

165°E 赤道太平洋溶解氧垂直分布异常分析*

王明彪 李杰

(国家海洋局南海分局, 广州 510300)

提要 根据 1986—1990 中美热带西太平洋海气相互作用 8 个航次合作综合调查资料, 分析了 1987 年 10 月赤道中西太平洋 165°E (10°N—6°S) 次表层水形成溶解氧最大值的原因。1986—1987 年 El Niño 衰退时期, 该海域赤道附近在 El Niño 强盛时期下沉的次表层水开始回升, 短时期内形成了类似于中、高纬度海域的理化环境, 使浮游生物在混合层内聚集生长, 最终导致溶解氧含量在次表层出现最大值和过饱和含量。

关键词 热带西太平洋 垂直分布 溶解氧最大值

上层海水尤其是中、高纬度海区上层海水中普遍存在溶解氧(DO)垂直分布中的最大值及过饱和现象已为众多海洋科学工作者所证实, 并对产生这些现象的机制进行了较为成功的解释(顾宏堪, 1980; Shulenberger et al., 1981; 刁焕祥, 1984; 杨嘉东等, 1988)。作者在分析中美 8 个航次合作调查的结果时发现, 1987 年 10 月在 165°E(10°N—6°S)断面上进行的 23 个观测站中有 19 个在 50—75m 水深处出现较为明显的 DO 含量最大值及过饱和现象。本文根据各航次调查的综合资料, 对其形成原因进行了初步探讨。

1 资料来源和分析方法

所有资料均来源于 1986 年—1990 年 8 个航次中美热带西太平洋海气相互作用合作调查。温度(T)、盐度(s)、深度(DEP)由 MarkIII CTD 装置测定; DO 用 Winkler 法测定¹⁾; 风速风向取自船测资料; 水样用 GO-FLO 采水器在 CTD 同一站点处采取。Chl. a 用 Turner Designs Model₁₀-005R 荧光计测定; 营养盐用 Alpkem RFA-300 自动分析仪测定; DO 饱和度根据现场 T, s 值由 Weiss (1970) 公式计算。真光层深度采用海水透明度, 按照 $I_z = I_e^{-kz}$, $K = 1.7/S$ [S 为塞克板深度 (m)] 公式, 计算 1% 海面辐照度的深度 (m)。 ΔDO 是 DO 最大值处实测绝对含量与该处饱和含量之差。 T 变化梯度小于 $0.05^\circ\text{C}/\text{m}$ 示为均匀层, 大于或等于 $0.05^\circ\text{C}/\text{m}$ 示为温跃层。上均匀层厚度指海表面到温跃层上界间的距离。营养盐跃层上界深度指其垂直分布第一个拐点处深度。

2 结果与讨论

统计结果表明(表1), 1987 年 10 月研究海域 83% 测站在次表层出现 DO 含量及

* 自选课题。本文承蒙中国科学院南海海洋研究所韩舞鹰研究员审阅, 谨志谢忱。

收稿日期: 1992 年 1 月 17 日, 接受日期: 1992 年 4 月 6 日。

1) 部分资料取自经 Winkler 法现场校正后的 CTD 系统测定结果, 准确度与 Winkler 法相当。

DO% 垂直分布最大值 [DO_{max} , $(DO\%)_{max}$], 位置如图 1、图 2 所示。上均匀层厚度为 25—75m, 平均厚度为 42m; DO_{max} 深度为 50—75m, 最大频率深度为 50m, 占总出现站数的 63%; Chl. *a* 含量最大值深度为 50—141m, 最大频率深度为 100m, 占测站总数的 61%, 75m 深度占 30%; NO_3-N 和 PO_4-P 含量跃层上界平均深度分别为 104m 和 124m; 1% 表面光强平均深度为 100m。表 2 是 DO_{max} 、 $(DO\%)_{max}$ 的特征值。可见, 在 DO_{max} 处, DO 亦呈过饱和态。

表 1 165°E(10°N—6°S) 不同时期部分理化参数平均值

Tab. 1 Averaged values of some physical and chemical factors in different periods at 165°E(10°N—6°S)

参 数	1986 1.31—2.12	1986 11.28— 12.15	1987 9.30— 10.20	1988 5.3—5.22	1988 10.26— 11.16	1989 4.30—5.22	1989 10.25— 11.19	1990 6.11—7.3
温跃层 平均厚度 (m)	135	140	180	115	97	123	122	143
上均匀层 平均厚度 (m)	113	80	42	97	130	124	114	94
1%表面光强 平均深度 (m)	73	67	100	71	63	70	70	86
PO_4-P 跃层上界 平均深度 (m)	123	156	124	160 ¹⁾	173 ¹⁾	169 ¹⁾	—	96
NO_3-N 跃层上界 平均深度 (m)	113	82	104	125	136	152	99	86
出现 DO_{max} 频 率 (%)	50 ²⁾	0	83	52 ²⁾	9 ²⁾	35 ²⁾	65 ²⁾	—
出现 Chl. <i>a</i> 最大 值频率 ²⁾ (%)	76	35	96	70	95	74	91	76

1) 跃层上界不明显; 2) 不包括大于 100m 深度的最大值; 3) 最大值不明显。

表 2 DO_{max} (mg/L) 及 $(DO\%)_{max}$ 特征值

Tab. 2 Characteristic values of DO_{max} (mg/L) and $(DO\%)_{max}$

项 目	变化范围	平均值	平均值—表层平均值	ΔDO 范围
DO_{max}	6.39—7.23	6.72	0.60	0.09—0.63
$(DO\%)_{max}$	101.5—109.4	104.1	5.3	—

调查期间船测结果表明(表 3), El Niño 形成时期的 1986 年冬季, 赤道西太平洋海域盛行西风。1987 年 10 月西风开始减弱, 到 1988 年 5 月已完全消失 (McPhaden, 1988)。

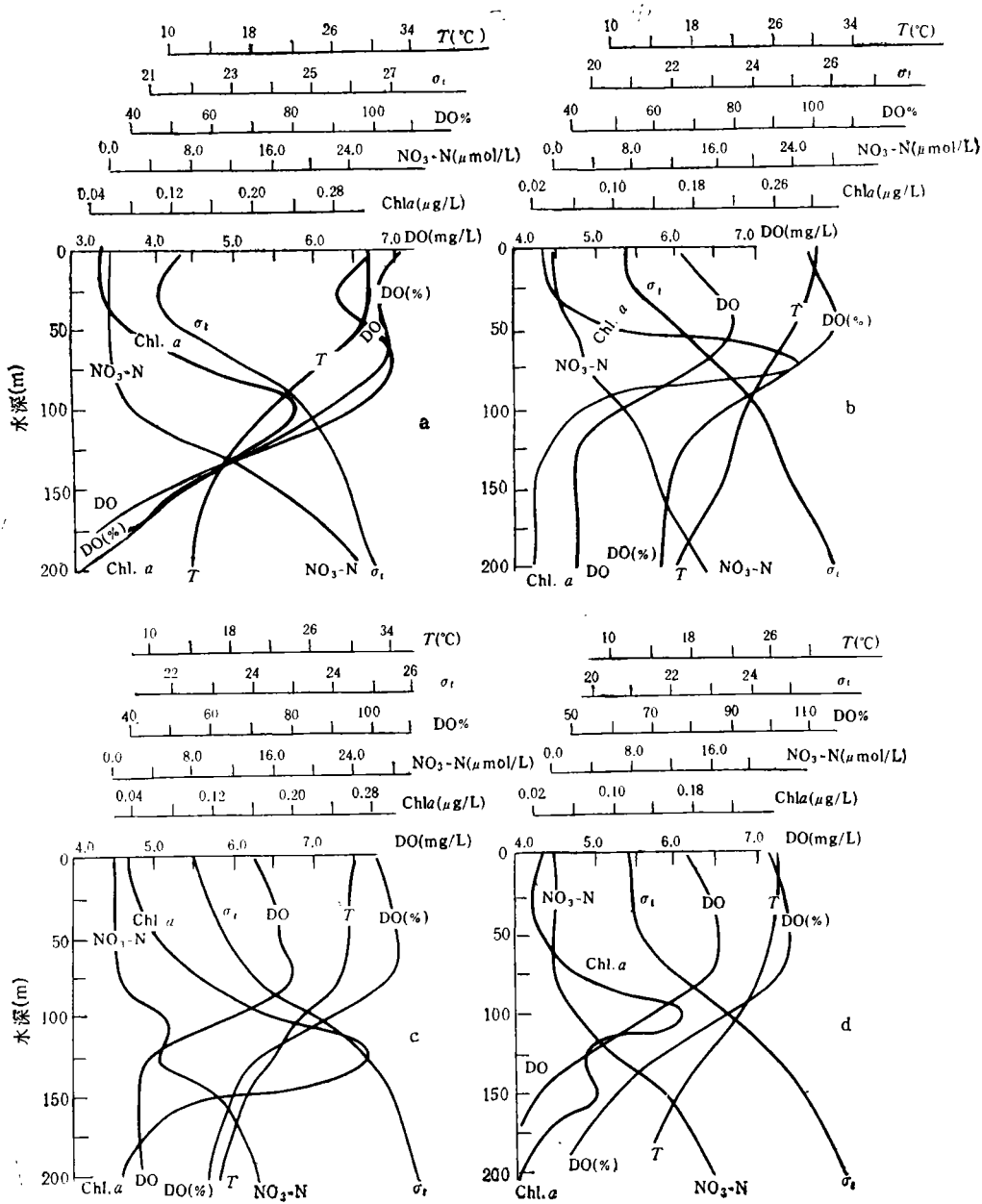


图 1 165°E DO, DO%, T, σ_t , Chl.a, NO₃-N 垂直分布

Fig. 1 Vertical distributions of DO, DO%, T, σ_t , Chl.a and NO₃-N at 165°E
a. 8°N; b. 1°N; c. 2°S; d. 5°S.

与此同时, 165°E (10°N—6°S) 断面温跃层平均深度由 1986 年 12 月的 80m 升至 1987 年 10 月的 42m, 与 141.5°E 处几乎相等 (表 4), 平均厚度由 140m 升至 180m, 1% 表面光强平均深度从 67m 加深到 100m。林洪英等 (1989) 分析南沙海域 DO 垂直分布最大值成因时认为, 在密度跃层下部, 由于内波的作用, 维持了不连续面的涡动混合, 使

表 3 不同时期部分风要素的平均值¹⁾

Tab. 3 Averaged values of some wind factors in different periods

时间	风 要 素	风 向							
		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1986年 11—12月	平均风速 (m/s)	4.4	8.8	8.2	10.0	4.7	5.1	8.1	7.1
	风 频 (%)	6.2	18.5	15.7	7.3	1.1	5.6	21.9	23.6
	最大风速 (m/s)	7.2	18.2	19.8	15.6	6.6	7.5	15.2	16.0
1987年 11—12月	平均风速 (m/s)	3.8	4.3	4.7	4.0	3.9	5.6	5.4	3.4
	风 频 (%)	4.8	11.3	12.4	7.5	19.4	12.9	16.7	8.1
	最大风速 (m/s)	6.7	8.7	7.8	8.2	10.3	10.3	10.3	7.2
1988年 11—12月	平均风速 (m/s)	4.4	7.8	6.7	7.0	3.9	3.3	0.0	3.1
	风 频 (%)	7.1	32.8	40.4	7.6	4.5	4.5	0.0	3.0
	最大风速 (m/s)	10.0	16.8	13.4	9.6	6.4	6.7	0.0	4.5

1) 表中数值由孙雄提供。

表 4 不同时期 165°E(10°N—6°S) 与 141.5°E(8°N—2°S) 海域温跃层平均深度

Tab. 4 Averaged depths of thermoclines at 165°E (10°N—6°S) and 141.5°E (8°N—2°S) areas in different periods

时 间	1986年 11—12月		1987年 9—10月		1988年 4—5月	
	165°E	141.5°E	165°E	141.5°E	165°E	141.5°E
位 置						
平均深度 (m)	80	60	42	38	97	77

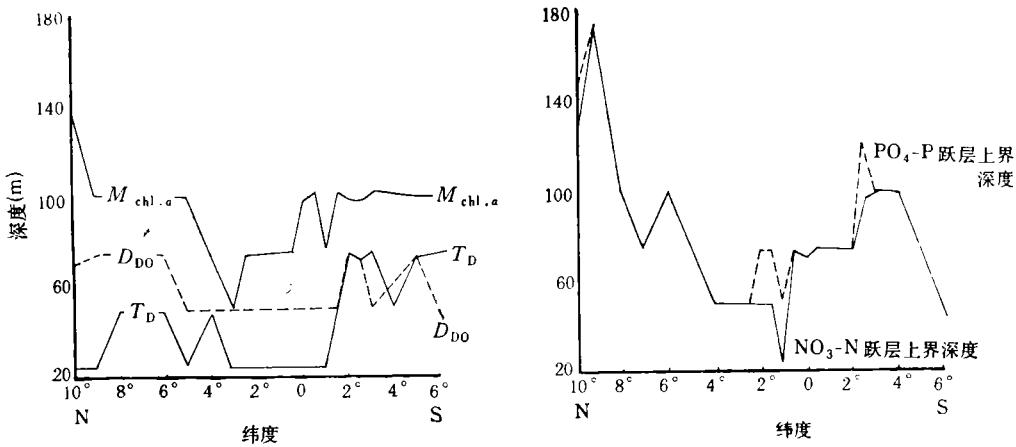


图 2 165°E(10°N—6°S) 温跃上层 (T_D), DO_{max} 深度 (D_{DO}), $Chl.a$ 最大值深度 ($M_{Ch1.a}$), NO_3-N 和 PO_4-P 含量跃层上层深度的变化

Fig. 2 Depth changes for the upper bound of thermocline (T_D), DO_{max} (D_{DO}), $Chl.a$ maximum ($M_{Ch1.a}$) and the upper bounds of jumping layers for nitrate and phosphate contents at 165°E (10°N—6°S)

该处富含营养盐又具有足够的光,为浮游生物的繁殖生长提供了一个良好的环境。Dale 等(1981)在分析温带开阔大洋中浮游生物和营养盐分布特征时指出,当混合层深度变浅、温跃层形成时,由于光照度的增强,混合层内浮游生物的生长速度也会相应地加快。1987年10月份 165°E(10°N—6°S)海区溶解氧含量在 50—75m 出现最大值是由于在 1986—1987年 El Niño 衰弱时期赤道附近次表层水的回升,不仅使混合层深度变浅、温跃层厚度变厚,而且给上层水带来较为丰富的营养盐,加上此时光照度的增强,使浮游植物在混合层处聚集快速繁殖生长产氧之故。

除生物光合作用会造成上层氧含量过饱和外,诸多物理过程亦会引起氧含量过饱和。当水温升高而 DO 含量保持恒定时将导致 ΔDO 增大。这种过程不会出现在年水温变化甚小的赤道中西太平洋海域。当不同盐度、温度 DO 饱和水相混时会使 DO 含量过饱和。西赤道太平洋表层水与次表层水间夹有一层过渡水层,其位置相当于最强温跃层所在的深度。由于跃层的垂直稳定度很大,阻碍了次表层高盐水与表层水的垂直混合(陈上及等,1990)。1987年10月研究区内 T, s, σ_t 垂直分布表明(图1),表层与次表层明显分层。由于表层水与次表层水垂直混合受到阻碍和上均匀层的屏蔽作用,混合层内光合作用所产生的氧不断地积聚于上均匀层下界的下方而使 DO 最大值处氧呈过饱和态。可见, DO_{max} 处的过量氧,生物光合作用放氧是主因,而物理作用是其形成的环境条件。

1987年10月研究海域内部分理化参数间的一元线性回归方程为(显著性水平 $\alpha = 5\%$, 统计量个数 n 为 19 或 26 时,相关系数 r 的临界值分别为 0.456 和 0.388);

$$\Delta DO = 2.648 - 3.142C_{NO_3-N} \quad (n = 19, r = -0.368) \quad (1)$$

$$\Delta DO = 2.452 - 5.650C_{NO_2-N} \quad (n = 19, r = -0.425) \quad (2)$$

$$Chl.a = 3.856 - 13.392C_{NO_3-N} \quad (n = 19, r = -0.435) \quad (3)$$

$$DO_{max} = 6.91 - 0.50C_{NO_2-N} \quad (n = 26, r = -0.370) \quad (4)$$

$$D_{NO_2-N} = 18.86 + 1.61D_{DO} \quad (n = 19, r = 0.670) \quad (5)$$

$$D_{DO} = 26.43 + 0.35D_{Chl.a} \quad (n = 19, r = 0.491) \quad (6)$$

式中, $C_{NO_3-N}, C_{NO_2-N}, Chl.a$ 分别为 DO_{max} 处硝酸盐 ($\mu\text{mol/L}$)、亚硝酸盐 ($\mu\text{mol/L}$) 和叶绿素 a ($\mu\text{g/L}$) 的含量; D_{DO}, D_{NO_2-N} 和 $D_{Chl.a}$ 分别为 DO_{max} 、亚硝酸盐最大值和叶绿素 a 最大值所在的深度 (m)。

硝酸盐是海洋无机氮硝化过程中的最终产物,又是浮游植物生长过程中必不可少的营养成分。叶绿素含量高意味着生物的造氧能力大。从式(1)—(6)可看出,研究水域内上层水体同时存在化学耗氧(硝化过程)和生物放氧两个相反过程。在温度、盐度和跃层稳定的水体中出现 DO_{max} 和 DO 含量过饱和是由于浮游植物在该水层聚集生长使生氧量大于耗氧量之故。

3 结论

正常水文条件下研究海域 DO 垂直分布不会出现明显的 DO_{max} 和 $(DO\%)_{max}$ 。较大强度的水文学跃层形成的水体稳定性是 DO 层化现象的基本条件。1987年冬季是 1986—1987年 El Niño 衰退时期,赤道西太平洋西向风开始减弱,地处东、西太平洋赤道上层水交汇区的 165°E 赤道附近次表层水开始回升使上均匀层厚度变薄,温跃层厚度增厚而上界抬高,水体稳定性增强,1% 表面光强深度加深,上均匀层内营养盐含量下降

而混合层内升高,最终导致在 50—75m 水深处出现明显的 DO_{max} 和过饱和现象。 DO_{max} 的位置在上均匀层下界的下方,Chl.*a* 含量最大值和 NO_3-N, PO_4-P 跃层上界深度的上方。上述异常现象是一定时期一定海区海洋理化环境短期变异引起浮游生物聚集成层分布生长而使该水层生氧量大于耗氧量且不断累积的反映。进一步研究赤道太平洋 165°E 海域 DO 垂直分布特性,对了解 El Niño 的形成、发展、衰退乃至消失诸过程是很有益的。

参 考 文 献

- 顾宏堪等, 1980, 黄海溶解氧垂直分布的最大值, 海洋学报, 2(2): 70—78。
 刁焕祥等, 1984, 南海溶解氧垂直分布最大值, 海洋学报, 6(6): 770—780。
 杨嘉东等, 1988, 南海中部海域环境资源综合调查报告, 海洋出版社(北京), 95。
 林洪瑛、韩舞鹰, 1989, 我国低纬度海水中 O₂ 最大值的初步研究, 海洋学报, 11(2): 162—169。
 陈上及、杜兵, 1990, 西赤道太平洋上层水水团的划分, 海洋学报, 4(12): 405—415。
 Dale, A. Kief and James N. Kremer, 1981, Origins of vertical patterns of phytoplankton and nutrients in the temperate, open ocean: a stratigraphic hypothesis, *Deep-Sea Res.*, 28A (10): 1087—1105。
 Michael L. Bender and Michael J. McPhaden, 1990, Anomalous nutrient distribution in the equatorial Pacific in April 1988: evidence for rapid biological uptake, *Deep-Sea Res.*, 37 (7): 1075—1084。
 McPhaden, M. J. et al. 1988, Variability in the western equatorial Pacific Ocean during the 1986—1987 El Niño/Oscillation event, *Air-Sea Interaction in Tropical Western Pacific*, China Ocean Press (Beijing), 41—58。
 Shulenberg, E. and Reid, J. L., 1981, The Pacific shallow oxygen maximum, deep chlorophyll maximum, and primary productivity, reconsidered, *Deep-Sea Res.*, 28A (9): 901—919。

AN ANALYSIS OF ABNORMAL VERTICAL DISTRIBUTION OF DISSOLVED OXYGEN AT 165°E EQUATORIAL PACIFIC OCEAN

Wang Mingbiao, Li Jie

(South China Sea Administration, SOA, Guangzhou 510300)

ABSTRACT

Based on the comprehensive investigation results of eight cruises of US-PRC TOGA, we have analysed the mechanism of the maximum of dissolved oxygen occurred in sub-surface water at 165°E Tropical Pacific Ocean (10°N—6°S) from 1986 to 1990. The sub-surface water in the sea area near the equator, which fell during the prevail of El Niño, had gone again during the decline of El Niño in 1986—1987. As a result, the physical-chemical environment occurred in this area was similar to that in the middle latitude or high latitude in a short period. Plankton grew considerably in the mixed layer, which caused the supersaturation or maximum of dissolved oxygen occurred in the sub-surface water of that area.

Key words Western Tropical Pacific Ocean Vertical distribution

DO_{max}