

马里亚纳海沟“挑战者深渊”营养盐的垂直分布特征*

李亚男, 陈洪涛**, 谷文艳, 王国善, 矫恒晨, 祝陈坚

(中国海洋大学化学化工学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 2015年12月在马里亚纳海沟“挑战者深渊”进行了定点样品采集,对温度、盐度、溶解氧、pH等环境参数进行了分析,讨论了营养盐的垂直分布特征、各形态营养盐结构特征及影响因素。研究发现,溶解氧在表层具有最大值,在1 000 m左右出现极小值,而在8 700 m深度具有较高溶解氧值($5.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),这可能与富氧水团的存在有关。硝酸盐表层含量较低,在1 000和5 367 m处出现双峰值。在表层水体中,溶解有机氮、磷是溶解总氮、溶解总磷的主要存在形式,表层以深,溶解无机氮、磷逐渐占据主导地位。磷酸盐表层含量最低,在1 000 m处达到最大值,之后随着深度的增加浓度逐渐降低;硅酸盐在表层含量较低,在约4 000 m处有最大值 $161.65 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,在4 000 m以深,硅酸盐仍维持较高浓度。结果表明马里亚纳海沟“挑战者深渊”的溶解氧、pH及营养盐的垂直分布特征与大洋环流、海沟形态以及生物活动密切相关。

关键词: 马里亚纳海沟;挑战者深渊;溶解氧;营养盐;垂直分布

中图分类号: P737.4+4

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)01-074-08

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190024

引用格式: 李亚男, 陈洪涛, 谷文艳, 等. 马里亚纳海沟“挑战者深渊”营养盐的垂直分布特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(1): 74-81.

LI Ya-Nan, CHEN Hong-Tao, GU Wen-Yan, et al. The vertical distribution of nutrients in the Challenge Deep of the Mariana trench[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(1): 74-81.

马里亚纳海沟是目前所知世界上最深的海沟,位于菲律宾东北、马里亚纳群岛附近的西太平洋。马里亚纳俯冲带具有典型的“沟—弧—盆”体系,是由太平洋板块向西俯冲到菲律宾海板块之下形成的洋—洋俯冲带^[1-3],马里亚纳海沟全长2 550 km,平均宽度为70 km,目前已探测到最深处达到11 034 m,被称为“挑战者深渊”^[4-6]，“挑战者深渊”位于马里亚纳海沟的南端,且东西方向延伸^[2]。马里亚纳海沟5 000 m以上区域坡度较为平缓,在5 000 m以下区域存在陡坡^[7]。其6 000 m以下几乎完全由海沟组成,是地球上研究最少的水生生物圈。海沟周围具有地形陡峭、静水压力高、温度低的特点,周期性地受到由浑浊流和地震活动与陡峭地形相结合引起的滑坡^[8]。海沟环境与深海海洋的区别在于它们的静水压升高和它们的水文地形隔离性质,而其他的物理和化学条件,如温度、盐度、溶解氧和营养盐等与深海海洋的条件基本一致^[4, 8]。

N、P、Si是海洋生物生长所必须的最重要元素,也是海洋初级生产过程和食物链的基础,其在海水中的含量高低会影响海洋生物生产力与生态系统的结构^[9-10]。海沟中营养盐的主要来源于上层海水的垂直

下沉、动物尸体的沉降分解以及地震等构造活动。此外,由于海沟的特殊构造,通过斜坡的横向输送也会使营养盐到达沟渠地面(也被称为“漏斗效应”^[11]),颗粒物沉降和埋藏是营养盐的主要迁出途径^[4, 12]。Takuro Nunoura等的研究表明马里亚纳海沟磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)及亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)浓度在海沟深度和深海平原之间是相似的^[4, 13]。在Riley等在调查中发现,深海盆地和海沟水域中,硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-S}$)含量的垂直分布含量随深度的增加而增加,通常在颗粒硅溶解的主要水层出现最大值^[14]。马里亚纳海沟区域深层水中主要包括两个水团:下环极深层水(LCPW)和北太平洋深层水(NPDW)^[15]。具有高溶解氧、高盐特征^[16]的LCPW,向新西兰东北方向流动,一直延伸到中太平洋盆地。LCPW的一些分支经过赤道和东马里亚纳盆地进入西北太平洋和西马里亚纳盆地^[15, 17]。NPDW自东北太平洋流入^[18],从东马里亚纳盆地东南方向延伸到了东马里亚纳盆地西南方向,水团的高硅核心在2 500~3 500 m,具有高硅的水系特征^[15]。

深海水团运动、生物活动以及地震等构造活动可能会影响海沟内营养盐的分布变化,为进一步研究马

* 基金项目:“全球变化与海气相互作用”专项项目(GASI-02-PAC-ST-MSwin)资助

Supported by “Global Change and Air-Sea Interaction”(GASI-02-PAC-ST-MSwin)

收稿日期:2019-01-19; 修订日期:2019-04-09

作者简介:李亚男(1995-),女,硕士生,主要从事海洋生物地球化学研究。E-mail:lynan2y@163.com

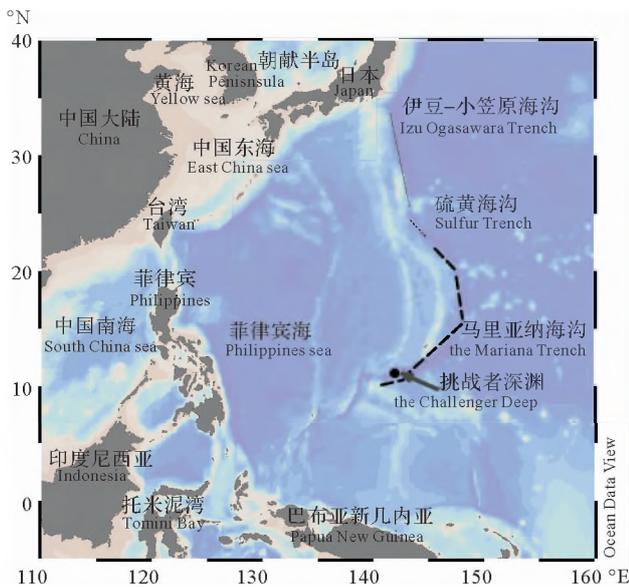
** 通讯作者:E-mail:chenht@ouc.edu.cn

里亚纳海沟中温度、盐度、溶解氧(DO)、pH 以及营养盐的分布特征, 本文采集了马里亚纳海沟“挑战者深渊”从表层到深层(0~8 727 m)的水样, 并对其 pH、DO、和不同形态的营养盐进行了分析。

1 采样与方法

1.1 研究站位

2015 年 12 月, 在马里亚纳海沟“挑战者深渊”(142°18.105'E, 11°22.569'N) 分 6 个水层采集样品, 采样水深分别为 0, 1 000, 1 759, 3 699, 5 367, 7 200 和 8 727 m, 具体见图 1。



(图中粗虚线代表马里亚纳海沟区域, 黑色圆点代表“挑战者深渊”采样位置。The thick dash line represents the Mariana trench, and the black dots represent the sampling location of the challenge deep.)

图 1 “挑战者深渊”采样站位示意图

Fig.1 Sampling stations in the Challenge Deep

1.2 样品采集及分析方法

海水温度和盐度在现场由 CTD 测定, DO 采用碘量法测定, pH 采用 pH 计法测定。采集的海水样品经 0.45 μm 醋酸纤维膜(经 1‰ 的盐酸浸泡 24 h 后用 Milli-Q 水冲洗至中性)过滤。取部分滤液现场测定 DIN 和 DIP^[19]。其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 利用次溴酸钠氧化法测定, $\text{NO}_3\text{-N}$ 为 Cd-Cu 还原法, $\text{NO}_2\text{-N}$ 为 α -萘乙二胺分光光度法, $\text{PO}_4\text{-P}$ 为磷钼蓝法, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 为硅钼蓝法; 另一部分滤液直接装于聚乙烯瓶(预先于 HCl 溶液中浸泡 24 h, 后用蒸馏水及 Milli-Q 水洗至中性), -20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下冷冻保存, 回岸上实验室分析 DTN 和 DTP。DTN 和 DTP 的测定采用碱性过硫酸钾氧化法^[20]进行。

溶解氧、溶解态无机营养盐采用国家海洋局第二海洋研究所生产的碘酸钾标准溶液和营养盐标准溶

液作为外标质控样, 测定结果符合要求。各要素方法检出限分别为: 溶解氧为 0.02 mg/L, 硝酸盐为 0.03 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 亚硝酸盐为 0.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 氨氮为 0.03 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 磷酸盐为 0.02 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, 硅酸盐为 0.45 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。溶解有机氮(DON)和溶解有机磷(DOP)则根据 DTN、DIN 和 DTP、DIP 的差值计算得出: $\text{DON}=\text{DTN}-\text{DIN}$; $\text{DOP}=\text{DTP}-\text{DIP}$ 。

2 结果与讨论

2.1 温度、盐度的分布特征

从图 2 可以看出, 随着深度增加, 马里亚纳海沟“挑战者深渊”的海水温度从表层的 28.12 $^{\circ}\text{C}$ 迅速降低至 2 000 m 左右的 2.39 $^{\circ}\text{C}$, 在 4 000~7 200 m 以深, 温度大约在 1.60 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 而到 8 727 m 温度增至 2.0 $^{\circ}\text{C}$, 大约升高 0.4 $^{\circ}\text{C}$, 这是因为沟槽内的底层水温随着静水压力(即深度)的增加而变暖, 在压力增大的情况下, 水分子会产生压缩性效应, 会放出热量^[5,21]。盐度变化曲线显示在表层水体中盐度为 34.4, 表层以下, 盐度随着深度的增加而逐渐增加, 在 3 000 m 左右盐度增大, 这是因为在 3 000~5 000 m 左右 LCPW 的存在^[22-23], 高盐水团的输入导致了盐度的迅速增加, 4 000 m 以下, 盐度基本维持在 34.7 左右。

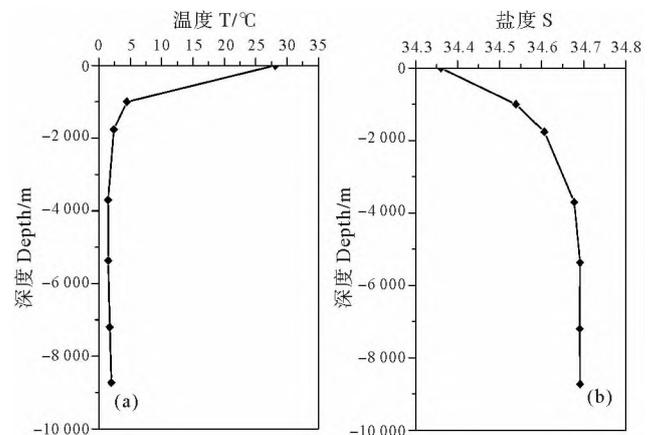


图 2 马里亚纳海沟“挑战者深渊”温度(a)和盐度(b)的垂直分布特征

Fig.2 Vertical distribution characteristics of temperature (a) and salinity (b) in the Challenge Deep of the Mariana trench

2.2 pH 的分布特征

马里亚纳海沟“挑战者深渊”处 pH 值的垂直分布见图 3, 表层水体出现 pH 极大值为 8.30, 这是由于生物光合作用会迁出水中的 CO_2 , 导致 pH 值的增加^[24]。随深度的增加, pH 值降低, 至 1 000 m 左右出现 7.89 的极小值, 该区间 pH 降低的主要原因是由于生源碎屑的氧化分解会增加水体中的 CO_2 , 导致 pH 值出现极小值^[25]。自极小值层以深, pH 值略有增加, 大约维持在

7.90 左右,这主要是 CaCO_3 的溶解降低水体中 CO_2 , 造成的 pH 值增加^[24]。

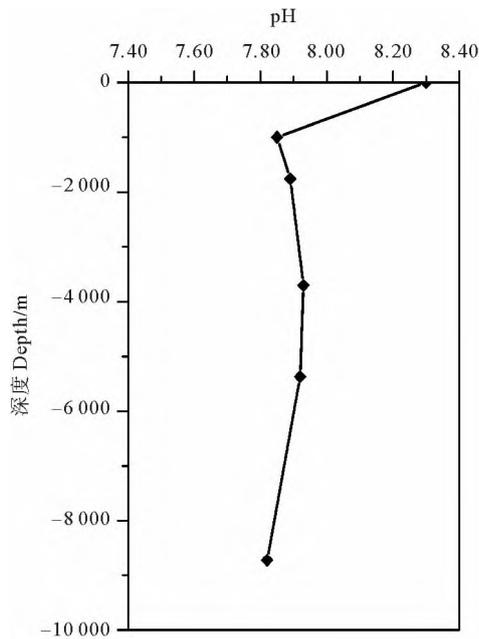


图3 马里亚纳海沟“挑战者深渊”pH的垂直分布特征
Fig.3 Vertical distribution characteristics of pH in the Challenge Deep of the Mariana trench

2.3 DO 的分布特征

马里亚纳海沟的 DO 的分布特征如图 4 中所示。在表层有 DO 最大值 $6.57 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 1 000 m 处出现溶解氧的极小值 $2.77 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这是由于有机物的氧化分解作用和海洋生物的呼吸作用, 溶解氧浓度随深度增加逐渐降低^[26]。在极小值以深, DO 的含量逐渐增加, 在 5 367 m 处出现极大值 $5.79 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这可能是高纬度富氧海水下环极深层水(LCPW)下沉不断补充的结果^[26-27]。在马里亚纳海沟 3 000~5 000 m 以深有 LCPW 的存在^[22-23], LCPW 来自南极底层水(AABW), 具有低温、高溶解氧、高盐的特征。随着洋流的输送, 高溶解氧的海水向马里亚纳海沟中输送^[28]。DO 的含量在极大值以深随深度的增加略有降低, 但在 8 727 m 的海洋超深渊层仍有较高的溶解氧值, 这可能是富氧海水向下扩散所导致的^[13, 29-30]。马里亚纳海沟 DO 的垂直分布与 Taejin Kim 等在北太平洋区域的观测结果^[31]较为相似。

2.4 营养盐的含量及分布特征

2.4.1 溶解态氮 马里亚纳海沟“挑战者深渊”各形态氮的垂直分布如图 5 所示, $\text{NO}_3\text{-N}$ 在表层水体中浓度很低, 在 1 000 m 处出现第一个峰值, 其浓度达到 $41.47 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。随着深度的增加, 浓度逐渐降低, 在 3 699 m 处达到 $27.73 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 在 5 367 m 出现第二个峰值($43.10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。5 367 m 以深, $\text{NO}_3\text{-N}$

浓度略有降低。马里亚纳海沟表层水体中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度几乎接近分析零值, 这是在表层中浮游植物生长消耗所致^[32]。随着深度的增加, 由于生物碎屑的氧化分解使得 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的浓度在 1 000 m 达到最大值, 而在 5 000 m 左右出现第二个极大值可能是由于马里亚纳海沟特殊的构造, 在其陡坡处由于重力驱动产生了下坡输沙^[4, 6], 导致了斜坡上有机物的积累, 当有机物发生降解时就引起了无机态营养盐的变化^[33]。

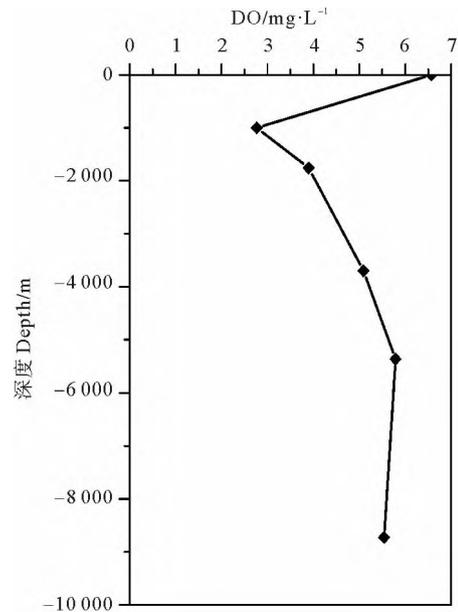


图4 马里亚纳海沟“挑战者深渊”溶解氧的垂直分布特征
Fig.4 Vertical distribution characteristics of dissolved oxygen in the Challenge Deep of the Mariana trench

“挑战者深渊” $\text{NO}_2\text{-N}$ 整体浓度较低且随深度变化不大, 最大浓度小于 $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在表层水体中的含量为 $1.81 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 随深度增加逐渐降低, 1 000 m 处达到极小值($0.72 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$), 在极小值以深浓度逐渐增加, 在 3 699 m 处达到极大值。在极大值以深, $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度迅速降低, 并维持在 $0.50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, 这可能是由于在海沟 8 000 m 左右深处有较高溶解氧值, 硝化作用仍旧维持在较高水平, 导致 $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度降低。

DIN 在马里亚纳海沟“挑战者深渊”的分布与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 基本一致, 且 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量占 DIN 约为 98%。在表层水体中, DON 的浓度较高, 可能是微生物的同化作用导致 DON 的积累。随着深度的增加逐渐降低, 在 1 759、5 367 m 处达到分析零值, 在 5 367 m 以深, DON 浓度略有增加。DTN 在 1 000 m 达到极大值, 在极大值以深浓度降低, 并维持在 $39 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。在表层中, DON 是 DTN 的主要组成成分, 随着深度的增加, DIN 逐渐占据主导地位。各形态的溶解氮的浓度变化趋势如图 5 所示。

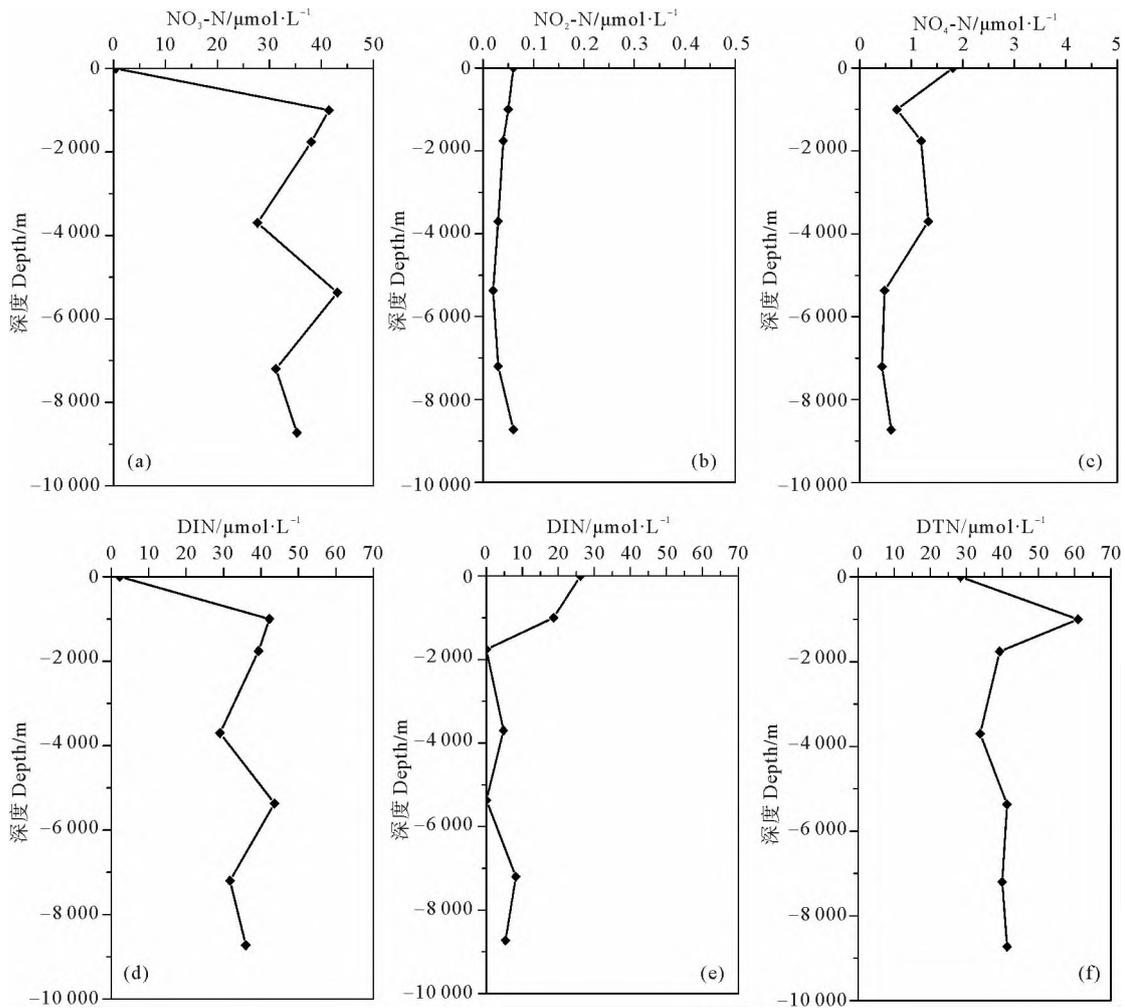


图5 马里亚纳海沟“挑战者深渊”溶解态氮的垂直分布特征

Fig.5 Vertical distribution characteristics of all forms of nitrogen in the Challenge Deep of the Mariana trench

2.4.2 溶解态磷 $\text{PO}_4\text{-P}$ 在表层水体中含量较低, 随深度的增加 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量迅速增加, 在 1 000 m 处达到极大值 ($2.84 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。在表层水体中, 生物活动的吸收导致 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量很低^[34]。在 1 000 m 左右出现极大值是因为含磷颗粒在重力的作用下沉一直带到 1 000 m 以深的海水中, 由于细菌的分解氧化, $\text{PO}_4\text{-P}$ 又被释放回海水中^[35-37], 导致 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度随着深度的增加迅速增加。在 1 000 m 以深, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的浓度略有降低, 由于垂直涡动扩散, 使不同水层的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 浓度趋于均等, $\text{PO}_4\text{-P}$ 随深度的增加变化很小^[38], 基本维持在 $2.40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。 $\text{PO}_4\text{-P}$ 的垂直分布与 Takuro Nunoura 等在“挑战者深渊”处的观测结果较为相似^[6]。 DTP 的垂直分布与 $\text{PO}_4\text{-P}$ 基本一致。 DOP 在表层水体中的浓度相对较高, 是 DTP 的主要组成成分, 在表层以深 DOP 的浓度接近分析零值, DTP 主要受 DIP 控制, 这表明表层以深存在 DOP 的降解和 DIP 的再生转化(见图 6)。

2.4.3 溶解态硅 马里亚纳海沟“挑战者深渊”表层水体中, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度相对较低。随着深度的增加, 海水中的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度逐渐增加, 但与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 不同的是, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 并没有在 1 000 m 左右出现极大值, 而是在 3 699 m 处出现最大值 ($161.65 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。在最大值以深, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度略有降低, 但基本稳定在 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右(见图 7)。

“挑战者深渊” $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的垂直分布与北太平洋的分布相似^[3]。 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度在 3 699 m 处达到最大值, 这是由于北太平洋深层水(NPDW)的存在^[38], 在北太平洋 3 500 m 左右处是高硅 NPDW 的核心区域, 水团的混合使马里亚纳海沟“挑战者深渊”也具备高 Si 的特征^[29-30]。在海沟 8 000 m 以下的超深渊层, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的浓度高达 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。这不仅与生物体的下沉溶解有关, 而且与底质表层硅酸盐矿物质的直接溶解有关。临近冬季, 生物死亡后残体缓慢下沉, 随着深层压力增加, 有利于颗粒硅的再溶解作用释放出溶解硅^[8]。

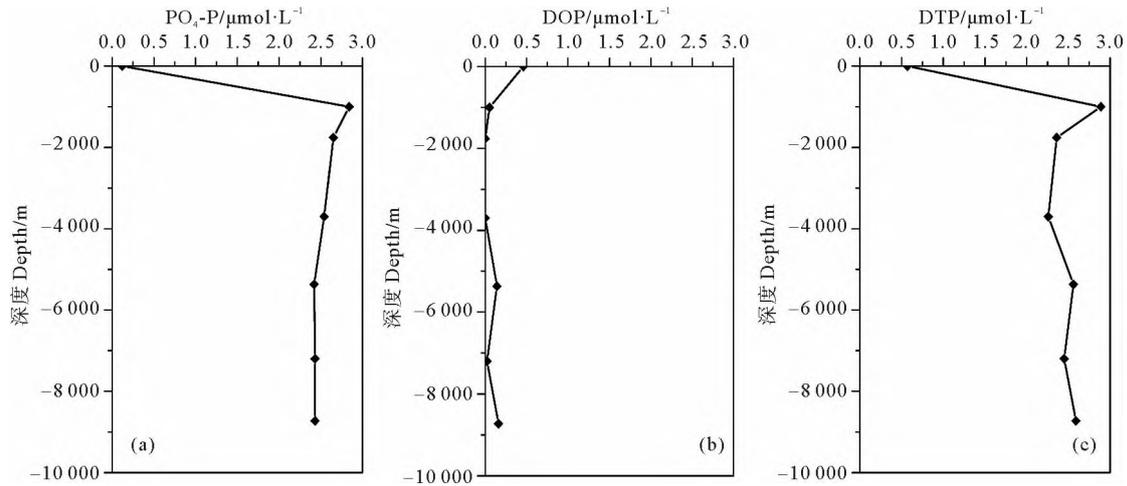


图6 马里亚纳海沟“挑战者深渊”各溶解态磷的垂直分布特征

Fig.6 Vertical distribution characteristics of dissolved phosphate in the Challenge Deep of the Mariana trench

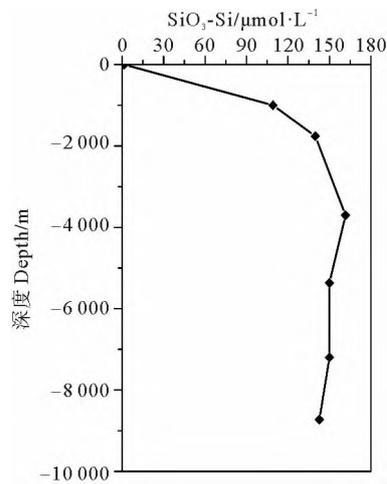


图7 马里亚纳海沟中“挑战者深渊”溶解态硅的垂直分布特征

Fig.7 Vertical distribution characteristics of silica in the Challenge Deep of the Mariana trench

2.5 营养盐结构的垂直分布特征

总体来说,“挑战者深渊”N/P 与 N/Si 呈现相似的变化趋势,与 Si/P 呈现相反的变化趋势。N/P 比在表层较高,比值接近 20。表层以下 N/P 迅速降低,在 3 699 m 处出现极小值,比值为 11 左右。之后比值又开始升高,在 5 367 m 处出现峰值,比值在 18 左右,随后 N/P 比值再次降低,出现第二次极小值,在 8 737 m 以深比值略有上升(见图 8)。

N/Si 比值在表层出现最大值 1.67,随着深度的增加,比值降低,在 1 759 m 以深比值基本稳定,维持在 0.27 左右。Si/P 比值的的变化趋势与 N/Si 趋势相反,在表层出现最小值 11.54,随着深度的增加,比值逐渐增加,在 3 699 m 处达到极大值,在极大值以深,比值变化不大,比值在 59.8 左右。一般大洋中的营养盐结构符合 Redfield 比值($N : Si : P \approx 16 : 16 : 1$)^[40],但根

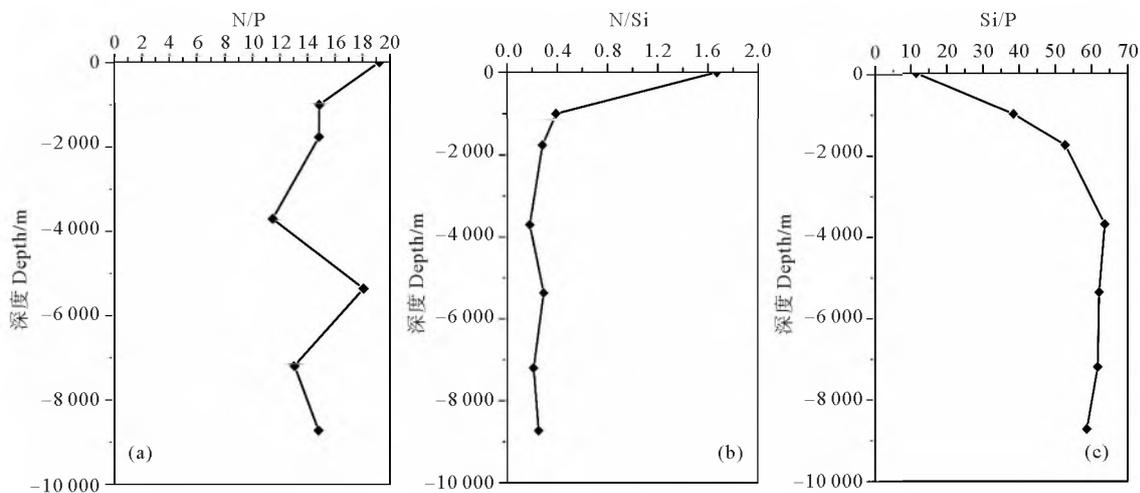


图8 马里亚纳海沟“挑战者深渊”营养盐结构的垂直分布特征

Fig.8 Vertical distribution characteristics of nutrients structure in the Challenge Deep of the Mariana trench

据先前研究表明, Redfield 比值存在不确定性, 北太平洋西部深海水域的 Redfield 比值要低于 $16^{[39-41]}$ 。

3 结论

马里亚纳海沟“挑战者深渊”是目前研究较少的区域, 通过对其表层至深层水体中 pH、溶解氧以及营养盐的分析, 可以得到以下结论:

(1) DO 含量表层高, 在 1 000 m 左右出现极小值, 1 000 m 以深由于富氧水团 LCPW 的存在 DO 值增加, 在 8 000 m 左右的超深渊层具有较高的 DO 值, 可能是 LCPW 向下扩散造成的。

(2) $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 含量表层较低, 随深度的增加迅速增加, 在 1 000 m 处达到极大值。但 $\text{NO}_3\text{-N}$ 除在 1 000 m 处出现第一个峰值外, 在 4 000 m 左右出现第二个峰值, 这可能由于重力驱动在海沟 4 000 m 左右的陡坡处产生了下坡输沙, 导致了营养盐的积累。

(3) 在表层水体中, DON、DOP 是 DTN、DTP 的主要存在形式, 表层以深, DIN、DIP 逐渐占据主导地位。

(4) $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 含量表层较低, 在 3 699 m 处出现极大值, 但在海沟 8 000 m 左右 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 浓度仍很高, 原因可能是高硅水团 NPDW 的存在以及冬季生物死亡后颗粒态硅再溶解释放出溶解态硅。

参考文献:

- [1] 刘鑫, 李三忠, 赵淑娟, 等. 马里亚纳俯冲系统的构造特征[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 329-340.
Liu Xin, Li Sanzhong, Zhao Shujuan, et al. Structural characteristics of mariana subduction system[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(4): 329-340.
- [2] 刘方兰, 杨胜雄, 邓希光, 等. 马里亚纳海沟“挑战者深渊”最深处水深探测[J]. 海洋测绘, 2013, 33(5): 49-52.
Liu Fanglan, Yang Shengxiong, Deng Xiguang, et al. Depth detection in the challenger deep of mariana trench[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2013, 35(5): 49-52.
- [3] 刘方兰, 曲佳. 马里亚纳海沟水深探测及“挑战者深渊”海底地形特征[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(4): 7-11.
Liu Fanglan, Qu Jia. Seafloor topography and bathymetric survey of the Challenger Deep of Mariana Trench[J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(4): 7-11.
- [4] Nunoura T, Takaki Y, Hirai M, et al. Hadal biosphere: Insight into the microbial ecosystem in the deepest ocean on earth[J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 2016, 112(11): 1230-1236.
- [5] Fujioka K, Okino K, Kanamatsu T, et al. Morphology and origin of the Challenger Deep in the Southern Mariana Trench[J]. Geophysical Research Letters, 2002, 29(10): 1-4.
- [6] Carruthers J N, Lawford A L. The deepest oceanic sounding[J]. Nature, 1952, 169(4302): 601-603.
- [7] Jamieson A J, Fujii T, Mayor D J, et al. Hadal trenches: The ecology of the deepest places on Earth[J]. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(3): 190-197.
- [8] 范雕, 孟书宇, 邢志斌, 等. 利用重力异常推估海底地形[M]. 国家安全地球物理丛书, 西安: 西安地图出版社, 2017.
Fan Diao, Meng Shuyu, Xing Zhibin, et al. Inversion of the Mariana Trench Seabed Terrain Using Gravity Anomaly[M]. Xian: National Security Geophysics Series, 2017.
- [9] 罗延馨, 宋金明. 生源要素的海洋生物地球化学过程研究进展[J]. 海洋科学集刊, 1999(1): 65-78.
Luo Yanxin, Song Jingming. Progress in studies on marine biogeochemistry process of biogenic elements[J]. Studia Marine Sinica, 1999(1): 65-78.
- [10] 宋金明, 李鹏程, 詹滨秋. 热带西太平洋定点海域($4^{\circ}\text{S}156^{\circ}\text{E}$)营养盐变化规律及降水对海水营养物质影响的研究[J]. 海洋科学集刊, 1997(1): 133-141.
Song Jinming, Li Pengcheng, Zhan Binqu. Variability of nutrients and effect of rainwater on seawater nutrients in the tropical west Pacific[J]. Studia Marine Sinica, 1997(1): 133-141.
- [11] Liu R, Wang L, Wei Y, et al. The Hadal Biosphere: Recent insights and new directions[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2018, 155: 11-18.
- [12] Hamiltongalat K, Galat D L. Seasonal variation of nutrients, organic carbon, ATP, and microbial standing crops in a vertical profile of Pyramid Lake, Nevada[J]. Hydrobiologia, 1983, 105(1): 27-43.
- [13] Obata H, Nishioka J, Kim T, et al. Dissolved iron and zinc in Sagami Bay and the Izu-Ogasawara Trench[J]. Journal of Oceanography, 2017, 73(3): 333-344.
- [14] Riley J P, Skirrow G, Schlunbaum G. Chemical Oceanography [M]. 2nd edition. International Review of Hydrobiology, London and New York: Academic Press, 2010, 389-392.
- [15] Siedler G, Holfort J, Zenk W, et al. Deep-water flow in the Mariana and Caroline Basins[J]. J Phys Oceanogr, 2004, 34(3): 566.
- [16] Johnson G C, Toole J M. Flow of deep and bottom waters in the Pacific at 10°N [J]. Deep-Sea Res, 1993, 40(2): 371-394.
- [17] Kawabe M, Taira K. Water masses and properties of 165°E in the western Pacific [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1998, 1031(C6): 12941-12958.
- [18] Wijffels S E, Tode J M, Bryden H L, et al. The water masses and circulation at 10°N in the Pacific[J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 1996, 43(4): 501-544.
- [19] GB 17378. 4-2007, 海洋监测规范[S]. 2007.
GB 17378. 4-2007, Marine Monitoring Specifications[S]. 2007.
- [20] Grasshoff K, Kremling K. Method of Seawater Analysis [M]. [s.l.]: John Wiley & sons, 1999.
- [21] Bryden H L. New polynomials for thermal expansion, adiabatic temperature gradient and potential temperature of sea water[J]. Deep-Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1973, 20(4): 401-408.
- [22] Liu Y, Liu X, Lv X, et al. Watermass properties and deep currents in the northern Yap Trench observed by the Submersible Jiaolong system[J]. Deep Sea Research Part I Oceanographic Research Papers, 2018, 139: 27-42.
- [23] Huang C, Xie Q, Wang D, et al. Seasonal variability of water characteristics in the Challenger Deep observed by four cruises [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 11791-11797.
- [24] Mantyla A W, Reid J L. Measurements of water characteristics at

- depths greater than 10 km in the Marianas Trench[J]. *Deep-Sea Research*, 1978, 25(2): 169-173.
- [25] 冯士桢, 李凤歧, 李少菁. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
Feng Shizuo, Li Fengqi, Li Shaojing. *Introduction to Marine science*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1999.
- [26] 王成善, 胡修棉, 李祥辉. 古海洋溶解氧与缺氧和富氧问题研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 39-47.
Wang Chengshan, Hu Xiumian, Li Xianghui. Dissolved oxygen in palaeo-ocean anoxic events and high-oxic problems[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1999, 19(3): 39-47.
- [27] 刁焕祥. 太平洋溶解氧垂直分布最小值形成机理的探讨[J]. *海洋学报: 中文版*, 1986, 8(2): 184-189.
Diao Huanxiang. Discussion on formation mechanism of minimum vertical distribution of dissolved oxygen in Pacific Ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1986, 8(2): 184-189.
- [28] Johnson G C, Toole J M. Flow of deep and bottom waters in the Pacific at 10°N[J]. *Deep-Sea Res*, 1993, 40(2): 371-394.
- [29] Kawabe M. Deep water properties and circulation in the Western North Pacific[J]. *Elsevier Oceanography*, 1993, 59: 17-37.
- [30] Kawabe M, Fujio S, Yanagimoto D. Deep-water circulation at low latitudes in the western North Pacific[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2003, 50(5): 631-656.
- [31] Kim T, Obata H, Kondo Y, et al. Distribution and speciation of dissolved zinc in the western North Pacific and its adjacent seas [J]. *Marine Chemistry*, 2015, 173: 330-341.
- [32] Elskens M, Baeyens W, Goeyens L. Contribution of nitrate to the uptake of nitrogen by phytoplankton in an ocean margin environment[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 353(1-3): 139-152.
- [33] Luo M, Gieskes J, Chen L, et al. Provenances, distribution, and accumulation of organic matter in the southern Mariana Trench rim and slope: Implication for carbon cycle and burial in hadal trenches[J]. *Marine Geology*, 2017, 386(2): 486-498.
- [34] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems[J]. *Earth Science Reviews*, 2000, 51(1): 109-135.
- [35] Li J, Reardon P, Mckinley J P, et al. Water column particulate matter: A key contributor to phosphorus regeneration in a coastal eutrophic environment, the Chesapeake Bay[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122: 737-752.
- [36] Beniteznelson C R, O'Neill Madden L P, Styles, Renée M, et al. Inorganic and organic sinking particulate phosphorus fluxes across the oxic/anoxic water column of Cariaco Basin, Venezuela[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 105(1): 90-100.
- [37] Defforey D, Paytan A. Phosphorus cycling in marine sediments: Advances and challenges[J]. *Chemical Geology*, 2018, 477: 1-11.
- [38] 张正斌. 海洋化学, 上册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1984.
Zhang Zhengbin. *Marine Chemistry*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1984.
- [39] 张平, 沈志良. 营养盐限制的水域性特征[J]. *海洋科学*, 2001, 25(6): 16-19.
Zhang Ping, Shen Zhiliang. Water-characteristics of nutrient limitation[J]. *Marine Science*, 2001, 25(6): 16-19.
- [40] Redfield A C. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. *Sea*, 1963, 40(6): 640-644.
- [41] Hirose K, Kamiya H. Vertical nutrient distributions in the Western North Pacific Ocean: simple model for estimating nutrient upwelling, export flux and consumption rates[J]. *Journal of Oceanography*, 2003, 59(2): 149-161.

The Vertical Distribution of Nutrients in the Challenge Deep of the Mariana Trench

LI Ya-Nan, CHEN Hong-Tao, GU Wen-Yan, WANG Guo-Shan, JIAO Heng-Chen, ZHU Chen-Jian
(College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the samples collected in the Mariana trench, the authors analyzed the vertical distribution of nutrients, temperature, salinity, dissolved oxygen and pH. Moreover, the structure and influence factor of nutrients were discussed. The results show that the maximum value of dissolved oxygen in Mariana trench was in the surface layer and the minimum value was at 1 000 m in depth. However, there was a high dissolved oxygen value (5.79 mg/L^{-1}) at 8 700 m in depth, which may be related to the existence of oxygen-enriched water masses. The nitrate concentration in surface layer was low, and there are two peaks at 1 000 and 5 367 m. Dissolved organic nitrogen is the main form of dissolved total nitrogen in surface seawater. From surface to bottom, dissolved inorganic nitrogen gradually became the dominant form of dissolved total nitrogen. In terms of vertical distribution, the concentration of phosphate was the lowest at the surface layer. Maximum value was at 1 000 m in depth ($2.84 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$). Below 1 000 m in depth, concentration gradually decreased with depth. Silicate was depleted at surface layer. Maximum value ($161.65 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) was at approximately 4 000 m. At the maximum depth, silicate concentration was still high. The results indicate that the vertical distribution characteristics of dissolved oxygen, pH and nutrients in the Mariana trench are closely related to ocean circulation, trench morphology and biological activities.

Key words: Mariana trench; Challenge Deep; dissolved oxygen; nutrients; vertical distribution

责任编辑 徐 环