海洋浮游生态系统动力学模式的研究*

高会旺 冯士筰 管玉平

(青岛海洋大学物理海洋研究所 青岛 266003)

提要 分析了海洋浮游生态系统动力学模式的结构,讨论了其研究现状。90年代以来海洋浮游生态系统动力学模式的特点是:状态变量的个数较以前有所增加,从 2---4 个增加到 3---7 个, 生物过程的描述更加细致;注意刻画物理过程的作用,特别是垂直方向上湍流的交换作用;利用 或改进原来的模式,研究新问题;模式仍以一维为主,同时三维耦合模式也得到发展和应用;研 究区域仍以北大西洋为主,也出现了研究赤道太平洋、阿拉伯海、东海等海区的工作。

关键词 海洋浮游生态系统 动力学模式 研究进展

学科分类号 Q178

海洋生态系统动力学数值模拟的研究始于 40 年代的欧洲,70—80 年代有了飞速的发展并得到广泛的应用,对生态系统能流、物流及其结构的描述日趋深入。进入 90 年代后,海洋生态系统动力学已成为国际上海洋科学研究的热点。海洋生态系统动力学模型研究越来越多受到重视,因为它不仅是多学科间、也是国际性海洋科学计划间联系的纽带和工具,同时还能够对制定观测计划提供指导(唐启升等,1996)。我国生态系统动力学的研究刚刚起步,但生态系统动力学模型的研究已被列为"九五"跨学科自然科学重大基金项目 "渤海生态系统动力学与生物资源持续利用"的基础内容之一。

海洋浮游生态系统动力学模型是海洋生态系统动力学模型的最基础部分,因此,深入 分析海洋浮游生态系统动力学模型的结构和特征,特别是 90 年代以来的发展特点,对我 国海洋浮游生态系统动力学模型的建立和研究具有重要的意义。本文主要讨论海洋浮游 生态系统动力学模型的结构,并对 90 年代以来模式工作的特点进行对比分析。

1 海洋浮游生态系统动力学模式

海洋生态系统动力学模式主要包括物理部分和生物部分,因此有时也称为物理-生物 耦合(生态)模式(Varela et al, 1992, Oguz et al, 1996)。浮游生态系统动力学模式刻画 了浮游生态系统在物理、化学和生物因子影响下的时间变化。模式表示成为浮游生态系统状态变量的一组微分方程:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + u \frac{\partial C_i}{\partial x} + v \frac{\partial C_i}{\partial y} + w \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) + B + S \quad (1)$$

* 国家自然科学基金资助项目,49576298号。高会旺,男,出生于1966年4月,博士后,教授, E-mail:hwgao@lib. ouqd.edu.cn

收稿日期:1998-01-19,收修改稿日期:1998-07-28

式中,*C*,为海洋浮游生态系统的状态变量,如浮游植物、浮游动物、营养盐(N,P,Si)、有机碎屑等;*i* = …*n*,对于不同的研究 *n*的值不同;*u*、*v*、*w*为海水在三个方向的流速;*K*,、*K*,、*K*,为湍扩散系数;*B*为生物过程引起的状态变量的变化;*S*为生物过程以外的源和汇,如营养盐的大气和河流输入,浮游植物、浮游动物和碎屑由于重力沉降并移出研究的生态系统。

上述模式可根据研究问题的需要而简化成为二维,一维(一般为垂直一维),甚至0维的模式。

浮游植物 (P)、浮游动物 (Z)、营养盐 (N) 和有机碎屑 (D) 是海洋浮游生态系统中最基本的状态变量 (有些模式仅取浮游植物、浮游动物、营养盐为其状态变量)。 生物过程引起的状态变量的动态变化率表示为:

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} = prodp - graz - mortp - metap \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}Z}{\mathrm{d}t} = \gamma \cdot graz - mortz - metaz \tag{3}$$

$$\frac{dN}{dt} = -uptkn + \theta \cdot graz + remn \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}D}{\mathrm{d}t} = (1 - \gamma - \theta) \cdot graz + mortp + mortz - remn \tag{5}$$

其中, prodp 为浮游植物光合作用的生产量; graz 为浮游动物对浮游植物的捕食量; mortp 为浮游植物的死亡; metap 为浮游植物的代谢,包括呼吸、自溶和分泌; mortz 为浮游动物的死亡; metaz 为浮游动物的代谢,主要包括呼吸和排泄; remn 为有机碎屑的再矿化; γ 为浮游动物对捕食量的同化率; θ 为浮游动物的捕食量中转化为营养盐的份数。

虽然生物过程描述成了上述的动力方程形式,但其中各项的表达(包括函数关系和参数)却由于没有足够的观测数据和实验基础而带有较大的人为性。因此,不同模式工作中 所取的函数形式和参数也有较大的不同。

2 海洋浮游生态系统动力学模式研究的最新进展

Fransz 等 (1991) 对生态动力学模式进行了概括性的分析和论述, 也是对 90 年代以前 海洋浮游生态系统动力学模式的总结。90 年代以来短短的几年内, 海洋浮游生态系统动 力学模式的研究又取得了较大的进展, 发表了多篇相关的论文。表 1a 列出了 90 年代以来 海洋浮游生态系统动力学模式方面的部分具有代表性的工作。

表 la 列出的模式中,大部分是 90 年代以后建立的,也有些是基于前人的工作,如模式 11、14、17 是利用 Franks 等(1986)简单的 NPZ 生物模式,与二维或三维的物理模式耦合。 Frost(1993)发展了 Frost(1987)的生态模式,改进涉及了环境强迫因素、模式的垂直结构 和垂直扩散、有效光合辐射和溶解无机氮的吸收过程。

2.1 90年代海洋浮游生态系统动力学模式的特点

(1) 生态系统动力学模式中状态变量的个数有所增加。90 年代以来的海洋浮游生态 系统动力学模式中状态变量的个数为 3--7 个,个别超过 7 个。几乎所有模式都包含了 P、 Z、N三个基本量,大多数也包括了 D。这与 90 年代以前的模式相比,状态变量的个数有所 增加。Fransz 等(1991)分析了 20 个模式,其状态变量一般是 2-4 个,个别超过 6 个,一般 把 P 和 N 作为基本的状态变量。这表明 90 年代后对生物过程的描述更加细致。

343

表1a 90年代以来的海洋浮游生态系统动力学模式及特点

Tab. 1a	Marine	planktonic	ecosystem	Models	and	their	features	in	the	1990s
---------	--------	------------	-----------	--------	-----	-------	----------	----	-----	-------

序号	模式		模式维数		研究海域	研究问题
1	Fasham	P, Z, B	垂直一层	年	百慕大海域	浮游生态系统的年循环
	(1990)	N, A, Nd, D		混合层		
2	Varela等	$H, 2P^{11}, N$	垂直一维		马尾藻海	深层叶绿素a最大值形成
	(1992)	Z, POM		0—300m	地中海西北部	的机制
3	Taylor等	4P, 3H, $4N^{2}$	垂直一层	220d	北大西洋	浮游生态系统的季节变化
	(1993)	D		混合层	$47^{\circ} - 60^{\circ} \text{ N}, 20^{\circ} \text{ W}$	
4	Frost	P, H, D	垂直一维	年	太平洋	控制浮游植物现存量和生
	(1993)	N, A		混合层	50° N, 145° W	产的过程研究
5	Radach等	P, N, D	垂直一维	年	北海中部	物理场和浮游植物的年
	(1993)			表面层		循环
6	Sharples等	P, N, Na	垂直一维	年	北海	物理场对中层叶绿素a最
	(1994)	PAR		070m		大值的影响
7	Mcgillicuddy	N, NE, A	垂直一维	155d	北大西洋	春季水华
	等(1995)	Р, Н		0—140m	15°60° N, 20° W	
8	徐永福	P, Z, B	垂直一层	年	24° N, 80° W	浮游生态系统的年循环
	(1995)	D, N, A, Nd		混合层	佛罗里达海峡	
9	Oguz等	N, A, P	垂直一维	年	黑海	生产力的年变化
	(1996)	Z, D		0-200m		
10	Mccreary等	N, P, Z	垂直一维	年	阿拉伯海	浮游生态系统的年循环
	(1996)	D				
11	Franks等	N, P, Z	X,Z 二维	季节X:0-210m	乔治滩	潮汐锋强迫下夏季浮游
	(1996)			Z:0-300m		植物的生产过程
12	Eigenheer等	P, Z, B	垂直二层	140d		混合层深度对浮游生态
	(1996)	N, A, D, Nd		0150m		系统变化的影响
13	Bacher ^I	P, PB, N	零维	年	Marennes-oleron	生态系统的年循环
	(1996)	Dw, Ds, W	箱模式		bay	
14	Chen等	N, P, Z	三维	35d	路易斯安那得	河口冲淡水对生物生产
	(1997)				克萨斯陆架	的影响
15	Cui等	$P, Z, 2B^{3}N,$	垂直一维	90d	东海中部	春季状态变量的垂直分
	(1997)	DOC, EZ, MP		0—80m		布和春季水华
16	Guo ²	N, P, PP	三维	月,东中国海	东海	浮游生物分布及物理过
	(1997)	Z, P		0—500m		程对其的影响
17	Franks	N, P, Z	X,Z 二维	5d, X: 0-120m	30° N	锋区风场强迫下浮游植
	(1996)			Z: 0-500m		物的块状分布
18	Loukos [®]	N, A, P	垂直一维	年	赤道,140°W	Fe,N限制问题,生态系
	(1997)	Z, D, (Fe)		0—150m		统的年循环
19	Norberg等	P, Z, POM	零维			温度对生态系统稳定性
	(1997)					的影响
20	Kuhn等	P, Z, B	垂直一维	季	北海北部	浮游生态系的N循环
	(1997)	N, A, Nd, D		0150m		
21	翟雪梅 [∛]	$2P^{1}$, B, Z, POC	零维	122d	养虾池	养虾池浮游生态系的时
	(1997)	DOC, DO, P, Si			山东威海	间变化

1) 2P:2 种浮游植物;2) 4P:4 种浮游植物,3H:3 类异养生物,4N:4 种营养盐;3) 2 种细菌

1 Bacher C, O Rallard, A Menesguen, 1996. Coupling models of the phytobenthos, phytoplankton primary production and oyster growth in the Marennes–Oleron bay. (Personal communication)

② Guo X, T Yanagi, Dunxin Hu, 1996. Ecological modelling in the East China Sea. (Personal communication)
③ Loukos H, B Frost, D E Harrison, 1997. An ecosystem model with iron limitation of primary production in the equatorial Pacific 140s. (Personal communication)

④ 翟雪梅,1997. 典型养殖水域的生态系统模型. 青岛海洋大学博士学位论文

344	海	洋	与	湖	沼		31卷
-----	---	---	---	---	---	--	-----

- 农口 保以中的行为及别代农的状态支置	表1b	模式中的符号及所代表的状态变量
----------------------	-----	-----------------

Tab. 1b Symbols in ecological models and their meanings

符号	意义	符号	意 义	符号	意 义
Р	浮游植物	А	NH4 ⁺	Si	 硅
Z	浮游动物	Nd	溶解有机氮	Dw	水中的碎屑
В	细菌	D	碎屑	Ds	底栖中的碎屑
Ν	营养盐或NO3	Н	异养生物	PAR	光合有效辐射
POM	颗粒有机物	NE	排除生态系的氮	Na	生物体的氮含量
DOM	溶解有机物	PP	磷	w	牡蛎
DO	溶解氧	PB	水底植物	Fe	铁
EZ	浮游植物的排粪量	MP	浮游植物的死亡量		

(2) 生态系统动力学模式以垂直一维为主,也有一部分模式是零维或垂直一层的混合层模式。近年来二、三维模式得到了发展和应用,如 Chen 等 (1997)和 Guo 等 (1996)¹⁾利用三维的物理-生物耦合模式分别研究了密西西比河的冲淡水对 Louissiana-Texas 陆架区 浮游生态系统的影响和东中国海的浮游生态系统。另外还有一些三维模拟方面的工作,如 Staystad 等 (1998)²⁾, Stoens 等 (1998)³⁾。90 年代以前三维生态系统动力学模式的研究则 较少,也未见到有北海的三维生态模式的发表 (Fransz *et al*, 1991)。

(3) 90年代以前的模式工作大都集中在对北大西洋北海及附近海域的研究。90年代 以后,模式研究仍以北大西洋区域的研究为多,区域遍及太平洋、大西洋、印度洋及南大洋 等与人类活动密切相关的主要海域,如白令海、波罗的海、北海、挪威海、黑海、阿拉伯海和 东海等。

2.2 90年代海洋浮游生态系统动力学模式中的物理和生物过程

浮游生态系统动力学模式体现了物理过程和生物过程共同作用下浮游生态系统的动态行为。由于研究目的和所关心的过程的不同,不同的模式包含的物理和生物过程也并不相同。表 2 给出了 90 年代海洋浮游生态系统动力学模式中包含的物理和生物过程。

近来也更注重一些物理过程对海洋浮游生态系统动力学的影响,如河口冲淡水、海洋 锋和上升流系的作用,物理环境对次表层叶绿素 a 最大值形成过程的影响,湍流交换过程 或混合层深度的变化对春、秋季水华形成的作用等。这一点从湍流闭合方案和三维模式的 应用也能得到体现。90 年代以来,一至三维模式中都包含了平流(对流)和扩散过程;一层 模式考虑了混合层与下层之间的交换;各模式中对交换过程的处理不同,有的采用湍流闭 合方案,有的仅做了简单的处理。与90 年代以前相比,较多的模式采用了湍流闭合方案。 而在 90 年代以前的工作中,虽然也有一些湍流闭合的工作,但一般的处理还比较粗糙。一 层模式中,通常利用一个常数交换率或混合层深度的变化来描述上、下层之间的交换过程。 是否包括温度对生态系统的影响和沉降过程也构成了模式间物理过程的差异。21 个模式

¹⁾ 见第 343 页脚注 2)

²⁾ Staystad D, Johausen V, Pedersen O P et al, 1998. Effect of life cycle strategies on the advection loss of calaus finmarchicus from the Norwegian Sea. GLOBEC Open Science Meeting, Paris

³⁾ Stoens A, Meukes C, Dandonneau Y et al, 1998. New production in the equatorial Pacific: a coupled dynamical biogeochemical modelling. GLOBEC Open Science Meeting, Paris

中仅有 6 个考虑了温度对生物活动的直接影响。据研究,温度每升高 10℃,生物的生长率 和呼吸率就会增加 1 倍,这就是"Q₁₀"法则(Fransz *et al*,1985)。在所研究的时间尺度内, 如果温度的变化较小,可忽略温度的影响,否则就应该考虑这一作用。沉降是浮游植物、浮 游动物和碎屑向下移出浮游生态系的过程,有一半以上的模式考虑了这一过程。

表2 90年代以来模式中包含的物理和生物过程

Tab.	2	Physical	and	biological	processes	in	ecological	models	in	the	1990s
				0	1		0				

		模 式	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
物	理	平流(对流)	n	у	n	n	У	у	y	n	у	у	у
过	程	湍流扩散	у	y.	у	У	у	У	y	r	У	у	у
		光 ¹⁾	у	у	n	у	y	у	y	n	у	у	у
		温度 ¹⁾	n	n	y	y	n	n	n	n	n	n	n
		沉降	у	y	у	у	у	n	y	n	у	у	n
生	物	光合生产	y	у	у	y	y	y	y	у	r	у	y
		浮游植物被捕食	r	y	У	r	у	у	у	у	J.	У	У
过	程	浮游植物代谢	n	n	n	n	у	n	n	y	n	n	n
		浮游植物死亡	r	n	y	n	у	n	n	у	y	y	у
		浮游动物的生长	y	у	у	y	n	n	у	у	y	у	у
		浮游动物代谢	у	у	n	n	n	n	у	у	у	n	n
		浮游动物死亡	ų.	n	y	у	n	n	у	y	У	у	У
		浮游动物被捕食	n	у	у	n	n	n	n	у	n	У	n
		模式	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
物	理	平流(对流)	n	n	У	y	y	У	n	У	n	y	
过	程	湍流扩散	y	n	y	У	у	У	n	У	n	y	
		光"	y	y	y	У	у	у	у	y	У	У	
		温度 ¹⁾	n	у	n	у	n	n	y	n	у	n	
		沉降	y	n	n	y	n	n	у	у	n	r	
生	物	光合生产	у	у	y	y	r	y	y	r	y	у	
		浮游植物被捕食	у	y.	у	y'	у	у	y	У	У	y	
过	程	浮游植物代谢	n	n	n	n	n	n	n	n	У	y	
		浮游植物死亡	У	у	y	У	У	У	n	r	у	n	
		浮游动物的生长	y	У	У	r	У	У	у	У	у	У	
		浮游动物代谢	y	у	n	у	n	У	у	n	у	y	
		浮游动物死亡	ŗ	n	у	y	у	у	у	y	y	n	
		浮游动物被捕食	n	n	n	n	n	n	n	n	у	n	

1) 指对生物活动直接影响的过程

y 包含某个物理或生物过程; n 不包含某个物理或生物过程

与 90 年代以前模式相比,就生物过程来看,其不同主要表现在对浮游动物相关过程的处理上,因为浮游动物并不是 90 年代以前模式关注的主要状态变量。Fransz 等(1991) 列出的 20 个模式中,包括浮游动物方程的模式不到一半,与浮游植物相关的过程则差别不大。给出的 11 个北海模式,大都包含了光合生产、被捕食和死亡过程,7 个模式包含了浮游植物的呼吸或排泄过程。

包含光合生产、浮游植物被浮游动物的捕食和浮游动物的生长过程是所有模式的共 识,然而不同模式对这些过程的数学表达却存在着差异,其差异主要表现在光合作用的限 制关系和浮游动物对浮游植物的捕食函数上。浮游植物和浮游动物的死亡也是大部分模 式都要考虑的内容。有 12 个模式包含了动物的代谢过程,而只有 4 个模式包含了植物的 代谢过程,可能是由于对植物的呼吸、自溶和分泌等代谢过程的了解还比较少。5 个模式 包括了更高营养层次的生物对浮游动物的捕食,这是浮游生态系与外界交换的途径之 一,也是能量向更高营养层次的转移过程。

3 讨论和结语

综上所述,90年代后海洋浮游生态系统动力学的模式研究有了飞速发展,其物理过程 和生物过程的描述也有了新特点。模式中状态变量的个数从以前的 2—4 个增加到 3—7 个,浮游动物已成为绝大多数模式的状态变量之一;对垂直方向上湍流的交换作用的描述,多数模式采用了湍流闭合方案;大部分模式是 90 年代以后建立的,有些则是利用或改 进原来的生态模式,研究新问题;模式仍以一维为主,三维的物理--生物模式耦合也得到了 发展和应用;研究区域仍以北大西洋为主,但已遍布海洋更大的范围。

在生态系统动力学模拟方面已有几十年的工作积累和努力,特别是 90 年代以后出现 了大批模式工作,但这些却都不能表明生态系统动力学模拟研究的完善与成熟,模式研究 仍是 GLOBEC 国际核心研究计划的内容之一。其发展目标是在不断积累基础资料的同 时,逐渐检验和完善模式,使其能够真正成为海洋生态系统的"实验室"。

我国在物理海洋学及模式研究、生态系统及营养盐循环方面已积累了不少基础资料 和研究经验,这将是进行浮游生态系统动力学模拟研究的宝贵财富。但在浮游生态系统 动力学模式研究方面才刚刚起步,模拟工作还比较少,模式也相对比较简单,进行生态系 统动力学模拟的经验还不足。因此,首先应建立状态变量较少、物理和生物过程相对比较 简单而又能反映浮游生态系统基本结构的模式,描述浮游生态系统的最基本特征和动态 规律。借鉴国外的经验,建立 NPZ 或 NPZD 混合层模式,并应用到特定海域(如渤海),充 分利用现有的资料检验和修正模式,在此基础上发展成为一维、二维甚至三维模式,建立 我国自己的浮游生态系统动力学模式体系。

参考文献

唐启升,范元炳,林 海,1996.中国海洋生态系统动力学发展战略初探.地球科学进展,11(2):160—168 徐永福,1995.模拟浮游生物的季节变化.生态学报,15(3):245—250

Chen C, Denis A, Wiesenburg, Lisen Xie, 1997. Influences of river discharge on biological production in the inner shelf: A coupled biological and physical model of the Louisiana-Texas Shelf. J Mar Res, 55:293-320

Cui Maochang, Wang Rong, Hu Dunxin, 1997. Simple ecosystem model of the central part of the East China Sea in spring. Chin. J Oceanol Liminol, 15(1):80-87

Eigenheer A, Kuhn W, Radach G, 1996. On the sensitivity of ecosystem box model simulations on mixedlayer depth estimates. Deep-Sea Res, 43(7):1011-1027

Fasham M J R, Duchlow H W, Mckelvie S M, 1990. A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layes. J Mar Res, 48:591-639

Fransz H G, Mommaerts J P, Radach G, 1991. Ecological modelling of the North Sea. Neth. J Sea Res,

28(1/2):67-140

Fransz H G, Verhagen J H G, 1985. Modelling research on the production cycle of phytoplankton in the Southern Bight of the North Sea in relation to river-borne nutrient loads. Neth. J Sea Res, 19:241-250

Franks P J S, Wroblewski J S, G R Flierl, 1986. Behavior of a simple plankton model with food-level accumulation by herbivores. Mar Biol, 91:121-129

Frost B W, 1987. Grazing control of phytoplankton stock in the open subarctic Pacific Ocean: A model assessing the role of mesozooplankton, particularly the large calanoid copepods, *Neocalanus* spp. Marine Ecology Progress Series, 39:49-68

Franks P J S, Chen C, 1996. Plankton production in tidal fronts: A model of Georges Bank in summer. J Mar Res, 54:631---651

Frost B W, 1993. A modelling study of processes regulating plankton standing stock and production in the open subarctic Pacific Ocean. Prog Oceanog, 32:17-56

Kuhn W, Radach G, 1997. A one-dimensional physical-biological model study of the planktonic nitrogen cycling during the spring bloom in the northern North Sea (FLEX'76). J Mar Res, 55:687-734

Mccreary J P, Kohler J, Kevin E et al, 1996. A four-component ecosystem model of biological activity in the Arabian Sea. Prog Oceanog, 37:193-240

Mcgillicuddy D, Mccarthy J J, Robinson A R, 1995. Coupled physical and biological modeling of the spring bloom in the North Atlantic(1): model formulation and one dimensional bloom processes. Deep Sea Res, 42(8): 1 313-1 357

Norberg J, Deangelis D, 1997. Temperature effects on stocks and stability of a phytoplankton-zooplankton model and the dependence on light and nutrients. Ecological Modelling, 95:75-86

Oguz T, Ducklow H, Malanotte-Rizzoli P, 1996. Simulation of annual plankton productivity cycle in the Black Sea by a one-dimensional physical-biological model. J Geophys Res, 101(c7):16 585-16 599

Radach J, Moll A, 1993. Estimation of the variability of production by simulating annual cycles of phytoplankton in the central North Sea. Prog Oceanog, 31:339-419

Sharples J, Tett P, 1994. Modelling the effect of physical variability on the midwater chlorophyll maximum. J Mar Res, 52:219-238

Taylor A H, Harbour D S, Harris R P, 1993. Seasonal succession in the plegic ecosystem of the North Atlantic and the utilization of nitrogen. J Plank Res, 15(8):875-891

Varela R A, Cruzado A, Tintore J, 1992. Modelling the deep-chlorophyll maximum: A coupled physicalbiological approach. J Mar Res, 50:441-463 海

PROGRESS IN MARINE PLANKTONIC ECOSYSTEM MODELLING

GAO Hui-wang, FENG Shi-zuo, GUAN Yu-ping

(Institute of Physical Oceanography, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

Abstract The structure of marine planktonic ecosystem models is discussed. The progress in marine planktonic ecosystem modelling in the 1990s is also reviewed and compared with earlier studies on modelling. The features of marine planktonic ecosystem modelling in the 1990s are as follows. The numbers of state variable have increased from 2---4 to 3---7. Emphasis has been placed on the role of physical forcing to ecosystem, and the turbulence mixing in the vertical direction is parameterized according to a turbulence scheme in many models. Most of the studies are based on the models developed in the 1990s, still some on the models appearing before 1990 or the modified version of the old models. One-dimensional models contribute to a great part of the references and there have been several studies of 3-dimension physical-biological modelling. Most of the studies focus on the North Arctic Ocean and some are applied to broad areas such as Equatorial Pacific, the Arabian Sea and the East China Sea.

Key wordsMarine Planktonic ecosystemEcosystem dynamics modelProgressSubject classification numberQ178