

李炎,陈一宁,吴祥柏. 论陆-海界面的复参数化[J]. 海洋学研究, 2022, 40(3): 3-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2022.03.001.
LI Yan, CHEN Yining, WU Xiangbai. Complex parameterization for land-ocean interface: A perspective[J]. Journal of Marine Sciences, 2022, 40(3): 3-8. DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2022.03.001.

论陆-海界面的复参数化

李炎¹, 陈一宁², 吴祥柏³

(1. 厦门大学 东山太古海洋观测与实验站, 福建 厦门 361005; 2. 自然资源部第二海洋研究所, 浙江 杭州 310012; 3. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212100)

摘要: 陆-海界面是地球系统科学模型边界条件设定的难点。入海物质通量测量的不确定性、逆梯度汇聚的局域化功能以及可降维自适应结构的存在, 使得陆-海界面成为共振条件下连接线性与非线性系统的枢纽, 难以在经典线性化理论框架下组织“各态遍历”的测量, 实现界面系统的实参数化, 满足地球系统科学模型的环境模拟与预测需求。受前人借助卫星高度计和潮位站等大规模水位数据阵列的伴随同化, 运用陆架潮波数值模型反演海底边界层拖曳系数时空变化规律的案例启发, 文章提出了陆-海界面系统的复参数化思维以及遥感观测和数值模型相结合的复参数化建议。

关键词: 陆-海界面; 遥感观测; 数值模型; 参数化; 复数

中图分类号: P73

文献标志码: A

文章编号: 1001-909X(2022)03-0003-06

DOI: 10.3969/j.issn.1001-909X.2022.03.001

0 引言

1988年, 美国的NASA咨询委员会发布了《地球系统科学》报告。该报告系统地阐述了地球系统科学的基本观点, 一方面强调了地球系统变化的影响与后果以及地球系统未来变化的预测等科学任务的重要性, 另一方面提出地球系统科学的四大研究方法: 观测、理解、模拟、预测^[1]。由于全球变化研究的需求驱动, 加上政府适时推行“完全与开放”科学数据共享决策和“大循环”的数据共享道路^[2], 明显提升了以全球海洋观测系统(Global Ocean Observing System, GOOS)为代表的全球观测系统与学术共享数值模型的精度与可靠性。

无论是水动力学、泥沙动力学、营养盐动力学还是生态动力学过程, 广义的数值模型边界, 比如陆-海

界面、水体-沉积界面、海洋-大气界面或是水体-生物体界面等约束, 都需要在模型网格步长对应的时间和空间尺度下参数化。其中, 最具工程实用意义的技术路线是源自1877年法国力学家Boussinesq著名的涡黏性假设^[3]。具体推广到界面设置, 通常用可观测的平均量替代时间平均运动方程中的脉动相关项, 通过闭合模型将边界约束以实数形式实参数化, 然后利用针对性的实际观测和实验测试数据, 确定模型中的参数取值^[4]。当不具备参数化支撑数据观测条件或共享数据积累的时候, 只能从已发布的模型“参数池”中选择。可惜, 广受关注的环境界面参数, 比如海底边界层拖曳系数、海-气边界层拖曳系数、海-气界面气体交换速率等, 流行的实参数化方案均有几十种之多, 成了地球系统科学模型, 特别是旨在描述陆海过渡带碳汇的碳循环模型引入不确定性的主因。

收稿日期: 2022-06-08

基金项目: 卫星海洋环境动力学国家重点实验室高端访问海星学者基金

第一作者简介: 李炎(1954—), 男, 福建省泉州市人, 教授, 主要从事河口海岸学研究, E-mail: liyan@xmu.edu.cn。

面临海洋碳汇问题政策化挑战的环境科学与海洋科学交叉领域中的同行们,如何优化这条争论不休的经典技术路线?我们可从研究案例最丰富、不确定性最突出的陆-海界面现象入手,借助物理学的近代发展,深度思考界面参数化的发展策略。于是,有了这篇线上专题讨论后形成的观点与建议。

1 测不准的陆-海界面?

无论是宏观的箱式模型、中观的概化模型还是精细的过程模型,地球系统科学模型均相当依赖所引用的陆-海界面通量精度。但众所周知,陆-海界面通量的测量精度受到明显限制。

以长江径流入海通量为例,为了避开河口潮波动力过程的影响,长期以来都依照长江入海口上游方向 642 km 的大通水文站观测结果确定。至少因为忽略河口区沿程取水排水通量的贡献,用大通断面径流量代表长江入海通量显然具有不确定性。在盐水入侵界线徐六泾布置的声学多普勒流速剖面仪走航式断面观测序列说明,徐六泾断面径流量与大通径流量之间存在显著的非线性相关关系:徐六泾断面估算的年径流量略大于大通年径流量,但枯水期徐六泾断面径流量却小于大通径流量^[5]。

水动力学视角上,长江流域与东海陆架之间的陆-海界面是一个具有一定时空规模的界面系统,其中包含着沿程取水排水、河口潮波运动、河口环流等不同时空尺度与不同稳定程度的循环或波动。按经典的线性化理论,一般由大尺度平衡运动与小尺度不稳定流动的相互作用解释,或仿照 Charney 的大气动力学多平衡态理论,在边界强迫的情况下,系统产生两类具有不同特征的平衡态:一类非常接近共振条件,具有强的波动分量和比较弱的定常分量;另一类离线性共振条件很远,具有弱的波动分量和较强的定常分量^[6]。如此共振条件主导的界面系统中,通过测量一阶矩、二阶矩、三阶矩等系统“秉性”(固有特性),确定系统的位置、动量和能量等表观特征,需具备满足“各态遍历”要求的时间、空间采样集。在系统边缘的一个时间序列断面(如大通断面),或在更为接近系统核心的一个时间序列断面(如徐六泾断面),试图确定一个线性共振主导的水动力学系统,必定会因其远离“各态遍历”要求的时间、空间采样集,带来关于系统的位置、动量、能量等测量不确定性,更不用说将各阶矩联系起来的闭合模型及其参数群了。

拓展到更加复杂的陆-海界面碳循环系统,这是

一个拥有无机碳与有机碳、溶解态与颗粒态、海洋-大气界面与海洋-沉积界面,涉及营养盐、微生物、浮游植物、浮游动物,潜在“极限环”式共振条件的生态动力学系统^[7]。线性共振的水动力学环境下,高度无序运动的颗粒物,特别是生命“颗粒”物质及其相关生源物质,深度参与所显示出的强烈非线性行为,对“各态遍历”时间、空间采样集的测量要求更高了,以致边缘海的碳沉降输出和埋藏的定量化成为世界性难题。同样以长江口及毗邻东海陆架为例,刘茜等^[8]基于走航 $p\text{CO}_2$ 观测对东海 CO_2 源汇格局的集成研究,涵盖长江冲淡水、闽浙沿岸流、北部陆架、中部陆架和南部陆架五个子区的面积加权平均 CO_2 通量为 $(-2.5 \pm 1.5) \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,已有 60% 的相对误差。若综合不同研究团队的观测成果,东海年平均海-气碳通量位于 $-6.92 \sim -23.30 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 区间,相对误差超过 100%。故开展具有足够空间和时间覆盖范围的、陆海统筹的跨界面观测和研究凸显急切^[9]。

2 局域化的陆-海界面?

1958 年,美国物理学家 Anderson 通过理论计算预测,无序程度足够强的情况下,电子无法自由地扩散,晶体不再导电成为了绝缘体。这一预测后来被实验证实,称为电子波的 Anderson 局域化现象^[10-11]。随后,Anderson 局域化理论被引申到其他因无序程度足够强而抑制扩散的物理现象分析,比如大气的阻塞^[6]、水波的沙波群储能^[12]、颗粒物的孤立子波形隆起^[13]等。强烈共振影响下的陆-海界面,在颗粒物、生命“颗粒”及其相关生源物质无序程度足够强的情况下,亦可成长为一种生命史较长而结构持续稳定的大振幅孤立系统,具备逆梯度汇聚周边颗粒物、生命“颗粒”及其相关生源物质而维持波形不变的宏观局域化现象。

最早注意到陆-海界面无序物质逆梯度汇聚现象的是河口海岸学的学者。1950 年代,潜心研究潮滩发育过程的 van Straaten、Keunen 和 Postma 等欧洲科学家们,用一个包含启动延迟效应和沉降延迟效应的非线性概念模型,解释了潮流不对称过程驱动浅海细颗粒泥沙向潮滩方向汇聚的动力学过程^[14]。1960 年代,欧美河口海岸泥沙动力学者在线性化理论框架下,运用絮凝作用、河口环流、潮不对称过程等及其相互作用,合力剖析河口最大浑浊带的形成机制^[14]。1970 年代,Dyer 以及后来的苏纪兰等^[15]仍然依据线性化理论,把悬浮泥沙质量浓度、流速和水位按均值

和脉动展开与重组,将输运方程分解为不同物理属性的特征项,成功地描述了物质逆梯度汇聚现象中的泵吸效应与陷捕效应。借助1980年代兴起的底部边界层三角架观测技术,我们又从频域视角分析了长江口与毗邻东海陆架波动输运过程的时均通量,观测到悬浮泥沙顺梯度方向的扩散和逆梯度方向的汇聚,受到频谱通道和空间通道均具分异性的陆-海界面“滤波器”结构操控^[16]。然终因线性化理论框架限制,未能沿起动延迟效应和沉降延迟效应方向有所推进。

由陆及海发展的环境科学界,历来关注指向低浓度的正向扩散作用,很少论及逆梯度汇聚现象。最近ZHENG et al^[17]利用相对于活性磷酸盐的浮游植物生长过剩无机氮(N^*)作为准保守指标,发现渤海和黄海沿岸流系与生命“颗粒”所关联的过剩无机氮,具有来自边缘海甚至黑潮海域的大气沉降氮逆梯度汇聚的重要贡献。

陆-海界面的颗粒物和营养物逆梯度汇聚现象,究竟与潮波共振、河口环流等水动力线性共振环境,以及最大混浊带、浮游植物藻华、浮游动物旺发等沉积动力学或生态动力学非线性共振事件等有何联系?什么条件下其非线性会降低到摆脱大振幅孤立系统,回归到相对容易测量与评估的线性化系统?源自海洋大气沉降和西边界流的生命“颗粒”关联营养物,如何逆梯度向河流主控边缘海陆-海界面汇聚,其输运通道的时域、频域和空域又是如何分布?或将成为海洋环境科学界不可忽视的选题。

3 自适应的陆-海界面?

颗粒物建造的“动床”界面具有很好的自适应能力。海底边界层拖曳系数观测所揭示的陆架边缘沙波底床减阻现象^[18]和岸滩浮泥底床减阻现象^[14]均为明显实例。随着潮流速度的增加,切换并缓存在沙波底形或浮泥界面谐振的高频段能量份额调高,余留于潮波所在低频段的能量份额调低,导致低频段的拖曳系数减少,底应力增幅受限,正压梯度趋于稳定,潮波的非线性化变形受抑制^[19]。这种在地形坡折处显著增强的沙波底床和浮泥底床负反馈作用,宛如动床界面为匹配陆-海界面水波能流而建造的“稳压器”。

MACCREADY^[20]将沿等盐度面平均的方法应用到Columbia河口三维水动力学数值模拟成果再分析时,发现河流入海口的横截断面处,河口交换流对应的人流体积通量 Q_m 几乎不随径流量 Q_R 的变化而变化,出流体积通量 Q_{out} 仅随径流量 Q_R 的变化而线性变

化。经过长期适应与调整的河口潮波、河口环流与河口地形,已能以稳定的河口环流维持河口通量与入海通量的匹配,Columbia河口的“动床”界面负反馈调控,形成一个为衔接陆-海界面流路而建造的“稳流器”。

动床界面“稳压器”效应和“稳流器”效应的存在,使得陆-海界面系统的能流和物质流输入以及相应地形和物质储库,可以自动调整到相互适应的匹配状态。此时系统的维数降低,稳定性提高,可测程度可随之提高。若将该概念拓展到无序程度更高的生态动力学层次,甚至强非线性生态系统动力学层次,寻找和解析动力-沉积-地貌-生态相互适应的匹配状态,认识其广义动床界面天然“稳定器”的结构与特性参数,可能是优化“开展具有足够空间和时间覆盖范围的、陆海统筹的跨界面观测和研究”方案,更快实现诸如陆-海界面碳循环系统参数化目标的最佳路线。

4 复参数化思考

遥感测量是获取“各态遍历”时间、空间采样集的快捷且可靠路线。经典范例是1954年COX与MUNK^[21-22]仅依靠夏威夷海区(风速 $14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以下)的9个航空摄影试验获取的29组有效数据,通过手工量算就提出著名的海-气界面波面斜率分布与风速的关系。50余年后,BRÉON和HENRIOT^[23]通过ADEOS-1卫星上的POLDER传感器收集到全球范围内共24 000幅太阳耀光图像以及该卫星微波散射计同步测量的风速,依据全球海洋范围的数百万对有效数据集,再次统计了海-气界面波面斜率分布与风速的关系。比较两者的统计成果,其一阶矩和二阶矩的回归关系式均高度吻合,仅在三阶矩和四阶矩上出现细节上的差异,以致时年92岁的MUNK^[24]发文感叹:“这是一个难以忽视的海洋真理,太基本而不能被忽视,太不完整而不能被理解。……过去50年的进展怎么如此缓慢啊!”

对于较快达到均衡态,弛豫时间较短的界面相互作用过程,借助遥感一类大规模数据采集的实参数化路线,精度已经相当可靠。而对于具有时域、频域和空域尺度效应的,明显受到滞后效应影响的陆-海界面系统,可将“通过闭合模型将边界约束以实数形式实参数化”的经典参数化路线,提升为“通过闭合模型将边界约束以复数形式参数化”的复参数化路线。我们注意到,以下两篇文献的研究案例均已表现出海底边界层拖曳系数复参数化的可行性。借助卫星高度计和潮位站等大规模数据阵列的伴随同化,WANG

et al^[25] 运用东中国海陆架水平二维潮波数值模型反演了海底边界层拖曳系数时空变化规律,除了重现海底边界层拖曳系数与潮流流速负相关的底床减阻现象外,还发现海底边界层拖曳系数具有 M_2 潮周期波动,并比潮流流速波动超前约 2 h。这种具有表观滞后效应的“缓冲”或“弹性”特性,可用复数表述的海底边界层拖曳系数,也曾被现场阵列式观测与动力学模型反演所报道。WILLIAMS^[26] 采用多站阵列观测和垂向二维剖面动量平衡方程反演路线,发现欧洲北海陆架沙波群的海底边界层拖曳系数具有 M_2 潮周期波动,并比流速波动超前约 3 h。海底边界层拖曳系数位相超前潮流流速波动,更进一步提升了潮波系统的高流速减阻,降低能耗,维持共振状态,也表现出水波能量存储和释放等适应性调整与匹配。上述案例显示,经过遥感测量同化的数值模型是值得推荐的环境界面复参数化反演路线。

犹如滚动摩擦与滑动摩擦的亚尺度结构区别,这类可用复数表述的环境界面参数,与亚阵列尺度结构的共振状态和位相调控机理有关。陆架潮流沙脊群和沙波群等亚阵列尺度周期性底形,滨海湿地红树林和盐沼植物群落等亚阵列尺度“超构材料”^[27],或者浮泥密度界面、颗粒态营养物界面甚至生态系统食物网界面的波动与“缓冲”现象(比如前述的启动延迟效应和沉降延迟效应),都可能是诱发亚阵列尺度共振状态与位相调控、导致环境界面参数“弹性”的起因。我们期待当今物理学领域进展迅速的“超构材料”研究,可为地学领域关于环境界面参数“弹性”形成与调控机制的探索提供更先进的理论架构。

对参数化相互作用达到均衡态历时漫长或滞后效应较为明显的这类界面过程进行参数化反演时,仅靠遥感一类大规模数据采集与分析已难以实现。因此,合理地选择与数值模型步长网格相匹配的时空尺度,针对性地组织遥感主导的多站阵列观测与分析,反演可用复数表述的“弹性”环境界面参数,可以有效降低地球系统科学模型的不确定性。

目前我国正在实施的“全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”项目,其海洋生态系统碳参数产品遥感反演与产品研发重点“海水二氧化碳分压($p\text{CO}_2$)”,采用的是基于控制机制分析的海水 $p\text{CO}_2$ 半解析遥感模型 MeSAA- $p\text{CO}_2$ ^[28]。尽管 MeSAA- $p\text{CO}_2$ 已经引入了海水碳酸盐系统端元分析等长周期保守混合平衡因素,比仅仅基于 $p\text{CO}_2$ 和遥感参数之间的线性、多元回归关系或机器学习获得的区域性经验遥

感反演模型有所进步,但是研发者仍然承认,在海水 $p\text{CO}_2$ 的反应动力学链条中,“不同控制机制具有不同的时间尺度,因此存在相互作用与滞后效应,而在我们的算法中,不同的进程之间的关系仍然是一个悬而未决的问题”^[29]。选择经过遥感测量同化的海洋生态动力学数值模型,解析出用复数表述的碳循环各界面参数,可以有效利用遥感定量化、长时间序列和大尺度宏观的观测优势,发挥海洋生态动力学数值模型对海洋碳循环控制机理的量化估算能力,改善上述关于海洋关键界面层(如海-气界面、陆-海界面、垂向界面、侧向输运等)碳通量和有机碳储量全球估算模型的不确定性问题。

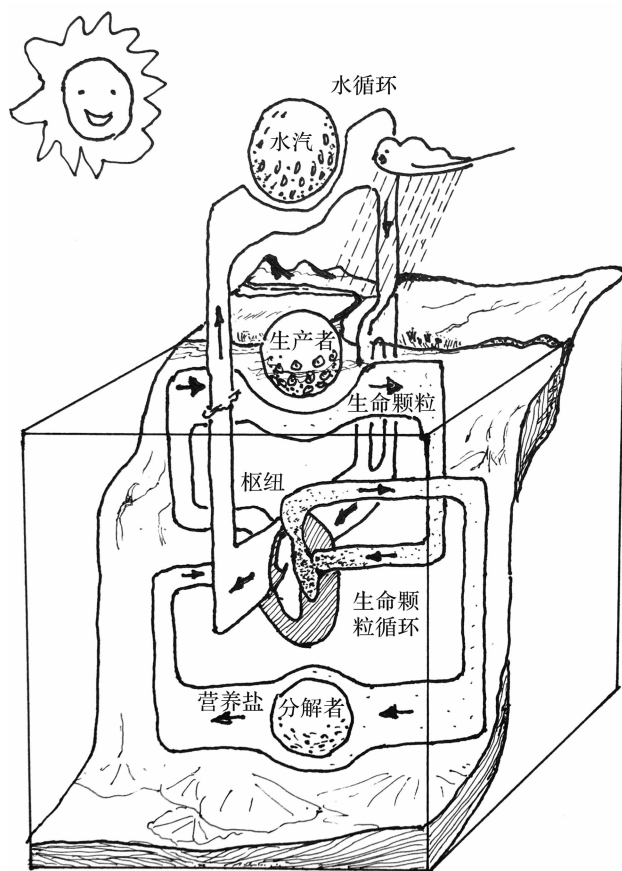


图 1 枢纽式陆-海界面系统示意

Fig. 1 The hub-like system for land-sea interaction

5 结语

陆-海界面是连接线性的水体循环体系、非线性的颗粒物体体系、强非线性的生命“颗粒”及其生源物质体系的,具有自适应能力的陆海相互作用枢纽式界面系统,犹如连接肺循环和体循环等回路的心脏一样

(图1)。相比只有幅度特征的实数形式界面参数,具有频率、振幅、位相特征的复数形式界面参数,可以更加完整地表现陆-海界面这类枢纽式界面系统的状态。

致谢 感谢本专辑特约主编,自然资源部第四海洋研究所黄大吉研究员的特别约稿。本文选题得益于2022年1月11日浙江大学海洋学院张继才教授主持的“底边界层机制与底摩擦效应参数化”线上学术论坛的启发,并为厦门大学环境科学系陈能汪教授组织的厦门大学环境学科40周年纪念活动所触动,在卫星海洋环境动力学国家重点实验室访问期间开始撰写。谨此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 中国科学院地学部地球科学发展战略研究组. 21 世纪中国地球科学发展战略报告[M]. 北京:科学出版社,2009.
Research Group of Earth Science Development Strategy, Geoscience Department, Chinese Academy of Sciences. Strategic report: China's earth science development for 21st century[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [2] 刘闯,王正兴. 美国全球变化数据共享的经历对我国数据共享决策的启示[J]. 地球科学进展,2002,17(1):151-157.
LIU Chuang, WANG Zhengxing. The experience of U. S. global change data and information sharing and its indication to China[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(1): 151-157.
- [3] 刘沛清. 流体力学通论[M]. 北京:科学出版社,2017.
LIU Peiqing. Fluid mechanics biography[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 布德罗,约尔根森. 水底边界层——迁移过程与生物地球化学[M]. 北京:科学出版社,2013.
BOUDREAU B P, JORGENSEN B B. The benthic boundary layer: Transport processes and biogeochemistry [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [5] 汪亚平,潘少明, H. V. Wang, 等. 长江口水沙入海通量的观测与分析[J]. 地理学报,2006,61(1):35-46.
WANG Yaping, PAN Shaoming, WANG H V, et al. Measurements and analysis of water discharges and suspended sediment fluxes in Changjiang Estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 35-46.
- [6] 周伟灿,朱乾根,刘宣飞. 阻塞动力学研究进展与展望[J]. 南京气象学院学报,1999,22(2):279-286.
ZHOU Weican, ZHU Qian'gen, LIU Xuanfei. Advances in the blocking dynamics and its prospects[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1999, 22(2): 279-286.
- [7] 陈长胜. 海洋生态系统动力学与模型[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- CHEN Changsheng. Marine ecosystem dynamics and modelling[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [8] 刘茜,郭香会,尹志强,等. 中国邻近边缘海碳通量研究现状与展望[J]. 中国科学:地球科学,2018,48(11):1422-1443.
LIU Qian, GUO Xianghui, YIN Zhiqiang, et al. Carbon fluxes in the China Seas: An overview and perspective[J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61: 1564-1582.
- [9] 陈建芳,翟惟东,王斌,等. 河流-河口-近海连续体碳循环研究进展[J]. 海洋学研究,2021,39(4):11-21.
CHEN Jianfang, ZHAI Weidong, WANG Bin, et al. A review of the carbon cycle in river-estuary-coastal ocean continuum[J]. Journal of Marine Sciences, 2021, 39(4): 11-21.
- [10] ANDERSON P W. Absence of diffusion in certain random lattices[J]. Physical Review, 1958, 109(5): 1492-1505.
- [11] ANDERSON P W. Thoughts on localization[J]. International Journal of Modern Physics B, 2010, 24(12/13): 1501-1506.
- [12] ZHANG Yu, LI Yan, SHAO Hao, et al. Band gaps and localization of surface water waves over large-scale sand waves with random fluctuations[J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2012, 85: 066319.
- [13] 陈伟中. 颗粒物质表面孤立子波形隆起与内部对流[J]. 物理学报,1995,44(3):427-431.
CHEN Weizhong. Experimental study on soliton-shape heaping and convection in granular material [J]. Acta Physica Sinica, 1995, 44(3): 427-431.
- [14] DYER K R. Coastal and estuarine sediment dynamics[M]. New York: Wiley, 1986.
- [15] SU Jilan, WANG Kangshan. The suspended sediment balance in Changjiang Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1986, 23(1): 81-98.
- [16] 李炎. 从频域分析波动输运过程的时均通量[J]. 海洋科学,1990,14(4):1-6.
LI Yan. Notes on net flux in fluctuated process in view of frequency with special reference to the suspended sediment transport[J]. Marine Sciences, 1990, 14(4): 1-6.
- [17] ZHENG Liwen, ZHAI Weidong. Excess nitrogen in the Bohai and Yellow Seas, China: Distribution, trends, and source apportionment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 794: 148702.
- [18] WU Xiangbai, LI Yan. Estimates of drag coefficient over the Taiwan Bank using HF-Radar system[C]// Proceeding of the 1st Ocean Radar Conference for Asia, 2012.
- [19] 邵浩. 台湾浅滩沙波的太阳耀光遥感研究[D]. 厦门:厦门大学,2011.

- SHAO Hao. Sun glitter remote sensing of sand waves on the Taiwan Banks[D]. Xiamen: Xiamen University, 2011.
- [20] MACCREADY P. Calculating estuarine exchange flow using isohaline coordinates [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2011, 41(6): 1116-1124.
- [21] COX C, MUNK W. Measurement of the roughness of the sea surface from photographs of the sun's glitter[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1954, 44(11): 838-850.
- [22] COX C, MUNK W. Slopes of the sea surface deduced from photographs of sun glitter [J]. *Bulletin of the Scripps Institution of Oceanography*, 1956, 6(9): 401-488.
- [23] BRÉON F M, HENRIOT N. Spaceborne observations of ocean glint reflectance and modeling of wave slope distributions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(C6): C06005.
- [24] MUNK W. An inconvenient sea truth: Spread, steepness, and skewness of surface slopes [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 377-415.
- [25] WANG Daosheng, ZHANG Jicai, WANG Yaping. Estimation of bottom friction coefficient in multi-constituent tidal models using the adjoint method: Temporal variations and spatial distributions [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(5): e2020JC016949.
- [26] WILLIAMS J J. Drag and sediment dispersion over sand waves [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 41(6): 659-687.
- [27] 杨世礼, 钟雨豪, 颜士玲, 等. 弹性板波超材料研究进展 [J]. *科学通报*, 2022, 67(12): 1232-1248.
- YANG Shili, ZHONG Yuhao, YAN Shiling, et al. A review of elastic plate wave metamaterials [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, 67(12): 1232-1248.
- [28] 刘良云, 白雁, 孙睿, 等. “全球生态系统碳循环关键参数立体观测与反演”项目概述与研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2021, 36(1): 11-24.
- LIU Liangyun, BAI Yan, SUN Rui, et al. Stereo observation and inversion of the key parameters of global carbon cycle: Project overview and mid-term progressess [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2021, 36(1): 11-24.
- [29] BAI Yan, CAI Weijun, HE Xianqiang, et al. A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface $p\text{CO}_2$ in river dominated coastal oceans: A case study from the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3): 2331-2349.

Complex parameterization for land-ocean interface: A perspective

LI Yan¹, CHEN Yining², WU Xiangbai³

(1. Dongshan Swire Marine Station, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Second Institute of Oceanography, MNR, Hangzhou 310012, China; 3. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China)

Abstract: Land-ocean interface has been a challenge in determining the boundary conditions for earth system modelling. Due to the uncertainty of material fluxes, the localization effect on counter gradient convergence, and the existence of self-adapted structures, land-ocean interface is unable to be monitored ergodically under the framework of classic linear theory. There is a great difficulty in quantifying real parameters for this interface, which is the key connection between linear and nonlinear systems under harmonic conditions, to better improve the simulation and prediction capability of earth system modelling. In a previous work, based on a two-dimensional multi-constituent tidal model and its adjoint model, together with assimilation using satellite altimeter data and tidal gauge array data, the spatial and temporal variation in bottom friction coefficient was estimated in an improved way. Inspired by the abovementioned study, this contribution proposed a suggestion of complex parameterization for land-ocean interface, in combination with remote sensing observation and numerical modelling.

Key words: land-ocean interface; remote sensing observation; numerical modelling; parameterization; complex number