

文章编号: 1000-0615(2003)03-0265-08

东海磷营养盐变动模型的建立与应用

章守宇, 刘 莲, 杨 红
(上海水产大学海洋学院, 上海 200090)

摘要: 基于磷营养盐的变动由线性趋势和周期性波动构成的假设, 构建了东海磷营养盐变动模型; 提出了对非等间隔时间序列实测数据求解周期等模型参数的逐步选择法。运用模型对东海磷营养盐的历史调查资料进行验证及预测检验均取得了良好效果。分析还表明, 周期性成分引起的波动对东海磷酸盐变动的影响要比相应的趋势项成分大得多; 模型的构成周期中并没有特别卓越的成分在其中起支配作用, 决定东海磷酸盐变动的是多个时间尺度上的周期性现象的共同作用。

关键词: 东海; 磷营养盐; 模型; 时间序列

中图分类号: S911; S913 文献标识码: A

Establishment and application of phosphorus variation model in the East China Sea

ZHANG Shou-yu, LIU Lian, YANG Hong

(Ocean College, Shanghai Fisheries University, Shanghai 200090, China)

Abstract: Based on the hypothesis that phosphorus nutrient variation consists of linear trend and periodical fluctuation, a model of phosphorus nutrient variation (PVM) is developed. The stepwise choice method is adopted to solve the model parameters; such as period parameters based on observed data of unequal time interval series. The satisfactory results have been obtained by using the PVM model in fitting the observed data of phosphorous nutrient and verifying the phosphorus nutrient variation as a forecast measure. It is shown that the fluctuation due to the periodical components has much more effect on the variation of phosphorus in the sea than the corresponding trend component. It is also showed that no periodical component has the dominant effect in phosphorus variation and it is the combined effect of periodical phenomenon in several time-scales to determine the variation of phosphorus nutrient.

Key words: East China Sea; phosphorus; model; time series

磷属于亲生物元素, 是构成海洋初级生产力的基础物质之一。在许多沿岸海域, 由于水体中的氮磷原子比高于生物最适生长的 Redfield 比值, 而使磷同时又成为该海域初级生产力乃至赤潮发生的限制性因子^[1-5]。因此, 研究磷营养盐的变动规律对于把握该海域生态环境的未来走向、区域性赤潮发生的监测预报等都有着非常现实的意义。

收稿日期: 2002-08-16

资助项目: 上海市属博士学科点建设基金, 上海高校科技发展基金, 上海水产大学校长专项基金资助

作者简介: 章守宇(1961—), 男, 浙江长兴人, 博士, 教授, 研究方向为海洋生态系统工程。E-mail: syzhang@shfu.edu.cn

有关对磷营养盐的研究,过去较多的是围绕这些营养盐的区域分布特征以及它们的地化循环规律等来进行的^[6-7];也有学者试图通过再生动力学模型来定量地描绘磷营养盐在局部空间的短时间变化,以解释赤潮形成、发展及消亡过程中磷的作用^[8],但由于模型中“生物反应”项的有关参数的不确定性而使得整个定量解析局限性很大。而本文则根据东海磷营养盐的历史调查数据,建立其随时间和区域的中长期变动模型,并利用数值解析手段得到模型的相关参数。在此基础上,结合实际调查结果分析磷营养盐在该海域的分布特征和变动规律,最后运用本模型对整个东海的磷营养盐的近期变动趋势进行预测。

1 模型及解析

1.1 模型

图1所示是位于30°N、123.5°E的东海调查站点自1989年以来磷酸盐含量的历年变化情况。由图可知,磷营养盐含量具有稳定的增长趋势和明显的波动特征,据此假设东海磷营养盐的变动由趋势项和波动项二部分构成;进一步地,若趋势项是线性递增的、而波动项是具不同周期和振幅的余弦波的线性叠加,则该调查站点的磷营养盐变动模型可表示为

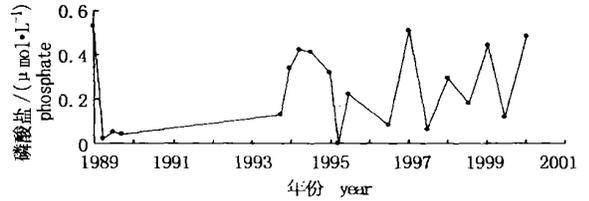


图1 调查站位磷酸盐含量的历年变化
Fig. 1 Secular change of phosphate concentration at survey station

$$P(t) = (a_0 + b_0t) + \sum_{k=1}^m P_k \cos(\omega_k t - \varphi_k) \tag{1}$$

上式左边为磷营养盐含量,是时间 t 的函数;右边第一项 $(a + b_0t)$ 为线性趋势项, a_0, b_0 分别表示磷营养盐在 80 年代末的起点基准值及其那时以来的线性变化率;右边第二项为波动项,由 m 个周期和振幅各不相同的余弦波线性叠加而成, P_k, ω, φ_k 分别为第 k 个余弦波的振幅、角频率和初相位,其中 $\omega = 2\pi / T_k, T_k$ 表示波动周期。

当考虑整个东海区的磷营养盐变动时,(1)式中的 $a_0, b_0, P_k, \omega, \varphi_k$ 均可表示为区域点 (x, y) 的函数,同时对(1)式进行分解变换可得

$$\begin{cases} P(x, y, t) = a_0(x, y) + b_0(x, y)t + \sum_{k=1}^m [a_k(x, y) \cos \omega_k(x, y)t + b_k(x, y) \sin \omega_k(x, y)t] \\ Z_i(x, y) = C_{i1}x^2 + C_{i2}y^2 + C_{i3}xy + C_{i4}x + C_{i5}y + C_{i6} \end{cases} \tag{2}$$

(2)式中,

$$\begin{cases} a_k(x, y) = P_k(x, y) \cos \varphi_k(x, y) \\ b_k(x, y) = P_k(x, y) \sin \varphi_k(x, y) \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \tag{3}$$

(1)、(2)、(3)式即构成东海磷营养盐变动的模型。(2)式中的 Z_i 为模型各参数 $a_0(x, y), b_0(x, y), T_k(x, y), P_k(x, y), \varphi_k(x, y)$ 的近似表达式, $C_{i1}, C_{i2}, \dots, C_{i6}$ 为各自的待定系数。

1.2 解析

对上述磷营养盐变动模型求解周期 T_k (或角频率 ω_k)、振幅 P_k 等各参数,从方法论讲是属于时间序列分析的范畴,但目前在气象、水文等研究领域得到广泛应用的谱分析、方差分析及人工神经网络等方法^[9-12],要求实测数据的时间序列必须为等间隔,因此,对于非等间隔的东海磷营养盐历史数据不能直接运用。另外,由于数据量本身还不十分大,故也无法删除其中的一部分来作成等间隔的时间序列数据。本文在此提出“逐步选择法”以求得本模型非等间隔系列数据中的振动周期及其他参数,对于某个站点,其具体步骤如下:

① 根据现场海域磷营养盐的变化特点决定周期的个数 m ,可能最大周期取为实测数据时间长度之

半值。

② 对应于实测次数为 n 的 $P(t_i)$ 和 $t_i (i=1, 2, \dots, n)$, 对(2)式运用最小二乘法回归, 分别对 a_0 、 b_0 和 a_k 、 b_k 取偏导数为零得以下矩阵式:

$$\begin{pmatrix} n & \sum t & \sum \cos \omega t & \sum \sin \omega t & \dots & \sum \cos \omega t & \sum \sin \omega t & \dots \\ \sum t & \sum tt & \sum \cos \omega t \cdot t & \sum \sin \omega t \cdot t & \dots & \sum \cos \omega t \cdot t & \sum \sin \omega t \cdot t & \dots \\ \sum \cos \omega t & \sum t \cos \omega t & \sum \cos^2 \omega t & \sum \sin \omega t \cos \omega t & \dots & \sum \cos \omega t \cos \omega t & \sum \sin \omega t \cos \omega t & \dots \\ \sum \sin \omega t & \sum t \sin \omega t & \sum \cos \omega t \sin \omega t & \sum \sin^2 \omega t & \dots & \sum \cos \omega t \sin \omega t & \sum \sin \omega t \sin \omega t & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \\ \sum \cos \omega t & \sum t \cos \omega t & \sum \cos \omega t \cos \omega t & \sum \sin \omega t \cos \omega t & \dots & \sum \cos^2 \omega t & \sum \sin \omega t \cos \omega t & \dots \\ \sum \sin \omega t & \sum t \sin \omega t & \sum \cos \omega t \sin \omega t & \sum \sin \omega t \sin \omega t & \dots & \sum \cos \omega t \sin \omega t & \sum \sin^2 \omega t & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots & \dots \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} a_0 \\ b_0 \\ a_1 \\ b_1 \\ \vdots \\ a_k \\ b_k \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum P \\ \sum P \cdot t \\ \sum P \cos \omega t \\ \sum P \sin \omega t \\ \vdots \\ \sum P \cos \omega t \\ \sum P \sin \omega t \\ \vdots \end{pmatrix} \quad (4)$$

③ 任意设定一周期组 $T_1, T_2, \dots, T_k, \dots, T_m$, 再通过(4)式求解 a_0 、 b_0 和 a_k 、 b_k , 并由下式得到 P_k 和 φ_k 。

$$\begin{cases} P_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \\ \varphi_k = \arctan(b_k / a_k) \end{cases} \quad (k=1, 2, \dots, m) \quad (5)$$

④ 利用(4)、(5)和(1)式得到对应于设定周期组的 n 个 $P(t)$ 计算值。

⑤ 重复③、④得到对应于各个设定周期组的 $P(t)$ 计算值。

⑥ 根据最大相关系数最终确定其中最适的一组周期及相应的 a_0 、 b_0 和 P_k 、 φ_k 值。

以上步骤②~⑥的计算通过 Visual Basic 编程完成, 运算流程见附录 1。根据每站点所得的模型参数, 利用(2)式中第二等式, 可求得模型各参数的空间分布函数。

2 实例计算

运用本模型对东海营养盐的中长期变动(1989—2000. 2)进行实例分析, 图 2 为该海域调查站位的分布。

磷营养盐变动模型中余弦波合成个数 m 的取值以尽量小、但同时又不影响模型精度为原则。具体应结合海域环境的复杂程度, 并根据不同 m 取值时模型回归的相关系数变化率趋零来最终确定, 本文取 $m=3$ 。运用(2)、(3)式并按 2.2.1 中的②~⑥步骤, 可求得模型的周期参数。计算结果显示约三分之二的调查站位在构成其磷酸盐波动的 3 个周期中均具有 11~13 个月的成分, 如表 1 所示。依据该结

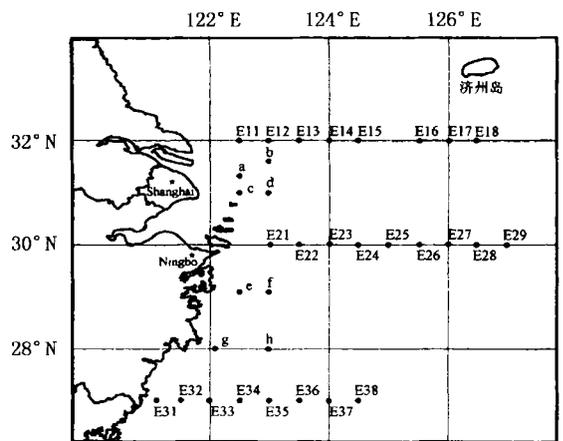


图 2 东海海域调查站位图

Fig. 2 The sketch-map of survey stations in the East China Sea 分布。

果并考虑东海磷营养盐变动的主要影响因素有大陆径流^[13,14]等具年周期性变化的特征,故设 $T_1=12$ 个月作为其变动的一固定周期,称之为严格周期^[9]。其物理意义是显而易见的,即一年之内周而复始的季节性变化。

表 1 东海磷营养盐变动模型构成周期(T_1)

Tab. 1 One constituted period (T_1) of phosphorus variation model in the East China Sea

站点 station	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	a	b	c
T_1	12	3	12	13	5	13	11	13	1	1	11
站点 station	d	e	f	g	h	E21	E22	E23	E24	E25	E26
T_1	11	13	13	4	1	13	12	12	2	1	13
站点 station	E27	E28	E29	E31	E32	E33	E34	E35	E36	E37	E38
T_1	12	13	12	4	12	12	12	13	2	10	20

构成周期 T_2 、 T_3 的计算结果如表 2 所示。由表可知,各站点之间的 T_2 或 T_3 差异均较大,分别达 35.1(=36.1-1.0)和 57.4(=59.8-2.4)个月,反映了东海各调查站点所在海区的磷营养盐变动在其影响因子组成上的空间差异性。因为周期 T_2 、 T_3 的物理意义的复杂性与不确定性,故称之为准周期^[9]。尽管目前对有关准周期变化及其物理因子的认识还存在争议,但国内外许多气象、水文等工作者在这方面的一些阶段性成果(如长江中下游 5~8 月的降雨量周期为 24~36 个月、海气相互作用的韵律周期为 5~6 个月、太阳活动的双振动周期为 60~72 个月等等^[9])为分析某些海域的磷营养盐波动周期(如站点 E13、a 等的 36.1、27.9、站点 e 等的 5.9 及站点 f 等的 59.8 个月等)的物理意义提供了一定的理论依据。即磷营养盐在这些站点的波动周期在一定程度上体现了该海域受相应的、具“准周期性”规律的物理因子的影响。由于海洋中许多生物的、化学的变化从本质上说都受着大至行星尺度小至湍流涡动的物理过程的支配,因此,那些影响磷营养盐中长期变动的生物、化学因子最终总归会通过一定的周期性波动体现出来,本文把这些因素一并归结到了构成周期 T_2 和 T_3 之中。

表 2 磷营养盐变动模型的其他构成周期(T_2 、 T_3)

Tab. 2 The other constituted periods (T_2 and T_3) of phosphorus variation model

站点 station	E11	E12	E13	E14	E15	E16	E17	E18	a	b	c
T_2	7.4	1.2	9.3	36.1	4.6	2.0	6.0	3.0	16.6	6.9	8.0
T_3	19.4	11.8	36.1	4.1	7.4	11.1	11.3	6.1	27.9	14.6	15.1
站点 station	d	e	f	g	h	E21	E22	E23	E24	E25	E26
T_2	7.2	3.7	8.0	1.7	3.0	5.2	8.2	8.9	7.6	9.1	1.0
T_3	7.4	5.9	59.8	58.2	4.1	13.2	16.5	34.1	20.2	35.7	2.4
站点 station	E27	E28	E29	E31	E32	E33	E34	E35	E36	E37	E38
T_2	9.1	12.6	8.1	9.9	9.2	5.9	7.6	4.8	9.3	1.8	19.5
T_3	37.1	23.5	24.4	54.7	37.6	16.2	9.6	5.9	39.5	3.6	24.1

磷营养盐变动模型的其他基本参数的计算结果见表 3。1989 年以来东海磷营养盐的月增长率 b_0 的最大值出现在近岸的 b 站位,达到了 $13.17 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,而最小值则出现在外海的 E29 站位,仅 $0.013 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,二者相差竟达 1013 倍。显然,这是由于携带着大量磷营养盐的大陆径流对东海的影响程度是由近岸向外海逐渐减小的缘故。但是,尽管各个站位的差异较大,就东海整体而言,其平均值为 $2.197 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,仍是处于微量增加的水平。

由表 3 还可知,构成磷营养盐变动的 3 个周期性波动成分其振幅在整个东海的平均值分别为 0.17、0.141 和 $0.178 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$,彼此相差较小、分别占 34.8%、28.8% 和 36.4%,因而并没有特别卓越的周期成分在磷营养盐变动中起支配作用,这说明决定其变动的是多个时间尺度上的周期性现象的共同作用。但它们相对于线性趋势项均显示出较大的优势,分别达到了 77.38、64.18 和 81.02 倍,平均值为 74.2 倍,即周期性成分引起的波动对整个海域磷酸盐变动的影

疑具有特别重要的意义。

表3 磷营养盐变动模型的其他基本参数

Tab. 3 The other basic parameters of phosphorus variation model

站位 station	模型参数 parameters of the model								R^2
	a_0	$b_0 \times 10^{-3}$	P_1	P_2	P_3	φ_1	φ_2	φ_3	
E11	0.408	0.528	0.326	0.210	0.146	-0.982	1.975	2.985	0.995
E12	0.291	1.585	0.220	0.144	0.269	4.329	3.294	0.689	0.958
E13	0.349	1.430	0.240	0.204	0.105	-0.562	3.079	3.718	0.861
E14	0.313	2.700	0.212	0.135	0.223	-0.637	2.797	3.519	0.899
E15	0.236	2.806	0.191	0.171	0.112	0.321	-1.152	-1.371	0.999
E16	0.220	0.675	0.209	0.205	0.061	-0.119	4.665	3.734	0.961
E17	0.105	1.710	0.149	0.080	0.131	-1.130	-1.375	2.129	0.987
E18	0.249	0.727	0.166	0.159	0.074	-0.313	1.994	-0.798	0.962
E21	0.205	1.095	0.080	0.083	0.157	-1.059	4.494	0.825	0.971
E22	0.210	0.713	0.129	0.070	0.121	0.233	-1.063	-0.799	0.906
E23	0.133	0.585	0.078	0.105	0.109	-0.142	-1.309	-1.090	0.894
E24	0.181	0.233	0.165	0.060	0.051	-0.773	4.085	-1.152	0.773
E25	0.161	0.452	0.120	0.098	0.055	-0.715	3.721	-1.476	0.843
E26	0.147	0.849	0.174	0.163	0.140	4.530	0.679	0.486	0.923
E27	0.135	0.559	0.095	0.089	0.068	-0.434	4.361	4.638	0.880
E28	0.090	1.480	0.127	0.070	0.087	-0.595	2.374	-0.541	0.880
E29	0.224	0.013	0.165	0.072	0.156	-1.055	3.651	-1.310	0.918
E31	0.254	1.480	0.145	0.142	0.124	0.460	-0.713	-1.105	0.999
E32	0.219	0.358	0.142	0.135	0.080	-0.627	3.202	3.923	0.874
E33	0.149	0.882	0.066	0.075	0.081	0.261	0.179	-0.751	0.923
E34	0.103	0.983	0.060	0.065	0.059	0.925	-0.669	0.977	0.903
E35	0.223	0.150	0.003	0.071	0.161	4.619	2.299	-0.280	0.748
E36	0.140	0.547	0.053	0.087	0.078	-0.595	3.529	-1.318	0.895
E37	0.186	0.299	0.026	0.115	0.106	0.331	0.362	0.250	0.868
E38	0.198	0.231	0.043	0.068	0.127	0.965	4.299	4.588	0.795
a	0.260	12.600	0.102	0.469	0.323	1.557	1.048	2.004	0.999
b	0.252	13.100	0.235	0.155	0.433	-1.211	-0.049	2.049	0.999
c	0.807	5.230	0.227	0.360	0.634	1.110	2.137	1.610	0.998
d	0.246	2.570	0.160	0.153	0.223	-0.977	3.414	-0.154	0.775
e	0.946	12.300	1.259	0.259	0.671	1.915	0.506	4.334	0.998
f	0.531	1.950	0.091	0.088	0.547	4.617	4.107	4.175	0.956
g	0.383	0.290	0.091	0.110	0.120	4.695	-0.800	1.808	0.998
h	0.235	1.400	0.058	0.181	0.047	-0.295	2.592	3.436	0.740
平均 aver.	0.266	2.197	0.170	0.141	0.178	0.567	1.869	1.204	0.911

初相位 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 反映了其相应的波动周期在计算该海域磷营养盐变动时的起始时刻的位置, 这种由于波动初相位在各站位的正负值所产生的滞后性或超前性并无特别的物理意义, 仅仅是因为计算曲线能较好地拟合实测数据。

运用本模型对东海 33 个调查站位进行了验证, 结果精度良好, 图 3 显示了其中几类磷酸盐变动曲线具有代表性的部分站位的验证结果。尽管由于各站位的周期、振幅及初相位不同而导致它们的变动曲线类型不一样, 但都能较好反映磷酸盐的实测值及其变动走向。因此, 本模型将东海磷营养盐变动分解成线性趋势项和周期波动项这二部分是合适的, 运用“逐步选择法”来求解非等间隔系列数据中的振动周期及其他参数是可行且有效的。

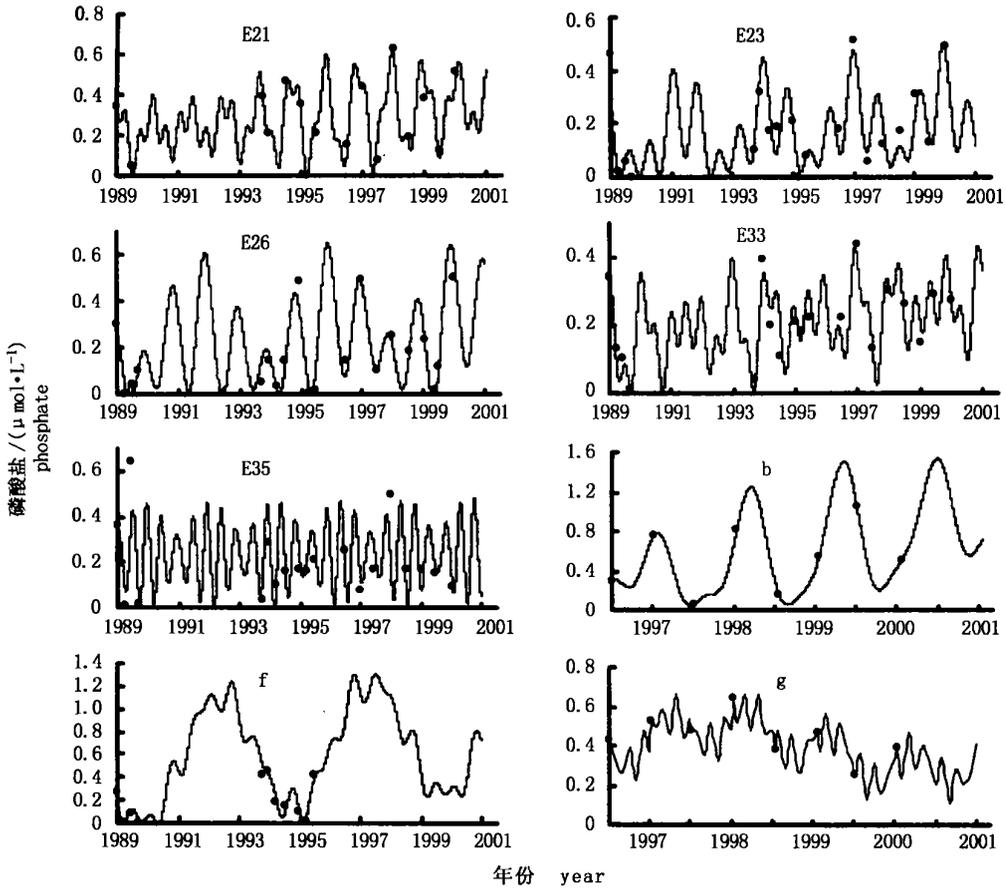


图 3 各调查站位磷酸盐变动的计算值及实测值(实线: 计算值, 圆点: 实际值)

Fig. 3 Calculated values and observed values of phosphate concentration at different survey station(Line: calculated values, Dots: observed values)

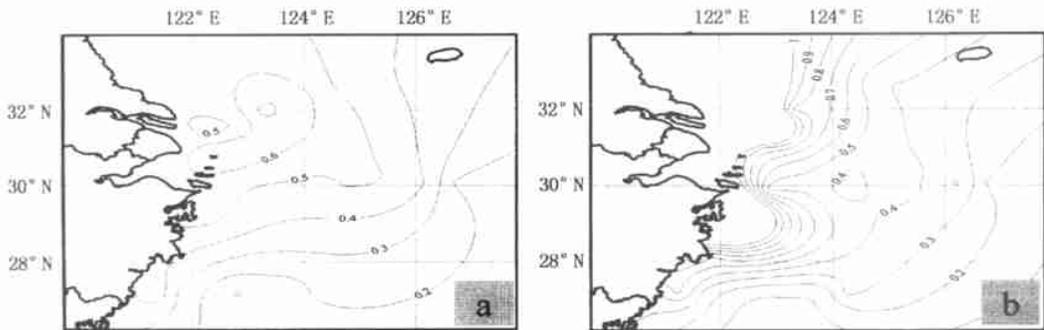


图 4 模型对 2000 年 2 月的预测检验(a: 实际值, b: 预测值)

Fig. 4 The verification of model by forecasting for Feb 2000 (a: observed values b: forecast values)

作为对本模型用于预测结果的检验, 图 4 显示了 2000 年 2 月东海磷酸盐的实际值(a)与预测值(b)

的等值线分布。比较二者可知,除了近岸几个站位由于实测数据较少(1996—2000)而使得预测误差较大外,其它站位的预测都达到了较好的精度。

图5给出了2003年8月东海磷酸盐分布的预测结果。由图可知,其分布特征为由沿岸向外逐渐降低,但在中部海域出现浓度为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的低谷区,这可能是由于该海域此期间的水温、透明度等环境因子均较适宜浮游植物生长而使得水体中磷酸盐浓度降低的缘故。由图5还可知,磷酸盐浓度在长江口—杭州湾海域具有双舌分布特征,即自长江口和杭州湾分别向东北、东南方向伸展,这与两河的夏季高营养盐、高径流量及其扩张途径^[13]是一致的。

3 结论

通过建立磷营养盐的变动模型及对东海磷营养盐的历史数据进行验证、预测检验,本文主要得到以下几点结论:

(1) 以磷营养盐的变动由线性趋势项和周期波动项构成这一假设构建的磷营养盐变动模型,可以较准确地反映东海磷营养盐的分布规律及其近期的变动走向。

(2) 本文提出的“逐步选择法”可以有效地、从较少量的非等间隔时间序列数据中求得磷营养盐变动模型的周期、振幅等参数。

(3) 周期性成分引起的波动对东海磷酸盐变动的影响要比相应的趋势项成分大得多,这对于认识该海域磷营养盐变动的近期走向、对于磷为限制性营养物质的某些海区的赤潮发生进行预警具有特别重要的意义。

(4) 包括季节性变动在内,磷营养盐变动模型中并没有特别卓越的周期成分在其中起支配作用,决定其变动的是多个时间尺度上的周期性现象的共同作用。

(5) 影响东海磷营养盐变动的因子具有空间差异性,这种差异性可以通过模型中的“准周期”来体现。

本研究是依据磷营养盐自身的历史变动过程而建立模型的,没有直接涉及到影响磷营养盐变动的环境因子或生物因子,而是将这些因子的影响归结到了模型的构成周期之中,并取得了较好结果。随着新的实测数据的不断补充,本模型的验证及预测精度将会得到进一步提高。如何根据环境、生物等影响因子来探讨东海磷营养盐的“横向变动”,以分析本模型“纵向变动”中构成周期的合理性、显见性,并在此基础上结合海洋物理过程模型来构建东海磷营养盐的迁移扩散及循环再生的生态动力模型,将是今后的重要课题。

参考文献:

- [1] Hama T, Shin K H, Handa N. Spatial variability in the primary productivity in the East China Sea and its adjacent waters [J]. *J Oceanography*, 1997, 53: 41—45.
- [2] Chen C M, Bao J J, Wu Y D. Relationship between the different forms, concentration of nutrients and the competition and growth of phytoplankton 1. Effect of phosphorus [J]. *Marine Environmental Science*, 1990, 9(1): 6—12. [陈慈美,包建军,吴瑜端. 纳污海域营养物质形态及含量水平与浮游植物增殖竞争关系 I. 磷的效应[J]. *海洋环境科学*, 1990, 9(1): 6—12.]
- [3] Hu M H, Yang Y P, Xu C L, et al. Phosphate limitation of phytoplankton growth in Changjiang River estuary [J]. *Acta Oceanol Sin*, 1989, 11(4): 439—443. [胡明辉,杨逸萍,徐春林,等. 长江口浮游植物生长的磷酸盐限制[J]. *海洋学报*, 1989, 11(4): 439—443.]
- [4] Hong J C, Huang Q, Jiang X S, et al. Analysis of environmental factors during occurrence of *Skeletonema costatum* red tide in Changjiang River estuary [J]. *Oceanol et Limnol Sin*, 1992, 25(2): 179—184. [洪君超,黄秀清,蒋晓山,等. 长江口中肋骨条藻赤潮发生全过程

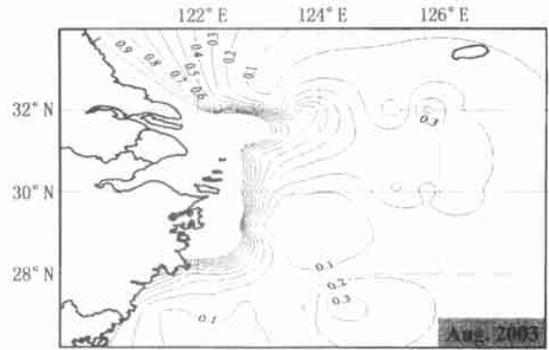


图5 2003年8月东海磷酸盐的分布预测
Fig. 5 Distribution of phosphorus forecasted by the model in the East China Sea in Aug 2003

环境要素分析—营养盐状况[J]. 海洋与湖沼, 1992, 25(2): 179—184.]

- [5] Lin R G, Zou J Z. Consequences and countermeasures of coastal eutrophication [J] . Marine Environmental Science, 1997, 16(3): 71—75. [林荣根, 邹景忠. 近海富营养化的结果和对策[J]. 海洋环境科学, 1997, 16(3): 71—75.]
- [6] Huang Z Q, Ji W D. Variation character and correlation of total phosphorus, organic phosphorus and phosphate in Changjiang River Estuary [J] . Acta Oceanol Sin, 1994, 16(1): 51—60. [黄自强, 暨卫东. 长江口水中总磷、有机磷、磷酸盐的变化特征及相互关系[J]. 海洋学报, 1994, 16(1): 51—60.]
- [7] Zhu C J, Shi X Y, Li T. The distribution and regeneration of phosphate in the East China Sea [J] . J Ocean Univ of Qingdao, 1996, 26(1): 75—81. [祝陈坚, 石晓勇, 李 铁. 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.]
- [8] Yanagi T, Onizuka G. Numerical model on the lower trophic level ecosystem in Hakata Bay [J] . Research of Marine, 1999, 8(4): 245—251.
- [9] Feng L H, Lou G Y. Forecast of intensity of landing typhoon bases on model superposition method [J] . Acta Oceanol Sin, 2001, 23(1): 127—132. [冯利华, 骆高远. 基于模型叠加方法的登陆台风强度预报[J]. 海洋学报, 2001, 23(1): 127—132.]
- [10] Huang Z S. Spectrum analysis method and the application in the hydrometeorology [M] . Beijing: Weather Press, 1983. [黄忠恕. 波谱分析方法及其在水文气象学中的应用[M]. 北京: 气象出版社, 1983.]
- [11] Huang Z H, Quan Y C, Xu X J, et al. Application of the period extrapolated method by variance analysis to long-term prediction [J] . Acta Mathematica Sinica, 1974, 17(3): 156—163. [黄忠华, 全应翠, 徐相金, 等. 方差分析周期外推法在长期预报中的应用[J]. 数学学报, 1974, 17(3): 156—163.]
- [12] Holger R M, Graeme C D. Neural networks models for forecasting univariate time series [J] . Neural Network World, 1996, 6(5): 747—772.
- [13] Duan S W, Zhang S, Chen X B, et al. Concentrations of nitrogen and phosphorus and nutrient transport to estuary of the Yangtze River [J] . Environmental Science, 2000, 21: 53—56. [段水旺, 章 申, 陈喜保, 等. 长江下游氮、磷含量变化及其输送量的估计[J]. 环境科学, 2000, 21: 53—56.]
- [14] Tang R Y. Biochemical behavior of nitrogen and phosphate in the Changjiang River estuary and its adjacent sea areas. "The Biochemical Research in the Changjiang River estuary and its adjacent sea areas" [M] . Beijing: China Ocean Press, 1992, 322—334.
- [15] Wang B D. On the extension and nutrient transportation of the Changjiang River diluted water [J] . Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas, 1998, 16(2): 41—47. [王保栋. 长江冲淡水的扩展及其营养盐的输送[J]. 黄渤海海洋, 1998, 16(2): 41—47.]

附录 1 计算流程图

Appendix 1 The flow chart of calculation

