

# 台湾海峡海域表观耗氧量之研究\*

陈水土 阮五崎

(福建海洋研究所, 厦门 361012)

**提要** 台湾海峡海域 1983—1988 年多次调查资料表明, 该海域夏季表观耗氧量(AOU)变化幅度较大, 其分布特征呈近岸、底层高, 向上层、外海递减, 诸上升流是其主要控制因素。各上升流区 AOU 与温度、盐度、诸营养盐呈显著相关关系。PO<sub>4</sub>/AOU 与 NO<sub>3</sub>/AOU 比值平均分别为 0.0058 和 0.076。上升流海域夏季初始营养盐[PO<sub>4</sub>]<sub>pre</sub> 和 [NO<sub>3</sub>]<sub>pre</sub> 较低, 而再生营养盐高, 是现场营养盐的主要部分。有机物质分解耗氧对 AOU 的贡献比浮游动物等呼吸耗氧更重要。

**关键词** 表观耗氧量 初始营养盐 近岸上升流 台湾海峡

表观耗氧量(AOU)定义为:

$$AOU = [O_2]^* - [O_2]_t \quad (1)$$

式中, [O<sub>2</sub>]<sub>t</sub> 表示海水中溶解氧含量的实测值; [O<sub>2</sub>]<sup>\*</sup> 表示水体在 1Pa 时、现场特定的温度、盐度条件下溶解氧的饱和含量。溶解氧的表观消耗不仅与水体交换有关, 而且与同时发生的营养物质的变化有关。研究 AOU 对于大洋中水团混合、海洋生物地球化学以及生物生产力等研究, 都有重要的意义。已有不少报道涉及台湾海峡局部海域 AOU 的关系及其垂直变化 (Hung, 1971; 戴民汉等, 1991; 庄万金, 1992; 文景烟, 1982)。但是, 有关台湾海峡海域 AOU 的化学特征, 还有待于系统研究。本文拟通过台湾海峡多次调查研究的资料, 着重讨论全海域表观耗氧量的分布变化特征及其与温度、盐度、营养盐等因素的关系, 揭示该海域 AOU 的化学特征及其与上升流的关系。

## 1 资料与方法

所用的海水化学、水文、海洋生物和初级生产力等调查资料取自于: 福建海洋研究所 1983 年 5 月—1984 年 5 月台湾海峡中北部海洋综合调查; 1987 年 7 月—1988 年 7 月福建海洋研究所与中国科学院海洋研究所合作的研究; 1987 年 12 月—1988 年 11 月福建海洋研究所与厦门大学海洋系、福建省海洋水产研究所等合作的闽南—台湾浅滩渔场上升流研究; 福建海洋研究所 1986 年 1 月—1987 年 5 月台湾海峡中部海洋综合调查。

温度、盐度、溶解氧含量及 NO<sub>3</sub>, PO<sub>4</sub>, SiO<sub>3</sub> 诸营养盐为现场测定, 测定方法按海洋调查规范执行, 单位为 μmol/L。表观耗氧量由现场测定的资料按公式(1)计算得出, 溶解氧与 AOU 的单位为 mmol/L。

\* 国家自然科学基金资助项目, 4860241 号。陈水土, 男, 出生于 1943 年 4 月, 副研究员。

参加调查工作的还有杨尧、吴丽云、张钊、郑瑞芝等。水温资料和浮游生物量资料分别由本所海洋水文气象室和海洋生物研究室提供。谨志谢忱。

收稿日期: 1995 年 2 月 20 日, 接受日期: 1995 年 5 月 20 日。

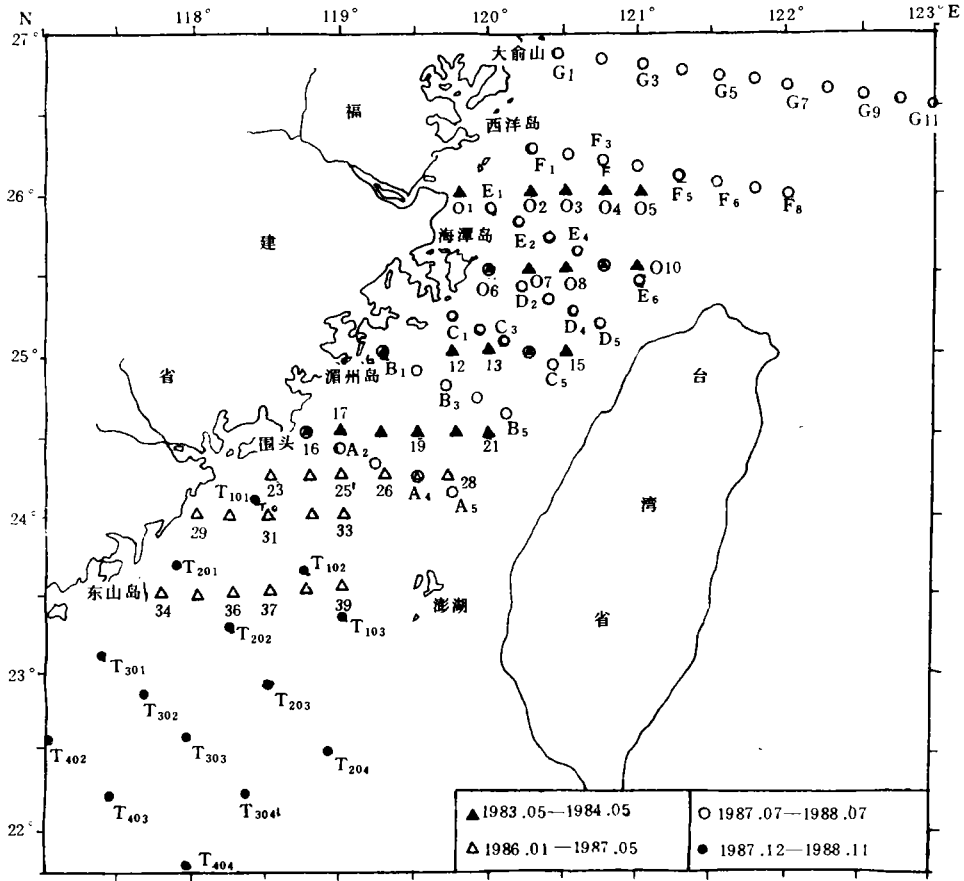


图1 多次调查研究的观测站位分布

Fig.1 Location of stations and data of cruises in the Taiwan Strait

## 2 结果与讨论

2.1 表观耗氧量的分布变化特征 台湾海峡海域 AOU 的分布变化规律在夏季与冬季有明显不同的特征。

夏季,台湾海峡全海域 AOU 变化幅度皆较大(-47.59—81.18)。近岸、底层区, AOU 较高且变化大,水温较低,盐度较高;远岸、上层区, AOU 较低且多数为负值,水温较高,盐度较低(表 1)。表层 AOU 分布除在海潭岛至围头一带近岸和澎湖北面海域出现 AOU>0 外,一般为负值,西北部沿岸达-40(图 2)。10m 至底层各层 AOU 的平面分布趋势相似,呈西部沿岸高,向东南、外海递减,由上层向下层渐增的规律;西侧近岸水域,存在着一条与岸线平行的带状 AOU 相对高值区,远岸海域 AOU 多为负值,且分布较均匀(图 2)。AOU 的断面分布一般呈近岸、底层较高,向上层、向外海递减的规律。东部海域 AOU 分布较均匀。西部近岸上层 AOU 垂直变化梯度较大,随离岸距离的增加,等值线向下移动(图 3)。分布特征明显反映了低温、高 AOU 的深层水沿坡向岸涌升的现象。北部 F, G 断面 50m 层以下水域,以及台湾浅滩边缘海域也出现高 AOU 的深层水局部涌升现象。

表1 夏季台湾海峡各区域表观耗氧量、水温、盐度比较

Tab.1 The comparison of AOU, T, S in the Taiwan Strait in summer

时间 (年·月)	区域		AOU			温度(℃)平均值	盐度 平均值
			平均值	变化范围	-N% <sup>1)</sup>		
1983.07	台湾海峡 中北部	上层	-7.41±9.73	-34.18—27.42	89	26.86±1.50	33.70±0.40
		下层	6.23±12.3	-16.04—31.12	59	25.61±1.49	33.85±0.39
1986.08	台湾海峡 中部	上层	6.70±10.07	-8.09—25.93	25	27.15±1.12	33.21±0.23
		下层	22.62±6.80	12.51—32.69	0	25.93±1.20	33.41±0.25
1988.07	闽南—台 湾浅滩	上层	-0.47±13.85	-19.06—47.47	70	26.30±1.76	33.57±0.39
		下层	27.76±22.81	-2.08—81.18	5	23.75±2.03	34.09±0.32
1988.07	海峡中 北部近岸	上层	-0.60±17.36	-47.59—51.44	48	27.26±1.39	33.62±1.96
		下层	22.13±19.26	-8.33—65.61	4	24.84±1.02	34.40±0.12
1988.07	海峡中北部远岸		-0.09±5.64	-10.31—10.33	53	27.57±1.13	34.19±0.09
1988.07	台湾 北面海域	上层	-5.03±4.39	-15.87—2.00	83	28.44±1.02	34.06±0.29
		下层	33.67±27.53	2.05—71.96	0	22.60±3.82	34.43±0.20

1) -N% 表示 AOU<0 的水样数占总数的比例(表2同)。上层: 0—30m, 下层:>30m。

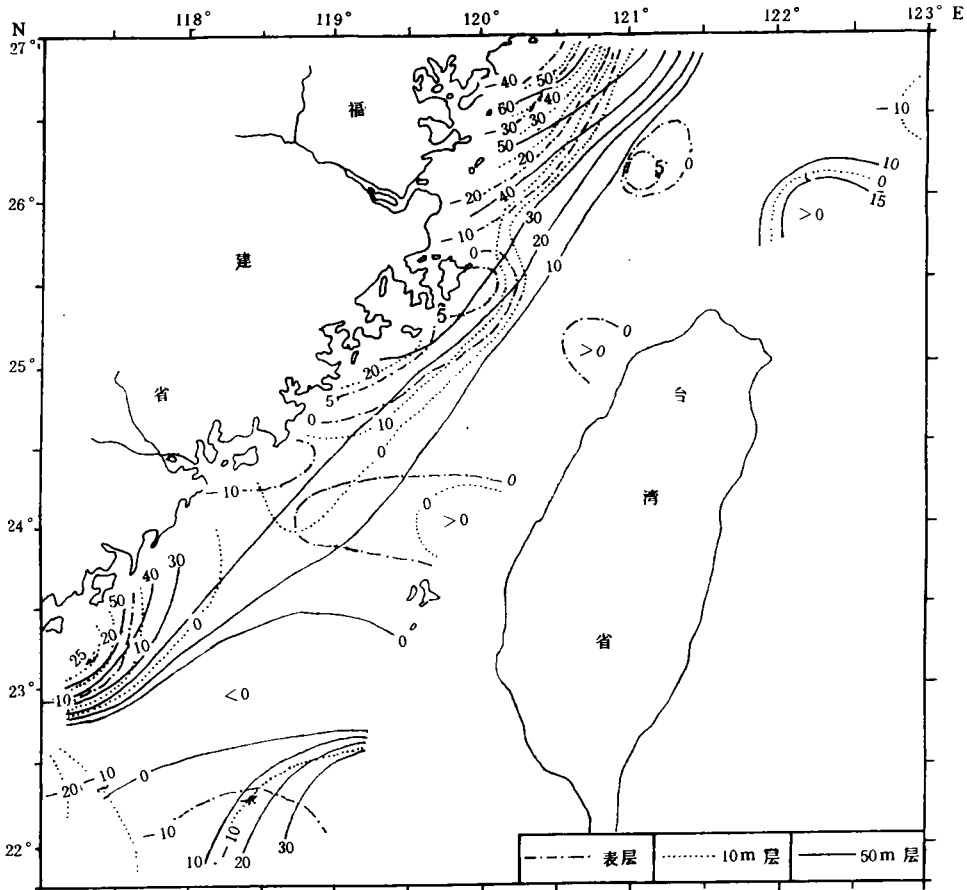


图2 1988年7月 AOU 的平面分布

Fig.2 Horizontal distributions of AOU in July, 1988, in the Taiwan Strait

冬季,台湾海峡南北各区域 AOU 上下层变化幅度皆较小,除个别站外,全海域 AOU 较低且多数为负值,尤其是南部海域,大部分时间、大部分测站都处于氧饱和状态(表 2)。AOU 平面分布和断面分布有明显的区域性差异,体现浙闽沿岸水对该海域的控制作用(图 4b,c),以及海峡暖流水的影响依然存在(图 4a)。

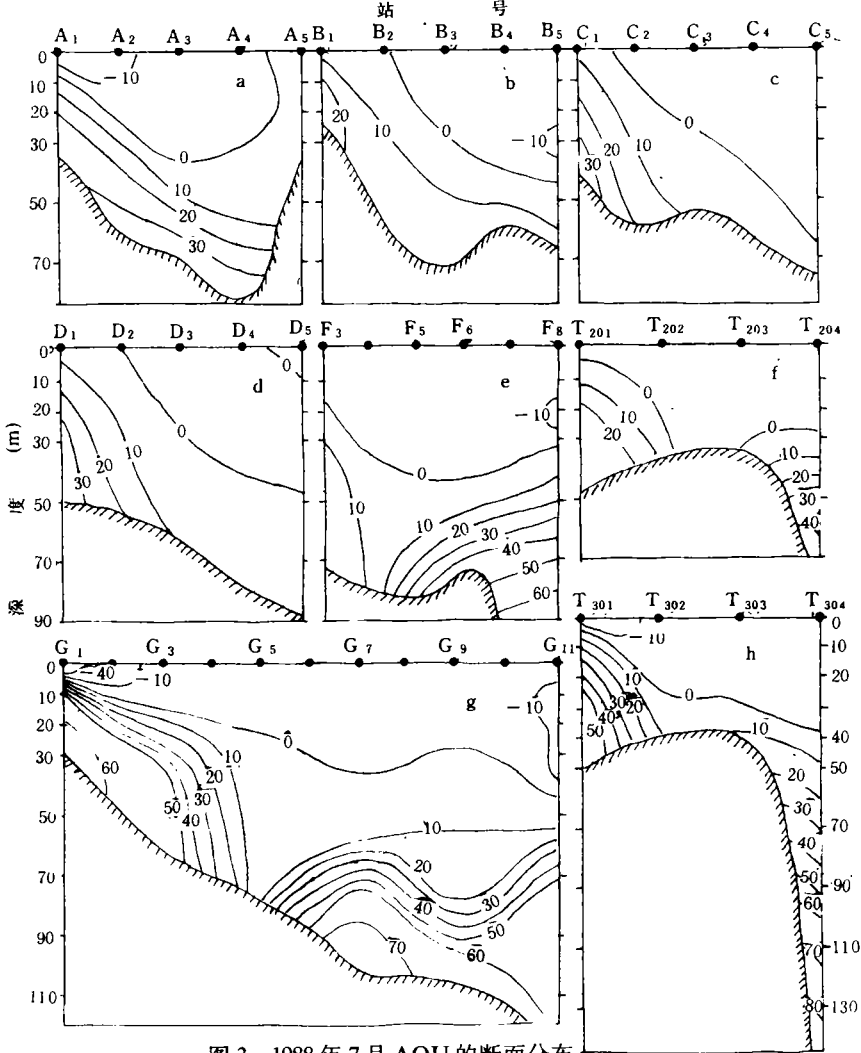


图 3 1988 年 7 月 AOU 的断面分布  
Fig.3 Vertical distributions of AOU in July, 1988 in the Taiwan Strait

表 2 冬季台湾海峡各区域表观耗氧量比较

Tab.2 The comparison of AOU in the Taiwan Strait in winter

时间 (年·月)	区域	全域平均值 -N%	上层 变化范围	下层 变化范围
1987.12	闽南-台湾浅滩	-40.56±6.811 00	-54.58—-28.14	-48.40—-30.15
1986.12	海峡中部海域	-0.35±24.887	-23.40—61.16	-21.47—73.08
1983.12	海峡中北部海域	-9.52±6.01	-23.62—13.54	-17.76—0.0



表 3 各上升流区海域 AOU 与温度、盐度、营养盐的相关关系

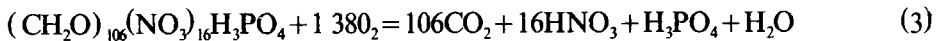
Tab.3 The correlation coefficient between AOU and temperature, salinity and nutrients in the upwelling areas in the Taiwan Strait

时间(年·月)	区 域	T	S	PO <sub>4</sub> -P	NO <sub>3</sub> -N	SiO <sub>3</sub> -Si
1988.07	海峡中北部远岸海域	-0.5831 <sup>1)</sup>	0.3419 <sup>2)</sup>	0.5866 <sup>1)</sup>	-0.1158	-0.0182
1988.07	海峡中北 上层	-0.5124 <sup>2)</sup>	0.1796	0.6957 <sup>1)</sup>	0.2307	0.2886
	部近岸海域 下层	-0.8527 <sup>1)</sup>	0.5548 <sup>1)</sup>	0.9258 <sup>1)</sup>	0.3916 <sup>2)</sup>	0.9152 <sup>1)</sup>
1988.07	台湾浅滩附近海域	-0.9347 <sup>1)</sup>	0.7744 <sup>1)</sup>	0.9168 <sup>1)</sup>	0.9240 <sup>1)</sup>	0.8803 <sup>1)</sup>
1988.07	闽南-粤东近岸	-0.8470 <sup>1)</sup>	0.7514 <sup>1)</sup>	0.8582 <sup>1)</sup>	0.9542 <sup>1)</sup>	0.9437 <sup>1)</sup>
1988.07	台湾北部 上层	-0.0570	-0.2756	-0.3488	-0.1406	-0.2085
	海域 下层	-0.9726 <sup>1)</sup>	0.8829 <sup>1)</sup>	0.8504 <sup>1)</sup>	0.5620 <sup>2)</sup>	0.9515 <sup>1)</sup>
1986.08	台湾海峡 上层	-0.9129 <sup>1)</sup>	0.6133 <sup>1)</sup>	0.8410 <sup>1)</sup>	-0.1840	0.8440 <sup>1)</sup>
	中部海域 下层	-0.8488 <sup>1)</sup>	0.8399 <sup>1)</sup>	0.5513	0.0513	0.4858
1988.07	闽南-台湾 上层	-0.7507 <sup>1)</sup>	0.5401 <sup>2)</sup>	0.8403 <sup>1)</sup>	0.9002 <sup>1)</sup>	0.8872 <sup>1)</sup>
	浅滩海域 下层	-0.9362 <sup>1)</sup>	0.7623 <sup>1)</sup>	0.8499 <sup>1)</sup>	0.9010 <sup>1)</sup>	0.8620 <sup>1)</sup>
1983.07	台湾海峡 上层	-0.5296 <sup>1)</sup>	0.2029	0.3478 <sup>2)</sup>	0.6145 <sup>1)</sup>	—
	中北部海域 下层	-0.8772 <sup>1)</sup>	0.4431 <sup>1)</sup>	0.8631 <sup>1)</sup>	0.8369 <sup>1)</sup>	—

1) 表示显著性水平  $\alpha=0.001$ ; 2) 表示  $\alpha=0.01$ ; (上层区为  $<30\text{m}$ , 下层区为  $>30\text{m}$ )。表4 同。

式中,  $C_{\text{pre}}$  为营养盐  $\text{PO}_4$  和  $\text{NO}_3$  的初始浓度;  $k$  为 Redfield 比值。只有当  $C_{\text{pre}}$  为一常数时, 营养盐对 AOU 线性方程的斜率才等于 Redfield 比值。实际上, 上述所讨论的海域并不是这样。上述海域  $[\text{PO}_4]$  和  $[\text{NO}_3]$  浓度对 AOU 作线性回归方程(表 4), 其斜率分别为  $\text{PO}_4/\text{AOU}=0.0039-0.0090$ , 平均 0.0058;  $\text{NO}_3/\text{AOU}=0.0516-0.0972$ , 平均 0.076(不计相关性差的), 均比 Redfield 比值(分别为 0.0072 和 0.116)小得多。

海水中实测的溶解氧含量与特定温度、盐度下计算的氧饱和量之间的任何差异, 都被认为是由于光合作用或有机物质的氧化所造成, 因此表观耗氧量(或产氧量)将与伴随这些过程所发生的营养盐变化有关, 这些关系导出海洋中光合作用与氧化作用的化学计算模式如下(Riley et al., 1975):



就是说, 每生成一个磷原子和一个氮原子需消耗的氧原子分别为 276 个和 17.2 个。本海域平均  $\Delta\text{O}/\Delta\text{P}=346$ ,  $\Delta\text{O}/\Delta\text{N}=26.4$ , 比值较高。

在上述  $[\text{PO}_4]$  和  $[\text{NO}_3]$  浓度对 AOU 的线性方程中(表 4), AOU 等于 0 时的截距与  $C_{\text{pre}}$  相对应。在大洋上层水体, 初始营养盐浓度一般为零(Wen et al., 1989), 但近岸水域情况较复杂。本研究海域现场营养盐分布一般呈近岸、底层高, 向上层、外海递减。近岸、底层水域初始营养盐浓度一般低于现场营养盐; 上层、远岸海域初始营养盐略高于下层水域(表 5)。这说明上层及远岸海域由于浮游植物光合作用产氧(AOU  $< 0$ )消耗营养盐, 现场营养盐一般略低于初始营养盐, 而近岸底层海域, 上升流发育强盛, 初始营养

表4 AOU与 $PO_4-P$ ,  $NO_3-N$ 的线性回归方程Tab.4 A liner correlation between AOU and  $PO_4-P$ ,  $NO_3-N$ 

时间(年·月)	区域		线性回归方程		n
1988.07	海峡中北部近岸	上层	$PO_4=0.14+0.0039AOU$ (0.753 <sup>1)</sup> ), $NO_3=4.25+0.0066AOU$ (0.056)		21
		下层	$PO_4=0.066+0.0065AOU$ (0.943 <sup>1)</sup> ), $NO_3=2.42+0.0516AOU$ (0.356 <sup>2)</sup> )		25
1988.07	台湾浅滩海域		$PO_4=0.170+0.0049AOU$ (0.879 <sup>1)</sup> ), $NO_3=0.37+0.0972AOU$ (0.908 <sup>1)</sup> )		10
1988.07	闽南粤东近岸		$PO_4=0.236+0.0043AOU$ (0.777 <sup>1)</sup> ), $NO_3=0.14+0.0715AOU$ (0.978 <sup>1)</sup> )		18
1988.07	台湾北部海域		$PO_4=0.053+0.0077AOU$ (0.862 <sup>1)</sup> ), $NO_3=1.57+0.0798AOU$ (0.632 <sup>1)</sup> )		19
1986.08	台湾海峡中部		$PO_4=0.020+0.0084AOU$ (0.764 <sup>1)</sup> ), $NO_3=0.41+0.0208AOU$ (0.576 <sup>2)</sup> )		16
1983.07	海峡中北部		$PO_4=0.179+0.0090AOU$ (0.511 <sup>1)</sup> ), $NO_3=1.22+0.0914AOU$ (0.737 <sup>1)</sup> )		136
1987.12	闽南台湾浅滩		$PO_4=-0.16-0.011 AOU(-0.502^{1})$ , $NO_3=-7.81-0.31 AOU(-0.53^{1})$ )		35

表5 现场营养盐与初始营养盐浓度比较

Tab.5 The comparison of the concentration of nutrients at site and preformed nutrients

时间 (年·月)	区域		$PO_4-P$		$[PO_4]_{pre}$		$NO_3-N$		$[NO_3]_{pre}$	
			平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围	平均值	变化范围
1988.07	海峡中 北部近岸	上层	0.14	0.0—0.26	0.11	0.0—0.34	3.99	0.28—9.08	3.93	0.06—9.89
		下层	0.22	0.06—0.39	0.06	0.0—0.17	3.62	0.68—9.69	2.88	0.94—6.44
1988.07	中北部远岸		0.06	0.01—0.13	0.06	0.0—0.14	3.59	0.24—8.29	3.63	0.05—8.96
1988.07	台湾浅滩海域		0.23	0.09—0.67	0.16	0.02—0.24	1.59	0.19—10.3	0.84	0.12—1.92
1988.07	闽南粤东近岸		0.27	0.11—0.48	0.18	0.02—0.32	1.28	0.11—4.42	0.72	0.11—2.54

盐浓度相对较低, 但再生营养盐部分所占比例较大。

冬季, 闽南台湾浅滩海域  $PO_4$ ,  $NO_3$  营养盐对 AOU 线性回归方程的斜率(表4)较夏季大,  $PO_4/AOU = -0.011$ ,  $NO_3/AOU = -0.31$ , 大于 Redfield 比值。水体  $AOU < 0$ , 光合作用产氧且消耗营养盐, 初始营养盐浓度高于现场营养盐。

**2.4 AOU 与生物生产力关系** 海洋生物的呼吸作用及水中各种有机物质氧化分解消耗氧, 而浮游植物光合作用产生氧, 因此, 对于水中表观耗氧量的变化和分布, 生物活动是另一重要的、直接的影响

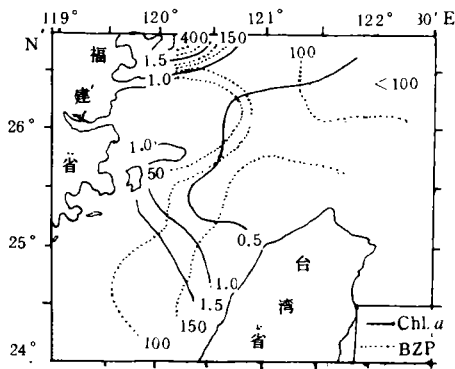


图5 chl.a 与 BZP 的平面分布(1988年7月)  
Fig.5 Horizontal distributions of chlorophyll a and biomass of zooplankton in July, 1988

因素。

在中北部近岸 10m 层至底层 AOU 高值的带状海域(图 2), 叶绿素 chl. a 相对较高(含量变化范围在 0.102 — 3.17, 水柱平均皆  $>0.5\text{mg}/\text{m}^3$ , 局部区域  $>1.0$ ), 但浮游动物总生物量(BZP)较低, 一般  $<100\text{mg}/\text{m}^3$ (除西北部  $G_1$  站外)(图 5)。在 AOU 为负值或较小的上层、远岸海域与台湾北部海域, chl. a 都较低(变化范围分别为 0.034 — 1.44 和 0.078 — 1.01 $\text{mg}/\text{m}^3$ ), BZP 分别为 138 和 108 $\text{mg}/\text{m}^3$ , AOU 与 chl. a, BZP 的相关性甚差。

1983 年 7 月西部沿岸表层局部产氧高值( $>15$ )的湄州岛至海潭岛海域, chl. a 较高( $>1.0$ ), 浮游植物较密集( $>10^7$  个/ $\text{m}^3$ ), 但浮游动物量较低(50 — 100 $\text{mg}/\text{m}^3$ )。在西南部围头外海附近海域, 浮游植物量低( $<10^6$  个/ $\text{m}^3$ , chl. a  $<0.5\text{mg}/\text{m}^3$ ), 浮游动物量较高, AOU 低(底层  $<10$ , 表层  $>-10$ )(图 6)。

上述事实说明生物活动在水体中产生的各种生物碎屑、排泄物、分泌物等有机物质的分解耗氧比浮游动物呼吸耗氧对表观耗氧量的贡献更大。西部近岸海域尽管 chl. a 高, 浮游植物光合作用产氧较高, 但海域 AOU 高, 近岸上升流是其主要控制因素。

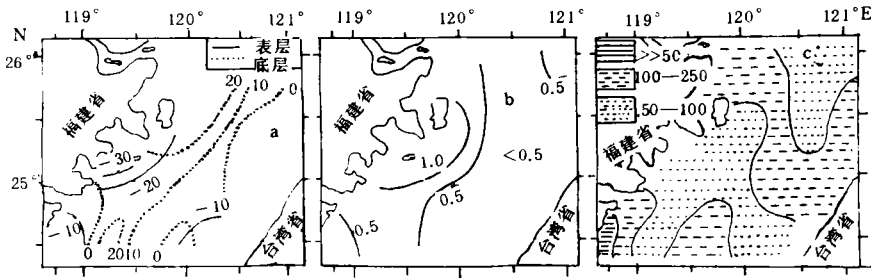


图 6 AOU(a), chl. a (b) 与 BZP (c) 的平面分布 (1983 年 7 月)

Fig.6 Horizontal distributions of AOU (a), chlorophyll a (b) and biomass of zooplankton (c) in July, 1983

### 3 结语

**3.1** 台湾海峡夏季 AOU 变化幅度较大。表层与远岸海域大多为负值, 近岸及下底层 AOU 高, 且呈向上层、外海递减的分布趋势。近岸上层局部海区 AOU 垂直变化梯度大, 反映深层水沿坡抬升现象。冬季全海域 AOU 多数为负值。

**3.2** 福建沿岸上升流、粤东沿岸上升流、台湾浅滩边缘上升流及台湾北部海域冷水涌升等是台湾海峡夏季 AOU 分布特征的控制因素。AOU 与温度呈明显的负相关关系, 而与盐度呈正相关关系。

**3.3** 台湾海峡海域 AOU 与营养盐 $[\text{PO}_4]$ 和 $[\text{NO}_3]$ 浓度呈较好的正相关关系,  $\text{PO}_4/\text{AOU}$ 和  $\text{NO}_3/\text{AOU}$  比值平均分别为 0.0058 和 0.076。

**3.4** 上层、远岸海域初始营养盐浓度略高于现场营养盐, 而近岸底层海域初始营养盐浓度较低, 但再生营养盐所占比例高, 现场营养盐含量高。

**3.5** 水中生物活动产生的各种有机物质分解耗氧比浮游动物呼吸耗氧对 AOU 的贡献



更大。

## 参 考 文 献

- 文景烟, 1982, 海洋学报, 4(6): 697—702.
- 庄万金, 1992, 台湾海峡, 11(1): 42—48.
- 陈水土等, 1991, 闽南—台湾浅滩渔场上升流区生态系研究, 科学出版社(北京), 179—188.
- 陈水土等, 1992, 热带海洋, 11(3): 29—36.
- 陈水土等, 1995, 热带海洋, 14(1): 1—8.
- 戴民汉等, 1991, 闽南—台湾浅滩渔场上升流区生态系研究, 科学出版社(北京), 198—204.
- Chen Shuitu et al., 1992, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 10(2): 168—177.
- Hung Tsuchang, 1971, *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1: 55—68.
- Riley, J. P. 等著, 1975, 崔清晨等译, 1982, 化学海洋学, 2, 海洋出版社(北京), 283—297, 327—375.
- Wen Liangaw et al., 1989, *Acta Oceanographica Taiwanica*, 23: 19—23.

## STUDY ON APPARENT OXYGEN UTILIZATION IN THE TAIWAN STRAIT AREA

Chen Shuitu, Ruan Wuqi

(Fujian Institute of Oceanology, Xiamen 361012)

**Abstract** Taiwan Strait oceanographic survey data (temperature, salinity, dissolved oxygen and nutrients of  $\text{NO}_3$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{SiO}_3$  were measured at site) obtained in 1983 to 1988 showed that apparent oxygen utilization (AOU, calculated by “[ $\text{O}_2$ ] $^s$ —[ $\text{O}_2$ ] $^o$ ,” based on survey data at site) in the whole Taiwan Strait was relatively low in winter and had more change in summer. The nearshore and bottom waters were characterized by relatively high and more changing AOU with distributions decreasing upward and offshoreward. There was a close layer of large vertical changes of AOU in the local upper water of the offshore areas. Upwellings controlled the characteristics of AOU distribution in the areas in summer. Significant correlations between AOU and temperature, salinity, nutrients [ $\text{PO}_4$ ], and [ $\text{NO}_3$ ], respectively, were found in the upwelling areas.

The averages of  $\text{PO}_4/\text{AOU}$  and  $\text{NO}_3/\text{AOU}$  ratios in the areas were respectively 0.0058 and 0.076, and smaller than the Redfield ratio. There were the relatively low preformed nutrients concentrations, but the high concentrations of field and regenerated nutrients in the nearshore and bottom water areas. The regenerated nutrients comprised a major part of the field nutrients in the upwelling areas in summer.

**Key words** Apparent oxygen utilization Preformed nutrients Nearshore upper water Taiwan Strait