

# 我国典型潮间带不同形态氮的空间分布特征

郭慧丽<sup>1</sup>, 王玉珏<sup>2</sup>, 高伟明<sup>1</sup>, 王艳霞<sup>3</sup>, 刘东艳<sup>2</sup>

(1. 河北师范大学 资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设省级重点实验室, 河北 石家庄 050024; 2. 中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室(烟台海岸带研究所), 山东省海岸带环境过程重点实验室, 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 3. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050021)

**摘要:** 2014 年秋季对全国 14 个典型潮间带沉积物间隙水与上覆水中不同形态氮的空间分布特征进行了调查, 结合沉积物粒度、人类活动等影响因素对其主要影响因子进行了研究。结果表明: 间隙水中氮的浓度均受到周边人类活动的影响, 流域氮输入是导致河口区间隙水氮浓度高于非河口区的原因之一。不同粒径沉积物对氮的保持能力也是影响其浓度的重要因素。在河口区, 人口密度、农田面积和污水排放量对间隙水中 DIN 浓度有一定影响, 海水养殖面积对间隙水中 DON 浓度有重要影响。其中大辽河口、九龙江口和珠江口潮间带间隙水主要受人口密度的影响, 大沽河口主要受人口密度和农田面积的影响, 闽江口主要受人口密度和污水排放量的影响, 黄河口主要受海水养殖的影响。在非河口区, 污水排放量对潮间带间隙水中 DON 影响显著, 由于非河口区养殖降低了氮营养盐尤其是硝酸盐浓度, 海水养殖面积和种类对 DIN 的浓度和结构有明显影响。其中苏北浅滩间隙水中氮主要受污水排放的影响, 北戴河沙滩、四十里湾和英罗湾均受海水养殖的影响。

**关键词:** 潮间带; 氮浓度; 空间分布; 影响因素

中图分类号: P736; X13

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2016)05-0678-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2016.05.007

## Different forms of nitrogen in the typical intertidal zones in China

GUO Hui-li<sup>1</sup>, WANG Yu-jue<sup>2</sup>, GAO Wei-ming<sup>1</sup>, WANG Yan-xia<sup>3</sup>, LIU Dong-yan<sup>2</sup>

(1. Hebei Key Laboratory of Environmental and Ecological Construction, College of Resources and Environment Science, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China; 2. Key Laboratory of Coastal Environmental Processes and Ecological Remediation, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences; Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Environmental Processes, YICCAS, Yantai 264003, China; 3. Institute of Geographic Science, Hebei Academy of Science, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** Spatial distributions of nitrogen in sediment interstitial water and overlying water together with the sediment grain size and human activities were analyzed at 14 typical tidal zones in China to study the nitrogen distribution and related impact factors. The results showed that surrounding human activities played important roles to the nitrogen distribution of the intertidal zones and the nitrogen loadings from the river input explained the higher nitrogen concentrations in sediment interstitial water in the river estuaries compared to the non-estuary zones. Besides, the nitrogen conservation differences related to different sediment grain sizes also affected the nitrogen concentrations in sediment interstitial water. For the estuary intertidal zones, population, agriculture area and sewage discharge increased the DIN

收稿日期: 2015-11-04, 修订日期: 2016-02-25

基金项目: 科技基础性工作专项(2014FY210600); 中国科学院战略先导研究项目(XDA11020405); 国家自然科学基金面上项目(41376121); 山东省自然科学基金(JQ201414)

作者简介: 郭慧丽(1989-), 女, 河北平山人, 硕士, 主要从事资源评价与可持续利用研究, E-mail: guohuili0624@163.com

通讯作者: 王玉珏, 助理研究员, 主要从事近海富营养化及生理生态机制研究, E-mail: yjwang@yic.ac.cn

concentrations in sediment interstitial water and aquaculture mainly showed effects on DON concentrations. Interstitial water nitrogen concentrations in the Daliao River estuary, Jiulong River estuary and the Pearl River estuary were mainly related to the surrounding population, in the Dagu River estuary were related to the population and agriculture area, in the Min River estuary were related to population and sewage discharge, and in the Yellow River estuary were mainly related to aquaculture. For the non-estuary intertidal zones, obvious effects of sewage discharge on DON concentrations were found, and the aquaculture area and type both related to the DIN concentration and structure. For example, Northern Suzhou shoal was mainly affected by sewage discharge and the nitrogen concentration and structure in intertidal zones of Yingluo bay, Sishili bay and Beidai River beaches were mainly affected aquaculture.

**Key words:** intertidal zone; nitrogen; spatial distribution; impact factors

过去 30 a, 受高强度人类活动的影响, 我国近海环境面临严重的富营养化问题, 过量的氮排放导致近海富营养化, 甚至形成赤潮等生态灾害<sup>[1-2]</sup>。2014 年我国富营养化状态的海域面积达 10.4 万 km<sup>2</sup>, 其中重度富营养化海域面积达 35760 km<sup>2</sup>, 赤潮爆发面积累计达 7290 km<sup>2</sup>, 绿潮最大分布面积达 50000 km<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。

潮间带是底栖生物的栖息地、鸟类迁徙中转站及陆海物质交换与能量循环的重要场所<sup>[4]</sup>。围养殖活动引起的有机质不断积累、降解, 以及各类污水的排入, 使潮间带间隙水氮含量升高, 其中大量溶解性物质通过扩散作用影响上覆水体, 加剧底质恶化与水体富营养化<sup>[5-6]</sup>。导致潮间带生物多样性急剧下降, 甚至出现绿潮等生态灾害<sup>[7]</sup>。可见, 了解潮间带环境中氮的分布状况及影响因素, 对控制氮的排放, 缓解近岸富营养化, 开展潮间带生态修复具有重要的作用。

本研究对我国 14 个典型潮间带沉积物间隙水与上覆水中氮的空间分布进行了比较, 结合粒度和人类活动信息, 探讨了其主要影响因素, 以期为我国潮间带环境保护与修复提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样站位与方法

根据我国潮间带沉积物类型、发育特点、分布区域及人类社会经济活动的影响程度, 选取 14 个典型潮间带区域(图 1), 河口区包括: 大河口区(河流径流量 > 500 亿 m<sup>3</sup>/a): 黄河口(山东, 东营)、崇明岛东滩(上海, 崇明岛)、闽江口(福建, 福州)、珠江口(广东, 珠海); 小河口区(河流径流量 < 500 亿 m<sup>3</sup>/a): 大辽河口(辽宁, 营口)、涧河口(天津, 汉沽)、大沽河口(山东, 青岛)、杭州湾南岸(浙江, 慈溪)、和九龙江口(福建, 厦门)。非河口区包括北戴河沙滩(河北, 秦皇岛)、四十

里湾(山东, 烟台)、苏北浅滩(江苏, 盐城)、英罗湾(广西, 北海)和东寨港(海南, 海口)。

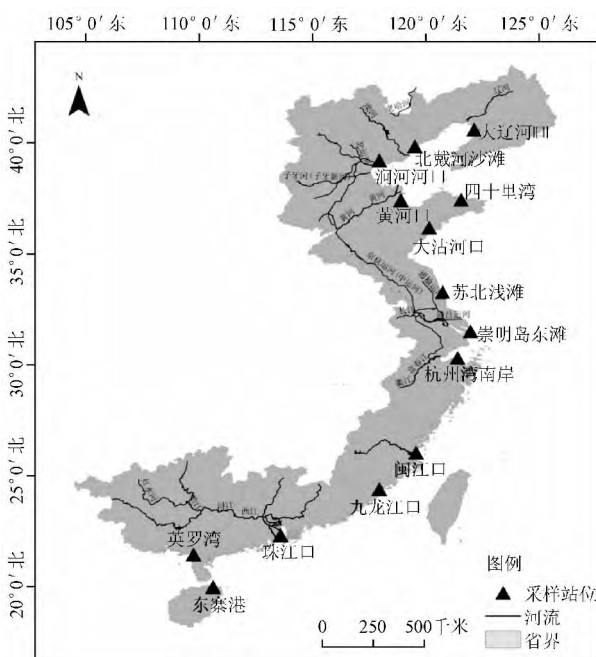


图 1 采样站位

Fig. 1 The sampling sites

分别于 2014 年 9 ~ 10 月期间在长江口以北的 9 个潮间带和 11 ~ 12 月期间在长江口以南的 5 个潮间带开展了样品采集工作。每个潮间带站位设置 3 个采样剖面, 在每个剖面高、中、低潮带三个位点进行间隙水和表层沉积物样品的采样。在采样点挖坑后, 用泥土围住坑口防止上覆水下流, 等待 30 ~ 60 min, 用塑料针管采集坑底聚集的间隙水样品, 转入 100 mL 塑料瓶中, GF/F 膜过滤后置于冰柜中 -20℃ 冷冻保存用于氮营养盐的测定, 每个采样位点均取 3 个平行样, 结果以平均值 ± 标准偏差表示。表层沉积物样品用直径 3 cm 的塑料取样器取表层 0 ~ 2 cm 沉积物, 置于冰柜中 -20℃ 冷冻保存, 每个采样位点取 5 个平行样用于沉积物粒度的分析, 结果以平均值 ± 标准偏

差表示。上覆水样品用 250 mL 塑料瓶进行采集, GF/F 膜过滤后置于冰柜中  $-20^{\circ}\text{C}$  冷冻保存, 用于氮营养盐的测定。在每个剖面对应低潮带的近海取 3 个平行样, 结果以平均值  $\pm$  标准偏差表示。

### 1.2 营养盐与沉积物粒度参数测定

间隙水和上覆水用营养盐自动分析仪(AA3, Bran + Luebbe, German) 测定, 分析方法主要参照《海洋调查规范》(GB/T 12763.4-2007) [8]。氨氮( $\text{NH}_4\text{-N}$ ) 采用水杨酸钠显色法测定, 亚硝酸氮( $\text{NO}_2\text{-N}$ ) 采用重氮-偶氮显色法测定, 硝酸氮( $\text{NO}_3\text{-N}$ ) 采用铜镉还原后重氮-偶氮显色法, 总溶解态氮(TDN) 采用碱式过硫酸钾硝解法硝解, 铜镉还原后重氮-偶氮显色法测定。溶解态无机氮(DIN) 为  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  的浓度之和, 溶解态有机氮(DON) 为 TDN 与 DIN 之差。

沉积物粒度采用激光粒度仪(Malvern 2000, England) 测定, 测定方法主要参照《海洋调查规范》(GB/T12763.8-2007) [9], 测量范围为  $0.02 \sim 2000 \mu\text{m}$ , 误差小于 1%。

### 1.3 数据统计和处理

使用 ArcGis 软件, 在采样点为圆点建立面积为  $1256 \text{ km}^2$  的圆形缓冲区, 对圆形面积内人口密度和农田面积 [10] 进行统计。并对各河流的径流量、各市污水排放量以及海水养殖面积和主要种类进行统计 [11]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 间隙水中不同形态氮的分布特征

间隙水中 TDN、DON 与 DIN 浓度如图 2 所示, 河口区的氮浓度普遍高于非河口区。TDN 的浓度范围为  $47.7 \sim 178.1 \mu\text{mol/L}$ , 最高值出现在珠江口, 最低值出现在杭州湾南岸; DON 浓度范围介于  $10.2 \sim 98.4 \mu\text{mol/L}$  之间, 最高值出现在黄河口, 最低值出现在杭州湾南岸; DIN 浓度范围为  $29.5 \sim 151.5 \mu\text{mol/L}$ , 最高值出现在珠江口, 最低值出现在北戴河沙滩(图 2)。

对不同形态氮的组成进行分析表明: 大辽河口和黄河口中 TDN 的主要组成为 DON, 而其它站位为 DIN。DIN 的组成特征可分为两大类: 辽河口、四十里湾、大沽河口、苏北浅滩、崇明岛东滩、闽江口、九龙江口、珠江口、英罗湾和东寨港的 DIN 以  $\text{NH}_4\text{-N}$  为主; 大辽河口、北戴河沙滩、黄河口和杭州湾南岸以  $\text{NO}_3\text{-N}$  为主。  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量较

低, 最高比例出现在黄河口(图 3)。

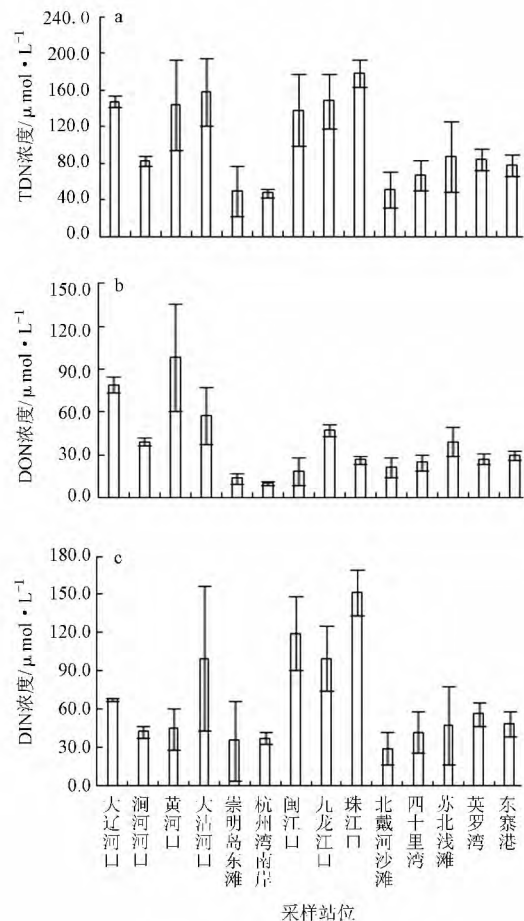


图2 间隙水中 TDN (a)、DON (b) 和 DIN (c) 浓度分布  
Fig. 2 TDN (a), DON (b) and DIN (c) concentrations of interstitial water

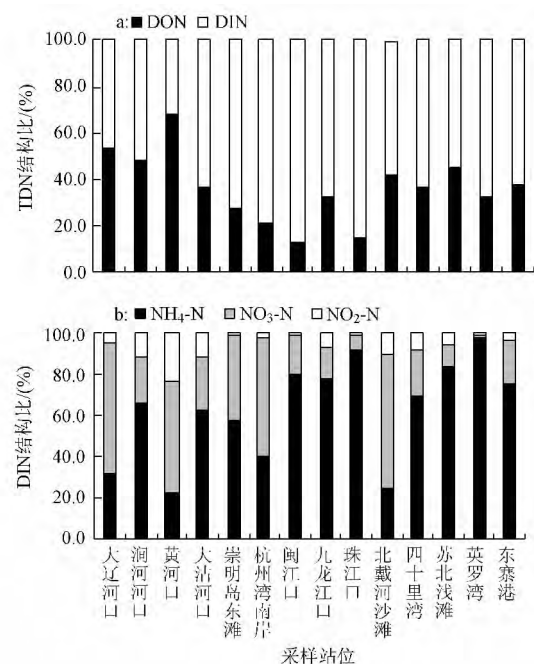


图3 间隙水中 TDN (a) 和 DIN (b) 的结构比例  
Fig. 3 The structure of TDN (a) and DIN (b) of interstitial water

张晋华<sup>[12]</sup> 对大辽河口营养盐的研究, 廖巍<sup>[13]</sup> 对黄河口营养盐及通量的研究, 表明 DIN 结构同本文中间隙水的 DIN 结构是一致的, 说明间隙水氮浓度受高径流量影响。

崇明岛东滩虽受长江径流影响, 流量大且废水排放量高, 但间隙水中氮浓度却相对低, 这可能与河流氮浓度以及废水种类有关。大量生长的互花米草等植物对氮的吸收利用<sup>[14]</sup> 也会降低其浓度, 具体原因需要结合其他数据进一步确定。

## 2.2 上覆水中不同形态氮的分布特征

图4给出上覆水中 TDN、DON 与 DIN 浓度, 河口区上覆水的氮浓度普遍高于非河口区。TDN 浓度为 15.4 ~ 123.7  $\mu\text{mol/L}$ , 最高值出现在大辽河口, 最低值出现在英罗湾浓度; DON 浓度范围为 7.34 ~ 58.3  $\mu\text{mol/L}$ , 最高值出现在大辽河口, 最低值出现在东寨港; DIN 浓度范围为 6.28 ~ 67.3  $\mu\text{mol/L}$ , 其中, 最高值出现在九龙江口, 最低值出现在英罗湾(图4)。与国家海水水质标准比较得出: 大辽河口、大沽河口、崇明岛东滩、杭州湾南岸、闽江口、九龙江口和珠江口站位的上覆水水质均劣于四类水质( $\text{DIN} \leq 0.50 \text{ mg/L}$ ) N 含量超标。

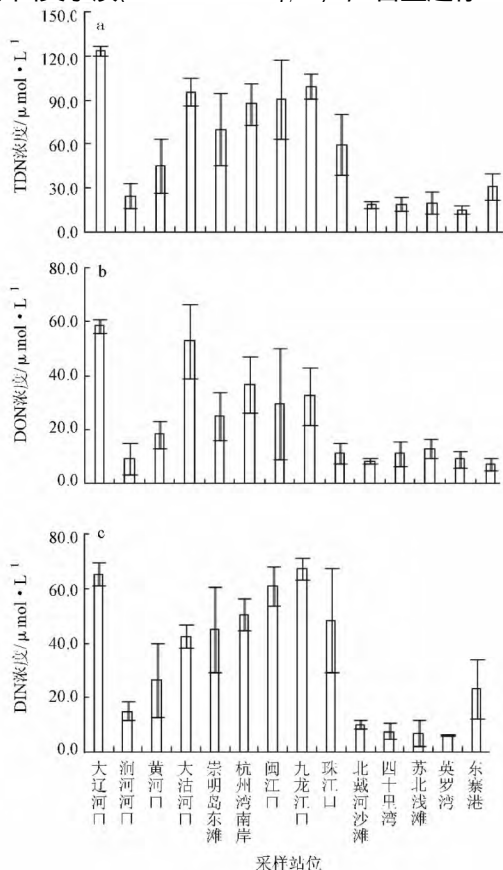


图4 上覆水中 TDN(a)、DON(b) 和 DIN(c) 浓度分布

Fig. 4 TDN (a), DON (b) and DIN (c) concentrations of overlying water

上覆水中 DON 与 DIN 的组成比例如图5所示: 四十里湾、大沽河口、苏北浅滩和英罗湾中 TDN 的主要存在形式为 DON; 而其它站位为 DIN。DIN 的组成类型可分为两大类: 北戴河沙滩、涧河河口、黄河口、四十里湾、苏北浅滩和英罗湾的 DIN 以  $\text{NH}_4\text{-N}$  为主; 大辽河口、大沽河口、崇明岛东滩、杭州湾南岸、闽江口、九龙江口、珠江口和东寨港的 DIN 以  $\text{NO}_3\text{-N}$  为主。  $\text{NO}_2\text{-N}$  含量较低, 最高比例出现在九龙江口(图5)。

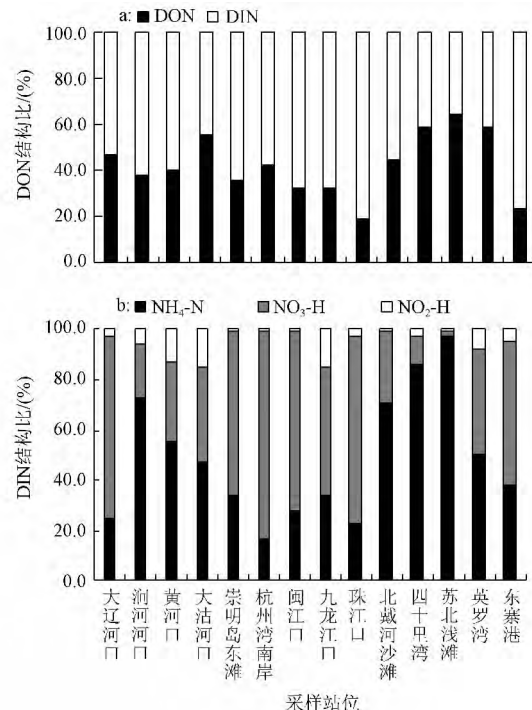


图5 上覆水中 TDN(a) 和 DIN(b) 的结构比例

Fig. 5 The TDN (a) and DIN (b) structures in overlying water

间隙水和上覆水存在的浓度差异, 产生一个分子扩散力<sup>[15]</sup>, 使间隙水和上覆水进行交换, 风浪作用下沉积物再悬浮对氮的交换行为也有一定影响<sup>[16]</sup>。对间隙水和上覆水 TDN 进行相关分析(图6), 两者在总体上呈现正相关性, 表明间隙水和上覆水中 TDN 的交换作用。图上显示有些点比较分散, 部分站位 DIN 组成存在明显区别, 表明除了受上覆水氮浓度影响外, 间隙水中的氮浓度还受其他因素的影响。

## 2.3 沉积物粒径特征

图7给出沉积物中值粒径( $d_{50}$ )及结构比例, 根据沉积物粒度分类(GB/T12763.8-2007)<sup>[9]</sup>, 得出: 北戴河沙滩、四十里湾和英罗湾的沉积物类型为砂; 闽江口、珠江口和东寨港为粉砂质砂; 大辽

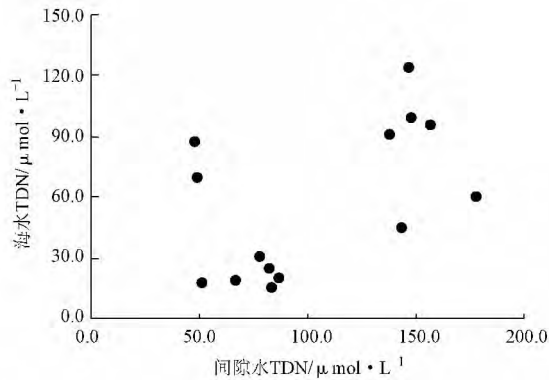


图6 间隙水与上覆水中TDN的相关关系

Fig. 6 The correlation of nitrogen in interstitial water and overlying water

河口、黄河口、大沽河口和苏北浅滩为砂质粉砂；而润河口、崇明岛东滩、杭州湾南岸和九龙江口为粉砂。沉积物粒径与间隙水中氮的浓度密切相关，不同粒径沉积物对氮的吸附解吸作用不同<sup>[17]</sup>，导致富集程度不一致，进而影响其含量。这也是河口区间隙水中氮浓度高的原因之一，也在一定程度上解释了北戴河沙滩等站位氮浓度低的现状。

#### 2.4 间隙水中氮浓度的影响因素

鉴于河口区和非河口区的差异，分别对其影响因素进行讨论。由于缺乏河流整体流域人类活

动和河流氮通量的数据，本文主要结合河流流量和周边人类活动的相关数据对DIN、DON的主要影响因素进行分析(表1,图8)。

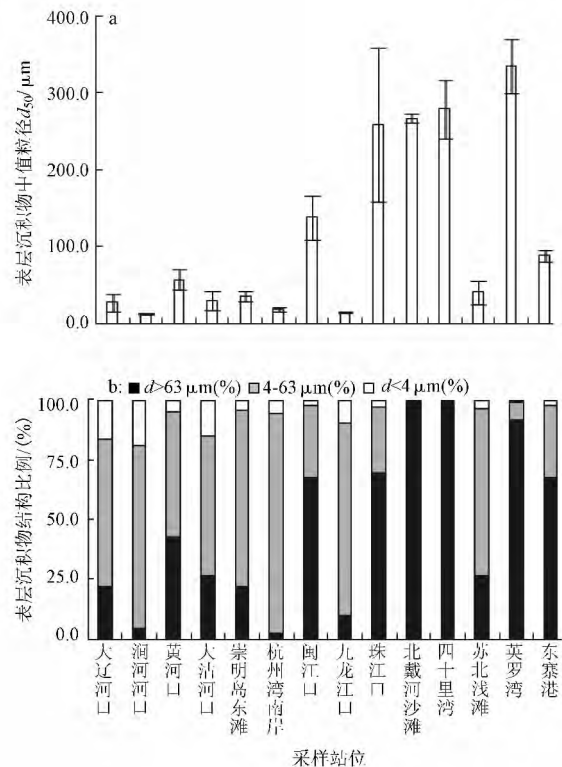


图7 表层沉积物中值粒径及颗粒结构

Fig. 7 The median diameter of surface sediment grain size and structure

表1 河口区河流径流量和人类活动数据<sup>[9-10]</sup>Tab. 1 The river runoff and human activities in estuary area<sup>[9-10]</sup>

采样点	河流	河流径流量 /亿 m <sup>3</sup> · a <sup>-1</sup>	人口密度 /人 · km <sup>-2</sup>	农田面积 /km <sup>2</sup>	污水排放量 /10 <sup>8</sup> t · a <sup>-1</sup>	海水养殖面积 / × 10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> · a <sup>-1</sup>	主要养殖种类
大辽河口	辽河	137	858	72.7	1.03	0.82	对虾、海参
润河口	润河		381	236.6	8.42	9.95	南北美白对虾
黄河口	黄河	592	146	50.4	2.07	104.2	贝类、海参
大沽河口	大沽河	6.61	1717	513.8	4.72	35.0	海参、鱼类
崇明岛东滩	长江	9857	291	118.5	22.3		
杭州湾南岸	钱塘江	431	1139	292.2	0.90	3.99	青蟹、对虾
闽江口	闽江	623	1217	229.1	37.1		鲍鱼
九龙江口	九龙江	149	969	205.6	5.02	11.2	贝类
珠江口	珠江	3381	738	57.9	2.35	14.5	对虾、海鲈

由图8得出，人口密度、农田面积和污水排放量对DIN有一定影响。大沽河口、闽江口、九龙江口和珠江口，人口密度均较大，大沽河口农田面积最高，闽江口污水排放量最大，这都是其间隙水中DIN浓度较高的原因之一<sup>[18]</sup>。另外地下水

输入也可能影响潮间带营养盐的浓度。如九龙江陆源地下水向河口输送DIN约为 $2.78 \times 10^4$  t/a，这可能是导致九龙江间隙水和上层海水高浓度氮的重要来源<sup>[19]</sup>。DON浓度与海水养殖面积呈正相关，海水养殖对间隙水DON浓度影响较大，

可能是由于河口氮营养盐的补充 ,对间隙水中 DIN 影响不明显。黄河口海水养殖面积最大 ,这

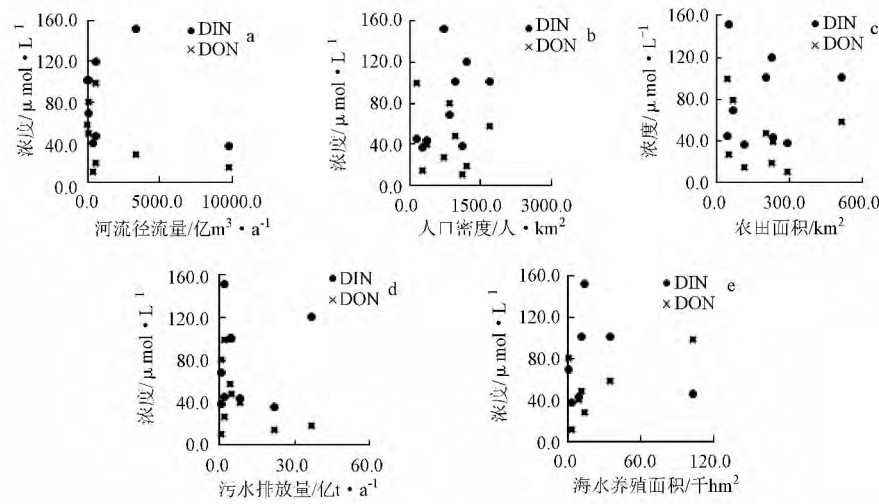


图 8 河口区间隙水中 DIN、DON 与影响因子的相关分析

Fig. 8 The correlations of DIN , DON of interstitial water and impact factors in estuary area

非河口区间隙水中氮主要来源于周边人类活动的输入 ,表 2、图 9 分别对其进行了统计与分析。

由图 9 得出 ,非河口区 DIN 和 DON 与污水排放量和海水养殖面积呈现一定的正相关性 ,污水排放对潮间带 DON 影响显著 ,海水养殖面积与 DIN 的相关性也很明显 ,这可能与非河口区贝类

的养殖降低了氮尤其是  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度有关。养殖种类也影响氮的浓度 ,四十里湾、苏北浅滩、英罗湾和东寨港的养殖均包括双壳贝类 ,饵料投放少 ,且贝类有利于降低氮浓度 ,对水体起到一定的净化作用<sup>[20]</sup> ,导致这四个潮间带氮浓度相对较低。间隙水中高的  $\text{NH}_4\text{-N}$  组成进一步说明了海水养殖的影响。

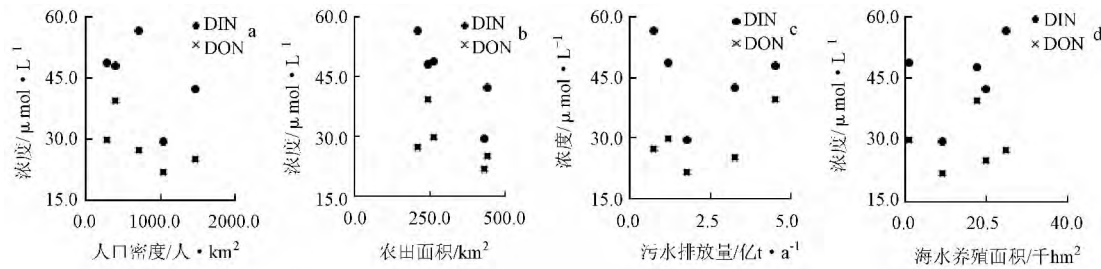


图 9 非河口区间隙水中 DIN、DON 与影响因子的相关分析

Fig. 9 The correlations of DIN , DON and impact factors of interstitial water in non-estuary area

表 2 非河口区人类活动数据<sup>[10-11]</sup>

Tab. 2 The human activities in non-estuary zones<sup>[10-11]</sup>

采样点	地区	人口密度 /人·km <sup>-2</sup>	农田面积 /km <sup>2</sup>	污水排放量 /10 <sup>8</sup> t·a <sup>-1</sup>	海水养殖面积 /×10 <sup>3</sup> hm <sup>2</sup> ·a <sup>-1</sup>	主要养殖种类
北戴河沙滩	秦皇岛	1040	431.7	1.77	9.31	海湾扇贝、河鲀
四十里湾	烟台	1462	443.5	3.26	19.91	双壳贝类
苏北浅滩	盐城	402	246.5	4.53	17.75	文蛤、梭子蟹
英罗湾	北海	723	214.2	0.74	25.06	对虾、文蛤
东寨港	海口	300	264.7	1.20	1.15	贝类、对虾

### 3 结论

(1) 潮间带间隙水中 TDN 的浓度范围为 47.7 ~ 178.1  $\mu\text{mol/L}$ ; DON 浓度范围介于 10.2 ~ 98.4  $\mu\text{mol/L}$  之间; DIN 浓度范围为 29.5 ~ 151.5  $\mu\text{mol/L}$ 。上覆水中 TDN 浓度为 15.4 ~ 123.7  $\mu\text{mol/L}$ ; DON 浓度范围为 7.34 ~ 58.3  $\mu\text{mol/L}$ ; DIN 浓度范围为 6.28 ~ 67.3  $\mu\text{mol/L}$ 。

(2) 间隙水中氮浓度均受到周边人类活动的影响,相对于非河口区,河口区流域氮输入是一个重要影响因素,这可能是河口区浓度高于非河口区的原因之一。沉积物对营养盐的保持能力也是影响其浓度的重要因素,例如,北戴河沙滩、四十里湾和英罗湾。

(3) 在河口区,人口密度、农田面积和污水排放对间隙水中 DIN 浓度有一定影响,人口密度较大的大辽河口、大沽河口、闽江口、九龙江口和珠江口站位,农田面积较大的大沽河口和闽江口,污水排放量最大的闽江口均呈现高 DIN 的特点。黄河口 DON 浓度则主要受海水养殖面积的影响。

(4) 在非河口区,污水排放对 DON 影响显著,例如苏北浅滩。海水养殖面积对 DIN 有明显影响,例如英罗湾。海水养殖种类也影响着潮间带氮营养盐的浓度,例如主要养殖种类为双壳贝类的北戴河沙滩和四十里湾,相对浓度就较低。

### 参考文献:

- [1] 黄小平,田磊,彭勃,等.珠江口海域环境污染研究进展[J].热带海洋学报,2010,29(1):1-7.
- [2] CHARLIER R H, MORAND P, FINKL C W, et al. Green tides on the Brittany Coasts[J]. Environmental Research, Engineering and Management, 2007, 3(41): 52-59.
- [3] 国家海洋局. 2014 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2015.
- [4] 吴宇华. 海岸带研究的深远意义[J]. 地球信息, 1997(2): 55-56.
- [5] 孙丕喜,王宗灵,战闰,等.胶州湾海水中无机氮的分布与富营养化研究[J].海洋科学进展,2005,23(4):466-471.
- [6] 雷坤,郑丙辉,孟伟,等.大辽河口 N、P 营养盐的分布特征及其影响因素[J].海洋环境科学,2007,26(1):19-22,27.
- [7] ZHOU M J, LIU D Y, ANDERSON D M, et al. Introduction to the special issue on green tides in the Yellow Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 163(Part A): 3-8.
- [8] GB/T 12763.4-2007 海洋调查规范 第4部分:海水化学要素调查[S].
- [9] GB/T 12763.8-2007 海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查[S].
- [10] 地球系统科学数据共享网. 2010 年全国人口密度栅格图, 2009 年土地利用栅格图[DB/OL]. <http://www.geodata.cn/Portal/>.
- [11] 中华人民共和国国家统计局. 各省市环境保护状况及水产养殖状况[G]. <http://www.stats.gov.cn/>.
- [12] 张晋华,于立霞,姚庆祯,等.不同季节辽河口营养盐的河口混合行为[J].环境科学,2014,35(2):569-576.
- [13] 廖巍,张龙军,陈洪涛,等.2001-2011 年黄河口营养盐变化及入海通量估算[J].中国海洋大学学报,2013,43(1):81-86.
- [14] HUREK T, HANDLEY L L, REINHOLD-HUREK B, et al. Azotarcus grass endophytes contribute fixed nitrogen to the plant in an unculturable state[J]. Molecular Plant-Microbe Interactions, 2002, 15(3): 233-242.
- [15] 范成新,相崎守弘.好氧和厌氧条件对霞浦湖沉积物-水界面氮磷交换的影响[J].湖泊科学,1997,9(4):337-342.
- [16] WAINRIGHT S C. Sediment-to-water fluxes of particulate material and microbes by resuspension and their contribution to the planktonic food web[J]. Marine Ecology Progress Series, 1990, 62: 271-281.
- [17] VAN RAAPHORST W, MALSCHAERT J F P. Ammonium adsorption in superficial North Sea sediments[J]. Continental Shelf Research, 1996, 16(11): 1415-1435.
- [18] 郑小宏. 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征[J].台湾海峡,2010,29(1):42-46.
- [19] 黄磊.九龙江河口区的地下水输入研究[D].厦门:厦门大学,2009.
- [20] WANG Y J, LIU D Y, RICHARD P, et al. A geochemical record of environmental changes in sediments from Sishili Bay, northern Yellow Sea, China: anthropogenic influence on organic matter sources and composition over the last 100 years[J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, 77(1/2): 227-236.