

基于 WOD 数据集的西北太平洋混合层内 营养盐浓度初步研究*

杨海燕¹, 毛新燕^{1**}, 郭新宇^{2,3}

(1. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100; 2. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东 青岛 266100;
3. 日本爱媛大学沿岸环境科学研究中心, 日本 松山 7908577)

摘要: 本文将 WOD13(World Ocean Database 2013)中营养盐(硝酸盐和磷酸盐)浓度的观测资料重新构成 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的气候态平均场, 结合 Argo 气候态月平均混合层深度数据, 对西北太平洋混合层内营养盐浓度的季节变化进行了初步研究。结果表明, 混合层内的营养盐平均浓度在 30°N 以北海域均沿纬向分布, 且浓度随纬度的增加而增大。与夏季相比, 在日本海和日本以东寒暖流交汇处的混合层内, 冬季营养盐平均浓度明显增加; 在黑潮主流及其附近海域, 冬季营养盐平均浓度略有增加。根据混合层内营养盐总量的冬夏变化特点, 可以总结为以下四种类型: 冬季增加型、冬季减少型、冬夏不变型 I (垂向分布不变) 和冬夏不变型 II (垂向对流补偿)。仅靠生物生化作用和垂向混合是无法完全解释这些变化的, 海流的水水平输运也会对混合层内的营养盐供给产生一定影响。

关键词: 冬季混合层; 西北太平洋; 营养盐; 季节变化

中图分类号: P734.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2018)08-001-09

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170194

引用格式: 杨海燕, 毛新燕, 郭新宇. 基于 WOD 数据集的西北太平洋混合层内营养盐浓度初步研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(8): 1-9.

YANG Hai-Yan, MAO Xin-Yan, GUO Xin-Yu. A preliminary study on nutrients concentration within the mixed layer in the Northwest Pacific based on WOD data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(8): 1-9.

在太阳辐射、风应力、表面波浪和海洋内部物理过程的影响下, 海洋上层形成一个垂向温度、盐度和密度分布近乎均匀的混合层。混合层作为联系大气底边界层和上层海洋的中间层, 对海洋与大气的物质、能量和动量的交换过程有重要作用。定义混合层的方法中, 界定差值法是最常用的。虽然判定标准不尽相同, 但得到的混合层深度的时空分布特征基本一致^[1-4]。研究表明, 北半球大洋的混合层深度最大值出现在晚冬^[5-6], 在太平洋副热带和高纬度海域, 混合层深度的季节性变化很强, 黑潮延伸体海区的混合层在夏季变浅, 随着冬季的来临逐步加深^[1,7]。

混合层深度的变化影响海水中的营养盐浓度和平均光照强度, 对海洋浮游生物的初级生产力会产生重大影响^[8-9]。冬季转入春季期间, 太阳辐射增强, 混合层变浅, 海水层化加强, 浮游植物被限制在表层, 利用冬季残留的营养盐产生春季水华, 生物量大幅增加。因此混合层内营养盐的分布变化规律对研究海洋初级

生产力和海洋生物水产资源的开发有重要的现实意义。

海洋上层营养盐的分布受生物化学过程和物理过程的共同影响。其中, 冬季的垂向对流混合一直被认为是营养盐由深层向表层补充的主要过程^[10-11]。但 Williams 和 Follows^[12]认为水平环流也可以向表层输送营养盐, 并借助模型研究发现北大西洋的营养盐可以通过表层 Ekman 流从邻近上升流区跨过环流边界进入到副热带的下降流区。Reynolds 等^[13]发现磷酸盐能越过北大西洋副热带环流近极地一侧的边界, 对副热带环流内部进行横向补充, 以维持海域的生产力。

关于海洋上层营养盐输运的研究大多集中在北大西洋, 而太平洋上层营养盐输运的相关研究较少。本文利用营养盐观测资料和 Argo 混合层深度数据, 研究西北太平洋混合层内营养盐的季节变化特征, 初步探究西北太平洋上层营养盐的输运方式。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41576010); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(201512004)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(41576010); The Fundamental Research Funds for the Central Universities(201512004)

收稿日期: 2017-04-24; 修订日期: 2017-05-18

作者简介: 杨海燕(1991-), 女, 硕士生。E-mail: yanghaiyan12345@163.com

** 通讯作者: E-mail: maoxinyan@ouc.edu.cn

1 数据和方法

1.1 数据简介

本文研究区域为西北太平洋 $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$ 。使用的营养盐(硝酸盐和磷酸盐)浓度资料来自美国国家海洋数据中心(National Oceanographic Data

Center, NODC)制作的世界海洋数据集 WOD13,包括 1929—2013 年的标准层营养盐数据。营养盐观测次数的空间分布如图 1 所示,磷酸盐的观测覆盖面积大于硝酸盐。两种营养盐数据主要集中在东中国海、日本海、黑潮流域和日本东部的寒暖流混合区,在副热带大洋,观测数明显不足。

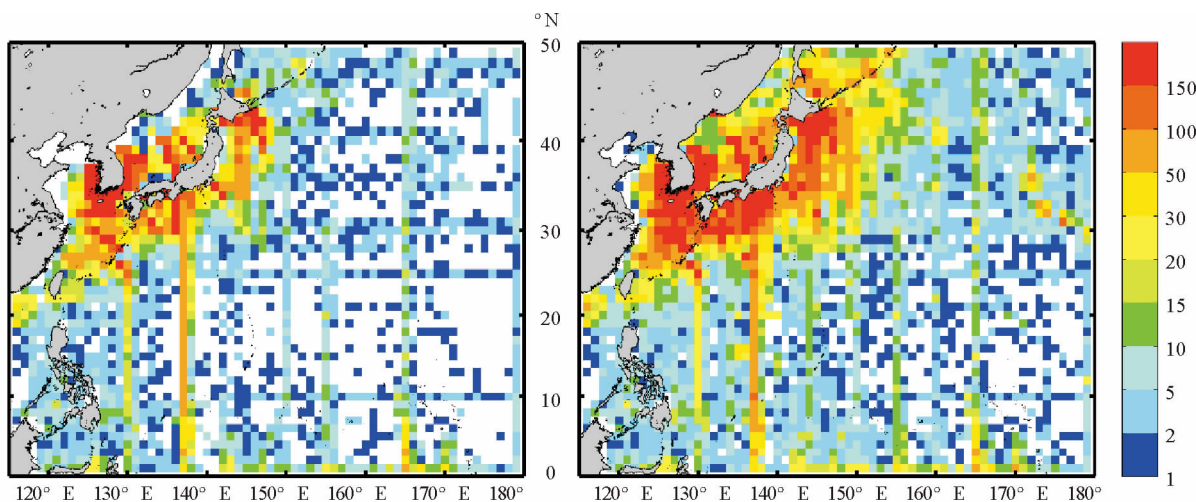


图 1 硝酸盐(左)和磷酸盐(右)观测次数的空间分布

Fig. 1 The distribution of observation number for nitrate (left) and phosphate (right)

混合层数据采用的气候态月平均混合层深度资料^[14]是美国 Scripps 海洋研究所利用 de Boyer Montégut 等^[2]提出的密度临界值法($\Delta\sigma_{\theta} = 0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)处理 Argo 数据得到的,空间分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 。本文定义 1~3 月为冬季,由此可以求得冬季混合层深度的分布(见图 2)。在边缘海和季节性冰区,Argo 浮标布放较少,造成了数据缺失。冬季混合层深于 150 m 的区域有两处,分别位于 32°N 的黑潮延伸体南部海域和沿 40°N 的大洋区域。前者深度较大是受到冬季中纬度风应力与海表热通量显著增加,以及海洋热运输的影响^[15],在 $20^{\circ}\text{N}\sim 27^{\circ}\text{N}$ 海区附近,冬季混合层明显浅于南北两侧海域,这是由于在 27°N 以南区域的风速弱于以北区域^[16],海洋热运输较弱,在该区域下降流占主导,下降流的水平补偿作用会导致南北两侧海域的混合层加深,从而造成该区域的混合层相对较浅^[2]。

1.2 数据处理及验证

WOA(World Ocean Atlas)又被称为 Levitus 资料,是目前国际上常用的气候态水文资料。但是在一些地方如台湾北部(122.5°E , 25.5°N),WOA 的营养盐浓度垂向分布存在异常(见图 3(b)),与观测(见图 3(a))并不相符。因此本文使用 WOD13 数据,参考 WOA 的“三次订正”(Three-pass correction)分析法^[17],将时间、空间均为零散分布的营养盐浓度观测数据网格化为分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的气候态平均场。

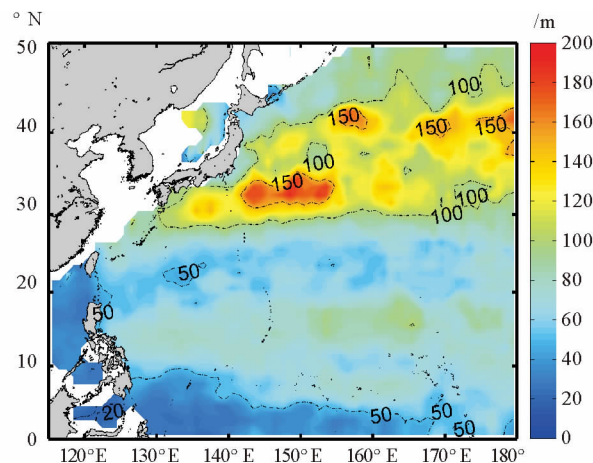
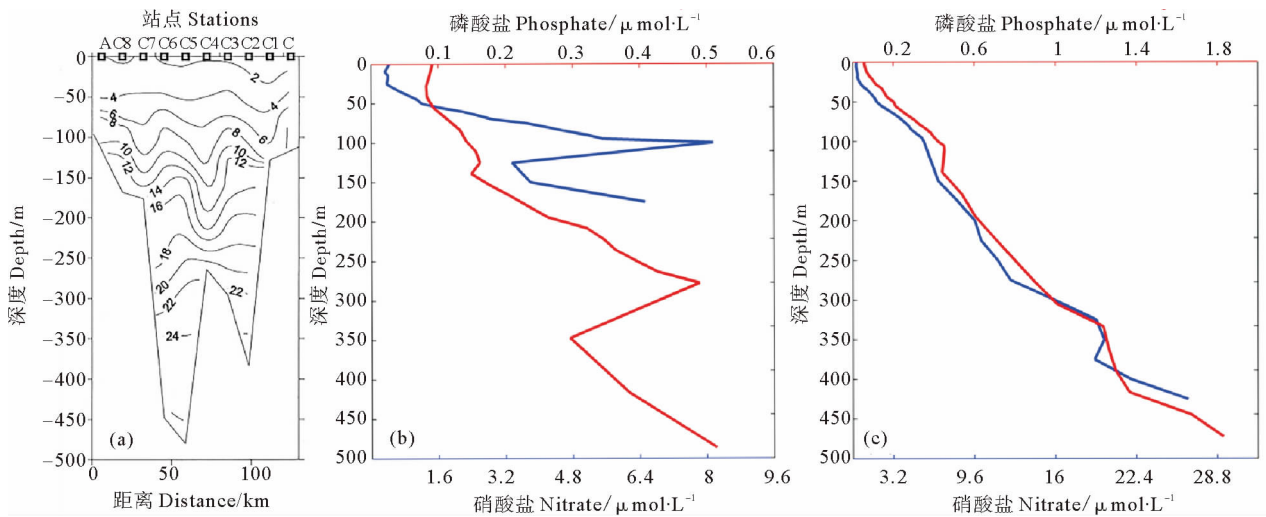


图 2 Argo 数据的冬季混合层深度分布

Fig. 2 The distribution of winter mixed layer depth from Argo data

首先,利用 WOD 自带的质量控制标识对数据进行剔除,分别求出分辨率为 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 的统计年平均、季节平均和月平均场。然后按照图 4 所示的流程,计算气候态年平均、季节平均和月平均场,其中采用 Cressman 逐步订正法^[18],对猜值场进行三次订正,订正半径随着迭代次数的增加而减小,分别取为 892,669 和 446 km。最后,利用大小为 $3^{\circ}\times 3^{\circ}$ 的窗口将图 4 得到的各平均场进行中值滤波,得到最终的气候态年平均、季节平均和月平均场。



(a)8 月份断面硝酸盐观测结果(文献[19]中的, Fig. 9, 其中 C5 位置 122.5°E, 25.5°N); (b)硝酸盐和磷酸盐的 WOA 结果; (c) 本文结果。(a)Observed section in August (Fig. 9 in reference[19], C5 position is 122.5°E,25.5°N); (b)The nitrate and phosphate of WOA and (c) our result .)

图 3 硝酸盐浓度垂向对比图

Fig. 3 Comparison of vertical nitrate concentration

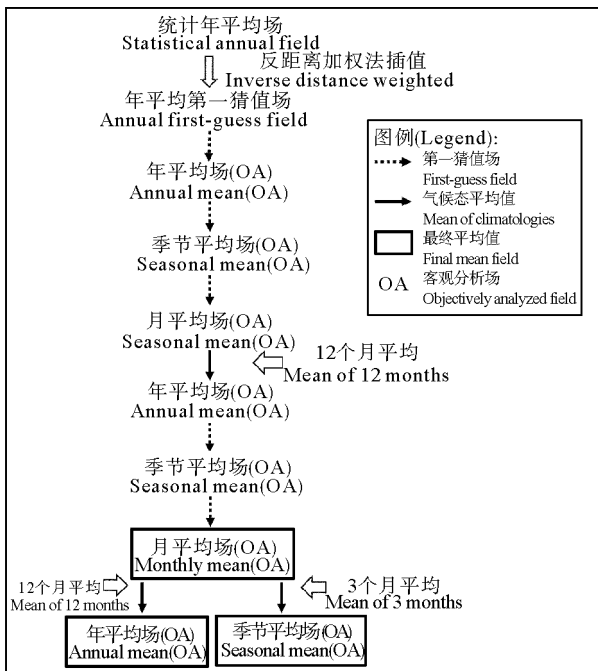


图 4 营养盐数据处理流程图

Fig. 4 Scheme used in computing annual, seasonal, and monthly objectively analyzed means for nitrate and phosphate

按照上述方法处理得到的 8 月份台湾北部(122.5°E, 25.5°N)处的营养盐浓度垂向分布如图 3(c)所示, 营养盐浓度随深度单调增加, 与 Liu 等^[19]观测到的垂向浓度变化趋势(图 3(a))一致。从量值上来看, 100 m 以浅的硝酸盐浓度与观测结果也基本相同, 在 50 m 深度处硝酸盐浓度达到 4 μmol/L, 100 m 处的浓度达 7 μmol/L, 但 100 m 以深的硝酸盐浓度略低于观测值, 这与本文数据是经过平滑处理的多年平均值有关。同

时, 将表层硝酸盐浓度的冬夏分布与 WOA 对比(见图 5), 可看出在副热带区域, 本文数据无异常低值存在。

处理得到的海表面磷酸盐浓度在冬夏季的分布如图 6 所示。在中纬度海区, 磷酸盐浓度沿纬向分布, 且在夏季明显降低, 例如 30°N 纬线处的磷酸盐浓度值在冬季为 0.2 μmol/L, 在夏季不足 0.1 μmol/L。该结果与 Conkright 等^[20]得到的表层磷酸盐浓度分布基本一致。

此外, 处理得到的 3 和 8 月海表面硝酸盐和磷酸盐浓度的分布如图 7 所示, 大洋中营养盐浓度自低纬向高纬增加。与 3 月份相比, 8 月份海表面磷酸盐浓度低于 0.3 μmol/L、硝酸盐浓度低于 4 μmol/L 的海域面积明显扩大。本文数据处理结果与 Yasunaka 等^[21]综合多种数据集的处理结果对比, 也具有良好的一致性。综上所述, 本文处理得到的气候态平均营养盐浓度数据质量高, 可用于后续的季节变化研究。

2 结果与分析

冬季混合层深度一般被认为是海洋垂向混合所能达到的最大深度。利用 Argo 冬季混合层(后文简称“混合层”)深度和营养盐气候态季节平均场, 可求得混合层内冬夏两季的营养盐垂向平均浓度:

$$C_{a冬} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 C_{冬}(z) dz, C_{a夏} = \frac{1}{h} \int_{-h}^0 C_{夏}(z) dz。$$

其中 h 为冬季混合层深度。因为积分深度没有季节变化, $C_{a冬}$ 、 $C_{a夏}$ 也代表了冬季混合层深度以浅的营养盐总量的季节变化。 $C_{a冬}$ 、 $C_{a夏}$ 及二者之差的分布如图 8 所示。混合层内营养盐的平均浓度在各季都显现出低纬度区域低于中纬度海域的特征, 且随纬度的增加而

增大。在东中国海附近沿陆坡分布,在外海区域则基本沿纬向分布。

海洋表层营养盐的分布受物理过程和生化过程的共同影响,但其营养盐的补充绝大多数来自于海洋深

层的垂直运输和混合过程^[22]。例如在图6中纬度海区,冬季的垂向对流过程加强,表层营养盐浓度明显高于夏季。

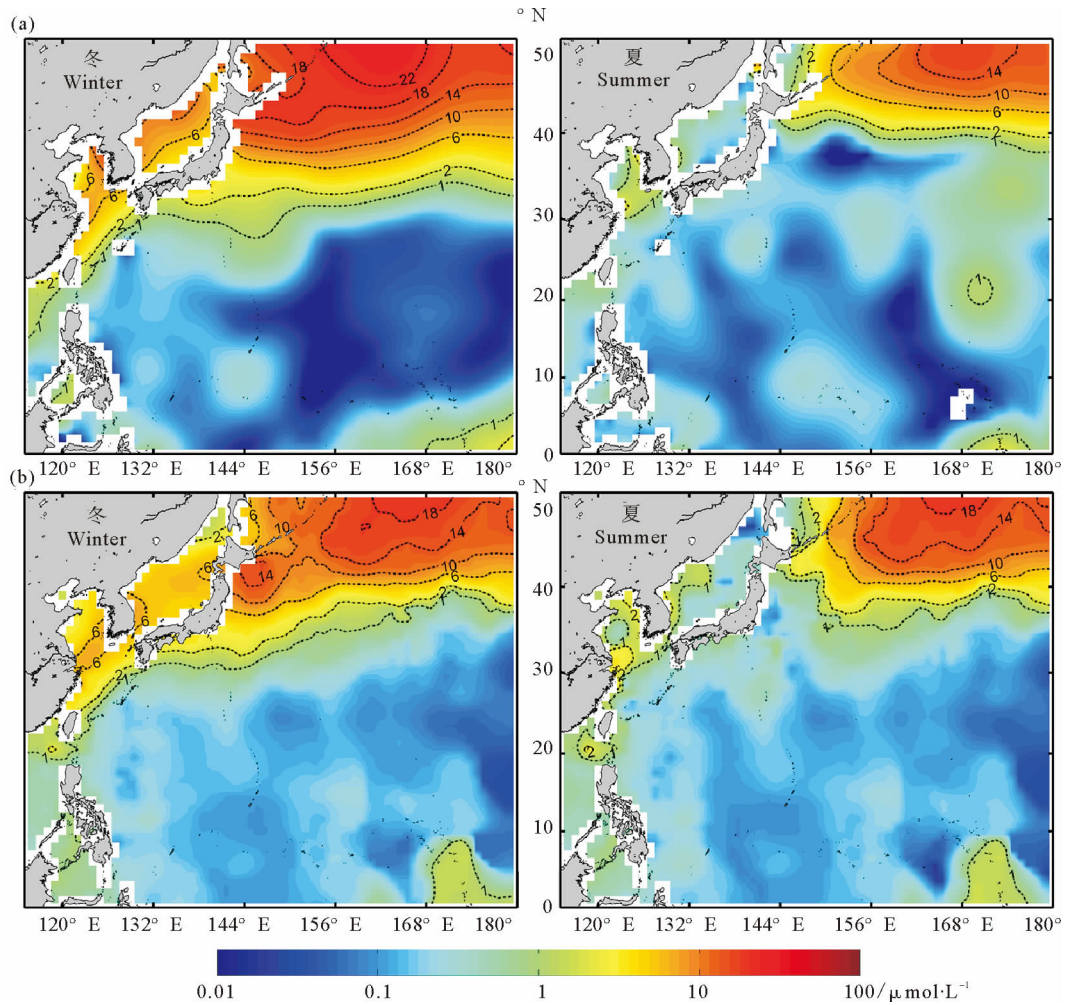


图5 WOA(a)与本文(b)的表层硝酸盐浓度冬夏分布图

Fig. 5 The winter and summer distribution of surface nitrate concentration in WOA (a) and our results (b)

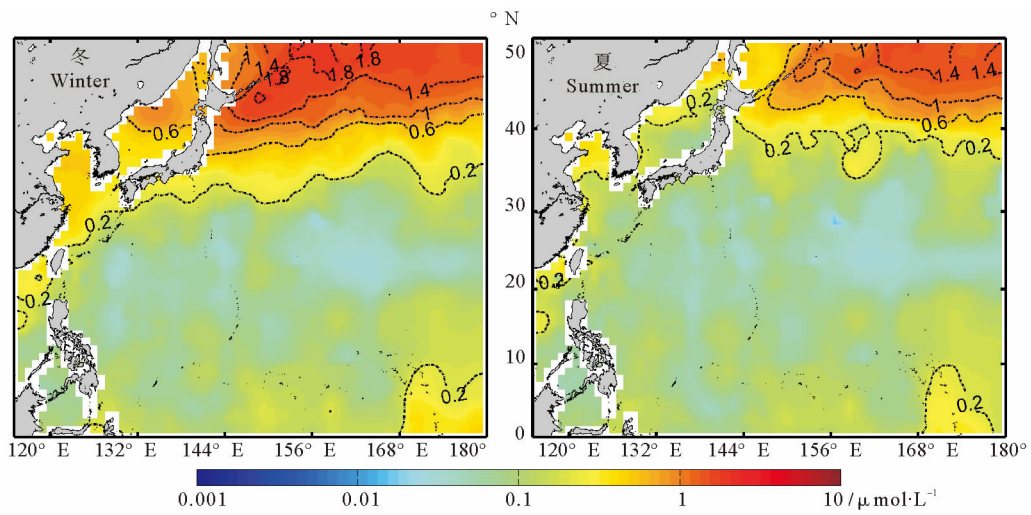


图6 表层磷酸盐浓度在冬季(左)和夏季(右)分布图

Fig. 6 The distribution of surface phosphate concentration in winter (left) and summer (right)

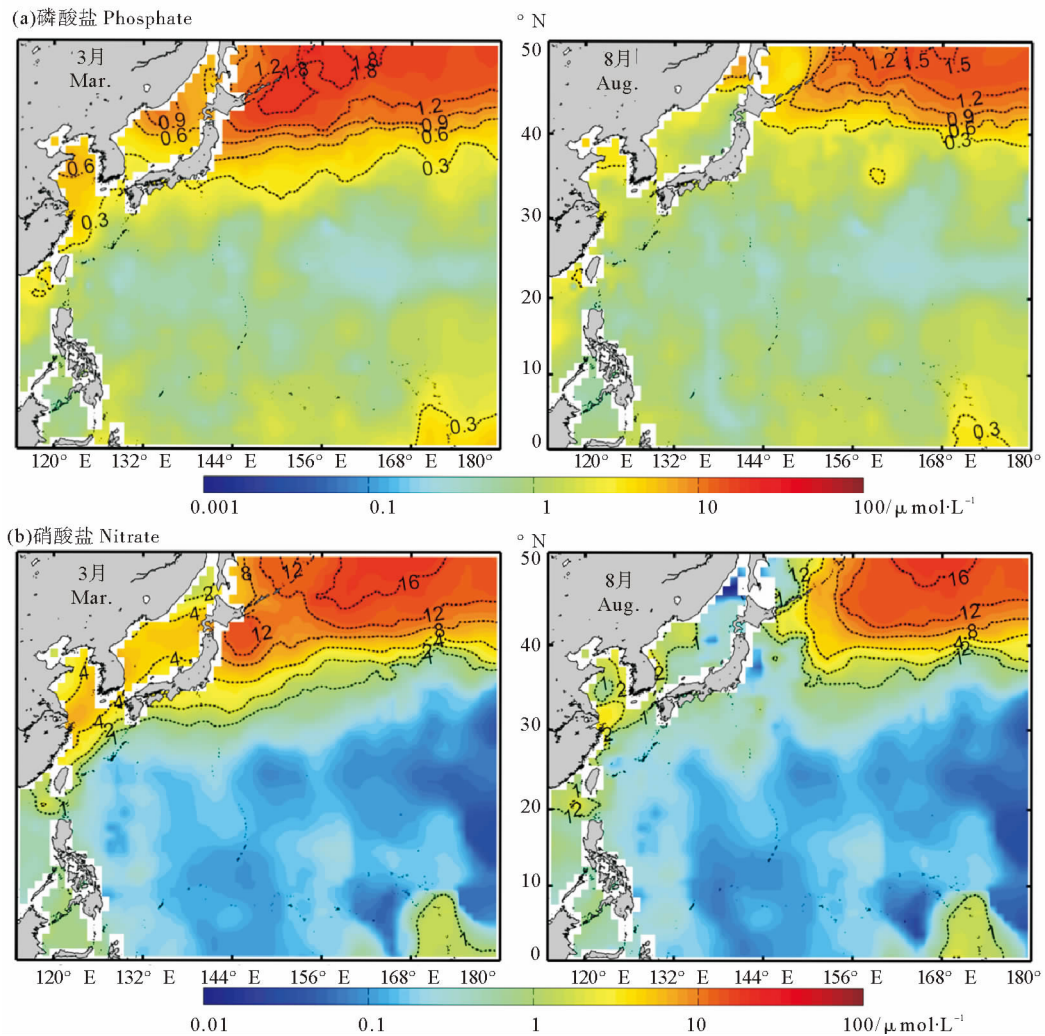


图 7 表层磷酸盐(a)和硝酸盐(b)在 3 和 8 月的浓度分布

Fig. 7 The distribution of surface phosphate(a) and nitrate(b) concentration in March and August

冬季混合层深度为对流混合最深处,该深度处的对流通量定义为 0,如果各季节积分深度均选用该深度,即不存在混合层深度的变化,忽略生化作用的影响,该深度内的营养盐浓度将不随季节更替发生总量的增减,只存在垂向的交换。若混合层内营养盐总量即平均浓度发生季节变化,则代表有垂向过程之外的输运方式存在。在冬季,风应力增强,促进了海水的物理输运过程,导致混合层内营养盐浓度增大(见图 8)。在日本海和日本以东的寒暖流交汇处,冬季营养盐平均浓度显著增加,硝酸盐增量可达 $4 \mu\text{mol/L}$,磷酸盐增量达 $0.4 \mu\text{mol/L}$;在黑潮流域和菲律宾群岛近岸区,硝酸盐和磷酸盐的平均浓度在冬季有少量增加,硝酸盐增加 $0.1 \mu\text{mol/L}$,磷酸盐增加 $0.01 \mu\text{mol/L}$ 。在不同海域,营养盐浓度的季节变化幅度存在差异,Limsakul 等^[23]发现,与副热带黑潮流区相比,寒暖流交汇区的风应力和太阳辐射季节变化更显著,故而其海洋上层的生物环境和营养盐都显示出更强的季节变化。

以垂向平均浓度变化 0.01 和 $0.001 \mu\text{mol/L}$ 分别作

为判定硝酸盐和磷酸盐冬夏总量不变的临界值,根据混合层内营养盐总量冬夏变化的不同特点,可以分为 4 种类型,以硝酸盐为例,类型如图 9 所示(站位如图 10 标注):

(1) 冬季增加型(见图 9(a))。在冬季,受光照强度限制,生物的生化作用不明显,而风应力加强,导致海水的物理输运过程(如水平输运)增强,混合层内硝酸盐得到补充,硝酸盐总量在冬季高于夏季。如图 10 所示,该类型分布在黑潮流域和绝大部分近岸海域。

(2) 冬季减少型(见图 9(b))。冬季近表层海水的硝酸盐浓度增加,随深度增加,混合层内硝酸盐存在较大损失,总量减少。如图 10 所示,该类型主要分布在研究区域的东北部。

(3) 冬夏不变型 I(见图 9(c))。混合层内的硝酸盐浓度垂向分布冬夏季几乎不变,造成硝酸盐总量的季节变化量为 0。在副热带海区,除了 137°E 断面观测量较多,其他区域的硝酸盐观测数据不足(参看图 1),数据插值、订正过程都受限,因此副热带海区该类型存在的面积较大(见图 10)。

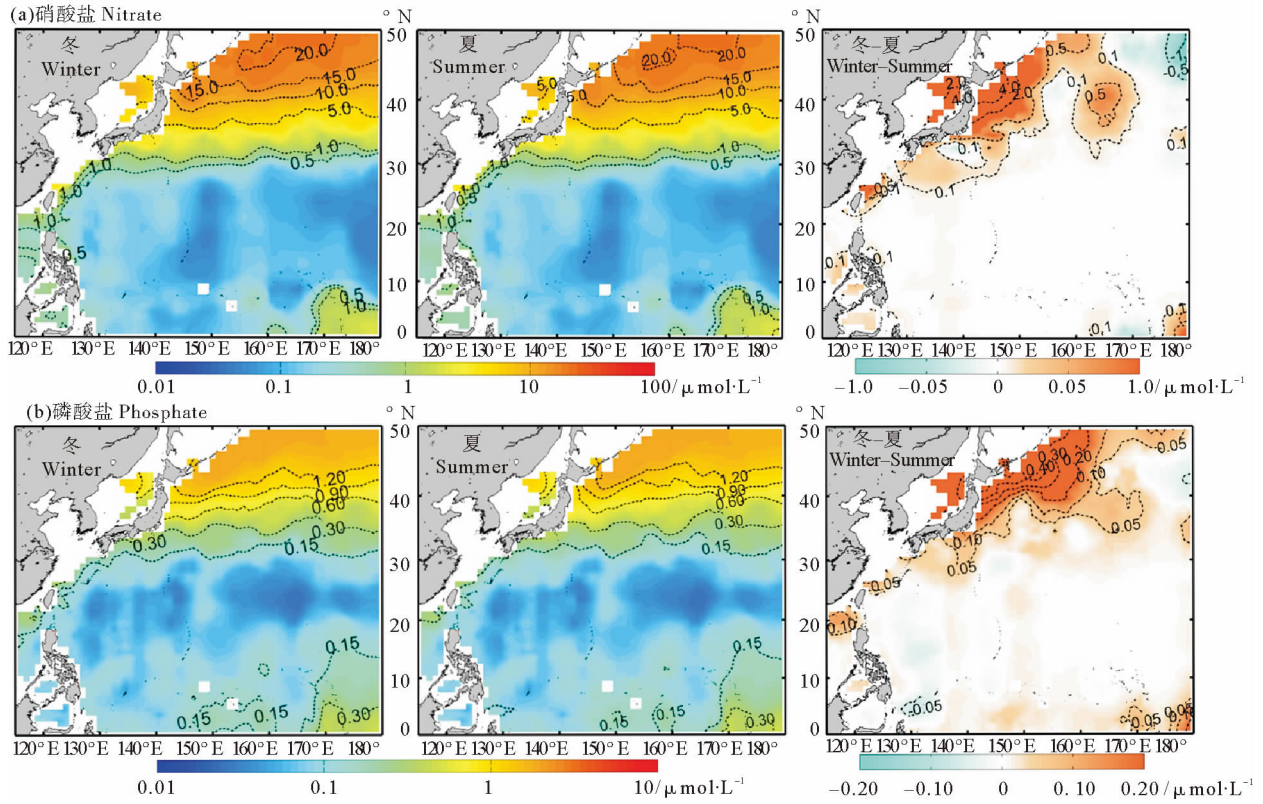
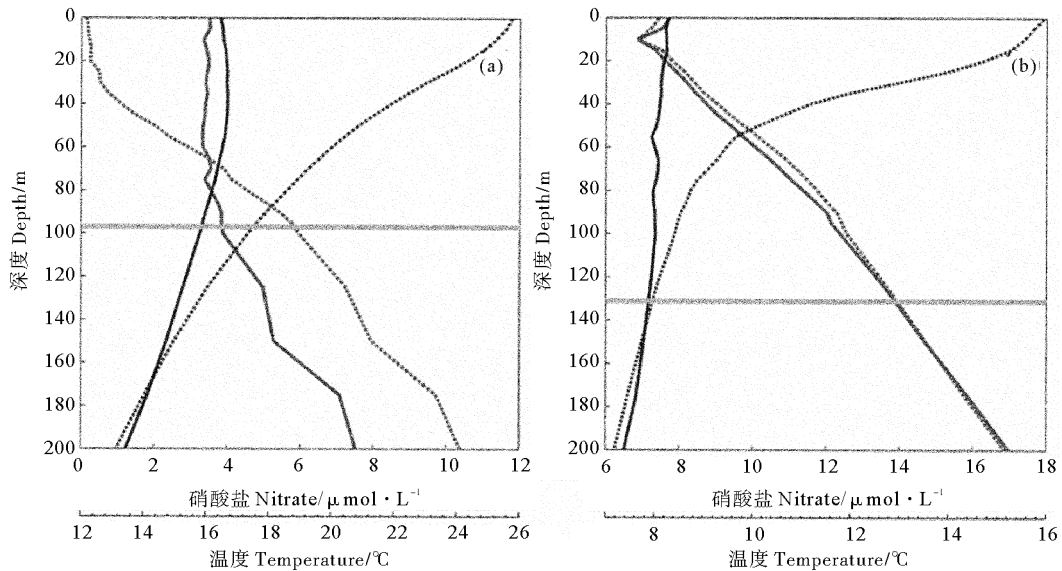


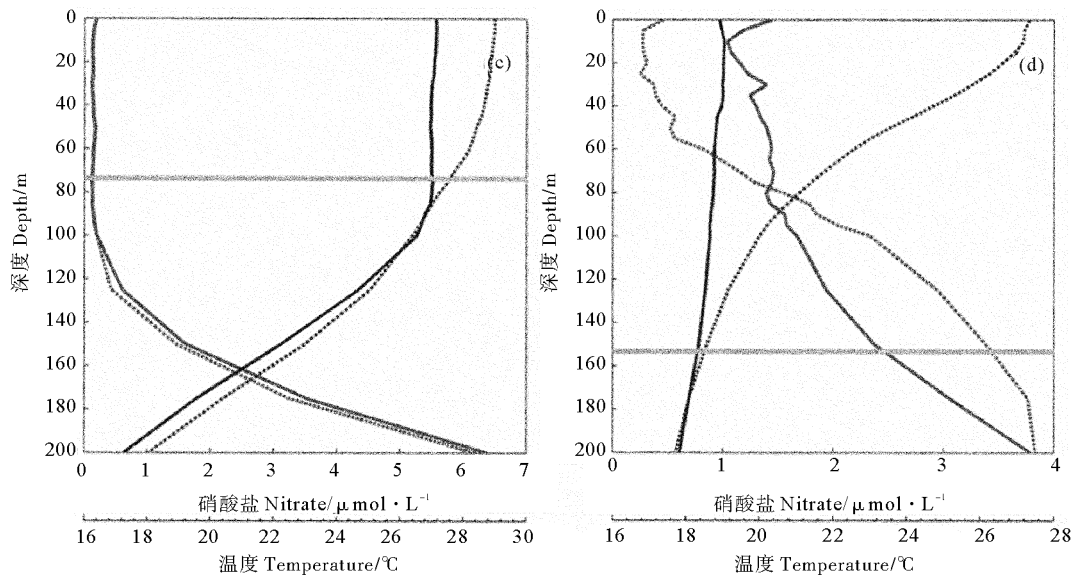
图8 混合层内硝酸盐(a)和磷酸盐(b)平均浓度分布及冬夏差异图

Fig. 8 Distribution of the averaged concentration and seasonal difference (winter minus summer) of nitrate (a) and phosphate (b) in winter mixed layer

(4) 冬夏不变型Ⅱ(见图9(d))。混合层内仅存在垂向对流过程,造成混合层内硝酸盐总量冬夏季保持不变,这是最简单的理论状态。如图10所示,在研究海域,这种类型仅在极少海区存在,这表明,在研究海区内,垂向对流之外的运输过程对混合层内硝酸盐总量的季节变化是有贡献的。

磷酸盐总量变化的四种类型与硝酸盐具有相似分布,冬季在黑潮流域和绝大部分近岸海域增加,在研究区域的东北部减少。但在日本以南副热带海域的分布与硝酸盐不同,在该海域,两种营养盐的观测量存在差异(见图1),可能影响了二者的数据处理过程和结果。





(实线: 冬季; 虚线: 夏季; 灰线: 冬季混合层深度。Solid line: winter; Dotted line: summer, Gray line: winter mixed layer. (a) 冬季增加; (b) 冬季减少; (c) 冬夏不变 I; (d) 冬夏不变 II。(a)Increasing in winter; (b)Decreasing in winter; (c) non-change I; (d) non-change II.)

图 9 混合层内硝酸盐冬夏变化四种类型

Fig. 9 Four types of nitrate seasonal variation in the mixed layer

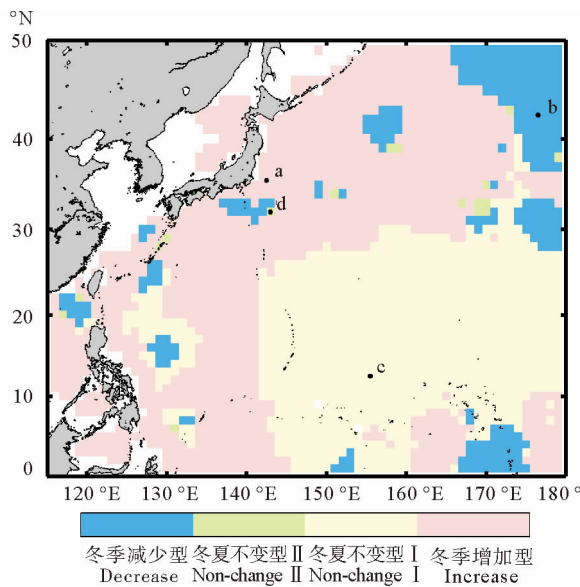


图 10 混合层内硝酸盐冬夏总量变化类型和图 9 站位分布图
Fig. 10 The distribution of seasonal variation types for total nitrate in the mixed layer and the stations in fig. 9

3 结语

基于 Argo 冬季混合层数据和网格化的 WOD13 营养盐(硝酸盐和磷酸盐)数据,对西北太平洋混合层内营养盐浓度的季节变化进行了分析,分析结果表明,在西北太平洋冬季混合层深度内,营养盐垂向平均浓度沿纬向分布,且随纬度的增加而增大。在日本海和日本以东的寒暖流交汇处,营养盐平均浓度在冬季明显高于夏季,且冬夏浓度变化幅度大于副热带海域。混合层内营养盐总量的冬夏变化可分为 4 种类型:冬

季增加型、冬季减少型、冬夏不变型 I (垂向分布不变) 和冬夏不变型 II (垂向对流补偿)。在黑潮流域和大部分近岸海域,两种营养盐都属于冬季增加型,但由于混合层底部并无营养盐垂向通量补充,生物生化作用影响不明显,这些海域混合层内营养盐总量的季节变化可能受水平运输的影响。

由于观测资料时空分布不均,副热带海区的观测资料不足,在插值过程中可能被带入误差,可考虑补充其他数据集的营养盐观测资料,进一步研究这些区域的营养盐浓度变化。另外,上述结论都是基于由观测数据得到的统计研究结果,其动力学机制还需通过数值模式等方法加以验证。

致谢: 作者对日本爱媛大学全国共同利用共同研究基地 LaMer(Leading Academia in Marine and Environment Pollution Research)的资助表示诚挚谢意。

参考文献:

[1] Kara A B, Rochford P A, Hurlburt H E. Mixed layer depth variability over the global ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2003, 108(C3), doi: 10.1029/2000JC000736.
 [2] de Boyer Montégut C, Madec G, Fischer A S, et al. Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C12), doi: 10.1029/2004JC002378.
 [3] Ohno Y, Iwasaka N, Kobashi F, et al. Mixed layer depth climatology of the North Pacific based on Argo observations[J]. Journal of Oceanography, 2009, 65(1): 1-16.
 [4] 李丽平, 靳莉莉, 管兆勇. 北太平洋次表层海温异常对中国夏季降

- 水影响的可能途径[J]. 大气科学, 2010, 34(5): 988-1000.
- Li L, Jin L, Guan Z. The possible influence channel of sub-surface sea temperature anomaly in the North Pacific on China summer rainfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2010, 34(5): 988-1000.
- [5] Stommel H. Determination of water mass properties of water pumped down from the Ekman layer to the geostrophic flow below [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1979, 76(7): 3051-3055.
- [6] Marshall J C, Williams R G, Nurser A J G. Inferring the subduction rate and period over the North Atlantic[J]. Journal of Physical Oceanography, 1993, 23(7): 1315-1329.
- [7] 安玉柱, 张韧, 王辉赞, 等. 全球大洋混合层深度的计算及其时空变化特征分析[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2249-2258.
An Y, Zhang R, Wang H, et al. Study on calculation and spatio-temporal variations of global ocean mixed layer depth[J]. Chinese J Geophys (in Chinese), 2012, 55(7): 2249-2258.
- [8] Sverdrup H U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton[J]. Journal du Conseil, 1953, 18(3): 287-295.
- [9] Yentsch C S. Estimates of 'new production' in the Mid-North Atlantic[J]. Journal of Plankton Research, 1990, 12(4): 717-734.
- [10] Gargett A E. Physical processes and the maintenance of nutrient-rich euphotic zones[J]. Limnology and Oceanography, 1991, 36(8): 1527-1545.
- [11] Michaels A F, Olson D, Sarmiento J L, et al. Inputs, losses and transformations of nitrogen and phosphorus in the pelagic North Atlantic Ocean[J]. Biogeochemistry, 1996, 35(1): 181-226.
- [12] Williams R G, Follows M J. The Ekman transfer of nutrients and maintenance of new production over the North Atlantic[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1998, 45(2): 461-489.
- [13] Reynolds S, Mahaffey C, Roussenov V, et al. Evidence for production and lateral transport of dissolved organic phosphorus in the eastern subtropical North Atlantic[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2015, 28(8): 805-824.
- [14] Holte J, Gilson J, Talley L et al. Argo Mixed Layers[R]. Scripps Institution of Oceanography/UCSD. <http://mixedlayer.ucsd.edu>, accessed, 2016.
- [15] Kang Y J, Noh Y, Yeh S W. Processes that influence the mixed layer deepening during winter in the North Pacific[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2010, 115(C12), doi: 10.1029/2009JC005833.
- [16] Takeuchi E, Yasuda I. Wintertime shoaling of oceanic surface mixed layer[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(22), doi: 10.1029/2003GL018511.
- [17] Garcia H E, Locarnini R A, Boyer T P, et al. World Ocean Atlas 2013(volume 4): Dissolved Inorganic Nutrients (Phosphate, Nitrate, Silicate)[M]. USA: NOAA Atlas NESDIS, 2014, 76: 25.
- [18] Barnes S L. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis[J]. Journal of Applied Meteorology, 1964, 3(4): 396-409.
- [19] Liu K K, Tang T Y, Gong G C, et al. Cross-shelf and along-shelf nutrient fluxes derived from flow fields and chemical hydrography observed in the southern East China Sea off northern Taiwan[J]. Continental Shelf Research, 2000, 20(4): 493-523.
- [20] Conkright M E, Gregg W W, Levitus S. Seasonal cycle of phosphate in the open ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2000, 47(2): 159-175.
- [21] Yasunaka S, Nojiri Y, Nakaoka S, et al. Mapping of sea surface nutrients in the North Pacific: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(11): 7756-7771.
- [22] Williams R G, Follows M J. Physical Transport of Nutrients and the Maintenance of Biological Production[M]. //Ocean Biogeochemistry. Berlin Heidelberg: Springer, 2003: 19-51.
- [23] Limsakul A, Saino T, Goes J I, et al. Seasonal variability in the lower trophic level environments of the western subtropical Pacific and Oyashio Waters—A retrospective study[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(24): 5487-5512.

A Preliminary Study on Nutrients Concentration Within the Mixed Layer in the Northwest Pacific Based on WOD Data

YANG Hai-Yan¹, MAO Xin-Yan¹, GUO Xin-Yu^{2,3}

(1. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 3. Center for Marine Environmental Studies, Ehime University, Matsuyama 7908577, Japan)

Abstract: The WOD13 (World Ocean Database 2013) data (nitrate and phosphate) is processed into $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ gridded climatological mean fields. Combined with the Argo climatological mixed layer depth, the seasonal variation of nutrients concentration within the winter mixed layer is preliminarily examined in the northwest Pacific. Results show that in the region to the north of 30°N , the vertically mean nutrient concentration in the winter mixed layer shows zonal distribution and it increases as the latitude goes up. As for the seasonal variation, it is found that, the nutrients concentration increases significantly in the winter compared to the summer in the Japan Sea and to the east of Japan, and increases slightly in the mainstream and adjacent area of Kuroshio. The seasonal change of the total nutrient concentration can be divided into four types: increasing in winter, decreasing in winter, non-change I (unchanged in vertical distribution), and non-change II (vertical convective compensation). Obviously, these changes cannot be explained only by biochemical processes and vertical mixing, which implies the horizontal transport has remarkable influence on the nutrient supplying into the mixed layer.

Key words: winter mixed layer; northwest Pacific; nutrients; seasonal variation

责任编辑 庞 旻