

基于声学方法的南黄海浮游动物垂直迁移季节变化研究

李劳钰¹, 王辉武¹, 吕连港²

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋与气候研究中心, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋环境与数值模拟重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 为研究南黄海浮游动物垂直迁移的季节变化, 分析了 2006 年至 2007 年 4 个季节布放潜标中声学测流仪的观测数据。结果是: 声学测流仪测量的后向散射强度呈现显著的日变化特征, 这是由浮游动物垂直迁移造成的; 在 4 个季节中都出现这一凌晨向下、黄昏向上的垂直迁移, 但是垂直迁移发生的时间有季节变化。利用南黄海辐射通量的直接观测数据, 讨论了垂直迁移发生时间与光照的关系, 结果表明垂直迁移的季节变化主要受光照的影响。这对于研究浮游动物垂直迁移机制有一定意义。

关键词: 浮游动物垂直迁移; 后向散射强度; 季节变化; 日变化; 南黄海

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2012)09-0096-06

声学多普勒测流仪(ADCP, ADP)通过测量水中声散射体的多普勒频移实现海流的测量。对这类仪器而言, 海水中的声散射体主要是浮游动物, 还包括悬浮沉积物等。于是除测流外, ADCP 和 ADP 还被用于测量浮游动物的丰度和生物量^[1-4], 以及监测悬浮物^[5]。既然声学多普勒测流仪测量的后向散射强度可以转换成等效的浮游动物生物量, 那么就可以利用该类仪器研究与物理海洋环境有关的浮游动物分布特征, 例如大西洋湾流弯曲^[6]、冷暖涡^[7-8]、锋面^[9]、北太平洋中层水^[10]等物理海洋环境对生物分布的影响。在南极半岛西部陆架海区的声学测流仪观测表明, 地转流可能引起浮游动物的输运^[11]。

ADCP和ADP测量的后向散射强度数据具有显著的日变化, 同步的生物采样证明ADCP和ADP测量的后向散射强度(S_v)数据的日变化是由浮游动物垂直迁移造成的^[4, 9, 12-13]。虽然浮游动物垂直迁移会受到其他环境因子的影响(如溶解氧^[14]、温度^[15]), 但是浮游动物的昼夜垂直迁移主要与光照的日变化有关^[12-13, 16-20]。光照的日变化存在季节变化, 于是一些学者利用长时间的声学测流仪观测研究了浮游动物昼夜垂直迁移的季节变化^[4, 8, 17, 20]。

黄海水文状况的季节变异明显, 夏季黄海冷水团是中国近海重要的水文现象之一, 温度的垂直分布呈现显著的三层结构, 而冬季黄海重要的水文现象是黄海暖流。黄海冷水团是中华哲水蚤夏季聚集的水体^[21], 黄海冷水团上的强跃层是浮游动物垂直迁移的屏障^[15]。以上使用的都是传统的生物采集方

法, 海上采集和实验室处理的工作量很大, 且数据的时空分辨率不高^[22]。用声学方法研究浮游动物垂直迁移不但提高了数据收集分析的效率, 而且应用这种非侵入方法避免了浮游动物对取样仪器的逃避反应。吕连港等^[23]利用2005年和2006年夏季南海的声学观测计算了浮游动物垂直迁移的速度, 散射体在夜间呈现以跃层为界上下两组的分布特征, 该分布特征佐证了黄海冷水团上的强跃层是浮游动物垂直迁移的屏障。

本文利用南黄海 4 个季节的潜标声学数据研究浮游动物昼夜垂直迁移的季节变化。结合现场观测的海表短波辐射数据, 分析了垂直迁移发生时间的季节变化与光照的关系。这对于研究浮游动物垂直迁移机制有一定意义。

1 观测地点及数据说明

2006 年至 2007 年在南黄海进行了 4 个航次(季节)的多学科综合海洋调查。在物理海洋的调查内容包括 4 个季节的潜标观测和 3 个季节的海表辐射通量观测^[24]。本文利用其中 3 个站位(图 1)潜标上的声学测流仪数据(观测仪器和时间列于表 1)分析浮游动物昼夜垂直迁移的季节变化。声学测流仪数据的

收稿日期: 2011-10-28; 修回日期: 2012-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(40806015); 基本科研业务费专项资金项目(GY2009G17)

作者简介: 李劳钰(1978-), 女, 广西平南人, 研究员, 硕士, 主要从事海洋生态学研究, 电话: 0532-88960673, E-mail: lilaoyu@fio.org.cn

垂直分层都是 2 m, 时间间隔皆为 10 min。

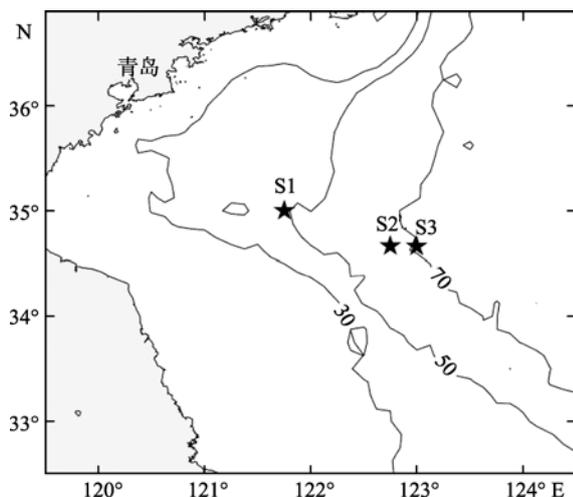


图 1 潜标观测站位

Fig. 1 Stations of mooring observation

表 1 观测仪器和数据时间

Tab. 1 Observation instruments and data time used

航次	站位	仪器	数据时间(年-月-日)
夏	S1	250 kHz ADP	2006-07-20~2006-08-23
冬	S2	600 kHz ADCP	2006-12-19~2007-01-17
	S3	300 kHz ADCP	2006-12-19~2007-01-23
春	S2	300 kHz ADCP	2007-04-06~2007-05-02
	S3	300 kHz ADCP	2007-04-06~2007-04-22
秋	S2	300 kHz ADCP	2007-10-11~2007-11-21
	S3	300 kHz ADCP	2007-10-11~2007-11-21

2 方法

用 Sontek 公司提供软件导出 ADP 3 个波束的回声强度, 计算回声强度 3 个波束的均值, 然后按照 Sontek 技术文件提供的方法^[25]计算 S_v 。

用 RD 公司 WinADCP 软件导出 4 个波束平均的回声强度, 按照 Deines 所提供方法^[26]计算 S_v 。

3 观测结果

3.1 日变化

夏季航次 S1 站位 ADP 观测的结果^[23], 以及春、秋、冬季航次的观测结果都呈现明显的日变化特征。图 2 是冬季航次 S3 站位 ADCP 测量的后向散射强度的深度-时间分布。底层水体(55 m 以下)中 S_v 白天强夜间弱, 而其上层水体(55 m 以上)的 S_v 白天弱夜间强, 呈现非常显著的日变化特征。 S_v 的强弱表征声散射体的多少, 因此 S_v 的日变化表明了散射体在水体中

以 1 天为周期的再分布特征, 即浮游动物的昼夜垂直迁移^[4, 9, 12-13]。

3.2 日变化的季节变化

既然各站次的 S_v 数据都呈现明显的日变化特征, 把各站次的观测数据处理成 1 天的分布数据, 以分析日变化的季节差异。具体的处理方法是把同一站次的观测结果中每天相同时刻、深度的数据平均, 即得到每站次的平均日变化分布 $S_v(z, t)$, z 是深度, t 是 1 天中的不同时刻。考虑测流仪的不同(表 1), 对 $S_v(z, t)$ 时间平均得到 $S_v(z)$, 然后定义后向散射强度平均日变化的扰动 S_{vA} :

$$S_{vA}(z, t) = S_v(z, t) - S_v(z)$$

4 个季节 S_{vA} 分布呈现共同点(图 3): 底层 S_{vA} 白天强(正)夜间弱(负), 其上水体中的 S_{vA} 白天弱夜间强。这意味着浮游动物在早晨由中上层水体迁移至底层水体, 在黄昏则由底层水体向中上层水体迁移。这种昼夜的垂直迁移在 4 个季节都发生。不同点是迁移的发生时间不同, 图 3 中冬季和春季的迁移时间明显不同。同一季节不同站位的迁移时间没有明显差异。

3.3 垂直迁移的季节变化

为获得垂直迁移发生时间的季节差异, 需要计算垂直迁移的具体时间。S1, S2 和 S3 站位的水深不同, 所以首先把各站次 S_{vA} 分布进行深度归一化。海面的数据易受风浪干扰, 而海底的数据易受潮致悬浮物的干扰, 并且昼夜垂直迁移的浮游动物白天聚集在底层水体中, 夜间则迁移至中上部水体, 因此第二步是把归一化深度 0.2~0.6 内的 S_{vA} 进行深度平均。最后把平均的 S_{vA} 对时间求导, 得到 1 天内的 S_{vA} 时间变化。浮游动物昼夜垂直迁移造成后向散射强度平均日变化的扰动, S_{vA} 时间导数最大表征 S_{vA} 由弱变强的最强变化, 导数最小(负值)表征 S_{vA} 由强变弱的最强变化, S_{vA} 的日变化是由浮游动物昼夜垂直迁移造成的, 因此 S_{vA} 时间导数最大值出现的时间就是浮游动物向上迁移的时间, 最小值出现的时间就是浮游动物向下迁移的时间。考虑 ADP^[23]和 ADCP 测量数据差异导致导数幅度的差异, 为清楚显示把站次的 S_{vA} 导数幅度再归一化。

图 4 示出归一化深度 0.2~0.6 内的后向散射强度扰动 S_{vA} 的时间导数, 表 2 是各站次浮游动物垂直迁移的具体时间以及向上与向下迁移的时间差。夏季浮游动物向下(上)迁移的时间最早(晚), 冬季向下

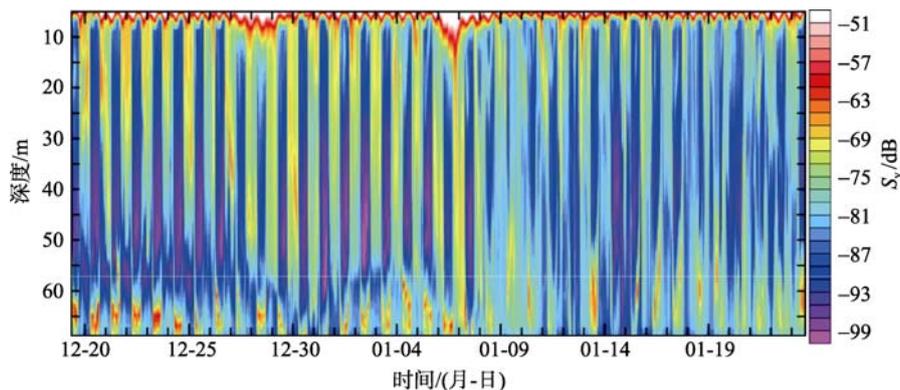


图 2 冬季 S3 站位观测的后向散射强度

Fig. 2 Volume backscattering strength at S3 in winter

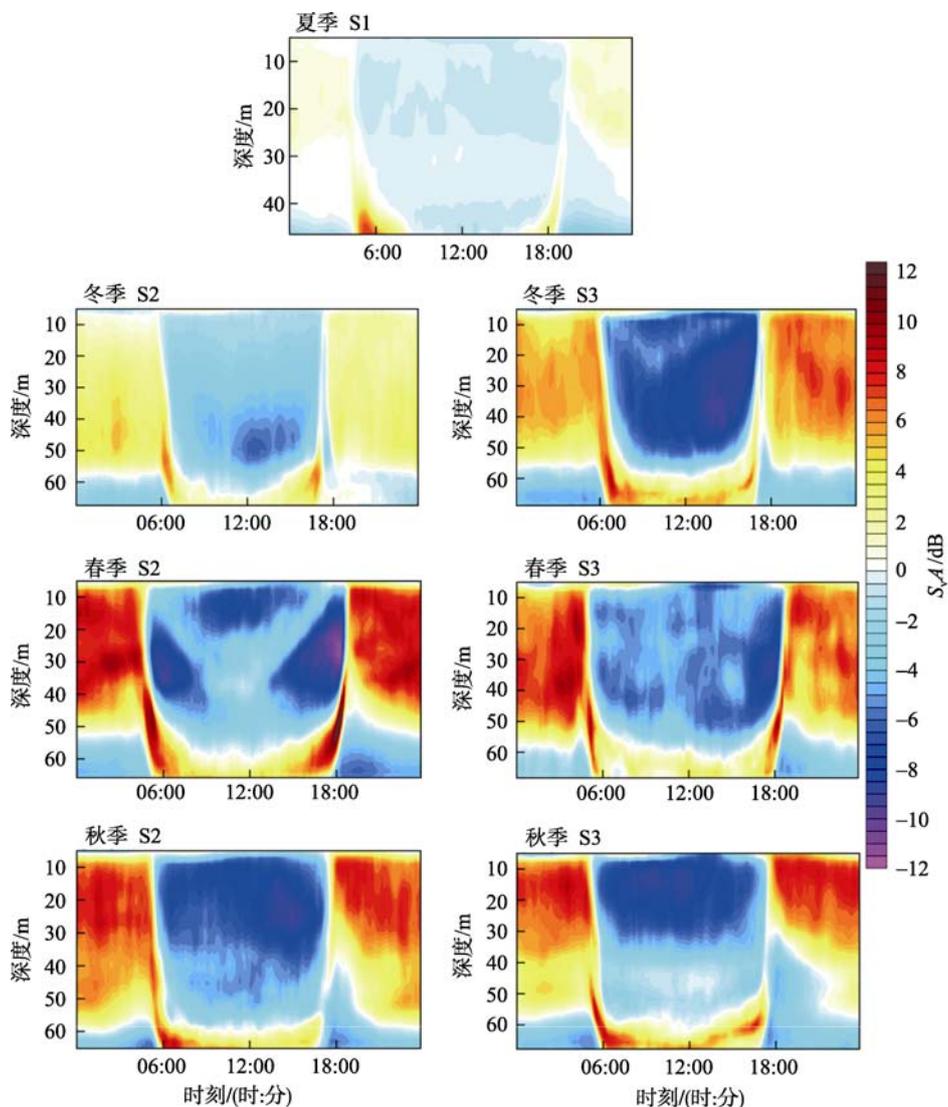


图 3 S_vA 分布

Fig. 3 Distribution of S_vA

(上)迁移的时间最晚(早)。春季向下(上)迁移的时间比秋季早(晚)。白天浮游动物在底层水体聚集的时间

由长至短分别是在夏、春、秋、冬季节。需要指出的是，相同季节不同站位的迁移时间差异最大为

10 min(秋季向下迁移时间), 考虑所用数据的时间间隔是 10 min, 所以认为相同季节不同站位的迁移时间基本一致。

冬季两个站位的时间导数在黄昏皆出现两个峰值。第一个峰值所表示的 S_vA 由负变正对应向上迁移开始(图 3)。向上迁移造成在归一化深度 0.2~0.6 范围

内较深的深度(如 40 m)出现负 S_vA 。随后有向下的迁移, 在该深度出现正 S_vA , 对应第二个峰值。第二峰值表示的是在总体向上迁移背景下的向下迁移, 这在其他季节的观测中都可以看到(图 3), 只是冬季总体向上迁移背景下的向下迁移最为迅速, 于是出现明显的第二峰值。因此迁移时间的判读是根据第一峰值。

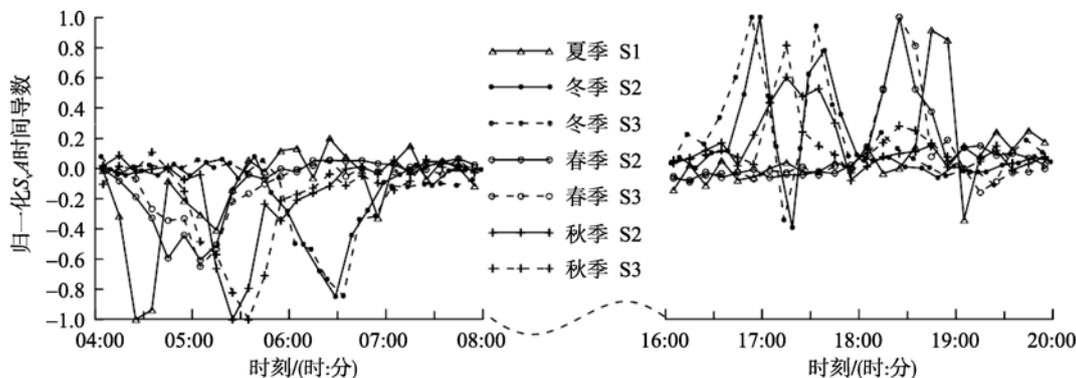


图 4 归一化深度 0.2~0.6 内的后向散射强度扰动的的时间变化
Fig. 4 Time variation of S_vA averaged over normalized depth 0.2~0.6

表 2 垂直迁移发生时间、时间差以及光照时间

Tab. 2 The occurrence time of the vertical migration, the difference in migration time, and sunshine time

航次	站位	向下迁移时间 (时:分)	向上迁移时间 (时:分)	时间差 (h)	光照时间 (h)
夏	S1	04:25	18:45	14.3	未测
冬	S2	06:28	16:58	10.5	10.8
	S3	06:33	16:53	10.3	
春	S2	05:05	18:25	13.3	13.3
	S3	05:05	18:25	13.3	
秋	S2	05:25	17:15	11.8	11.7
	S3	05:35	17:15	11.7	

3.4 光照的季节变化

以前的研究认为这种昼夜迁移的季节差异与光照的季节变化有关^[4, 8, 17, 20], 但是这些研究没有同步的光照观测以直接证明。在南黄海的综合调查中开展了 3 个航次(季节)的海表辐射通量观测。利用 30 min 平均的辐射通量数据计算了各季节辐射分量的平均日变化以及各航次辐射的平均值, 以比较分析南黄海海表辐射通量的季节变化^[24]。为与声学测流仪数据 10 min 时间间隔匹配, 本文采用 10 min 平均的海表向下短波辐射通量计算各季节的平均日变化(图 5)和光照时间(表 2)。光照时间由长至短分别是在春、秋、冬季节。需要指出的是辐射观测是车载观测, 观测点分布于南黄海的调查海区, 而且观测

时间上与声学测流仪数据也略有差异^[24]。即使如此, 浮游动物垂直迁移时间的季节差异与光照的季节差异一致(3 个季节), 证明了光照的季节变化导致浮游动物垂直迁移的季节变化。

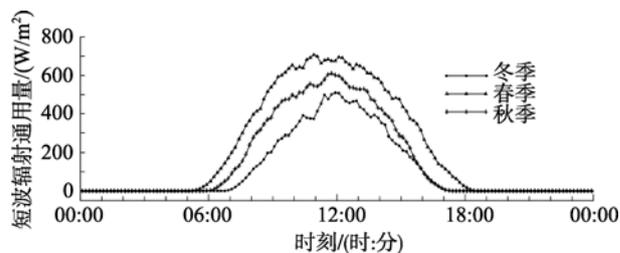


图 5 向下短波辐射通量的平均日变化
Fig. 5 Mean diurnal cycles of downward shortwave radiation

4 结语

2006年至2007年在南黄海进行了4个航次多学科的综合海洋调查。本文分析了4个季节布放潜标中声学测流仪的观测数据。声学测流仪观测的 S_v 都呈现显著的日变化特征,底层 S_v 白天强夜间弱,其上水体的 S_v 白天弱夜间强。这表明浮游动物在早晨由中上层水体迁移至底层水体,黄昏则由底层水体向中上层水体迁移。这种昼夜的垂直迁移在4个季节都发生。

为比较不同水深站位的垂直迁移时间,采用深度归一化处理各站次平均的 S_vA 分布。结果表明:夏季浮游动物向下(上)迁移的时间最早(晚),冬季向下(上)迁移的时间最晚(早),春季向下(上)迁移的时间比秋季早(晚);同一季节不同站位的迁移时间一致;白天浮游动物在底层水体聚集的时间由长至短分别是在夏、春、秋、冬季节。结合短波辐射的观测分析,浮游动物垂直迁移发生时间的季节差异与光照的季节差异较为一致,证明了光照的季节变化导致浮游动物垂直迁移的季节变化。

参考文献:

- [1] Flagg C N, Smith S L. On the use of the acoustic Doppler current profiler to measure zooplankton abundance[J]. *Deep Sea Res*, 1989, 36(3): 455-474.
- [2] Heywood K J, Scrope-Howe S, Barton E D. Estimation of zooplankton abundance from shipborne ADCP backscatter[J]. *Deep Sea Res*, 1991, 38(6): 677-691.
- [3] Zhou M, Nordhausen W, Huntley M. ADCP measurements of the distribution and abundance of euphausiids near the Antarctic Peninsula in winter[J]. *Deep Sea Res I*, 1994, 41(9): 1425-1445.
- [4] Ashjian C J, Smith S L, Flagg C N, et al. Distribution, annual cycle, and vertical migration of acoustically derived biomass in the Arabian Sea during 1994-1995[J]. *Deep Sea Res II*, 2002, 49: 2377-2402.
- [5] Yoshioka H, Takayama T, Serizawa S. ADCP application for long-term monitoring of coastal water[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 24(1): 95-100.
- [6] Ashjian C J, Smith S L, Flagg C N, et al. The influence of a Gulf Stream meander on the distribution of zooplankton biomass in the Slope Water, the Gulf Stream, and the Sargasso Sea, described using a shipboard acoustic Doppler current profiler[J]. *Deep Sea Res I*, 1994, 41: 23-50.
- [7] Zimmerman R A, Biggs D C. Patterns of distribution of sound-scattering zooplankton in warm-and cold-core eddies in the Gulf of Mexico, from a narrowband acoustic Doppler current profiler survey[J]. *J Geophys Res*, 1999, 104: 5251-5262.
- [8] Jiang Songnian, Dickey T D, Steinberg D K, et al. Temporal variability of zooplankton biomass from ADCP backscatter time series data at the Bermuda Testbed Mooring site[J]. *Deep Sea Res I*, 2007, 54(4): 608-636.
- [9] Wade I P, Heywood K J. Acoustic backscatter observations of zooplankton abundance and behaviour and the influence of oceanic fronts in the northeast Atlantic[J]. *Deep Sea Res II*, 2001, 48:899-924.
- [10] Lü Liangang, Qiao Fangli, Yuan Yeli. Latitudinal variation of deep scattering layer in the Western Pacific[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2004, 16(5): 571-581.
- [11] Lawson G L, Wiebe P H, Ashjian C J, et al. Acoustically-inferred zooplankton distribution in relation to hydrography west of the Antarctic Peninsula[J]. *Deep Sea Res II*, 2004, 51: 2041-2072.
- [12] Ashjian C J, Smith S L, Flagg C N, et al. Patterns and occurrence of diel vertical migration of zooplankton biomass in the Mid-Atlantic Bight described by the acoustic Doppler current profiler[J]. *Continental Shelf Research*, 1998, 18: 831-858.
- [13] Luo Jiangang, Orin P B, Forcucci D, et al. Diel vertical migration of zooplankton and mesopelagic fish in the Arabian Sea[J]. *Deep Sea Res II*, 2000, 47: 1451-1473.
- [14] Mutlu E. Diel vertical migration of *Sagitta setosa* as inferred acoustically in the Black Sea[J]. *Marine Biology*, 2006, 149: 573-584.
- [15] Wang Rong, Zuo Tao. The Yellow Sea Warm Current and the Yellow Sea Cold Bottom Water, their impact on distribution of zooplankton in the Southern Yellow Sea[J]. *J Kor Soc Oceanogr*, 2004, 39(1): 1-13.
- [16] Plueddemann A J, Pinkel R. Characterization of the patterns of diel migration using a Doppler Sonar[J]. *Deep Sea Res*, 1989, 36(4): 509-530.
- [17] Fischer J, Visbeck M. Seasonal variation of the daily zooplankton migration in the Greenland Sea[J]. *Deep Sea Res I*, 1993, 40(8): 1547-1557.

- [18] Kaneko A, Zhu Xiaohua, Radenac M H. Diurnal variability and its quantification of subsurface sound scatterers in the western equatorial Pacific[J]. *J Oceanogr*, 1996, 52: 655-674.
- [19] Zhu Xiaohua, Takasugi Y, Nagao M, et al. Diurnal cycle of sound scatterers and measurements of turbidity using ADCP in Beppu Bay[J]. *J Oceanogr*, 2000, 56: 559-565.
- [20] Lenn Y D, Chereskin T K, Glatts R C. Seasonal to tidal variability in currents, stratification and acoustic backscatter in an Antarctic ecosystem at Deception Island[J]. *Deep Sea Res II*, 2003, 50: 1665-1683.
- [21] Wang Rong, Zuo Tao, Wang Ke. The Yellow Sea Cold Bottom Water - an oversummering site for *Calanus sinicus* (copepoda, crustacean) [J]. *J Plank Res*, 2003, 25(2): 169-183.
- [22] 左涛, 王荣, 王克, 等. 夏季南黄海浮游动物的垂直分布与昼夜垂直移动[J]. *生态学报*, 2004, 24(3): 524-530.
- [23] Lü Liangang, Liu Jianjun, Yu Fei, et al. Vertical migration of sound scatterers in the southern Yellow Sea in summer[J]. *Ocean Science Journal*, 2007, 42(1):1-8.
- [24] Lü Liangang, Yu Fei, Diao Xinyuan, et al. Direct observation of radiative flux in the southern Yellow Sea[J]. *Ocean Science Journal*, 2008, 43(2): 115-126.
- [25] Sontek. Sontek Doppler Current Meters – Using signal strength data to monitor suspended sediment concentration[R]. 6837 Nancy Ridge Drive, Suite A · San Diego, CA 92121, USA: Sontek , 1997.
- [26] Deines K L. Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers IEEE[R], San Diego, CA 92131, USA: Teledyne RD Instruments, 1999.

Seasonal variation of the zooplankton vertical migration in the southern Yellow Sea described by acoustic method

LI Lao-yu¹, WANG Hui-wu¹, LÜ Lian-gang²

(1. Center for Ocean and Climate Research, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Received: Oct.,28,2011

Key words: zooplankton vertical migration; volume backscattering strength; seasonal variation; diel variation; the southern Yellow Sea

Abstract: Data from acoustic current profiler deployed as mooring in four seasons are analyzed to study seasonal variation of the zooplankton vertical migration in the southern Yellow Sea. Volume backscattering strength measured with acoustic current profiler has dominant diel variation, which results from vertical migration of zooplankton. The vertical migration (downward at dawn and upward at dusk) occurs in all four seasons. However, the occurrence time of the vertical migration shows seasonal variation. The relationship between the migration occurrence time and the daylight is discussed based on the direct observation of radiative flux. It shows that the seasonal variation of the migration occurrence time is mainly affected by the daylight. All these are important for characterization of zooplankton vertical migration mechanism.

(本文编辑: 刘珊珊)