

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2021091902

史华明, 许春玲, 马玉, 等. 珠江口牛尾海中 DON 的自养生产和异养降解[J]. 环境化学, 2022, 41(9): 2931-2939.

SHI Huaming, XU Chunling, MA Yu, et al. Autotrophic production and heterotrophic degradation of DON at the Niuweihai (Ngau Mei Hoi) area of the Pearl River Estuary [J]. Environmental Chemistry, 2022, 41 (9): 2931-2939.

珠江口牛尾海中 DON 的自养生产和异养降解*

史华明^{1,2#} 许春玲^{1,2#} 马玉^{1,2**} 林梵^{1,2} 陈际雨^{1,2} 张伟杰^{1,2} 许欣^{1,2}
王翔^{1,2} 王迪^{1,2}

(1. 国家海洋局南海调查技术中心, 广州, 510300; 2. 自然资源部海洋环境探测技术与应用重点实验室, 广州, 510300)

摘要 本文研究了珠江口牛尾海海域 2000—2014 年期间溶解有机氮 (DON) 月际变化与空间分布; 并基于二维混合质量平衡模式, 结合叶绿素 a (Chl-a) 估算该海域的 DON 滞留时间 (T_{DON}), 评估自养生产和异养降解作用所产生的余量 DON (ΔDON). 结果显示, 牛尾海海域中 DON 浓度约 $(0.118 \pm 0.056) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 浮游植物生产的 DON 释放率约为 $27.1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} (\text{N} / \text{Chl-a})$, 其 T_{DON} 约为 6 d, 证实牛尾海海域是一个 DON 循环速率相对较快海域. 牛尾海主湾区水域 ΔDON 接近于零, 说明其 DON 的自养生产与异养降解接近平衡; 湾顶水域 ΔDON 约 $0.010 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 说明其 DON 自养生产占主导地位. 总体上, 牛尾海海域 DON 自养生产明显强于异养降解作用.

关键词 溶解有机氮, 自养生产, 异养降解, 珠江口, 牛尾海.

Autotrophic production and heterotrophic degradation of DON at the Niuweihai (Ngau Mei Hoi) area of the Pearl River Estuary

SHI Huaming^{1,2#} XU Chunling^{1,2#} MA Yu^{1,2**} LIN Fan^{1,2} CHEN Jiyu^{1,2}
ZHANG Weijie^{1,2} XU Xin^{1,2} WANG Xiang^{1,2} WANG Di^{1,2}

(1. South China Sea Marine Survey and Technology Center, State Oceanic Administration, Guangzhou, 510300, China;

2. Key Laboratory of Marine Environmental Survey Technology and Application, Ministry of Natural Resources, Guangzhou, 510300, China)

Abstract In the paper the monthly variations and spatial distributions of dissolved organic nitrogen (DON) were analyzed at the Niuweihai (Ngau Mei Hoi) area of Pearl River Estuary during 2000—2014. Based on the two-component mixing mass-balance model, the residence time of the DON (T_{DON}) was also estimated combining with the data of chlorophyll a (Chl-a), in order to assess the net DON (ΔDON) from autotrophic production and heterotrophic degradation at the Niuweihai area, our results showed the DON concentration was $(0.118 \pm 0.056) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, and the DON release rate from the phytoplankton production was $\sim 27.1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} (\text{N} / \text{Chl-a})$. The residence time (T_{DON}) was about 6 days, suggesting that the DON cycle rate was fast at the Niuweihai area. The ΔDON concentration was close to zero, indicating the DON in main body waters was close to equilibrium between the autotrophic production and heterotrophic degradation. The ΔDON concentration was

2021年9月19日收稿(Received: September 19, 2021).

* 海洋观测预报与防灾减灾项目(2200128)资助.

Supported by Ocean Observation, Forecast and Hazard Prevention and Mitigation (2200128).

** 通信联系人 Corresponding author, Tel: 020-84191240, E-mail: 362005949@qq.com

#具有同等贡献. These authors contributed equally to this work.

$\sim 0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, indicating the autotrophic production of DON was stronger than the heterotrophic degradation at the bay's top waters. In general, the autotrophic production of DON at the Niuweihai sea area was significantly stronger than heterotrophic degradation.

Keywords DON, autotrophic production, heterotrophic degradation, the Pearl River Estuary, the Niuweihai area.

全球海洋上部及近岸水域同时发生着有机物的自养生产和异养降解两个方向相反的生物地球化学过程, 自养生产即自养细菌和浮游植物利用无机态营养盐合成生产并最终释放有机物到水体中^[1-2], 而异养降解则是异养细菌选择性地降解水体中有机物并转化为无机态, 这两个过程驱动着全球海洋营养物质循环^[3]. 自生 DON 是指浮游生物食物网中病毒与死亡细胞自溶、海藻、浮游植物与细菌直接分泌和摄食浮游植物的原始与多细胞动物排泄释放的 DON^[4]. 外来 DON 是指通过大气沉降^[5]、沉积物释放^[6]和陆源输入^[7]等方式进入到水体的 DON.

本文采用 2000—2014 年在珠江口牛尾海每月水质调查监测结果, 采用 DIN 和总溶解氮 (TDN) 浓度系列子集导出的数据来分析湾中 DON 浓度的时空变化, 结合叶绿素-a (Chl-a) 的实测结果, 确定湾中 DON 滞留时间 (T_{DON}), 利用二元混合质量平衡模式^[8-9], 结合盐度 (S) 实测数据, 探讨研究自养生产和异养降解过程产生的剩余 DON (ΔDON), 研究湾中生物活动驱动氮循环机制及其碳源/汇特征.

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 研究海区与监测站位

牛尾海西邻珠江口、东靠大鹏湾, 是半封闭的小海湾. 该海湾集水区 (包括湾中的海岛) 约 73 km^2 , 水域面积约为 42.3 km^2 , 平均水深 14.2 m , 容积约为 $6\times 10^8 \text{ m}^3$, 且湾顶较浅、湾口较深, 无大的径流输入; 潮差平均为 1.0 m , 水动力较弱, 是弱潮区^[10]. 牛尾海受季风影响明显, 4—9 月为湿季, 盛行西南季风, 10 月—翌年 3 为干季, 盛行东北季风, 降雨总量约为 $2398.5 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 总蒸发量约为 $1227.3 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$, 降雨主要集中在湿季, 湿、干季总雨量之差约为每月 290.0 mm , 而湿、干季总蒸发量相差较小, 约为每月 35.0 mm .

在牛尾海布设了 9 个水质调查监测站位, 分别是 PM1—PM4、PM6—PM9 和 PM11, 其中, PM1—PM4 和 PM6 调查站位于湾顶, PM7—PM9 和 PM11 站位处于海湾的主区域 (图 1).

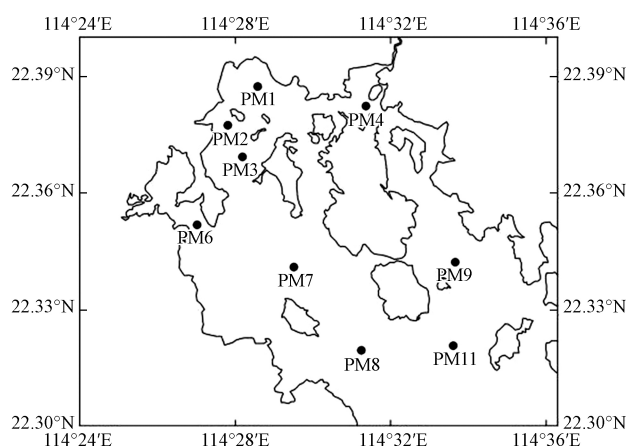


图 1 珠江口牛尾海水质调查采样站位

Fig.1 Stations for water quality sampling at the Niuweihai area of Pearl River Estuary

在湾附近观测到的大气中无机氮 (IN) 和有机氮 (ON) 干湿沉降总量分别为 $2.23 \text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 和 $1.34 \text{ t}\cdot(\text{km}^2\cdot\text{a})^{-1}$ ^[11]. 依据 2000—2014 年注入湾的小河溪水中盐度 (S)、DIN 和 DON 的实测数据, 估算的盐度 (S) 接近于零的入湾淡水 (FW) 中 DIN 和 DON 浓度分别约为 $1.340 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.323 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 依据中国深圳和中国香港合作研究组的报告, 没有污水排放入牛尾海 (unpublished data). 利用湾的集水区面

积、水域面积、年总雨量和年总蒸发量计算的 FW 量为 $135 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$, 并利用小河溪中 DIN 和 DON 浓度以及 IN 和 ON 年沉降总量(所有沉降的 IN 和 ON 分别被当作水域中的 DIN 和 DON), 求出的排放入湾淡水中 DIN 和 DON 浓度分别为 $1.545 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.624 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

1.2 样品采集与储藏

采用 CTD 原位观测海水温度 (T) 和盐度 (S), 同时采集水样, 当水深 (H) < 4 m 时仅取表层样品(海面下 1 m); 当 $4 \text{ m} \leq H < 6 \text{ m}$ 时采集表、底层(离底 1 m)样品; $H \geq 6 \text{ m}$ 时, 采集表层、中层 ($0.6H$) 和底层样品. 营养盐(包括 DIN 和 DON)样品采用孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜真空过滤, 样品瓶置于 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 冷柜中保存; 采用直径 47 mm 孔径 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜真空(最大 0.3 bar)过滤 500 mL Chl-a 水样, 将对折并包好的滤膜放入密实袋中避光冷藏保存, 上述营养盐和 Chl-a 样品均带回室内实验室测试. 采用 SBE18 pH 和 SBE32Y 溶解氧传感器现场测量 pH 和溶解氧 (DO).

1.3 样品分析与数据处理

采用分光光度计测定 Chl-a, 流动注射自动分析仪测定氨氮 ($\text{NH}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐氮 ($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝酸盐氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 或凯氏氮 (TKN). DIN 由等式 $\rho[\text{DIN}] = \rho[\text{NH}_3\text{-N}] + \rho[\text{NO}_2\text{-N}] + \rho[\text{NO}_3\text{-N}]$ 计算; DON 由等式 $\rho[\text{DON}] = \rho[\text{TKN}] - \rho[\text{NH}_3\text{-N}]$ 计算^[12-13], 自养生产和异养降解过程产生的 ΔDON 计算方法^[14]为: $\Delta\text{DON} = \rho[\text{DON}] - (1 - S_{\text{BW}}/S_{\text{SW}}) \times \rho[\text{DON}_{\text{FW}}] - S_{\text{BW}}/S_{\text{SW}} \times \rho[\text{DON}_{\text{SW}}]$, 式中 $\rho[\text{DON}_{\text{FW}}]$ 、 $\rho[\text{DON}_{\text{SW}}]$ 和 $\rho[\text{DON}]$ 分别是排放入湾淡水 (FW 包含雨水, $S \approx 0$)、湾口外附近海水 (SW) 和湾内水 (BW) 中的 DON; S_{SW} 和 S_{BW} 分别是 SW 和 BW 中的 S . 观测数据的 T 、 S 、pH、DO、透明度、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TKN 和 Chl-a 的不确定度或检出限分别为 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 、0.1、0.1、0.1 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.1 m、0.005 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.002 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.002 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、0.05 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.2 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[15].

根据实测数据, 求出各站位水柱(包括表层、中层和底层)月平均 DON 浓度. 选取冬季(1月)、春季(4月)、夏季(7月)和秋季(10月)分析 DON 的时空变化; 根据所有监测站表、中、底层海水中月平均 DON 浓度分析年度变化; 采用各航次平均 DON 浓度研究年际变化.

2 结果与讨论 (Results and discussion)

2.1 水文和生物地球化学因子的变化

干季表层 T (约 $20.8 \text{ }^\circ\text{C}$) 略高于底层 T (约 $20.5 \text{ }^\circ\text{C}$), 湿季表层 T (约 $27.1 \text{ }^\circ\text{C}$) 明显高于底层 T (约 $24.7 \text{ }^\circ\text{C}$)(表 1). 相反, 干季表层 S (约 32.6) 略低于底层 S (约 32.7), 湿季表层 S (约 31.1) 明显低于底层 S (约 33.1)(表 1). 干季表、底层 pH 和 DO 没有太大差别, 分别约为 $8.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $7.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 但湿季表层 pH(约 8.2) 和 DO(约 $6.4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 高于底层 pH(约 8.1) 和 DO(约 $5.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)(表 1). 干、湿季 Chl-a 差别不大, 表层和底层 Chl-a 分别约为 $2.6 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $2.4 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. 干季表层和底层 DIN 分别约为 $0.062 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而湿季表层和底层 DIN 分别约为 $0.047 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表 1). 湿季水柱层化明显, 干季水体混合均匀, 且干、湿季环境因子差别明显, 主要是受到季风的影响.

表 1 2000—2014 年牛尾海中干季和湿季各监测站表层和底层平均 T 、 S 、pH、DO、Chl-a 和 DIN 浓度^a

Table 1 T , S , pH, DO, Chl-a and DIN concentrations averaged for surface- and bottom-waters at various sites for the dry and wet seasons^a at the Niuweihai area between 2000 and 2014

季节 Period	站号 Site	$T/^\circ\text{C}$		S		pH		DO/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)		Chl-a/($\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)		DIN/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	
		表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层
干季	PM1	20.9	20.6	32.6	32.6	8.1	8.1	6.9	7.4	3.3	3.0	0.053	0.054
	PM2	20.9	20.7	32.5	32.6	8.1	8.1	6.9	7.2	3.0	2.9	0.059	0.062
	PM3	20.9	20.5	32.6	32.7	8.1	8.1	7.1	7.1	2.9	2.5	0.055	0.067
	PM4	20.7	20.5	32.6	32.6	8.1	8.1	6.8	7.3	2.8	3.0	0.050	0.052
	PM6	20.9	20.6	32.4	32.6	8.1	8.1	7.0	7.1	3.1	2.4	0.064	0.070
	PM7	20.8	20.5	32.6	32.8	8.1	8.1	7.1	7.1	2.2	2.1	0.061	0.075

续表 1

季节 Period	站号 Site	$T/^\circ\text{C}$		S		pH		$\text{DO}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$		$\text{Chl-a}/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$		$\text{DIN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	
		表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层	表层	底层
干季	PM8	20.7	20.5	32.6	32.8	8.1	8.1	7.1	7.1	2.1	1.6	0.070	0.082
	PM9	20.6	20.3	32.6	32.7	8.1	8.1	7.0	7.2	2.1	2.2	0.068	0.078
	PM11	20.6	20.5	32.6	32.8	8.1	8.1	7.0	7.1	1.9	1.6	0.075	0.085
	平均值	20.8	20.5	32.6	32.7	8.1	8.1	7.0	7.2	2.6	2.4	0.062	0.069
湿季	PM1	27.5	25.7	30.7	32.4	8.2	8.1	6.5	5.9	3.1	3.5	0.053	0.053
	PM2	27.4	25.9	30.7	32.2	8.2	8.1	6.1	5.9	3.5	2.9	0.059	0.063
	PM3	27.4	24.6	30.9	33.1	8.2	8.1	6.4	5.2	2.9	2.5	0.055	0.068
	PM4	27.3	25.7	30.7	32.5	8.2	8.1	6.2	5.9	2.6	3.4	0.050	0.053
	PM6	27.1	24.8	30.8	32.9	8.1	8.1	6.4	5.1	3.9	2.9	0.064	0.079
	PM7	27.0	24.0	31.2	33.5	8.2	8.0	6.6	4.9	2.0	1.7	0.061	0.080
	PM8	26.8	23.6	31.4	33.7	8.2	8.0	6.6	4.9	1.9	1.3	0.070	0.080
	PM9	26.8	24.1	31.6	33.5	8.2	8.1	6.3	5.2	1.9	1.9	0.068	0.069
	PM11	26.7	23.7	31.6	33.7	8.2	8.1	6.5	5.0	1.8	1.5	0.075	0.077
	平均值	27.1	24.7	31.1	33.1	8.2	8.1	6.4	5.3	2.6	2.4	0.047	0.069

^a干季指10月—翌年3月,湿季指4—9月。The dry season is Oct–Mar and the wet season is Apr–Sep.

无论在湿季还是在干季,湾顶水域中 Chl-a 和 DIN 浓度均明显高于湾主区水域(表 1),显示中国香港城市生产生活用水向海排放的影响。湿季表层 DIN 浓度明显低于底层(表 1),表明自养生产主要发生在水柱的上部,表层水体 DIN 被同化消耗。此外,水柱中的密度层化限制了表、底水中 DIN 的交换,且夏季西南季风驱动南海北部沿岸陆架底层水侵入本湾,把高 DIN 底层水带入湾内^[9]。

2.2 DON 的时空分布

2000—2014 年湾中 DON 平均浓度为 $(0.118\pm 0.056)\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。春、夏、秋、冬季 DON 的浓度范围分别为 $0.089—0.110$ 、 $0.098—0.145$ 、 $0.105—0.125$ 、 $0.092—0.123\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均分别为 0.100 、 0.124 、 0.116 、 $0.112\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。四季 DON 空间分布趋势相同,从湾顶向湾口逐步降低,整体上季节变化不大,在夏季较高,而春季较低(图 2)。年际周期性变化方面,表、中、底层的 DON 浓度年内变化均不大,3—9 月表层均值均高于底层(图 3a),8 月 DON 浓度最高,约为 $0.127\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,3 月最低,约为 $0.107\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表层 DON 浓度从 4—8 月不断增加,表明该期间 DON 在表层水中积累(图 3a)。DON 浓度呈逐年上升趋势,从 2000 年初的 $0.086\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至 2014 年底的 $0.151\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (图 3b)。

四季湾顶 DON 浓度均明显高于湾的主区(图 2),主要是由于:1)湾顶水域受陆源输入影响较大;2)湾顶水深较浅,且湾中部有岛屿分布,易于藻源性 DON 产生且不易扩散等因素影响。同时,表层 DON 浓度高于底层,主要因为:1)自养生产主要发生在水柱的上部;2)夏季水柱中存在着强密度跃层,阻碍上下层水的垂直混合;3)陆源排放 DON 也对高表层 DON 浓度有所贡献。另外,4—8 月 DON 浓度不断增加,并达到一年中的最大值(图 3a),表明该期间 DON 在湾中积累。在最大值之后,DON 浓度在 9 月有较大幅度的降低,之后保持在较低浓度水平(约 $0.116\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)直至翌年 3 月,显示其他期间 DON 在湾中没有积累。DON 浓度的季节变化和年变化不大,显示湾中的生态系统稳定,而且具有高自净化能力。DON 浓度的年际变化呈上升趋势(图 3b),说明近十几年湾中陆源 DON 输入呈逐年增加趋势,与深圳湾、珠江口和大鹏湾中研究结果相近^[16-17],也与我国近岸海域近几十年来氮输入不断增加趋势一致^[18]。

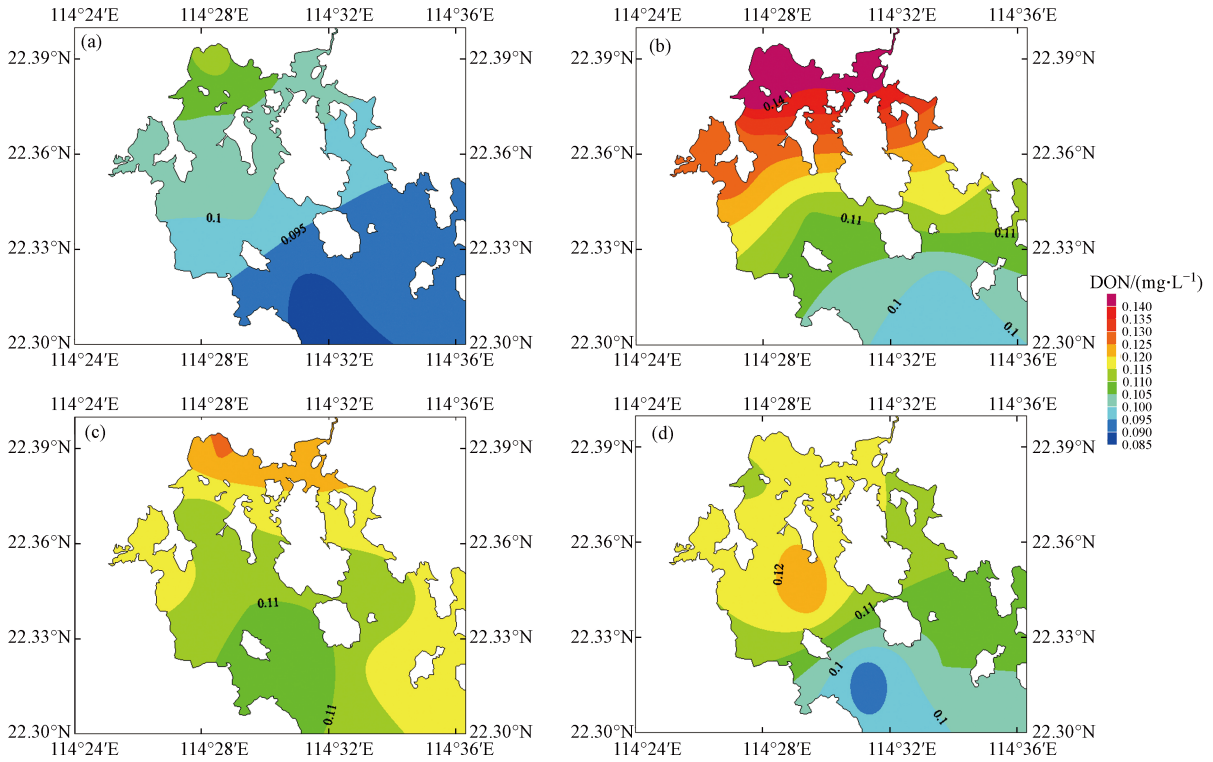


图 2 2000—2014 年牛尾海 DON 平均浓度的时空分布
(a: 春季, b: 夏季, c: 秋季, d: 冬季)

Fig.2 Spatiotemporal distributions of the average DON concentrations ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) at the Niuweihai area between 2000 and 2014
(a: spring, b: summer, c: autumn, d: winter)

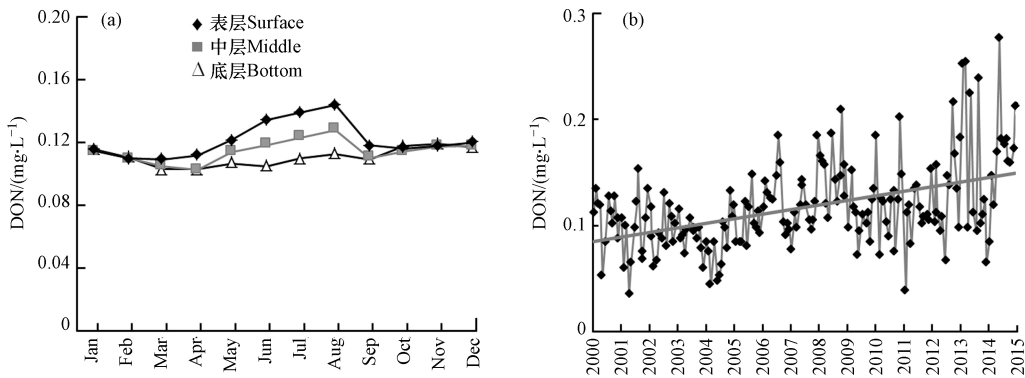


图 3 2000—2014 年牛尾海 DON 的年变化和年际变化
(a: 月平均, b: 航次均值的年际变化)

Fig.3 Variabilities of DON concentration at the Niuweihai area between 2000 and 2014
(a: The intra-variability of the monthly average, b: inter-annual variability of the cruise average)

2.3 DON 与 Chl-a 的相关关系

浮游植物的生长繁殖释放 DON, 而 Chl-a 浓度代表浮游植物现存量, 也与初级生产率 (PP) 高度相关^[19]. 2000—2014 年牛尾海表层 DON 与 Chl-a 显著正相关, 线性相关系数 (R^2) 为 0.30 (图 4), 说明 DON 与浮游植物现存量密切相关, 且浮游植物的现场生产是湾中颗粒有机物 (POM) 的主要来源, 这与大鹏湾中的结果相似^[16]. 如图 4 所示, 回归线斜率 $\times 1000$ 约为 $27.1 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($\text{N}/\text{Chl-a}$), 表示湾中自养生产过程的 DON 释放率与 Chl-a 浓度成正比. 回归线在 x -轴上的截距为 $0.067 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 代表较少被浮游生物利用的难降解 DON, 约为 DON 总量的 47%, 表明湾中只有 53% 的 DON 被浮游生物 (包括细菌等) 快速循环利用. 依据 POM 与 Chl-a 实测数据导出的湾中自养生产过程产生的颗粒有机碳 (POC) 释放率为 $53.1 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($\text{C}/\text{Chl-a}$), 由此并依据 Redfield 比率^[20] 求出颗粒有机氮 (PON) 的释放率为 $9.35 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($\text{N}/\text{Chl-a}$). 比较 DON 和 PON 释放率可知, 自养生产过程产生的 DON 释放率是 PON 释放率的 2.90 倍.

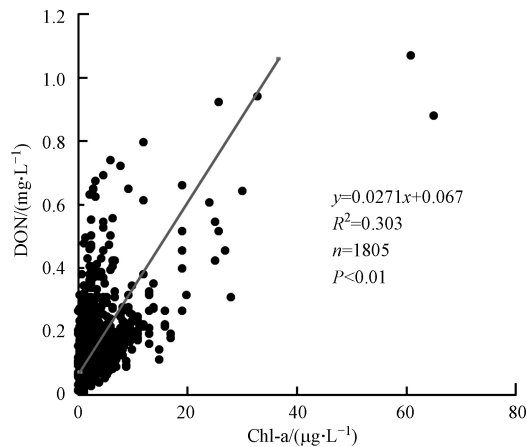


图4 2000—2014年牛尾海中表层DON与Chl-a的回归分析

Fig.4 Regression of the surface DON with Chl-a at the Niuweihai area between 2000 and 2014

2.4 DON 滞留时间 (T_{DON})

由上述研究结果可知, 研究海区自养生产过程中 DON 释放率是 PON 释放率的 2.90 倍. 并依据^[14]的方法, 求出 T_{DON} 结果见表 2.

$$T_{\text{DON}} = I_{\text{DON}} / (2.90\text{PP} \times 224 / 1272) \quad (1)$$

式中, I_{DON} ($\text{gN} \cdot \text{m}^{-2}$) 是水柱中的累积 DON; PP ($\text{gC} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$) 是初级生产率; 224 和 1272 分别是浮游植物分子式中的总氮和总碳原子量^[20]. 牛尾海 T_{DON} 变化范围为 3.6—9.1 d, 平均为 5.9 d, 与水深成正比 (表 2), 湾中 DON 被快速循环.

表 2 2000—2014 年牛尾海中 DON 的平均滞留时间

Table 2 Average residence times for DON at the Niuweihai area between 2000 and 2014

站号 Site	水深/m Water depth	$I_{\text{DON}}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{N})$	$\text{PP}/(\text{g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1} \cdot \text{C})$	T_{DON}/d
PM1	6	0.772	0.415	3.6
PM2	8	1.020	0.493	4.1
PM3	13	1.629	0.535	6.0
PM4	6	0.749	0.386	3.8
PM6	11	1.338	0.553	4.7
PM7	17	1.924	0.526	7.2
PM8	20	2.001	0.492	8.0
PM9	15	1.600	0.487	6.4
PM11	21	2.220	0.477	9.1

需要说明的是, T_{DON} 的估算结果是在假设生态系统稳定且自养生产是 DON 的唯一来源的前提下求得的, 但陆源输入和大气沉降等也是海水 DON 的其他来源. 为了确定其他来源对 T_{DON} 的贡献, 结合牛尾海的平均 PP、Redfield 比率和水域面积, 求得自养生产 DON 总量为 $4.00 \times 10^3 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \text{ N}$. 依据集水区面积、总雨量、总蒸发量和河溪平均 DON, 估算河流输出 DON 总量约为 $27.6 \text{ t N} \cdot \text{a}^{-1}$, 占自养生产 DON 总量的 0.69%, 另因周边无污水直排牛尾海, 污水输入 DON 的量为 $0 \text{ t N} \cdot \text{a}^{-1}$. 依据 ON 干湿沉降和湾的面积, 计算获得大气沉降 DON 总量约为 $56.7 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1} \text{ N}$, 占自养生产 DON 总量的 1.42%. 尽管浅水域中沉积有机物 (SOM) 释放相当可观^[21], 但它们多以无机物形态通过沉积物-水界面释放至水溶液中^[22]. SOM 通过沉积物-水界面释放的 DON 很小, 远小于自养生产 DON 总量的 1%. 所以, T_{DON} 的估算结果具有 96% 以上的可信度.

2.5 DON 的自养生产和异养降解

为了确定 DON 的异养降解速率, 根据 ΔDON 的计算方法, 2000—2014 年湾口外附近的 S_{SW} 和 $\rho[\text{DON}_{\text{SW}}]$ 分别约为 $32.8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.105 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 排入湾的 $\rho[\text{DON}_{\text{FW}}]$ 约为 $0.624 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 假定自养生产

被异养降解完全平衡,那么 SW 和 FW 的两个 S-DON 数点的连线可被认为是 FW 和 SW 在湾内的理论混合线.湾中 DON 随 S 的上升而降低(图 5),DON 被外海水稀释;湾顶水域 S-DON 数点位于混合线的上方呈正偏差,且各站位平均 ΔDON 为 $0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (表 3),自养生产占主导地位;湾主区 S-DON 数点位于理论混合线的周围(图 5),且各站位平均 ΔDON 接近于零(表 3),自养生产的 DON 几乎被异养降解平衡.总体上,牛尾海 ΔDON 的变化范围为 $-0.006\text{--}0.013 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,平均 ΔDON 为 $0.006 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,自养生产强于异养降解.

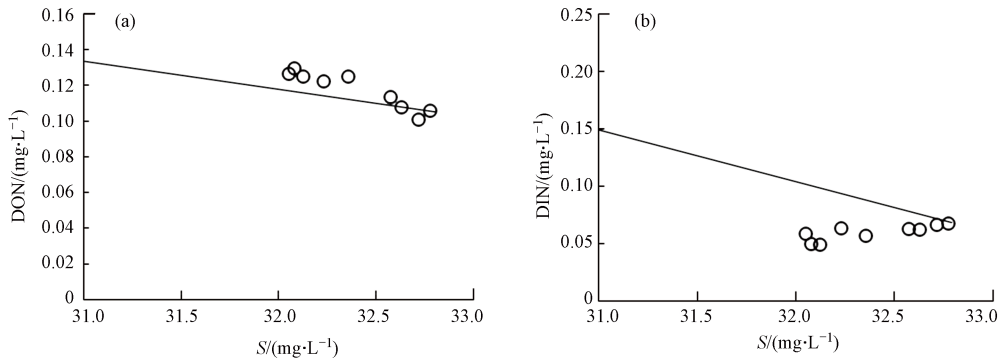


图 5 2000—2014 年牛尾海各站位平均盐度与 DON 和 DIN 的相关关系
(a: S 与 DON; b: S 与 DIN)

Fig.5 Correlation of the salinity with DON and DIN concentration averaged at various sites at the Niuweihai area between 2000 and 2014
(a: salinity with DON; b: salinity with DIN)

表 3 2000—2014 年牛尾海中各测站的平均 ΔDON 和 ΔDIN

Table 3 Average ΔDON and ΔDIN at various sites at the Niuweihai area between 2000 and 2014

站号 Site	水深/m Water depth	$\Delta\text{DON}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\Delta\text{DIN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
PM1	6	0.013	-0.051
PM2	8	0.009	-0.043
PM3	13	0.013	-0.031
PM4	6	0.009	-0.050
PM6	11	0.008	-0.031
PM7	17	0.005	-0.016
PM8	20	-0.006	-0.006
PM9	15	-0.000	-0.013
PM11	21	0.000	-0.002

研究期间湾中 DIN 浓度为 $(0.060\pm 0.050) \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, SW 和 FW 中 DIN 浓度分别约为 0.069 和 $1.544 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 如果不考虑湾中自养生产和异养降解过程对 DIN 的影响,可得到 SW 与 FW 混合时的 S 与 DIN 浓度的理论混合线,所有 S-DIN 数点都在混合线的下方,呈负偏差(图 5b). 用 DIN 代替 ΔDON 计算方程中的 DON,可得到下式:

$$\Delta\text{DIN} = \rho[\text{DIN}] - (1 - S_{\text{BW}}/S_{\text{SW}}) \times \rho[\text{DIN}_{\text{FW}}] - S_{\text{BW}}/S_{\text{SW}} \times \rho[\text{DIN}_{\text{SW}}] \quad (2)$$

式中, $\rho[\text{DIN}_{\text{FW}}]$ 、 $\rho[\text{DIN}_{\text{SW}}]$ 和 $\rho[\text{DIN}]$ 分别是 FW、SW 和 BW 中的 DIN 浓度. 由等式 (2) 计算的湾中各监测站的平均 ΔDIN 列于表 3; ΔDIN 的变化范围为 $-0.051\text{--}-0.002 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均为 $-0.027 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 湾中 DIN 出现亏损, 而且 DIN 亏损值比 DON 盈余值大得多, 大部分亏损的 DIN 被转化为 PON, 并可能沉积至海床被埋藏或由水交换输送至外海.

2000—2014 年湾中表层沉积物有机物 (SOM) 质量分数约为 $9.29 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (湿重), 利用文献报道的方法^[23], 求得湾中 SOM 水生源分数约为 77.2%. 并由湾中水域面积、湾口沉积速率 $2.69\text{--}3.18 \text{ mm}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[24-25]、沉积物含水率和比重及 Redfield 比率, 求得沉积物中水生源 SON 总量约为 $119 \text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ N, 被埋藏的

SON 大于陆源输入 DON 总量 ($27.6 \text{ t N}\cdot\text{a}^{-1}$) 与大气沉降 ON 总量 ($56.7 \text{ t N}\cdot\text{a}^{-1}$) 的总和, 所以部分 DIN 亏损是其转化成 PON 并沉积至海床所致。

总之, 牛尾海自养生产的 PON 的部分沉积至海底, 另一部分 PON 同剩余 DON 被输出至外海, 同时, 水交换又把外海 DIN 带入湾中, 湾中大部分 DIN 亏损是通过水交换从外海中获得补充。湾内生物活动利用 DIN 和 CO_2 进行光合作用及生长繁殖, 将无机氮转化为有机氮, 同时吸收 CO_2 , 是大气 CO_2 的“汇”。

3 结论 (Conclusion)

2000—2014 年牛尾海湾顶水域 DON 浓度四季均较高, 主要受陆源输入和海湾自身水深地形等因素影响; 表层 DON 浓度高于底层, 尤其是在夏季水柱存在强密度跃层, 阻碍上下层水的垂直混合, 且自养生产主要发生在水柱上部。总体而言, 牛尾海 DON 浓度的季节变化和年变化小, 生态系统稳定并具有高自净化能力。

表层 DON 与 Chl-a 呈密切正相关关系, DON 释放率约为 $27.1 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ ($\text{N}/\text{Chl-a}$), 大约是 PON 释放率的 2.90 倍, T_{DON} 约为 5.9 d, DON 被快速循环利用。湾主区水域 ΔDON 约为 $0.000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 而湾顶水域 ΔDON 约为 $0.010 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 湾主区中自养生产和异养降解过程基本处于平衡状态, 而湾顶水域中 DON 自养生产占优势。总体而言, 牛尾海自养生产强于异养降解, 湾内生物活动利用 DIN 和 CO_2 进行光合作用及生长繁殖, 将无机氮转化为有机氮, 同时吸收 CO_2 , 是大气 CO_2 的“汇”。

致谢: 感谢中国香港特别行政区环境保护署提供并允许使用相关数据。

参考文献 (References)

- [1] COTNER J B, BIDDANDA B A. Small players, large role: Microbial influence on biogeochemical processes in pelagic aquatic ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2002, 5(2): 105-121.
- [2] WARD B B, BRONK D A. Net nitrogen uptake and DON release in surface waters: Importance of trophic interactions implied from size fractionation experiments [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2001, 219: 11-24.
- [3] 林梵, 李绪录, 许春玲, 等. 2000—2015 年大鹏湾中 5 日生化需氧量的时空分布 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 883-889.
LIN F, LI X L, XU C L, et al. Temporal and spatial distributions of 5-day biochemical oxygen demand in the mirs bay [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(5): 883-889 (in Chinese).
- [4] BERMAN T, BRONK D A. Dissolved organic nitrogen: A dynamic participant in aquatic ecosystems [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2003, 31: 279-305.
- [5] CORNELL S, RANDELL A, JICKELLS T. Atmospheric inputs of dissolved organic nitrogen to the oceans [J]. *Nature*, 1995, 376(6537): 243-246.
- [6] LOMSTEIN JEN B, JENSEN A, HANSEN J W, et al. Budgets of sediment nitrogen and carbon cycling in the shallow water of Knebel Vig, Denmark [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 1998, 14: 69-80.
- [7] KROEGER K D, COLE M L, VALIELA I. Groundwater-transported dissolved organic nitrogen exports from coastal watersheds [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(5): 2248-2261.
- [8] LEE E S, KROTHER N C. A four-component mixing model for water in a Karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers [J]. *Chemical Geology*, 2001, 179(1/2/3/4): 129-143.
- [9] LI X L, SHI H M, XIA H Y, et al. Seasonal hypoxia and its potential forming mechanisms in the Mirs Bay, the northern South China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2014, 34: 1-7.
- [10] 黄小平, 黄良民. 大鹏湾水动力特征及其生态环境效应 [J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(5): 47-54.
HUANG X P, HUANG L M. Hydrodynamic characteristics of Dapeng Bay and its ecological and environmental effects [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2003, 22(5): 47-54 (in Chinese).
- [11] WANG X M, WU Z Y, SHAO M, et al. Atmospheric nitrogen deposition to forest and estuary environments in the Pearl River Delta region, Southern China [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2013, 65(1): 20480.
- [12] APHA. 5210B, Standard methods for the examination of water and wastewater(20th Edition) [S]. New York: American Public Health Association(APHA), 1998
- [13] 李绪录, 周毅频, 夏华永. 2000—2010 年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化 [J]. *环境科学*, 2013, 34(3): 857-863.

- LI X L, ZHOU Y P, XIA H Y. Intra-and inter-annual variabilities of particulate organic matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010 [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3): 857-863 (in Chinese).
- [14] SHI H M, MA Y, LI X L, et al. Distribution, residence time, autotrophic production, and heterotrophic removal of DOP in the Mirs Bay, northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(8): 17-26.
- [15] EPD (Environmental Protection Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region). Marine water quality in Hong Kong in 2015.2016, <http://wqrc.epd.gov.hk/pdf/water-quality/annual-report/MarineReport2015eng.pdf>
- [16] 李绪录, 张军晓, 周毅频, 等. 2000—2010年大鵬湾溶解有机氮的时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33(10): 1799-1807.
- LI X L, ZHANG J X, ZHOU Y P, et al. Temporal and spatial distributions of dissolved organic nitrogen in the Mirs Bay from 2000 to 2010 [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(10): 1799-1807 (in Chinese).
- [17] 李绪录, 许春玲, 林梵, 等. 深圳湾及邻近水域中的溶解有机氮: 其时空分布、来源和生物利用率 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(9): 2757-2764.
- LI X L, XU C L, LIN F, et al. Dissolved organic nitrogen in the Shenzhen Bay and adjacent coastal waters: Its temporal and spatial distributions, sources and bioavailability [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(9): 2757-2764 (in Chinese).
- [18] 金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28(2): 253-261.
- JIN J, LIU S M. Advances in studies of phosphorus utilization by marine phytoplankton [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(2): 253-261 (in Chinese).
- [19] HU S H, SMITH W O Jr. The effects of irradiance on nitrate uptake and dissolved organic nitrogen release by phytoplankton in the Ross Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18(9): 971-990.
- [20] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of sea-water [M]. In: Hill, M. N. (ed.). *The Sea: The Composition of Sea-Water*, Vol. 2. Harvard University Press, London, 1963.
- [21] 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]. *海洋学报(中文版)*, 2002, 24(3): 52-59.
- PAN J M, ZHOU H Y, HU C Y, et al. Nutrient profiles in interstitial water and flux in water-sediment in terface of Zhujiang Estuary of China in summer [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2002, 24(3): 52-59 (in Chinese).
- [22] 何桐, 谢健, 余汉生, 等. 春季大亚湾海域沉积物-海水界面营养盐的交换速率 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29(2): 179-183.
- HE T, XIE J, YU H S, et al. Exchange rates of nutrients at sediment-seawater interface in Daya Bay in spring [J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29(2): 179-183 (in Chinese).
- [23] 许春玲, 李绪录, 林梵. 深圳湾及邻近沿岸沉积物中碳、氮和磷的分布 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(7): 2691-2698.
- XU C L, LI X L, LIN F. Distributions of carbon, nitrogen and phosphorus in the surface sediments of the Shenzhen Bay and adjacent coastal area [J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(7): 2691-2698 (in Chinese).
- [24] 关祖杰, 杨健明, 余君岳, 等. 用 γ 谱方法测定大鵬湾的沉积速率 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 1995, 34(2): 32-37.
- GUAN Z J, YANG J M, YU J Y, et al. Determination of sedimentation rates in the mirs bay sea areas with gamma spectrometry [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1995, 34(2): 32-37 (in Chinese).
- [25] 黄向青, 梁开, 刘雄. 深圳大鵬湾表层沉积物碎屑矿物空间分布特征 [J]. *海洋湖沼通报*, 2007(1): 74-82.
- HUANG X Q, LIANG K, LIU X. Spatial distribution characteristics of surface sediment debris minerals in Shenzhen Dapeng Bay, Guangdong [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2007(1): 74-82 (in Chinese).