

服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算 一体化架构平台 ——2018年中国地理学会地理大数据计算环境“优秀实用案例”

张 丰^{1*}, 白 雁²

1. 浙江大学地球科学学院, 杭州 311300; 2. 国家海洋局第二海洋研究所, 青岛 266000

摘 要: 在全球变化的背景下, 海洋固碳(蓝色碳汇)因政府间气候谈判及碳贸易等问题备受国际社会广泛关注。边缘海时空动态变化大、系统复杂, 碳通量的估算存在极大的不确定性和挑战, 卫星遥感的高时空分辨率、长期稳定观测, 已成为解决边缘海碳循环系统科学问题的重要手段之一。项目组为支撑海量的卫星遥感、现场船只、浮标和岸基站观测相结合的边缘海碳通量研究, 基于云存储技术, 设计了多源碳通量监测数据分布式可扩展存储模型, 解决了大规模海洋信息的高可扩展存储、高效率检索等技术难题, 构建了PB级遥感碳通量监测数据管理云平台。建立异构混合云计算环境, 研制了一套自主可控的三维碳通量遥感信息服务系统。具有自主知识产权的“海洋云计算数据中心+大数据服务云平台”技术架构将为未来实现海洋时空大数据按需计算和面向物联网的多元服务提供全新解决方案。研究成果“中国近海二氧化碳通量遥感监测与示范系统”获得了2015年度国家海洋科学技术奖特等奖。

关键词: 海洋碳通量; 云计算; 大数据服务; 存算一体化架构平台

DOI: 10.3974/geodp.2018.03.05

1 背景

1.1 平台建设的科学目标

海洋吸收了近1/3人类排放的二氧化碳(CO₂), 且接收了大量陆源输入碳(约占陆地生态系统吸收人为CO₂的40%)。从长时间尺度(如千年)来看, 只有输入深海、埋藏在海洋沉积物或形成惰性溶解有机碳, 才能脱离大气的循环。因此, 海洋是CO₂的最终储库, 对地球碳循环系统及全球气候变化极为重要。当前, 海洋固碳(蓝色碳汇)因政府间气候谈判及碳贸易等问题备受国际社会广泛关注。由于边缘海高度动态变化, 卫星遥感的高时空分辨率、长期稳定观测, 已成为解决边缘海碳循环系统科学问题的重要手段之一^[1]。

《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》的科学目标是: 突破海洋时空数据高性能存储、计算核心技术瓶颈, 支撑长时序的高精度、高频度、大覆盖的海-气CO₂通量和陆源入海碳通量监测数据进行分析评价, 构建碳通量高维时空过程可视化模

收稿日期: 2018-07-20; 修订日期: 2018-09-16; 出版日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(41430636, 41571518); 中华人民共和国科学技术部(2016YFA0602804)

*通讯作者: 张丰 C-7850-2019, 浙江大学地球科学学院, zfcarnation@zju.edu.cn

作者ID: 张丰 C-7850-2019, 白雁 E-2700-2019

引用格式: 张丰, 白雁. 服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台——2018年中国地理学会地理大数据计算环境“优秀实用案例”[J]. 全球变化数据学报, 2018, 2(3): 279–289. DOI: 10.3974/geodp.2018.03.05.

型，厘清碳循环过程主要碳储量和通量的格局和变率，阐明碳循环动态变化的过程和机制，包括自然和人为因素的相互作用。

1.2 主要完成单位

《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》研发的完成单位是浙江大学和国家海洋局第二海洋研究所。其中，浙江大学负责构建了海洋时空分布式存算一体化架构，支撑大规模海洋遥感与监测数据的处理、分析与碳循环时空过程模拟；国家海洋局第二海洋研究所承担基于地理大数据计算环境，解决中国近海复杂水体海-气 CO₂ 通量遥感估算任务。

2 数据组构

《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》第一期数据组构组成部分列于表 1，包括数据集名称，数据参数类型，数据覆盖空间范围和空间分辨率，数据时间覆盖范围和频率，数据来源等（表 1）。

表 1 《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》数据组构表

数据集名称	参数类型	空间范围及分辨率	时间范围及分辨率	数据来源说明
EIO-WPO-SCS (东印-西太-南海)	SSC (Surface Suspension Concentration, 表层悬浮物浓度)	(10 °N-46 °N, 80 °E-160 °E); 1.8 km	2010 年 5 月至 2015 年 5 月; 原始数据来自 NASA, 日平均、10 日平均、月平均、SIO/SOA 制作年平均	
		(10 °N-46 °N, 80 °E-160 °E); 5 km	2003-2010 年; 10 日平均、月平均	原始数据来自 NASA, SIO/SOA 制作
	CHL (Chlorophyll Concentration, 表层叶绿素浓度)	(10 °N-46 °N, 80 °E-160 °E); 1.8 km	2010 年 5 月至 2015 年 5 月; 原始数据来自 NASA, 日平均、10 日平均、月平均、SIO/SOA 制作年平均	
		(10 °N-46 °N, 80 °E-160 °E); 5 km	2003-2010 年; 10 日平均、月平均	原始数据来自 NASA, SIO/SOA 制作
	SDD (Secchi Disk Depth, 海水透明度)	(10 °N-46 °N, 80 °E-160 °E); 1.8 km	2010 年 5 月至 2015 年 5 月; 原始数据来自 NASA, 日平均、10 日平均、月平均、SIO/SOA 制作年平均	
GOB/GOC (渤海/长江口海域)	SSC (Surface Suspension Concentration, 表层悬浮物浓度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E); 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
		(37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E); 500 m		
	LW1 (Normalized water-leaving radiance at 412 nm, 412 nm 归一化离水辐亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E); 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW2 (Normalized water-leaving radiance at 443 nm, 443 nm 归一化离水辐亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E); 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
		(37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E); 500 m		

续表

数据集名称	参数类型	空间范围及分辨率	时间范围及分辨率	数据来源说明
GOB/GOC (渤海/长江 口海域)	LW3 (Normalized water-leaving radi- ance at 490 nm, 490 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW4 (Normalized water-leaving radi- ance at 555 nm, 555 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW5 (Normalized water-leaving radi- ance at 660 nm, 660 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW6 (Normalized water-leaving radi- ance at 680 nm, 680 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW7 (Normalized water-leaving radi- ance at 745 nm, 745 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 每小时	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
	LW8 (Normalized water-leaving radi- ance at 865 nm, 865 nm 归一化离水辐 亮度)	(27 °N-35 °N, 119 °E-126 °E) ; 500 m (37 °N-41 °N, 117 °E-123 °E) ; 500 m	2011-2017 年; 8 次/天	原始数据来自 KOSC/GOCI, SIO/SOA 制作
GLOBAL(全 球海域)	CHL (Chlorophyll Concentration, 表层 叶绿素浓度)	(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km (90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km (90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 9 km (90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km	1997-2016 年; 日平均、月平均 2002 年 7 月-发稿日期; 日平均、 月平均 1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均、月平均 2002 年-发稿日期; 日平均、月 平均	来源于 ESA 标准产品, 多卫星融合产品 来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品 来源于 NASA, SeaWiFS 产品 来源于 NASA, VIIRS 产品
	SST (Sea surface temperature, 海表温 度)	(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 25 km (90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 25 km	1981 年-发稿日期; 日平均 2002 年 6 月-发稿日期; 日平均	来源于 NOAA, AVHRR 产品 来源于 RSS, MW_IR 产品
	SSW (Sea surface wind field, 海面风 场)	(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 25 km (90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 25 km	1987-2017 年; 六小时、月平均 2003 年 2 月-发稿日期; 日平均、 月平均	来源于 RSS, CCMP 产 品 来源于 RSS, Windsat 产品

续表

数据集名称	参数类型	空间范围及分辨率	时间范围及分辨率	数据来源说明
GLOBAL (全球海域)	NPP (Net primary productivity, 净初级生产力)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	2002 年 7 月-发稿日期; 月平均	来源于 Oregon 大学, Aqua/MODIS NPP 产品
		(90°S-90°N, 180°W-80°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 月平均	来源于 Oregon 大学, SeaWiFS NPP 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	2012 年-发稿日期; 月平均	来源于 Oregon 大学, VIIRS NPP 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 25 km	2016 年 9 月-发稿日期; 月平均	来源于 RSS, SMAP 产品
	SSS (Sea surface salinity, 海表盐度)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 25 km	2009 年 7 月-发稿日期; 月平均	来源于 ESA, SMOS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 25 km	2011-2015 年; 月平均	来源于 NASA, Aquaris 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 25 km	日平均	来源于 NOAA NCEP, 模式产品
	ACP (Atmospheric CO ₂ partial pressure, 大气 CO ₂ 分压)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 25 km	2002 年 7 月-发稿日期; 日平均	来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均、月平均	来源于 NASA, SeaWiFS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2012 年-发稿日期; 日平均、月平均	来源于 NASA, VIIRS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2002 年 7 月-发稿日期; 日平均	来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品
	PAR (Photosynthetically active radiation, 海面光合有效辐射)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均、月平均	来源于 NASA, SeaWiFS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2012 年-发稿日期; 日平均、月平均	来源于 NASA, VIIRS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2002 年 7 月-发稿日期; 日平均	来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品
	POC (Particulate organic Carbon, 表层颗粒有机碳浓度)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均, 月平均	来源于 NASA, SeaWiFS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2012 年-发稿日期; 日平均, 月平均	来源于 NASA, VIIRS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2002 年 7 月-发稿日期; 日平均	来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均, 月平均	来源于 NASA, SeaWiFS 产品
	PIC (Particulate inorganic Carbon, 表层颗粒无机碳浓度)	(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2012 年-发稿日期; 日平均, 月平均	来源于 NASA, VIIRS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2002 年 7 月-发稿日期; 日平均	来源于 NASA, Aqua/MODIS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月; 日平均、月平均	来源于 NASA, SeaWiFS 产品
		(90°S-90°N, 180°W-180°E); 4 km	2012 年-发稿日期; 日平均、月平均	来源于 NASA, VIIRS 产品

续表

数据集名称	参数类型	空间范围及分辨率	时间范围及分辨率	数据来源说明
GLOBAL (全球海域)	SSC (Surface Suspension Concentration, 表层悬浮物浓度)	(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km	2002 年 7 月-发稿日期;日平均、月平均	原始数据来自 NASA/Aqua/MODIS, SIO/SOA 制作
		(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月;日平均、月平均	原始数据来自 NASA/SeaWiFS, SIO/SOA 制作
		(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km	2012 年-发稿日期;日平均、月平均	原始数据来自 NASA/VIIRS, SIO/SOA 制作
	ACD (Colored dissolved organic matter absorption coefficient at 443 nm, 443 nm CDOM 吸收系数)	(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 4 km	2002 年 7 月-发稿日期;日平均、月平均	原始数据来自 NASA/Aqua/MODIS, SIO/SOA 制作
		(90 °S-90 °N, 180 °W-180 °E) ; 9 km	1997 年 9 月至 2010 年 12 月;日平均、月平均	原始数据来自 NASA/SeaWiFS, SIO/SOA 制作

3 数据计算环境

数据计算环境包括计算机服务器、模型系统、软件系统、网络情况、数据处理能力、数据计算能力和网站传播等。

3.1 硬件环境

现有的硬件环境下（表 2），分布式文件系统实现了 200 TB 的数据存储能力，混合型数据库能够支撑同时 100 用户的并发访问，高性能在线处理节点可提供同时 48 个线程的实时处理能力。

表 2 《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》计算机硬件环境

序号	名称	描述
1	SatCO ₂ Namenode	分布式文件系统主节点
2	SatCO ₂ Datanode1	分布式文件子系统子节点
3	SatCO ₂ Datanode2	分布式文件子系统子节点
4	SatCO ₂ Database	混合型数据库
5	SatCO ₂ Webservice1	高性能在线处理服务节点
6	SatCO ₂ Webservice2	高性能在线处理服务节点
7	SatCO ₂ Webservice3	高性能在线处理服务节点

3.2 软件系统

存算一体化的高扩展高性能时空数据处理框架总体结构采用 Hadoop+Spark 方式，实现数海洋数据存算一体节点的快速动态扩展，保证计算任务和存储任务的合理调度分配，达到资源最优利用，采用 Hadoop 集群和 Spark 集群强大的分布式/并行计算能力，提供高效的海洋时空大数据处理和信息挖掘，保证整个软件体系的高可扩展性、高可用性、高性能和易用性。

如图 1 所示，其主要组成部分如下：

(1) HDFS: Hadoop 分布式文件系统。HDFS 有着高容错性的特点,并且设计用来部署在低廉的硬件上。它提供高吞吐量来访问应用程序的数据,适合那些有着超大数据集的应用程序。HDFS 放宽了 POSIX 的要求,以实现流的形式访问文件系统中的数据。

(2) Hadoop Yarn: 将 MapReduce 中的 JobTracker 拆分成了两个独立的服务:一个全局的资源管理器 ResourceManager 和每个应用程序特有的 ApplicationMaster。其中 ResourceManager 负责整个系统的资源管理和分配,而 ApplicationMaster 则负责单个应用程序的管理。

(3) HBase: Hadoop Database,是一个高可靠性、高性能、面向列、可伸缩的分布式存储系统,适合于非结构化数据存储的数据库,是基于列的数据存储模式。

(4) Hadoop MapReduce: hadoop 的分布式计算框架,基于该框架能够容易地编写应用程序,这些应用程序能够运行在由上千个商用机器组成的大集群上,并以一种可靠的、具有容错能力的方式并行地处理上 TB 级别的海量数据集。

(5) Hive: 基于 Hadoop 的一个数据仓库工具,可以将结构化的数据文件映射为一张数据库表,并提供简单的 sql 查询功能,可以将 sql 语句转换为 MapReduce 任务进行运行。

(6) Oozie: Apache Oozie 是一个工作流协同系统。可以配置工作流来运行 ALTER TABLE 命令,该命令负责向 Hive 中添加一个包含上一小时数据的分区。我们还可以控制这个工作流每小时执行,这就能确保我们看到的总是最新的数据。

(7) Spark: Spark 能更好地适用于数据挖掘与机器学习等需要迭代的 MapReduce 的算法。

(8) Spark Streaming: 一种构建在 Spark 上处理 Stream 数据的实时计算框架,它扩展了 Spark 处理大规模流式数据的能力。基本的原理是将 Stream 数据分成小的时间片断(几秒),以类似 batch 批量处理的方式来处理这小部分数据。

(9) MLlib: Spark 的可扩展机器学习库。提供分类回归、聚类、关联规则、推荐、降维、优化、特征抽取筛选,用于特征预处理的数理统计方法以及算法的评测等机器学习算法。

(10) Graphx: 一个分布式图计算框架,它是基于 Spark 平台提供对图计算和图挖掘简洁易用而丰富的接口,在 Spark 之上提供一栈式数据解决方案,可以方便且高效地完成图计算的一整套流水作业,极大的方便了对分布式图处理的需求。

3.3 计算能力

(1) 数据连接计算

基于嵌入式索引的分布式时空数据并发检索技术以及基于 Spark 的内存数据库计算技术难点,融合克隆连接和单数据集索引外存空间连接法的思想,提出一个新的基于分布式内存计算的空间连接算法,并用 Spark 并行编程模型实现。算法首先采用空间格网实现空间划分。然后进行分区连接,对连接后的结果采用重划分模型进行分析,按条件进行迭代重划分。最后,采用 R*树单数据集索引方法并行处理每个分区,得到空间连接的最终结果。如图 2 所示,对比 SJMR、SpatialHadoop、Hadoop-GIS 和 SpatialSpark 平台提出的空间连接算法,164,448,446 条路网、72,729,686 个地块、5,857,442 条线状水系、2,298,808 个面状水系、121,960 个界标多边形参与运算,性能对比,优势明显。



图 1 基于多云共生的海洋时空分布式存算一体化架构

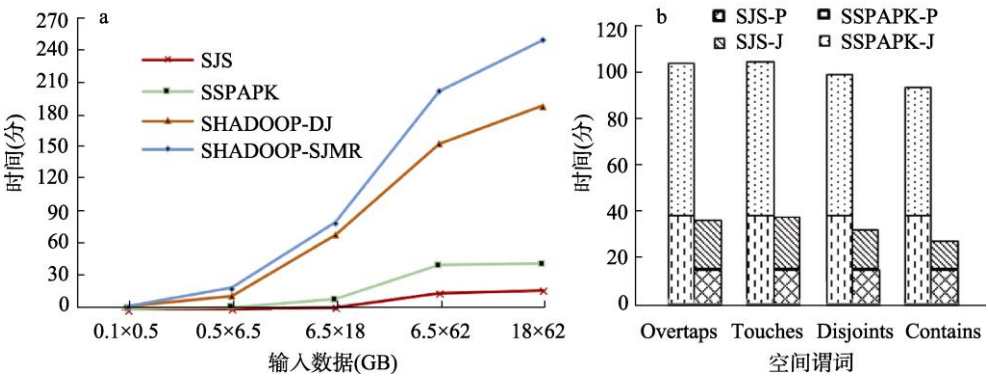


图 2 不同技术框架下的空间连接性能对比

(2) 海洋遥感辐射传输模型计算

将海洋遥感辐射传输模型进行了并行化改造，测试在 Windows 环境下的原 Fortran 程序在各阶以及各角度分段数下的运算时间以及在 Linux 环境下分布式并行化后的 Fortran 程序与 java 程序在各阶以及各角度分段数下的运算时间消耗。

1) 测试参数为 NUMMU (角度分段数)=10 固定，AZIORDER (阶数) 从 10 增大到 99 (程序中限定阶数最大为 99)，增量为 10。随着阶数的增大，并行化后程序的运行速度优势逐渐显著，在阶数为 99 时，并行化后的程序运行时间比单机运行缩短了 24.5 倍。

2) 测试参数为 AZIORDER (阶数)=99 固定, NUMMU (角度分段数) 从 10 增大到 30, 增量为 5。NUMMU=25 时, Windows 下的单机运行速度过慢, NUMMU=30 时, 无法运行。测试结果如图 3 所示, 程序运行时间随着 NUMMU 的增大呈指数趋势上涨。随着角度分段数的增大, 并行化后程序的运行速度优势亦逐渐显著, 在角度分段数达到 25 时, 并行化后的程序运行速度比单机运行快了 64.6 倍。

(3) 时空过程可视化计算

通过优化时空数据的组织结构, 构建时空数据渲染预处理模型实现时空数据的结构化组织, 改进针对不同数据类型的高效检索、压缩、叠加等流程方法, 实现面向多类型图形终端的高性能渲染; 改进流数据调度和绘制算法, 实现高效、准确、精确、美观的时空对象数据的可视化渲染。

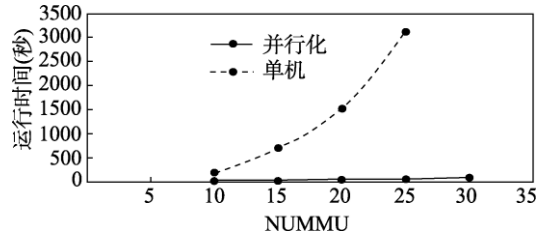


图3 程序运行时间与 NUMM 关系曲线对比图

考虑到渲染方式的多样性, 分别针对矢量数据、栅格数据、三维数据 (DEM、体数据) 以及流对象 (时序数据) 数据等的渲染过程进行剖析, 同时将渲染加速按照阶段划分为渲染预处理模型、渲染自适应计算模型、渲染调度策略以及流数据加速渲染优化等方面。针对碳浓度数据特点进行可视化构形, 设计内存显存之间渐进式的数据传输策略以应对四维大量时空数据的调度问题, 基于 CUDA 实现大规模粒子状态更新及半角切片技术, 采用 GPU 编程渲染实现粒子绘制^[17]。

3.4 服务网站

<http://www.satCO2.com>

4 平台应用的主要科学成果

CO₂ 等温室气体排放引起的全球气候变化, 已严重威胁人类生活和经济发展。为此, 联合国举行了多次政府间气候谈判, 协商各国的碳减排责任。我国是最大的发展中国家, 也是 CO₂ 气体排放最多的国家之一。如何协调节能减排和经济发展、承担相应国际责任是我国面临的巨大挑战, 迫切需要摸清并掌握我国的碳通量清单以及碳增汇的潜力。根据全球碳计划 2013 年报告, 人类活动排放的 CO₂ 约 45% 存留在大气, 27% 被海洋吸收, 而陆地吸收量则是通过大气和海洋推算得到。因此, 准确估算海洋系统碳收支对全球碳循环及气候变化评估具有极其重要的意义。基于利用长时间序列海量的遥感数据, 构建长期、稳定的海洋 CO₂ 通量监测和评估体系^[2], 获得可靠、科学的海-气 CO₂ 通量评估结果, 是极其迫切的国家需求。

4.1 基于控制因子的海水 CO₂ 分压半分析遥感模型应用成果

海-气 CO₂ 通量估算的关键在于海水 CO₂ 分压的遥感反演 (以下简称 pCO₂)。基于海水碳化学和遥感科学的交叉研究, 提出了基于控制机制分析的海水 pCO₂ 半解析模型框架 (Mechanistic-based Semi-Analytic-Algorithm, MSAA-pCO₂)。算法思路为: 首先理清研究海区海水 pCO₂ 的主要控制机制, 然后建立各种控制过程的定量化遥感模型, 将不同主控因

子引起的 $p\text{CO}_2$ 改变量进行叠加, 最终获得总的海水 $p\text{CO}_2$ ^[3]。项目以受长江冲淡水影响的东海海区为示范区域, 建立了长江冲淡水表层盐度遥感反演模型, 首次获得了高时空分辨率、连续十年序列的长江冲淡水分布及其变化特征, 并分析了长江冲淡水对近海浮游植物藻华的影响。在此基础上, 综合考虑影响海水 CO_2 分压的热力学作用、水平与垂直混合、生物作用等效应。MeSSA 模型比传统的单参数或多参数经验拟合模型能更好地解决复杂近海水体 $p\text{CO}_2$ 遥感反演难题, 中国近海二氧化碳时空过程如图 4 所示。由于该模型是基于物理-生化机制, 可推广应用到其它大河冲淡水影响的边缘海系统。

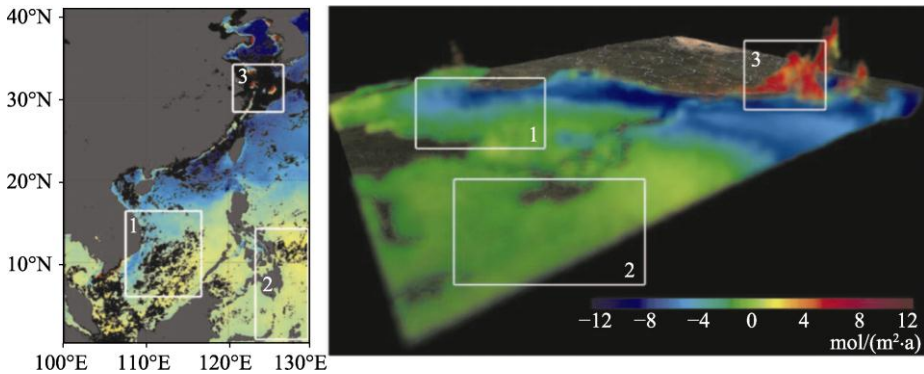


图 4 中国近海二氧化碳通量时空过程

4.2 结合卫星遥感和数值模拟估算边缘海溶解有机碳 (DOC) 输运通量应用成果

利用卫星遥感反演获得东海表层 DOC 浓度, 进一步利用 DOC 剖面分布模型, 估算得到 DOC 浓度三维分布。利用数值模拟方法, 得到东海的三维流场; 利用遥感 DOC 及模拟流场, 估算出了东海 DOC 水平输运通量。结果表明, 在长江口、闽浙沿岸、台湾海峡和黑潮区域, DOC 通量常年高值, 但存在季节变化^[4]。在东海陆架, 从南到北存在 3 条从西向东的 DOC 输运带, 这些输运带在夏半年较强, 而在冬半年较弱甚至消失。此外, 还存在 1 条从台湾海峡往北延伸到长江口的 DOC 输运带。从年平均来看, 台湾海峡净输入东海的 DOC 通量最大, 达 30.65 Tg C/a, 主要从台湾海峡东侧输入; 其次为黑潮 DOC 输入, 在 200 m 等深线达 18.75 Tg C/a, 主要从 26°N–26.5°N 陆坡输入。东海 DOC 净输出主要位于北边界 (32°N), 达 -52.75 Tg C/a, 主要从 100–200 m 的外陆架输出。

4.3 数据产品

通过该计算平台首次完成了覆盖中国海区 15 年 (2000–2014) 序列的海-气 CO_2 通量遥感产品集。在以上遥感监测技术的基础上, 完成了连续 15 年 (2000–2014) 中国邻近海域月平均海气 CO_2 遥感产品, 包括大气 CO_2 分压、海水 CO_2 分压、海-气 CO_2 分压差和海-气 CO_2 通量 4 种专题产品, 分辨率达 1 km。经覆盖各季节及中国黄海、东海和南海的 15 个航次的大量走航数据验证, 表明在近海高动态变化 (200–900 μatm) 的复杂水体, 遥感反演水体 CO_2 分压平均偏差小于 35 μatm , 大气 CO_2 分压平均偏差小于 10 μatm , 海-气 CO_2 通量平均偏差小于 $\pm 4.2 \text{ mmol C}/(\text{m}^2 \text{ day})$ ^[9–10]。该成果首次为我国提供了覆盖整个中国海域高时空分辨率的碳源汇格局分布、碳收支清单及其长时间序列变化趋势^[13–14]。国际上尚未见同类长时间序列的边

缘海海-气 CO₂ 通量遥感监测产品发布。

4.4 2003–2014 年亚欧大陆边缘海生态环境变化监测

通过该计算平台基于 MODIS 获取的长时间序列的海洋生态环境要素,研究了 2003–2014 年亚欧大陆 12 个边缘海生态环境的变化,包括海表温度、光合有效辐射、海水透明度以及叶绿素浓度^[5–7]。结果表明,所有边缘海的温度均上升,其中封闭的边缘海相对上升速率较快,如黑海、波罗的海、日本海、地中海以及波斯湾。光合有效辐射基本都降低,但是欧洲边缘海并不显著。与海表温度的变化相似,海水透明度在所有边缘海都是上升,最大的上升速率出现在波斯湾,为 3.02%/a (0.25m/a, $P=0.0003$)。与预想的一致,叶绿素浓度在热带边缘海基本都下降,但是在高纬度边缘海上升^[6]。海表温度与叶绿素浓度变化的不同关系表明全球变暖对不同边缘海浮游植物影响的复杂性^[15–16]。

4.5 东海的三维流场的模拟与科学发现

通过该计算平台利用卫星遥感反演获得东海表层 DOC 浓度,进一步利用 DOC 剖面分布模型,估算得到 DOC 浓度三维分布。利用数值模拟方法,我们得到东海的三维流场^[11–12]。利用遥感 DOC 及模拟流场,估算出了东海 DOC 水平输运通量。结果表明,在长江口、闽浙沿岸、台湾海峡和黑潮区域,DOC 通量常年高值,但存在季节变化^[8]。在东海陆架,从南到北存在三条从西向东的 DOC 输运带,该输运带夏半年较强,冬半年较弱甚至消失。此外,还存在一条从台湾海峡往北延伸到长江口的 DOC 输运带。从年平均来看,台湾海峡净输入东海的 DOC 通量最大,达 30.65 Tg C/a,主要从台湾海峡东侧输入;其次为黑潮 DOC 输入,在 200 m 等深线达 18.75 Tg C/a,主要从 26°N–26.5°N 陆坡输入。东海 DOC 净输出主要位于北边界 (32°N),达 -52.75 Tg C/a,主要从 100–200 m 的外陆架输出^[1]。

5 结束语

《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》不仅在本项目组成功应用,其在国内外应用培训班上也得到推广。来自孟加拉国、柬埔寨、印度、印度尼西亚、马来西亚、尼日亚、挪威、巴基斯坦、斯里兰卡、泰国、美国和台湾等 15 个国家和地区的 130 多名科研人员参加了 2016 年 12 月举办的海洋生态环境遥感应应用高级培训班。通过 SatCO₂ 软件可链接海洋二所云数据中心,获取根据最新研究成果制作的各种专业遥感数据集,结合用户本机的实测数据在三维地球上进行可视化数据分析及海洋碳通量估算。2017 年 12 月 1–5 日举办了国内培训,来自国家海洋局第一海洋研究所、国家海洋环境监测中心、中国科学院南海海洋研究所、浙江海洋大学、浙江大学、台湾中山大学、厦门大学、同济大学、中国海洋大学、国家卫星海洋应用中心、深圳大学和山东大学等 33 个单位 130 余名专家、学者和学生参加了培训。

通过本平台的前期实验和推广应用的实践,《服务于海洋碳通量研究的时空分布式存算一体化架构平台》可以直接应用于国家海洋环境监测数据集成和分析计算相关的科研活动。

参考文献

- [1] Bai, Y., Cai, W. J., He, X., *et al.* A mechanistic semi-analytical method for remotely sensing sea surface pCO₂ in river-dominated coastal oceans: a case study from the East China Sea [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(3): 2331–2349. DOI: 10.1002/2014JC010632.
- [2] Li, T., Pan, D., Bai, Y., *et al.* Satellite remote sensing of ultraviolet irradiance at the ocean surface [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2015, 34(6): 101–112. DOI: 10.1007/s13131-015-0690-z.
- [3] Li, T., Bai, Y., Li, G., *et al.* Effects of ultraviolet radiation on marine primary production with reference to satellite remote sensing [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2015, 9(2): 237–247. DOI: 10.1007/s11707-014-0477-0.
- [4] Liu, D., Pan, D., Bai, Y., *et al.* Remote sensing observation of particulate organic carbon in the Pearl River estuary [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(7): 8683–8704. DOI: 10.3390/rs70708683.
- [5] He, X. Q., Pan, D. L., Yan, B., *et al.* Recent changes of global ocean transparency observed by SeaWiFS [J]. *Continental Shelf Research*, 2016, 143: 159–166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2016.09.011>, 2016.
- [6] Hu, Z. F., Pan, D. L., He, X. Q., *et al.* Assessment of the MCC method to estimate sea surface currents in highly turbid coastal waters from GOCI [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, 38(2): 572–597. DOI: 10.1080/01431161.2016.1268737.
- [7] Hu, Z. F., Pan, D. L., He, X. Q., *et al.* Diurnal variability of turbidity fronts observed by geostationary satellite ocean color remote sensing [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8: 147. DOI: 10.3390/rs8020147.
- [8] Hu, Z. F., Wang, D. P., Pan, D. L., *et al.* Mapping surface tidal currents and Changjiang plume in the East China Sea from Geostationary Ocean Color Imager [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2016, 121: 1–10. DOI: 10.1002/2015JC011469.
- [9] Song, X. L., Bai, Y., Cai, W. J., *et al.* Remote sensing of sea surface pCO₂ in the Bering Sea in summer based on a mechanistic semi-analytical algorithm (MeSAA) [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(7): 558. DOI: 10.3390/rs8070558.
- [10] Song, X., Bai, Y., Hao, Z., *et al.* Controlling factors analysis of pCO₂ distribution in the Western Arctic Ocean in summertime [C]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9638: 96380U. DOI: 10.1117/12.2194668.
- [11] Wang, H. J., Dai, M. H., Liu, J. W., *et al.* Eutrophication-driven hypoxia in the East China sea off the Changjiang estuary [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(5): 2255–2263.
- [12] Qian, W., Dai, M. H., Xu, M., *et al.* Non-local drivers of the summer hypoxia in the East China Sea off the Changjiang estuary [J]. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 2017, 198(11): 393–398. <https://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2016.08.032>.
- [13] Zhai, W. D., Zang, K. P., Huo, C., *et al.* Occurrence of aragonite corrosive water in the North Yellow Sea, near the Yalu River estuary, during a summer flood [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 166(part B): 199–208.
- [14] Zhai, W. D., Zhao, H. D. Quantifying air-sea re-equilibration- implied ocean surface CO₂ accumulation against recent atmospheric CO₂ rise [J]. *Journal of Oceanography*, 2016, 72(4): 651–659. DOI: 10.1007/s10872-016-0350-8.
- [15] Qin, M., Li, Z., Du, Z. Red tide time series forecasting by combining ARIMA and deep belief network [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2017, 125: 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2017.03.027>.
- [16] Zhang, F., Wang, Y., Cao, M., *et al.* Deep-learning-based approach for prediction of algal blooms [J]. *Sustainability*, 2016, 8(10): 1060.
- [17] Du, Z. H., Fang, L., Bai, Y., *et al.* Spatio-temporal visualization of air-sea CO₂ flux and carbon budget using volume rendering [J]. *Computers & Geosciences*, 2015, 77: 77–86. DOI: 10.1016/j.cageo.2015.01.004.