

九龙江河口区营养盐分布特征及其影响因素分析

黄海宁¹, 林彩^{1,2}, 暨卫东¹, 孙秀武¹, 刘洋¹, 贺青¹, 陈宝红¹, 林辉^{1,2}

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 海洋与地球学院, 福建 厦门 361005)

摘 要: 根据 2009、2010 年“丰水期”和“枯水期”四航次九龙江河口混合区的调查资料, 且结合历史资料对营养盐含量及分布特征、周日变化特征进行了统计和相关分析, 研究了九龙江流域营养盐输入海洋的变化过程, 探讨九龙江河口营养盐伴随潮汐变化, 以及河口混合过程中的生物地球化学行为。调查期间溶解无机氮、硅和磷含量的平面分布呈现出由径流冲淡水高值向河口外海端递减的变化趋势; 在涨潮时, 河口区感潮段高溶解无机氮、硅、磷营养盐的陆源冲淡水与低溶解无机氮、硅、磷营养盐外海水相遇, 随着外海水的侵入, 外海水的作用逐渐加强, 在稀释混合过程中呈现出无机营养盐逐步降低的变化趋势, 退潮时则相反; 营养盐在这复杂的河口过程中往往表现出在水动力的作用下稀释混合是主要过程, 无机氮和活性硅酸盐在河口稀释混合过程中呈现保守性特征, 活性磷酸盐在河口转移(补充)过程的行为复杂化, 呈现缓冲作用为主。

关键词: 九龙江; 营养盐; 河口过程; 分布特征

中图分类号: P734.44

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2012)03-0290-07

Analysis of the nutrient distribution features and affecting factors in the Jiulongjiang estuary

HUANG Hai-ning¹, LIN Cai^{1,2}, JI Wei-dong¹, SUN Xiu-wu¹, LIU Yang¹, HE Qing¹,

CHEN Bao-hong¹, LIN Hui^{1,2}

(1. The Third Institute of Oceanography of State Oceanic Administration, Xiamen 361005, China;

2. College of Ocean and Earth Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Based on the historical data and the data from four surveys in the wet season and dry season of 2009 and 2010 in the Jiulongjiang estuary, the concentration and distribution of nutrient were discussed in the mixing process. Furthermore, the daily variation of nutrient concentration with the tide was also discussed. The results showed that: (1) the concentration of total dissolved inorganic nitrogen, silicate and phosphate all decreased gradually from the river runoff to seawater; (2) in high tide, in the mixing process of the runoff with high nutrient concentration and the seawater with low concentration of nutrient, the concentration of nutrient decreased due to seawater. On the contrary, during the ebb, the concentration of nutrient increased due to the runoff; (3) in the mixing process in Jiulongjiang estuary, nitrogen and silicate were both conservatively diluted, but phosphate was buffered because of the complicated transfer and complement of phosphate.

Keywords: Jiulongjiang; nutrient; estuary process; distribution features

营养盐是海洋生物生长、发育的必需条件, 海域营养盐水平对海洋生产力有决定性的影响(叶仙森等, 2000)。河口是一个半封闭的沿岸水体, 它与外海自由相通, 并且其中的海水明显的被来自陆

地的淡水所稀释, 从河口到外海形成很强的盐度梯度。一般海水中营养盐的变化是由海洋的内部循环所决定, 但对环境变化较为明显的河口近岸海域, 河口生态环境主要受河流径流输入营养盐影响

收稿日期: 2011-08-03; 修订日期 2011-11-23

基金项目: 国家海洋局公益性项目(200805064); 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费项目(海三科 2009021) 海三科 2009007。

作者简介: 黄海宁(1978-), 男, 工程师, 从事海洋地球化学研究工作。电子邮箱: mikkyhnh@163.com。

通讯作者: 林辉, 研究员, 主要从事海洋地球化学研究。电子邮箱: linhui_hyssh@163.com。

(Tian et al, 1993; Balls et al, 1994)。对中国长江口海区、珠江口以及德国湾的研究也表明, 营养盐主要是通过流域降水后随河流进入河口 (沈志良等, 2001; 张国森等, 2003; Beddig et al, 1997; Huang et al, 2003)。

九龙江位于福建省南部, 是福建省仅次于闽江的第二大河流, 由北溪和西溪两大支流构成, 以北溪为主流。其中北溪流域面积 9 803 km², 干流河长 285 km, 西溪流域面积 3 964 km², 干流河长 172 km, 两溪在龙海市境内长洲附近汇合流入九龙江口 (朱佳佳, 2009)。2009 年九龙江入海污染物总量为 1.33 × 10⁵ t, 其中无机氮和总磷分别为 2.99 × 10⁴ t 与 1.16 × 10³ t, 这些 N、P 污染物无疑对九龙江及其周边海域造成巨大的压力 (福建省海洋与渔业局, 2010)。正是由于九龙江径流携带大量的 N、P 污染物进入九龙江口, 使得海区水体呈富营养化状况, 早期对九龙江河口研究过程中就表明, 九龙江河口及厦门附近海域的海水水质以及富营养化等问题受九龙江来水水质的影响十分显著 (暨卫东等, 1987)。因此了解九龙江河口营养盐的含量变化、分布特征的现状是迫切需要的。

本文根据 2009 年 8 月—2010 年 11 月的调查资料, 分析九龙江河口营养盐的含量变化、分布

特征, 阐述了营养盐伴随潮汐过程的变化特征, 以及探讨营养盐河口生物地球化学过程, 为九龙江河口营养盐整治与污染源控制, 防止赤潮灾害发生, 以及海洋环境保护与海洋经济协调发展提供了科学依据。

1 材料与方法

1.1 调查时间及范围

分别于 2009 年 8 月 11 日、2009 年 11 月 23 日、2010 年 8 月 15 日和 2010 年 11 月 8 日在福建省九龙江河口 24.37°–24.52°N, 117.74°–118.10°E 之间, 共进行 4 个航次的调查作业。2009 年度共布设 21 个站位 (如图 1 圆点标志), 2010 年度为了加强西溪和北溪对九龙江河口影响的观测, 剔除了 10、12、13、18、20 和 21 号站的大面观测, 剩余 15 个站位基本与 2009 年度站位重合 (如图 1 三角形标志), 并增加 16 号站位的周日变化观测。

1.2 样品的采集及保存

在调查期间, 两条大面观测船和一条 16 号站位周日观测船进行准同步作业。大面观测时, 当水深 $H < 5$ m 时, 采 0.5 m 层水; 当水深 $H \geq 5$ m 时, 采 0.5 m 层水和 $H - 2$ m 层水; 周日观测时, 每 2 个

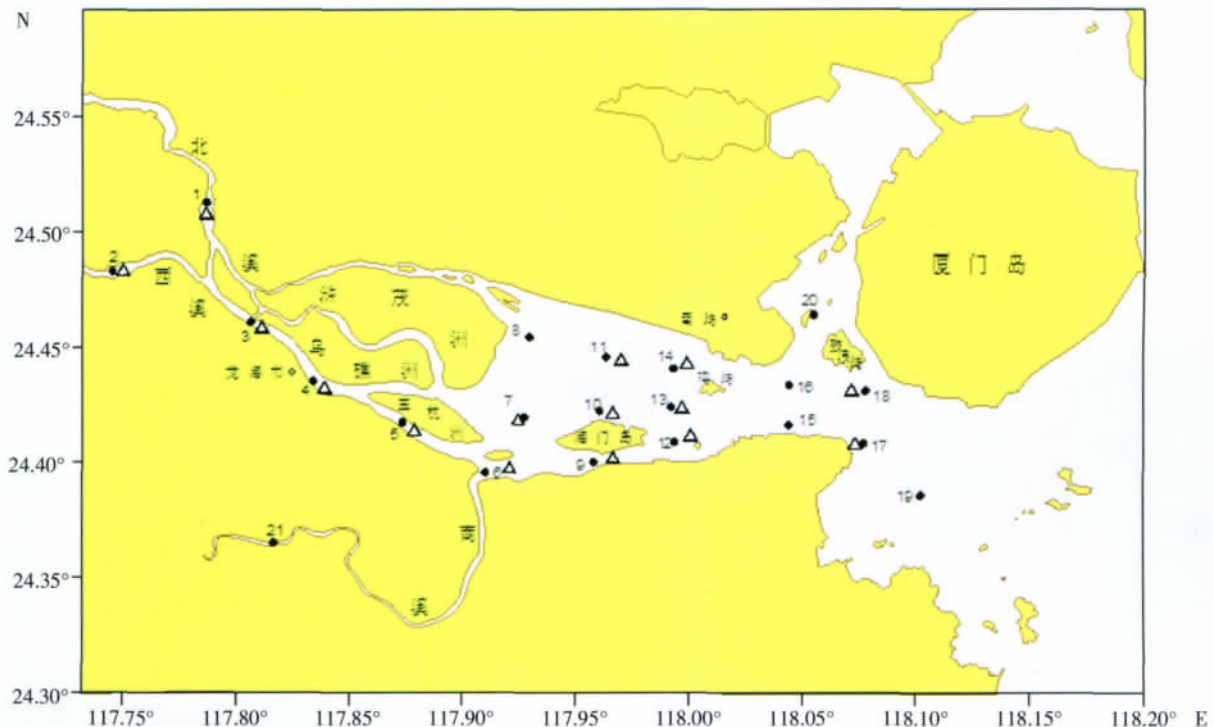


图 1 九龙江口水质监测站位布设

小时取一次样品,当水深 $H < 5$ m 时,采 0.5 m 层水;当水深 $10\text{ m} > H \geq 5$ m 时,采 0.5 m 层水和 $H-2$ m 水;当水深 $H \geq 10$ m 时,采 0.5 m 层水、 $1/2H$ m 层和 $H-2$ m 水。水样采集后,经 $0.45\ \mu\text{m}$ 滤膜(预先处理)过滤水样,样品放置在 $4\ ^\circ\text{C}$ 保温箱内冷藏,并及时运送回实验室在 24 h 内完成样品分析。样品采集、保存和分析方法均按《海洋调查规范》和《海洋监测规范》中规定的有关方法进行(国家海洋局,2007)。

2 结果与讨论

2.1 九龙江营养盐平面分布特征

由于九龙江河口地表径流较强,河口断面主要受流域上游、龙海市和厦门市部分区域的生活、农业、工业废水,以及港口码头、过往船舶油污水排放的影响,特别是龙海市城镇及工业开发区污水处理厂建设滞后,市区排污沟、渠密布,对河口断面水质有着严重影响,陆源污染较严重。表 1 是四个航次九龙江河口表层水体营养盐含量统计特征值,图 2、图 3 为四个航次营养盐表层平面分布图。从图可知,本河口表层海水活性硅酸盐、无机氮和活

性磷酸盐含量的平面分布均呈现出由径流冲淡水高值向河口外海端逐减的变化趋势,表现为西南部海域较东北部海域高的特点。说明高溶解无机氮、硅、磷的陆源冲淡水在河口与低溶解无机氮、硅、磷的外海水相遇呈现出稀释混合过程的分布特征。其影响因素主要是由于:(1) 大陆径流是营养盐输入海域的主要途径;(2) 西溪和北溪汇合后主要出口有北、中、南港,而由于北港设闸取水,造成径流量主要通过南港汇入河口区,使得径流冲淡水主要集中于西南部;(3) 潮汐变化对河口稀释混合过

表 1 九龙江河口表层水体营养盐含量统计特征值(单位:mg/L)

年度	水期	项目	含量范围	平均值
2009	丰水期	SiO_3	1.44~10.5	5.30
		DIN	0.53~4.13	1.50
		PO_4	0.025~0.117	0.042
	枯水期	SiO_3	1.17~11.2	4.30
		DIN	0.68~4.51	2.12
		PO_4	0.012~0.088	0.044
2010	丰水期	SiO_3	1.53~7.73	5.67
		DIN	0.64~2.63	1.89
		PO_4	0.022~0.067	0.047
	枯水期	SiO_3	9.50~14.1	8.49
		DIN	1.61~4.78	2.94
		PO_4	0.027~0.126	0.057

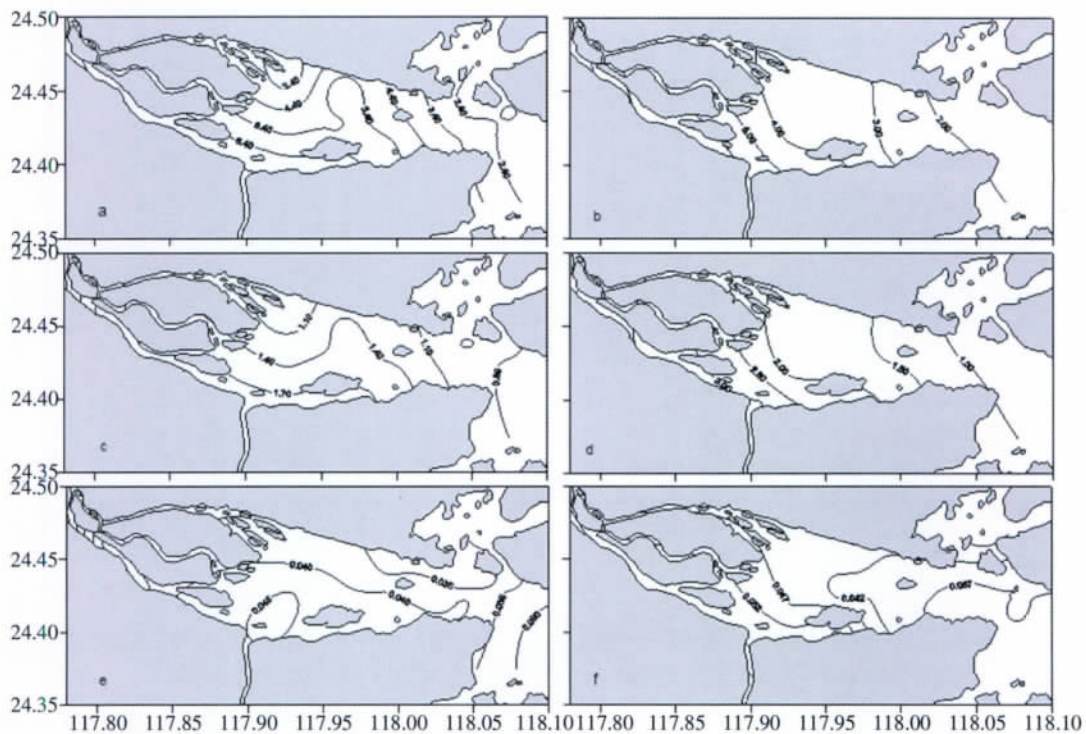


图 2 2009 年度丰水期和枯水期营养盐表层平面分布图

丰水期: a. SiO_3 , c. DIN, e. PO_4 ; 枯水期: b. SiO_3 , d. DIN, f. PO_4

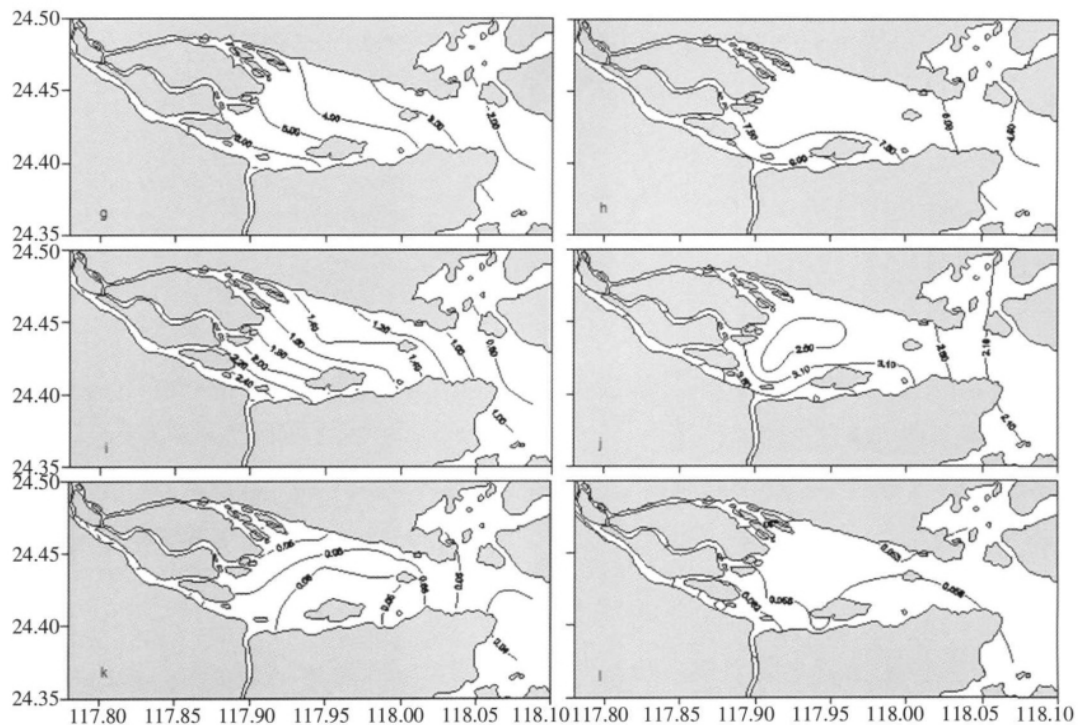


图3 2010年度丰水期和枯水期营养盐平面分布图

丰水期: g. SiO_3 , i. DIN, k. PO_4 ; 枯水期: h. SiO_3 , j. DIN, l. PO_4

程的影响,涨潮时外海水主要是朝北进入,对九龙江口东北部海域稀释作用最大。

2.2 九龙江河口流域营养盐伴随潮汐的周日变化特征

2010年度丰水期在河口区感潮段16号站对营养盐的含量进行周日观测。由图4可见,每日都呈现出两个高值峰与低值峰的正常半日潮的变化特征,表层水中活性硅酸盐周日变化范围 $1.31 \sim 3.54 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $2.12 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;无机氮周日变化范围 $0.61 \sim 1.62 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $1.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;活性磷酸盐周日变化范围 $0.022 \sim 0.046 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $0.035 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。溶解无机氮、磷、硅的周日变化,除活性磷酸盐在后一个12:00时观测的结果例外,所有无机营养盐变化趋势基本一致。在涨潮时,河口区感潮段外海水的作用逐渐加强,在稀释混合过程中呈现出无机营养盐逐步降低的变化趋势。在退潮时,陆源冲淡水的作用逐渐加强,呈现出无机营养盐逐步增高的变化趋势。底层水中活性硅酸盐周日变化范围 $0.56 \sim 3.18 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;无机氮周日变化范围 $0.42 \sim 1.40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;活性磷酸盐周日变化范围 $0.019 \sim$

$0.085 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,平均含量为 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。无机氮和活性硅酸盐的周日变化特征与表层水一致,但是底层活性磷酸盐含量的变化不一致,这可能是与悬浮物的吸附、脱附作用相关,另外,采样期间潮汐对底层的扰动,造成的二次污染对底层海水的影响大于表层海水,这些因素相互作用影响了混合稀释过程的原本规律性(Eyre et al, 1994; Wattakom et al, 2001)。

2.3 九龙江河口流域营养盐河口过程行为分析

由于河口区流域受潮汐影响,咸淡水强烈混合导致离子强度发生梯度变化,水体中营养盐在水动力、悬浮物的吸附/脱附、生物的吸收与释放,以及化学过程等作用的影响下也会发生剧烈的变化;营养盐在这复杂的河口过程中往往表现出在水动力的作用下稀释混合是主要过程。本研究分别对2009、2010年度丰水期和枯水期表层营养盐及盐度之间的相关性进行分析(图5和表2),连续两年九龙江口溶解无机氮、活性硅酸盐与盐度之间都呈现密切的负相关。从方程可知,不同年度相同水期的变化趋势是一致的,说明它们在涨、落潮的动力作用下,主要以河口区低盐度高营养盐的陆源冲淡

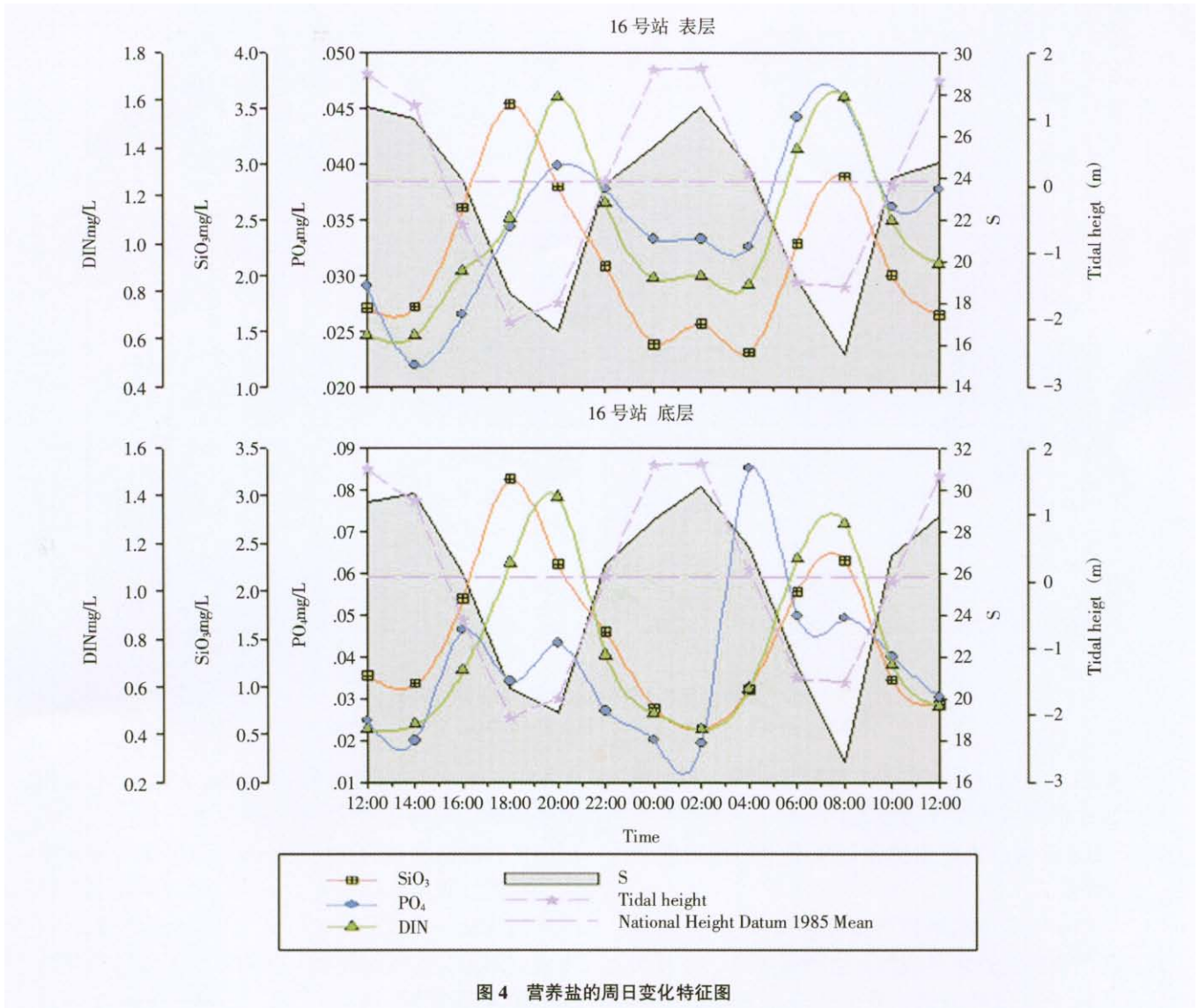


图4 营养盐的周日变化特征图

水水与高盐度低营养盐的外海水交错混合过程为主导，营养盐的含量都随着盐度的增加而降低，总体上溶解无机氮、硅营养盐在河口稀释混合过程中呈现保守性特征。这与王伟强等调查发现，在整个盐度范围内（盐度为0~28），活性硅酸盐与盐度呈现良好的线性关系的结果是一致的（王伟强等，1984）。但在本河口的较低盐度范围内（盐度为0~14）和在河口的近河端（盐度为6~15），均发现活性硅酸盐有明显的转移（李法西等，1964；张远辉等，1999）。而早期在研究本河口硝酸盐的行为时，发现在河水和海水混合初期存在增补现象（暨卫东等，1987；张远辉等，1999）。本文研究的结果与其有很大的差异，这一方面是河口水文、化学环境随时间发生变化，另一方面，观测者之间存在

着取样和分析的差异。

九龙江河口区不管是“丰水期”或“枯水期”，表层水中活性磷酸盐与盐度之间没有明显的相关。从图5可知，盐度<1.88时，其含量变化明显大于无机氮和活性硅酸盐的变化幅度，而在咸淡水混合过程中，其含量基本不变。这可能是河口区低盐、高磷的冲淡水与高盐、低磷的外海水的混合过程中，活性磷酸盐往往表现为被浮游植物摄取所转移，还与水体中悬浮颗粒物对它的吸附-解吸作用有关，又因为九龙江口外海端受城市生活污水的影响，而生活污水中氮、磷比例，磷酸盐的含量相对较高，造成高盐高磷外海底层水侵入而被增补，使得活性磷酸盐在河口转移（补充）过程的行为复杂化，在河口过程中维持不变呈现缓冲作用为主。

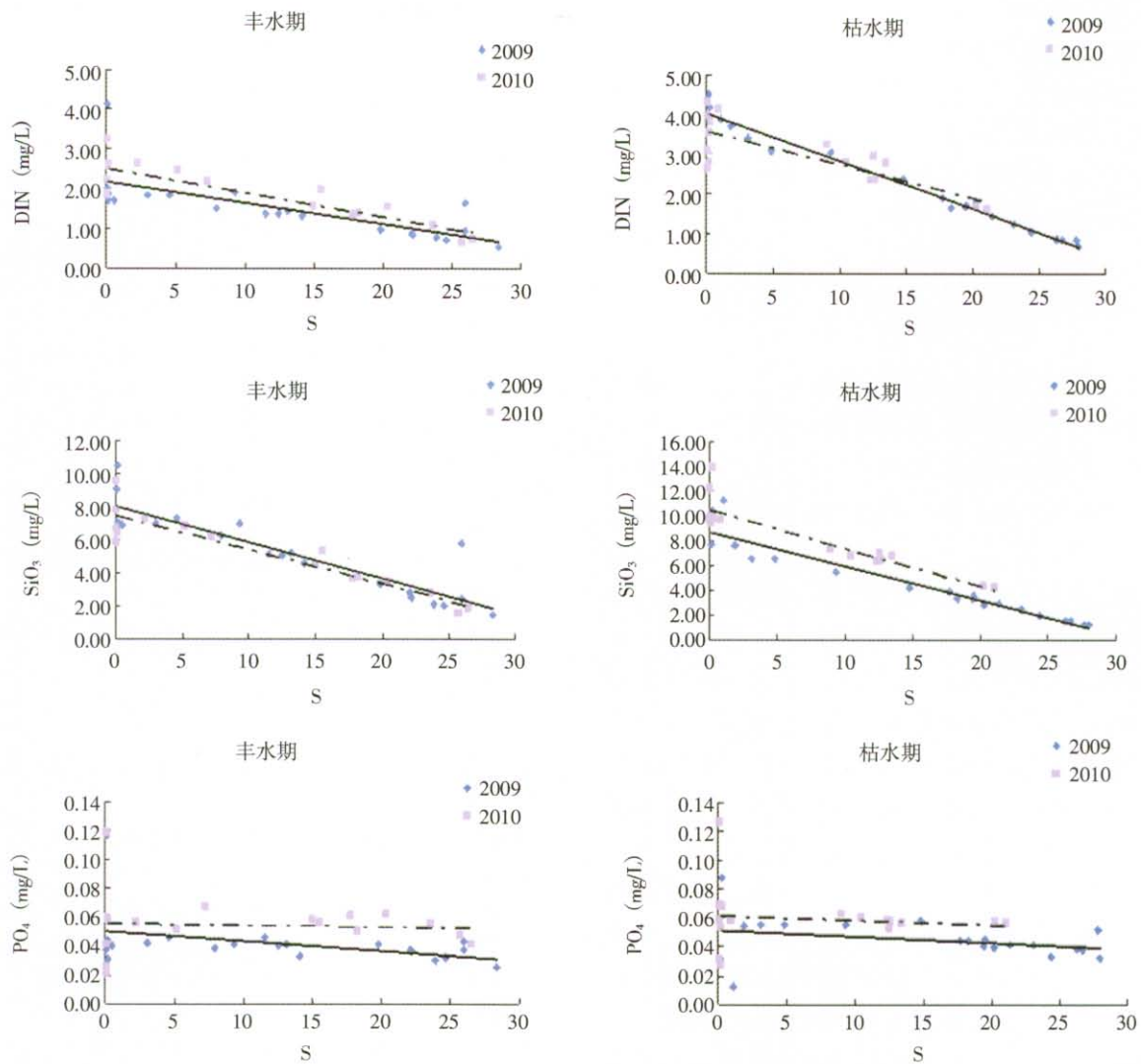


图 5 营养盐与盐度的二维散点图

表 2 不同年度相同水期营养盐与盐度之间的相关分析

相关因子 Y-X	水期	年度	回归方程 $y = ax + b$	自由度 $n-2$	相关系数 r	显著性水平 α
DIN-S	丰水期	2009	$DIN = -0.054 S + 2.17$	19	-0.723	0.01
		2010	$DIN = -0.061 S + 2.50$	13	-0.863	0.01
	枯水期	2009	$DIN = -0.120 S + 4.04$	19	-0.989	0.01
		2010	$DIN = -0.084 S + 3.58$	13	-0.801	0.01
SiO ₃ -S	丰水期	2009	$SiO_3 = -0.217 S + 8.02$	19	-0.889	0.01
		2010	$SiO_3 = -0.205 S + 7.45$	13	-0.930	0.01
	枯水期	2009	$SiO_3 = -0.278 S + 8.73$	19	-0.955	0.01
		2010	$SiO_3 = -0.312 S + 10.5$	13	-0.904	0.01
PO ₄ -S	丰水期	2009	$PO_4 = -0.0007 S + 0.051$	19	-0.395	0.05
		2010	$PO_4 = -0.0001 S + 0.056$	13	-0.054	不显著
	枯水期	2009	$PO_4 = -0.0004 S + 0.052$	19	-0.312	0.05
		2010	$PO_4 = -0.0003 S + 0.061$	13	-0.111	不显著

其变化特征与研究长江口水中总磷、有机磷、活性磷酸盐的变化特征及相互关系,以及辽河口营养要素的化学特性及其入海通量估算中得出的,活性磷酸盐在河口转移(补充)过程的行为复杂化,含量随盐度变化的规律性不明显,为非保守要素的结论是一致的(黄自强等,1994;蒋岳文等,1995)。

3 结语

(1) 九龙江河口活性硅酸盐、无机氮和活性磷酸盐的平面分布受地表径流和陆源冲淡水的影响较大,表现出自淡水端向海端减少趋势,高值区主要出现在淡水端,呈现调查海区西南部高于东北部的特点。

(2) 在周日变化过程中,河口区感潮段高溶解无机氮、硅、磷营养盐的陆源冲淡水与低无机氮、硅营养盐外海水相遇,在涨潮时,外海水侵入,外海水的作用逐渐加强,在稀释混合过程中呈现出无机营养盐逐步降低的变化趋势。在退潮时,陆源冲淡水的作用逐渐加强,在稀释混合过程中呈现出无机营养盐逐步增高的变化趋势。

(3) 由于河口区流域受潮汐影响,咸淡水强烈混合导致离子强度发生梯度变化,2009、2010两年九龙江河口无机氮、硅与盐度之间都呈现良好的负相关关系。说明无机氮和活性硅酸盐在涨、落潮的动力作用下,无机氮、硅营养盐的含量都随着盐度的增加而降低,总体上呈现保守性质的特征。活性磷酸盐在河口转移(补充)过程的行为复杂化,呈现缓冲作用为主。

参 考 文 献

- Balls P W, 1994. Nutrient inputs to estuaries from nine Scottish east coast river: influence of estuarine processes on input to the North Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39: 329-352.
- Beddig S, Brockmann U H, Dannecker W, 1997. Nitrogen fluxes in the German Bight. *Marine Pollution Bulletin*, 34(6): 382-394.
- Eyre B, 1994. Nutrient biogeochemistry in the tropical Moresby River Estuary system North Queensland, Australia. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 39: 15-31.
- Huang X P, Huang L M, Yue W Z, 2003. The characteristics of nutrients and eutrophication in the Pearl River estuary, South China. *Marine Pollution Bulletin*, 47: 30-36.
- Tian R C, Hu F X, Martin M, 1993. Summer nutrient fronts in the Changjiang (Yantze River) estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 37: 27-41.
- Wattakorn G, Prapong P, Noichareon D, 2001. Biogeochemical budgets and processes in Bandon Bay. *Journal of Sea Research* 46: 133-142.
- 叶仙森, 张勇, 2000. 长江口海域营养盐的分布特征及其成因. *海洋通报*, (19): 89-92.
- 张国森, 陈洪涛, 张经, 等, 2003. 长江口地区大气湿沉降中营养盐的初步研究. *应用生态学报*, 14(7): 1107-1111.
- 沈志良, 刘群, 张淑美, 等, 2001. 长江和长江口高含量无机氮的主要控制因素. *海洋与湖沼*, 32(5): 465-473.
- 朱佳佳, 2009. 九龙江流域水环境状况及治理对策初探. *水环境* (4): 28-29.
2010. 《2009年厦门海洋环境质量公报》. 福州: 福建省海洋与渔业局, 9-11.
- 暨卫东, 黄尚高, 王伟强, 1987. 九龙江口硝酸盐的增补现象. *海洋通报* 6(2): 19-21.
- 国家海洋局, 2007. GB 12763.4-2007 海洋调查规范 海水化学要素观测. 北京: 中国标准出版社.
- 国家海洋局, 2007. GB 17378.4-2007 海洋监测规范. 北京: 中国标准出版社.
- 王伟强, 杨嘉东, 黄尚高, 等, 1984. 九龙江口的比电导、盐度、氯度和活性硅酸盐. *台湾海峡*, 3(2): 151-158.
- 李法西, 吴瑜端, 王隆发, 等, 1964. 河口硅酸盐物理化学过程研究 I. *海洋与湖沼*, 6(4): 311-321.
- 张远辉, 王伟强, 黄自强, 1999. 九龙江口盐度锋面及其营养盐的化学行为. *海洋环境科学*, 11(4): 1-7.
- 黄自强, 暨卫东, 1994. 长江口水中总磷、有机磷、磷酸盐的变化特征及相互关系. *海洋学报* (1): 51-60.
- 蒋岳文, 陈淑梅, 1995. 辽河口营养要素的化学特性及其入海通量估算. *海洋环境科学* (11): 41-45.

(本文编辑 郭箬)