

基于 Nudging 方法对全球海洋 M_2 和 m_1 分潮的同化研究*

刘 力, 陈学恩**

(中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘 要: 基于全球海洋模式 OGCTM(Ocean General Circulation and Tide Model), 利用 19 年(1992—2011 年)的卫星高度计资料调和得到全球分潮调和常数回报逐时正压潮水位; 采用 Nudging(牛顿松弛逼近)方法进行潮汐同化, 针对 Nudging 松弛项的差分方案以及松弛系数进行了数值试验研究。一系列试验结果表明, 不论采用显式还是隐式 Nudging 松弛方案, 模式结果的偏差会随着松弛系数的增加先减小后增大, 松弛系数最优值为 1×10^{-5} ; 当松弛系数太大时, 会造成模式的溢出。Nudging 松弛项采用隐式差分方案可以显著提高松弛系数的阈值; 松弛系数在适当的取值范围内时, 加入 Nudging 松弛项的数值试验描述的潮汐特征要明显优于未加 Nudging 松弛项的数值试验描述的潮汐特征; 在最优 Nudging 松弛方案下, Nudging 松弛方法对全日分潮的振幅模拟准确度可提高 50%, 对半日分潮的振幅模拟准确度可提高 56%。试验结果也表明了 Nudging 方法作为一种简单的同化方法的可行性和有效性。

关键词: Nudging 方法; 全球海洋潮汐; 数值模拟; 半日和全日分潮

中图法分类号: P731.23

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2021)07-011-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdx.20200202

引用格式: 刘力, 陈学恩. 基于 Nudging 方法对全球海洋 M_2 和 m_1 分潮的同化研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(7): 11-17.

Liu Li, Chen Xueen. Assimilation of global ocean M_2 and m_1 tides based on Nudging method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(7): 11-17.

潮汐是海洋最基本的运动形式之一。潮汐与人类的关系十分密切, 是人们较早开始注意的海洋现象, 亦是地球物理学和测地学研究中的重要组成部分, 海港工程、航运交通、渔、盐、水产业、近海环境研究与污染治理及物理海洋学中许多如环流、水输运和潮汐现象密切相关, 且潮汐能开发也越来越引起人们的重视, 因此针对潮汐进行研究具有理论意义和实际应用价值。

潮汐的观测最早是通过验潮站进行的, 这种方法容易受到仪器、天气等因素的制约, 且验潮站空间上分布太稀疏。自 20 世纪 70 年代海洋卫星测高技术兴起, 极大推动了卫星高度计观测资料中的主要组成部分的潮汐的研究。前人直接分析卫星高度计数据发展经验潮汐模式, 如李培良等^[1]根据正交响应方法, 利用超过 6 年的南中国海 TOPEX/POSEIDON 卫星高度计数据进行潮波分析; Yi 等^[2]发现利用 TOPEX/POSEIDON 和 ERS-2 双卫星交叉点数据可以减轻潮汐混淆, 利用这两个卫星高度计交叉点数据采用响应方法发展了一个经验大洋潮

汐模式, 提高对南大洋潮汐的模拟准确度。同时, 为了更好的探索和利用潮汐, 全球数值模式也用于获取全球潮汐信息, 解释相关海洋现象, 但数值模式总存在误差, 因此如何合理地利用实测数据(例如验潮站数据或卫星高度计数据)使数值模式结果变得准确, 成为一个重要的研究课题, 这种将观测资料与数值模式相结合的方法为数据同化方法。

数据同化方法的分类有很多种。Smedstad 等^[3]根据数据同化采用的不同数学方法, 将其归纳为多项式内插法、统计(最优)插值法和变分数值分析法。Anderson 等^[4]则将数据同化方法分为两大类: 顺序方法(包括 Kalman 滤波法、直接替代法、Nudging 方法、逐步订正法、最优插值法)和变分方法。常用的数据同化方法包括最优插值法、Nudging 方法、变分方法、Kalman 滤波和伴随法。

基于现有潮汐模式利用卫星高度计数据进行潮汐数值同化, 也是发展更精确潮汐模式的方法。魏泽勋

* 基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2016YFC1401300)资助

Supported by the National Key R&D Program of China (2016YFC1401300)

收稿日期: 2020-07-08; 修订日期: 2020-08-12

作者简介: 刘 力(1997-), 女, 硕士生。E-mail: liuli@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: E-mail: xchen@ouc.edu.cn

等^[5]基于POM模式研究了Nudging同化方案对西北太平洋海域 M_2 分潮模拟的改进。韩桂军等^[6-7]利用从验潮站获取的水位观测资料以及TOPEX/POSEIDON卫星高度计资料优化非线性潮汐模型的开边界条件,来提高数值模式精度。吕咸青等^[8]采用伴随法,由渤海沿岸19个验潮站的 m_1 和 M_2 分潮调和常数来反演渤海海域的开边界条件,实现渤海潮波的数值模拟,数值模拟结果较好地体现了渤海 m_1 和 M_2 分潮的基本特征。吴自库等^[9]也采用伴随法,利用正交响应方法对248个周期的南中国海TOPEX/POSEIDON卫星高度计资料进行分析提取的分潮调和常数同化到二维非线性潮汐数值模式中去,优化了模型的开边界条件和底摩擦系数,较好地模拟了南海 m_1 和 M_2 分潮的潮汐。Matsumoto等^[10]基于Blending方法,利用5年的TOPEX/POSEIDON卫星高度计数据以及219个近岸验潮站数据对引潮势驱动的潮汐模式进行同化,发展出了一个全球大洋潮汐模式NAO.99b和一个区域潮汐模式NAO.99Jb。Foreman等^[11]在东北太平洋海区利用TOPEX/POSEIDON卫星高度计沿轨交叉点数据调和和分析得到的调和常数同化到模式中,得到修正后的调和常数与大洋和近岸验潮站调和常数进行对比,以评估卫星高度计数据对潮汐同化的改进。

综上所述,国内外有大量学者为了获得更为精确的潮汐信息进行了卫星高度计资料分析或应用。主要有两种思路:直接分析高度计资料发展经验潮汐模式、基于卫星高度计资料采用不同的同化方法对数值模式进行潮汐数值同化以求得到一个更为准确的潮汐模式。

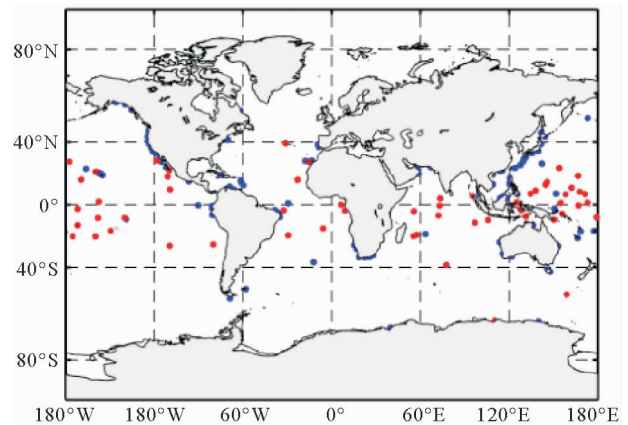
本文为使OGCTM海洋模式获得更加准确的全球潮波模拟结果,定量研究Nudging松弛方法的可行性和对同化效果进行评估。将基于一个引潮势驱动的全球海洋环流潮汐模式OGCTM(Ocean General Circulation and Tide Model),采用Nudging方法,利用1992—2011年共19年的全球卫星高度计(TOPEX/POSEIDON、Jason1、Jason2)资料调和和分析得到的68个分潮的调和常数回报得到的逐时正压潮水位,对模式的潮汐进行Nudging松弛逼近,讨论Nudging松弛方案以及松弛系数的改变对 M_2 和 m_1 (($k_1 + O_1$)/2)分潮模拟的影响。

1 数据介绍及质量控制

1.1 验潮站数据介绍及质量控制

验潮站数据是由夏威夷大学海平面中心GLOSS(The Global Sea Level Observing System)提供的逐时数据。利用ETOPO5地形数据获得验潮站水深,对

验潮站数据按照水深不同分类,分为水深大于200 m以及水深小于200 m两类,并对数据进行筛选,去掉一些过于密集的站点,最终选择水深大于200 m的验潮站57个,水深小于200 m的验潮站149个,全球总计206个验潮站,筛选后的验潮站分布如下图1所示。



(红色标记为水深大于200 m,蓝色标记为水深小于200 m。Red mark means water depth deeper than 200 m, Blue mark means water depth shallower than 200 m.)

图1 验潮站分布图

Fig.1 Tidal station location

1.2 卫星高度计数据介绍、质量控制

首先对全球共48 943个点(见图2)的TOPEX/POSEIDON系列卫星高度计沿轨数据进行质量控制,利用T-tide调和和分析得到68个分潮的调和常数^[12],回报每个点2012年6月1日0时—7月31日23时的逐时正压潮水位。

由图2可知,卫星高度计数据的覆盖范围为66°S—66°N,所以,将上述所回报的正压潮水位插值到介于66°S—66°N的模式网格点,构造网格化的正压潮逐时水位数据。

2 Nudging方法介绍

Nudging方法最初在1974年被Anthes^[13]引入气象学领域,现在已成为海洋数值模拟中常用的数据同化方法之一。它是通过在模式连续方程中加入人为的强迫项,积分模式而使模式结果向观测结果靠近。

本文采用的Nudging同化方案如下:

模式原方程:

$$\frac{\zeta^{n+1} - \zeta^n}{\Delta t} = -L. \quad (1)$$

式中: ζ 为水位; n 为时刻; Δt 为时间步长; L 为连续方程中的其他项。

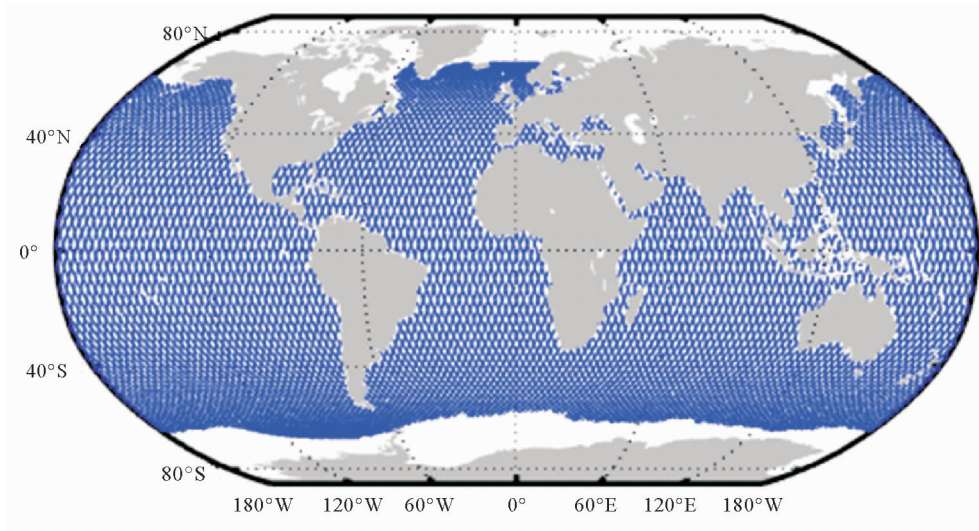


图 2 卫星高度计星下点位置

Fig.2 Satellite altimeter sub-satellite point location

在模式原方程基础上增加 Nudging 项,有:

$$\zeta^{n+1} - \zeta^n = [-L - \alpha(\zeta^n - \zeta_m^n)]\Delta t, \quad (2)$$

(1)Nudging 松弛项显式差分方案:

$$\zeta^{n+1} = \zeta^n + [-L - \alpha(\zeta^n - \zeta_m^n)]\Delta t, \quad (3)$$

(2)Nudging 松弛项隐式差分方案:

$$\zeta^{n+1} = \frac{\zeta^n - L\Delta t + \alpha\Delta t \zeta_m^n}{1 + \alpha\Delta t}. \quad (4)$$

式中: ζ_m^n 为 n 时刻第 m 个回报的正压潮水位; α 为松弛系数, 该值越大表明趋近观测值的约束作用越强。

Nudging 方法的优点是计算量相对较小,但它的主要缺点是增加了强迫项,可能会诱发虚假动力过程。

3 模式简介

本文采用的数值模式 OGCTM 是一个引潮势驱动

的全球海洋环流潮汐模式。模式网格采用可移动坐标投影点的曲线正交网格,本次试验的网格配置将两个坐标投影点分别置于中国大陆和大洋洲,其水平方向共包含 $1\,200 \times 740$ 个网格点。图 3 为每 10 个点展示 1 个点的网格分布示意图;图 3 中的填色是模式分辨率信息;此网格对“两洋一海”区域(印度洋-南海-太平洋)进行加密,在“两洋一海”区域模式网格分辨率较高可达 5 km,在大西洋等区域模式网格分辨率则较低;模式垂向采用 z 坐标系,垂向分层为 40 层;模式的时间步长为 300 s;垂向涡粘系数和耗散系数均为 2×10^{-3} ;正压潮模拟,故海表无通量强迫场输入,海洋温盐场设置初始温度场为 $15\text{ }^\circ\text{C}$,初始盐度场为 34。

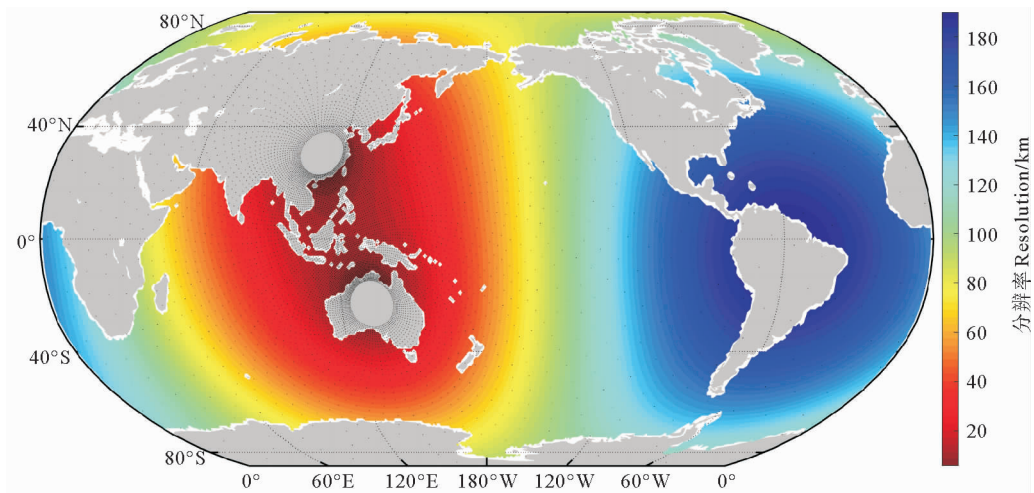


图 3 全球海洋模式网格点及分辨率示意图

Fig.3 Global ocean model grid points and resolution diagram

4 数值试验设置和结果分析

本文中所有试验的模拟时间段均为 2012 年 6 月 1 日—7 月 31 日,长 2 个月;模式输出水位为逐时水位,对模式输出的 7 月份 31 d 的逐时水位数据进行调和与分析,获得分潮(M_2 、 m_1)的调和常数。

4.1 分析方法

为了对比各试验模拟结果的表现,利用验潮站数据,采用以下 5 个参数进行评估,分别是振幅绝均差、迟角绝均差、振幅均方根误差、迟角均方根误差以及潮高偏差。

潮高偏差表征了计算值和观测值的偏离程度,引入这个量的原因是:当振幅较小时,计算和观测的迟角都不太稳定,同时振幅较小时的误差对潮高计算误差影响也较小,所以将振幅、迟角分开考虑求平均或均方根不太合理,采用潮高偏差这个量更合理。汪一航、高秀敏等^[14-15]都曾在评估全球大洋潮汐模式的准确度时采用潮高偏差这个量。

振幅绝均差、迟角绝均差、振幅均方根误差、迟角均方根误差以及潮高偏差 5 个参考量的计算公式分别为:

$$\Delta H = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |H_{sim,n} - H_{obs,n}|, \quad (5)$$

$$\Delta g = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |g_{sim,n} - g_{obs,n}|, \quad (6)$$

$$rms_H = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (H_{sim,n} - H_{obs,n})^2}, \quad (7)$$

$$rms_g = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (g_{sim,n} - g_{obs,n})^2}, \quad (8)$$

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [(a_{sim,n} - a_{obs,n})^2 + (b_{sim,n} - b_{obs,n})^2] \right\}^{1/2}. \quad (9)$$

(5)~(9)式中: N 是验潮站个数; ΔH 是振幅绝均差; $H_{sim,n}$ 是模式在第 n 个验潮站位置处的振幅; $H_{obs,n}$ 是第 n 个验潮站的振幅; Δg 是迟角绝均差; $g_{sim,n}$ 是模式在第 n 个验潮站位置处的迟角; $g_{obs,n}$ 是第 n 个验潮站的迟角; rms_H 是振幅均方根误差, rms_g 是迟角均方根误差; σ 是潮高偏差。另外(9)式中, $a = H \cos g$; $b = H \sin g$ 。

4.2 最优 Nudging 松弛方案的确定

高度计资料的准确性与水深有一定的相关性。基于许安迪等^[12]提供的此卫星高度计数据与全球 162 个验潮站数据的分析结果,对卫星高度计数据的准确性重新评估得到表 1。

对模式无同化时的结果进行评估,结果如表 2 所示,并与表 1 卫星高度计评估结果进行对比。

表 1 卫星高度计数据误差

Table 1 Satellite altimeter data deviation

水深 Depth/m	M_2		m_1	
	$\Delta H/cm$	$\Delta g/(\circ)$	$\Delta H/cm$	$\Delta g/(\circ)$
≥ 200	2.15	8.59	0.45	8.33
< 200	7.49	12.05	1.27	10.46

表 2 无同化情况下模式结果误差

Table 2 Model without assimilation deviation

水深 Depth/m	M_2		m_1	
	$\Delta H/cm$	$\Delta g/(\circ)$	$\Delta H/cm$	$\Delta g/(\circ)$
≥ 200	22.59	13.95	3.48	12.78
< 200	22.57	14.84	5.55	13.02

结合表 1 和 2 结果,卫星高度计数据在水深大于等于 200 m 时半日(全日)分潮的振幅绝均差仅为 2.15 cm (0.45 cm),远小于模式数据的振幅绝均差,迟角绝均差为 8.59° (8.33°),小于模式迟角绝均差 13.95° (12.78°);水深小于 200 m 时半日(全日)分潮的振幅绝均差为 7.49 cm (1.27 cm),也小于模式数据的振幅绝均差 22.57 cm (5.55 cm),迟角绝均差为 12.05° (10.46°),小于模式迟角绝均差 14.84° (13.02°)。鉴于上述结果,故利用此卫星高度计数据对潮汐数值模式进行同化是合理的。

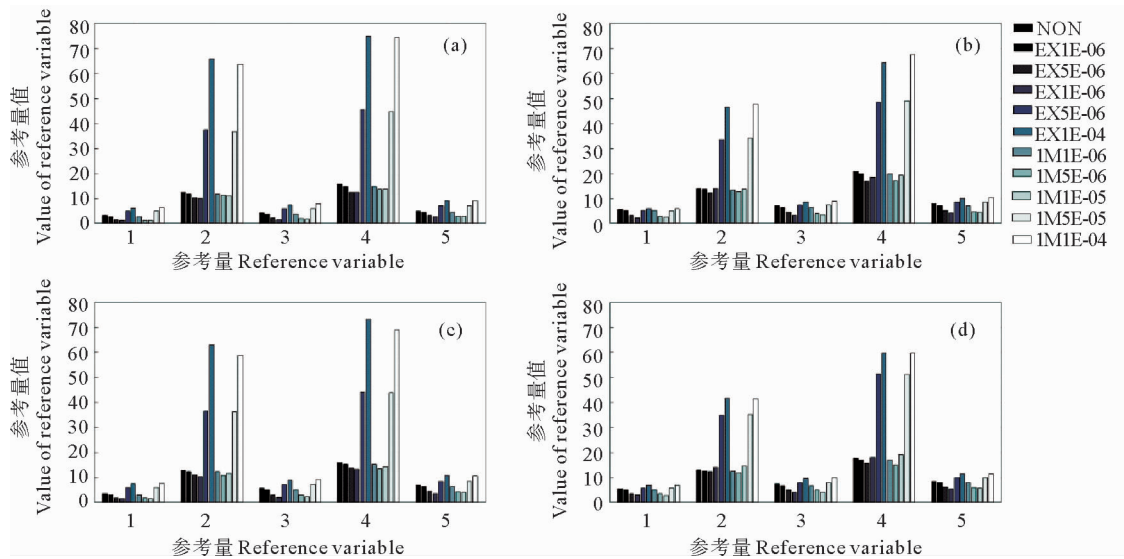
为了研究 Nudging 松弛项采用显式差分方案和隐式差分方案及 Nudging 松弛系数大小对潮波模拟改进的影响,本文设计了 11 个数值试验,包括 1 个标准试验,5 个加 Nudging 松弛项且采用显式差分方案的数值试验,5 个加 Nudging 松弛项且采用隐式差分方案的数值试验。

选择 10^{-6} 、 10^{-5} 、 10^{-4} 、 10^{-3} 作为松弛系数,根据显式差分方案和隐式差分方案进行试验,当松弛系数为 10^{-3} 时,显式差分方案会造成模式的溢出,但是隐式差分方案未发生溢出。为了选定最优 Nudging 松弛方案,在 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 范围内,增设两个松弛系数(5×10^{-6} 、 5×10^{-5})的试验,下面给出当松弛系数为 10^{-6} 、 5×10^{-6} 、 10^{-5} 、 5×10^{-5} 、 10^{-4} 时,分潮在不同水深情况下的模式表现柱状图。标准试验用 NON 表示,试验组命名方式为显式或隐式差分方案加松弛系数,EX 代表显式差分方案,IM 代表隐式差分方案。

图 4 为 M_2 、 m_1 分潮在不同水深情况下,不同 Nudging 松弛方案下的模式数据与验潮站数据的偏差,其中振幅绝均差、振幅均方根偏差以及潮高偏差都在松弛系数为 1×10^{-5} 达到最优,从图中迟角相关数据来看,Nudging 方法对迟角的影响不大,综合振幅相关结果考虑,选定为最优松弛系数为 1×10^{-5} 。当松弛系数

大于 1×10^{-5} 时, 不论振幅还是迟角的误差都会增大, 迟角的误差显著增大, 图中的结果能明显反映这一问题。另外当松弛系数为 1×10^{-3} 时, 显式方案发生了模

式的溢出, 隐式方案未出现异常, 由此说明隐式差分方案更稳定。由上述分析可以获得以下结论:



((a)和(b)分别为 M_2 分潮在水深大于等于和小于 200 m 时的结果; (c)和(d)分别为 m_1 分潮在水深大于等于和小于 200 m 时的结果。(其中 1: 振幅绝对均差, 2: 迟角绝对均差, 3: 振幅方均根误差, 4: 迟角方均根误差, 5: 潮高偏差; 1, 3 和 5 的单位为 cm; 2 和 4 的单位为 $^\circ$ 。)) (a) and (b) are the results of the M_2 tide when the depth is greater than or equal and less than 200 m; (c) and (d) are the results of the m_1 tide when the depth is greater than or equal and less than 200 m, respectively. (1: absolute deviation in amplitude, 2: absolute deviation in phase, 3: root mean square error in amplitude, 4: root mean square error in phase, 5: tide height deviation; The unit of 1, 3 and 5 is cm; the unit of 2 and 4 is $^\circ$ 。))

图 4 不同松弛方案下模式结果偏差

Fig.4 The deviation of the model results under different relaxation schemes

(1) 最优松弛方案为松弛系数取 1×10^{-5} 的隐式差分方案。

(2) 模式中 Nudging 松弛项的松弛系数在一定范围时, 加入了 Nudging 松弛项的模拟结果要明显优于未加 Nudging 松弛项的模拟结果。

(3) 不论为显式还是隐式差分方案, Nudging 同化结果的偏差都随着松弛系数的增加而减小, 当松弛系数增加到最优值后, 模拟结果的偏差反而随着松弛系数的增加而增加。

(4) Nudging 同化对迟角模拟的准确度提高不明显, 这是由于 Nudging 同化只在模式的连续性方程中加入了松弛项, 但由于缺少流速数据而未对流速进行修正; 另外, 想要对水位以及流速联合调整, Nudging 松弛方法难以实现, 需要四维变分或者 Kalman 滤波等方法。

下面给出最优 Nudging 松弛方案相对于标准试验改进的百分比(见表 3)。

通过表 3 可得以下结论:

(1) 对 m_1 分潮的振幅模拟准确度提高平均可达 50%, 对 M_2 分潮的振幅模拟准确度提高平均可达 56%。

(2) 采用 Nudging 方法利用海表高度进行潮汐同化, 对迟角的模拟准确度提高不明显, 全日分潮的迟角模拟准确度提高平均为 11%, 半日分潮的迟角模拟准确度提高平均为 31%, 水深越浅对迟角的模拟准确度提高越明显。

(3) 通过潮高偏差综合来看, M_2 分潮的潮高偏差改善平均可达 48%, m_1 分潮的潮高偏差改善平均可达 37%, 且水深越深改善程度越明显。

表 3 最优 Nudging 松弛方案对模式的改进结果

Table 3 Improvement of optimal Nudging relaxation term

分潮	水深	ΔH	Δg	rms_H	rms_g	σ
Partidal	Depth	/%	/%	/%	/%	/%
tide	/m					
M_2	≥ 200	52.2	26.6	55.8	21.8	49.2
	< 200	60.3	35.2	61.7	43.6	46.1
m_1	≥ 200	51.8	9.9	61.1	9.5	43.3
	< 200	48.0	12.0	45.5	8.2	31.3

目前, 国际上有几十种潮汐模式, 在这里根据高秀

敏等^[15]利用南海近岸的63个验潮站对四个潮汐模式(TPX07.2、GOT00.2、NAO.99b、DTU10)的评估结果与本文所用模式同化后的全球近岸(水深<200 m)结果进行比较,结果如表4所示。

表4 潮汐模式评估结果对比

Table 4 Comparison of evaluation results of tidal modes

模式 Model	分潮 Tide	$\Delta H/cm$	$\Delta g/(^{\circ})$
TPX07.2	M_2	7.01	17.97
	m_1	5.35	10.56
GOT00.2	M_2	4.99	11.81
	m_1	3.60	6.89
NAO.99b	M_2	6.28	16.40
	m_1	3.15	7.42
DTU10	M_2	3.66	10.66
	m_1	2.94	7.49
OGCTM	M_2	8.95	9.61
	m_1	2.89	7.96

由表4结果可得,本文所使用的OGCTM海洋模式得到的 M_2 分潮振幅相对于验潮站所得的振幅绝对差比其他四个模式的都要偏大,其他四个模式振幅绝对差最大值是7.01 cm,而OGCTM的 M_2 分潮振幅绝对差为8.95 cm; m_1 分潮振幅绝对差和其他模式结果接近;不论 M_2 还是 m_1 分潮的迟角绝对差都与其他四个潮汐模式的结果差距不大且明显优于TPX07.2。由此说明,同化后的OGCTM海洋模式对于全日分潮的模拟结果尚可,但存在对半日分潮模拟结果仍存在振幅偏大的现象。另外OGCTM在全球近岸的潮汐模拟表现和另外4个模式在南海的表现相当,由此也可说明同化后的OGCTM在全球近岸的模拟已经达到较好效果。

5 结论

本文基于一个引潮势驱动的全球海洋潮汐环流模式,讨论了Nudging松弛方案以及松弛系数的不同对模式结果的影响,以及从数值上给出最优Nudging松弛方案对模式的改进量。本文主要结论如下:

(1)松弛系数在合理范围内时,模式中加入了Nudging松弛项的模拟结果要明显优于未加Nudging松弛项的模拟结果。

(2)当Nudging松弛方案为显式时,松弛系数为时,会造成模式的溢出;Nudging松弛方案改为隐式时,可以显著提高松弛系数的阈值。

(3)仅在模式的连续性方程中加入Nudging松弛项,对振幅模拟准确度提高程度良好,但是对迟角模拟准确度提高程度一般;从数值上来看,最优Nudging松弛方案对模式的振幅改进量可达60%。

(4)虽然Nudging同化后的模式结果仍和国际上现有的成熟潮汐模式存在差距,但是Nudging方法作为一种简单的同化方法,对于模式的改进效果是显著的,其原理简单,对于只需简单的同化来改进模式结果的情况是十分具有借鉴意义的。

Nudging方法是众多同化方法中比较简单的一种,计算量相对较小,只需在连续性方程中加入Nudging松弛项。它的主要缺点是增加了强迫项,可能会产生虚假动力过程。从目前试验结果来看,采用Nudging方法对潮汐进行同化,可有效改善潮汐振幅的模拟。另外,本文的试验是基于19年卫星高度计数据计算得到的调和常数,利用此调和常数回报得到逐时水位数据,进一步插值到模式网格,得到与模式网格匹配的水位数据进行同化,此过程可能会引入误差,在本文中对此过程中的误差未加以讨论,未来可以直接利用卫星高度计沿轨数据对模式进行同化。

参考文献:

- [1] 李培良,左军成,李磊,等.南海TOPEX/POSEIDON高度计资料的正交响应法潮汐分析[J].海洋与湖沼,2002(3):287-295.
Li P L, Zuo J C, Li L, et al. Orthogonalized convolution method for analysis of South China Sea tidal data from TOPEX/POSEIDON[J]. Oceanologica Et Limnologia Sinica, 2002(3): 287-295.
- [2] Yi Y, Matsumoto K, Shum C K, et al. Advances in Southern Ocean tide modeling[J]. Journal of Geodynamics, 2006, 41(1): 128-132.
- [3] Smedstad O M, O'Brien J J. Variational data assimilation and parameter estimation in an equatorial Pacific ocean model[J]. Progress in Oceanography, 1991, 26(2): 179-241.
- [4] Anderson D L, Sheinbaum J, Haines K, et al. Data assimilation in ocean models[J]. Reports on Progress in Physics, 1996, 59(10): 1209-1266.
- [5] 魏泽勋,王永刚,高秀敏,等. Nudging同化方案改进及其在西北太平洋海域 M_2 分潮模拟中的应用[J].海洋科学进展,2015,33(4):431-438.
Wei Z X, Wang Y G, GAO X M, et al. Improved nudging assimilation schemes and their applications in simulating M_2 tide in the Northwest Pacific[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 431-438.
- [6] 韩桂军,何柏荣,马继瑞,等.用伴随法优化非线性潮汐模型的开边界条件I.伴随方程的建立及“孪生”数值试验[J].海洋学报(中文版),2000(6):27-33.
Han G J, He B R, Ma J R, et al. Optimizing open boundary conditions of nonlinear tidal model using adjoint method I. The establishment of adjoint model and twin-experiment[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2000(6): 27-33.
- [7] 韩桂军,方国洪,马继瑞,等.利用伴随法优化非线性潮汐模型的

- 开边界条件 II. 黄海、东海潮汐资料的同化试验[J]. 海洋学报(中文版), 2001(2): 25-31.
- Han G J, Fang G H, Ma J R, et al. Optimizing open boundary conditions of nonlinear tidal model using adjoint method II. Assimilation experiment for tide in the Huanghai Sea and the East China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2001(2): 25-31.
- [8] 吕咸青, 方国洪. 渤海开边界潮汐的伴随法反演[J]. 海洋与湖沼, 2002(2): 113-120.
- Lv X Q, Fang G H. Inversion of the tides on the open boundary of the Bohai Sea by adjoint method[J]. Oceanologica Et Limnologia Sinica, 2002(2): 113-120.
- [9] 吴自库, 田纪伟, 吕咸青, 等. 南海潮汐的伴随同化数值模拟[J]. 海洋与湖沼, 2003(1): 101-108.
- Wu Z K, Tian J W, Lv X Q, et al. A numerical model of tides in the South China Sea by adjoint method[J]. Oceanologica Et Limnologia Sinica, 2003(1): 101-108.
- [10] Matsumoto K, Takanezawa T, Ooe M, et al. Ocean tide models developed by assimilating TOPEX/POSEIDON altimeter data into hydrodynamical model: A global model and a regional model around Japan[J]. Journal of Oceanography, 2000, 56(5): 567-581.
- [11] Foreman M G G, Crawford W R, Chemiawsky J Y, et al. A high-resolution assimilating tidal model for the northeast Pacific Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2000, 105(C12): 28629-28651.
- [12] 许安里, 陈学恩. 基于卫星高度 H 数据的全球海洋潮汐特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2021, 51(1): 1-8.
- Xu A D, Chen X E. Analysis of global tidal characteristics using satellite altimetry data[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(1): 1-8.
- [13] Anthes R A. Data Assimilation and initialization of hurricane prediction models[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1974, 31(3): 702-719.
- [14] 汪一航, 方国洪, 魏泽勋, 等. 基于卫星高度计的全球大洋潮汐模式的准确度评估[J]. 地球科学进展, 2010, 25(4): 353-359.
- Wang Y H, Fang G H, Wei Z X, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models base on satellite altimetry [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(4): 353-359.
- [15] 高秀敏, 魏泽勋, 吕咸青, 等. 全球大洋潮汐模式在南海的准确度评估[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(1): 1-14.
- Gao X M, Wei Z X, Lv X Q, et al. Accuracy assessment of global ocean tide models in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(1): 1-14.

Assimilation of Global Ocean M_2 and m_1 Tides Based on Nudging Method

Liu Li, Chen Xueen

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on a global Ocean Model OGCTM (Ocean General Circulation and Tide Model), 19 years of satellite altimeter data harmonic analysis are used to get the global tidal harmonic constant. Return hourly barotropic tide. By Nudging (Newtonian relaxation approximation) method for tidal assimilation, design numerical experiments about different Nudging relaxation scheme and Nudging relaxation coefficient. Analysis the output sea level by a series of experiments using T-TIDE, obtaining the harmonic constants of M_2 and m_1 ($(K_1 + O_1)/2$). A series of experiments show that the tidal features of the numerical experiment with Nudging relaxation term are significantly better than those without Nudging relaxation term. Regardless of explicit or implicit Nudging relaxation scheme, the deviation of mode result decreases first and then increases with increasing relaxation coefficient, with optimal value of 1×10^{-5} . When the relaxation coefficient is too large, the mode will overflow. When the relaxation coefficient is within the appropriate range, the tidal characteristics described by numerical experiments with Nudging relaxation term are significantly better than those described by numerical experiments without Nudging relaxation term. Under the optimal Nudging relaxation scheme, the amplitude of the full-day tide can be improved by 50%, and the amplitude of the half-day tide can be improved by 56%. The experimental results also show that the Nudging method is effective as a simple assimilation method.

Key words: Nudging method; global ocean tides; the numerical simulation; diurnal and semidiurnal constituent