体生长和养殖水体水质有重要影响。目前,中华绒螯蟹养殖主要用杂鱼、玉米、小麦、大豆和油饼等传统饲料投喂^[8],但由于供应不稳定、营养不均衡、携带病原体等原因,这种投喂方式会引起池塘水质恶化、中华绒螯蟹疾病暴发等严重问题^[9-11]。当投喂量不足时,中华绒螯蟹的生长受限,经济效益降低^[12];当投喂量过高时,中华绒螯蟹无法全部摄食,残留的饵料会腐败变质,造成水体污染和中华绒螯蟹生长受限等负面影响^[13]。水温、溶解氧质量浓度、pH值等作为评价水体质量的重要指标^[4],对中华绒螯蟹养殖有重要影响。其中,针对溶解氧的研究最为广泛,其与中华绒螯蟹生存和饲料利用息息相关^[14-15]。也有研究关注叶绿素、pH值和水温等其他参数^[16-18]。另外,许多水质参数之间存在相互作用^[19],例如氮、磷和有机质的养分负荷量过多时,会增大需氧量和有毒代谢物浓度,导致溶解氧含量降低和水体富营养化^[20]。

目前,已有研究者提出了基于溶解氧、pH值等参数的投喂策略^[21-22],分析了不同饲料配比对中华绒螯蟹生长的影响^[10-11],但关于投喂对水质影响的研究相对较少。王海候等^[6]分析了螺蛳投喂量对中华绒螯蟹产量的影响,发现投喂量过多或过少均对中华绒螯蟹生长不利。针对对虾养殖的研究则发现,过高的投喂频率不但无法显著提高对虾的饲料利用效率,反而污染了水体环境^[7];饶毅等^[23]认为生物絮团技术显著改善了草鱼养殖水质。上述研究多是通过控制试验的方法分析不同投喂策略、投喂频率对养殖水质的

影响,但当前中国的中华绒螯蟹养殖仍处在经验养殖阶段,普通农户的投喂策略以经验判断为主,实际生产环境下的饲料投喂对养殖水质的影响尚不明晰。此外,中华绒螯蟹投喂行为对水质的影响存在一定的滞后效应,而现有研究大多未考虑滞后效应。Gasparini等^[24]以广义线性模型和广义加法模型等传统模型的思想为基础,阐述了分布滞后非线性模型(Distributed lag non-linear models, DLNM)理论,适用于投喂与水质变化之间的滞后效应研究。

本研究基于2020年江苏省宜兴市高塍镇中华绒螯蟹水产养殖试验示范基地中2个试验池塘的水质、气象和养殖投喂数据,在考虑滞后效应的基础上,采用分布滞后非线性模型,以溶解氧、pH值、氨氮等6个指标表征养殖水质情况,分析饲料投喂后养殖水质变化,以探讨实际生产环境下中华绒螯蟹饲料投喂量对养殖水质的影响,为中华绒螯蟹养殖过程中水体环境的及时调节和中华绒螯蟹养殖产业的可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据采集

中华绒螯蟹是江苏省宜兴市的特色水产养殖品种,具有养殖面积大、产量高、效益好等特点。本研究所用数据采集自2020年江苏省宜兴市高塍镇中华绒螯蟹水产养殖试验示范基地的2个试验池塘,分别由2个养殖户经营管理(图1),其中1号池塘面积为 2.17 hm^2 ,2号池塘面积为 0.94 hm^2 。

蟹塘水质数据来自池塘中布设的传感器。在各池塘选取4个位置,取距离水底30 cm、60 cm和90 cm处作为布设点,每个池塘分别布设12个传感器(图1,表1),用于监测溶解氧质量浓度、叶绿素质量浓度、浊度、氨氮质量浓度、水温、pH和电导率。数据采集间隔时间为10 min,2020年中华绒螯蟹生长季数据量总计1 602 400条。气象数据来源于试验池塘附近建立的小型气象站,用于监测大气温度、大气压强、空气湿度、雨量、太阳辐射、风速和风向,数据采集间隔时间为1 min,数据量总计481 456条。

中华绒螯蟹投喂数据为2个试验池塘的养殖户通过“与蟹同行”小程序上传获得,每条数据均有专

业人员进行人工审核,确保数据的可靠性。1 号池塘共有 201 条投喂记录,2 号池塘共有 207 条投喂记录,涉及投喂的饲料类型、投喂时间、投喂量、饲料的采购价格、采购渠道,以及人工审核情况。

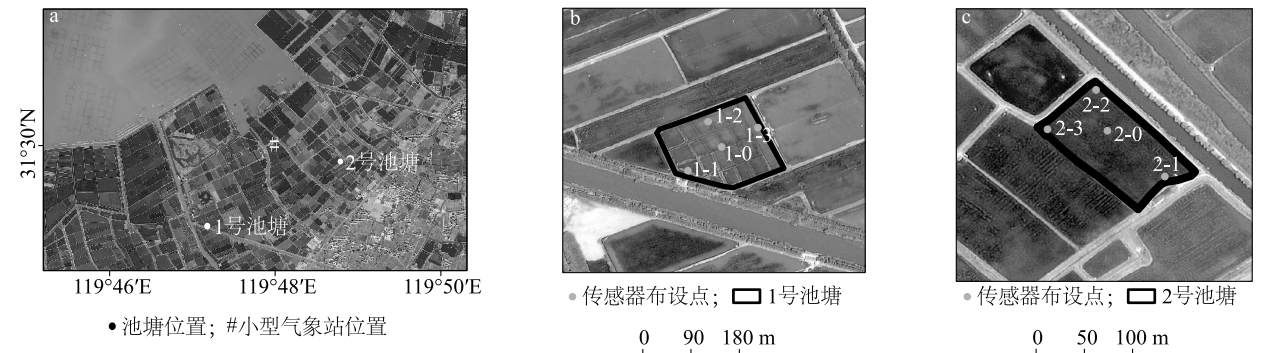


图 1 试验池塘分布及传感器布设
Fig.1 Distribution of the experimental ponds and the layout of sensors

表 1 各观测点采集的数据类型

Table 1 Types of data collected at each observation point

布设点	位置	传感器采集的数据类型
1-0/2-0	上	溶解氧质量浓度、水温、叶绿素质量浓度、浊度
	中	溶解氧质量浓度、水温、叶绿素质量浓度、浊度、氨氮质量浓度、pH、电导率
	下	溶解氧质量浓度、水温、叶绿素质量浓度、浊度
1-1/2-1	上	溶解氧质量浓度、水温
	中	溶解氧质量浓度、水温
	下	溶解氧质量浓度、水温
1-2/2-2	上	溶解氧质量浓度、水温
	中	溶解氧质量浓度、水温
	下	溶解氧质量浓度、水温
1-3/2-3	上	溶解氧质量浓度、水温
	中	溶解氧质量浓度、水温
	下	溶解氧质量浓度、水温

布设点位置见图 1。

1.2 数据融合与处理

由于投喂数据在采集时已进行人工审核,因此数据清洗主要针对气象和水质数据。根据各类设备采集数据的参数范围(表 2),判断气象观测和水质监测时序数据中的异常值,并识别可能由于网络波动、设备异常等原因导致的长时间数值唯一且异常的情况,将数据集中的异常值作为缺失值对待。由于水产传感器的稳定性较差,而水质指标往往受到气象、投喂、增氧泵设备运转等多种因素影响,直接对缺失值进行填补可能会对模型结果带来较大不确定性,因此研究中只选择连续、没有缺失的数据集进行模型构建。在后续研究中,气象和水质观测数据均通过取平均值的

方法统一至以天作为时间分辨率。

表 2 传感器和小型气象站设备型号及参数

Table 2 Device types and parameters of sensors and small weather stations

参数类型	指标	规格型号	参数范围
水质参数	溶解氧质量浓度	江苏中农混合传感器	0~20 mg/L
	水温	江苏中农混合传感器	0~45 ℃
	pH	Chemins PHG-202	0~14
	氨氮质量浓度	Chemins NHN-202	0~100 mg/L
	浊度	Chemins ZS-206	0~200 NTU
	电导率	Chemins DDM-202	0~5 000 μS/cm
气象参数	叶绿素质量浓度	Chemins CHLO-206	0~400 μg/L
	大气温度	FR-TS	-50~100 ℃
	大气湿度	FR-HS	0~100% RH
	风速	FR-WS	0~70 m/s
	风向	FR-WD	0°~360°
	气压	FR-PS	300~1 100 hPa
	降雨量	FR-YL02	0~4 mm/min
	太阳辐射	FR-STR	0~2 000 W/m ²

NTU: 散射浊度单位; RH: 相对湿度。

1.3 DLNM 模型的构建

选取溶解氧质量浓度、叶绿素质量浓度、浊度、氨氮质量浓度、pH 和电导率 6 个指标表征水体环境情况,对每个池塘中 12 个传感器监测的每组水质数据分别进行分析。考虑到观测的 7 个气象因素之间可能存在多重共线性,且各水质指标并非均与所有气象因素相关,为了保证 DLNM 模型构建时参数选择的合理性,先建立各水质参数与气象因素的最小二乘线性回归模型,即:

$$y_{\text{index}} = \beta_1 x_{\text{temperature}} + \beta_2 x_{\text{pressure}} + \beta_3 x_{\text{radiation}} + \beta_4 x_{\text{windspeed}} + \beta_5 x_{\text{winddirection}} + \beta_6 x_{\text{precipitation}} + \beta_7 x_{\text{humidity}} + \beta_0 + e$$

式中, y_{index} 表示水质参数, $x_{\text{temperature}}$ 表示大气温度, x_{pressure} 表示气压, $x_{\text{radiation}}$ 表示太阳辐射, $x_{\text{windspeed}}$ 表示风速, $x_{\text{winddirection}}$ 表示风向, $x_{\text{precipitation}}$ 表示雨量, x_{humidity} 表示大气湿度, $\beta_0 \sim \beta_7$ 表示回归参数, e 表示残差。

通过逐步回归方法,基于 AIC 准则选取气象因素组合,并基于方差膨胀系数进行共线性检验,确保方差膨胀系数小于 10,在排除多重共线性的同时保证模型具有较好的解释性,进而确定引入各个 DLNM 模型的气象指标。

在 DLNM 模型构建中,根据已有研究结果,投喂量数据的基函数选择自然样条函数,滞后维度的基函数选择多项式函数,气象参数选用自由度为 3 的自然样条函数进行拟合^[25-26]。通过分别拟合 7~40 期不同滞后天数的 DLNM 模型并计算改进的赤池信息准则 (Quasi-Akaike information criterion, QAIC) 和改进的贝叶斯信息准则 (Quasi-Bayesian information criterion, QBIC) 2 个指标,选择其中指标值最小时所对应的滞后期作为 DLNM 模型的最大滞后

表 3 各水质参数相关的气象指标

Table 3 Meteorological indicators related to each water quality parameter

水质参数	回归方程
溶解氧质量浓度	$y = -0.43x_{\text{temperature}} - 0.06x_{\text{pressure}} - 0.03x_{\text{radiation}} + 0.06x_{\text{windspeed}} + 0.11x_{\text{winddirection}} - 0.02x_{\text{precipitation}} - 0.15x_{\text{humidity}}$
pH	$y = -0.52x_{\text{temperature}} - 0.43x_{\text{pressure}} + 0.04x_{\text{radiation}} + 0.12x_{\text{winddirection}} - 0.14x_{\text{precipitation}} - 0.15x_{\text{humidity}}$
氨氮质量浓度	$y = -0.38x_{\text{temperature}} - 0.17x_{\text{radiation}} + 0.07x_{\text{winddirection}} - 0.09x_{\text{precipitation}} - 0.10x_{\text{humidity}}$
电导率	$y = -0.43x_{\text{temperature}} - 0.19x_{\text{pressure}} + 0.06x_{\text{radiation}} + 0.12x_{\text{windspeed}} + 0.04x_{\text{winddirection}} - 0.10x_{\text{precipitation}} - 0.11x_{\text{humidity}}$
叶绿素质量浓度	$y = -0.04x_{\text{pressure}} + 0.16x_{\text{radiation}} + 0.06x_{\text{winddirection}} - 0.06x_{\text{precipitation}}$
浊度	$y = 0.33x_{\text{temperature}} + 0.46x_{\text{pressure}} + 0.04x_{\text{radiation}} - 0.12x_{\text{winddirection}} - 0.04x_{\text{precipitation}} + 0.05x_{\text{humidity}}$

$x_{\text{temperature}}$: 大气温度; x_{pressure} : 气压; $x_{\text{radiation}}$: 太阳辐射; $x_{\text{windspeed}}$: 风速; $x_{\text{winddirection}}$: 风向; $x_{\text{precipitation}}$: 雨量; x_{humidity} : 大气湿度。

2.2 饲料投喂量对蟹塘水质的影响

2.2.1 饲料投喂与 DLNM 建模数据概况 2020 年生长季中,2 个中华绒螯蟹养殖试验池塘的主要投喂饲料类型包括冰鱼、蛋白质饲料和玉米,其中 1 号池塘全生长季 3 种饲料的投喂量占比分别为 87.8%、9.0% 和 3.2%;2 号池塘 3 种饲料投喂量占比分别为 72.0%、23.2% 和 4.8%,另有少量的复合型益生菌。

在 DLNM 模型建模过程中,不同观测点引入建模的数据量各不相同。每个池塘所观测的 6 项水质指标共可生成 21 组数据。1 号池塘分析用最小连续观测量为 55 条,最大值为 113 条;2 号池塘最小

天数。以溶解氧参数为例,基本模型如下:

$$y_{\text{Dissolve_oxygen}_t} = \alpha + \beta_1 \text{Feed}_{t,l} + ns_{(\text{Humidity},3)} + ns_{(\text{Temperature},3)} + ns_{(\text{Pressure},3)} + ns_{(\text{WindSpeed},3)} + ns_{(\text{WindDirection},3)} + ns_{(\text{Radiation},3)}$$

式中, t 表示观察时间 (d), $y_{\text{Dissolve_oxygen}_t}$ 是当日的溶解氧监测数值, α 是模型截距项, β_1 为日投喂量的交叉矩阵系数, $\text{Feed}_{t,l}$ 为利用每日投喂量建立的交叉基, ns 为自然样条, 3 为自由度。气象指标为筛选出的与溶解氧相关且不存在多重共线性的变量。建模过程中,参考谷少华等^[27]的方法,各 DLNM 模型均选取投喂量的中位数作为参考点,分别以投喂量的 99% 和 1% 分位数表征高和低投喂量情景。

数据的处理分析均在 R 4.1.0 环境下进行。线性回归分析基于 lm 程序包,广义线性模型构建基于 glm 程序包,DLNM 模型构建基于 dlnm 程序包^[28],时间序列数据的处理基于 tseries 和 lubridate 程序包。

2 结果与分析

2.1 气象参数的选择

根据最小二乘回归模型拟合结果,选择引入各水质参数 DLNM 建模过程的气象指标 (表 3)。

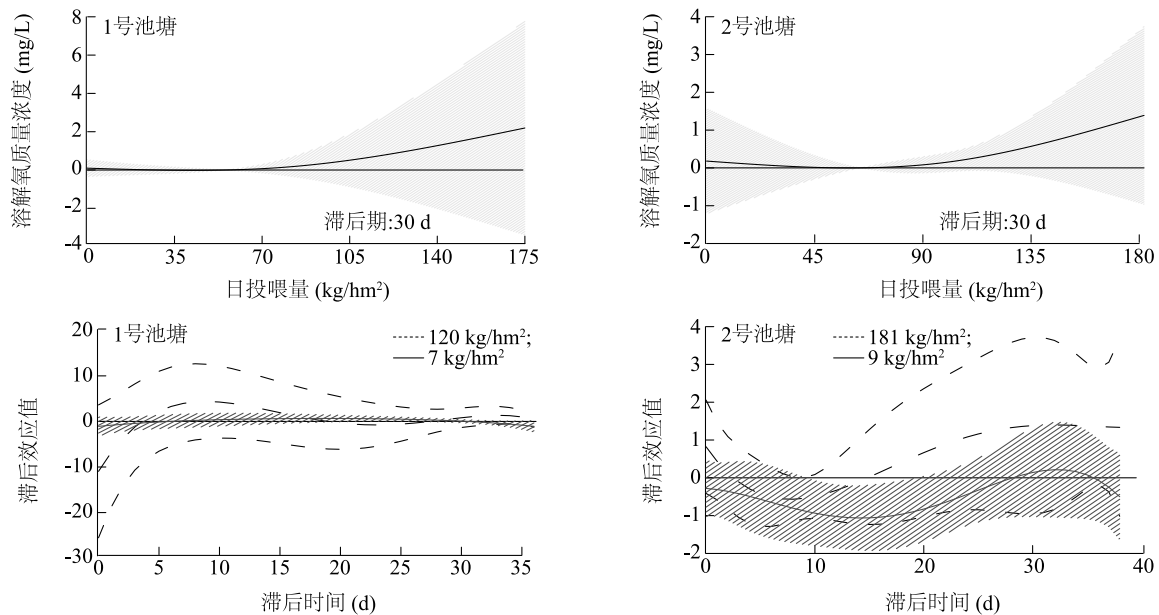
连续观测量为 63 条,最大值为 168 条,符合大样本要求。1 号池塘日投喂量参考点为 55 kg/hm²,99% 分位点为 120 kg/hm²,1% 分位点为 7 kg/hm²。2 号池塘日投喂量参考点为 64 kg/hm²,99% 分位点为 181 kg/hm²,1% 分位点为 9 kg/hm²。

2.2.2 饲料投喂量对蟹塘各水质指标变化的影响

由于各池塘 0 号点位中层 (即 0-2 号观测点) 监测了所有的水质指标,因此以该点对比分析各水质指标受投喂量的影响。对于溶解氧质量浓度,1 号池塘均值为 7.96 mg/L,标准差为 2.60 mg/L,DLNM 模型滞后期为 36 d;2 号池塘溶解氧质量浓度均值

为 7.66 mg/L, 标准差为 2.08 mg/L, 滞后期为 38 d, 表明投喂量对溶解氧质量浓度的影响具有长期滞后效应(图 2)。在 30 阶滞后情况下, 相对于参考值, 1 号和 2 号池塘不同投喂量对于溶解氧质量浓度的变化影响均不显著($P>0.05$)。当 1 号池塘投喂量由参考值降为 7 kg/hm² 时, 在 22 阶滞后期使溶解氧质量浓度升高了 0.614 mg/L (95% 置信区间: 0.001 ~

1.228 mg/L), 该正效应持续至第 25 阶, 效应值为 0.498 mg/L (95% 置信区间: 0.024 ~ 0.972 mg/L), 其余滞后期不显著。当 2 号池塘投喂量由参考值降为 9 kg/hm² 时, 在 10~19 阶滞后具有使溶解氧质量浓度降低的显著负效应, 其中最大负效应为 -1.063 mg/L (95% 置信区间: -1.917 ~ -0.208 mg/L), 但在高投喂量情景下各滞后期效应均不显著。



阴影和虚线区间部分为 95% 置信区间。

图 2 基于 DLNM 模型的各池塘 0-2 观测点投喂量与溶解氧质量浓度变化的滞后效应

Fig.2 Lag effects of feeding amount of feedstuff on the mass concentration variation of dissolved oxygen in each crab pond based on DLNM model at 0-2 observation point

对于 pH 值, 1 号池塘平均值为 7.94, 标准差为 0.23; 2 号池塘平均值为 8.40, 标准差为 0.48。在 30 阶滞后情况下, 相对于参考值, 2 号池塘仅在投喂量为 65 kg/hm² 及 76~141 kg/hm² 时对 pH 值变化的效应不显著, 在其余投喂量下均有显著负效应(图 3)。对于 2 号池塘, 低投喂量情景下滞后 40 d 的负效应值最大, 为 -0.17 (95% 置信区间: -0.264 ~ -0.076); 高投喂量情景下, 滞后 9~36 d 均显示出负效应, 最大负效应为 -0.096 (95% 置信区间: -0.159 ~ -0.032)。1 号池塘无论是在特定滞后期或是特定投喂量情景下效应均不显著。

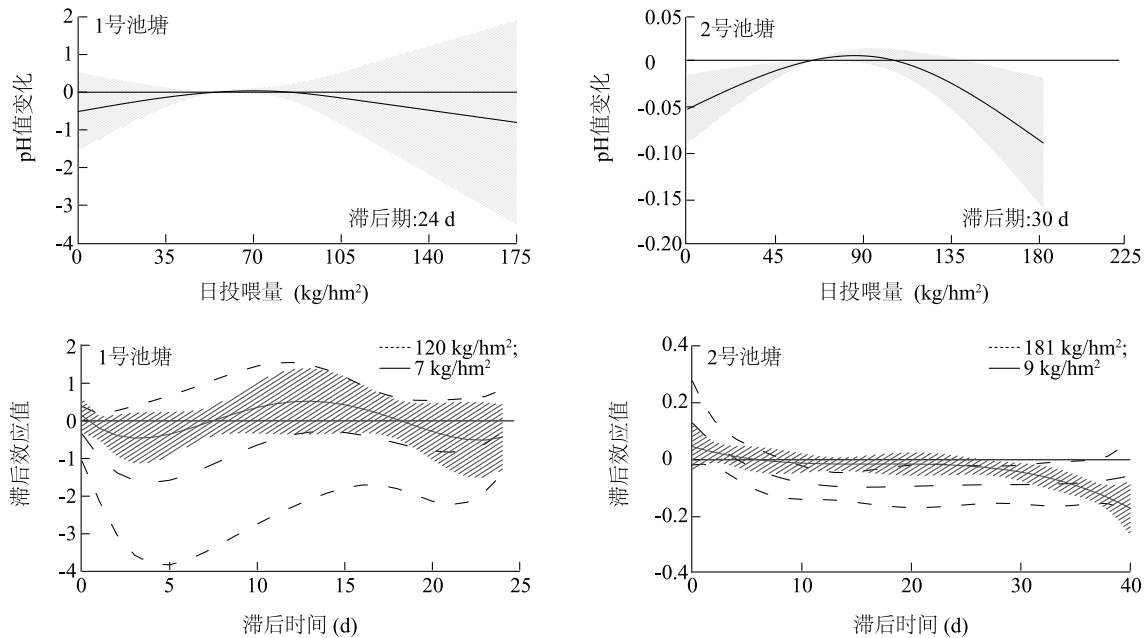
在高和低投喂量情景下, 不同水质参数对投喂的响应模式不同(表 4)。对于溶解氧质量浓度, 在高投喂量情景下, 各池塘在全滞后期无显著效应; 在低投喂量情景下, 1 号池塘在 36 期滞后中的 4 期 (11.1%) 具有显著正效应, 2 号池塘则在 38 期滞后

中的 10 期 (26.3%) 具有显著负效应。对于 pH 值, 2 号池塘在 2 种情景下均呈现显著负效应。对于氨氮质量浓度, 1 号池塘在高投喂量情景下出现 5 期显著负效应, 在低投喂量情景下 2 个池塘均在部分滞后期表现为显著正效应, 表明当投喂量较低时, 水体的氨氮质量浓度相对于参考值有显著上升。2 号池塘水体浊度和电导率受投喂行为的影响相对明显, 高、低投喂量情景下分别有 11 期 (32.4%) 和 15 期 (44.1%) 使水体浊度显著上升, 分别有 26 期 (66.7%) 和 14 期 (35.9%) 使电导率显著下降。2 种情景下饲料投喂量对叶绿素质量浓度变化均无显著效应。

由于在各池塘布设的 12 个观测点均有对溶解氧质量浓度的监测, 选用模型结果更显著的 2 号池塘分析不同观测点溶解氧质量浓度在各投喂量下的滞后效应(图 4)。1-3 和 3-3 2 个观测点模型结果均

不显著,无统计学意义。其余 10 个观测点中,由于饲料投喂对溶解氧质量浓度带来的显著正效应较少,负效应较多。当投喂量降低至 9 kg/hm^2 时,7 个观测点部分滞后期的溶解氧质量浓度指标呈显著负效应,且多出现在滞后期前中期(如 0-1 点)和后期(如 3-1 点)。其中,1-2 号点位的 10 阶滞后负效应最大,使得溶解氧质量浓度下降 1.731 mg/L (95% 置信区间: $-2.647 \sim -0.816 \text{ mg/L}$)。投喂量升高至 181 kg/hm^2 时,9 个观测点部分滞后期的溶解氧质

量浓度指标表现出显著负效应,该负效应多出现在前期和后期(如 0-1 点)。其中,滞后期数最多的点位为 0-1,在 5~10 期和 30~38 期共 15 期滞后,使溶解氧质量浓度显著降低。在所有观测点中,2-2 点位的 4 阶滞后期使溶解氧质量浓度下降的效应最大,下降了 1.781 mg/L (95% 置信区间: $-2.916 \sim -0.647 \text{ mg/L}$)。总体而言,同一深度不同位置及同一位置不同深度的溶解氧质量浓度滞后效应模式也有所不同,变化趋势没有明显规律。



阴影和虚线区间部分为 95% 置信区间。

图 3 基于 DLNM 模型的各池塘 0-2 观测点投喂量与 pH 值变化的滞后效应

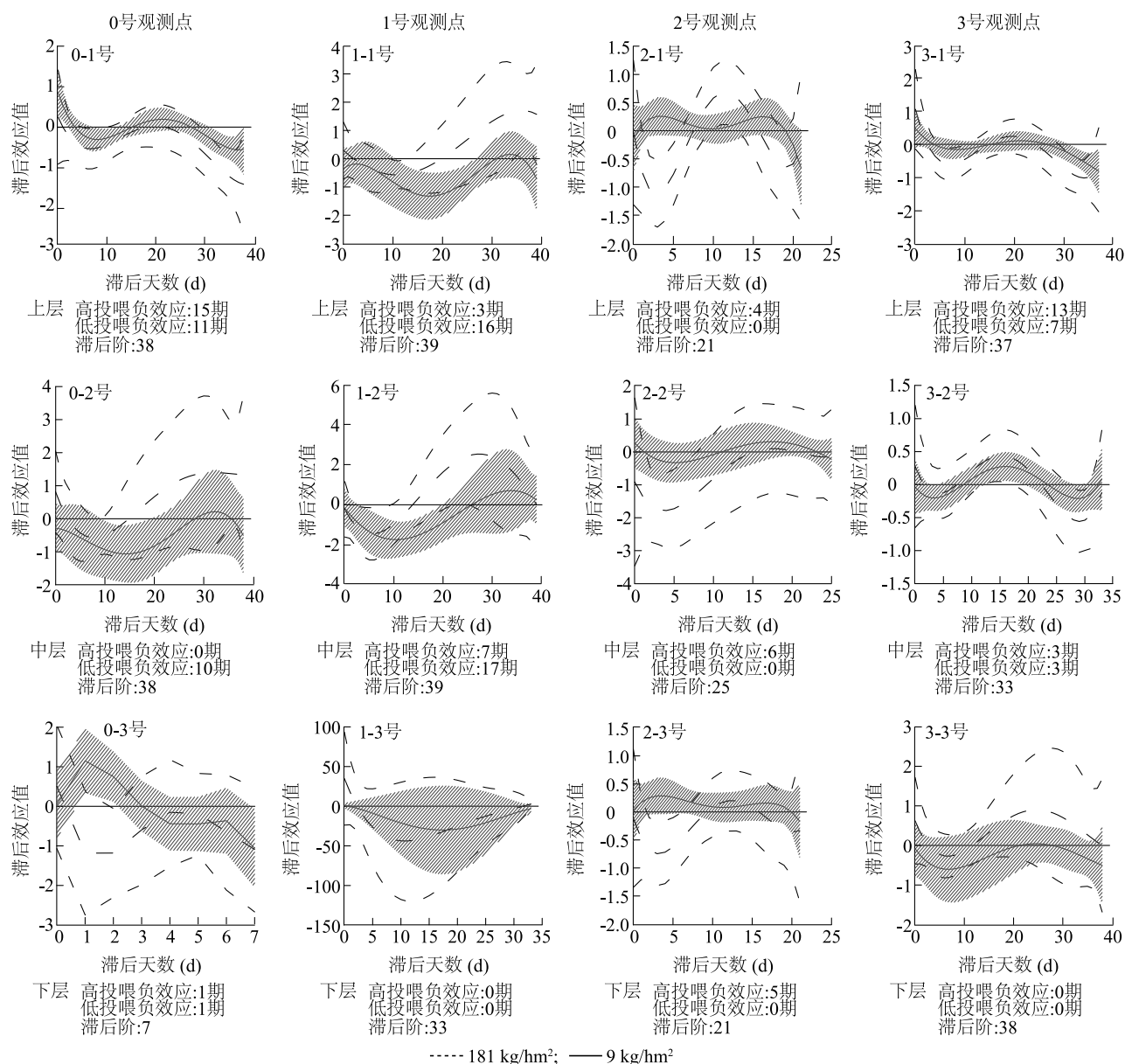
Fig.3 Lag effects of feeding amount of feedstuff on the pH value in each crab pond based on DLNM model at 0-2 observation point

表 4 各池塘 0-2 观测点水质在高、低投喂量情景下的滞后效应分析

Table 4 Analysis of the lag effects of the water quality under high or low feeding amount based on the data of 0-2 observation point in each pond

池塘	水质参数	高投喂量下的频数(期)		低投喂量下的频数(期)		模型滞后阶(d)
		显著正效应	显著负效应	显著正效应	显著负效应	
1 号	溶解氧质量浓度	0	0	4	0	36
	pH	0	0	0	0	24
	氨氮质量浓度	0	5	7	0	21
	浊度	0	2	2	0	8
	电导率	1	0	3	0	7
	叶绿素质量浓度	0	0	0	0	7
	溶解氧质量浓度	0	0	0	10	38
2 号	pH	0	28	0	14	40
	氨氮质量浓度	0	0	11	0	12
	浊度	11	6	15	0	34
	电导率	0	26	0	14	39
	叶绿素质量浓度	0	0	0	0	8

显著效应频数表示在对应的模型各滞后期中,投喂量相对于参考值的升高或降低使得水质参数在 95% 置信度下显著增大或减小的期数。



阴影和虚线区间部分为 95% 置信区间。

图 4 基于 DLNM 模型的 2 号池塘各观测点投喂量与溶解氧质量浓度变化的滞后效应

Fig.4 Lag effects of feeding amount of feedstuff on the mass concentration of dissolved oxygen in pond 2 based on DLNM model at each observation point

3 结论与讨论

本研究采用分布滞后非线性模型,在考虑滞后效应的基础上,基于 2020 年宜兴市中华绒螯蟹水产养殖试验示范基地的 2 个试验池塘数据,分析了生产环境下饲料投喂量对蟹塘水质的影响。研究结果可为生产环境下蟹塘水质的影响因素分析及水质调节策略的及时制定提供支撑。

研究发现,在高、低两种投喂量下,饲料投喂与蟹塘溶解氧质量浓度、pH、氨氮质量浓度、电导率、浊度的变化之间存在长期滞后效应,但与叶绿素质量浓度变化之间的关系不显著。在高投喂量情景下,相对于参考值,总体表现出氨氮质量浓度、电导率、pH 值在部分滞后期显著减少、浊度显著上升的趋势,其中溶解氧质量浓度在 75% 的观测点显著减少,滞后期内最大负效应达 -1.781 mg/L (95% 置信

区间: $-2.916 \sim -0.647$ mg/L)。已有研究者指出,中华绒螯蟹饲料投喂量较高时,饲料无法充分利用,残饵、粪便等使得水体浊度显著上升,随着有机物质分解和中华绒螯蟹摄食行为的增加,耗氧量和二氧化碳的排放量有所增加,导致溶解氧质量浓度和 pH 值显著降低^[13,20],这与本研究结论相一致。1 号池塘的氨氮质量浓度和 2 号池塘的电导率在后期显著减小,浊度在部分滞后期也表现出显著的负效应,这可能是由于养殖户在投喂量过大时会定期进行池塘改底等措施。试验池塘的用药记录显示,在中华绒螯蟹养殖过程中会使用特效芽孢杆菌、底居安、碧水安等药物降解水体中的有机物、氨氮等有害物质,从而使池塘氨氮质量浓度在投喂后 15~20 d、电导率在投喂后 30~40 d、浊度在投喂后 26~31 d 左右显著下降。在低投喂量情景下,相对于参考值,氨氮质量浓度和浊度在部分滞后期显著增加, pH 值显著减小。这与饵料不足时,螃蟹为寻觅食物在池塘底部淤泥处大量活动有关^[29]。另外,由于投喂量减少,残饵量相对减少,因此 2 号池塘的电导率在多个滞后期呈显著负效应。1 号池塘的溶解氧质量浓度在部分滞后期显著上升,但 2 号池塘在 7 个观测点均出现对溶解氧质量浓度的显著负效应,滞后期最大负效应达 -1.731 mg/L (95% 置信区间: $-2.647 \sim -0.816$ mg/L); pH 值的负效应多出现在滞后的后期,在滞后期前期虽然估计效应值并不显著,但相比于高投喂量情景效应值较小。这可能是由于投喂量减少后,前期溶解氧质量浓度上升、pH 值增高,养殖户基于较好的水质情况调整了投喂策略,增加了投喂量,使得后期又出现水质下降的趋势。

研究发现,同一深度不同位置及同一位置不同深度的溶解氧质量浓度受投喂量影响的滞后效应模式有所不同,多数观测点滞后期在 30 d 以上。这与溶解氧在水体不同位置质量浓度分布有所不同有关。现有研究表明,养殖池塘溶解氧质量浓度受到多种生态因素影响,并在水体中呈现出三维分布特征^[30-31]。具体表现为在池塘同一水平面上不同位置的溶解氧质量浓度有所不同,在同一垂直面上不同水层的溶解氧质量浓度也不同^[4, 32],这与本研究在不同观测点观测到的滞后效应模式有所不同的结果相符合。

本研究结果可辅助生产环境下蟹塘水质调节策略的制定。对于养殖户,在投喂大量饲料后,宜着重

关注投喂后 5~10 d 和 20 d 后的溶解氧质量浓度下降情况,以及投喂 9 d 后的 pH 值下降情况;在投喂少量饲料后,宜关注投喂后 8~12 d 和 30 d 后的溶解氧质量浓度下降情况、投喂后 10~18 d pH 值下降情况、投喂后 10 d 内氨氮质量浓度和投喂后 5~20 d 池塘浊度变化,及时通过开启增氧泵设备、改变投喂策略、池塘改底等方式调节养殖水质。本研究也存在一定的局限性,通过 DLNM 模型的构建,可以给出投喂和水质参数之间暴露-反应关系的总结,但由于未报告各滞后期、投喂量对应影响效应的统计显著性^[28],因此本研究采用了特定投喂量和滞后期进行分析。另外,由于中华绒螯蟹养殖水质受到气象、生态、养殖经验、投喂、用药等多方面影响,且同一池塘不同位置的水质变化情况有所不同,未来还需要融合更多类型的数据并将其集成在分析过程中,进一步明确蟹塘养殖水质的复杂变化规律。

参考文献:

- [1] ZHUANG K J, WU N, WANG X C, et al. Effects of 3 feeding modes on the volatile and nonvolatile compounds in the edible tissues of female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4):968-981.
- [2] WANG S, HE Y, WANG Y Y, et al. Comparison of flavour qualities of three sourced *Eriocheir sinensis* [J]. Food Chemistry, 2016, 200:24-31.
- [3] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴 [J]. 北京: 中国农业出版社, 2020.
- [4] 段青玲, 刘怡然, 周新辉, 等. 大闸蟹养殖大数据分析模型和应用进展 [J]. 农业大数据学报, 2021, 3(1):56-65.
- [5] WANG Q D, LIU J S, ZHANG S Y, et al. Sustainable farming practices of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) around Hongze Lake, lower Yangtze River Basin, China [J]. Ambio, 2016, 45(3):361-373.
- [6] 王海候, 金梅娟, 沈明星, 等. 螺蛳对蟹塘产量、水质的影响及其适宜投喂量研究 [J]. 水产科技情报, 2016, 43(1):37-40.
- [7] 叶 乐, 林黑着, 李卓佳, 等. 投喂频率对凡纳滨对虾生长和水质的影响 [J]. 南方水产, 2005, 1(4):55-59.
- [8] 潘 杰, 吴旭干, 赵恒亮, 等. 三种投喂模式对河蟹二龄成蟹养殖性能的影响 [J]. 淡水渔业, 2016, 46(2):87-93.
- [9] HE J, WU X G, LI J Y, et al. Comparison of the culture performance and profitability of wild-caught and captive pond-reared Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) juveniles reared in grow-out ponds: implications for seed selection and genetic selection programs [J]. Aquaculture, 2014, 434:48-56.
- [10] 阙有清, 杨志刚, 纪连元, 等. 配合饲料替代杂鱼对中华绒螯蟹生长发育、体成分及脂肪酸组成的影响 [J]. 水产学报, 2012,

- 36(10):1612-1623.
- [11] LONG X, SUN Y, WADE N M, et al. Key metabolic and enzymatic adaptations underlie the benefits of formulated diets in the adult female Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture Research, 2020, 51(12):5125-5140.
- [12] SUN M, HASSAN S G, LI D. Models for estimating feed intake in aquaculture: a review[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127:425-438.
- [13] CUI Y, MA Q, LIMBU S M, et al. Effects of dietary protein to energy ratios on growth, body composition and digestive enzyme activities in Chinese mitten-handed crab, *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture Research, 2016, 48(5):2243-2252.
- [14] 任妮, 鲍彤, 刘杨, 等. 基于粒子群优化算法和长短时记忆神经网络的蟹塘溶解氧预测[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(2):426-434.
- [15] 樊宇星, 任妮, 田港陆, 等. 基于 DeepAR-RELM 的池塘溶解氧时空预测方法研究[J]. 农业机械学报, 2020, 51(S1):405-412.
- [16] XU L, LIU S, LI D. Prediction of water temperature in prawn cultures based on a mechanism model optimized by an improved artificial bee colony[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 140:397-408.
- [17] BARZEGAR R, AALAMI M T, ADAMOWSKI J. Short-term water quality variable prediction using a hybrid CNN - LSTM deep learning model[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2020, 34(2):415-433.
- [18] 徐龙琴, 李乾川, 刘双印, 等. 基于集合经验模态分解和人工蜂群算法的工厂化养殖 pH 值预测[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3):202-209.
- [19] XU Z, BOYD C E. Reducing the monitoring parameters of fish pond water quality[J]. Aquaculture, 2016, 465:359-366.
- [20] BOYD C E. Water quality: an introduction [M]. 2nd ed. New York: Springer, 2015.
- [21] 杨朦朦. 池塘养殖精准投喂量投饵机的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- [22] 吴强泽. 池塘养殖智能投饲系统的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.
- [23] 饶毅, 徐先栋, 丁立云, 等. 不同饲料投喂量下生物絮团技术对草鱼养殖及水质的影响[J]. 湖南农业科学, 2020, 4:51-54, 57.
- [24] GASPARRINI A, ARMSTRONG B, KENWARD M G. Distributed lag non-linear models[J]. Statistics in Medicine, 2010, 29(21):2224-2234.
- [25] 张克兴. 基于分布滞后非线性模型分析 PM2.5 对循环系统疾病寿命损失影响[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2018.
- [26] 黄照, 刘涛, 许燕君, 等. 基于死亡数据用 DLNM 构建气象健康指数[J]. 环境卫生学杂志, 2018, 8(5):368-373, 380.
- [27] 谷少华, 贺天锋, 陆蓓蓓, 等. 基于分布滞后非线性模型的归因风险评估方法及应用[J]. 中国卫生统计, 2016, 33(6):959-962.
- [28] GASPARRINI A. Distributed lag linear and non-linear models in R: The package dlnm[J]. Journal of Statistical Software, 2011, 43(8):1-20.
- [29] 吴桂亮. 蟹池水浑因投喂量不足[N]. 江苏农业科技报, 2007-09-08(6).
- [30] CHEN Y, YU H, CHENG Y, et al. A hybrid intelligent method for three-dimensional short-term prediction of dissolved oxygen content in aquaculture[J]. PLoS One, 2018, 13(2):e0192456.
- [31] CHEN Y L, CHEN L Q, QIN J G, et al. Growth and immune response of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) fed diets containing different lipid sources[J]. Aquaculture Research, 2016, 47(6):1984-1995.
- [32] CAO X K, REN N, TIAN G L, et al. A three-dimensional prediction method of dissolved oxygen in pond culture based on Attention-GRU-GBRT[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181:105955.

(责任编辑:张震林)