

环境因子对长江口咸淡水混合水体 中硅酸盐浓度的影响

杜锦¹ 石晓勇^{1,2} 陈鹏³ 张传松^{1*}

(¹ 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

(² 国家海洋局海洋减灾中心, 北京 100194)

(³ 中国烟台赫尔曼格迈纳尔中学, 烟台 265500)

摘要 通过室内培养实验,模拟了不同条件下(水体盐度、温度、pH 值、富氧缺氧等)长江径流淡水和东海外海水的混合过程,初步了解了上述主要环境因子对长江口硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)混合模式的影响。结果表明,在实验条件下:1)长江淡水(包括已滤和未滤)与外海水在混合过程中, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度在大约 40 h 后可基本达到平衡。2)混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度与其盐度表现出良好的负相关关系,长江口 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度主要受物理混合稀释影响,已滤长江淡水与未滤长江淡水同外海水混合,二者混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著差异。实验条件下,水体泥沙等颗粒物的存在对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在稀释过程中的浓度没有显著影响。3)随着混合水体温度升高,其 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度略有升高,表明长江冲淡水对外海海域 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的补充存在季节性差异。4) pH 为 4-8 时,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度相差不大, pH = 10 时, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度发生改变,可能是悬浮颗粒物对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的解吸增加、pH 影响了 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的存在形式。5)在富氧和缺氧状态下长江淡水同外海水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度无显著差异。

关键词 硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$); 长江口; 咸淡水混合; 稀释模式; 迁移转化

中图分类号 X503.225 **文献标志码** A **文章编号** 1000-7075(2014)03-0027-07

The influence of environmental factors on the silicon concentration in the freshwater-seawater mixing plume at the Changjiang Estuary

DU Jin¹ SHI Xiao-yong^{1,2} CHEN Peng³ ZHANG Chuan-song^{1*}

(¹ College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

(² National Marine Hazard Mitigation Service, Beijing 100194)

(³ Hermann Gmeiner School, Yantai 265500)

ABSTRACT In order to study the migration, transformation, and the dilution mode of nutrients in the freshwater-seawater mixing plume at the Changjiang Estuary, we simulated environmental factors in the laboratory, such as salinity (S), temperature (T), pH, and dissolved oxygen (DO), and explored their influences on the silicon ($\text{SiO}_3\text{-Si}$) concentration in the mixing plume of the diluted Changjiang River water and the external seawater. Our results and their implications are: (1) when

国家重点基础研究发展规划(973)项目(2010CB428701)资助

* 通讯作者。E-mail: zcsong@ouc.edu.cn

收稿日期:2013-06-25;接受日期:2013-08-14

作者简介:杜锦(1988-),女,硕士研究生,主要从事海水分析化学与海洋生物地球化学研究。E-mail: du2007@sina.cn, Tel: 13455263206

the external seawater was mixed with either filtered or unfiltered diluted Changjiang River water, the concentration of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ stabilized after 40 h. (2) The $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in the freshwater-seawater mixing plume showed a clear negative correlation with the salinity, indicating that the $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration at the Changjiang Estuary was mainly affected by the physical mixing dilution. In the mixture of the external seawater and the diluted Changjiang River water, the concentration of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ showed no significant difference no matter whether the Changjiang River water was filtered, which suggested that the suspending particles in the water had no effect on the $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in the freshwater-seawater mixing plume. (3) The concentration of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ slightly increased as the temperature of mixed water rose. This implied that there may be a seasonal change in the flow of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ from the diluted Changjiang River water to the offshore area of the East China Sea. (4) The $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration in the mixed water remained unchanged at pH 4–8, but altered when pH was 10. Simple explanations were that higher pH enhanced the $\text{SiO}_3\text{-Si}$ desorption by suspending particles, or changes in the pH affected the form of $\text{SiO}_3\text{-Si}$. (5) The oxygen levels (anoxia or oxygen-enriched state) did not affect the $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration.

KEY WORDS Silicon ($\text{SiO}_3\text{-Si}$); Changjiang Estuary; Freshwater-seawater mixing plume; Dilution mode; Migration and transformation

近几十年来,随着人为活动的增加,营养盐从陆地输入海洋的量逐渐增加,从而造成世界沿海环境富营养化和很多海区发生生态失衡的现象(林荣根等 1997;付翔等 2012)。长江口及邻近海域成为我国著名的赤潮高发区,而该海域的赤潮频发就与每年营养物质的排海通量不断增加密切相关(沈焕庭等 2001;Zhang *et al.* 1998)。长江是中国第一大河,世界第三大河,年平均径流总量约为 $9.24 \times 10^{11} \text{ m}^3$,并由此向东海输入大量营养盐,其中以硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)最多(叶仙森等 2000;黄尚高等 1986)。

海水中可溶性硅酸盐是海洋浮游生物尤其是硅藻类浮游植物、放射虫和有孔虫等原生动物所必需的营养盐之一(Officer *et al.* 1980)。硅在严重缺乏时,会导致 C/N、C/P、C/Si、C/Chl 增加,进而造成脂类合成过剩的现象(杨小龙等 1990)。而随着近海海域富营养化程度的日益加重,海水体系中营养盐结构不断发生变化,其中硅的限制性作用日益突出(Conley *et al.* 1995)。对于海洋而言,其 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 绝大部分来源于河流输入(Treguer *et al.* 1995)。研究表明,每年世界海洋溶解硅的净输入大约有 80% 来自河流的输入(孙云明等 2001)。

营养盐在河口区的迁移转化受物理因素、生物因素、化学因素(吸附-解吸、氧化-还原、沉淀的生成与溶解、络合等)等多种过程的影响(Brockmann *et al.* 1988)。河口海域的环境变化明显,水体的温度(T)、盐度(S)、pH、溶解氧(DO)等环境因子均会对河口营养盐的生物地球化学过程产生影响(Magni *et al.* 2002)。其中,在不同河口和季节, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的迁移转化特点不同。Bien 等(1958)对密西西比河口进行调查和实验室模拟,发现电解质和悬浮颗粒物的存在可使活性硅发生较显著的化学转移;Liss 等(1973)认为,悬浮颗粒物的吸附作用和电解质对活性硅的无机化学转移产生作用,生物转移的程度比较小;Wollast 等(1971)和 Fanning 等(1973)调查比利时斯凯尔特河口,认为活性硅转移主要是生物转移。国内有学者对长江口区域营养盐的混合行为进行了研究,认为长江口区域硝酸盐和硅酸盐呈保守状态(叶仙森等 2000;黄尚高等 1986;王保栋 2006),但是目前对于长江口营养盐混合行为中各环境因子的影响仍然认识不足。

为了从机制上探讨长江口及邻近海域环境因子对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在混合过程中的影响,本研究通过现场取东海外海水和长江径流淡水,在实验室可控制因素的条件下,对各环境因子的影响进行实验模拟,研究 T 、 S 、pH、 DO 等环境因子对长江口咸淡水混合过程中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 行为的影响,从而明确咸淡水混合过程对海区 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 补充及分布的作用,进一步了解近海富营养化关键过程及其对赤潮灾害的驱动作用。受实验条件的限制,本研究仅从

物理混合和化学转化角度考虑上述问题。

1 样品采集与实验方案

1.1 样品采集与测定方法

实验所用的外海水、长江淡水采样点位置如图1所示。为使模拟实验体系尽可能与长江口现场水化学介质条件及颗粒物特征相符,模拟实验中的长江淡水取自长江口,外海水取自长江口外。其中,外海水的采样时间为2011年5月4日,采集的表层外海水立即采用GF/F滤膜(Whatman GF/F,预先于马弗炉中450℃灼烧6h)过滤,加入饱和 HgCl_2 固定以消除生物影响(本研究去除生物因素的影响),并保存在5L聚乙烯塑料桶(预先经0.2 mol/L HCl浸泡洗净)内至陆地实验室。淡水的采样时间为2011年9月23日,采样地点为长江苏通大桥的上游,长江河流的中间区域。采集到的长江淡水同样加入饱和 HgCl_2 固定,保存在25L聚乙烯塑料桶中,带回岸上实验室后立即将部分长江淡水经GF/F滤膜过滤,保存于洁净的5L聚乙烯塑料桶内。将处理后的长江淡水带回陆地实验室后即开始模拟实验。

模拟实验中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度采用硅钼蓝法(抗坏血酸还原法)通过营养盐自动分析仪(Bran + Luebbe GmbH QuAAtro)测定。

1.2 实验方案

外海水同过滤长江淡水以及未过滤长江淡水混合的模拟实验同时进行并比较结果。为方便描述,将过滤后的外海水简称海水,过滤的长江淡水简称已滤淡水,未过滤的长江淡水简称未滤淡水。所测样品均取两份平行样。

1.2.1 混合过程平衡时间的确定

为了确定模拟实验所需要的时间,首先需要确定外海水与长江淡水混合后 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度达到平衡所需的时间,选取 $S=6.7$ 、 $S=16.75$ 、 $S=30$ 分别代表低盐区、中盐区、高盐区进行平衡时间的测定。

海水与已滤淡水混合平衡时间的确定:1)将海水($S=33.5$)和已滤淡水($S=0$)于500 ml锥形瓶中混合,按比例混合使混合水体盐度 $S=6.7$,加10滴饱和 HgCl_2 抑制生物作用的影响,封口后于 $(25 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、180 r/min的恒温振荡器中恒温振荡。2)为研究 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间的变化状况,分别于不同的时间间隔取样($t=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 15, 18, 21, 24, 30, 32, 36, 38, 40, 48, 54, 58, 60, 61$ h)。3)取样后水样立即用GF/F滤膜过滤,测定不同时间间隔混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度。混合水体盐度 $S=16.75$ 和 $S=30$ 平衡时间的确定方法均同上。

海水与未滤淡水混合平衡时间的确定方法同上。

1.2.2 盐度、温度对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

为了探讨温度对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 混合模式的影响,依据长江口及其邻近海域一年四季温度的变化范围,模拟实验设计的水温范围为 $10-35^\circ\text{C}$ 。同时,将海水与淡水按照不同比例混合,得到不同盐度的混合水体,探究盐度对咸淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的影响。

25℃时海水与已滤淡水混合不同S混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的测定:1)将海水($S=33.5$)与已滤淡水($S=0$)按照不同比例混合,得到 $S=33.5, 30, 26.8, 23.45, 20.1, 16.75, 13.4, 10.05, 6.7, 3.35, 0$ 的混合水体,控制混合水体体积 $V=50$ ml。2)将不同S样品加入洗净烘干后的50 ml锥形瓶中,分别滴加两滴饱和 HgCl_2 ,于 $(25 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ 、180 r/min的恒温振荡器中恒温振荡。3)40 h后立即将水样通过GF/F滤膜过滤,测定 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度。

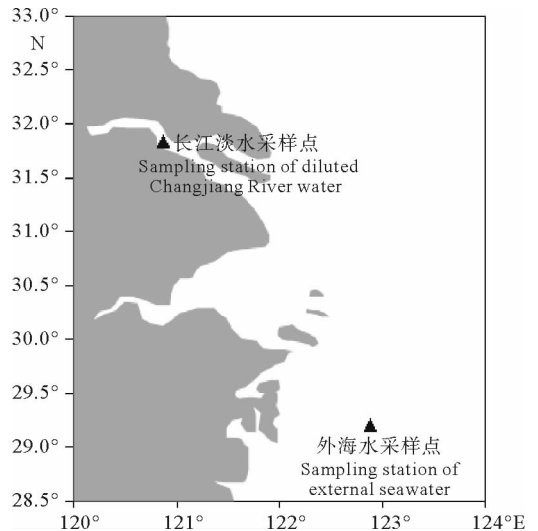


图1 取样点位置

Fig. 1 Location of sampling stations

其他温度(10 ± 0.2)、(15 ± 0.2)、(20 ± 0.2)、(30 ± 0.2)、(35 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 时不同盐度混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的测定方法均同上。

1.2.3 pH 对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

为了研究不用 pH 下咸淡水混合时 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的变化,结合长江口及其邻近海域实际的 pH 值状况,本实验设计混合溶液的 pH 为分别为 4、6、8、10。

不同 pH 条件下海水与已滤淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的测定:1)同 1.2.2 中 1)。2)将样品加入 50 ml 的锥形瓶中,分别滴加两滴饱和 HgCl_2 ,使用 1 mol/L HCl、1 mol/L NaOH、稀 HCl、稀 NaOH 调节各样品 $\text{pH} = 4 \pm 0.2$,于 (25 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 、180 r/min 的恒温振荡器中恒温振荡。3)40 h 后立即将水样通过 GF/F 滤膜过滤,测定 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度。 $\text{pH} = (6 \pm 0.2)$ 、(8 ± 0.2)、(10 ± 0.2)时混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的测定方法均同上。

1.2.4 DO 对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

研究富氧(DO 含量估计 6–8.5 mg/L)和缺氧状态(DO 含量估计低于 1.5 mg/L)下长江口咸淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的变化。

缺氧状态下咸淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度变化的测定:1)同 1.2.2 中 1)。2)将样品加入 50 ml 锥形瓶中,分别滴加两滴饱和 HgCl_2 ,于 (25 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$ 、180 r/min 的恒温振荡器中恒温振荡,并向每个锥形瓶中连续充入高纯氮气(含量 99.999%)。3)40 h 后立即将水样通过 GF/F 滤膜过滤,测定 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度。

按照上述方法向每个锥形瓶中连续充入高纯氧气,探究富氧状态下咸淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的变化。

2 结果分析

2.1 长江口咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度平衡时间的确定

河流淡水入海时与口外海水相遇,它们的物理、化学环境均发生了剧烈变化,如温度、pH、电位、离子强度、络合物组分的相对比例等,因此悬浮颗粒物和溶液之间化学物质组分的形态会发生转换,而悬浮颗粒物的吸附-解吸、还原性组分的氧化-还原、底层沉淀物的再生等都会显著影响到组分之间的形态转换和各种反应速率以及反应程度(王保栋 2006),所以咸淡水混合后达到平衡需要一定的平衡时间。

图 2 为海水与淡水(包括已滤和未滤)按照不同比例混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间变化的关系图。海水与已滤淡水混合 $S = 6.7$ 的混合水体,0–10 h 范围内, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间增加逐渐降低;12 h 以后, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本无变化。海水与未滤淡水混合 $S = 6.7$ 的混合水体,38 h 后 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本不变。

海水与已滤淡水混合 $S = 16.75$ 的混合水体,0–6 h $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间增长逐渐降低;6–10 h $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度出现上升趋势;10 h 以后, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本无变化。海水与未滤淡水混合 $S = 16.75$ 的混合水体,40 h 以后, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 基本无变化。

海水与已滤淡水混合 $S = 30$ 的混合水体, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的变化趋势同海水与已滤淡水混合 $S = 16.75$ 的混

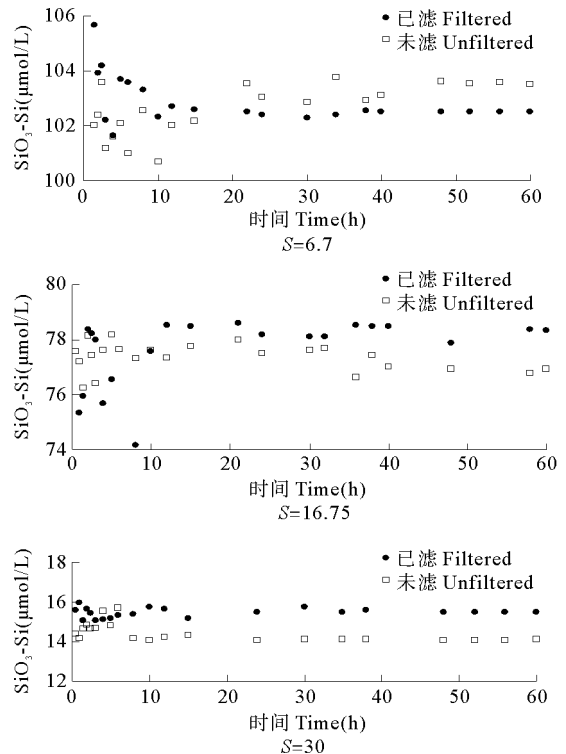


图 2 咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随时间变化
Fig. 2 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus time after seawater mixed with Changjiang River water

合水体变化趋势类似。海水与未滤淡水混合 $S = 30$ 的混合水体, $0 - 4$ h 范围内, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度逐渐增加; $4 - 10$ h 范围内, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度逐渐下降; 10 h 以后, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本保持平衡。

由以上分析可以看出,在实验条件下,海水与淡水(包括已滤和未滤)混合, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度大约 40 h 后基本达到平衡。

2.2 盐度对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

分别讨论在 10 、 15 、 20 、 25 、 30 、 35°C 温度条件下,不同盐度对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响。

图3为 25°C 时,海水与淡水(包括已滤和未滤)混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度变化的关系图。对两组数据分别作回归分析,海水与已滤淡水混合后,水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化为线性趋势, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度增大而降低,线性关系良好 ($R^2 = 0.984$)。海水与未滤淡水混合后,水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的增大而降低,线性关系良好 ($R^2 = 0.992$)。将海水与已滤淡水和海水同未滤淡水混合, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度进行 T 检验, $P = 0.95$,说明海水与已滤淡水混合同海水与未滤淡水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著差异。

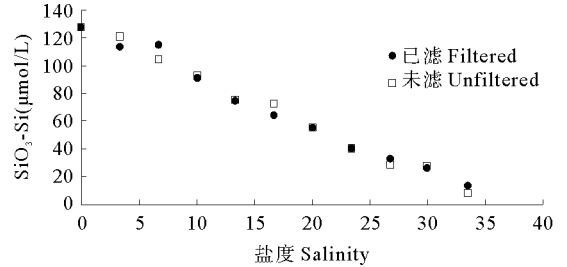


图3 25°C 混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化

Fig. 3 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus salinity at 25°C after freshwater-seawater mixing plume

在 10 、 15 、 20 、 30 、 35°C 时,海水与淡水(包括已滤和未滤)混合, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化趋势和 25°C 时相同,混合后水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度增大而降低,线性关系良好;海水与已滤淡水混合同海水与未滤淡水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著差异。

在实验条件下,长江口区域咸淡水混合的过程中, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度和盐度之间表现出良好的负相关关系,表明 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度主要受物理混合稀释影响,具有良好的混合保守性。这与过去学者的研究结论相一致(叶仙森等 2000;黄尚高等 1986;张传松 2008)。已滤长江淡水与未滤长江淡水同外海水混合,二者混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著差异,说明实验条件下水体泥沙等颗粒物的存在对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在稀释过程中的浓度没有显著影响。

2.3 温度对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

图4、图5为咸淡水混合、不同盐度混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随温度变化关系图。

由图4、图5可知, $10 - 15^\circ\text{C}$ 时,各盐度段海水与淡水(包括已滤和未滤)混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度均随温度升高而略有升高,而 $15 - 20^\circ\text{C}$ 时,各盐度段海水与淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度整体上随温度升高而略呈下降趋势。在 $20 - 25^\circ\text{C}$,海水与淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度均随温度升高而升高。 $25 - 30^\circ\text{C}$,低盐度段,海水与已滤淡水混合后,除 $S = 6.7$ 时水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度明显下降外,其余均略呈上升趋势;海水与未滤淡水混合,除 $S = 10.05$ 时,水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度明显上升外,其余均略呈下降趋势;高盐度段,海水与已滤淡水混合后水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度均随温度升高而略呈下降趋势;海水与未滤淡水混合后,除 $S = 20.1$ 、 30 时,水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度明显下降外,其余均呈上升趋势。 $30 - 35^\circ\text{C}$,各盐度段,海水与淡水(包括已滤和未滤)混合后水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度均随温度升高而升高。总体来看,在实验条件下,海水与淡水(包括已滤和未滤)混合后,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随温度升高而略有升高,表明长江冲淡水对外海海域 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的补充存在季节性差异。

2.4 pH 对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

图6、图7为咸淡水混合、不同盐度混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随 pH 变化关系图。其中, $\text{pH} = 4$ 、 6 、 8 、 10 ,是咸淡水刚混合后振荡平衡之前的 pH。整体而言,在实验条件下,各盐度段 $\text{pH} = 4 - 8$ 时海水与淡水(包括已滤和未滤)混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度基本不变; $\text{pH} = 10$ 时, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度发生改变,出现升高或降低。可能的原因是

水体中 pH 的大小影响了硅酸盐的存在形式,天然水体中硅总是以 4 价正离子氧化态存在,形态繁多,主要是溶解态硅酸盐和悬浮二氧化硅。张莹莹(2006)提出,长江口 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度除了受物理稀释混合影响外,很可能存在悬浮颗粒物的吸附解析,而且悬浮颗粒物中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的解吸随着 pH 值的增大而逐渐增加。

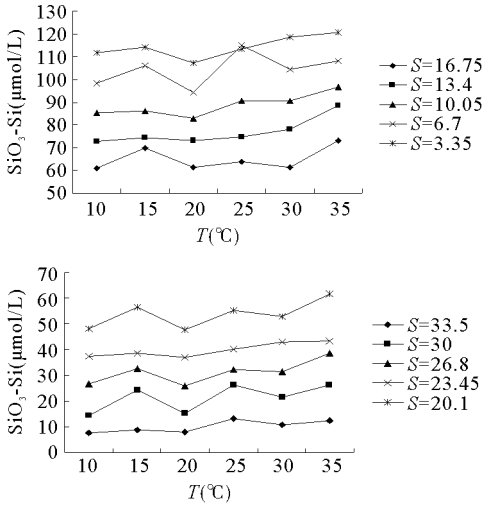


图 4 咸淡(已滤)水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随温度的变化

Fig. 4 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus temperature after seawater mixed with filtered Changjiang River water

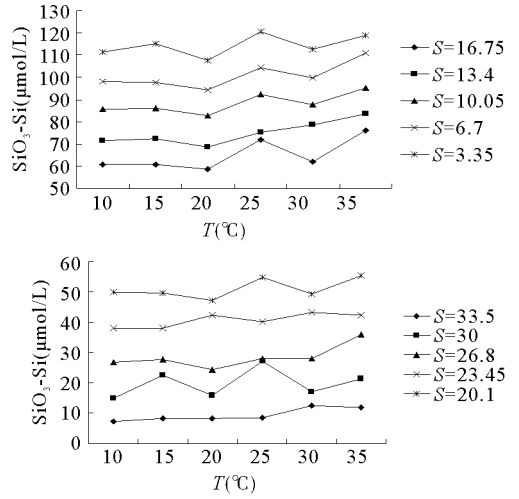


图 5 咸淡(未滤)水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随温度的变化

Fig. 5 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus temperature after seawater mixed with unfiltered Changjiang River water

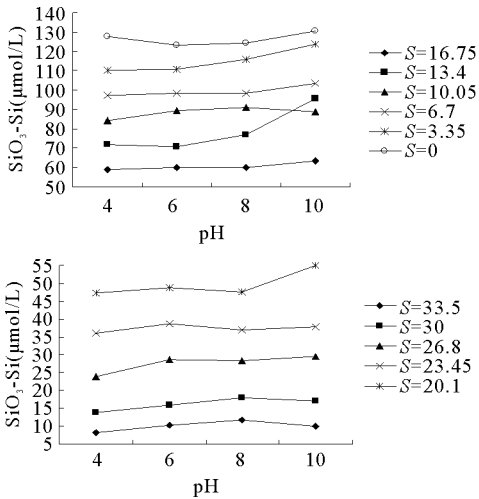


图 6 咸淡(已滤)水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随 pH 的变化

Fig. 6 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus pH after seawater mixed with filtered Changjiang River water

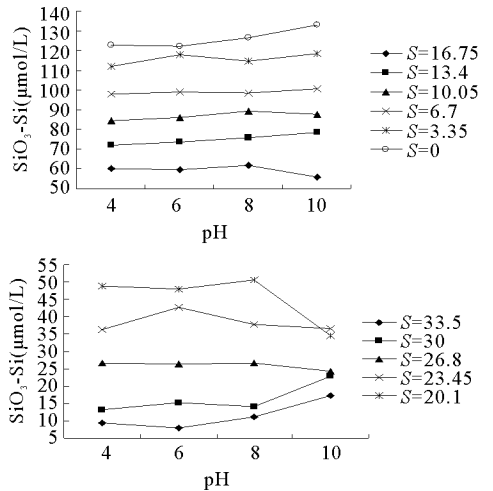


图 7 咸淡(未滤)水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随 pH 的变化

Fig. 7 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus pH after seawater mixed with unfiltered Changjiang River water

2.5 DO 对咸淡水混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度的影响

图 8 为富氧状态和缺氧状态下海水和淡水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度变化关系图。由图 8 可以看出,富氧状态和缺氧状态下,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度整体上随盐度的增大逐渐降低,相关性较好。将富氧和缺氧状态下海水与淡水混合 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度进行 SPSS T 检验,结果显示,两种状态 $P = 0.42 > 0.05$,表明两种状态下混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著性差异,说明实验条件下,DO 对长江口咸淡水混合硅酸盐没有显著性影响。

3 结论

1) 在本实验条件下,海水与长江淡水(包括已滤和未滤)混合, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度可以在40 h后达到平衡。

2) 不同盐度的海水与长江淡水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度与其盐度表现出良好的负相关关系,长江口 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 主要受物理混合稀释影响,具有良好的混合保守性。海水与已滤淡水混合同海水与未滤淡水混合,混合水体中 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著差异,表明实验条件下水体泥沙等颗粒物的存在对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 在稀释过程中的浓度没有显著影响。

3) 海水与长江淡水混合,10–35℃范围内,随着混合水体温度升高,其 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度略有升高,表明长江冲淡水对外海海域 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的补充存在季节性差异。

4) 海水与长江淡水(包括已滤和未滤)混合,pH = 4–8时各盐度段 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度相差不大;pH = 10时, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度发生改变,可能是由于水体中高pH值影响了硅酸盐的存在形态以及随着pH增大悬浮颗粒物对 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的解吸增加。

5) 在富氧和缺氧状态下海水与长江水混合,混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化无显著性差异,溶解氧对长江口咸淡水混合硅酸盐没有显著性影响。

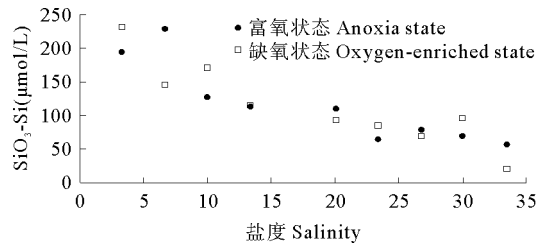


图8 富氧状态和缺氧状态下混合水体 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度随盐度的变化

Fig. 8 Variation of $\text{SiO}_3\text{-Si}$ concentration versus salinity at 25°C after freshwater-seawater mixing plume in anoxia and oxygen-enriched states

参 考 文 献

- 王保栋. 2006. 长江口及邻近海域富营养化状况及其生态效应. 见: 中国海洋大学博士研究生学位论文
- 叶仙森, 张勇, 项有堂. 2000. 长江口海域营养盐的分布特征及其成因. 海洋通报, 19(1): 89-92
- 孙云明, 宋金明. 2001. 海洋沉积物—海水界面附近氮、磷、硅的生物地球化学. 地质评论, 47(5): 527-534
- 付翔, 郝镛, 刘诚刚. 2012. 象山港多品种养殖与富营养化状况的数值模拟. 渔业科学进展, 33(1): 1-9
- 沈焕庭. 2001. 《长江河口物质通量》. 北京: 海洋出版社, 42-117
- 张传松. 2008. 长江口及邻近海域赤潮生消过程特征及其营养盐效应分析. 见: 中国海洋大学博士研究生学位论文
- 张莹莹. 2006. 长江口咸—淡水混合过程对营养盐在悬浮物—水之间分配的探讨. 见: 华东师范大学博士研究生学位论文
- 林荣根, 邹景忠. 1997. 近海富营养化的结果与对策. 海洋环境科学, 16(3): 28-31
- 杨小龙, 朱明远. 1990. 浮游植物营养代谢研究新进展. 黄渤海海洋, 8(3): 65-68
- 黄尚高, 杨嘉东, 暨卫东, 杨绪琳, 陈国祥. 1986. 长江口水体活性硅、氮、磷含量的时空变化及相互关系. 台湾海峡, 5(2): 114-123
- Bien GS, Contois DE, Thomas WH. 1958. The removal of soluble silica from fresh water entering the sea. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 14(1-2): 35-54
- Brockmann U, Billen G, Gieskes WWC. 1988. North Sea nutrients and eutrophication. *Pollution of the North Sea*: 348-389
- Conley DJ, Smith WM, Cornwell JC and 1 other. 1995. Transformation of particle-bound phosphorus at the land-sea interface. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 40(2): 161-176
- Fanning KA, Pilson MEQ. 1973. The lack of inorganic removal of dissolved silica during river-ocean mixing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37(11): 2405-2415
- Liss PS, Pointon MJ. 1973. Removal of dissolved boron and silicon during estuarine mixing of sea and river waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 37(6): 1493-1498
- Magni P, Montani S, Tada K. 2002. Semidiurnal dynamics of salinity, nutrients and suspended particulate matter in an estuary in the Seto Inland Sea, Japan, during a spring tide cycle. *J Oceanogr* 58(2): 389-402
- Officer CB, Ryther JH. 1980. The possible importance of silicon in marine eutrophication. *Mar Ecol Prog Ser* 3(3): 83-91
- Treguer P, Nelson DM, Van Bennekom AJ and 3 others. 1995. The silica balance in the world ocean: A reestimate. *Science* 268(5209): 375-379
- Wollast R, Broeu DF. 1971. Study of the behavior of dissolved silica in the estuary of Scheldt. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 35(6): 613-620
- Zhang JZ, Ortner PB. 1998. Effect of thawing condition on the recovery of reactive silica acid from frozen natural water samples. *Water Research* 32(8): 2553-2555