

区域海洋模式中的开边界问题

Open boundary conditions in regional ocean models

储敏^{1,2}, 徐永福¹

(1. 中国科学院 大气物理研究所, 大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

中图分类号: P733

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2009)06-0112-06

因研究对象不同,目前的海洋环流模式常分为全球模式和海盆尺度(区域)模式,各个模式考虑的物理过程、参数化方法、数值解法和分辨率都不尽相同,因此不同模式的计算结果存在差异,尤其区域尺度上的差异更为明显,这就对发展区域性的海盆尺度环流模式提出了要求。海盆尺度模式可以使用更高的分辨率,考虑更精细的物理和生化过程,从而对区域的刻画更为准确和真实,而且,在碳循环的研究中,陆架边缘海碳循环是新的研究热点,这也需要进一步发展海盆尺度的碳循环模式。另外从计算方面来说,限于目前的计算条件,在未来很长时间内海盆尺度碳循环模式都将与全球模式同时存在并互为补充。

用区域模式代替全球模式,缩小了研究的范围,可以更好地关注区域上的特征,同时也有效地节约了计算,这自然是比较经济的做法,但是,当模式的大小给定以后,这种方法的代价相当大,因为在假想的开边界处需要给定具体的边界条件,但这并不简单^[1]。人为设定的开边界和真实的陆地边界不同,在真实的陆地边界处没有动量、能量及物质的平流输送,而假想的开边界可能是人为设定的水中边界,因此必须给定恰当的边界条件以反映所关注的海盆和其他相邻海域之间的交换特征。而难点在于开边界问题没有相应的完整表达式,在给定的边界条件下,其在数学上也可能是不适定的^[1~3](若定解问题的解是唯一存在的,并且连续依赖于定解条件,则称定解问题是适定的;否则称为不适定的),Sani等^[4]曾因此称人为边界条件问题为流体力学中的“边界条件困惑”(Boundary Condition Dilemma),而且,边界对各种波动的吸收和反射也是个问题^[5]。由于边界条件的复杂性,模式区域的解往往强烈地依赖于开边界处所采用的数学方法,边界处的微小变化常常极大地影响模式区域内部的解;有实验表明即便是同一种开边界条件,在不同的问题中也常常表现出不同的效果,从而一般认为没有最好的、普适的开

边界处理方法,具体开边界条件的设计在很大程度上依赖于模式本身以及待解决的问题^[6,7]。因此,如何设计一个好的开边界条件是一个难题,但为了模式研究及应用的需要必须确立开边界提出的基本原则并在此基础上探索一些有效的方法。

物理中的许多问题往往都定义在无界区域上,而实际的数值研究首先必须界定研究的区域,这也遇到人为边界,即开边界的问题。Givoli^[8]在1991年对无反射边界条件(non-reflecting boundary condition,简记为NRBC)的综述中提出,建立一个新的NRBC边界条件应尽量满足以下几点:(1)区域内部问题的方程和边界条件结合起来在数学上是适定的,并且是无限区域上问题的很好的近似;(2)边界条件引起的反射很小,到达边界的波可以不受阻碍而自由通过边界;(3)边界条件必须与控制方程所采用的数值方案兼容;(4)控制方程的数值方法与边界条件一起是稳定的,并且边界条件的使用不会造成计算量的大量增长,同时具有一定的精度;(5)若物理问题寻求的是最终的稳定解,那么数值方法必须能够快速达到稳态。显然,这也是区域模式中开边界的设计所需要遵循的原则^[9]。

在已有的研究中,人们从计算流体力学以及模式应用的角度对OBCs(Open Boundary Conditions)进行了很多的研究,与此同时,国内外也有不少关于开边界条件的研究及综述^[10~19],但是,这些文章往往关注开边界条件的某一方面的特征而不全面,并且大多没有包括新近的研究进展。因此,作者的目

收稿日期:2007-11-07;修回日期:2009-04-01

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX-2-YW-218);国家自然科学基金项目(40730106)

作者简介:储敏(1980-),男,安徽岳西人,博士研究生,主要从事海洋碳循环研究,电话:010-62375373, E-mail: chumin. cn@gmail. com;徐永福,通信作者,研究员,主要从事大气化学与全球环境变化研究,电话:010-62377281, E-mail: xyf@mail. iap. ac. cn

的在于,在前文提出的开边界建立的基本原则基础之上,讨论开边界条件的研究现状以及目前还存在的问题,并对常用的 OBCs 做简单的归纳和分析,从而为开边界条件的应用和发展提供参考。

作者提及的开边界条件有简单边界条件、辐射边界条件、松弛方案、以及 Stevens 方案和 Gill 方案。从本质上来说,简单边界条件往往是辐射边界条件的特殊情形,但是在实际应用中两者的表现和性能却往往有很大不同,因此这里根据 Jensen^[7] 以及 Roed 等^[20] 的观点仍将简单边界条件视为一类独立的开边界处理方法。

为叙述方便,在不特别指定的情况下,下文均假设研究的变量为 Φ , 该变量的气候值记为 Φ_{ext} , 开边界设在南边界,方向向北为正,并记开边界位置为 b , 离散的时间和空间步长分别为 $\Delta t, \Delta y$ 。

1 简单边界条件

1.1 固壁边界条件

对于区域海洋模式的研究,最简单的开边界方法莫过于将区域海洋看成一个封闭的海域,将人为设定的边界当成真实的固壁边界来对待,从而无需考虑边界上的能量传播和物质输送。Xu 等^[21] 即采用该方法对北太平洋环流和碳循环进行了模拟研究。

这种方法简单,使用方便,但往往不符合真实情形,赵亮等^[22,23] 将 Xu 等^[21] 的模式中的闭边界改造成开边界,其中流场采用 Orlanski^[24] 型辐射边界条件,温盐采用 Stevens^[25] 开边界方法,入流时候采用恢复边界条件,出流时候采用辐射边界条件,以此对北太平洋的流场和 CFCs 进行了模拟研究,并对闭边界和开边界的结果以及观测资料进行了对比,结果发现闭边界会造成边界附近虚假的下沉流,而所采用的开边界条件有效地改善了这一点。

1.2 CLP(clamped)开边界条件

开边界不易处理的基本原因在于边界处的数据难以获得,因此不得不设计一些处理的方法。有一种基本的假设是:在模式积分过程中边界上的值不随时间而改变,这便是 CLP 开边界条件,其方程形式为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (1. a)$$

写成离散形式即为:

$$\Phi_b^{n+1} = \Phi_b^n \quad (1. b)$$

该方法形式简单,也得到了很多的应用^[26],但是应该注意该假设的前提与实际情况是不相符的。

1.3 零梯度边界条件

与 CLP 边界条件假设边界上的数值不随时间变化不同,零梯度边界条件假设在边界附近没有物质或能量的平流输送,即:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (2. a)$$

写成离散形式即为:

$$\Phi_b^{n+1} = \Phi_{b+1}^{n+1} \quad (2. b)$$

其中下标 $b+1$ 表示与边界相邻的内点,该点的值由控制方程计算得到;由于没有平流的输送,所有入射到边界的波能量都不能由边界传出,而会被反射到计算区域中去,如此一来,即便是一个内点稳定的模式,有可能会因为边界上计算不稳定向内点的传播而造成整个计算区域出现虚假的计算波解,导致计算的不稳定,显然这可能会扰乱模式区域内的解^[27,28]。

1.4 简单的辐射方案

既然零梯度边界条件有可能导致模式区域内产生虚假的计算波解,从而影响模式的解,那么一个很自然的想法就是如何让传入到边界的波动能够没有歪曲和变形地传出边界,从而将(1. a)和(2. a)结合起来得到一个简单的辐射边界条件:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (3. a)$$

这对应于从边界外传的波,其相速度为常数 -1 。采用差分近似,对时间导数前差和空间导数隐式前差即可得到以下的离散形式:

$$\Phi_b^{n+1} = \Phi_b^n + \frac{\Delta t}{\Delta y} (\Phi_{b+1}^{n+1} - \Phi_b^{n+1}) \quad (3. b)$$

在文献[29]中 Smith 等对此方法做了具体的讨论;但是,该方法的缺点是一望便知的:首先,采用常定的相速度是不合理的,从而取其大小为 -1 显得颇为随意;其次,在模拟的任意时刻都在边界设定一个外传的波也显得与真实情况不尽相符。关于辐射开边界处理方法,在后文有更为详细的叙述。

由上可以看出,简单边界条件一般都有简洁的形式,易于使用,但是因为简洁,从而往往过于简单,并不能真实地反映海洋开边界处的特征。因此,开边界的处理需要更为精细的方法。

2 辐射边界条件

在开边界问题的研究中,许多的研究在兼顾精度和稳定性的同时主要致力于前文提出的第二点上,即如何使得传向边界的波可以自由通过边界而不受阻碍,从而使得边界条件引起的反射很小。辐射条件的提出正是为了解决这一问题。

一般而言,辐射边界条件的基本原理是:考虑正交于边界的方向,在边界处吸收传向模式区域内部的波。这样就可以达到减少或消除边界反射波的目的,因此模式区域内产生的有意义的波动可以不受歪曲地通过边界,从而不影响区域内的解。

现在广为使用的辐射边界条件是基于 Sommerfeld^[30]的方法,其适用性在于地球物理流体力学中的许多问题在本质上是双曲型的^[6]。该方法的具体形式为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + c \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

其中 c 为相速度。利用辐射边界条件的主要目的在于使模式区域内波可以无障碍地顺利通过边界而消除反射,但是,如果物理波并非是向外界辐射的,或者不是整个过程都是向外辐射的,那么直接使用辐射条件就不尽合理了^[9]。正如前文提到的简单辐射方案,取相速度为 -1 是不符合实际的情形的,因为在真实的边界处有着出流和入流的不同,发生着波的传入和传出,用常值的相速度显然不能描述真实的边界状态,那么,如何计算相速度是一个问题。在计算重力长波问题时,常采用的相速度为 $c = \sqrt{gh}$,但是,如果计算问题并非是重力长波,则需要设计其他的方法^[9]。

Orlanski^[24]在 1976 年提出了一个计算相速度的方法,并为模式研究人员广为采用,具体计算为:

$$c(y, t) = \begin{cases} \Delta y / \Delta t, & -\Phi_t / \Phi_y > \Delta y / \Delta t; \\ -\Phi_t / \Phi_y, & 0 < -\Phi_t / \Phi_y < \Delta y / \Delta t; \\ 0, & -\Phi_t / \Phi_y < 0. \end{cases} \quad (5)$$

根据上述公式,相速度就有了一个量化的标准,并在实际应用中根据差分格式的不同以及处理方法的差异有许多变体^[6,9,12~14];如此一来,根据相速度 $c(y, t)$ 允许波自由传出,这是 OBCs 应具有的理想性质;但是,这个方法并不完善,因为当 $\Phi_y = 0$ 时,(5)式则不能用于计算,尽管这在实际中或许不大可能发生,但在理论上却不能不考虑这种情形的存在;而且,更为重要的是,在解决了计算之后其实还有一个更为本质的问题,那就是相速度 $c(y, t)$ 的物理意义是什么。

在具体模式的应用和开边界条件的比较过程中,许多研究人员发现单纯地使用 Orlanski 型辐射边界条件效果并不如想象中的理想^[10,12,31~33];2001 年, Treguier 等^[15]用一个大西洋的涡相容(eddy-permitting)模式分析了辐射边界条件,特别对相速度的时间序列给予了关注,其结果表明相速度 $c(y, t)$ 接近于白噪声,因此,从这个意义上来说(5)式的计算方法值得深究。

Blayo 等^[16]认为出现这种情形的基本原因在于, Sommerfeld 条件只有当用于常相速度的波动方程时才是恰当的,而对于海洋和大气模式采用的 $N-S$ 方程,尽管本质上是双曲型的,但是当忽略扩散项的影响之后,计算结果与原始方程已有较大的误差,从而在海洋或大气模式中采用此类条件结果并不理想。

上述提到的辐射边界条件只考虑了正交于边界方向的情形, Raymond 等^[34]在 1984 年提出了二维的情形,同时考虑边界切线和法线方向的运动,方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + c_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + c_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

其中, $c_x = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \frac{\partial \Phi / \partial x}{(\partial \Phi / \partial x)^2 + (\partial \Phi / \partial y)^2}$,

$c_y = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \frac{\partial \Phi / \partial y}{(\partial \Phi / \partial x)^2 + (\partial \Phi / \partial y)^2}$ 分别为平行于和垂直于边界方向的相速度。Raymond 等认为这样计算相速度会更为准确,但是, Barnier 等^[32]认为考虑平行于边界方向的相速度有可能导致计算的不稳定。

总体说来,辐射边界条件得到了很广泛的应用,但是,单独地使用辐射边界条件并不足以得到满意的模拟结果,这是因为仅仅能处理外传的波并不足以成为好的边界条件^[14],因为在真实的边界处还需要考虑入流的情形;而在模式的实际应用中,辐射边界条件往往和松弛边界条件一起使用方能得到较为满意的结果。

3 松弛方案

在拥有观测资料的情况下,松弛方案是比较简单也比较有效的开边界方法。简单来说松弛方案也就是把一个牛顿阻尼项加到边界附近的控制方程中,在距边界一定的范围内,阻尼方程的解向给定的气候值恢复,构成一个“海绵”层。在设定边界条件时,需给定适当的阻尼时间尺度和海绵层的宽度^[18]。

一般而言,即使能够获得观测资料也往往不直接使用狄利克雷边界条件,即直接将观测值赋给积分变量,因为边界上的观测值可能与模式内部的解不连续,从而导致计算的不稳定,进而影响模拟结果。根据松弛系数的不同形式,松弛方案一般分为线性松弛方案和指数松弛方案^[35,36]。

如同前文已经提到过的,在真实的边界处发生着出流和入流,单独地使用松弛方案或者辐射方案都不能准确地表示边界上的特征。Blayo 等^[16]认为,一个有效的开边界条件需要遵循两个原则:(1) 反映出流特征;(2) 与观测资料的一致性。因此,将辐

射边界条件和松弛方案结合起来使用是个不错的选择,即当边界上为出流时采用辐射边界条件,入流时采用松弛方案;Treguier 等在文献[15]中称此为混合开边界方法(mixed open boundary algorithm),而 Marchesiello 等则在文献[33]中称此种方法为自适应方法(adaptive algorithm)。

4 Stevens 开边界方法

Stevens^[25]在1991年提出了一个新的开边界方法,这里同样考虑出流和入流的不同情形。当边界上为入流时,可将边界值取为气候值,同前面一样,为了消除边界处和模式区域内部的不连续而采用松弛的方法,以使得边界上的值随着积分的进行向着观测资料趋近,其方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = \frac{1}{\alpha} (\Phi_{\text{ext}} - \Phi) \quad (7)$$

其中, Φ_{ext} 如前文的定义为边界处给定的气候值资料, $1/\alpha$ 为恢复系数。

当边界上为出流时,边界上不使用强迫,区域内产生的波动可以传向区域外,并且在边界处无反射,从而不影响区域内的解,采用的方程为:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{v + c_{\phi}}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} + K_h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} + A_h \nabla^2 \Phi \quad (8)$$

上式中, a 为地球赤道半径, φ 为纬度; K_h 和 A_h 为垂向和水平扩散系数,右端二、三项分别为垂直扩散和水平扩散; c_{ϕ} 为相速度,利用上一时刻 Φ 的计算值由下面的公式反算出来:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = -\frac{c_{\phi}}{a} \frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} \quad (9)$$

并规定 c_{ϕ} 的取值与辐射边界条件中的计算相同。

可以看出,Stevens 的方法一方面区分了出流和入流的情形,而另一方面是对原始方程很好的近似,不仅考虑了内波向外的辐射,还考虑了正交于边界方向的平流输送以及各方向的湍流扩散,因此,从方程本身来说比辐射方案更为准确。

Stevens^[37]于1990年首次提出此开边界方法并将其用到 GFDL 的海洋模式中,随后又用于一个高分辨率南极模式(FRAM, Fine Resolution Antarctic Model)中^[25],Stevens 等^[38]则将其用于模拟伊比利亚陆架海流的模式中,发现采用该开边界条件可以得到较好的结果;赵亮等^[22,23]将此方法用于北太平洋模式的研究,将一个闭边界海盆尺度环流模式改造成开边界模式,对 20°S 以北太平洋大尺度环流进行了系统模拟,成功模拟了北太平洋环流以及被动示踪物 CFCs。

5 Gill 开边界方法

如前文的叙述,就目前的研究来看,混合边界条件,即区别对待出流和入流的情形,是最符合海洋模式中开边界的真实情形的开边界方法,但是混合边界的使用依赖于观测资料的准确性;只是,对于广袤的海洋和具体研究的问题,在涉及到的特定开边界上,常常未必能够得到可使用的资料。这时候,边界的处理是一个问题,特别是在需要长时间积分的问题中,边界造成的影响因为长时间的累积而更加不可忽视^[39]。

不同于 Stevens^[25]所采用的近似方法,最初应用于热带区域海洋的 Gill 方案^[40]在对示踪物的处理时基于以下两个假设:一是示踪物能够自由穿过边界,特别是热量需要能够从边界传出,以防止热带海洋模式中温度的过快增长;二是模式区域内部计算得到的示踪物浓度到外部区域的气候值资料能有光滑的过度,以防止不连续给模式计算的稳定性带来影响。

这里具体介绍一下该方法。其基本思路在于将边界附近的区域近似看成是边界层,从而控制方程可以简化为垂正交于边界方向上的平流项和扩散项的平衡:

$$v \frac{\partial \Phi}{\partial y} = A_h \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} \quad (10)$$

显然,这里可以采用常微分方程的解法即可以得到方程的解为:

$$\Phi(y) = c_1 + c_2 e^{\frac{v}{A_h} y} \quad (11)$$

其中 c_1, c_2 为任意常数,从而这里求解的关键在于两个常数的取值如何尽量与实际相符合。对于出流和入流的情形,作者分别考虑方程(10)式的不同形式的解:

出流时, $v < 0$, 考虑的解为:

$$\Phi(y) = (\Phi_0 - \Phi_{\infty}) e^{-\sigma y} + \Phi_{\infty} \quad (12)$$

其中, Φ_0 为边界上的温度, Φ_y 为模式区域内距离边界 y 处的温度, Φ_{∞} 为远离边界处的温度(和选取的边界层的宽度有关), $\sigma = \frac{A_h}{|v|}$ 为边界层的宽度; $\Phi_0, \Phi_y, \Phi_{\infty}$ 均为模拟值。

为了使得边界上模拟值向气候值的光滑过渡,采用如下的方法:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = \lambda (\Phi_0 - \Phi_{\text{ext}}) \quad (13)$$

其中 λ 为松弛系数。因此,同前文中的方法一样,边界上的数值不是直接等于气候值资料,而是向其逼近,逼近速度的快慢由参数 λ 控制,这也反映数据强

迫的强度;由(12)及(13)两式即可得到:

$$\Phi_0 = \frac{\Phi_{\text{ext}} - (1/\lambda\sigma)\Phi_{\infty}}{1 - (1/\lambda\sigma)} \quad (14)$$

若 $\lambda \gg \sigma^{-1}$, 那么边界上的 Φ_0 向给定的数据趋近。

入流时, $v > 0$, 考虑方程(10)的平凡解, $\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0$,

亦即 $\Phi_0 = \Phi_{\text{ext}}$ 。这是作者最初采用的方法。

这与前文提到的处理方法不尽相同, 将开边界附近近似看成是一个边界层, 这里假设 $\frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0$, 并且仅考虑正交于边界的方向上的平流和扩散的平衡, 对于近似方程的求解则可以用常微分方程的方法, 从而即使不依赖于观测的资料, 也可以得到边界上的值; 这或许给开边界问题的处理提供了一个新的途径; 但是, 该方法只考虑边界法线方向上的平流和扩散是否过于简单, 可不可以同时考虑平行于边界方向的平流和扩散, 这些都还是需要思考的问题。该方法除了文献[40]的介绍之外, 还没有看到更多的应用以及与其他方法的比较, 因此, 其效果的好坏还不确切地知道, 或许有赖于更多的研究。

6 小结

开边界问题是个相对古老的问题, 因此长久以来有着很多的研究, 各种开边界处理方法也不断被提出和应用, 但是对于开边界条件的好坏往往并无明确的结论, 最好的、普适的开边界条件更是无处可寻, 因为这往往依赖于具体的模式和问题。一般说来, 数学模型只能是物理模型的近似描述, 因此只有当数学模型接近真实的物理现象时, 实验才能反映物理现象本身。从而, 在海洋模式中对边界条件的处理是否符合实际开边界的特征是开边界提法正确与否的关键。

如文献[2,3]所说, 处理 $N-S$ 方程的开边界问题需要考虑其适定性, 但是, 正因如此, 设计合理的开边界处理方法才显得更为重要。从前文所述可知, 边界条件有两重涵义: (1) 用来说明所研究海域的边界所具有的特定状态, 与初始条件一起构成模式的定解条件, 从而使模式的求解能够得到结合实际解; (2) 描述所关注的海域与其周围环境之间的相互作用关系, 即物质和能量的交换。

从这个意义上来说, 开边界的设计不能脱离 $N-S$ 方程而独立提出, 也正是因为这一点, 辐射边界条件尽管在波动问题中表现良好而在海洋模式中却不如人意, 尤其是相速度在表现上是噪声, 未能反映出开边界的真实特征。从而 Blayo 等^[16]指出, 边界条件应满足两点: 内部信息的外传, 和外部数据的输

入, 以分别表征出流和入流的情形。

现在广为使用的混合边界条件正是从出流和入流的不同来分别采取辐射和松弛的处理方法, 但是, 这有一个前提, 那就是观测数据的存在。对于广阔的海洋, 现有的观测是相对稀少而缺乏的, 因此, 当没有观测数据可用的时候, 边界上为入流时又该如何处理, 特别是在长时间的积分问题中? Gill 的方案可能给我们某种提示, 把边界附近当成是一个边界层或许是有有效的方法。但是, 该方案在提出之后鲜有应用, 因此和其他方案的比较相对的优点和不足现在也还知之甚少。不论如何, 尽管该方法如前文所说的在理论上就有着不足, 但是其效果还有待于实际的模拟研究来评价。

参考文献:

- [1] Haidvogel D B, Beckmann A. 海洋环流数值模拟 [M]. 王东晓, 宏波, 蔡树群, 等译. 北京: 气象出版社, 2005. 245-246.
- [2] Olinger J, Sundstrom A. Theoretical and practical aspects of some initial boundary value problems in fluid dynamics [J]. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1978, **35**(3):419-446.
- [3] Bennett A F, Kloeden P E. Boundary conditions for limited-area forecasts [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1978, **35**: 990-996.
- [4] Sani R L, Gresho P M. Resume and remarks on the open boundary condition minisymposium [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1994, **18**: 983-1 008.
- [5] 白晔斐, 宋金宝. 侧边界对内长波传播影响的数值模拟 [J]. *海洋科学*, 2005, **29**(9): 42-50,55.
- [6] Palm E D, Matano R P. On the implementation of passive open boundary conditions for a general circulation model: The barotropic mode [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 1 319-1 341.
- [7] Jensen T G. Open boundary conditions in stratified ocean models [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, **16**: 297-322.
- [8] Givoli D. Non-reflecting boundary conditions [J]. *Journal of Computational Physics*, 1991, **94**: 1-29.
- [9] 孙文心, 江文胜, 李磊. 近海环境流体动力学数值模型 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. 158-163.
- [10] Camerlengo A L, O'Brien J J. Open boundary conditions in rotating fluids [J]. *Journal of Computational Physics*, 1980, **35**: 12-35.
- [11] Israeli M, Orszag S A. Approximation of radiation boundary conditions [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, **41**: 115-135.
- [12] Chapman D C. Numerical treatment of cross-shelf

- open boundaries in a barotropic coastal ocean model [J]. **Journal of Physical Oceanography**, 1985, 15: 1 060-1 075.
- [13] Palm E D, Matano R P. On the implementation of open boundary conditions for a general circulation model: The three-dimensional case [J]. **Journal of Geophysical Research**, 2000, 105: 8 605-8 627.
- [14] Palm E D, Matano R P. Dynamical impacts associated with radiation boundary conditions [J]. **Journal of Sea Research**, 2001, 46: 117-132.
- [15] Treguier A M, Barnier B, Miranda A P, *et al.* An eddy-permitting model of the Atlantic circulation: Evaluating open boundary conditions [J]. **Journal of Geophysical Research**, 2001, 106: 22 115-22 129.
- [16] Blayo E, Debreu L. Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables [J]. **Ocean Modelling**, 2005, 9: 231-252.
- [17] Marsaleix P, Auclair F, Estournel C. Considerations on open boundary conditions for regional and coastal ocean models [J]. **Journal of Atmospheric and Ocean Technology**, 2006, 23: 1 604-1 613.
- [18] 李东辉, 张铭, 王纯富. 海洋环流数值模式中的若干技术问题评述 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 4(4): 76-81.
- [19] Chen J H. Numerical boundary conditions and computational modes [J]. **Journal of Computational Physics**, 1973, 13: 522-535.
- [20] Roed L P, Cooper C K. Open boundary conditions in numerical models [A]. O'Brien J J. *Advanced Physical Oceanographic Numerical Modeling* [C]. Dordrecht: Reidel Publishing Company, 1986. 411-436.
- [21] Xu Yong-Fu, Watanabe Y W, Aoki S, *et al.* Simulation of storage of anthropogenic carbon dioxide in the North Pacific using an ocean general circulation model [J]. **Marine Chemistry**, 2000, 72: 221-238.
- [22] 赵亮, 徐永福. 边界条件对北太平洋海盆尺度环流模式的影响 [J]. 海洋科学进展, 2006, 24(3): 292-300.
- [23] 赵亮, 徐永福. 开边界海盆尺度环流模式模拟北太平洋CFCs分布 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(4): 798-806.
- [24] Orlanski I. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows [J]. **Journal of Computational Physics**, 1976, 21: 251-269.
- [25] Stevens D P. The open boundary condition in the United Kingdom fine-resolution Antarctic model [J]. **Journal of Physical Oceanography**, 1991, 21: 1 494-1 499.
- [26] Beardsley R C, Haidvogel D B. Model studies of the wind-driven transient circulation in the Middle Atlantic Bight, Part 1. Adiabatic boundary conditions [J]. **Journal of Physical Oceanography**, 1981, 11: 355-375.
- [27] 吕新刚, 沙文钰. POM模式边界条件的数值实验及其在环台湾岛海域风生流模拟中的应用 [J]. 海洋通报, 2003, 22(1): 17-23.
- [28] Nitta T. On the reflective computational wave caused by the outflow boundary condition [J]. **Journal of the Meteorological Society of Jpn**, 1964, 42: 274-276.
- [29] Smith W D. A non-reflecting plane boundary condition for wave propagation problems [J]. **Journal of Computational Physics**, 1974, 15:492-503.
- [30] Sommerfeld A. *Partial Difference Equations in Physics* [M]. New York: Academic Press, 1949.
- [31] Miller M J, Thorpe A J. Radiation conditions for the lateral boundaries of limited-area numerical models [J]. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1981, 107: 615-628.
- [32] Barnier B, Marchesiello P, De Miranda A P, *et al.* A sigma-coordinate primitive equation model for studying the circulation in the South Atlantic. Part I: Model configuration with error estimates [J]. **Deep-Sea Res I**, 1998, 45: 543-572.
- [33] Marchesiello P, McWilliams J C, Shchepetkin A. Open boundary conditions for long-term integration of regional oceanic models [J]. **Ocean Modelling**, 2001, 3:1-20.
- [34] Raymond W H, Kuo H L. A radiation boundary condition for multidimensional flows [J]. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 1984, 110: 535-551.
- [35] 魏和林, 符淙斌, 王维强. 区域气候模式侧边界的处理对东亚夏季风降水模拟的影响 [J]. 大气科学, 1998, 22(5): 779-790.
- [36] 郑益群, 钱永甫, 贵祈军, 等. 初、边值条件对区域气候模拟的影响 [J]. 大气科学, 2002, 26(6): 794-806.
- [37] Stevens D P. On open boundary conditions for three dimensional primitive-equation ocean circulation models [J]. **Geophysical and Astrophysical Fluid Dynamics**, 1990, 51: 103-133.
- [38] Stevens I G, Johnson J A. Sensitivity to open boundary forcing in a fine-resolution model of the Iberian shelf-slope region [J]. **Ann Geophysicae**, 1997, 15: 113-123.
- [39] 储敏, 徐永福, 李阳春. 边界条件对北太平洋自然¹⁴C分布的影响 [J]. 热带海洋学报, 2008, 27(6): 19-27.
- [40] Carrington D J. Unified model documentation paper No. 48: Lateral boundary conditions in the ocean model, Version 1. 0, 1990 [EB/OL]. http://ncas-cms.nerc.ac.uk/html_umdocs/UM55_User_Guide/node48.html, 2007-09-09.

(本文编辑:刘珊珊)