

• 论坛 / PERSPECTIVE •

地学 e-Science 发展的回顾与展望

张耀南^{1,2}, 汪洋¹, 敏玉芳^{1,2}, 赵雪茹^{1,2}, 康健芳^{1,2}

1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000

2. 甘肃省高性能网格计算中心, 甘肃 兰州 730000

摘要: 自 e-Science 提出之后的近 20 年间, 地学 e-Science 在计算、网络和存储等信息技术的推动下, 业已形成了基于数据、模型、计算、可视化分析和协同工作的地学研究框架, 已经成为推动地学研究方法变革的驱动器。本文梳理和归纳了地学 e-Science 的发展过程和一些典型应用, 总结了地学 e-Science 的发展趋势, 提出了简化的基于 3M 平台 (Monitoring (监测平台)、Modeling (模型平台)、Manipulating (操作平台)) 的地学 e-Science 架构。从地学 e-Science 发展趋势上看, 建立基于数据产生、采集、传输、管理的联合观测系统, 形成完善的监测平台是地学 e-Science 的基础。建立数据分析、制备、同化和模型构建、集成与模拟的模型平台是地学 e-Science 的核心。建立基于高性能计算、可视化分析和协同工作环境的操作平台是地学 e-Science 研究的基本环境。

关键词: 地学 e-Science; 3M 平台; 数据平台; 模型平台

Review and Prospects of e-Geoscience

Zhang Yaonan^{1,2}, Wang Yang¹, Min Yufang^{1,2}, Zhao Xueru^{1,2}, Kang Jianfang^{1,2}

1. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China

2. GanSu High Performance and Grid Computing Center, Lanzhou, Gansu 730000, China

Abstract: With the progress of information technology, e-Geoscience has become a framework for Geoscience research based on data, models, high performance computing, visualization and collaborative work environment in about 20 years since e-Science proposed, and it is driving force of the revolution of the geoscience research. This paper reviewed the evolution and some typical applications of e-Geoscience, summarized the trends of its development, and proposed a simplified e-Geoscience

基金项目: 国家自然科学基金(91125005/D011004); 国家自然科学基金(J0930003/J0109); 中国科学院信息化重点项目(INFO-115-D01- Z007)

framework based on 3M platform (i.e. the Monitoring platform, the Modeling platform and the Manipulating platform). It is the base of e-Geoscience to build the joint observation system and the perfect monitoring platform for data collection, transmission, and management, the core of e-Geoscience is the modeling platform which performs data analysis, preparation, assimilation, and model construction, integration, simulation. The manipulating platform based on high-performance computing, visualization analysis and collaborative work is the fundamental research environment for e-Geoscience.

Keywords: e-Geoscience; 3M platform; data platform; modeling platform

引言

地学研究正朝着宏观和精细方向不断发展, 其过程机理研究已经到达一个非常复杂、非常深奥的境界。系统和整体性地表过程、地球系统的研究已成为必然趋势, 这些趋势对目前的地学研究方法和手段提出了新的挑战。地学研究的对象也从原来单一或几个变量的简单系统转变为综合性的、覆盖多领域的复杂系统。例如, 全球变化的研究就包含了多个学科, 需要多个学科之间的交互协作。需要构建完善的联合观测系统、联合同步观测系统以及可实现国际化的虚拟联合观测系统, 需要提供新的科研方法和手段来实现从整体上研究对象, 解决对象研究的复杂性, 解决研究对密集型数据的需求和密集型计算问题等。

正如 Tony Hey^[1] 在《The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery》中提出的目前地学研究过程一样, 已经进入了第四范式时代。前三种范式分别是实验、理论与模型研究。而随着对地表过程的密集观测实现, 地学研究者将面对海量的科学数据、或者大数据 (Big Data) 以及基于数据和模型研究的大规模科学计算或过程模拟, 需要研究者从这些资源中提取出有用的信息并将其转化为认识地表过程等的知识。目前地学数据不只由实验、检测和观测产生, 许多复杂现象的认识数据是由计算机模拟获得的。如地学研究方面的气候模式、数值天气预报、水循环过程、生态系统健康评价、全球陆面过程模型以及数据同化等模拟研究, 都能够产生大量的数据。这些数据的处理、分析和交换, 都面临海量数据的存储、传输、计算与可视化分析等一系列问题。这些问题需要

依赖高性能计算、海量存储和高速通信等基础环境的支持。地学 e-Science 致力于将设备、仪器、数据、计算、工具和研究人员等资源进行集成, 形成有利于地学研究的信息化基础环境, 进而来推进地学综合集成研究, 提高地学的研究产出和对地学现象深入理解。借助网格技术、基于 Web 的工具、高性能计算与可视化分析等信息技术作为 e-Science 的驱动力, 连接现有的地学研究资源, 最大限度地满足科研机构 and 人员之间交流与协作的需要, 尽可能方便的开展科研活动、获取和处理信息, 有效共享海量的各类资源, 是现代信息技术带给传统地学研究的巨大变革。

1 地学 e-Science 发展与现状

1.1 e-Science 起源与理解

在国际上, 一般称科研信息化为 e-Science。1999 年, 英国科技部部长 John Taylor^[2] 提出 “e-Science 是指在重要的科学领域中的全球性合作, 以及使这种合作成为可能的下一代基础设施。” 其中一个核心的要素就是资源共享, 跨地合作。英国 e-Science 研究院主任 Malcolm Atkinson^[3] 教授在 2000 年给出了的一个更为明确的定义: “e-Science 就是利用先进计算思想的研究方式的系统发展。这种研究方式, 可以使研究者通过自己的桌面电脑访问和使用分布在各处的计算机上的资源, 这些资源包括数据库、极大规模的计算能力、科学仪器和高性能可视化。” 从 Atkinson 的观点看, 在英国, e-Science 主要是基于网格和高性能计算的一种信息化构架体系, 可以使研究人员在世界各地通过自己的电脑实现数据、网格计算以及高性能

可视化共享。从广义上说, e-Science 的实质就是“信息化基础设施支持下的科研活动^[4-5]”, 包括两个基本方面: 一是信息化的基础设施, 比如英国、欧盟的 e-Infrastructure 和美国的 Cyberinfrastructure 建设; 另一是信息化的科研活动, 包括科学研究中各种信息化科研手段的介入, 以及科研过程的信息化。

1.2 地学研究信息化的起步

地学研究随着 20 世纪 40 年代电子计算机的发明发生了转变, 从基于纸张的数据复制形式转变为了电子数据拷贝, 这种转变使得相互之间信息交换与共享变得容易, 从而使科学研究的过程发生了变革^[4]。真正的地学研究信息化始于 1963 年加拿大测量学家 R.F.Tomlinson^[5] 提出的“地理信息系统”这一概念和他建立的世界上第一个地理信息系统——“加拿大地理信息系统”。此后的 1965 年, 美国哈佛大学土地测量专业的一名学生 J. Dangermond^[6-7]在其毕业论文中, 设计了一个简单的 GIS 系统, 并在毕业后于 1996 年成立了 ESRI 公司, 成为推动地学信息技术发展的重要里程碑。20 世纪 60 年代随着计算机网络的发明与应用, Email、FTP 等的引入, 计算机网络深刻地改变了地学研究者的研究方式。越来越多的科学家开始利用网络获取资源、共享资源, 推动了网络基础设施的进一步发展^[8]。网络的发展已经并将继续支持越来越多的研究、开发和决策应用^[9], 日益提高的网络速度使大规模的数据与信息共享成为可能, 越来越多的世界各地的地学研究者也开始通过网络建立虚拟科研组织, 共享数据资源, 进行科学交流。可以说, 网络环境和网络功能快速发展已经彻底的改变了我们的日常工作方式。

1.3 美英欧地学 e-Science

1998 年理查德克拉克在白宫新闻发布会上提出了 Cyberinfrastructure (CI), 美国国家科学基金会 (NSF) 在报告中正式将 CI 定为术语, 在基于蓝带调查小组报告的基础上^[10], 提出去整合和拓展数字革命的成果, 服务于下一代的科学和工程研究及相关教育。高端计算机网络共享系统^[11] 的关键在于将数据、

信息、工具、仪器, 包括超级计算、存储以及交流等综合性的知识资源完全服务于具体的研究群体, 提供新的途径, 使研究人员在发现和探索研究上获得更多更好的信息, 使得研究小组跨时间、区域、部门甚至学科间实现共享和协作。同时成立 CI 办公室来推进 CI 的研究、开发以及建设。作为一个通用的信息基础设施, CI 可以支持所有科学领域收集、归档、共享、分析、可视化科学数据, 以及模拟数据、信息和知识。这种贯穿各领域的基础设施, 可以支持邻近学科之间的跨领域的数据处理工作, 这就成为后来美国 e-Science 的前身。

随后建立的地理空间网络信息基础设施^[12-14] (Geospatial Cyberinfrastructure, GCI) 支持地理空间数据、信息和知识的收集、管理以及利用, 为多学科领域提供服务。1994 年美国正式建立了联邦地理数据协会形成了一个跨机构的国家空间数据基础设施^[14-15] (National Spatial Data Infrastructure, NSDI)。此后, 在开放地理空间联盟 (Open Geospatial Consortium, OGC) 和国际标准组织 (International Organization for Standardization, ISO) 通过测试各种平台和各种措施, 建立信息化基础设施应用^[16]的推动下, GCI 在标准定义方面取得了很大的进步。

欧盟《2010 年欧洲信息化基础设施咨询工作组蓝皮书》^[17-18] 对欧盟信息化基础设施服务的场景和趋势进行了评估, 确定了若干关键领域面临的挑战和机会, 提出了网络、高性能计算、数据管理、认证等领域的政策建议。在地学研究方面, 通过不同的项目将地球科学网格团体组织在一起, 建立至少 7 个虚拟研究组织。这些不同的团体在网格系统上已经移植了大量的程序, 并且也开发了适合其环境的一些工具和接口。其中起始于 EGEE^[19-23] (Enabling Grids for E-Science) 与 EGEE II 项目, 是欧盟面向国际上所有科学研究领域的 e-Science 项目。来自全球的科学研究人员可以申请在网格框架内建立虚拟组织, 开发与共享专业的科学研究工具与软件。EGEE-III 创建网格监控平台来整合收集到有关 EGEE 网格运行状况和 EGEE 用户行为的数据, 并向 EGI (European Grid Infrastructure, 欧洲网格基础设施)^[24] 自我发展模式发

展。欧洲研究基础设施战略论坛 ESFRI (the European Strategy Forum on Research Infrastructures) 路线图表明, 研究基础设施往往需要有数据管理、信息化、通讯等方面的结构化信息系统。这些系统包括网格计算、软件和中间件等基于信息、通信和技术的基础设施。而且认为坚持 e-Infrastructures 对于路线图中所有的项目是至关重要的, 并且确认 ICT 的架构和未来优先发展的 e-Infrastructures。

英国从 2001 年启动了第一期为期 4 年的 e-Science 计划, 在伦敦、剑桥、牛津等十所大学和三个国家实验室建立了 e-Science 中心, 主要开发通用网格中间件, 利用分布于整个互联网的异构资源 (包括计算集群, 存储设备, 科学仪器等等), 通过建成一个同构环境, 使得这些资源能够为分布于各地的用户提供协同式的服务, 以达到在整个广域网范围内的计算资源共享。从 2003 年开始, 英国启动了第二期为期 4 年的 e-Science 计划, 继续开发网格中间件以及加强了各中心之间的网格基础设施建设, 并成立了开放中间件研究所^[25-26] (Open Middleware Infrastructure Institute, OMII)。2005 年, 英国启动了第三期为期 4 年的 e-Science 计划, 重点支持公共 e-Science 基础设施建设, 并建设国家的科研信息化基础设施。

1.4 美国地学 e-Science 案例

2002 年, 在英国开始实施 e-Science 计划后, 美国也启动了相应的研究计划, 并提出 e-Science 已经作为一个新的领域, 将应用计算机、通信等先进的信息化手段来面对日益复杂化的科学问题。2007 年, 美国 NSF 发布了 2006-2010 科研信息化基础设施的发展规划《21 世纪的科研信息化基础设施》^[27], 规划中对科研信息化基础设施建设有着全面的部署, 主要包括高性能计算、数据、数据分析及其可视化、虚拟研究组织、学习和人力资源开发等方面。美国 NSF 开展的“大尺度综合环境观测网^[28] (Cooperative Large-Scale Environmental Observatories, CLEOs)”、“数字水文观测网站设计 (Designing Hydrologic Observatories)”、“协同促进水文科学发展的大学联盟^[29] (Consortium of Universities for the Advancement

of Hydrologic Science, Inc, CUAHSI)”计划中, 提出要建立一个水文监测网络, 一个水文测量机制, 一个水文信息系统和一个综合中心。其目的是, 通过大型综合的水文观测站网 (CLEOs) 的建立, 促进科学家之间的数据共享和经验交流, 科学和工程的相互转化, 实现依托数字技术, 实现流域尺度学科的综合与集成, 推动科学与工程进步。在加州大学自然保护区系统^[30-31] (Natural Reserve System) 的詹姆斯保护区中, 设计、开发、部署了嵌入式传感器网络系统, 开展不同陆地生态系统中生境和生态变化的连续监测, 在以数据为基础的生态、水文集成研究中, 针对用于图形化、模块化的模型构建环境需求, 开展了推动空间显式的集成建模环境^[32] (Integrated Modeling Environment, IME) 的研究。到目前为止, 国际上适合生态、水文建模的环境有模块化建模系统 MMS^[33-34] (Modular Modeling System)、动态集成体系结构系统 DIAS^[35] (Dynamic Information Architecture System) 框架、交互式建模系统 ICMS^[36] (Integrated Catchment Modeling System)、Tarsier^[28]、空间建模环境 SME^[37] (Spatial Modeling Environment)、HarmonIT^[38-39] 的开放式建模接口和环境^[40-41] (OpenMI) 等建模环境。在美国开展的流域研究中, 利用 SME 完成了 Patuxent 流域 PLM^[42-47] (the Patuxent Landscape Model-PLM 1995) 综合集成模型和埃弗格莱兹流域的 ELM^[48] (the Everglades Landscape Model-ELM 1995) 集成模型等。利用 MMS 和数据库、模型和 GIS 系统开发了应用于华盛顿州 Yakima 河等流域水资源管理和农业开发规划中 RIVERWARE^[49] 的决策支持系统。

1.5 中国科学院 e-Science 现状

在我国, 由于科研手段相比国外研究机构与高校相对落后, 特别是缺乏跨学科的综合研究能力、大规模综合系统建设能力、模型构建能力、仿真模拟能力。2008 年中国科学院在“十一五”信息化规划中部署的 14 个“e-Science 应用示范”项目来推动能力建设。这些项目中 5 个与地学有关, 诸如, 张耀南^[50-54]在黑河流域中利用无线数据传输技术实现观测数据的实时传输, 结合地学模型研究、超级计算资

源与 Web 技术提出模型在线计算方案, 实现“数据-模型-计算-可视化”的地学研究思路; 诸云强^[55]基于 PDA 技术与 Web 技术提出了地学考察路线选择与综合管理、PDA 数据采集工具等, 还开展了面向 e-GeoScience 的地学数据共享研究^[56-57]; 侯西勇^[58]提出 e-Coastal Science 框架, 针对海岸带开展模型研究, 将小波分析模型和 Markov 预测模型集成到 e-Coastal Science 中供研究人员使用; 于贵瑞^[59]整合中国生态系统研究网络的观测资源建立 China Flux 门户平台; 以及何洪林^[60]的中国陆地生态系统碳收支集成研究的 e-Science 系统构建, 为生态研究提供多源的数据资料支持。

2 地学 e-Science 应用

自 e-Science 概念提出以来, 与地学相关的 e-Science 研究也在美国与欧洲有着快速的发展与应用, 美国国家科学基金会 (National Science Foundation, NSF) 支持的 TeraGrid^[61-64]项目于 2001 年启动, 该项目由合作站点组成, 整合了美国本土 11 个合作站点的计算资源, 存储资源以及科研力量, 为用户提供开放的科学研究环境。TeraGrid 提供了许多地学的工作组来致力于开发某个方面的专业软件或工具, 如 GEON (GEOscience Network) 提供诸如岩石三维重力模拟模型, 基于雷达资料与地球动力学模型的地球构造研究等应用; ESG^[65-70] (The Earth System Grid) 组织提供全球气候变化有关的数据、模型与工具; GISolve (TeraGrid Geographic Information Science) 组织则致力于地理信息的收集以支持科学调查和各种应用领域的决策支持, 包括环境科学、交通和卫生等。

欧盟 2000 年启动的支持的 EUROGRID 项目包括 4 个大的研究领域, 生命科学、大气科学、工程技术以及高性能计算理论研究。大气科学组开发了一个专业的图像用户界面 (Graphical User Interface, GUI), 使用户能够方便的应用天气预报 LM 模型, 并耦合 UNICORE GRID, 为用户提供网格计算服务。EGEE (Enabling Grids for E-Science)^[19-23]

和 EGEE II 是欧盟面向国际上所有科学研究领域的 e-Science 项目, 来自全球的科学研究人员可以申请在网格框架上建立虚拟组织, 开发与共享专业的科学研究工具和软件。

美国的地球系统建模框架^[71-74] (Earth System Modeling Framework, ESMF) 是一款开源的建模基础设施, 用于解决不同学科或领域的模型耦合或互操作问题。该建模框架主要应用于气候、天气、数据同化等领域。国家气候系统模式 CCSM^[75-76] (Community Climate System Model)、NOAA 地球物理流体动力学实验模型 GFDL^[77] (NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory models)、NASA 戈达德对地观测系统模型 GEOS-5^[78] (NASA Goddard Earth Observing System) 等是典型的气候应用领域的 ESMF 应用实例。

在 GENIE (Grid Enable Integrated Earth system model) 和 CIAS 框架中, 耦合全球变化和人类活动, 通过数据同化和不确定性分析改善模型。将数据同化的不确定性分析加入模型开发的框架中, 利用集合卡尔曼滤波 (EnKF) 数据同化方法, 可替换的直接优化程序和新开发的贝叶斯统计方法, 用于解决不确定性的问题, 校准和评估未来事件的可能性, 提供了可选的优化方案。通过开发一个基于网格的计算框架, 方便耦合成熟的组件, 构建统一的地球系统模型 (ESM)。

GENIE 为地球模型的构建、执行和管理提供了一个组件框架。在地球系统组分的成熟模型基础上 (如海洋、大气、陆地、海冰、冰架、生物地球化学, 等等)。在 GENIE 中, 使这些模型能够方便的耦合在一起并, 实现千年时间尺度上的运行, 开展冰期和间冰期模拟。利用 GENIE 环境, 开展了参数优化, 并进行了 c-GOLDSTIN、地球系统模型 (ESM) 组成的三维海冰模型和二维的能量水分平衡大气模型相关模拟研究。

我国近年来也有不少成功的应用实例。如黑河流域为深入理解水文-生态模型, 利用了多种网络技术将特定区域的生态-水文定点监测系统、无线传感器网络, 连接到数据库、模型库、高性能计算及可视化环境, 形成了水文-生态从数据观测、采集、处理、

分析、模拟、计算、可视化、发布等研究一体化的 3M (Monitoring, Modeling, Manipulating) 框架。形成了黑河流域生态-水文研究数据集成环境, 提供针对模型需要数据的在线和离线处理、分析, 构建了生态-水文研究的模型库管理系统, 提供水文/陆面过程的数据同化模拟。另外还利用地学 e-Science 来开展开人地关系研究^[57]、海岸带模型研究^[58]、陆地生态系统碳收支研究^[59]等。

3 地学 e-Science 框架

3.1 地学 e-Science 的结构

从现有的地学 e-Science 环境分析来看, 这些环境各有其特点。其中 EGEE 的 EGEE/WLCG (Worldwide Hadron Collider (LHC) Computing Grid) 是目前世界上最完整的网格记录接口之一。它提供了不同的视图, 可以实现从全局视图和公众视图到专业化视图的转换。由 gLite (Lightweight Middleware for Grid Computing) 开发的网格可视化电子服务 VizLitG 可便捷地访问和交互可视化网格中的远程数据文件。VizLitG 由 Java 和 ClassFish 管理构建, 并包含 HDF5 (Hierarchical Data Format Release 5) 数据管理和 VTK 可视化引擎, 部署了可视化大数据集的交互分布式开源软件 ParaView 软件。

目前, 在缺乏基础设施支持下, 科学家无法与的所有实验、数据、计算和分析设备之间建立联系。因此在地学研究开发的 e-Science 环境中, 提供了集成数据发现、数据获取、数据计算和数据可视化 (CLRC e-Science Center) 的数据入口、HPC 入口和可视化入口。数据在网格或 e-Science 中将扮演着关键的角色。在 CLRC 中, 提供了访问多学科数据、来自异构资源的元数据描述和洛杉矶超级计算中心 (SDSC) 数据物理位置存储代理 (Storage Resource Broker, SRB) 三个组件的数据入口, 来解决数据存取挑战。HPC 入口关注网格资源、文件传送、和作业提交的监视、选择和时间安排。可视化入口提供一个适合基于网格的可视化工具。在集成的 e-Science 环境中, 三个模块采用 Web Service 和 Globus2.2 架构实现松耦合^[79]。

地球系统网格 (Earth System Grid, ESG) 集成大规模数据的超级计算机, 以及位于众多国家实验室和研究中心的分析服务器, 用于建立下一代气候研究的强大环境。通过联和的数据网关系统使用 ESG 资源, 并为全球气候、区域模型、IPCC 研究、分析和可视化软件提供大量的数据和服务。而建立在高性能和灵活的软件基础平台上的地球系统建模框架 (Earth System Modeling Framework, ESMF), 可提供易用、可移植、可互操作和可重用的气候和数值天气预报、数据同化和其它的地球科学应用。ESMF 的基本思想是将复杂应用分成许多小块或者组件, 通过集成组件来创建多重应用和多种执行方式。在 ESMF 里, 一个组件可能是一个物理域, 或者是一个诸如连接器或 I/O 系统的函数。

从目前地学 e-Science 表现形式上来看, 地学 e-Science 的实质就是支撑地学研究的信息化环境及其在此基础上开展的各类地学科研活动。可以将地学 e-Science 总体架构归纳为四个层次。最下层的信息化基础设施包括网络环境、存储环境、超级计算环境或网格计算环境。第二层是功能服务提供层。包括提供各种数据处理功能、数据管理功能、计算支持功能、模型模拟功能、可视化分析功能、决策支持功能、协同工作功能, 以及在线数据观测系统或联合观测系统支持等功能。第三层是地学资源提供层, 包括针对性应用数据、模型、模式、算法、工具、插件等资源。如针对陆面过程研究的模式、数据、运行模型研究所需的相关资源。第四层是应用层, 是 e-Science 的核心, 通过以下几个层次的构建, 形成针对性的地学 e-Science 应用, 如形成数据同化应用系统、生态水文研究应用系统、陆面过程研究系统等等。第五层为用户交互和互操作层。有三种比较常见的形式, GUI 形式、命令行形式以及 Portal 形式。如图 1 所示。

在下层环境中, 网络环境、存储环境、计算环境都是地学 e-Science 必不可少的信息化基础设施。高速的网络环境决定了用户上传、下载文件的速度, 交流的流畅性直接影响用户的交互速度。存储环境的大小制约着特定应用的发展, 许多应用都需要海量的存储环境来支持模型的运行, 如全球气候模型、数值天

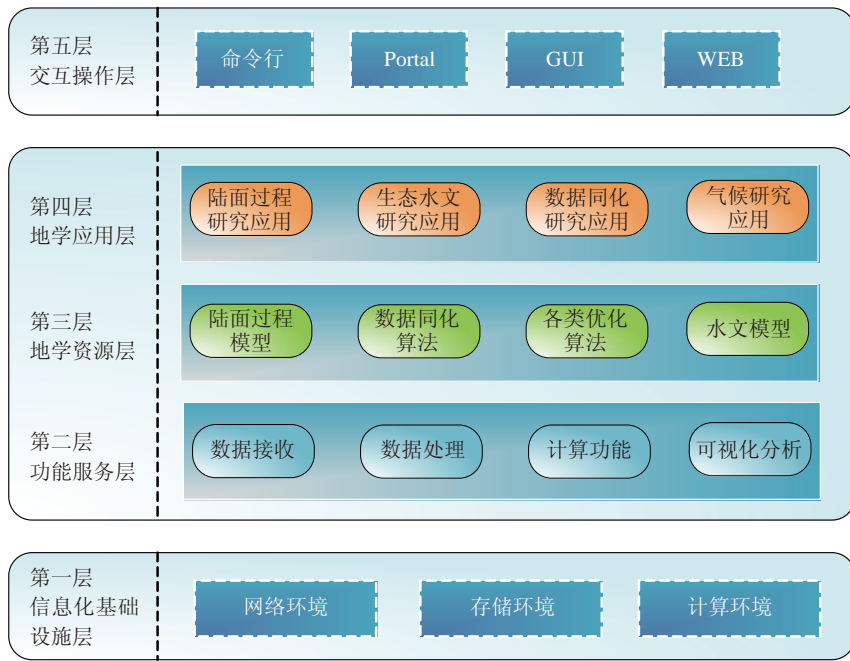


图1 地学 e-Science 框架

Fig. 1 e-Science framework for geoscience

气预报、数据同化等等。计算环境可以是超级计算环境也可以是网格计算环境，它的性能也将决定整个地学 e-Science 框架的效率，特别是那些需要海量数据的应用。

在二到第四层的环境中，不同的 e-Science 框架有着不同的部署，如在 EUROGIRD 框架中，框架的建设者为其他用户提供了专业的模型应用以及相关的工具插件。用户只需要调用框架中的模型就可以进行科学研究。另一种方式则是如 EGEE 框架一样，这种方式就像开源软件一样，用户可以通过一定的机制发布新的模型、工具与算法，用户也可以通过虚拟组织进行专业方面的交流，改善模型与算法，从而促进该专业领域的应用发展。在上层环境中，命令行形式、Portal 形式以及 GUI 形式也各有优缺点。命令行形式是最为基本的应用方式，它的主要用户群体是对超算环境、网格环境十分熟悉的用户，这种应用方式功能最全面，能够完成用户的特定需求，但对用户的要求较高，需要用户熟练地掌握操作命令，编写脚本。Portal 形式是目前比较流行的应用方式，类似于 B/S 架构，这种应用方式对用户本地的计算机没有任何要

求，只需要有网络和浏览器就可以登陆到网格环境上，并且在 Portal 中，已经整合了许多应用软件、模型和工具等，即使用户没有较好的 Linux 操作基础也可以比较方便地进行应用，但在这种方式下，许多在命令行形式下的自定义功能就无法得到满足。GUI 形式的应用方式类似于 C/S 架构，用户需要下载框架提供的客户端，用户在本地进行一系列操作后由客户端将用户的操作指令上传至服务器，但这种方式难以全面地应对众多的应用、模型或工具设计 GUI 需要，因此 GUI 形式的应用方式通常只支持一个或几个相关的应用模型或工具。

3.2 地学 e-Science 的功能

从地学 e-Science 的支持研究的功能上来划分，为了实现数据采集、传输、管理、共享、处理、分析、模拟、计算、可视化一体化，可将 e-Science 简化为基于 3M 平台基础的总体结构^[50]。近几年随着地球科学观测系统的逐步完善、无线传感器网络的引入以及联合观测系统的推动，地学研究的 e-Science 框架发生了变化。除传统的 e-Science 结构外，在下层

中更多的引入了监测平台, 将监测体系纳入到地学 e-Science 的信息化基础设施中。特别是将地学观测系统组建成虚拟的传感网络, 作为地学 e-Science 关键数据基础环境, 实现数据的有效管理和高效应用。在地学 e-Science 中间层中, 更多的引入了基于数据和计算的模型以及对模型集成研究的支持能力, 开展模型构建、模型有关的参数化等应用工作。在上层中随着虚拟工作组的需求增加, 上层中将增加协同工作环境功能, 来增加不同领域的研究者围绕一个共同问题开展研究的支撑能力。

因此从适合地学研究出发, 可以将地学 e-Science 的框架归纳为数据、模型、超级计算、可视化分析、协同工作环境的功能分类组成。在网络、计算、存储基础设施之上, 可以进一步归纳为针对一个流域研究所需的简化 e-Science 环境。如图 2 所示包含监测平台 (Monitoring)、模型平台 (Modeling) 和操作平台 (Manipulation) 的 3M 平台。

(Manipulation) 的 3M 平台。在此基础上, 构建支持地学不同研究领域的虚拟研究组织, 开展特定的地学研究应用。在包含数据-模型-计算-可视化分析为基本架构的 3M 平台中, 监测平台将地学观测系统, 通过数据自动传输环境, 组建成传感网络和联合观测系统, 形成地学 e-Science 中的关键数据资源。模型平台构建数据管理、处理和共享环境, 构建在线和离线模型应用和模型构建环境, 提供数据交换、共享和应用, 提供在线的模型应用和构建服务; 操作平台中基于计算资源, 形成交互模拟分析、可视化分析的环境, 提供交互式数据格式转换、驱动数据制备、参数模拟、数据分析以及可视化展示。3M 平台与协同工作环境整合, 形成基于数据、模型、计算、可视化和协同工作的地学信息化科研环境。从支持地学陆面过程研究来看, 在完善的底层存储、计算、通信基础上, 需要构建高性能计算服务, 数据、信息、知识服务, 实时数

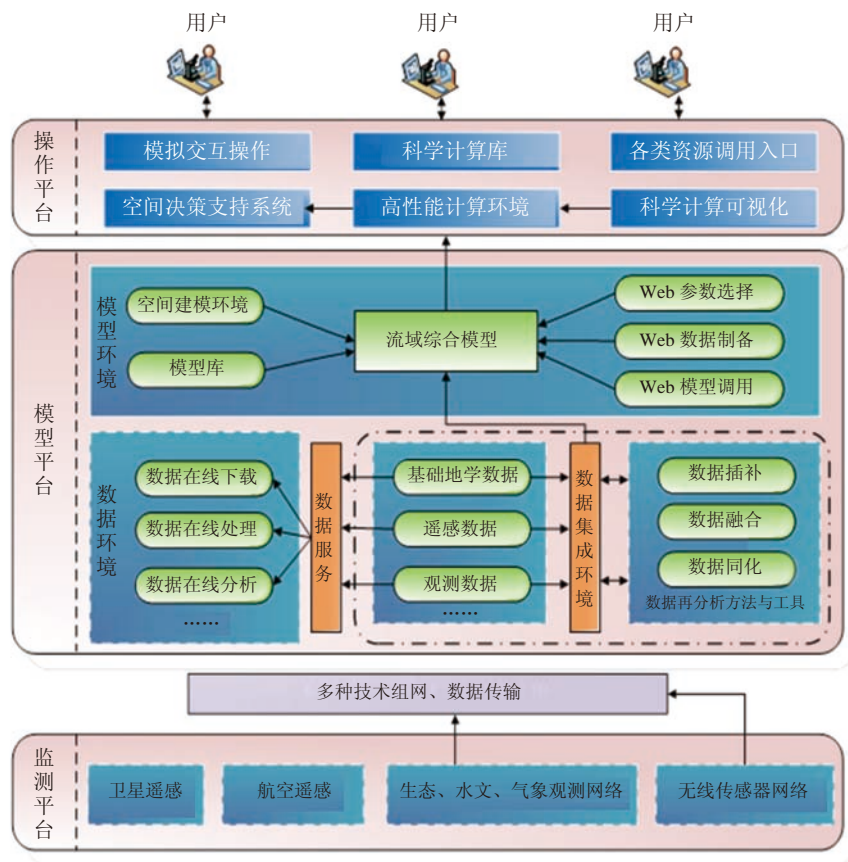


图2 3M 平台整体结构

Fig. 2 3M platform framework

据的网络环境,数据再加工服务,各类接口和可视化服务,协作服务等基础设施。针对地表过程研究,其完善的地学 e-Science 环境在拥有 3M 平台之后,还需要提供决策支持服务和跨学科的协同工作环境支持如图 3 所示。从而形成基础技术、基础设施、功能提供支持下的 e-Science 应用示范。在特定的应用示范基础上,建立诸如陆面过程、环境研究、生态研究、工程研究等特定地学 e-Science 应用环境。

4 地学 e-Science 趋势

4.1 数据是地学 e-science 的核心

以虚拟观测为核心特征的电子化地球物理年 (Electronic Geophysics Year (eGY, 2007-2008)) 的国际联合倡议进一步推动了地球科学 e-Science 的发展。eGY 推动地球科学观测从模拟记录的数字化到

建立一个虚拟观测系统,并建议将虚拟观测系统部署到冰冻圈中,来接收所有可能产生的地理数据 (例如:大气、地磁、地质学、冰川、海洋、气候等),建成一个世界范围的数据网络 “data fabric”,提供基于 WEB 方式的自由访问所有可用的地球科学数据。同时还提议将现在的世界数据中心加入到数据网络 “data fabric” 中,转变为世界范围数据网络资源的一部分,成为永久保存的和持续可用的数据。eGY 倡议为研究人员提供可以自由访问的更好、更综合的数据资源和数据服务。

在 2007 年在加利福尼亚旧金山举行的地理信息会议上,最为关注的主题是能够帮助我们改进地球模拟和环境过程理解的地球科学数据发现、集成、管理和可视化。论坛表现出数据、模型、计算和可视化是地学 e-Science 核心要素,多学科交叉是地学 e-Science 发展的动力。同年在科罗纳多丹佛,由

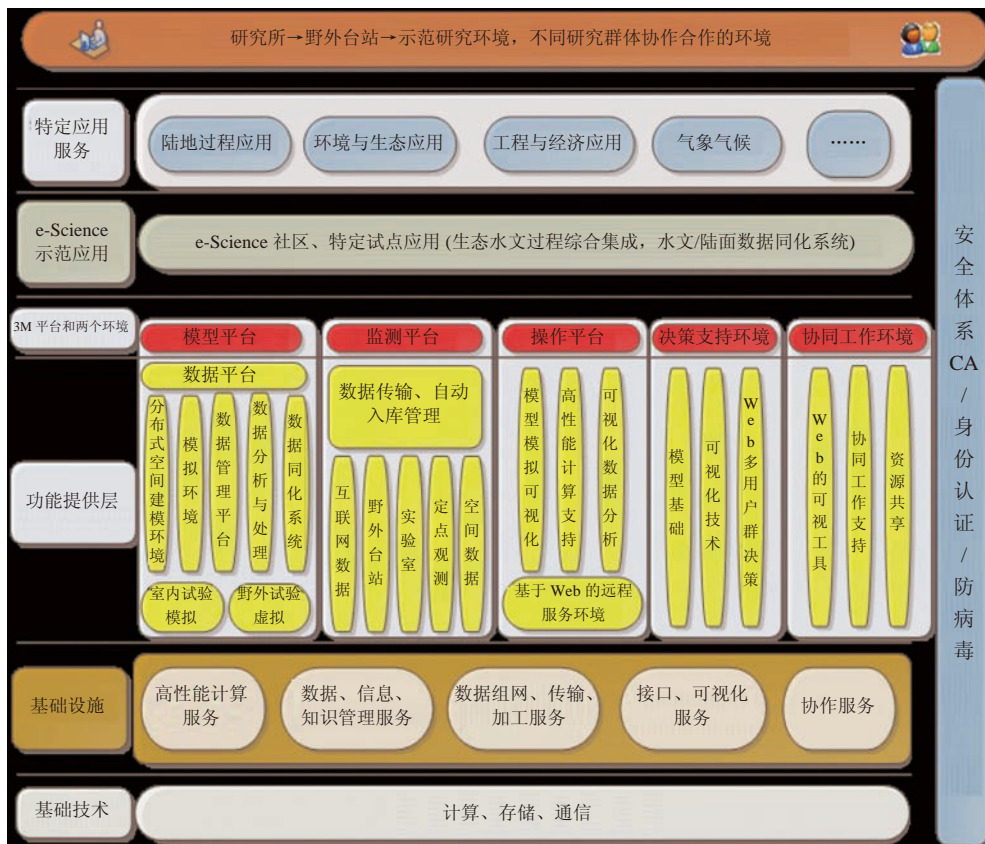


图3 地表过程研究的 e-science 环境

Fig. 3 e-Science environment for land surface process research

eGY、NASA、NSF 和 NCAR 等举办的首届地球科学中的虚拟观测 (Virtual Observatories in Geoscience, VOiG) 会议, 将目标集中在定义和表述虚拟观测系统目前的状态上。这次会议进一步表明应将监测系统纳入地学 e-Science 的发展, 通过组建针对性的虚拟观测系统, 实现地学研究观测的系统性、完整性。

4.2 地学 e-Science 的四个着力方向

有关 e-Science 的认识还在不断地推进, e-Science 是信息化基础设施支持下的科研过程^[80-81]基本形成共识。地球科学作为一种以观测与实验为基础的学科需要建立一个能够整合自动数据观测-高速数据传输-海量数据管理-智能数据处理-高性能/网格计算-数据可视化为一体的地学 e-Science 环境。在地学 e-science 的框架中, 框架下层还需要加入观测设备、实验仪器的网络化来完善科学数据的收集的时效性。框架中层需要强调科研机构和虚拟组织结合来完善模型和工具, 框架上层机构中需采用命令行模式和 Portal 模式。

概括起来地学 e-Science 的发展趋势主要有以下几个方面: 一是建立完善的对地联合观测网络, 跨区域的虚拟联合观测系统, 形成完善的监测平台, 开展联合同步观测和精细的密集观测, 形成认识地表过程或地球系统的关键数据基础。二是以数据管理、集成、制备、分析、同化为基础建立完善的数据平台, 提供更广范围的数据共享。三是以集成建模环境为基础, 提供集中和分布可以利用不同机构的研究模型资源, 通过联合或已有模型的集成, 开展地学模型研究、构建, 形成支持地学研究的模型研究和开发的模型平台, 支持对地表过程的模拟和刻画。四是针对大数据、密集数据、复杂模拟的科学计算和可视化分析, 建立支持海量数据、大数据分析、移动、复制、管理等的高性能计算, 建立支持多学科协同研究的协同工作环境, 建立可视化表达地表过程的可视化分析方法, 形成可交互的操作平台, 支持多学科综合性对地表过程开展研究。

4.3 e-Science 成为地学研究常态化环境

目前, 正是 e-Science 飞速发展的时期, 越来越

多的 e-Science 环境在世界各地涌现出来, 新的技术如云计算、云存储、云服务等概念也层出不穷。正如前文所提及的, 美国与欧盟也正在大力支持一些 e-Science 框架项目, 对高速网络、海量存储环境以及并行计算技术、网格技术的研发十分重视, 并且越来越多的科学研究机构以及各领域的科学家也都开始使用 e-Science 环境, 认识到 e-Science 环境的发展前景。地学 e-Science 框架将为地学研究者提供海量的存储环境以及高速的计算环境, 越来越多的专业应用模型、工具以及插件也不断地耦合到 e-Science 环境中来, 科学家们通过高速网络将自己的数据、知识与其他人共享, 可以加入同一个虚拟组织, 针对同一个科学问题, 实现跨地域、跨机构、跨学科的综合科学研究。

参考文献

- [1] T. Hey, S. Tansley, et al., The Fourth Paradigm: Data-Intensive Scientific Discovery. 2009, Washington: Microsoft Corporation. <http://radar.oreilly.com/2012/01/what-is-big-data.html>.
- [2] J. Taylor. www.rcuk.ac.uk/escience/default.htm. 1999.
- [3] O.e.-I.W. Group, Developing the UK's e-Infrastructure for Science and Innovation. 2000.
- [4] F.A. Lerner, The story of libraries: From the invention of writing to the computer age 2001: Continuum International Publishing Group.
- [5] R.F. Tomlinson, H.W. Calkins, et al., Computer handling of geographical data : an examination of selected geographic information systems. Natural resources research 13. 1976, Paris: Unesco.
- [6] J. Dangermond, Cad Vs Gis. Computer Graphics World, 1986. 9(10): p. 73-74.
- [7] J. Dangermond, Geographic Information-Systems and Their Value for Geological Analysis. Aapg Bulletin-American Association of Petroleum Geologists, 1987. 71(5): p. 546-546.
- [8] G.J. Holzmann and B. Pehrson, The 1st Data-Networks.

- Scientific American, 1994. 270(1): p. 124–129.
- [9] M.A. Smith and P. Kollock, *Communities in Cyberspace*. 1999: Routledge Press.
- [10] Daniel E. Atkins .*Revolutionizing science and engineering through cyberinfrastructure: Report of the National Science Foundation blue-ribbon advisory panel on cyberinfrastructure*. <http://www.nsf.gov/od/oci/reports/CH1.pdf>.2003
- [11] ZHANG Yao-nan, CHENG Guo-dong,et al. .Introduction to NSF’ s Report of Revolutionizing Science and Engineering Through Cyberinfrastructure[J].*Adviance in Earth Science*. 2007 Vol. 22 (5): 527–531. [张耀南,程国栋,肖洪浪. 高端计算机网络共享系统支撑的科学和工程革新[J].*地球科学进展*. 2007, Vol. 22 (5): 527–531.]
- [12] S.W. Wang and Y. Liu, TeraGrid GIScience Gateway: Bridging cyberinfrastructure and GIScience. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009. 23(5): p. 631–656.
- [13] T. Zhang and M.H. Tsou, Developing a grid-enabled spatial Web portal for Internet GIServices and geospatial cyberinfrastructure. *International Journal of Geographical Information Science*, 2009. 23(5): p. 605–630.
- [14] T. Zhang, M.H. Tsou, et al., Building an intelligent geospatial cyberinfrastructure: an analytical problem solving approach - art. no. 64200A. *Geoinformatics 2006: Geospatial Information Science*, 2006. 6420: p. A4200–A4200.
- [14] J. McLaughlin and S. Nichols, Developing a National Spatial Data Infrastructure. *Journal of Surveying Engineering-Asce*, 1994. 120(2): p. 62–76.
- [15] N. Tosta, Continuing Evolution of the National Spatial Data Infrastructure. *Gis/Lis '94 Annual Conference and Exposition, Proceedings*, 1994: p. 769–777.
- [16] C. Yang, R. Raskin, et al., Geospatial Cyberinfrastructure: Past, present and future. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2010. 34(4): p. 264–277.
- [17] e-IRG “Blue Paper” 2010. http://www.e-irg.eu/images/stories/eirg_bluepaper2010_final.pdf.
- [18] 2010 年欧洲信息化基础设施咨询工作组蓝皮书发布. *信息化研究与应用快报*.2010,20(44):1-2.[<http://www.ecas.cn/xxzy/xxkw/kbcd/201012/P020101208494465713747.pdf>] (内部刊物).
- [19] F. Gagliardi, The EGEE European grid infrastructure project. *High Performance Computing for Computational Science - Vecpar 2004*, 2005. 3402: p. 194–203.
- [20] F. Gagliardi, The European grid infrastructure EGEE project. *Astronomical Data Analysis Software and Systems Xiii*, 2004. 314: p. 357–363.
- [21] F. Gagliardi, M.E. Begin, et al., EGEE - providing a production quality Grid for e-Science. *Local to Global Data Interoperability - Challenges and Technologies*, 2005: p. 88–92.
- [22] F. Gagliardi, B. Jones, et al., Building an infrastructure for scientific Grid computing: status and goals of the EGEE project. *Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2005. 363(1833): p. 1729–1742.
- [23] B. Jones, An overview of the EGEE project. *Peer-to-Peer, Grid, and Service -Orientation in Digital Library Architectures*, 2005. 3664: p. 1–8.
- [24] European Grid Infrastructure. <http://www.egi.eu/>
- [25] M. Atkinson, D. DeRoure, et al., Web Service Grids: an evolutionary approach. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*, 2005. 17(2-4): p. 377–389.
- [26] J. Bradley, C. Brown, et al., The OMII software distribution. *Proceedings of the UK e-Science All Hands Meeting 2006*, 2006: p. 748–753.
- [27] National Science Foundation (U.S.) and Cyberinfrastructure Council (National Science Foundation), *Cyberinfrastructure vision for 21st century discovery*. 2007, National Science Foundation, Cyberinfrastructure Council: Arlington, VA.
- [28] CLEANER and NSF's environmental observatories. 2006, Washington, D.C.: National Academies Press.
- [29] L. Band, Hydrologic Observatory Network, in *CUAHSI Technical Report #4*. 2002: Washington D.C.
- [30] M.P. Hamilton, E.A. Graham, et al., *New approaches in*

- embedded networked sensing for terrestrial ecological observatories. *Environmental Engineering Science*, 2007. 24(2): p. 192–204.
- [31] R.o.t.U.o. California. James San Jacinto Mountains Reserve. <http://www.jamesreserve.edu>.
- [32] I.I.f.A.S. Analysis. IIASA. <http://www.iiasa.ac.at/>.
- [33] G.H. Leavesley, S.L. Markstrom, et al., The modular modeling system (MMS) - The physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management. *Water Air and Soil Pollution*, 1996. 90(1-2): p. 303–311.
- [34] G.H. Leavesley, S.L. Markstrom, et al., The Modular Modeling System (MMS) - The physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and ecosystem management. *Second Symposium on Environmental Applications*, 2000: p. 92–97.
- [35] U.S.D.o.E.O.o. Science. Dynamic Information Architecture System <http://www.dis.anl.gov/projects/dias.html>.
- [36] M. Reed, S.M. Cuddy, et al., A framework for modelling multiple resource management issues - an open modelling approach. *Environmental Modelling & Software*, 1999. 14(6): p. 503–509.
- [37] C.S. University. Tarsier Environmental Modeling Software Framework. <http://ecoviz.csumb.edu/tarsier/index.htm>.
- [38] T. Maxwell and R. Costanza, Distributed modular spatial ecosystem modeling. *Int. J. Comput. Simul.*, 1995. 5(3): p. 247–262.
- [39] D. Fortune, Floods and hydroinformatics: new challenges. *Houille Blanche-Revue Internationale De L Eau*, 2007(3): p. 33.
- [40] D. Fortune, P. Gijsbers, et al., OpenMI - Real Progress Towards Integrated Modelling. *Practical Hydroinformatics: Computational Intelligence and Technological Developments in Water Applications*, 2008. 68: p. 449–464.
- [41] J.B. Gregersen, P.J.A. Gijsbers, et al., OpenMI: Open modelling interface. *Journal of Hydroinformatics*, 2007. 9(3): p. 175–191.
- [42] R.V. Moore and C.I. Tindall, An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI). *Environmental Science & Policy*, 2005. 8(3): p. 279–286.
- [43] A. Voinov, R. Costanza, et al., Patuxent landscape model: 1. Hydrological model development. *Water Resources*, 2007. 34(2): p. 163–170.
- [44] A. Voinov, R. Costanza, et al., Patuxent landscape model: 2. Model development - Nutrients, plants, and detritus. *Water Resources*, 2007. 34(3): p. 268–276.
- [45] A. Voinov, R. Costanza, et al., Patuxent Landscape Model. III. Model calibration. *Water Resources*, 2007. 34(4): p. 372–384.
- [46] A. Voinov, R. Costanza, et al., Patuxent Landscape Model: 4. Model application. *Water Resources*, 2007. 34(5): p. 501–510.
- [47] A. Voinov, R. Costanza, et al., Patuxent landscape model: integrated ecological economic modeling of a watershed. *Environmental Modelling & Software*, 1999. 14(5): p. 473–491.
- [48] A Voinov, H.C. Fitz, et al., Surface water flow in landscape models: I. Everglades case study. *Ecological Modelling*, 1998. 108(1-3): p. 131–144.
- [49] E.A. Zagona, T.J. Fulp, et al., Riverware: A generalized tool for complex reservoir system modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, 2001. 37(4): p. 913–929.
- [50] Zhang Yaonan, Xiao Hongliang, et al., E-Science Environment for Integrated Research of Inland River Basin[J]. *e-Science Technology & Application*, 2009,(2): 52–64. [张耀南, 肖洪浪, 等. 内陆河流域综合集成研究所需的e-Science环境 [J]. 科研信息化技术与应用, 2009,(2): 52–64.]
- [51] ZHANG Yao-nan, CHENG Guo-dong, et al., Research on e-Science Adapted to Environment and Ecology Study[J]. *ADVANCES IN EARTH SCIENCE*, 2006. 21(10): p. 1083–1090. [张耀南, 程国栋, 等. 适宜环境与生态研究的e-Science探讨 [J]. 地球科学进展, 2006, 21(10): 1083–

- 1090.]
- [52] Y. Wang, Y. Zhang, et al. An e-Science environment study using wireless transmission technique. in 2010 6th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM 2010, September 23, 2010 - September 25, 2010. 2010. Chengdu, China: IEEE Computer Society.
- [53] Y. Wang, Y. Zhang, et al. Using ensemble Kalman filter to assimilate land surface temperature and evapotranspiration. in Communications and Networking in China (CHINACOM), 2010 5th International ICST Conference on. 2010.
- [54] Y. Zhang, G. Zhao, et al. Spatial Interpolation of meteorology monitoring data for western China using back-propagation artificial neural networks. in Communications and Networking in China (CHINACOM), 2010 5th International ICST Conference on 2010. Beijing.
- [55] Zhu YunQiang, Sun JunLin, et al..e-Geoscience Research, Applicationand Demonstration[J], e-Science Technology & Application, 2009. 2(4): p. 42–51. [诸云强,孙九林,等. 地学信息化科研环境研究与应用示范[J]. 科研信息化技术与应用, 2009, (4): 42–51.]
- [56] ZHU Yun-qiang, SUN Jiu-lin. The Research Progress in Geo-data Sharing Based on e-GeoScience[J]. ADVANCES IN EARTH SCIENCE,2006,21(3):286–290.[诸云强,孙九林. 面向e-GeoScience 的地学数据共享研究进展[J].地球科学进展, 2006,21(3):286–290.]
- [57] Zhu Yunqiang, Sun Jiulin, et al. e-Geoscience Research and Practice—A Case show of North Eastern Asia Joint Scientific Exploration and Cooperative Research Platform. ADVANCES IN EARTH SCIENCE[J]. 2011, 26(1) 66–74.[诸云强,孙九林,等.地学e-Science研究与实践[J].地球科学进展, 2011, 26(1): 66–74.]
- [58] Hou Xiyong,Gaomen,et al..Characters of Vegetation Cover Change in Yellow River Delta and Coastal Region of Laizhou Bay by Spatio-temporal Data Mining Techniques[J] e-Science Technology & Application, 2010,V1(3): 50–61. [侯西勇, 高猛, 等. 基于时空数据挖掘技术的黄河三角洲—莱州湾沿岸植被覆盖变化特征分析[J]. 科研信息化技术与应用, 2010, 1(3): 50–61.]
- [59] Yu Guirui,Hehonglin,et al..Study on the e-Science Environment Construction for Carbon Budget Integration Research of Chinese Terrestrial Ecosystem[J]. e-Science Technology & Application, 2009, (2): 21–31.[于贵瑞, 何洪林, 等. 中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设探讨[J]. 科研信息化技术与应用, 2009, (2): 21–31.]
- [60] He Honlin,Zhang Li,et al.. Carbon Budget Integration Research of Chinese Terrestrial Ecosystem, ADVANCES IN EARTH SCIENCE,2012, 27(2) 246–254.[何洪林,张黎,等.中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science系统构建[J].地球科学进展,2012, 27 (2): 246–254.]
- [61] Anon, Birth of TeraGrid network. R&D Magazine, 2002. 44(8): p. 16–16.
- [62] Anon, TeraGrid. Electronics World, 2003. 109(1803): p. 5–5.
- [63] P.H. Beckman, Building the TeraGrid. Philosophical Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences, 2005. 363(1833): p. 1715–1728.
- [64] F. Berman, From TeraGrid to knowledge grid. Communications of the Acm, 2001. 44(11): p. 27–28.
- [65] W. Kendall, M. Glatter, et al., Web enabled collaborative climate visualization in the Earth System Grid. Proceedings of the 2008 International Symposium on Collaborative Technologies and Systems: Cts 2008, 2008: p. 212–220.
- [66] D.E. Middleton, D.E. Bernholdt, et al., Enabling worldwide access to climate simulation data: the earth system grid (ESG). SciDAC 2006: Scientific Discovery Through Advanced Computing, 2006. 46: p. 510–514.
- [67] L. Pouchard, L. Cinquini, et al., An ontology for scientific information in a grid environment: The Earth system grid. Ccgrid 2003: 3rd Ieee/Acm International Symposium on Cluster Computing and the Grid, Proceedings, 2003: p. 626–632.
- [68] A.R. Price, G. Xue, et al., Optimization of integrated

- Earth System Model components using Grid-enabled data management and computation. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*, 2007. 19(2): p. 153–165.
- [69] D.N. Williams, R. Ananthakrishnan, et al., THE EARTH SYSTEM GRID Enabling Access to Multimodel Climate Simulation Data. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009. 90(2): p. 195.
- [70] D.N. Williams, R. Ananthakrishnan, et al., Data management and analysis for the Earth System Grid - art. no. 012072. *Scidac 2008: Scientific Discovery through Advanced Computing*, 2008. 125: p. 12072–12072.
- [71] N. Collins, G. Theurich, et al., Design and implementation of components in the Earth system modeling framework. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2005. 19(3): p. 341–350.
- [72] C. Hill, C. DeLuca, et al., The architecture of the earth system modeling framework. *Computing in Science & Engineering*, 2004. 6(1): p. 18–28.
- [73] C. Hill, C. DeLuca, et al., Implementing applications with the Earth System Modeling Framework. *Applied Parallel Computing: State of the Art in Scientific Computing*, 2006. 3732: p. 563–572.
- [74] S.J. Zhou, Coupling climate models with the Earth System Modeling Framework and the Common Component Architecture. *Concurrency and Computation-Practice & Experience*, 2006. 18(2): p. 203–213.
- [75] M. Blackmon, B. Boville, et al., The Community Climate System Model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001. 82(11): p. 2357–2376.
- [76] J.B. Drake, P.W. Jones, et al., Overview of the software design of the Community Climate System Model. *International Journal of High Performance Computing Applications*, 2005. 19(3): p. 177–186.
- [77] T.L. Delworth, A.J. Broccoli, et al., GFDL's CM2 global coupled climate models. Part I: Formulation and simulation characteristics. *Journal of Climate*, 2006. 19(5): p. 643–674.
- [78] D.V. Ledvina and J. Pfaendtner, Inclusion of SSM/I total precipitable water into the NASA/Goddard earth observing system - Data assimilation system. *Numerical Weather Prediction 10th Conference (Nwp)*, 1994: p. 199–201.
- [79] KERSTIN KLEESE VAN DAM, et, al. An Integrated E-Science Environment For Environmental Science. http://www.ecmwf.int/newsevents/meetings/workshops/2004/high_performance_computing-11th/pdf/Kerstin_Kleese-van_Dam.pdf
- [80] Gui Wenzhuang. A Further Discussion on What's e-Science [J]. *e-Science Technology & Application*, 2009, (2): 1–5.[桂文庄.再谈什么是e-Science[J].*科研信息化技术与应用*,2009, (2): 1–5.]
- [81] Gui Wenzhuang.What is e-Science.*e-Science Technology & Application*, 2008, (1): 1–7.[桂文庄.什么是e-Science [J]. *科研信息化技术与应用*,2008,(1):1–7.]

收稿日期: 2013 年 8 月 7 日

张耀南: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 研究员, 主要研究方向为数据、模型、高性能计算及地学 e-Science。E-mail: yaonan@lzb.ac.cn

汪 洋: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 工程师, 主要研究方向为科研信息化、地学e-Science。本文发稿时, 作者已供职于中国科学院计算机网络信息中心。E-mail: wangyang@cnic.cn

敏玉芳: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 工程师, 主要研究方向为科学数据库建设、数据可视化。E-mail: myf@lzb.ac.cn

赵雪茹: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 工程师, 主要研究方向为科学数据库建设、网络科普。E-mail: zhaoxr@lzb.ac.cn

康健芳: 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 助理工程师, 主要研究方向为科学数据库建设、协同工作环境。E-mail: kangjf@lzb.ac.cn