

唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量

蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃

(中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要: 2004-08 ~ 2005-05 分 4 个航次对唐岛湾网箱养殖区的 10 个站的沉积物间隙水和上覆水中的溶解无机氮营养盐(NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N)进行了现场调查, 并使用 Fick 第一定律对该海区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量进行了估算. 结果表明, 网箱养殖区的上覆水和沉积物间隙水中溶解无机氮均以 NO_3^- -N 为主, 分别占溶解无机氮总量的 73.34% 和 61.45%; 上覆水中溶解无机氮(DIN)和 NO_3^- -N 含量的季节变化趋势一致, 在 2004-10 达到峰值, NH_4^+ -N 的季节变化稍有不同; 间隙水中溶解无机氮(DIN)和 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 的变化趋势一致, 表现为从 5 月份到 8 月份含量逐渐增加, 到 10 月份达到最大, 然后到次年 2 月份又减少; 上覆水和间隙水中 NO_2^- -N 的含量随养殖进程表现为一个逐步积累的过程. NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 NO_2^- -N 在沉积物-海水界面上的扩散通量分别为 5.46、-5.04、8.71 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, NO_2^- -N 的扩散释放对唐岛湾网箱养殖区的水环境质量影响较大.

关键词: 网箱养殖区; 上覆水; 间隙水; 无机氮; 扩散通量; 唐岛湾

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2007)05-1001-05

Diffusive Fluxes of Dissolved Inorganic Nitrogen Across Sediment-Water Interface in Net-Cage Culture Area of Tangdao Bay

JIANG Zeng-jie, CUI Yi, CHEN Bi-juan

(Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: On basis of field data measured during 4 cruises from August 2004 to May 2005, concentrations of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N in overlying and interstitial waters of sediments in net-cage culture areas of Tangdao Bay were analyzed. Moreover, diffusive fluxes of dissolved inorganic nitrogen from sediments were estimated by Fick's first law. Results showed that the main form of inorganic nitrogen in overlying and interstitial waters of sediments was NO_3^- -N, accounting for 73.34% and 61.45% respectively. Concentrations distributions of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and NO_3^- -N in overlying water varied seasonally, which got their maximum concentration in October 2004 while the NH_4^+ -N concentration showed a little difference. The seasonal change of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and NO_3^- -N, NH_4^+ -N in interstitial water varied similarly and also got their maximum concentration in October 2004. The concentration of NO_2^- -N in overlying and interstitial waters increased from spring to winter. The average fluxes of NH_4^+ -N, NO_3^- -N, NO_2^- -N were separately 5.46, -5.04, 8.71 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$. And NO_2^- -N was the most diffusive flux component in net-cage culture area of Tangdao Bay.

Key words: net-cage culture area; overlying water; interstitial water; inorganic nitrogen; diffusive fluxes; Tangdao Bay

氮是近海网箱养殖系统重要的生源要素之一, 养殖过程中大量外源性物质的投入, 导致养殖水体中氮的各种存在形态和转化与自然状况下相比发生了很大的改变^[1~4]. 作为营养物质积累和间歇性再生的重要场所, 沉积物中无机氮营养盐含量及其与上覆水间的相互关系已成为沿岸水体发生富营养化的重要影响因素, 在一定的条件下, 大量的营养物质会从沉积物中重新释放出来, 造成水体的富营养化^[5~8]. 因此, 开展网箱养殖系统沉积物-水界面无机氮营养盐扩散通量的研究, 对于系统地掌握和了解养殖水体中氮营养盐的收支、循环转移和积累过程、评价网箱养殖对水环境的影响机理、保证养殖业的可持续发展具有十分重要的理论意义.

1 材料与方法

1.1 唐岛湾概况

唐岛湾位于海西半岛西南岸, 东部和北部为青岛市黄岛区的薛家岛, 西邻胶南的灵山卫镇, 南接黄海灵山湾, 湾口开向西南, 东起薛家岛的鱼鸟咀 ($35^\circ 52' 26''\text{N}$, $120^\circ 10' 00''\text{E}$), 西至灵山卫镇的炮台咀 ($35^\circ 54' 31''\text{N}$, $120^\circ 08' 55''\text{E}$), 口宽 2.5 km 左右, 总面积约 17 km^2 ^[9]. 20 世纪 80 年代起即发展成为青岛

收稿日期: 2006-06-01; 修订日期: 2006-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(40376037)

作者简介: 蒋增杰(1978~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋生态学, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

重要养殖区域之一,网箱养殖是该湾最重要的水产养殖方式,主要分布在湾中部水域,共有网箱约4 000个(多为3 m×3 m),面积约5 万 m²,网箱中每年放养鱼苗的数量、种类大致相同,养殖品种主要为鲈鱼、黑头鱼、河鲀鱼等,养殖周期一般为1 a,投喂的饵料主要来源于海上打捞的小杂鱼.

1.2 样品采集

2004-08、2004-10、2005-02 和 2005-05 在唐岛湾网箱养殖区共设 10 个采样点进行调查(图 1).用 Micro corer 柱状采泥器采集直径 65 mm,高度为 15~25 cm 的带有上覆水的表层底泥,用乳胶管小心地将上覆水引进聚乙烯瓶,用 0.45 μm 滤膜过滤后加入 1 mL/L 的甲醛冷冻保存.泥样样品运回实验室后恒温离心(5 000 r/min, 30 min),取上清液经 0.45 μm 孔径的微孔滤膜过滤后得到间隙水样品,用去离子水适当稀释后的间隙水和上覆水进行 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 含量分析.

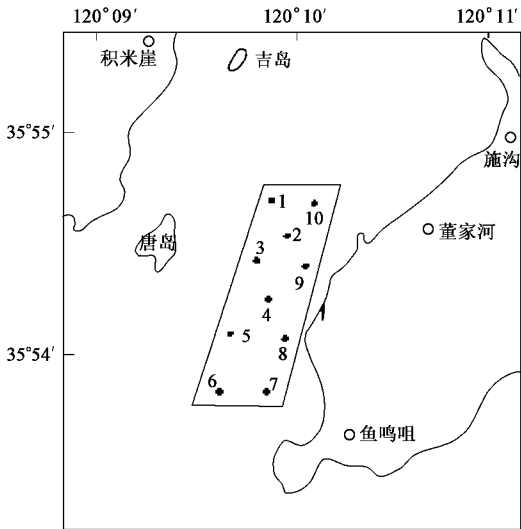


图 1 调查海区及采样点
Fig.1 Area of survey and sampling sites

1.3 分析方法

NH₄⁺-N 采用次溴酸钠氧化法,NO₃⁻-N 采用铈-镉还原法,NO₂⁻-N 采用重氮-偶氮法.

2 结果与讨论

2.1 网箱养殖区上覆水中无机氮营养盐的含量和季节变化

唐岛湾网箱养殖区 10 个采样点 4 个月份上覆水中 3 种形态无机氮的浓度范围、平均值以及占溶解无机氮的百分比见表 1.从表 1 中可以看出,全年

该养殖区上覆水中 NH₄⁺-N 的浓度变化范围在 0.61~6.81 μmol/L 之间,年平均值为 2.38 μmol/L;NO₃⁻-N 的浓度变化范围在 2.47~39.87 μmol/L 之间,年平均值为 10.35 μmol/L;NO₂⁻-N 的浓度变化范围在 0.23~3.21 μmol/L 之间,年平均值为 0.90 μmol/L.从 3 种形态无机氮的百分组成情况看,NO₃⁻-N 占 3 种形态无机氮含量的 73.34%,是上覆水中无机氮的主要存在形式;NH₄⁺-N 次之,占 18.85%;NO₂⁻-N 最少,只有 7.81%.

为了与唐岛湾鱼类网箱养殖的养殖周期相一致,将 2005-05 的数据作为起始值进行讨论.上覆水中溶解无机氮、3 种形态无机氮的季节变化趋势如图 2 所示,NO₃⁻-N 的变化趋势与 3 种形态氮的总和(DIN)是一致的,表现为从 5 月份到 8 月份含量逐渐增加,到 10 月份达到最大,然后到 2 月份又减少;NH₄⁺-N 的季节变化表现为 5 月份含量较高,到了 8 月份减少,然后 10 月份达到最高,到 2 月份达到最低.NO₂⁻-N 在这 4 个月当中的含量均很小,但含量呈现逐渐增加的趋势.上覆水中各形态无机氮含量季节变化的这种趋势,主要是由养殖鱼类的放养规律、代谢活动、饵料投喂量以及浮游植物的消长情况所共同决定的^[10,11].5 月份,放养鱼类的规格很小,投喂的饵料较少,排泄物也相对较少,所以该月份水体中溶解无机氮含量相对来说都较小;8 月份,鱼类生长迅速,生命代谢旺盛,投饵和排泄物均增加,虽然此时浮游植物的繁殖旺盛,会消耗掉水体中一部分无机氮,但无机氮的增加速率超过了浮游植物的利用极限,致使溶解无机氮在水中积累,表现在其含量继续增加;10 月份,浮游植物繁殖速率下降,而养殖鱼类继续增长至最大,载鱼量达到全年最高,其代谢与投饵量也达到最大,故这个季节养殖水环境

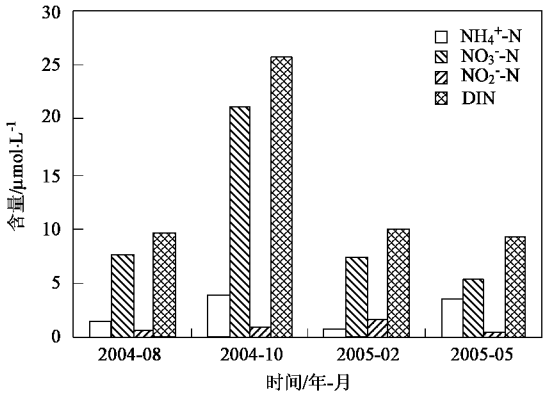


图 2 上覆水中溶解无机氮的季节变化
Fig.2 Seasonal change of inorganic nitrogen in overlying water

中溶解无机氮含量最高;2 月份,大部分的鱼类已经收获,剩余的部分鱼类因为温度降低,生命活动和新陈代谢减少,投饵量和排泄量也大大降低,所以此时溶解无机氮的含量降低.但对于 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 来说,情况有所不同,主要表现在 8 月份,由于浮游植物迅速繁

殖,大量消耗水中的无机氮, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 来不及转化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 时已被浮游植物吸收,构成 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ -浮游植物(有机氮)-浮游动物(有机氮)- $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的直接循环^[12],因此,8 月份 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 并不随养殖活动强度的增加而增加,反而减少.

表 1 上覆水中无机氮营养盐的含量变化/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Content distribution of inorganic nitrogen in overlying water/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$					
取样时间/年-月	项目	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	DIN
2004-08	范围	0.73 ~ 2.77	5.23 ~ 9.48	0.53 ~ 0.80	7.67 ~ 11.72
	平均值	1.43	7.55	0.64	9.62
	占 DIN 的比例/%	14.86	78.47	6.65	100
2004-10	范围	1.73 ~ 6.81	10.86 ~ 39.87	0.29 ~ 1.61	13.63 ~ 46.37
	平均值	3.83	21.14	0.88	25.85
	占 DIN 的比例/%	14.82	81.78	3.40	100
2005-02	范围	0.61 ~ 1.18	3.50 ~ 11.63	0.78 ~ 3.21	5.45 ~ 15.38
	平均值	0.77	7.40	1.68	9.85
	占 DIN 的比例/%	7.82	75.13	17.05	100
2005-05	范围	2.87 ~ 5.53	2.47 ~ 8.71	0.23 ~ 0.56	5.74 ~ 12.72
	平均值	3.48	5.32	0.38	9.18
	占 DIN 的比例/%	37.91	57.95	4.14	100
年平均值	含量	2.38	10.35	0.90	13.63
	占 DIN 的比例/%	18.85	73.34	7.81	100

2.2 网箱养殖区沉积物间隙水中无机氮营养盐的含量和季节变化

唐岛湾网箱养殖区 10 个采样点 4 个月份沉积物间隙水中 3 种形态无机氮的浓度范围、平均值以及占溶解无机氮的百分比见表 2.从表 2 中可以看出,全年该养殖区沉积物间隙水中 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度变化范围在 0.37 ~ 15.40 $\mu\text{mol/L}$ 之间,年平均值为 3.38 $\mu\text{mol/L}$; $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的浓度变化范围在 3.09 ~ 25.27 $\mu\text{mol/L}$ 之间,年平均值为 9.60 $\mu\text{mol/L}$; $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的浓度变化范围在 0.53 ~ 6.30 $\mu\text{mol/L}$ 之间,年平均值为 2.65 $\mu\text{mol/L}$.从 3 种形态无机氮的百分组成情况看, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 占 3 种形态无机氮含量的 61.45%,是沉积物间隙水中无机氮的主要存在形式, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 各占 21.61%和 16.94%.沉积物间隙水中营养盐的水平取决于沉积物中有机物的数量及其分解速率、界面的水动力因素、陆源的影响程度以及沉积物中掘穴动物的数量等多种因素^[13].沉积物间隙水中溶解无机氮、3 种形态无机氮的季节变化趋势如图 3 所示,溶解无机氮(DIN)和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的变化趋势一致,表现为从 5 月份到 8 月份含量逐渐增加,到 10 月份达到最大,然后到 2 月份又减少. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 含量从 5 月份到 2 月份表现为一个逐步积累过程,并在 2 月份达到最大,含量超过 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,占溶解

无机氮的 30.84%.网箱养殖中后期产生大量的残饵和养殖生物的粪便以颗粒物的形式沉降堆积在沉积物表层,经微生物分解,有机氮降解、矿化而产生 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$,在有氧气参与情况下, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 通过硝化作用经 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 进一步氧化成 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,导致沉积物间隙水中保持有较高的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的浓度.养殖前期残饵、粪便等含氮有机物较少,硝化细菌有能力降解所产生的亚硝酸盐,随着养殖过程中投饵量的增加,亚硝酸盐的量也不断加大,而分解亚硝酸盐的硝化细菌产生速度较慢,从而使亚硝酸盐的降解进度减缓,表现在 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的不断积累过程,并在养殖后期达到最高,也表明沉积物环境由氧化态逐渐向

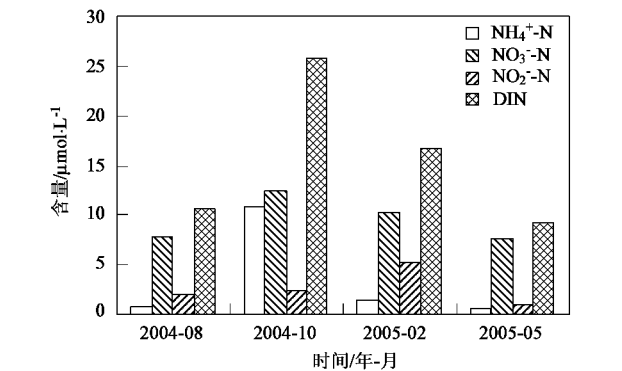


图 3 沉积物间隙水中溶解无机氮的季节变化

Fig.3 Seasonal change of inorganic nitrogen in interstitial water

表 2 表层沉积物间隙水中无机氮的含量变化/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Content distribution of inorganic nitrogen in interstitial water of surface sediments/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$					
取样时间	项目	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	DIN
2004-08	范围	0.68 ~ 1.15	3.09 ~ 16.04	1.33 ~ 2.76	6.21 ~ 18.25
	平均值	0.80	7.91	1.98	10.69
	占 DIN 的比例/%	7.48	73.99	18.52	100
2004-10	范围	7.18 ~ 15.40	8.92 ~ 19.54	1.19 ~ 5.72	18.86 ~ 36.77
	平均值	10.78	12.56	2.42	25.76
	占 DIN 的比例/%	41.85	48.76	9.39%	100
2005-02	范围	1.04 ~ 1.84	5.10 ~ 25.27	4.19 ~ 6.30	11.15 ~ 32.33
	平均值	1.36	10.21	5.16	16.73
	占 DIN 的比例/%	8.13	61.03	30.84	100
2005-05	范围	0.37 ~ 0.79	5.40 ~ 13.84	0.53 ~ 1.85	6.61 ~ 16.33
	平均值	0.57	7.73	1.03	9.33
	占 DIN 的比例/%	6.11	82.85	11.04	100
平均值	含量	3.38	9.60	2.65	15.63
	占 DIN 的比例/%	21.61	61.45	16.94	100

还原态转变的趋势. 另外, 沉积物间隙水中 NO_3^--N 是 3 种形态氮的主要形式也表明了唐岛湾网箱养殖区的表层沉积物尚处于有氧状态.

2.3 网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量

海洋沉积物-水界面营养盐的扩散转移通量主要取决于界面上下浓度梯度引起的浓差扩散过程, 如果界面附近的水相中某化学物质的浓度随沉积物深度的变化近似于直线, 其净通量可以用 Fick 第一定理进行计算^[14]:

$$F = \phi \times D_s \delta_c / \delta_x \tag{1}$$

式中, F 为沉积物-水界面营养盐扩散通量 [$\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$], ϕ 为沉积物上表层(1 cm)的平均孔隙度, D_s 为沉积物块体扩散系数, δ_c/δ_x 为界面浓度梯度.

当 $\phi < 0.7$ 时, $D_s = \phi \cdot D_0$, 当 $\phi \geq 0.7$ 时, $D_s = \phi^2 \cdot D_0$.

D_0 为理想溶液的扩散系数, Li 等^[15]认为, 在 0 ~ 100℃ 的温度范围内自由粒子的扩散系数与水的粘度有关, 可用 Stokes-Einstein 关系式表示:

$$(D_0 \eta_0 / T)_{T_1} = (D_0 \eta_0 / T)_{T_2} \tag{2}$$

式中, η_0 是水的粘度, T 为绝对温度. 对于扩散比氟离子快的离子关系式可简化为:

$$(D_0 \eta_0)_{T_1} = (D_0 \eta_0)_{T_2} \tag{3}$$

这样就可以得到不同季节温度下的 D_0 值.

唐岛湾沉积物类型为粘土质粉砂^[9], 因此, 孔隙度 ϕ 值取 0.65. δ_c/δ_x 用表层沉积物间隙水浓度与上覆水浓度的差值计算. 由此得出唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量(表 3).

由表 3 可以看出, 唐岛湾网箱养殖区溶解无机氮扩散通量总体表现为从沉积物向上覆水扩散, 扩散通量范围为 $-9.58 \sim 102.91 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 平均为 $9.13 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. NH_4^+-N 、 NO_3^--N 和 NO_2^--N 在沉积物-水界面上的扩散通量分别为 5.46、 -5.04 、 $8.71 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. NO_3^--N 除 2004-10 为沉积物向水体方向释放外, 2004-08、2005-02 和 2005-05 由于上覆水体中 NO_3^--N 含量高于沉积物间隙水中的含量, NO_3^--N 的扩散通量出现负值, 反映了沉积物间隙水吸收上覆水 NO_3^--N 的趋势. 孙云明等认为, 间隙水中 NO_3^--N 从上覆水向沉积物扩散表明养殖海域表层沉积物界面有机质的丰富^[16], 说明网箱下沉积物随养殖时间的延长, 有机污染物的含量也增加. NH_4^+-N 的变化趋势与 NO_3^--N 相反, 主要表现为从沉积物向上覆水扩散的趋势, 并且在 2004-10 达到最大 $38.27 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. 由于 NO_2^--N 的不稳定的特殊价态, 它在海洋环境中总是主要作为硝化、反硝化过程以及植物体内硝酸盐在硝化酶的作用下转化为氨及氨基酸过程的中间产物而存在, 其扩散通量经常被人们忽略^[17]. 但从本研究的观测结果来看, NO_2^--N 的含量在上覆水、间隙水中的含量从 5 月份到 2 月份一直呈递增趋势, 并且这一趋势随着养殖进程不断加强, 而且间隙水中的含量也一直高于上覆水中, 导致其扩散通量表现为从沉积物向上覆水扩散, 并且在 2 月份达到最大值 $14.21 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 成为无机氮扩散的主要形式. 作为氨转化为硝酸盐过程中的中间产物, 亚硝酸盐能够竞争性同血液中的血红蛋白结合形成高铁血红蛋白, 从而使血红蛋白失去携 O_2 能力, 造成养殖生物组织缺氧、神经麻

表 3 沉积物-水界面溶解无机氮扩散通量¹⁾/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

Table 3 Diffusion fluxes of inorganic nitrogen across sediment-seawater interface/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{d})^{-1}$

日期	项目	$\text{NH}_4^+ \text{-N}$	$\text{NO}_3^- \text{-N}$	$\text{NO}_2^- \text{-N}$	DIN
2004-08	范围	- 13.21 ~ 0	- 43.36 ~ 49.53	5.42 ~ 14.6	- 38.39 ~ 53.67
	平均值	- 4.55	2.54	9.36	7.35
2004-10	范围	18.60 ~ 74.82	- 140.52 ~ 13.14	1.88 ~ 25.86	- 95.33 ~ 93.09
	平均值	38.27	- 45.45	8.17	0.99
2005-02	范围	0.30 ~ 4.90	- 26.47 ~ 81.99	6.37 ~ 19.53	- 9.58 ~ 102.91
	平均值	2.49	11.41	14.21	28.11
2005-05	范围	- 23.34 ~ - 10.85	1.40 ~ 33.96	0.19 ~ 7.42	- 13.94 ~ 29.11
	平均值	- 14.36	11.34	3.10	0.08
年平均值		5.46	- 5.04	8.71	9.13

1)正值代表营养盐通量是从沉积物向上覆水扩散;负值代表营养盐通量是从上覆水向沉积物扩散

痹、甚至窒息而亡^[18,19].因此,对于网箱养殖过程中出现的 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的累积现象,需要引起足够的重视.

3 结论

(1)唐岛湾网箱养殖区上覆水和表层沉积物间隙水中溶解无机氮主要以 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 为主,分别占溶解无机氮总量的的 73.34% 和 61.45%, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 次之, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的含量最低.

(2)上覆水中溶解无机氮(DIN)和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量的季节变化趋势一致,在 10 月份达到峰值, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的季节变化稍有不同;间隙水中溶解无机氮(DIN)和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 的变化趋势一致,表现为从 5 月份到 8 月份含量逐渐增加,到 10 月份达到最大,然后到 2 月份又减少;上覆水和间隙水中 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的含量从 5 月份到 2 月份一直增大,表现为一个逐步积累的过程.影响上覆水和间隙水中无机氮含量季节变化的主要因素包括养殖鱼类的放养规律、代谢活动、饵料投喂量、浮游植物的消长情况以及氮素不同化学形态的转化和损失等.

(3)唐岛湾网箱养殖区溶解无机氮扩散通量总体表现为从沉积物向上覆水扩散,扩散通量范围为 - 9.58 ~ 102.91 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, 平均为 9.13 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$. $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 在唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面上的扩散通量分别为 5.46、- 5.04、8.71 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 是沉积物向上覆水体扩散的主要组分,它在网箱养殖区的不断累积效应及可能对养殖生物产生的影响需引起重视.

参考文献:

[1] Hargeaves J A. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds [J]. *Aquaculture*, 1998, **166**(8): 181 ~ 212.
[2] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems [J]. *FEMS Microbiology Renewes*, 1999, **23**(4): 563 ~ 590.

[3] 舒廷飞,温琰茂,陆雍森,等. 网箱养殖 N、P 物质平衡研究-以广东省啞铃湾网箱养殖研究为例[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1046 ~ 1052.
[4] 王文强,韦献革,温琰茂. 啞铃湾网箱养殖海域沉积物中氮的地球化学形态分配特征[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(5): 15 ~ 22.
[5] Bonanni P, Caprioli R, Ghiara E, *et al.* Sediment and interstitial water chemistry of Orbetello lagoon (Grosseto, Italy) : nutrient diffusion across the water-sediment interface [J]. *Hydrobiology*, 1992, **235**: 553 ~ 568.
[6] Lorenzen K, Struve J, Cowan V J. Impact of farming intensity and water management on nitrogen dynamics in intensive pond culture-a mathematical model applied to Thailand commercial shrimp farms [J]. *Aquaculture Research*, 1997, **28**(10): 493 ~ 507.
[7] 顾德宇,汤容坤. 大亚湾沉积物间隙水的无机磷硅氮营养盐化学[J]. *海洋学报*, 1995, **17**(5): 73 ~ 80.
[8] 张斌亮,刘云翔,刘敏. 潮滩沉积物-水界面营养盐 N、P 分布及交换特征[J]. *上海环境科学*, 2003, **22**(10): 677 ~ 726.
[9] 中国海湾志编辑委员会. 中国海湾志[M]. (第四分册). 北京: 海洋出版社, 1993. 261.
[10] 舒廷飞,温琰茂,贾后磊,等. 啞铃湾网箱养殖水体中 N、P 的形态特征及其季节变化调控机制[J]. *海洋环境科学*, 2004, **23**(3): 12 ~ 15.
[11] 林燕堂,李纯厚,杨美兰. 网箱区人工投饵与赤潮关系的探讨[J]. *南方水产*, 1998, **6**: 35 ~ 41.
[12] 沈国英,施并章. 海洋生态学[M]. (第二版). 厦门: 厦门大学出版社, 1990. 228 ~ 238.
[13] 丘耀文,王雄鼎,高红莲,等. 大亚湾养殖水域沉积物-海水界面营养盐扩散通量[J]. *热带海洋*, 1999, **18**(3): 83 ~ 89.
[14] 宋金明,李鹏程. 南沙群岛海域沉积物-海水界面间营养物质的扩散通量[J]. *海洋科学*, 1996, (5): 43 ~ 50.
[15] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in seawater and in deep-sea sediment [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1974, **38**: 703 ~ 714.
[16] 孙云明,宋金明. 中国浅海沉积物在生源要素循环中的功能[J]. *海洋环境科学*, 2002, **21** (1): 26 ~ 33.
[17] 蔡立胜,方建光,董双林. 桑沟湾养殖海区沉积物-海水界面氮、磷营养盐的通量[J]. *海洋水产研究*, 2004, **25**(4): 57 ~ 64.
[18] 余瑞兰,聂湘平. 分子氮和亚硝酸盐对鱼类的危害及对策[J]. *中国水产科学*, 1999, **6** (3): 73 ~ 77.
[19] 王明学,吴卫东. $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 对鱼类毒性的研究概况[J]. *中国水产科学*, 1997, **4** (5): 85 ~ 90.