

文章编号: 1674-5566(2025)05-1115-16

DOI:10.12024/jsou.20241204723

崇明岛中华绒螯蟹成蟹养殖池塘的水质变化特征及评价

林建伟¹, 季高华², 杨洁³, 周捷³, 吴旭干², 詹艳慧¹, 熊瑞祥¹, 宋宇迪², 叶佳伟¹, 丁龙海¹, 王馨怡¹

(1. 上海海洋大学 海洋科学与生态环境学院, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产与生命学院, 上海 201306; 3. 上海市崇明区水产技术推广站, 上海 202150)

摘要: 池塘水质不仅直接影响中华绒螯蟹养殖的产量和质量, 且会影响池塘水环境健康和尾水达标排放。在上海市崇明岛选择5个代表性的中华绒螯蟹成蟹养殖基地作为采样点, 系统研究成蟹养殖期间池塘水质变化特征, 并对其进行评价, 水质指标包括溶解态活性磷(SRP)、总磷(TP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、悬浮颗粒物(SS)、叶绿素a(*Chl.a*)等。结果发现, 不同月份崇明岛中华绒螯蟹成蟹养殖池塘水体中SRP和TP平均浓度分别为0.091~0.300和0.235~0.449 mg/L; 4月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度较高(3.82 mg/L), 而养殖中后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低(< 2 mg/L); 4月和5月TN平均浓度较高(分别为7.04和6.19 mg/L), 9月和10月部分池塘TN浓度较高, 而养殖中期TN浓度较低(< 3 mg/L); 随着养殖时间的延长, COD_{Mn} 平均浓度先下降而后又再上升, 4—9月平均浓度较低; SS平均浓度为159~331 mg/L; 从6月开始,*Chl.a*平均浓度逐渐增加, 10月达到最大值。崇明岛中华绒螯蟹成蟹养殖池塘水体中TP、SRP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和TN相互之间存在显著的正相关性, COD_{Mn} 与TN和*Chl.a*呈显著正相关, SS仅与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈显著正相关,*Chl.a*仅与 COD_{Mn} 呈显著正相关。富营养化评价结果表明, 崇明岛中华绒螯蟹成蟹养殖池塘水体存在较高的蓝藻水华爆发风险。与《上海市水产养殖尾水排放标准》相比, 养殖池塘水体超标污染物主要为SS, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN超标主要发生在养殖初期。综上, 养殖中后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、中期TN平均浓度显著下降, COD_{Mn} 平均浓度则先下降后上升, 蟹塘水体中 COD_{Mn} 和TN、SS和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 均呈显著正相关性, SS为池塘的主要污染物, 尾水排放前需要进行沉淀处理, 以便达标排放。

关键词: 中华绒螯蟹; 养殖池塘; 水质指标; 池塘尾水; 排放标准; 富营养化评价

中图分类号: S 966.16; X 843

文献标志码: A

中华绒螯蟹(*Eriocheir sinensis*, 以下简称河蟹), 隶属节肢动物门(Arachnida)软甲纲(Malacostraca)十足目(Decapoda)方蟹科(Grapsidae)绒螯蟹属(*Eriocheir*), 是我国重要的水产养殖经济甲壳动物^[1-2]。河蟹养殖已成为我国水产养殖业的支柱产业之一^[3]。当前, 池塘养殖是我国河蟹养殖的主要模式^[4]。水环境是河蟹赖以生存的最基本条件, 水质的好坏将直接影响河蟹的生长和品质^[5]。然而, 河蟹池塘养殖过程中出现的水质恶化和富营养化问题制约了河蟹产业的可持续发展^[6-7]。揭示河蟹池塘养殖过程

中水质变化规律, 对于河蟹产业的可持续发展至关重要。另外, 对河蟹养殖池塘水质进行评价, 不仅可以帮助养殖户更加科学、专业地管理池塘, 而且可以帮助养殖户及时发现池塘养殖过程中存在的问题并采取应对措施。上海市崇明区地处东海之滨长江入海口, 是长江水系河蟹的发源地。河蟹产业已成为崇明区支柱产业之一^[8]。加快推进崇明区河蟹产业绿色发展, 不仅事关崇明区经济发展、农民增收, 更是崇明世界级生态岛发展的重要一环。崇明岛是崇明区的主体部分。因此, 厘清上海市崇明岛河蟹养殖池塘水质

收稿日期: 2024-11-06 修回日期: 2025-03-24

基金项目: 上海市崇明区农业科创项目(2022CNKC-01-05); 上海市教委水产动物良种培育与绿色养殖协同创新中心项目(2021科技02-12)

作者简介: 林建伟(1978—), 男, 教授, 博士, 研究方向为水产养殖环境污染治理与生态修复。E-mail: jwlin@shou.edu.cn

版权所有 ©《上海海洋大学学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)

Copyright © Editorial Office of Journal of Shanghai Ocean University (CC BY-NC-ND 4.0)

<http://www.shhydx.com>

变化规律,并对水质状况进行评价,对于崇明区河蟹池塘养殖产业可持续发展和崇明世界级生态岛建设而言是非常重要的。

目前国内外围绕河蟹养殖池塘中水质的变化规律和评价已开展了一定的研究。徐嘉波等^[9]对河蟹池塘养殖尾水排放周期内的水质动态变化进行了分析。曹丽^[10]对兴化市5个典型河蟹养殖池塘水体中氨氮、总氮、总磷、高锰酸盐指数、pH、水温和底泥中总氮、总磷、重金属含量的变化进行了分析,并采用单项和综合污染指数法对各蟹塘中水质和底泥的污染状况进行分析评价。兰艳^[11]对2019年上海市宝山区沪宝生产合作社1个养殖周期内的各水环境因子及底泥环境因子的变化特征进行了分析,并采用综合营养状态指数评价了水体的富营养化状况。季铭等^[12]研究了太湖流域河蟹池塘养殖场水体和底泥中氮磷的动态变化规律。吴凯等^[13]对上海市松江区泖港地区3个河蟹养殖池塘不同水层的水质因子进行昼夜监测。余丽梅等^[14]于2018年8月至11月对洪湖区域之内的4口池塘和梁子湖区域之内的6口池塘水质进行了监测和分析。张旭等^[15]于2022年6—10月逐月监测了上海市崇明区某河蟹养殖池塘内水质指标,探讨了环境因子与水体中微生物物种组成及功能结构特征之间的关系。BAI等^[16]报道了湖北洪湖周边河蟹养殖池塘水体中氮磷变化规律及动力学,但是采样频率为每季度1次。刘金金等^[8]对2019年上海市崇明岛河蟹成蟹养殖池塘的水环境质量和氮磷负荷进行了跟踪监测和评价。上述研究,为进一步认识河蟹成蟹养殖的水质变化规律及氮磷循环等提供了重要的背景资料,但这些研究中存在采样池塘数量少和没有结合《水产养殖池塘尾水排放标准》进行水质评价等缺点。考虑到影响河蟹养殖池塘水质的因素众多^[1,8,12,17],因此有必要结合上海市《水产养殖池塘尾水排放标准》,系统研究河蟹成蟹养殖过程中池塘主要水质特征、变化规律及评价。

因此,本研究选取崇明岛有代表性的5个河蟹成蟹养殖基地的13口养殖池塘,在成蟹养殖周期内每月采样1次,系统研究成蟹养殖池塘的水质变化特征及评价,旨在为了解崇明岛成蟹养殖的水质状况及变化规律,同时也为成蟹养殖池塘的水环境质量调控、池塘尾水处理和达标排放等

提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 采样地点

选取上海市崇明岛5个代表性的河蟹成蟹养殖基地,即上海崇东水产养殖专业合作社、上海惠康水产养殖专业合作社、河蟹集团玉海棠基地、崇明宝岛河蟹养殖合作社和崇明河蟹产业集团裕西水产养殖基地,作为本研究的采样地点,各养殖基地的空间分布见图1。对于崇东、惠康和玉海棠基地,每个基地均选择3个池塘作为研究对象。对于宝岛和裕西基地,每个基地均选择2个池塘作为研究对象。各池塘的具体信息见表1。

1.2 样品采集和分析

依据《水质采样技术指导(HJ 494—2009)》从河蟹养殖池塘中采集水样。采样时间为2023年的3月23日、4月12日、5月23日、6月21日、7月18日、8月28日、9月23日和10月16日。将水样运回实验室后对各项水质指标进行分析。本研究测试指标包括总磷(TP)、溶解态活性磷(SRP)、氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)、亚硝态氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)、总氮(TN)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})和悬浮颗粒物(SS)。按照国家标准对上述水质指标进行分析,其中TP采用过硫酸钾氧化-钼酸铵比色法测定,SRP采用钼酸铵比色法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂分光光度法进行测定, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 采用紫外分光光度法测定, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定, COD_{Mn} 采用高锰酸钾法测定,SS采用重量法进行测定。现场同步使用YSI多参数水质检测仪原位测定各池塘水体的温度(T)、pH、溶解氧(DO)和叶绿素a(*Chl.a*)。

1.3 数据处理

采用Microsoft Excel 2010软件对实验数据进行统计和整理。采用SPSS 19.0软件进行显著性和相关性分析,其中不同月份水质指标平均值之间是否存在显著差异采用单因素方差分析(One-way ANOVA)进行检验。采用Origin 2021进行绘图。

1.4 水质评价

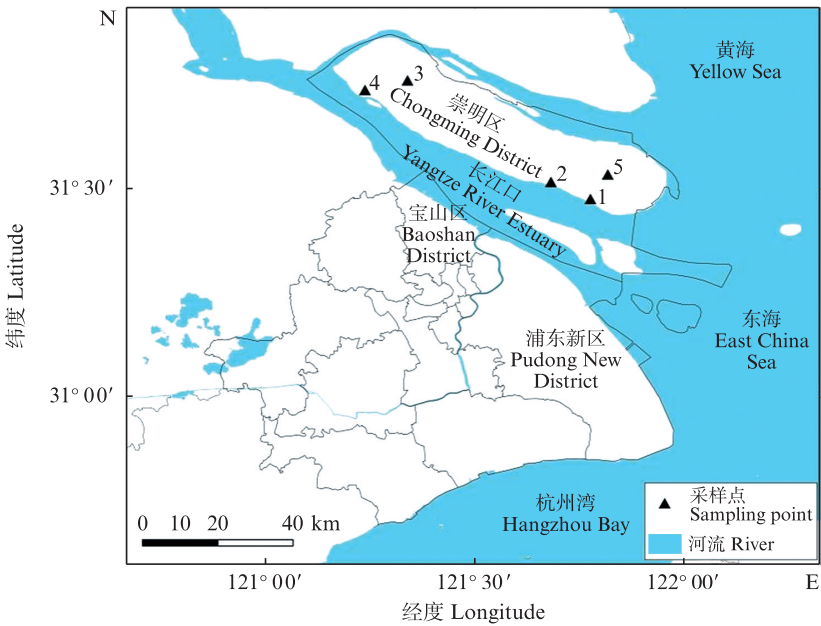
以上海市地方标准《水产养殖尾水排放标准》(DB 31/ 1405—2023)为评价依据,采用单项

污染指数对崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质进行评价。上海市地方标准规定的养殖尾水污染物排放限值见表2。单项污染指数的计算公式为

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

(1)

式中： P_i 表示单项污染指数， C_i 表示第*i*项水质污染物实测值， S_i 表示第*i*项污染物标准限值。当 $P_i>1$ 时，水质指标超标，判定为不合格；当 $P_i\leq 1$ 时，指标合格。



1. 上海崇东水产养殖专业合作社;2. 上海惠康水产养殖专业合作社;3. 河蟹集团玉海棠基地;4. 崇明宝岛河蟹养殖合作社;5. 崇明河蟹产业集团裕西水产养殖基地。
1. Shanghai Chongdong aquaculture specialized cooperative; 2. Shanghai Huikang aquaculture specialized cooperative; 3. Chinese mitten crab group Yuhaitang base; 4. Chongming Baodao Chinese mitten crab breeding cooperative; 5. Chongming Chinese mitten crab industry group Yuxi aquaculture base.

图1 本研究所调查的养殖基地的分布图
Fig. 1 Spatial distribution map of adult Chinese mitten crab culture bases investigated in this study

表1 本研究调查池塘的具体信息
Tab. 1 Detailed information of ponds investigated in this study

池塘编号 Number of pond	养殖基地 Breeding base	行政区划 Administrative division	池塘面积 Area of pond/667 m ²	放养密度 Stocking density/(ind./667 m ²)	配套植物 Matching plant
1	崇东	陈家镇	35	1 000	伊乐藻
2	崇东	陈家镇	25	1 000	伊乐藻
3	崇东	陈家镇	25	1 000	伊乐藻
4	惠康	堡镇	11.4	2 500	伊乐藻+轮叶黑藻
5	惠康	堡镇	7.9	1 200	伊乐藻+轮叶黑藻
6	惠康	堡镇	7.8	1 200	伊乐藻+轮叶黑藻
7	玉海棠	三星镇	5.1	1 250	中间种植水稻,四周种植伊乐藻
8	玉海棠	三星镇	15.6	1 250	中间种植水稻,四周种植伊乐藻
9	玉海棠	三星镇	28.3	800	中间种植水稻,四周种植伊乐藻
10	宝岛	绿华镇	25	1 000	伊乐藻
11	宝岛	绿华镇	25	1 000	伊乐藻
12	裕西	陈家镇	8	1 000	水花生+伊乐藻
13	裕西	陈家镇	10	640	伊乐藻+轮叶黑藻

表2 养殖尾水污染物排放限值
Tab. 2 Discharge limits for pollutants in
tailwater from aquaculture

序号 Number	项目 Item/(mg/L)	限值 Limited value
1	悬浮物	≤85.0
2	总氮	≤5.0
3	总磷	≤0.8
4	高锰酸盐指数	≤25.0
5	氨氮	≤2.0

采用综合营养状态指数法对崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质进行评价。综合营养状态指数的计算公式参见2001年中国环境监测总站发布的《湖泊(水库)富营养化评价方法及分级技术规定》(总站生字[2001]090号)。选择 *Chl.a*、TP、TN 和 COD_{Mn} 作为评价指标,分别计算各指标的营养状态指数,再通过加权得到综合营养状态指数[TLI(Σ)]。当 $TLI(\Sigma) < 30$ 时,水体为贫营养状态;当 $30 \leq TLI(\Sigma) \leq 50$ 时,水体为中营养状态;当 $TLI(\Sigma) > 50$ 时,水体为富营养化状态^[18]。TLI(Σ)值越高,表明水体的富营养化程度越重。当 $50 < TLI(\Sigma) \leq 60$ 时,水体为轻度富营养;当 $60 < TLI(\Sigma) \leq 70$ 时,水体处于中度富营养;当 $TLI(\Sigma) > 70$ 时,水体处于重度富营养^[18]。TLI(Σ)的计算公式^[19]:

$$T_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n W_j \times T_j \quad (2)$$

$$W_j = \frac{r_{ij}^2}{\sum_{j=1}^n r_{ij}^2} \quad (3)$$

式中: T_{Σ} 为 TLI(Σ); W_j 为第 j 种评价指标占综合营养状态指数的权重; T_j 为第 j 种评价指标的营养状态指数; r_{ij} 为第 j 种评价指标与基准评价指标 *Chl.a* 的相关系数; n 为评价指标的数目。4 种评价指标的营养状态指数的计算公式分别为^[20]

$$T_1 = 10[2.5 + 1.086 \ln(C_{Chl.a})] \quad (4)$$

$$T_2 = 10[9.436 + 1.624 \ln(C_{TP})] \quad (5)$$

$$T_3 = 10[5.453 + 1.694 \ln(C_{TN})] \quad (6)$$

$$T_4 = 10[0.109 + 2.661 \ln(C_{COD})] \quad (7)$$

式中: T_1 为 *Chl.a* 的营养状态指数; T_2 为 TP 的营养状态指数; T_3 为 TN 的营养状态指数; T_4 为 COD_{Mn} 的营养状态指数; $C_{Chl.a}$ 、 C_{TP} 、 C_{TN} 和 C_{COD} 分别为 *Chl.a*、TP、TN 和 COD_{Mn} 浓度; *Chl.a* 浓度的单位为 mg/m^3 , TN、TP 和 COD_{Mn} 浓度的单位为 mg/L 。本研究中所采用的 r_{ij} 和计算确定的 W_j 见表3^[20]。

表3 本研究所采用的相关关系 r_{ij} 和计算确定的 W_j
Tab. 3 Values of r_{ij} and W_j in this study

参数 Parameter	<i>Chl.a</i>	TP	TN	COD_{Mn}
r_{ij}	1	0.84	0.82	0.83
r_{ij}^2	1	0.705 6	0.672 4	0.688 9
W_j	0.326 1	0.230 1	0.219 2	0.224 6

2 结果与讨论

2.1 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质总体情况

表4为崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质指标统计分析情况。从中可见,2023年崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中 SRP、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN、 COD_{Mn} 、SS 和 *Chl.a* 平均浓度分别为 (0.165 ± 0.211) 、 (0.313 ± 0.274) 、 (1.11 ± 2.05) 、 (0.301 ± 0.309) 、 (0.075 ± 0.130) 、 (3.38 ± 3.72) 、 (4.65 ± 1.74) 、 (221 ± 101) 和 (39.2 ± 68.1) mg/L , 平均水温为 (24.30 ± 6.00) $^{\circ}C$, 平均 pH 为 8.880 ± 0.606 。SRP、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、*Chl.a*、 COD_{Mn} 和 SS 浓度的变异系数较大,水温的变异系数也较大,而 pH 的变异系数则较小。

2.2 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘不同水质指标之间的相关性

表5为崇明岛河蟹成蟹养殖池塘不同水质指标之间的相关性分析结果。从中可见,SRP 与 TP、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 呈显著正相关,TP 与 SRP、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 呈显著正相关; NH_4^+-N 与 SRP、TP、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN 呈显著正相关; NO_3^--N 与 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 、TN 呈显著正相关; NO_2^--N 与 SRP、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、TN、SS 呈显著正相关; TN 与 SRP、TP、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、 COD_{Mn} 呈显著正相关; COD_{Mn} 与 TN 和 *Chl.a* 呈显著正相关; SS 仅与 NO_2^--N 呈显著正相关; *Chl.a* 仅与 COD_{Mn} 呈显著正相关; 水温与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 、TN 和 COD_{Mn} 呈显著负相关; pH 与 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 和 TN 呈显著负相关。这说明,崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中 TP、SRP、 NH_4^+-N 、 NO_2^--N 和 TN 相互之间存在显著的正相关性,说明它们的来源是一致的;水温和 pH 是影响崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 和 TN 浓度水平的重要因素,水温也是影响 COD_{Mn} 浓度水平的重要因素。

表 4 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质指标统计分析情况
Tab. 4 Statistical analysis of water quality indexes of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

指标 Index	最小值 Minimum value	最大值 Maximum value	平均值 Average value	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%
SRP/(mg/L)	0.003	1.410	0.165	0.211	127
TP/(mg/L)	0.048	1.590	0.313	0.274	87.5
NH ₄ ⁺ -N/(mg/L)	0.016	13.800	1.110	2.050	185
NO ₃ ⁻ -N/(mg/L)	0	1.610	0.301	0.309	102
NO ₂ ⁻ -N/(mg/L)	0	0.645	0.075	0.130	172
TN/(mg/L)	0.365	19.20	3.380	3.720	110
COD _{Mn} /(mg/L)	1.94	9.09	4.65	1.74	37.5
SS/(mg/L)	28.0	478	221	101	45.6
Chl.a/(mg/L)	1.92	538	39.2	68.1	174
T/°C	14.4	34.3	24.3	6.0	24.6
pH	7.55	10.70	8.88	0.606	6.83

表 5 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘不同水质指标之间的相关性
Tab. 5 Correlation among different water quality indexes of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

水质指标 Water quality index	SRP	TP	NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	TN	COD _{Mn}	SS	Chl.a	T	pH
SRP	1										
TP	0.885**	1									
NH ₄ ⁺ -N	0.236*	0.206*	1								
NO ₃ ⁻ -N	0.101	0.097	0.512**	1							
NO ₂ ⁻ -N	0.274**	0.245*	0.741**	0.520**	1						
TN	0.331**	0.314**	0.879**	0.614**	0.818**	1					
COD _{Mn}	0.049	0.200	0.158	0.088	0.031	0.208*	1				
SS	-0.102	-0.116	0.111	0.119	0.267*	0.183	-0.175	1			
Chl.a	-0.093	-0.004	-0.146	0.027	-0.171	-0.055	0.248*	-0.057	1		
T	0.041	-0.057	-0.398**	-0.360**	-0.314**	-0.359**	-0.387**	-0.070	0.091	1	
pH	-0.138	-0.166	-0.345**	-0.243*	-0.351**	-0.330**	0.006	-0.064	0.101	0.139	1

注: *表示在 0.05 级别(双尾)相关性显著; **表示在 0.01 级别(双尾)相关性显著。
Notes: * indicates a significant correlation at level 0.05 (two-tailed); ** indicates a significant correlation at the 0.01 level (two-tailed).

2.3 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质总体变化情况

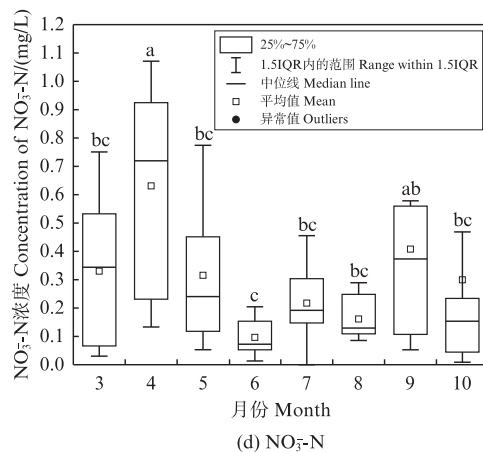
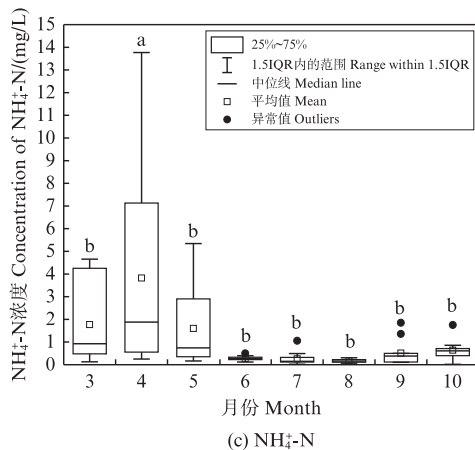
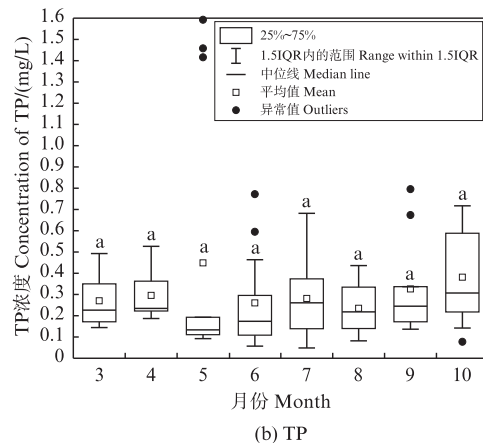
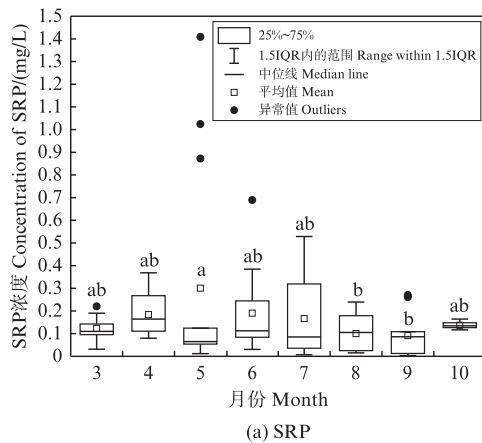
图 2 为不同月份崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质指标的箱线图。由图 2a 可见,不同月份水体中 SRP 平均浓度为 0.091~0.300 mg/L。由图 2b 可见,不同月份水体中 TP 平均浓度为 0.235~0.449 mg/L。由图 2c 可见,4 月水体中 NH₄⁺-N 平均浓度显著高于 3、5 和 6—10 月。此外,4 月水体中 NH₄⁺-N 平均浓度达到 3.82 mg/L,而 6 和 8 月水体中 NH₄⁺-N 浓度都低于 1 mg/L,7、9 和 10 月除个别采样池塘为 1~2 mg/L 外,大部分都低于 1 mg/L。这说明,养殖中后期崇明河蟹成蟹池塘水体中 NH₄⁺-N 浓度处于较低的水平。由图 2d 可见,不同月份水

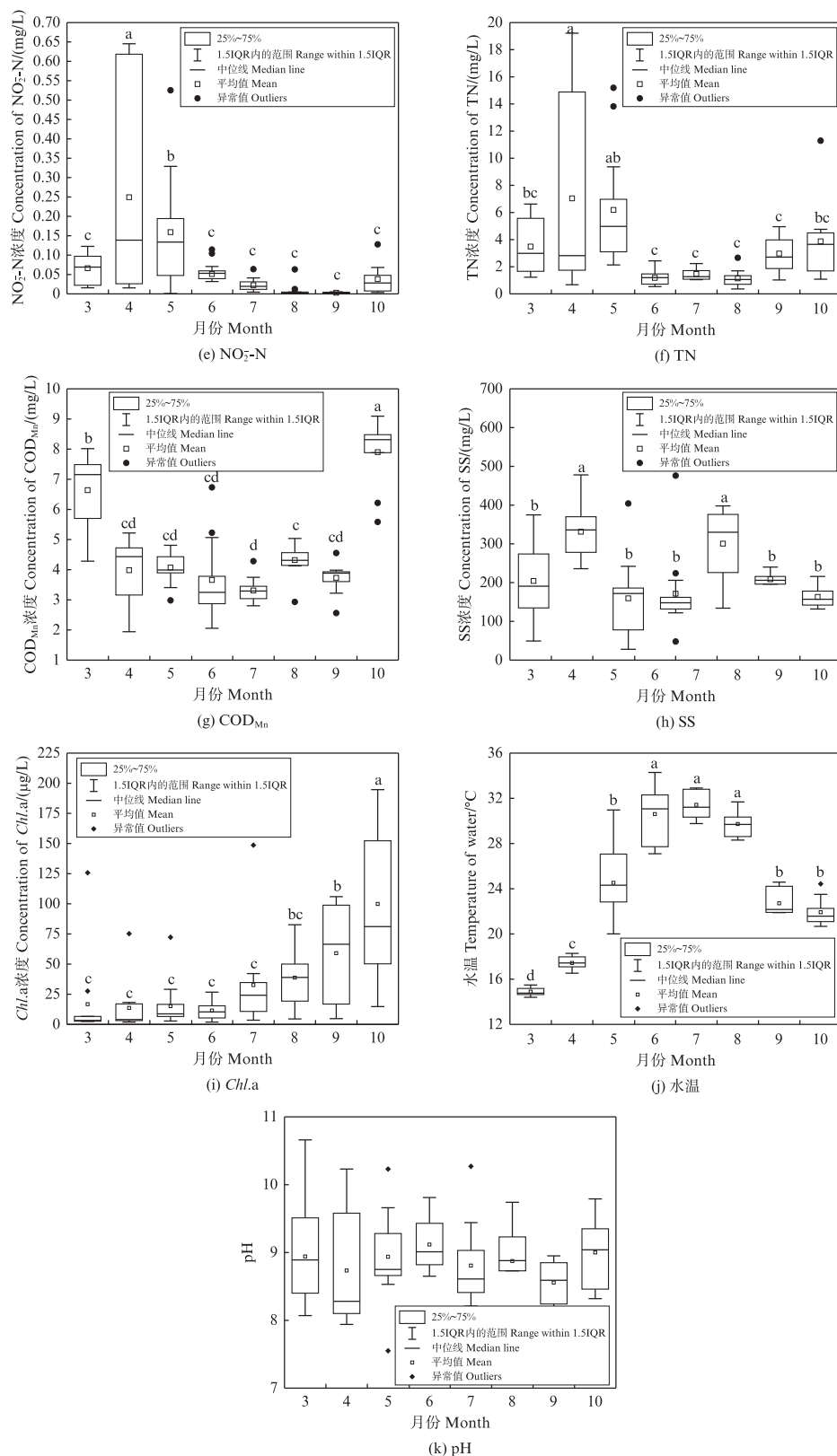
体中 NO₃⁻-N 平均浓度为 0.097~0.631 mg/L,4 月出现最大值。由图 2e 可见,水中 NO₂⁻-N 平均浓度随养殖时间延长的变化规律是:先增加,后下降。由图 2f 可见,4 和 5 月水体中 TN 平均浓度显著高于 6—8 月。4 和 5 月水体中 TN 平均浓度分别达到 7.04 和 6.19 mg/L,而 6、7 和 8 月水体中 TN 浓度都低于 3 mg/L。这说明,养殖中期崇明河蟹成蟹池塘水体中 TN 浓度处于较低的水平。另外,9 和 10 月部分崇明河蟹成蟹池塘中 TN 浓度较高,超过了 3 mg/L。由图 2g 中可见,随着养殖时间的延长,出现了水中 COD_{Mn} 平均浓度先下降而后上升的现象;当养殖时间为 3 和 10 月时,平均浓度

较高,分别为 6.64 和 7.90 mg/L;当养殖时间为 4—9 月时,平均浓度较低,为 3.31~4.32 mg/L。另外,除 6 月的 1 个采样池塘外,6—9 月池塘水体中 COD_{Mn} 浓度都低于 3 月的平均浓度;6—9 月 COD_{Mn} 浓度都低于 10 月的平均浓度。这说明,6—9 月崇明区河蟹成蟹养殖池塘水体中 COD_{Mn} 浓度处于较低的水平。由图 2h 可见,不同月份水体中 SS 平均浓度为 159~331 mg/L,5 月出现最大值。由图 2i 可见,养殖初期(3—6 月)水中 Chl.a 平均浓度处于低水平,然而当养殖时间从 6 月到 10 月时,水中 Chl.a 平均浓度逐渐增加,10 月达到最大值。由图 2j 可见,随着养殖时间的增加,平均水温先增加而后下降,7 月达到最大值。由图 2k 可见,3、4、5、6、7、8、9 和 10 月水体的 pH 分别为 8.07~10.7、7.94~10.2、7.55~10.2、8.65~9.81、8.21~10.3、7.85~9.74、8.01~8.95 和 8.32~9.79。

河蟹成蟹养殖池塘中的污染物主要来自于前期施肥、饵料、排泄物以及水生植物死亡腐烂等^[21-22]。5 月个别崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体

中 SRP 和 TP 浓度明显偏高(图 2a 和 2b),这主要是由肥料过多投入所导致的^[7]。另外,养殖初期崇明岛部分河蟹成蟹养殖池塘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 浓度较高(图 2c 和 2f),这主要是由前期施肥所造成的^[23]。养殖中后期崇明成蟹养殖池塘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低的原因包括:(1)植物是河蟹成蟹养殖生态系统的重要初级生产者,植物均能够吸收水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ^[24-26],从而可以降低水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度;(2)河蟹成蟹养殖池塘水体的溶解氧(DO)浓度较高($> 3 \text{ mg/L}$),而高的 DO 浓度有利于水中微生物驱动的反硝化反应的进行,加速水中氨氮向亚硝态氮和硝态氮的转化^[1, 27]。底泥中存在以 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 为电子受体、有机物为电子供体的反硝化作用,且植物也能吸收水体中的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ^[28-31]。这使得养殖中后期崇明成蟹养殖池塘水体中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度处于较低的水平(图 2d 和 2e)。养殖中期崇明成蟹养殖池塘水体中 TN 浓度较低的原因包括植物的吸收作用、微生物的硝化和反硝化作用。





不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

Different letters indicate significant differences ($P < 0.05$).

图2 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中各水质指标季节性变化特征

Fig. 2 Seasonal variation characteristics of various water quality indicators in adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

2.4 崇明岛不同河蟹成蟹养殖池塘水质变化情况

图3为崇明岛不同河蟹成蟹养殖池塘水质变化情况。由图3a可见,不同池塘水体中TP平均浓度随养殖时间的变化规律存在区别。随着养殖时间的延长,惠康池塘表现为先增加、后下降、而后又增加,5月达到最大值,为1.49 mg/L;宝岛池塘表现为先下降、后增加,10月达到最大值,为0.307 mg/L;裕西池塘表现为先基本保持不变、后增加,10月达到最大值,为0.663 mg/L;崇东池塘表现为先下降、后增加、而后又下降,7月达到最大值,为0.471 mg/L;玉海棠池塘表现为先增加、后下降、再增加、又下降,8月达到最大值,为0.335 mg/L。5月惠康池塘水体中TP浓度明显偏高主要是因为过量投加肥料的缘故^[7]。由图3b可见,惠康和玉海棠池塘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度随着养殖时间延长的变化规律为先增加、后下降、再增加,4月达到最大值;在整个养殖期间,宝岛、裕西和崇东池塘水体中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度较低,分别为0.083~1.18、0.113~0.699和0.174~0.819 mg/L。3—5月惠康池塘水体和4月玉海棠池塘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度偏高主要是由于过量投加肥料所导致的。由图3c可见,惠康池塘水体中TN平均浓度随养殖时间的变化规律为前期浓度较高,而后期则较低;宝岛、裕西和崇东池塘水体中TN平均浓度在整个养殖期间均较低;玉海棠池塘水体中TN平均浓度在养殖期间波动较大,先是增加,而后下降,然后再增加,10月达到最大值,为11.3 mg/L。4和5月惠康和玉海棠池塘水体中TN浓度偏高主要是由过量投加肥料所造成的。由图3d可见,3和10月惠康、宝岛、崇东和玉海棠池塘水体中 COD_{Mn} 平均浓度较高,但4—9月却较低;10月裕西池塘水体中 COD_{Mn} 平均浓度较高,但4—9月却较低。由图3e可见,随着养殖时间的变化,不同池塘中SS平均浓度均处于波动状态,分别在79.3~319、69.0~356、128~387、125~409和113~296 mg/L之间波动。针对养殖初期个别池塘水体中氮磷浓度偏高的问题,建议对肥料进行分多次小剂量投加,以提高肥料的利用率和减少施肥对池塘水体环境的负面影响。

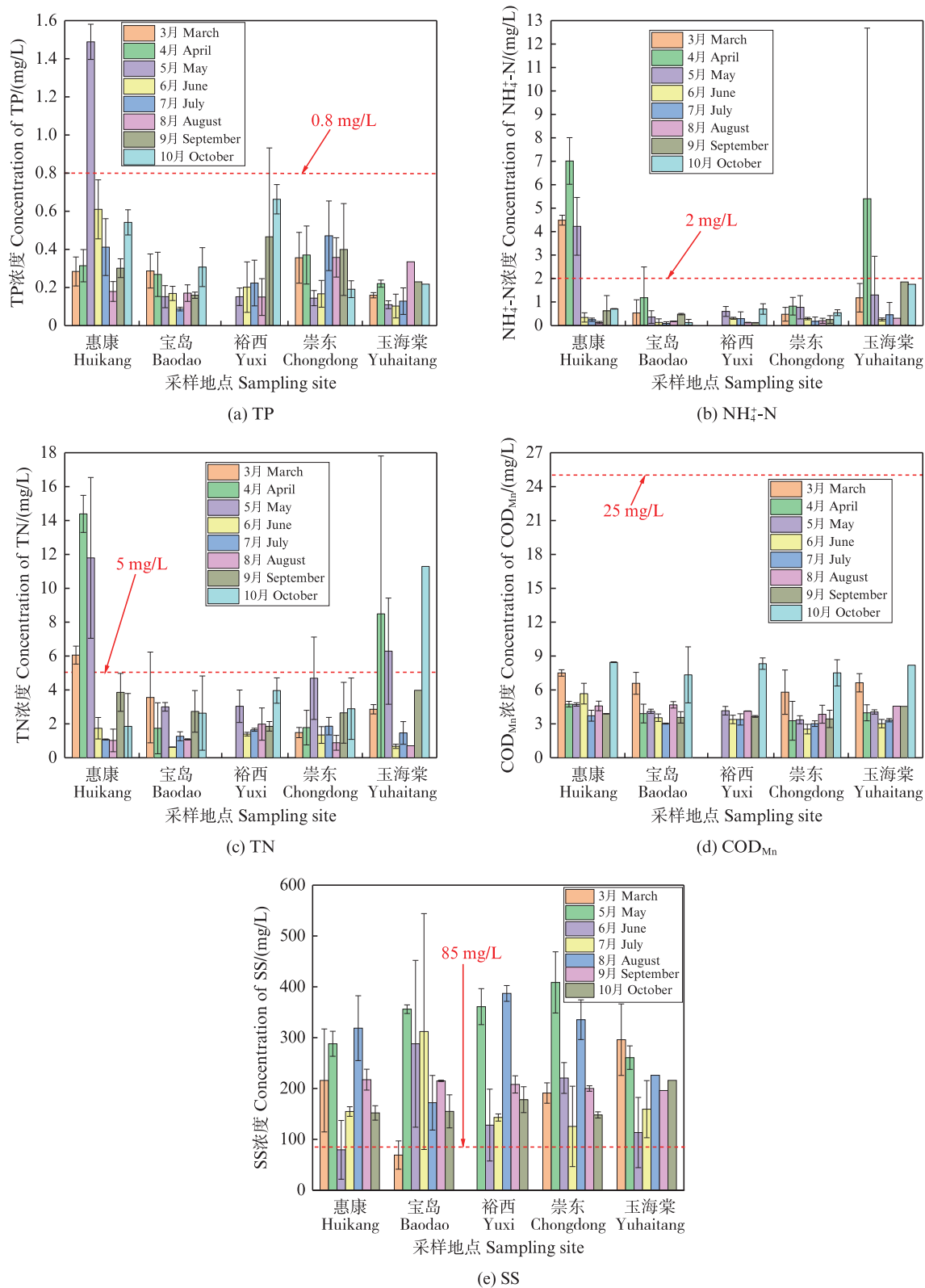
2.5 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中总磷和总氮组成

图4为崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中溶解态活性磷占总磷的比值和各形态氮占总氮的比值。由图4a可见,4—10月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中SRP/TP平均值位于0.254~0.666。这说明SRP是崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中TP的重要组成部分。由图4b、4c和4d可见,4—10月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}/\text{TN}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}/\text{TN}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}/\text{TN}$ 平均值分别位于0.170~0.497、0.070~0.165和0.001~0.047。这说明, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中TN的重要组成部分,而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 占TN的比例通常是很小的。

2.6 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质评价

2.6.1 基于水产养殖尾水排放标准的水质评价

图5为崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质单项污染指数评价结果。由图5a可见,除了5月,崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中TP浓度均没有超过上海市水产养殖尾水排放标准,且5月TP浓度仅个别采样点超过了标准。这说明,TP不是崇明岛河蟹成蟹养殖池塘尾水排放特别需要关注的水质指标。由图5b可见,3—5月部分采样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超过了上海市水产养殖尾水排放标准,而6—10月则全部采样点的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均没有超过标准。这说明,对于崇明岛河蟹成蟹养殖池塘尾水排放而言,养殖前期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 超标的风险较高,需要采取有效措施来保证尾水达标排放,而养殖中后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 则不是特别需要关注的水质指标。类似于 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,3—5月部分采样点的TN浓度超过了上海市水产养殖尾水排放标准,而6—10月则除了1个采样点超标,其余采样点均没有超过标准(图5c)。这说明,对于崇明岛河蟹成蟹养殖池塘尾水治理而言,养殖前期需要关注TN,而养殖中后期TN则不是特别需要关注的水质指标。由图5d可见,3—10月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中 COD_{Mn} 浓度均没有超过上海市水产养殖尾水排放标准。这说明, COD_{Mn} 不是崇明岛河蟹成蟹养殖池塘尾水治理需要关注的指标。由图5e可见,绝大部分样品的SS浓度超过了上海市水产养殖尾水排放标准。这说明,SS是崇明岛河蟹成蟹养殖池塘尾水治理需要特别关注的水质指标。



红色虚线表示上海市地方标准规定的限值。

The red dashed line indicates the limit value specified by the local standard of Shanghai.

图3 崇明岛不同河蟹成蟹养殖池塘各水质指标随养殖时间的变化情况

Fig. 3 Changes in various water quality indexes with the breeding time in adult Chinese mitten crab culture ponds from different bases on Chongming Island

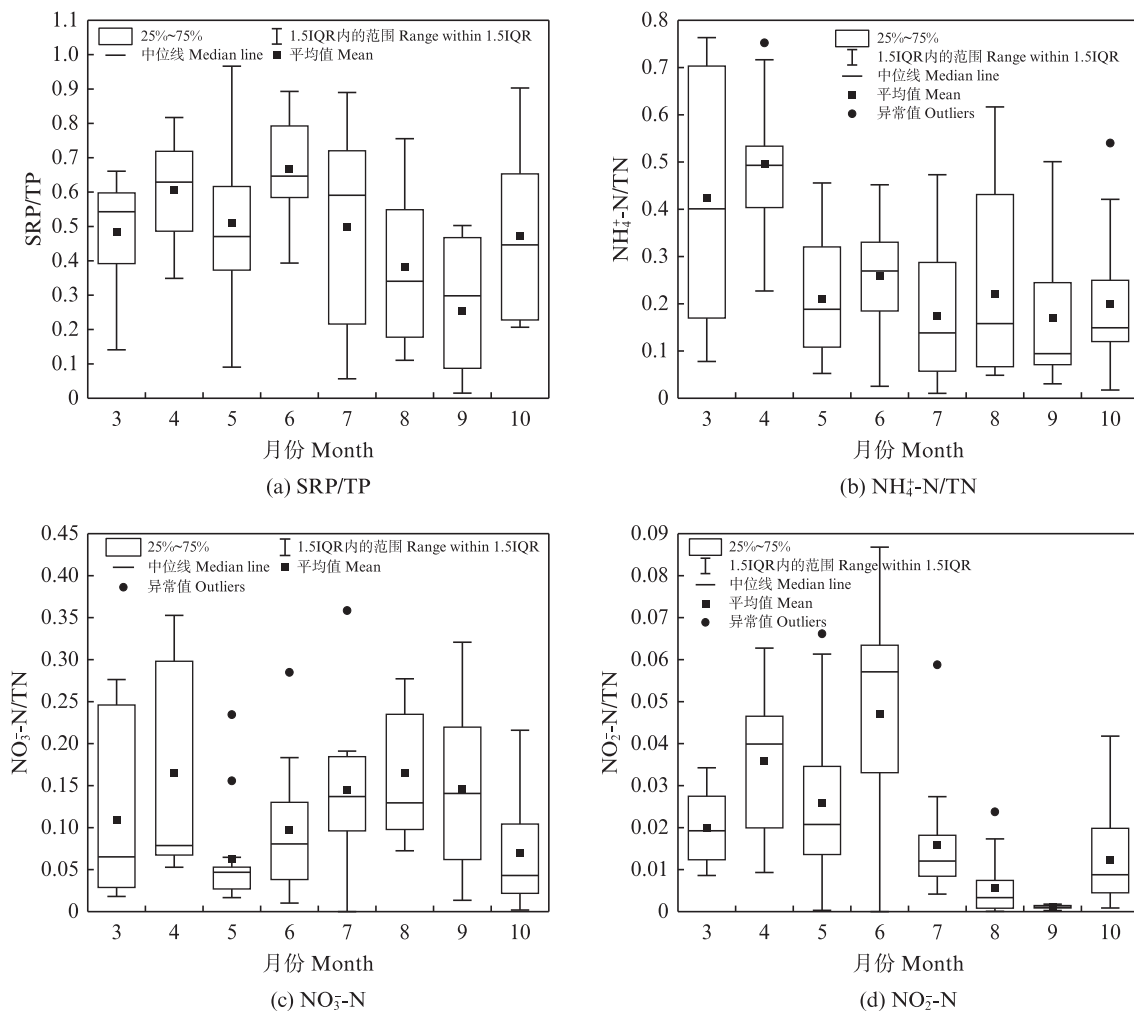


图4 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中溶解态活性磷占总磷的比值和各形态氮占总氮的比值

Fig. 4 Percentages of SRP to TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to TN, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ to TN, and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ to TN in water of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

进一步将不同池塘的水质指标与上海市尾水排放标准进行对比,结果见图3。由图3a可见,对于惠康池塘而言,TP浓度超标仅出现在5月,其余月份TP浓度均没有超过标准;另外,其他池塘的TP浓度均没有超过标准。由图3b可见, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度超标出现在3—5月的惠康池塘和4月的与玉海棠池塘,其余月份惠康和玉海棠池塘 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均没有超过标准;另外,其他池塘的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均没有超过标准。由图3c可见,TN浓度超标出现在3—5月的惠康池塘以及4、5和10月的玉海棠池塘,其余月份惠康和玉海棠池塘

均没有超过标准;另外,其他池塘的TN浓度均没有超过标准。由图3d可见,惠康、宝岛、裕西、崇东和玉海棠池塘在整个养殖周期内 COD_{Mn} 浓度均没有超过标准。由图3e可见,仅6月的惠康池塘和3月的宝岛池塘SS浓度没有超标外,其余月份惠康和宝岛池塘SS浓度均超过了标准;另外,裕西、崇东和玉海棠池塘在整个养殖周期内SS浓度均超过标准。以上结果进一步说明了,与《上海市水产养殖尾水排放标准》相比,崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体超标污染物主要为SS,尾水排放前需要进行沉淀处理,以便达标排放。

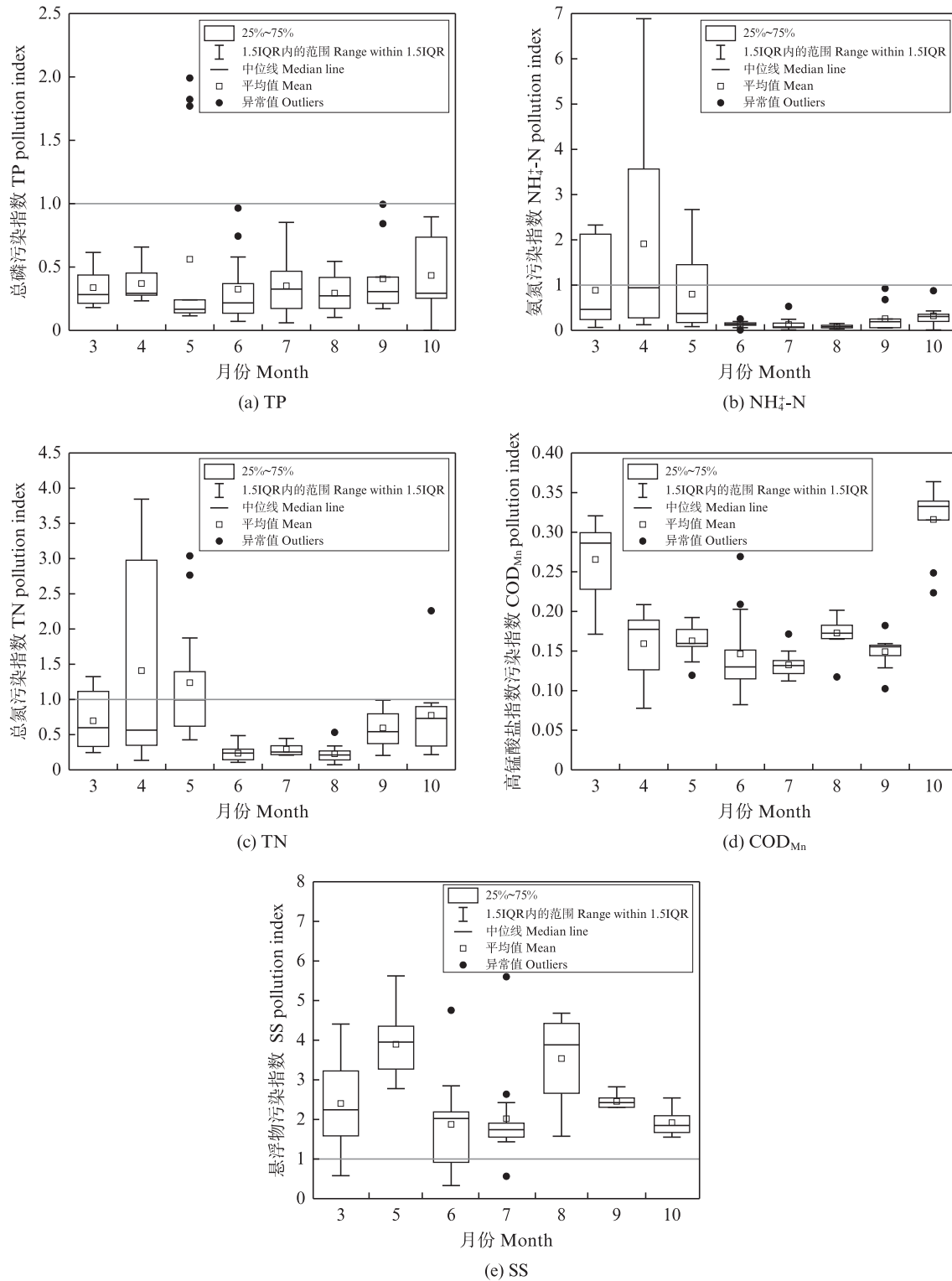


图5 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水质单项污染指数评价结果

Fig. 5 The evaluation results of water quality of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island based on single pollution index

2.6.2 基于蓝藻水华爆发的氮磷阈值的水质评价
氮和磷被认为是影响蓝藻水华爆发的关键影响因素。一旦水体中TN和TP达到富营养化阈值,蓝藻水华发生风险增加。一般认为当TN

超过 0.2 mg/L 时,TP 超过 0.02 mg/L 时,蓝藻水华爆发的风险增加^[32-33]。本研究的TN、TP浓度普遍明显超过这个浓度,因此,崇明岛河蟹成蟹养殖池塘蓝藻水华爆发的风险很大。另外,许多

学者对地表水体蓝藻水华暴发期间的磷阈值开展了研究。曹晶等^[34]发现,太湖蓝藻水华暴发的TP控制阈值为0.05~0.06 mg/L。张家瑞等^[35]发现,白洋淀湿地水体水华暴发TP阈值为0.12 mg/L。温成成等^[36]发现,李家河水库(北方富营养分层型水库)夏季藻华启动的TP阈值为0.011 mg/L。杨龙等^[37]发现,密云水库发生富营养化的总磷阈值为0.053~0.064 mg/L。陈小华等^[38]发现,苏南地区湖泊群富营养化状态由轻度向中度转变的TP阈值为0.125 mg/L。郭茹等^[39]发现,太湖苕溪流域的总磷阈值约为0.05 mg/L。本研究绝大多数采样点的TP浓度都大于太湖、白洋淀湿地、密云水库、太湖苕溪流域水体蓝藻水华暴发的TP阈值和苏南地区湖泊群富营养化状态由轻度向中度转变的TP阈值,全部采样点的TP浓度都大于李家河水库夏季藻华启动的TP阈值。这进一步说明了崇明区河蟹成蟹养殖池塘蓝藻水华暴发的风险较高。因此,采取有效措施降低池塘水体营养盐浓度并降低蓝藻水华风险是当前河蟹养殖业亟待解决的问题。

2.6.3 基于综合营养状态指数的水质评价

图6为崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体的综合营养状态指数。从中可见,不同月份崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体的综合营养状态指数平均值均超过了50。3、5和10月全部采样池塘水体的TLI(Σ)值均大于50。这表明,3、5和10月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体处于富营养化状态。4、6和7月一部分采样池塘水体的TLI(Σ)值大于50,另一部分采样池塘水体的TLI(Σ)值位于40~50之间。这表明,4、6和7月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体处于富营养化或中营养状态。8和9月绝大多数采样池塘水体的TLI(Σ)值大于50。这表明,8和9月崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体普遍处于富营养化状态。特别需要指出的是,养殖后期崇明河蟹成蟹池塘水体的富营养化状态会随着时间的推移而加重。总体上,河蟹从8月养殖到10月时,池塘水体的富营养化状态会从轻度富营养变为中或重度富营养化。夏秋季节是池塘暴发蓝藻水华的高峰期^[40-44]。因此,为了控制夏秋季节蓝藻水华的发生,采用有效措施来降低崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体的营养状态是非常必要的。

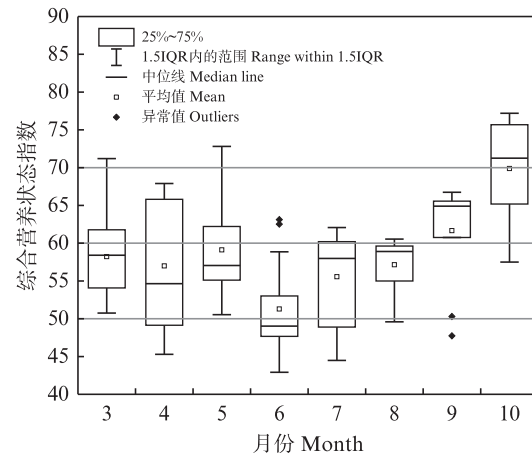


图6 崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体的综合营养状态指数
Fig. 6 Comprehensive trophic level index of water in adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

3 结论

不同月份崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中SRP和TP平均浓度为0.091~0.300和0.235~0.449 mg/L;4月 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度较高,而中后期 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度较低;4月和5月TN平均浓度较高,9月和10月部分池塘TN浓度较高,而养殖中期TN浓度较低;随着养殖时间的延长, COD_{Mn} 平均浓度先下降后上升,4—9月浓度较低;SS平均浓度为159~331 mg/L;从6月开始, Chl.a 平均浓度逐渐增加,10月达到最大值。

崇明岛河蟹成蟹养殖池塘水体中TP、SRP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和TN相互之间存在显著的正相关性, COD_{Mn} 与TN和 Chl.a 呈显著正相关,SS仅与 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 呈显著正相关, Chl.a 仅与 COD_{Mn} 呈显著正相关。

与《上海市水产养殖尾水排放标准》相比,崇明岛成蟹养殖池塘水体超标污染物主要为SS,尾水排放前需要进行沉淀处理,以便达标排放。

崇明岛成蟹养殖池塘水体存在蓝藻水华暴发的风险,需要采取有效措施来降低蓝藻水华发生的风险。

作者声明本文无利益冲突。

参考文献:

- [1] 王高龙,马旭洲,王武,等. 上海松江泖港地区成蟹养殖对水质的影响[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(3):

- 299-304.
- WANG G L, MA X Z, WANG W, et al. Effect of *Eriocheir sinensis* growing on the water quality in Maogang Town, Songjiang District, Shanghai [J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(3): 299-304.
- [2] 谢昕洋,周振旗,关伟晔,等. 中华绒螯蟹攻击性差异的比较转录组研究[J]. 水产科学, 2024, 43(4): 571-579.
- XIE X Y, ZHOU Z Q, GUAN W Y, et al. Comparative transcriptome on Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* with aggressive differences[J]. Fisheries Science, 2024, 43(4): 571-579.
- [3] 金鑫,程润强,张娣,等. 不同养殖模式对中华绒螯蟹品质的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(11): 1845-1854.
- JIN X, CHENG R Q, ZHANG D, et al. Different culture modes on quality of *eriocheir sinensis* [J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(11): 1845-1854.
- [4] 肖霖,徐克,孙云飞,等. 中华绒螯蟹养殖池塘晒塘阶段的CO₂排放通量特征[J]. 中国水产科学, 2024, 31(7): 820-828.
- XIAO L, XU K, SUN Y F, et al. Characterization of CO₂ emission fluxes during the sunning stage of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) aquaculture ponds [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2024, 31(7): 820-828.
- [5] HAN W F, SUN Y F, LIU J, et al. Effect of different feeding modes on the growth, biochemical composition, and living environment of the juvenile Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis*[J]. Aquaculture, 2021, 541: 736687.
- [6] JIA B C, LI Y F, ZI X Y, et al. Nutrient enrichment drives the sediment microbial communities in Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* culture[J]. Environmental Research, 2023, 223: 115281.
- [7] LIU X, WU H J, WANG Y, et al. Comparative assessment of Chinese mitten crab aquaculture in China: spatiotemporal changes and trade-offs[J]. Environmental Pollution, 2023, 337: 122544.
- [8] 刘金金,张玉平,孙振中. 上海崇明中华绒螯蟹养殖池塘水环境质量及氮磷负荷估算[J]. 淡水渔业, 2020, 50(6): 60-69.
- LIU J J, ZHANG Y P, SUN Z Z. Water environmental quality and load estimation of nitrogen, phosphorus in *Eriocheir sinensis* culture pond in Chongming, Shanghai [J]. Freshwater Fisheries, 2020, 50(6): 60-69.
- [9] 徐嘉波,刘永士,施永海,等. 淡水池塘不同养殖品种养殖尾水排放周期内的水质动态变化[J]. 渔业现代化, 2023, 50(1): 26-33.
- XU J B, LIU Y S, SHI Y H, et al. Dynamic changes of water quality during wastewater discharge cycle of different aquaculture varieties [J]. Fishery Modernization, 2023, 50(1): 26-33.
- [10] 曹丽. 兴化市典型蟹塘养殖生长周期的污染特征研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2021.
- CAO L. Research on pollution characteristics of typical crab pond culture growth cycle in Xinghua City [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021.
- [11] 兰艳. 河蟹养殖池塘氮磷收支及养殖容量估算研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- LAN Y. The study of nitrogen and phosphorus budget and estimation of the carrying capacity of crab ponds [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021.
- [12] 季铭,闫兴成,许晓光,等. 太湖流域河蟹不同生长期池塘养殖场氮磷动态变化研究[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2020, 43(4): 129-134.
- JI M, YAN X C, XU X G, et al. Study on the dynamic changes of nitrogen and phosphorus from pond farms in different growth stages of crab in Taihu lake basin [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2020, 43(4): 129-134.
- [13] 吴凯,马旭洲,王友成,等. 河蟹生态养殖池塘不同水层水质变化的研究[J]. 上海农业学报, 2018, 34(1): 46-51.
- WU K, MA X Z, WANG Y C, et al. Study on the change of water quality in different layers in the crab eco-culture ponds[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2018, 34(1): 46-51.
- [14] 余丽梅,李云峰,杜开开,等. 中华绒螯蟹生长关键期池塘水质状况分析及评价[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(1): 136-142.
- YU L M, LI Y F, DU K K, et al. Analysis and evaluation of water quality in ponds during critical growth period of Chinese mitten crab [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(1): 136-142.
- [15] 张旭,周丽,蔡敏,等. 基于宏基因组学的中华绒螯蟹养殖池塘水体微生物群落结构和功能组成分析[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(4): 112-124.
- ZHANG X, ZHOU L, CAI M, et al. Metagenomics-based analysis of microbial community structure and function composition in aquaculture pond for Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(4): 112-124.
- [16] BAI D, LI X W, LIU Z H, et al. Nitrogen and phosphorus turnover and coupling in ponds with different aquaculture species[J]. Aquaculture, 2023, 563: 738997.
- [17] 丁惠明,沈彩娟,陈雯,等. 池塘养殖换水目的和水质状态对换水频率的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(6): 781-786.
- DING H M, SHEN C J, CHEN W, et al. Preliminary study on the effects of water exchange purpose and water quality status on the frequency of water exchange in pond

- aquaculture [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(6): 781-786.
- [18] 史密伟, 王艳霞, 高博, 等. 2013—2022 年白洋淀水体富营养化时空变化特征研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(10): 1472-1478.
- SHI M W, WANG Y X, GAO B, et al. Spatial and temporal characteristics of eutrophication in Baiyangdian Lake from 2013 to 2022 [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(10): 1472-1478.
- [19] 何利聪, 王东伟, 张敏莹, 等. 淮中游叶绿素 a 的时空分布特征及富营养化评价[J]. *大连海洋大学学报*, 2024, 39(1): 114-123.
- HE L C, WANG D W, ZHANG M Y, et al. Spatial and temporal distribution of chlorophyll a concentration and eutrophication evaluation in the middle reaches of Huaihe River [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(1): 114-123.
- [20] 李伟, 杨岷园, 熊健, 等. 西藏雅尼湿地水质评价及污染源分析[J/OL]. *水生态学杂志*, (2024-07-30). <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202404160132>.
- LI W, YANG J Y, XIONG J, et al. Water quality evaluation and pollution source analysis of Yani Wetland in Xizang [J/OL]. *Journal of Hydroecology*, (2024-07-30). <https://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202404160132>
- [21] 刘永茂, 金梅娟, 付卫国, 等. 蔬菜替代伊乐藻对中华绒螯蟹产量和蟹塘水质的影响[J]. *淡水渔业*, 2022, 52(6): 51-57.
- LIU Y M, JIN M J, FU W G, et al. Effects of Ipomoea aquatic as a substitute of Elodea nuttallii on Eriocheir sinensis yields and water quality in ponds [J]. *Freshwater Fisheries*, 2022, 52(6): 51-57.
- [22] LIU X, LI Z R, SHENG H, et al. The underestimated importance of fertilizer in aquacultural phosphorus budget: case of Chinese mitten crab [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 852: 158523.
- [23] ZHANG S, HUANG J C, JI Y L, et al. Nitrogen and phosphorus cycling for aquaculture ponds with artificially-controlled drainage: sources, sinks and treatment strategies [J]. *Ecological Engineering*, 2024, 206: 107331.
- [24] XU B, ZHANG X Y, CHANG J S, et al. Remediation of the black-odor water body by aquatic plants with plant growth-promoting Rhizobacteria: lab and pilot tests [J]. *Environmental Research*, 2023, 223: 115462.
- [25] 伏桂仙, 曹伟张, 陶俊. 12 种水生植物对富营养化水体的净化效果[J]. *环境科学与技术*, 2021, 44(S2): 308-315.
- FU G X, CAO W Z, TAO J. Purification effect of 12 aquatic plants on eutrophic water [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44(S2): 308-315.
- [26] 徐婵, 刘峰, 李娴, 等. 黄河三角洲盐碱地稻蟹共作系统水质和底栖生物群落[J]. *渔业现代化*, 2024, 51(5): 56-62.
- XU C, LIU F, LI X, et al. Study on the dynamic changes of water quality and benthic community of rice-crab co-cropping model in saline-alkali land of Yellow River Delta [J]. *Fishery Modernization*, 2024, 51(5): 56-62.
- [27] 戴丹超, 马旭洲, 张勇, 等. 宜兴太湖地区河蟹生态养殖池塘对水环境的影响[J]. *环境化学*, 2019, 38(11): 2573-2582.
- DAI D C, MA X Z, ZHANG Y, et al. Impact of Eriocheir sinensis ecological culture ponds on water environment in Gehu Lake area of Yixing City [J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(11): 2573-2582.
- [28] 陈瑾, 廖明军, 何绪刚, 等. 池塘表层底泥反硝化菌丰度与环境因子的相关性分析[J]. *淡水渔业*, 2014, 44(4): 90-95.
- CHEN J, LIAO M J, HE X G, et al. Correlation between the abundance of denitrifiers and environmental factors in aquaculture surface sediments [J]. *Freshwater Fisheries*, 2014, 44(4): 90-95.
- [29] 倪蒙, 储忝江, 刘梅, 等. 水生植物种类及覆盖率水质净化效果研究[J]. *水产科学*, 2023, 42(6): 1063-1071.
- NI M, CHU T J, LIU M, et al. Effects of different aquatic macrophytes and coverages on purification of aquaculture wastewater [J]. *Fisheries Science*, 2023, 42(6): 1063-1071.
- [30] MILLER M M, SHERMAN T D, MAJOR K M. Competitive success of the invasive species, *Hydrilla verticillata*, over *Vallisneria spiralis* in nature could be linked to differences in nitrogen metabolism [J]. *Aquatic Botany*, 2022, 182: 103544.
- [31] 付贤茂, 罗国芝, 刘文畅, 等. 池塘沉积物对上覆水脱氮作用的初步探究[J]. *渔业现代化*, 2020, 47(3): 58-63.
- FU X M, LUO G Z, LIU W C, et al. Preliminary study on denitrification of overlying water by pond sediments [J]. *Fishery Modernization*, 2020, 47(3): 58-63.
- [32] 王嗣彤, 程全国, 雷坤, 等. 温州市鳌江水系叶绿素 a 和氮、磷的分布特征与富营养化研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(2): 291-296.
- WANG S T, CHENG Q G, LEI K, et al. Eutrophication and distribution characteristics of chlorophyll a, nitrogen and phosphorus in Aojiang river system, Wenzhou City [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(2): 291-296.
- [33] 黄振华, 邵志平, 史新明, 等. 义乌岩口水库富营养化综合评价及水环境容量分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(12): 7073-7081.
- HUANG Z H, SHAO Z P, SHI X M, et al. Comprehensive eutrophication evaluation and water environment capacity analysis of Yiwu Yankou reservoir

- [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(12): 7073-7081.
- [34] 曹晶, 田泽斌, 储昭升, 等. 太湖蓝藻水华暴发的氮磷控制阈值分析[J]. *湖泊科学*, 2022, 34(4): 1075-1089.
CAO J, TIAN Z B, CHU Z S, et al. Nitrogen and phosphorus control thresholds of cyanobacterial blooms in Lake Taihu[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2022, 34(4): 1075-1089.
- [35] 张家瑞, 曾勇, 赵彦伟. 白洋淀湿地水华暴发阈值分析[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(8): 1744-1750.
ZHANG J R, ZENG Y, ZHAO Y W. Threshold analysis of water blooms in Baiyangdian wetlands[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(8): 1744-1750.
- [36] 温成成, 黄廷林, 孔昌昊, 等. 北方富营养分层型水库藻类季节性暴发机制及其阈值分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(3): 1452-1464.
WEN C C, HUANG T L, KONG C H, et al. Analysis of mechanism and start-up thresholds of seasonal algal blooms in a northern eutrophic stratified reservoir[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3): 1452-1464.
- [37] 杨龙, 王晓燕, 王子健, 等. 富营养化水体磷阈值的动态 AGP 模拟研究[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1625-1630.
YANG L, WANG X Y, WANG Z J, et al. Simulation on phosphorus threshold for lake eutrophication by a dynamic algae growth potential (AGP) experimentation[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5): 1625-1630.
- [38] 陈小华, 李小平, 王菲菲, 等. 苏南地区湖泊群的富营养化状态比较及指标阈值判定分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 390-399.
CHEN X H, LI X P, WANG F F, et al. Research on the difference in eutrophication state and indicator threshold value determination among lakes in the Southern Jiangsu province, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 390-399.
- [39] 郭茹, 杨京平, 梁新强, 等. 太湖苕溪流域氮磷的生物阈值评估[J]. *环境科学学报*, 33(10): 2756-2765.
GUO R, YANG J P, LIANG X Q, et al. Biological threshold of nitrogen and phosphorus in Tiaoxi River, Taihu Lake Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(10): 2756-2765.
- [40] 张旭, 周丽, 蔡敏, 等. 基于形态学和宏基因组学的养殖蟹塘浮游植物群落分析[J]. *南方水产科学*, 2024, 20(1): 151-160.
ZHANG X, ZHOU L, CAI M, et al. Analysis of phytoplankton community in aquaculture crab pond using morphological and metagenomics methods[J]. *South China Fisheries Science*, 2024, 20(1): 151-160.
- [41] JIN L Q, DING A J, LIN J W, et al. Dynamics of phytoplankton communities and environmental drivers in Chinese mitten crab aquaculture ponds: highlighting the need for cyanobacteria control[J]. *Water*, 2024, 16(12): 1688.
- [42] 潘璠, 江敏, 吴昊, 等. 凡纳滨对虾养殖池塘及外河道的浮游植物群落结构变化[J]. *水产学报*, 2024, 48(9): 099111.
PAN F, JIANG M, WU H, et al. Changes of phytoplankton community structure in *Litopenaeus vannamei* culture ponds and outer river[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(9): 099111.
- [43] 童璐, 刘丹, 段骄阳, 等. 千岛湖浮游植物群落时空变化及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2024, 33(5): 1176-1186.
TONG L, LIU D, DUAN J Y, et al. Temporal and spatial changes of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Qiandao Lake[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2024, 33(5): 1176-1186.
- [44] 王文婷, 李丰, 徐赛赛, 等. 上海青草沙水库浮游植物功能群时空变化特征及其影响因子[J]. *上海海洋大学学报*, 2023, 32(6): 1224-1236.
WANG W T, LI F, XU S S, et al. Spatiotemporal variation of phytoplankton communities and their relationship with environmental factors in Shanghai Qingcaosha Reservoir[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2023, 32(6): 1224-1236.

Changes and evaluation of water quality in adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island

LIN Jianwei¹, JI Gaohua², YANG Jie³, ZHOU Jie³, WU Xugan², ZHAN Yanhui¹, XIONG Ruixiang¹, SONG Yudi², YE Jiawei¹, DING Longhai¹, WANG Xinyi¹

(1.College of Oceanography and Ecological Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2.College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3.Shanghai Chongming District Aquatic Technology Promotion Station, Shanghai 202150, China)

Abstract: Water quality ponds plays a pivotal role in the pond culture of Chinese Mitten Crab (*Eriocheir sinensis*), influencing not only the yield and quality of the crabs but also the ecological health of the pond water and the compliance of discharged tail water with environmental standards. In this study, five representative adult Chinese mitten crab culture bases on Chongming Island were selected as sampling sites. The research systematically investigated and evaluated the changes in pond water quality throughout the crab culture period. The water quality parameters analyzed included dissolved reactive phosphorus (SRP), total phosphorus (TP), ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$), nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$), nitrite nitrogen ($\text{NO}_2^-\text{-N}$), total nitrogen (TN), permanganate index (COD_{Mn}), suspended particulate matter (SS), Chlorophyll a (*Chl.a*), among others. The results showed that the average concentrations of SRP and TP in the water of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island ranged from 0.091 to 0.300, and from 0.235 to 0.449 mg/L, respectively, exhibiting fluctuations over the culture period. The average concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was higher in April (3.82 mg/L), but the $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentrations were lower in the middle and late stages of culture (< 2 mg/L). The average concentration of TN was relatively high in April and May (7.04 and 6.19 mg/L, respectively), the TN concentration in some ponds was also relatively high in September and October, but the TN concentrations were relatively low in the middle stage of culture (< 3 mg/L). As the culture period progressed, the average concentration of COD_{Mn} initially decreased, reaching lower levels from April to September, before subsequently increasing again. The average concentration of SS fluctuated between 159 and 331 mg/L when the culture time prolonged. After June, the average concentration of *Chl.a* gradually increased and the maximum value was obtained in October. There was a significant correlation among TP, SRP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and TN in the water of adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island, and COD_{Mn} was significantly positively correlated with TN and *Chl.a*. However, *Chl.a* was only significantly positively correlated with COD_{Mn} , and SS was only significantly positively correlated with $\text{NO}_2^-\text{-N}$. For the adult Chinese mitten crab culture ponds on Chongming Island, the risk of cyanobacterial bloom was high. Compared to the Shanghai Aquaculture Tailwater Discharge Standards, the primary pollutant exceeded the limit was SS, while $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN only surpassed the standard during the early stages of the culture period (from March to May). To sum up, in the adult Chinese mitten crab pond on Chongming Island, the average concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ significantly declined during the middle and late stages of the culture period. Meanwhile, TN levels decreased notably in the mid-stage. As for COD_{Mn} , its average concentration initially decreased and then increased again, with lower average concentrations observed from April to September. COD_{Mn} and TN exhibited a significant positive correlation, while SS and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ also showed a strong positive relationship. According to the pollutant discharge standards for aquaculture tailwater, SS emerged as the primary pollutant in Chongming *Eriocheir sinensis* culture ponds. Consequently, sedimentation treatment of tailwater is essential to ensure compliance with discharge standards before its release into receiving water bodies.

Key words: Chinese mitten crab; culture pond; water quality index; pond tailwater; discharge standard; eutrophication evaluation