

文章编号: 1674-5566(2018)05-0756-09

DOI:10.12024/jsou.20180502315

凡纳滨对虾露天土池底泥硫化物含量及其与其他环境因子的关系

周微微^{1,2}, 戴习林^{1,2}, 冯奇飞³, 臧维玲^{1,2}

(1. 上海海洋大学 水产科学国家级实验教学示范中心, 上海 201306; 2. 上海海洋大学 水产动物遗传育种中心上海市协同创新中心, 上海 201306; 3. 上海市金山区水产技术推广站, 上海 201500)

摘要: 通过定期监测分析凡纳滨对虾露天养殖土池水化学指标和底泥硫化物(S^{2-})、单质硫(S^0)、总硫(TS)含量和动态变化特征,探讨其与溶解氧(DO)、pH、总磷(TP)、总氮(TN)和总有机碳(TOC)的相关性,为凡纳滨对虾的健康养殖和养殖塘底质的科学管理提供理论依据。结果如下:周边河道底泥中硫化物含量(18.13~232.56 mg/kg)和露天土池底泥中硫化物含量(0.31~5.86 mg/kg)都低于渔业沉积环境中硫化物的安全下限;养殖塘底泥 S^0 和TS含量分别是0.39~3.06 mg/kg和221~4421 mg/kg。 S^{2-} 和TS随养殖时间呈波浪式增加趋势, S^0 含量箱型区间增减变化;土池底泥TS中0.12%~1.76%为 S^{2-} ,0.12%~1.04%为单质硫;水源底泥TS中4.30%~17.85%为硫化物,0.09%~0.37%为单质硫;主要水化学指标符合凡纳滨对虾养殖需求,底泥中TOC与TN均随养殖时间波浪式累积,TP动态变化规律不明显;相关分析表明,底泥 S^{2-} 、TS与底泥中TOC、TN呈极显著正相关($P < 0.01$),与DO、pH显著负相关。结果表明:残饵、代谢产物和生物尸体等虾塘有机质的累积,易造成大量氧气被消耗,从而导致低氧状态下底泥中硫化物含量增加。建议通过合理投饵、提高溶解氧含量、定时清淤等途径有效减少虾塘底质硫化物和有机质的含量。

关键词: 凡纳滨对虾; 硫化物; 单质硫; 总硫; 环境因子

中图分类号: S 912 **文献标志码:** A

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*), 又称南美白对虾, 是世界主要经济虾类之一, 其具有生长周期短、出肉率高以及养殖水质适应性强等优点^[1]。截止到2016年, 我国凡纳滨对虾养殖产量已达到167.22万吨, 凡纳滨对虾养殖业对我国水产养殖业显得尤为重要, 养殖过程中养殖环境更值得关注^[2]。多数从业者片面追求养殖效益, 持续增加养殖规模、提高养殖密度, 随着生物负载量和饵料投入量的提高, 池塘营养物质和有机物质负荷不断加重, 加剧了池塘水体耗氧和水质恶化, 甚至产生剧毒的挥发性硫化物^[3]。鱼虾碰到较高的挥发性硫化物时, 其免疫能力, 呼吸和能量代谢, 机体抗氧化系统均会受到显著影响^[3-4]。因此为了凡纳滨对虾养殖业的可持续发展, 不仅需要动态监测和调控养殖水体中亚硝酸盐含量、氨氮含量等水质指标, 还应重视养殖池塘底泥沉积物中的硫化物含量。

截至目前, 关于凡纳滨对虾养殖塘底泥中硫化物的研究报道很少, 国内仅少量文献探讨了不同类型养殖塘中硫化物的分布、含量、变化规律^[5-7], 以及网箱养殖、贝类养殖等水产养殖活动对底质硫化物生成的影响^[8-10], 也有国外学者开展了硫化物对重金属生物有效性影响的研究^[11-12]。本研究通过动态监测和分析凡纳滨对虾养殖露天土池底泥中硫化物(S^{2-})、单质硫(S^0)、总硫(TS)、总磷(TP)、总氮(TN)和总有机碳(TOC)的含量及其变化特征, 定量考察底泥中硫化物与TP、TN、TOC间的相关性, 以期为凡纳滨对虾的健康养殖和养殖塘底质的科学管理提供理论借鉴。

1 材料与方法

1.1 凡纳滨对虾露天土池基本情况

本研究选择上海市奉贤区庄行镇某养殖场

收稿日期: 2018-05-11 修回日期: 2018-06-07

基金项目: 上海市科技兴农重点攻关项目[沪农科攻字(2014)第7-1-11号]

作者简介: 周微微(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产养殖。E-mail: 1445457525@qq.com

通信作者: 戴习林, E-mail: xldai@shou.edu.cn

的凡纳滨对虾淡水养殖露天土池(四口,分别记为 H₁、H₂、H₃ 和 H₄)作为试验塘,面积均为 0.43 hm²,泥质塘底,6 年塘龄,每年 11 月至次年 3 月为虾塘休塘期,养殖前清淤后,按 1.5 t/hm² 生石灰消毒并冲洗 2 次,每口土池配置叶轮式增氧机 2 台(功率为 1.5 kW/台)和底部微孔管增氧设施 1 套(功率为 0.75 kW),且 H₁、H₂ 塘水面还种植约 400 m² 水蕹菜(*Ipomoea aquatica*)。2015 年以

邻近河道水为养殖水源(记为 R),每池按 74.97 万尾/hm² 放养淡化驯养 15 d 的凡纳滨对虾虾苗,6 月至 9 月采样试验期间,水深约 1.5 m,每日 13:00~15:00、22:00~1:00 启动增氧设备进行增氧,每日适量投喂配合饲料 2 次(6:00、16:00),各池分别于 7 月 20 日始每隔 15 日左右轮捕一次(约占池塘载虾量的 20%~35%)。凡纳滨对虾试验塘(H₁-H₄)的基本情况列于表 1。

表 1 凡纳滨对虾试验塘基本情况

Tab. 1 The basic information of the test ponds of *Litopenaeus Vannamei*

塘号 Pond No.	养殖起讫时间 Starting time and finishing time	养殖天数/d Culture time	单位产量/(kg/hm ²) Unit yield	饵料系数 Feed coefficient
H ₁	4.22~9.21	145	6 747	1.03
H ₂	4.22~9.21	145	6 597	1.04
H ₃	4.22~8.18	111	3 691	0.94
H ₄	4.22~9.21	145	6 459	1.07

1.2 样品采集

采样试验期间,每两周在池 4 角距塘堤 3 m 处用自制柱状采泥器采集底泥,分别取同等量表层 5 cm 泥样混合作为该池泥样,密封冷藏运回实验室,同样在池 4 角距塘堤 5 m 处用采水器采集表层水(水面下约 20 cm)和底层水(距底约 30 cm),等量混合后为该池水样,运回实验室测定水质指标。约每隔 15 d 采样一次,同步定点采集周边河道泥样和水样。

1.3 样品测定

1.3.1 水化学指标测定

采用便携式多参数水质测定仪(YSI ProPlus, 美国)对水温(T)、溶解氧(DO)、pH 进行现场测定。通过现场目视白色透明度盘测定水体透明度,并分别基于 N-1-奈基-己二胺光度法、蔡氏比色法、磷钼蓝分光光度法、钼酸铵比色法和碱性过硫酸钾法测定亚硝基氮(NO₂⁻-N)、总氮氮(TAN)、活性磷(PO₄³⁻-P)、总磷(TP)和总氮(TN)^[13]。

1.3.2 底泥指标测定

挥发性硫化物(S²⁻)采用亚甲基蓝分光光度法测定^[14],每次测定同时随机选择 5 个样品加入硫化物标准溶液进行加标回收实验^[15],测得加标回收率为 85.20%~92.48%;等摩尔的 S 与 SO₃²⁻ 反应生成 S₂O₃²⁻,剩余的 SO₃²⁻ 在酸性条件下与甲醛进行加成反应,然后用碘量法测定

S₂O₃²⁻,间接求出单质硫(S⁰)^[16-17];采用碳硫分析仪(eltra CS3000,德国)并基于高频燃烧红外吸收法,测定底泥中总硫(TS)含量^[18];干泥样酸化处理后用 Vario MAX 元素分析仪测定总有机碳(TOC)^[19];Vario MAX 元素分析仪测定 TN;灰化法测定 TP^[20];重量法测定泥样含水率^[14]。

1.4 数据处理

借助 Excel 2010 软件整理实验数据,基于 R 3.4.3 进行方差分析,并采用 Duncan's 法进行多重比较(P 值小于 0.05 表示差异显著)。

2 结果与分析

2.1 试验塘水质状况

表 2 给出了试验池主要水质指标的平均值和变化区间。由表 2 可知,4 口试验塘 pH(7.96~9.72)上限略偏高^[21],T、DO、TAN 和 NO₂⁻-N 符合凡纳滨对虾养殖需求^[22-23];但由于养殖中后期(8 月)水温和 pH 均较高,NH₃-N 含量超过了孙国铭等提出的凡纳滨对虾生长的安全 NH₃-N 浓度(0.201 mg/L)^[23],达 0.42~0.86 mg/L。TP 与 TN 的变化区间分别为 0.24~2.09 mg/L 与 0.73~9.35 mg/L,分别超过国家地表水环境质量的 III 类标准(0.2 mg/L)和 II 类标准(0.5 mg/L)^[24]。通过比较,可以发现养殖初期(前 50 天)各养殖池的水体水质指标相对较好,而养殖中后期主要水质指标普遍劣于早期,TN

和 TP 含量明显上升,最高值较初始值分别增加了 5~7 倍和 2~4 倍。同时发现水源 DO 含量显著低于养殖塘 DO,检测到的最低值仅 1.54 mg/

L, TAN、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P、TP 明显高于养殖塘,水质显著劣于养殖塘水体,可见河道水用于养殖前应采用如沉淀、曝气、消毒等措施加以预处理。

表 2 试验塘及水源主要水质指标平均值与变化区间

Tab. 2 The average value and variation range of the main water quality indexes of test shrimp ponds and water source

塘号 Pond No.	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	R
水温/°C Water temperature	28.1 ± 2.6 (24.4 ~ 30.7)	27.6 ± 2.7 (23.7 ~ 30.8)	28.2 ± 2.3 (24.6 ~ 30.5)	27.7 ± 2.4 (24.1 ~ 30.8)	27.9 ± 3.2 (23.9 ~ 33.5)
DO (mg/L)	8.49 ± 1.68 (5.24 ~ 10.29)	8.45 ± 2.26 (5.18 ~ 11.87)	7.99 ± 1.64 (5.69 ~ 10.28)	8.45 ± 2.17 (5.85 ~ 11.72)	3.95 ± 1.97 (1.54 ~ 7.12)
pH	8.81 ± 0.50 (8.07 ~ 9.62)	8.77 ± 0.60 (7.96 ~ 9.72)	8.82 ± 0.54 (8.23 ~ 9.70)	9.08 ± 0.41 (8.46 ~ 9.62)	8.11 ± 0.51 (7.51 ~ 9.12)
透明度/cm Transparency	22.5 ± 8.3 (10 ~ 35)	24.8 ± 7.0 (13 ~ 38)	19.8 ± 7.0 (11 ~ 28)	18.4 ± 5.2 (11 ~ 25)	38.1 ± 15.5 (11 ~ 58)
TAN/ (mg/L)	0.91 ± 0.60 (0.33 ~ 1.99)	0.80 ± 0.45 (0.34 ~ 1.61)	0.59 ± 0.11 (0.51 ~ 0.75)	0.93 ± 0.62 (0.28 ~ 1.93)	1.77 ± 1.41 (0.72 ~ 4.7)
NH ₃ -N/ (mg/L)	0.24 ± 0.21 (0.06 ~ 0.64)	0.22 ± 0.16 (0.03 ~ 0.46)	0.18 ± 0.14 (0.06 ~ 0.42)	0.42 ± 0.30 (0.05 ~ 0.86)	0.18 ± 0.25 (0.03 ~ 0.76)
NO ₂ ⁻ -N/ (mg/L)	0.121 ± 0.188 (0.004 ~ 0.566)	0.057 ± 0.088 (0.004 ~ 0.224)	0.012 ± 0.007 (0.007 ~ 0.024)	0.222 ± 0.549 (0.005 ~ 1.579)	0.237 ± 0.149 (0.082 ~ 0.547)
PO ₄ ³⁻ -P (mg/L)	0.22 ± 0.09 (0.07 ~ 0.32)	0.23 ± 0.12 (0.09 ~ 0.45)	0.19 ± 0.03 (0.17 ~ 0.25)	0.18 ± 0.06 (0.06 ~ 0.25)	1.34 ± 1.86 (0.12 ~ 5.74)
TN/ (mg/L)	4.83 ± 3.26 (0.97 ~ 9.35)	3.51 ± 2.6 (0.78 ~ 7.79)	3.14 ± 2.13 (0.73 ~ 5.3)	3.96 ± 2.26 (0.82 ~ 6.36)	4.22 ± 2.96 (1.06 ~ 10.01)
TP/ (mg/L)	0.9 ± 0.56 (0.27 ~ 1.82)	0.77 ± 0.59 (0.24 ~ 2.09)	1.02 ± 0.49 (0.43 ~ 1.57)	0.81 ± 0.48 (0.37 ~ 1.69)	1.99 ± 2.56 (0.25 ~ 7.89)

2.2 露天土池及水源河道底泥中硫化物、单质硫和总硫含量的动态变化特征

2.2.1 硫化物含量动态变化特征

由表 3 和表 4 可以看出 3 个养殖周期相同 (145 d) 的凡纳滨对虾 H₁、H₂、H₄ 露天土池底泥中 S²⁻ 含量平均值及占 TS 的百分比基本接近,约为养殖周期少 34 d 的 H₃ 池的 2~3 倍,均值比较表明平均值及占 TS 的百分比相互间不存在显著差异 ($P > 0.05$),且 4 个试验塘底泥中 S²⁻ 含量变化范围为 0.31~5.86 mg/kg,远低于甘居利等^[5] 报道的草虾养殖塘底质中 S²⁻ 含量,极显著低于周边河道底泥的 132.54 mg/kg ($P < 0.01$)。同时河道底泥中 S²⁻ 占 TS 的百分比达到了 12.11%,这主要由于周边河道常年遭受工农业生产、生活以及水产养殖污染物排放,造成河床底质中污染物的大量积累。

图 1a 为不同养殖时间点露天养殖土池及同时期周边河道底泥 S²⁻ 含量的变化趋势,由此图可知,各养殖塘底泥中 S²⁻ 含量随养殖时间延长

基本同步呈波浪式平缓增加,均是收获对虾时底泥中 S²⁻ 含量最高,约为监测初期的 2~3 倍;而周边河道底泥中 S²⁻ 含量波浪式增加幅度明显高于养殖塘。同时发现 6 月 27 日底泥 S²⁻ 含量明显高于 7 月 10 日测定值,此可能与水温、投饵量、雨水冲刷有关。祁铭华等^[25] 指出水温越高硫酸盐还原菌的活性相应越高,从而促进硫化物生成。ANKLEY 等^[26] 认为暴雨、清淤等外部条件会显著影响沉积物的氧化还原状态,从而改变硫化物浓度。此时适逢梅雨季节,雨水量大,温度变化较为剧烈,多数池塘投饵量仅为正常量的 50%~70%,6 月 26 出现过高温(水温由 25 °C 上升至 30 °C),7 月初水温又急剧下降至 26 °C 左右。

2.2.2 总硫含量动态变化特征

比较表 3 和表 1 数据知 H₁、H₂、H₄ 露天土池(养殖周期 145 d)底泥中 TS 平均值高于 H₃(养殖周期 111 d),且底泥中 TS 平均值随饵料系数正向变化,饵料系数最高的 H₄ 塘 TS 平均值 330

mg/kg 最高,饵料系数最低的 H₃ 塘 TS 平均值 286 mg/kg 最低;方差分析显示各养殖池底泥中 TS 间无显著性差异($P > 0.05$),但极显著低于周边河道底泥中 TS(1 008 mg/kg, $P < 0.01$),约为露天土池的 3~4 倍。由图 1c 可知,TS 含量随养殖时间的延长整体上呈波浪式累积变化,且除最

后一次数据外,TS 变化趋势类同于 S²⁻。监测期间,H₁、H₂ 和 H₄ 塘的 TS 值于 9 月 4 日达最大值,H₃ 塘的 TS 值于 6 月 27 日达最大值。露天土池底泥中 TS 含量的最终值约为初始值的 10~16 倍,河道底泥中 TS 含量的最终值约是初始值的 29 倍。

表 3 养殖塘及河道底泥中硫化物及其他因子含量平均值与变化范围

Tab. 3 The average value and variation range of content of sulfide and other factors in sediments

塘号 Pond No.	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	R
S ²⁻ /(mg/kg)	1.75 ± 1.78 (0.39 ~ 5.86)	1.47 ± 1.03 (0.31 ~ 3.41)	0.65 ± 0.29 (0.36 ~ 1.02)	1.91 ± 0.94 (0.46 ~ 2.89)	132.54 ± 81.39 (18.13 ~ 232.56)
S ⁰ / (mg/kg)	1.78 ± 0.68 (0.72 ~ 3.06)	1.32 ± 0.58 (0.39 ~ 2.44)	1.07 ± 0.59 (0.53 ~ 1.96)	1.63 ± 0.75 (0.33 ~ 2.50)	1.45 ± 0.64 (0.79 ~ 2.68)
TS / (mg/kg)	295 ± 44 (221 ~ 348)	292 ± 46 (241 ~ 363)	286 ± 55 (255 ~ 384)	330 ± 70 (243 ~ 441)	1008 ± 405 (422 ~ 1713)
TN / (mg/g)	1.14 ± 0.05 (1.06 ~ 1.22)	1.13 ± 0.08 (0.99 ~ 1.24)	1.06 ± 0.1 (0.95 ~ 1.23)	1.14 ± 0.09 (1.02 ~ 1.26)	1.36 ± 0.18 (1.14 ~ 1.72)
TP / (mg/g)	0.30 ± 0.16 (0.09 ~ 0.55)	0.30 ± 0.16 (0.11 ~ 0.55)	0.24 ± 0.07 (0.16 ~ 0.32)	0.31 ± 0.09 (0.19 ~ 0.44)	0.39 ± 0.16 (0.21 ~ 0.70)
TOC / (mg/g)	9.52 ± 1.57 (7.07 ~ 12.01)	9.55 ± 2.00 (6.86 ~ 13.37)	7.37 ± 0.71 (6.4 ~ 8.39)	9.79 ± 1.33 (8.16 ~ 12.16)	12.74 ± 2.1 (10.69 ~ 17.11)

表 4 硫化物(S²⁻)和单质硫(S⁰)占总硫(TS)百分比

Tab. 4 The percentages of sulfide and elemental sulfur to TS of sediment

塘号 Pond No.	H ₁	H ₂	H ₃	H ₄	R
S ²⁻ /TS	0.54 ± 0.49	0.47 ± 0.30	0.24 ± 0.12	0.51 ± 0.22	12.11 ± 4.89
S ⁰ /TS	0.62 ± 0.24	0.47 ± 0.23	0.40 ± 0.26	0.49 ± 0.26	0.16 ± 0.06

2.2.3 单质硫含量动态变化特征

由表 3 和图 1b 知 4 口土池及周边河道底泥中单质硫(S⁰)含量变化表现为先下降上升再下降上升的波浪式变动,变化规律不明显,底泥中 S⁰ 平均值相互间不存在显著差异($P > 0.05$),尤其是河道底泥中 S⁰ 含量与养殖池间不存在显著差异($P > 0.05$),与 S²⁻、TS 不一致;同时表 4 表明露天土池底泥 S⁰ 占 TS 的百分比为 0.40%~0.62%,河道底泥 S⁰ 占 TS 的百分比为 0.16%。这与 S⁰ 的特性有关,S⁰ 存在形式不稳定,不仅可与有机物质结合转变为含硫衍生物,而且会被高铁细菌氧化成为硫酸盐。本试验中露天土池底泥中 S⁰ 最高值基本出现在 8 月,此与菲律宾蛤仔养殖区及非养殖区底质中 S⁰ 含量于夏季出现最大值一致^[17]。

2.3 露天土池及水源河道底泥中总有机碳、总氮、总磷动态变化特征

由图 2a 知 H₃ 土池底泥中 TOC 含量最低为(7.38 ± 0.73) mg/g,显著低于其他养殖池底泥($P < 0.05$),7 月 10 日达最高值后递减;H₁ 与 H₂ 土池底泥中 TOC 含量平均值较接近,分别为(9.53 ± 1.61) mg/g、(9.57 ± 2.05) mg/g,H₄ 土池底泥中 TOC 平均值略高为(9.81 ± 1.36) mg/g,3 口试验塘变化趋势基本一致,相互间无显著差异($P > 0.05$),整体呈波浪式增加,最终值较初始值分别增加 29%、37% 和 49%;四口养殖池底泥中 TOC 含量均略高于袁有宪等^[27]测定的对虾养殖塘表层底质中 TOC 含量,但极显著低于周边河道底泥中 TOC 含量[13.14 ± 1.97 mg/g, $P < 0.01$]。图 2b 表明 4 个养殖池底泥中 TN 含量除 6 月 8 日较低外,其余时间点均在 1.00~1.25 mg/g 区间波浪式增减变化,H₁~H₄ 间不存在显著差

异($P > 0.05$),分别为 (1.15 ± 0.11) 、 (1.12 ± 0.10) 、 (1.05 ± 0.21) 、 (1.20 ± 0.17) mg/g,不仅显著低于河道底泥 TN 含量 $[(1.39 \pm 0.23)$ mg/g],而且也低于广州郊区某养殖池塘表层沉积物

中 TN 含量^[28]。由图 2c 可以看出,随养殖时间的增加,养殖塘底质和河道底泥中 TP 含量呈现波浪式增减的波动变化,此可能与天气和浮游植物量的变化有关,平均值间无显著差异($P > 0.05$)。

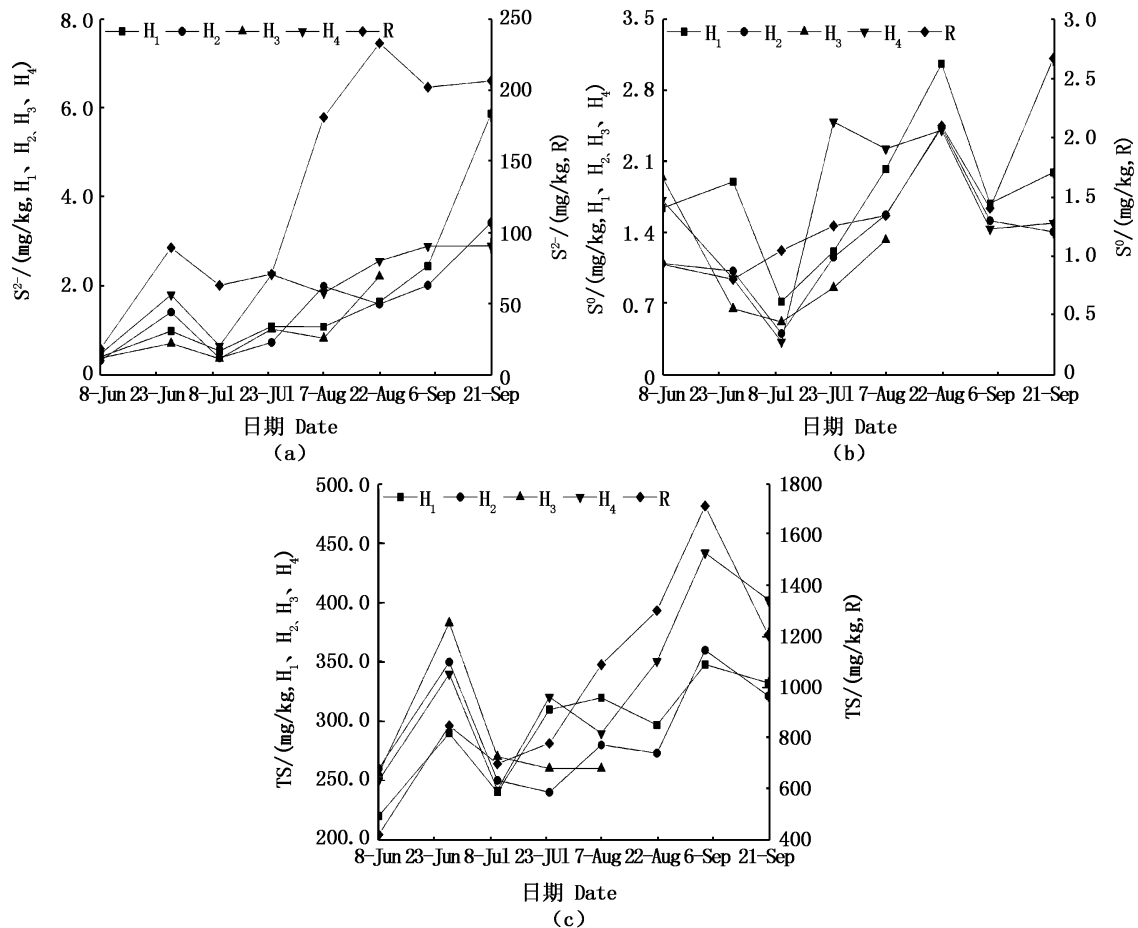


图 1 底泥中 S^{2-} 、 S^0 和 TS 含量随养殖时间的变化

Fig. 1 Content variations of sulfide, elemental sulfur and total sulfur in sediments versus culture time

3 讨论

3.1 底泥硫化物与其它底泥指标的相关性

表 5 为底泥 S^{2-} 、 S^0 、TS 与池塘其他环境指标的相关分析结果。结果显示,底泥中 S^{2-} 与底泥中 TOC、TS 和 TN 间存在极显著正相关($P < 0.01$),底泥中 TS 则与底泥中 TOC、TP 和 TN 间存在极显著正相关($P < 0.01$),说明底泥中有机质和硫氮是底泥中硫化物的关键影响因素;而 S^{2-} 和 TS 与水体中 DO、pH 间存在显著负相关。可见,本试验塘底泥硫化物的产生和含量与有机质的分解以及氮、磷、硫营养盐的转化有密切关系。此与舒廷飞等^[36]以及冯奇飞等^[7]研究结论

一致。在凡纳滨对虾露天土池中,C、N、P、S 等营养元素主要源自于残饵、鱼虾生长代谢物及尸体等有机物中,上述有机物的氧化分解会导致大量氧气被消耗,当水温较高时,极易使养殖塘底部形成适合硫酸盐还原菌活动的缺氧或低氧状态,硫酸盐被还原为硫化物,当硫化物积累到一定程度,可引起对虾中毒从而造成养殖对虾的“偷死”现象。DZAPO 等^[30]研究发现 10%~20% 的投喂饲料直接进入养殖水体时无法被摄取。杨庆霄等^[31]、祁真等^[32]考察了对虾养殖过程残饵、排泄物、虾尸体对养殖水体水质的影响,发现残饵对养殖水质的影响最为显著。因此,上述有机质的富集易导致底质硫化物的产生,且水温较高、水

溶氧含量低为硫化物生成提供了环境条件。

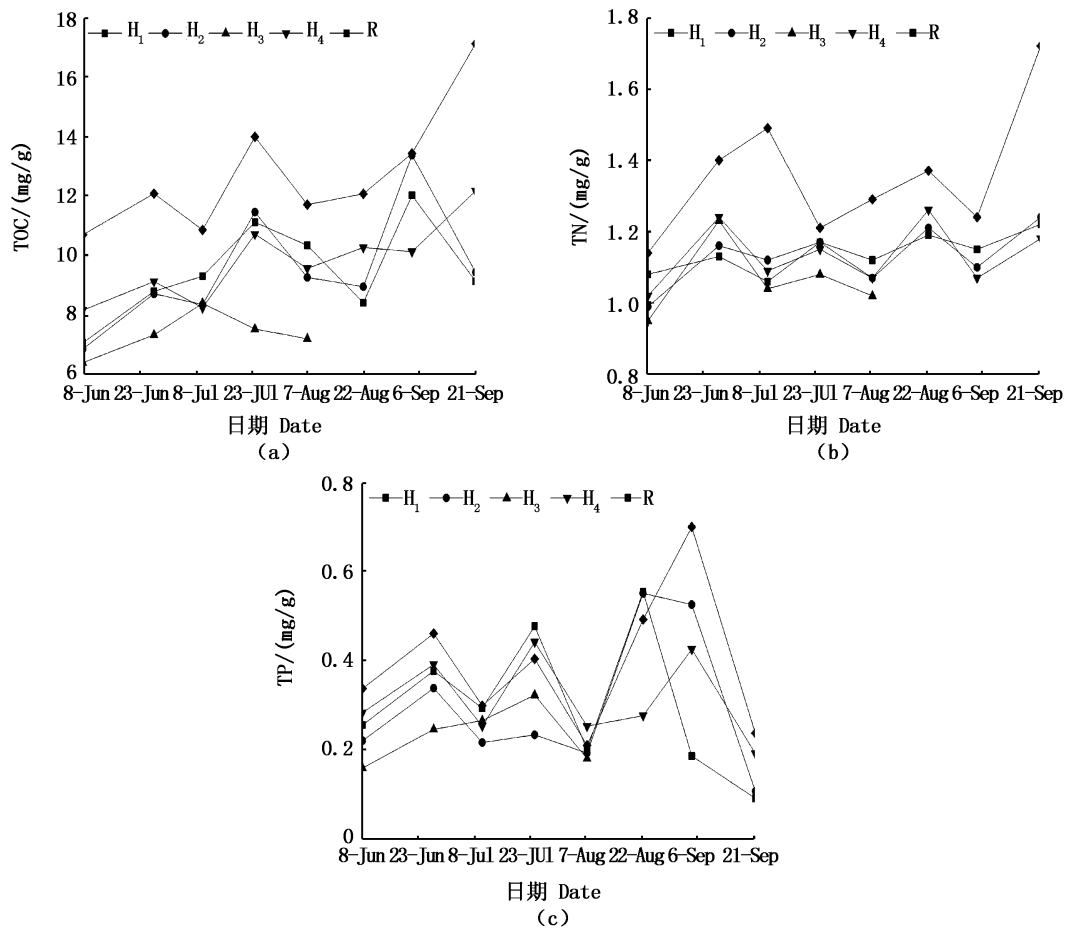


图 2 底泥中 TOC、TN 和 TP 含量随养殖时间的变化

Fig. 2 Content variations of TOC, TN and TP in sediments versus culture time

表 5 底泥硫化物与其它因子的相关关系

Tab. 5 The correlation of sulfide and other indicators

指标 Index	底泥 Sediment					水体 Culture water	
	S ⁰	TS	TN	TP	TOC	DO	pH
S ²⁻	0.159	0.962 **	0.680 **	0.309	0.643 **	-0.621 **	-0.445 *
S ⁰		0.113	0.221	0.165	0.222	-0.019	0.175
TS			0.655 **	0.414 **	0.681 **	-0.665 **	-0.456 **

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

Notes: ** indicates very significant positive ($P < 0.01$); * indicates significant positive ($P < 0.05$)

3.2 养殖生产对底质硫化物的影响

统计数据表明 4 口凡纳滨对虾露天土池底泥中硫化物含量约为 0.36 ~ 5.86 mg/kg, 远低于渔业沉积环境中硫化物的安全下限 (400 mg/kg)^[33], 属于低含量水平。但 H₁、H₂、H₄ 与 H₃ 试验塘底泥中硫化物含量均随养殖时间的延长呈波浪式增加趋势, 且分别经历 145 d 和 111 d 的

养殖后, 最终值较初始值分别增加 14 倍、10 倍、1 倍和 5 倍。这表明对虾养殖过程虾塘底质遭受污染, 结果与有关报道^[7,9,34-36] 相一致。凡纳滨对虾在养殖初期, 虾体小、生长慢, 投饵量少, 水质较好, 底泥硫化物含量较低, 6 月底至 7 月初后, 随着对虾的快速生长, 投饵量、残饵、排泄物等也随之快速增加, 此时水温较高, 水质也较前期欠

佳,塘底产生的硫化物量也逐步增多,养殖中后期,因间断轮捕对虾,日投饵量不再增加甚至减少,底泥硫化物含量随养殖日期的延长呈缓慢增加趋势。

底质硫化物是导致养殖塘底质老化的关键因素,也是养殖塘底质环境的重要评价指标^[3,36]。凡纳滨对虾养殖过程中,不仅需要关注养殖水质指标,而且应加强底质管理,尤其注意底泥硫化物引起的对虾“偷死”现象,通过合理投饵、增加溶解氧含量、定时清淤等途径有效减少虾塘底质硫化物和有机质的含量。

参考文献:

- [1] 席丽萍,王居安,邱雨燕,等.池塘养殖凡纳滨对虾幼虾到成虾阶段生长差异研究[J].上海海洋大学学报,2017,26(5):691-698.
XI L P, WANG J A, QIU Y Y, et al. Investigation and analysis of the growth differences of larvae to adult stage of *Litopenaeus vannamei* [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 26(5): 691-698.
- [2] 吴琴瑟.南美白对虾养殖现状与发展对策[J].科学养鱼,2006(10):1-2.
WU Q S. The aquaculture actuality and development countermeasures of *Litopenaeus vannamei*[J]. Scientific Fish Farming, 2006(10): 1-2.
- [3] 张文革.南美白对虾养殖过程中硫化物的控制[J].河北渔业,2011(4):50-52.
ZHANG W G. The control of sulfide during culture of *Litopenaeus vannamei*[J]. Hebei Fisheries, 2011(4): 50-52.
- [4] 杨艳云,张继红,吴文广,等.桑沟湾不同养殖区大型底栖动物的群落结构特征[J].水产学报,2018,42(6):922-931.
YANG Y Y, ZHANG J H, WU W G, et al. Macrobenthic community characteristics of different culture areas in Sanggou Bay[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, 42(6): 922-931.
- [5] 甘居利,林钦,李卓佳,等.斑节对虾节水型养殖期间虾池硫化物含量的变化特征[J].台湾海峡,2005,24(1):83-89.
GAN J L, LIN Q, LI Z J, et al. Variation characteristics of sulfide content in shrimp ponds during save-water type culture of *Penaeus monodon*[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005, 24(1): 83-89.
- [6] 彭斌.滨海盐场养殖池塘底质硫化物的变化及其与其它因子的关系[J].海洋湖沼通报,2008(3):155-160.
PENG B. The variation of sulfide in culture ponds of Binhai saltern and relationship between sulfide and other factors [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2008(3): 155-160.
- [7] 冯奇飞,臧维玲,戴习林,等.罗氏沼虾养殖塘底质硫化物含量及其与其他因子关系的研究[J].广东农业科学,2014,12(37):175-182.
FENG Q F, ZANG W L, DAI X L, et al. Sulfide content in sediment of *Macrobrachium rosenbergii* culture ponds and relationship between sulfide content and other parameters [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 12(37): 175-182.
- [8] 杨美兰,林钦,甘居利,等.考洲洋底质中硫化物的含量与分布[J].湛江海洋大学学报,2002,22(3):47-51.
YANG M L, LIN Q, GAN J L, et al. Sulphide in the sediments of Kaozhouyang Bay in mariculture and multiplication waters [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2002, 22(3): 47-51.
- [9] 黄洪辉,林钦,甘居利,等.大鹏澳海水鱼类网箱养殖对沉积环境的影响[J].农业环境科学学报,2007,26(1):75-80.
HUANG H H, LIN Q, GAN J L, et al. Impact of cage fish farming on sediment environment in Dapengao Cove [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(1): 75-80.
- [10] 王文强,韦献革,温琰茂.哑铃湾网箱养殖海域沉积物中的硫化物[J].海洋环境科学,2006,35(3):13-16.
WANG W Q, WEI X G, WEN Y M. Sulfide in sediment in cage farming area of Yaling Bay [J]. Marine Environmental Science, 2006, 35(3): 13-16.
- [11] AFFONSO E G, POLEZ V L P, CORREA C F, et al. Physiological responses to sulfide toxicity by the air-breathing catfish, *Hoplosternum littorale* (Siluriformes, Callichthyidae) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology and Pharmacology, 2004, 139(4): 251-257.
- [12] YIN H B, FAN C X, DING S M, et al. Acid volatile sulfides and simultaneously extracted metals in a metal-polluted area of Taihu Lake, China [J]. Bulletin of environmental contamination and toxicology, 2008, 80(4): 351-355.
- [13] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].北京:中国环境科学出版社,2002:200-284.
State Environmental Protection Administration. Water and wastewater monitoring analysis methods[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2002: 200-284.
- [14] 国家质量技术监督局. GB 17378.5-2007 海洋监测规范第四部分:沉积物分析[S].北京:中国标准出版社,2007:65-90.
State Bureau of Quality and Technology Supervision. GB17378.5-2007 The Specification for Marine Monitoring, Part 5: Sediment analysis [S]. Beijing: China Standard Press, 2007: 65-90.
- [15] 王华,时秋颖,赵延萍,等.硫化物测试条件的优化[J].工业安全与环保,2005,31(2):25-26.
WANG H, SHI Q Y, ZHAO Y P, et al. Brief discussions on the Optimization of test Conditions for sulphide[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2005, 31(2): 25-26.

- [16] 王桂芝. 分光光度法测定矿石和土壤中单质硫[J]. 冶金分析, 1998, 18(3): 52-53.
WANG G Z. Spectrophotometric Determination of elemental sulfur in ore and soil [J]. Metallurgical Analysis, 1998, 18(3):52-53.
- [17] 王强. 菲律宾蛤仔养殖对底质硫化物变化的影响研究[D]. 上海: 上海水产大学, 2007.
WANG Q. Research on the effects of culture of *Ruditapes philippinarum* on the variation of sulfide in sediment [D]. Shanghai: Shanghai Fisheries University, 2007.
- [18] 张明杰, 戴雪峰, 陆丁荣, 等. 高频燃烧-红外碳硫仪用于农用地土壤质量调查样品中碳硫的快速测定[J]. 岩矿测试, 2010, 29(2): 139-142.
ZHANG M J, DAI X F, LU D R, et al. Rapid determination of carbon and sulfur in farmland soil samples by high frequency-infrared carbon-sulfur analyzer [J]. Rock and Mineral Analysis, 2010, 29(2):139-142.
- [19] QIN Y W, ZHENG B H, LEI K, et al. Distribution and mass inventory of polycyclic aromatic hydrocarbons in the sediments of the south Bohai Sea, China [J]. Marine pollution bulletin, 2011, 62(2): 371-376.
- [20] 吴凯, 马旭洲, 王友成, 等. 3 种水草腐解对水质的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2016, 25(5): 726-734.
WU K, MA X Z, WANG Y C, et al. Effect of three water plants decomposition on water quality [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2016, 25(5): 726-734.
- [21] 王卫平, 杨继元. 南美白对虾养成过程中的水质调控[J]. 河北渔业, 2007(5): 22-24.
WANG W P, YANG J Y. Water quality control in the process of *Litopenaeus vannamei*[J]. Hebei Fisheries, 2007(5): 22-24.
- [22] 袁合侠. 南美白对虾健康养殖水质调控技术[J]. 水产养殖, 2010(10): 19-20.
YUAN H X. Water quality control technology for healthy culture of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Aquaculture, 2010(10): 19-20.
- [23] 孙国铭, 汤建华. 氨氮和亚硝酸氮对南美白对虾的毒性研究[J]. 水产养殖, 2002(1): 22-24.
SUN G M, TANG J H. Toxicity of ammonia nitrogen and nitrite to *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Aquaculture, 2002(1): 22-24.
- [24] 国家环境保护总局. GB3838-2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2003.
State Environmental Protection Administration of China. GB3838-2002 Environmental quality standard for surface water[S]. Beijing: China Standard Press, 2003.
- [25] 祁铭华, 马绍赛, 曲克明, 等. 沉积环境中硫化物的形成及其与贝类养殖的关系[J]. 海洋水产研究, 2004, 25(1): 85-89.
QI M H, MA S S, QU K M, et al. The formation of sulfide in the marine sediments and its relationships to cultivation of shellfish[J]. Progress in Fishery Sciences, 2004, 25(1): 85-89.
- [26] ANKLEY G T, LIBER K, CALL D J, et al. A field investigation of the relationship between zinc and acid volatile sulfide concentrations in freshwater sediments[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1996, 5(4): 255-264.
- [27] 袁有宪, 幸福言, 孙耀, 等. 对虾养殖池沉积环境中 TOC, TP, TN 和 pH 及质量评价模型[J]. 水产学报, 2000, 24(3): 247-253.
YUAN Y X, XIN F Y, SUN Y, et al. TOC, TP, TN and pH in sediment environment of shrimp culture and quality assessment module[J]. Journal of Fisheries of China, 2000, 24(3): 247-253.
- [28] 李小伟, 乔永民, 杨宇峰. 广州市郊养殖池塘表层沉积物中氮磷的初步研究[J]. 水利渔业, 2008, 28(1): 74-77.
LI X W, QIAO Y M, YANG Y F. Preliminary study on nitrogen and phosphorus in surface sediments of aquaculture ponds in Guangzhou[J]. Journal of Hydroecology, 2008, 28(1): 74-77.
- [29] 舒廷飞, 温琰茂, 贾后磊, 等. 哑铃湾网箱养殖对水环境的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(5): 97-101.
SHU T F, WEN Y M, JIA H L, et al. Influence of cage culture in Yaling Bay on water environment [J]. Environmental Science, 2004, 25(5): 97-101.
- [30] DZAPO V, REINER G. The nutritive effect of avilamycin in swine breeding and fattening [J]. DTW. Deutsche tierärztliche Wochenschrift, 1991, 98(9): 341-343.
- [31] 杨庆霄, 蒋岳文, 张昕阳, 等. 虾塘残饵腐解对养殖环境影响的研究 II 虾塘底层残饵腐解对沉积物环境的影响[J]. 海洋环境科学, 1998, 18(3): 10-15.
YANG Q X, JIANG Y W, ZHANG X Y, et al. Study on the effects of decomposition of the bait in a shrimp-pond on the maricultural environment II Effects of decomposition of the sub bottom bait in a shrimp-pond on the sediment environment [J]. Marine Environmental Science, 1998, 18(3): 10-15.
- [32] 祁真, 杨京平, 刘鹰. 对虾池残饵、粪便及死虾腐解对养殖水质影响的模拟试验[J]. 水产科学, 2004, 23(11): 5-8.
QI Z, YANG J P, LIU Y. Effects of feed remnants, excrement and dead shrimp bodies on water quality in aquaria [J]. Fisheries Science, 2004, 23(11): 5-8.
- [33] 祁铭华. 菲律宾蛤仔的养殖活动对沉积物中酸挥发性硫化物(AVS)的影响[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
QI M H. The effect of culture of *Ruditapes philippinarum* on acid volatile sulfide in sediments [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2004.
- [34] 韦献革, 温琰茂, 王文强, 等. 哑铃湾网箱养殖对底层水环境的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2): 274-278.
WEI X G, WEN Y M, WANG W Q, et al. Environmental impact of cage culture on bottom water in Yaling Bay [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 274-278.

- [35] 彭斌. 虾贝混养池塘养殖环境中底质硫化物的研究[J]. 现代农业科技, 2008, 9: 172-174.
PING B. Study on sulfide in sediment of polyculture pond of shrimp and shellfish [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2008, 9: 172-174.
- [36] 范可章, 孙国铭, 陈爱华, 等. 江苏南部海域文蛤增养殖区底质中硫化物及其与 COD 的关系[J]. 南京师大学报 (自然科学版), 2005(4): 19.
FAN K Z, SUN G M, CHEN A H, et al. A preliminary study on the relationship between the sulphuret and the COD in the substratum of the HARD clam (Meretrix) in the maritime reproductive-cultural area of southern Jiangsu Province [J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2005(4): 19.

Sulfide content in sediment of outdoor ponds of *Litopenaeus vannamei* and its relationship with other environmental factors

ZHOU Weiwei^{1,2}, DAI Xilin^{1,2}, FENG Qifei³, ZANG Weiling^{1,2}

(1. National Demonstration Center for Experimental Fisheries Science Education, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Collaborative Innovation for Aquatic Animal Genetics and Breeding, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Jinshan District Aquatic Technology Extension Station, Shanghai 201500, China)

Abstract: By regularly monitoring and analyzing the water chemical indexes and the content variation trend of S^{2-} , S^0 and TS in sediments of the outdoor ponds of *Litopenaeus vannamei*, their relationships with DO, pH, TP, TN and TOC were investigated for guiding the healthy aquaculture of *Litopenaeus vannamei*. The results indicate that S^{2-} content in sediments of the outdoor ponds and surrounding rivers were respectively 0.31 ~ 5.86 mg/kg and 18.13 ~ 232.56 mg/kg, which were all lower than the safety low-limit of sulfide content in fishery sedimentary environment; S^0 and TS contents in sediments of the outdoor ponds were 0.39 ~ 3.06 mg/kg and 221 ~ 4421 mg/kg, respectively. S^{2-} and TS contents showed wave-like increase trend with aquaculture time, and S^0 content varied within a cube-type range. S^{2-} and S^0 proportions of TS in sediments of outdoor ponds were respectively 0.12% ~ 1.76% and 0.12% ~ 1.04%, and those in sediments of water source were respectively 4.30% ~ 17.85% and 0.09% ~ 0.37%; The main water chemical indexes met the *Litopenaeus vannamei* aquaculture demand. TOC and TN contents showed wave-like increase trend versus aquaculture time but the variation trend of TP content was not obvious. Additionally, it was found that S^{2-} and TS had a significant positive correlation with TOC and TN but a negative correlation with DO and pH. The results demonstrate that accumulation of organic matters including residual feeds, metabolites and biological carcasses in shrimp pond could result in higher oxygen consumption and the sulfide content increase under low-oxygen condition. Hence, it was suggested that the key solutions to reducing the sulfide and organic matter contents in shrimp pond sediments were the rational feeding, the maintenance of abundant dissolved oxygen in shrimp ponds and the thorough desilting.

Key words: *Litopenaeus vannamei*; sulfide; elemental sulfur; total sulfur; environmental factors