

# Distribution Characteristics of Dissolved Nutrients and Their Environmental Effect in the Pearl River Estuary

Mingji Ren

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu Sichuan  
Email: renmingji20@163.com

Received: Jun. 26<sup>th</sup>, 2019; accepted: Jul. 16<sup>th</sup>, 2019; published: Jul. 26<sup>th</sup>, 2019

## Abstract

This study aims to investigate the tidal variations of hydrology and dissolved nutrients, based on extensive field measurements during January 3~10, 2016 in the Humen outlet of the Pearl River estuary, and to indicate the nutrient dynamics. The concentration of  $\text{NH}_4$  varied from 0.59~2.06 mg/l, 1.20~3.54 mg/l for  $\text{NO}_3$ , 0.14~0.49 mg/l for  $\text{NO}_2$ , and 0.025~0.063 mg/l for  $\text{PO}_4$  during the sampling time, which demonstrates a significant difference in tidal changes. Salinity and suspended sediment fluctuated with tides, and no big tidal difference was found in water temperature. The role of marine waters on the diluting-mixing process of nitrogen was stronger than that on phosphorus. Compared with nitrogen, phosphorus was scarce in this study, and was a limited factor. The results enable us to develop effective coastal management and to benefit from more focused studies in the functioning of ecological health.

## Keywords

Estuarine Dynamics, Dissolved Nutrients, Principal Component Analysis, Humen Outlet

# 珠江虎门河口营养盐的分布特征及其环境影响

任明吉

中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都  
Email: renmingji20@163.com

收稿日期: 2019年6月26日; 录用日期: 2019年7月16日; 发布日期: 2019年7月26日

## 摘要

基于珠江虎门河口2016年枯季(1月3~10日)水文水质多要素同步观测数据, 采用Pearson相关分析和主成分分析。作者简介: 任明吉(1985-), 河南商丘, 学士, 主要从事水环境、水利工程等相关研究。

析等方法研究河口动力及氮磷营养盐的潮周期变化,并探讨虎门河口营养盐的环境影响机制。结果显示,大、小潮观测期间氨氮浓度变化范围为0.59~2.06 mg/l,硝酸盐氮浓度变化范围为1.20~3.54 mg/l,亚硝酸盐氮浓度变化范围为0.14~0.49 mg/l,磷酸盐浓度变化范围为0.025~0.063 mg/l,且垂向平均浓度分别为1.20 mg/l, 1.84 mg/l, 0.32 mg/l和0.04 mg/l,揭示虎门河口动力驱动下氮磷营养盐的潮周期差异显著。水文要素盐度和含沙量亦随潮汐涨落变化较大,而水温无明显潮周期变化,且各因子对氮磷营养盐的影响机制不同。外海水团对氮营养盐的稀释混合作用强于磷营养盐,而悬浮泥沙对氮营养盐以吸附作用为主,对磷营养盐吸附与解吸附作用共存。研究结果将为珠江口的污染治理及生态修复提供科学依据。

## 关键词

河口动力, 营养盐, 主成分分析, 虎门

Copyright © 2019 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

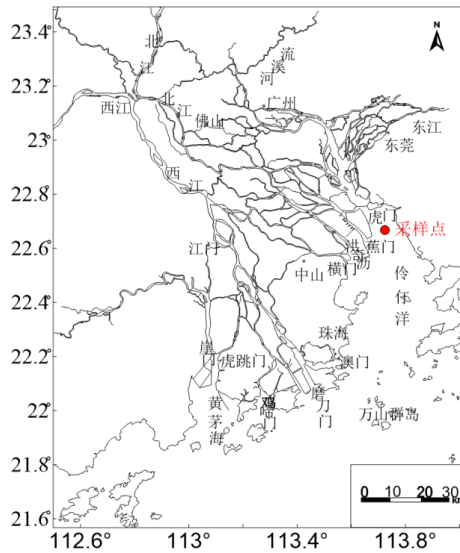
河口区既是陆地与海洋的耦合作用带,又是物质由河流流向海洋的主要运输通道及源/汇区,位置独特,生物地球化学过程复杂[1][2]。河口水体中含有丰富的氮磷等营养资源,其时空变化及迁移转化过程是河口生态系统研究的关注点之一。在河口径流和潮流相互作用下,河口动力结构多变,其环境因子如水温、盐度、悬浮物等具时空变化的特殊性,故河口动力驱动下氮磷等营养盐的行为特征及其影响机制具有独特性[3][4]。Vipindas等研究了Cochin河口营养盐的季节变化特征[5],Mosier和Francis分析了San Francisco河口水体中氮的环境效应[6],Liu等调查分析了黄河口人类活动对营养盐过程的影响[7],肖凯恩分析了珠江口海域营养盐比例[8]。因此,研究河口氮磷等营养盐的分布特征及其动力机制具重要科学意义。

珠江河口具有“三江汇流、八口入海”的自然属性,大量氮、磷和有机污染物通过八大口门(图1,虎门、蕉门、洪奇沥、横门、磨刀门、虎跳门、鸡啼门和崖门)进入珠江口并输送至南海。不同河口类型(潮优型、河优型)其动力结构存在显著差异,导致河口生态过程不同[9]。其中,虎门河口是连接狮子洋和伶仃洋的关键节点,是珠江河口潮动力最强的河口;在枯季,径流量较小,潮汐动力占主导,盐淡水混合作用较强;也是广州、东莞和佛山三大城市污染物排放的主要运输通道。过量营养盐破坏了水体中营养结构的生态平衡,造成富营养化,致使浮游植物大量繁殖,多次引发赤潮,严重威胁渔业资源和河口环境[10]。关于河口动力结构对营养盐的影响已有较多研究[8][11],而珠江虎门河口营养盐的分布特征及其对动力响应的分析较少。本研究基于珠江虎门河口枯季(2016年1月3~10日)水文水质多要素连续观测数据,采用主成分分析(principal component analysis, PCA)和Pearson相关分析研究河口氮磷营养盐对动力结构的响应关系,揭示盐度和含沙量对营养盐的不同影响机制,为珠江河口污染治理及生态修复提供科学依据。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 研究区域概况

珠江虎门河口是东江干流的主要入海口,平均年径流量为 $6.03 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,年均输沙量为 $6.58 \times 10^6 \text{ t}$ ,为珠江八大口门中潮汐动力最强的潮优型河口,潮汐吞吐量为八大口门之首,潮汐为不正规半日混合潮型,潮流为往复流,年均潮差为1.61~1.66 m,平均涨潮流速为1.3 m/s,落潮流速1.4 m/s,多年平均进潮总量为 $2.29 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,是其下泄径流总量的3.6倍[12][13]。涨潮量占东四口门总量的80.5%,尤其枯季径流量小,潮流量大,盐



**Figure 1.** Sketch map of the Pearl River estuary and sampling site in the Humen outlet  
**图 1.** 珠江口位置及虎门采样点布设

水沿虎门上溯至狮子洋，可达距口门 42 km 的黄埔。涨潮时，潮水由口外向湾涌入，地形束窄，能量聚集，因此潮差增大，流束集中，水流对河床冲刷作用强烈；落潮时，水流退泄，流速加大，使河槽刷深加剧。

## 2.2. 样品采集及处理

在珠江虎门河口进行连续 26 h 定点观测及样品采集，观测时间为 2016 年 1 月 3~4 日(小潮)和 9~10 日(大潮)。采用有机玻璃采水器，逐时采集观测期间垂线表(0.2 H, H 代表观测时水深)、中(0.6 H)、底(0.8 H)三层水样。水文要素温度、盐度和水深使用 optical backscatter point sensor (OBS-3A)现场测定。用于含沙量和营养盐分析的水样，现场抽滤，滤液与滤膜带回实验室分析。所有样品的采集、运输及处理均按照《海洋监测规范》和《海洋调查规范》执行。

## 2.3. 数据分析

本研究采用 Pearson 相关分析和主成分分析(principal component analysis, PCA)等方法研究珠江虎门河口动力对氮磷营养盐的影响。Pearson 相关分析和主成分分析使用 SPSS 软件完成。

# 3. 结果与讨论

## 3.1. 虎门河口动力潮周期变化

本研究中虎门河口的动力结构主要关注大、小潮涨落过程中流速、水温、盐度和含沙量的潮周期变化，逐时分布如图 2 所示。

### 3.1.1. 流速

连续观测期间，大潮平均流速为 0.49 m/s，小潮平均流速为 0.21 m/s (文中实测数据用正值表示落潮流，用负值表示涨潮流)。大潮平均流速明显大于小潮，流速变化越大，水体紊动作用越强，对营养盐的影响也越显著。大潮期间涨潮流速范围为 0.06~0.68 m/s，落潮流速范围为 0.1~0.91 m/s，落潮历时(16 h)大于涨潮历时(10 h)。小潮涨潮流速范围为 0.09~0.39 m/s，落潮流速范围为 0.02~0.41 m/s，且涨潮历时(6 h)明显小于落潮历时(20 h)。与大潮相比，垂向流速分布出现明显差异，主要表现在两次涨急时刻。落急时刻，流速出现明显的垂向梯度，表

层流速大于底层流速。

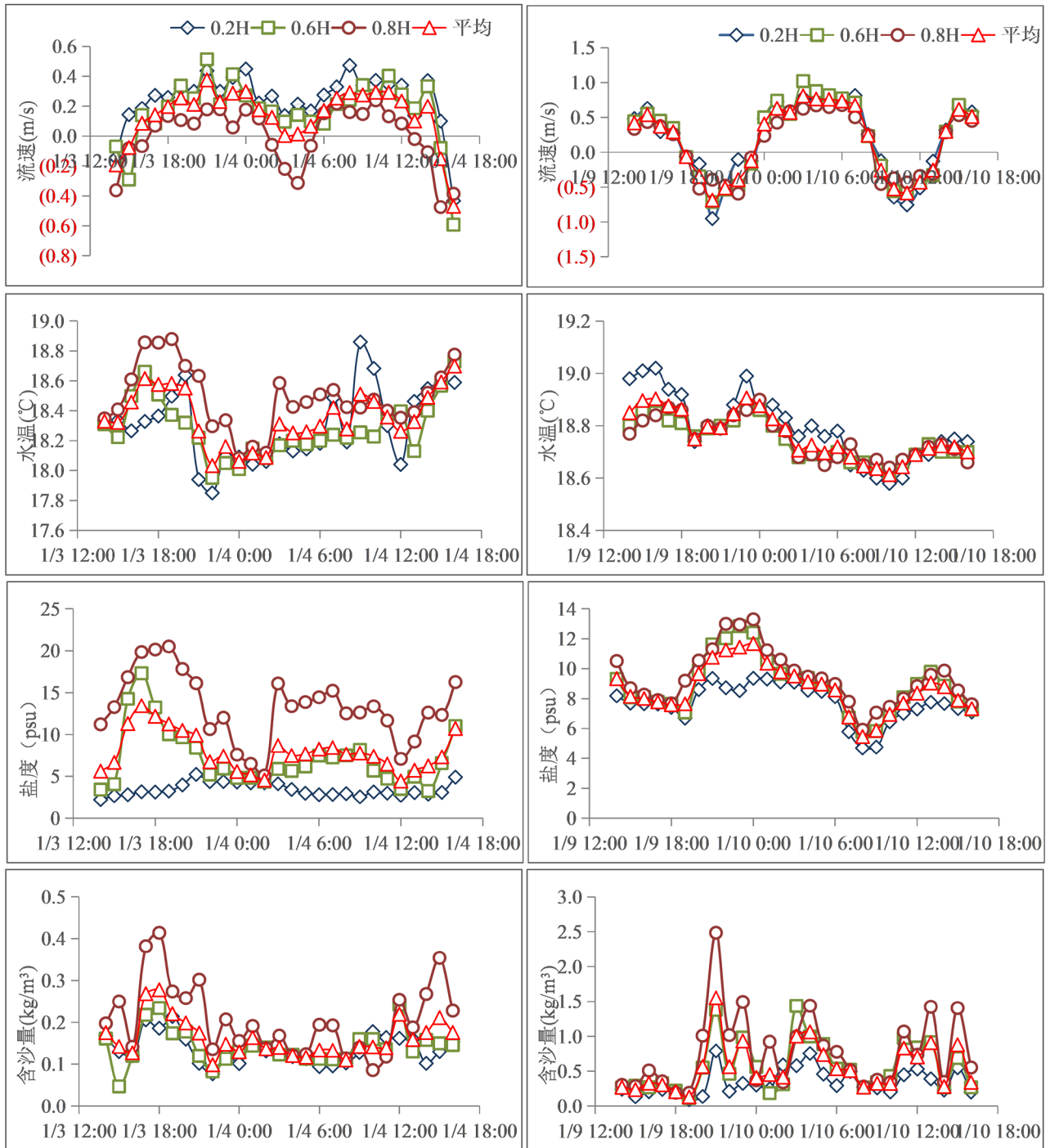


Figure 2. Tidal changes of hydrological factors at three layers and vertical-averaged values in the Humen outlet (neap tide: 3~4, spring tide: 9~10)

图 2. 珠江虎门河口水文要素各水层及垂向平均的潮周期变化(小潮: 3~4 日, 大潮: 9~10 日)

### 3.1.2. 水温

虎门河口观测期间大、小潮水温差异不显著。大潮平均温度为 18.76°C，略高于小潮的 18.31°C。表层水体

温度易受气温影响,本次观测时间为枯季,温度变化范围小,气温低,大潮期间温度垂向分布均匀,小潮期间表层温度略低于底层。

### 3.1.3. 盐度

采用 Hansen 和 Rattray 所提出的分层系数来分析珠江虎门河口盐淡水混合情况[14]。大潮期间虎门河口表、中和底层盐度范围分别为 4.70‰~9.36‰、5.78‰~12.84‰和 5.92‰~12.95‰,垂向上盐度随水深增大而增大,中、底层盐度较为接近,表层受径流影响,盐度偏小。由分层系数计算结果可知,大潮分层系数变化范围为 0.08~0.35,均值为 0.19,水体为部分混合型。小潮期间虎门河口表、中和底层盐度范围分别为 2.22‰~4.91‰, 3.25‰~17.31‰和 5.10‰~20.52‰,盐度随水深增大而增大,且垂向变化梯度大。小潮分层系数变化范围为 0.19~2.00,均值为 1.34,水体为高度分层结构。

### 3.1.4. 含沙量

连续观测大潮期间,虎门河口表层悬沙浓度为 0.09~0.76 kg/m<sup>3</sup>,中层为 0.11~1.44 kg/m<sup>3</sup>,底层为 0.19~2.49 kg/m<sup>3</sup>。潮汐涨落过程中,水体悬浮颗粒物含量随流速的增大,水体中含沙量浓度增大,在涨急和落急时刻,因泥沙再悬浮,悬沙浓度出现峰值,中、底层的悬沙浓度明显增大,表层浓度增大不明显。小潮涨落潮过程中表、中和底层悬沙浓度范围分别为 0.08~0.26 kg/m<sup>3</sup>、0.05~0.24 kg/m<sup>3</sup>和 0.09~0.41 kg/m<sup>3</sup>,表、中层差异较小,底层悬沙浓度较大,变化趋势一致,且变化范围较小,较大悬沙浓度出现在憩流时刻近底层附近。

## 3.2. 营养盐潮周期变化

### 3.2.1. 营养盐浓度

虎门河口枯季大、小潮期间各项营养盐浓度涨落潮逐时分布剖面图如图 3 所示。大潮时, PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub> 和 NO<sub>3</sub> 浓度的变化范围分别为 0.025~0.063 mg/L、0.67~2.06 mg/L、0.14~0.30 mg/L 和 1.25~3.54 mg/L,垂线平均浓度分别为 0.046 mg/L、1.41 mg/L、0.24 mg/L 和 1.82 mg/L。垂向上, PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub> 各层平均浓度均表现为表层 > 中层 > 底层,表层水体 PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub> 的平均浓度为底层的 121%、130%; NO<sub>2</sub> 垂向分布相对比较均匀; NO<sub>3</sub> 表层浓度略低,表层平均浓度比中、底层低 10%左右。

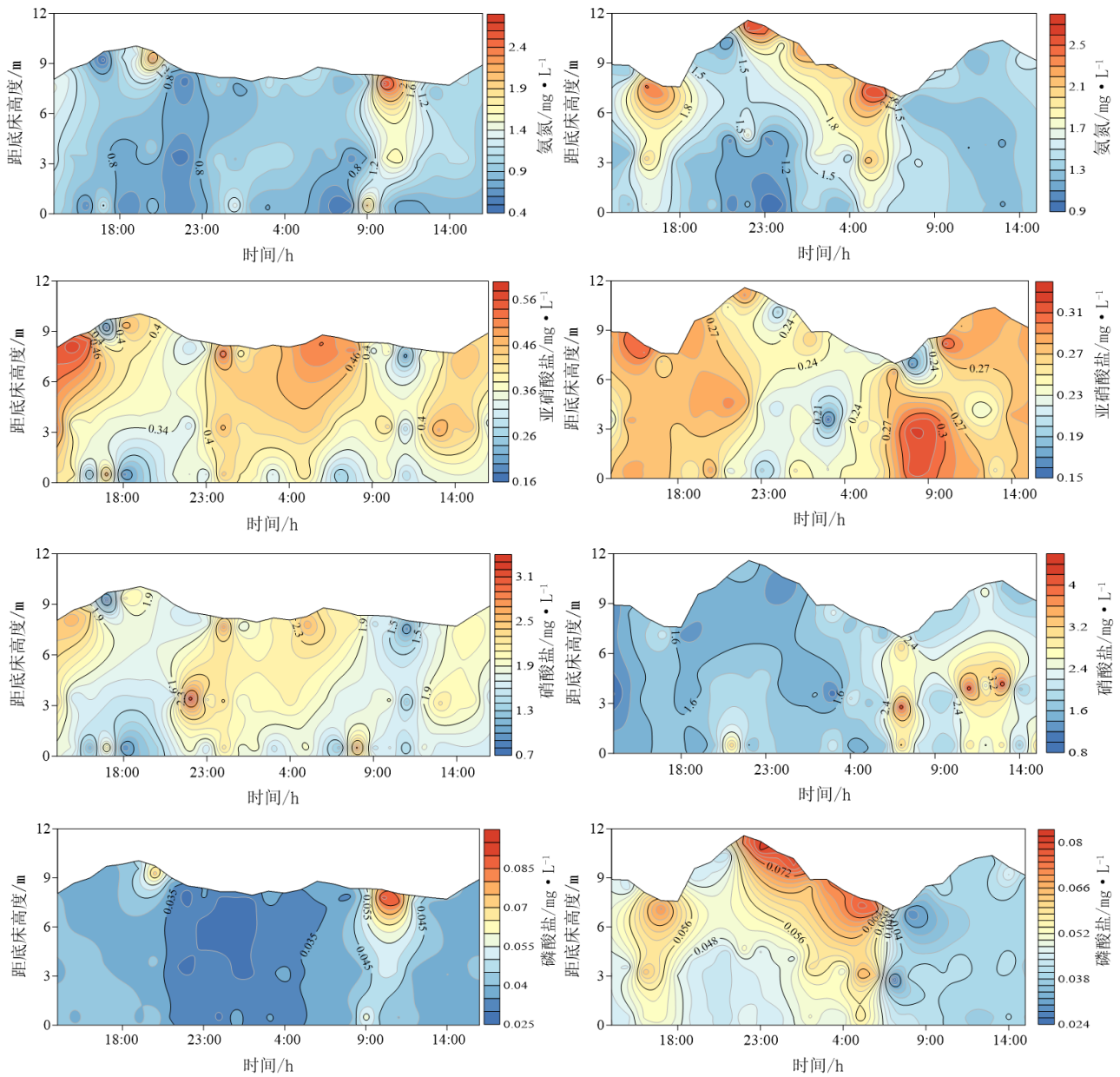
小潮期间, PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub> 和 NO<sub>3</sub> 浓度的变化范围分别为 0.029~0.062 mg/L、0.59~1.74 mg/L、0.26~0.49 mg/L 和 1.20~2.42 mg/L,垂线平均浓度分别为 0.039 mg/L、1.00 mg/L、0.39 mg/L 和 1.85 mg/L。垂向上, PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub> 和 NO<sub>3</sub> 各层平均浓度表现为表层 > 中层 > 底层,表层水体 PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub>、NO<sub>2</sub> 和 NO<sub>3</sub> 的平均浓度分别为底层的 109%、136%、126%和 117%。

对比大小潮各项营养盐的浓度,大潮 PO<sub>4</sub>、NH<sub>4</sub> 和 NO<sub>3</sub> 垂线平均浓度和各水层的平均浓度均大于小潮,垂线平均浓度分别为小潮的 1.24、1.52、1.05 倍; NO<sub>2</sub> 垂线平均浓度和各水层的平均浓度则是小潮更大,大潮 NO<sub>2</sub> 垂线平均浓度仅为小潮的 67%。

### 3.2.2. 营养盐结构

海洋浮游生物 N/P 的正常摩尔比值为 12~22,平均值为 16,与大洋水体比例相似。水环境可利用的氮与磷在这一比例范围被认为是最适宜浮游生物生长。虎门河口可溶态的氮磷比远超出适宜范围(表 1),大潮垂线平均 DIN/DIP 达 177.5 (DIN = NO<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> + NH<sub>4</sub>),小潮垂线平均 DIN/DIP 达 188.6。结果显示,该水域氮营养盐充足,其中浮游植物生长可利用的溶解态氮非常丰富,而可利用的溶解态磷显得十分贫乏,表明磷是该水域水环境的主要限制因素,即磷限制,与已有研究吻合[7]。这是因为溶解态氮的主要来源为径流输入,而径流对磷酸盐的贡献不显著,故磷营养盐被消耗得不到及时补充[15]。尤其是在小潮期间,水体高度层化(盐度分布为高度分层型)阻碍表底层水体之间的营养盐交换,使得表层磷先于氮被耗尽,导致表、中层平均氮磷比大于底层。





**Figure 3.** Time series profiles of dissolved nutrients during the spring and neap tide in the Humen outlet  
**图 3.** 虎门河口大、小潮期间营养盐的时间剖面图(左:大潮, 右:小潮)

**Table 1.** Ratio of DIN and DIP during the field time period in the Humen outlet  
**表 1.** 虎门河口枯季可溶性氮磷比

	统计值	表层	中层	底层	垂线平均
大潮	最小值	92.2	113.0	138.4	120.2
	最大值	265.6	536.9	272.7	352.7
	平均值	164.4	187.8	180.3	177.5
小潮	最小值	80.5	144.4	84.3	121.1
	最大值	322.4	309.1	286.3	290.5
	平均值	199.0	199.2	167.5	188.6

### 3.3. 河口动力结构对氮磷营养盐的影响

#### 3.3.1. Pearson 相关分析

枯水期, 河口区以高盐度低营养盐的冲淡水为主体。受径-潮动力影响, 水体分层或强烈混合导致营养盐分布及结构发生剧烈的变化[16], 其变化的典型特点是河口动力的驱动作用。径流是河口区营养盐的主要来源, 而海水入侵则起着稀释作用。受季风和径流影响, 珠江河口表层盐度空间分布总体趋势为自口门向外海逐渐增加。径-潮相互作用主要由盐度参数表征; 水动力强弱主要由流速参数体现; 悬浮泥沙是营养盐的重要载体, 营养盐易被吸附在泥沙颗粒上, 改变营养盐的分布。

虎门河口大、小潮各项营养盐与水文要素间的 Pearson 相关系数如表 2 所示。结果显示, 小潮  $PO_4$  与流速、水深、盐度和悬沙浓度的相关性均不显著, 而大潮  $PO_4$  与流速显著相关; 小潮  $NO_3$  以及大潮  $NO_2$  均与悬沙浓度呈显著负相关, 说明悬浮泥沙对以上营养盐以吸附作用为主, 悬沙浓度越高, 吸附的营养盐越多, 导致水体中溶解态营养盐浓度下降; 大潮  $NO_3$  与悬沙浓度呈正相关, 说明悬浮泥沙对  $NO_3$  以解吸附作用为主, 悬沙浓度越大, 解吸的  $NO_3$  越多,  $NO_3$  浓度提升; 大、小潮氮营养盐( $NH_4$ 、 $NO_2$ 、 $NO_3$  和 DIN)均与盐度呈负相关, 这是因为高盐度低营养盐的外海水团对其具有稀释作用, 盐淡水混合使水体盐度升高而营养盐浓度下降。

Table 2. Pearson correlations between hydrological factors and nutrients

表 2. 虎门河口水文要素与各项营养盐的相关关系

		流速	悬沙浓度	盐度	温度	水深
小潮	$NH_4$	-0.055	0.029	-0.206	0.28	-0.171
	$NO_2$	-0.538*	-0.284	-0.402*	-0.305*	-0.369*
	$NO_3$	-0.289	-0.505*	-0.491*	-0.628*	-0.422*
	DIN	-0.347*	-0.413*	-0.597*	-0.322*	-0.512*
	$PO_4$	0.156	0.19	0.146	0.577*	0.121
大潮	$NH_4$	0.488*	-0.392*	-0.09	0.165	-0.46*
	$NO_2$	-0.012	-0.585*	-0.466*	-0.036	-0.32*
	$NO_3$	-0.022	0.206	-0.331*	-0.442*	-0.171
	DIN	0.222	-0.065	-0.337*	-0.273	-0.383*
	$PO_4$	0.515*	-0.27	0.274	0.415*	-0.224

表中, \*代表显著相关。

分别绘制大、小潮悬沙浓度、盐度与 DIN 的分层散点分布图(图 4、图 5), 探讨虎门河口大、小潮各水层悬沙浓度和盐度对无机氮的影响。可看出, 虎门河口小潮期间, 各层 DIN 浓度均随悬沙浓度的增大而减小, 表明小潮期间悬浮泥沙对 DIN 以吸附作用为主; 而大潮期间, 各层 DIN 浓度均随悬沙浓度的增大而增大, 表明大潮期间悬浮泥沙对 DIN 主要以解吸附作用为主。虎门河口大、小潮各层 DIN 浓度均随盐度的增加而降低, 体现了盐淡水混合作用下, 高盐度低营养盐的外海水团对水体氮营养盐的稀释作用。

#### 3.3.2. 主成分分析

为进一步探究虎门河口枯季营养盐的主要驱动因子, 分别对大、小潮各项营养盐的影响因素进行主成分分析, 结果如表 3、表 4 所示。结果显示, 小潮前三个主成分和大潮前四个主成分累计贡献率分别达 83.2%和 89.0%, 可代表变量的大部分信息。

虎门河口大、小潮前两个主成分旋转因子载荷矩阵如图 6 所示, 虎门河口小潮第一主成分主要由水文要素主导(特征值为 3.25, 占总方差的 36.15%); 第二主成分主要由  $PO_4$  和  $NH_4$  贡献较多(特征值为 2.33, 占总方差的 25.87%)。各个主成分相互独立, 揭示了不同水文因子对营养盐的贡献。小潮时水温和含沙量对磷酸盐的影响较

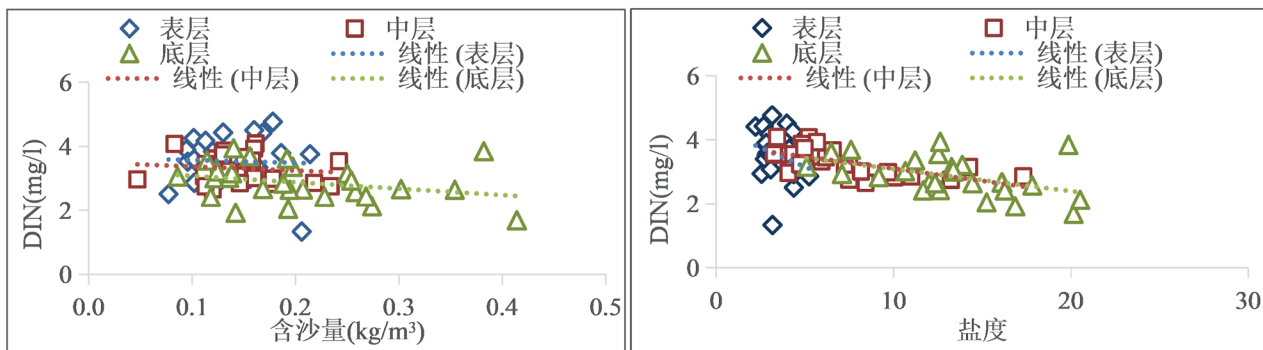


Figure 4. Scatter plots of suspended sediment, salinity and DIN during the neap tide at three water layers in the Humen outlet  
 图 4. 虎门河口枯季小潮期间悬沙浓度、盐度与 DIN 分层散点分布

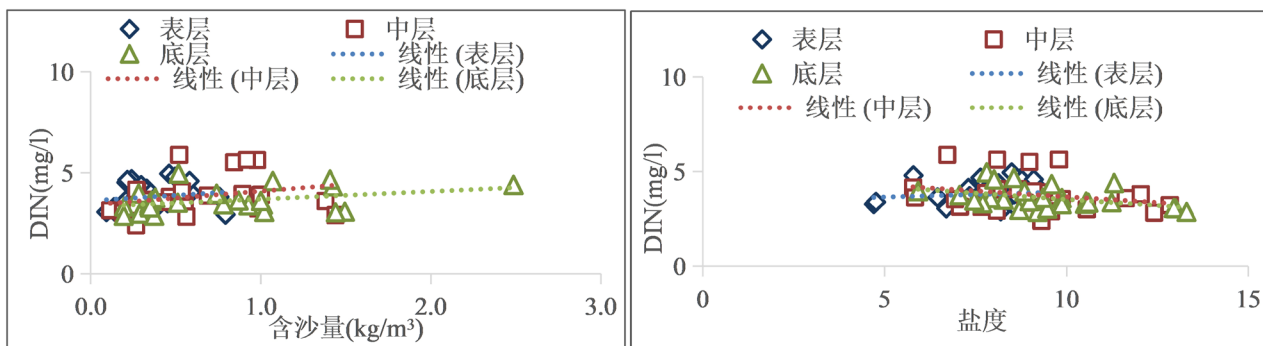


Figure 5. Scatter plots of suspended sediment, salinity and DIN during the spring tide at three water layers in the Humen outlet  
 图 5. 虎门河口枯季大潮期间悬沙浓度、盐度与 DIN 分层散点分布

大，而流速对硝酸盐和亚硝酸盐作用较显著。同时显示盐度与磷营养盐的正相关关系，与氮营养盐呈负相关，与 Pearson 相关分析结构一致。小潮观测期间氮磷营养盐的主要影响因素为盐度、水深、含沙量和水温。

虎门河口大潮第一主成分中  $PO_4$  和  $NH_4$  为主要组成部分(特征值为 2.50，占总方差的 27.78%)；第二主成分中盐度贡献较多(特征值为 2.10，占总方差的 23.29%)。结果显示，盐度和水温对磷酸盐的影响较大，而流速对硝酸盐和亚硝酸盐的影响较突出。大潮观测期间氮磷营养盐的主要影响因素为流速和盐度。综上所述，虎门河口枯季大、小潮动力结构不同，其对氮磷营养盐的影响机制也不同。

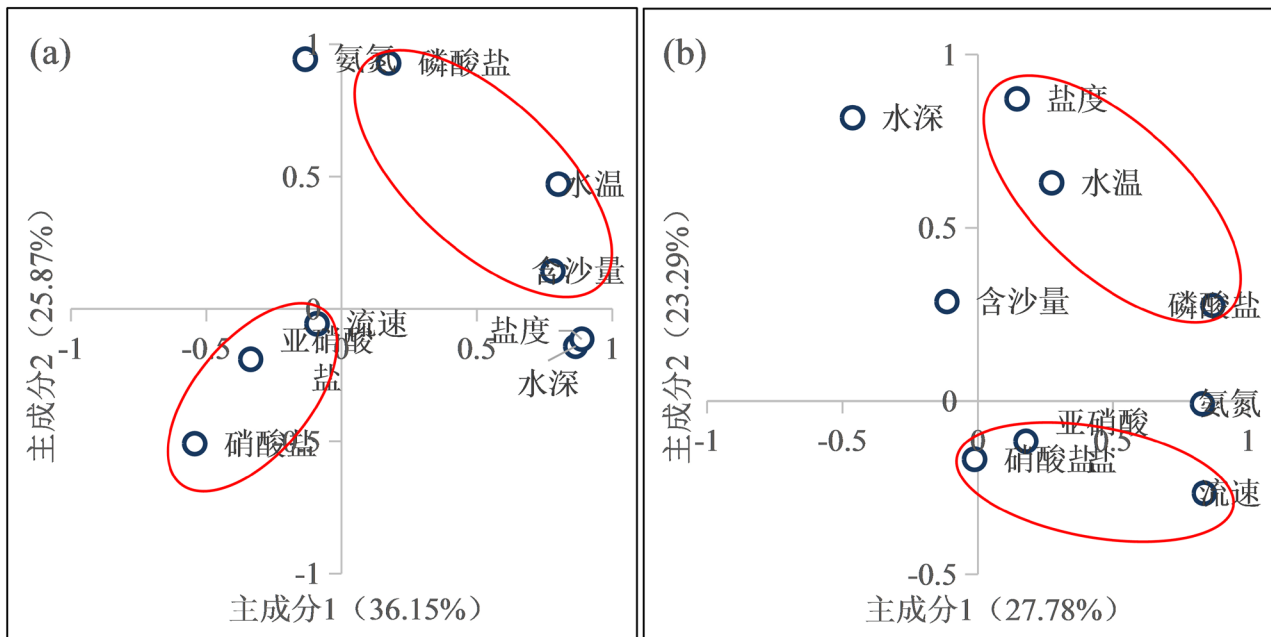
Table 3. Principal component analysis of nutrients and hydrological factors during the neap tide  
 表 3. 虎门河口枯季小潮环境因子主成分分析结果

主成分	初始特征值			旋转后的平方和		
	合计	方差%	累计%	合计	方差%	累计%
1	4.005	44.497	44.497	3.254	36.155	36.155
2	1.996	22.181	66.679	2.328	25.869	62.024
3	1.485	16.497	83.175	1.904	21.151	83.175
4	0.598	6.643	89.818			
5	0.444	4.933	94.75			
6	0.234	2.601	97.351			
7	0.149	1.653	99.005			
8	0.064	0.713	99.717			
9	0.025	0.283	100			



**Table 4.** Principal component analysis of nutrients and hydrological factors during the spring tide  
**表 4.** 虎门河口枯季大潮环境因子主成分分析结果

主成分	初始特征值			旋转后的平方和		
	合计	方差的%	累计%	合计	方差的%	累计%
1	3.198	35.535	35.535	2.501	27.785	27.785
2	2.471	27.455	62.99	2.096	23.293	51.078
3	1.265	14.053	77.044	1.956	21.73	72.808
4	1.076	11.96	89.004	1.458	16.196	89.004
5	0.47	5.219	94.223			
6	0.284	3.156	97.379			
7	0.138	1.535	98.913			
8	0.061	0.683	99.596			
9	0.036	0.404	100			



**Figure 6.** Rotated loading matrices of the first two components during the spring and neap tide in the Humen outlet: (a) neap tide; (b) spring tide

**图 6.** 虎门河口枯季环境因子第一、第二主成分旋转因子载荷矩阵：(a) 小潮；(b) 大潮

#### 4. 结论

本研究基于珠江虎门河口 2016 年枯季连续观测数据，分析河口动力和氮磷营养盐的潮周期变化，探讨河口动力对营养盐的控制作用，主要结论如下：

1) 氮营养盐与盐度呈显著负相关，说明虎门河口氮营养盐主要是河流入海的贡献，其分布主要受到沿岸入海河流径流以及外海洋流强烈混合作用及其相互消长影响。

2) 氮营养盐与悬沙浓度总体上呈显著负相关，悬浮泥沙对氮营养盐以吸附作用为主；磷营养盐与悬沙浓度关系不显著，悬沙对磷营养盐吸附与解吸作用并存。

3) 枯季氮磷比远大于海洋浮游生物正常摩尔比值, 该水域整体表现为磷限制。

## 致谢

衷心感谢中山大学河口海岸研究所罗向欣、牛丽霞和罗珮珍提供河口基础数据, 在论文写作中给予建议和指导并对论文进行修改。

## 基金项目

国家自然科学基金青年基金项目(编号: 51709289, 41506104)。

## 参考文献

- [1] LUO, X., YANG, S. and ZHANG, J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary, and subsequent sediment dispersal in the East China Sea. *Geomorphology*, 2012, 179: 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.05.034>
- [2] GAN, J., LU, Z., CHEUNG, A., DAI, M., LIANG, L., HARRISON, P. J. and ZHAO, X. Assessing ecosystem response to phosphorus and nitrogen limitation in the Pearl River plume using the Regional Ocean Modeling System (ROMS). *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119: 8858-8877. <https://doi.org/10.1002/2014JC009951>
- [3] 罗珮珍, 牛丽霞, 罗向欣, 蔡华阳, 杨清书. 珠江磨刀门河口枯季叶绿素 a 环境因子驱动分析[J]. *广东海洋大学学报*, 2019, 39(2): 83-93.  
LUO Peizhen, NIU Lixia, LUO Xiangxin, CAI Huayang and YANG Qingshu. Environmental controls of phytoplankton chlorophyll-a during the dry season in the Modaomen outlet of the Pearl River Estuary. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2019, 39(2): 83-93. (in Chinese)
- [4] 李俊龙, 郑丙辉, 张铃松, 金小伟, 胡序朋, 刘方, 邵君波. 中国主要河口海湾富营养化特征及差异分析[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(2): 506-516.  
LI Junlong, ZHENG Binghui, ZHANG Lingsong, JIN Xiaowei, HU Xupeng, LIU Fang and SHAO Junbo. Eutrophication characteristics and variation analysis of estuaries in China. *China Environmental Science*, 2016, 36(2): 506-516. (in Chinese)
- [5] VIPINDAS, P. V., ABDULAZIZ ANAS, K. V., JAYALAKSHMY, K. R., LALLU, P. Y. and BENNY, N. S. Impact of seasonal changes in nutrient loading on distribution and activity of nitrifiers in a tropical estuary. *Continental Shelf Research*, 2018, 154: 37-45. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2018.01.003>
- [6] MOSIER, A. C., FRANCIS, C. A. Relative abundance and diversity of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in the San Francisco Bay estuary. *Environmental Microbiology*, 2008, 10: 3002-3016. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2008.01764.x>
- [7] LIU, S. M., LI, L. W., ZHANG, G. L., LIU, Z., YU, Z. G. and REN, J. L. Impacts of human activities on nutrient transports in the Huanghe (Yellow River) estuary. *Journal of Hydrology*, 2012, 430-431: 103-110. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.02.005>
- [8] 肖凯恩. 珠江口东海域营养盐比例及其对藻类的影响[J]. *环境保护科学*, 2012, 38(3): 14-24.  
XIAO Kaien. Nutrients proportion and its impact on algae in the east estuary of Pearl River. *Environmental Protection Science*, 2012, 38(3): 14-24. (in Chinese)
- [9] 王先伟, 温伟英, 刘翠梅. 珠江口及附近海域夏季氮的化学形式分布研究[J]. *海洋科学*, 2003, 27(4): 49-53.  
WANG Xianwei, WEN Weiyong and LIU Cuimei. Study on distributions of chemical species of nitrogen in summer in the Pearl River estuary and its adjacent sea areas. *Marine Sciences*, 2003, 27(4): 49-53. (in Chinese)
- [10] WANG, G., CAO, W., YANG, Y., ZHOU, W., LIU, S. and YANG, D. Variations in light absorption properties during a phytoplankton bloom in the Pearl River estuary. *Continental Shelf Research*, 2010, 30: 1085-1094. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.02.010>
- [11] YIN, K., HARRISON, P. J. Nitrogen over enrichment in subtropical Pearl River estuarine coastal waters: Possible causes and consequences. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1435-1442. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2007.07.010>
- [12] 李春初, 雷亚平. 认识珠江, 保护珠江——试论广州至虎门潮汐水道的特性和保护问题[J]. *热带地理*, 1998, 18(1): 24-28.  
LI Chunchu, LEI Yaping. On the property and maintenance of the tidal channel of the Pearl River system from Guangzhou city to the Humen inlet. *Tropical Geography*, 1998, 18(1): 24-28. (in Chinese)
- [13] 任杰, 吴超羽, 包芸. 珠江虎门口动力结构研究[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(3): 106-109.  
REN Jie, WU Chaoyun and BAO Yun. Dynamic structure of Humen estuary of the Pearl River. *Journal of Sun Yatsen University*, 2006, 45(3): 106-109. (in Chinese)
- [14] HANSEN, D. V., RATTRAY, M. New dimensions in estuary classification. *Limnology and Oceanography*, 1966, 11(3):

319-326. <https://doi.org/10.4319/lo.1966.11.3.0319>

- [15] 黄小平, 黄良民. 珠江口海域无机氮和活性磷酸盐含量的时空变化特征[J]. 台湾海峡, 2002, 21(4): 416-421.  
HUANG Xiaoping, HUANG Liangmin. Temporal and spatial variation characteristics of inorganic nitrogen and active phosphorus in Zhujiang estuary. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2002, 21(4): 416-421. (in Chinese)
- [16] 张伟, 孙健, 聂红涛, 姜国强, 陶建华. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(12): 4034-4044.  
ZHANG Wei, SUN Jian, NIE Hongtao, JIANG Guoqiang and TAO Jianhua. Seasonal and spatial variations of nutrient and the response of phytoplankton in PRE and Adjacent Sea Areas. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(12): 4034-4044. (in Chinese)