

地球系统科学理念下海岸带地质调查转型思考

吴林强¹，张涛¹，张旭²，蒋成竹¹

(1. 中国地质调查局发展研究中心，北京 100037；2. 安徽省勘查技术院，合肥 230031)

摘要：地球系统科学的发展要求海岸带地质调查更加注重地质过程研究和定量模拟，加强对地球系统的预测，服务可持续发展。在地球系统科学理念的指导下，我国海岸带地质调查科学划分了全国海岸带生态地质单元分区，逐步构建了陆海统筹的综合调查监测体系和业务化的数学耦合模型，更加注重海岸带和海洋过程与人类活动的耦合研究，突出成果支撑和服务可持续发展。新时期，海岸带地质调查工作要聚焦高质量发展要求，强化可持续发展的地质科学供给，推动海岸带地质调查工作模块化、标准化、流程化，强化数据采集、分析、模拟和预测，创新成果表达方式，构建专业化、特色化的业务新格局。

关键词：海岸带；地质调查；地球系统科学；转型发展；可持续发展

中图分类号：P748；F062.1 **文献标识码：**A **文章编号：**文章编号：1672-6995（2023）

DOI：10.19676/j.cnki.1672-6995.001153

Reflections on the Transformation of Coastal Zone Geological Survey under the Concept of Earth System Science

WU Linqiang¹, ZHANG Tao¹, ZHANG Xu², JIANG Chengzhu¹

(1. Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China;

2. Anhui Exploration Technology Institute, Hefei 230031, China)

Abstract: The development of Earth System Science demands that coastal zone geological surveys place greater emphasis on geological process studies and quantitative modeling, strengthen predictions of the earth system, and serve sustainable development. Guided by the concept of Earth System Science, China's coastal zone geological surveys have scientifically delineated eco-geological units in the national coastal zone, progressively established a comprehensive land-sea coordinated investigation and monitoring system, and developed operational mathematical coupling models, paid more attention to the coupling of coastal and marine processes with human activities, and highlighted results that support and serve sustainable development. In the new era, coastal zone geological surveys should focus on the requirements of high-quality development, enhance the geological science supply for sustainable development, promote modularization, standardization, and process optimization in survey workflows, strengthen data collection, analysis, simulation, and prediction, innovate result presentation methods, and build a specialized and distinctive new operational framework.

Keywords: coastal zone; geological survey; Earth System Science; transformational development; sustainable development

海岸带地区是全球生态系统最丰富、海陆作用最强烈的地理区带，也是经济社会最发达、人类活动最强烈的地带。我国海岸带地区集中了全国30%的大中城市、近20%的人口和35%的GDP总量，已经成为社会经济最活跃、资源汇聚程度最高的区域，是推进海洋强国建设和构建新发展格局的重要区域。同时，这些区域也面临着严重的资源、环境、生态、灾害等一系

收稿日期：2024-07-25；**修回日期：**2024-12-23

基金项目：中国地质调查局项目“深海海洋资源勘探开发政策与战略研究”（DD20243539）

作者简介：吴林强（1988—），男，江西省上饶市人，中国地质调查局发展研究中心高级工程师，工学硕士，主要从事海洋地质战略和天然气水合物产业化研究。

列重大地球系统科学问题，亟需在地球系统科学理念的指导下，深入研究海岸带各圈层之间的相互联系、相互作用机理，以及海岸带自然演替规律和动力机制，预测人类活动影响下海岸带环境演变趋势，推动海岸带社会经济和生态环境的质量变革、效率变革、动力变革，实现可持续发展。

1 海岸带在地球系统中的特殊位置

地球是一个由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈（包括人类）组成的（图1），由能量、物质和生物相互作用驱动的复杂巨型系统^[1]。海岸带（coastal zone）是指海洋和陆地相互作用的带状区域，包括海岸线向陆拓展的陆地部分和向海延伸的近岸海域。关于海岸带的范围，国际上尚无统一的界定。一般认为，海岸带的上界为最大风暴潮影响的上界，从海岸线向陆延伸 10 km 左右；下界为向海延伸至 5~10 m 左右的等深线^[2]。作为地球系统各圈层之间的相互作用结合地带，海岸带对地球系统物质大循环起着过滤和沉淀作用，是研究地球系统科学的最佳透视窗口和切入点^[3-5]。加强对海岸带系统的深入研究，有助于获取关于地球系统内部运行机制的最多信息量，最大程度地克服对某单一系统研究时所产生的宽泛与片面^[4]。此外，海岸带还是人类的自然资源、社会资源和经济资源的密集带，全球约 50%以上的人口生活在沿海大约 60 km 的范围内。由于海岸带具有极度的反应灵敏性，既是典型的生态环境脆弱带^[6]，也是反映人地交互作用力最明显的典型区域^[7]。在这种意义上，海岸带为人类摸清全球变化规律和地球系统内部运行机制提供了一个绝好的研究空间，可有效获取有关人地关系系统的大量信息。同时，海岸带还是多学科研究的“碰撞缝合带”，其研究涉及自然科学和人文科学的多个领域，如大气科学、海洋科学、生物科学、区域科学、城市学、人口学、经济学等^[4, 8]。在地球系统科学框架下，海岸带的研究必然离不开多学科、多尺度的系统综合。特别是，实现自然科学与人文科学跨学科的综合研究是地球系统研究的一个突出难点，而海岸带的人地矛盾更加突出，寻求人地关系的和谐统一、实现可持续发展是地球系统科学面临的重要课题。因此，由于海岸带在地球系统中所处的特殊位置，开展海岸带调查研究将有助于促进自然科学与人文科学的综合研究，为实现自然-社会耦合研究、推动可持续发展作出有益的尝试。



图1 地球系统示意图

2 地球系统科学对海岸带地质调查的新要求

地球系统科学是将岩石圈、水圈、大气圈和生物圈作为研究对象，从全球性、统一性的整体观、系统观和多时空尺度，探寻地球各圈层之间物质和能量循环与相互作用，并以此来研究地球整体及其圈层之间的性质、行为、过程和机制^[9]。其中，观测与实验、地球系统模拟、评估与综合研究是地球系统科学的三大研究方法^[10]。地球系统科学的提出和发展，对海岸带地质调查工作提出了一系列新的要求。

2.1 更加注重地质过程研究，要求对海岸带开展动态观测

传统地质学通常被定义为描述性学科，其主要任务是为“地球写一个说明书”，寻找能源和矿产资源^[11]。长久以来，包括海岸带地质调查在内的地质调查工作以区域地质调查为基础，侧重于绘制区域地质图、编写说明书及对地质记录和样品的存档^[5]，是对地质现象静态的描述和记录。而地球系统科学尤其注重开展过程研究，既有现象描述、采集记录的方面，又有追踪过程、探索机理的方面，更侧重于对地质现象时间序列上的观测^[12]。在地球系统科学理念指导下，海岸带地质调查应聚焦重大资源环境问题，优先识别、筛选并获取关键变量，通过长期、持续、同步的观测（卫星和地面观测），建立相应的变量信息库，这是当前海岸带地质调查最为重要和基础的工作内容。

2.2 更加注重对过程的定量模拟，要求建立数字耦合模型

地质工作过程和成果的记录，会不断产生地质数据，但从数据角度看，传统的地质数据生态链仅是一个数据的采集、处理、归纳综合和提交的过程，并没有充分挖掘地质大数据的潜力和价值^[13]。对地球系统科学而言，为了实现人类对地球系统演化的预测，其研究不仅需要反映地球的物质组成、结构构造和历史演化，更要反映地球各层圈之间相互作用的物理、化学和生物学过程及它们之间的相互关系，而数值模拟则几乎是再现地球各个圈层的内部过

程及其相互作用的唯一手段^[14]。因此，在地球系统科学理念指导下，海岸带地质调查的关键任务就是要将海岸带系统的变化用一些基本变量来描述，通过观测、描述而合理解控关键的、互相作用的物理、化学、生物和人类过程，并对观测所得的海量数据建立数学模型，从而实现地球各子系统相互作用过程和变化的定量模拟^[12]。

2.3 更加注重对地球系统的预测，要求进一步开发可预测工具

“将今论古”和“以古示今”是传统地质学研究的两种基本方法论，其中详细、客观、深刻、全面认识地球历史是“以古示今”的基础和前提^[11]。从历史的角度看，不论是“将今论古”还是“以古示今”，传统地质工作侧重的是对地球系统过去的重建，而地球系统科学研究的最终目的是对地球系统演化的定量预测，实现人与自然的和谐相处及人类社会的可持续发展。因此，在地球系统科学理念指导下，海岸带地质调查工作不仅注重对地球系统过去的重建和现在的监测，更强调对未来的预测。

2.4 更加注重人的因素，要求服务可持续发展

在地球系统科学研究中，人类活动被认为是与太阳和地核并列的、能引发地球系统变化的驱动力——第三驱动因素^[15]。与传统的地质科学相比，地球系统科学研究更加强调人类活动对地球系统变化的影响和适应^[12]。在地球系统科学视角下，海岸带地质调查除了理解全球气候与环境变化的自然成因外，更要探索驱动地球系统变化的人类因素及其对人类和社会福祉的影响。将基础性的地球系统科学问题与对人类社会福祉至关重要的议题（粮食、水、健康、碳、能源等）联系起来^[16]，从而为解决因区域自然条件及经济快速发展所产生的资源、环境、生态、灾害等问题提供科学技术支撑，为制定人类世的政策和管理提供重要指导，实现对海岸带的开发管理和可持续发展。

2.5 更加侧重交叉学科的融合，要求开展多学科综合调查研究

将地球视为一个统一的整体（即地球系统）是“地球系统科学”提出的认知基础^[16]，可以说，地球系统科学的发展促进了从跨学科研究（多学科协作）到超学科研究（学科边界消失）的转变。开展地球系统科学研究需要交叉学科、多尺度、跨区域的综合集成数据，并通过数据的同化实现观测和模拟的融合^[17]。以地球系统科学理念为指导开展海岸带地质调查研究，必然要求打破学科边界，开展多学科、多要素、多时间尺度的综合调查，对地球系统及各子系统的相互作用，以及物理、化学、生物过程等开展系统研究。

3 地球系统科学理念指导下海岸带地质调查转型方向与实践

在地球系统科学理念指导下，传统海岸带地质调查工作的研究模式、范式和目的都发生了变化，且从中国、美国等主要国家地质调查机构的实践来看，转变的方向大体都是一致的，即研究模式由兴趣驱动的科学发现转向需求驱动；研究范式由描述为主的“经验范式”、归纳研究为主的“理论范式”、计算模拟为主的“计算范式”并重，转向以大数据为基础的“数据密集型”科学发现；研究目的从以解决学科问题为主转向服务自然资源管理和生态文明建设。

3.1 强化流域性、区域性资源环境问题研究，科学划分全国海岸带生态地质单元

要解决海岸带的问题，不能孤立地依靠狭窄的海岸带本身的研究，需要向影响海岸带的内陆区域扩展，向流域、山脉探寻影响海岸带的地质作用根源^[18]。因此，我国科学家在开展海岸带生态保护修复工作中，突破传统的学科导向和图幅限制，聚焦重大战略问题，强化流域性、区域性资源环境问题的综合研究，根据我国地形地貌、地质背景、流域水系、气候条件、水土环境、生态系统等，将全国海岸带划分为3个一级、9个二级、32个三级生态地质单元。按区域梳理出典型生态环境背景和问题，初步提出了地质调查支撑服务海岸带不同生态系统的调查监测指标体系，构建了从全国到区域统筹调查的格局，并提出海岸带主要生态系统保护修复的地球系统科学框架。

3.2 初步建立了陆海统筹的综合调查和监测体系，数据采集手段逐渐由调查向监测转变

传统的海岸带地质调查主要以理解陆海交互带的主要地质过程为主，重点关注地质方面的要素，如地层、地质构造、沉积演化、沉积动力、海洋矿产资源和海底沉积物等。调查单元上以图幅为单位，利用浅剖、多波束、地质取样、沉积动力等传统调查手段。随着调查目的和调查理念的转变，海岸带地质调查除了描述和理解基础地质作用过程，还更加关注生态环境问题，服务自然资源管理。调查要素也从地质体向水体、生长物、大气等要素扩展。例如，在黄河三角洲开展地质调查时，重点对滨海湿地地区生态系统与地质环境、水循环、土壤地球化学、气候条件、海洋环境、人类活动的相互关系和相互影响进行研究，对影响湿地植被分布的关键指标进行调查分析，评估滨海湿地生态功能服务价值，估算湿地沉积固碳潜力和生态需水量，并探讨气温上升对滨海湿地生态系统的影响，调查要素涉及地球系统各层圈。在调查技术方法上，为了将海岸带多学科整合起来解决综合性的科学问题，除传统调查手段外，还利用无人机、无人艇、差分卫星测高系统、多普勒河流流量测量系统等新技术新方法，实现“星-空-地-海”一体化三维立体调查。同时，初步建立了多圈层地球系统监测体系，对各种区域尺度上的海岸带进行长期的调查、监测、分析，以获得环境变化的长时间序列，进一步理解造成生态系统改变的过程。以浙江三门湾地质调查为例，除了以往地质背景和环境地质条件调查外，还建立了三门湾从山到海的“岩-气-水-生”多圈层综合调查监测体系，对三门湾地区地下水、营养盐入海过程、浅层气、气象条件等开展长时间监测，将孤立的学科整合起来，为抗旱保供水、海水养殖整治、浅层气灾害防治、海洋环境司法鉴定等综合性科学问题提供全局性的数据和认识。

3.3 探索性开发业务化数学耦合模型，进一步提高理解和预测海岸带和海洋环境对自然过程和人类活动响应的能力

满足社会对减少灾害风险和可持续管理自然资源的需求，是海岸带地质调查的内在要求^[19]。随着科学技术的发展和社会对预报能力需求及标准的不断提高，迫切需要开发能模拟量化并预测生态系统、海岸带地貌和地质结构演变的工具，从而提高可持续管理海岸带和海洋资源的能力。近年来，我国部分海岸带地质调查项目从传统的以定性分析研究为主，转向更加注重对调查研究变量进行定量化分析，并探索性地开展了相关的数值模拟运算，以此提升

对策建议的科学性。例如，以京津冀沿海为研究区，针对海岸带的特殊地理位置和存在的地质环境问题，在对海岸带海洋水动力、波浪、潮汐气压、滨海气象等数据长期观测的基础上，初步开发了波浪、潮汐、大气、泥沙四场耦合模型（图2），使得极端天气和海况条件下的大气和海洋动力变化过程模拟精度大幅提高，深化了对渤海湾海岸带系统演变的认知和预测^[20-21]。基于此模型，先后完成唐山海洋牧场建设对周边海域生态环境影响评估和曹妃甸工业区围海造陆工程环境影响监测评估，提出了陆海统筹综合整治建议。

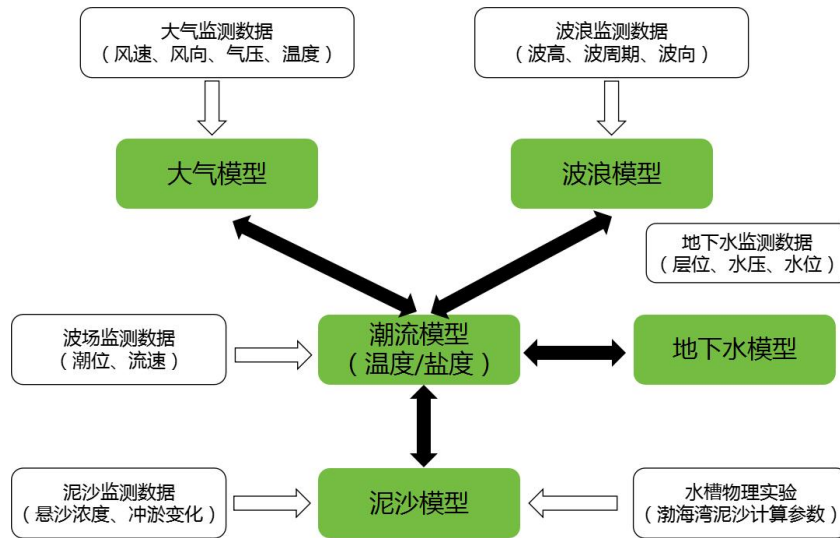


图2 海岸—地下水—大气多圈层耦合数值模拟

3.4 突出海岸带和海洋过程与人类活动耦合研究，更加注重成果支撑和服务可持续发展

在地球系统科学理念指导下，海岸带地质调查已逐渐从以往的学科导向、学术导向，向问题导向、需求导向转变；从以解决学科问题为主，向更加注重解决重大资源环境问题转变。突出对政策、行为和技术选择潜在影响等的研究，将地球科学知识和政策实践有效连接起来，最终服务自然资源管理和生态文明建设。一方面，更加关注人类活动对海岸带生态系统的影响，耦合研究人文要素与海岸带和海洋过程，分析生态环境和资源的承载力、临界点并进行早期预警。如，在北海、大连、宁德等沿海城市，构建了“海岸带+城市地质”的调查工作模式，聚焦经济社会发展的资源环境效应，对城镇化、城市建设、围填海工程等人类活动引起的海岸带生态系统问题进行定量表征，建立可靠的模型来预测生态系统对不断变化的条件的响应特征，继而提出自然资源管理、国土空间规划、生态保护修复建议。另一方面，注重以生态系统服务为桥梁，分析海岸带和海洋过程对经济发展的影响和可持续发展目标的支撑作用。如，通过系统调查研究水污染、岸线侵蚀、海水入侵、风暴潮灾害等自然过程引起的生态系统问题，开展自然-社会耦合影响及双向反馈机制研究；通过生态功能服务价值评估和“双评价”等手段，有效服务地方城市规划建设、围填海工程、人工牧场规划、灾害防治等人类活动，助力实现可持续发展目标。

4 新时期海岸带地质调查转型发展思考

4.1 聚焦高质量发展要求，强化海岸带可持续发展的地质科学供给

经过改革开放 40 多年的发展，我国海岸带地区已由高强度开发转入高质量发展的新阶段，开发和保护成为“双主题”。立足新发展阶段，贯彻新发展理念，构建新发展格局，地质调查要从新时期海岸带保护利用的优先任务中强化地质供给。笔者通过系统梳理“十四五”规划和 2035 年远景目标纲要、《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035 年）》、《自然资源调查监测体系构建总体方案》、《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》、《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》、《2030 年前碳达峰行动方案》等国家重大战略，研究提出海岸带地质调查的七个优先任务：①优化国土空间布局，节约集约高效利用海岸带国土空间资源。②实施海岸带生态修复，提升生态系统服务功能，构建生态安全屏障。③开展陆海气环境协同防治，污染联防联控，改善河口海湾环境质量。④服务“双碳”目标，创新固碳增汇技术，提升海岸带生态碳汇能力，实施碳封存工程。⑤构建新型灾害监测预警和应急体系，提升减灾防灾和韧性发展能力。⑥生态-降污-增汇-防灾协同增效，健全保护利用治理管控联动机制。⑦加大法律和标准供给，构建规划政策体系。围绕这些优先任务，海岸带地质调查应主动谋划、积极作为，推动实现转型发展。

4.2 融入现代化管理的概念和路径，推动海岸带工作质量变革、效率变革

构建现代化海岸带地质调查工作体系，首先要实现管理和实施路径的现代化。随着传统的地质工作逐渐向“数据密集型”科研转变，融入现代化管理的概念和路径，将工作模块化、标准化、流程化是提升工作效率、确保成果质量的重要手段^[22-23]。美国地质调查局（USGS）提出的基于生态系统尺度的“模块式科学框架”，以相对标准化和流程化的路径，将各类科学资产组织到有逻辑、可变动和可综合的模块中，组合大量信息驱动对地球科学认知的合成^[24]，有效确保了研究成果的量和质。新时期海岸带地质调查工作要贯彻新发展理念，坚持需求驱动，围绕经济社会发展实际需求，在凝练重大地球系统科学问题的基础上，对关键指标开展调查监测，依托“大数据”破解海岸带地质环境演化科学问题，深化对海岸带地质过程的理解，为海岸带生态环境修复与韧性发展提供科学技术支撑，最终实现可持续发展（图 3）。

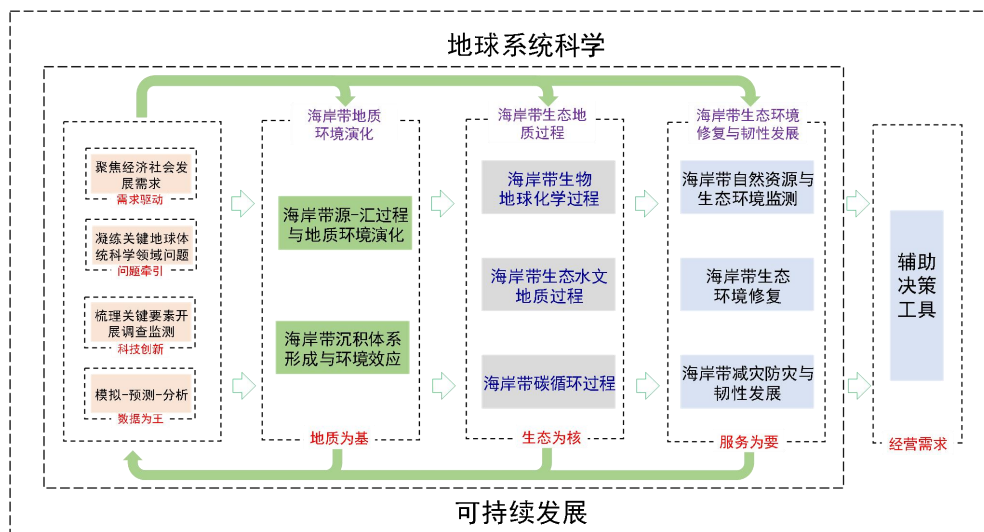


图 3 地球系统科学指导下海岸带地质调查工作思路

4.3 强化数据驱动研究，为科学决策提供精准、有效的支撑服务

地球系统科学的研究是以数据采集、分析、模拟和预测为重要基础的。尽管部分海岸带地质调查工作在研究过程中探索开发了多要素耦合模型，并对岸线变化等少数变量进行了模拟预测，但总体上我国海岸带的研究手段还是定性分析和半定量研究为主，缺乏系统有效的模拟和可视化工具，在观测—模拟—评估—预测的工作流程中还偏“前端”，而对于更能直接提高自然资源管理工作的后端预报和预测相对较少，如对风暴潮、台风登入后沙丘侵蚀、冲刷和淹没的预测模拟等。相比之下，USGS将地球系统各过程的模拟预测作为其实现使命和愿景的重要能力之一，并建立了数百个将对过程和系统动态的理解整合在一个框架内的数学模型^[25]。其中，海岸带灾害与海洋资源调查计划就开发了包括岸线数字分析系统、海洋—大气—波浪—沉积物迁移耦合，以及海岸线对飓风的反应预测等十余个模型^[19]，可以说建模是其海岸带计划各项目最为重要的基础之一。依托数据驱动，推动海岸带地质调查研究模式和成果产出，是实现海岸带地质调查工作转型发展的重要引擎。

4.4 加强需求侧供给驱动，为科学决策提供多样化、创新化和适用性产品

海岸带是人类活动最集中的地带。海岸带地质调查要服务经济社会发展，就必须跳出纯科学研究的范畴，跨越自然与社会科学的界限，更加关注人类社会面临的环境、灾害等重大科学问题，强化服务人类社会可持续发展的功能。例如，USGS海岸带地质调查研究更多由“需求侧”驱动，偏向为决策者提供辅助决策信息。美国新一轮海岸带灾害与海洋资源调查十年战略计划（2020—2030）就以研发科学工具，创建更安全高效的沿海社区，以及更完善的自然资源管理措施为使命^[19]。除关注重要的地质过程外，还重点开展海岸带对自然和人为灾害的脆弱性评估及后果预测。在成果表达上，USGS创新表达形式，尽量为不同的用户提供不同的产品服务，包括各种综合数据库、资料库和易于访问的可视化规划工具等。相比之下，尽管我国海岸带地质调查和研究在成果的转化和服务上有效支撑了重大工程建设、生态保护修复和经济社会的高质量发展，但这种调查研究更多是由“供给侧”驱动的，本质上还是“以供定需”而不是“以需定供”，科学研究的目的多于应用，需求导向还差“最后一公里”，且成果的产品思维较差，表达方式以项目报告、图集和对策建议等图文为主。在大数据的驱动下，我国海岸带地质调查的服务产品应以形成决策辅助信息为目标，突破传统图件和报告的表达方式，更加关注数据的可视化应用、可互操作和决策工具的开发，将多学科的数据、研究、地理空间工具、预测模型和支撑工具整合起来，为科学决策提供多样、适用、友好的信息产品。

4.5 构建专业化、特色化业务新格局，深化动力变革推动高质量发展

实现海岸带可持续发展是一项复杂的系统工程。目前，我国海岸带地质调查已实现由点的突破向系统性推进的新局面，各调查队伍呈现“百舸争流、千帆竞渡”的壮观场面，但仍存在特色不鲜明、专业不突出、成果不够精等现象。不仅调查内容存在同质化现象，且普遍缺乏专业的遥感专家和数据挖掘、建模专家，地质学家基本上都是数据的采集、挖掘、分析、

开发“一肩挑”，严重限制了对航空遥感等现代手段的利用和对大数据的有效挖掘。相比之下，USGS 为了进一步将科学家从常规数据处理的“苦差事”中解放出来，从而专注于科学发现，专门围绕数据集成、数据操作和知识的创新与应用三个层面，组建了三个专业机构^[5]。加强精细化管理，实现高质量发展，需要将现有的业务体系进行重新整合、分工。一方面，要根据不同单位的资源优势和业务特长实现业务差异化、特色化；另一方面，要发挥我国地质调查各专业调查中心的优势，将数据挖掘、建模及航空遥感解译等工作剥离出来，探索实现地质调查业务的流程化、模块化，实现精细化管理，推动高质量发展。

致谢：本文在成文过程中得到了中国地质调查局天津地质调查中心研究员王宏、肖国强、王福、胡云壮，中国地质调查局青岛海洋地质研究所研究员印萍、叶思源等的大力支持，几位审稿专家为本文提出了非常有益的修改建议，在此一并表示诚挚感谢。

参考文献

- [1]BIERMANN F, BETSILL M M, BURCH S, et al. The earth system governance project as a network organization: a critical assessment after ten years[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 39:17-23.
- [2]肖国强, 王福, 印萍, 等. 我国海岸带地质调查工作回顾与展望[J]. *华北地质*, 2022, 45(1):92-100.
- [3]吴宇华. 试论海岸带在地球系统中的地位和作用[J]. *广西教育学院学报*, 2000(3):1-5.
- [4]吴志峰. 海岸带在地球系统科学研究中的作用[J]. *地球信息*, 1998(Z1):52-57.
- [5]夏焯. 基于地球系统科学的新时代地质工作体系思考[R]. 北京:中国地质调查局发展研究中心, 2021.
- [6]杨荫凯. 地球系统科学现行研究的最佳切入点:试论海岸带研究框架的创立[J]. *地理科学进展*, 1998(1):73-79.
- [7]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(3):69-80.
- [8]吴志峰, 胡伟平. 海岸带与地球系统科学研究[J]. *地理科学进展*, 1999(4):346-351.
- [9]郑永飞, 郭正堂, 焦念志, 等. 地球系统科学研究态势[J]. *中国科学:地球科学*, 2024, 54(10):3065-3090.
- [10]STEFFEN W, RICHARDSON K, ROCKSTRÖM J, et al. The emergence and evolution of earth system science[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, 1(4768):54-63.
- [11]王训练, 沈阳. 地球系统科学时代的区域地质调查应更加重视古生物资源调查[J]. *地质论评*, 2020, 66(4):829-835.
- [12]张志强, 黄鼎成, 林海. 地球系统科学发展战略研究[M]. 北京:气象出版社, 2005.
- [13]朱月琴, 谭永杰. 大数据与地质大数据[M]. 北京:地质出版社, 2019.
- [14]SCHELLNHUBER H. Earth system analysis and the second Copernican

- revolution[J]. Nature, 1999(402):C19-C23.
- [15]LAWTON J. Earth system science[J]. Science, 2001, 292:1965.
- [16]SCANLON B R, RUDELL B L, REED P M, et al. The food-energy-water nexus:transforming science for society[J]. Water Resour Res, 2017, 53(5):3550-3556.
- [17]李新, 刘丰, 方苗. 模型与观测的和弦:地球系统科学中的数据同化[J]. 中国科学:地球科学, 2020, 50(9):1185-1194.
- [18]杜晓敏, 周平, 常勇, 等. 美国海岸带综合地质调查进展及其对中国海岸带研究的启示[J]. 地质通报, 2020, 39(Z1):414-423.
- [19]USGS. CMHRP's decadal science strategy for 2020—2030[R/OL]. [2024-12-02]. <https://www.usgs.gov/natural-hazards/coastal-marine-hazards-and-resources>.
- [20]LI Yong, CHEN Xin, JIANG Xingyu, 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.
- [21]李勇, 杨朋, 文明征, 等. 海岸带“海陆空”数值模型及应用综述[J]. 华北地质, 2022, 45(3):7-15.
- [22]王妞. 优化企业管理体系实现企业生产流程化管理[J]. 现代国企研究, 2016(14):16.
- [23]张晓予. 标准化对企业质量管理的作用[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2014, 37(1):81-83.
- [24]杨宗喜, 唐金荣, 周平, 等. 大数据时代下美国地质调查局的科学新观[J]. 地质通报, 2013, 32(9):1337-1343.
- [25]USGS. 21st-century science strategy 2020—2030[R/OL]. [2024-12-02]. <https://pubs.usgs.gov/publication/cir1476>.