

热带西太平洋定点海域($4^{\circ}\text{S}156^{\circ}\text{E}$)营养盐变化规律及降水对海水营养物质影响的研究

宋金明 李鹏程 詹滨秋

(中国科学院海洋研究所)

海水中的 N, P, Si 是海洋中最基本的营养物质,对海洋浮游生物的生存、繁殖、海洋生物食物链结构和新陈代谢,以及海洋中物质的循环都具有重要的意义,一直是海洋学研究的重要内容之一,几乎世界上海洋的各个区域都有其研究报道。中国陆架海中营养物质的研究已进行了 40 多年,获得了大量的资料和重要的研究成果。随着我国海洋科学的发展,近年来陆续开展了世界大洋、极地海的营养盐研究,并有一些报道(顾宏堪,1992;宋金明,1995,1996;Hecky 等,1993),但对世界大洋定点长周期的营养盐变化观测研究和降水对表层海水的输入影响长周期定点系列观测还未见报道。热带西太平洋海域有一个世界海洋中最大的高温、高盐“暖池(WPWP)”,这里进行着地球上强烈的海-气相互作用,所以,研究该海域海水中营养盐的变化规律,对系统研究海洋对气候的调节作用,乃至全球气候变化都具有重要意义。本文通过对 $4^{\circ}\text{S}, 156^{\circ}\text{E}$ 长达 4 个月的定点观测,研究了上层海水、深水中营养盐的变化、营养盐的周日变化及降水对表层海水营养盐输入的影响,本文为 TOGA-COARE 研究的一部分。

一、方 法

1992 年 11 月至 1993 年 2 月“科学一号”调查船在 $4^{\circ}\text{S}, 156^{\circ}\text{E}$ (TOGA-COARE IOP) 抛锚,每 6 天对上层水(0—300m)用南森采水器进行一次观测,层次设置为 0, 50, 100, 150, 200, 300m 层。1992 年 12 月 12 日和 1993 年 1 月 23 日分别进行一次深水观测,层次设置为 0, 50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1600m 层。1992 年 11 月 17—18 日和 1993 年 1 月 13—14 日对上层水进行每 4 小时观测一次的周日观测,取得水样后,立即用玻璃电极、铂片电极、Ag-Ag₂S 膜电极和饱和甘汞电极测得海水的 pH, Eh, Es, 并用 Es 求得 -2 价硫 $\Sigma\text{S}(-\text{II})$ 浓度(宋金明,1996), pH 测定准确度为 ± 0.01 , Eh 为 $\pm 2\text{mV}$, $\Sigma\text{S}(-\text{II})$ 测定误差为 $\pm 5\%$ 。用磷钼蓝分光光度法测定 $\text{PO}_4\text{-P}$, 硅钼蓝分光光度法测定 $\text{SiO}_3\text{-Si}$, 磺胺-盐酸萘乙二胺偶氮分光光度法测定 $\text{NO}_2\text{-N}$, 次溴酸钠氧化偶氮分光光度法测定 $\text{NH}_4\text{-N}$, 同时对降水及降水前后表层海水进行取样,然后重复以上观测。

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 2718 号。
收稿日期:1995 年 10 月 30 日

二、结果与讨论

1. 上层水中营养盐的变化 表1是4个月中 $\text{PO}_4\text{-P}$, $\text{SiO}_3\text{-Si}$, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 在上层水各层中的平均浓度,从表中可以看出,4种组分在不同层次中最大值出现的月份不同。对于同层次来说,2月的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 较低, $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 也较低。12月份的 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 较低, $\text{PO}_4\text{-P}$ 的最高与最低浓度相差2.8倍, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 相差2.1倍, $\text{NO}_2\text{-N}$ 相差4.1倍, $\text{NH}_4\text{-N}$ 相差11.8倍,说明该海域营养盐的不同月际变化较大,但共同的趋势是随着深度的增加,在不同月份中同层次浓度差别减小,差别最大的在真光层内,说明真光层内浮游生物对N,P,Si的影响甚大。图1是4个月总平均浓度在上层水中的垂直分布,由图可见, $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的分布相类似, $\text{PO}_4\text{-P}$ 在50m左右出现最小值, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 则随深度的增加而增加, $\text{NO}_2\text{-N}$ 在100m左右有一最大值, $\text{NH}_4\text{-N}$ 在200m左右有一最小值,这种垂直分布特性与每种组分的生物化学特性密切相关。Si是受生物活动影响最小的元素,随着深度的增加,压力增大,生物体分解出的Si亦增加,这是Si的主要控制因素。在次表层由于浮游生物量最大,生物吸收的P远远大于生物分解释放的P,因而使海水中的P出现最小值,随着深度的增加,生物分解释放出的P增加,则海水中的P也随之增加。CTD观测表明,温盐度在130—180m出现跃层,跃层的温度较低,盐度较高(Feng Ming等,1995),在这样的环境中, NO_2^- 易产出与保存,因而在跃层上出现 $\text{NO}_2\text{-N}$ 最大值, $\text{NH}_4\text{-N}$ 在跃层下则出现最小值,估计该层的 NH_4^+ 也有相当部分氧化成了 NO_2^- ,这种结果很可能是通过生物作用而完成的。

2. 深水中的营养盐 图2是12月和1月深水营养盐的垂直分布, $\text{PO}_4\text{-P}$ 在50m左右依然出现最低值, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 也有类似的情况,往下则随着深度的增加,Si和P的浓度亦增加。在真光层内Si和P受浮游生物的吸收所控制,有机物(主要为生物排泄物及尸体)可分解和释放出Si和P。 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的分布较复杂,变化较大,但在同层次二者是反向,如在100m层左右,12月份 $\text{NO}_2\text{-N}$ 有一范围内的最小值,则 $\text{NH}_4\text{-N}$ 就会是这一范围内的最高值;1月份 $\text{NO}_4\text{-N}$ 则是较高值对应 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的最低值,二者的产生与消耗有其内在的相关性,这种作用是在生物的参与下完成的,可用下式表示:

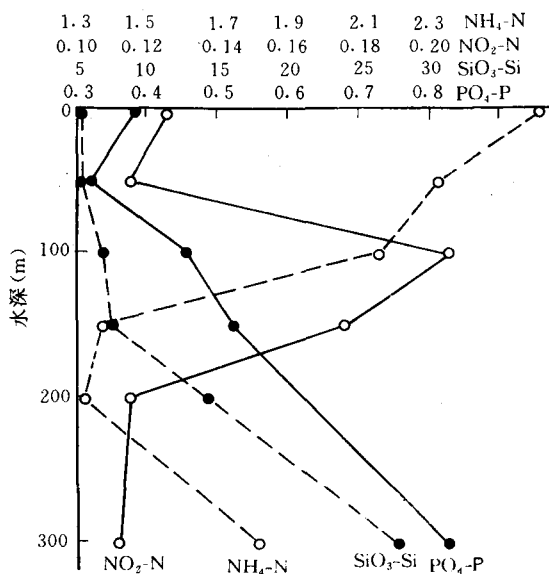
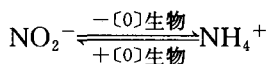
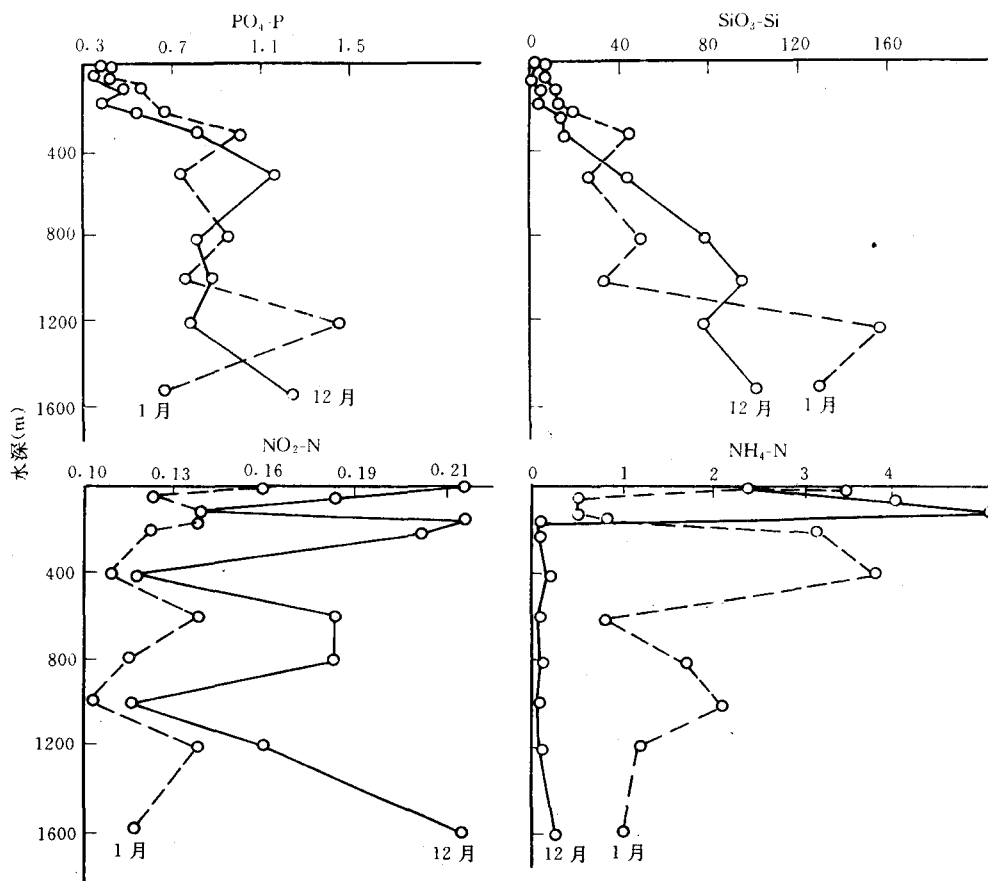


图1 4°S156°E 上层水中营养盐的垂直分布(μmol/L)

图2 深水中营养物质的垂直分布($\mu\text{mol/L}$)

3. 营养盐的周日变化 图3表示0,100,300m层 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 的周日变化,由图可以看出,在一昼夜中,表层海水中P,Si的变化幅度较小,100m层变化最大,300m层P的变化幅度小,但Si的变化大,然而白天与夜晚变化也不相同。在100m以内的真光层内,P和Si有相似的行为,一般均是下午4:00或凌晨4:00出现最大值,而100m以下,P和Si的周日变化规律性则不强,出现最大值的时间各不相同。真光层内下午4:00是一天中水温最高的时间,而凌晨4:00是水温最低的时间,这种相差悬殊的水温不利于生物的活动,相对吸收的营养盐亦低,因此水中就会出现最大值;而在白天,0—100m内,12:00光合作用最为强烈,浮游生物在合成碳水化合物的同时也大量吸收P和Si,所以一般在12:00出现P和Si的最小值。在这里需要特别指出的是,海水中营养盐的周日变化除受到生物活动影响外,海水的运动状况也是影响其变化的重要因素。表2是P和Si周日变化的统计结果,0,100,300m层中,11月、1月的P和Si有较明显的正相关,同时反映了P与Si被生物吸收与释放的机制相同。11月和1月的Si呈负相关,说明两个月中Si的机制有差异,11月份Si被产出的量多于吸收量,1月份则相反,这从图3中也可明显看出,0,300m层中P在两个月中亦均呈负相关,情况Si类似。表3为P和Si白天与夜晚的

表 1 4°S156°E 上层海水中营养物质的浓度($\mu\text{mol/L}$)

组 分	层次(m)	1992 年		1993 年		总平均
		11 月	12 月	1 月	2 月	
$\text{PO}_4\text{-P}$	0	0.395	0.497	0.468	0.180	0.385
	50	0.282	0.347	0.417	0.184	0.308
	100	0.379	0.549	0.475	0.405	0.452
	150	0.541	0.471	0.584	0.499	0.524
	200	0.585	0.566	0.751	0.601	0.626
	300	0.857	0.923	0.837	0.693	0.828
$\text{SiO}_3\text{-Si}$	0	5.84	4.76	6.46	6.13	5.80
	50	6.13	4.71	6.76	6.60	6.05
	100	7.82	3.92	8.18	7.22	6.79
	150	6.75	5.53	11.42	9.87	8.39
	200	9.92	11.65	17.59	16.87	14.01
	300	28.49	23.10	33.70	27.03	28.08
$\text{NO}_2\text{-N}$	0	0.153	0.185	0.090	0.075	0.126
	50	0.135	0.163	0.122	0.040	0.115
	100	0.228	0.238	0.170	0.183	0.205
	150	0.200	0.213	0.122	0.170	0.176
	200	0.120	0.170	0.128	0.040	0.115
	300	0.140	0.135	0.106	0.068	0.112
$\text{NH}_4\text{-N}$	0	5.30	2.22	2.16	0.76	2.61
	50	4.02	1.55	3.21	0.47	2.31
	100	5.45	1.76	0.75	0.65	2.15
	150	2.15	0.54	1.30	0.42	1.39
	200	3.31	0.69	1.04	0.28	1.33
	300	3.65	1.09	2.17	0.38	1.82

统计结果,由表可以看出,白天表层 Si 在 11 月和 1 月的产生与吸收机制类似,呈正相关;夜晚呈负相关,说明两个月中 Si 产生与吸收机制有差异。在 11 月和 1 月,白天表层 P 呈负相关,说明 P 的控制机制不同。在 100m 层,1 月份 P 与 Si 白天有明显的正相关,说明它们有共同的控制机制;300m 层,P 在 11 月与 1 月白天呈正相关,夜晚呈负相关,与表层 Si 类似,11 月份 P 和 Si 在夜晚有良好的负相关,反映夜晚 P, Si 的控制机制确有不同,P 主要被产出,而 Si 主要被吸收。上述的统计分析表明,在白天,往往 P 与 Si 的正相关性明显,同时被吸收和产出;夜晚则情况较复杂,可能同被吸收和产出,也可能不同,但就一昼夜来说,二者有相似的控制机制。

表 2 海水中 P, Si 周日变化的统计结果($n=7$)

$$(y = A + Bx)$$

层 次	$x(\text{月}) - y(\text{月})$	A	B	r
0m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	0.4007	-0.0741	-0.2893
	$Si_{(11)} - Si_{(1)}$	8.6251	-0.2754	-0.3127
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	1.4904	8.0453	0.2391
	$P_{(1)} - Si_{(1)}$	-10.1452	46.2370	0.4888
100m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	0.4489	0.1965	0.2320
	$Si_{(11)} - Si_{(1)}$	10.6853	0.3753	-0.3522
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	1.2402	9.2689	0.3435
	$P_{(1)} - Si_{(1)}$	-6.9331	27.4048	0.8072
300m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	1.5813	-0.6803	-0.8142
	$Si_{(11)} - Si_{(1)}$	73.6971	-1.1220	-0.5924
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	3.7349	34.9767	0.5480
	$P_{(1)} - P_{(1)}$	-67.8778	106.0951	0.7310

注： x, y 分别代表某月份 P 或 Si 的浓度； A, B 为常数， r 为相关系数(下同)。

表 3 海水中 P, Si 周日变化(白天与夜晚)的分类统计结果(r 值) ($n=7$)

层 次	$x(\text{月}) - y(\text{月})$	白 天 8:00—20:00	夜 晚 20:00—8:00
0m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	-0.7234	0.1492
	$Si_{(11)} - Si_{(1)}$	0.8904	-0.8463
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	0.0249	0.4328
	$P_{(1)} - Si_{(1)}$	-0.1340	0.4154
100m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	0.2103	0.3219
	$Si_{(11)} - Si_{(1)}$	-0.2013	-0.2257
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	0.6205	0.4109
	$P_{(1)} - Si_{(1)}$	0.9863	-0.2089
300m	$P_{(11)} - P_{(1)}$	0.8729	-0.9707
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	0.0422	-0.5964
	$P_{(11)} - Si_{(11)}$	0.4048	-0.9707
	$P_{(1)} - Si_{(1)}$	0.8535	0.4912

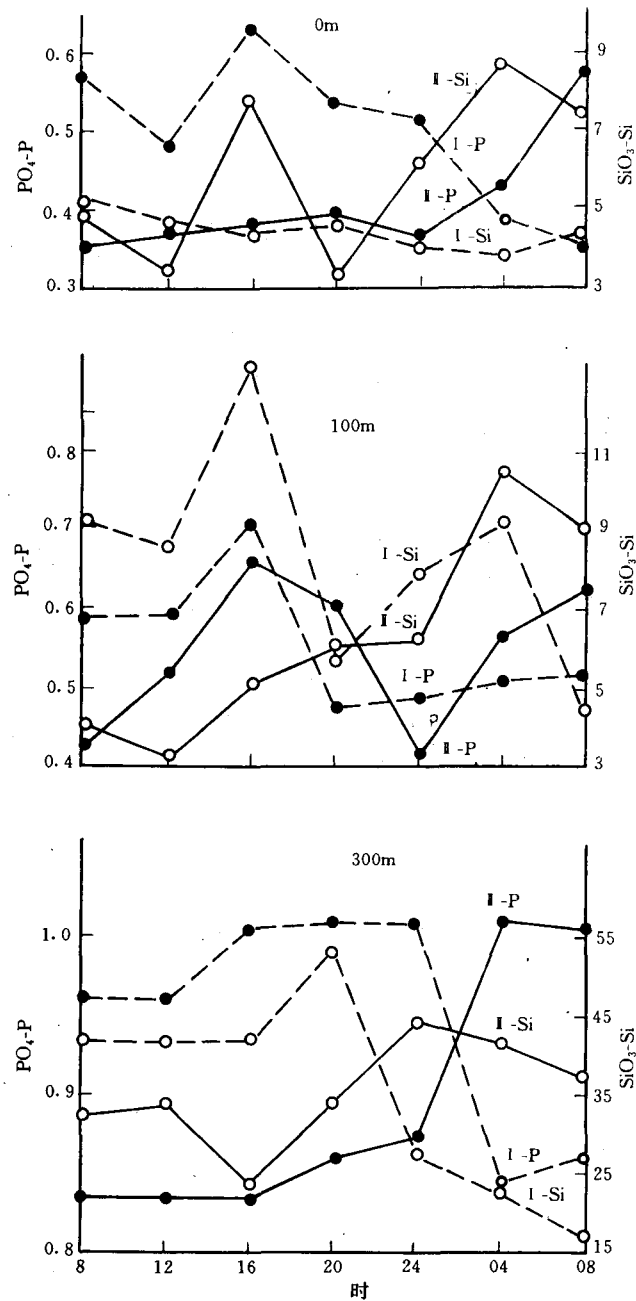


图3 4°S, 156°E 海水中磷、硅的周日变化(μmol/L)

(I-P, I-Si 为 1 月份的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$; II-P, II-Si 为 11 月份的 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$)

4. 降水对表层海水营养盐的影响

(1) 降水对表层海水化学状况的影响: 由表 4 可以看出, 降雨可使表层海水 pH 升高,

Eh, Es 增加, $\Sigma S(-II)$ 浓度降低, 即海水的碱性增强, 氧化性增强。就平均而言, 降水使表层海水 pH 增高 0.4%, Eh 增高 25.5%, Es 增高 72.0%, $\Sigma S(-II)$ 降低 14.0%。降水对表层海水化学状况的改变必然影响表层海水中其它组分的浓度。

表 4 降水对表层海水化学状况的影响(r 值)(n=7)

	pH			Eh (mV)			Es (mV)			$\Sigma S(-II)$ ($\mu\text{mol/L}$)		
雨 前	8.30	8.28	8.26	57	101	93	-26	-26	-32	18.26	18.26	19.16
雨 中	8.31	8.30	8.31	107	111	96	-7.5	-2	-14.7	15.94	15.36	16.86
雨 后	8.28	8.26	8.28	90	93	77	-28	-32	-28	18.60	19.16	18.60
比雨前增加(%)	0.1	0.2	0.6	87.7	9.9	3.2	71.2	92.3	54.1	-12.7	-15.9	-12.0
比雨后增加(%)	0.4	0.5	0.4	18.9	8.6	24.7	73.2	93.8	47.5	-14.3	19.8	-9.4

注: Eh, Es 分别为铂片电极、Ag-Ag₂S 膜电极, 均相对于饱和甘汞电极电位。

(2) 降水对表层海水营养盐的补充作用: 表 5 是观测 5 次降水前后及降水中表层海水营养盐的浓度及与降水中营养盐浓度的比较, 从表中可以看出, 降水可对表层海水中的 N 有明显的补充作用, P 也有一定的输入, Si 变化不大, 主要原因在于, 在降水中有较多的氯化物溶于水形成 NO_2^- , 可引起 $\text{NO}_2\text{-N}$ 明显升高, 所以降水是海水中营养物质重要来源之一。

表 5 降水对表层海水营养盐的影响($\mu\text{mol/L}$)

	$\text{PO}_4\text{-P}$	$\text{SiO}_3\text{-Si}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	$\text{NH}_4\text{-N}$
未降水时浓度	0.339	5.713	0.109	1.782
降水后浓度	0.362	5.660	0.256	1.224
降水引起表层海水 营养盐变化(%)	6.78	-0.91	134.86	-31.31
降水中浓度	0.545	0.901	0.298	3.748

三、结 语

热带西太平洋定点海域 4°S, 156°E 定点 4 个月海水营养盐的观测表明:

(1) $\text{PO}_4\text{-P}$ 的垂直分布在 50m 左右出现最小值, 往下则随深度增加而浓度增加, $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 一般则随深度的增加而增加, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ 的垂直变化较复杂, 但二者变化趋势相反, 在真光层内营养盐主要由浮游生物的吸收控制, 真光层下主要由生物排泄物、尸体等分解控制, NO_2^- 与 NH_4^+ 可在生物作用下相互转化彼此消长。

(2) P, Si 周日变化观测表明, 一般在白天, P, Si 有相似的产出与吸收机制, 夜晚则不同, 真光层内 P, Si 最大值一般出现在下午 4:00 或凌晨 4:00, 真光层下则不一定; 真光

层内 P, Si 周日变化幅度较大, 真光层下变化幅度小。

(3) 降水对表层海水化学状况影响甚大, 降水可使 pH 升高 0.4%, Eh 升高 25.5%, Es 升高 72.1%, $\Sigma S(-II)$ 降低 14.0%, 即降水使表层海水碱性增强, 氧化性增强。降水使表层海水中 NO_2-N 增加 134.86%, PO_4-P 增加 6.78%, Si 变化不大, NH_4-N 降低, 降水对该区海水营养盐中的 N, P 有一定的补充作用。

参 考 文 献

- 宋金明, 1992, 东海沉积物间隙水中磷酸盐的转移模式, 海洋环境科学, 11(3): 45—51。
- 宋金明、李鹏程, 1995, 枯水期黄河口北部海域海水的营养盐化学, 全国第二届青年学术年会卫星会议暨青岛市首届青年学术大会论文集, 青岛出版社, 49—58。
- 宋金明, 1996, 赤道西太平洋部分海域上层水的海洋化学, 海洋科学, 2: 40—44。
- 宋金明、李鹏程, 1997, 热带西太平洋定点海域 4°S, 156°E 降水的化学特征研究, 气象学报, 55: 41—49。
- 顾宏堪, 1992, 渤海东海海洋化学, 科学出版社, 423—457。
- Altabet, M. A. et al, 1986, A model for the vertical flux of nitrogen in the upper ocean; Simulating the alteration of isotopic ratios, *J. Mar. Res.*, 44: 203—225。
- Devol, A. H. and J. P. Chistensen, 1993, Benthic fluxes and nitrogen cycling in sediments of the continental margin of the eastern North Pacific, *J. Mar. Res.* 51: 345—372。
- Hecky, R. E. et al, 1993, The stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in particulate matter of lakes and oceans, *Limnol. Oceanogr.*, 38: 709—724。
- Feng Ming and Hu Dunxin, 1995, Variability of thermohaline structure at 4°S 156°E during TOGA COARE IOP, *Chin. J. Oceanol. Limnol.*, 13(1): 21—30。

**VARIABILITY OF NUTRIENTS AND EFFECT OF RAINWATER ON
SEAWATER NUTRIENTS IN THE TROPICAL WEST PACIFIC,
TOGA COARE IOP(4°S156°E) ***

Song Jinming, Li Pengcheng and Zhan Binqiu

(Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences)

ABSTRACT

The vertical variation and daily change of nutrients and effect of rainwater on seawater nutrients were studied by analysing of sea water nutrients from Nov. 1992 to Feb. 1993 in the tropical west Pacific, TOGA COARE IOP (4°S156°E). The results showed that dissolved phosphate and silicate increased with depth and that dissolved phosphate minimized at 50m layer. Dissolved phosphate and silicate were controlled by decomposition of biological excrement and corpse decomposition under the euphotic layer. $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-H}$ having inverse distribution tendency showed that they were controlled by inter-transformation of $\text{NO}_2\text{-N}$ and $\text{NH}_4\text{-N}$. The daily change research showed that mechanism controlling dissolved phosphate is similar to that for silicate during daytime, but is different during nighttime. Phosphate and silicate maximized at 4 o'clock, a. m or p. m, and the situation is indefinite under the euphotic layer. Rainwater increased the alkalinity and decreased reduction in the surface layer seawater. $\text{NO}_2\text{-N}$ could increase 134.86% and $\text{PO}_4\text{-P}$ 6.78%, but $\text{SiO}_3\text{-Si}$ was almost constant and $\text{NH}_4\text{-N}$ could decrease at the surface layer seawater. The study showed, rainwater could supply N and P to seawater in some degree, and it is one of the important resources of N and P.

* Contribution No. 2718 from the Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences.