

长江口外海域冬、春季水温变化规律研究*

胡莹英¹ 赵亮¹ 郭新宇² 魏皓³

(1. 中国海洋大学物理海洋实验室 青岛 266100; 2. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心 松山 7908577;
3. 天津科技大学海洋科学与工程学院 天津 300457)

摘要 收集了 1963—1996 年长江口外海域水温的观测数据, 分析了该海域冬、春季表层、10m 层、20m 层和 30m 层不同层次水温的季节和年际变化规律, 以及其间水温垂向结构的变化。季节变化上, 表层多年平均水温在 8 月最高, 3 月最低, 底层多年平均水温 9 月最高, 3 月最低。年际变化上, 冬季在 1979 年存在一个由冷到暖的跃迁; 4 月水温的年际变化较冬季复杂, 表层、10m 层、20m 层和 30m 层水温分别在 1979、1973、1973 和 1975 年发生从冷到暖的跃迁。水平分布上, 冬季除东南角小范围表层水温降低外, 沿岸及北部海区表层水温均升高, 春季北部和南部中间海域水温升高, 升温幅度由表层至 30m 层逐渐变小。垂向结构上, 冬季表底混合均匀, 表层与 20m 层的年际变化相关系数高达 0.97, 春季表层与 20m 层的水温差存在 10 年左右的变化周期。本文将一些可能影响春季水温年际变化的因素与海温进行了比较并发现, 在冷期, 春季表层海温与长江口外海域气温相关较暖期好, 相关指数为 0.79; 而暖期的春季表层与 20m 层的水温差与净热通量相关系数较高, 为 0.65。

关键词 年际变化, 水温, 长江口, 冬、春季

中图分类号 P731.1

自 20 世纪 90 年代中后期以来, 东海北部及黄海海区连年发生水母暴发, 并有逐年加重的趋势。水母在能量从初级生产到高营养级传递的过程中主要起负作用, 水母暴发改变生态系统的机构和功能, 破坏正常食物链结构, 影响生态系统稳定性, 水母数量的大量增长已经成为一种海洋生态灾害(张芳等, 2009)。程家骅等(2005)通过观测发现, 部分大型水母的密集区主要位于长江冲淡水外侧的东海北部暖水控制海域, 过度捕捞、富营养化以及气候变暖都可能是水母数量变化的原因。陈洪举等(2010)研究发现, 水母类分布受水温和盐度变化的影响, 随着温度的变化, 水母的分布范围也相应发生变化。因此, 研究该区域水温的时空变化特征, 可以为研究水母大量繁殖提供物理环境变化的背景认识。

长江口外海域水文环境复杂多变, 受长江冲淡水、黄海冷水团、台湾暖流和黑潮等的共同影响。

受观测数据限制, 对长江口外海域水温变化的研究以卫星遥感数据为主, 局限在海表温度的变化, 对其它层次的研究较少。因此, 本文收集了长江口外海域多年器测的水温资料, 分析该区域水温的季节变化和冬、春季不同层次水温的年际变化规律, 根据跃迁年份给出不同时期长江口外海域水温的平面分布及垂直结构的变化, 并简要分析了可能的影响因素。

1 数据和方法

1.1 数据简介

本文综合了两个来源的水温数据进行研究, 资料一为日本海洋数据中心(Japan Oceanographic Data Center, JODC)从 1960 年 1 月 1 日—2008 年 4 月 27 日通过走航观测、浮标观测等方式获得的水温资料; 资料二是国家海洋局(State Oceanic Administration, SOA) 1966—1999 年数个常规断面的水温调查资料。

* 国家重点基础研究发展计划(973)项目, 2011CB403602 号, 2010CB428904 号; 国家自然科学基金重点项目, 40830854 号, 胡莹英, E-mail: hoo.yy205@gmail.com

通讯作者: 赵亮, E-mail: zhaoliang@ouc.edu.cn

收稿日期: 2011-12-31, 收修改稿日期: 2012-02-28

所选研究区域为东海北部长江口外海域(图 1), 范围是 29° — 32° N, 123° — 125.5° E, 图中点和圆圈分别表示该区域内 JODC 和 SOA 温度数据点。本文研究重点是对水母早期补充比较重要的冬季和早春时节的水温变化特征。根据表 1 给出的研究区域内所有实际观测温度数据站位数的时间分布, 选取 1—3 月平均代表冬季, 4 月代表春季。为了研究早春时期长江口外海域的海水温度变化特征, 作者选取数据较为连续的 4 月作为代表月。1997 年以后水温数据很少, 但总体上来说, 统计结果显示观测站位空间和时间分布较均匀, 能用来分析长江口外海域水温的变化特征。

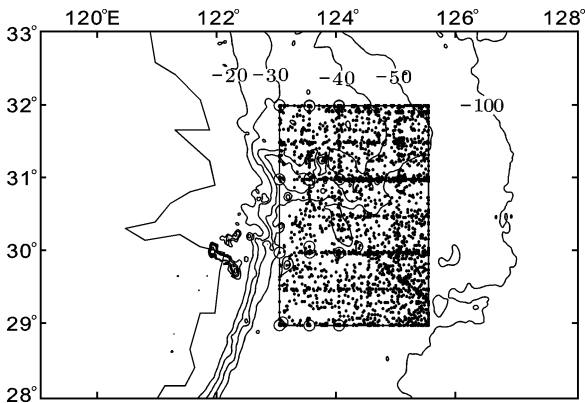


图 1 研究区域及水温观测数据点分布

Fig.1 Study areas, water temperatures and sampling locations
注: 点代表日本海洋数据中心数据, 圆圈代表国家海洋局数据

1.2 数据处理

数据分析前, 先进行质量控制, 剔除了数据中超出正常温度范围的数据, 温度范围设定为 -3.0 — 35.0°C 。将质量控制后的数据按照海洋调查标准层次分层, 其中, 距离标准层 $\pm 2\text{m}$ 水深范围内的数据都视为该层数据; 考虑到海水上混合层深度, 将 0 — 5m 的数据皆视为表层数据, 以减小短时天气现象影响造

成的误差; 根据地形数据, 设定深度不超过水深 $\pm 5\text{m}$ 范围内数据为底层数据。分析季节变化时, 分层次逐月剔除距平超过标准差 2.5 倍的数据(Minobe *et al.*, 2004)后, 求出各个层次逐月的平均温度, 然后计算得到该区域气候态的分层温度数据。在分析年际变化时, 利用前面得到的各层逐月温度数据, 将 1—3 月平均视为冬季, 春季取 4 月数据。温度垂向结构变化主要分析了表层和 20m 层温度差的变化。

温度跃迁年份的确定采用了基于 t -检验的循序算法(Rodionov, 2004; Rodionov *et al.*, 2005), 该算法在事先假设跃迁时间尺度的基础上进行验证性统计, 对于跃迁开始时间的判别是较为准确的。循序算法主要由截断长度 L 和 Huber 权重参数 H 以及预先设定的置信度 p 值确定跃迁年份, 得到的 RSI (regime shift index)值是标准化所得矩平的累积和, 可以反映跃迁发生的可靠性。选择的截断长度值 L 需要大于物理过程变化的显著周期, 这样才能将它的年代际变化考虑到研究中。Overland 等(2008)利用该算法, 计算了 PDO 指数、MEI、西太平洋指数和美国西海岸上升流指数等的转折年, Minobe(1997)用此算法计算了美国西北部春季气温、东北太平洋春季海表温度等的转折年份, 均显示在 1976/1977 年存在一个跃迁年份。本文在对温度和时间序列的应用中, 经验性地将 L 值取为 15 年, H 值取 2。

2 结果

2.1 季节变化

由图 2 可以看出, 水温存在明显的季节变化, 夏季温度最高, 冬季最低, 冬、夏最大温差出现在表层, 约为 16°C 。不同层次的水温的季节变化规律与幅度各不相同的。表层温度的季节变化大于底层温度。表

表 1 水温观测数据站位数

Tab.1 The number of observe stations for monitoring water temperature

年份	月份												合计
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1960—1969	22	106	61	70	99	77	137	210	37	89	71	6	985
1970—1979	140	92	37	87	40	64	164	122	45	130	38	38	997
1980—1989	111	83	18	139	106	119	121	63	55	193	110	58	1176
1990—1996	101	89	2	98	226	65	98	63	31	82	96	39	990
1997—	0	0	0	0	1	4	0	3	5	1	1	0	15
合计	374	370	118	394	472	329	520	461	173	495	316	141	4163

层温度在3—8月呈上升趋势，在8月达到最大值，为27.7℃，在9—2月呈下降趋势，3月达到最小值，为12.1℃。底层温度升温晚且幅度小，在3—9月缓慢上升，在9月达到最大值22.1℃，11—3月迅速下降，在3月达到最低值为11.8℃。20m温度在3月至9月上升，在9月达到最大值为25.8℃，之后开始降温，到3月温度达到最低，为12.2℃，季节变化规律和底层相似，但夏季增温幅度大于底层。

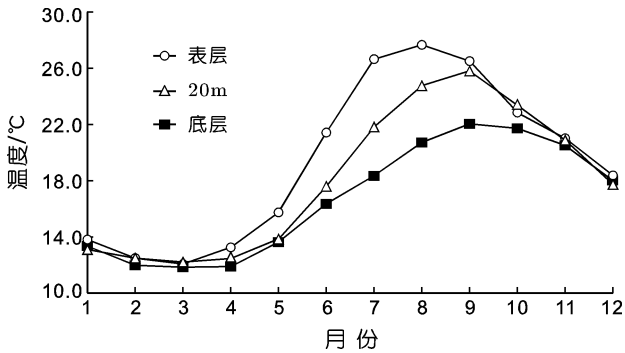


图2 水温的季节变化

Fig.2 Seasonal variations of water temperatures

由于不同的物理过程影响，表底的温差也存在明显季节性差异。在风和潮汐的作用下，2—3月垂向混合均匀，表底温度基本一致。随着气温升高、大气

热通量增加、风混合减弱以及海洋中跃层逐渐形成，表底层温差逐渐增大，4—10月，表层温度高于底层。由于直接受大气加热和冷却影响，表层的升温与降温速度均快于底层。

2.2 年际变化

考虑到数据的连续性，选择1963—1996年水温数据分析冬、夏季长江口外海域表层、10m层、20m层和30m层水温的年际变化规律。

由图3可以看出，温度存在显著的年际变化信号和冷暖交替，应用循序算法诊断，得到表层、10m层和30m层水温都在1979年存在从冷相位到暖相位的跃迁。冬季长江口区域表层水温时间序列在1963—1978年处于冷相位，1979—1995年为暖相位，均值分别为12.32℃和13.45℃，温度增加了1.13℃；10m层与30m层的水温变化趋势和跃迁年份与表层相同，暖位相相比冷位相温度分别增加了1.10℃和1.39℃。30m层水温的冷相位年间均值较表层和10m层低0.28℃，而暖相位年间的均值较表层和10m层高0.08℃和0.11℃，转折指数(RSI值)较大，增温幅度更大一些，说明转折更明显。20m层虽没有通过循序算法检验，但整体变化趋势与其它层次相似，由于暖期个别年份20m层水温较低，因此循序算法并未诊断出跃迁年份，如果也以1979年为界，20m层水温均值分别为

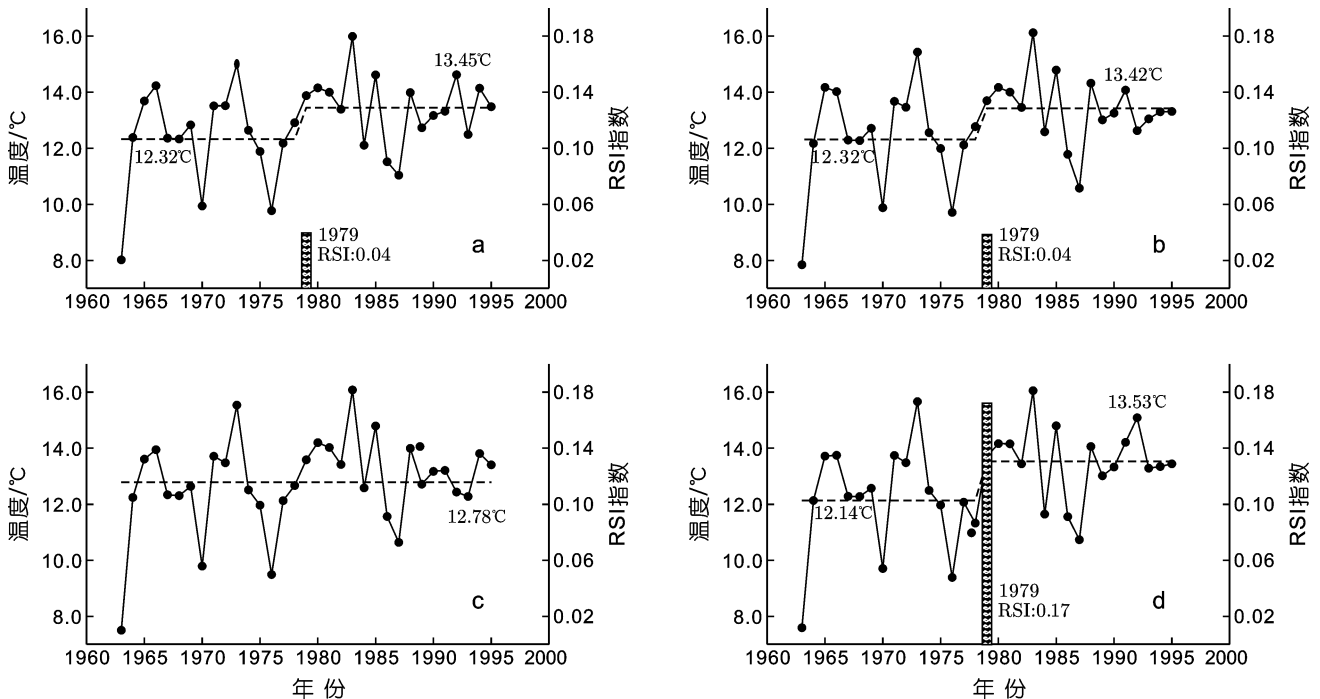


图3 冬季水温的年际变化

Fig.3 Inter-annual variations of water temperatures in winter

a. 表层, b. 10m, c. 20m, d. 30m

12.24℃和 13.29℃，温度增加了 1.05℃。因此可以认为，1963—1995 年间，长江口外海域冬季水温在不同层次上都存在明显的增暖趋势，且底层增温最显著。

以 4 月作为春季的代表月分析 1963—1996 年春季长江口外海域表层、10m 层、20m 层和 30m 层水温的年际变化(图 4)。图 4 可看出，春季水温也存在显著的年际变化信号，但温度的振荡幅度相比冬季要小。应用循序算法诊断出表层、10m 层、20m 层和 30m 层水温分别在 1979、1973、1973 和 1975 年存在从冷相位到暖相位的跃迁。表层水温时间序列在 1963—1978 年处于冷相位，1979—1996 年为暖相位，均值分别为 12.75℃和 13.62℃，温度增加 0.87℃；10m 层和 20m 层水温时间序列在 1963—1972 年位于冷相位，1973—1996 年为暖相位，10m 层均值分别为 11.96℃和 13.27℃，温度增加 1.31℃，20m 层温度低于 10m 层，均值分别为 11.33℃和 12.84℃，增加 1.51℃；30m 层水温时间序列 1963—1974 年处于冷相位，1975—1996 年处于暖相位，均值分别为 11.59℃和 12.84℃，温度增加 1.25℃。与冬季一样，1963—1995 年间，长江口外海域春季水温也存在明显的增暖趋势。总体看，冬季和春季平均增温强度相当，但是冬季水温振荡的幅度大，下层海洋增温比上层海洋大。

2.3 水平分布变化

以水温跃迁年为界，分别将冷期和暖期中海域内所有温度在空间上按照 0.5°×0.5°区域进行平均，得到冷期和暖期长江口外海域水平的平均水温分布，图 5 和图 6 分别给出了冬季和春季冷暖期温度的差异的分布。

由图 3 可知，冬季各个层次温度变化规律一致，表底温度差异较小，因此只给出了冬季表层冷暖期温度差异的分布(图 5)。以 1979 年为界，1979—1996 年为暖期，1963—1978 年为冷期。通过冷暖期表层水温平面分布的变化，可知该区域暖期较冷期南部水温降低，但沿岸及北部靠近长江口区域水温上升，且河口外区域温度增加幅度最大。

为了便于比较，春季各层水温变化的冷暖期统一以 1979 年为界，1979—1996 年定义为暖期，1963—1978 年定义为冷期，同样将冷暖期水温按照 0.5°×0.5°平均，图 6 分别给出了和表层、10m 层、20m 层和 30m 层的水温差异的平面分布的变化。和冬季不同，近岸海域的水温暖期相比冷期低。表层主要升温区域有南北两个，一是 31°N 以南 123.5°—124.5°E 范围内，二是 31.5°—32.5°N 范围内。南部升温区域在中间，两侧近岸和外陆架温度都降低，且近岸降低幅度

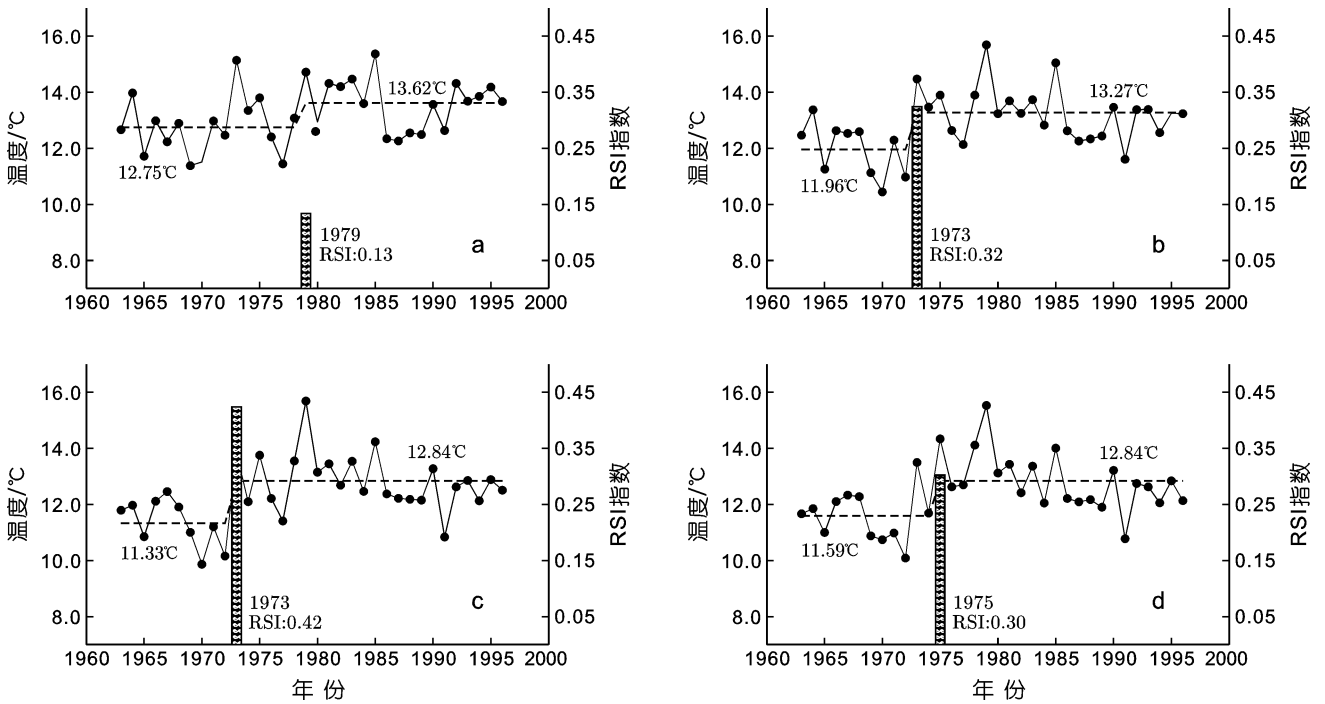


图 4 春季水温的年际变化

Fig.4 Inter-annual variations of water temperatures in spring
a. 表层, b. 10m, c. 20m, d. 30m

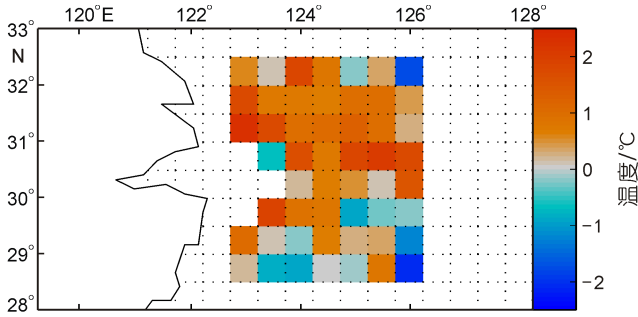


图5 1979—1996年与1963—1978年冬季平均水温差值的分布

Fig.5 Horizontal distribution of the difference of the average winter water temperatures of 1963—1978 and 1979—1996

最大。北部海域升温温差呈由西向东升高的趋势，南部升温区域由上向下逐渐减小，20m层升温区域较0m层减小约一倍。过去近40年来，长江口外海域水温整体呈上升趋势，但是水温的变化存在较大的空间差异性，除了东海外陆架暖期温度比冷期降低，冬季水温整体呈增加趋势，春季则是近岸和外陆架暖期温度比冷期降低，存在南北两个升温区域。

2.4 垂向结构的变化

在风搅拌的作用下，冬季该海域垂向混合充分，表底温度差异很小，表层与20m层的年际变化相关系数高达0.97(置信度大于99%)。春季跃层逐渐形成，表层与20m层水温的年际变化相关系数较冬季变小，

呈现出差异性，因此这部分仅分析春季水温的垂向结构变化。

作者将该区域四月表层、10m层、20m层和30m层的水温随时间变化图放在一起，观察四月水温垂向结构随时间的变化。图7a可看出表层和其它层次温度存在明显差异，表层温度最高，20m和30m最低，两者变化基本一致，10m介于两者之间。因此，作者利用表层和20m温度差的变化来刻画水温垂向结构的变化。由图7b不难看出，表层与20m的温差存在约10年左右的变化周期。1965—1969年、1975—1980年和1985—1990年温差小于1°C。在20m层水温跃迁年(1973年)的前一年，温差达到最大值2.31°C。在表层跃迁年1979年，温差最小，约为-0.97°C(由于缺少1978年4月该区域水温数据，无法判断1978年的情况)。接着作者将1978年水温插值后，利用循序算法，取 $P=0.1$ ，截断长度 $L=5$ ， $H=2$ ，得到1965—1996年表层与20m水温差值发生转折的年份分别为1970、1975、1981、1986和1991年。

3 讨论

影响海水温度变化的因素复杂多变，主要包括海气热输送、侧向热输送和被加热水体本身热容量等。海气热输送受包括风和气温等大气强迫影响，侧向热输送收海流、径流等因素影响，而水体热容量受

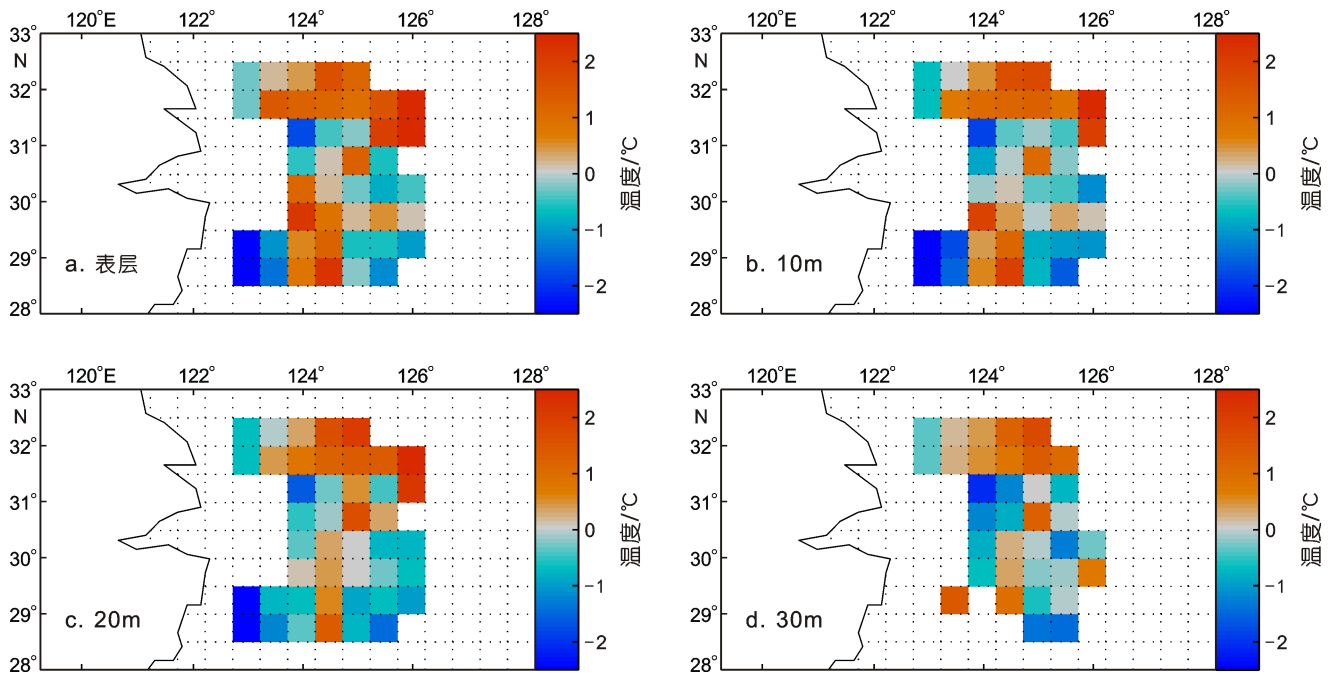


图6 1979—1996年与1963—1978年春季平均水温差值的分布

Fig.6 Horizontal distributions of the differences of the average spring water temperatures of 1963—1978 and 1979—1996

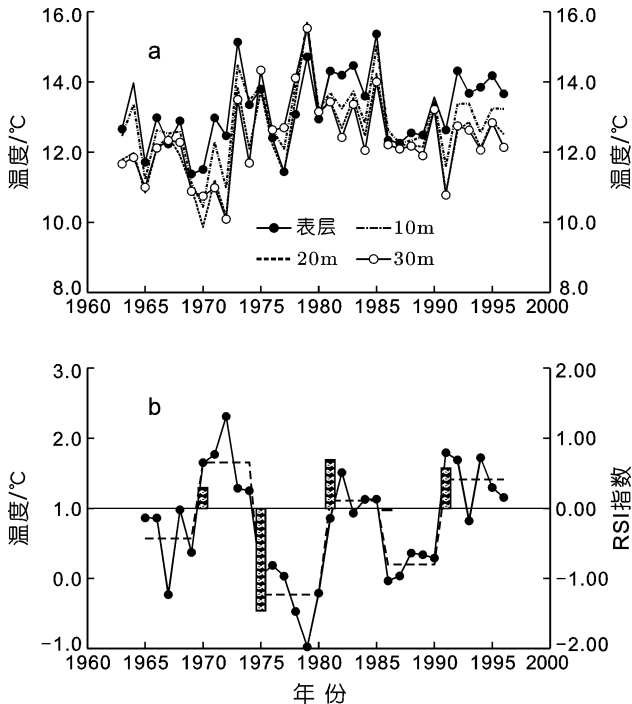


图7 春季各层次水温的年际变化以及表层与20m温差的年际变化

Fig.7 Inter-annual variations of water temperatures in different layers and the temperature differences between surface layer and 20m layer in spring

注: a 为春季各层次水温的年际变化; b 为春季表层与20m层温差的年际变化

水深、跃层等因素影响。

采用赵汉光等(1996)文中的方法,利用大气压数据计算了1963—1996年间东亚冬季风指数。结果显示东亚季风指数在1980年前后存在一个转折,指数在1980年后较1980年前上升了0.13,转折后季风变强。季风指数和水温都在1980年前后同样存在一个转折,但是两者之间没有明显的关系。

将NCEP月均气温数据进行处理,得到1963—1996年31.4281°N, 123.75°E这一格点上冬季和4月气温数据。冬季气温与海表温度的相关系数达到0.53,置信度大于99%。同样置信度的前提下,1963—1976年间4月气温与海表温度相关系数高达0.79,而1976年之后两者又找不到明显的相关关系。利用的循序算法发现,4月气温的转折年为1984年,且1984—1996年较1963—1983年平均气温下降0.64°C,而4月海表温度在转折年后上升,说明两者的转折机制不同。另外,将四月表层与20m层温差的年际变化与该区域风速、气温和净热通量进行了比较,发现其与风速和气温无明显关系。1963—1996年4月表层与20m层温差与净热通量的相关系数仅为0.32,但是在水温

从冷期转折到暖期后,1979—1994年表层与20m层温差与净热通量的相关系数为0.65(置信度大于99%)。说明在1979—1994年间的4月,长江口海域的净热通量对海表水温变化有显著贡献。

上述比较说明,春季水温在冷暖转折前后,受控机制不同,冷期受气温变化影响比较大,到了暖期后则和气温没有直接联系,此时受海气净热通量影响更大。

关于海温年际、年代际变化转折年份的研究,Minobe(1997)对北太平洋气候振荡的研究表明,北太平洋东部春季海表温度、北太平洋中部冬、春季的海表气压、日本Enoshima附近春夏季的海表温度和印度洋年均海表温度异常均在1976/1977年存在气候转折。Graham(1994)对观测资料进行分析并进行模式模拟,指出1976/1977冬季起,赤道中东太平洋地区大面积增暖,北太平洋中部显著变冷。相比于北太平洋,长江口海域水温在冬季发生的转折年份晚两年,而四月水温除表层外其它层次变化的月前年份均早于北太平洋数年。冯琳等(2009)的研究认为,东中国海SST的变化相对于太平洋具有一定的滞后性,但气候跃迁信号极有可能是从太平洋传进东中国海的。可以推测,长江口外海域水温除了受到大气强迫的影响,还会受到太平洋传递进来的信号的影响,此外,长江径流量的变化导致的长江口外海域温、盐、密度结构的变化都会影响这个海域温度的分布和变化,其变化机制需要进一步深入讨论。

4 结论

在季节变化上,长江口外海域表层水温在8月最高,3月最低,底层水温9月最高,3月最低,表层温度变化幅度和速度均大于底层;年际变化上,冬季和春季都存在明显的增暖趋势。冬季除20m层水温外,均在1979年存在一个由冷到暖的跃迁,且深层增温较表层显著,4月水温的年际变化较冬季复杂,表层、10m层、20m层和30m层水温分别在1979、1973、1973和1975年发生从冷到暖的跃迁,冬季和春季平均增温强度相当,但是冬季水温振荡的幅度大;冷暖年温度变化的水平分布上,冬季除东南角小范围表层水温降低外,沿岸及北部海区表层水温均升高,春季北部和南部中间海域暖期水温比冷期升高,但是在近岸和外陆架降低;垂向结构上,冬季表底混合均匀,表层与20m层的年际变化相关系数高达0.97,4月表层与20m层水温差存在10年左右的变化周期。

检验了大气强迫量和水温变化之间的关系, 发现: 在冷期, 4 月表层水温与长江口外海域气温的相关系数为 0.79, 而在暖期, 4 月表层与 20m 层水温差与长江口外海域的净热通量相关系数为 0.65, 冷暖期, 水温变化的影响因素不同, 但具体作用机制尚不清晰。今后工作中, 将从径流量、海表和侧向热输送及大洋信号影响等各方面讨论温度变化的控制机制。

参 考 文 献

- 冯 琳, 林霄沛, 2009. 1945—2006 年东中国海海表温度的长期变化趋势. 中国海洋大学学报, 39(1): 13—18
- 张 芳, 孙 松, 李超伦, 2009. 海洋水母类生态学研究进展. 自然科学进展, 19(2): 121—130
- 陈洪举, 刘光兴, 2010. 夏季长江口及邻近海域水母类生态特征研究. 海洋科学, 34(4): 17—24
- 赵汉光, 张先恭, 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系. 气象, 22(4): 8—12
- 程家骅, 丁峰元, 李圣法等, 2005. 东海区大型水母数量、分布特征及其与温盐度的关系. 生态学报, 25(3): 440—446
- Graham N E, 1994. Decadal-scale climate variability in the tropical and North Pacific during the 1970s and 1980s: observations and model results. *Climate Dynamics*, 10(3): 135—162
- Minobe S, 1997. A 50—70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophysical Research Letters*, 24(6): 683—686
- Minobe S, Sako A, Nakamura M, 2004. Inter-annual to inter-decadal variability in the Japan Sea based on a new gridded upper water temperature dataset. *Journal of Physical Oceanography*, 34: 2382—2397
- Overland J, Rodionov S N, Minobe S *et al*, 2008. North Pacific regime shifts: Definitions, issues and recent transitions. *Progress in Oceanography*, 77: 92—102
- Rodionov S N, 2004. A sequential algorithm for testing climate regime shifts. *Geophysical Research Letters*, 31: L092024
- Rodionov S N, Overland J E, 2005. Application of a sequential regime shift detection method to the Bering Sea ecosystem. *ICES Journal of Marine Science*, 62(3): 328—332

VARIATIONS OF THE WATER TEMPERATURE OFFSHORE THE CHANGJIANG RIVER ESTUARY IN WINTERS AND SPRINGS

HU Ying-Ying¹, ZHAO Liang¹, GUO Xin-Yu², WEI Hao³

(1. *Physical Oceanography Laboratory, Ocean University of China, Qingdao, 266100*; 2. *Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama, Japan, 7908577*; 3. *College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin, 300457*)

Abstract Using historical water temperature data offshore the Changjiang River estuary from 1963 to 1996, we analyzed seasonal and inter-annual temperature variations at sea surface, 10m, 20m and 30m depths and the variations of vertical structure. Seasonally, we found that the surface water temperature was the highest in August and the lowest in March; the bottom water temperature was the highest in September and the lowest in March. For inter-annual variations, the winter water temperatures shifted from cold phase to warm phase in 1979. Although the spring (defined as April here) water temperatures at all depths also shifted from cold phase to warm phase. The shifts occurred in different years. Horizontally, the winter surface water temperature had an increasing trend along coast and northern part of study area but a decreasing trend on southeastern part; spring water temperature had an increasing trend, whose magnitude decreased from sea surface to 30m depth, in northern and middle-southern areas. Vertically, winter water temperatures were homogenous and the correlation coefficient for inter-annual variations between sea surface and 20m depth was 0.97; water temperature difference of sea surface and 20m depth in spring presented an approximately 10 years periodic variation. We examined some possible factors affecting inter-annual variations in water temperature in spring and found significant correlation between sea surface water temperature and air temperature during cold period and the correlation coefficient was 0.79, which was greater than that during warm period. We also found significant correlation between net heat flux and water temperature difference of sea surface and 20m depth during warm period, with a correlation coefficient of 0.65.

Key words Inter-annual variations, Water temperature, Changjiang River estuary, Winter and Spring