

东海沿岸海域表层海水酸化趋势及影响因素研究*

刘晓辉¹ 孙丹青¹ 黄 备² 王健鑫¹

(1. 浙江海洋大学 海洋微生物分子生态与应用实验室 舟山 316022;

2. 浙江省舟山海洋生态环境监测站 舟山 316021)

摘要 根据 2002—2011 年东海沿岸海域(4 个区域, 16 个站位)春、夏、秋三个季节的表层海水 pH、温度、盐度和叶绿素 *a* 等监测资料, 对该海域 pH 的年际时空变化及其影响因素进行了探讨。结果表明, 东海沿岸海域表层海水十年间 pH 变化趋势存在明显的季节和区域差异, 共有 10 个站点表层海水 pH 呈下降趋势, 主要集中于长江口和杭州湾海域, 而三门湾和椒江口海域的酸化则不明显。环境因子相关性分析显示, 杭州湾海域夏季表层海水的 pH 与叶绿素 *a* 浓度呈极显著正相关, 其它海域两者间未显示出显著的相关性; 杭州湾海域的 pH 与海表温度也存在显著的相关性, 但季节不同趋势不同, 呈现出春季正相关而夏季负相关的特征; pH 与盐度的关系在各海域表现得更加明显, 长江口、杭州湾和三门湾三个调查海区海水的 pH 变化与盐度都存在显著的正相关。总之, 在 10 年的连续监测内东海沿岸海域存在一定程度的酸化趋势, 其影响机制还需进一步研究。

关键词 东海沿岸; 海水; 酸化; pH; 年际变化

中图分类号 P734

doi: 10.11693/hyh20161100254

自工业革命以来, 人类大量使用化石燃料造成大气中 CO_2 浓度从 280×10^{-6} 上升至 2015 年的 400×10^{-6} , 超过了过去 80 万年的地球大气 CO_2 最高浓度(Lüthi *et al.*, 2008)。海洋作为地球上最大的碳汇之一, 吸收了人类 CO_2 排放量的 30%—40%(Sabine *et al.*, 2004), 这在一定程度上缓冲了大气中 CO_2 含量的增速, 但是吸收的 CO_2 不可避免地会给海洋自身带来变化, 比如海水 pH 降低、海洋中的碳酸盐平衡体系被打破等(Turley *et al.*, 2006)。目前全球表层海水 pH 已经下降 0.1 个单位, 预计到 2100 年海水 pH 将下降 0.3—0.4 个单位, 而到 2300 年海水 pH 下降将达到 0.7—0.8 个单位(Caldeira *et al.*, 2003; Orr *et al.*, 2005)。海洋酸化成为 21 世纪人类面临的除气候变化以外的另一个重大环境问题, 不仅会影响海洋中的碳化学、营养盐、微量元素等地球化学特性, 而且能影响海洋中浮游动植物、微生物、各种大型动物乃至整个海洋生态系统(张锦峰等, 2015)。

东海是典型的陆架边缘海, 涵盖河口、近岸、岛屿等多种生态系统, 具有独特的海洋生物地球化学特征, 也是开展海洋酸化研究的重要区域。海水 pH 是海洋化学环境的关键因子, 即使细微变化都可能对整个海洋生态系统产生巨大影响(Feely *et al.*, 2004), 而海水中的 pH 除了大气 CO_2 作用外, 温度、盐度等环境因子也在影响其变化, 另外水体叶绿素 *a* 浓度代表着浮游植物的现存量, 是海洋食物网结构和功能的基础环节, 同时也表征了海洋浮游植物将大气中的 CO_2 转化进入海洋的能力(郝翎, 2010)。近年来基于海水长期监测数据的分析成为海洋酸化研究的一个热点(Midorikawa *et al.*, 2012), 但在我国相关报道非常有限, 仅有对渤海(石强等, 2013)和南海(杨顶田等, 2013)进行过类似分析, 而在东海海域都为单年度 pH 变化及与环境指标相关性分析(王玉衡等, 1990), 尚未开展过较长历史时期 pH 年际变化的研究, 也未见有 pH 与叶绿素相关性的报道。

* 国家自然科学基金项目, 31270160 号, J1310037 号; 浙江省自然科学基金项目, LY12C03003 号; 浙江省大学生新苗人才计划项目, 2014R411019 号。刘晓辉, 硕士研究生, E-mail: 865939587@qq.com

通讯作者: 王健鑫, 副教授, E-mail: zswjx2575@163.com

收稿日期: 2016-11-19, 收修改稿日期: 2016-12-03

本文利用 2002—2011 年期间东海沿岸海域春、夏、秋三个季节表层海水的 pH、叶绿素 *a*、水温和盐度等观测数据, 重点研究了该海域表层海水 pH 的年际变化趋势, 以及 pH 与其他环境因子之间的相关性, 其结果将为进一步研究海洋酸化对东海沿岸生态系统的影响, 以及预测未来我国沿海生态安全及海洋生产力的变化提供参考。

1 材料与方法

1.1 调查海区及站点设置

2002—2011 年, 本项目组利用专业海洋调查船对东海沿岸海域进行春、夏、秋三季的环境指标监测。本文选择其中 4 个典型区域 16 个站点为研究对象, 分别为长江口海域(CJ01、CJ02、CJ03、CJ04、CJ05)、杭州湾海域(HZ01、HZ02、HZ03、HZ04、HZ05)、三门湾海域(SM01、SM02、SM03)和椒江口海域(JJ01、JJ02、JJ03), 调查站点具体位置见图 1。

1.2 样品的采集与测定

根据国家海洋监测规范(GB17378) (中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008)要求, 分别采集表层以下 0.5m 处海水用于测定 pH、叶绿素 *a*、水温和盐度, 其中 pH 和叶绿素 *a* 浓度分别采

用 pH 计法和分光光度法测定, 水温和盐度则分别采用温度计和盐度计直接测定。所有站点的 pH 数据完整, 但由于航次安排等原因, 部分站点或个别年度的其他环境因子数据会有缺失(具体见结果部分)。

1.3 数据分析

pH 和叶绿素 *a* 数据主要按时间和空间序列进行分析。pH 和叶绿素 *a* 的整体变化趋势都包含了三个季节的数据信息, 对于 pH 还进行了三个季节的比较, 由于叶绿素 *a* 的数据量较少, 所以未进行季节间的比较。各因子间的相关性分析采用 SPSS19.0 软件进行 Pearson 相关性分析和双侧显著性检验。

2 结果与分析

2.1 东海沿岸海域表层海水 pH 年际变化

东海沿岸海域表层海水 pH 的年际变化如图 2 所示。从图中可以统计出共有 10 个站点的 pH 存在下降趋势, 占到所有站点 60%以上, 其中长江口海域的 CJ01、CJ02 站点和杭州湾海域的 HZ01 站点 pH 下降幅度较大, 说明这两个海域的酸化趋势比较明显; 而三门湾和椒江口海域 pH 的下降并不明显, 说明其海水尚未有明显的酸化趋势。

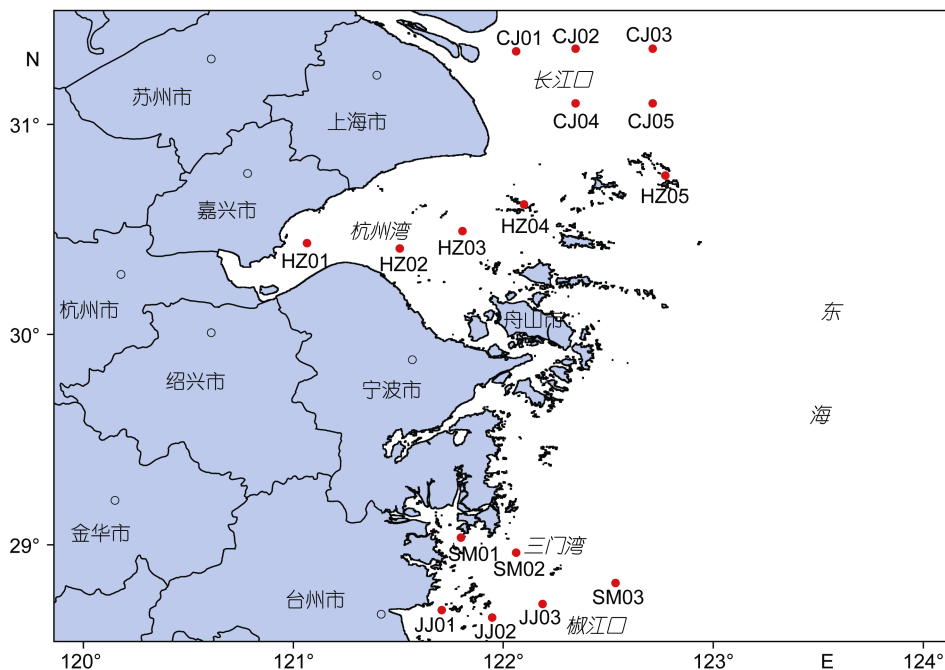


图 1 东海沿岸海域采样站点分布图

Fig.1 The sampling sites of the East China Sea coast

春、夏、秋三季表层海水 pH 年际变化分别见图 3、图 4 和图 5。总体来看,春季表层海水 pH 的下降趋势比较明显,而且也比较稳定,从图 3 中可以看出近年来 pH 出现连续的下降趋势;夏季表层海水 pH 的变化范围比较大,最小值为 7.75,最大值为 8.37,从图 4 可以清晰地看出 pH 的年际变化幅度是三个季节中最大的,其中三门湾海域的 pH 值在 2008 年有一明显低谷,而椒江口海域的 JJ03 站点却有轻微上升的趋势;秋季的 pH 年际变化幅度不是很大,同一海域里的站点 pH 值变化趋势大致相同,但没有表现出明显的上升或下降趋势。对比春、夏、秋三个季节表层海水 pH 的年际变化趋势,可以看出只有春季的表层海水 pH 呈较明显的下降趋势,而夏季和秋季的变

化趋势则不明显。无论从海域还是季节上分析海水 pH 的年际变化,都能发现 pH 存在下降的趋势,这在一定程度上说明了东海沿岸海域表层海水存在一定的酸化倾向。

2.2 东海沿岸海域表层海水叶绿素 *a* 年际变化

2002—2011 年东海沿岸海域表层海水叶绿素 *a* 浓度变化如图 6 所示,从海域上比较,长江口海域的 CJ03 站点叶绿素 *a* 浓度变化比较大,CJ01 和 CJ04 站点的叶绿素 *a* 浓度变化趋势比较相近,都表现为先增加后减少的趋势。杭州湾海域的三个站点叶绿素 *a* 浓度变化趋势都比较接近,没有发现明显的变化规律。三门湾海域的 SM03 站点叶绿素 *a* 浓度要比 SM02 站点略低,但从年际变化来看两者都呈现出先升高后

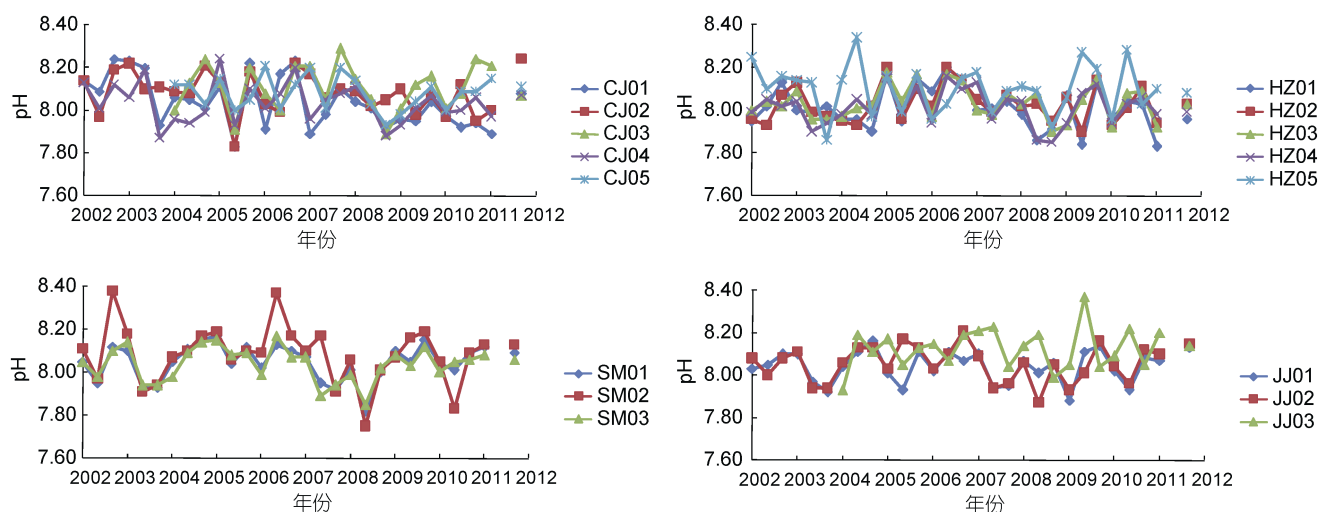


图 2 表层海水 pH 整体变化趋势

Fig.2 The annual variation of pH in surface seawater

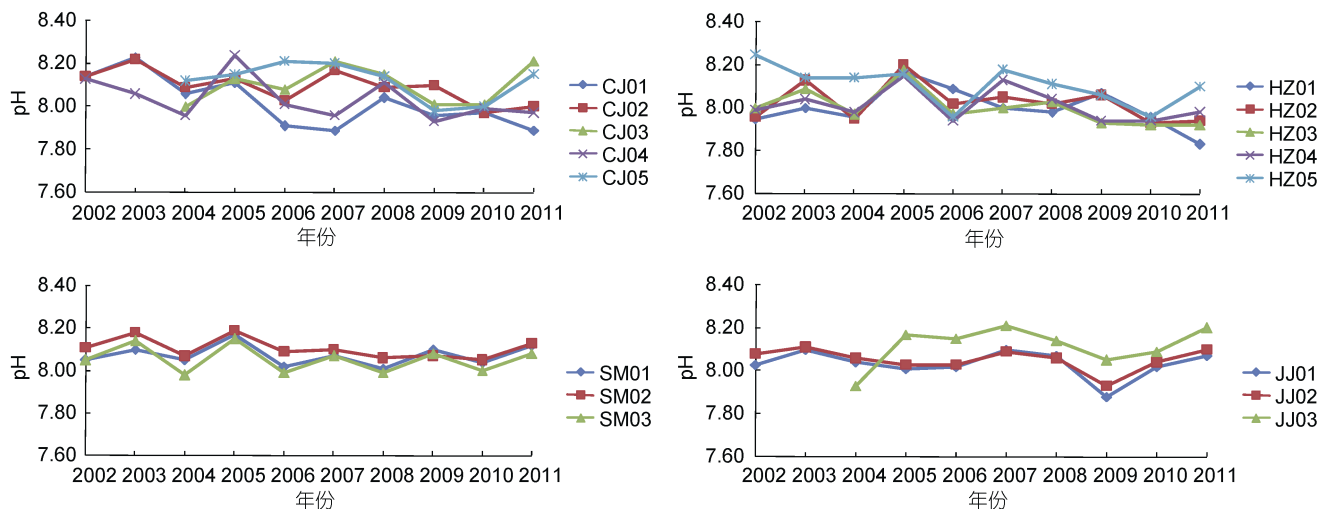


图 3 春季表层海水 pH 年际变化

Fig.3 The annual variation of pH in surface seawater in spring

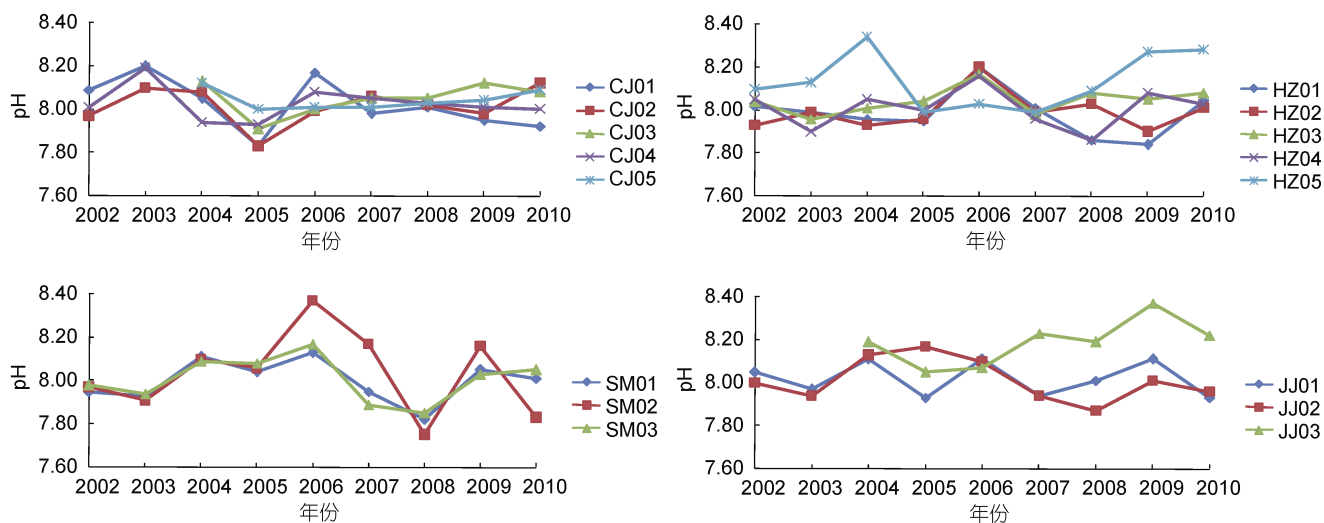


图 4 夏季表层海水 pH 年际变化

Fig.4 The annual variation of pH in surface seawater in summer

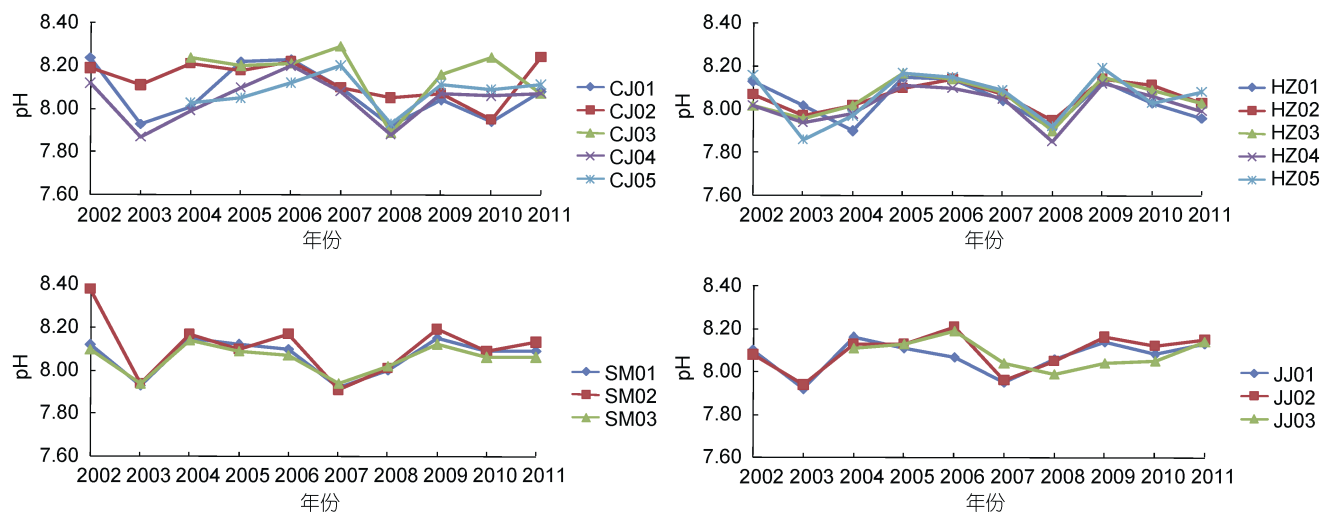


图 5 秋季表层海水 pH 年际变化

Fig.5 The annual variation of pH in surface seawater in autumn

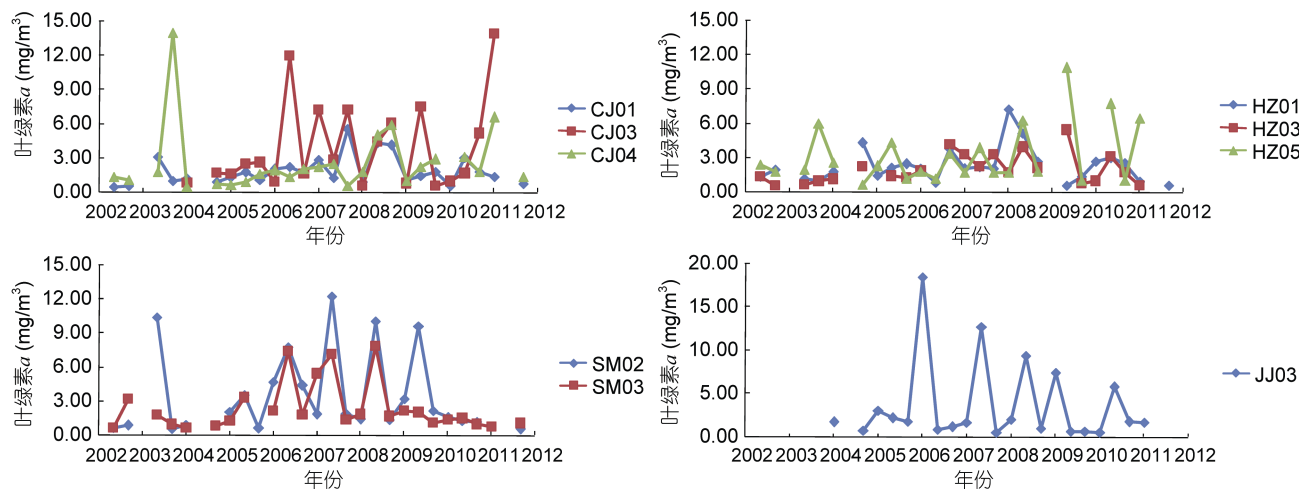


图 6 表层海水叶绿素 a 整体变化趋势

Fig.6 The annual variation of chlorophyll a in surface seawater

逐渐降低的趋势。JJ03 站点位于椒江口海域附近, 叶绿素 *a* 浓度的年际变化差异较大, 也没有明显的变化规律。总的来说, 叶绿素 *a* 浓度在 2007 和 2008 年间有一个明显的小高峰, 但从 2009 年开始浓度相对较低, 呈明显的下降趋势。

2.3 表层海水 pH 与其他环境因子相关性分析

东海沿岸海域 2002—2011 年春、夏、秋三个季节的表层海水 pH 值与叶绿素 *a* 浓度、水温、盐度的相关性分析结果如表 1—表 3 所示: 从表 1 可以看出只有杭州湾海域夏季表层海水的 pH 与叶绿素 *a* 浓度呈极显著正相关($r=0.526$, $P<0.01$), 而在其他海域两者间未显示出显著的相关性。pH 与海表温度和盐度也存在一定关系, 从表 2 可以看出杭州湾海域春夏两季的 pH 与水温都表现出显著的相关性, 其中春季为正相关($r=0.390$, $P<0.05$), 夏季为负相关($r=-0.405$, $P<0.05$)。pH 与盐度的关系在各海域表现的更加明显, 从表 3 中可以发现长江口海域春季表层海水的 pH 与盐度存在极显著的正相关关系($r=0.530$, $P<0.01$), 杭州湾海域的春夏两季 pH 与盐度都呈显著的正相关, 同时三门湾海域秋季 pH 与盐度也表现出一定的正相关关系($r=0.457$, $P<0.05$)。

表 1 pH 与叶绿素 *a* 相关性分析表

Tab.1 The correlation analysis between pH and chlorophyll *a*

海域	相关系数(<i>r</i>)			离散度(<i>P</i>)		
	春	夏	秋	春	夏	秋
长江口	0.360	0.062	-0.318	0.091	0.786	0.105
杭州湾	0.174	0.526	-0.214	0.477	0.01**	0.274
三门湾	0.152	0.155	0.118	0.587	0.567	0.640
椒江口	0.067	0.151	0.296	0.874	0.775	0.519

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$

表 2 pH 与水温相关性分析表

Tab.2 The correlation analysis between pH and water temperature

海域	相关系数(<i>r</i>)			离散度(<i>P</i>)		
	春	夏	秋	春	夏	秋
长江口	0.051	0.244	-0.257	0.796	0.240	0.187
杭州湾	0.390	-0.405	-0.359	0.033*	0.036*	0.051
三门湾	0.139	0.059	0.016	0.559	0.817	0.946
椒江口	0.086	0.195	0.235	0.839	0.674	0.575

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$

综合来看, 表层海水 pH 与叶绿素 *a* 浓度、水温、盐度等相关性显著的区域主要集中于杭州湾海域, 少量分布于长江口和三门湾海域, 而在椒江口海域

没有明显的相关性。从季节上看, 夏季 pH 与其他环境因子的相关性比较明显, 春季次之, 秋季最小。

表 3 pH 与盐度相关性分析表

Tab.3 The correlation analysis between pH and salinity

海域	相关系数(<i>r</i>)			离散度(<i>P</i>)		
	春	夏	秋	春	夏	秋
长江口	0.530	-0.085	0.038	0.009**	0.738	0.869
杭州湾	0.383	0.539	0.167	0.037*	0.004**	0.378
三门湾	0.010	-0.255	0.457	0.965	0.308	0.043*
椒江口	0.038	-0.038	0.287	0.930	0.936	0.490

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$

3 讨论

3.1 东海沿岸海域酸化总体趋势与空间分布特征

目前国外对海洋酸化的历史数据分析已有较多的报道, Midorikawa 等(2012)关于 1969—2003 年夏季南太平洋海域 pH 变化趋势的研究表明 pH 在整个海区都有下降趋势, 而极地区域的下降率最高; Polonsky(2012)对黑海表层海水的酸化研究显示 10 年尺度下 pH 的下降特别明显; Wootton 等(2008)对东太平洋沿海海域 2000—2007 年的历史数据研究也表明 pH 有明显下降趋势。研究人员还发现与大洋地区的海洋酸化相比, 近岸海域的 pH 下降幅度更为明显 (Byrne *et al*, 2010; Cai *et al*, 2011)。国内关于海洋酸化历史趋势分析的研究不多, 石强等(2013)研究了渤海 1978—2013 年间的海水酸化进程, 发现冬季表层和夏季底层海水平均 pH 年际变化存在显著性的线性降低趋势; 杨顶田等(2013)对三亚湾 2000—2010 年的监测发现海水 pH 出现明显下降。本研究对 2002—2011 年东海沿岸表层海水 pH 的监测数据进行分析, 显示部分海域站点存在酸化的趋势, 特别是长江口海域的 CJ01、CJ02 站点和杭州湾海域的 HZ01 站点。从地理位置上看这几个站点都在沿岸附近分布, 与靠近外海的站点相比有明显的下降趋势。对于近岸海域酸化趋势比较明显的原因有多种推测, 湛焘焘等(2013)认为近岸海域水层较浅, CO₂ 气体在水中的溶解一般处于饱和状态, 水体中的 CO₂ 分压易随空气中 CO₂ 浓度的变化而变化, 是最先也是最容易受到海洋酸化影响的海域; Duarte 等(2013)则认为海流作用、营养物输入和生态系统结构的改变容易造成沿海 pH 的变化; 我们认为沿岸这几个站点酸化主要与长江和钱塘江带来的淡水以及大量有机物质的分解有关。

表层海水 pH 的年际变化在不同区域其变化规律是不同的, 杨顶田等(2013)比较了中国几处典型海域的海水 pH, 发现各海域水体的 pH 存在较大差异。我们研究发现长江口和杭州湾海域表层海水 pH 都呈现出缓慢的下降趋势, 从空间上看, 长江口海域离岸越近的 CJ01 站点比离岸越远的 CJ02 及其他站点下降趋势更为明显, 这一结果与石晓勇等(2005)研究发现的长江口海域 pH 呈近岸低、外海高的分布趋势相一致。杭州湾海域 HZ01 站点的 pH 变化较大但仍有下降的趋势, 这可能与沿岸的污染物排放以及海水养殖活动有关, 杨季芳等(2011)也研究发现陆源工业污水的排放、海水增养殖活动、频繁发生的赤潮等区域生态灾害会直接影响该海域水体的 pH。三门湾位于浙江省沿海中部, 是一个半封闭的海湾, 湾内岸线曲折, 使其成为具有港口、航道、养殖等多功能的海湾(王奎等, 2007)。三门湾海域 pH 的年际波动幅度是 4 个海域中最大的, 从变化趋势上看没有明显的规律可循, 可能与三门湾海域频繁的人类活动造成水体重度富营养化而引起浮游植物大量繁殖有一定关联。离三门湾不远的椒江口海域水环境质量也不容乐观, 营养盐也同样严重超标(钱健等, 2016)。该海域表层海水 pH 与其余 3 个海域相比处于较高水平, 但也没有明显的变化规律, 从空间上看呈现出南高北低的规律, 这与王玉衡等(1990)研究发现浙江南部海区随着纬度的降低 pH 由北向南逐渐升高的结果相一致。

3.2 东海沿岸海域叶绿素 *a* 变化与 pH 相关性

叶绿素 *a* 是反映海洋中初级生产者浮游植物生物量的一个重要指标, 也是浮游植物进行光合作用的关键色素(周伟华等, 2003)。总体而言, 各海域叶绿素 *a* 浓度的空间变化特征表现为三门湾和椒江口海域的表层海水叶绿素 *a* 浓度总体较高, 而长江口和杭州湾海域相对较低; 各海域表层海水的叶绿素 *a* 浓度年际变化趋势大都呈先上升后下降的趋势, 高值区大致位于 2007 年和 2008 年附近。胡松等(2011)在中国东部海域叶绿素时空变化的研究中也发现了 2007 年为叶绿素浓度典型的高值年。吴国丽等(2016)研究指出 2006—2007 年为厄尔尼诺年, 海表温度发生异常, 这可能是导致本次研究出现叶绿素 *a* 浓度高值年的原因。根据最近几年的走势情况未来叶绿素 *a* 浓度可能有进一步下降的趋势, 这与郑小慎等(2012)研究发现的从 1998—2010 年东海沿岸海域年平均叶绿素 *a* 浓度存在一定的下降趋势基本一致。

海水中叶绿素 *a* 的分布和季节变化在一定程度上反映了温度、盐度、营养盐、pH 和 DO 等环境因子对浮游植物生长的影响, 也反映了海洋生态系统的发展状况(周群英等, 2000; 王俊等, 2002)。水体的 pH 与藻类生命活动密切相关, 游亮等(2007)研究发现在藻类丰盛的水体中, 其藻类丰度和生命活动旺盛程度对水体的 pH 起主导作用。Mattsdotter Björk 等(2014)在研究阿蒙森海和罗斯海控制酸化的因素时发现叶绿素 *a* 对酸化的影响最大, 生物因素是边缘海表层水海洋酸化的主控因素。国内研究人员也对东海春季、渤海秋季和黄海冬季的海水监测数据进行分析, 结果都显示 pH 值与叶绿素 *a* 间呈显著正相关(孙军等, 2003; 石晓勇等, 2005; 张龙军等, 2008)。本研究发现杭州湾海域夏季表层海水的 pH 值与叶绿素 *a* 浓度呈极显著正相关, 而其他几个海域两者间均无显著的相关性, 具体原因还待进一步分析。

3.3 东海沿岸海域温盐度与 pH 变化的相关性

沿海海域酸化具有局部性和季节性的特征(Feely *et al*, 2010), 有研究报道海水温度的变化可以影响海水吸收 CO₂ 的能力和 pH 值, 当水温升高时, 海水 CO₂ 含量减少, pH 值升高, 而当水温降低时 pH 值随之降低(González-Dávila *et al*, 2003; Raven *et al*, 2005); 但龙爱民等(2006)对南海北部海域的相关研究发现海水 pH 值表现出与温度相反的分布趋势, Midorikawa 等(2010)对西北太平洋海域 25 年的观测结果显示海表温度上升对 pH 下降的贡献度为 15%左右; 因此海水 pH 的变化与海水温度变化之间的关系比较复杂。本研究显示杭州湾海域的 pH 与温度之间存在显著的相关性, 呈现出春季正相关而夏季负相关的特征, 可能与江浙沿岸水的季节性水团差异有关。江浙沿岸水因受到长江和钱塘江等入海径流以及气象条件等因素的影响呈现出夏季分布范围大, 温度高, 盐度低, 冬季温度低, 盐度略高的特点(张启龙等, 2007), 因此夏季江浙沿岸水的高温低盐水团对长江口和杭州湾海域的影响非常大, 而春季又属于冬季型向夏季型的过渡, 此时江浙沿岸水出现明显东扩。

pH 与海表盐度也存在一定关系, Zeebe(2012)指出温度和盐度是碳酸盐化学平衡中的重要因子, 会影响海水 pH 值; 肖征霖(2015)研究发现楚科奇海和北欧海的酸化都受到盐度的影响, 但从相关度来看楚科奇海洋酸化受盐度影响较大, 北欧海则较小, 这与北欧海海区水团相对稳定而楚科奇海受到融冰水的影响有关。我们的研究结果显示多数海域里 pH

与盐度都有一定的相关性,不同海域的酸化受盐度影响的程度也不相同,通过相关性分析显示长江口、杭州湾和三门湾海域海洋酸化受盐度影响较大,椒江口则较小,这可能与淡水的稀释作用、浙江沿岸流以及台湾暖流的影响有关。但是研究结果显示 2003 年和 2008 年 pH 出现明显低值的主要原因则应该与厄尔尼诺影响有关,因为这两个年份恰好因厄尔尼诺事件导致次年夏季长江流域降水偏多(袁媛等, 2012),长江径流量偏大导致海水被稀释,盐度降低可能是导致 pH 偏低的主要原因。

4 结论

2002—2011 年东海沿岸海域表层海水 pH 和叶绿素 *a* 的年际变化趋势都存在明显的季节性和区域性差异。共有 10 个站点表层海水 pH 呈下降趋势,从区域上看,主要集中于长江口和杭州湾海域的部分站点,从季节上看,春季的表层海水 pH 呈较明显的下降趋势,而夏季和秋季的变化趋势不明显;叶绿素 *a* 浓度总体上呈现出先升高后逐渐降低的变化趋势,区域上的分布特点为南部海域高于北部海域。相关性分析表明,杭州湾海域夏季表层海水的 pH 与叶绿素 *a* 浓度呈极显著正相关,其余几个海域则无相关性;杭州湾海域的 pH 值与海表温度也存在显著的相关性,但季节不同趋势不同,呈现出春季正相关而夏季负相关的特征; pH 与盐度的关系在各海域表现得更加明显,长江口、杭州湾和三门湾三个调查海区海水的 pH 变化与盐度都存在显著的正相关。总之,近年来东海沿岸表层海水存在一定程度的酸化趋势,其影响机制是复杂的,仍需要进一步研究,同时酸化对海洋生态系统的潜在影响也不容忽视。

参 考 文 献

- 王 奎,金明明,陈建芳等, 2007. 三门湾海域 4、7 月营养盐分布及其稀释效应. 海洋学研究, 25(1): 10—22
- 王 俊,李洪志, 2002. 渤海近岸叶绿素和初级生产力研究. 海洋水产研究, 23(1): 23—28
- 王玉衡,蒋国昌,董恒霖, 1990. 春季浙江南部海区溶解氧、pH 值和营养盐分布特征及相互关系研究. 海洋学报, 12(5): 654—660
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2008. GB 17378.4-2007 海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 83—88
- 石 强,杨鹏金,霍素霞等, 2013. 近 36 年来渤海海水酸化进程. 见: 中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集. 昆明: 中国环境科学学会, 59—66
- 石晓勇,王修林,陆 茸等, 2005. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨. 海洋与湖沼, 36(5): 404—412
- 龙爱民,陈绍勇,周伟华等, 2006. 南海北部秋季营养盐、溶解氧、pH 值和叶绿素 *a* 分布特征及相互关系. 海洋通报, 25(5): 9—16
- 孙 军,刘东艳,柴心玉等, 2003. 1998—1999 年春季渤海中部及其邻近海域叶绿素 *a* 浓度及初级生产力估算. 生态学报, 23(3): 517—526
- 杨顶田,单秀娟,刘素敏等, 2013. 三亚湾近 10 年 pH 的时空变化特征及对珊瑚礁石影响分析. 南方水产科学, 9(1): 1—7
- 杨季芳,王海丽,陈福生等, 2011. 象山港海域细菌的分布特征及其环境影响因素. 生态学报, 31(14): 4007—4018
- 肖征霖, 2015. 楚科奇海与北欧海海洋酸化研究. 厦门: 国家海洋局第三海洋研究所硕士学位论文, 76—77
- 吴国丽,王庆业,翟方国等, 2016. 近年来厄尔尼诺期间北赤道流运输的年际变化. 海洋科学, 40(2): 118—127
- 张龙军,王婧婧,张 云等, 2008. 冬季北黄海表层海水 $p\text{CO}_2$ 分布及其影响因素探讨. 中国海洋大学学报, 38(6): 955—960
- 张启龙,王 凡,赵卫红等, 2007. 舟山渔场及其邻近海域水团的季节特征. 海洋学报, 29(5): 1—9
- 张锦峰,高学鲁,周凤霞等, 2015. 海洋生物及生态系统对海洋酸化的响应. 海洋环境科学, 34(4): 630—640
- 周伟华,霍文毅,袁翔城等, 2003. 东海赤潮高发区春季叶绿素 *a* 和初级生产力的分布特征. 应用生态学报, 14(7): 1055—1059
- 周群英,高廷耀, 2000. 环境工程微生物学. 北京: 高等教育出版社, 102—105
- 郑小慎,魏 皓,王玉衡, 2012. 基于水色遥感的黄、东海叶绿素 *a* 浓度季节和年际变化特征分析. 海洋与湖沼, 43(3): 649—654
- 郝 翎, 2010. 中国近海叶绿素和初级生产力的时空分布特征和环境调控机制研究. 青岛: 中国海洋大学博士学位论文, 1—2
- 胡 松,吴奇峰, 2011. 中国东部海域叶绿素时空变化经验正交分析及探讨. 水产学报, 35(6): 890—896
- 袁 媛,杨 辉,李崇银, 2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响. 气象学报, 70(3): 467—478
- 钱 健,贾怡然,丰卫华等, 2016. 椒江口海域营养盐及富营养状况的时空变化. 海洋环境科学, 35(5): 743—749
- 湛垚垚,黄显雅,段立柱等, 2013. 海洋酸化对近岸海洋生物的影响. 大连大学学报, 34(3): 79—84
- 游 亮,崔莉凤,刘载文等, 2007. 藻类生长过程中 DO、pH 与叶绿素相关性分析. 环境科学与技术, 30(9): 42—44
- Byrne R H, Mecking S, Feely R A *et al*, 2010. Direct observations of basin-wide acidification of the North Pacific Ocean. Geophysical Research Letters, 37(2): L02601
- Cai W J, Hu X P, Huang W J *et al*, 2011. Acidification of subsurface coastal waters enhanced by eutrophication. Nature Geoscience, 4(11): 766—770
- Caldeira K, Wickett M E, 2003. Oceanography: anthropogenic carbon and ocean pH. Nature, 425(6956): 365
- Duarte C M, Hendriks I E, Moore T S *et al*, 2013. Is ocean

- acidification an open-ocean syndrome? Understanding anthropogenic impacts on seawater pH. *Estuaries and Coasts*, 36(2): 221—236
- Feely R A, Alin S R, Newton J *et al*, 2010. The combined effects of ocean acidification, mixing, and respiration on pH and carbonate saturation in an urbanized estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 88(4): 442—449
- Feely R A, Sabine C L, Lee K *et al*, 2004. Impact of anthropogenic CO₂ on the CaCO₃ system in the oceans. *Science*, 305(5682): 362—366
- González-Dávila M, Santana-Casiano J M, Rueda M J *et al*, 2003. Seasonal and interannual variability of sea-surface carbon dioxide species at the European Station for Time Series in the Ocean at the Canary Islands (ESTOC) between 1996 and 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(3): 1076
- Lüthi D, Le Floch M, Bereiter B *et al*, 2008. High-resolution carbon dioxide concentration record 650, 000–800, 000 years before present. *Nature*, 453(7193): 379—382
- Mattsdotter Björk M, Fransson A, Torstensson A *et al*, 2014. Ocean acidification state in western Antarctic surface waters: controls and interannual variability. *Biogeosciences*, 11(1): 57—73
- Midorikawa T, Inoue H Y, Ishii M *et al*, 2012. Decreasing pH trend estimated from 35-year time series of carbonate parameters in the Pacific sector of the Southern Ocean in summer. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 61: 131—139
- Midorikawa T, Ishii M, Saito S *et al*, 2010. Decreasing pH trend estimated from 25-yr time series of carbonate parameters in the western North Pacific. *Tellus B*, 62(5): 649—659
- Orr J C, Fabry V J, Aumont O *et al*, 2005. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. *Nature*, 437(7059): 681—686
- Polonsky A, 2012. Had been observing the acidification of the black sea upper layer in XX Century. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 12: 391—396
- Raven J, Caldeira K, Elderfield H *et al*, 2005. *Ocean Acidification Due to Increasing Atmospheric Carbon Dioxide*. London: The Royal Society, 5—13
- Sabine C L, Feely R A, Gruber N *et al*, 2004. The oceanic sink for anthropogenic CO₂. *Science*, 305(5682): 367—371
- Turley C, Blackford J, Widdicombe S *et al*, 2006. Reviewing the impact of increased atmospheric CO₂ on oceanic pH and the marine ecosystem. In: Schellnhuber H J, Cramer W, Nakicenovic N *et al* eds. *Avoiding Dangerous Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 65—70
- Wootton J T, Pfister C A, Forester J D, 2008. Dynamic patterns and ecological impacts of declining ocean pH in a high-resolution multi-year dataset. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(48): 18848—18853
- Zeebe R E, 2012. History of seawater carbonate chemistry, atmospheric CO₂, and ocean acidification. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1): 141—165

ACIDIFICATION AND THE FACTORS IN SURFACE SEAWATER OF THE EAST CHINA SEA COAST

LIU Xiao-Hui¹, SUN Dan-Qing¹, HUANG Bei², WANG Jian-Xin¹

(1. Zhejiang Ocean University, Laboratory for Marine Microbial Molecular Ecology and Application, Zhoushan 316022, China;

2. Zhoushan Marine Ecological and Environmental Monitoring Station in Zhejiang Province, Zhoushan 316021, China)

Abstract Using 2002—2011 monitoring data of pH, temperature, salinity and chlorophyll *a* in spring, summer, and autumn in surface seawater of the coastal East China Sea in four areas and 16 sites, we studied the annual temporal-spatial variation of pH and the influencing factors. The results show that seasonal and regional variations in pH of the surface water in last 10 years was significant. The pH value decreased in 10 sites in the Changjiang (Yangtze) River estuary and Hangzhou Bay, but did not in the Sanmen Bay and Jiaojiang River mouth. Correlation analysis showed that, correlation between pH value and chlorophyll *a* concentration was significantly positive in the surface waters of Hangzhou Bay during summer, but not in other waters and seasons. The correlation between the pH value and sea surface temperature was significant in the Hangzhou Bay, but varied in seasonal trend: positive in spring and negative in summer. The correlation between pH and salinity was obvious in all waters: significantly positive in the Changjiang River estuary, Hangzhou Bay and Sanmen Bay. In conclusion, there was a certain degree of acidification trend in the coastal East China Sea within 10 years of continuous monitoring, the impact mechanism still need further study.

Key words coastal East China Sea; seawater; acidification; pH; annual variation