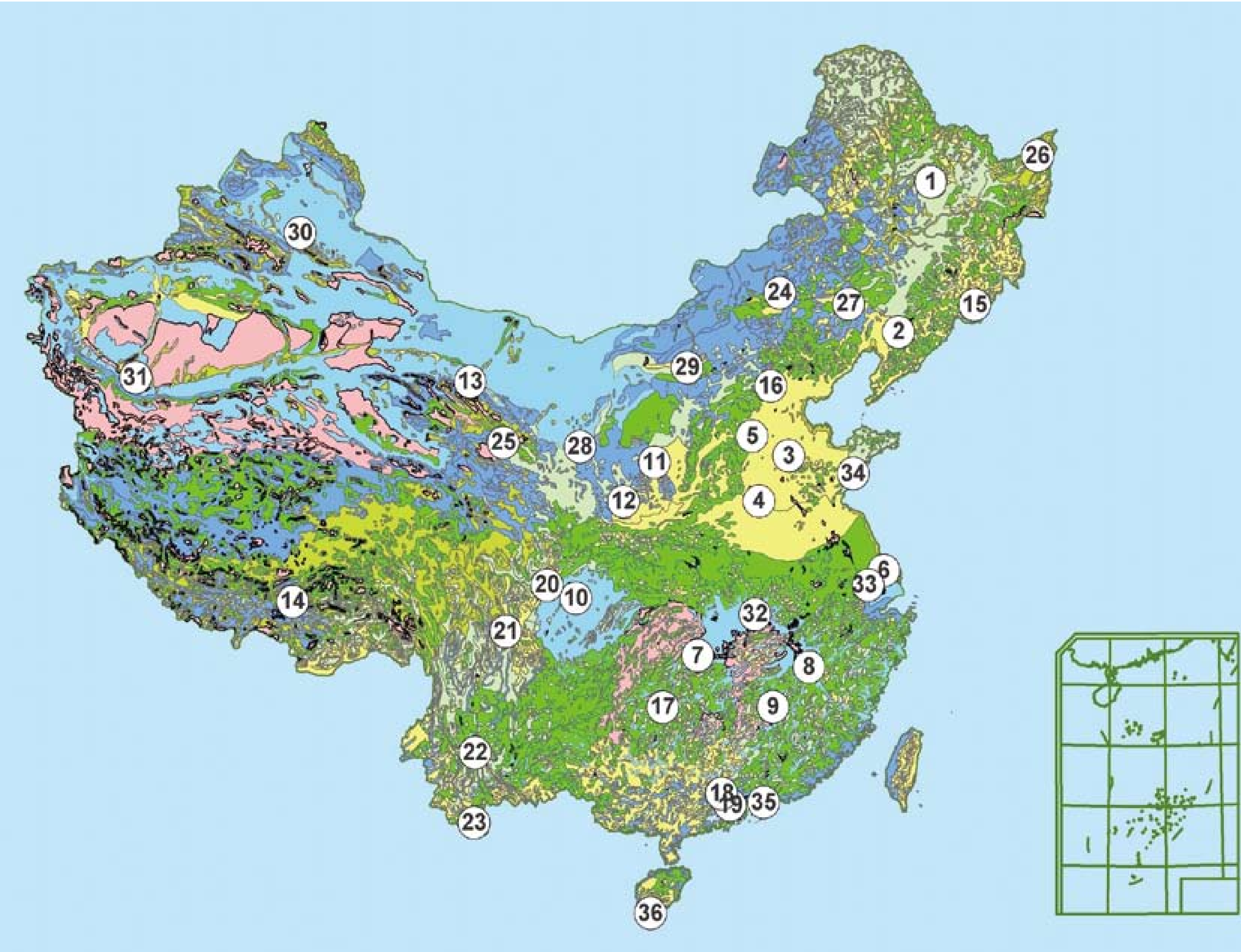


本图片由作者提供

全球气候变化是国际社会共同关注的重大环境问题，减少温室气体排放、抑制全球变暖进程是保护地球系统的重大国际行动，是人类社会共同承担的国际责任和义务。近20年来，陆地生态系统碳循环已成为地球系统科学和全球变化科学的前沿问题。各国相继启动了许多大型碳循环研究计划，试图开展从区域乃至洲际尺度开展碳循环过程及其区域响应的集成研究。而全球或区域生态系统碳循环研究具有多台站联网观测、数据多源、多模型综合分析、跨领域科学家协同工作等方面的特点，需要多个领域的科学家在不同尺度协同开展数据观测、数据分析、模型模拟等工作，需要高性能的计算环境支持，需要海量的、多种来源的、不同学科的数据支持。因此，生态系统碳循环研究已成为数据密集型工作，比以往任何时候都需要跨学科、跨越时间、空间、物理障碍的资源共享与协同工作，急迫需要开展e-Science应用和示范研究。

中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设探讨

于贵瑞[1] 何洪林[1] 黎建辉[2]
1.中国科学院地理科学与资源研究所，中国生态系统研究网络综合研究中心，北京 100101
2.中国科学院计算机网络信息中心，科学数据中心，北京 100190

摘 要： 以中国通量观测研究网络（ChinaFLUX）为基础平台，开展生态系统碳循环集成研究不仅是全球变化科学研究的重要内容，也是我国应对气候变化的重大科技任务。生态系统碳循环集成研究需要多台站联网观测、多源数据同化、多模型综合分析、以及跨区域、跨学科合作的协同工作环境，急迫需要开展e-Science应用和示范研究。本文论述了国内外生态系统碳循环集成研究的e-Science环境建设现状及其发展趋势，提出了建立服务于中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设的目标和思路，阐述了以ChinaFLUX现有的8个野外观测台站为基础，通过一个由“三个工作环境”（数据集成环境，模型模拟环境，可视化协同工作环境）和“四个层次的应用系统”（典型生态系统、典型区域、中国区域、东亚区域）构成的中国陆地生态系统碳循环科学研究的e-Science应用示范体系的建设任务，并讨论了开展碳循环集成研究e-Science环境建设在中国生态系统研究网络（CERN）信息化建设，以及我国生态信息科学发展中的重要作用。

关键词： 生态系统碳收支；e-Science；陆地生态系统；中国通量观测研究网络（ChinaFLUX）；中国生态系统研究网络（CERN）

Study on the e-Science Environment for Carbon Budget Integration Research of Chinese Terrestrial Ecosystem

Yu Guirui[1], He Honglin[1], Li Jianhui[2]

1.Synthesis Center of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) , Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101,China

2.Center of Scientific Database, Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190,China

Abstract: With the foundation platform of Chinese Terrestrial Ecosystem Flux Research Network (ChinaFLUX), the development of terrestrial carbon budget integration research is not only the important content of global change science study, but also the significant scientific and technical duties for our country to cope with the climate change. The cooperative work environment of multi-station measurement network, multi-source data assimilation, multi-model comprehensive analysis and cooperative work of cross-discipline and cross-region is needed for terrestrial carbon budget integration research. It is an urgent need to develop the research on application and demonstration of e-Science. This paper discusses the situation and the development trend of e-Science environment construction for ecosystem carbon budget integration research at home and abroad, puts forward the aim and idea of e-Science environment construction, describes the construction task of e-Science application demonstration for Chinese terrestrial ecosystems carbon cycle research, which consists of three work environments (data integrated environment, model simulation environment and visualization cooperative work environment) and four-level application system(typical ecosystems, typical region, China region and east asia region), and discusses the important role of developing integration research of terrestrial carbon budget in information construction of Chinese Ecosystem Research Network (CERN) and the development of ecological informatics in China.

Keywords: Carbon budget; e-Science; Terrestrial ecosystem; ChinaFLUX; CERN

1. 引言

全球气候变化是国际社会共同关注的重大环境问题，减少温室气体排放、抑制全球变暖进程是保护地球系统的重大国际行动，是人类社会共同承担的国际责任和义务。近20年来，陆地生态系统碳循环已成为地球系统科学和全球变化科学的前沿问题，也一直是国际地圈生物圈计划(IGBP)、世界气候研究计划(WCRP)和全球环境变化国际人文因素计划(IHDP)等重大科学计划的研究主题。各国相继启动了许多大型碳循环研究计划，如全球碳计划(GCP)[1]、北美碳计划(NACP)[2]、欧洲碳循环联合项目(CarboEurope-IP)等，试图开展从区域乃至洲际尺度开展碳循环过程及其区域响应的集成研究。

近年来我国启动了一批与碳循环相关的重大研究项目，如中国科学院重大知识创新工程项目“中国陆地/近海生态系统碳收支研究（2002-2006）”，国家973项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制（2002-2007）”，国家自然基金重大项目“我国主要生态系统对全球变化的响应与适应样带研究（2005-2010）”等。建立了以中国生态系统研究网络（CERN）为基础的包含8个通量观测站和16个箱法观测站的中国通量观测研究网络（ChinaFLUX），获取了大量的观测数据，在通量观测技术、典型陆地生态系统碳收支及其环境控制机理、生态系统碳水通量模型模拟等领域开展了大量研究工作，并取得了重要进展[3]。例如，初步估算了我国陆地生态系统的碳储量，引进并开发了陆地生态系统碳循环模型，模拟分析了区域/全国尺度的陆地生态系统碳收支格局及其对气候变化、CO2浓度升高的响应[4-9]。这些研究工作一方面为我国参与应对全球气候变化国际行动和制定行动方案提供了坚实的科学依据，一方面也为通过对我国陆地生态系统的碳汇管理，减缓温室气体减排和限排压力，保障生态安全、维持国家经济与环境可持续发展提供了科学数据和知识。

目前，我国的生态系统碳循环集成研究的科技活动还缺乏支撑野外观测自动仪器—野外台站—综合中心网络连接的高速网络环境、快速的数据采集、传输、分析、共享服务工具；缺乏自动化生成驱动区域/全国尺度的碳循环模型运算的GIS和遥感数据的数据处理工具；缺乏服务于生态系统碳循环模拟分析的模型运行和可视化环境；缺乏跨领域科学家的协同工作环境。这些e-Science环境的缺憾，导致了无法实现碳循环研究数据的有效整合、模型模拟的快速运算和可视化输出，更无法实现全国/区域碳收支状况的快速评估，影响了对国家外交谈判需求的快速反应，以及科研成果的快速产出。

e-Science的实质是“科学研究的信息化”，是信息时代中科学研究环境和科学研究活动的典型体现。分布式的、海量的科学数据是e-Science的基础，与观察实验、理论分析鼎足而立的科学计算是e-Science的核心，开放式的科学研究、大范围的资源共享、广泛的协同合作是e-Science的基本特点[10]。全球或区域生态系统碳循环研究具有多台站联网观测、数据多源、多模型综合分析、跨领域科学家协同工作等方面的特点，需要多个领域的科学家在不同尺度协同开展数据观测、数据分析、模型模拟等工作，需要高性能的计算环境支持，需要海量的、多种来源的、不同学科的数据支持。由此可见，生态系统碳循环研究已成为数据密集型工作，比以往任何时候都需要跨学科、跨越时间、空间、物理障碍的资源共享与协同工作，急迫需要开展e-Science应用和示范研究。

2. 国内外的研究现状及发展趋势

2.1 国内外研究现状

生态学领域的e-Science研究还处于起步阶段，其中美国长期生态系统研究网络（LTER）、美国国家生态综合分析研究中心（NCEAS）联合美国圣地亚哥超级计算中心、美国国家超级计算中心等多个机构在美国NSF的资助

下开展了一系列的与e-Science相关的研究项目。如SEEK项目、KNB项目，以及基于网格技术的LTER GRID Piolt 项目[11]等，开发出了一系列的生态信息学工具，包括服务于数据规范化和共享的元数据标准EML、元数据管理工具morpho、元数据共享服务器Metcat以及实现数据的管理、共享和服务的EcoGRID，也包括实现数据与模型在信息化环境下集成的科学工作流工具 Kepler。随着生态系统碳循环研究成为全球变化研究的热点和前沿问题，国际上也逐渐开展了以碳循环为主题的e-Science研究。其主要研究内容包括碳循环信息化环境的整体结构、数据的获取、管理和分析、碳循环模型研究等方面。

在碳循环的模型研究方面，美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和科罗拉多大学合作完成的GRID-BGC（基于网格技术的生物地球化学碳循环模型的开发）项目(2004-2005)，完成了Biome-BGC模型的网格门户原型的开发[12]。

在碳循环相关的数据采集、获取和处理分析方面，美国自然基金会(NSF)2006年资助的REAP(Real-time Environment for Analytical Processing)项目，以陆地和海洋生态系统中传感器获取的实时数据为研究对象，集成数据传输技术、数据分析技术以及工作流技术，开展了生态系统观测实时数据的快速传输与分析处理研究，提高生态系统野外观测数据的快速处理能力[13]。

在对通量数据处理与质量控制方面，由Microsoft 资助、Microsoft与AmeriFlux合作开展了以通量数据为基础的e-Science项目(2006-),采用数据仓库中的OLAP技术，实现通量数据的多维可视化分析，并开发了一系列基于Excel的通量数据处理工具[14]。

在碳循环信息化环境的整体结构研究方面，2007年美国Los Alamos国家重点实验室提出的Carbon Cyberinfrastructure概念，首次完整地给出了碳循环研究信息化环境的体系结构，提出Carbon Cyberinfrastructure是获取碳循环信息、模型以及求解碳循环相关科学问题的集成信息化环境，其主要由基础知识层（数据库和模型库）、MMV链（基础知识层与野外观测、监测数据、遥感数据的集成）、过程模型链（基础知识层中数据与模型的集成、多模型的耦合）、综合模型链（与动态系统的集成）、决策支持链（与决策支持的集成）组成。在GIS技术的支持下，定期发布国家层面的碳收支地图。该实验室指出Carbon Cyberinfrastructure是碳循环由研究走向管理和决策的重要手段，希望在不久的将来启动Carbon Cyberinfrastructure项目[15]。

中国生态系统研究网络（CERN）经过多年的建设，基本上完成了元数据国家标准、数据资源体系和数据信息系统三部分内容的建设，形成了具有自己特色的数据管理体系，已经与LTER、ECN形成了全球三大生态系统研究网络信息系统，为开展碳循环研究的e-Science 应用示范奠定了良好的基础。

在数据库及信息系统建设方面，依托院重大项目“中国陆地/近海生态系统碳收支研究（2002-2006）”建立了ChinaFLUX通量数据库，为开展典型生态系统尺度的碳循环及其驱动机制提供数据支撑；依托中国科学院“人类活动与生态系统变化”创新团队国际合作伙伴计划，建立了包括土壤、植被和土地利用、气象栅格数据以及土地资源数据在内的全国尺度的遥感和GIS数据库，为开展区域/全国尺度的碳循环研究提供了数据基础。

在数据处理和模型模拟方面，已经基于MATLAB平台，建立了通量数据处理系统，初步实现了通量观测数据由原始数据向数据产品的转化，建立了包括基于过程和遥感的不同生态系统生产力模型，实现了区域/全国尺度的生产力估算。

在传感器网络建设和应用方面，在禹城、千烟洲等野外站开展了基于传感器和数据采集器的联网研究。2008年5月，院地理资源所与计算机网络信息中心启动了中国通量网信息化基础设施建设示范项目（ChinaFLUX

Cyberinfrastructure:CFCI），以ChinaFLUX的四个野外台站为基础，以服务于站点尺度的碳收支集成研究为目标，研究通量数据的采集、传输、分析及可视化技术，通过示范性研究，以期推动整个中国通量网的信息化基础设施建设。

2.2 发展趋势

当前国际上碳循环的科研活动信息化环境建设的发展有以下几大趋势：

1）传感器网络技术在生态系统碳循环e-Science研究中日益重要，迫切需要提高数据的快速传输能力和观测的网络化程度，以获取更多的科学研究数据

未来的生态系统研究网络是传感器时代，以生态网络、通量观测、遥感观测为基础的碳循环研究也不例外。现阶段的通量观测虽然已经实现了自动化实时观测，但由于大部分通量塔地处偏僻，无法实现提供快速传输海量数据的服务基础设施。因此，迫切需要通过传感器网络技术的应用研究，提高实现数据的快速传输和实时分析处理的能力，提高观测的网络化程度，从而保证碳循环e-Science研究中数据的及时性和有效性。

2）分布、多源、异构数据的有效管理和共享是生态系统碳循环e-Science研究的基础

碳循环所涉及的数据类型较多，既有站点观测的实时数据，也有大量历史数据；既有遥感和GIS数据，也有大量的社会经济数据，不同类型的数据格式也不一样，因此需要通过对数据库技术的应用研究，有效管理这些不同格式、不同种类的数据，实现分布、多源、异构数据的有效管理和共享服务，从而充分发挥数据的价值。

3）支持多尺度的数据－模型融合，多模型比较是生态系统碳循环e-Science研究的核心

碳循环模型是认识陆地生态系统碳循环驱动机制、实现碳循环研究由站点尺度向区域尺度转变的基础，多尺度模型-数据融合、多模型比较是量化和减少碳循环研究不确定性的支撑手段，建模和数据分析在碳循环研究中起着至关重要的作用。因此是否具备支持数据－模型融合、多模型比较的高性能计算环境是碳循环e-Science研究成功与否的关键。

4）可视化和协同工作是实现辅助决策和服务于社会公众的重要手段，是生态系统碳循环e-Science的重要组成部分

科学可视化是辅助决策支持的重要技术，它将图形生成技术、图像处理技术和人机交互技术结合在一起，从复杂的多维数据中产生图形，从而能及时得到相关数据的直观、形象的整体概念。碳循环研究中采集的信息具有数量大、复杂和实时变化的特点，单单依靠对数据信息的分析，效率低下，很难及时获取有用的信息。如果能利用可视化技术，将各种碳循环数据信息和处理后结果数据以图表的方式展现给科研人员和用户，首先能便于科研人员快速发现在激增的数据背后隐藏着的一些重要信息、进而能对其进行更高层次的分析，以便更好地利用这些数据；其次能给决策人员根据可视化展现的信息快捷而果断的做出决策；最后给社会公众以浅显易懂的表现方式来描述数据本身隐藏的一些信息，从而更容易向社会大众普及更多的科学知识，实现科学普及。因此，可视化环境的构建是碳循环e-Science的重要组成部分。另外，随着信息技术的发展，越来越多的科学研究需要及时交流、协同工作。所以协同工作环境的建设可以为碳循环的研究人员提供一个方便的工作交流和沟通平台，从而能共同解决一些复杂问题，真正高效率地进行工作。

5）基于生态系统碳循环e-Science环境实现碳收支的快速评估是开展碳循环e-Science研究的重要产出

动态获取国家尺度的碳收支状况是碳循环研究的国家需求。基于碳循环e-Science环境开展碳循环研究，为实现碳收支的快速评估提供了技术支撑，同时也是开展碳循环e-Science应用示范研究的最重要产出。

综上所述，生态系统碳循环研究的科研活动信息化环境建设

在国内外还处于初期阶段，已启动的大部分项目都是针对研究构成中的某一环节实施的。还尚未启动一个综合集成的数据采集-传输-分析-多源数据管理-模型分析-可视化决策一体化的信息化环境研究项目。在我国率先开展综合性的生态系统碳循环e-Science应用研究，既可以促进我国生态系统碳循环科学和生态信息学的发展，最终必将推动我国e-Science技术的发展。

3. 中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设目标及其思路

基于我国生态系统碳循环研究和科学院中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设的基础设施现状和未来发展趋势，中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设目标是，构建生态系统碳循环联网观测和联网实验的数据采集与在线远程传输、数据分析与多源数据管理、模拟分析与可视化表达一体化的信息化环境。建设任务的具体目标为：

建成中国陆地生态系统碳通量观测网络（ChinaFlux）信息化基础设施（CFCI: ChinaFlux Cyber-Infrastructure），实现ChinaFlux野外观测数据及相关仪器设备监控数据的自动采集、传输、存储、管理、分析处理、发布与可视化，全面提升通量数据的质量与实时性。

形成中国陆地生态系统碳循环数据集成环境，以ChinaFlux的通量观测数据为基础，实现与卫星遥感数据、生态观测和实验数据、区域调查数据的整合与集成，提供各种类型的数据分析和处理工具，建成中国陆地生态系统碳循环数据集成分析的基础平台。

形成中国陆地生态系统碳循环模型系统及其模拟分析环境，实现陆地生态系统碳循环模型（遥感反演模型、生态过程模型）与多源碳观测数据（通量数据、生物计量数据和遥感数据等）的有机融合，为广大科研人员提供基于互联网的模型计算与综合分析科研环境。

形成中国陆地生态系统碳循环研究可视化环境，提供ChinaFLUX台站通量观测仪器的实时监控，各种碳循环数据、模拟和计算结果等可视化工具，支持科研人员通过互联网远程使用可视化环境与服务。

面向中国典型生态系统碳源/汇季节变化及其机制研究、中国典型区域生态系统以及全国陆地生态系统碳收支时空分布格局研究等具体科学问题，建成支持跨机构、跨地域和跨学科研究团队联合研究的e-Science环境及其应用示范系统。

为了实现上述建设目标，建设的整体思路是：

首先，基于我院信息化基础设施和ChinaFLUX科学研究的工作基础和新的需求，重点实现相关野外台站的联网观测和信息的网络化管理，实现野外观测的自动化、网络化，实现观测数据的自动采集、传输、存储、处理与共享。

其次，在上述工作的基础上，构建融数据、模型模拟、可视化以及计算等一体化的生态系统碳循环研究的信息化环境，实现资源的整合集成与共享，成为科研人员开展碳循环研究的信息化支撑环境。

最后，在全国和区域尺度的陆地生态系统碳收支研究方面，选择若干重点的区域和科学问题，构建面向科学问题的集成研究系统，实现科学研究与信息化环境的有机统一，发挥其示范和带动作用。

4. 中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设的主要内容

中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设任务是，以ChinaFLUX现有的8个野外观测台站为基础，通过一个由“三个工作环境”（数据集成环境，模型模拟环境，可视化协同环境）和“四个层次的应用系统”（典型生态系统、典型区域、中国区域、东亚区域）构成的中国陆地生态系统碳循环科学研究的e-Science应用示范体系，以满足我国生态系统碳循环科学

和生态信息学科学发展的需求，实现全国/区域/典型生态系统（站点）不同尺度碳收支状况的快速评估。如图1所表示。

4.1 中国陆地生态系统碳循环科学研究的三个工作环境建设

1）中国陆地生态系统碳循环数据集成与服务环境建设

应用传感器技术、数据库技术等多种信息技术手段，建立中国陆地生态系统碳循环通量数据集成与服务环境，实现ChinaFLUX（分布在全国的8个野外台站）通量数据从采集到传输、存储、管理、分析处理、发布和可视化的有机集成，实现区域/全国尺度生态系统碳循环研究的生态过程、遥感、气象等各类空间数据的有效整合和管理，建立ChinaFLUX数据库、气象栅格数据库和生态遥感数据库，开发碳通量和视频数据采集和实时数据远程传输、通量观测数据处理、气象要素空间化等一系列数据处理工具，为建立区域/全国尺度的生态系统碳循环研究提供数据基础及相关的数据处理工具。

2）陆地生态系统碳循环模型模拟环境建设

通过整合站点尺度的光合与呼吸模型、区域/全国尺度的碳收支卫星遥感和生物地球化学模型（如VPM模型、TECO模型等）、数据-模型融合方法（如MCMC方法、Kalman filter方法等），利用WEB services技术开发构造模型-数据融合系统的软件（具体形式为不同的WEB services）系列，建立陆地生态系统碳循环模型模拟环境，为生态系统碳循环的集成性模拟分析提供共享平台。

3）陆地生态系统碳循环可视化环境建设

组织开发生态系统通量观测数据的实时采集和可视化监控工具，实现对通量观测的关键仪器进行可视化监控和自动化报警；采用 WEB GIS和科学工作流（Kepler平台）技术，开发2D/3D可视化工具。

4.2 中国陆地生态系统碳循环e-Science科学研究的应用和示范系统建设

1）典型生态系统碳源/汇季节变化及其机制研究应用系统

基于中国陆地生态系统碳循环数据集成与共享服务环境，以中国生态系统通量网（ChinaFLUX）的8个通量观测台站为研究对象，利用开发的数据处理工具对实时获取的通量观测

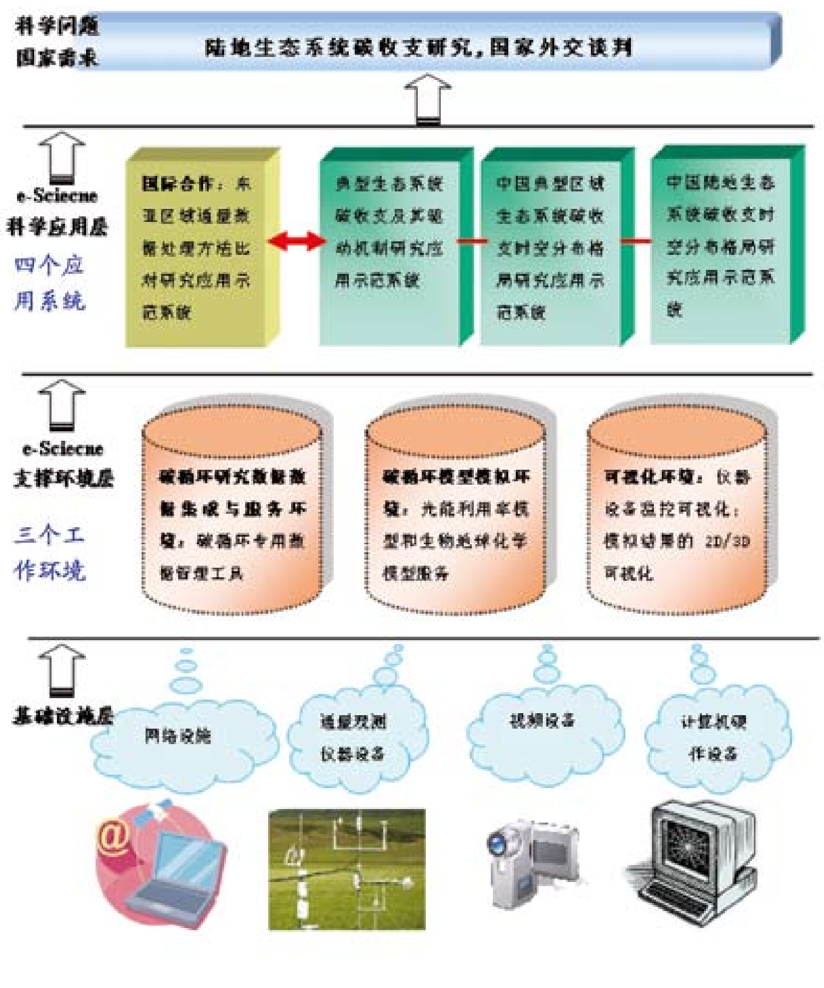


图1 中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设任务及其主要建设内容

数据进行快速处理和分析，利用对实时监控技术和通量数据分析工具评估野外通量观测数据的质量。同时，通过站点尺度碳循环模型集成和可视化环境建设，形成典型生态系统碳源/汇季节变化研究科学工作流，综合分析典型生态系统（农田、森林、草地等）碳收支状况的季节、年际变异及其控制机制，实现对中国典型森林、草地、农田生态系统碳源/汇的快速估算和评估。

2）中国典型区域生态系统碳收支时空分布格局研究应用系统

中国典型区域生态系统碳收支时空分布格局研究，是在样带和区域尺度上研究与分析处于不同地理空间的生态系统碳收支变异性及影响机制。本研究的重点是选取中国东部南北森林样带NSTEC（North-South Transect of Eastern China）和中国草地样带CGT（China Grassland Transect）为示范研究区域(如图所表示)，采用各种类型的生态系统碳循环数据、模型模拟以及模型-数据融合等方法，实现中国典型区域尺度碳源/汇的快速估算，构建服务于公众、服务于全球变化和碳循环研究的区域生态系统碳收支评估应用系统。

3）中国陆地生态系统碳收支时空分布格局研究应用系统

建立基于WEB 的中国陆地生态系统碳收支时空分布格局研究应用系统，为野外观测人员、数据管理人员和模型模拟人员等跨领域科学家的协同环境，发展可以服务于中国陆地生态系统碳收支时空分布格局分析的数据集成、共享服务、模型模拟，以可视化表达的应用技术系统，实现全国尺度的多时空分辨率碳收支的快速估算，从而服务于国家外交谈判、社会公众和科学研究。

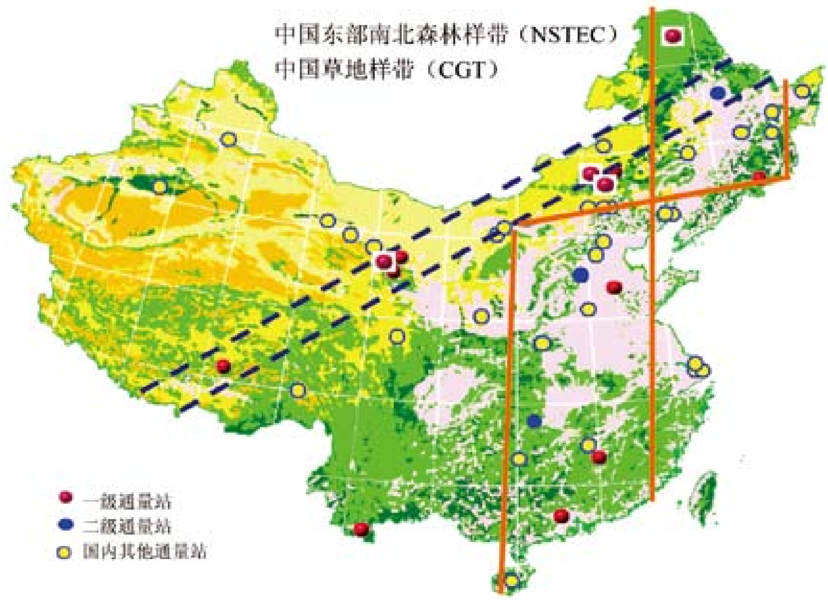


图2 中国东部南北森林样带（NSTEC）和中国草地样带（CGT）示意图

4）东亚区域通量数据处理方法比对研究应用系统

综合利用上述4个系统的研究成果，探讨适合东亚季风区生态系统通量数据处理方法与技术，利用国家基金委的中日韩三国联合基金（A3）重大项目基于通量观测网络的生态系统碳循环过程与模型综合研究（CarbonEastAsia）为工作平台，开展生态系统通量特征的多站点和多情景数据的对比分析，建立东亚地区陆地生态系统通量观测数据处理的方法与技术共享体系。

5. 结论

通过开展服务于中国陆地生态系统碳收支集成研究的e-Science环境建设和应用示范，将建立我国第一个陆地生态系统碳循环观测网络ChinaFLUX信息化基础设施，实现野外台站Flux观测设备的网络互联，实现野外观测数据的实时传输、存储、处理与共享服务。该项研究工作将为我国生态系统碳循环观测网络的信息化提供示范作用，推动我国的生态系统通量观测事业的发展，推动和促进我国生态信息学

和碳循环研究学科的发展。与此同时，该项研究工作也将会带动我国生态系统研究网络（CERN）的信息化建设，为野外台站联网、仪器设备的网络监控、数据实时采集、传输、处理等信息化建设提供良好的解决方案和经验；还会带动其他领域的科学研究（如水循环、物候、生态系统评估等）的信息化基础设施建设，全面推动我国全球变化和生态学科的发展。

参考文献:

[1]Liese Coulter,Pep Canadell,Shobhakar Dhakal,A GCP report for the ESSP,CARBON REDUCTIONS AND OFFSETS,2007,http://www.globalcarbonproject.org/index.htm.

[2]2003 The U.S. Climate Change Science Program. Vision for the Program and Highlights of the Scientific Strategic Plan.A Report (41 pages) by the Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research.

[3]Yu GR,Fu YL,Sun XM，et al.Recent progress and future directions of ChinaFLUX.Science in China Series D,2006a，49(Supp II):1-23.

[4]于贵瑞，孙晓敏，等.陆地生态系统通量观测的原理与方法.北京：高等教育出版社，2006.

[5]于贵瑞，孙晓敏.中国陆地生态系统的碳通量观测技术及其时空变化特征.北京：科学出版社，2008.

[6]Yu G.R.,Zhang L.M.,Sun X.M..Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in eastern China.Global Change Biology.14,1-17,doi:10.1111/j.1365-2486.2008.01663.x.

[7]Zhao L,Li YN,Xu SX,et al.Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO2 exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan plateau.Global Change Biology,2006,12:1940-1953.

[8]Zhou GY,Liu SG,Li Z，et al.Old-growth forests can accumulate carbon in soils.Science,2006，314:1417.

[9]李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳储量.中国科学(D辑),2003，33:72-80.

[10]National Science Foundation.Cyberinfrastructure Vision for 21st Century Discovery. www.nsf.gov/od/oci/ci_v5.pdf，2006.

[11]Randy Butler,Mark Servilla，et al.Cyberinfrastructure for the analysis of ecological acoustic sensor data:a use case study in grid deployment.Cluster Computing,2007，10:301-310.

[12]Thornton,P.E.Biome-BGC:Modeling Effects of Disturbance and ClimateModel product.Available on-line [http://www.daac.ornl.gov] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center,Oak Ridge,Tennessee,U.S.A.,2005.

[13]Environmental Cyberinfrastructure Needs For Distributed Sensor Networks.workshop held August 12−14.information available at http://www.lternet.edu/sensor_report,2003.

[14]Gretchen Miller,The AmeriFlux Cyberinfrastructure Prototype−Introduction and Applications.bwc.berkeley.edu/home/presentations/Ameriflux_wg3.

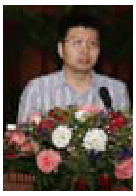
[15]Paul M.Rich,Gordon N.Keating，et al.A Vision for Carbon Cyberinfrastructure.www.bigskyco2.org/presentations/chapman−cyberinfrastructure−18jan05.ppt，2007.

收稿时间:2009年3月31日

作者信息

于贵瑞

中国科学院地理科学与资源研究所研究员，博士生导师，副所长，主要研究方向为SPAC系统内的水分运动、植物生理生态、陆地生态系统通量观测的理论和方法、生态系统通量的过程机理及其模拟分析、生态系统碳水循环及其管理，生态信息科学和数据共享。



何洪林

中国科学院地理科学与资源所副研究员，博士，CERN综合中心副主任，主要研究方向为生态信息学。

黎建辉

中国科学院计算机网络信息中心正研级高工，博士，科学数据中心主任，主要研究方向为科学数据库建设与共享。