

杭州湾营养盐时空分布特征及其影响研究

陈思杨,宋琍琍,余骏,马佳斌

(浙江省海洋监测预报中心 杭州 310007)

摘要:文章基于2015年1—12月杭州湾海域12个航次的调查资料,对杭州湾海域营养盐溶解无机氮(DIN)和活性磷酸盐(PO_4^{3-})的月度时空分布特征及其影响进行了探讨。结果表明,杭州湾表层海水DIN和 PO_4^{3-} 含量空间分布月际间变化明显,其变化受湾内、沿岸径流输入和长江冲淡水影响显著。杭州湾海域12个月DIN含量均超第四类海水水质标准,硝酸盐氮(NO_3^-)占DIN的94%及以上。N/P值处于较高水平,内湾(IB)和外湾(OB)的N/P值季节性变化幅度比中湾(CB)大,海湾生态系统对磷的变化敏感。营养盐—盐度对研究区域的水体混合状况有明显的指示作用,杭州湾营养盐的分布主要受物理混合作用所控制,浮游生物活动对营养盐分布的影响相对较小。

关键词:杭州湾;营养盐;时空分布;N/P;水团混合

中图分类号:X3;P7

文献标志码:A

文章编号:1005—9857(2018)11—0061—06

Temporal-Spatial Distribution and Influencing Factors of Nutrients in the Hangzhou Bay

CHEN Siyang, SONG Lili, YU Jun, MA Jiabin

(Marine Monitoring and Forecasting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310007, China)

Abstract: Based on the 12 investigations carried out in the Hangzhou Bay from January to December 2015, spatial and temporal distribution and influencing factors of dissolved inorganic nitrogen (DIN) and phosphate (PO_4^{3-}) in the Hangzhou Bay were discussed. The results showed that distributions and variations of DIN and PO_4^{3-} were significant by months, which were related to in-shore runoff in the bay and the Changjiang River diluted water. DIN content of the 12 months were all over the fourth class of seawater quality standard. Nitrate (NO_3^-) accounted for approximate 94% of DIN in the Hangzhou Bay. Generally the N/P ratios of the 12 investigations were in high value, indicating that the bay ecosystem is sensitive to the change of phosphorus content. The seasonal changes of N/P in inner bay (IB) and outer bay (OB) were higher than that in center bay (CB). Nutrient-salinity plays an obvious role in indication the water mixing process in the

收稿日期:2018-04-16;修订日期:2018-09-07

作者简介:陈思杨,工程师,博士,研究方向为海洋环境监测与评价

通信作者:宋琍琍,教授级高工,研究方向为海洋环境监测监控

study area. The distributions of nutrient were mainly controlled by physical mixing of water and plankton activity was relatively insignificant in this area.

Key words: Hangzhou Bay, Nutrients, Spatial and Temporal Distribution, N/P, Water Mixing

河口海湾是流域物质的归宿,流域人类活动导致的生态环境变化通常在河口海湾表现出来。人为因素和自然因素的协同作用影响海湾生态系统环境。河口海湾的自然属性也是影响生态环境的重要因素。2003 年,建设环杭州湾产业带时,杭州湾有着天然的深水湾区。2006—2010 年 5 年间,杭州湾海域滩涂湿地面积减少了 10% 以上。滩涂养殖的不合理发展,使得余姚和慈溪沿岸的滩涂生物趋于单一结构,杭州湾滩涂湿地的生物多样性遭到破坏。2008 年曹娥江大闸的落成,影响了钱塘江潮对于河口海湾的自然作用,陆源污染物发生了变化,使杭州湾西部海域的生物群落和生产力受到影响^[1]。

2017 年,环杭州湾大湾区建设推进,湾区经济发展给杭州湾沿岸城市带来了新的发展空间和战略机遇,但对于杭州湾生态环境却是一个更高的挑战。该海域水团复杂,除长江冲淡水外,还与黄海冷水团、台湾暖流、江浙沿岸流等水团存在营养盐交换。陆源污染的营养盐输入,使杭州湾海域水体富营养化严重^[2-4]。对杭州湾海域水质状况已有较多研究^[5-7],但调查的时间尺度存在一定的局限性。本研究根据 2015 年 1—12 月对杭州湾海域进行 12 个航次调查,对杭州湾营养盐的时空分布特征、营养盐结构及其影响机制进行了分析和探讨,为湾区经济建设和海洋生态环境保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 站位布设

本研究于 2015 年 1—12 月对杭州湾海域进行系统调查,布设 12 个调查站位,为了比较杭州湾海域营养盐时空分布特征和影响机制,将调查站位分为 3 个部分:内湾 IB(IB₁、IB₂、IB₃)、中湾 CB(CB₁、CB₂、CB₃、CB₄)、外湾 OB(OB₁、OB₂、OB₃、OB₄、OB₅)、调查站位见图 1。

1.2 样品采集及分析方法

监测项目为表层海水氨氮(NH₄⁺)、硝酸盐氮

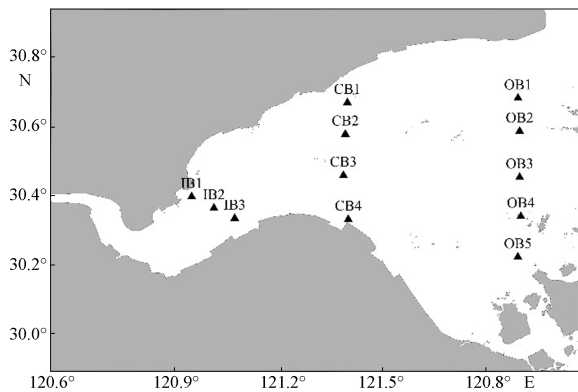


图 1 杭州湾海域调查站位

(NO₃⁻)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻)和活性磷酸盐(PO₄³⁻),pH、溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、叶绿素(Chl. a)、盐度。12 个航次的样品保存运输和分析方法按照《海洋调查规范》《海洋监测规范》^[8-9]进行。溶解无机氮(DIN)=NO₃⁻+NO₂⁻+NH₄⁺。

2 结果与讨论

2.1 杭州湾海域营养盐的时空分布特征

杭州湾 DIN 和 PO₄³⁻ 的平均含量如表 1 所示。DIN 和 PO₄³⁻ 的月平均含量变化明显,最高值分别是 9 月和 8 月,为 2.09 mg/L 和 0.069 mg/L;最低值均是 2 月,分别为 0.93 mg/L 和 0.034 mg/L。与海水水质标准相比,杭州湾 12 个月所有调查站位表层 DIN 含量均超第四类海水水质标准,8 月、11 月和 12 月所有调查站位表层 PO₄³⁻ 含量超第四类海水水质标准^[10]。可见杭州湾营养盐含量变化范围大,且含量较高。根据 1981 年 12 月和 1982 年 5 月、7 月、10 月杭州湾调查结果,NO₃⁻ 含量为 0.50~0.65 mg/L,PO₄³⁻ 含量为 0.025~0.036 mg/L^[11],杭州湾在 1981 年已经处于污染状态。与 20 世纪 80 年代调查结果相比,杭州湾 2015 年 12 个月 DIN 平均含量增幅大于 100%,PO₄³⁻ 平均含量增加 72%,说明钱塘江和曹娥江等入海河流携带的污染物日益增多,且 DIN 的增幅显著大于 PO₄³⁻ 的增幅。

表 1 杭州湾无机氮和活性磷酸盐的平均含量				
mg/L				
月份	DIN	DIN-SD	PO ₄ ³⁻	PO ₄ ³⁻ —SD
1 月	1.44	0.45	0.037	0.006
2 月	0.93	0.10	0.034	0.003
3 月	1.68	0.96	0.051	0.012
4 月	2.06	0.28	0.053	0.004
5 月	1.89	0.41	0.056	0.017
6 月	1.08	0.04	0.035	0.008
7 月	1.56	0.51	0.045	0.011
8 月	1.63	0.36	0.069	0.012
9 月	2.09	0.17	0.047	0.017
10 月	1.71	0.22	0.053	0.017
11 月	1.23	0.45	0.063	0.007
12 月	1.74	0.10	0.066	0.011

注:DIN—SD 为 DIN 均值的标准差;PO₄³⁻—SD 为 PO₄³⁻ 均值的标准差。

杭州湾 DIN 和 PO₄³⁻ 含量的月度时空分布如图 2 和图 3 所示,可见内湾区域受钱塘江等径流影响、湾口东北部受长江冲淡水的影响,以及湾口东南部外海海水主要沿舟山群岛两侧流入海湾。DIN 和 PO₄³⁻ 含量分布趋势多呈现为湾内高、湾外低,有明显的营养盐梯度。等值线分布月际间存在变化差异,因为长江入海量和钱塘江径流量有明显的季节性变化。长江冲淡水在冬季沿浙江沿岸南下,入春后由东南转向东,夏季受黄海冷水团的作用转向东北,秋季后由东北转向东,再转向东南^[12]。由于上游水库调度作用,钱塘江径流量丰枯期径流比照相对减弱,但主要是受降雨影响^[13]。2 月内湾海水 DIN 和 PO₄³⁻ 含量略低于中湾和外湾,但含量数值变化范围不大,各调查站位的含量标准差为全年最低。8 月海湾东南海域 DIN 含量低,10 月海湾东北海域 DIN 含量高,主要是由于夏季台湾暖流的影响和秋冬季长江冲淡水的影响^[14]。PO₄³⁻ 含量分布与 DIN 含量分布趋势不尽相同。3 月和 5 月南岸淹东浅滩一带 PO₄³⁻ 含量较高,可能与悬浮颗粒物对磷的解析有关,较高盐区域吸附于悬浮物的 PO₄³⁻ 易于解析进入水体^[15]。

2.2 杭州湾海域营养盐比值及其季节性变化

2015 年杭州湾水质 N/P 均值 12 个月的季节

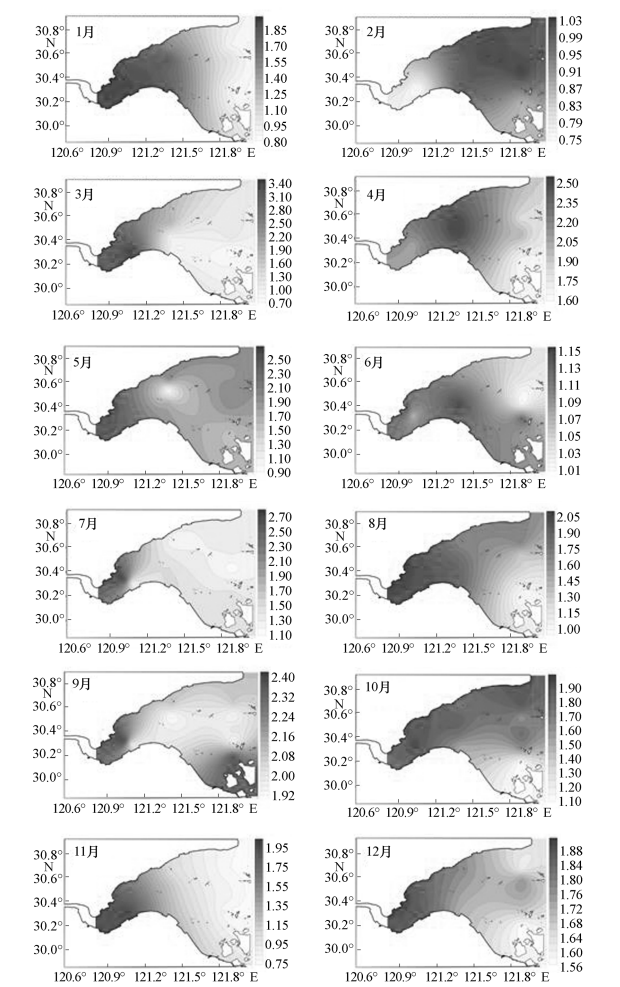


图 2 杭州湾无机氮含量时空变化(单位:mg/L)

性变化明显(图 4),内湾 N/P 均值范围为 52~151,最高均值出现在 3 月,中湾 N/P 均值范围为 42~98,最高值出现在 4 月,外湾 N/P 均值范围为 33~154,最高值出现在 9 月。内外和外湾 N/P 均值的变化幅度比中湾大,说明钱塘江、长江口和复杂的水团对其附近水域 N/P 值产生一定的影响。杭州湾内湾和外湾 N/P 最高值是 Redfield 比值(16 : 1)^[16]的 9.5 倍,中湾 N/P 最高值是 Redfield 比值的 6 倍。1981—1982 年杭州湾调查结果显示 N/P 约为 Redfield 比值的 2.6 倍^[11]。据 1985 年污染源调查,北岸的污染物直排口已达 30 余个,1987 年杭州湾丰平枯三季 N/P 均值约为 Redfield 比值的 5.5 倍^[17]。杭州湾 N/P 值的大幅度增加,营养盐氮磷结构的不平衡发展使得海湾生态系统对磷的变化十分敏感^[18],易于对浮游生物群落结构产生影

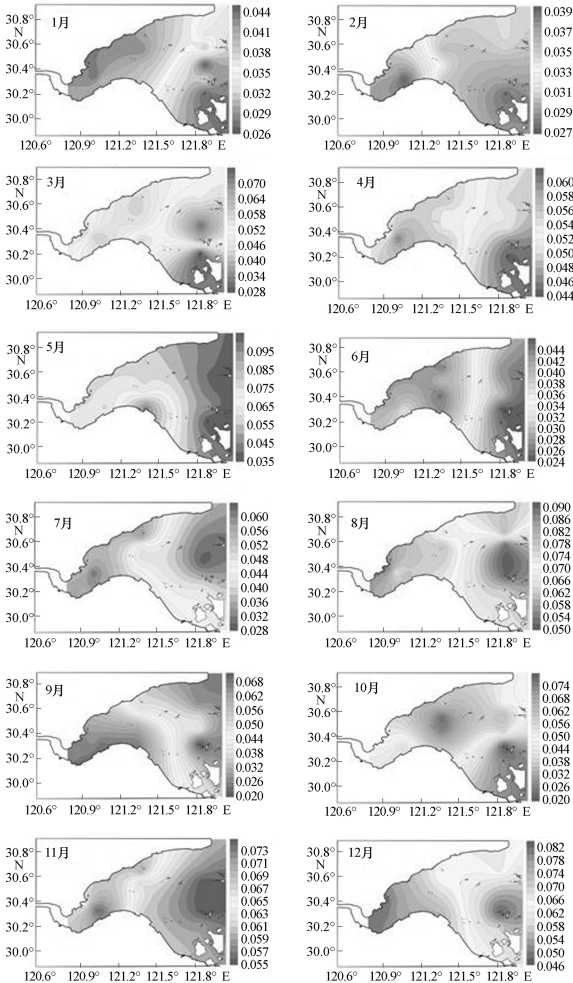


图3 杭州湾活性磷酸盐含量时空变化(单位:mg/L)

响,从而打破原有的生态平衡^[19]。

NO_3^- 是杭州湾 DIN 的主要存在形式,所占比例 94% 及以上(表 2), NH_4^+ 占比小于 5%,这主要与硝化过程充分有关。杭州湾海域 DIN 中 NO_3^- 占比远远高于江苏北部海域, NH_4^+ 占比相对较低。江苏北部近岸海域 NO_3^- 占比 50% 左右,个别调查期达 86%, NH_4^+ 占比 20% 左右,个别调查期达 63%^[20]。DIN 组分的不同比例组成与所属海域陆源径流氮输入、沉积物—水界面氮释放和海洋生物群的生长繁殖情况有关^[21-22]。

表 2 杭州湾无机氮组成比季节性变化 %			
月份	NO_3^-/DIN	NO_2^-/DIN	NH_4^+/DIN
1 月	98.5	0.51	0.99
2 月	94.0	1.50	4.50

续表

月份	NO_3^-/DIN	NO_2^-/DIN	NH_4^+/DIN
3 月	97.0	0.79	2.21
4 月	99.4	0.35	0.25
5 月	98.6	0.43	0.97
6 月	97.9	0.82	1.28
7 月	97.2	0.70	2.10
8 月	97.5	0.34	2.16
9 月	98.2	0.33	1.47
10 月	98.3	0.32	1.38
11 月	97.0	1.02	1.98
12 月	98.1	0.60	1.30

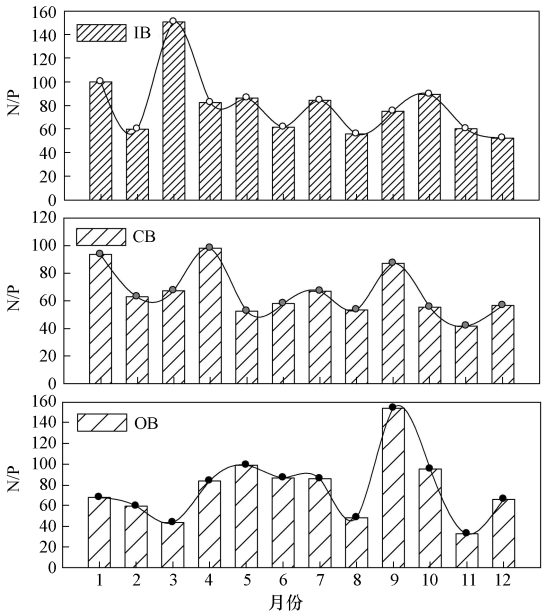


图4 杭州湾表层海水水体 N/P 营养盐结构(摩尔比)

2.3 杭州湾海域营养盐水平与环境因子的关系

相关性分析表明(表 3),1 月、3 月、7—8 月、10—12 月 DIN 含量与盐度呈显著负相关($P<0.01$),1—2 月、4 月、6—12 月 PO_4^{3-} 含量与盐度呈显著负相关($P<0.01$,其中 7 月 $P<0.05$)。营养盐 DIN 和 PO_4^{3-} 与 pH、DO、COD 和 Chl. a 的相关性不明显。与杭州湾不同,莱州湾 PO_4^{3-} 含量与盐度没有明显的相关性^[23],表明莱州湾 PO_4^{3-} 的补充可能主要是以有机物的分解矿化再生和浮游植物的大量繁殖为主。杭州湾营养盐与盐度的显著负相关性表明,其营养盐 DIN 和 PO_4^{3-} 分布主要受物理混合

作用影响,化学过程和浮游生物生长对营养盐分布影响不明显。由于杭州湾水域悬浮物含量普遍很高,泥沙引起大时空尺度水体浑浊、透明度差,浮游

植物生长活动受到一定程度的限制^[24];此外杭州湾海域营养盐 DIN 和 PO_4^{3-} 含量本底较高,化学作用和生物消耗引起的营养盐变化不明显。

表 3 杭州湾营养盐与环境因子的相关系数

相关因子	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
DIN-盐度	-0.983 **	0.526	-0.945 **	-0.489	-0.347	-0.472	-0.714 **	-0.902 **	-0.275	-0.928 **	-0.794 **	-0.831 **
DIN-pH	-0.929 **	-0.379	-0.778 **	-0.012	0.666 *	-0.177	-0.559	-0.687 *	-0.413	-0.786 **	-0.950 **	-0.460
DIN-DO	0.710 **	-0.466	-0.382	-0.434	0.208	0.082	-0.699 *	0.676 *	-0.146	0.269	0.595 *	-0.077
DIN-COD	0.037	-0.585 *	0.070	0.727 **	-0.186	0.540	-0.293	0.484	0.071	-0.515	0.368	-0.349
DIN-Chl. a	0.569	-0.407	-0.468	0.456	0.614 *	-0.107	-0.330	0.579 *	-0.387	-0.815 **	0.936 **	0.420
PO_4^{3-} -盐度	-0.862 **	0.754 **	0.263	-0.784 **	-0.506	-0.875 **	-0.630 *	-0.735 **	-0.869 **	-0.912 **	-0.823 **	-0.890 **
PO_4^{3-} -pH	-0.789 **	-0.703 *	-0.004	-0.384	-0.406	-0.341	-0.872 **	-0.786 **	-0.792 **	-0.843 **	-0.790 **	-0.813 **
PO_4^{3-} -DO	0.713 **	-0.349	-0.122	-0.457	0.407	-0.291	-0.114	0.535	0.051	0.244	0.728 **	0.163
PO_4^{3-} -COD	0.410	-0.793 **	-0.350	0.863 **	0.661 *	0.735 **	-0.202	0.125	0.175	-0.427	0.282	-0.124
PO_4^{3-} -Chl. a	0.475	-0.452	0.536	0.621 *	0.483	-0.107	-0.647 *	0.318	-0.437	-0.855 **	0.703 *	0.449

注: $n=12$; * 代表 $P<0.05$, ** 代表 $P<0.01$.

DIN 和 PO_4^{3-} 与盐度具有良好的相关性,其海陆源特性的巨大差别对于区分滨岸水团组成具有非常重要的意义。DIN 和 PO_4^{3-} 随盐度的变化如图 5 所示。由图 5 可见,研究海域的水体被很明显分为 3 个部分:低盐高营养的入海河口水体、入海口水体与远岸海水的混合及高盐低营养的远岸海水。内湾调查站位更多地落在了低盐高营养的入海河口水体,外湾调查站位更多地落在了高盐低营养的远岸海水部分,而中湾调查站位则均落在了入海河口水体部分和远岸海水部分之间,从而清晰地表明了入海河口水体与远岸海水混合过程对近海水团时空变化的影响。

3 结论

(1)杭州湾海水 DIN 和 PO_4^{3-} 的月平均含量变化明显,最高值分别是 9 月和 8 月,为 2.09 mg/L 和 0.069 mg/L;最低值均是 2 月,分别为 0.93 mg/L 和 0.034 mg/L。杭州湾营养盐含量变化范围大,且含量较高。DIN 和 PO_4^{3-} 含量空间分布均呈现明显的月度变化,8 月海湾东南海域 DIN 含量低,10 月海湾东北海域 DIN 含量高,主要是由于夏季台湾暖流的影响和秋冬季长江冲淡水的影响。

(2)杭州湾海水 N/P 均值月度变化明显,内湾 N/P 均值范围为 52~151,中湾 N/P 均值范围为 42~98,外湾 N/P 均值范围为 33~154。内湾和外湾的 N/P 值季节性变化幅度比中湾大。杭州湾生

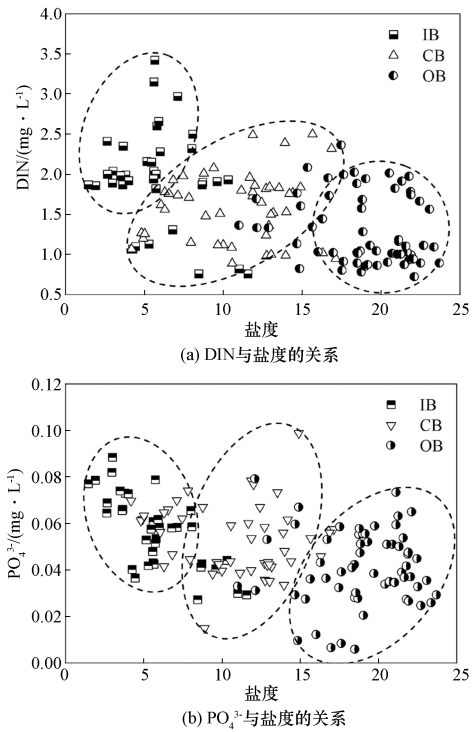


图 5 杭州湾 1—12 月 DIN(a)和 PO_4^{3-} (b)与盐度的关系

态系统对磷的变化敏感。 NO_3^- 是杭州湾溶解无机氮的主要存在形式,所占比例均在 94%以上。

(3)杭州湾的营养盐—盐度对区域的水体混合状况有明显的指示作用,杭州湾营养盐的分布主要受物理混合作用所控制,浮游生物活动对营养盐分

布的影响相对较小。

参考文献

[1] 韩庚辰,樊景凤.我国近岸海域生态环境现状及发展趋势[M].北京:海洋出版社,2016.

[2] 李俊龙,郑丙辉,张铃松,等.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.

[3] SUN D,LIU Z,ZHANG J,et al.Environmental control of me-sozooplankton community structure in the Hangzhou Bay, China[J].Acta Oceanologica Sinica,2016,35(10):96—106.

[4] 刘雪芹.舟山近岸海域富营养化评价[J].海洋湖沼通报,2005(2):55—60.

[5] 秦铭俐,蔡燕红,王晓波,等.杭州湾水体富营养化评价及分析[J].海洋环境科学,2009,28(增刊1):53—56.

[6] GAO S Q,YU G H,WANG Y H.Distributional features and fluxes of dissolved nitrogen, phosphorus and silicon in the Hangzhou Bay[J].Marine Chemistry,1993,43:65—81.

[7] 高生泉,陈建芳,金海燕,等.杭州湾及邻近水域营养盐的时空分布与富营养化特征[J].海洋学研究,2011,29(3):36—47.

[8] 国家海洋局.海洋调查规范[Z].北京:海洋出版社,2007.

[9] 国家海洋局.海洋监测规范[Z].北京:中国标准出版社,2007.

[10] 国家环境保护局.GB 3097—1997 海水水质标准[S].1998.

[11] 蒋国昌,王玉衡,董恒霖,等.浙江沿海富营养化程度的初步探讨[J].海洋通报,1987,6(4):38—45.

[12] 朱建荣,肖成猷,沈焕庭,等.黄海冷水团对长江冲淡水扩展的影响[J].海洋与湖沼,1998,29(4):389—394.

[13] 许丹.钱塘江河口物质输移与能量数值研究[D].杭州:浙江大学,2010.

[14] CHEN C A.Chemical and physical fronts in the Bohai, Yellow and East China seas[J].Journal of Marine Systems,2009,78(3):394—410.

[15] FOX L E,SAGER S L,WOFSY S C.Factors controlling the concentrations of soluble phosphorus in the Mississippi estuary[J].Limnology & Oceanography,1985,30(4):826—832.

[16] REDFIELD A C,KETCHUM B H,RICHARDS F A.The influence of organisms on the composition of seawater[C]//HILL M N.The Sea:Vol.2.New York:John Wiley,1963:26—77.

[17] 中国海湾志编纂委员会.中国海湾志(第五分册)[M].北京:海洋出版社,1992.

[18] JUSTIC D,RABALAIS N N,TURNER R E,et al.Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters;Stoichiometric nutrient balance and its consequences[J].Estuarine Coastl and Shelf Science,1995,40(3):339—356.

[19] 康燕玉,梁君荣,高亚辉,等.氮、磷比对两种赤潮藻生长特性的影响及藻间竞争作用[J].海洋学报,2006,28(5):117—122.

[20] 张丽君.江苏北部近岸海域营养盐的时空分布与富营养化特征研究[D].青岛:青岛大学,2016.

[21] 韩丽君,郑新庆,蓝文陆,等.近 10 年涠洲岛周边海域表层海水营养盐含量变化特征[J].应用海洋学学报,2015,34(1):65—72.

[22] 李玲伟.沉积物—水界面交换和黄河输入对渤海营养盐的影响[D].青岛:中国海洋大学,2010.

[23] 赵玉庭,刘霞,李佳蕙,等.2013 年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律[J].海洋环境科学,2016,35(1):95—99.

[24] 李俊龙,郑丙辉,刘录三,等.长江口浮游植物群落特征及其与环境的响应关系[J].环境科学研究,2013,26(4):403—409.