

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020080301

# 南黄海西部日照至连云港海域的春季温跃层和化学跃层

秦亚超<sup>1,2</sup>, 高飞<sup>1,2</sup>, 苏大鹏<sup>1,2</sup>, 朱晓青<sup>1,2</sup>, 谢柳娟<sup>1,2</sup>

1. 自然资源部天然气水合物重点实验室, 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071

2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071

**摘要:**利用2016年5月5个站位的温盐深(CTD)和海流(ADCP)同步测量资料,分析南黄海西部日照至连云港海域温跃层和化学跃层的日内生消过程及强度变化,探讨深层水温度、盐度的周期性变化及其与潮流的关系。结果表明:南黄海西部海域在5月已存在日内生消的温跃层和溶解氧(DO)、pH跃层。温跃层厚度为2~4 m,层位水深为4~7 m至7~10 m之间波动,跃层强度最大可达0.80 °C/m。DO跃层和pH跃层位于温跃层之下,水深为10~14 m,两者的形成在时间和深度上具有一定的同步性,且不受温跃层控制。在DO跃层之上,氧浓度在白天都保持在相当高的水平,甚至处于过饱和状态,但存在显著波动,其峰值并不出现在表层(0~2 m),而是位于次表层(2~14 m)。在DO跃层之下,氧浓度低且稳定,约为4 mg·L<sup>-1</sup>,向下呈缓慢降低的趋势。pH跃层表现为垂向上的快速跳变,包括向下的正跳变和负跳变,强度最大值可达0.03~0.04个pH单位。小潮期间,温跃层稳定,强度较大;大潮期间,温跃层强度明显减弱,稳定性变差;这表明潮流的增强对温跃层有明显的抑制和破坏作用。深层水的温度、盐度等参数存在日内周期性变化,与潮位变化同步,是潮流驱动下水体水平对流的结果。

**关键词:**温跃层;化学跃层;pH剖面;DO剖面;潮流;南黄海

中图分类号:P731.1

文献标识码:A

## Late spring thermocline and chemoclines in the area off the Rizhao–Lianyungang coast, western South Yellow Sea

QIN Yachao<sup>1,2</sup>, GAO Fei<sup>1,2</sup>, SU Dapeng<sup>1,2</sup>, ZHU Xiaoqing<sup>1,2</sup>, XIE Liujuan<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Gas Hydrate, Ministry of Natural Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

**Abstract:** Conductivity–temperature–depth (CTD) measurement and continuous current observation with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) were synchronously conducted in May, 2016, at five hydrographic stations off the Rizhao–Lianyungang coast, western South Yellow Sea. The intraday evolution of thermocline and chemoclines is analyzed and the relation of the periodical changes in temperature and salinity of the deep water with tidal currents is discussed. Results show that the thermocline and chemoclines of dissolved oxygen (DO) and pH have formed as early as in May. The thickness of thermocline usually varies between 2~4 m. It mostly dwells in the depth range from 4~7 m to 7~10 m. The maximum gradient reaches 0.80 °C/m. DO and pH chemoclines dwell at the depths of 10~14 m, which are deeper than the thermocline. To some degree, the chemoclines of DO and pH occur synchronously at the same depths and have no relations to the thermocline. Above the chemocline DO fluctuates markedly and maintains at a high level or even oversaturated in daytime. Its peak concentrations do not occur in the surface layer (0~2 m) but in the sub-surface layer (2~14 m). Below the chemocline it invariably remains about 4 mg·L<sup>-1</sup> and slowly drops downward. The pH chemocline is characterized by vertical rapid jump, including downward positive and negative jumps with a maximum strength of 0.03~0.04 pH units. In the neap tides thermocline is stable with a large gradient, whereas in the spring tides the gradient and sustainability is reduced apparently. These results suggest that the enhancement of tidal currents undermines the sustainability of thermocline. The periodical changes in temperature and salinity of deep waters are consistent with that of the tidal level, indicating the consequence of advection driven by tidal currents.

**Key words:** thermocline; chemoclines; pH profile; DO profile; tidal current; South Yellow Sea

资助项目:中国-东盟海上合作基金项目“中国-东盟海洋地震数据平台与研究中心建设”(12120100500017001);中国地质调查局项目(GZH201400206, DD20160139, DD20190236, DD20190377)

作者简介:秦亚超(1971—),男,博士,从事海洋地质调查与研究, E-mail: Lucifer2046@126.com

收稿日期:2020-08-03; 改回日期:2020-10-13. 蔡秋蓉编辑

黄海水团可分为沿岸水、中部冷水团和两者之间的混合水。沿岸水分布于黄海沿岸两侧, 由于受大陆地表径流的影响, 沿岸水混浊, 透明度低, 盐度通常低于 31 psu<sup>[1]</sup>, 其分布范围夏季大而冬季小, 但厚度则夏季浅而冬季深。黄海冷水团是一个季节性冷水团, 其下层水具有低温、高盐的特征, 盘踞在黄海中部 50 m 以深的水域<sup>[2]</sup>。冷水团在夏季尤为强盛, 其边缘存在封闭型的温度强锋区, 底层水盐度通常大于 32 psu<sup>[3]</sup>。沿岸水与中部冷水团之间的混合水多呈过渡性质。

黄海的季节性变化显著, 常出现季节性跃层, 跃层生消过程明显<sup>[4]</sup>。夏半年水体常具有明显的三层结构, 即上混合层、中温跃层和下均匀层<sup>[5]</sup>。除苏北近岸及黄海西南海域外, 黄海温跃层普遍形成于 4 月, 但强度较弱, 通常为 0.10~0.20 °C/m, 上界深度为 5~10 m, 厚度约为 10 m; 8 月, 黄海温跃层强度普遍在 0.30 °C/m 以上, 上界深度为 5~20 m, 厚度为 10~20 m。陆架浅海区季节性温跃层的形成, 不仅受制于海面热通量的日内变化<sup>[5-6]</sup>, 还与多种动力因素(风、波浪和潮流的混合效应)<sup>[5-11]</sup>或热力因素(如蒸发增盐或降温增密)所导致的水体垂向混合强度以及不同性状水团之间的水平对流作用有关。由于海水密度由温度和盐度控制, 因此, 温跃层通常与密度跃层同时出现。

海洋水体通常具有不均一性, 在垂直于等密度面的方向上, 每个水层的化学性质都会有所差异, 出现 DO、pH 和营养盐等要素的化学分层现象。该现象常见于一些生物活动旺盛的季节或海区, 比如珊瑚礁海域<sup>[12]</sup>、海草繁茂海域<sup>[13]</sup>。在北美加利福尼亚近岸的海带丛林, 生态系统的光合作用使得水体 DO 和 pH 出现半日或全日的周期性变化; 在水深 7 m 处, pH 为 8.07; 至水深 17 m 处, pH 可降低至 7.87<sup>[14]</sup>。在美国东北陆架海域, 借助于水下潜航器搭载的 pH 传感器, 也可探测到垂向上 pH 值的变化<sup>[15]</sup>。

南黄海西部日照至连云港海域, 是一个大型的开阔海湾(图 1), 水深在 30 m 以内, 由苏北沿岸水控制<sup>[4, 16]</sup>。由于周边多为小型河流, 地表径流量低<sup>[17]</sup>, 沿岸水受大陆径流的影响弱, 水体盐度偏高, 且较为稳定。春夏之交, 是南黄海冬季混合水向夏季分层水转变的时期, 也是南黄海温跃层形成的初始阶段。温跃层稳定性差, 具有明显的日内短周期特征。潮流对水文参数的影响可能表现得更为突出。日照至连云港海域水体稳定, 无明显径流干扰, 这些有利条件也使得本区成为研究潮流作用对水体水文参数影响的理想海域。

本研究通过温盐深和海流同步定点调查, 了解春季末(5 月)日照至连云港海域的温度、盐度、浊度、pH 和 DO 等水文参数及其垂直结构, 分析温跃层和化学跃层的日内变化和生消过程, 探讨潮流对跃层及水文参数变化的影响。

## 1 数据与方法

2016 年 5 月 8 日至 24 日, 利用“向阳红 07”考察船, 在日照至连云港海域进行了温盐深和海流定点测量, 共布设站位 5 个(图 1), 每个站位连续观测 25 h, 站位信息详见表 1。温盐深测量采用美国 SBE 公司生产的 SBE19 plus CTD 水质剖面仪, 通过电动绞车悬挂入水, 感温 1~3 min, 从海面匀速降至海底, 下放速度控制在 1 m·s<sup>-1</sup> 以内, 随后再提升至海面。每个整点测量一次, 水文采样频率为 4~5 Hz, 主要观测参数包括温度、盐度、浊度、DO 和 pH 等, 以仪器下降阶段获取的数据为正式测量值。温度测量的准确度为±0.02 °C, 分辨率为 0.005 °C。盐度的准确度为±0.02 psu, 分辨率为 0.005 psu。

海流测量采用美国 Teledyne RD Instruments 公司生产的 Workhorse Sentinel 300 kHz 声学多普勒流速剖面仪(ADCP), 观测深度为 3~40 m, 固定安装在船右舷中间位置, 换能器固定吃水 1 m, 观测层厚 1 m, 共分 40 层, 除仪器本身盲区之外, 所观测第一层的海流数据为海面以下 2.72 m 处, 观测频率为 1 Hz, 每 10 分钟得到一个平均海流数据。当流速<100 cm·s<sup>-1</sup> 时, 流速测量的准确度为±5 cm·s<sup>-1</sup>, 流向的准确度为±5°。调查期间, 天气及海况良好, 轻浪。该海域的海流以潮流占绝对优势, 因此, 本文 ADCP 数据均按照潮流来处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度、盐度和浊度剖面特征

温度垂向剖面的日内变化显示, W2、W3、W4 和 W5 站位, 水体分层现象最为明显, 从上向下可依次划分为上部混合层、温跃层和下部均匀层(图 2); W1 站位层化现象不明显。水体分层一般出现于下午约 16 时, 延续至次日上午 9 时甚至 10 时左右, 温跃层厚度为 2~4 m, 层位水深为 4~7 m 至 7~10 m 之间波动, 跃层强度最大可达 0.80 °C/m(如 W5 站位 5 月 23 日 10 时曲线所示)。从上午约 9 时至下午约 16 时, 由于太阳辐射作用及热量的向下传导,

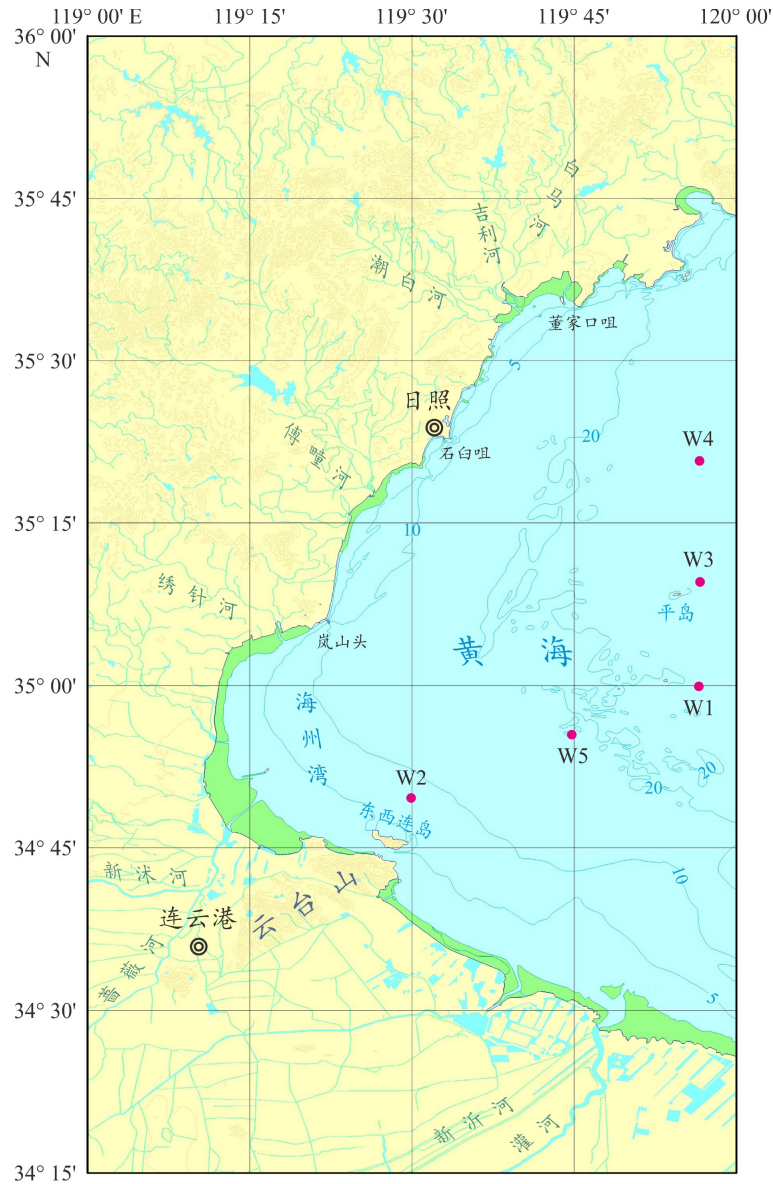


图1 南黄海西部日照至连云港海域水文观测站位分布

Fig.1 Map of the study area showing the locations of 5 hydrological stations off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

表1 观测站位信息一览表

Table 1 The detailed information from the observation stations off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

站位	北纬	东经	观测周期	阴历日期	潮周期	平均水深/m
W1	34° 59' 56.688"	119° 56' 32.064"	5/08 07:00 – 5/09 07:00	初二、初三	大潮	23.2
W2	34° 49' 37.164"	119° 29' 56.508"	5/10 17:00 – 5/11 17:00	初四、初五	中潮	10.3
W3	35° 09' 33.840"	119° 56' 40.200"	5/17 14:00 – 5/18 14:00	十一、十二	小潮	26.7
W4	35° 20' 46.968"	119° 56' 36.924"	5/18 16:00 – 5/19 16:00	十二、十三	中潮	25.2
W5	34° 55' 27.624"	119° 44' 46.824"	5/23 10:00 – 5/24 11:00	十七、十八	大潮	21.2

上混合层消失,温跃层可扩张至海面。

盐度的垂向变化仅见于上混合层和温跃层,下部深层水盐度垂向变化非常小(图3)。变化幅度最大的层位主要集中于表层和温跃层。表层海水受

波浪和潮流影响很大,在潮流驱动下,外海高盐度水团与近岸低盐度水团之间的水平对流所引起的混合过程,使得盐度出现明显波动。在温跃层附近,由于相邻水层温度、盐度的差异,其混合过程常出

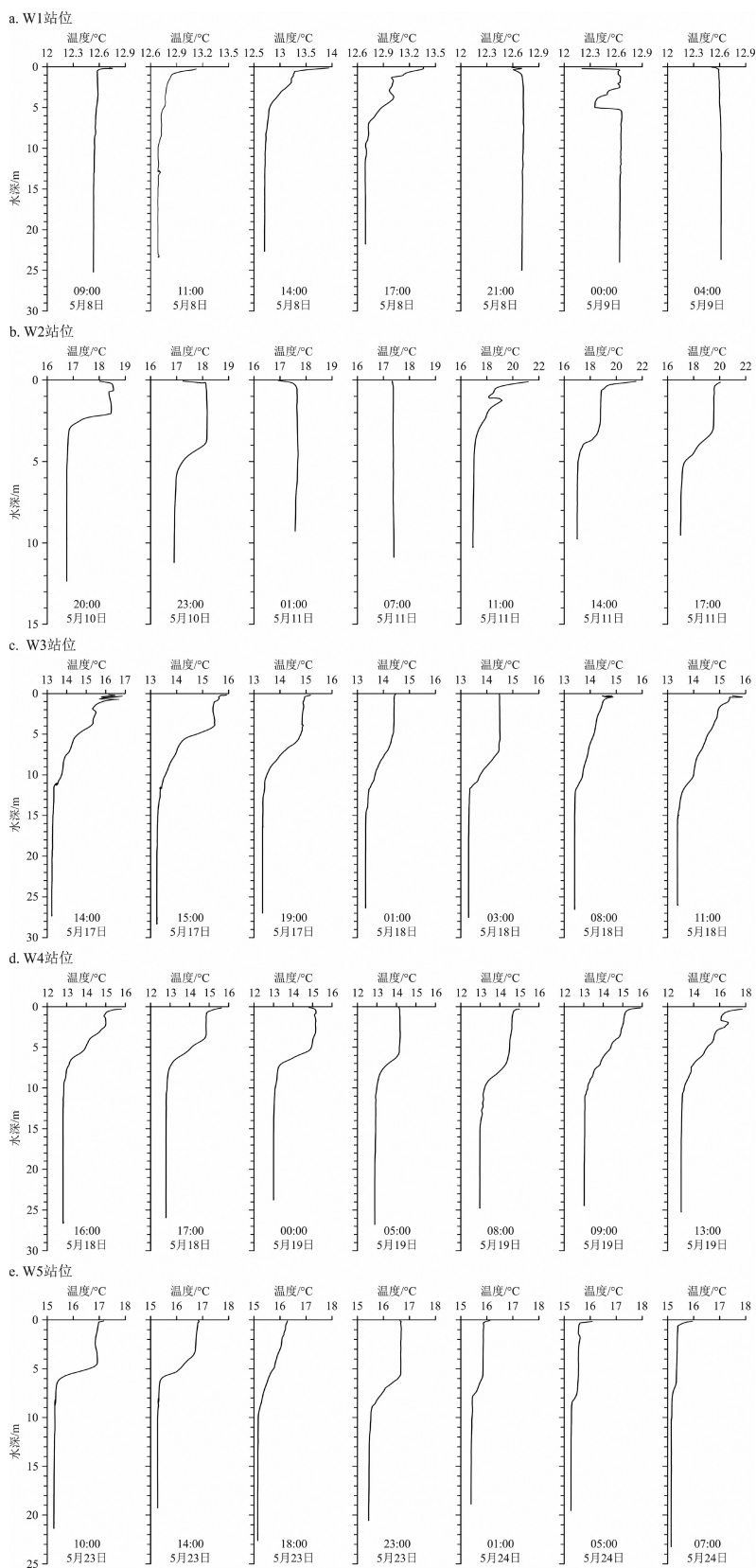


图 2 南黄海西部日照至连云港海域水柱温度典型剖面的日内变化  
每个站位从 25 个时间序列中选择 7 个具有代表性的剖面进行展示。

Fig.2 The intraday evolution of representative profiles of water column temperature off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

7 typical profiles out of 25-hour time series are presented at each station.

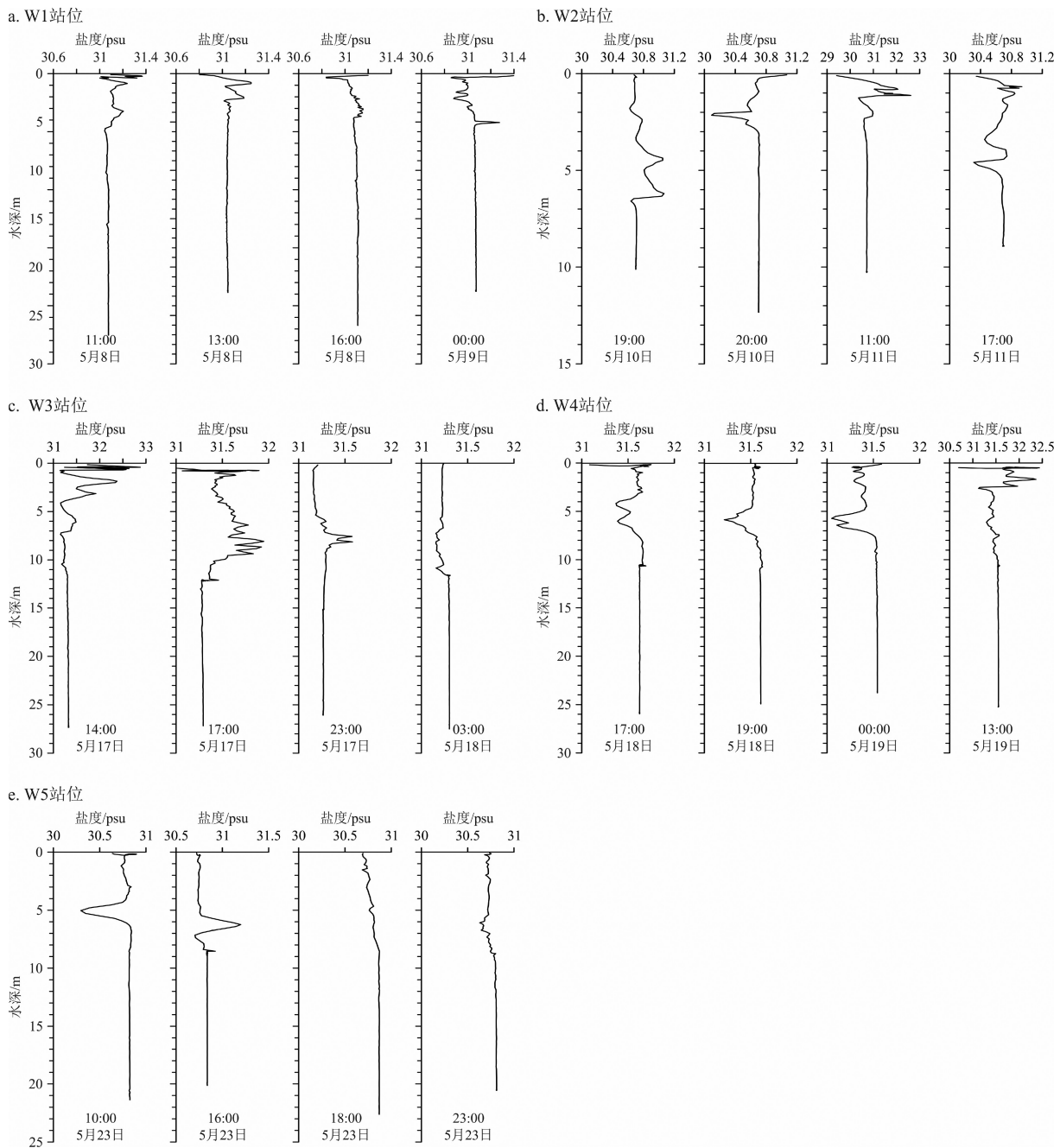


图3 南黄海西部日照至连云港海域水柱盐度典型剖面的日内变化

Fig.3 The intraday evolution of typical profiles of water column salinity off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

现盐指现象<sup>[18]</sup>。当温度梯度较小、跃层较厚时,常出现一簇指状的盐度峰(或谷)值,比如,W3 站位 5月17日17时和23时的剖面(图3c);而当温度梯度大、跃层厚度薄时,常出现单一的盐度峰(或谷)值,比如,W4 站位 5月18日19时和19日0时剖面(图3d)、W5 站位 5月23日10时和16时剖面(图3e)。

虽然水体上层温度、盐度等日内变化明显,但跃层之下这些指标垂直分布呈均匀状态(图2,图3),表明深层水非常稳定,这里以水深20m的日内平均值代表其温盐状况。W1 站位平均水温 12.67℃,

W2 站位(水深8m处)17.00℃,W3 站位 13.32℃,W4 站位 12.96℃,W5 站位 15.26℃。除W2 站位之外,随着时间序列的延长,温度总体呈上升趋势。在站位纬度相近的情况下,反映了5月8日至24日这段观测期内海面热输入的日益增强。W1 站位平均盐度 31.10 psu, W2 站位(水深8m处)30.70 psu, W3 站位 31.29 psu, W4 站位 31.58 psu, W5 站位 30.83 psu。除了W2 和W5 站位由于距离海岸较近、盐度偏低之外,显示深层水体盐度稳定。

水体浊度向下呈缓慢增加的趋势,接近海底浊



度明显升高。以水深 20 m 的浊度日内平均值统计, W1 站位 7.6 NTU, W2 站位(水深 8 m 处) 32.2 NTU, W3 站位 3.2 NTU, W4 站位 2.8 NTU, W5 站位 5.4 NTU, 近岸水体浊度明显上升。部分剖面显示跃层附近也存在明显的浊度梯度, 表明相邻水层之间存在性质差异。

## 2.2 DO 和 pH 剖面特征

DO 垂向剖面一般具有双层结构, 上部为富氧水, 下部为低氧深层水。两者之间的界面有时可出现较高的 DO 梯度, 指示存在跃层; 有时则呈振荡降低的趋势, 显示跃层不明显(图 4)。以 W1 站位为例, 在 5 月 8 日 9 时、13 时和 19 时, DO 跃层出现于水深 12~14 m 处。在跃层之上, 白天 DO 浓度波动显著, 但都保持在较高浓度水平; 夜晚 DO 浓度明显降低。通常, 氧的穿透深度随水深增加而逐渐降低, 然而, W1 站位的氧浓度峰值很少出现于表层(0~2 m) 而是常见于次表层(2~14 m), 最高可达约  $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在跃层之下, 氧浓度通常保持在约  $4 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 向下呈缓慢降低的趋势。在 W1 站位水温  $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$  和盐度 31 psu 条件下, DO 饱和度为  $8.68 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ [19]。白天次表层水广泛的 DO 过饱和现象, 可能主要与藻类等浮游植物的光合作用有关。

pH 跃层表现为垂向分布上的快速跳变, 它有两种相反的模式, 即向下正跳变和向下负跳变。前者出现于 5 月 8 日 8 时和 5 月 9 日 0 时、2 时, 后者出现于 5 月 8 日 13 时, 强度可达 0.03~0.04 个 pH 单位(图 5)。以 W1 站位为例, pH 跃层出现于水深

10~14 m 处。pH 跃层的存在表明, 在下部深层水与上部温跃层之间存在弱的化学界面, 这有助于维持深层水的低氧状态。

与温度剖面进行对比显示, DO 跃层和 pH 跃层的深度均位于温跃层之下, 表明两者的形成并不受温跃层控制。有时 DO 跃层和 pH 跃层同步出现在同一深度, 比如在 5 月 8 日 13 时, 但也有时两者并不同步, 比如在 5 月 8 日 9 时和 19 时(图 6)。上层水柱 DO 浓度的变化和 pH 跃层模式的日内转换, 与大潮期间潮流驱动下水层之间水平对流的差异密切相关(详见下文分析)。

## 2.3 潮流特征

潮位变化曲线表明, 本区为规则半日潮(图 7)。在 W1 站位, 观测期为阴历初二、初三, 处于大潮期间, 最高潮位 2.21 m, 最低潮位 -2.26 m, 潮差 4.47 m。在 W2 站位, 观测期为阴历初四、初五, 处于中潮期间, 最高潮位 2.16 m, 最低潮位 -2.49 m, 潮差 4.65 m。在 W3 站位, 观测期为阴历十一、十二, 处于小潮期间, 最高潮位 1.37 m, 最低潮位 -1.07 m, 潮差 2.44 m。在 W4 站位, 观测期为阴历十二、十三, 处于中潮期间, 最高潮位 1.34 m, 最低潮位 -1.42 m, 潮差 2.76 m。在 W5 站位, 观测期为阴历十七、十八, 处于大潮期间, 最高潮位 2.01 m, 最低潮位 -1.92 m, 潮差 3.93 m。以上观测数据显示, 近岸潮差明显大于离岸潮差。近岸站位 W2、W5, 落潮历时明显长于涨潮历时, 其比值分别为 1.21、1.34。离岸站位 W1, 落潮历时明显小于涨潮历时, 其比值为 0.86。离岸站位 W3、W4,

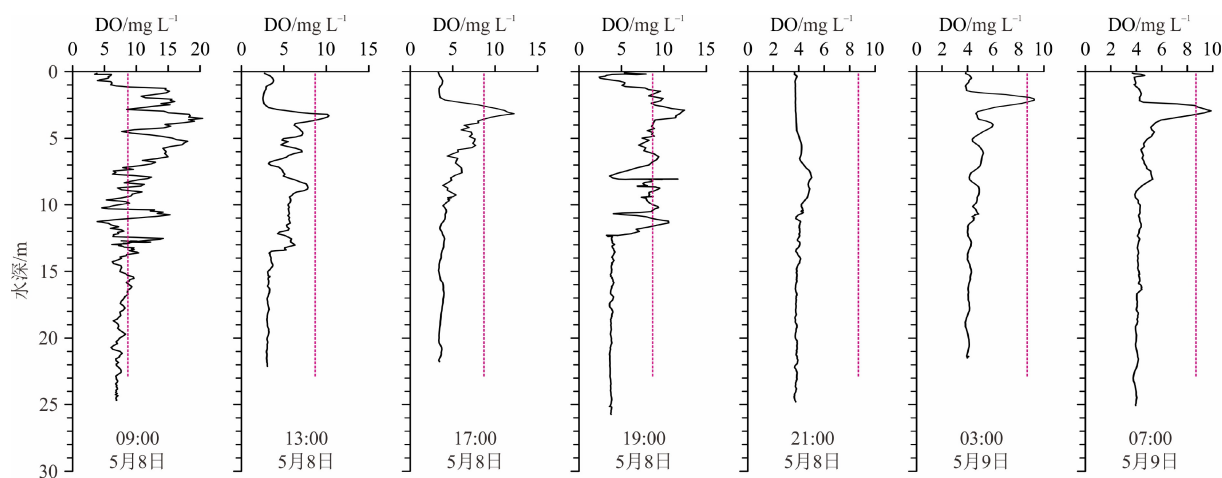


图 4 南黄海西部日照至连云港海域 W1 站位水柱 DO 典型剖面的日内变化  
红色虚线代表 DO 饱和线。

Fig. 4 The intraday evolution of typical profiles of water column DO at site W1 off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

Dotted red lines represent the DO saturation at  $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and 31 psu.

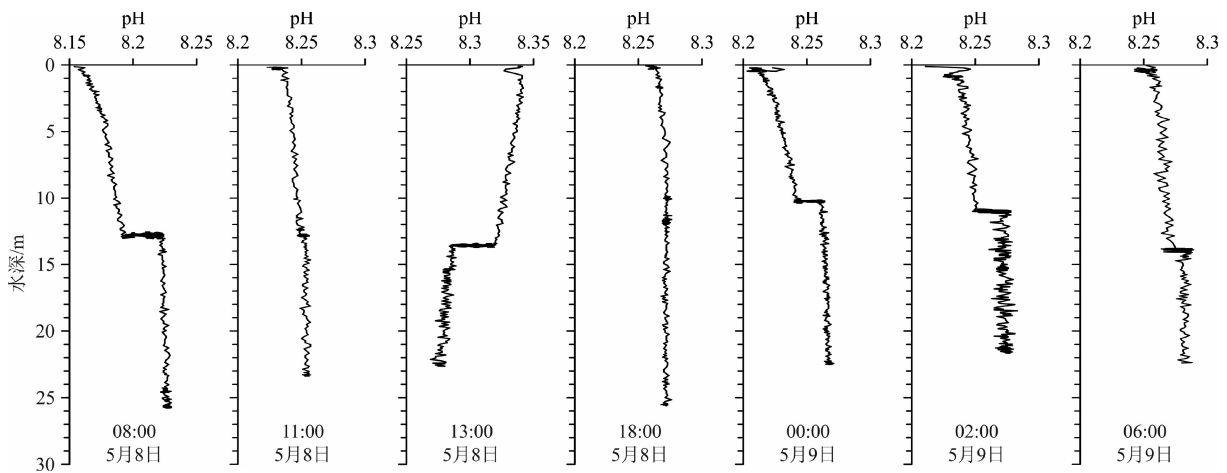


图5 南黄海西部日照至连云港海域 W1 站位水柱 pH 典型剖面的日内变化

Fig.5 The intraday evolution of representative profiles of water column pH at site W1 off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

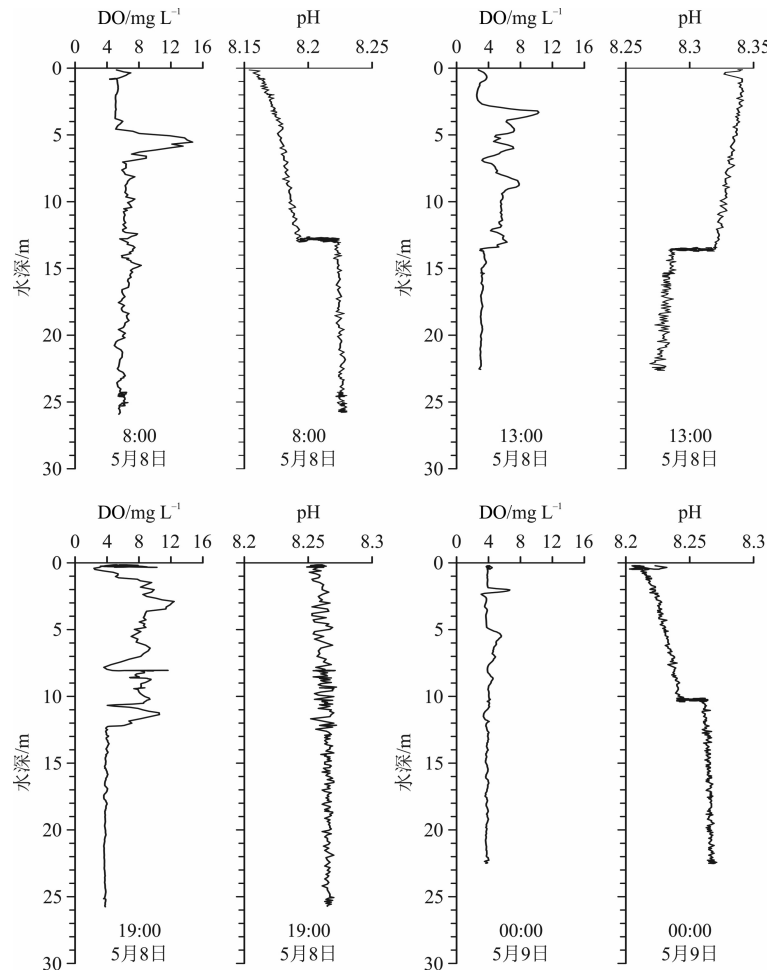


图6 南黄海西部日照至连云港海域 W1 站位代表性剖面的 DO 和 pH 对比

Fig.6 Comparison of representative profiles of DO and pH at site W1 off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

涨潮和落潮阶段历时相差不大。

以海面以下 3.72 m 处(第 2 层) ADCP 数据为例,展示 5 个观测站位的潮流流速和流向的 25 小时变化曲线(图 7)。潮流属规则半日潮流,以旋转流

为主,在 0~360°范围内呈逆时针旋转。涨潮流期间,潮流的方向从北向南旋转;落潮流期间,潮流的方向从南向北旋转。涨潮流多为西或西北向,落潮流多为东或东南向。水柱中潮流流速的分布多呈向

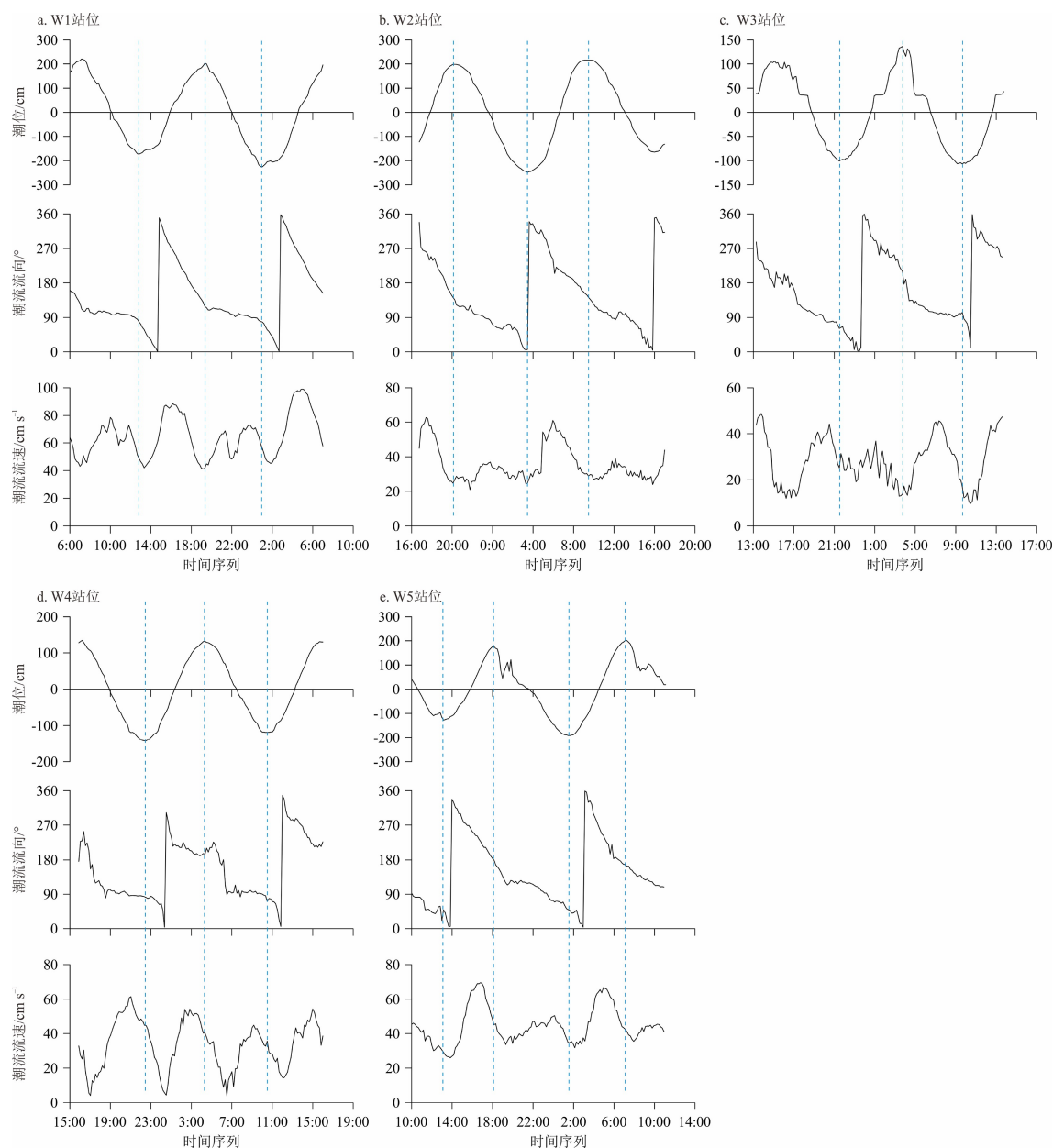


图 7 南黄海西部日照至连云港海域的潮位变化和潮流流速、流向变化的 25 小时时间序列

Fig.7 25-hour time series of tidal level changes and tidal current changes in velocity and direction off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

下缓慢降低的趋势(图 8a), 潮流流向的垂直变化较小(图 8b)。观测期间最大潮流流速约为  $100 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ , 最低流速约为  $10 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

#### 2.4 潮流对水体跃层和水文参数的影响

黄海上部混合层和温跃层主要由波浪及潮流的混合作用形成和维系<sup>[9]</sup>。在黄海西部近岸海域, 水体表面边界层的深度和垂向混合强度主要受往复流和旋转流所控制<sup>[20]</sup>。大潮期间, 潮流流速快, 波浪和潮流的混合搅拌作用较强, 表面边界层的深度加大, 上部混合层扩张, 温跃层向下迁移(比如

W5 站位(图 2e)), 同时跃层强度也会明显减弱(比如 W1 站位(图 2a))。在小潮期间, 波浪和潮流的混合搅拌作用较弱, 表面边界层的深度减小, 温跃层向上迁移(比如 W2、W3 站位(图 2b、2c)), 伴随着跃层强度的增加。

海面的潮流和波浪可以使表层海水发生垂直混合, 进而产生上混合层, 另一方面, 在潮流驱动下, 水团还会出现水平对流现象。由于水柱中潮流流速多呈向下降低的趋势(图 8a), 随着时间的积累, 从上向下, 不同水层之间的水平位移会越来越大。相对而言, 相邻水层之间的垂向分子扩散及其



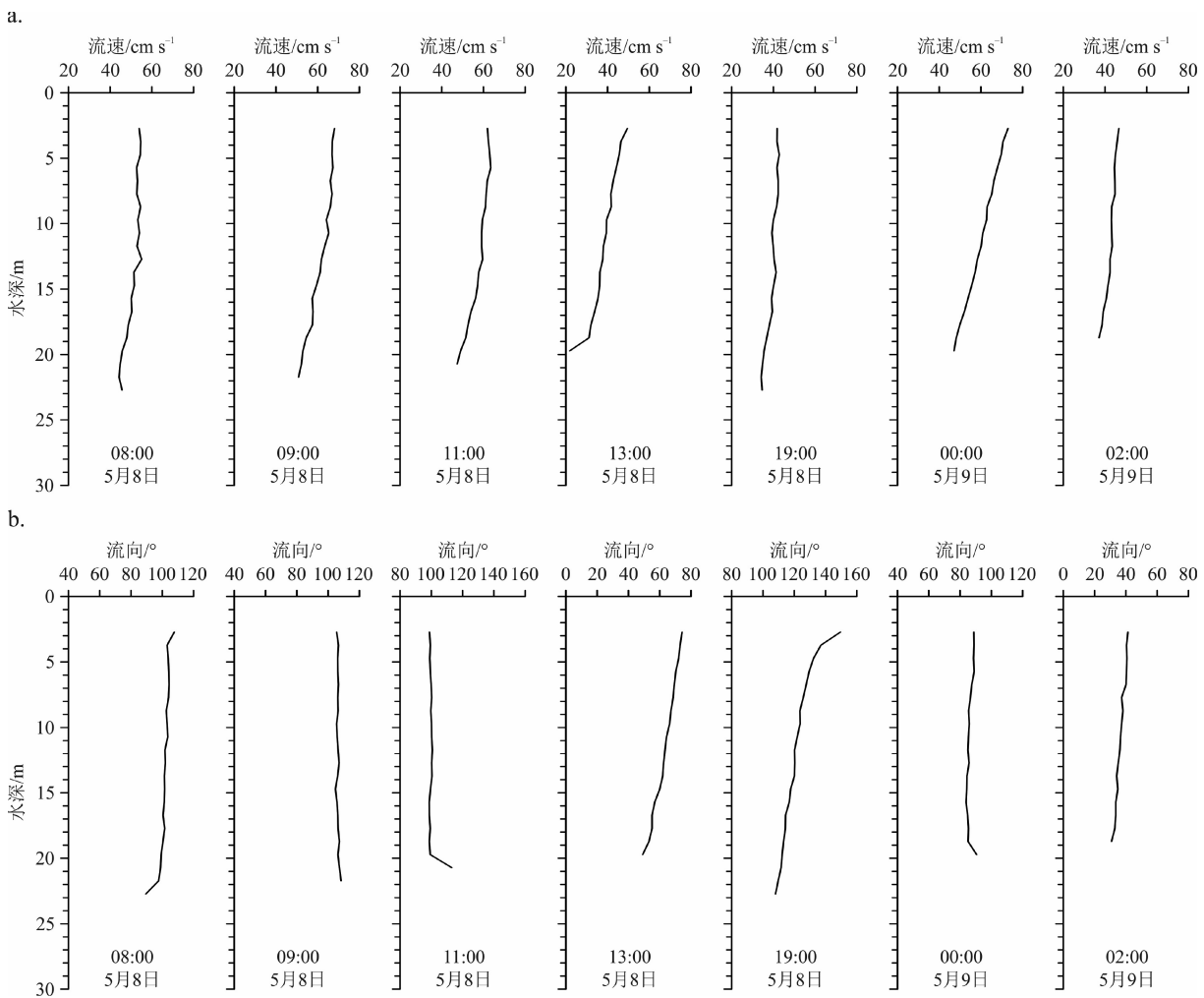


图8 南黄海西部日照至连云港海域W1站位潮流流速、流向的垂直分布

a.潮流流速剖面, b.潮流流向剖面。

Fig.8 The vertical distributions of velocity and direction of tidal currents at site W1 off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

a. velocity profiles, b. direction profiles.

所产生的混合作用是很慢的,因此,实际观测到的水文指标的垂向分布,比如, pH 跃层的存在,以及 pH 跃层之上 pH 值随深度缓慢升高或降低的现象(图 5,图 6),可能主要反映了水平方向上相邻区域之间中下部水体化学性质的突变性(比如 pH 跃层)或渐变性质差异。

虽然深层水垂直结构均匀,但其温度、盐度和 pH 的 25 小时时间序列曲线也存在着周期性波动(图 9)。W2 和 W5 站位水温的周期性变化最为明显;在 W4 站位,水温除了呈周期性波动之外,还明显叠加了线性升温的趋势,指示临近暖水的水平流入(图 9d)。海水盐度的周期性波动最为典型,其变化趋势与温度曲线呈反相分布,即温度较高时,盐度较低;而温度较低时,盐度较高。将潮位 25 小时变化曲线与温盐曲线进行对比,可以发现它们的周

期变化具有同步性。这表明,在天气和海况良好的情况下,深层水温度和盐度的变化主要是潮流驱动下水体水平运动的结果。该认识与 Meng 等<sup>[20]</sup>的数值分析结果相一致。此外,在潮流驱动下,深层水的 pH 也可能存在一定的周期性波动。

### 3 结论

(1)南黄海西部日照至连云港海域,春季末(5月)广泛存在日内生消的季节性温跃层和化学跃层。温跃层厚度为 2~4 m,层位水深为 4~7 m 至 7~10 m,跃层强度最大可达 0.80 °C/m。在温跃层附近,由于上下层水体温度、盐度的差异,其混合过程常出现盐指现象。跃层之下的深层水温度、盐度垂直分布均匀,站位之间的水温差异主要反映了随

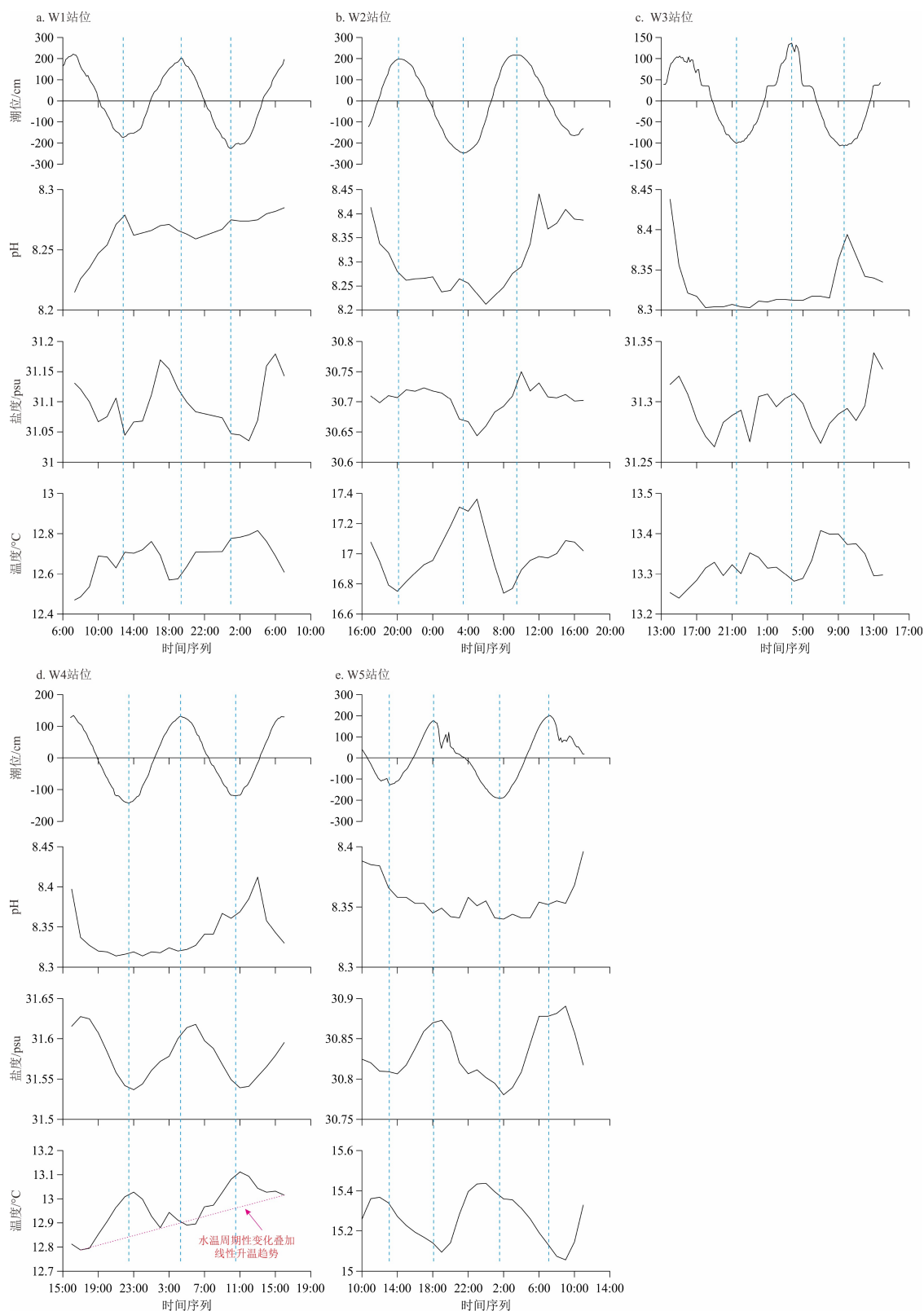


图 9 南黄海西部日照至连云港海域深层水的温度、盐度和 pH 变化与潮位变化的 25 小时时间序列对比

Fig.9 25-hour time series comparison of deep water changes in temperature, salinity and pH with the tidal level changes off the Rizhao-Lianyungang coast, western South Yellow Sea

着夏季的临近海面热输入的日益增强。

(2) DO 垂向剖面一般具有双层结构, 上部为富氧水, 下部为低氧水, 两者之间的界面可出现较高

的 DO 梯度。白天水体次表层广泛的 DO 过饱和现象, 可能主要与藻类等浮游植物的光合作用有关。pH 跃层表现为垂向上的快速跳变, 包括向下的正

跳变和负跳变,强度最大值可达 0.03~0.04 个 pH 单位。DO 跃层和 pH 跃层均位于温跃层之下,水深为 10~14 m,两者的形成在时间和深度上具有一定的同步性,且不受温跃层控制。

(3)在天气和海况良好的条件下,潮流是影响水体温度、盐度、DO 和 pH 等水文参数变化的重要因素,也是影响温跃层稳定性的主要原因,主要表现为垂直方向上的混合作用和水平方向上的对流作用。小潮期间,温跃层稳定,强度较大,持续时间也较长。大潮期间,温跃层稳定性差,强度明显减弱。这表明,潮流的增强对温跃层有明显的抑制和破坏作用。深层水的温度、盐度等参数存在日内周期性变化,与潮位变化同步,是潮流驱动下水体水平对流的结果。

### 参考文献 (References)

- [1] 苏纪兰,袁业立. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005: 14-23. [SU Jilan, YUAN Yeli. Offshore Hydrology in China[M]. Beijing: China Ocean Press, 2005: 14-23.]
- [2] Park S, Chu P C, Lee J H. Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967-2008: characteristics and seasonal forcings [J]. *Journal of Marine Systems*, 2011, 87(3-4): 177-193.
- [3] Zhang S W, Wang Q Y, Lü Y, et al. Observation of the seasonal evolution of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1996-1998 [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(3): 442-457.
- [4] 孙湘平. 中国近海区域海洋[M]. 北京: 海洋出版社, 2006: 201-228, 276-280. [SUN Xiangping. Regional Oceanography of China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2006: 201-228, 276-280.]
- [5] 万邦君, 郭炳火, 陈则实. 黄海热结构的三层模式[J]. 海洋学报, 1990, 12(2): 137-148. [WAN Bangjun, GUO Binghuo, CHEN Zeshi. A three-layer model of the thermal structure in the Yellow Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(2): 137-148.]
- [6] 杨殿荣, 匡国瑞, 张玉琳, 等. 黄、东海夏季温跃层的诊断研究[J]. 海洋学报, 1990, 12(1): 14-23. [YANG Dianrong, KUANG Guorui, ZHANG Yulin, et al. Diagnosis of the summer thermocline in the Yellow and East China Seas [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1990, 12(1): 14-23.]
- [7] 赵保仁. 渤、黄海及东海北部强温跃层的基本特征及形成机制的研究[J]. 海洋学报, 1989, 11(4): 401-410. [ZHAO Baoren. Basic characteristics and formation mechanism of the strong thermocline in the Bohai, Yellow, and northern East China Seas [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1989, 11(4): 401-410.]
- [8] Yuan Y L, Li H Q. On the circulation structure and formation mechanism of the Cold Water Mass of the Yellow Sea (I): zero-order solution and circulation structure [J]. *Science in China (Series B)*, 1993, 36(12): 1518-1528.
- [9] 乔方利, 马建, 夏长水, 等. 波浪和潮流混合对黄海、东海夏季温度垂直结构的影响研究[J]. *自然科学进展*, 2004, 14(12): 1434-1441. [QIAO Fangli, MA Jian, XIA Changshui, et al. The impacts of tidal and wave mixing on the vertical structure of summer temperature in the Yellow and East China Seas [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(12): 1434-1441.]
- [10] Ma J, Qiao F L, Xia C S, et al. Tidal effects on temperature front in the Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 314-321.
- [11] Yang Y Z, Qiao F L, Xia C S, et al. Wave-induced mixing in the Yellow Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22(3): 322-326.
- [12] Xie L P, Wang B D, Pu X M, et al. Hydrochemical properties and chemocline of the Sansha Yongle Blue Hole in the South China Sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 649: 1281-1292.
- [13] Hendriks I E, Olsen Y S, Ramajo L, et al. Photosynthetic activity buffers ocean acidification in seagrass meadows [J]. *Biogeosciences*, 2014, 11(2): 333-346.
- [14] Frieder C A, Nam S H, Martz T R, et al. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest [J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(3): 3917-3930.
- [15] Saba G K, Wright-Fairbanks E, Miles T N, et al. Developing a profiling glider pH sensor for high resolution coastal ocean acidification monitoring[C]//OCEANS 2018 MTS/IEEE Charleston. Charleston, SC, USA: IEEE, 1-8.
- [16] 张志欣, 郭景松, 乔方利, 等. 苏北沿岸水的去向与淡水来源估算[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 527-532. [ZHANG Zhixin, GUO Jingsong, QIAO Fangli, et al. Whereabouts and freshwater origination of the Subei coastal water [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(3): 527-532.]
- [17] 秦亚超. 南黄海西部日照至连云港海域表层沉积物粒度特征及其指示意义[J]. *第四纪研究*, 2017, 37(6): 1412-1428. [QIN Yachao. Grain-size characteristics of bottom sediments and its implications offshore between Rizhao and Lianyungang in the western South Yellow Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 2017, 37(6): 1412-1428.]
- [18] Sorkin A, Sorkin V, Leizerson I. Salt fingers in double-diffusive systems [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 303(1-2): 13-26.
- [19] USGS. DOTABLES[EB/OL]. (2019-12-19). <https://www.usgs.gov/software/dotables.2019>.
- [20] Meng Q J, Li P L, Zhai F G, et al. The vertical mixing induced by winds and tides over the Yellow Sea in summer: a numerical study in 2012 [J]. *Ocean Dynamics*, 2020, 70(7): 847-861.