

文章编号: 1004 - 7271(2005)02 - 0162 - 06

## 长江口及邻近海域磷酸盐的再生和垂直通量

杨红<sup>1</sup>, 李纲<sup>1</sup>, 金成法<sup>2</sup>

(1. 上海水产大学海洋学院, 上海 200090; 2. 宁波市海洋环境监测中心, 宁波 315040)

**摘要:**根据 1998 年 8 月东海调查资料, 计算了长江口及邻近海域磷酸盐的再生量和垂直通量, 并运用垂直扩散 - 对流模式计算磷酸盐再生速率。研究海域垂直流速分别为  $\omega_1 = 1 \times 10^{-3}$  cm/s 和  $\omega_2 = 5 \times 10^{-3}$  cm/s 时, 磷酸盐的再生速率分别为  $6.10 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$  和  $30.51 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$ , 磷酸盐在水体中的平均停留时间分别为 27.61 d 和 5.51 d。磷酸盐的平均再生量为  $0.74 \mu\text{mol}/\text{L}$ , 再生的磷酸盐成为浮游植物所需磷的主要来源, 是该海域夏季磷酸盐的主要补充途径之一。磷酸盐的再生量和再生速率在沿岸水域比外海要大, 呈现由近海向外海逐渐减小的趋势。长江口及邻近海域典型上升流区磷酸盐的平均垂直通量为  $50.16 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ , 非典型上升流区磷酸盐的平均垂直通量为  $10.03 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 。

**关键词:**长江口; 磷酸盐; 再生; 垂直通量

**中图分类号:**S 912      **文献标识码:**A

## The regeneration and vertical flux of phosphate in the Yangtze River Estuary and its adjacent area

YANG Hong<sup>1</sup>, LI Gang<sup>1</sup>, JIN Cheng-fa<sup>2</sup>

(1. College of Marine Science & Technology, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China;

2. Ningbo Marine Environmental Monitoring Center, Ningbo 315040, China)

**Abstract:** According to the researched data in the East China Sea in Aug. 1998, regenerative quantum and vertical flux of phosphate in Changjiang estuary and its adjacent area were calculated respectively, and the regenerative rate was calculated using vertical diffusion-convection model. When the vertical velocity is  $\omega_1 1 \times 10^{-3}$  cm/s and  $\omega_2 5 \times 10^{-3}$  cm/s, the regenerative rate of phosphate is  $6.10 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$  and  $30.51 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$  respectively, and the settled time of phosphate is 27.61 and 5.51 days respectively. The average regenerative quantum of phosphate is  $0.74 \mu\text{mol}/\text{L}$ , which is the main phosphate source for the algae and one of the primary supplemental ways in summer. The regenerative quantum and regenerative rate of phosphate are higher in estuary than in off-shore. The average vertical flux of phosphate is  $50.16 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  in the typical upwelling area and  $10.03 \text{ mg}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$  in the atypical upwelling area.

**Key words:** Yangtze River estuary; phosphate; regeneration; vertical flux

长江是我国最大的河流,也是世界上最大的河流之一,年入海径流量约为  $9 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 。每年,长江向东海输送大量的营养盐、有机质及矿物质。磷酸盐对生物过程有重要作用,磷是浮游生物的主要营养元素,在浮游植物繁盛期,无机磷酸盐以相当快的速率自水柱中消失。在这种条件下,再生的磷酸盐成为

收稿日期:2004-08-27

基金项目:上海市高等学校发展基金项目(科 2000 - 115)和上海市捕捞学重点学科项目资助(科 2002 - 186)

作者简介:杨红(1962 - ),女,江苏无锡人,教授,主要从事海洋环境学研究。E-mail:hyang@shfu.edu.cn

浮游植物生长所需营养盐的重要来源,磷酸盐的再生作用成为影响初级生产力的重要因素之一。对于富营养化水体,磷又常常成为严重污染物质,甚至成为赤潮的一个重要诱发因素。因此,研究磷酸盐的循环再生和垂直通量对研究东海初级生产力以及赤潮都有重要意义。祝陈坚等<sup>[1]</sup>研究了东海黑潮区磷酸盐的再生和分布情况,对长江口氮磷等物质的人海通量研究也较多<sup>[2-4]</sup>,但对长江口及邻近海域磷酸盐的再生和垂直通量的研究尚未报道。本文运用一维垂直扩散-对流模式对长江口及邻近海域的磷酸盐的再生情况进行初步分析和探讨,并在此基础上计算了磷酸盐的垂直通量,为研究长江口及邻近海域的初级生产力以及赤潮研究提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 调查区域

本文所用数据资料为 1998 年夏季长江口及邻近海域调查数据。调查范围为北纬 30°00' ~ 32°00'、东经 122°30' ~ 126°00'。调查水域及站位见图 1,共设九个站位。

### 1.2 测定方法

按照海洋监测规范(HY 003-91),水温、盐度均为现场测定,海水溶解态无机磷酸盐 PO<sub>4</sub>-P 水样经现场过滤、低温保存,带回实验室用磷钼蓝分光光度法测定<sup>[5]</sup>。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 稳态组分的垂直扩散-对流模式

海洋中的磷酸盐作为一种非保守性成分,其分布可采用产生、消耗、水平和垂直迁移过程来加以描述<sup>[6]</sup>。建立一维垂直扩散-对流模式的基本假想是:溶解组分的稳定垂直分布可以由两点边界值的模式来表示,而与任何中间平流因素无关。这样对于任何垂直分布在欧拉指向上的稳定组分,其垂直分布可以由其上、下界浓度、简单混合参数、中间再生率和消耗率来确定<sup>[1,7,8]</sup>。该模式的一般形式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial Z} \tag{1}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial(\rho KC')}{\partial Z} \cdot \frac{1}{\rho} - \omega \frac{\partial C}{\partial Z} - \lambda C + J \tag{2}$$

式中,  $K$  是垂直涡动扩散系数;  $\omega$  是垂直对流速度;  $J$  是与浓度无关的再生(消耗)率,产生为正,消耗为负;  $\lambda$  是一级消耗率或放射性衰减常数。

对于非守恒性的磷酸盐,假设磷酸盐处于稳定状态且水平分布均匀(或水平流速为零),  $(\rho\omega)$  为常数,  $\lambda = 0$ , 并令  $K^0 = \frac{K}{\omega}$  则式(2)简化为:

$$K^0 \frac{\partial^2 C}{\partial Z^2} - \frac{\partial C}{\partial Z} + J^0 = 0 \tag{3}$$

$$J^0 = \frac{J}{\omega} \tag{4}$$

坐标原点在海底,  $Z$  取向上为正,则边界条件为:  $Z = 0$  时,  $C = C_0$ ,  $Z = Z_m$  时,  $C = C_m$ 。  $C$  为深度  $Z$  处的浓度,  $Z_m$  为水层深度或水层的厚度。该方程(4)的解为:

$$C = C_0 + [(C_m - C_0) + J^0(Z - Z_m)] \frac{e^{Z/K^0} - 1}{e^{Z_m/K^0} - 1} \tag{5}$$

研究表明,只有盐度和位温呈线性关系的水层,才能运用垂直扩散-对流模型。根据调查数据,对

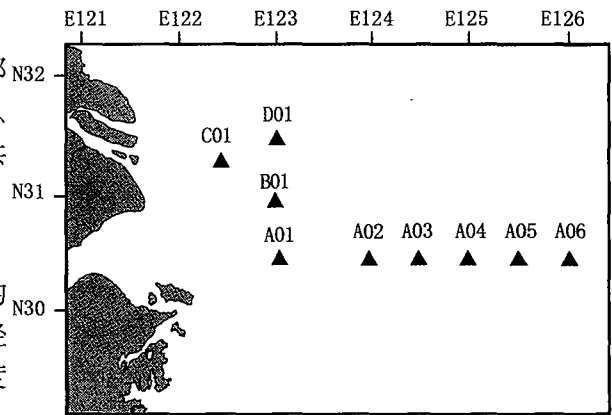


图 1 站位分布

Fig.1 Location of stations

式(5)进行非线性拟合,可以分别求得边界值  $C_0$ 、 $C_m$  和  $K^0$ 、 $J^0$  值。由式(4),可求得磷酸盐的再生速率  $J$ 。

### 1.3.2 磷酸盐的再生量和垂直通量的计算

根据垂直流速和水层厚度,可以求得磷酸盐物质从底层上升指标层所需时间  $\tau$ :

$$\tau = \Delta Z / \omega \quad (6)$$

在时间再生的磷酸盐可由下式求得<sup>[9]</sup>:

$$\Delta DIP = J\tau \quad (7)$$

营养盐的垂直通量指垂直方向营养盐自底层向表层在单位时间内通过单位面积的量,即底层水体进入表层水体的磷酸盐含量。

$$f = \alpha C \omega \quad (8)$$

式中,  $\alpha$  为单位换算常数,计算磷酸盐时值大小为  $2.6758 \times 10^4$ <sup>[10]</sup>。  $C$  值为研究海区平均磷酸盐浓度值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磷酸盐的再生速率和垂直分布

#### 2.1.1 垂直方向上温度和盐度的关系

由上文可知运用垂直扩散-对流模型的必要条件是水体垂直方向上盐度和位温满足线性关系。由于长江口及邻近水域水深较浅,温度和位温相差很小,因此可将水层温度近似看作位温。对各站温度和盐度进行线性回归,温度和盐度均满足线性关系,相关系数  $r$  大于 0.93。此结果表明,垂直方向上温度和盐度线性关系显著,温盐关系满足垂直扩散-对流模型的要求。限于篇幅,本文仅给出 A01、B01、C01 和 D01 四个站的温度、盐度垂直分布图(图 2)和线性关系图(图 3)。A01、B01、C01 和 D01 站,相关系数  $r$  均大于 0.95。

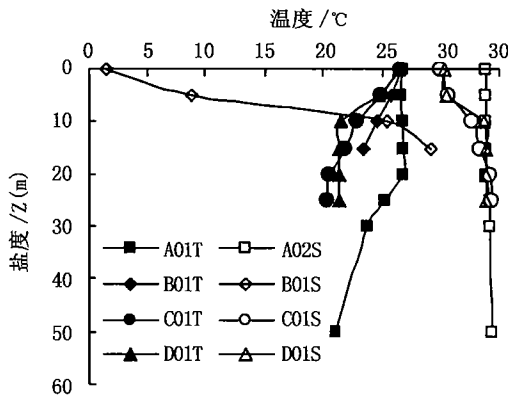


图 2 A01, B01, C01, D01 站温度与盐度的垂直分布  
Fig. 2 Vertical distribution of temperature and salinity at stations A01, B01, C01 and D01

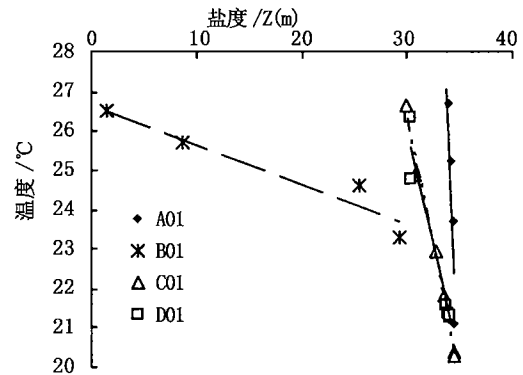


图 3 A01, B01, C01, D01 站温度与盐度的线性关系  
Fig. 3 Linear relation between temperature and salinity at stations A01, B01, C01 and D01

#### 2.1.2 磷酸盐的再生速率

由式(5)计算出的 9 个站点表、底层磷酸盐的计算值和各站磷酸盐的观测值见表 1, 其中  $C_0$ 、 $C_m$  和  $C'_0$ 、 $C'_m$  分别表示实测值和计算值, 计算结果和观测值相差不大, 说明拟合结果是可靠的。

东海上升流  $\omega$  量级为  $10^{-3}$  cm/s<sup>[11-14]</sup>, 本文取  $\omega_1 = 1 \times 10^{-3}$  cm/s 和  $\omega_2 = 5 \times 10^{-3}$  cm/s 估算磷酸盐的再生速率。各站  $J^0$  [ $\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{m})$ ] 及  $\omega$  值分别代入(4)式得到的磷酸盐再生速率的值见表 2。

表 1 各站表层、底层磷酸盐浓度的实测值和计算值  
Tab.1 Observational and calculated value of phosphate concentration of surface layer and bottom at all stations

站位	$C_0$	$C'_0$	$C_m$	$C'_m$
A01	0.73	0.72	0.19	0.21
A02	0.78	0.82	0.17	0.19
A03	0.81	0.82	0.21	0.21
A04	0.71	0.69	0.31	0.36
A05	0.72	0.73	0.18	0.21
A06	0.72	0.77	0.16	0.14
B01	0.72	0.67	0.64	0.65
C01	0.94	1.00	0.18	0.05
D01	0.58	0.57	0.15	0.16

表 2 各站  $K^0$ 、 $J^0$ 、 $J$  值及磷酸盐停留时间  
Tab.2 Value of  $K^0$ ,  $J^0$  and  $J$  and settled time of phosphate at all stations

站位	$K^0$	$J^0$	$J[\mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{d})]$		$t(\text{d})$	
			$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_1$	$\omega_2$
A01	0.023 9	0.018 3	0.015 8	0.078 9	17.96	3.60
A02	0.050 5	0.017 9	0.015 4	0.077 2	19.77	3.94
A03	0.010 3	0.009 1	0.007 8	0.039 2	46.58	9.27
A04	0.081 0	0.018 8	0.016 2	0.081 0	20.52	4.10
A05	0.063 5	0.017 2	0.014 8	0.074 2	19.89	3.97
A06	0.014 0	0.007 3	0.006 3	0.031 6	45.33	9.04
B01	0.060 6	0.047 0	0.040 6	0.202 9	15.02	3.01
C01	0.024 0	0.011 8	0.010 2	0.050 9	43.95	8.81
D01	0.002 1	0.026 9	0.023 2	0.116 1	19.47	3.89
平均值	0.036 7	0.019 4	0.016 7	0.083 6	27.61	5.51

由表 2 可知该海域  $\omega_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 磷酸盐的平均再生速率  $J$  为  $0.0167 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{d})$ , 相当于  $6.10 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$ ;  $\omega_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ , 磷酸盐的平均再生速率  $J$  为  $0.0836 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{d})$ , 相当于  $30.51 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{a})$ 。研究表明<sup>[7]</sup>, 中层水中出现磷酸盐净的再生现象, 但大部分再生出现在 17.5 米以下水中, 磷酸盐再生速率在  $0.01 \sim 0.125 \mu\text{mol}/(\text{L}\cdot\text{d})$  之间。本文计算的结果在此范围内。夏季, 长江口及邻近海域存在温跃层, 其深度小于  $10 \text{ m}$ <sup>[15]</sup>, 温跃层的存在对磷酸盐的再生影响较小。根据磷酸盐的  $J$  值, 可大致估算出磷酸盐在水体中的平均停留时间。垂直流速为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  时, 该水域磷酸盐平均停留时间分别为 27.61 d 和 5.51 d。对比各站磷酸盐的再生速率可以发现, B01 站磷酸盐的再生速率最大, 在水体中的停留时间也最短, 仅为 15.02 d ( $\omega_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ) 或 3.01 d ( $\omega_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ )。A06 站磷酸盐的再生速率最小, 其停留时间达到 45.33 d ( $\omega_1 = 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ) 或 9.04 d ( $\omega_2 = 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ )。与外海相比, 磷酸盐在近岸水体中停留的时间短, 其循环速度快, 磷酸盐再生速率呈现由近海向外海逐渐变小趋势。这可能和近海、外海磷酸盐的多寡有关。近海由于受大陆径流影响, 水体中磷酸盐浓度较高, 浮游植物生长旺盛, 磷酸盐的再生速率较大; 远离河口区, 径流对海水中磷酸盐的补充有限, 磷酸盐则较为缺乏, 成为浮游植物生长的限制因子, 其再生速率则相应较小。据报道, 浮游动物体内每天有 35% ~ 60% 的磷以无机形式排出体外; 中型浮游动物排泄的无机磷在大陆架水域相当于浮游植物需要量的 15%, 湾流区达 60%, 而在浅海湾仅为 6%。在北太平洋, 浮游动物排出的磷量相当于浮游植物所需磷量的 55% ~ 183%<sup>[16]</sup>。

### 2.1.3 磷酸盐的垂直分布

磷酸盐垂直分布见图 4 和图 5。磷酸盐的浓度随深度加深而增加是磷酸盐再生的结果。表层由于浮游植物消耗, 磷酸盐浓度很低, 除 B01 站和 A05 站外, 磷酸盐浓度低于  $0.20 \text{ mmol/L}$ 。30 米以浅, 磷酸

盐浓度变化不大,这跟浮游植物垂直分布有关。底层磷酸盐的矿化再生作用明显,使水体磷酸盐在底层出现高值。北纬 31°30′附近海域磷酸盐断面分布图见图 5。由图 5 可以看出,在东经 125°附近,磷酸盐等值线明显向上凸起,表明了上升流的存在。上升流可将底层磷酸盐向上输送,成为浮游植物所需磷酸盐的重要来源。舟山外海存在的上升流,促成了该区域的高生产力。海域中磷直接参与海洋浮游植物光合作用,并在其生物地球化学循环过程中得到再生与转化。所以,磷酸盐的分布除受上升流因素控制外,生物活动也是重要的、直接的影响因素。夏季营养盐的上述分布特征应是近岸上升流与生物活动的综合结果。

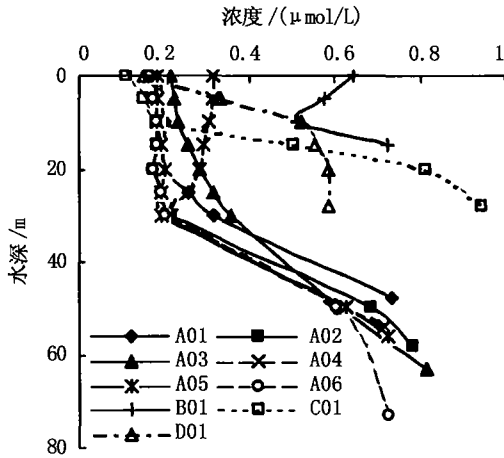


图 4 磷酸盐的垂直分布

Fig.4 Vertical distribution of phosphate

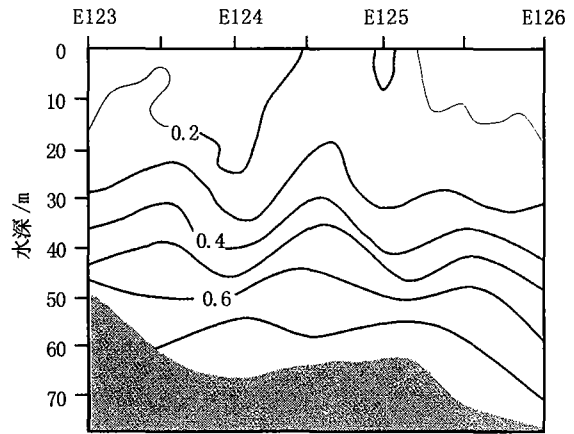


图 5 磷酸盐断面分布图

Fig.5 Section of phosphate distribution on 30°30′

### 2.2 磷酸盐的再生量和垂直通量

由式(6)和(7)可求得在水体的停留时间内磷酸盐的再生量(表 3)。近岸水域磷酸盐的再生量比外海磷酸盐的再生量要大,同样呈现由近海向外海逐渐减少的趋势,与其再生速率的变化趋势相一致。

长江口及其邻近海域,磷酸盐的平均再生量为 0.74 μmol/L。夏季,由于浮游植物生长旺盛,海洋表层的磷酸盐由于浮游植物的快速吸收浓度很低,再生的磷酸盐成为浮游植物消耗磷的主要来源,是该海域夏季磷酸盐的主要补充途径。另一方面,海洋动物特别是浮游动物代谢排泄磷的速率很快,加上其他很多矿化途径,使再生主要在水层内完成,磷循环很快,再生量的比重相当大。例如,在加利福尼亚海域,浮游植物所消耗的磷有 68%~87% 是由表层 75 m 内再生的磷提供的。到 700 m 深处,有 91%~95% 的磷完成矿化再生。在太平洋,约有 87% 的磷也是在 75 m 以内的深度再生,到 1000 m 深度,再生量达 99%<sup>[16]</sup>。

表 3 各站磷酸盐的再生量和垂直通量

Tab.3 Regenerative quantum and vertical flux of phosphate of each stations

站位	C(μmol/L)	ΔDIP(μmol/L)	f[mg/(m <sup>2</sup> ·d)]	
			ω <sub>1</sub>	ω <sub>2</sub>
A01	0.28	0.88	7.59	37.97
A02	0.30	1.04	8.15	40.73
A03	0.36	0.57	9.72	48.61
A04	0.33	1.01	8.90	44.49
A05	0.29	0.96	7.88	39.39
A06	0.29	0.53	7.64	38.21
B01	0.61	0.56	16.32	81.61
C01	0.45	0.33	12.00	59.98
D01	0.45	0.75	12.09	60.43
平均值	0.37	0.74	10.03	50.16

根据式(8),  $C$  为各站磷酸盐的平均浓度, 各站磷酸盐的垂直通量见表 3。  $\omega$  取  $5 \times 10^{-3}$  cm/s 时, 整个区域磷酸盐的平均垂直通量为  $50.16 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。台湾海峡中北部磷酸盐的垂直通量为  $23.6 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 舟山渔场上升流区磷酸盐的垂直通量为  $38 \sim 189 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ <sup>[8]</sup>。本文计算的结果高于台湾海峡中北部磷酸盐的垂直通量, 在舟山渔场上升流区磷酸盐的垂直通量范围内, 故可看作研究海区典型上升流区域磷酸盐的平均垂直通量。如果  $\omega$  取  $1 \times 10^{-3}$  cm/s, 磷酸盐的平均垂直通量为  $10.03 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 可视为研究海区非典型上升流区域磷酸盐的平均垂直通量。

### 3 结论

磷酸盐的再生速率可以用垂直扩散 - 对流模型来计算。本文的计算结果表明长江口及邻近海域磷酸盐的再生速率为  $0.0167 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{d})$  和  $0.0836 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{d})$ , 相当于  $6.10 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{a})$  和  $30.51 \text{ } \mu\text{mol}/(\text{L} \cdot \text{a})$ 。磷酸盐在水体中的平均停留时间 27.61 d 和 5.51 d, 磷酸盐停留的时间比较短, 其循环速度比较快。再生速率在沿岸水域比外海要大, 呈现由近海向外海逐渐减小的趋势。

长江口及邻近海域磷酸盐的平均再生量为  $0.74 \text{ } \mu\text{mol}/\text{L}$ , 再生的磷酸盐相当大。磷酸盐的再生量同样呈现由近海向外海减小的趋势。

长江口及邻近海域典型上升流区磷酸盐的平均垂直通量为  $50.16 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 非典型上升流区磷酸盐的平均垂直通量为  $10.03 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

#### 参考文献:

- [1] 祝陈坚, 石晓勇. 东海磷酸盐的分布与再生[J]. 青岛海洋大学学报, 1996, 26(1): 75 - 81.
- [2] 傅瑞标, 沈焕庭. 长江河口淡水端溶解态无机氮磷的通量[J]. 海洋学报, 2002, 24(4): 34 - 43.
- [3] 沈焕庭. 长江河口物质通量[M]. 海洋出版社, 2001. 32 - 41.
- [4] 刘新成, 沈焕庭, 黄清辉, 等. 长江入河口区生源要素的浓度变化及通量估算[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(3): 332 - 340.
- [5] 国家海洋局发布. 海洋监测规范[M]. 海洋出版社, 1991. 159 - 162.
- [6] 李绪录, 詹进源. 南海中部深水中位温和盐度垂直分部的数字模拟 - 垂直扩散 - 对流模型[J]. 海洋学报, 1989, 11(1): 115 - 121.
- [7] Riley J P, Skirrow G. 化学海洋学第二卷 - 微量营养元素[M]. 海洋出版社, 1982. 293 - 297.
- [8] Craig H. Abyssal carbon and radiocarbon in the Pacific [J]. J Geophys Res, 1969, 74: 5491 - 5506.
- [9] 王明彪, 林洪瑛. 南沙群岛海域深层海水碳垂直通量[J]. 海洋学报, 1995, 17(3): 118 - 121.
- [10] 陈水土, 阮五崎. 台湾海峡上升流区氮、磷、硅的化学特性及输送通量估算[J]. 海洋学报, 1996, 18(3): 36 - 44.
- [11] 袁耀初. 东海三维海流的一个预报模式 - 黑潮调查研究论文选(五)[R]. 海洋出版社, 1993. 311 - 323.
- [12] 罗义勇. 东海沿岸上升流的数值计算[J]. 海洋湖沼通报, 1998, 3: 1 - 5.
- [13] 罗义勇, 俞光耀. 风和台湾暖流引起东海沿岸上升流数值计算[J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28(4): 536 - 542.
- [14] 朱建荣. 夏季长江口外水下河谷西侧上升流产生的动力机制[J]. 科学通报, 2003, 48(23): 2488 - 2492.
- [15] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 山东: 青岛海洋大学出版社, 2000. 40 - 42.
- [16] 沈国英, 施并章. 海洋生态学[M]. 福建: 厦门大学出版社, 2002. 297 - 298.