

综 述

基于 O_2/Ar 比值估算海洋混合层群落净生产力的研究进展

张桂玲¹, 韩 玉^{2**}, 郑文静¹, 秦 川¹

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 海洋高等研究院, 山东 青岛 266100;

2. 海南热带海洋学院海洋科学技术学院, 海南 三亚 572000)

摘 要: 群落净生产力(NCP)是海洋混合层中光合作用和群落呼吸作用的差值,代表了从表层海水向深层海洋输送的最大有机质量,是衡量生物活动对上层海洋碳循环影响的有效指标。海洋混合层的溶解氧浓度主要受物理过程和生物过程控制,而惰性气体氩(Ar)的分布主要受物理过程以及温度和盐度对溶解度的影响,由于 O_2 和 Ar 具有相似的物理特性,因此氧氩比值(O_2/Ar)消除了物理过程对海水中溶解氧的影响,其偏离平衡值的量($\Delta O_2/Ar$)可表征生物过饱和氧,并可据此估算群落净生产力。随着质谱技术的发展,连续走航测定 O_2/Ar 比值技术得到广泛应用并可以获得高时空分辨率 NCP 分布,因此成为估算海洋混合层 NCP 的重要方法。本文介绍了基于 O_2/Ar 比值法估算群落净生产力的原理,综述了用 O_2/Ar 比值法估算海洋混合层中群落净生产力的研究进展,探讨了估算模型中存在的不足及解决办法,并对其未来发展方向做了展望。

关键词: 氧氩比值;群落净生产力;生物过饱和氧;生物泵;连续走航观测

中图法分类号: P734.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)03-001-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20190403

引用格式: 张桂玲, 韩玉, 郑文静, 等. 基于 O_2/Ar 比值估算海洋混合层群落净生产力的研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 1-7.

ZHANG Gui-Ling, HAN Yu, ZHEN Wen-Jing, et al. Advances in studies of net community production based on oxygen/argon ratio[J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(3): 1-7.

CO_2 是大气中重要的温室气体,工业革命以来由于人为活动的影响,大气中 CO_2 浓度迅速增加,到 2017 年全球平均 CO_2 体积分数高达 $(405.5 \pm 0.1) \times 10^{-6}$, 是工业前的 146%^[1]。海洋是大气 CO_2 的重要汇,自工业革命以来海洋吸收了人类活动排放 CO_2 的三分之一以上,海洋对 CO_2 的吸收(或释放)受生物泵、溶解泵和海洋环流的影响^[2-3]。全球海洋净吸收 CO_2 约为 $\sim 2 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[4],通过生物泵向深层海洋输送的碳约为 $8 \sim 15 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$,海洋吸收 CO_2 及向深层海水输送有机碳的量有较大的时空差异性^[3,5]。因此了解生物泵和溶解泵的时空变化及其影响因素对于预测海洋碳汇对未来地球气候系统变化的影响和响应都有着重要的意义。

海洋透光层中自养生命有机体通过光合作用固定

的有机碳的量减去自养呼吸所消耗的称为净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP),部分有机物质被原位的异养呼吸消耗,这部分净初级生产力和异养呼吸之间的差值被称为群落净生产力(Net community production, NCP)^[6]。NCP 代表了从表层海水向深层海洋输送的最大有机质量,是衡量生物活动对上层海洋碳循环影响的最好指标。然而表层海洋群落净生产力是高度动态变化的,在不同时间和空间尺度上都表现出明显的变化,考虑到其在全球碳循环中的作用和气候变化的敏感性,连续和准确测定群落净生产力是非常必要的,对认识全球碳循环和诊断可能的气候—碳反馈有重要作用^[7]。

国际上对海洋中群落净生产力的研究已经有四十

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目(41776122);科技部重点研发计划课题项目(2016YFA0601302);国家自然科学基金创新研究群体科学基金项目(41521064);海南省自然科学基金青年基金项目项目(419Q241)资助

Supported by NSFC General Program (41776122); the National Key Research and Development Project of the Ministry of Science and Technology (2016YFA0601302); Innovation Research Group of National Natural Science Foundation of China (41521064); Hainan Province Natural Science Foundation for Youths (419Q241)

收稿日期:2019-12-02;修订日期:2020-01-03

作者简介:张桂玲(1972-),女,教授,博导,主要从事海洋生源活性气体的生物地球化学循环研究。E-mail:guilingzhang@ouc.edu.cn

** 通讯作者: E-mail: yuhan@hntou.edu.cn

多年的历史^[8],海洋学家使用不同方法对世界许多大洋、近岸海区有机碳输出通量进行估算,对其分布特征及影响因素进行了广泛的研究,并取得了初步认识,其主要研究方法有黑白瓶培养法、硝酸盐质量平衡法、通过无机碳的季节性变化估算、直接示踪颗粒碳的输出通量、生物地球化学模型、卫星遥感法等^[9-14]。上述方法大多存在操作繁琐、分析时间长、测定大批量样品存在困难、不易实时测定、采样空间分辨率低等问题,取得的数据十分有限^[14-18]。近年来基于膜进样质谱法(Membrane Inlet Mass Spectrometry, MIMS)或平衡器进样质谱法(Equilibrator Inlet Mass Spectrometry, EIMS)连续走航测定 O_2/Ar 比值技术得到广泛应用,进而估算 NCP,可以在更高的空间分辨率和更大范围内提供上层海洋向深层海洋输出有机碳的量,这种方法将大气科学、海洋化学、环境科学及生态学紧密的联系在一起,成为估算海洋混合层 NCP 的重要方法^[3,12,19-24]。

1 O_2/Ar 比值法估算群落净生产力的原理及计算方法

海洋透光层中浮游植物的光合作用是产生 O_2 的主要过程,有机质的降解和群落呼吸作用会消耗 O_2 ,因此海洋碳循环通过光合作用和呼吸作用与 O_2 循环紧密联系^[25]。在光合作用中, O_2 和有机碳生成量具有一定的化学计量关系,因此,平衡时 O_2 的量在一定程度上反映了有机碳的量,在没有物理作用时, O_2 浓度体现了光合作用和群落呼吸作用的差值,即群落净生产力(NCP)^[12]。海水中的溶解氧浓度主要受物理过程(海气交换、温度和压力改变、水平混合和垂直扩散等)和生物过程(光合作用和呼吸作用)控制^[25]。惰性气体 Ar 在海洋中的分布主要受控于物理过程以及温度和盐度对其溶解度的影响,由于 O_2 和 Ar 具有相似的物理特性(如溶解度、对温度的响应以及扩散速率),通过 O_2 与 Ar 的归一化,即 O_2/Ar 比可以消除气泡注入、气体交换等物理过程对溶解氧的影响, O_2/Ar 比偏离平衡值的量($\Delta O_2/Ar$)可以作为生物过饱和 O_2 的测定指标,对生物活动有重要指示意义^[25]。

O_2/Ar 比值的过饱和定义为 $\Delta O_2/Ar$ ^[12,25-26],见公式(1):

$$\Delta(O_2/Ar) = \left[\frac{([O_2]/[Ar])}{([O_2]/[Ar])_{eq}} - 1 \right]. \quad (1)$$

式中: $[O_2]/[Ar]$ 是实测的 O_2/Ar 比值; $[O_2]/[Ar]_{eq}$ 是与大气鼓泡平衡后海水中的 O_2/Ar 比值。忽略混合层垂直混合和水平交换,混合层生物氧净通量是群落净生产力和海-气交换的函数,因此基于 $\Delta O_2/Ar$ 比值可以估算特定水团一定时间尺度内的群落净生产

力^[12,19-20],见公式(2):

$$NCP(\text{mmol C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}) \approx k_{O_2} \times O_{2sat} \times \Delta(O_2/Ar) \times r_{C:O_2}. \quad (2)$$

式中: k_{O_2} 是气体交换速率($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$); O_{2sat} 是在一定温盐条件下平衡时 O_2 的浓度($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); $r_{C:O_2}$ 是摩尔光合商,通常为 1.4^[26]。 k_{O_2} 可用公式(3)计算^[27]:

$$k = 0.31 \times u_{10}^2 \times (Sc/660)^{-0.5}. \quad (3)$$

式中: Sc 数为水的动力粘度与待测气体分子扩散速率之比,可以根据海水中 O_2 的 Sc 数与水温的关系式计算^[27]。 u_{10} 为水面上方 10 m 高度处的风速。由于船载自动气象站现场测得的风速数据受到船自身的摇晃及航行中避风等影响,导致不能获得全面、高分辨率的风速数据,因此文献中基本使用卫星风速数据^[12,20-21]。

每个站位氧的浓度取决于采样前一段时期内的 O_2 的产生速率和风速,由于每天的风速不同,在计算 k 时采用加权平均法来估算采样前不同天内对气体交换的贡献^[12,28]。定义样品采集当日混合层交换通量所占的比例为 f_1 ($f_1 = k_1 \times 1\text{day}/Z_{mix}$, Z_{mix} 为混合层深度),样品采集当日的权重 ω_1 为 1,样品采集前一天混合层通量所占的比例为 f_2 , $f_2 = k_2 \times 1\text{day}/Z_{mix}$,这个数值所占的权重比第一天有所降低, $\omega_2 = \omega_1 \times (1 - f_1)$,采样前第 n 天所占的权重为 $\omega_n = \omega_{(n-1)} \times (1 - f_{(n-1)})$,气体交换速率每天的权重为 $k_n \times \omega_n$,混合层气体交换速率为^[12]:

$$k = \frac{\sum_{t=1}^{60} k_t \omega_t}{(1 - \omega_{60}) \sum_{t=1}^{60} \omega_t}. \quad (4)$$

2 基于 O_2/Ar 比值法估算群落净生产力的研究进展

2.1 离散海水样品中溶解气体的研究

早期对主要通过气相色谱和质谱法对单个离散海水样品中 N_2 、Ar、 O_2 等气体含量进行测定,研究气体的分布以及海-气界面的交换速率等^[25,29-30]。Gamo 和 Horibe^[30]建立了气相色谱法测定海水中溶解 Ar、 O_2 、 N_2 和 CO_2 的分析系统,精密度分别为 0.3%、0.3%、0.2% 和 0.5%,分析时间为 16 min。Nakayama 等^[31]对该方法改进,使用 5A 分子筛大口径毛细管柱,测定了北太平洋北部海水 N_2 、Ar、 O_2 等气体的垂直分布,探讨了气泡、风速等因素对表层海水气体过饱和度的影响。Craig 等^[25]指出海水中 O_2 受生物光合作用和物理过程的影响,Ar 是惰性气体,仅受物理过程的影响,Ar 和 O_2 具有类似的物理性质,通过对比 O_2 与 Ar 的饱和度异常来区分生物过程和物理过程对 O_2 的贡献。在较长的时间尺度内 O_2/Ar 比的测定比其绝对值更容易获得好的精密度,因此可以用 $\Delta(O_2/Ar)$ 比值用来指示

生物过程产生氧的过饱和度^[32]。而 N_2 在海水中溶解度较小,对温度响应敏感,通常用 N_2/Ar 比研究气泡注入对表层海水溶解气体的贡献^[29]。Emerson 等^[29]用水-气平衡的样品瓶,结合质谱仪同时测定 N_2 、 Ar 、 O_2 和 ^{222}Rn ,通过测定真光层中 O_2/Ar 比研究生物过程对氧气的贡献,测定 N_2/Ar 比值和 ^{222}Rn 的研究气泡注入、海-气界面交换等对真光层中 O_2 含量的影响,结果表明气泡注入和小气泡的溶解会导致 $\Delta(O_2/Ar)$ 比值增大。Kana 等^[32]介绍了用 MIMS 测定的溶解气体 O_2 、 N_2 、 Ar 之间的比值方法,但这种方法不能定量每种气体的浓度,其原理是液体中的溶解气体通过一个半透膜扩散进入质谱仪真空分析室,经过离子化,由质谱仪检测器按照离子质核比分离和检测,得出气体组成和含量信息。Reuer 等^[12]用质谱法测定了南大洋水体中 O_2/Ar 比和 O_2 的三种同位素,并估算了该区域的群落净生产力(O_2/Ar 比值法)和总生产力($\Delta^{17}O$)。Huang 等^[33]在南大洋西南部半岛地区采集离散样品,用质谱仪测定其 O_2/Ar 比值并估算该区域 NCP 的范围为 $-3 \sim 76 \text{ mmol} \cdot O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ 。虽然气相色谱法和质谱法精确度均较高,但采集离散样品限制了空间取样密度,容易错过一些分布上的精细变化^[12,32]。

2.2 连续走航测定水体中 O_2/Ar 比值方法的建立及应用

Tortell 等^[15]首次建立了用 MIMS 实时、高频率、高精度的连续走航测定表层海水中的多种溶解气体(包括 CO_2 、 O_2 和 Ar 、DMS 等)的方法,随后这种方法被广泛应用于海水中溶解气体的连续走航测定。Nemcek^[34]等用该方法调查了 British Columbia 近岸海域表层海水中 pCO_2 和 O_2/Ar 分布,发现 pCO_2 和 O_2/Ar 呈明显的斑块状分布,过饱和和不饱和水域交替分布,并且 O_2/Ar 的分布与叶绿素呈较好的正相关,和 pCO_2 呈较好的负相关,说明生物过程对海水中溶解气体的分布有很大的影响。Tortell 等^[35]实时在线测定了春季南大洋水华期间生源气体的时空变化,发现表层海水中溶解 O_2/Ar 和 pCO_2 在数天到数周的时间尺度上和千米以内的空间尺度上有明显的变化,表明物理过程和生物过程紧密联系,控制着南大洋气体分布。Tortell 等^[36]报道了南极洲 Amundsen Sea 冰窟和海冰区的 pCO_2 和 $\Delta O_2/Ar$,在调查区域内表层海水中溶解气体浓度有很大的时空差异性,水温参数和浮游生物量分布呈很大的梯度分布。

通过离散或连续的测定 O_2/Ar 比值还可以估算 NCP^[12,19]。Kaiser 等^[19]用 MIMS 连续走航测定东赤道太平洋海域 O_2/Ar 比值,估算了该海域的 NCP,结果显示在 $2.75^\circ N$ 以北海域, NCP 接近 0,而在 $6.75^\circ S$ 以南, NCP 约为 $12 \text{ mmol} \cdot m^2 \cdot d^{-1}$ 。Guéguen 等^[2]用 MIMS 高频率实时测定了南大洋中 pCO_2 和由生物

过程引起的 O_2 饱和度(O_2/Ar)在小尺度上的变化,结果表明 $65^\circ S$ 以北的几个主要的热量锋面会影响 CO_2 的浓度,同时生物因素也可以引起 CO_2 分布的多样性;而在 Ross Sea 的涡流区 pCO_2 分布的时空差异性主要是由于生物对 CO_2 的利用引起的,温度对其影响很小。Tortell 等^[37]报道了 2005 年 12 月~2006 年 1 月罗斯海冰窟的表层海水中净生物氧通量为 $(52.2 \pm 58.3) \text{ mmol } O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,在这期间浮游植物爆发式增长, pCO_2 、 $\Delta O_2/Ar$ 和 Chl *a* 之间呈较好的线性相关,这说明生物过程对这些溶解气体的分布有很大的影响。Castro-Morales 等^[38]用 MIMS 测定了 Belling-shausen 海 NCP 为 $-3 \sim 28 \text{ mmol} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,不同海区 NCP 表现了显著的时空差异性。Tortell 等^[39]示踪了南大洋近岸海区水华期间生物群落的发展变化,记录了由于群落迁移 pCO_2 和 $\Delta O_2/Ar$ 在几小时或几天尺度上的变化,测得水华期间 NCP 为 $380 \text{ mmol} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,与用传统方法测得的结果基本一致($390 \text{ mmol} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)。

在 MIMS 的基础上, Cassar 等^[40]建立了 EIMS 法测定 O_2/Ar ,这种方法首先将海水样品引入顶空平衡器,平衡后的顶空气体通过一个直径为 0.05 mm 长 2 m 的硅石英管道进入质谱仪检测,实现了表层海水中 O_2/Ar 的实时、高频率、高精度连续走航测定。Stanley 等^[28]用 EIMS 连续走航测定了西赤道太平洋海区 NCP 为 $(1.5 \pm 0.2) \text{ mol} \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$,巴布亚新几内亚附近海区 NCP 为 $(1.2 \pm 0.2) \text{ mol} \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ 。Cassar 等^[20]调查了亚南极区和极地锋区 NCP 为 $43 \text{ mmol } O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ ($31 \text{ C } m^{-2} \cdot a^{-1}$),与 Reuer 等^[12]在该区域采集离散样品用质谱法测定的结果基本一致($50 \text{ mmol } O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$),并认为铁和光照是该区域内 NCP 的限制因素。Lockwood 等^[3]报道北太平洋亚极地($45^\circ N \sim 50^\circ N$)、北过渡带($40^\circ N \sim 45^\circ N$)、南过渡带($32^\circ N \sim 40^\circ N$)以及亚热带($22^\circ N \sim 32^\circ N$)海区 NCP 分别为 (25.8 ± 4.6) 、 (17.1 ± 4.4) 、 (5.4 ± 1.8) 和 $(8.1 \pm 2.1) \text{ mmol} \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,是该区域内 CO_2 通量的 $6 \sim 8$ 倍,并且 NCP 与 Chl *a* 和 CO_2 通量间有较好的相关性,表明了生物泵与 CO_2 泵之间较好的耦合性。Hahm^[21]等报道南极洲阿蒙森海冰间湖区 2011 年 1 月 NCP 为 $(119 \pm 79) \text{ mmol } O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,2012 年 2 月 NCP 为 $(23 \pm 14) \text{ mmol } O_2 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$,并指出 2011 年 NCP 较高是由于初夏温度升高,光照强度加大导致了水华造成的。Ulfso 等^[41]在北冰洋调查发现不同海区由于营养盐来源和光照条件不同, NCP 也表现了较大的时空差异性,范围为 $-0.4 \sim 6 \text{ mol} \cdot m^{-2}$ (90 天内)。

2.3 基于 O_2/Ar 比值法测定 NCP 新进展

基于连续走航测定 O_2/Ar 比值估算 NCP 实现了

高时空分辨率样品采集及测定,避免了离散采样方法样品处理中引入误差,成为大洋 NCP 测定的理想方法,被广泛使用^[22]。目前科学家已经通过船载 $\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$ 法测定了不同区域的 NCP,极大地扩大 NCP 数据的空间覆盖,但该方法也存在一定的不确定性,如近岸特别是有上升流的海域的水体垂直混合,浮游植物种类等都会影响 NCP 的估算。随着研究的深入,科学家在 NCP 的校正、与其他方法结果对比等方面开展了大量的工作。如 Siegel 等^[16]提出“碳输出科学计划”,旨在通过研究跟碳循环密切相关的生态、生物地球化学和物理海洋学过程来研究全球海洋碳输出量以及对当前和未来气候的影响,同时通过实测数据进一步优化卫星遥感和地球系统模型对海洋碳输出量和循环转化的研究,在该计划中 NCP 基于 O_2/Ar 比值法测定。Li 等^[23]基于 O_2/Ar 比值法和卫星遥感法提出了两种估算 NCP 的统计算法,一种是基于遗传规划算法,这种方法同时从 NPP、Chl、POC、固有光学性质、浮游植物大小组成等多种预测因子中寻找最优方程的最优形式和系数;第二个算法基于支持向量回归,它优化了 O_2/Ar -NCP 测量和遥感观测之间的数值关系,这两种新算法对年均输出生产力空间格局的估算与文献中其他算法预测的结果相似。在上升流海域,深层海水涌升会带来大量营养盐,生物生产力较高,同时也会将低 O_2 海水输送到表层,偏离 O_2/Ar -NCP 法中 O_2 仅受生物过程和海-气交换影响的假设,造成 NCP 的严重低估,早期研究一般会将该部分数据剔除^[19,28]。Haskell^[42]通过对比研究发现,在上升流海区 NCP 通过 O_2/Ar 估算,有 84% 的信号被掩盖。Izett^[22]等通过测定水柱中 N_2O 来修正垂直混合系数,准确估算了亚北极东北太平洋的 NCP。通过校正,所有调查站位均呈现净自养状态,在春季和夏季测得的 NCP 超过 $100 \text{ mmol O}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,明显高于早期在该海域没有校正的数值,并且校正后的 NCP 与对应的 Chl_a、SST、混合层深度呈较好的线性关系。Manning^[17]在蒙特利湾上升流海区用不同的方法测定了净初级生产力(NPP, ^{14}C 法)、新生产力(N-NCP, $^{15}\text{NO}_3^-$ 法)、群落净生产力(NCP, O_2/Ar 法)、总初级生产力(GPP, O_2 三种同位素组成)、颗粒有机碳通量(POC, 沉积物捕集器)等来认识上升流海域碳输出通量的影响因素。在第一航段开始时,碳循环处于稳定状态,在 O_2/Ar 和 ^{15}N 培养估算的 NCP 分别为 $35(10)$ 和 $35(8) \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,二者有非常好的一致性。在第二航段,由于上升流带来大量的营养盐,导致 ^{14}C 和 $^{15}\text{NO}_3^-$ 的吸收大幅增, O_2/Ar 连续走航测定也显示水体结构发生中尺度变化,在该行段中测定结果和培养的结果不一致,表明水体在 O_2 通量可以忽略或可以定量的非稳态条件下,用 O_2/Ar

法和 ^{15}N 法测得的 NCP 具有很好的一致性。Teeter^[43]对比了 O_2/Ar 法和区域海洋模拟系统的准二维模型方法测定 NCP,结果发现大部分海域二者获得结果一致,但在有上升流的海域, O_2/Ar 法会出现严重偏差,并指出表层海水温度是指示生物通量法出现偏差的重要依据。浮游生物群落产生的有机物可以在上层海洋再循环或输送到深层海洋中去,会影响 NCP^[24],这与颗粒的种类、大小和密度等有关,如大多数硅藻体积大,硅质外壳较重,下沉速度更快,普遍认为碳输出效率较高。细菌活动和浮游动物也会影响 NCP^[44]。基于此, Lin 等^[45]将 O_2/Ar -NCP 测定和高通量 18 s 核糖体 DNA 测序结合起来,研究南极半岛西部海域浮游生物群落结构和碳输出潜力之间的关系,结果表明结合对浮游生物群落结构研究,能更准确的解释碳输出通量的时空变化。

总的来说,利用 MIMS 或 EIMS 法同时测定表层海水中溶解 O_2 、Ar、 CO_2 等气体的浓度来反映生物过程对 $p\text{CO}_2$ 动力学的影响并提供表层海水中 NCP 的信息,对深入认识生物泵对海洋碳汇的影响以及预测全球气候变化趋势具有重要意义。科学家在相关领域开展了大量工作,但目前该研究在国内还处于起步阶段,韩玉^[46]用该方法测定了我国陆架边缘海表层海水中 O_2/Ar 和 NCP 的时空分布,结果在已报道的世界海洋 NCP 范围之内。郑文静等^[47]建立了连续走航测定水体中 O_2 、Ar、 CO_2 等多种气体的方法,精密度分别为 1.57%、3.75% 和 2.21%,并用该方法测定南海陆坡表层海水中 O_2/Ar 和 $p\text{CO}_2$,结果与已报道的相当。国内其他用 O_2/Ar 比值法研究海洋 NCP 还未见有报道。

3 存在的问题及解决方法

MIMS 或 EIMS 连续走航测定 O_2/Ar 比值,在更高的空间分辨率和更大范围内提供上层海洋向深层海洋输出有机碳的量,近年来在估算海洋透光层 NCP 得到广泛的应用^[48],但由于受各种复杂因素的综合影响,该方法估算的 NCP 存在一定的误差。如在 O_2/Ar 中,假设 Ar 是饱和的,但实际的表层海水中 Ar 存在几个百分点的偏离^[48]。 $\text{C}:\text{O}_2$ 的摩尔光合商一般取 1.4,不确定性约为 10% 左右^[26]。另一个最重要的误差来源于 k_{O_2} 的估算,一般通过风速以及气体交换的一些参数来估算,约有 $\pm 30\%$ 的不确定性^[12,26]。在定义 NCP 时忽略垂直混合和水平输送,而实际上表层海水中 $\Delta\text{O}_2/\text{Ar}$ 是 NCP 和垂直混合共同作用的结果,在某些区域一定的时间段内,表层海水中 O_2 的浓度受垂直混合作用影响明显^[49-51],虽然有研究对垂直混合造成的 O_2/Ar 偏差进行校正^[22],但还没有普遍公认的普适方法。

针对这些 NCP 估算过程中的不确定性,科学家建

立许多方法来校正以期减小估算误差。如测定表层海水氮的分布,减小气体交换速率的不确定性^[52-53],用该方法与加权平均值法^[12]计算的气体交换速率之间的根方差为 40%^[52],这个值是高估的,因为它包括了风速的不确定性以及氮测定本身的误差。Jonsson 等^[54]定量了南大洋实测海-气界面生物氧通量和用 Prognostic 模型方法计算的混合层中 NCP 之间的差值,发现当生物 O_2 通量小于 $10 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,误差较大。当 O_2/Ar 比过饱和时,NCP 会低估 5%~15%,当 O_2/Ar 比不饱和时,NCP 会低估 20%~35%。用 O_2/Ar 比值法估算 NCP 的准确度还跟混合层深度有关,当混合层深度小于 30 m 时 NCP 会高估~10~15 $\text{mmol } O_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,当混合层深度大于 40 m 时,NCP 会低估~10~15 $\text{mmol } O_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。Cassar 等^[48]提出用表层海水 N_2O 的含量来校正垂直混合的影响,其原理为:在好氧水体中, N_2O 主要通过硝化作用产生,在真光层中光照抑制硝化过程的进行, N_2O 主要真光层以下的水体中产生的,而真光层中的 N_2O 主要通过深层海水垂直混合输送,基于此将 O_2 信号分解为原位产生和垂直混合导致的,从而获得准确的 $\Delta O_2/Ar$ 和 NCP。

4 展望

综上所述,群落净生产力代表了从表层海水向深层海洋输送的最大有机质量,对认识全球碳循环和预测全球气候变化趋势有重要作用。 O_2/Ar 比值法能够提供 NCP 高分辨率的时空分布格局,被广泛应用于 NCP 估算。目前 NCP 的计算模型还存在一定误差,尽管科学家们从不同角度对其进行定量和校正,但还没有达成统一的被广泛接受和认可的校正方法,未来还需要开展大量的探索和研究工作:

(1)在定义 NCP 时忽略垂直混合和水平输送,而实际上表层海水中 $\Delta(O_2/Ar)$ 是物理过程和生物过程共同作用的结果,在某些区域一定的时间段内(如上升流海区、台风影响海区),表层海水中 O_2 的浓度受垂直混合作用影响明显,虽然目前有科学家通过 N_2O 方法对垂直混合进行校正^[48],但该方法应用还不普遍,还可以从其他角度开展进一步工作,如结合物理海洋数值模型进行模拟研究,或通过相应的物质输送扩散方程进行计算,然后与实际观测进行对比。

(2)用 O_2/Ar 比值法计算 NCP 时认为混合层是均匀的,但实际情况是混合层不同深度 O_2 含量有所不同,而在实际走航测定过程中,一般根据船的载重不同,采集 5~10 m 的水样,这部分引入的误差,目前还没有人开展相关研究。

(3) O_2/Ar 比值法连续走航测定 NCP 相比采集离散样品而言在时空分辨率上大大提高,但相对卫星遥感,其

覆盖面积有限,可针对 O_2/Ar 比值法测定 NCP 与卫星遥感或数值模拟开展广泛对比,寻求之间的联系,如此,可在全球范围内估算海洋 NCP。

(4)国际上已获得部分大洋混合层中 NCP 的高分辨率时空分布,但是对影响其分布的生物、化学和物理因素还缺乏深入的了解,调查区域主要集中在南大洋和赤道太平洋等,研究海域覆盖范围较小、调查航次季节分布不均匀,还难以绘制全球群落净生产力分布图,国内相关研究还刚刚起步,因此在今后研究中,必须获取更大范围、不同季节、不同区域的群落净生产力分布。

参考文献:

- [1] 世界气象组织. 2017 年 WMO 温室气体公报[R]. 2018, 14. World Meteorological organization 2017 WM Green house Gas Bulletin, Swiss: [s.n.], 2018: 14.
- [2] Guéguen C, Tortell P D. High-resolution measurement of Southern Ocean CO_2 and O_2/Ar by membrane inlet mass spectrometry[J]. *Marine Chemistry*, 2008, 108: 184-194.
- [3] Lockwood D, Quay P D, Kavanaugh M T, et al. High-resolution estimates of net community production and air-sea CO_2 flux in the Northeast Pacific[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(4): 4010.
- [4] Takahashi T, Sutherland S C. Climatological mean and decadal change in surface ocean pCO_2 , and net sea-air CO_2 flux over the global oceans[J]. *Deep Sea Research II*, 2009, 56: 554-577.
- [5] Schlitzer R. Export production in the equatorial and north Pacific derived from dissolved oxygen, nutrient and carbon data[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(1): 53-62.
- [6] Williams P J le B. Chemical and tracer methods of measuring plankton production[J]. *ICES Marine Science Symposium*, 1993, 197: 20-36.
- [7] Sarmiento J L, Hughes T M C, Stouffer R J, et al. Simulated response of the ocean carbon cycle to anthropogenic climate warming [J]. *Nature*, 1998, 393: 245-249.
- [8] Eppley R W, Peterson B J. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean[J]. *Nature(London)*, 1979, 282(5740): 677-680.
- [9] Bender M L, Dickson M L, Orchard J. Net and gross production in the Ross Sea as determined by incubation experiments and dissolved O_2 studies[J]. *Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography*, 2000, 47(15): 3141-3158.
- [10] Codispoti L A, Friederich G E, Iverson R L, et al. Temporal changes in the inorganic carbon system of the southeastern Bering Sea during spring 1980[J]. *Nature*, 1982, 296: 242-245.
- [11] Chen W F, Cai P H, Dai M H, et al. Th-234/U-238 disequilibrium and particulate organic carbon export in the northern South China Sea[J]. *Journal of Oceanography*, 2008, 64: 417-428.
- [12] Reuer M K, Barnett B A, Bender M L, et al. New estimates of Southern Ocean biological production rates from O_2/Ar ratios and the triple isotope composition of O_2 [J]. *Deep Sea Research I*, 2007, 54: 951-974.
- [13] Jonsson B F, Salisbury J E, Mahadevan A. Large variability in continental shelf production of phytoplankton carbon revealed by

- satellite[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 1213-1223.
- [14] Emerson, Steven. Annual net community production and the biological carbon flux in the ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(1): 14-28.
- [15] Tortell P D. Dissolved gas measurements in oceanic waters made by membrane inlet mass spectrometry[J]. *Limnology and Oceanography Methods*, 2005, 3: 24-37.
- [16] Siegel D A, Buesseler K O, Behrenfeld M J, et al. Prediction of the export and fate of global ocean net primary production: The EXPORTS science plan[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2016, 3: 22. doi: 10.3389/fmars. 2016. 00022.
- [17] Manning C C, Stanley R H R, Nicholson D P, et al. Impact of recently upwelled water on productivity investigated using in situ and incubation-based methods in Monterey Bay[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(3): 1901-1926.
- [18] Juranek L W, Quay P D. Using triple isotopes of dissolved oxygen to evaluate global marine productivity[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5(1): 503-524.
- [19] Kaiser J, Reuer M K, Barnett B, et al. Marine productivity estimates from continuous O_2/Ar ratio measurements by membrane inlet mass spectrometry[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(19): 307-323.
- [20] Cassar N, DiFiore P, Barnett B A, et al. The influence of iron and light availability on net community production in the subarctic and polar frontal zones[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8: 227-237.
- [21] Hahm D, Rhee T S, Kim H-C, et al. Spatial and temporal variation of net community production and its regulating factors in the Amundsen Sea, Antarctica[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119: 2815-2826.
- [22] Izett R W, Manning C C, Hamme R C, et al. Refined estimates of net community production in the Subarctic Northeast Pacific derived from $\Delta O_2/Ar$ measurements with N_2O -based corrections for vertical mixing[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32(3): 326-350.
- [23] Li Z, Cassar N. Satellite estimates of net community production based on O_2/Ar observations and comparison to other estimates[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2016, 30(5): 735-752.
- [24] Armstrong R A, Lee C, Hedges J I, et al. A new, mechanistic model for organic carbon fluxes in the ocean based on the quantitative association of POC with ballast minerals[J]. *Deep Sea Research. Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2001, 49(1-3): 0-236.
- [25] Craig H, Hayward T. Oxygen supersaturation in the ocean-biological versus physical contributions[J]. *Science*, 1987, 235(4785): 199-202.
- [26] Laws E A. Photosynthetic quotients, new production and net community production in the open ocean[J]. *Deep Sea Research I*, 1991, 38(1): 143-167.
- [27] Rik Wanninkhof. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C5): 7373.
- [28] Stanley R H R, Kirkpatrick J B, Cassar N, et al. Net community production and gross primary production rates in the Western Equatorial Pacific[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24(4): 10.1029/2009GB003651.
- [29] Emerson S, Quay P D, Stump C, et al. O_2 , Ar, N_2 and ^{222}Rn in surface waters of the Subarctic Ocean: Net biological O_2 production[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1991, 5: 49-69.
- [30] Gamo T, Horibe Y. Precise determination of dissolved gases in sea water by shipboard gas chromatography[J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 1980, 53: 2839-2842.
- [31] Nakayama N, Watanabe S, Tsunogai S. Nitrogen, oxygen and argon dissolved in the Northern North Pacific in early summer[J]. *Journal of Oceanography*, 2002, 58(6): 775-785.
- [32] Kana T M, Darkangelo C, Hunt M D, et al. Membrane inlet mass spectrometer for rapid and high-precision determination of N_2 , O_2 and Ar in environmental water samples[J]. *Analytical Chemistry*, 1994, 66: 4166-4170.
- [33] Huang K, Ducklow H, Vernet M, et al. Export production and its regulating factors in the West Antarctica Peninsula region of the Southern Ocean[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26(2): 1-13.
- [34] Nemcek N, Ianson D, Tortell P D. A high-resolution survey of DMS, CO_2 , and O_2/Ar distributions in productive coastal waters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22, GB2009, doi: 10.1029/2006GB002879.
- [35] Tortell P D, Long M C. Spatial and temporal variability of biogenic gases during the Southern Ocean spring bloom[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(1), L01603, doi: 10.1029/2008GL035819.
- [36] Tortell P D, Long M C, Payne C D, et al. Spatial distribution of pCO_2 , $\Delta O_2/Ar$ and dimethylsulfide (DMS) in polynya waters and the sea ice zone of the Amundsen Sea, Antarctica[J]. *Deep Sea Research II*, 2012(71-76): 77-93.
- [37] Tortell P D, Guéguen C, Long M C, et al. Spatial variability and temporal dynamics of surface water pCO_2 , $\Delta O_2/Ar$ and dimethylsulfide in the Ross Sea, Antarctica[J]. *Deep Sea Research I*, 2011, 58(3): 241-259.
- [38] Castro-Morales K, Cassar N, Kaiser J. Biological production in the Bellingshausen Sea from oxygen-to-argon ratios and oxygen triple isotopes[J]. *Biogeosciences Discuss*, 2012, 9: 16033-16085.
- [39] Tortell P D, Asher E C, Ducklow H W, et al. Metabolic balance of coastal Antarctic waters revealed by autonomous pCO_2 and $\Delta O_2/Ar$ measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41: 6803-6810.
- [40] Cassar N, Barnett B, Bender M L, et al. Continuous high-frequency dissolved O_2/Ar measurements by Equilibrator Inlet Mass Spectrometry(EIMS)[J]. *Analytical Chemistry*, 2009, 81(5): 1855-1864.
- [41] Ulfso A, Cassar N, Korhonen M, et al. Late summer net community production in the central Arctic Ocean using multiple approaches[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28: 1129-1148.
- [42] Haskell W Z, Fleming J C. Concurrent estimates of carbon export reveal physical biases in $\Delta O_2/Ar$ -based net community production estimates in the Southern California Bight[J]. *Journal of Marine Systems*, 2018, 183: 23-31.
- [43] Teeter L, Hamme R C, Ianson D, et al. Accurate estimation of net community production from O_2/Ar measurements[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2018, 32, 1163-1181.

- [44] Steinberg D K, Landry M R. Zooplankton and the Ocean Carbon Cycle[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2017, 9(1): 413-444.
- [45] Lin Y, Cassar N, Marchetti A, et al. Specific eukaryotic plankton are good predictors of net community production in the Western Antarctic Peninsula[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7, 14845, doi: 10.1038/s41598-017-14109-1.
- [46] 韩玉. 我国陆架边缘海表层海水中氧氩比和群落净生产力的时空分布及影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
Han Y. Spatial and Temporal Distribution of Oxygen/Argon Ratio and Net Community Production in Marginal Seas of China and Influencing Factors[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015.
- [47] 郑文静, 韩玉, 秦川, 等. 利用膜进样质谱连续走航测定表层海水 O_2/Ar 比值和 pCO_2 [J]. *海洋环境科学*, 2016(4): 611-617.
Zheng W J, Han Y, Qin C, et al. Continuous underway measurements of sea surface O_2/Ar and pCO_2 by membrane inlet mass spectrometry[J]. *Marine Environmental Science*, 2016(4): 611-617.
- [48] Cassar N, Nevison C D, Manizza M. Correcting oceanic O_2/Ar -net community production estimates for vertical mixing using N_2O observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41, 8961-8970.
- [49] Castro-Morales K, Cassar N, Shoosmith D R, et al. Biological production in the Bellingshausen Sea from oxygen-to-argon ratios and oxygen triple isotopes[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(4): 2273-2291.
- [50] Giesbrecht K E, Hamme R C, Emerson S R. Biological productivity along Line P in the subarctic northeast Pacific: In situ versus incubation-based methods[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2012, 26: GB3028, doi: 10.1029/2012GB004349.
- [51] Weeding B, Trull T W. Hourly oxygen and total gas tension measurements at the Southern Ocean Time Series site reveal winter ventilation and spring net community production[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(1): 348-358.
- [52] Bender M L, Kinter S, Cassar N, et al. Evaluating gas exchange parameterizations using upper ocean radon distributions[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2011, 116: C02010, doi: 10.1029/2009JC005805.
- [53] Rutgers van der Loeff M M, Cassar N, Nicolaus M, et al. The influence of sea ice cover on air-sea gas exchange estimated with radon-222 profiles[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2014, 119(5): 2735-2751.
- [54] Jonsson B F, Doney S C, Dunne J, et al. Evaluation of the Southern Ocean O_2/Ar -based NCP estimates in a model framework[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118: 385-399.

Advances in Studies of Net Community Production Based on Oxygen/Argon Ratio

ZHANG Gui-Ling¹, HAN Yu², ZHENG Wen-Jing¹, QIN Chuan¹

(1. The Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Marine Science and Technology, Hainan Tropical Ocean University, Sanya 572000, China)

Abstract: Net community production(NCP)is the difference between gross primary production and the community's combined autotrophic and heterotrophic respiration, representing the largest organic matter transported from surface waters to the deep ocean, and is a good indicator of the impact of biological activity on the upper ocean carbon cycle. Mixed layer Ar is only affected by physical saturation mechanisms whereas O_2 responds to both biological and physical mechanisms. Simultaneous O_2 and Ar measurements in surface seawater allow one to estimate oceanic O_2 outgassing and to probe oceanic productivity. With the progress in mass spectrometer, continuous underway measurement systems have been developed for high resolution measurement of O_2/Ar ratio and subsequent estimation of NCP. The authors introduced the principle of estimating net community production based on oxygen/argon ratio, reviewed the advances on the studies of net community production based on oxygen/argon ratio, discussed the problems existed in its estimating model and possible solutions, and its development direction is prospected in the future.

Key words: oxygen and argon ratio; net community production; biological oxygen saturation; biological pump; continuous underway measurement

责任编辑 徐 环