

文章编号: 1004-7271(2008)06-0700-07

## 长江口海域营养盐通量的估算

杨红, 王春峰

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:**运用 LOICZ 通用的生源要素通量估算法—BOX 模型,估算长江口主要营养盐物质 DIP 和 DIN 的通量,定量分析了长江口门水域 DIP 和 DIN 的行为过程,DIP 在口门内通过非保守性行为而离开系统,而在口门外表现出完全相反的过程,DIP 通过生物和非生物过程进入系统;DIN 在这两个区域都通过非保守性行为进入系统,充当“源”的作用;论证了长江口海域 DIP 和 DIN 营养盐通量主要由径流量所控制;盐度分布、营养盐浓度也是营养盐通量控制因素之一。

**关键词:**陆海相互作用;长江口;物质通量;营养盐

**中图分类号:**S 912      **文献标识码:**A

## The estimation of nutrition fluxes in the Yangtze River Estuary

YANG Hong, WANG Chun-feng

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** The paper was tested by the LOICZ biogeochemical element estimation of BOX model in the Yangtze River Estuary. It estimated the nutrition of DIP and DIN. Fluxes of DIP and DIN to behavior process is quantitatively analyzed. DIP is deviate from the system by the non-conservative behavior process inside of the Yangtze River estuary. It is reverse phenomenon outside of the Yangtze River estuary. DIP is entering the system by the biological and nonbiological process. DIN is entering the system by the non-conservative behavior process in this area. It acts as the effect of source. It was testified that the fluxes of DIP and DIN are controlled by the current. The fluxes of nutrition are also influenced by the salinity and concentration.

**Key words:** LOICZ; the Yangtze River Estuary; material flux; nutrition

物质通量是国际地圈生物圈研究计划(IGBP)中的两个核心计划—全球海洋通量联合研究(JGOFS)和海岸带陆海相互作用(LOICZ)的中心议题<sup>[1-2]</sup>,作为最易受人类活动影响之一<sup>[3]</sup>的海岸带,随着营养盐通量的增加导致水域富营养化不断加剧。长江河口地处我国东部沿海,是工农业和交通运输业最发达地区,也是长江重要经济鱼类和珍稀濒危动物的活动场所。关注长江口营养盐通量的变化对长江口生态环境的影响具有重要的意义。本文采用 BOX 模型,应用 2000 年 8 月和 2006 年 8 月调查数据,估算长江口同一区域营养盐通量变化,定量分析长江口 DIP 和 DIN 等主要营养盐的行为过程,并通过对比 1998 年 8 月最大洪峰和 8 月多年平均径流量,径流量变化对营养盐通量的影响分析,对长江口海域主要营养盐(DIN、DIP)的富集、释放等行为过程有一个更清楚的认识,为河口开发和海岸带综合利用提供一定的科学依据。

收稿日期:2008-03-15

基金项目:上海市“908”专项(PJ1-2;HD3);上海市海洋环境工程重点学科专项基金(J50702)

作者简介:杨红(1962-),女,江苏无锡人,教授,主要从事环境海洋学方面的研究。E-mail:hyang@shfu.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域划分

选取夏季 8 月份调查数据,以长江口口门附近区域为界,将研究区域划分为两个系统分别开展研究(图 1),即长江口内 31°12' ~ 31°48'N, 121°30' ~ 122°00'E 作为系统研究区域之一,以 BOX1 表示;长江口门外 31°00' ~ 31°48'N, 122°00' ~ 122°36'E 作为系统研究区域之二,以 BOX2 表示。长江口水动力条件复杂多变,夏季由于径流量大并盛行偏南风,长江冲淡水在黄东海区上层分布很广,冲淡水羽状流东界上层可达到 122°40' ~ 123°00'E<sup>[4-5]</sup>, 122°36'E 附近海域作为长江冲淡水和外海水的界线,向外作为外海区域。同时以 121°30'E 以西附近水域为近口岸区域。

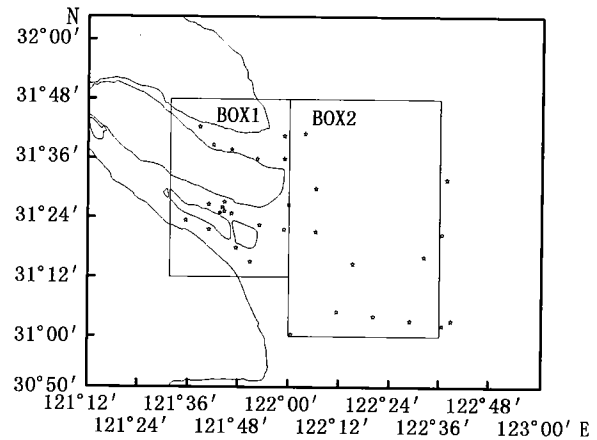


图 1 长江口调查海域站位示意图  
Fig. 1 Locations of investigation sites in the Yangze River Estuary

### 1.2 数据来源及处理

采用 1998 年 8 月、2000 年 8 月和 2006 年 8 月长江口海域现场调查的数据。营养盐通量的估算以溶解态无机磷(DIP)、溶解态无机氮(DIN)表示,各 BOX 系统中的营养盐数据列于表 1。根据大通断面连续 22 年的资料统计,8 月的平均流量为 44 065 m<sup>3</sup>/s<sup>[6]</sup>。各 BOX 系统中降水量和蒸发量中营养盐的通量与整个长江口径流中的营养盐通量而言相差近 2 个数量级,所以可忽略不计,为了突出模型的完整性,整个计算过程中将上海市的 8 月平均降水量和蒸发量作为模型中近似的降水量和蒸发量,根据《中国统计年鉴》记载的上海月平均降水量:98 年 8 月为 112.8 mm,2000 年 8 月为 235.6 mm,2006 年 8 月为 279.1 mm;蒸发量取上海市 8 月的平均蒸发量 193.6 mm<sup>[7]</sup>;降水中 DIN 的浓度是根据王文兴<sup>[8]</sup>和沈志良<sup>[9]</sup>等报道取值为 85.3 mmol/m<sup>3</sup>;由于磷一般不以气态形式存在,降水中溶解态无机磷几乎不存在<sup>[6]</sup>,所以降水中 DIP 则假定为 0 mmol/m<sup>3</sup>。所得数据如表 1。

表 1 不同年份各区域的营养盐浓度及基本参数

Tab. 1 The concentrations of nutrient and the parameters in the estimation system areas in different years

年份	区域	营养盐 (mmol/m <sup>3</sup> )		研究区域 面积 km <sup>2</sup>	降水量 V <sub>p</sub> × 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> /d	蒸发量 V <sub>E</sub> × 10 <sup>7</sup> m <sup>3</sup> /d
		DIP	DIN			
2000-08	近口岸	0.855	80.88			
	BOX1	0.85	93.48	3146.0	2.39	1.96
	BOX2	0.63	42.41	5039.0	3.83	3.15
	外海	0.42	6.19			
2006-08	近口岸	4.531	46.959			
	BOX1	2.336	43.745	3146.0	2.83	1.96
	BOX2	2.148	31.309	5039.0	4.54	3.15
	外海	0.77	19.1			

### 1.3 长江口收支平衡模式

#### 1.3.1 长江河口营养盐收支平衡模式

根据物质的质量守恒定律,可以得到河口系统物质 M 随时间的变化率为(图 2):

表达式为:

$$dM/dt = \sum Input - \sum Output + \sum (Sources - Sinks) \quad (1)$$

式中:  $dM/dt$  为河口区系统物质随时间的变化率;  $\Sigma \text{Input}$  为物质各项输入之和;  $\Sigma \text{Output}$  为物质的各项输出之和;  $\Sigma (\text{Sources} - \text{Sinks})$  为系统内部物质相互转化各项源、汇差额的和, 其中 Sources 是源, 而 Sinks 为汇。

### 1.3.2 水的收支平衡模式

对于水和盐度这些守恒性物质来说, 其系统内部没有“源”与“汇”。当  $dM/dt = 0$ , 即物质随时间的变化率为 0。那么方程(1)可简化为:

$$\Sigma (V_Q + V_P + V_G + V_O + V_R + V_X) - \Sigma (|V_E| + V_X) = 0 \quad (2)$$

$$V_R = -V_Q - V_P - V_O - V_G + |V_E| \quad (3)$$

式(2)中:

$V_Q$ : 河流流量;  $V_P$ : 降水量;  $V_G$ : 地下水补给量;  $V_O$ : 其他补给量;  $V_E$ : 河口水面的蒸发量;  $V_R$ : 余流;  $V_X$ : 交换流量。

### 1.3.3 盐度的收支平衡模式

根据方程(2), 可以得到描述盐度的收支方程式。在盐度的收支计算方程中, 各 BOX 系统中盐通量等于水的体积通量( $V$ )乘以各系统的盐度( $S$ )得:

$$\Sigma (V_Q S_Q + V_P S_P + V_G S_G + V_O S_O + V_R S_R + V_X S_{ocean}) - \Sigma (|V_E S_E| + V_X S_{system}) = 0 \quad (4)$$

显然,  $V_Q, V_P, V_E, V_G, V_O$  的盐度  $S_Q, S_P, S_E, S_G, S_O$  的为 0, 去除盐度可能为 0 的几项, 则该式可简化为:

$$\Sigma (V_R S_R + V_X S_{ocean}) - \Sigma (V_X S_{system}) = 0 \quad (5)$$

$$V_X = V_R S_R / (S_{system} - S_{ocean}) \quad (6)$$

### 1.3.4 营养盐的收支平衡模式

对于非保守性的营养盐来说, 在河口系统中通常存在着内部的源或汇, 根据方程(1)可得营养盐得收支平衡式:

$$V_{system} \frac{dY_{system}}{dt} = \Sigma \text{Input} - \Sigma \text{Output} + \Sigma (\text{Sources} - \text{Sinks}) \quad (7)$$

引入非保守性通量( $\Delta Y$ ), 并将它定义为:

$$\Delta Y = \Sigma (\text{Sources} - \text{Sinks}) \quad (8)$$

$\Delta Y$  为正值, 反映系统对溶解态物质  $Y$  来说起“源”的作用;  $\Delta Y$  为负值, 反映系统对溶解态物质  $Y$  来说是“汇”<sup>[10]</sup>。当  $dY_{system}/dt = 0$ , 则根据方程(7)可以得到

$$\Delta Y = \Sigma \text{Input} - \Sigma \text{Output} \quad (9)$$

由于地下水、降水以及其它补给对河口区 DIP 通量相对较小可以忽略。因此, 河口区 DIP 和 DIN 的平衡可以由公式(9)进行计算:

$$\Delta Y = -V_R Y_R - V_Q Y_Q - V_P Y_P - V_X (Y_{ocean} - Y_{out}) \quad (10)$$

其中:  $Y_R$  为河口系统生物地球化学的浓度;  $Y_Q$  为河流该元素的浓度;  $Y_{ocean}$  为邻海的该元素浓度;  $Y_{out}$  为交换流中的浓度, 这里与河口系统内物质的浓度相同。

## 2 结果与分析

### 2.1 水通量收支

2000 年 8 月河流输入河口的流量达  $38.07 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ , 净降水量达  $1.11 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ ; 由图 3 可知, BOX1 与 BOX2 之间水余通量  $V_R = 38.11 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ , BOX2 与外海的水余通量  $V_R = 38.18 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ , 各 BOX 系统中流入和流出水通量相差无几, 最终流出 BOX2 系统中的水通量大于流入 BOX1 系统中的水

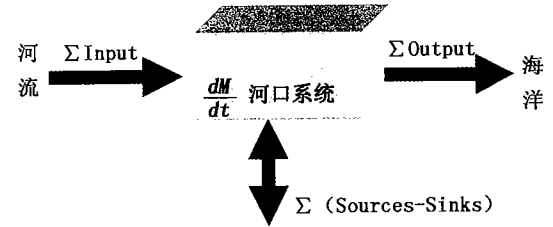


图 2 河口系统物质收支平衡模式

Fig. 2 Simplified balance model of the estuary system

通量,表明黄浦江等支流影响增加了长江口系统中的水通量;BOX1 与 BOX2 之间的交换通量  $V_x = 1.96 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ ,BOX2 与外海的交换通量  $V_x = 8.26 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ ,交换流量是表征流入和流出河口系统水量之间的差,其值为正,表明各系统水量有外源输入,致使最终流出 BOX2 系统水余通量高于上游河流的输入量。

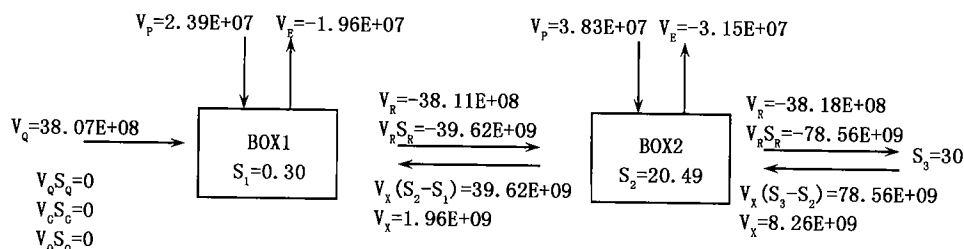


图3 2000年8月水和盐度的收支平衡(单位: $\text{m}^3/\text{d}$ )

Fig. 3 Water and salt balance in the Yangze River Estuary in Aug. 2000 (fluxes in  $\text{m}^3/\text{day}$ )

图4所示,2006年8月河流输入长江河口的流量达  $38.07 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,整个河口的净降水量 ( $V_{p-e}$ ) 达  $2.26 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ ;各系统之间的水余通量相差不多,BOX1 与 BOX2 之间为  $38.16 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ,BOX2 与外海水余通量为  $38.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ ;系统之间的交换通量相差较大,BOX1 与 BOX2 之间为  $23.88 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ ,而 BOX2 与外海的交换通量为  $3.40 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{d}$ ,相差1个数量级,这主要受系统中盐度变化影响,BOX2 与外海盐度相差梯度较大,致使交换通量发生相应变化。可见,水通量中水余通量基本不受盐度的变化,而交换通量受盐度影响较大。

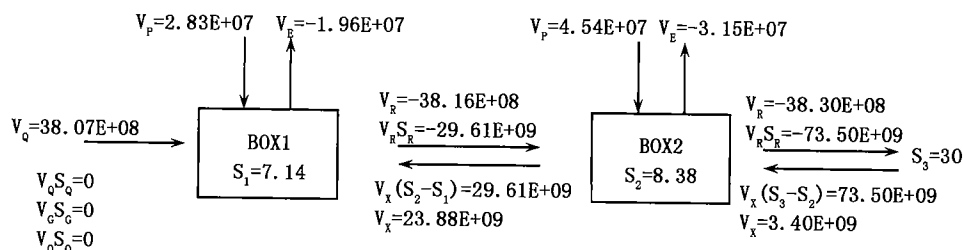


图4 2006年8月水和盐度的收支平衡(单位: $\text{m}^3/\text{d}$ )

Fig. 4 Water and salt balance in the Yangze River Estuary in Aug. 2006

## 2.2 营养盐 DIP 通量收支

收支平衡估算结果表明(图5、图6),2000年8月河流输入河口的DIP通量为  $3.25 \times 10^6 \text{ mol}/\text{d}$ ,2006年8月输入通量为  $17.25 \times 10^6 \text{ mol}/\text{d}$ ,两者相差1个数量级;2006年8月各系统区域的水余通量  $V_rY_r$  均高于2000年8月,相差在3倍左右,其中BOX2与外海的DIP水余通量2000年8月为  $2.0 \times 10^6 \text{ mol}/\text{d}$ ,06年8月为  $5.59 \times 10^6 \text{ mol}/\text{d}$ ;而各系统中的交换通量都表现出相同的规律性,其值均为负值,表明营养盐DIP是流出系统区域,而不是进入系统,其中2006年8月各系统区域的交换通量都高于2000年8月,可见在河流流量  $V_0$  相同的情况下,各系统中营养盐浓度直接影响各区域的营养盐通量的大小;这两年中通过河流输入的DIP通量与交换流而带出河口系统的DIP通量相差较大,前者均大于后者,表明上游河流输入是长江口溶解态无机磷(DIP)的主要来源,而长江口门附近水域是DIP净消耗水域。

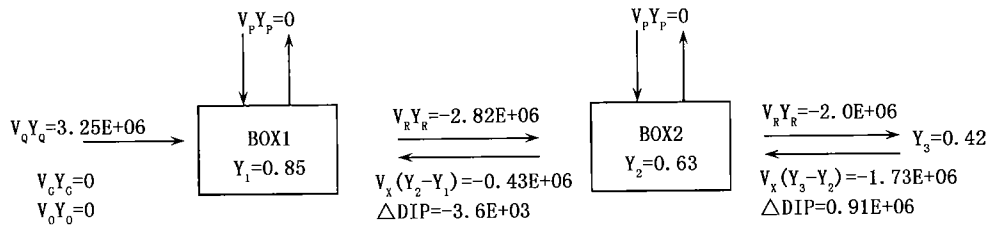


图 5 2000 年 8 月 DIP 收支平衡模式 (浓度单位: mmol/m<sup>3</sup>, 通量单位: mol/d)  
Fig. 5 DIP balance in the Changjiang Estuary in Aug. 2000

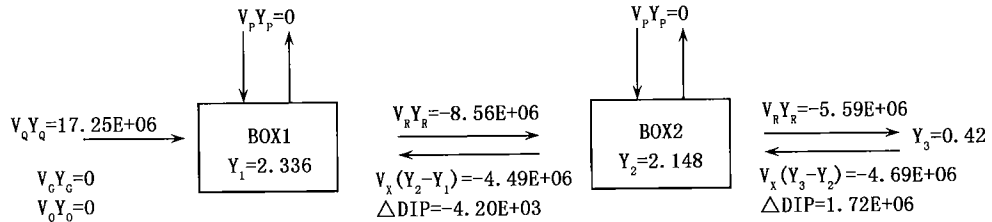


图 6 2006 年 8 月 DIP 收支平衡模式 (浓度单位: mmol/m<sup>3</sup>, 通量单位: mol/d)  
Fig. 6 DIP balance in the Changjiang Estuary in Aug. 2006

### 2.3 营养盐 DIN 通量收支

DIN 的收支平衡计算结果表明 (图 7、图 8), BOX1 区域中 2000 年 8 月的余通量  $V_R Y_R$  为  $258.9 \times 10^6$  mol/d, 2006 年 8 月的余通量  $V_R Y_R$  为  $143.2 \times 10^6$  mol/d; BOX2 区域中 2006 年 8 月余通量为  $9.28 \times 10^7$  mol/d, 2006 年 8 月余通量为  $9.65 \times 10^7$  mol/d。各系统中的交换通量都表现出与 DIP 相同的规律, 其值均为负值, 表明营养盐 DIN 是流出系统区域, 其中 BOX1 区域交换通量 2000 年 8 月为  $100.1 \times 10^6$  mol/d, 2006 年 8 月为  $297.0 \times 10^6$  mol/d; BOX2 区域交换通量 2000 年 8 月为  $299.2 \times 10^6$  mol/d, 2006 年 8 月为  $41.5 \times 10^6$  mol/d。

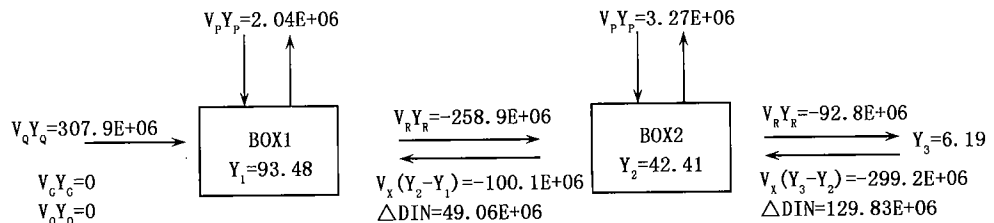


图 7 2000 年 8 月 DIN 收支平衡模式 (浓度单位: mmol/m<sup>3</sup>, 通量单位: mol/d)  
Fig. 7 DIN balance in the Yangze River Estuary in Aug. 2000

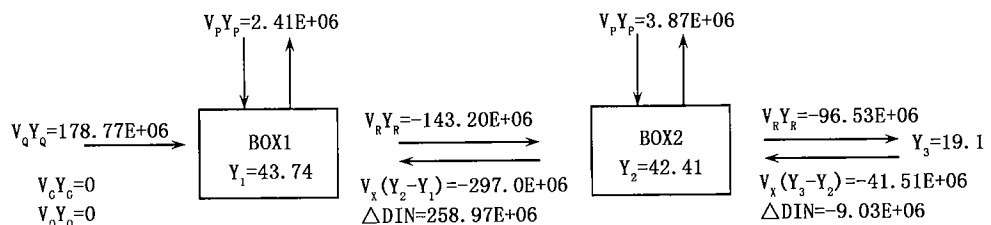


图 8 2006 年 8 月 DIN 收支平衡模式 (浓度单位: mmol/m<sup>3</sup>, 通量单位: mol/d)  
Fig. 8 DIN balance in the Yangze River Estuary in Aug. 2006

2006 年 8 月 BOX1 区域中河流输入 DIN 通量小于交换流带出系统的 DIN 通量, 沈焕庭等<sup>[6]</sup>研究表明长江口生物呼吸作用强于初级生产力, 既长江口是有机质的净消费者, DIN 通过有机质的降解作用被释放出来, 加上沉积物的硝化作用, 增加了海域内 DIN 的含量, 致使交换流中的 DIN 通量高于河流输入

量;上述现象同样出现在 2000 年 8 月 BOX2 区域,河流输入 DIN 通量小于交换流带出系统的 DIN 通量,这可能与 2000 年长江径流量偏小,而长江口门外受其影响较大,口外羽状锋强度变大<sup>[11]</sup>,使 BOX2 区域与外海的营养盐浓度梯度变大。

## 2.4 营养盐的“源”“汇”作用

2000 年 8 月和 2006 年 8 月 DIP 的非保守性均表现出相同的规律(表 2),在 BOX1 区域  $\Delta$ DIP 值均为负值,即 DIP 通过非保守性行为而离开系统,充当“汇”的作用,比如水体中的颗粒悬浮物对 P 的吸附作用和生物的吸收都可能使水体中溶解态磷酸盐 DIP 减少<sup>[12]</sup>。而在 BOX2 区域  $\Delta$ DIP 值由负转变为正充当“源”的作用,有研究表明在拦门沙区域有机质的降解对 DIP 的释放特别显著<sup>[6]</sup>。

表 2 各区域不同年份  $\Delta$ DIP 和  $\Delta$ DIN 的比较 (mol/d)

Tab. 2 Comparisons of  $\Delta$ DIP and  $\Delta$ DIN in different years (fluxes in mol/day)

	BOX1		BOX2	
	$\Delta$ DIP	$\Delta$ DIN	$\Delta$ DIP	$\Delta$ DIN
2000-08	$-3.6 \times 10^3$	$+49.06 \times 10^6$	$+0.91 \times 10^6$	$+129.83 \times 10^6$
2006-08	$-4.20 \times 10^6$	$+258.97 \times 10^6$	$+1.72 \times 10^6$	$-9.03 \times 10^6$

除 2006 年 8 月 BOX2 区域  $\Delta$ DIN 值表现出“汇”的作用外,2000 年 8 月和 2006 年 8 月各区域中  $\Delta$ DIN 值均为正值,表明 DIN 通过非保守性行为进入系统,充当“源”的作用,由于长江口的 DIN 输送通量相当高,与 DIP 相比,DIN 在系统内部差额较大,交换流和余流带出系统的 DIN 不足于平衡整个河口区的 DIN 通量。而 2006 年 8 月 BOX2 区域 DIN 通过非保守性行为离开系统,这是因为交换流带出系统中的 DIN 通量远低于系统内 DIN 通量,这与 2006 年 8 月 BOX2 区域内与外海 DIN 浓度梯度变化趋小,而盐度梯度变大有关。

## 2.5 大径流量下营养盐通量收支

1998 年 8 月最大洪峰期径流量  $71\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$ <sup>[6]</sup>下,计算 BOX2 区域各营养盐通量,并将 2000 年 8 月和 2006 年 8 月同区域各营养盐通量计算结果列于表 3。

表 3 1998 年 8 月与各年平均月通量比较

Tab. 3 Comparisons of Aug. 1998 and average months' fluxes

	径流量 $\times 10^8\ \text{mol/d}$	$\text{DIP} \times 10^6\ \text{mol/d}$				$\text{DIN} \times 10^7\ \text{mol/d}$			
		输入通量	余通量	交换通量	$\Delta$ DIP	输入通量	余通量	交换通量	$\Delta$ DIN
1998-08	61.43	+8.12	-6.74	-14.58	+14.58	+19.43	-12.45	-30.77	+23.67
2000-08	38.11	+2.82	-2.0	-1.73	+0.91	+25.89	-9.28	-29.92	+12.98
2006-08	38.16	+8.56	-5.59	-4.69	+1.72	+14.32	-9.65	-4.15	-0.90

从表 3 中各年的 8 月份营养盐通量对比可以看出:余通量和交换通量受径流量变化明显。1998 年最大径流量下,余通量和交换通量均高于 2000 年 8 月和 2006 年 8 月,其内部差额 ( $\Delta Y$ ) 也有相应的变化,而输入通量不仅受径流影响,还要取决于上游营养盐的输入量。在径流量为一般水平的年份中,如 2000 年 8 月和 2006 年 8 月,各营养盐余通量、交换通量和系统内部差额主要受上游营养盐的输入影响。由此可见,营养盐通量中余通量和交换通量受径流量影响显著,营养盐的输入通量不仅受径流影响,而且上游营养盐的输入对其影响较大。

## 3 结论

本文利用 LOICZ 通用的生源要素通量估算法建立了长江河口营养盐的收支平衡模式。通过估算论证了 LOICZ 模拟方法的简单实用性,证明了 BOX 模型在长江口河口区的适用性。通过建立这样一个

简单的模式,可以得到一些结果:

(1)运用 BOX 模型估算长江口门内和口门外 2000 年和 2006 年同一月份的营养盐 DIP 和 DIN 的通量,并得到相应营养盐通量值。通过估算发现,上游河流输入是长江口溶解态无机磷(DIP)的主要来源,在长江口海域溶解态无机磷 DIP 各通量表现出相同的规律性,在口门内通过非保守性行为流出系统,在口门外则进入系统区域;

(2)相比 DIN 通量与 DIP 通量有数量级的差别,DIN 通量除来自于上游河流输入外,还有部分来自于长江河口区自身有机质的降解以及沉积物的硝化反应,使 DIN 通量表现出“源”的作用,而研究系统内与外海营养盐和盐度的梯度变化也对通量的“源”“汇”产生影响;

(3)通过估算大径流量下营养盐的收支,对比发现长江口海域 DIP 和 DIN 营养盐通量主要由径流量所控制,营养盐通量中余通量和交换通量主要受径流影响;而输入通量不仅受径流影响,还取决于上游营养盐的输入;

(4)河流入河口区与河口输出通量两者存在一定的差别,DIN 内部净通量差额也明显大于 DIP 通量,其影响过程是一个综合复杂的过程,本文只分析了造成这种现象的可能原因,对不同的营养元素而言,长江河口是起“源”还是“汇”的作用,有待做进一步的研究。

#### 参考文献:

- [1] Holligan P M, de Boois H. Land-ocean interactions in the coastal zone (LOICZ) [R] // Science Plan, Global Change Report, 1993, 25: 1 - 150.
- [2] Pemetta J C, Milliman J D. Land-ocean interactions in the coastal zone (LOICZ) [R] // Implementation Plan, Global Change Report, 1995, 33: 1 - 125.
- [3] 刘新成, 沈焕庭. 长江入河口区生源要素的浓度变化反通量估算[J]. 海洋与湖沼, 2001, 33(3): 332 - 340.
- [4] 胡 辉, 胡方西. 长江口的水系和锋面[J]. 中国水产科学, 1995, 2(1): 81 - 90.
- [5] 胡方西, 胡 辉. 长江口锋面研究[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2002.
- [6] . 长江河口物质通量[M]. 北京: 海洋出版社, 2001.
- [7] 杨 凯, 唐 敏, 周丽英. 上海近 30 年水蒸发变化及其城郊差异分析[J]. 地理科学, 2004, (5): 557 - 561.
- [8] 王文兴. 中国酸雨成因研究[J]. 中国环境科学, 1994, 14(5): 323 - 329.
- [9] 沈志良. 长江口无机氮控制机制的初步研究[J]. 海洋科学, 1996, 1: 61 - 63.
- [10] Gordon Jr D C, Boudreau P R. Land-ocean interactions in the coastal zone (LOICZ) [R] // Biogeochemical Modeling Guidelines, LOICZ Reports & Studies, 1996, 5: 1 - 96.
- [11] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000 年 8 月长江口外海区冲淡水 and 羽状锋的观测[J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 250 - 255.
- [12] 洪华生, 曹文志. 九龙江河口生物地球化学元素通量的初步模拟[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(4): 1 - 4.