

宁波南沙港养殖水域沉积物-水界面 氮磷营养盐的扩散通量

蒋增杰¹, 方建光¹, 毛玉泽¹, 王巍¹, 施慧雄², 焦海峰²

(1.农业部渔业资源可持续利用重点开放实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东 青岛 266071; 2.宁波市海洋与渔业研究院, 浙江 宁波 315012)

摘要:在 2007 年 1 月—2007 年 11 月分 4 个航次对宁波南沙港养殖水域上覆水和表层沉积物间隙水中的溶解无机氮(DIN)和活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)浓度进行了现场调查,并应用 Fick 第一定理对该养殖水域沉积物-水界面 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量进行了估算。结果表明,南沙港养殖水域上覆水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的浓度变化范围分别为 1.07~11.73、0.01~121.43、0.06~3.79 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 0.42~4.16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 间隙水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度年变化范围分别为 24.00~219.51、4.02~1 250.41、0.45~8.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 3.41~41.87 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的扩散通量平均值分别为 1 520.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 22.33 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 扩散方向总体表现为从沉积物向上覆水扩散,每年向养殖系统中输入的 DIN 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 量分别约为 9.87 t 和 0.32 t,表明沉积物是南沙港养殖水域水体氮磷营养盐,尤其是 DIN 的重要的输入源。

关键词:上覆水;间隙水;氮磷;扩散通量;南沙港

中图分类号:X55 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)12-2413-07

Diffusion Fluxes of Dissolved Inorganic Nitrogen and Phosphorus Across Sediment-water Interface in Nansha Aquaculture Area, China

JIANG Zeng-jie¹, FANG Jian-guang¹, MAO Yu-ze¹, WANG Wei¹, SHI Hui-xiong², JIAO Hai-feng²

(1.Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Ningbo Academy of Ocean and Fishery, Ningbo 315021, China)

Abstract: Based on 4 cruises of field investigation from January 2007 to November 2007, concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in overlying and interstitial waters of sediments in Nansha aquaculture area were analyzed. Moreover, diffusion fluxes of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus across sediment-water interface were estimated according to Fick's first law. Results showed that, the concentration variation range of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in overlying water were 1.07~11.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.01~121.43 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.06~3.79 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.42~4.16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively; the concentration variation range of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in interstitial water were 24.00~219.51 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 4.02~1 250.41 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 0.45~8.70 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and 3.41~41.87 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, respectively. The average diffusion rate of dissolved inorganic nitrogen(DIN) and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ across sediment-water interface were 1 520.73 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ and 22.33 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. The annual fluxes of DIN and $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ from sediment to water were about 9.87 t and 0.32 t, which indicate the sediment is a major output source of nutrient to the water, especially for nitrogen.

Keywords: overlying water; interstitial water; nitrogen and phosphorus; diffusion fluxes; Nansha aquaculture area

氮磷营养盐是近海网箱养殖系统中重要的生源要素。作为营养物质积累和间歇性再生的重要场所,

沉积物间隙水中氮磷营养盐浓度及其与上覆水间的相互关系是学者们一直关心的热点问题^[1-6]。研究表明,沉积物-水界面的营养盐交换对水体中营养盐的收支和营养盐的循环动力学以及水体富营养化具有极其重要的作用^[7-10]。本研究根据 2007 年对宁波南沙港网箱养殖水域 4 个航次的调查资料,利用 Fick 第一定理估算了该海区沉积物-水界面溶解无机氮和磷

收稿日期:2010-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41006074);海洋公益性行业科研专项经费项目(200805069);中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费专项资金项目

作者简介:蒋增杰(1978—),男,山东青岛人,博士,助理研究员,主要从事海洋生态学方面的研究。E-mail:jiangzj@ysfri.ac.cn

酸盐的扩散通量,以期了解南沙港网箱养殖水域沉积物-水界面氮磷营养盐的物质交换过程,为计算网箱养殖系统氮磷营养盐的物质平衡、建立鱼贝藻综合养殖配比模式提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 南沙港概况

南沙港位于浙江省宁波市裘村镇,平均水深约 13 m,网箱养殖是南沙港最重要的水产养殖方式,养殖面积约 618 800 m²,养殖器材多为木架浮动式网箱,规格主要为 3 m×3 m×6 m,共有网箱约 4 000 个,年产量约 1 000 t,每个网箱放养 1 000 尾左右,养殖品种主要为鲈鱼 *Lateolabrax japonicus*、大黄鱼 *Pseudosciaena crocea*、美国红鱼 *Sciaenops ocellatus*、鲷类 *Pagrosomus Major*,养殖周期一般为 2~3 a。作为奉化鱼贝藻养殖示范基地,该港还养殖贝类(褶牡蛎 *Ostrea plicatula*)约 51 390 m²,藻类(海带 *Laminaria japonica*, 龙须菜 *Gracilaria lemaneiformis*)约 747 073.4 m²。

1.2 样品采集

2007 年 1、4、7 和 11 月按季度分 4 次在南沙港水域共设 14 个采样点进行环境调查(图 1),其中沉积物取样站位有 9 个(1、2、5、6、7、10、12、13、14),1 号站为贝类养殖区,2 号站位于藻类养殖区,5 号站作为对照区,6、7、10、12、13 和 14 号站位于网箱或其周围区。用 Micro corer 柱状采泥器采集直径 65 mm,高度为 10~15 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取样瓶。泥样样品运回实验室后恒温离心(5 000 r·min⁻¹, 30 min),取上清液经 0.45 μm 孔径的醋酸纤维滤膜过滤后得到间隙水样品,用去离子水适当稀释后分别进行 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N、PO₄³⁻-P 浓度分析。

1.3 研究方法

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,PO₄³⁻-P 的测定采用磷钼蓝法,标准曲线采用的标准物质为国家海洋局第二海洋研究所生产的国家一级标准物质。

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:

$$F = \varphi \times D_s (\delta_c / \delta_x) \quad (1)$$

式中: F 为沉积物-水界面营养盐扩散通量, $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$; φ 为沉积物的孔隙度; D_s 为沉积物块体扩散系数; δ_c / δ_x 为界面浓度梯度,用表层沉积物间隙水浓度与上覆水浓度的差值计算。

当 $\varphi < 0.7$ 时, $D_s = \varphi \cdot D_0$; 当 $\varphi \geq 0.7$ 时, $D_s = \varphi^2 \cdot D_0$ 。

D_0 为理想溶液的扩散系数, Li^[1] 认为, 在 0~100 °C 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:

$$(D_0 \eta_0 / T)_{T1} = (D_0 \eta_0 / T)_{T2} \quad (2)$$

式中: η_0 是水的粘度; T 为绝对温度, 下标 $T1$ 和 $T2$ 用

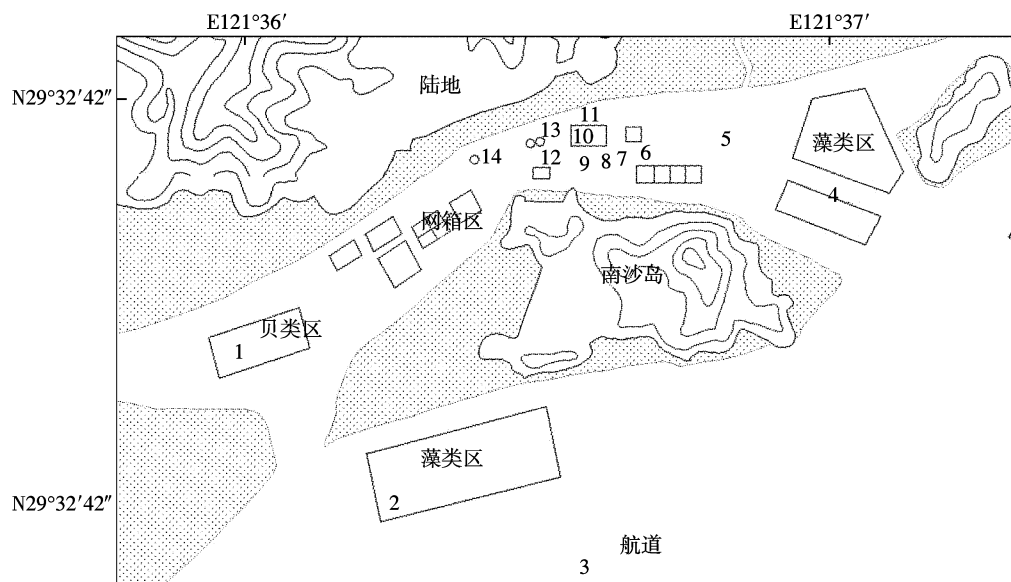


图 1 南沙港调查站位图

Figure 1 Investigation station in Nansha bay

于甄别相同参数在不同温度条件下的取值。对于扩散比氟离子快的离子关系式可简化为:

$$(D_0\eta_0)_n=(D_0\eta_0)_{n2} \quad (3)$$

这样就可以得到不同季节温度下的 D_0 值。

孔隙度根据沉积物的干湿比估算,其计算公式为:

$$\varphi=(r-s)/r \quad (4)$$

式中: r 为沉积物湿重; s 为经过 110 °C 干燥后的沉积物重量。

2 结果与分析

2.1 上覆水中氮磷营养盐的浓度

4 个航次调查上覆水中氮磷营养盐的浓度变化情况见图 2。从图中可以看出,对照区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $1.07\sim 3.43\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $45.71\sim 121.43\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.43\sim 2.86\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $1.42\sim 3.23\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 网箱及周围区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $2.26\sim 6.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $34.43\sim 76.79\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.63\sim 3.50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $3.39\sim 4.16\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 贝类养殖区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $2.21\sim 11.43\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $0.01\sim 86.43\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.20\sim 3.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $1.16\sim 2.94\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 藻类养殖区 NH_4^+-N 浓度年变化

范围为 $1.57\sim 7.64\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $4.36\sim 74.29\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.06\sim 2.57\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $0.42\sim 2.45\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。从 3 种形态无机氮的百分组成情况看,4 个航次调查各类型养殖区上覆水中溶解无机氮的主要形态均以 NO_3^--N 为主,其次是 NH_4^+-N , NO_2^--N 最少。

从季节变化趋势来看,对于 NH_4^+-N 来说,对照区上覆水中 NH_4^+-N 浓度的变化表现为夏季最高,秋季次之,春季最低的特征;而网箱养殖区上覆水中 NH_4^+-N 浓度的变化表现为春、夏季浓度最高,秋季最低的特征,年平均浓度约为对照区的 2.23 倍;贝类和藻类养殖区上覆水中 NH_4^+-N 浓度变化特征相似,都表现为冬季最高,夏季次之,而春季最低的特征,年平均浓度分别约为对照区的 2.41 倍和 1.70 倍。对于 NO_3^--N 来说,对照区上覆水中 NO_3^--N 浓度大小顺序表现为春季>秋季>冬季>夏季;网箱养殖区上覆水中 NO_3^--N 浓度秋季浓度最高,但不同季节浓度差异不显著 ($P<0.05$);贝类和藻类养殖区上覆水中 NO_3^--N 浓度变化特征相似,都表现为秋季最高,冬季次之,春季最低的变化趋势。但从浓度水平来看,对照区和养殖区上覆水中 NO_3^--N 的浓度相当。对于无机磷来说,对照区变化趋势表现为秋季最高,冬、春、夏季差异不显著的特

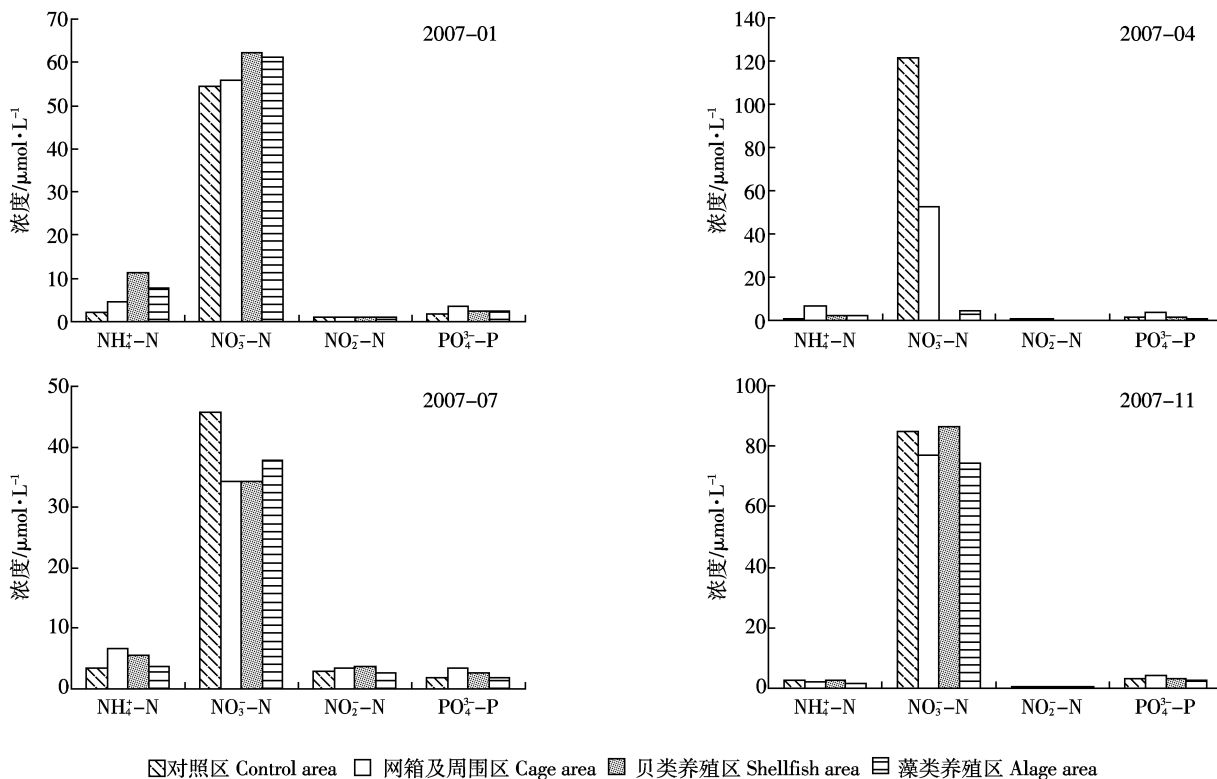


图2 上覆水中氮磷营养盐的浓度

Figure 2 Concentrations of inorganic nitrogen and phosphorus in overlying water

征;网箱养殖区不同季节无机磷的浓度变化不显著($P<0.05$)。由此可见,网箱养殖在一定程度上改变了水体中氮磷营养盐的浓度变化特征。

2.2 表层沉积物间隙水中氮磷营养盐的浓度

4 航次调查表层沉积物间隙水中氮磷营养盐的浓度情况见图3。从图中可以看出,对照区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $24.00\sim 153.06\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $7.45\sim 771.43\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.89\sim 6.29\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $4.98\sim 12.62\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;网箱及周围区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $78.60\sim 216.79\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $10.44\sim 1\ 250.41\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $1.45\sim 8.00\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $25.72\sim 41.87\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;贝类养殖区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $78.57\sim 219.513\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $4.02\sim 333.33\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $1.12\sim 6.03\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $9.44\sim 17.10\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$;藻类养殖区 NH_4^+-N 浓度年变化范围为 $51.28\sim 204.97\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_3^--N 为 $38.32\sim 452.38\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NO_2^--N 为 $0.45\sim 8.70\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 为 $3.41\sim 6.38\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

从季节变化来看,各类型养殖区表层沉积物间隙水中 NH_4^+-N 浓度的变化趋势几乎完全相同,都表现为夏季>春季>秋季>冬季,但不同类型养殖区之间的浓度水平存在差异。贝类区、藻类区以及网箱区的

NH_4^+-N 浓度分别约为对照区的 1.75、1.62 倍和 1.54 倍。对于 NO_3^--N 来说,各类型养殖区浓度虽然都在秋季表现为最低,但出现最高值的时间不同,其中,对照区和网箱区都表现为夏季浓度最高,而贝类区最高值在春季,藻类区最高值出现在冬季,网箱区 NO_3^--N 的浓度水平约为对照区的 1.60 倍,贝类区和藻类区的浓度水平与对照区相当。由此可见,网箱养殖对沉积物中氮浓度的影响主要表现为养殖区氮浓度高于对照区,尤其是 NH_4^+-N 的浓度。对于磷来说,对照点变化趋势表现为冬季最高,夏季最低的特征;而网箱区、贝类区以及藻类区虽然也是冬季浓度最高,但不同季节浓度水平相差不大。

2.3 沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量

经实测,南沙港表层沉积物 ϕ 值为 0.57。根据 Fick 第一定理,得出南沙港不同类型养殖区沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量(表1),其中,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。由表1可以看出,南沙港养殖水域溶解无机氮和磷酸盐的扩散通量范围网箱及周围区分别为 $229.47\sim 8\ 286.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $50.14\sim 62.09\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;贝类养殖区分别为 $71.79\sim 2\ 250.39\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $14.25\sim 20.39\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

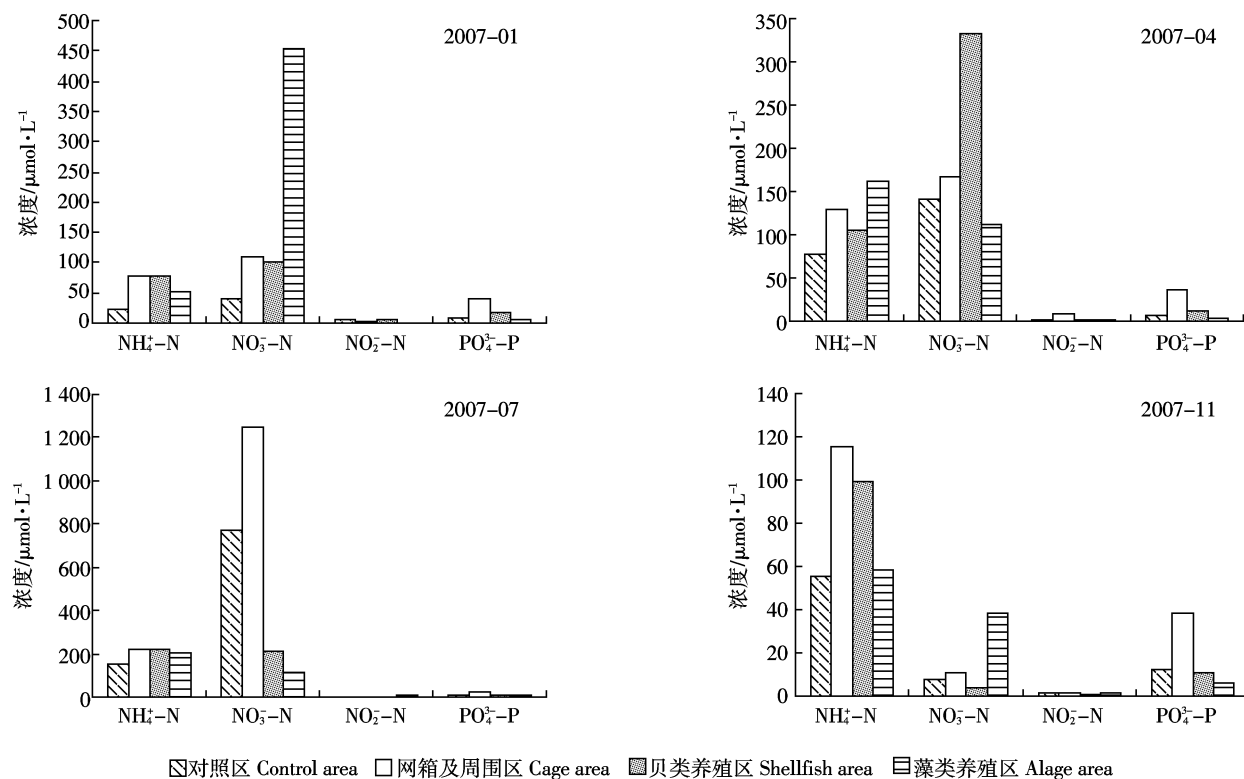


图3 表层沉积物间隙水中氮磷营养盐的含量

Figure 3 Contents of inorganic nitrogen and phosphorus in interstitial water

表 1 南沙港水域沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量
($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)

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

年-月	类型	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$	DIN	$\text{PO}_4\text{-P}$
2007-01	对照区	19.03	-47.98	80.03	51.08	22.79
	网箱及周围区	2.13	195.74	270.15	468.02	53.72
	贝类养殖区	19.33	142.85	245.01	407.19	20.39
	藻类养殖区	-1.82	1 417.02	159.25	1 574.45	3.07
2007-04	对照区	0.88	83.21	308.44	392.52	7.41
	网箱及周围区	31.23	468.33	499.22	998.77	50.61
	贝类养殖区	7.63	1 356.74	417.42	1 781.79	16.40
	藻类养殖区	5.56	435.81	652.71	1 094.07	4.69
2007-07	对照区	-2.12	4 216.98	873.67	5 088.54	6.91
	网箱及周围区	-5.92	7 065.77	1 226.68	8 286.53	50.14
	贝类养殖区	-14.74	1 015.54	1 249.58	2 250.39	15.34
	藻类养殖区	37.14	429.66	1 175.12	1 641.92	5.09
2007-11	对照区	4.63	-367.89	251.87	-111.38	17.20
	网箱及周围区	3.66	-314.74	540.55	229.47	62.09
	贝类养殖区	4.06	-390.94	458.68	71.79	14.25
	藻类养殖区	5.49	-170.63	271.61	106.48	7.18
全港年平均		7.26	970.97	542.50	1 520.73	22.33

d^{-1} ;藻类养殖区分别为 $106.48\sim 1\ 641.92\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $3.07\sim 7.18\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 对照区分别为 $-111.38\sim 5\ 088.54\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $6.91\sim 22.79\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。从全港水平来看,溶解无机氮和磷酸盐的扩散通量范围分别为 $-111.38\sim 8\ 286.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $3.07\sim 62.09\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,年平均分别为 $1\ 520.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $22.33\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

宁波南沙港水域不同类型养殖区沉积物-水界面溶解无机氮和磷酸盐的扩散通量季节变化情况见图 4。从图 4 可以看出,除了 2007 年 11 月对照区氮营养盐的扩散通量为负值外,其余时间都是正值,表明宁波南沙港水域的氮磷营养盐通量是由沉积物向上覆水扩散。不同类型养殖区溶解无机氮扩散通量的季节变化情况相似,都表现为夏季高,秋季最低的特点,但网箱养殖区夏季的扩散通量量值最大,达到 $8\ 286.53\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,约是对照区的 1.63 倍。不同类型养殖区磷酸盐扩散通量的季节变化情况相似,表现为春季最高,秋季最低的特点,且量值相当。

3 讨论

利用 Fick 第一定理进行沉积物-水界面物质扩散通量的估算是研究者广泛采用的研究方法之一^[12],

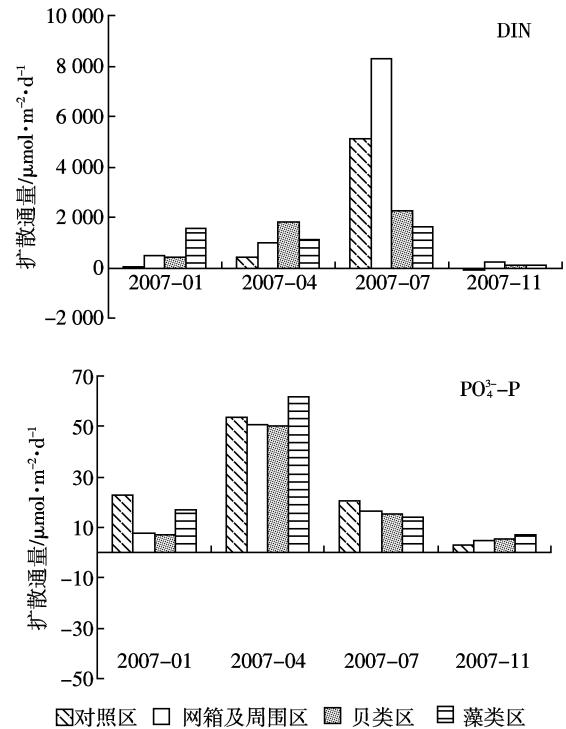


图 4 不同类型养殖区沉积物-水界面
氮磷营养盐扩散通量的季节变化

Figure 4 Seasonal variation of diffusion fluxes of inorganic nitrogen and phosphorus across sediment-seawater interface in different aquaculture area

这种方法的前提是需要获得两个水样样品:一个是上覆水样品,这个样品的获得比较简单,通过虹吸柱状采泥器中的水样然后经滤膜过滤即可获得;另外一个就是表层沉积物中间隙水的制备,这个过程比较繁琐,因为海洋监测规范第 4 部分海水分析(GB 17378.4—2007)对 3 氮 1 磷这 4 个指标营养盐的测定方法要求样品体积数要达到 100 mL 以上,而沉积物中间隙水的量一般比较少,如果获得的间隙水体积过少,也就意味着稀释倍数要加大,这样计算误差就会增大。本研究为了获得尽量多的间隙水样品,对各个站位的沉积物样品采用 100 mL 的大容积离心管进行高速($5\ 000\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)30 min 的离心时间,保证各个站位离心出的间隙水体积达到 10 mL 以上,以控制稀释倍数在 10 倍以内,这样可以有效地减小误差,保证估算结果的准确性。

南沙港养殖水域沉积物-水界面溶解无机氮和磷酸盐的扩散通量范围分别为 $1\ 520.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $22.33\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,总体表现为从沉积物向上覆水扩散,每年向养殖系统输入的氮磷量分别约为 9.87 t 和 0.32 t,所释放氮磷负荷的比值约为 30.76:1,

表 2 不同海域沉积物-水界面氮磷营养盐通量的比较

Table 2 Comparison of nutrients fluxes across sediment-seawater interface in different sea areas

海域	营养盐通量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$		研究方法	参考文献
	DIN	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$		
南沙港	-111.38 ~ 8 286.53	3.07~62.09	Fick 第一定理	本文
大亚湾	692.9($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	36.5	Fick 第一定理	[10]
桑沟湾	415.76	10.08	Fick 第一定理	[8]
胶州湾	-500 ~ 1 600($\text{NH}_4^+\text{-N}$), 200 ~ 2 800($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	0.1~90	现场培养	[13~14]
大鹏澳		270~2 470	现场培养	[15]
唐岛湾	- 9.58~102.91	—	Fick 第一定理	[12]
莱州湾	38 ~ 3 650($\text{NO}_3^-\text{-N}$), 960 ~ 2 520($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	—	现场培养	[16]
美国 Mobile 湾	410 ~ 2 650	36~120	现场培养	[17]
日本海 Vostok 湾	100 ~ 1 200($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	40~500	现场培养	[18]

表明沉积物是南沙港养殖水域水体氮磷营养盐,尤其是溶解无机氮的重要输入源。与其他海域相比,南沙港养殖水域沉积物-水界面上溶解无机氮的交换通量处于较高水平(表 2)。另外,从调查结果来看,不同养殖区之间沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量的差异并不显著($P>0.05$),说明长期的网箱养殖活动向水体中输入了大量的营养物质,不仅使网箱及周围区沉积物环境中氮磷含量升高,残饵、粪便等的漂移甚至影响到对照区域的沉积环境,网箱养殖大大提高了营养盐由沉积物向海水界面的扩散通量,使养殖海域成为一个潜在的污染内源。

关于网箱养殖对水体富营养化的影响已有很多报道^[19-22],为了减少网箱养殖的这种负面效应,南沙港还搭配开展了贝、藻类养殖,这种鱼贝藻混养的综合养殖模式从理论上讲可以在系统内实现营养物质的有效再利用^[23]。但不同养殖区之间沉积物-水界面氮磷营养盐的扩散通量的差异并不显著的这种情况表明:对于水域面积相对较小、两端开放的女沙港来说,整个港区水体的混合程度非常高;而且,虽然目前南沙港在养殖上进行了理论上的分区,但养殖系统之间的营养盐循环并没有达到预想的效果。作者认为,造成这种现象的根本原因主要在于种类的混养比例上,也就是说,目前的藻类养殖规模对水体起到的修复作用难以与网箱养殖带来的富营养化污染构成平衡,加之港湾面积较小,在频繁水动力交换的作用下造成了整个养殖水域富营养化的现象。因此,根据网箱养殖系统氮磷的物质平衡方程,确定源汇项,进而根据营养盐负荷与藻类对营养盐的吸收来确定鱼贝藻的最适混养比例是下一步需要深入探讨的问题。

4 结论

南沙港养殖水域沉积物-水界面溶解无机氮和磷酸盐总体表现为由沉积物向水体扩散,每年向养殖系统中输入的氮磷量分别约为 9.87 t 和 0.32 t,沉积物是南沙港养殖水域水体氮磷营养盐,尤其是溶解无机氮的重要输入源。与其他海域相比,南沙港养殖水域沉积物-水界面上的交换通量处于较高水平,网箱养殖大大提高了营养盐由沉积物向海水界面的扩散通量,使养殖海域成为一个潜在的污染内源。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(4):370-376.

SONG Jin-ming, LI Xue-gang, SHAO Jun-bo, et al. Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the south yellow sea sediments[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(4):370-376.

[4] 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.

ZHANG Bin-liang, LIU Yun-xiang, LIU Min. Distribution and exchanging characteristics of porewater nutrients in tidal sediments-water interface[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2003, 22(10):677-726.

[5] 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.

QIU Yao-wen, WANG Xiong-ding, GAO Hong-lian. Diffusive fluxes of

- nutrients across sediment-seawater interface in cultural sea area of Daya bay[J]. *Tropic Oceanology*, 1999, 18(3):83-89.
- [6] 潘建明, 周怀阳, 扈传昱, 等. 夏季珠江口沉积物中营养盐剖面分布和界面交换通量[J]. 海洋通报, 2002, 24(3):52-59.
- PAN Jian-ming, ZHOU Huai-yang, HU Chuan-yu, et al. Nutrient profiles in interstitial water and flux in water-sediment in terface of Zhu-jiang estuary of China in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(3):52-59.
- [7] 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.
- SONG Jin-ming, LI Peng-cheng. Studies on characteristics of nutrient diffusion fluxes across sediment-water interface in the district of Nan-sha islands, South China Sea[J]. *Marine Sciences*, 1996(5):43-50.
- [8] 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.
- CAI Li-sheng, FANG Jian-guang, DONG Shuang-lin. Preliminary studies on nitrogen and phosphorus fluxes between seawater and sediment in Sungo Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(4):57-64.
- [9] 孙云明, 宋金明. 中国近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.
- SUN Yun-ming, SONG Jin-ming. Functions of China marginal sea sediments in the cycles of biogenic elements[J]. *Marine Environmental Science*, 2002, 21(1):26-33.
- [10] 黄小平, 郭芳, 黄道建. 大亚湾典型养殖区沉积物-海水界面营养盐扩散通量及其环境意义[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(S2):6-12.
- HUANG Xiao-ping, GUO Fang, HUANG Dao-jian. Nutrients diffusion fluxes in sediment-water interface in marine culture area of Daya Bay and its environmental significance[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(S2):6-12.
- [11] Li Y H, Gregory S. Diffusion of ions in seawater and in deep-sea sediment[J]. *Geochemical et Cosmochimica Acta*, 1974, 38:703-714.
- [12] 蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃. 唐岛湾网箱养殖区沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 2007, 28(5):1001-1005.
- JIANG Zeng-jie, CUI Yi, CHEN Bi-juan. Diffusive fluxes of dissolved inorganic nitrogen across sediment-water interface in net-cage culture area of Tangdao Bay [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(5):1001-1005.
- [13] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 溶解无机氮在胶州湾沉积物-海水界面上的交换速率和通量研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(4):13-18, 24.
- JIANG Feng-hua, WANG Xiu-lin, SHI Xiao-yong, et al. Benthic exchange rates and fluxes of dissolved inorganic nitrogen at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(4):13-18, 24.
- [14] 蒋凤华, 王修林, 石晓勇, 等. 胶州湾海底沉积物-海水界面磷酸盐交换速率和通量研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(5):50-54.
- JIANG Feng-hua, WANG Xiu-lin, SHI Xiao-yong, et al. Benthic exchange rates and fluxes of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ at the sediment-water interface in Jiaozhou bay[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(5):50-54.
- [15] 李占东, 林钦, 黄洪辉. 大鹏澳网箱养殖海域磷酸盐在沉积物-海水界面交换速率的研究[J]. 南方水产, 2006, 2(6):25-30.
- LI Zhan-dong, LIN Qin, HUANG Hong-hui. The study of phosphate exchange rates at the sediment-water interface in fish cage area of Dapengao[J]. *South China Fisheries Science*, 2006, 2(6):25-30.
- [16] 刘素美, 张经, 于志刚, 等. 渤海莱州湾沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 1999(2):12-16.
- LIU Su-mei, ZHANG Jing, YU Zhi-gang, et al. Benthic fluxes of dissolved inorganic nitrogen in the Laizhou Bay, Bohai Sea.[J]. *Environmental Science*, 1999(2):12-16.
- [17] Propp M V, Tarasoff V G, Cherbadgi I I, et al. Benthic-pelagic oxygen and nutrient exchange in coastal region of the Sea of Japan [C]. Columbia: University of South Carolina Press, 1980:265-284.
- [18] Cowan J L W, Pennock J R, Boynton W R. Seasonal and interannual patterns of sediment-water nutrient and oxygen fluxes in Mobile Bay, Alabama (USA): Regulation factors and ecological significance[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1996, 141:229-245.
- [19] 王肇鼎, 彭云辉, 孙丽华, 等. 大鹏澳网箱养鱼水体自身污染及富营养化研究[J]. 海洋科学, 2003, 27(2):77-81.
- WANG Zhao-ding, PENG Yun-hui, SUN Li-hua, et al. Self-pollution and eutrophication in area of fish cage-farming in Dapengao cove[J]. *Marine Sciences*, 2003, 27(2):77-81.
- [20] 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 Xian-ge, WEN Yan-mao, WANG Wen-qiang, et al. Environmental impact of cage culture on bottom water in Yaling Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):274-278.
- [21] 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 Ting-fei, WEN Yan-mao, JIA Hou-lei, et al. Influence of cage culture in Yaling bay on water environment[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(5):97-101.
- [22] 蒋增杰, 崔毅, 陈碧鹃. 唐岛湾网箱养殖对水环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):1190-1194.
- JIANG Zeng-jie, CUI Yi, CHEN Bi-juan. Effect of net-cage culture on water environment in Tangdao Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3):1190-1194.
- [23] 毛玉泽, 杨红生, 王如才. 大型藻类在综合海水养殖系统中的生物修复作用[J]. 中国水产科学, 2005, 12(2):225-231.
- MAO Yu-ze, YANG Hong-sheng, WANG Ru-cai. Bioremediation capability of large-sized seaweed in integrated mariculture ecosystem: A review[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(2):225-231.