

珠江广州河段沉积物无机氮的分布特征 和界面交换通量

吴文成¹, 吴群河², 梁明易¹, 张恒军¹

(1. 国家环保总局华南环境科学研究所, 广东 广州 510655; 2. 中山大学环境科学研究所, 广东 广州 510275)

摘要: 基于现场调查与实验测试方法, 研究了珠江广州河段 0~50 cm 沉积物中无机氮 (包括氨氮、硝态氮及亚硝态氮) 的垂向分布特征, 并由相应的间隙水与上覆水中无机氮的含量, 估算该河段的交换通量。结果表明, 氨氮是该河段沉积物无机氮的主要形态, 变化范围在 $0.053\ 5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 至 $1.455\ 4\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 各层平均含量随深度的增加总体上呈上升趋势; 硝态氮与亚硝态氮含量很低, 分布上无明显规律; 在该河段的沉积物-水界面中, 氨氮呈自沉积物向上覆水扩散的趋势, 各点平均交换通量为 $2.54\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 硝态氮与亚硝态氮的扩散方向与氨氮相反, 平均交换通量分别为 -0.06 、 $-0.03\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。珠江广州河段沉积物-水界面无机氮的通量与其他区域相比处于中等偏上水平。

关键词: 珠江广州河段; 无机氮; 分布特征; 交换通量

中图分类号: X522 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)03-1128-06

Distribution Characteristics of Inorganic Nitrogen in Core Sediments and Diffusion Fluxes in Interface from Guangzhou Reach of the Pearl River

WU Wen-cheng¹, WU Qun-he², LIANG Ming-yi¹, ZHANG Heng-jun¹

(1. South China Institute of Environmental Sciences, SEPA, Guangzhou 510655, China; 2. Institute of Environmental Sciences, SunYatsen Universtiy, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The vertical distribution characteristics of inorganic nitrogen (including ammonia, nitrate and nitrite) in the sediments ranged from 0 to 50 cm depth in Guangzhou Reach of the Pearl River were investigated. And the diffusion fluxes of inorganic nitrogen across sediment-water interface were estimated according to the nitrogenous concentration gradients at the interface. The results showed that, ammonia was the main form of inorganic nitrogen in the sediments and increased with depth, ranging from $0.053\ 5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ to $1.455\ 4\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$. The concentration of nitrate and nitrite were quite low, which suggested random rules. The average diffusion flux that the amount of ammonia diffused from sediment to pore-water across the sediment-water interface was $2.54\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. In addition, the diffusion directions of nitrate and nitrite were contrary to ammonia's, and their average diffusion fluxes were -0.06 and $-0.03\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, respectively. Compared with other zones, the diffusion flux of inorganic nitrogen of Guangzhou Reach of the Pearl River was over medium grade slightly.

Keywords: Guangzhou Reach of the Pearl River; inorganic nitrogen; distribution characteristics; flux

沉积物是河流内源负荷的重要源、库已成为共识。城市河流在长期的外源输入和水生生物残渣的沉积过程中, 大量有机质、含氮物质富集于沉积物中, 这也是导致珠江广州河段水质发黑发臭的主要原因^[1]。当河流污染严重时, 沉积物与河水间存在着一种吸收和释放的动态平衡, 污染物的释放不明显, 但在河流外源污染得到有效控制后, 河水污染物含量减少, 此

时沉积物中污染物的释放量将可能增加, 内源污染成为影响城市河流水体水质的重要因素。沉积物中的氮以有机态为主, 有机氮通过矿化作用转化为无机氮, 不断向上覆水体释放、扩散^[2]。

沉积物-水界面间 N 的扩散通量可直接通过培养测定计算, 或依间隙水与上覆水浓度梯度间接估算 (即 Fick's 第一定律)。目前, 国内对水体营养盐扩散通量的研究大多均采用间隙水与上覆水浓度梯度间接估算, 范成新等^[3]1998 年采用柱状芯样模拟法并结合该方法对骆马湖沉积物氮释放负荷进行模拟, 得到氮释放速率为 $-7.3\sim 77.9\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$; 丘耀文等^[4]1998

收稿日期: 2007-08-03

基金项目: 广东省科技计划项目 (2006B36601006)

作者简介: 吴文成 (1981—), 男, 广东英德人, 硕士, 从事水土保持与水环境的研究。E-mail: wenchwu@scies.com.cn

通讯作者: 吴群河 E-mail: eeswqh@mail.sysu.edu.cn

年用该方法估算大亚湾养殖水域冬季氨氮的释放通量为 $5.44 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;周伟华等^[5]分别于 1997 年冬季和 1999 年夏季用该方法估算了南沙群岛海域氨氮冬季和夏季的释放通量分别为 $2.19 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $1.34 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$;张路等^[6]于 2002—2003 年用该方法估算夏季和冬季东太湖氨氮的释放通量,分别为 $2.11\sim 11.38 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 和 $0.63\sim 3.82 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。可见,Fick's 第一定律对研究水体底泥营养盐的扩散通量方面有广泛的应用。本文也将采用该定律对界面无机氮的扩散通量进行估算。

珠江是流经广州的重要水体,尽管目前水质已好转,但仍未达到水环境功能要求,饮用水源水质达标率只有 71.1%^[7]。前人对珠江氮的研究最早可追溯到上世纪 80 年代^[8],其后也有一些报道^[9,10],但多集中在珠江口,且尚未见有对广州河段沉积物、间隙水及上覆水氮分布的研究报道。本研究通过对该河段沉积物、上覆水及间隙水的采样与分析,对无机氮的分布特征、沉积物-水界面交换通量进行初步探讨,为进一步治理该河段提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

基于珠江广州河段的水文水质特点、河道走向和

弯道、支流和障碍物的位置、沿程污染源分布,在西航道及前航道设置 6 个断面、10 个采样点(图 1)。本试验于 2006 年 10 月 21 日,采用全球定位系统 GPS 导航(经纬度见表 1),利用自制采样器($\Phi=8 \text{ cm}$)于各采样点分别采集 2~3 柱沉积物平行样,现场按 0~5 cm、5~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~50 cm 切割、混合;用虹吸法于采样器中采集上覆水样置于聚乙烯瓶中,现场用硫酸:水=1:1,V/V 酸化至 $\text{pH}\leq 2.0$ 。所有样品均低温保存($4\text{ }^{\circ}\text{C}$),运回实验室后立刻将 1、2 层沉积物离心($5\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$,15 min)得间隙水样,所有样品均在 48 h 内测定 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 。沉积物

表 1 采样点名称及经纬度
Table 1 Number and geographic coordinate of the monitoring sections

样点编号	断面名称	经度	纬度
1-1	雅岗	23° 13' 41.65"	113° 10' 51.61"
2-1	硬颈海	23° 10' 15.75"	113° 12' 39.24"
2-2		23° 10' 17.26"	113° 12' 49.68"
3-1	珠江大桥	23° 07' 36.34"	113° 13' 08.68"
3-2		23° 07' 35.49"	113° 13' 14.82"
4-1	花地涌	23° 06' 25.32"	113° 13' 38.13"
5-1	二沙岛	23° 06' 34.59"	113° 17' 03.54"
5-2		23° 06' 55.83"	113° 17' 52.09"
6-1	琶洲大桥	23° 06' 33.32"	113° 20' 34.52"
6-2		23° 06' 44.32"	113° 20' 35.28"

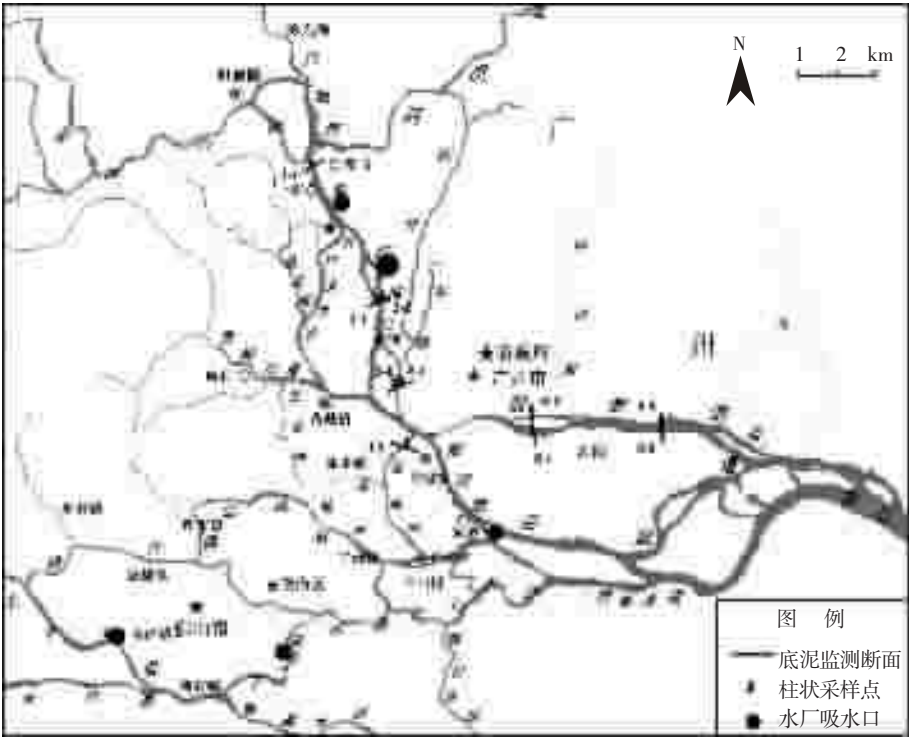


图 1 采样站位

Figure 1 Monitoring sections in Guangzhou Reach of Pearl River

样品理化性质的研究结果见表 2。

1.2 样品分析方法

沉积物样品分析除粒径组成采用欧美克粒度仪外,其他均参照《土壤农化分析》^[11]中的方法:含水率测定采用烘干法、pH 采用 pH 计法、有机质采用重铬酸钾-外加加热法、总氮采用半微量开氏法、铵态氮采用纳氏试剂比色法、硝态氮采用酚二磺酸比色法、亚硝态氮采用 N(1-萘基)乙二胺比色法测定。

间隙水及上覆水的分析参照《水和废水监测分析方法》中规定的方法^[12]。

1.3 扩散通量计算方法

根据 Fick 第一扩散定律及相关文献^[4,13],扩散通量计算公式如下:

$$F=-\varphi \cdot D_s \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$
 (当 $\varphi \leq 0.7$ 时, $D_s=\varphi \cdot D_o$; 当 $\varphi > 0.7$ 时, $D_s=\varphi^2 \cdot D_o$) (1-1)

式中: φ 为沉积物孔隙度, %; D_s 为经孔隙度校正的有效分子扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$, $\frac{\partial c}{\partial x}$ 为界面浓度梯度, $mg \cdot L^{-1} \cdot cm^{-1}$, D_o 为理想溶液的扩散系数, 温度 25 ℃ 时 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、 NO_2^--N 的理想扩散系数 (D_o) 分别为 19.8×10^{-6} 、 19.0×10^{-6} 、 $19.1 \times 10^{-6} cm^2 \cdot s^{-1}$ ^[14]。

孔隙度 φ 根据柱状样沉积物的干湿比估算, 其计算公式为:

$$\varphi = \frac{r-s}{r}$$
 (1-2)

式中: r 为沉积物湿重, s 为经过 110 ℃ 干燥后的沉积物重量。经实测, 珠江广州河段表层 (0~10 cm) 沉积物 φ 的范围为 0.35~0.70 (见表 4)。

由于水土界面物质交换主要发生在沉积物表层 0~10 cm 范围内^[15], $\frac{\partial c}{\partial x}$ 根据沉积物 0~10 cm 间隙水的

平均浓度与上覆水浓度之差求得。

1.4 数据分析方法

所有数据使用 Excel 2003 及 SPSS13.0 进行统计分析。

2 结果与讨论

2.1 铵态氮的垂直分布

通过分析表 3 及图 2 可以看出, 铵态氮含量的变化范围在 $0.053 5 g \cdot kg^{-1}$ 至 $1.455 4 g \cdot kg^{-1}$ 之间, 且 NH_4^+-N 平均含量、最大及最小含量均随沉积物深度增加呈上升趋势。表层 0~5 cm 铵态氮含量与 10~50 cm 各层存在显著性差异, 而 5~50 cm 这 4 个层次的铵态氮含量差异并不显著。

通常情况下, NH_4^+-N 含量与可降解有机物含量、沉积环境及水动力状况有关, 在还原环境中, 由有机氮经氨化作用释放出来的 NH_4^+-N 极易累积, 且沉积物环境的还原性会随深度增加而增强^[10]。因此, 氨氮通常表现为自上而下逐渐升高的趋势^[16]。珠江广州河段沉积物中氨氮含量的垂直变化的总趋势符合以上规律。此外, NH_4^+-N 的垂直分布还可能受到底栖动物的“灌溉”作用而促使上层沉积物中的氨氮优先向水体扩散, 因此, 较深层沉积物中 NH_4^+-N 就可进一步积累, 从而出现了 NH_4^+-N 含量随深度而增加的趋势。由于所有采样点均位于岸边, 表层沉积物极易受到风浪扰动, 相对间隙水中以及吸附于沉积物颗粒上的分子态 NH_3 在底部湖流运动及再悬浮作用下, 更易进入上覆水体, 部分经物理作用逸出水面进入大气, 较大程度降低了表层沉积物中 NH_4^+-N 的含量。

2.2 硝态氮的垂直分布

由表 3 及图 3 可以看出, 珠江广州河段硝态氮含

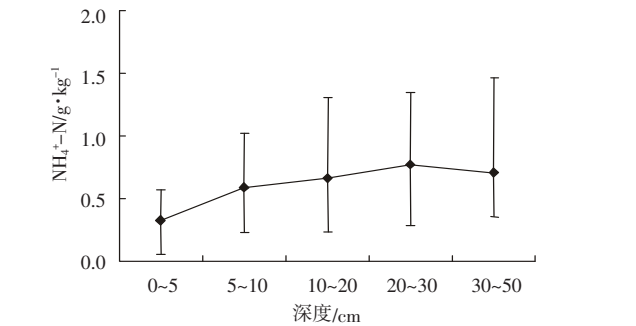
表 2 珠江广州河段沉积物理化性质
Table 2 Physiochemical factors of the sediment samples in Guangzhou Reach of the Pearl River

编号	粒径组成/%					pH	含水率/ %	有机质/ g · kg ⁻¹	总氮/ g · kg ⁻¹
	粘粒(<0.002 mm)	细粉粒(0.002~0.005 mm)	中粉粒(0.005~0.01 mm)	粗粉粒(0.01~0.05 mm)	砂粒(>0.05 mm)				
1-1	3.13	6.59	12.77	62.49	15.03	7.19	62.7	61.42	2.65
2-1	2.70	6.22	12.79	61.98	16.31	7.54	63.6	67.26	2.90
2-2	3.39	7.12	13.75	62.42	13.32	7.26	58.7	62.68	2.27
3-1	3.90	8.27	15.57	61.95	10.32	7.16	45.1	40.08	1.77
3-2	3.44	7.18	13.76	61.37	14.25	7.59	38.2	29.3	1.47
4-1	2.77	6.41	13.11	63.73	13.98	7.66	60.6	46.06	1.67
5-1	3.26	7.22	14.37	64.29	10.86	7.66	48	38.16	1.13
5-2	2.68	6.08	12.27	57.76	21.22	7.47	68.5	64.49	2.77
6-1	4.08	8.89	17.07	62.53	7.43	7.29	64.3	51.77	2.15
6-2	2.87	6.24	12.58	62.05	16.25	7.45	60.6	48.11	2.29

表 3 珠江广州河段沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 方差分析
Table 3 Analysis of variance of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ at different depths in Guangzhou Reach of the Pearl River

深度/cm	$\text{NH}_4^+\text{-N/g}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N/g}\cdot\text{kg}^{-1}$
0~5	0.325 0 a	0.515 4 a
5~10	0.588 5 ab	0.377 2 a
10~20	0.657 2 b	0.717 4 a
20~30	0.769 3 b	0.717 4 a
30~50	0.701 6 b	0.538 3 a

注: 同列不同字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$); 表中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量为 $\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NO}_2^-\text{-N}$ 之和。
Note: Different letters in the same column show significant difference ($P<0.05$); the content of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ indicates the sum of $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$.



注: 中间点为均值, 最高点、最低点为极值, 图 3 同。
Note: The middle point denotes the means, the highest and lowest points in the figure are extreme values.

图 2 沉积物铵态氮各层含量剖面分布
Figure 2 Profile of ammonia content in the sediment samples

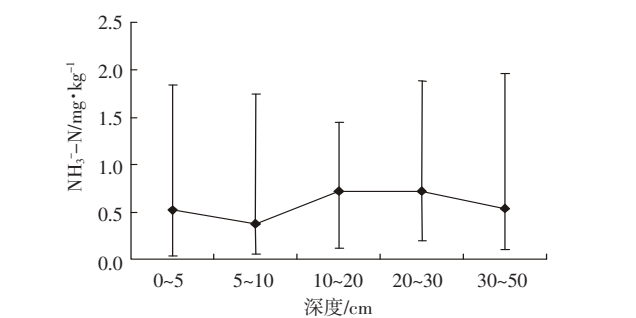


图 3 沉积物硝态氮各层含量剖面分布
Figure 3 Profile of nitrate & nitrite content in the sediment samples

量在 $0.032\sim1.96\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间, 各层的硝态氮平均含量随沉积物深度的变化无明显规律, 且各层的硝态氮平均含量无显著性差异。硝态氮这种分布特点是由于其含量受沉积物中的氧化还原条件影响很大, 当还原条件较强时, 沉积物处于反硝化状况, 高价态的 NO_3^- 、 NO_2^- 会转化为低价态的 NH_4^+ 、 N_2O 等; 处于氧化环境时, 又会发生硝化反应, N 从低价态的 NH_4^+ 转化为高价的 NO_2^- 、 NO_3^- , 且在底泥环境中, 除 DO 是氧化还原条件的决定因素外, 铁、锰等也是重要的影响因

素。

2.3 沉积物-水界面的无机氮浓度梯度

间隙水中的营养盐向上覆水扩散以及进而向水体混合扩散的过程, 主要是由浓度差支配的^[17]。由于间隙水与上覆水体的氮存在浓度差异, 必然存在由高浓度向低浓度进行的分子扩散作用, 且浓度差值越大, 扩散趋势越明显, 氮的潜在释放能力越强。根据珠江广州河段间隙水与上覆水中无机氮的实测浓度, 得出界面的浓度梯度比, 见表 4。

从表 4 可见, 界面中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的浓度梯度比值均大于 1, 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的均小于 1, 显示与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相反的扩散方向。

2.4 沉积物-水界面的无机氮扩散通量

本文根据表层沉积物中各种营养盐的浓度梯度计算了沉积物-上覆水之间的扩散通量 (表 5), 从表 5 可以看出, 各点的净扩散通量均为正数, 沉积物中的氮自间隙水向上覆水扩散, 并以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 为主。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 表现出与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 相反的方向, 各点均由上覆水向沉积物中扩散, 通量变化范围分别为 $-0.13\sim-0.01\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 、 $-0.05\sim-0.01\text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, 暗示沉积物中反硝化作用的存在^[18]。 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的含量低、扩散通量小, 是硝化与反硝化作用的中间产物, 因此它对扩散通量的指示意义不明确^[19]。

珠江广州沉积物无机氮的扩散通量与其他水域的比较见表 6。从表 6 看出, 与珠江口、南沙群岛海域、大亚湾及东太湖等受污染水体相比, 珠江广州河段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散通量处于中等偏上的水平, 远高于南海北部, 变化范围小于桑沟湾; $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的扩散通量 (绝对值) 与南海北部相当, 明显低于其他水域; $\text{NO}_2^-\text{-N}$

表 4 间隙水与上覆水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的浓度梯度比
Table 4 Rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and $\text{NO}_2^-\text{-N}$ concentration between the pore and overlying water

采样点	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NO}_2^-\text{-N}$
1-1	14.34	0.40	0.11
2-1	5.80	0.16	0.04
2-2	15.17	0.30	0.05
3-1	2.50	0.49	0.18
3-2	4.51	0.28	0.08
4-1	6.63	0.62	0.03
5-1	6.26	0.22	0.02
5-2	10.44	0.19	0.03
6-1	5.73	0.15	0.02
6-2	11.65	0.27	0.29
平均	8.30	0.31	0.09

表 5 沉积物-水界面不同形态氮的扩散通量 ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
Table 5 Diffusion fluxes of different forms nitrogen across the sediment-water interface

指标	1-1	2-1	2-2	3-1	3-2	4-1	5-1	5-2	6-1	6-2	平均
孔隙度	0.66	0.66	0.59	0.48	0.35	0.64	0.50	0.69	0.63	0.70	0.59
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	4.34	2.19	4.54	0.46	0.32	2.61	0.90	4.38	2.18	3.47	2.54
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	-0.05	-0.11	-0.05	-0.02	-0.02	-0.01	-0.06	-0.10	-0.13	-0.08	-0.06
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	-0.02	-0.03	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.04	-0.05	-0.03	-0.02	-0.03
净通量	4.33	2.11	4.52	0.47	0.32	2.64	0.85	4.30	2.09	3.43	2.51

注:负值表示扩散方向由上覆水到间隙水。
Note: The negative values in the table mean the diffusion direction being from overlying water to the pore.

表 6 珠江广州河段与其他区域氮扩散通量对比 ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$)
Table 6 Comparison of diffusion fluxes between Guangzhou Reach of the Pearl River and other zones

研究区域与季节	F ($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	F ($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	F ($\text{NO}_2^-\text{-N}$)
珠江广州河段 冬季*	17.89~251.95	-2.08--0.23	-1.01~-0.19
桑沟湾 夏季 ^[22]	-738.4~1 443.6	-9.8~153.1	0.7~19.5
珠江口 夏季 ^[23]	88~206	-3~-117	-0.1~-0.6
鸭绿江口 不祥 ^[13]	—	82	—
南海北部 不祥 ^[20]	-0.48~25.30	-4.50~1.77	-1.08~0.11
南沙群岛 不祥 ^[5]	0.48~137.31	-91.07~88.55	-1.09~5.22
大亚湾 不祥 ^[4]	52.8~625.0	0.72~10.15	0.38~1.28
东太湖 冬季 ^[6]	35.0~212.2	—	—

注:* 为本实验估算,单位经各形态分子量转换而来;其他水域的扩散通量皆为 Fick’s 第一定律估算结果。
Note: * indicates the estimated value, calculated by changing different forms molecular; the diffusion fluxes in other zones are estimated values based on Fick’s first law.

的扩散通量(绝对值)除明显低于桑沟湾外,与其他水域较为接近。

张路等^[6]对太湖水土界面氮交换通量时空差异的研究表明,夏季氮的扩散通量明显高于冬季,这是由于夏季水温高,水温变化影响分子运动,进而影响分子扩散以及通过影响微生物的活性来影响营养盐降解和析出。可见,季节对界面扩散通量有较大的影响。

本研究采用的 Fick’s 第一定律所得的扩散通量只考虑了氮在间隙水-上覆水之间的浓度梯度以及孔隙度对无机氮迁移扩散的影响,因此是一种理论通量,由于生物的扰动作用、氮在水体中的水平迁移扩散、风浪作用造成的紊流扩散、沉积物表面的直接释放等其他因素在这个模型中均未得到体现,因而由 Fick’s 第一定律得到的释放通量通常小于实际情况下的通量^[6,20,21]。

3 结语

通过对珠江广州河段沉积物无机氮的分布及界面扩散通量的计算,可得以下结论:

(1)氨氮是珠江广州河段沉积物中无机氮的主要形态,变化范围在 $0.053\ 5\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 至 $1.455\ 4\ \text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,各层平均含量随深度的增加总体上呈上升趋势;硝态氮与亚硝态氮含量很低,分布上无明显的规律。

(2)珠江广州河段沉积物-水界面无机氮存在着明显的浓度梯度, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 表现为自沉积物向上覆水扩散,平均扩散通量为 $2.54\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,硝态氮与亚硝态氮的扩散方向与氨氮相反,平均扩散通量分别为 -0.06 、 $-0.03\ \text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

(3)珠江广州河段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的扩散通量与其他受污染水域相比处于中等偏上的水平, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 与南海北部相当,但明显低于其他水域; $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的扩散通量(绝对值)除明显低于桑沟湾外,与其他水域较为接近。

参考文献:

[1] 熊移民. 珠江广州河段水质发黑发臭原因浅析[J]. 铁道劳动安全卫生与环保,2004,31(3):131-132.
XIONG Yiming. Preliminary study on the reason of nigrescent and odoriferous about the water in Guangzhou Reach of the Pearl River[J]. *Railway Occupational Safety, Health & Environmental Protection*, 2004, 31(3):131-132.
[2] 胡雪峰,高效江,陈振楼.上海市郊河流底泥氮磷释放规律的初步研究[J].上海环境科学, 2001, 20 (2):66-70.
HU Xuefeng, GAO Xiaojang, CHEN Zhenlou. Preliminary study on nitrogen and phosphorus release from the creek sediments, outskirts of Shanghai[J]. *Shanghai Environmental Sciences*, 2001,20(2):66-71
[3] 范成新,等.湖泊沉积物氮磷内源负荷模拟[J].海洋与湖沼, 2002, 33(4):370-378.
FAN Chengxin, et al. Simulation of internal loadings of nitrogen and phosphorus in a lake[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2002, 33(4):370-378.
[4] 丘耀文,王肇鼎,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,1997,18(3):83-90.
QIU Yaowen, WANG Zhaoding, et al. Diffusive fluxes of nutrients across sediment seawater interface in cultural sea area of DAYA Bay[J]. *Tropic Oceanology*, 1997, 18(3):83-90.

- [5] 周伟华,吴云华,陈绍勇. 南沙群岛海域沉积物间隙水营养盐(氮、磷、硅)的研究[J]. 热带海洋学报, 2001, 20(4): 49–56.
ZHOU Weihua, WU Yunhua, CHEN Shaoyong. Study on nutrients (N, P, Si) in sediment interstitial waters in the district of NanSha Islands Sea area[J]. *Tropic Oceanology*, 2001, 20(4): 49–56.
- [6] 张 路,范成新,等. 太湖水土界面氮磷交换通量的时空差异[J]. 环境科学, 2006, 27(8): 1537–1544.
ZHANG Lu, FAN Chengxin, et al. Space–Time dependent variances of ammonia and phosphorus flux on sediment–water interface in Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(8): 1537–1544.
- [7] 单 力,伊水图. 环境质量稳定珠江水质好转[J]. 绿色广东, 2006, 5: 52–53.
SHAN Li, YI Shuitu. Stabilization of environmental quality, improvement of water quality in the Pearl River [J]. *Green GuangDong*, 2006, 5: 52–53.
- [8] 林植青,郑建禄,等. 珠江中氮的迁移[J]. 海洋与湖沼, 1984, 15(6): 515–520.
LIN Zhiqing, ZHENG Jianlü, et al. The transference of nitrogen in Zhujiang River[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 1984, 15(6): 515–520.
- [9] 贾晓珊,徐昕荣,等. 珠江流域河网底泥的氮磷污染特征及释放机理[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(2): 107–120.
JIA Xiaoshan, XU Xinrong, et al. Distribution and release of nitrogen and phosphorus in typical river sediments, Pearl River Delta Region, China[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(2): 107–120.
- [10] 岳维忠,黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 195–199.
YUE Weizhong, HUANG Xiaoping. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River Estuary [J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2): 195–199.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. (第三版), 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shidan. Methods of Soil Analysis [M]. (Part III), Beijing: Agricultural Publishing House of China, 2000.
- [12] 国家环境保护总局 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版), 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
SEPA. Analytical Method on Monitoring Water and Waste Water [M]. (Part IV), Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [13] 叶曦雯,刘素美,等. 鸭绿江口潮滩沉积物间隙水中的营养盐[J]. 环境科学, 2002, 23(3): 92–96.
YE Xiwen, LIU Sumei, ZHANG Jing. Nutrients in sediment pore water in tidal flat area in Yalujiang Estuary [J]. *Environmental Science*, 2002, 23(3): 92–96.
- [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.
SONG Jinming, LI Pengcheng. Study 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.
- [15] 秦伯强,朱广伟,等. 大型浅水湖泊沉积物内源营养盐释放模式及其估算方法[J]. 中国科学 D 辑, 地球科学, 2005, 35 (增刊 II): 33–44.
QIN Boqiang, ZHU Guangwei, et al. The release mode of endogenous nutrient and its estimation method in large adlittoral lake [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2005, 35(II): 33–44.
- [16] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, et al. The effect of macrofauna on pore water profile and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber Estuary[J]. *Estuarine coastal and Shelf Science*, 1999, 48: 683–699.
- [17] 范成新,杨龙元,张 路. 太湖底泥及其间隙水中氮磷垂直分布及相互关系分析[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 359–367.
FAN Chengxin, YANG Longyuan, ZHANG Lu. The vertical distributions of nitrogen and phosphorus in the sediment and interstitial water in Taihu Lake and their interrelations [J]. *Journal of Lake Science*, 2000, 12(4): 359–367.
- [18] 张德荣,陈繁荣,等. 夏季珠江口外近海沉积物/水界面营养盐的交换通量[J]. 热带海洋学报, 2005, 24(6): 53–60.
ZHANG Derong, CHEN Fanrong, et al. Benthic fluxes of nutrients in neritic zone outside Zhujiang River estuary in summer [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(6): 53–60.
- [19] Hall P O J, Hulth S, Hulthe G, et al. Benthic nutrient fluxes on a basin–wide scale in the Skagerrak (north–eastern North Sea)[J]. *Journal of Sea Research*, 1996, 35: 123–137.
- [20] 潘建明,周怀阳,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]. 海洋学报, 2002, 24(3): 52–60.
PAN Jianming, ZHOU Huaiyang, et al. Nutrient profiles in interstitial water and flux in water–sediment interface of Zhujiang Estuary of China in summer[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(3): 52–60.
- [21] 吕 莹,陈繁荣,等. 春季珠江口内营养盐剖面分布和沉积物–水界面交换通量的研究[J]. 地球与环境, 2006, 34(4): 1–4.
LU Ying, CHEN Fanrong, et al. Study on profile distribution of nutrients and exchange fluxes at sediment–water interface in inner Pearl River estuary in spring [J]. *Earth and Environment*, 2006, 34(4): 1–4.
- [22] 蔡立胜,方建光,等. 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 Lisheng, FANG Janguang, et al. Preliminary studies on nitrogen and phosphorus fluxes between seawater and sediment in Sun–go Bay[J]. *Marine Fisheries Research*, 2004, 25(4): 57–64.
- [23] 顾德宇,汤荣坤,余 群. 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.
GU Deyu, TANG Rongkun, YU qun. The chemistry character of inorganic P, Si and N in sediment–pore water from the DAYA Bay[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1995, 17(5): 73–80.