高位虾池底泥碳氮富集特征

王子爱 唐少霞* 陈珂珂 傅雨萱 郑 苗 杨春燕
(海南师范大学地理与环境科学学院, 海口 571158)

摘 要 为了解高位虾池养殖导致的环境影响,对海口市东营镇3种类型养殖虾池底泥0~5 cm(t1)、5~10 cm(t2)、10~15 cm(t3)和15~20 cm(t4)中总氮(TN)、总碳(TC)和有机碳(TOC)的含量进行分析。结果表明:高位虾池废水的渗透,最终导致虾池围堤外侧土壤中TC、TOC、TN含量分别比虾池所在地的背景值高出5.66、6.95和2.49倍;养殖水体中饵料及对虾排泄物在虾池底泥中的富积,导致底泥中的TC、TOC和TN含量高于背景值7.36、8.68和4.41倍;底部铺沙的虾池底泥中TN、TC和TOC的含量基本上是表层含量最高,且高于深层土2~27倍;底部铺水泥的虾池,裂缝处的TN、TC和TOC的含量则是第三层土的最高,呈现t3>t1>t2>t4;虾池围堤外侧TN、TC和TOC的含量从表层向深层呈明显递减规律;排废水后未清洗的虾池表层底泥及养殖期间饵料及虾粪残留物中的TOC和TN超标较严重,其中排废水后未清洗的虾池表层底泥有机氮和有机指数评级为Ⅲ中度污染和Ⅱ轻度污染,而养殖期间的饵料及虾粪残留物的有机氮和有机指数评级均为Ⅳ重度污染;虾池围堤外侧土的有机指数评级为Ⅲ中度污染,而有机氮评级则为Ⅳ重度污染;虾池底泥中的C:N偏低,有利于残余在底泥的饵料和生物排泄物形成腐殖质,而腐殖质如不能及时清理,则会导致养殖水体水质恶化。

关键词 高位虾池; 沉积物; 碳氮含量; 污染风险

Carbon and nitrogen accumulation characteristics of sediment in higher-place shrimp pond. WANG Zi-ai, TANG Shao-xia*, CHEN Ke-ke, FU Yu-xuan, ZHENG Miao, YANG Chun-yan (*College of Geography and Environmental Science, Hainan Normal University, Haikou* 571158, *China*).

Abstract: To clarify the environmental impacts of higher-place shrimp pond aquaculture, we analyzed the concentrations of total nitrogen (TN), total carbon (TC), and total organic carbon (TOC) in the sediments sampled from three types of shrimp aquaculture in the Dongying Town of Haikou City. The sediments were sampled from four layers: 0-5 cm (t1), 5-10 cm (t2), 10-15 cm (t3), and 15-20 cm (t4). The concentrations of TC, TOC, TN in the soil outside the embankment of shrimp ponds were 5.66, 6.95 and 2.49 times higher than that of shrimp ponds, respectively, a phenomenon caused by the infiltration of wastewater from the higher-place shrimp ponds. Additionally, the concentrations of TC, TOC and TN in the sediments were 7.36, 8.68 and 4.41 times higher than the background value, which was caused by accumulation of baits and shrimp excrement. The concentrations of TN, TC and TOC in the sediments of the bottom auxiliary sand were the highest in the surface layer and 2 to 27 times higher than that in the deep soil. In the bottom auxiliary cement shrimp pond, the concentrations of TN, TC and TOC in the crack were the highest in the third layer of soil, showing a trend of t3>t1>t2>t4. The concentrations of TN, TC and TOC on the outer side of shrimp pond dike showed a significant decrease from the surface layer to the deep layer. The TOC and TN in the surface sediments in shrimp ponds and the residues of bait and shrimp dung during culture were seriously exceeded the standard after the discharge of wastewater. The organic nitrogen and organic index of surface sediments of the

国家自然科学基金(41361108)后续研究基金及海南省重点地理学科项目资助。
收稿日期: 2019-05-18 接受日期: 2019-10-17
*通讯作者 E-mail: 519635162@qq.com

unwashed shrimp pond after draining wastewater were classified as III moderate pollution and Ⅱ mild pollution, while both organic nitrogen and organic index of the bait and shrimp manure residues during the culture were classified as IV heavy pollution. The organic index in the lateral soil of the shrimp ponds embankment was III moderate pollution, while organic nitrogen rating was IV heavy pollution. The C∶N ratio in the sediments of the shrimp pond was low, which was conducive for the formation of humus stemmed from residual baits and biological excretions in sediments. If humus is not cleaned in time, it will reduce aquaculture water quality.

Key words: higher-place shrimp pond; sediment; carbon and nitrogen concentration; pollution risk.

沉积物—水界面及其附近发生着复杂的物理、化学和生物作用,并进行着频繁的物质交换(Santschi *et al.*,1990;孔繁翔等,2009)。高位虾池养殖主要以投喂外源性饲料维持虾的生长代谢活动,但虾对饲料有限的利用(利用率4.0%~27.4%)通常造成大量有机物滞留和富集在虾池底部沉积物中(Chen *et al.*,2016)。受养殖残饵和排泄物等影响,沉积物中聚集大量的氮、磷和有机物(孙耀等,1997;杨庆霄等,1999;王欢欢等,2019)。蓄积的有机物经过厌氧环境和矿化过程,转化成不同形态的碳氮(刘华丽等,2011;杨平等,2018)。此外,富集于虾池底部沉积物中的有机物质,会因外界环境的扰动诱使大量营养物质二次释放而造成水体富营养化(Calvert *et al.*,1995;韦章良等,2016),进而影响整个养殖系统的平衡和循环。因此,监测和分析沉积物中碳氮的含量与分布,不仅可以揭示底泥营养盐的转化规律,同时还能有效评估其生态环境的质量。对虾养殖系统中有机碳积累的去向主要是向底泥沉积(刘国才等,2002),随养殖时间延长,虾池底部沉积物中有机物含量逐渐上升(权伟等,2015;陈桂香等,2017a)。亚热带的广东省流沙湾(罗昭林等,2014)、拓林湾(吴锐等,2015;张婷等,2019)、南澳岛(毛洁等,2012)和大亚湾(黄小平等,2010),福建省闽江口(陈桂香等,2017a)和九龙江口(杨平等,2017)以及位于温带的渤海莱州湾(杨俊丽等,2018)等地的研究均表明,养殖区沉积物存在不同程度的污染、内源负荷高等现象。目前国内外对于高位虾池的研究主要集中在水质对养殖环境的影响(吴伟等,2014;刘国锋等,2018;周微微等,2018)、养殖水体的净化及技术(刘倩等,2015;黄翔峰等,2016;马晓娜等,2017;江肖良等,2018;吴英杰等,2018)、虾养殖行业的可持续发展(许国晶等,2015;陈敏等,2017;裴鹏兵等,2018)等方面,目前对虾池沉积物污染的研究主要集中在中温带和亚热带淡水养殖区。海南省地处热带季风区是全国海产品南繁育制种的重要基地,同时海南省又是对虾苗种繁育的发源地,因此深入研究热带地区虾池有机物在池底的分布规律,揭示高位虾池养殖的潜在风险,具有重要的环境生态学意义。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

海口市地处海南岛北部,属于热带季风气候区,近岸海域年平均表层盐度为30.83‰,近岸海域的年平均表层海水温度为26.6 ℃,各地全年日照时数为1780~2600 h,且季节分配较均匀。全年到达地面的太阳总辐射量为4600~5800 MJ·m^{-2},光合有效辐射2100~2600 MJ·m^{-2},非常适合发展海产品的养殖。本文以海口市美兰区东营镇某养殖场作为研究靶区,该养殖场位于南渡江以东3 km处,北临琼州海峡,平均海拔6 m,土地面积459 hm^2,高位虾塘28 hm^2。该区域有些虾塘池壁用土面或红砖砌成,并用水泥抹面,底部或铺沙或铺水泥地板,而有一些虾池则铺塑料膜。研究区未建污水处理设施,养殖废水通过管道或沟渠直接排入海域。本文从中选择3个底部铺沙的虾池,1个底部铺膜的虾池,1个底部铺水泥但有破损的虾池作为采样样地。每个虾池样地的现状描述见表1。此外,在离海最近的5#虾池北侧排水口1 m处设一虾池外围采样点记为6#样地,6#样地作为受虾池影响的外围土;在距离3#虾池西侧1 km上风区,远离虾池处设一采样点作为背景土,记作7#样地。研究区及采样虾塘见图1。

1.2 样品的采集与实验方法

用柱状采泥器,在每个样地内按蛇形法设采样点进行采样,每个采样点每隔5 cm间距分层采集0~5、5~10、10~15、15~20 cm四个深度的土层,每个土层取500 g,分别记为t1、t2、t3和t4。土样带回实验室于恒温干燥箱80 ℃下烘干24 h,冷却后取出

表 1 采样地基本情况

Table 1 Basic situation of sampling plots

采样类型 Sampling type	虾池沉积物 Shrimp pond sediment				虾池残留物 Shrimp pond residue	虾池围堤外侧 Lateral soil of the shrimp pond	背景土 Background soil
样地编号 Plot number	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
采样深度 Sampling depth	0~20 cm	0~20 cm	0~20 cm	0~20 cm	0~5 cm	0~20 cm	0~5 cm
虾池清洁状况 Shrimp pond cleaning situation	已清洗 未注水 Cleaned and not irrigation	已清洗 未注水 Cleaned and not irrigation	已清洗 未注水 Cleaned and not irrigation	刚排水 未清洗 Drained and not cleaned	刚排水 未清洗 Drained and not cleaned	–	–
虾池底部铺设材料 Shrimp pond bottom use material	铺设沙土 sandy soil	铺设水泥但有破损 Laying cement but damaged	铺设沙土 sandy soil	铺设沙土 sandy soil	铺设地膜 Plastic film	–	–

备注:2#池虽然是水泥铺设,但有几处出现破损处,采样点设在破损处。5#于薄膜内采集养殖残留物,故采样深度只有 0~5 cm。

Note: Although the 2# is cemented, there are several places where the damage occurs, and the sampling point is located at the damaged place. The 5# collects culture residues in the film, so the sampling depth is only 0-5 cm.

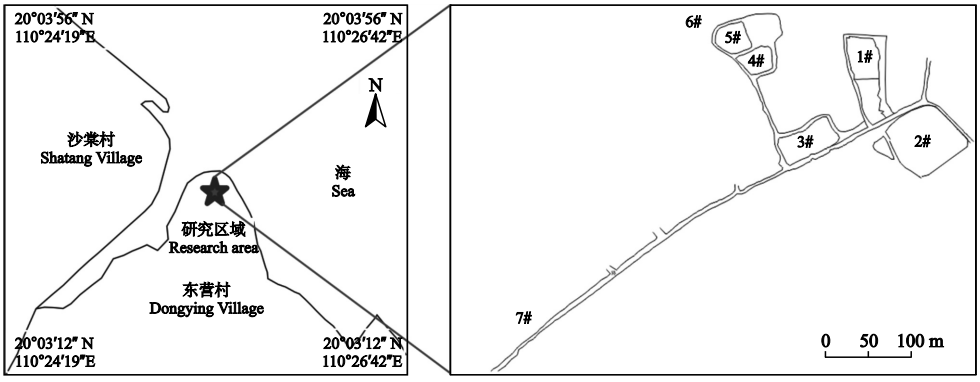


图 1 研究区及采样位置

Fig.1 Study area and sampling location

除去明显杂物,研磨、混匀后过 200 目筛,用 Vario TOC 检测仪测定底泥的 TN(总氮)、TOC(有机碳)和 TC(总碳)。TOC(有机碳)检测前,准确称取过筛后土样 3 g 记作 M1,加 30 mL 10%的盐酸,磁力搅拌 30 min 后静置 24 h,离心洗酸至中性于 60 ℃下烘干 24 h,烘干土样称重记 M2。称取每个烘干样品 10 mg,上机检测沉积物中 TC 含量的实测值,沉积物中的 TOC 含量等于实测值乘以 M2/M1。Vario TOC 检测仪检测条件设置为:氧气压力为 0.1 MPa;燃烧温度 950 ℃;流速 160~180 mL·min^{-1};10、20、50、100、200 mg 标准土样绘制标准曲线的相关系数 r 为 0.999。为减小检测的误差,每个样品做两个平行样检测(表 2)。从表 2 可看出,检测值的标准差较小,各虾池采样点的对比分析可用样地平均值。

表 2 样地表层土 t1 碳氮含量与背景土比较

Table 2 Comparison of carbon and nitrogen contents in surface layer soil and background soil

样地编号 Plot number	TOC 范围 range	TOC C_i (g·kg^{-1})	TOC 标准差 SD	TOC P_i	TC 范围 range	TC C_i (g·kg^{-1})	TC 标准差 SD	TC P_i	TN 范围 range	TN C_i (g·kg^{-1})	TN 标准差 SD	TN P_i
1#	1.28~2.77	1.87	0.64	0.00	1.71~4.16	2.64	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2#	6.75~9.61	8.19	1.43	2.80	10.35~32.68	17.33	9.03	4.72	0.26~0.86	0.53	0.25	0.00
3#	5.02~7.97	6.27	1.24	2.15	6.80~8.61	6.65	2.17	1.81	0.09~0.46	0.27	0.17	0.00
4#	10.58~11.09	10.84	0.36	3.71	11.81~12.69	12.25	0.62	3.34	0.88~1.15	1.02	0.23	1.20
5#	25.03~26.41	25.35	2.01	8.68	26.19~27.80	27.00	0.80	7.36	3.74~3.76	3.75	0.01	4.41
6#	19.86~20.71	20.29	0.42	6.95	20.30~21.35	20.78	0.48	5.66	1.68~2.55	2.12	0.44	2.49

注:P_i为 C_i/b_i。C_i为实测平均值,b_i为距离虾塘 1 km 上风区尚未开垦的草坪土背景值:TC 3.67 g·kg^{-1},TOC 2.92 g·kg^{-1},TN 0.85 g·kg^{-1}。

Note: P_i *is* C_i/b_i. C_i is the measured average value, and b_i is the background value of the turf soil which has not been reclaimed from the windward area of 1 km away from the shrimp pond: TC 3.67 g·kg^{-1}, TOC 2.92 g·kg^{-1}, TN 0.85 g·kg^{-1}.

所有的数据利用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 软件进行处理,图形采用 Origin 8.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 碳氮含量的空间赋存特征

2.1.1 表层土 t1 碳氮含量的赋存特征 如图 2 所示:5#样地由于采集的是虾池养殖水中饵料及虾排泄物沉积在薄膜上的残留物,TOC、TC 和 TN 的含量最高,分别为 25.35、27、3.75 g·kg^{-1},6#样地是位于 5#虾池北侧排水口 1 m 处外围土,其表层土中的 TOC、TC 和 TN 的含量分别为 20.29、20.78、2.12 g·kg^{-1},含量仅次于 5#虾池,而且 6#样地表层土中 TOC、TC 和 TN 的含量分别比 7#样地背景土高出 17.37、17.11、1.27 g·kg^{-1}。可见,5#虾池样地携带有机物废水对虾池外围土壤的影响比较大。唐少霞等(2018)对虾塘沟渠土的研究也表明,沟渠土沉积物中的营养盐与背景土中所含的营养盐相比,超标倍数为 6~48 倍。

1#虾池、3#虾池及 4#虾池,底部均铺沙土,但 1#虾池、3#虾池排废水后,还进行了清洗,因此底泥中 TOC、TC 和 TN 的含量均较低,而 4#池虽排了废水,但尚未清洗,因此 4#底泥中的 TOC、TC 和 TN 检测值与 3#虾池的相比,高出 4.75、5.60 和 0.75 g·kg^{-1};与 1#虾池的相比高出 8.97、9.61 和 1.02 g·kg^{-1}。

2#虾池底部铺设水泥地板,虽然养殖户对虾池进行排水清洗,但由于水泥地板有破损,养殖过程中不可避免会存在养殖废水下渗现象,本研究在虾池 3 个破损处采集表层土进行检测,结果显示,TOC、TC 和 TN 检测值均高于铺设沙土且同样清洗后的 1#虾池、3#虾池的检测值。2#虾池底泥中的 TOC、TC 和 TN 检测值与 3#池的相比,高出 1.92、10.68和0.26 g·kg^{-1};与 1#池的相比高出6.32、14.69 和 0.53 g·kg^{-1},主要原因是 2#池破损处的本底土层为砖红壤,该土粘性大,养殖废水中的残留物不易下渗,主要富集于表土层,而且 2#池底泥中的 TOC、TC 与虾池所在地的背景值相比,也高出 2.80、4.72 倍,详见表 2。

由此可见,高位虾池废水通过渗透影响虾池围堤外侧土壤,最终导致虾池围堤外侧 6#土壤中 TOC、TC 和 TN 含量分别比虾池所在地的背景值高出 6.95、5.66和 2.49 倍。虾池养殖水体中的饵料及对虾排泄物会在虾池底泥中富积,导致底泥中的 TC、TOC 和 TN 含量高于背景值 7.36、8.68 和 4.41 倍。

2.1.2 沉积物碳氮含量的垂向赋存特征 为了探明养殖水体中的饵料及对虾排泄物在虾池底泥中的富积规律,本研究分别在 1#、2#、3#、4#虾池及 5#池的外围(6#点)采集 0~5、5~10、10~15 和 15~20 cm 四个深度的土层,分别记为 t1,t2,t3,t4,并对这些土层中的 TOC、TC 和 TN 含量进行检测,结果显示(图 3),底部铺沙的虾池,除了 1#虾池中的 TN、TC 是深层土 t4 的含量最高之外,3#、4#虾池中的 TN、TC 和 TOC 的含量均是表层土 t1 含量最高,且高于深层土 2~27 倍。底部铺水泥地板的 2#虾池,裂缝处的 TN、TC 和 TOC 的含量则是第三层土的最高,呈现 t3>t1>t2>t4,可见该虾池养殖残留饵料及虾粪随水下渗进裂缝中,产生明显的淋溶富集作用,但由于虾池的底泥为砖红壤,粘性较大,污染物不易往更深层渗透,故 t4 的含量偏低,此外由于虾池底部为水泥地板,养殖期间为改变养殖水质采取的吸底及搅动底泥对裂缝中的残留物分布影响不大。6#样地的 TN、TC 和 TOC 的含量则呈明显的从表层向深层递减规律,即 t1>t2>t3>t4,原因除了受养殖户清塘丢弃底泥的影响之外,还受地表植被枯枝落叶形成的腐质层影响。

2.2 表层沉积物营养物质的生态毒性

以加拿大安大略省环境和能源部1992年制定

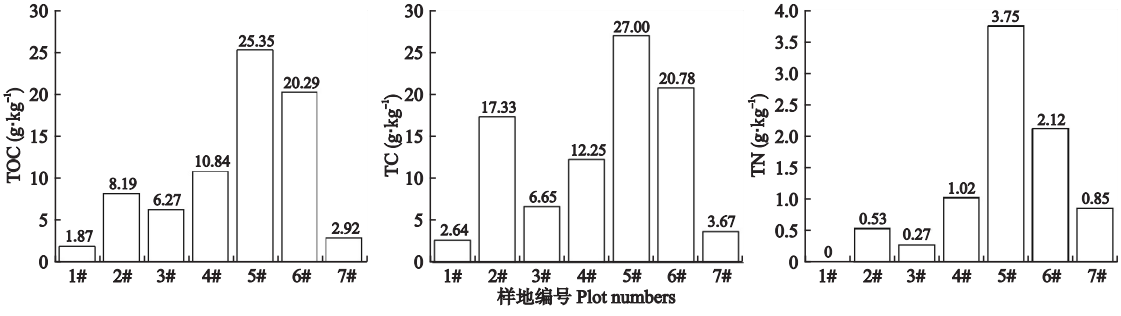


图 2 样地表层土 t1 碳、氮含量

Fig.2 Contents of carbon and nitrogen in surface layer soil

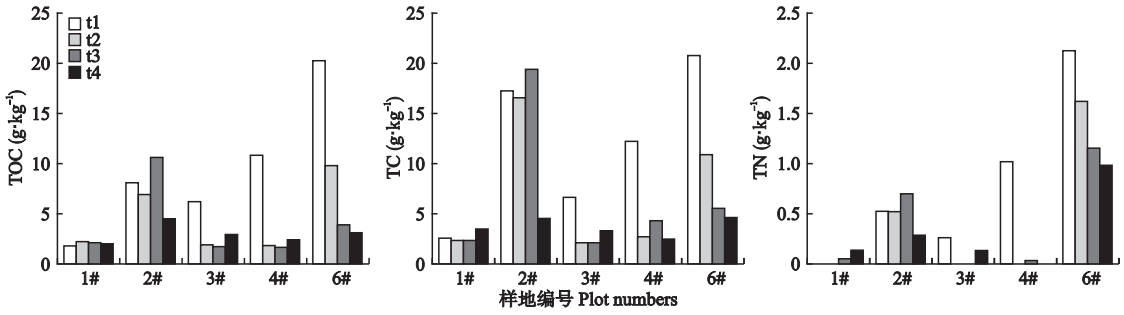


图 3 样地垂向碳氮含量

Fig.3 Content of carbon and nitrogen contents in the vertical direction of the plots

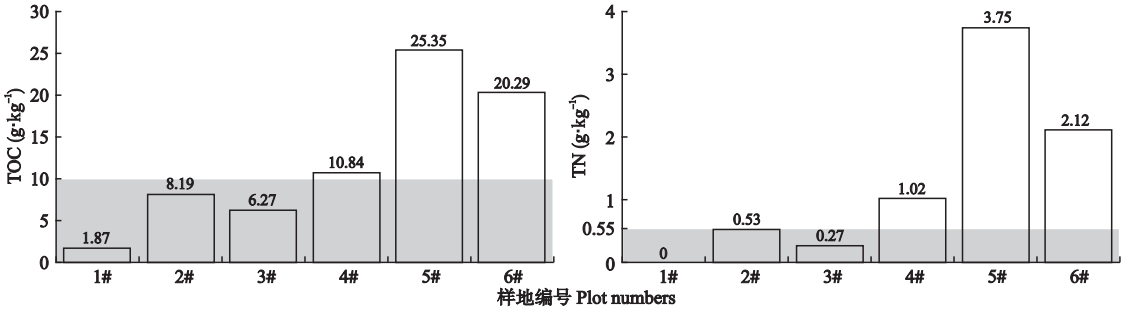


图 4 表层土 t1 TOC、TN 含量与标准限值相比

Fig.4 TOC and TN contents in surface layer compared with the standard

的沉积物质量评价标准中的最低级 TN (0.55 g·kg^{-1})、TOC (10 g·kg^{-1})作为标准(李任伟,1998),当 TN、TOC 的浓度达到该标准时,表示底泥已受污染。由图 4 可见,研究样地中的 1#、2#和 3#虾池底泥沉积物中的 TOC 和 TN 质量分数范围虽在安全级别,但是 4#、5#、6#三个样地的 TOC、TN 均出现超标现象,TOC 超标 1.08~2.54 倍,TN 超标 1.85~6.82 倍。其中 5#虾池残留物的 TOC 和 TN 超标最为严重,分别为 2.54 和 6.82 倍。

有机质含量通常反映沉积物的营养水平,是评价沉积物环境质量的重要特征指标。有机指数(Org-index)通常用作评价水体底质环境状况的指标,以此衡量底泥受有机物污染程度。有机氮(Org-N)常用来衡量底泥受有机氮污染程度(朱伊梦等,2019)。根据公式(1)、(2)并结合表 3,沉积物污染评价结果见表 4。

$$OI = TOC(\%) \times ON(\%) \quad (1)$$

$$ON = TN(\%) \times 0.95 \quad (2)$$

式中,*OI* 为有机指数,*ON* 为有机氮。

6 个样地表层 t1 的有机氮和有机指数范围分别为 0~0.356%、0~0.90(表 4)。底部铺沙土且已清洗的 1#、3#虾池底泥的有机氮和有机指数评级均为Ⅰ,同为铺沙土但未清洗的 4#虾池底泥的有机氮和有机指数评级为Ⅲ和Ⅱ,即中度污染和轻度污染。由此可见,清淤是清除虾塘有机质的一种有效手段。底部铺水泥的 2#虾池底泥虽然有机指数评级为清洁水平,但是有机氮表现为轻度污染。5#虾池残留

表 3 沉积物有机指数和有机氮评价标准

Table 3 Organic index and organic nitrogen evaluation criteria in sediments

类型 Type	清洁 clear	轻度污染 Mild pollution	中度污染 Moderate pollution	重度污染 Severe pollution
等级 Degree	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
有机指数 Org-index	OI<0.05	0.05≤OI <0.20	0.20≤OI <0.50	OI≥0.50
有机氮% Org-N%	<0.033	0.033~0.066	0.066~0.133	≥0.133

表 4 样地表层土 t1 污染程度评价结果

Table 4 Pollution degree evaluation results at the surface layer of the sampling plots

样地编号 Plot numbers	ON%	ON 等级 ON degree	TOC%	OI	OI 等级 OI degree
1#	0.000	Ⅰ	0.19	0.00	Ⅰ
2#	0.050	Ⅱ	0.82	0.04	Ⅰ
3#	0.026	Ⅰ	0.63	0.02	Ⅰ
4#	0.097	Ⅲ	1.08	0.10	Ⅱ
5#	0.356	Ⅳ	2.54	0.90	Ⅳ
6#	0.201	Ⅳ	2.03	0.41	Ⅲ

表 5 样地表层土 t1 C∶N 值
Table 5 C∶N ratio in the surface layer of sampling plots

样地编号 Plots numbers	TC (g·kg^{-1})	标准差 *SD*	TN (g·kg^{-1})	标准差 *SD*	C/N
1#	2.64	1.18	0.00	0.00	0.00
2#	17.33	9.03	0.53	0.25	32.70
3#	6.65	2.17	0.27	0.17	24.63
4#	12.25	0.62	1.02	0.23	12.00
5#	27.00	0.80	3.75	0.01	7.20
6#	20.78	0.48	2.12	0.44	9.80
7#	3.67	0.16	0.85	0.02	4.32

物的有机氮和有机指数评级均为重度污染,说明养殖过程内源污染负荷超高,富营养化风险以及环境污染物风险上升。6#虾池围堤外侧土的有机指数评级为中度污染,而有机氮评级却为重度污染。

2.3 表层沉积物中的 C∶N

分析土壤 C∶N 的变化有助于深入理解土壤碳氮的累积过程及土壤质量的变化趋势。在正常耕地中,土壤生物获得平衡营养的土壤 C∶N 大约为 25。如果土壤 C∶N 大于 25,表示土壤中 N 含量无法满足细菌需要(吕国红等,2006),微生物分解作用过慢,且要消耗土壤中的有效氮素;而当 C∶N 小于 25 时,微生物的分解作用会较快,有利于腐殖质形成(王敬富等,2012)。有机质在分解过程中有矿化和腐殖化两个过程,矿化过程最终分解成简单无机物,而腐殖化过程即有机质转变为腐殖质的过程(易文利等,2011)。腐殖质是有机质的主体部分,在一定的条件下腐殖质也会矿化、分解,但其分解比较缓慢,是土壤有机质中最稳定的成分。

表 5 可见,除了 1#虾池底泥 C∶N 为 0,2#虾池底泥C∶N为 32.70>25,其余的 3 个虾池样地表层 t1 C∶N介于 7.20~24.63,有利于残余在底泥的饵料和生物排泄物形成腐殖质,表层底泥中腐殖质如不及时清理,则有利于大量微生物的繁殖,当耗氧微生物大量繁殖时,将消耗水中的氧气,使水质恶化。

3 讨 论

虾池底部饵料及虾粪残留物中的 TOC、TN 和 TC 明显比虾池底泥中的含量高。随着养殖方式逐渐向高密度放养和饲料投喂的集约化养殖转变,养殖过程中残余的饲料、化学残留物以及养殖对象排泄物长期积聚在水体和底泥中。研究表明,虾塘养虾过程中饵料的投入和残饵的生成是造成养殖自身污染的重要因素(计新丽等,2000),人工投饵输入虾塘的 N 占总输入 N 的 90%左右,其中仅有 19%转化为虾体内的 N,其余大部分积累在虾塘底部,此外,尚有 8%~12%以悬浮颗粒氮、溶解有机氮、溶解无机氮等形式存在于水中(杨逸萍等,1999)。基于养虾池中的营养物质平衡研究表明,在养殖过程中只有约 6%的有机质被吸收利用,未被利用的则以各种形式沉积到沉积物-水界面环境中(吴锐等,2015)。对 6 个样地表层土碳氮含量分析可知:TOC 含量表现为5#>6#>4#>2#>3#>1#,TC 含量表现为 5#>6#>2#>4#>3#>1#,TN 含量表现为 5#>6#>4#>2#>3#>1#。原因是 5#中的 TOC、TN 和 TC 检测值为底膜上承接的饵料及虾粪残留物的含量,而 6#、4#、2#、3#、1#底泥中 TOC、TN 和 TC 的检测值为饵料及虾粪残留物渗透到泥土中的含量。

阳光的暴晒有利于降低虾池表层底泥中的 TOC、TN 和 TC 含量。尽管 1#、3#和 4#虾池均为池底铺沙,但 3 个池底表层土中的 TOC、TN 和 TC 含量仍存在差异,一方面由于 1#、3#虾池处于清淤暴晒阶段,有利于空气中氧气与池底底泥充分接触,充足光照不仅能杀灭池底细菌,还能提高底泥微生物分解代谢有机质的速率和效果。研究表明,清淤是去除养殖池塘有机质最为直接的手段,养殖过程中大量新鲜有机质沉积是底层缺氧的主要原因,池塘清淤和水交换具有改善底层环境质量的潜质(Boyd *et al.*,1997),所以 1#、3#虾池的 TOC、TN 和 TC 含量低于未清淤晾塘的 4#虾池;另一方面 4#虾池在排水之前长期处于淹水状态,形成的高度厌氧环境抑制了有机质的分解。

除 1#虾池外,底部铺沙的虾池底泥中的 TN、TC 和 TOC 的含量均是表层含量最高,且高于深层土 2~27倍。各样地垂向分析表明底泥淤积具有明显的空间差异性,主要与各样地的自身情况有关,如换水频率、投喂饲料种类、土壤性质、塘底以及塘四周的铺设情况、清洁程度、周围环境等。6#样地的 TOC、TN 和 TC 含量随着土层深度增加含量递减,可能是由以下原因造成:一是处于 5#虾池围堤外侧,养殖水体向周边土壤渗透会导致土壤污染,受养殖废水中携带有机质影响增加了其来源也增加了土壤中碳、氮含量,王凌等(2009)研究也表明,海水养殖密集区的土壤比未养殖区土壤有机碳含量增加 30%,总氮含量增加 20%;二是由于植物残体和凋落物输入在土壤表层而发生累积,研究表明,大量的植物残骸是表层沉积物有机碳的重要来源(吕国红

等,2006);三是氮沉降因素(王发刚等,2008)。底部铺设水泥的 2#虾池,可能是土壤性质的原因,导致 TOC、TN 和 TC 主要蓄积在 t1~t3 层,最高值均出现在 t3 层。2#虾池底泥自上而下分为 4 层:t1 为污染层,主要为残留饵料、虾体排泄物以及微生物残体等;t2 为过渡层,土质结构疏松;t3 为沉积层,土质为粘土且颜色呈黑色至深黑色,截留大部分有机物质;t4 为本底层,质地坚硬,即高位虾池建成前的原始土壤。沉积物碳氮含量的空间分布还会受到沉积物粒度效应的影响,研究表明黏粒可以吸附有机质,提高有机碳含量(李顺姬等,2010)。细颗粒物质因具有巨大的比表面积可将有机质吸附、富集于表面并形成有机质膜,进一步为碳氮等物质提供吸附结合位点(乔永民等,2018),因而细质土比粗质土能固定更多的碳和氮。陈桂香等(2017a)、杨平等(2018)研究表明,沉积物有机质变化特征主要受沉积物粒径大小的调控,且呈正相关关系。至于底部铺沙的 1#养殖池为何 TN、TC 和 TOC 不是表层土含量最高,回访调研时了解到养殖户清塘时是用高压水枪对虾池进行清洗,由此推测有可能是因为高压水枪冲洗时,除将表层的一些污染物清洗掉之处,另外一些渗透进 t2 和 t3 层。

虾池底泥中的 C∶N 偏低,有利于残留在底泥中的饵料和生物排泄物形成腐殖质,如不能及时清理腐殖质,将会导致养殖水体恶化。一般情况下,土壤 C∶N 主要受地区的水热条件和成土作用特点的控制,同时 C∶N 作为沉积物中有机物稳定性的指标值,C∶N 低通常意味着沉积物中含有较高的不稳定有机物(Graham *et al.*,2001)。本研究期间各样地表层土 t1 的 C∶N 表现为 2#>3#4#>6#>5#,并且其比值均大于背景土的 C∶N 值。除铺水泥的 2#池外,其余样地 C∶N 均低于 25,说明这些样地微生物的分解作用较快,有利于沉积物中有机质分解形成腐殖质。研究表明,过低 C∶N 值虽然加快了有机质和有机氮的矿化分解速度,但是土壤固定有机碳能力降低,同时因矿化释放的过多无机氮在土壤中难以累积,使得氮素流失可能性增加,对环境产生负面影响(Franzluebbers *et al.*, 1996; Vanlauwe *et al.*,1996)。同时,由于腐殖质复杂的构成和所含的多种基团,不仅能吸收不同波段的光,颜色从黄到黑,影响水的透光性。而且能影响和控制水体中重金属和持久性有机污染物的迁移转化,进而影响其毒性和生物可得性(乔永民等,2018)。腐殖质本身矿化率很低,但它能促进其他有机质的矿化,而有机质矿化过程大量耗氧,同时释放出 C、N、P 和 S 等营养盐及大量 CO_2 和 CH_4 等温室气体,可造成严重的水质恶化、水体富营养化(朱广伟等,2001)。

养殖期间饵料及虾粪残留物的有机氮和有机指数评级均为Ⅳ重度污染,虾池围堤外侧土的有机指数评级为Ⅲ中度污染,而有机氮评级却为Ⅳ重度污染。将沉积物表层土 t1 的 TOC 和 TN 含量与加拿大沉积物质量评价标准进行对比分析,结果显示,4#、5#、6#样地 TOC 和 TN 均超标,即沉积物均能引起最低级别生态毒性效应。甘华阳等(2012)根据加拿大安大略省环境质量评价标准对北部湾滨海沉积物进行生态风险评估,结果显示,龙门港区、大风江口中部和铁山港顶部西北角为污染区域,其余区域为未污染区域。但在对鳐鱼滩湿地不同围垦年限研究时发现,即使是围垦 3 a 的养殖塘沉积物,其 TOC 和 TN 含量分别显示轻度污染和重度污染(陈桂香等,2017b)。每个样地的碳氮含量是各个因素的综合结果,或受其协同作用,或受其制约作用。

天津、河北和辽宁环渤海海岸表层沉积物中 TN 的含量为 0.7~1.5、0.6~1.2、0.5~1.0 g·kg^{-1}(李任伟等,2008);福建省东北部的三沙湾养殖海域沉积物中 TN 的含量为 0.15 ~1.39 g·kg^{-1}(韦章民等,2016);深圳湾和珠江口东南沿岸沉积物中 TN 的含量为 0.75~1.04、0.49~0.70 g·kg^{-1}(许春玲等,2017)。本研究中,3 种类型虾池表层沉积物 TN 的含量为 0.00~3.75 g·kg^{-1},含量范围内最高值 3.75 g·kg^{-1}均大于上述研究区域中 TN 含量的最高值。由此可见,与海湾或其他开放的养殖水域相比,封闭型的虾池养殖由于其环境容量有限,加上农户为了提高经济效益,进行高密度养殖,极易导致养殖环境的污染。

本研究虽采集了 3 种类型 5 个虾池共 120 个底泥样本,均为排水后的虾池底泥。为了更好地探讨高位虾池底泥碳氮富集的特征,需要进一步对养殖期的底泥进行深入研究。

参考文献

陈 敏, 陈石泉, 陈春华, 等. 2017. 海南岛周边泻湖资源保护与可持续利用研究探讨. 海洋湖沼通报, (4): 107-114. [Chen M, Chen SQ, Chen CH, *et al*. 2017. Studies on protection and sustainable utilization of lagoon resource around Hainan Island. *Transactions of Oceanology and Limnology*, (4): 107-114.]

陈桂香, 高灯州, 王志萍, 等. 2017a. 闽江口围垦养殖对沉积物有机碳组分及其矿化的影响. 环境科学学报, **37**(11): 4374-4382. [Chen GX, Gao DZ, Wang ZP, *et al*. 2017a. Effects of reclamation aquaculture on sediment organic carbon fractions and mineralization in the Min River Estuary. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **37**(11): 4374-4382.]

陈桂香, 高灯州, 王志萍, 等. 2017b. 鳝鱼滩湿地不同围垦年限养殖塘沉积物中碳、氮和磷含量及其污染风险评价. 湿地科学, **15**(2): 309-314. [Chen GX, Gao DZ, Wang ZP, *et al*. 2017b. Contents of carbon, nitrogen and phosphorus in sediments in aquaculture ponds for different reclamation years in Shanyutan wetlands and its pollution risk assessment. *Wetland Science*, **15**(2): 309-314.]

甘华阳, 张顺之, 梁 开, 等. 2012. 北部湾北部滨海湿地水体和表层沉积物中营养元素分布与污染评价. 湿地科学, **10**(3): 287-298. [Gan HY, Zhang SZ, Liang K, *et al*. 2012. Nutrients distribution and contamination assessment in seawater and surface sediment of the coastal wetlands, northern Beibu Gulf. *Wetland Science*, **10**(3): 287-298.]

黄翔峰, 王 珅, 陈国鑫, 等. 2016. 人工湿地对水产养殖废水典型污染物的去除. 环境工程学报, **10**(1): 12-20. [Huang XF, Wang K, Chen GX, *et al*. 2016. Typical pollutants removal efficiency from aquaculture wastewater by using constructed wetlands. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **10**(1): 12-20.]

黄小平, 郭 芳, 黄良民. 2010. 大鹏澳养殖区柱状沉积物中氮、磷的分布特征及污染状况研究. 热带海洋学报, **29**(1): 91-97. [Huang XP, Guo F, Huang LM. 2010. Distribution characteristics and pollution of nitrogen and phosphorus in core sediments of marine culture area in Dapeng Cove. *Journal of Tropical Oceanography*, **29**(1): 91-97.]

计新丽, 林小涛, 许忠能, 等. 2000. 海水养殖自身污染机制及其对环境的影响. 海洋环境科学, **19**(4): 66-71. [Ji XL, Lin XT, Xu ZN, *et al*. 2000. Mechanism of mariculture self-pollution and its effects on environment. *Marine Environmental Science*, **19**(4): 66-71.]

江肖良, 李 孟, 张少辉, 等. 2018. 4种不同工况生物滤池净化效能与微生物特性分析. 环境科学, **39**(12): 5503-5513. [Jiang XL, Li M, Zhang SH, *et al*. 2018. Purification efficiency and microbial characteristics of four biofilters operated under different conditions. *Environmental Science*, **39**(12): 5503-5513.]

孔繁翔, 马荣华, 高俊峰, 等. 2009. 太湖蓝藻水华的预防、预测和预警的理论与实践. 湖泊科学, **21**(3): 314-328. [Kong FX, Ma RH, Gao JF, *et al*. 2009. The theory and practice of prevention, forecast and warning on cyanobacteria bloom in Lake Taihu. *Journal of Lake Sciences*, **21**(3): 314-328.]

李任伟, 李 原. 2008. 渤海沿岸环境沉积调查: As、重金属、氮和磷污染. 沉积学报, **26**(1): 128-138. [Li RW, Li Y. 2008. Environmental and sedimentological survey along the coast of Bohai Gulf. *Acta Sedimentologica Sinica*, **26**(1): 128-138.]

李任伟. 1998. 沉积物污染和环境沉积学. 地球科学进展, **13**(4): 398-402. [Li RW. 1998. Contamination of sediments and environmental sedimentology. *Advances in Earth Science*, **13**(4): 398-402.]

李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 2010. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系. 生态学报, **30**(5): 1217-1226. [Li SJ, Qiu LP, Zhang XC. 2010. Mineralization of soil organic carbon and its relations with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, **30**(5): 1217-1226.]

刘 倩, 徐桂梅, 罗国芝. 2015. 水力停留时间对养殖污水固相反硝化处理效果的影响研究. 渔业现代化, **42**(6): 6-10. [Liu Q, Xu GM, Luo GZ. 2015. Study on the effect of hydraulic retention time on aquaculture wastewater treatment in solid-phase denitrification system. *Fishery Modernization*, **42**(6): 6-10.]

刘国才, 李德尚, 董双林, 等. 2002. 对虾综合养殖生态系有机碳的平衡. 海洋学报(中文版), **24**(6): 84-91. [Liu GC, Li DS, Dong SL, *et al*. 2002. Budget of organic carbon in shrimp polyculture ecosystems. *Acta Oceanologica Sinica*, **24**(6): 84-91.]

刘国锋, 徐 跑, 吴 霆, 等. 2018. 中国水产养殖环境氮磷污染现状及未来发展思路. 江苏农业学报, **34**(1): 225-233. [Liu GF, Xu P, Wu T, *et al*. 2018. Present condition of aquaculture nitrogen and phosphorus environmental pollution and future development strategy. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, **34**(1): 225-233.]

刘华丽, 曹秀云, 宋春雷, 等. 2011. 水产养殖池塘沉积物有机质富集的环境效应与修复策略. 水生态学杂志, **32**(6): 130-134. [Liu HL, Cao XY, Song CL, *et al*. 2011. Environmental effects of organic matter enrichment and restoration strategy in sediment of aquaculture ponds. *Journal of Hydroecology*, **32**(6): 130-134.]

罗昭林, 朱长波, 郭永坚, 等. 2014. 流沙湾表层沉积物中碳、氮、磷的分布特征和污染评价. 南方水产科学, **10**(3): 1-8. [Luo ZL, Zhu CB, Guo YJ, *et al*. 2014. Distribution characteristics of C, N and P in Liusha Bay surface sediment and their pollution assessment. *South China Fisheries Science*, **10**(3): 1-8.]

吕国红, 周 莉, 赵先丽, 等. 2006. 芦苇湿地土壤有机碳和全氮含量的垂直分布特征. 应用生态学报, **17**(3): 384-389. [Lü GH, Zhou L, Zhao XL, *et al*. 2006. Vertical distribution of soil organic carbon and total nitrogen in reed wetland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **17**(3): 384-389.]

马晓娜, 李 贤, 张延青, 等. 2017. 气水比对移动床生物滤器净化海水养殖废水的影响. 海洋科学, **41**(8): 46-52. [Ma XN, Li X, Zhang YQ, *et al*. 2017. Effect of gas-water ratio on removal efficiency of marine aquaculture wastewater in moving bed biofilm reactor. *Marine Sciences*, **41**(8): 46-52.]

毛 洁, 杨宇峰, 谷阳光, 等. 2012. 汕头南澳养殖区表层沉

积物中生源要素的分布及其污染评价. 生态科学, **31**(3): 252-258. [Mao J, Yang YF, Gu YG, *et al.* 2012. Distribution and potential contamination assessment of biogenic elements in surface sediments from Nan'ao mariculture areas, Shantou. *Ecological Science*, **31**(3): 252-258.]

裴鹏兵, 吴洁琼, 梁宏豪, 等. 2018. 生物净水栅对凡纳滨对虾肠道菌群组成的影响. 水产科学, **37**(3): 301-308. [Pei PB, Wu JQ, Liang HH, *et al.* 2018. Effects of biological water purification grid on intestinal flora composition of Pacific White Leg Shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Fisheries Science*, **37**(3): 301-308.]

乔永民, 谭键滨, 马舒欣, 等. 2018. 深圳红树林湿地沉积物氮磷分布与来源分析. 环境科学与技术, **41**(2): 34-40. [Qiao YM, Tan JB, Ma SX, *et al.* 2018. The distribution pattern and sources analysis for nitrogen and phosphorus in core sediment of Shenzhen mangrove wetland. *Environmental Science & Technology*, **41**(2): 34-40.]

权 伟, 应苗苗, 康华靖, 等. 2015. 洞头近海养殖水域沉积物碳含量空间分布格局. 应用海洋学学报, **34**(4): 580-585. [Quan W, Ying MM, Kang HJ, *et al.* 2015. Spatial distribution of sediments carbon in Dongtou offshore aquaculture waters. *Journal of Applied Oceanography*, **34**(4): 580-585.]

孙 耀, 李 健, 崔 毅, 等. 1997. 虾塘中新生残饵的N、P营养物质溶出速率及其变化规律研究. 应用生态学报, **8**(5): 541-544. [Sun Y, Li J, Cui Y, *et al.* 1997. Dissolving rates of N and P from newborn remains produced by feeding and their changing patterns in shrimp pond. *Chinese Journal of Applied Ecology*, **8**(5): 541-544.]

唐少霞, 王子爱, 魏伊宁, 等. 2018. 高位虾池养殖水对沟渠土营养盐的影响. 广东农业科学, **45**(10): 128-133. [Tang SX, Wang ZA, Wei YN, *et* al. 2018. Impact of the aquaculture water of higher-place shrimp ponds on nutrients within the soil within trenches. *Guangdong Agricultural Sciences*, **45**(10): 128-133.]

王 凌, 岳 平, 谢善何, 等. 2009. 南方高位池养殖生态环境影响及对策. 环境科学与技术, **32**(8): 194-198, 204. [Wang L, Yue P, Xie SH, *et al.* 2009. Ecological environment impact countermeasures for high-level pond aquaculture in South China. *Environmental Science & Technology*, **32**(8): 194-198, 204.]

王发刚, 王启基, 王文颖, 等. 2008. 土壤有机碳研究进展. 草业科学, **25**(2): 48-54. [Wang FG, Wang QJ, Wang WY, *et al.* 2008. Research progress on soil organic matter. *Pratacultural Science*, **25**(2): 48-54.]

王欢欢, 谭斯尹, 王 慧, 等. 2019. ATS 藻板与自然礁石上藻群生物多样性的比较. 热带海洋学报, **38**(1): 43-48. [Wang HH, Tan SY, Wang H, *et al.* 2019. Comparison of biological diversity of algae on algal turf scrubber (ATS) and natural reefs. *Journal of Tropical Oceanography*, **38**(1): 43-48.]

王敬富, 陈敬安, 曾 艳, 等. 2012. 贵州百花湖沉积物磷、氮及有机碳的空间分布特征. 环境化学, **31**(5): 599-603. [Wang JF, Chen JA, Zeng Y, *et al.* 2012. Spatial distribution of TP, TN and C_{org} in the sediment of Baihua Lake. *Environmental Chemistry*, **31**(5): 599-603.]

韦章良, 韩红宾, 于克锋, 等. 2016. 三沙湾盐田港养殖海域沉积物中的有机碳、氮和磷. 海洋科学, **40**(3): 77-86. [Wei ZL, Han HB, Yu KF, *et al.* 2016. The content of carbon, nitrogen and phosphorus in the surface sediment at the mariculture area in the enclosed Sansha Bay. *Marine Sciences*, **40**(3): 77-86.]

吴 锐, 雷永乾, 王 畅, 等. 2015. 粤东柘林湾养殖区海水富营养化评价. 环境科学与技术, **38**(10): 210-215. [Wu R, Lei YQ, Wang C, *et al.* 2015. Assessment of eutrophication for aquaculture seawater in Zhelin Bay, eastern Guangdong Province. *Environmental Science & Technology*, **38**(10): 210-215.]

吴 伟, 范立民. 2014. 水产养殖环境的污染及其控制对策. 中国农业科技导报, **16**(2): 26-34. [Wu W, Fang LM. 2014. Pollution and control measures of aquaculture environment. *Journal of Agricultural Science and Technology*, **16**(2): 26-34.]

吴英杰, 马璐瑶, 陈 琛, 等. 2018. 北美海蓬子生态浮床对养殖海水的净化和对虾的增产效果. 环境工程学报, **12**(12): 3351-3361. [Wu YJ, Ma LY, Chen C, *et al.* 2018. Purification of aquaculture seawater and stimulation of shrimp yield by *Salicornia bigelovii* ecological floating beds. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, **12**(12): 3351-3361.]

许春玲, 李绪录, 林 梵. 2017. 深圳湾及邻近沿岸沉积物中碳、氮和磷的分布. 中国环境科学, **37**(7): 2691-2698. [Xu CL, Li XL, Lin F. 2017. Distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in the surface sediment of the Shenzhen Bay and adjacent coastal Area. *China Environmental Science*, **37**(07): 2691-2698.]

许国晶, 段登选, 杜兴华, 等. 2015. 基于生物协同作用的强化生态浮床对养殖水体的净化效果. 大连海洋大学学报, **30**(1): 62-67. [Xu GJ, Duang DX, Du XH, *et al.* 2015. Aquaculture waste water treatment by an enhanced ecological floating bed based on synergistic effect. *Journal of Dalian University*, **30**(1): 62-67.]

杨 平, 金宝石, 谭立山, 等. 2017. 九龙江河口区养虾塘沉积物-水界面营养盐交换通量特征. 生态学报, **37**(1): 192-203. [Yang P, Jin BS, Tang LS, *et al.* 2017. Temporal variation of nutrients fluxes across the sediment-water interface of shrimp ponds and influencing factors in the Jiulong River Estuary. *Acta Ecologica Sinica*, **37**(1): 192-203.]

杨 平, 金宝石, 谭立山, 等. 2018. 亚热带河口陆基养虾塘水体溶解性碳浓度及沉积物-水界面碳通量时空动态特征. 生态学报, **38**(6): 1994-2006. [Yang P, Jin BS, Tan LS, *et al.* 2018. Spatial-temporal variations of water column dissolved carbon concentrations and dissolved carbon flux at the sediment-water interface in the shrimp ponds from two subtropical estuaries. *Acta Ecologica Sinica*, **38**(6): 1994-2006.]

杨俊丽, 吴 雪, 李希磊, 等. 2018. 莱州湾扇贝养殖区表层沉积物质量评价. 水产科学, **37**(3): 361-367. [Yang JL, Wu X, Li XL, *et al*. 2018. Quality evaluation of surface sediments in scallop culture area in Laizhou Bay. *Fisheries Science*, **37**(3): 361-367.]

杨庆霄, 蒋岳文, 张昕阳, 等. 1999. 虾塘残饵腐解对养殖环境影响的研究 Ⅰ. 虾塘底层残饵腐解对水质环境的影响. 海洋环境科学, **18**(2): 11-15. [Yang QX, Jing YW, Zhang XY, *et al*. 1999. Study on the effects of decomposition of the bait in shrimp pond on the maricultural environment. Ⅰ. Effect of decomposition of the bottom bait in shrimp pond on water environment. *Marine Environmental Science*, **18**(2): 11-15.]

杨逸萍, 王增焕, 孙 建, 等. 1999. 精养虾池主要水化学因子变化规律和氮的收支. 海洋科学, (1): 15-17. [Yang YP, Wang ZH, Sun J, *et al*. 1999. The variation law of aqueous chemical factors and the budgets of nitrogen in the intensive shrimp ponds. *Marine Sciences*, (1): 15-17.]

易文利, 王圣瑞, 杨苏文, 等. 2011. 长江中下游浅水湖泊沉积物腐殖质组分赋存特征. 湖泊科学, **23**(1): 21-28. [Yi WL, Wang SR, Yang SW, *et al*. 2011. Humus distribution and forms in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Lake Sciences*, **23**(1): 21-28.]

张 婷, 刘 爽, 宋玉梅, 等. 2019. 柘林湾海水养殖区底泥中重金属生物有效性及生态风险评价. 环境科学学报, **39**(3): 706-715. [Zhang T, Liu S, Song YM, *et al*. 2019. Bioavailability and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of marine aquaculture in Zhelin Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, **39**(3): 706-715.]

周微微, 戴习林, 冯奇飞, 等. 2018. 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. 上海海洋大学学报, **27**(5): 756-764. [Zhou WW, Dai XL, Feng QF, *et al*. 2018. Sulfide content in sediment of outdoor ponds of *Litopenaeus vannamei* and its relationship with other environmental factors. *Journal of Shanghai Ocean University*, **27**(5): 756-764.]

朱广伟, 陈英旭. 2001. 沉积物中有机质的环境行为研究进展. 湖泊科学, **13**(3): 272-279. [Zhu GW, Chen YX. 2001. A review of geochemical behaviors and environmental effects of organic matter in sediments. *Journal of Lake Sciences*, **13**(3): 272-279.]

朱伊梦, 姜翠玲, 朱立琴, 等. 2019. 表面流人工湿地长期运行后的底泥营养盐累积特征与释放规律. 环境科学, **40**(6): 2764-2772. [Zhu YM, Jiang CL, Zhu LQ, *et al*. 2019. Accumulation characteristics and release regularity of nutrients in sediments of a surface-flow constructed wetland after long-term operation. *Environmental Science*, **40**(6): 2764-2772.]

Boyd CE. 1997. Practical aspects of chemistry in pond aquaculture. *The Progressive Fish-Culturist*, **59**: 85-93.

Calvert S, Pedersen TF, Naidu PD. 1995. On the organic carbon maximum on continental slope of the Eastern Arabian Sea. *Journal of Marine Research*, **53**: 269-296.

Chen Y, Dong SL, Wang F, *et al*. 2016. Carbon dioxide and methane fluxes from feeding and no-feeding mariculture ponds. *Environmental Pollution*, **212**: 489-497.

Franzluebbers AJ, Arshad MA, Ripmeester JA. 1996. Alterations in canola residue composition during decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, **28**: 1289-1295.

Graham MC, Eaves MA, Farmer JG, *et al*. 2001. A study of carbon and nitrogen stable isotope and elemental ratios as potential indicators of source and fate of organic matter in sediments of the Forth Estuary, Scotland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **52**: 375-380.

Santschi P, Höehener P, Benoit G, *et al*. 1990. Chemical processes at the sediment-water interface. *Marine Chemistry*, **30**: 269-315.

Vanlauwe B, Nwoke OC, Sanginga N, *et al*. 1996. Impact of residue quality on the C and N mineralization of leaf and root residues of three agroforestry species. *Plant and Soil*, **183**: 221-231.

作者简介 王子爱,女,1995 年生,硕士研究生,主要研究方向为生态环境及资源开发利用。E-mail: wangzai713@126.com

责任编辑 李凤芹