

黄海西部海洋湍流的季节变化特征分析*

魏传杰^{1,2} 于非¹ 郭景松³ 刁新源¹

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049;
3. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

摘要 在 2006—2007 年开展的“中国近海海洋综合调查与评价”项目中, 作者利用自由下降湍流剖面仪 MSS60 在南黄海海区分别进行了夏、冬、秋季三个航次的微尺度湍流观测, 并计算分析了该海区的湍动能耗散系数 ϵ , 湍扩散系数 κ 等。通过与温度、流速分布图对比, 结果表明三个季节的湍流混合趋势大体一致。在沿岸浅水区, 混合作用比较强烈。而深水区湍流混合的垂直分布明显地表现出三层结构, 混合较强的上混合层和底混合层, 及相对较弱的中层。风混合和潮混合是黄海湍流混合的主要形式。风的影响主要表现在海洋上层, 潮流的影响则表现于底层。

关键词 南黄海; 湍流混合; 湍动能耗散系数; 湍扩散系数

中图分类号 P731.1 doi: 10.11693/hyhz20121205001

众所周知, 海洋中存在各种类型的大、中、小尺度的运动, 其能量传递过程一般是由大尺度向小尺度传递, 最终以湍流混合的形式耗散(范植松, 2002)。湍流引起海洋中各种物质的混合和扩散, 是海洋混合重要而普遍的形式之一。湍流混合对海水的动量、热量和质量输运有重要贡献(Thorpe, 1998)。随着物理海洋学的不断发展, 研究表明海洋湍流在海面波浪破碎、海洋内部双扩散及内波破碎等方面, 也起了举足轻重的作用(魏皓等, 2001)。海洋湍流已经成为制约物理海洋学领域研究与发展的关键。

20 世纪 50 年代起, 海洋学家逐渐认识到海洋湍流研究的重要意义, 这个领域开始迅速发展并取得了显著的研究成果, 同时带动了海洋湍流观测技术的飞速发展。近期针对这方面的研究我国的海洋学者也取得了一定的成果。周磊等(2005)在东海陆架坡折海区进行了湍流混合的直接观测, 揭示了该海区的湍流混合特征并研究了该海区的双扩散现象。梁鑫峰等(2006)基于同一次观测, 计算得出了该海区热耗散系数与湍混合系数, 研究分析了该海区的温度微结构。杨丽芬等(2008)在南海北部陆坡区利用自由沉降

式湍流剖面仪 TurboMAP- 进行了微尺度过程的观测, 利用获得的观测数据, 计算得到了湍动能耗散系数和热耗散系数并研究了盐指现象对内部混合的影响。Liu 等(2008)利用自由下降湍流剖面仪 MSS60 在黄海的潮混合区和内波混合区域进行了湍流的连续观测, 给出了黄海特定环境下湍流混合的特征, 并揭示了湍流混合与潮混合及内波混合的关系。

关于黄海湍流混合的研究在国内尚处于起步阶段, 对于该区域湍流混合的认识还很不深入。近几年来, 在实施“中国近海海洋综合调查与评价”南黄海区块调查工作中, 我们利用自由下降湍流剖面仪 MSS60 在南黄海海区进行了三个不同季节的湍流混合观测。本文期望利用这些资料对该海区的湍流混合过程做出更客观的了解, 从而为以后进行更深入的研究和其他相关领域的发展提供参考。

1 数据处理

在南黄海海区分别进行了夏、冬、秋季三个航次的湍流混合观测。观测范围为 35°N 断面(见图 1)。在各个航次的观测中, 利用德国 Sea&Sun Technology 公

* 国家自然科学基金项目, 41206020 号, 41176018 号; 中国科学院战略性先导科技专项, XDA11020301。魏传杰, 硕士, 工程师, E-mail: weicj@qdio.ac.cn

通讯作者: 于非, 博士, 研究员, E-mail: yuf@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2012-12-05, 收修改稿日期: 2013-04-28

40—50m 等深线范围内出现明显的水平变化梯度, 断面东侧深水区的 ε 量级减少, 主要在 10^{-8} — 10^{-7} , 基本差了 1 个量级。在 35°N 断面东侧的深水区, 湍动能耗散系数垂直分布明显的表现出三个层次, 由于

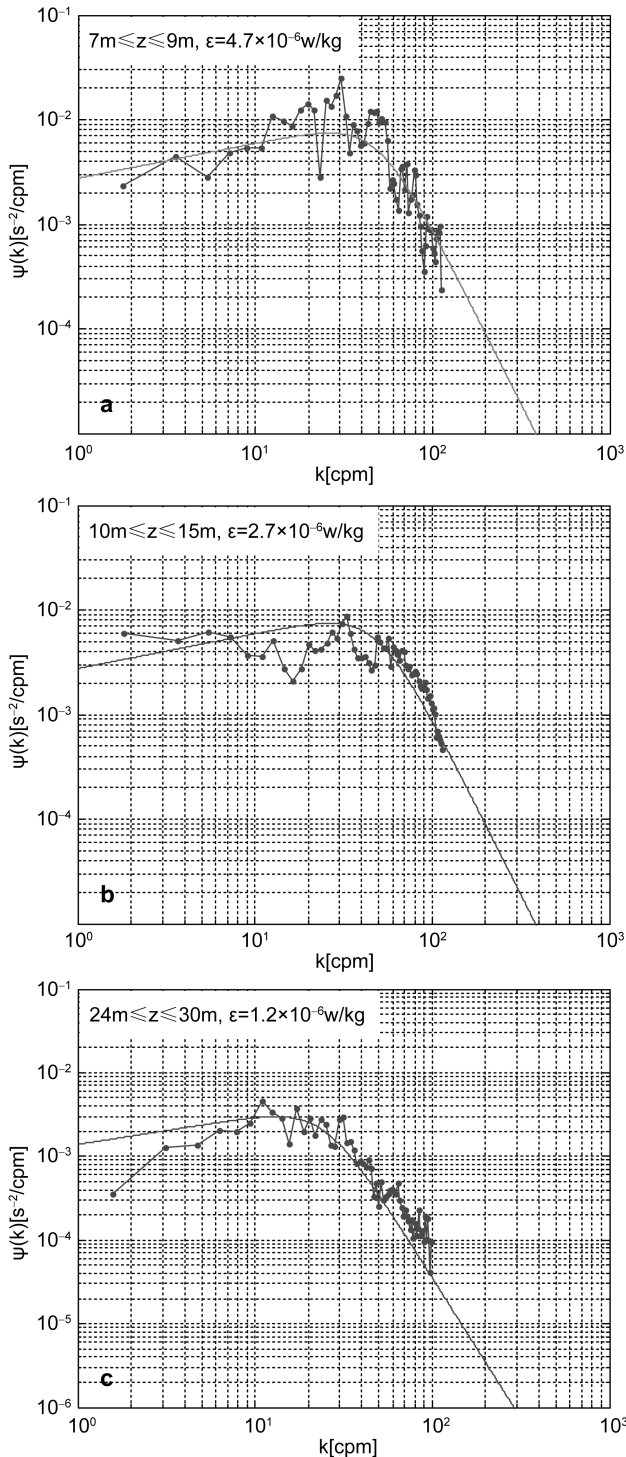


图 2 根据水平流速剪切计算的剪切功率谱 $\psi(k)$ 与相应尺度的 Nasmyth spectrum 的比较

Fig.2 Examples of the shear spectra at hh158 in summer cruise for the surface layer (a), pycnocline (b), and near the seafloor (c)

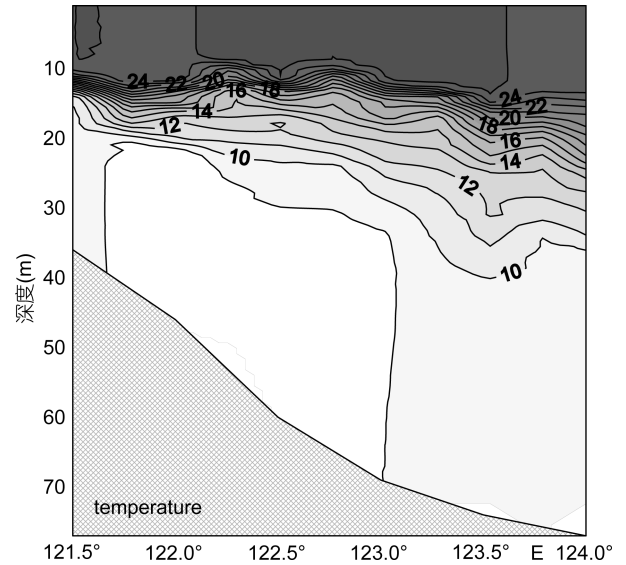


图 3 夏季航次南黄海 35°N 断面温度分布

Fig.3 Temperature contour plot along the section 35°N

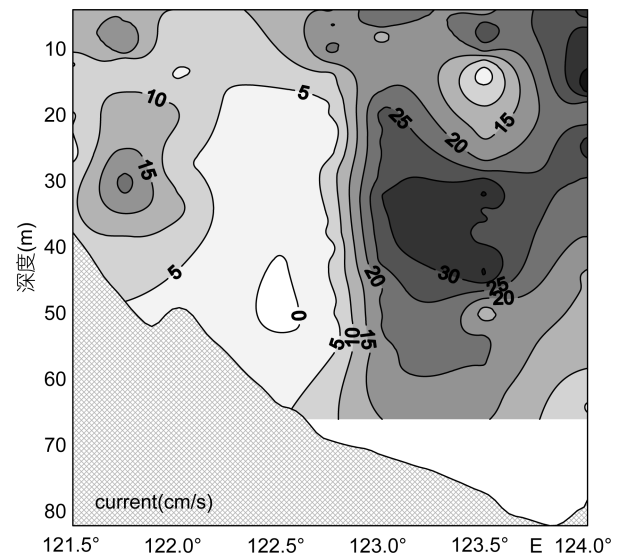


图 4 夏季航次南黄海 35°N 断面流速分布

Fig.4 Current contour plot along the section 35°N

海面升温 and 风的共同作用, 观测海区内的表层 (小于 30m) 混合明显强于中层及底层, ε 的量级在 10^{-6} 。在跃层区, 湍动能耗散系数 ε 出现较大的垂直变化梯度。跃层以下为黄海冷水团覆盖区, 水体相对稳定, 混合较弱, 湍动能耗散系数 ε 的量级在 10^{-8} — 10^{-7} 。而在底边界层中, 潮流在海底摩擦作用下产生强湍流耗散, 使得海水混合加强, 湍动能耗散系数 ε 的量级在 10^{-7} 左右。

与湍动能耗散系数 ε 的分布相似, 断面的湍扩散系数 κ 在上层和底层的量值较大。而在冷水团内部的

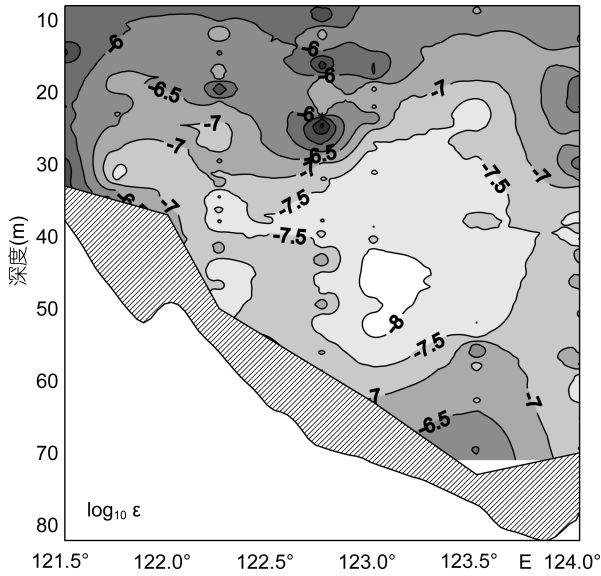


图 5 夏季航次南黄海 35°N 断面湍动能耗散系数的垂直分布图

Fig.5 The logarithm of turbulent kinetic energy dissipation rate contour plot along the section 35°N

湍扩散系数较小, 量级在 10^{-5} 附近。在垂直均匀分布的浅水混合区, 湍扩散系数依旧出现较强值。

2.2 2006/2007 年冬季南黄海 35°N 湍流混合特征

2007 年冬季航次中, 在南黄海 35°N 断面共进行 8 个站位的混合观测。图 6 是冬季航次中南黄海 35°N 断面温度结构图, 冬季强冷北风和海面冷却的共同作用下, 使整个调查区水温垂直分布基本呈现出海面至海底为均匀一致的状态。但需要指出的是, 由于受黄海暖流影响, 在断面东侧的水温明显高于西侧, 且在近底层出现了弱的温跃层。断面流速分布不均匀, 强、弱流速相间出现(图 7)。在断面中部, 有两块海

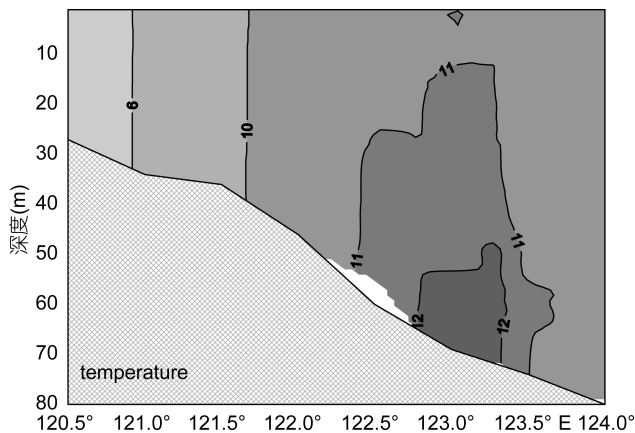


图 6 冬季航次南黄海 35°N 断面温度分布

Fig.6 Temperature contour plot along the section 35°N

域流速很弱, 仅为 10cm/s 左右; 而在断面东端, 流速较强, 其值为 60—70cm/s。断面西端流速亦较强。

通过湍动能耗散系数 ϵ 的分布(图 8)可以看出, 断面西侧的浅水区混合直达海底, 湍动能耗散系数 ϵ 的量级主要在 10^{-7} — 10^{-6} 之间。与夏季不同, 强的湍流混合主要是由于强风和潮混合作用造成的。以 40—50m 等深线为界限, 断面东侧深水区的混合明显减弱, 但仍清晰的表现三个层次, 上混合层与底层仍然是较强的混合区, 湍动能耗散系数 ϵ 的量级皆较大, 风生混合和潮混合各自影响的深度范围与夏季相当。在海水中部黄海暖流持续稳定存在, 呈现层流状态, 湍流运动较弱, 湍动能耗散系数 ϵ 的量级在 10^{-8} 左右。对比图 4 与图 7 中可以看出, 与夏季相比冬季流速垂直分布更加均匀, 垂直速度剪切较弱, 湍流能量减弱, 这就造成了弱混合区域范围的扩大。与夏季相同, 断面的湍扩散系数 κ 与湍动能耗散系数 ϵ 的分布趋势基本一致。

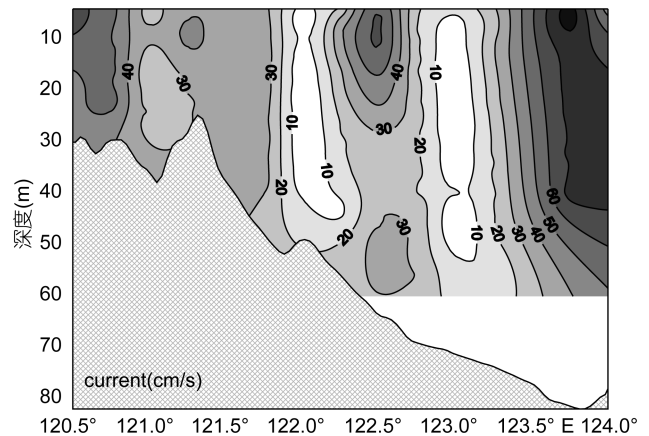


图 7 冬季航次南黄海 35°N 断面流速分布

Fig.7 Current contour plot along the section 35°N

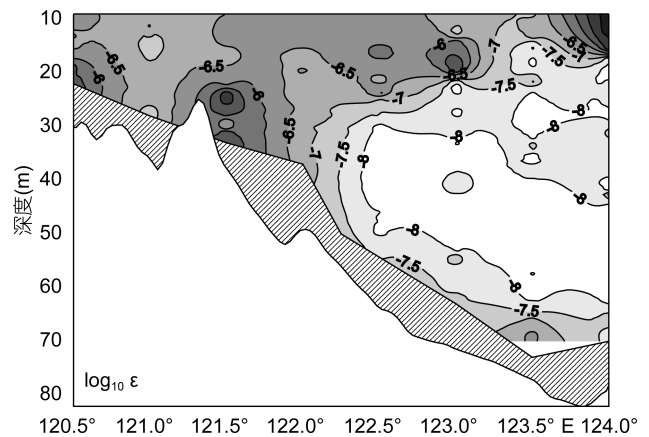


图 8 冬季航次南黄海 35°N 断面湍动能耗散率的垂直分布

Fig.8 The logarithm of turbulent kinetic energy dissipation rate contour plot along the section 35°N

2.3 2007 年秋季南黄海 35°N 湍流混合特征

2007 年秋季航次中, 南黄海 35°N 断面的混合观测共有 9 个站位。秋季水温逐渐下降, 水温分布正向冬季的特征转化。与夏季相比, 最主要的变化是, 尽管水温垂直分布仍基本保持为三层结构, 但温跃层已明显下沉(图 9), 且强度明显减弱。同时, 跃层明显呈倾斜状, 由西向东上倾。而下均匀层覆盖的水域很小。调查断面东西两侧的流速较强, 但中部的流速较弱(图 10)。断面西侧的流速又强于断面东侧。

从图 11 中湍动能耗散系数 ε 的分布来看, 秋季的浅水区依然是强混合区, 湍动能耗散系数 ε 的量级在 10^{-7} — 10^{-6} 之间, 而在断面东侧的深水区, 太阳辐射和弱风共同作用阻碍了海水上层湍流的产生, 从而出现了较大区域的弱混合, 湍动能耗散系数 ε 的量级普遍较小。湍动能耗散系数 ε 水平梯度变化最大的区域出现在 40—50m 等深线范围内。与夏季相比, 湍动能耗散系数 ε 在跃层附近出现的切变并不十分明显。在黄海冷水团覆盖区垂直流速剪切呈现低值, 混

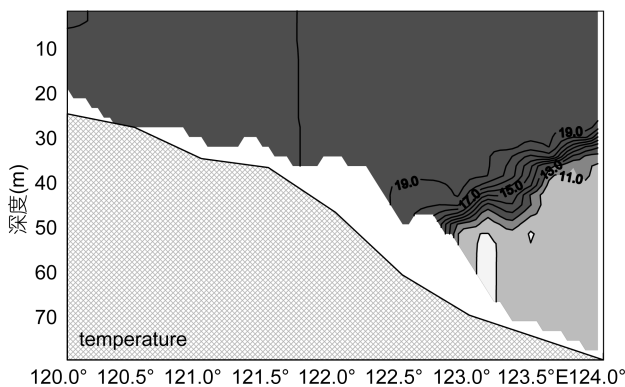


图 9 秋季航次南黄海 35°N 断面温度分布

Fig.9 Temperature contour plot along the section 35°N

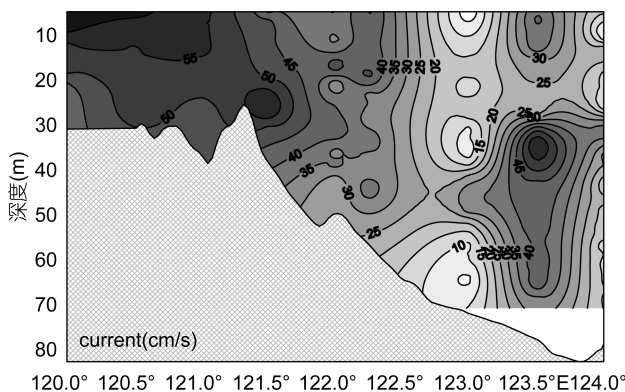


图 10 秋季航次南黄海 35°N 断面流速分布

Fig.10 Current contour plot along the section 35°N

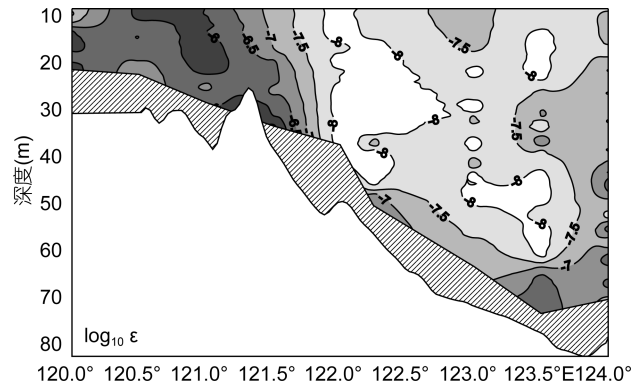


图 11 秋季航次南黄海 35°N 断面湍动能耗散率的垂直分布图

Fig.11 The logarithm of turbulent kinetic energy dissipation rate contour plot along the section 35°N

合依旧较弱。潮流的底摩擦作用依然使底层出现较强的混合。断面的湍扩散系数 κ 与湍动能耗散率 ε 的分布相对应。

3 讨论与结论

黄海平均水深为 44m, 是一个典型的强潮区陆架浅海。风应力和潮流是黄海最主要的动力因素, 其中两者在边界层内造成的能量耗散是湍流混合的主要能量来源。因此, 风混合和潮混合是黄海湍流混合的主要形式。风应力驱使海水产生风浪、漂流等, 加剧海面扰动, 产生强烈的湍流从而对混合起增强作用, 所以海洋上层的湍动能耗散在很大程度上受到海表面风速变化的影响。在浅海, 风生混合有时可直达海底。与风生混合不同, 潮混合效应通常是由海底向上扩展的。在浅海区, 潮流与海底产生摩擦作用, 使流动产生较大的速度剪切而造成湍流混合, 形成性质均匀的底混合层。

从三个季节各种参量的断面分布可以看出, 湍流混合的趋势大体一致。在沿岸浅水区, 湍流混合作用比较强烈。而深水区湍流混合的垂直分布明显地表现出三层结构, 湍流混合较强的上混合层和底混合层, 及相对较弱的中层。值得注意的是, 在冬季强冷北风和海面冷却的共同作用下, 使整个调查断面的各水文要素垂直分布基本呈现出海面至海底为均匀一致的状态。但在断面东侧的深水区, 湍流混合的趋势依然表现为明显的三层结构, 海洋的上层与底层为较强的湍流混合区域, 中层湍流混合较弱。由于风生混合和潮混合各自扩展的深度范围有限, 深水区两种混合的影响无法贯通整个水体, 这就造成了中

层海水出现相对弱的湍流混合。在浅海, 底混合层有时可以发展到与上混合层相贯通, 从而导致海水在铅直方向上的混合普遍较强。

同时观测表明, 跃层对潮流和风的混合扩散具有抑制作用, 尤其是风混合。在夏季, 表层海水增温和淡化显著, 形成稳定层结, 湍流混合减弱, 上混合层的深度变浅。在上混合层的下界, 混合强度减弱, 加之跃层的抑制作用, 湍动能耗散系数 ε 在跃层附近出现较大的垂直变化梯度。秋季航次 35°N 断面调查期间天气良好, 太阳辐射和弱风共同作用阻碍了海水上层湍流的产生, 从而造成了断面东侧的深水表层海水较弱的混合。秋季跃层已明显下沉至上湍流混合层之下湍流底混合层之上的区域, 在这个区域内混合普遍较弱, 同时跃层强度减弱导致其抑制作用减小, 从而使湍动能耗散系数 ε 在跃层附近的切变并不明显。

通过观测资料分析黄海湍流混合变化规律, 得到一些初步认识。但海洋的内部混合过程比较复杂, 要全面客观理解该海区的微细结构或小尺度过程, 今后还需要开展更深入的研究工作。

参 考 文 献

- 杨丽芬, 田纪伟, 谢玲玲, 2008. 南海北部陆坡区小尺度过程观测. 海洋科学, 32(12): 10—16
- 范植松, 2002. 海洋内部混合研究基础. 北京: 海洋出版社, 3—4
- 周 磊, 田纪伟, 张效谦, 2005. 东海陆架坡折处小尺度过程观测. 科学通报, 50(16): 1784—1788
- 梁鑫峰, 田纪伟, 张效谦, 2006. 东海陆架坡折处温度微结构观测. 自然科学进展, 16: 1268—1274
- 魏 皓, 武建平, 张 平, 2001. 海洋湍流模式应用研究. 青岛海洋大学学报, 31(1): 7—13
- Dewey R K, Crawford W R, Gargett A E *et al.*, 1987. A microstructure instrument for profiling oceanic turbulence in coastal bottom boundary layers. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4: 288—297
- Liu Zhiyu, Hao Wei, Lozovatsky I D, 2008. Late summer stratification internal waves and turbulence in the Yellow Sea. *Journal of Marine Systems*, 77(4): 459—472
- Lueck R G, Wolk F, Yamazaki H, 2002. Oceanic Velocity Microstructure Measurements in the 20th Century. *Journal of Oceanography*, 58: 153—174
- Osborn T R, 1980. Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 20: 83—89
- Thorpe S A, 1998. Turbulence in the stratified rotating World Ocean. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 11: 171—181
- Wesson J C, Gregg M C, 1994. Mixing at Carmarinal Sill in the Strait of Gibraltar. *Journal of Geophysical Research*, 99(C5): 9847—9878
- Wolk F, Yamazaki H, Seuront L *et al.*, 2002. A New Free-fall Profiler for Measuring Biophysical Microstructure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19: 780—793
- Yamazaki H, 1990. Stratified turbulence near a critical dissipation rate. *Journal of Physical Oceanography*, 20: 1583—1598

SEASONAL VARIATION OF OCEAN TURBULENCE IN THE WESTERN YELLOW SEA

WEI Chuan-Jie^{1,2}, YU Fei¹, GUO Jing-Song², DIAO Xin-Yuan¹

(1. Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract Using the data acquired with Microstructure Profiler MSS60 during the *Comprehensive Survey and Evaluation in Chinese Nearshore Waters*, turbulent kinetic energy dissipation rate and diffusivity in three seasons between 2006 and 2007 are estimated in the southern Yellow Sea. Our results reveal that mixing tends to be intensive in the coastal region where water is well-mixed. Away from the coast, mixing become more intensive in the near-surface and bottom layers than in the layers in-between. By combing the in situ observations, we suggest that mixing in the Yellow Sea is controlled by both tide and wind. Wind determines the strength of mixing in the upper layer, whereas tide mainly affects bottom mixing.

Key words the southern Yellow sea; turbulent mixing; dissipation; diffusivity