

南黄海冷水域西部溶解氧垂直分布 最大值现象的成因分析

韦钦胜^{1,2}, 葛人峰³, 王保栋^{1,2}, 臧家业^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所 海洋生态研究中心, 山东 青岛 266061; 2 海洋生态环境科学与工程国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061; 3 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 重点分析了南黄海冷水域西部溶解氧 (DO) 垂直分布中的最大值现象, 并对 DO 浓度与主要环境因子的相关性进行了研究。结果表明: DO 垂直分布最大值现象是调查海域 DO 分布的显著特征, 且与 SCM 现象相伴生; DO 垂直分布的最大值深度和量值具有较为明显的区域差异; 温、盐是 DO 最大值层以上水体中氧含量的主要控制因素; 一定强度的温跃层形成之后, DO 最大值层出现在跃层的下界附近, 且其氧含量受控于跃层厚度和生物化学作用, 并与跃层厚度呈正相关; 底层较低的 DO 含量是底层水及沉积物中有机物分解耗氧的结果。同时, 还成功解释了 DO 最大值处与次表层叶绿素最大值层位置不吻合且量值不相关的原因, 并提出了“DO 净积累效应”的观点, 不仅从时间跨度以及动态的角度上对 DO 最大值的形成机制进行了分析, 而且从理论上探讨了 DO 最大值层氧含量 (或来源) 的构成, 指出自 DO 最大值层开始产生至观测之时该层之下、真光层以内水体中的生物化学作用 (或 Chl-a 总产出) 才与氧最大值密切相关。总体来看, 水体层化和生物化学作用明显影响着夏季南黄海冷水域西部 DO 的垂直分布。

关键词: 南黄海; 冷水域; 溶解氧; 分布特征; DO 最大值; DO 净积累效应

中图分类号: P736.2; TP722.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2009)04-0069-09

1 引言

黄海作为一个半封闭的海域, 由于其具有独特的地形和水文、化学、生物特征以及污染、捕捞等人类活动对其具有重要的影响, 被列为世界 50 个大海洋生态系之一, 称为黄海大海洋生态系^[1-2]。

黄海冷水团作为我国陆架浅海上一个重要的季节性海洋现象, 一直倍受我国海洋学家的关注, 每年 5 月前后开始形成于黄海中部, 7, 8 月份达到其强盛期, 直到 11, 12 月份才完全消失^[3-4]。已有的研究表明, 黄海冷水团对溶解氧 (DO) 的垂直分布具有重要的影响。顾宏堪^[5-6] 最早发现黄海夏季溶解氧 (DO) 垂直分布中的最大值现象, 并

提出了“夏季 DO 垂直分布中的最大值, 主要系由冬季保持而来”的理论。之后, 又有诸多学者对这一现象进行了研究^[3,7-13], 其中王保栋^[11] 综合多年的调查资料, 指出黄海 DO 垂直分布中的最大值并非主要由冬季保持而来, 而是光合作用和良好的温跃层共同作用的结果。然而文献大多是在定性方面从光合作用和跃层的角度对 DO 垂直分布最大值现象进行描述和解释, 而没有做进一步的深入探讨。此外, 南黄海作为一个陆海相互作用强烈的半封闭陆架浅海, 随着沿岸工农业和经济的迅速发展, 对南海的生态环境也产生了若干影响^[14-15], 黄海冷水域 DO 的分布特征是否也对其有所响应。因此, 针对以上问题, 本文拟根据南黄海 2006 年夏

收稿日期: 2009-03-30; 修订日期: 2009-06-08。

基金项目: 中国近海海洋综合调查与评价专项课题- ST03 区块水体环境调查与研究 (908-01-ST03)。

作者简介: 韦钦胜 (1981-), 男, 山东省菏泽市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事海洋生物地球化学、化学水文学方面的研究工作。

E-mail: weiqinsheng@fia.org.cn

季 (7 月) 的最新调查资料, 详细分析黄海冷水域西部 DO 垂直分布中的最大值现象, 并结合温度、盐度、温跃层、Ch_{1+a} 和营养盐等同步观测资料, 探讨它们之间的定量关系。

2 调查与方法

2.1 研究海区与站位布设

2006 年 7 月 (夏季), 利用“北斗”号海洋考查船对南黄海进行调查, 共设有 8 条断面 (A~H), 44 个大面站 (站位设置见图 1), 全海域核心位置与南黄海冷水团的西部冷中心相吻合。

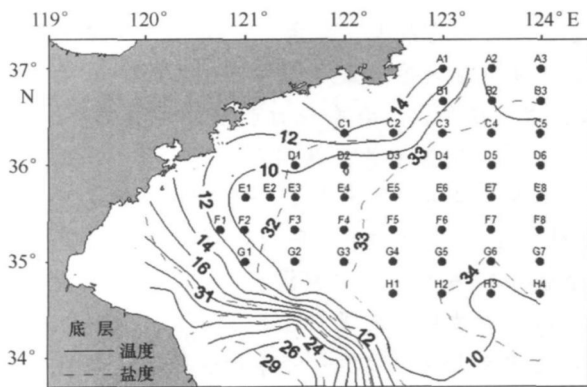


图 1 采样站位和底层温 (°C)、盐分布

2.2 样品采集与测定

利用 Sea-Bird 32 CTD 仪测温度、盐度和深度, 并用 Niskin 采水器采集水样 (根据水深情况, 取 0, 10, 20, 30, 50 m 和底层水样)。DO 含量按 Winkler 法在现场进行测定 (GB17378.4-1998); 营养盐数据按照《海洋监测规范》规定的方法, 经过 0.45 μm 的醋酸纤维膜过滤后, 用 7230 型分光光度计现场测定得到, 其中硝酸盐采用锌-镉还原法, 磷酸盐采用磷钼蓝法, 硅酸盐采用硅钼蓝法, 所有分析均用国家海洋局标准物质中心生产的营养盐标准系列制定工作曲线; 叶绿素 a 的测定采用荧光法, 将样品用 GF/F 玻璃纤维滤膜过滤, 并用 10 mL 体积比为 90% 的丙酮溶液避光萃取 12 h 后, 利用 TD-700 型荧光计测定。

3 结果与讨论

3.1 水文特征概况

研究表明, 调查区域温度垂直分布差异显著, 存在强大的温跃层。在此, 本文采用拟阶梯函数逼近法对温度垂直剖面拟合逼近^[16-17], 以获得温跃

层的特征量。计算结果显示, 温度垂直结构层化清晰, 呈现为上混合层-跃层-下混合层三层结构, 其总体情况是: 上混合层平均厚度在 8 m 以上, 水温较高且分布均匀, 其下是强大的温跃层 (强度在 0.64~2.54 °C/m 之间), 平均厚度在 14 m 以上, 温跃层以下海域被黄海冷水团 (图 1) 所覆盖, 温度较低且温差较小, 标志冷水团核心范围的 10 °C 等温线包络了调查海域大多数站位, 黄海冷水团已完全成型^[18], 黄海冷水团范围内的盐度分布与温度分布趋势也相一致。

3.2 DO 的垂直分布特征

南黄海冷水域西部 DO 的浓度范围为 5.35~10.36 mg/dm³, 平均值为 7.73 mg/dm³, 且 DO 浓度均值从大到小的顺序是: 30 m 的、10 m 的、表层的、底层的。由典型断面的 DO 分布情况来看 (见图 2), DO 高值核心也是出现在中层水体, 这显然是 DO 垂直分布最大值的具体表现。进一步分析还发现, DO 垂直分布最大值的深度和量值在整个研究海区也并不是均匀一致的, 而是存在以下的变化规律: 在 122.5°E 以东透明度较高的深水区域, DO 最大值位置较深, 大多在水深 30 m 上下, DO 最大值的量值相对也较大, 而在 122.5°E 以西受近岸影响较明显的区域, DO 最大值位置大多在 20 m 水深左右或者更浅, DO 的量值也明显低于外海区 (见图 2)。总体而言, 各采样站点 DO 垂直分布最大值深度总体上随水体深度的增加而增加。

关于 DO 垂直分布最大值现象的成因及氧的来源, 顾宏堪^[6]认为最大值处的氧主要系由冬季保持而来。而王保栋^[11]认为良好的温、密跃层是形成氧最大值的必要条件, 跃层以上和底层水体分别因增温和有机物分解而使氧含量降低, 于是在中层就形成了 DO 垂直分布中的最大值, DO 最大值层中的生物及化学作用才是影响夏季氧最大值处氧含量的主要因素。为了更清楚和准确描述 DO 的垂直分布特征与温跃层、Ch_{1+a} 及营养盐的关系, 本文以典型断面 D 为代表, 给出了断面上各站位 DO 和温度随深度的变化曲线 (见图 3), 以及温度、叶绿素和营养盐的断面分布情况 (见图 4)。由图 2a、图 3 及图 4 可知, 上混合层中的氧由于增温而排入大气中, 致使 DO 浓度较低且变化不大, 从跃层上界处 DO 浓度开始逐渐增加, 到跃层下界附近处达到最大值, 随后随着深度的增加, DO 浓度便逐渐降低, 并在底层形成 DO 的低值区, DO 最大值总

体上处于受黄海冷水团影响的温跃层的下界附近,且基本与温跃层下界附近营养盐浓度的低值锋面相一致,同时还与次表层叶绿素最大值现象 (Sub-

surface Chlorophyll Maximum, SCM) 相伴生。此外,需要特别指出的是,其他断面的情况与D断面类似,限于篇幅,在此不再一一讨论。

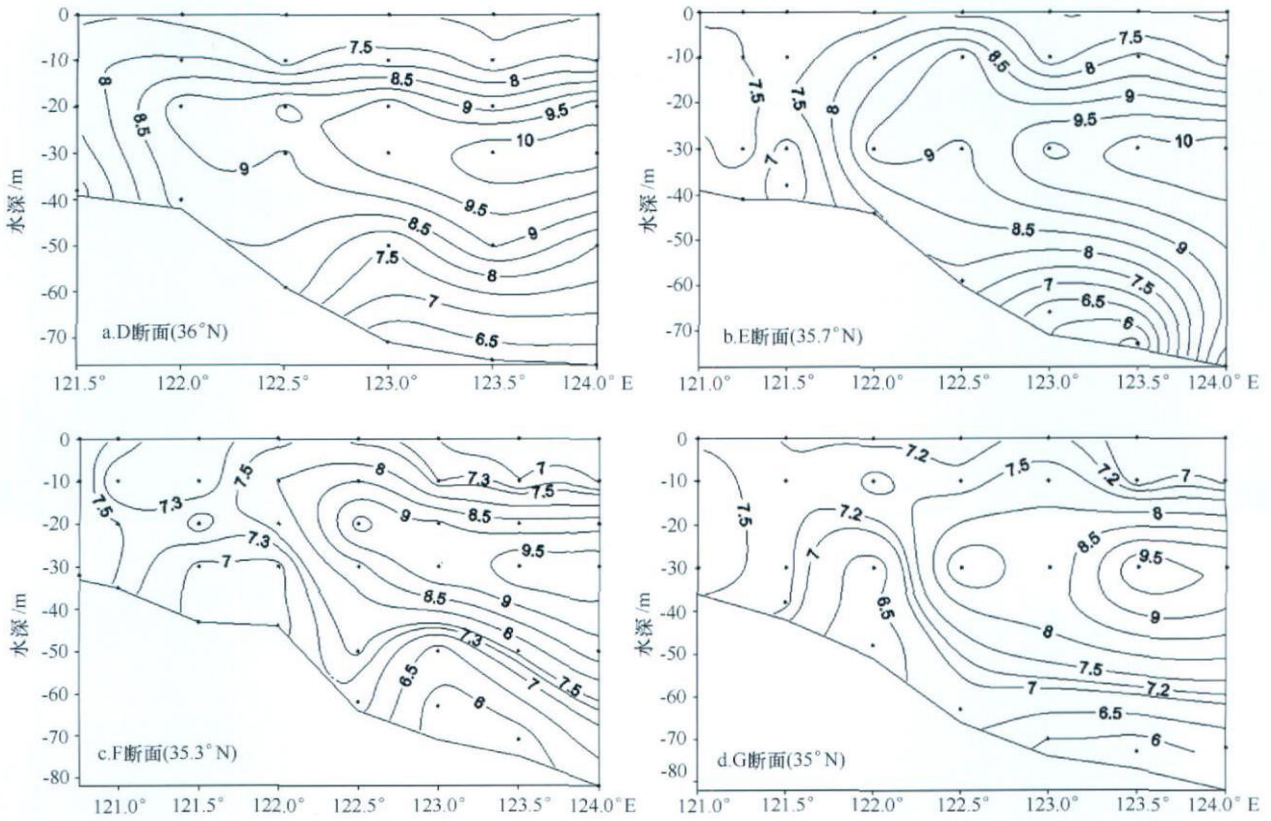


图2 典型断面的DO分布 (mg/dm^3)

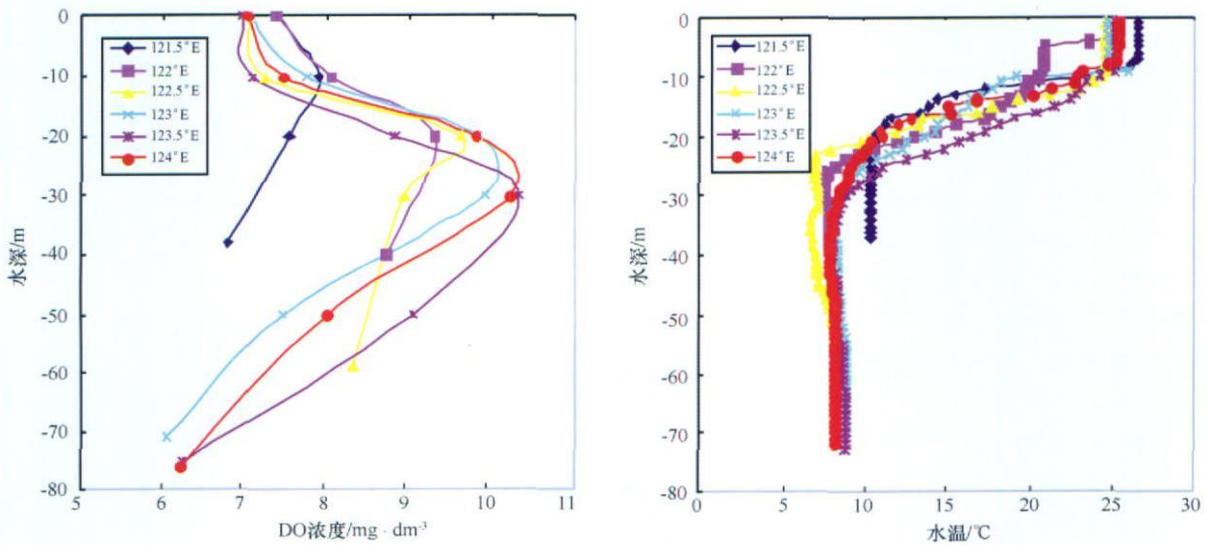


图3 D断面上各站点DO和温度的垂直分布

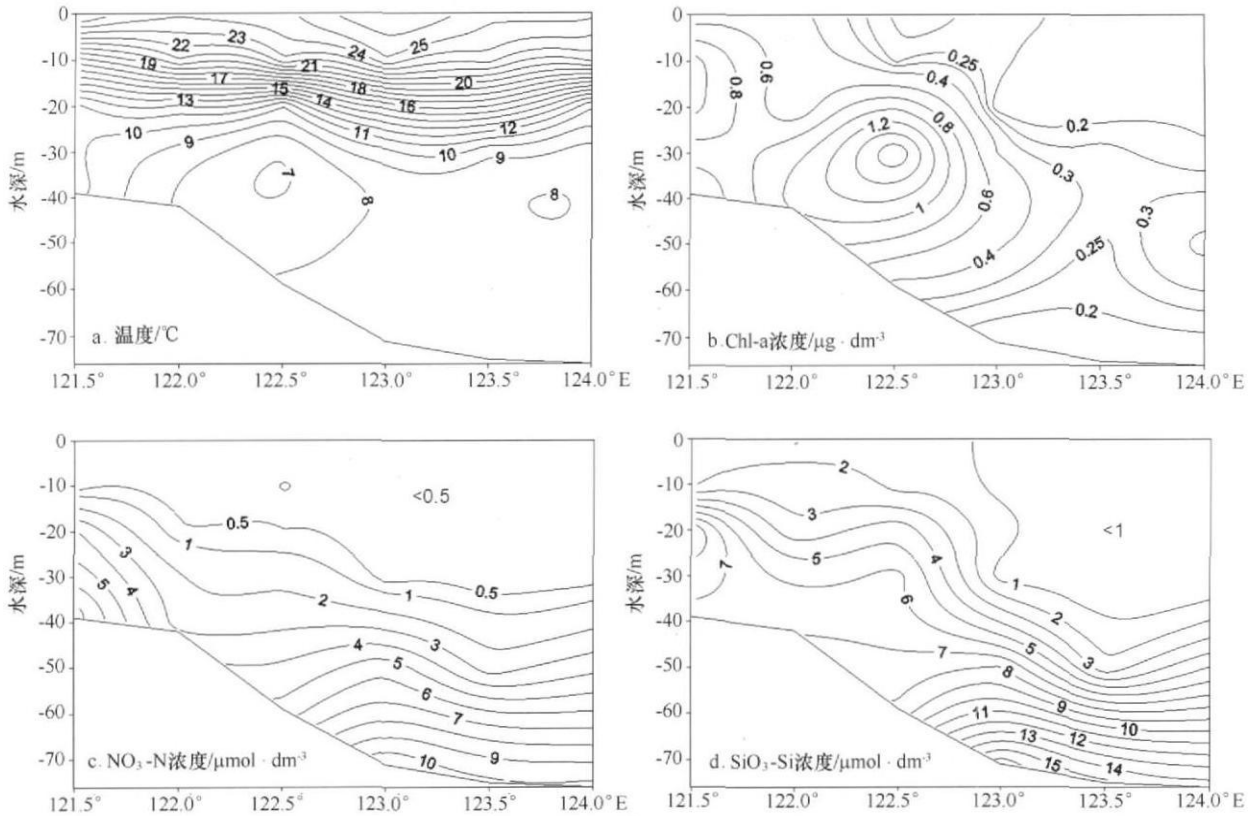


图4 D断面温度、Chl-a和营养盐分布

这一结果验证了以往的研究成果,即夏季南黄海DO垂直分布最大值的出现与跃层密切相关^[6,10-11,13],并与SCM现象相伴生^[13]。但也有一些新的发现,如DO最大值深度与叶绿素最大值深度并不完全一致,叶绿素最大值深度在深水区要比DO最大值深度更大些(见图2a、图4b);DO最大值处的氧浓度(DO_{max})与该处叶绿素浓度以及Chl-a最大值处的叶绿素浓度分布情况也不一致,Chl-a浓度较高的海域,DO含量较低,而在Chl-a浓度较低的地方,DO含量却较高(见图2a、图4b)。其他断面也同样存在上述现象,针对该问题,本文将在下一部分做一深入探讨。

3.3 DO浓度与主要环境因子的关系分析

海水中DO的分布变化与主要环境因子关系密切,然而针对南黄海夏季DO垂直分布最大值问题,文献对DO和主要环境因子在量值上的关系讨论的不够系统和深入,据此,本文将在以下部分对此问题做一分析,研究DO浓度与温度、盐度、温跃层、Chl-a和营养盐的相关性,并进一步探讨氧最大值现象的成因和氧的来源。

3.3.1 DO浓度与温盐的关系

对DO最大值层以上水体而言,DO浓度与温度和盐度之间具有较好的相关性(见图6a、b);而对DO最大值层及以下水体,DO浓度与温度和盐度之间则无明显相关性(R^2 分别为0.0041和0.0194, $P < 0.01$),因此水温和盐度是DO最大值层以上水体中DO平衡浓度的主要控制因素。

3.3.2 DO最大值深度与温跃层深度、厚度及Chl-a最大值深度的关系

对各站位DO最大值深度、温跃层深度及Chl-a最大值深度的统计结果表明(图5a,其值根据CTD携带的经过校正的DO和Chl-a探头所测数据来确定):DO最大值深度、温跃层上下界深度、温跃层厚度及Chl-a最大值深度随各站位水深的分布与DO最大值浓度分布具有总体上的一致性,量值都在浅水区较小,而在深水区较大;DO最大值出现在8~30m,基本上所有站位DO最大值都位于温跃层中,并且大多数站位的DO最大值深度与温跃层下界接近,进一步分析发现,DO最大值深度与温跃层下界深度存在良好的正相关(见图

5b), 这说明 DO 最大值的存在, 既需要有较低的水温, 又需要水体具有较强的垂直稳定性。

此外, 研究发现调查区域的温跃层强度在 $0.64 \sim 2.54 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ 之间 (平均 $1.21 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$), 且 DO 最大值的量值与温跃层强度之间无明显相关性, 而与温跃层的厚度呈正相关 (图 6c), 这可以用以下

机制来解释: 根据刘克修等^[10]的数值模拟结果, 海水层化会影响 DO 的垂直涡动扩散, 从而对 DO 垂直分布最大值的形成和保持起着至关重要的作用, 因此, 本文认为在跃层强度达到一定程度的时候, 随着跃层厚度的增加, 会导致 DO 垂直涡动扩散的减弱, 进而影响 DO 最大值的量值。

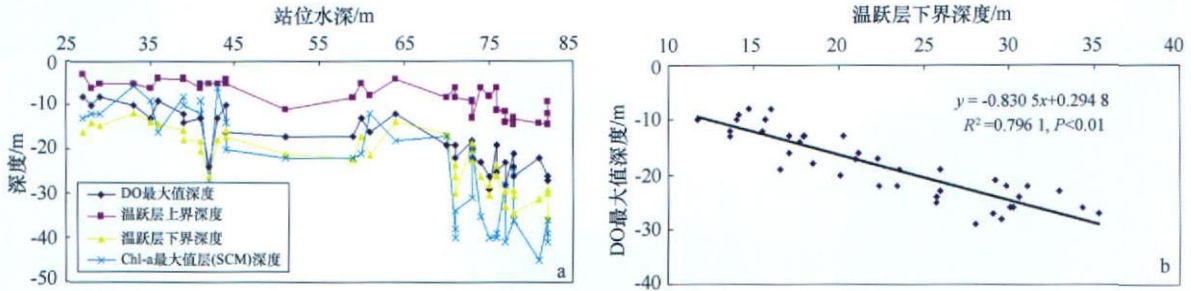


图 5 DO 最大值深度与温跃层、Chl-a 最大值深度的关系

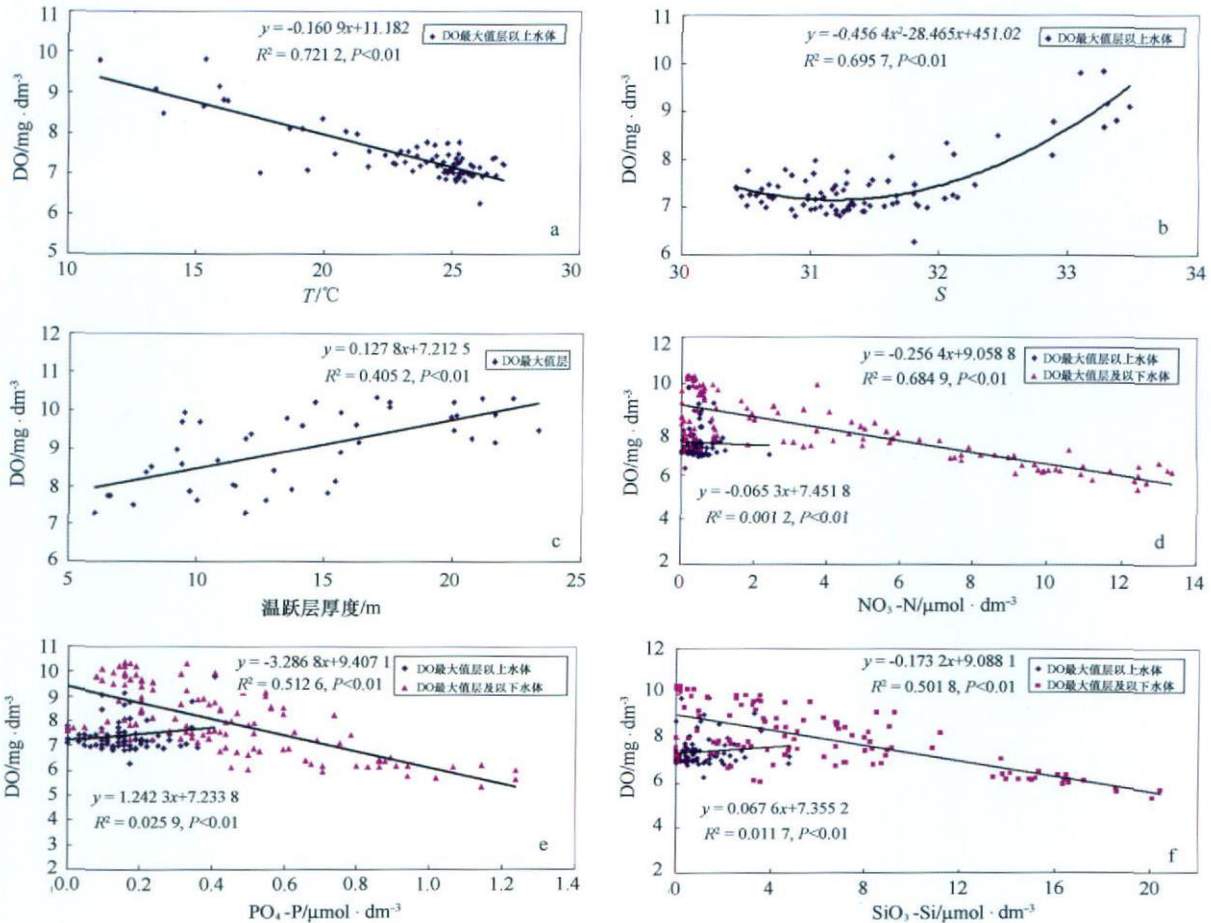


图 6 DO 与环境因子的相关性

由 DO 和 Chl-a 的断面分布情况可以看出 (见图 2a, 4b), 虽然 DO 和 Chl-a 垂直分布最大值现象同时存在, 但 DO 最大值深度与叶绿素最大值层并不完全一致。图 5a 的统计结果表明: DO 最大值深度与叶绿素最大值深度之间存在 3 种关系, 一是叶绿素最大值深度比 DO 最大值深度要浅; 二是两者基本吻合; 三是叶绿素最大值深度比 DO 最大值深度要大。对这一现象可以用下述机制来解释: Chl-a 最大值的形成是光照和营养盐共同作用的结果, 在大部分海域尤其是较深水区 (水深大于 45 m, 本航次资料), 一方面黄海冷水团内的垂直环流虽然存在将下层的营养盐向上层扩散的趋势, 但由于强大的温、密跃层的存在, 营养盐会在跃层下界及以下水体中积累, 而并未穿透温、密跃层 (见图 4c, d), 另一方面深水区透明度也较大, 光照强度适应, 因而易在温跃层下界及以下水体中形成叶绿素最大值层, 表现为与 DO 最大值层相吻合或在其之下; 对浅水区而言 (水深小于 45 m), 由于跃层强度和厚度较小, 营养盐的贯跃层运输会使其穿越温跃层^[19], 而且受水体透明度的限制, 适宜的光照也出现在跃层的中部, 因此叶绿素最大值层出现在跃层之中, 甚至在 DO 最大值层以上。

3.3.3 氧最大值浓度与 Chl-a 的关系

研究发现, DO 最大值处的氧浓度与该处叶绿素浓度以及 Chl-a 最大值处的叶绿素浓度在量值上并不存在相关性, DO_{max} 越高的海域, Chl-a 值却越小 (见图 2a, 4b)。对于 DO_{max} 与 Chl-a 最大值之间的不相关性, 本文认为, 只有当叶绿素最大值深度在 DO 最大值深度之下或两者相吻合的情况下, DO_{max} 与 Chl-a 最大值才可能有关, 而在 Chl-a 最大值深度比 DO 最大值深度小的情况下, DO_{max} 与 Chl-a 最大值没有关系, 这是因为浮游植物光合作用所产生的氧会向上扩散, 并在温跃层的下界附近积聚和保存, 并逐步形成 DO 最大值层, 所以当叶绿素最大值深度在 DO 最大值深度之上时, 其光合作用产氧将对 DO_{max} 没有贡献。此外, 由于观测的 Chl-a 含量只是某一时间节点的值, 而且 Chl-a 含量较高的地方也有可能存在由于上部跃层厚度较小以及垂直环流所引起的氧涡流扩散加剧的情况 (如 D 断面 122°E 附近海域的 20~30 m 水深处, 见图 4a, b), 氧损失严重, 从而使 DO_{max} 也会比较低, 造成现场观测时 Chl-a 与 DO_{max} 之间的不相关。所以, 观测之时 DO 最大值层中的 Chl-a 浓度及

Chl-a 最大值均不是影响 DO 最大值的决定因素。

3.3.4 氧最大值浓度与“DO 净积累效应”

在黄海, 跃层总在真光层以内^[10], 据此, 笔者认为 DO 最大值层以下、真光层以内水体中在时间跨度上 DO 的净积累作用才与 DO_{max} 密切相关, 本文称之为“DO 净积累效应”, 本文将其定义为: 一定条件的跃层形成以后 (DO 最大值层开始出现), DO 最大值层以下、真光层以内水体在一定时间内 (可以是一天) 光合作用产氧抵消有机物分解、呼吸耗氧, 氧的垂直涡动扩散等氧损失后, 会有氧的剩余, 由于温跃层下界附近具有相对较低的水温和较强的垂直稳定性, 一部分剩余的氧 (DO 净积累) 会在此积聚和保存。将 DO 净积累从跃层出现开始对时间进行积分, 将得到较大时间跨度上 DO 净积累的叠加: $DO \text{ 净积累的叠加} = \int_{t=t_0} DO_{\text{净积累}} dt$ 。而且, 在跃层出现并为形成 DO_{max} 层提供必要条件时, 水体中还存在一 DO 含量的本底值 ($DO_{\text{本底}}$), 假定 $DO_{\text{本底}}$ 在一定时间内的氧损失已体现在 $DO_{\text{净积累}}$ 中, 所以 DO 最大值层氧含量可表示为: $DO_{max} = DO_{\text{本底}} + \int_{t=t_0} DO_{\text{净积累}} dt$ 。当 $DO_{\text{净积累}}$ 对时间的积分值 ($\int_{t=t_0} DO_{\text{净积累}} dt$) 大于 0, 并逐渐增大时, 则 DO 最大值层处于形成期, 且 DO 最大值逐渐升高; 当 $\int_{t=t_0} DO_{\text{净积累}} dt$ 不变时, 则是 DO 最大值层的成熟和保持期, 此时 DO 最大值的量值最大; 当 $\int_{t=t_0} DO_{\text{净积累}} dt$ 逐渐下降时, 则 DO 最大值层将开始衰退并逐渐消失。为直观的描述这一过程, 本文给出了 $DO_{\text{净积累}}$ 对时间的积分值随时间变化的概念曲线 (图 7)。

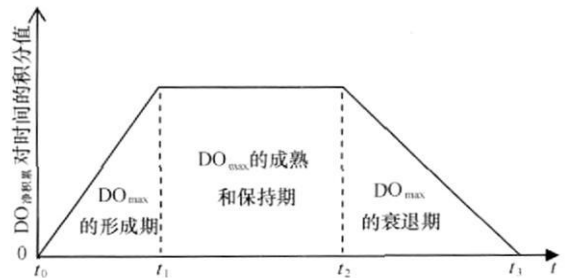


图 7 DO 净积累的积分图

由此可见, DO 最大值层氧的含量 (或来源) 是由两部分组成, 一是 DO 最大值层开始产生时水

体中 DO 的本底值, $DO_{\text{本底}}$ 受两个因素制约, 即 DO 最大值层开始产生之前春季光合作用的产氧以及由于海水增温而来不及扩散到上层水体中的由冬季保留下来的一部分氧; 二是自 DO 最大值层开始产生至观测之时 $DO_{\text{净积累}}$ 的叠加。由以上分析也不难看出, $DO_{\text{净积累}}$ 的叠加则会受到氧的垂直涡动扩散和光合作用的影响, 前者主要受控于跃层的厚度, 自跃层形成之后, 其厚度可能变化不大, 从而使 DO_{max} 与其呈正相关; 光合作用则与自 DO 最大值层开始产生至观测之时该层以下、真光层以内水体中 $Chl-a$ 的总产出有关。需要进一步指出的是, 针对 DO 最大值的形成机制, 在肯定温跃层和光合产氧所起的作用的基础上, 本文提出的“DO 净积累效应”的观点不仅从时间跨度以及动态的角度上对 DO 垂直分布最大值的形成机制进行了分析, 而且在理论上探讨了 DO 最大值层氧含量 (或来源) 的构成, 并明确指出了自 DO 最大值层开始产生至观测之时该层以下、真光层以内水体中的生物化学作用 (或 $Chl-a$ 的总产出) 才与氧最大值密切相关。

此外, 受现有资料的制约, $DO_{\text{净积累}}$ 的叠加关于 $Chl-a$ 和跃层的具体关系目前尚无法给出, 所以图 7 仅是为了说明问题而给出的一个理想简略图, 但不可否认的是, 通过计算机模拟或现场调查方式的改进以获取更有针对性和说服力的资料, 也许有望能使这一目的得以实现, 这部分的研究工作笔者也正在探讨之中。

应用上述观点, 显然可以很好的解释春、夏季氧最大值处氧含量普遍高于冬季这一事实, 而且也能解释夏季氧最大值处的氧含量整体上逐月增大这一现象。

3.3.5 DO 浓度与营养盐的关系

从 D 断面 NO_3-N 和 SiO_3-Si 的浓度分布情况来看 (见图 4c, d), 营养盐总体上是在温跃层下界及以下水体中积累, 并由跃层附近向下层逐渐增加, 在水深较浅的海域, 温跃层附近的营养盐存在向上层扩散的趋势, 磷酸盐也有类似的分布趋势 (图略)。营养盐的这种分布趋势表明 DO 最大值层基本与温跃层下界附近营养盐浓度的低值锋面相一致, 这是该层中光合作用消耗营养盐的结果, 而底层 DO 含量的低值区也与营养盐浓度的高值区相吻合, 这显然是下层水及沉积物中有机物分解耗氧而使营养盐再生并逐渐积累的结果。对调查海域 DO 最大值层以上水体, DO 最大值层及以下水体中

DO 浓度和上述三种生源要素之间的化学计量关系分别进行统计分析, 结果表明, DO 最大值层及以下水体中, DO 与 NO_3-N , PO_4-P 和 SiO_3-Si 之间均存在较好的负相关, 而 DO 最大值层以上水体中, DO 与营养盐之间基本不存在相关性且营养盐含量均很低 (见图 6d, e, f)。这些结果也进一步说明, DO 最大值层及以下水体中, 营养盐的消耗或增加是时间跨度上生物化学作用的结果, 而 DO 含量也是受到时间跨度上生物化学累积作用的影响, 所以它们之间呈现较好的相关性也是自然而然的。

4 结论

调查结果显示: 2006 年夏季南黄海冷水域 DO 浓度范围为 $5.35 \sim 10.36 \text{ mg/dm}^3$, 平均值为 7.73 mg/dm^3 ; 黄海冷水团海域存在的 DO 垂直分布中的最大值现象是调查海域 DO 分布的显著特征, 并与 SCM 现象相伴生; DO 垂直分布的最大值深度和量值具有较为明显的区域差异。

通过对 DO 浓度与主要环境因子的相关性分析, 对南黄海冷水域 DO 垂直分布最大值现象的成因有了更详尽的认识: 温、盐明显控制着 DO 最大值层以上水体中的氧含量; 一定强度的温跃层形成之后, DO 最大值层出现在跃层的下界附近, 且其氧含量受控于跃层厚度和生物化学作用, 并与跃层厚度呈正相关; DO 最大值深度与叶绿素最大值深度之间存在三种关系, 且本文成功解释了 DO 最大值处与次表层叶绿素最大值层位置不吻合且量值不相关的原因; 提出了“DO 净积累效应”的观点, 不仅从时间跨度以及动态的角度上对 DO 垂直分布最大值的形成机制进行了分析, 而且从理论上探讨了 DO 最大值层氧含量 (或来源) 的构成, 并明确指出了自 DO 最大值层开始产生至观测之时该层之下、真光层以内水体中的生物化学作用 (或 $Chl-a$ 的总产出) 才与氧最大值密切相关; 底层较低的 DO 含量是底层水及沉积物中有机物分解耗氧的结果。总体来看, 水体层化和生物化学作用明显影响着夏季南黄海冷水域范围内 DO 的垂直分布。

当然, 南黄海 DO 垂直分布最大值现象的影响因素复杂, 是多种过程共同作用的结果, 在已有观测的基础上还需要通过调查手段和调查方法的改进来获取更有说服力的资料, 并对其进行严格动力学

模拟, 譬如黄海冷水团的增强或减弱对该现象是否存在重要影响等, 这部分的研究仍需要在后续工作中予以关注。

国家海洋局第 1 海洋研究所海洋生态研究中心和物理海洋室的 20 多位师生冒着风浪, 进行现场

观测, 付出了艰辛劳动, 在此一并表示感谢。还要特别感谢傅明珠博士在本文写作过程中给予的帮助以及刁新源老师在 CTD 资料获取和使用方面提供的协助。

参考文献:

- [1] 胡好国, 万振文, 袁业立. 南黄海浮游植物季节性变化的数值模拟与影响因子分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 74—88
- [2] 唐启升, 苏纪兰. 中国海洋生态系统动力学研究: iv. 关键科学问题与研究发展战略[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 3—34.
- [3] 刁焕祥, 沈志良. 黄海冷水域水化学要素的垂直分布特性[G]// 海洋科学集刊, 第 25 集. 北京: 科学出版社, 1985: 41—51.
- [4] 邹娥梅, 熊学军, 郭炳火, 等. 黄、东海温跃层的分布特征及其季节变化[J]. 黄渤海海洋, 2001, 19(3): 8—18.
- [5] 顾宏堪. 海水溶解氧夏季垂直分布中的最大值[J]. 海洋与湖沼, 1966, 8(2): 85—91.
- [6] 顾宏堪. 黄海溶解氧垂直分布中的最大值[J]. 海洋学报, 1980, 2(6): 70—79.
- [7] 蓝淑芳. 南黄海斜断面溶解氧分布特征及其微细结构[J]. 海洋科学, 1988, (3): 1—5.
- [8] 熊庆成, 丁宗信, 赵保仁. 秋末南黄海冷水团区溶解氧垂直结构及其最大值的分析研究[G]// 海洋科学集刊第 27 辑. 北京: 科学出版社, 1986: 107—114.
- [9] 于圣睿, 孙秉一. 南黄海溶解氧的分布与季节变化[J]. 山东海洋学院学报, 1980, 10(2): 81—90
- [10] 刘克修, 赵保仁. 黄海溶解氧垂直分布最大值的数值研究[J]. 海洋学报, 1997, 19(4): 80—89
- [11] 王保栋. 黄海溶解氧垂直分布最大值的成因[J]. 黄渤海海洋, 1996, 15(3): 10—15
- [12] 王保栋. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 2000, 22(6): 47—54
- [13] 王保栋, 王桂云, 郑昌洙, 等. 南黄海溶解氧的垂直分布特征[J]. 海洋学报, 1999, 21(5): 72—77
- [14] LIN C L, NING X R, SU J L, et al. Environmental changes and responses of ecosystem of the Yellow Sea during 1976—2000[J]. Journal of Marine System, 2005, 55: 223—234
- [15] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星. 南黄海溶解有机碳的生物地球化学特征分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 478—488
- [16] 葛人峰, 乔方利, 于非, 等. 陆架海区温跃层特征量的一种计算方法——拟阶梯函数逼近法[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(4): 393—400
- [17] 葛人峰, 郭景松, 于非, 等. 黄、东海陆架海域温度垂直结构类型划分与温跃层分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 424—435
- [18] 于非, 张志欣, 刁新源, 等. 黄海冷水团演变过程及其与邻近水团关系的分析[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 26—34
- [19] 魏皓, 王磊, 林以安, 等. 黄海中部营养盐的跃层层输运[J]. 海洋科学进展, 2002, 20(3): 15—20

Formation analysis of maximum value in vertical distribution of dissolved oxygen in the Cold Water Mass of the western Southern Huanghai Sea

WEI Qin-sheng^{1,2}, GE Ren-feng³, WANG Bao-dong^{1,2}, ZANG Jia-ye^{1,2}

(1. Research Center for Marine Ecology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 2. Key Lab of Science and Engineering for Marine Ecological Environment, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China; 3. Key Lab of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the data of dissolved oxygen (DO) collected from Southern Huanghai Sea investigation during July, 2006, this paper focused on an analysis of the maximum value phenomenon of DO vertical distribution in the Cold Water Mass of the western Southern Huanghai Sea, and the relationship of DO concentration between the main environmental factors was also studied. The results showed that the maximum value phenomenon was the dominant feature of DO vertical distribution in the Cold Water Mass of the western Southern Huanghai Sea, which was also accompanied with SCM; The depth and value of the DO

maximum had obvious regional differences; The temperature and salinity was the main controlling factors of DO in the water volume above DO maximum layer; After the formation of the thermocline with a certain strength, the DO maximum layer appeared in the vicinity of the lower bound of the thermocline, DO maximum value was controlled by the thickness of the thermocline and the biochemical activity, besides, the study also found that the thickness of the thermocline layer and the DO maximum value were positively correlated; DO concentration was low in bottom water, which was caused by the decomposition of organic matter. Simultaneously, successfully giving the explanation that the location was not match and the value was not related of the DO maximum layer and the subsurface chlorophyll maximum layer, in addition, a perspective named "DO net cumulative effect" was put forward, not only the formation mechanism of DO maximum value was analyzed from time scale and dynamic angle, but also the constitution of DO value or source in the DO maximum layer was discussed theoretically, and pointing that since the beginning of DO maximum layer to the time of observation, the biochemical activity (or $Chl\alpha$ total output) in the water volume under the DO maximum layer and in the euphotic zone was closely related to the DO maximum value. Overall, The water column stratification and biochemistry significantly affected the vertical distribution of DO in the Cold Water Mass of the western Southern Huanghai Sea in summer.

Key words: Southern Huanghai Sea; cold water mass; dissolved oxygen (DO); distribution; DO maximum value; DO net cumulative effect