

凡纳滨对虾温棚工厂化养殖中 主要水质因子的变化特点及相关性分析

王文君¹, 王东亮¹, 王磊¹, 汪顺周¹, 孙利东², 杜燕³

(1. 烟台市海洋环境监测预报中心, 山东 烟台 264003; 2. 烟台市海洋发展和渔业局, 山东 烟台 264003;
3. 山东泽元检测技术有限公司, 山东 烟台 264003)

摘要: 2021年6月至10月,对山东省海阳市一处典型的凡纳滨对虾温棚工厂化养殖场养殖进水和尾水中溶解氧(DO)、pH值、悬浮物(TSS)、总氮(TN)等12项水质因子进行了全程定期检测,同时,采集养殖场周边海域海水开展对照实验,分析养殖过程中主要水质因子的变化特点及其相互关系。养殖场采用地下咸水作为养殖水源,结果显示,进水呈富营养化状态,水中有机成分较多,其水质与对照海水相比有显著差异:DO和pH值显著低于对照海水;活性磷酸盐(DIP)、无机氮(DIN)、TN含量显著高于对照海水。在养殖过程中,养殖尾水水质整体劣于进水,其富营养化程度逐渐加重,DO、pH值呈下降趋势,TSS、化学需氧量(COD)、TN、总磷(TP)含量呈逐渐升高的趋势。DIN含量整体呈现先升高后下降的趋势,至养殖中期达到峰值。DIP含量呈现出较大的波动。DO与TSS、COD、DIN、TN和TP呈负相关。TSS与TN呈极显著正相关,与COD、TP呈显著正相关。TN与DIN、TP呈显著正相关。TSS和TN是影响凡纳滨对虾养殖尾水水质的关键因子。

关键词: 烟台; 凡纳滨对虾; 养殖进水; 养殖尾水; 水质; 相关性

中图分类号: S949 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2022)04-0301-10

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)属甲壳纲(Crustacea)、对虾科(Penaeidae)、对虾属(Penaeidae),又称南美白对虾,最初产于南美洲太平洋赤道附近的厄瓜多尔。其壳薄体肥、肉质鲜美^[1],适温适盐范围广、生长速率快、抗病力强,是烟台市对虾养殖的主要品种之一。近年来,在烟台滨海地区,以高密度、集约化为特点的凡纳滨对虾温棚工厂化养殖模式发展迅速,据统计,2021年烟台市凡纳滨对虾养殖面积466.67 ha,总产量达3767 t。随着养殖规模的扩大和养殖密度的提高,对虾养殖尾水直排入海情况及其对近岸海域生态环境的影响引起了广泛关注。近年来,随着国家对海洋生态环境的日益重视,《渤海综合治理攻坚战行动计划》《山东省关于加强入海排污口整治工作的指导意见》《关于进一步加大污染防控力度确保实现渤海区域环境综合治理攻坚战水质目标的通知》等重要文件相继出台,要求大力发展绿色健康养殖技术,对沿海地区工厂化养殖尾水综合治理和达标排放

做出了重要指示。凡纳滨对虾养殖具有季节性、周期性的特点,其尾水中主要水质因子含量随着养殖周期的变化而不断波动,关于虾池水质因子的变化及其对养殖影响的研究已有相关报道^[2-4],但是对凡纳滨对虾温棚工厂化养殖进水与周边海域海水的水质差异、进水和尾水中水质因子的变化及其相关性的研究则较少见。本研究通过定期监测凡纳滨对虾温棚工厂化养殖进水和尾水中主要水质因子的变化情况,分析它们之间的相互关系,比较进水与周边海域海水的水质差异,旨在为政府管理部门开展尾水综合治理和制定海水养殖尾水排放标准提供数据支撑。

1 材料与方 法

1.1 试验场地

2021年6月至10月,对山东省海阳市龙山

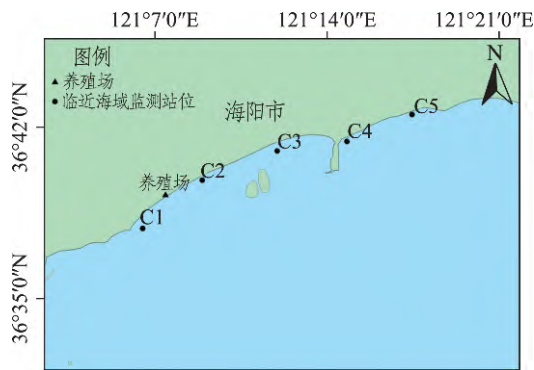
收稿日期: 2022-06-12; 修回日期: 2022-08-12

基金项目: 烟台市级统筹涉农项目“陆域工厂化海水养殖的水环境影响监测评价及尾水治理改善措施应用示范项目”

第一作者简介: 王文君(1982—),男,山东威海人,高级工程师,研究方向为海洋防灾减灾、海洋和渔业环境监测。E-mail: wangwenjun1982@126.com

通信作者简介: 孙利东(1978—),男,山东烟台人,研究方向为渔业管理。E-mail: hyjyjk@yt.shandong.com

街道一处凡纳滨对虾温棚养殖场进行跟踪性监测,监测时间跨度 105 天,覆盖了从养水、标粗直至养成的整个对虾养殖周期,共开展监测 13 次。在此期间,对养殖大棚排放尾水中的主要污染物质进行了测定和分析。监测点建有透光塑料大棚,双层棚顶,养殖池总面积约 4430 m²,池周建有增氧管道,通过悬挂气石全程增氧。养殖进水为抽取的地下咸水,养殖过程保持虾池水位 1.2~1.5 m。虾苗为进口凡纳滨对虾(*L. vannamei*) 虾苗,规格 0.8~1.0 cm,投苗密度约 400 尾·m⁻³,标粗 20 天后,虾苗规格达到 3 cm 左右分池,分池后养殖密度约 200 尾·m⁻³。根据对虾生长阶段,投喂不同型号的配合饲料,在虾池池壁处设置饲料观察台 3~5 个,用于观察投喂饲料是否有剩余、对虾的肠胃是否饱满,以了解对虾的摄食情况,及时调整投饵量。养殖期间施用光合细菌、护水宝等复合菌剂调节水质。标粗期间内不排放尾水,分苗后,根据水色和透明度状况,每日排放一定量的尾水,尾水排放量约 300 t·d⁻¹。7~9 月,在养殖场临近海域布设 5 个站位(图 1),采集表层海水水样做对照实验。



注: C1~C5 为调查点位。

图 1 养殖场临近海域调查站位

Fig.1 Survey sites of the sea area near the farm

1.2 水样采集与处理

养殖期间每 2 周采样 1 次,采样时间为早上 8:30~9:30,在集中换水时段尾水冲洗管道以后采集中段水样品,采样时避免混入生活污水,在采集尾水的同时,采集养殖进水进行比对研究。水样注入到 1 L 的聚乙烯塑料瓶中,放入冰盒低温保存,带回实验室进行检测。在养殖现场使用美

国赛维 Multiparameter Water Quality Sonde 6920 V2-1 型多功能水质测定仪测定溶解氧(DO)、pH 值、盐度和水温,用透明度盘测定透明度。分别于养殖第 0 d、第 50 d、第 80 d 在养殖场周边海域采集海水样品,采样依据《GB 17378.3—2007 样品采集贮存和运输》(GB 17378.3—2007)^[5] 执行。

1.3 监测项目与方法

养殖进水、养殖尾水、海水监测项目:溶解氧(DO)、pH 值、盐度、悬浮物(TSS)、化学需氧量(COD)、无机氮(DIN)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、活性磷酸盐(DIP)、总氮(TN)、总磷(TP)。分析方法按照《海洋监测规范第 4 部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)^[5] 和《海洋调查规范第 4 部分:海水化学要素调查》(GB/T 12763.4—2007)^[6] 执行。

1.4 数据处理

用 Excel 对尾水中各项水质因子数值进行处理,作图分析其变化趋势;用 IBM SPSS 23.0 对数据结果进行统计学分析。

富营养化评价方法——营养指数(E)法,计算公式:

$$E = \frac{COD \times DIN \times DIP \times 10^6}{4500}, \quad (1)$$

式中:COD、DIN、DIP 分别为水体中 COD、DIN、DIP 的实测值,单位以 mg·L⁻¹ 表示,如果 E ≥ 1,则水体呈富营养化状态。

2 结果与分析

2.1 进水及尾水中主要水质因子的变化情况

2.1.1 pH 值

在整个养殖周期中,进水 pH 值变化范围为 7.110~7.520,平均 7.330,在养殖中期有一定的波动,但是整体比较平稳。尾水 pH 值与进水相比有显著性差异(表 1),明显高于进水,在 7.820~8.360 之间,平均 8.010,呈现出从养殖前期逐渐升高,至养殖中期达到顶点,之后又逐渐下降的趋势,到养殖后期达到最低值(图 2(a))。

表1 进水、尾水中各水质因子均值及 t 检验结果
Tab.1 Mean value and t-test results of water quality factors in aquaculture influent and effluent

水质因子	采样点	平均值/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	标准差	均值 t 检验
DO	进水	5.510	0.420	0.000*
	尾水	7.920	1.530	
pH	进水	7.330	0.120	0.000*
	尾水	8.010	0.160	
盐度	进水	29.961	0.765	0.224
	尾水	29.481	1.155	
TSS	进水	14.200	8.300	0.000*
	尾水	76.500	24.000	
COD	进水	0.923	0.822	0.000*
	尾水	13.900	6.170	
DIP	进水	0.014	0.007	0.007*
	尾水	0.153	0.153	
DIN	进水	1.070	0.340	0.153
	尾水	1.690	1.440	
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	进水	0.056	0.011	0.378
	尾水	0.126	0.274	
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	进水	0.721	0.364	0.835
	尾水	0.775	0.852	
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	进水	0.292	0.109	0.091
	尾水	0.788	0.971	
TN	进水	2.260	0.970	0.000*
	尾水	5.410	1.800	
TP	进水	0.041	0.040	0.000*
	尾水	0.527	0.353	

注: * 表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

2.1.1.2 盐度

在整个养殖周期中,进水和尾水中盐度均相对稳定,进水盐度变化范围为 28.294~31.074,平均 29.961。尾水盐度与进水相比无显著性差异(表 1) 在 27.550~31.209 之间,平均 29.481(图 2(b))。

2.1.1.3 DO

使用多功能水质测定仪在养殖现场测定 DO。在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{DO})$ 变化范围为 7.110~7.520 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 5.510 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,整体比较平稳。尾水中 $\rho(\text{DO})$ 变化范围为 7.110~7.520 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 7.920 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,尾水 $\rho(\text{DO})$ 与进水相比有显著性差异(表 1) 整体含量高于进水,呈现出先升高后降低的趋势,在养殖后期,尾水中 DO 含量达到最低值,一度低于进水(图 2(c))。

2.1.1.4 TSS

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{TSS})$ 变化范围为 2.000~38.400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 14.200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 在养殖后期略有波动,但整体比较平稳。尾水中的悬浮物变化范围为 38.400~124.800 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均

76.500 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在整个养殖周期中,尾水悬浮物浓度与进水相比有显著性差异(表 1) 始终高于进水,呈现出一种逐渐升高的趋势(图 2(d))。

2.1.1.5 COD

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{COD})$ 变化范围为 0.464~3.600 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 0.923 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在养殖后期略有波动,但整体比较平稳。尾水中 $\rho(\text{COD})$ 变化范围为 0.613~23.400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 13.900 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在整个养殖周期中,尾水 $\rho(\text{COD})$ 与进水相比有显著性差异(表 1) 始终高于进水,并呈现出一种逐渐升高的趋势,在养殖后期,达到最大值(图 2(e))。

2.1.1.6 TP

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{TP})$ 变化范围为 0.012~0.162 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 0.041 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,整体比较平稳。尾水中 $\rho(\text{TP})$ 变化范围为 0.093~1.180 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 0.527 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在整个养殖周期中,尾水 $\rho(\text{TP})$ 与进水相比有显著性差异(表 1) 始终高于进水,波动较大,总体呈现出一种逐渐升高的趋势,在养殖后期,达到最高值(图 2(f))。

2.1.1.7 DIP

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{DIP})$ 变化范围为 0.002~0.025 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 0.014 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,整体比较平稳。尾水中 $\rho(\text{DIP})$ 变化范围为 0.006~0.501 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 0.153 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在整个养殖周期中,尾水中 $\rho(\text{DIP})$ 与进水相比有显著性差异(表 1) 始终高于进水,出现了两个高位,分别在养殖前期(第 20 d)和养殖中期(第 63 d),在养殖后期,活性磷酸盐的浓度明显下降(图 2(g))。

2.1.1.8 TN

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{TN})$ 变化范围为 1.290~3.940 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 2.260 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,整体上呈现出先升高后降低的趋势。尾水 $\rho(\text{TN})$ 变化范围为 1.570~8.960 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 5.410 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在整个养殖周期中,尾水中 $\rho(\text{TN})$ 与进水相比有显著性差异(表 1) 始终高于进水,在养殖前期和中期,与进水中 $\rho(\text{TN})$ 变化趋势相似,在养殖后期呈现比较明显的升高趋势(图 2(h))。

2.1.1.9 DIN

在整个养殖周期中,进水 $\rho(\text{DIN})$ 变化范围为 0.590~1.780 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 1.070 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$,在养水阶段,进水 $\rho(\text{DIN})$ 较高,之后逐步下降并趋于平稳。尾水中 $\rho(\text{DIN})$ 与进水相比无显著性

差异(表1),范围为 $0.053 \sim 4.390 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均 $1.690 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,其变化情况较为复杂,随着养殖时间的延长呈先上升后下降的趋势,在养殖中期

(第56 d)浓度达到最大,进入养殖后期先下降,在收获前后又有上升(图2(i))。

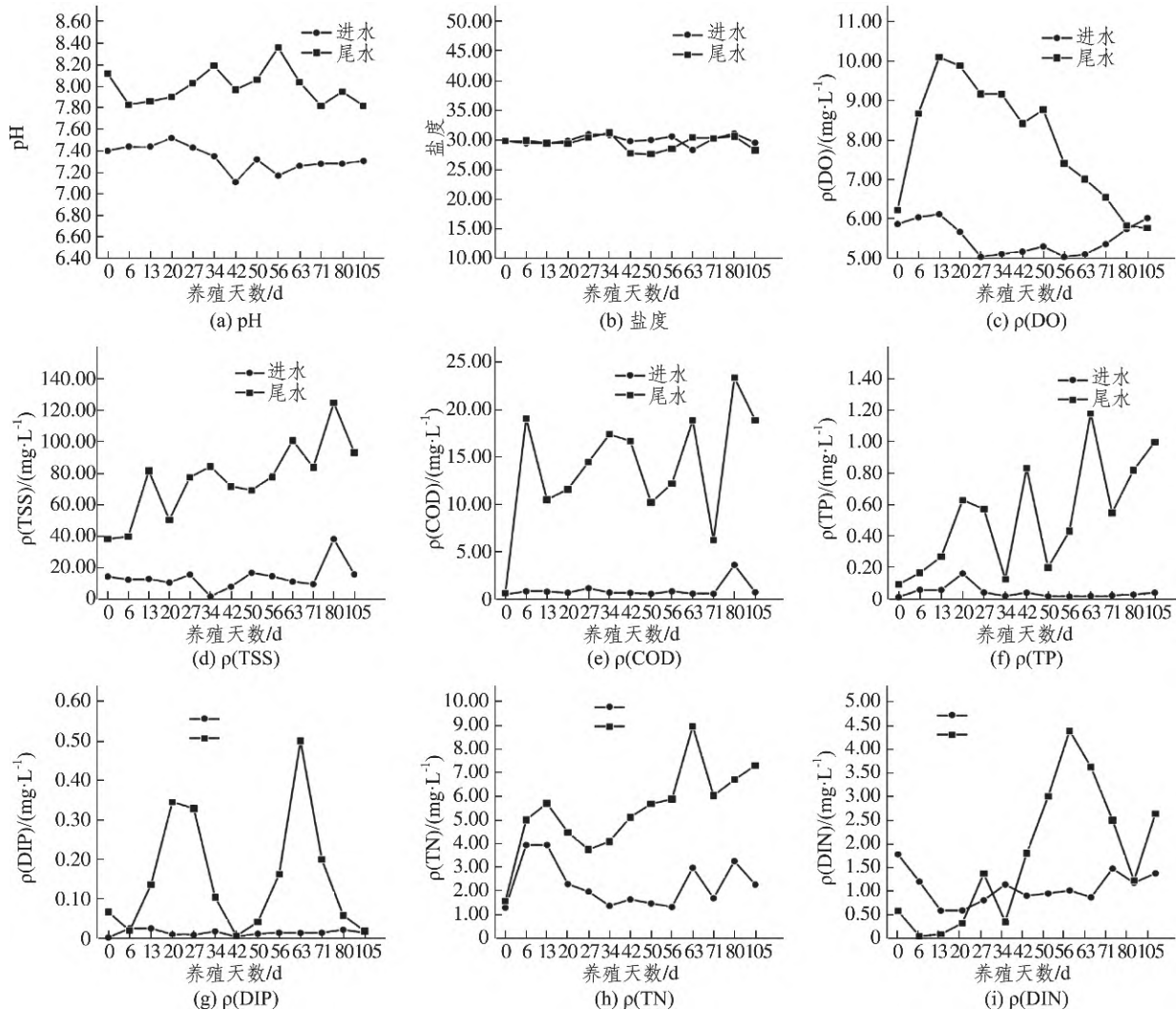


图2 养殖进水及尾水中各指标的变化

Fig.2 Variations of water quality factors in the aquaculture influent and effluent

2.1.10 三态氮(NO_3^- -N、 NO_2^- -N、 NH_4^+ -N)

水中DIN以硝酸盐氮(NO_3^- -N)、亚硝酸盐氮(NO_2^- -N)、氨氮(NH_4^+ -N)三种组分形式存在。调查发现,在整个养殖周期中,进水中DIN的组分变化相对稳定,三态氮在DIN中的占比波动不大,除个别时段外,均以 NO_3^- -N为主,平均占比67.45%,其次为 NH_4^+ -N,平均占比27.29%, NO_2^- -N最少,平均占比5.27%。尾水中三态氮与进水相比无显著性差异(表1),其变化情况比较复杂,在整个养殖周期中, NH_4^+ -N为DIN的主要组

成部分,平均占比46.66%; NO_3^- -N其次,平均占比45.89%; NO_2^- -N最少,平均占比7.45%。在不同养殖阶段中,池水中 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N、 NO_3^- -N占比有显著的波动(图3)。 NH_4^+ -N的占比在养殖前期和中期分别达到一次高峰,在养殖后期持续减少并达到最低值; NO_3^- -N占比在养殖中期达到最大,之后不断下降,在养殖后期尤其是临收获最后半个月左右又突然升高; NO_2^- -N在养殖周期的前80 d内基本维持在较低水平,但是在临收获最后半个月左右占比显著增加。

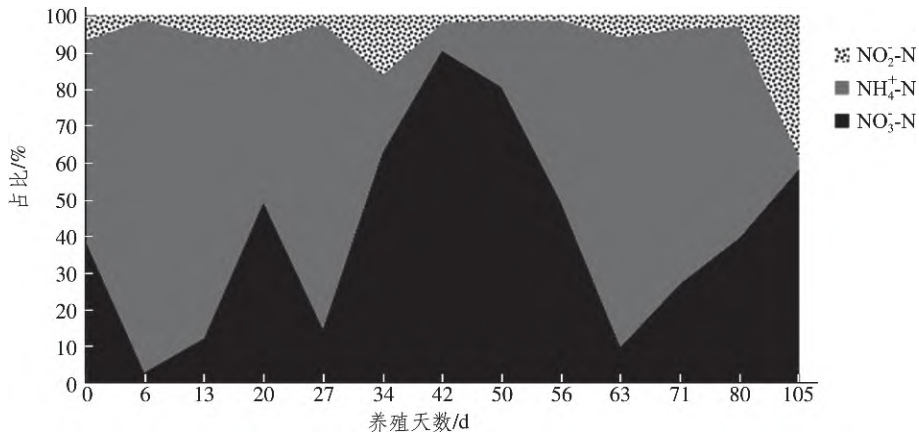


图 3 三态氮占比变化情况

Fig.3 Changes in the proportion of three-state nitrogen

2.2 进水与临近海域海水中主要水质因子的比较分析

对临近海域海水和进水中各水质因子检测值进行 t 检验 (表 2), 结果表明: 进水中 ρ(DO) 和

pH 值显著低于对照海水, ρ(DIP)、ρ(DIN)、ρ(TN) 显著高于对照海水, 而盐度、ρ(TSS)、ρ(COD)、ρ(TP) 检测结果与对照海水无显著性差异。

表 2 进水、海水中各水质因子均值及 t 检验结果表

Tab.2 Mean value and t-test results of water quality factors in aquaculture influent and seawater

水质因子	采样点	平均值/(mg·L ⁻¹)	标准差	均值 t 检验	水质因子	采样点	平均值/(mg·L ⁻¹)	标准差	均值 t 检验
DO	进水	5.510	0.420	0.027*	DIP	进水	0.014	0.007	0.001*
	海水	6.440	1.420			海水	0.004	0.002	
pH	进水	7.330	0.120	0.000*	DIN	进水	1.070	0.340	0.000*
	海水	8.030	0.210			海水	0.073	0.080	
盐度	进水	29.961	0.765	0.543	TN	进水	2.260	0.970	0.000*
	海水	30.170	0.989			海水	0.263	0.200	
TSS	进水	14.200	8.300	0.865	TP	进水	0.041	0.040	0.399
	海水	14.600	3.000			海水	0.032	0.011	
COD	进水	0.923	0.822	0.753					
	海水	0.992	0.177						

注: * 表示显著性差异 (P<0.05)。

2.3 进水及尾水中主要水质因子的相关性分析

相关性分析可以对多组变量元素进行分析, 反映因子之间相关程度, |r| 越接近 1, 显著性越强, 因子的相关性越大^[7]。对进水及尾水中 ρ(DO)、ρ(TSS)、ρ(COD)、ρ(DIP)、ρ(DIN)、ρ(NO₃⁻-N)、ρ(NO₂⁻-N)、ρ(NH₄⁺-N)、ρ(TP)、ρ(TN) 进行相关性分析。结果表明: 进水中 ρ(DO) 与 ρ(NO₂⁻-N)、ρ(NH₄⁺-N) 呈显著负相关 (P<0.05), 与 ρ(TN) 呈显著正相关 (P<0.05), 与 ρ(TP)、ρ(DIP) 呈正相关; ρ(TSS) 与 ρ(COD) 呈极显著正相关 (P<0.01); ρ(TN) 与 ρ(DIP) 呈极

显著正相关 (P<0.01), 与 ρ(DIN) 呈负相关; ρ(DIN) 与其组分 ρ(NO₃⁻-N) 呈极显著正相关 (P<0.01); ρ(TP) 与 ρ(DIP) 无明显相关性 (表 3)。

尾水中 ρ(DO) 与 ρ(TSS)、ρ(COD)、ρ(DIN)、ρ(TN) 和 ρ(TP) 呈负相关; ρ(TSS) 与 ρ(TN) 呈极显著正相关 (P<0.01), 与 ρ(COD)、ρ(TP) 呈显著正相关 (P<0.05); ρ(DIP) 与 ρ(DIN) 中的 ρ(NH₄⁺-N) 呈显著正相关 (P<0.05); ρ(DIN) 与 ρ(TN) 呈显著正相关 (P<0.05), 与其组分 ρ(NH₄⁺-N)、ρ(NO₃⁻-N) 呈极显著正相关 (P<0.01); ρ(TP) 与 ρ(TN) 呈显著正相关 (P<0.05) (表 4)。

表 3 进水水质因子间线性相关矩阵

Tab.3 Linear correlation matrix of water quality factors in aquaculture influent

水质因子	DO	TSS	COD	DIP	DIN	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	TP	TN
DO	1									
TSS	0.282	1								
COD	0.140	0.877**	1							
DIP	0.408	0.236	0.373	1						
DIN	0.211	0.102	0.007	-0.198	1					
NO ₂ ⁻ -N	-0.573*	-0.773**	-0.560*	-0.261	-0.279	1				
NO ₃ ⁻ -N	0.406	0.220	0.074	-0.134	0.950**	-0.407	1			
NH ₄ ⁺ -N	-0.632*	-0.331	-0.165	-0.148	0.003	0.377	-0.309	1		
TP	0.315	-0.116	-0.067	0.030	-0.529	0.179	-0.403	-0.336	1	
TN	0.603*	0.322	0.352	0.754**	-0.326	-0.452	-0.122	-0.570*	0.290	1

注: * 表示显著性相关($P < 0.05$); ** 表示极显著性相关($P < 0.01$)。

表 4 尾水水质因子间线性相关矩阵

Tab.4 Linear correlation matrix of water quality factors in aquaculture effluent

水质因子	DO	TSS	COD	DIP	NO ₂ ⁻ -N	NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N	DIN	TP	TN
DO	1									
TSS	-0.386	1								
COD	-0.053	0.568*	1							
DIP	0.171	0.146	-0.018	1						
NO ₂ ⁻ -N	-0.492	0.287	0.264	-0.137	1					
NO ₃ ⁻ -N	-0.213	0.122	-0.022	-0.354	0.267	1				
NH ₄ ⁺ -N	-0.334	0.381	0.007	0.671*	-0.058	0.138	1			
DIN	-0.446	0.384	0.042	0.217	0.310	0.737**	0.746**	1		
TP	-0.411	0.604*	0.520	0.410	0.502	0.119	0.434	0.460	1	
TN	-0.548	0.684**	0.097	0.315	0.446	0.302	0.560*	0.643*	0.683*	1

注: * 表示显著性相关($P < 0.05$); ** 表示极显著性相关($P < 0.01$)。

2.4 进水和尾水水质富营养化状况评价

在整个养殖周期中,养殖进水营养指数(E)变化范围为 0.33~20.35,平均 3.50,除了第 80 d 有较大波动外,其余时间中营养指数(E)相对稳定,对照站位海水营养指数(E)变化范围为

0.007 5~0.36,平均 0.085,相比海水,养殖进水呈现出比较明显的富营养化状况(图 4(a))。尾水营养指数(E)变化范围为 4.28~7615,平均 1004,尾水的富营养化状况较高,且在养殖后期出现剧烈的上升趋势(图 4(b))。

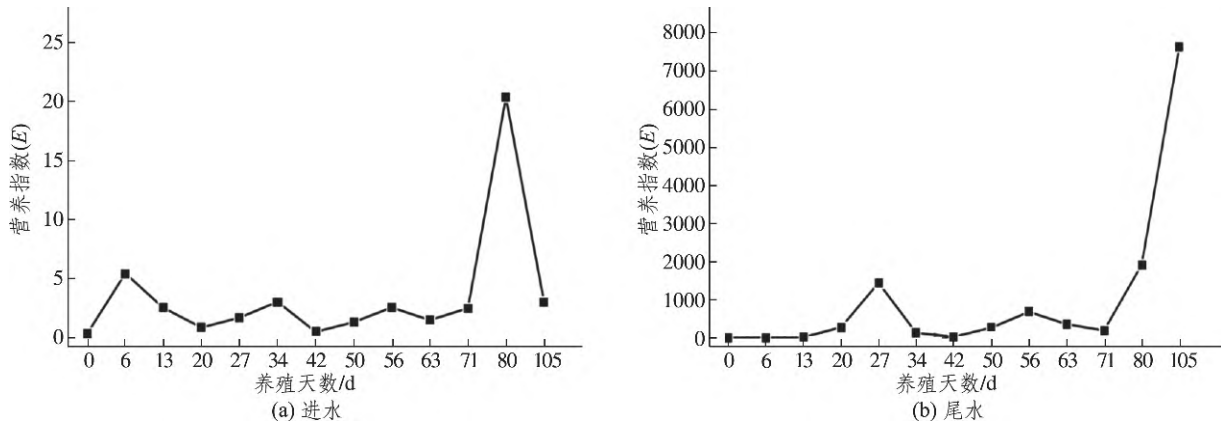


图 4 养殖进水(a)、尾水(b)营养指数(E)的变化情况

Fig.4 Variations of nutrient index (E) of the aquaculture influent(a) and effluent(b)

3 讨论

3.1 进水中水质因子特点

烟台滨海地区凡纳滨对虾温棚工厂化养殖场大多选址于近岸临近高潮线以上的区域,属于高位养殖^[8],一般通过打井抽取地下潜水作为养殖用水来源。本研究选取的养殖场具有上述典型特征,研究期间,养殖用水平均盐度 29.961,属于地下咸水,其成因非常复杂,是当地地质条件、地层含水层状况、水动力条件、降水、海水入侵、潮汐波动、季节变化、人类活动等因素综合作用的结果^[9]。养殖用水的理化性质稳定,有利于凡纳滨对虾的生长和发育^[10]。本研究发现,相比尾水,进水中各项水质因子含量相对稳定,起伏波动小,这说明地下咸水的生成环境较为稳定,受外界干扰的影响小,在对虾养殖中具有一定的优势。本研究对养殖进水与周边海域海水的水质因子含量进行了比较,结果显示,进水与海水水质存在显著差异,其 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{pH})$ 显著低于海水,而 $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{DIN})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 显著高于海水,其中, $\rho(\text{DIN})$ 甚至高于《海水养殖水排放要求》(SC/T 9103—2007)^[11]中的排放标准,这说明在进水方面,滨海地区凡纳滨对虾温棚工厂化养殖方式与通过纳潮截留或者直接抽取海水进行养殖的海水高位养殖有显著的不同。进水中 TSS 与 COD 显著相关, TN 与 DIN 呈负相关, TP 与 DIP 相关性不明显,说明进水中有机成分较多。进水水质呈富营养化状态,部分水质因子本底含量较高,因此,在凡纳滨对虾温棚工厂化养殖尾水排放标准的制定方面,应考虑进水的影响。同时,大量点状分布的取水井在生产过程中持续抽取地下咸水,对烟台滨海地区地下水水质及海水入侵状况的影响,还需要进一步研究。

通过对进水中各水质因子进行相关性分析可见, $\rho(\text{DO})$ 与 $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 、 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 呈显著负相关,与 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈正相关。水中 DIN 存在 NO_2^--N 、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 三种形态,可以在特定条件下通过硝化作用和反硝化作用相互转化,硝化反应是一个利用氨化反应产物的需氧过程, NH_4^+-N 在亚硝化细菌作用下被氧化成 NO_2^--N ,然后在硝化细菌的作用下进一步被氧化成 NO_3^--N 。当

水体缺氧时,反硝化细菌可以将 NO_3^--N 还原为 NO_2^--N ,再还原为氮气(N_2)、一氧化二氮(N_2O)和 NH_4^+-N 。因此,硝化与反硝化之间有很强的耦合作用^[12],水体中溶解氧是影响硝化和反硝化过程的关键因素。本研究结果与水中 DIN 形态转化及硝化、反硝化作用机理吻合,同时, $\rho(\text{DIN})$ 与 $\rho(\text{NO}_3^--\text{N})$ 呈极显著正相关,说明进水中 DIN 以 NO_3^--N 形态为主,整体上硝化作用占优势。进水中 $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{COD})$ 呈极显著正相关,说明进水中悬浮物的有机物成分占比较高。

3.2 尾水中水质因子变化特点及相关性分析

凡纳滨对虾温棚工厂化养殖尾水中水质因子的变动是由人工调控(人工增氧、饵料投喂、换水和水质改良剂的使用等)和生物(对虾、浮游生物和微生物)一系列生理生化活动共同作用的结果。

本研究发现,养殖场排放尾水的盐度基本保持稳定,且与进水盐度没有显著性差异,这可能与以下两方面因素有关:一是在养殖过程中,养殖用水来源单一稳定,未补充淡水或其他水源,且大棚可以阻隔外界降水对养殖水体的影响;二是养殖过程中保持了一定水量高频率的换水作业。

pH 值是判断池水及尾水水质的一个重要理化因子,它可以作为反映水质污染程度的重要指标,凡纳滨对虾一般适于在弱碱性水体中生活, pH 值以 7.8~8.5 为宜;同时,对虾养殖水体中 DO 含量的高低,直接决定细菌对有机物的分解速度、池中的硝化作用和反硝化作用过程,从而影响养殖环境中氮的循环速度和方向、溶解态氮的含量。本研究发现,进水 pH 值偏低,不是最适宜南美白对虾生长的 pH 值环境,养殖场通过使用生物肥水素、单胞藻等方法人工调节养殖水体的 pH 值,因此,尾水中 pH 值显著高于进水。在养殖过程中,尾水中 pH 值和 $\rho(\text{DO})$ 均呈现先升高后降低的趋势, $\rho(\text{DO})$ 尤为明显,且均与 $\rho(\text{TSS})$ 和 $\rho(\text{COD})$ 呈负相关,说明养殖环境中的光合作用、呼吸作用以及有机物氧化分解是影响尾水 pH 值、 $\rho(\text{DO})$ 的重要因素。养殖初期,池塘水体中有机物总量较小,微藻生长旺盛,环境中的光合作用强,而呼吸作用较弱, pH 值和 $\rho(\text{DO})$ 相对较高;养殖期间随着对虾的生长和投喂饲料量的增加,对虾代谢物不断增多,水体悬浮有机物的含量

持续上升,有机物分解和生物呼吸的耗氧量已超出藻类光合作用的产氧量和人工增氧量,水中 CO_2 不断积累,从而导致养殖中后期水体的pH值和 $\rho(\text{DO})$ 持续降低,而 $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{COD})$ 则逐渐升高。

在整个养殖周期中,尾水中 $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 均在养殖末期达到最高值,呈现出逐渐升高的趋势, $\rho(\text{TSS})$ 与 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈显著正相关,与 $\rho(\text{TN})$ 呈极显著正相关, $\rho(\text{COD})$ 与 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 呈正相关,说明悬浮物中氮磷成分不断增加,整个养殖水体中有机物质也在不断增加。在对虾养殖系统中,水体中有机物和氮磷的主要来源是残余饲料、对虾排泄物质,其次是生物残体^[13],随着养殖时间的延长,过量投饵、对虾排泄物以及生物残体的积累,都是造成尾水中 $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 逐渐升高的原因。同时,尾水中 $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 与其他水质因子的含量变化有较强的相关性,说明TSS和TN是影响尾水水质状况的关键因子。

尾水中 $\rho(\text{DIN})$ 和 $\rho(\text{DIP})$ 的变化比较复杂,相较进水,均出现了两次比较大的波动,且两者的波动趋势在时间序列上比较吻合, $\rho(\text{DIP})$ 与 $\rho(\text{DIN})$ 有一定的相关性,与 $\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$ 则显著相关。浮游植物在对虾养殖生态系统中起着重要作用,是虾池生态系统内物质循环和能量流动的关键环节,也是水体氮磷循环的重要组成部分。有研究表明,影响对虾精养池中浮游植物丰度的主要因子依次为活性磷酸盐>氨氮>亚硝酸氮>硝酸盐>温度>溶解氧^[14],在凡纳滨对虾的养殖池塘中,浮游植物群落以绿藻门的种类最多,数量上则是蓝藻居多,绿藻次之^[15]。薄芳芳等^[16]的研究显示,蓝藻、绿藻生物量受氮磷营养盐浓度的影响较大,孟顺龙等^[17]研究表明氮主要影响绿藻,磷主要影响蓝藻,浮游植物在生长过程中,会优先利用水体环境中的溶解态DIN和DIP,对DIN会优先利用其中的 NH_4^+-N ^[18],因此,尾水中 $\rho(\text{DIN})$ 和 $\rho(\text{DIP})$ 的剧烈波动,可能与养殖环境中浮游植物的生长繁殖情况有关。溶解态DIN是对虾养殖系统中溶解态氮的主要形式之一,有研究报道,对虾养殖过程中 $\rho(\text{DIN})$ 会出现较大波动^[19],在养殖初期至中期逐渐增高,至养殖中期达到峰值^[20-21],本研究的结果与前人研究较为契合。尽管尾水中 $\rho(\text{DIN})$ 与进水中没有显著差异,但是其组分情况产生了较大变化,与进水明显不同。

进水中以 NO_3^--N 为主,而尾水中则以 NH_4^+-N 为主。在对虾养殖环境中, NH_4^+-N 主要来源于细菌对有机物的分解,也就是氨化作用,在溶解氧充分的情况下,细菌分解有机物为 NH_4^+-N 、 CO_2 和 H_2O 。高密度养殖和大量投饵是 NH_4^+-N 在DIN中占比较高的主要原因。同时,随着养殖环境中DO含量的变化,硝化作用和反硝化作用交替进行,也会影响到三态氮的变化。本研究发现在养殖末期,随着水体中 $\rho(\text{DO})$ 的逐渐下降,反硝化作用加强, $\rho(\text{NO}_2^--\text{N})$ 明显升高,最高时达到 $1.02\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,超过对虾健康养殖的阈值^[22]。水中 NO_2^--N 和 NH_4^+-N 对生物体有较强的毒性,对水产养殖和周边海洋环境都会产生不利的影响。因此,在凡纳滨对虾温棚工厂化养殖的中后期阶段,合理调节养殖水体中的DO含量、降低水体有机物负荷是改善对虾生活环境、确保对虾健康成长和提高尾水水质质量的关键技术措施。

本研究发现,尾水中 $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 比进水中显著升高,尾水富营养化程度非常高,持续大量直排入海会影响周边海域的自净能力,加速局部海域的富营养化进程,对周边海洋环境状况产生较大的环境胁迫作用,因此,应加强凡纳滨对虾温棚工厂化养殖尾水处理措施和达标排放方面的研究,尤其要着力研究去除尾水中TSS和TN的技术方法。

4 结论

1) 本研究选取的凡纳滨对虾养殖场具有烟台滨海地区凡纳滨对虾温棚工厂化养殖的典型生产特征,不直接使用海水养殖,而是采用地下咸水作为养殖用水来源,其水质与近岸海域海水存在显著差异,水中 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{pH})$ 显著低于海水, $\rho(\text{DIP})$ 、 $\rho(\text{DIN})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 显著高于海水,呈现明显的富营养化状况,水中有机物质含量较高。

2) 凡纳滨对虾养殖过程中,尾水水质整体明显劣于进水,尾水中 $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 、 $\rho(\text{DIP})$ 显著高于进水。

3) 凡纳滨对虾养殖过程中,尾水水质呈逐渐下降的趋势,主要表现在: $\rho(\text{DO})$ 和pH值逐渐下降, $\rho(\text{TSS})$ 、 $\rho(\text{COD})$ 、 $\rho(\text{TP})$ 、 $\rho(\text{TN})$ 逐渐升高,尾水富营养化程度逐渐加重。

4) TSS和TN是影响凡纳滨对虾养殖尾水水

质的关键因子。合理调节养殖水体中的 DO 含量、降低 TSS、TN 含量和水体有机物负荷是改善对虾生活环境、确保对虾健康成长和提高尾水水质质量的关键技术措施。

参考文献:

- [1] 周井娟. 中国对虾养殖业发展轨迹及技术变迁 [J]. 中国农学通报 2016, 32(8): 22-29.
- [2] 陈金玲. 精养对虾主要生态因子变化特点与相关性分析 [J]. 南方水产科学 2012, 8(4): 49-56.
- [3] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖系统的水质理化状况 [J]. 湛江海洋大学学报, 2006, 26(1): 16-21.
- [4] 李奕雯, 李卓佳, 曹煜成, 等. 对虾海水高密度养殖后期水质因子的昼夜变化规律 [J]. 南方水产, 2010, 6(6): 26-31.
- [5] 国家海洋局. 海洋监测规范: GB 17378—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1.
- [6] 国家海洋局. 海洋调查规范: GB/T 12763—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 11.
- [7] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 175.
- [8] 苏守明. 海水高位养殖造成的环境问题分析: 以北部湾海水养殖为例 [J]. 农业经济, 2012, 19(6): 432-435.
- [9] 李进, 龚绪龙, 张岩, 等. 连云港地区地下咸水水化学特征及其成因分析 [C]// 曲久辉, 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会—环境工程技术创新与应用分会场论文集 (二). 北京: 工业建筑杂志社, 2021: 110-117+131.
- [10] 沈辉, 乔毅, 蒋葛. 怎样提高南美白对虾养殖效益 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 56-68.
- [11] 中华人民共和国农业农村部. 海水养殖水排放要求: SC/T 9103—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007: 2.
- [12] 李奕雯, 李卓佳, 曹煜成, 等. 对虾海水高密度养殖后期水质因子的昼夜变化规律 [J]. 南方水产, 2010, 6(6): 26-31.
- [13] 黄翔鹤. 对虾高位池水环境养殖污染和浮游微藻生态调控机制研究 [D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [14] 米振琴, 谢骏, 潘德博, 等. 精养对虾池浮游植物、理化因子与虾病的关系 [J]. 上海水产大学学报, 1999, 8(4): 304-308.
- [15] 王旭娜, 江敏, 钟锐, 等. 凡纳滨对虾养殖池塘中浮游植物群落结构与水质因子的关系 [J]. 水产学报, 2018, 42(11): 1787-1803.
- [16] 薄芳芳, 杨虹, 左倬, 等. 上海公园水体夏季浮游植物群落与环境因子的关系 [J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1259-1265.
- [17] 孟顺龙, 裘丽萍, 胡庚东, 等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1438-1444.
- [18] 王文君. 2014 年四十里湾一次海洋卡盾藻赤潮发展过程及其成因研究 [J]. 安徽农业科学, 2017, 45(15): 66-72.
- [19] 申玉春, 熊邦喜, 叶富良, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖系统的水质理化状况 [J]. 湛江海洋大学学报, 2006, 26(1): 16-21.
- [20] 方志山, 杨圣云, 许振祖. 杏林对虾池综合养殖系统主要环境因子的变化 [J]. 台湾海峡, 2001, 20(4): 496-501.
- [21] 王小谷, 胡锡钢. 杭州湾淡化对虾养殖池水中氮磷营养盐的存在特征 [J]. 东海海洋, 2004, 22(3): 56-61.
- [22] 麦贤杰, 黄伟健, 李卓佳, 等. 对虾健康养殖学 [M]. 北京: 海洋出版社, 2009: 214-325.

Variation Characteristics and Correlation Analysis of Major Water Quality Factors in Greenhouse Industrialized Culture for *Litopenaeus vannamei*

WANG Wenjun¹, WANG Dongliang¹, WANG Lei¹, WANG Shunzhou¹, SUN Lidong², DU Yan³

(1. Yantai Marine Environment Monitoring and Forecasting Center, Yantai 264003, China; 2. Yantai Marine Development and Fishery Bureau, Yantai 264003, China; 3. Shandong Zeyuan Testing Technology Co., Ltd, Yantai 264003, China)

Abstract: To study the variation characteristics and correlation of major water quality factors in aquaculture influent and effluent of greenhouse industrialized culture for *Litopenaeus vannamei*, we measured 12 water quality factors including the concentration of the dissolved oxygen, the total suspended solids, the total nitrogen as well as

pH etc.in the aquaculture influent and effluent of a greenhouse industrialized culture farm for *Litopenaeus vannamei* in Haiyang City Shandong Province from June to October in 2021.At the same time the seawater around the farm was collected for comparison and the variation characteristics and mutual relationship of major water quality factors in the culture process were analyzed.The results showed that the quality of aquaculture influent was significantly different from the control seawater.The water contained more organic components and was in a state of eutrophication.The dissolved oxygen(DO) and pH were significantly lower than the control seawater , while the active phosphate(DIP) ,inorganic nitrogen(DIN) and total nitrogen(TN) were significantly higher than the control seawater.The aquaculture effluent was in a state of eutrophication and gradually aggravated during the culture period the DO and pH in the aquaculture effluent showed a downward trend and the suspended solids(TSS) ,chemical oxygen demand(COD) ,total nitrogen(TN) and total phosphorus(TP) showed a gradual increasing trend.DIN increased gradually from the initial stage to the middle stage of breeding and reached the peak in the middle stage and DIP fluctuated greatly.DO was negatively correlated with TSS ,COD ,DIN ,TN and TP.TSS was positively correlated with TN ,COD and TP.TN was positively correlated with DIN and TP.TSS and TN are the key factors affecting the quality of aquaculture effluent.

Keywords: Yantai; *Litopenaeus vannamei*; aquaculture influent; aquaculture effluent; water quality; correlation
(责任编辑 李维卫)

(上接第295页)

Abstract ID: 1673-8020(2022)04-0289-EA

Network Attention of Marine Tourist Attractions Based on Baidu Index in Yantai City

BAO Lin¹ , YIN Peng^{1,2} , DUAN Peili¹

(1.Business School , Ludong University , Yantai 264039 , China;

2.Institute of Marine Development , Ocean University of China , Qingdao 266100 , China)

Abstract: Based on the index function provided by the Baidu search engine , the network attention data of the marine tourist attractions from 2016 to 2020 was obtained through keyword search in Yantai City , and the characteristics of the network attention of the marine tourist attractions were analyzed. The results are as follows: 1) The network attention of marine tourist attractions has a large difference in Yantai City , the high-profile scenic spots have higher network attention and vice versa , and the inter-annual changes are relatively stable; 2) The network attention degree of marine tourist attractions in Yantai City has obvious seasonal changes with a unimodal pattern , the network attention degree of marine tourist attractions is high in the peak season , and the network attention degree is low in the off-season; 3) The network attention of marine tourist attractions is closely related to economic development , population structure characteristics and geographical distance , among them economic development , population structure characteristics and network attention of marine tourist attractions are positively correlated with network attention of marine tourist attractions , but geographical distance negatively correlated.

Keywords: network attention; marine tourist attractions; Baidu Index; Yantai City

(责任编辑 李秀芳)