

海水溶解氧夏季垂直分布中的最大值*

顾宏堪

(中国科学院海洋研究所)

海水溶解氧夏季垂直分布中的最大值^[1-3,5-7],如同其最小值一样,为溶解氧垂直分布中的一个突出的现象。它不仅出现在大洋中,而且也存在于浅海。这一现象,不同的研究者所作出的解释是不同的。有认为是生物原因,有认为是物理原因,有的则认为其原因是综合性的。

本文试图阐明海水溶解氧夏季垂直分布中最大值的形成机理。

一、有关溶解氧最大值形成机理的几种论点

Thompson 等^[7]在太平洋北部及东北部 25—50 米处观测到氧最大值层。他们认为,这一氧最大值层是与光合带相适应的。

Богоявленский^[1]对鄂霍次克海中氧最大值的形成,绘出了一幅假设图,认为夏季氧垂

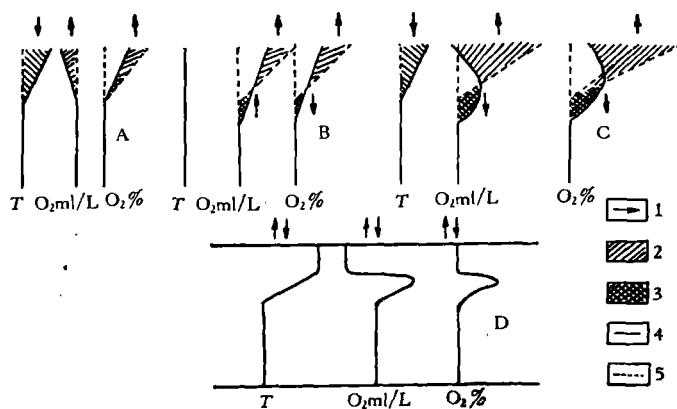


图1 氧最大值层的形成

Fig. 1. The formation of oxygen maximum (After Богоявленский, 1953).

- A. 增温但没有光合作用; heating but no photosynthesis;
- B. 光合作用但不增温; photosynthesis but no heating;
- C. 增温及光合作用; heating and photosynthesis;
- D. 形成的跃层及氧最大值层. thermocline and oxygen maximum.
1. 热及氧的流向; removal direction of caloric and oxygen;
2. 同大气平衡; equilibrium with atmosphere;
3. 同下层平衡; equilibrium with lower layer;
4. 观测到的分布; observed distribution;
5. 假设平衡不存在时的分布. hypothesis distribution in absence of equilibrium.

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第316号;本文承中国科学院海洋研究所曾呈奎副所长、纪明侯及管秉贤先生的指导,刘明星同志协助绘图,在此一并致谢。

直分布中的最大值,是由于在密跃层形成时期,浮游植物光合作用时,大量的氧渗入到稍下的层内,随着增温时该处稳定密度层的形成,垂直交换困难,因而氧即被保持下来,形成了它在夏季垂直分布中的最大值。

图 1 表明了 Богоявленский 的假设。

Сметанин^[3]对千岛-堪察加海区中氧的最大值,作出了与 Богоявленский 类似的解释。并认为,在氧最大值处,在 CO_2 、pH 及生原要素的分布曲线上,没有相应的特征,因而认为,氧最大值中的主要部分,是从这一层上面渗下来的。

Сметанин 绘制了一幅氧垂直分布季节变化图,如图 2,用以说明最大值的形成原因。图 A 中曲线 1 表明增温及光合作用开始前的情形,可以看出冬季对流层的状况。曲线 2、3 表明浮游植物春花及氧向下扩散的情形。曲线 4 表明氧向下扩散的最大效应。曲线 5、6 出现了明显的氧最大值。图 3 表明氧最大值位于海水垂直稳定度最大的层内^[3]。

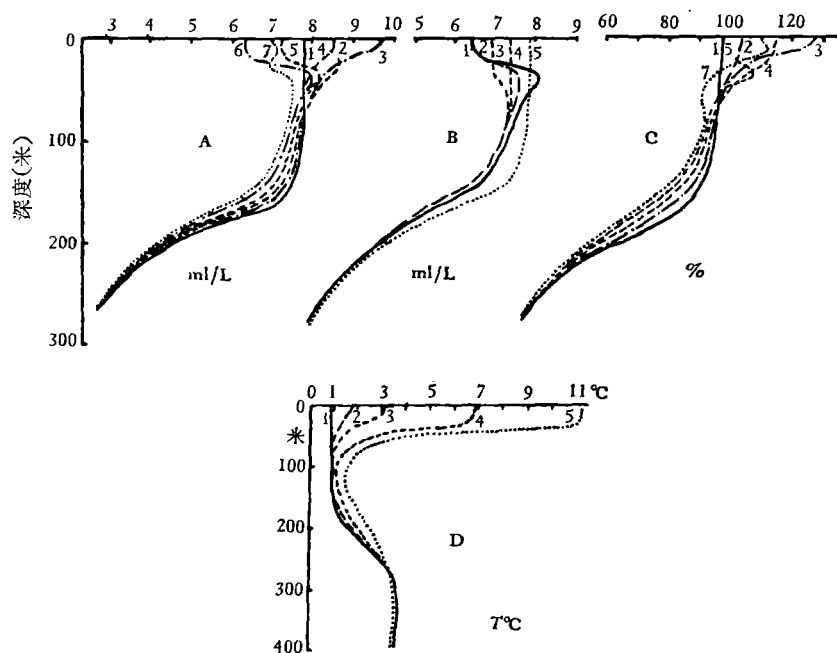


图 2 亚北极上层水氧分布的季节变化,图D为水温变化

Fig. 2. The seasonal variation of O_2 ml/L, $\text{O}_2\%$ and $T^\circ\text{C}$ in the upper layer of sub-Arctic water (After Сметанин, 1959).

- A. O_2 ml/L, 3—8 月, Mar.-Aug.;
- B. O_2 ml/L, 8—3 月, Aug.-Mar.;
- C. $\text{O}_2\%$;
- D. $T^\circ\text{C}$, 春季至夏季, Spring-Summer.

Бруевич 等^[2]同样指出,氧最大值存在的重要因素,是先前上层光合作用时渗入到该层中的高浓度氧,维持在这一稳定密度层中,而并非是该层中光合作用的积累。因为一系列的实验表明,鄂霍次克海的补偿点,通常位于氧最大值平均深度之上,因而该处由光合作用产生的氧,显然是不足以形成氧最大值的。并且,在 1949 年的观测中,没有在氧最大值处发现有显著量的浮游植物。

他们亦以不同季节氧垂直分布的变化来说明氧最大值的形成。他们认为从图 4 中可见,春季光合作用产生大量的氧,并向下渗入到中层。夏季明显地出现氧最大值,而该处 pH 及生原要素没有相应的特征。因此可以认为,氧最大值中的主要部分是从上层渗入的。

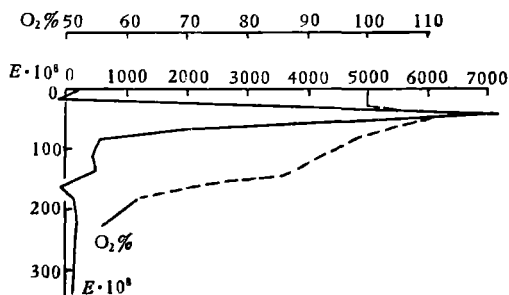


图 3 氧及垂直稳定度的分布(1954. 10. 某站)

Fig. 3. The distribution of oxygen and stability (Oct. 1954. for a station After Сметанин, 1959).

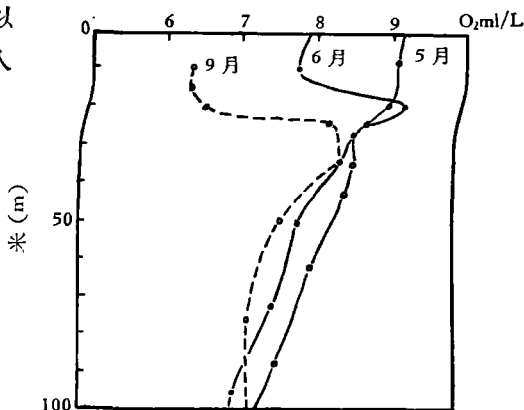


图 4 春秋季鄂霍次克海上层氧含量的变化 (各月站位略有差别,但均位于海区中南部)

Fig. 4. The variation of oxygen content in spring and autumn in Okhotsk Sea. (After Бруевич et al., 1960. in upper layer at central south).

他们综观了鄂霍次克海及其它海的资料,得出了结论,认为氧最大值存在的必要条件为,一是有良好的密度跃层,二是水中浮游植物春花需一直到稳定跃层形成,三是氧最大值存在于补偿深度稍下。

Ichiye^[5] 认为,密跃层中的氧最大值,是由于氧的涡动扩散,要进行得比热的涡动传导为慢的缘故。因而,逐渐增温时,氧来不及释放到大气中而呈过饱和状态。

Reid^[6]在研究了北太平洋中氧的最大值以后指出,夏季氧最大值常出现在冬季混合层的下部,夏季氧最大值处及其上面的氧的浓度,主要依赖于水的温度(见图 5)。

关于光合作用的可能影响,Reid 认为,在氧最大值形成中,温度的影响比生物作用的影响还要大,因计算的补偿深度通常在氧最大值之上,最大值处氧的净产量应为负值,因而由光合作用形成氧最大值似乎不可能。

二、中国海某站溶解氧的垂直分布

中国某海区一代表站 O_2 毫升/升、 $O_2\%$ 、 $T^\circ C$ 及 σ_t 垂直分布季节变化,如图 6 所示。

由图可见,冬季 O_2 毫升/升及 $O_2\%$ 均呈垂直均匀状态;春后至夏末 O_2 毫升/升上层逐月下降,以 8 月为最低。 $O_2\%$ 则春季增高夏季降低。但 20 米处, O_2 毫升/升变化很小,5—8 月仅差 0.2 毫升/升, $O_2\%$ 差 6%。35 米以下至底层, O_2 毫升/升及 $O_2\%$ 均逐月稍有下降;秋季到冬初,又渐趋于垂直均匀状态。由于 5—8 月的表、底层 O_2 毫升/升及 $O_2\%$ 均趋于下降,但 20 米处的数值变化很小,因而就形成了夏季氧最大值。显然,这一氧的最大值是与 $T^\circ C$ 及 σ_t 的跃层下界相一致的。

该站浮游植物量很少,1959 年 1—12 月整个水层的月平均值为 1 万个/米³,除 1、2、4、9 月在 2—5 万个/米³以外,其他各月每立方米大都仅数十及数百个。

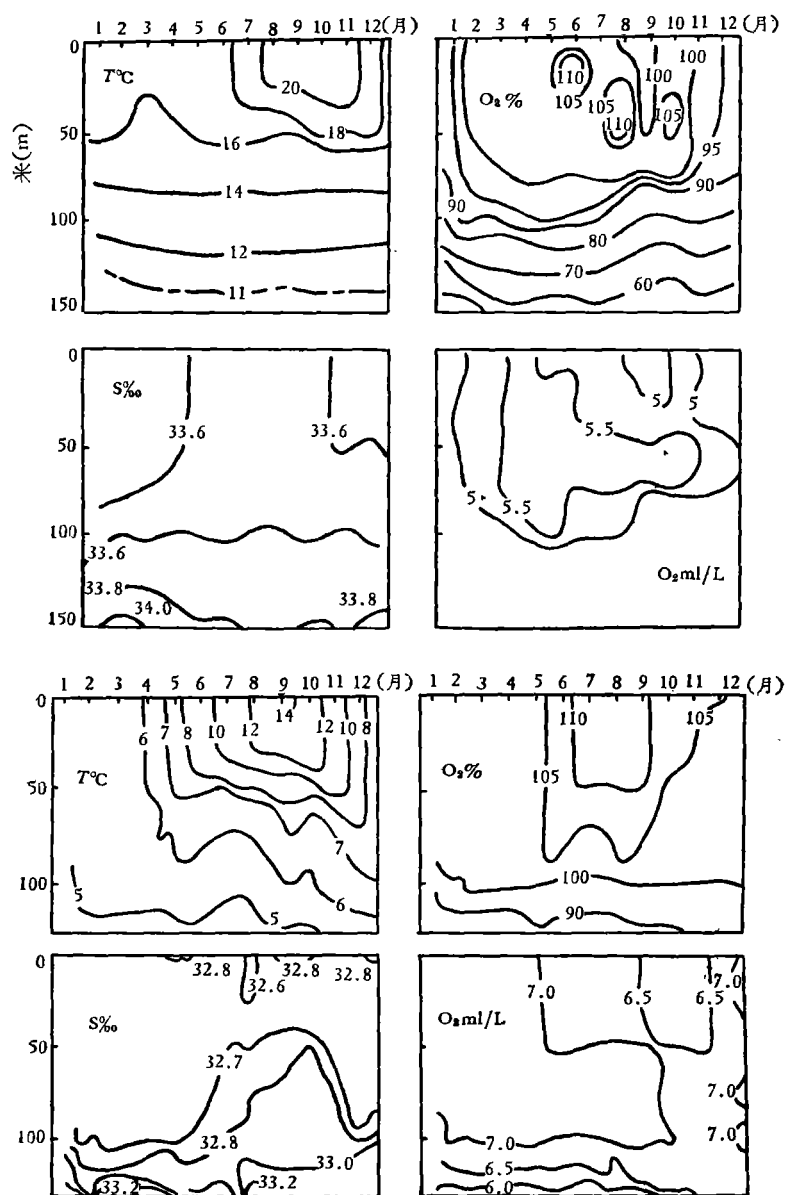


图5 上层水中 $T^{\circ}\text{C}$ 、 $S_{\text{‰}}$ 、 O_2 毫升/升及 $\text{O}_2\%$ 的季节变化

Fig. 5. The seasonal variation of $T^{\circ}\text{C}$, $S_{\text{‰}}$, $\text{O}_2 \text{ ml/L}$ and $\text{O}_2\%$ in the upper layer (After Reid, 1962).

上图 in upper $26^{\circ}32' \text{N}$ $117^{\circ}48' \text{W}$, 1950-1953 平均值。

下图 in lower 50°N 145°W , 1957 年。

三、討 論

对于溶解氧夏季垂直分布最大值的形成机理, 虽然不同作者在不同海区中所作出的结论不同, 但是, 大多数作者均强调了良好的密跃层或温跃层的存在是形成氧最大值的必要条件。并且指出, 夏季稳定密跃层或温跃层中的氧最大值, 是夏季以前保持下来的。由

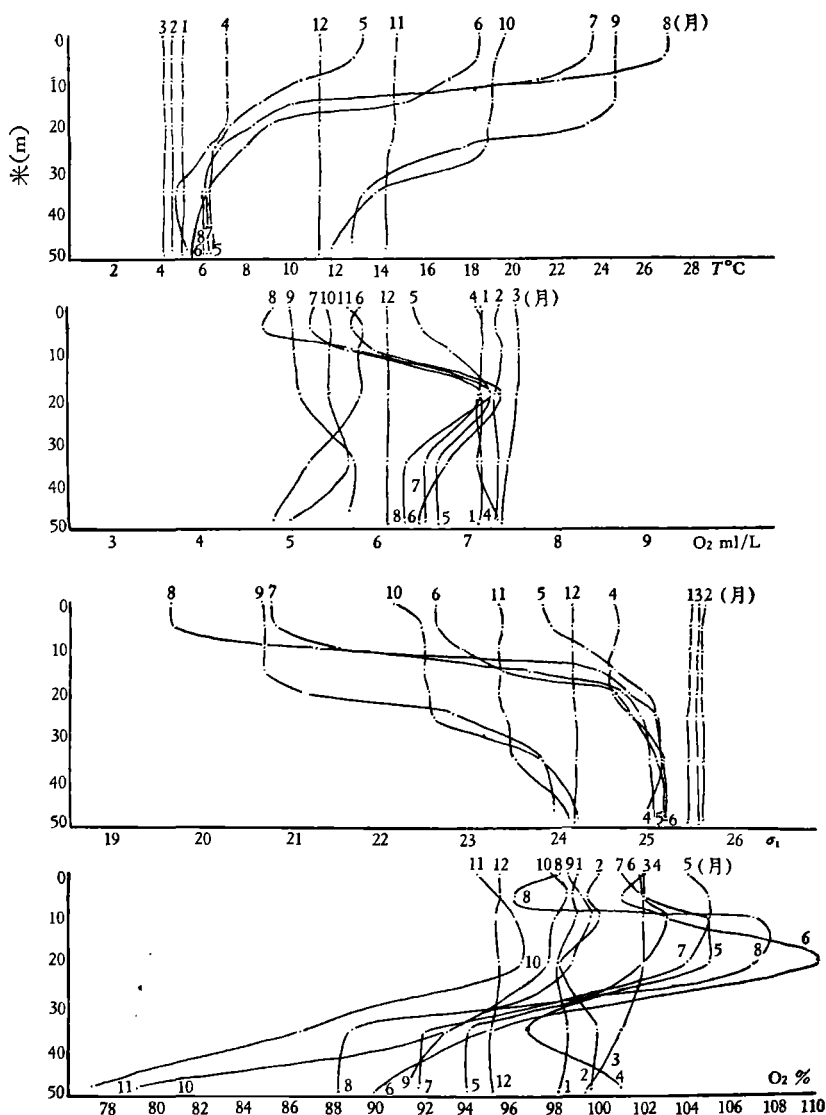


图6 中国海某站 O_2 毫升/升、 $O_2\%$ 、 $T^\circ C$ 及 σ_t 垂直分布的季节变化(1959年1—12月)

Fig. 6. The seasonal variation of O_2 ml/L, $O_2\%$, $T^\circ C$ and σ_t in a station of China Sea (Jan.-Dec. 1959).

于补偿深度在氧最大值之上,或在观测中没有发现氧最大值处有大量的浮游植物,因而又认为,氧最大值不可能由该处浮游植物的光合作用直接形成。

这些作者的不同观点即在于:夏季稳定密跃层或温跃层中的氧最大值,究竟其氧的来源为何? Боговяленский、Сметанин 与 Бруевич 认为,氧最大值是先前上层浮游植物光合作用时渗入到该层中的高浓度氧,当稳定密跃层形成时保持下来的。Reid 认为,夏季氧最大值处及其上面的氧的浓度,主要依赖于温度。

综观氧最大值的有关资料,本文作者认为:除某些因生物作用的特殊情况外,夏季密跃层处溶解氧垂直最大值,主要是由冬季保持下来的。这与水团的性质有关。氧被保持

的条件,是该处夏季密跃层以下的 $T^{\circ}\text{C}$ 及 σ_t 值,通常亦保持着冬春以来的数值,且跃层强度大(跃层强,稳度大,跃层附近垂直涡动势必小些)。至于浮游植物光合作用,随不同海区浮游植物量及其它条件的不同而必然有所不同,但其产生的氧,通常并不足以决定夏季氧最大值的存在与否,而只能影响氧最大值的大小。中国海某海区一代表站 O_2 毫升/升、 $\text{O}_2\%$ 、 $T^{\circ}\text{C}$ 及 σ_t 垂直分布的季节变化,非常典型地表明了这个观点。该站由于浮游植物量很小,而夏季密跃层以下的 $T^{\circ}\text{C}$ 及 σ_t 值的保守性很大,跃层强,因而可以明显地看出氧最大值系由冬季保持而来,并不是光合作用的结果。Reid 认为主要依赖于水温,这对于为什么夏季并不是有温跃层的海区都存在最大值这一点就不能得到解释,对于某些海区夏季氧最大值并不是产生在冬季对流层的下部也不能解释。

上述各作者所以没有从根本上去找出带有普遍性的氧最大值的形成原因,主要是被一些表面现象或个别海区的情况所模糊。在有强烈光合作用的海区中,人们往往误认这就是氧最大值的来源,在氧的分布与水温相一致的海区,就片面地认为氧最大值主要依赖于水温。事实上,从上述各作者所列出的一些图中,透过一些表面现象,也可以明显地看出形成氧最大值的根本原因来。就图 2 来看,Сметанин 认为图 A 曲线 2、3 表明浮游植物光合作用产生了大量氧,随后逐渐形成了氧最大值。但如果将氧最大值最明显的曲线 6 的氧最大值减小到曲线 1 的数值,显然曲线 6 的氧最大值并未消失,因而,没有夏季以前的浮游植物光合作用,夏季该处氧最大值仍然可以存在。事实上,曲线 6、1 氧最大值处仅差约 0.17 O_2 毫升/升左右。相反,如果该处浮游生物有机物产量极大的话,其残体下沉到密跃层处分解,氧被严重消耗,反而可能影响氧最大值的存在。图 4 的情形也一样。至于图 5,那更是极为明显的了,夏季氧最大值系由冬季保持而来。其位置,在温跃层的下界处。并且可以看到,夏季温跃层以下的 $T^{\circ}\text{C}$ 值,仍保持着冬春以来的数值。

夏季溶解氧垂直最大值之上层,其含氧量的减小,主要依赖于水温的增加。氧最大值之下层,其含氧量的减小程度,主要依赖于有机物分解的耗氧状况。

至于 Ichiye 提出的密跃层中氧的涡动扩散,要进行得比热的涡动传导为慢,因而增温时氧来不及释放到大气中的问题,这对氧饱和度是可能产生较为明显的影响的,但这不足以说明绝对含氧量最大值的形成。

浮游植物春花期,强烈光合作用使海水近表面的 O_2 毫升/升及 $\text{O}_2\%$ 增高也是可能的。这在密跃层形成前后都可能会产生。温带及亚热带海区浮游植物繁殖大多较早^[4],因而在密跃层形成前,就可能因强烈光合作用而在近表面形成类似于夏季的氧最大值。在密跃层较浅的海区,特别是沿岸海区,也可能因光合作用在密跃层内进行而使 O_2 毫升/升及 $\text{O}_2\%$ 增加。有时则可能与夏季氧最大值相巧合。但所有这些情形,往往都是带有偶然性的,可能在某一、二个月出现一下,这必须与由冬季逐月保持而来的夏季密跃层中的氧最大值加以区别。

参 考 文 献

- [1] Богоявленский, А. Н., 1953. Происхождение максимума кислорода в море. Рукопись. Фонды Ин-та океанол. АН СССР.
- [2] Бруевич, С. В., Богоявленский, А. Н. и Мокиевская, В. В., 1960. Гидрохимическая характеристика Охотского моря. Тр. Ин-та океанол. АН СССР 42:125—198.

- [3] Сметанин, Д. А., 1959. Гидрохимия района Курило-Камчатской глубоководной впадины. *Тр. Ин-та океанол. АН СССР* **33**:43—86.
- [4] Bogorov, B. G., 1960. Perspectives in the study of seasonal changes of plankton and of the number of generations at different latitudes. *Perspectives in Marine Biology*. University of California Press. 145—158.
- [5] Ichiye, T., 1954. On the distribution of oxygen and their seasonal variations in the adjacent seas of Japan. Part 11. *Oceanogr. Mag.* **6**(2).
- [6] Reid, J. L., Jr., 1962. Distribution of dissolved oxygen in the summer thermocline. *J. Mar. Res.* **20**(2):138—148.
- [7] Thompson, T., Thomas, B., and C. Barnes, 1934. Distribution of dissolved oxygen in North Pacific Ocean. James Johnston memorial volume, Univ. Liverpool.

ON THE MAXIMUM VALUE OF DISSOLVED OXYGEN IN ITS VERTICAL DISTRIBUTION IN THE SEA

H. K. Gu

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

A discussion was made on the maximum value of dissolved oxygen in its vertical distribution in the sea. Oxygen maximum in the summer thermocline is mainly reserved from winter except for some special cases by biological processes. Similer reservation occurs also in density and temperature. The oxygen maximum may be effected by photosynthesis, which, however, is not a decisive factor and occurs only by chance. Above and below the depth of the oxygen maximum the oxygen content is effected by temperature and biochemical process (decomposition of organic matter and respiration) respectively.