

海岸带“海陆空”数值模型及应用综述

李勇^{1,2,3}, 杨朋^{1,2}, 文明征^{1,2}, 姜兴钰^{1,2}, 田立柱^{1,2}, 王福^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 中国地质调查局海岸带地球系统科学研究中心, 天津 300170; 3. 河北环境工程学院, 河北 秦皇岛 066102)

摘要:数值模型作为津冀沿海“海陆空”综合地质调查与观测体系建设的必要组成部分,在环境地质成果表达和综合研究中具有重要的不可替代的作用。本文论述了与海岸带“空陆海”相关的众多开源数值模型,这些模型在工程设计和科学研究中经常会使用到,具有获取方便、使用灵活及便于耦合等优点。本文主要从流体运动(包括水体和大气)的角度,分海洋数值模型、大气数值模型、陆地数值模型以及耦合数值模型等四个方面介绍了各种模型的优缺点、网格形式、求解方法及应用领域,阐述了各种模型在工程设计和科学研究中的应用实例,分析了耦合模型的未来发展方向。

关键词:海岸带;海洋数值模型;大气数值模型;陆地数值模型;耦合数值模型

中图分类号: P731.2;P76

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2022)03-0007-09

海岸带被定义为陆地和海洋的过渡与衔接地带。进入二十一世纪以来,随着世界各国经济的不断发展,全球化的趋势越发明,海岸带地区由于其便利的海上交通及运输等条件使之吸引并聚集了大量的人口与资源。据不完全统计,全球将近百分之六十的人口和大中型城市都集中在了近岸沿海区域^[1]。此外,海岸带还是地球表层岩石圈、大气圈、水圈及生物圈相互作用最为频繁以及变化最为敏感显著的地带^[2-6]。海平面上升、风暴潮、海水入侵、地面沉降、洪水溃坝、灾害性天气及环境污染等“海陆空”自然环境地质灾害发生非常频繁^[7-15],严重影响了海岸带地区城市的健康可持续性发展,因此非常有必要研究海岸带区域“海陆空”各种灾害的发生、发展规律及应对对策。

随着数值模拟方法、计算机技术以及软件工程的不断发展,越来越多的工程师、科研人员及管理决策部门采用数值模型及模拟技术开展相关研究。数值模型研究具有成本低、效率高及方便实用等优点,而且计算结果经实测数据验证之后,可预测不同情景下的变化趋势,便于提前准备应对措施。整体上而言,针对各种不同问题的系列数值模型在功能上

大同小异,在数值算法、模块构成及开源性等方面存在具体差异。本文将介绍开源的数值模型为主。虽然开源代码使用起来较商业软件复杂一些,可能没有简单易用的操作界面,也可能没有完善的售后支持,但具有程序可修改性好、易于获取、灵活度高以及便于多种不同模式相互耦合等优点。本文关注的数值模型主要涉及流体(主要指水和气)在不同动力条件下的输运迁移过程,这些模型大多数可以同时考虑泥沙或者污染物的输运过程。

1 海洋数值模型

在海洋带资源开发以及防灾减灾的时代背景下,研究和掌握海岸带区域内海洋的水动力条件变得尤为重要。近些年来,伴随着计算机计算能力的快速提高,三维海洋数值模式的研发和运用逐渐普及,各种海洋数值模式的发展为获取海洋水动力条件提供了众多选择。使用较为普遍的三维数值模式主要有 ROMS^[16-20] (Regional Ocean Modeling System)、POM^[21] (Princeton Ocean Model)、Delft3D^[22]、ADCIRC^[23] (ADvanced CIRCulation Model)、ECOM^[24] (Estuarine and Coastal Ocean Model)、

收稿日期: 2022-08-10

资助项目: 中国地质调查局项目“津冀沿海资源环境承载能力调查(DD20189506)”;“黄渤海海岸带重点生态保护修复区综合地质调查(DD20211301)”

作者简介: 李勇(1978-),男,博士,研究员,毕业于清华大学,主要从事海岸带地质环境调查技术方法研究,E-mail:bjydy@163.com。

EFDC^[25] (Environmental Fluid Dynamics Code) 及 FVCOM^[26] (Finite Volume Community Ocean Model) 等。这些三维数值模型已被广泛运用于海洋环境以及近岸地区水动力的数值模拟中。

上述模型中,ROMS 模式是一个近些年新兴的海洋模式系统,采用三维非线性、自由表面的斜压原始方程模式,是加州大学洛杉矶分校和罗格斯大学共同研究开发。ROMS 已经被广泛地应用于各种尺度的水体运动研究,涉及全球性大尺度环流和陆架海、河口及海湾等小尺度水体运动^[27]。Penven 等^[16]利用 ROMS 研究了南部非洲西南海岸外的本格格拉上升流系统,分析了上升流特征及其对该海域鱼类繁殖策略的影响规律。宋军等^[17]利用三维海洋环流 ROMS 数值模型对东中国海海域黑潮流系系统的季节变化和年际变化进行了模拟和研究,给出了东海黑潮流系穿越东海大陆架 200 m 等深线的体积通量及其变化规律。周超杰等^[18]基于 ROMS 模式与四维变分同化方法,使用 AVHRR SST 和 AVISO SSH 数据,开展了南海区域同化实验。为检验同化的效果,分别利用 HYCOM 再分析资料和 Argo 温盐实测数据分析了同化结果的海面高度、流场及温盐剖面的精度。李勇等^[19]基于 ROMS 海洋模式,结合近年的地质实测资料,建立了渤海湾西部地区风暴潮漫滩的数值模型。基于此模型对渤海湾区域不同重现期的风暴潮漫滩动态过程进行了数值模拟,对比分析了不同重现期风暴潮漫滩的变化规律及最大可能淹没范围。罗士浩等^[20]利用区域海洋模式系统 ROMS 进行水平分辨率约为 1 km 的高分辨率数值实验,对南海北部的次中尺度过程进行了初步探讨。

ROMS 模式是在 Boussinesq 假定和垂向静压假定下,近似求解雷诺平均 NS (Navier-Stokes) 方程,其中 Boussinesq 假定认为水体非重力引起的密度差异可以忽略不计,而垂向静压假定则认为近岸海域里的垂向尺度远小于水平尺度,因而垂向运动方程能够采用静力平衡进行近似^[28]。ROMS 模式水平方向在交错 Arakawa C 网格上使用正交曲线坐标对原始控制方程进行离散,而垂直方向则采用 σ 坐标进行离散,也就是拉伸地形追随坐标,用以进行非等比例分层的拉伸处理。这样的网格设计方式可以让使用者在所关心的研究核心区域采用较高的分辨率,其余地区采用较低分辨率,从而在保证计算精度的同时提高计算效率。

ROMS 模式求解过程采用了模式分裂技术,将控制方程分为内模式和外模式两个部分,求解过程中内外模式进行耦合计算。内模式控制方程为原始的三维方程,主要包括 NS (Navier-Stokes) 方程、连续方程、海水状态方程、温度和盐度的守恒方程。内模式时间步长较大、计算效率高。外模式控制方程通过垂向积分内模式方程得到,计算时需要采用较小的时间步长,主要用来计算更新水位与正压动量方程^[29]。ROMS 提供了多种边界条件可以选择,主要包括 Flather 边界条件、Chapman 边界条件、Clamped 边界条件、辐射边界条件、辐射-强迫混合边界条件、梯度边界条件、固壁滑移边界条件以及周期性边界条件。此外,ROMS 还可以考虑完整的潮汐、径流量、盐通量、热通量及海表动量等水体驱动源,具有高度的灵活性和适用性。ROMS 中物理过程完善,采用模块化的结构程序设计方法,结构清晰,依具体问题具有很好的扩展性,加上其开源性,ROMS 的动力学模块得到了开发者和使用者不断地优化和完善,并在原有动力学模块的基础上进行了扩展。目前已经可以与其它多种模式进行耦合,包括海浪模式、泥沙运输模式、粒子追踪模式、海冰模式、气象模式及生态模式等,应用前景非常广阔。

此外,波浪模型在海洋水环境模拟中也占据了非常重要的位置。目前比较常用的开源模型主要包括 SWAN (Simulating Wave Nearshore)^[30] 和 WW3 (WAVEWATCH III)^[31]。SWAN 模型是代尔夫特科技大学研发的第三代近岸海浪模式。该模型采用的是全隐式的有限差分方法进行求解,全面考虑了包括风输入、破碎及摩擦等多种物理过程。WW3 属于第三代海浪模式,由美国国家海洋和大气管理局、美国国家环境预报中心共同开发和维护,作为美国全球海浪业务预报模型,WW3 同时支持结构化网格和非结构化网格。一般而言,WW3 模型常被用于大洋尺度的波浪模拟,而考虑了更多近岸物理过程的 SWAN 模型更适用于近岸海域波浪计算。

2 大气数值模型

为了获得更为全面和准确的大气环境数据,伴随着计算机计算速度和能力的提高,采用数值模拟方法进行风场的计算和研究逐渐兴盛起来。整体而言,大气模式经历了从大尺度至中尺度的发展历程,大尺度大气模式时空精度较低,无法反映局部区域

的气象特征。近年来,中尺度大气数值模式(主要针对1~25 km分辨率)日臻完善,其中国际上比较通用的中尺度模式有MM5^[32](Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model)、WRF^[33-36](Weather Research and Forecasting Model)、RAMS^[37](Regional Atmospheric Modeling System)、ETA^[38]等,各模式都有着其自身的优缺点,适用于各种不同场景的应用区域和研究目标。

WRF模式系统是由美国国家大气研究中心、国家海洋和大气管理局、国家环境预测中心以及许多其它国家的科研机构和科研人员共同参与研发的新一代数值天气预报和数据同化系统相结合的中尺度数值模拟系统^[39]。WRF模式近几年来不断更新其边界层方案、陆面方案等,其目的就是为了能够适应多种陆地区域、多种大气过程的数值模拟。目前而言,WRF模式是中尺度大气系统研究中应用最为广泛的数值预报模式和同化系统,接下来将进行重点介绍。已有不少学者采用中尺度数值模式对近地层风场特性进行了研究,已有研究表明,WRF模式对于风场、温度及降雨等关键大气要素的模拟效果比较好。刘振鑫等^[33]基于WRF和MM5模式对北京地区低层大气局地环流的模拟效果进行了对比研究,两种模式均能对低层大气局地环流特征进行较好的模拟,但在阵风条件下,对于近地面风场结构的模拟,WRF模式要优于MM5模式。为研究渤海周围下垫面对大风的影响,盛春岩等^[34]利用WRF模式,对2009年4月两次渤海东北大风过程进行了地形和海洋下垫面敏感性试验。研究表明渤海北部地形对渤海海面大风有增强作用。张晓慧等^[35]采用三维变分混合同化方法对双台风菲特(1323)和丹娜丝(1324)、天鹅(0907)和莫拉克(0908)进行数值模拟,并在此基础上,对双台风的相互作用进行了敏感性试验。杨沈斌等^[36]以晋江市为例,利用站点风要素观测数据,结合海陆风判别条件,提取并分析了两个典型海陆风日海陆风的基本特征。采用WRF与Noah陆面过程模式耦合,选用BEP多层城市冠层模型,对典型日进行了风场模拟。Samarasingha等^[40]基于WRF模型为斯里兰卡的Deduru Oya水库流域构建了一个天气预报模型。通过使用多种微物理和积云物理参数化方案进行一系列降雨过程模拟,对WRF模型进行了优化与改良。

WRF模式分为前处理模块、计算模块及后处理

模块三个核心模块^[41]。其中前处理模块又包括了Geogrid模块、Ungrib模块、Metgrid模块等三个关键子模块。Geogrid子模块可以将已有的陆面地形数据信息插值到模拟区域的网格节点上;Ungrib子模块负责将不同格式的大气要素场数据转化为WRF计算模块能够识别的中间数据;而Metgrid子模块则是形成最终的初始化场和边界条件。计算主模块基于基本控制方程和边界条件对气象要素的动力变化过程进行计算。WRF模式的计算结构可以分为三层,第一层名为驱动层,能够对WRF模式的初始化、空间和时间的积分步长、多重嵌套的关系等进行控制;中间层名为链接层,介于上下两层之间;第三层名为模式层,由具有计算功能的系列子程序组成,用户在使用过程中通过对子程序进行修改、删减等操作来实现对该层的控制。第三层模式层中采用非静力平衡的可压缩欧拉方程组进行大气动力过程方面的计算。WRF水平方向上采用的同样是Arakawa C网格,垂直方向上使用的是跟随大地坐标系,其时间积分根据需求可以采用三阶或四阶Runge-Kutta算法。后处理模块能对计算模块的模拟结果进行插值、统计及分类等诸多数字处理,并可以用画图软件灵活地绘制出用户所需的图形样式。

此外,介绍一下常用的WRF-Chem模式,是在WRF模式的基础上耦合了化学计算模块。此模式是由美国国家海洋和大气管理局、美国国家大气研究中心及天气预报系统实验室等机构联合研发的新一代区域气象动力与化学耦合模式,模式中大气模块和化学模块直接完全耦合,即化学模块直接使用了与大气模块相同的水平网格、时间步长和气象物理参数设置,从而能够更好地模拟大气场与大气污染物相互作用的过程^[42]。WRF-Chem能够很好地模拟近岸地区及海岸带区域的大气污染物,比如PM_{2.5}在大气中的运移过程及规律^[43]。

3 陆地水动力数值模型

陆地数值模型主要介绍地表水模型和地下水模型。经过众多科学家多年的研究和发展,用于模拟地表水和地下水运动的数值模拟代码和软件日趋成熟并逐渐被广大工程和科研人员所理解和接受。

3.1 地表水水动力数值模型

关于地表水数值模型,这里主要讨论可以对河流、湖泊、水库等地表水进行二维和三维模拟的水动

力模型,将不涉及流域模型。前文提到的海洋数值模型基本都能对上述常见的陆地地表水类型进行二维和三维的数值模拟,其中用得最为普遍的是 Delft3D^[44]和 EFDC^[45]。这些模型的优势是可以方便地对海岸带地区的近岸海洋和陆地地表水体进行水动力无缝耦合计算。

Delft3D 模型是由荷兰 Deltares 公司开发的三维有限容积数值模型,虽然由商业公司开发和维护,但可以通过网络注册免费获取其源代码。Delft3D 在国际上被广泛应用于工程设计和科学研究,能够有效应用于模拟河口、河流及海岸带水域的水动力过程。徐学军等^[46]基于 DELFT3D 模型系统建立了长江河口水沙数学模型,并利用实测水文、泥沙数据进行了率定、验证。大量实测资料验证结果表明模型具有较好的模拟精度。该模型在长江河口治理规划研究、整治工程方案设计、施工设计、航道治理等方面应用效果良好,可为相关整治工程的决策和设计提供一定的技术支撑。白生强^[47]利用 Delft3D-FLOW 二维水沙模型及泥沙冲淤模型,分析了库区水力学特征、泥沙的变化规律、极端年洪水的危险性,然后利用库区冲淤效应和洪水期流,提供泥沙冲淤的实际解决方案工程的应用参考。Akter 和 Tanim^[48]基于 Delft3D 模型通过量化盐入侵长度和分层,以及对潮汐循环、季节变化、地形和河流流量的响应,研究了部分混合河口航道网络中的盐度分布规律。

Delft3D 有友好的用户界面,编译运行过程简单,具有强大的前后处理功能。模型基于静水压力差分方法求解浅水 NS 方程,实现一维、二维和三维的水动力、泥沙输运及水质变化等过程的数值模拟^[49]。Delft3D 主要由七个模块组成,分别是 Delft3D-FLOW 水动力模块、Delft3D-WAVE 波浪模块、Delft3D-PART 粒子跟踪模块、Delft3D-WAQ 水质模块、Delft3D-ECO 生态模块、Delft3D-SED 泥沙模块以及 Delft3D-MOR 地貌动力模块,各模块之间可以完全实时动态耦合。模型计算方法采用的是交替隐式法 ADI(Alternating Direction Implicit),该方法具有计算稳定性好、效率高以及结果可靠等优点。模型前处理软件通过可视化界面集成了网格生成、编辑、检验及导出功能,可以修改网格的正交性与连续性。模型自带的后处理程序可以将计算结果导出,方便利用其它成熟的后处理软件进行处理。此外,模型模拟过程中的可调参数相对较少,便于抓住

核心参数开展相关研究。

EFDC 模型是一个开源的地表水建模系统,其最早于 1988 年由美国弗吉尼亚海洋科学研究所和威廉玛丽学院海洋科学系共同开发完成。模型将水动力、泥沙、污染物以及水质模块全部集成在一个单一的源代码内,各个模块之间可以相互耦合以满足不同工程和研究的需要。模型适合用来模拟海湾、河流、河口、湖泊、水库及湿地等不同水体,也可以根据需求建立一维、二维、三维的数值计算模型^[50]。唐天均等^[51]基于 EFDC 模型建立了深圳水库水动力与富营养化三维数值模型,用多年监测的流量、水位和水质等观测数据对模型进行了校验,研究表明模型能准确地反映出深圳水库的水动力和水质变化过程。Cunanan 和 Salvacion^[52]利用 EFDC 模型模拟了菲律宾面积最大的拉故那地湾湖水温的垂向分布规律,研究了水温与湖泊化学和生物特性之间的关系。陶亚等^[53]在阿什河流域控制单元划分、气象水文季节性划分等成果的基础上,基于 EFDC 模型,对阿什河水环境容量的时空变化进行了数值计算与分析。

EFDC 模型主控方程包括动量方程、连续性方程和温度及盐度等的物质输运方程。为适应实际边界,数值求解水平向采用正交曲线坐标,垂向采用 σ 坐标系。模型求解采用了有限体积法和有限差分法相结合的具有空间二阶精度的数值离散方法求解控制方程,在水平和垂直方向上采用的是六面体交错网格。EFDC 水质模块的动力学过程来源于 CE-QUAL-ICM(Corps of Engineers, Water Quality, Integrated Compartment Model)水质模型,水质变量的控制方程基于质量守恒,主要由平流扩散、物理输送和水动力过程三个部分构成。

3.2 地下水水动力数值模型

目前被用于模拟地下水流场及溶质运移的常用代码和软件主要有 MODFLOW^[54-56](Modular Three-dimensional Finite - difference Groundwater FLOW model), Visual MODFLOW^[57], GMS^[58](Groundwater Modeling System), MT3D^[59](Modular Transport, 3-Dimensional Model) 及 FEFLOW (Finite Element Subsurface FLOW System)^[60]等。

MODFLOW 是在 20 世纪 80 年代由美国地质调查局的科研人员研发,专门用于模拟孔隙介质中三维地下水流,用户根据需要可以构建合适的应用模型去模拟和研究地下水及溶质的输运状态及随影响

因素的变化规律。张春志^[54]利用MODFLOW对白沙河和城阳河下游水源地水质进行了研究,构建了水源地的地下水模型,对其水质进行了预测分析。王科^[55]以某污泥填埋场项目为例,使用MODFLOW对污泥填埋场项目前期建设和后期运营中的地下水运移过程展开数值模拟,研究了污泥填埋场项目对周围区域环境的影响规律,结合区域水文地质条件,提出了可行的地下水环境保护措施。邵鹏^[56]以辽宁省岫岩县新建前营子调节水库为例,构建了基于MODFLOW的水库渗漏模型,研究了水库渗漏强度的时空分布特征和地下水位和库水位对渗漏强度的影响。

MODFLOW主要采用有限差分法对控制方程进行离散,求解方法及过程简单易学。MODFLOW最大的优点是采用模块化结构进行编写,能够针对不同的工程设计和研究任务,不断研发功能各异的子程序包。通过主程序调用模拟所需子程序包,从而解决不同地下水系统问题。在MODFLOW的基础上,加拿大Waterloo水文地质公司的研究人员开发了可视化的扩展型软件Visual MODFLOW^[61]。该软件应用可视化编程技术进行研发,1994年在国际上首次公开发布,是目前国际上最流行且被各国同行一致认可的地下水流和溶质运移模拟及评价专业软件。软件利用友好的可视化界面把地下水数值模拟过程中的各个步骤紧密联系起来,主要包括模型初始化、地质体几何及水文参数的输入与编辑、模型计算、参数校准、模拟结果显示及自定义输出等,使整个地下水数值模拟过程实现了整体化、简单化和规范化,便于用户的实际操作及应用。Sajeena和Kurien^[62]采用四年监测数据对Visual MODFLOW进行二次开发和校准,用两年数据对模型进行验证,并使用验证之后的模型预测了印度喀拉拉邦科泽科德河流域未来15年的水头,为水资源的合理利用提供科学理论依据。

4 耦合数值模型

海岸带系统是一个统一的有机整体,海洋、陆地与大气相互作用,三者之间无时无刻不在进行着动量、热量以及水通量的交换。为了更好地研究海岸带区域“海陆空”各种自然环境现象及灾害的发生和变化规律,将海洋、陆地及大气模型进行耦合是数值模拟研究的大势所趋。下文将从地表水与地下水耦

合模型、海气耦合数值模型及海陆气耦合模型展开论述。

4.1 地表水与地下水耦合模型

目前,地下水与地表水的水动力交互作用已经成为了水利及地质领域新的研究热点。早在1986年与1994年,国际水文地质学家协会和国际水文科学协会就已将地表水与地下水之间的相互作用问题列为了重要的会议讨论议题^[63]。

现在已有的地表水和地下水耦合模型中,地表水多被简化为一维河道^[64,65]。真正采用全三维模型的研究还相对较少。王鹏飞^[66]采用数值模拟方法,尝试将开源的地表水模型与地下水模型进行耦合,利用经典的湾湖试验结果对耦合模型进行了验证。耦合模式选取基于有限差分法的地表水计算模型POM与基于有限元法的地下水计算模型SUTRA(Saturated-Unsaturated Transport Model),以水量交换作为两个独立模型的耦合参量在海岸界面处进行耦合,构建了针对海岸带地区的地表水和地下水三维耦合数值模型,用以研究滨海地区海水入侵、污染物运移等问题。

4.2 海气耦合数值模型

受海洋原始调查和观测资料的限制,海气耦合数值模式是目前研究海气相互作用的最主要方式。耦合方式主要是利用MCT(Model Coupling Toolkit)、OASIS3等耦合器将上述不同的海洋模式和大气模式进行耦合,比如MM5-ECOM耦合模式^[67]、ADCIRC-WRF耦合模式^[68]、FVCOM-WRF耦合模式^[69,70]、POM-WRF耦合模式^[71,72]及ROMS-WRF耦合模式^[73-80]等。下面着重介绍ROMS-WRF耦合模式。关于WRF与ROMS耦合方面的研究,国外学者起步较早。早在2010年,美国地质调查局伍兹霍尔海洋中心的Warner等^[73]就利用MCT耦合器将WRF、ROMS及SWAN进行了耦合,建立了一个高分辨率的区域海气浪耦合模型COAWST(Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport Model),并对北大西洋飓风进行了数值模拟。此模型已经在全世界范围内得到了推广和应用。类似的,Saravanan等^[74]和Hsieh等^[75]分别将WRF模式与区域海洋模式ROMS相耦合来研究大西洋飓风和热带气旋;Samala等^[76]将WRF模式与区域海洋模式ROMS相耦合来研究印度洋的夏季季风。国内相关的研究基本处于起步阶段。Liu^[77]将WRF-ROMS-CICE(Community

Ice Code)进行了耦合,分析了北冰洋区域海面温度、海冰面积以及气象条件的变化特征。李勇等^[78,79]为了更加准确地对发生在渤海湾的风暴潮进行数值模拟研究,构建了WRF与ROMS相耦合的海气耦合计算模型,耦合模型能在更加真实的动力环境下研究大气与海洋之间的相互作用。耦合过程中利用开源的耦合器和网格重建程序实现了海洋模式和大气模式之间实时的数据交换,基于所构建的多场耦合模型研究了发生在渤海湾的典型寒潮风暴潮和台风风暴潮。研究表明,海气耦合模型能够较好地模拟出渤海风暴潮期间温度场、风场、潮位以及潮流场的变化特征。伍志元等^[80]基于中尺度大气模式WRF和区域海洋模式ROMS,构建了南中国海地区海气耦合模式,并针对2012年台风“启德”进行数值模拟,通过观测数据对台风路径和强度进行了验证。通过数值模式计算结果揭示了台风、风暴增水和风生流场的时空分布特征。

4.3 海陆气耦合模型

目前而言,比较常见的海陆气耦合模型主要有CESM(The Community Earth System Model)^[81]和FROALS(Flexible Regional Ocean-Atmosphere-Land System model)^[82],但这两个模型主要用于研究长时间尺度范围内的区域或全球气候的变化规律。关于流体运动(水 and 气)海陆气耦合模型的研究还比较少,主要有两方面的原因。一方面,应用数值模型时,必须依靠实际观测和调查的数据,缺少这部分实测数据进行对比和验证,无法分析数值模型结果的准确性,而要同时获取海陆空三方面的流体流动数据,难度比较大;另外一方面,海陆空涉及流体流动的不同数值模型的编程语言、程序架构有较大差异,而且网格划分、交界面处理以及实例计算量过于庞大,这些都是实施耦合亟待解决的关键问题。

中国地质调查局海岸带地质环境重点实验室以津冀沿海为研究区,针对海岸带的特殊地理位置和存在的地质环境问题,建立了“海陆空”综合地质调查与观测技术方法体系^[83]。该技术方法体系基本解决了观测和调查数据获取的问题,初步具备了开展海陆气耦合模型研究的条件。图1所示为海洋-地下水-大气(海陆空)多圈层耦合数值模型的基本设想,目前已经构建完成了海洋水动力模型与大气模型的耦合,正在往耦合模式中加入泥沙模型,成功后将尝试加入地下水模型,需要指出的是地表水模型已经

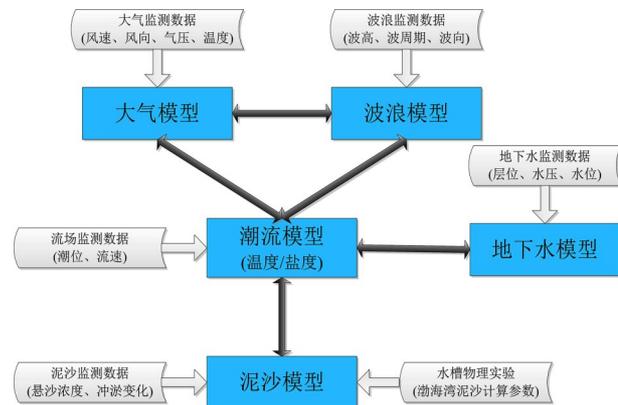


图1 海洋-地下水-大气多圈层耦合数值模型
Fig.1 Ocean-groundwater-atmosphere multi-layered coupling numerical model

暗含在海洋水动力模型当中了。

4.4 地球水环境系统模型

地球是一个统一的整体,大气、海洋及陆地等无时无刻不是处于各种通量的交换过程中,为了研究地球系统的变化规律、认识人类活动与全球变化之间的相互作用,构建完整统一的地球系统模型势在必行。地球系统模型的模拟结果能为人类活动相应政策的制定提供不可或缺的定量依据。前面提到的CESM模型就是由美国国家大气中心在共同气候系统模型(Community Climate System Model, CCSM)的基础上研发的新一代地球气候系统模型,是目前最为先进的、使用最为广泛的地球系统模式之一^[81]。CESM利用耦合器协同海洋、陆面、大气、海冰等分量模式进行气候模拟。目前还没有成熟的地球水环境系统模型,这需要在海陆气耦合模型的基础上进行不断地升级革新才有可能实现。这无疑是未来海岸带水环境数值模型的重要发展方向。

5 结论

系统阐述了与海岸带“海陆空”相关的开源数值模型,主要从数学原理、网格划分、求解方法、基本使用方法以及应用实例等几个方面展开论述。其中海洋数值模型部分主要介绍了工程设计和科学研究中常用的ROMS模型和SWAN模型;大气数值模型部分主要介绍了WRF模型的前处理模块、计算模块以及后处理模块等3个核心模块,还介绍了常用的WRF-chem模式;陆地数值模型部分主要介绍了Delft3D和EFDC两个地表水数值模型和MODFLOW地下水模型;耦合数值模型部分分别从地表

水与地下水耦合模型、海气耦合模型、海陆气耦合模型、地球水环境系统模型等四个方面展开,其中就目前海岸带数值模型研究水平而言,海陆气耦合模型,全面考虑了海洋、陆地与大气之间的相互作用,与自然界发生的实际情况较为吻合,目前还处于发展的初步阶段,相关成熟的研究比较少,但毫无疑问却是未来一段时间海岸带地区海洋环境及地质科学研究发展的大势所趋。

致谢:本论文得到中国地质调查局和中国国家留学基金委经费资助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] 孔俊. 海岸潮致地下水波动特征及其环境效应研究[D]. 南京:河海大学, 2009.
- [2] 张永战, 朱大奎. 海岸带—全球变化研究的关键地区[J]. 海洋通报, 1997, 16(3):74-79.
- [3] 张明书. 浅谈我国海岸带的基本特征[J]. 中国地质, 1998, (4):42.
- [4] 李建芬, 商志文, 陈永胜, 等. 渤海湾牡蛎礁的研究现状与保护建议[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(4):317-333.
- [5] 汪翡翠, 杨朋, 施佩歆, 等. 基于 Landsat OLI 影像的河北省 2019 年海岸线现状[J]. 华北地质, 2021, 44(4):35-40.
- [6] 王福, 商志文, 李建芬, 等. 渤海湾贝壳堤现状及保护建议[J]. 地质调查与研究, 2020, 43(4):293-316.
- [7] 王福, 王宏, 李建芬, 等. 我国海岸 2 万年以来的演替过程及趋势分析:对现代海岸生态保护修复的启示[J]. 中国地质. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220316.0851.004.html>, 2022.03.17.
- [8] WANG F, ZONG Y Q, MAUZ BARBARA, et al. Holocene sea-level change on the central coast of Bohai Bay, China[J]. Earth Surface Dynamics, 2020, 8(3): 679-693.
- [9] WANG F, LI J F, SHI P X, et al. The impact of sea-level rise on the coast of Tianjin-Hebei, China[J]. China Geology, 2019, 2(1): 26-39.
- [10] Wang F, Tian Lizhu, Jiang Xingyu, et al. Human-induced changes in recent sedimentation rates in Bohai Bay, China: implications for coastal development[J]. Science China (Earth Sciences), 2018, 61(10): 1510-1522.
- [11] 孙晓明, 吴登定, 肖国强, 等. 环渤海地区地下水资源与环境地质若干问题探讨[J]. 地质调查与研究, 2006, 29(1):47-56.
- [12] 李勇, 姜兴钰, 田立柱, 等. 渤黄海的风暴潮[J]. 中国矿业, 2019, 28(s2):510-516.
- [13] 杨吉龙, 李红, 施佩歆, 等. 环渤海典型地段海(咸)水入侵研究现状及方法探讨[J]. 地质调查与研究, 2014, 37(4):294-299.
- [14] 苏永军, 黄忠峰, 范翠松, 等. 三维高密度电法在海水入侵界面探测中应用—以莱州湾地区为例[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(2):134-137.
- [15] 孟庆华, 杨齐青, 谢海澜, 等. 浅谈环渤海经济区环境地质图编图[J]. 地质调查与研究, 2019, 42(2):129-134.
- [16] Penven P, Roy C, Brundrit G B, et al. A regional hydrodynamic model of upwelling in the Southern Benguela[J]. South African Journal of Science, 2001, 97:472-475.
- [17] 宋军, 郭俊如, 鲍献文, 等. 东海黑潮与陆架海之间的水交换研究[J]. 海洋通报, 2016, 35(2):178-186.
- [18] 周超杰, 张杰, 杨俊钢, 等. 基于 ROMS 模式的南海 SST 与 SSH 四维变分同化研究[J]. 海洋学报, 2019, 41(1):32-40.
- [19] 李勇, 田立柱, 裴艳东, 等. 渤海湾西部风暴潮漫滩数值模拟[J]. 地质通报, 2016, 35(10):1638-1645.
- [20] 罗士浩, 经志友, 齐义泉, 等. 南海北部次中尺度过程数值研究[J]. 热带海洋学报, 2016, (5):10-19.
- [21] 李冬, 刘璟, 韩桂军, 等. POM 海洋模式的并行算法[J]. 海洋通报, 2010, 9(3): 329-333.
- [22] 武雅洁, 程从敏, 赵红萍, 等. 西海岸中央公园防风暴潮数值模拟研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(9): 91-93.
- [23] 杨万康, 杨青莹, 张峰, 等. 典型海湾风暴潮特征数值模拟与研究[J]. 海洋通报, 2018, 37(5):537-547.
- [24] 沈淇, 朱建荣, 端义宏, 等. 西北太平洋环流和海温数值模拟[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2011, (6): 26-35.
- [25] 罗锋, 廖光洪, 盛建明, 等. 乐清湾海洋环境季节特征及水交换过程研究[J]. 水资源保护, 2012, (5): 48-51.
- [26] 袁帅, 袁鹏, 司先才, 等. 基于 FVCOM 的渤、黄海潮汐潮流数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2020, (2):10-18.
- [27] 周超杰. 基于海洋数值模式的资料同化及保能量算法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [28] SHCHEPETKIN A F, MCWILLIAMS J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [29] 邹怡杰. 大气—海洋—波浪耦合数值模式及其应用[D]. 长沙:长沙理工大学, 2018.
- [30] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A spectral model for waves in the near shore zone[J]. Coastal Engineering, 1994:68-78.
- [31] TOLMAN H L. Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III[J]. Parallel Computing, 2002, 28(1), 35-52.
- [32] 姜波, 杨学联, 张松, 等. 基于 MM5 模式的我国近海海洋风能资源评估[J]. 风能, 2013, (3):80-85.
- [33] 刘振鑫, 刘树华, 胡非, 等. MM5 和 WRF 对北京地区低层大气局地环流模拟能力的对比研究[J]. 中国科学(地球科学), 2012, (2):301-312.
- [34] 盛春岩, 李建华, 范苏丹. 地形及下垫面对渤海大风影响的数值研究[J]. 气象, 2014, 40(11):1338-1344.
- [35] 张晓慧, 张立凤, 周海申, 等. 双台风相互作用及其影响

- [J]. 应用气象学报, 2019, 30(4): 456-466.
- [36] 杨斌斌, 谢锋, 李梦琪, 等. 基于WRF模拟的晋江市海陆风特征分析[J]. 大气科学学报, 2019, 42(3): 459-468.
- [37] GÓMEZ I, CASELLES V, ESTRELA M J, et al. Simulation of surface energy fluxes and meteorological variables using the Regional Atmospheric Modeling System (RAMS): Evaluating the impact of land-atmosphere coupling on short-term forecasts[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2018, 249: 319-334.
- [38] CHENG W Y Y, STEENBURGH W J. Evaluation of Surface Sensible Weather Forecasts by the WRF and the Eta Models over the Western United States[J]. *Weather & Forecasting*, 2005, 20(5): 812-821.
- [39] 王晓君, 马浩. 新一代中尺度预报模式(WRF)国内应用进展[J]. 地球科学进展, 2011, 26(11): 1191-1199.
- [40] SAMARASINGHA S, SANDARUWAN M S, SAMPATH D S, et al. Dynamic downscaling of rainfall data for Deduru Oya River Basin using WRF weather model[J]. *The Institution of Engineers, Sri Lanka*, 2021, (2): 69-75.
- [41] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3[R]. USA: National Center for Atmospheric Research, 2008.
- [42] 庞杨, 韩志伟, 朱彬, 等. 利用WRF-Chem模拟研究京津冀地区夏季大气污染物的分布和演变[J]. 大气科学学报, 2013, 36(6): 674-682.
- [43] 张晗宇, 温维, 程水源, 等. 京津冀区域典型重污染过程与反馈效应研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(4): 1209-1220.
- [44] 毕潇伟. 应用Delft3D对青草沙水库盐度和温度的模拟和预测[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [45] 张文时. 基于EFDC模型的山地河流水动力水质模拟[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [46] 徐学军, 唐建华, 王玉臻, 等. 水沙数学模型技术在长江河口整治中的应用[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 42-46.
- [47] 白生强. 基于Delft3D-FLOW模型的水库泥沙冲淤特性分析[J]. 黑龙江水利科技, 2020, 48(6): 5-8.
- [48] AKTER A, TANIM A H. Salinity distribution in river network of a partially mixed estuary[J]. *Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering*, 2021, 147(2), 04020055.
- [49] 吴文挺. 基于遥感和数值模拟的河口湿地演变研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2019.
- [50] 熊雄. 基于EFDC的鄱阳湖水动力研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
- [51] 唐天均, 杨晟, 尹魁浩, 等. 基于EFDC模型的深圳水库富营养化模拟[J]. 湖泊科学, 2014, 26(3): 393-400.
- [52] CUNANAN A M, SALVACION J. Analysis of water temperature of Laguna Lake using EFDC model. [J]. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 2014(8): 68-76.
- [53] 陶亚, 陈宇轩, 赵喜亮, 等. 基于EFDC模型的阿什河水环境容量季节性分析[J]. 环境工程, 2017, 35(7): 65-69.
- [54] 张春志. MODFLOW在地下水水源地水质预测中的应用[J]. 地下水, 2007, 29(1): 61-64.
- [55] 王科以. MODFLOW运用于污泥填埋场项目地下水环境影响的预测[J]. 资源信息与工程, 2018, 33(5): 68-69.
- [56] 邵鹏. 基于MODFLOW的水库渗漏预测与影响评价数值模拟研究[J]. 水利技术监督, 2020, (3): 142-144.
- [57] 李文雅, 谢成平, 陈艳国. Visual Modflow在海勃湾水库环境地质评价中的应用[J]. 人民长江, 2016, 47(13): 56-59, 105.
- [58] 朱君妍, 李翠梅, 贺靖雄, 等. GMS模型的水文水质模拟应用研究[J]. 水文, 2019, 39(1): 68-75.
- [59] JABBARI E, FATHI M, MORADI M. Modeling groundwater quality and quantity to manage water resources in the Arak aquifer, Iran[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(14): 1-16.
- [60] 胡健, 张祥达, 魏志诚. 基于FEFLOW在地下水数值模拟中的应用综述[J]. 地下水, 2020, 42(1): 9-13.
- [61] 祖斌. Visual Modflow在水文地质模型构建及地下水模拟中的应用[J]. 绿色科技, 2018, (16): 233-234.
- [62] SAJEENA S, KURIEN E K. Studies on groundwater resources using visual MODFLOW - A case study of Kadalundi river basin[J]. *Open Journal of Soil and Water Conservation*, 2021.
- [63] 徐力刚. 地表水地下水的交互与耦合模拟研究现状与进展[J]. 水资源保护, 2009, 25(5): 82-85.
- [64] LETICIA B R, PABLO A C, CARLOS A V. Full conservative coupling of HEC-RAS with MODFLOW to simulate stream-aquifer interactions in a drainage basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 353(1-2): 129-142.
- [65] 武强, 孔庆友, 张自忠, 等. 地表河网-地水水系统耦合模拟I: 模型[J]. 水利学报, 2005, 36(5): 588-592.
- [66] 王鹏飞. 滨海地表水和地下水耦合模型的建立及应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [67] 亓春霞. 中尺度海-气耦合模式MM5V3/ECOM-si对黄东海入海气旋的模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.
- [68] 杨珂. 基于WRF-ADCIRC的海口湾典型台风下的风场改进及风暴潮模拟[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [69] 王扬杰, 张庆河, 陈同庆, 等. 大气-海洋-海浪耦合模型在台风过程模拟中的应用[J]. 水道港口, 2016, 37(2): 33-39.
- [70] 林谔. 大气-海洋-海浪实时耦合模式的建立及应用[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- [71] 刘武, 杨成荫, 李耀东, 等. 基于MCT耦合器的WRF-POM区域海气耦合模式构建及应用[J]. 海洋科学, 2018, 42(5): 98-107.
- [72] 刘磊, 费建芳, 黄小刚, 等. 大气-海浪-海流耦合模式的建立和一次台风过程的初步试验[J]. 物理学报, 2012, 61

- (14): 523–531.
- [73] WARNER J C, ARMSTRONG B, HE R, et al. Development of a coupled ocean–atmosphere–wave–sediment transport (COAWST) modeling system[J]. *Ocean Modelling*, 2010, 35(3): 230–244.
- [74] SARAVANAN R, HSIEH J S, CHANG P, et al. Development of a high resolution coupled regional climate model in the Atlantic sector for climate change studies[C]. 21st Conference on Climate Variability and Change, Phoenix: American Mathematical Society, 2009.
- [75] HSIEH J S, LI M K, SARAVANAN R, et al. Downscaling tropical cyclone activity using regional models: Impact of air–sea coupling on the frequency and intensity of Atlantic hurricanes[C]. American Geophysical Union, Fall Meeting, 2009.
- [76] SAMALA B K, NAGARAJU C, BANERJEE S, et al. Study of the Indian summer monsoon using WRF–ROMS regional coupled model simulations[J]. *Atmospheric Science Letters*, 2013, 14(1): 20–27.
- [77] LIU X Y. Biases of the Arctic climate in a regional ocean–sea ice–atmosphere coupled model: an annual validation[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 33(9): 56–67.
- [78] 李勇, 陈鑫, 田立柱, 等. 基于海气耦合模型的渤海湾风暴潮数值模拟[J]. *上海交通大学学报*, 2017, 51(11): 123–131.
- [79] LI Y, CHEN X, JIANG X Y, et al. Numerical simulations and comparative analysis for two types of storm surges in the Bohai Sea using a coupled atmosphere–ocean model[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2019, 38(9): 35–47.
- [80] 伍志元, 蒋昌波, 邓斌, 等. 基于海气耦合模式的南中国海北部风暴潮模拟[J]. *科学通报*, 2018, 63(33): 3494–3504.
- [81] CRAIG A P, VERTENSTEIN M, JACOB R. A new flexible coupler for earth system modeling developed for CCSM4 and CESM1[J]. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2011, 26(1): 31–42.
- [82] 周天军, 邹立维, 韩振宇, 等. 区域海气耦合模式 FROALS 的发展及其应用[J]. *大气科学*, 2016, 40(1): 86–101.
- [83] 李勇, 文明征, 杨朋, 等. 津冀沿海“海陆空”综合地质调查与观测体系建设[J]. *华北地质*, 2021, 44(4): 40–46.

Review on the "sea–land–atmosphere" numerical model and its application in coastal zone

LI Yong^{1,2,3}, YANG Peng^{1,2}, WEN Ming-zheng^{1,2}, JIANG Xing-yu^{1,2}, TIAN Li-zhu^{1,2}, WANG Fu^{1,2}

(1. Tianjian Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of coastal geological environment, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. Hebei University of Environmental Engineering, Qinhuangdao Hebei 066102, China)

Abstract: As a necessary part of the construction of "sea-land-atmosphere" comprehensive geological survey and observation system for Tianjin and Hebei coastal zone, the numerical model plays an irreplaceable role in the expression and comprehensive research of environmental geological results. This paper discusses many open source numerical models related to "sea-land-atmosphere" in coastal zone. These models are often used in engineering design and scientific research, and have the advantages of easy access, flexible use and easy coupling. Mainly from the perspective of fluid motion (including water and air), the advantages and disadvantages, grid forms, solution methods and application fields of various models are introduced from four aspects, including ocean numerical model, atmosphere numerical model, land numerical model and coupled numerical model. The application examples of the models in engineering design and scientific research are elaborated, and the development direction of the coupling model in the future is analyzed.

Key words: coastal zone; ocean numerical model; atmosphere numerical model; land numerical model; coupling numerical model