

生态系统科学研究与生态系统管理

于贵瑞,李文华,邵明安,张扬建,王绍强,牛书丽,
何洪林,戴尔阜,李发东,马泽清

(中国科学院地理科学与资源研究所 中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101)

摘要: 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统学科以生态系统生态学研究为核心,通过研制生态系统观测和模拟分析的技术和方法,探索解决区域性/大尺度生态学问题的理论和方法,监测生态系统变化,认知生态系统变化规律,推动生态系统生态学、生物地理生态学、全球变化生态学和生态信息科学技术的发展,创新生态系统管理模式,服务于国家和地方的生态建设、应对全球变化及区域可持续发展。面向国家重大需求,在中国华北平原农业区、南方红壤丘陵林业区、青藏高原农牧区以及黄土高原区等典型区域开展生态系统管理技术与模式的集成与创新研究,着力解决国家生态文明建设和应对全球气候变化中的重大生态学问题,推动区域生态系统管理领域的科技进步。围绕生态系统生态学学科前沿,着重在①生态系统联网观测、模拟与信息管理,②生态系统结构、过程与功能,③生态系统空间格局与机制,④生态系统对全球变化的响应与适应,⑤生态系统管理与生态系统服务等五大主要研究方向,系统开展生态系统生态学前沿理论和实践的创新研究,研究成果处于国内和国际生态学研究科学前沿。

关键词: 生态系统;生态信息;全球变化;生态系统管理;生态系统服务;可持续发展

DOI: 10.11821/dlxb202012006

1 引言

中国科学院地理科学与资源研究所(简称地理资源所)生态系统学科起源于中国科学院综合考察资源委员会(简称综考会)。20世纪50—80年代综考会组织了国内大规模的基础科学考察。考察结束后,孙鸿烈、阳含熙和李文华等老一辈科学家意识到需要在中国典型区开展长期的定位生态监测工作。当时选择了青藏高原、华北平原和南方红壤区分别建立了野外生态观测和研究定位站。基于这些台站和中国科学院其他研究所的台站,在1988年中国科学院成立了国家生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN),正是这些野外台站和研究网络为地理资源所的生态学科打下了坚实的基础。经过几十年的发展,地理资源所生态学科定位于以生态系统生态学研究为核心,针对农田、森林、高原生态系统以及区域和国家尺度的重大生态问题,综合研究生态系统与环境变化的关系及调控管理的理论和技术,致力于典型生态系统、区域和国家尺度生态系统动态过程和空间格局变化的网络观测,以及模拟理论和分析关键技术创新,发展和完善基于生态系统网络的观测、实验、研究体系,推动生态信息获取、管理和整合分析的理论创新和技术进步。具体包括如下五个主要研究方向。

收稿日期: 2020-10-22; 修订日期: 2020-12-11

作者简介: 于贵瑞(1959-), 男, 辽宁大连人, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事生态学与自然地理学交叉研究。

E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

通讯作者: 张扬建(1976-), 男, 江西万年人, 研究员, 主要从事高寒生态系统与全球变化研究。

E-mail: zhangyj@igsrr.ac.cn

(1) 生态信息的数据管理与模拟分析。生态数据信息的采集、传输、集成分析和知识挖掘是生态学研究的基础,生态信息技术的突破是推动现代生态科学研究事业发展的重要动力。该方向以生态信息科学为理论指导,致力于研究生态科学数据采集—传输—管理—分析—共享的新技术、新方法,开发服务于生态系统科学研究和国家生态系统管理的信息系统和数据共享平台,研发生态系统模型及模型数据融合系统,针对典型生态系统、区域和国家尺度、全球尺度的重大生态问题开展模拟分析和决策支持。于2019年成立了国家生态科学数据中心,成为中国最大的生态系统科学数据资源共享平台,引领了中国生态信息科学与技术的发展,提升了中国在国际相关领域的学术地位。

(2) 生态系统碳氮水通量及其耦合机制。全球变化深刻影响着生态系统碳、氮、水循环过程,而后者变化又反馈影响全球变化。研究生态系统碳、氮、水循环过程一直是国内外生态学研究的前沿,也是中国增加陆地碳汇、应对全球气候变化、减缓中国减排和限排压力的重大科技需求。2000年以来,通过联网观测、样带调查、数据集成与整合分析,结合稳定性同位素和分子生物学技术等研究手段,该方向取得了一系列重大原创性成果,系统地揭示了陆地生态系统碳—氮—水通量动态过程、时空变异格局及其耦合驱动机制,形成了中国陆地生态系统碳—氮—水耦合循环的理论框架和应用基础。

(3) 陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制。以气候变化为标志的全球环境变化对陆地生态系统产生了深刻影响,生态系统对全球变化的响应、适应及其反馈机制是生态学研究的前沿领域。目前对陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制认知还极为有限。2000年以来,基于原位控制实验、长期定点监测以及整合分析等多种研究手段,从不同时空尺度,研究陆地生态系统变化及其生物和环境调控机制,取得了一系列重大原创性成果,并形成了“多手段—多尺度”研究陆地生态系统与全球变化的整体优势,完善和推动了中国乃至全球该研究领域的发展。

(4) 生态系统功能及特征的生物地理格局。生物地理学是地理学与生物学的交叉学科,是研究生命组织单元的分布规律及其驱动机制的科学。该方向致力于生态系统结构和功能空间格局的研究,在植物功能属性、植被生产力、生态系统碳源汇研究方面取得了开创性的成果,有力地推动了大陆尺度的宏系统生态学研究。经过64年的发展,特别是近15年的发展,以生态系统功能为特色的生物地理生态学已建立了国内领先、国际一流的学科体系,成为中国生态学与生物地理学研究领域的核心力量。

(5) 生态系统管理与生态系统服务。生态系统管理是合理利用自然资源和保护生态系统健康最有效的途径。该方向致力于解决国家生态文明建设和应对全球气候变化中的重大生态问题,推动区域生态系统管理领域的科技进步。面向国家和地方需求,基于全球变化下生态系统理论及机理研究,在中国华北平原农业区(山东禹城农田生态系统国家野外科学观测研究站)、南方红壤丘陵林业区(中国科学院千烟洲亚热带森林生态系统观测研究站)、青藏高原农牧区(西藏拉萨农田生态系统国家野外科学观测研究站)以及黄土高原区等典型区域开展生态系统管理技术与模式的集成与创新研究,取得了较好的成效,得到了地方的高度认可。

2 发展历程

2.1 生态信息的数据管理与模拟分析

自1999年中国科学院生态系统网络观测与模拟重点实验室成立,生态信息的数据管理和模拟分析团队历经四个阶段的发展,已经成为国内外具有重要影响力的研究团队。

第一阶段(1999—2004年),主要开展了中国生态系统研究网络(CERN)长期动态监测数据信息化、数据库标准规范研究和数据库应用建设工作,形成了台站—分中心—综合中心三级数据质量控制体系,初步形成规范化的长期生态监测数据库,并发布了《中国生态系统研究网络数据管理和共享条例》,开创了生态数据开放共享的先河,引进了生态系统过程模型CEVSA和AVIM,陆续开展陆地生态系统生产力和碳循环过程机理及时空变化研究。

第二阶段(2005—2009年),研制了生态科学数据元数据国家标准,构建了分布式的CERN/CNERN数据共享信息系统,提升了野外台站和生态系统网络的信息化水平,首次以基于Web的服务系统方式为用户提供系统的、动态的、连续的生态系统监测数据共享服务;开发了具有自主知识产权的生态系统模型CEVSA2和AVIM2,揭示了中国陆地净初级生产力、土壤呼吸和净生态系统生产力的时空分异规律以及对气候变化的响应特征。研究成果“中国陆地生态系统生产力和碳循环研究”获2005年国家自然科学二等奖,“中国生态系统研究网络信息系统建设的关键技术及其应用”获2008年环境保护科学技术一等奖。

第三阶段(2010—2014年),构建了中国生态网络的“数据管理—分析工具—模拟模型”协同共享信息系统,实现了野外观测数据采集、传输、处理、分析、发布、模型模拟的一体化架构,构建了中国陆地碳循环模拟与碳收支评估的数据—模型融合系统,自主开发了中国陆地生态系统时空变化系列特色数据产品,系统性地应用于中国陆地生态系统变化评估,提升了国家层面生态系统网络的综合服务能力。研究成果“陆地生态系统变化观测的关键技术及其系统应用”获2011年国家科学技术进步二等奖。

第四阶段(2015年至今),先后成立生态系统大数据与模拟中心、CERN数据中心、国家生态科学数据中心、中国科学院生态科学数据中心。完成基于云计算与云服务的生态网络云平台建设,实现了实物资源、数据资源、成果资源、人才资源等多种资源的汇聚与服务。通过融合多源、长期观测数据与生态系统模型,推动联网监测数据挖掘分析和区域应用研究进入新的发展阶段,研究区域拓展到全球尺度,更加关注为应对气候变化、生态文明建设等国家需求提供科技支撑。

2.2 生态系统碳氮水通量及其耦合机制

在中国科学院知识创新工程重大项目和国家“973”计划等项目的支持下,2002年创建了中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)平台,开启了中国典型陆地生态系统CO₂、H₂O、能量通量的长期连续观测^[1-3]。经过10余年的不断发展和壮大,ChinaFLUX的观测站点已经由最初的8个扩展到目前的80余个,涵盖了中国主要的地带性陆地生态系统类型。在观测生态系统碳水通量的同时,研发了大气环境的氮、磷等元素沉降观测技术体系,并于2013年组建了中国典型生态系统大气湿沉降观测网络(ChinaWD)。同时,引进国际上领先的TDLAS(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy)稳定同位素观测技术,实现了ChinaFLUX站点生态系统碳、氮、水通量及 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 通量的协同观测。目前,ChinaFLUX已发展成为长期连续的通量观测与控制实验研究有机结合,多种温室气体的交换通量—环境要素—生态过程综合观测,以及生态系统碳—氮—水通量与循环过程协同观测的国家层面的多尺度—多要素—多过程的综合观测研究网络。

2.3 陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制

陆地生态系统对全球变化响应和适应是生态系统网络观测与模拟重点实验室重要研究方向之一,经过四个阶段的发展,已经形成了具有鲜明特色和重要影响力的研究团队。

第一阶段(1999—2004年),主要采用样点和样带观测、大尺度遥感观测和过程机理模拟等手段,认知陆地生态系统对全球变化的响应和反馈机制。

第二阶段(2005—2009年),主要通过野外原位控制试验,结合自然温度和降水梯度(样带法),系统地分析中国典型陆地生态系统对未来气候变化的响应与适应机制。

第三阶段(2010—2014年),采用全球变化控制实验、长期定点监测及模型模拟等研究手段,开展了典型区域、中国、东亚及全球陆地生态系统对全球变化关键要素的响应和适应的研究。

第四阶段(2015年至今),综合采用“多手段(联网观测、联网控制实验及整合分析)—多尺度”研究方法,整合全球多源数据,揭示陆地生态系统对全球变化的响应和适应机制。

2.4 生态系统功能及特征的生物地理格局

生物地理学研究始于1978年,发展于1988年生态系统观测研究网络,是生态系统网络观测与模拟重点实验室的核心发展方向之一。

第一阶段(1978—1990年),为了在中国发展全球生物学计划(IBP),1978年阳含熙和李文华对长白山进行科学考察,开展了生物地理群落结构与功能的研究,倡导并发展了植被数量生态学,对中国森林地理分布、结构功能与生产力进行了深入研究和系统总结。

第二阶段(1991—2005年),随着全球变化科学的兴起,将数据与模型融合以预测生态系统功能和格局的任务迫在眉睫。基于全国尺度的森林和草原调查,集成分析近100万个数据,建立了中国主要森林类型生物生产力格局与数学模型^[4],评估了主要森林生态系统碳储量,阐明了植物净第一性生产力、土壤碳氮储量的空间格局^[5],并率先提出了多尺度试验观测和跨尺度机理模拟^[6],发展了基于过程机理的生态系统模型,揭示了生态系统生产力时空分异规律以及对气候变化和人类活动的响应机理^[7]。

第三阶段(2006—2014年),以系统、规范的数据和生态学理论知识作为科学基础,对中国主要陆地生态系统对全球变化的响应与适应性进行了样带研究,对草地生态系统生产力格局进行了评估与模拟^[8],揭示了东亚是北半球碳汇的热点区域^[9];并以中国科学院先导项目“碳专项”为己任,研究了中国陆地生态系统固碳能力的强度和空间分布,评估了重大生态工程的固碳作用,证实了增加生物多样性可增加土壤碳储量。

第四阶段(2015年至今),由于演化生物学和基因组学的介入,生物地理的研究由描述格局走向成因分析,从而建立了大尺度地理格局与长时期生物演化历史之间的联系。例如,以“植物群落性状为基础构筑了联系传统性状与宏观生态研究的桥梁^[10];植物根系功能性状的生物地理格局及进化趋势,从根的角度首次阐明了植物进化原理^[11],实现了生物地理学研究从跟踪、并跑到引领的跨越式发展。

2.5 生态系统管理与生态系统服务

在中国三大典型区,分别以农田、森林和草地生态系统为对象,通过长期实地的科学研究和地方合作,大大提升了生态系统管理的能力和水平。

在位于华北农田区的禹城于1979年成立禹城综合试验站,1988年成为CERN农田生态系统试验站,1999年成为农田生态系统国家野外科学研究站,2006年正式成为国家生态系统网络试验站。禹城站以水、土、气候、生物等自然资源的合理利用与区域可持续发展为目标,深入开展地球表层的能量物质输送和转换机制、模型的建立和空间尺度转换方法的实验研究,进行测定方法的革新与仪器的改进和研制,结合多学科多手段研究农田生态系统的结构、功能过程,开展生态系统优化管理模式和配套技术的试验示范。

经过40年的长期研究积累,在农田生态系统水分和能量转换机理、作物生长过程和生态学机制、实验遥感技术、农田节水技术、农业试区试验示范等方面形成了优势。

在南方红黄壤区的江西省泰和县于1988年成立了千烟洲红壤丘陵综合开发试验站,1990年成为国家区域农业综合发展试验示范区,1991年加入CERN,2002年加入ChinaFLUX,2014年先后与中国环境科学研究院井冈山生态环境综合观测站、江西农业大学九连山森林生态系统定位观测研究站签订长期合作协议,建成“一站四点”的空间布局。千烟洲站重点开展亚热带农林生态系统结构和功能优化模式研究,亚热带常绿阔叶林生态系统结构与功能研究以及农林生态系统碳氮水循环过程及调控机制研究。经过30多年的长期研究积累,在区域农业综合开发示范、中亚热带红壤丘陵生态系统恢复与重建的过程及其环境效应,红壤丘陵区水土资源的可持续管理等方面形成了优势。

在位于一江两河的拉萨河谷(西藏自治区拉萨市达孜县)于1993年成立了拉萨高原生态试验站。拉萨站海拔3688 m,是世界上海拔最高的农业生态试验站。拉萨站2003年加入CERN,2005年成为国家野外科学观测研究站(CNERN),2013年加入中国高寒区地表过程与环境观测研究网络(HORN)。经过20余年的发展,拉萨站已经形成了4个研究基地、3条观测样带以及1个研究中心的布局,拉萨站立足于国家和西藏自治区地方需求,通过对高原生态环境要素的长期监测,对高原典型生态系统的变化及其机理进行定位研究,建立高原农牧业可持续发展优化模式,为青藏高原生态学研究提供技术支撑和服务平台。

基于生态系统管理方面的成果,自2001年起生态系统观测与模拟重点实验室组织开展了生态系统服务功能的研究,系统总结了国内外在一些典型生态系统方面所开展的工作及研究成果,探讨了国际上有关生态系统服务功能评价的方法、发展现状及趋势,全面总结了我国典型森林、草地、湿地、水域、防护林带等生态系统服务功能的评价方法与最新研究成果,出版了《生态系统服务功能研究》论文集^[12],是该领域国内较早的一份科研文献。

3 主要成就

经过多年的努力和发展,地理资源所生态系统科学在上述五个研究方向取得了长足的发展。首先从改进数据获取途径入手,规范数据获取方法,建立生态数据库;基于获得的数据,揭示了生态系统对全球变化的响应机理及区域分异规律;在理解生态系统和环境要素关系的基础上,提升了生态系统管理能力和水平,促进了地方经济发展。

3.1 生态信息的数据管理与模拟分析

构建了适用于长期生态观测数据管理与共享的标准规范体系,保障数据集成、管理与共享服务的标准化、规范化和制度化。研究所学者先后参与了长期监测规范2套9本、长期观测质量管理规范1套4本的编制以及《CERN数据共享和管理条例》《生态科学数据元数据》(GB/T 20533—2006)的制定,主持制定了生态站编码规范、长期生态学数据资源元数据标准、长期观测数据库建库规范等10多项标准规范;建成了“长期联网观测—专项观测—科学研究”三类数据资源体系,该体系体现了多源、多尺度、多要素、多关联的数据特征。其中,生态系统长期联网观测数据已成为中国生态环境领域独具特色的系统性、规范化长期联网定位监测数据资源。该数据资源涵盖了44个生态站,按照统一的监测指标和技术规范,获取了中国典型生态系统的水分、土壤、大气和生物等4个学科大类的数据,数据记录长达20多年,涉及近300个监测指标,总量达2000多万条记录。

探索多种数据共享服务模式,促进生态科学数据共享。为推动长期观测数据的开放共享,建立了多种数据共享服务模式,呈现多种模式齐头并进的趋势,并取得了一定的服务成效。主要服务模式包括:① 共享系统模式,通过不断应用新的信息技术,升级改造数据共享系统,提升数据共享效率,使生态网络的数据共享服务实现了由集中式数据服务、分布式共享服务到电子商务式数据服务的转变,注册用户数、访问量、数据服务量逐年递增,并呈快速增长趋势。② 出版物模式,通过各类出版物的出版、发行,既有效保护数据生产者知识产权,又拓展了数据用户范围。③ 国际合作模式,与DataONE (Data Observation Network for Earth) 合作,成为其成员节点 (<https://data-en.cern.ac.cn/metacat>),通过其服务规程向国内外科研人员和公众提供CERN国际共享数据的申请和下载等服务。

建设基于云计算的生态系统网络科研信息化环境。根据大数据时代生态系统观测的特点,以科学数据全生命周期管理为指导理论,构建了生态大数据云平台,主要由三部分组成:① 支撑野外生态站多要素观测数据采集的数字生态站综合信息管理平台(海端);② 支撑生态数据存储管理、挖掘分析与共享服务的生态大数据模拟分析与共享服务平台(云端);③ 支撑云海两端协同的多源数据远程传输与监控平台。整个平台实现了生态监测“数据采集—传输—存储—管理—处理—模型模拟—集成分析—共享服务”的一体化运维,引领了中国野外生态站的信息化建设,极大提升了野外生态站的信息化能力,转变了野外生态站科研活动的模式

改进和发展生态系统模型与模型数据融合技术。基于生态系统联网观测和试验数据,改进了自主研制的AVIM2、CEVSA2模型,推动了中国生态系统过程模型的发展。在AVIM2中增加了氮循环过程,在中国气象局得到成功应用和推广,并参加了全球碳循环模型比较,同时被列入泛欧亚国际实验研究计划(PEEX)推荐采用的模型之一,研究成果被IPCC第五次评估报告引用(IPCC-AR5第6章)。构建了碳氮水耦合循环模型CEVSA2,在国家尺度上模拟分析了氮沉降对中国森林碳循环的影响^[13],引进了国际主流模型CLM 4.5模型和DALEC模型,模拟分析了中国陆地生态系统碳通量的变化^[14-15]。通过集成创新构建了陆地生态系统碳循环模型数据融合技术,建立了不确定性分析方法体系,定量评价生态系统模型关键参数及其模拟结果的不确定性,提高模型模拟精度^[16-17]。开展了站点/区域尺度的碳水通量模型数据融合应用,量化并拆分了碳通量模拟的不确定性及其误差来源,降低了站点/区域尺度碳水通量模型模拟的不确定性^[18-19]。结合联网观测数据,实现了碳循环的非平衡态反演,揭示了传统平衡态假设对森林固碳功能评估的影响^[15],为促进CERN联网研究、深入挖掘长期联网观测数据提供了新思路。

3.2 生态系统碳氮水通量及其耦合机制

评估了中国陆地生态系统的固碳现状、速率、潜力及机制,量化中国陆海交错带蓝碳分布和固碳潜力,揭示了中国区域陆地与近海碳收支的环境驱动机制。通过多源历史数据整合,系统研究了中国区域陆地生态系统固碳现状,发现中国陆地生态系统20世纪80年代至21世纪初每年约固碳 $0.201 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$,森林生态系统是固碳的主体,而草地处于弱源/弱汇间波动,湿地整体表现为碳源。基于ChinaFLUX的长期观测数据,系统评价了中国主要陆地生态系统碳通量和碳汇/源强度及其年际变异特征,并构建了生物地理学统计模式,对中国陆地生态系统的碳收支和气候潜力值进行了定量评估。研究表明2001—2010年的中国区域陆地生态系统总初级生产力、净生态系统生产力和生态系统呼吸的年总量分别为 $7.51 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $1.91 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $5.82 \text{ Pg C} \cdot \text{a}^{-1}$,分别占全球总量的4.29%~6.80%、9.10%~12.73%、5.65%~6.06%^[20]。系统评估了中国森林固碳潜力以及生态

工程与草地管理对碳收支的影响,发现中国重大生态工程的固碳成效显著,2000—2010年间中国生态恢复工程区域的总固碳速率为 $132 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$,六大生态恢复工程区的总固碳量约占全国陆地的56% ($74 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$)^[21];基于全球和中国数据的整合分析,评估了全球及中国蓝色碳汇渔业,发现中国的特色渔业使中国具有非常高的蓝色碳汇^[22]。此外,系统评估了中国河流向近海的年均碳输送量,并探讨了1980—2015年氮沉降格局变化^[23]以及2006—2010年中国河流年N/P输入对近海碳收支的影响^[24],定量阐明了区域陆源N/P与近海C的耦合循环过程。

揭示了东亚季风区亚热带森林生态系统的高碳汇功能及其驱动机制,阐明中国、亚洲、全球陆地生态系统碳收支的空间格局和生物地理生态学机制。综合分析全球和中国通量网20世纪90年代至21世纪初的涡度相关碳交换通量观测数据,揭示了东亚季风区亚热带森林生态系统的高碳汇功能及其驱动机制,发现 $20^{\circ}\text{N} \sim 40^{\circ}\text{N}$ 东亚季风区亚热带森林生态系统是高碳汇功能区,挑战了过去认为“仅欧美温带森林是主要碳汇功能区”的传统观点^[9]。系统揭示了中国、亚洲、全球陆地生态系统碳通量的空间格局及其生物地理学调控机制^[25],阐明年均温和年总降水量的空间格局对区域碳通量空间变异的主要调控作用,揭示了生态系统碳通量组分在空间变异格局上的同向偶联共变现象,并阐明其形成机制^[26]。此外,系统评估了中国陆地生态系统的碳素利用效率、空间变异格局及影响因素。利用遥感模型模拟及数据计算系统揭示了全球尺度生态系统碳利用效率的时空格局及其驱动要素^[27]。

阐明生态系统碳—氮—水通量的耦合过程机理、相互平衡关系及其生物与环境调控机制。基于碳—氮—水平衡和碳饱和理论,系统评估了中国陆地生态系统水分利用效率以及固碳耗水成本的时空格局,揭示了中国陆地生态系统水分利用效率及固碳耗水成本在400~500 mm降雨分界线存在临界变化,指出在该边界以北大规模造林存在一定的环境风险。发展了生态系统蒸散机理模型,实现对中国典型草地生态系统蒸散的准确拆分。量化了中国典型草地生态系统土壤蒸发贡献的大小,揭示了蒸腾蒸散比时空变异的控制机制。系统研究了年降水总量、降水季节分布特征、降水时间对中国典型草地生态系统地上生产力的影响,提出了生态系统最大降水利用效率并非保守。发现土壤 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 通量三者存在复杂的协同、消长和随机型的耦合关系,并量化了基质可利用性对土壤碳氮气体通量的贡献率,全面认识了土壤碳氮气体通量的环境驱动机制。揭示了中国区域土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间格局,指出气候因子和养分有效性对土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 空间格局的主要调控作用。系统地阐明了关键带碳、氮、磷生物地球化学循环与水文过程的内在耦合关系,揭示了流域C、N、P降雨径流过程中的驱动机制。

阐明中国大气氮、磷、酸及重金属沉降通量的时空格局与主控因素,评估了湿沉降潜在的生态环境效应。基于全国45个生态站组成的中国湿沉降观测网络的联网实测雨水有机氮、总氮、颗粒态氮、磷、pH和重金属数据,系统性地定量评估了中国区域大气(湿)氮、磷和重金属沉降,首次从区域尺度报道了磷沉降空间格局,并发现中国大气湿沉降中的可溶性N:P比高达77:1,远高于植被和土壤N:P比,提出“不平衡的氮磷输入可能增强生态系统磷限制效应”假设。系统估算大气氮沉降的森林生态系统固碳效应约为 $9.6 \sim 27.7 \text{ kg C} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ N}$,氮沉降的固碳效率从南至北逐渐增大。在样带和全国尺度上揭示了大气氮湿沉降的时空变异特征及其影响因素。引入遥感反演和卫星观测技术,系统分析了1980年以来中国和全球大气氮干沉降的时空变异规律及其驱动因素^[28]。发现了中国大气氮沉降整体趋于稳定或有下降趋势,氮沉降逐步达到 NO_3^- 和 NH_4^+ 平衡,干湿沉降基本平衡^[29]。该结论颠覆了“中国氮沉降将逐步增加”的传统观点,并且发现中国氮沉

降出现了两个组分转换趋势,由于干沉降与湿沉降、 NO_3^- 与 NH_4^+ 生态效应的不同,促使人们重新思考和重新评估大气氮沉降的生态效应,并为模型模拟和野外控制实验设置等提出新视角或挑战。

3.3 陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制

全面解译陆地生态系统生产力的时空格局及其过程机制是准确预测大气 CO_2 浓度变化效应的关键,对解析大气 CO_2 浓度波动、应对大气 CO_2 浓度上升挑战和维持生态系统可持续发展具有至关重要的意义。通过整合分析长时间序列的全球陆地生态系统净碳交换数据,从时间动态角度系统阐明陆地生产力长期变化趋势与年际变异的特征规律,并基于把净生产力分解为碳吸收最大速率和碳吸收时期的新视角,首次揭示碳吸收最大速率和碳吸收时期对净生产力年际变异的重要调节机制,并提出新一代“气候因子—生态系统过程—生产力年际变异”概念框架^[30-31];从空间格局角度成功的建立基于系统动力学的系统突变理论与草地生产力动态指标之间的联系,并应用于预测生态系统状态的转变^[32]。

阐述土壤氮基质影响陆地生产力的一系列机理过程。尽管目前碳循环研究已经比较成熟,但是氮循环研究由于其本身的复杂性等原因还比较薄弱,尤其缺乏系统阐述影响陆地生产力的氮基质调控机制。通过整合分析206个氮添加实验,揭示了全球氮循环的普遍模式并提出“氮基质控制假说”。新观点从生态和生物学机理上阐明生态系统氮循环的普遍规律,对更准确地预测全球变化背景下陆地生产力的动态变化提供实验证据和新的理论框架。并进一步量化全球陆地生产力的氮饱和和阈值及其引发的土壤酸化等环境问题。最终基于大尺度植物养分数据提出新的化学计量概念框架:变化环境中植物元素浓度及它们之间的化学计量平衡不仅受到土壤养分的影响,同时还受到植物本身维持其多种功能养分需求的影响^[33-35]。

揭示了地下根系和微生物响应全球变化的过程机理。相比于生态系统地上生态学过程研究,地下根系过程迄今为止依然是全球变化科学领域的研究难点。基于大气氮沉降模拟控制实验,对亚热带典型人工林近10000条根系的生长、死亡、周转、分解完整动态过程进行原位动态监测研究,研究首次基于根系功能模块理论,从根系性状角度诠释氮沉降是南方人工林土壤碳汇增加的主要形成机制之一^[36]。基于全球数据整合分析,揭示了森林植物多样性对森林碳和养分循环的影响机制^[37]。土壤微生物是生物地球化学循环的驱动者,探讨植物和微生物对养分的竞争是揭示生态系统生产力的生物调控机制的关键所在,但截至目前对该领域的研究依然存在许多未知。基于野外长期养分输入实验平台,结合室内同位素示踪与培养试验,阐明了微生物激发效应的强度与方向受到外源氮素输入的化学形态、剂量以及可利用性碳的输入频次的影响^[38-39]。

揭示了中国陆地生态系统对全球变化关键要素响应和适应的过程和机理。在以往联网观测、全球变化原位控制实验以及整合分析等单一研究手段基础上,采用“多手段—多尺度”研究方法,整合全球多源数据,探讨陆地生态系统对全球变化的响应和适应。通过对不同遥感数据的融合,发现了青藏高原植被物候对全球变暖具有明显的响应,理清了过去有关青藏高原植被对气候变化响应方面的争论^[40]。基于控制实验的机理研究与全球整合分析相结合的方法,探讨了增温效应的水分调节机制,揭示了水分可利用性决定生态系统碳收支对气候变暖的响应,为以往研究中不一致的增温效应提供了较好的统一性认识^[41]。基于多源数据融合,评估了1980—2015年中国的氮沉降时空变化及其组成变化,发现了中国氮沉降已经逐步下降并趋于 $\text{NO}_3^-/\text{NH}_4^+$ 平衡和干湿平衡,更准确地阐明了2001—2015年中国氮沉降的变化特征分为三个重要转变时期,挑战了关于中国氮沉降持续增加的传统观点^[29]。

3.4 生态系统功能及特征的生物地理格局

揭示了中国典型生态系统生物量和生产力区域分异规律。李文华等率先对中国的森林生物量进行了测定, 阳含熙等创建了长白山森林定位站, 估算了中国森林生物量^[42]; 对中国森林地理分布、结构功能与生产力进行了系统研究。通过模型和野外调查相结合的方法, 揭示了降水对中国北方草原植被地上生产力时空变异的影响, 阐明了草地生态系统水分地带性变化的关键生物地理学控制机制^[43]; 明确了北方草原植被地上生产力时空变异及其对水分的响应规律^[44], 评估了内蒙古草地植被恢复动态, 证实了国家生态治理工程的实施效果。基于土壤普查资料系统地评价了中国土壤碳储量和空间格局动态特征^[45]; 进一步模拟气候变暖对土壤有机碳循环的影响, 结果表明 1981—2000 年全球陆地碳汇增强与降水量增加密切相关, 但中国陆地碳汇由于北方持续干旱和温度增长而下降^[7]。

揭示了陆地生态系统碳收支空间格局及其生物地理学机制。开展了立足中国、面向全球的大陆和全球尺度生态过程整合研究, 研发了全球尺度大数据整合分析的技术体系, 构建了总初级生产力、净生态系统生产力、生态系统呼吸的生物地理学统计模式, 分析陆地生态系统碳交换通量的地理空间格局规律及其生物地理学机制, 探索了网络化大数据支持下的区域、大陆和全球尺度的生态过程的生物地理机制整合研究, 致力于生物地理生态学研究理论和技术体系的建立, 并提出大陆尺度生态系统观测研究是揭示生态系统空间规律的根本途径。有关中国陆地生态系统碳收支时空格局的研究以翔实的数据, 科学的观测体系, 系统地归纳分析并全面评估了中国生态系统碳汇功能, 为构建中国生态系统可持续发展、应对全球变化和生物多样性保护提供了科学依据。围绕陆地生态系统碳收支分布格局评估的不确定性, 基于中国通量观测网长期观测数据, 并整合全球碳交换通量观测数据, 发现 20 世纪 90 年代至 21 世纪初东亚季风区的亚热带森林生态系统具有很高的净 CO_2 吸收强度, 超过了亚洲和北美 0°N ~ 20°N 的热带森林生态系统, 与北美东南部的亚热带森林和欧洲 40°N ~ 60°N 的温带森林生态系统的碳吸收强度相当^[9], 证实了被长期忽视的“东亚季风区森林碳汇功能区”; 阐明了区域碳通量和储量格局的生物地理学机制; 阐明了陆地生态系统净 CO_2 吸收量可以部分抵消其工业源排放量, 为中国减排策略的制定提供了科学基础; 定量阐明了区域陆源 N/P 与近海碳的耦合循环过程^[22]; 提升了中国在该领域的国际影响力, 为国家碳管理政策需求提供了科学依据。

揭示了植物根功能属性生物地理格局与进化原理。根系隐藏于地下, 认知较困难, 对地下过程的认识远落后于地上过程。通过发起并创建了国际上首个大陆尺度根系生物学过程观测网络 (RhizoNet), 对不同森林类型根寿命、周转和分解开展观测研究, 为根系、土壤微生物及生态系统功能相互联系建立了研究平台。通过自主探索的根系研究方法, 以一级根为采样单元, 获取了大量第一手数据, 建立了全球一级根功能属性数据库, 发现从热带雨林到荒漠, 植物吸收根直径整体在变细, 根多样性减少, 提出了一个全新的植物进化理论: 在长达 1.2 亿年的植物进化过程中, 地下吸收根朝更加高效、独立的方向进化, 为物种开拓新的栖息地发挥了重要作用, 促进了植物的传播和进化^[11]。研究首次揭示了根功能属性的生物地理格局, 提出了“根效率是植物进化的动力”理论, 发展了“根系经济谱理论”, 阐明了植物进化和传播的基本原理, 为演化理论找到了生物地理学的证据。该工作挖掘了根的进化原理, 揭开了隐秘在地下适者生存的规律, 对于物种多样性保护和生物地球化学循环具有重要意义。此外, 建立的全球根寿命数据库和全球根氮吸收速率数据库, 为“理解根形态与功能之间关系做出了机制性的解释”^[46], 揭示了植物多样性地理格局的生物学机制^[47]。

构建了生态系统性状概念体系和方法。揭示了植物性状的时空变异规律、影响因素及其适应机制;发展了基于“比叶面积、相对生物量和植物群落结构数据”从器官推导至群落的新方法,揭示了植物群落性状空间变异规律和影响因素,构建了植物群落性状与生态系统功能的定量关系,开创了植物性状从器官、物种、群落、生态系统全方面研究的新局面。以叶、枝、干、根配套的性状数据为基础,揭示了植物性状在叶—枝—干—根间的协调机制或元素优化分配策略,以及植物性状反映不同器官间的协调机制或元素优化分配机制;突破了先前集中在单一器官的限制,提高了对植物性状在叶—枝—干—根间的协调机制或元素优化分配策略的认识。发展了“以植物比叶面积、相对生物量和群落结构数据为桥梁”的科学推导方法(即生物量加权平均法),成功实现了多个植物性状(叶片大小、叶片C/N含量、气孔属性和叶片解剖属性)从器官到群落的推导,首次在群落层次阐明了从热带雨林到寒温带针叶林植物性状的空间变异规律及影响机制,在群落水平揭示了植物性状对生态系统生产力的调控机制。

3.5 生态系统管理与生态系统服务

在农田生态系统管理研究与示范方面,建立了企业(合作社)经营主体、科研机构支撑的示范推广模式。围绕“水稻良种繁育—订单生产—技术服务—收购—加工—仓储—销售”建成了完整产业链条,东营市建成水稻生产核心区3个,总面积3.2万亩,带动发展示范区42个,总面积达到31.3万亩。项目区发挥30家企业的资本、管理优势,标准化建设示范区39万亩。发挥合作社、家庭农场的优势,逐步辐射带动周边上百万亩盐碱地粮食增产增效。在滨州无棣核心示范县建立了“一园三区”的示范布局:渤海粮仓工程科技示范园(核心区,7150亩)、盐碱地粮食增产示范区(示范区,120000亩)、盐碱地农牧产业化示范区(示范区,20000亩)及高效生态模式示范区(示范区,15000亩),园区辐射面积12多万亩。应用地面监测系统开发,结合遥感手段、粮食生产信息采集,建立“大数据”研究方法,为项目区增产增效提供数据和技术服务。建设了农业大数据信息共享平台,通过各类传感网络,实时监测土壤、水盐、气候、苗情、虫害等情况,为粮田精准化管理、灾害预警和生产决策提供服务。注重从农业生产多要素和全链条角度进行技术提升,构建与区域资源和生产发展相适应的提质增效新模式。依托团队在粮食作物高产高效群体结构调控、病虫害生态防治等方面的国内领先技术和研究基地,优化农田土壤质量提升技术体系、主粮作物健康生长和品质提升技术体系、种养循环生态农场效率提升技术体系,形成技术体系组件化方案和模式。

依托中国科学院黄河三角洲现代农业工程实验室和中国科学院地理资源所黄三角研究中心,部署实施“黄河三角洲现代生态农业技术系统集成示范”项目,开展了盐碱地治理、种养循环农场、智能装备建设、水产养殖等技术模式试验和示范。30多个研究团队在此进行协作,将现代高效生态农业技术集成推向新高度。在原有的北丘种养循环农场(100亩)的基础上,扩展为5000亩的种养循环规模。

在红壤丘陵区生态恢复与生态系统优化管理技术示范方面提出了农林复合的“千烟洲模式”。20世纪80年代初,由于不合理的开发利用,红壤丘陵区生态环境遭到严重破坏,原始植被损失殆尽,土地荒芜,水土流失严重,农民生活贫困。为探索红壤丘陵区生态恢复及经济可持续发展的有效途径,千烟洲站因地制宜,采用生态经济相结合、长期短期效益相结合以及治用相结合的原则,通过科学规划,在荒丘草坡上成功创建了著名的立体生态农业模式——“千烟洲模式”。

“千烟洲模式”的主要技术路线是在丘陵上比较厚的缓坡地种植效益较高的经济林木和果树,坡度较陡、土层较薄的丘陵地段发展用材林、防护林、水源涵养林、水土保持

林以及薪炭林等,而对一些土层瘠薄、植被稀少的地段,则封山禁伐,并采取人工措施种草植树逐渐恢复植被。“千烟洲模式”的创建,实现了生态恢复与经济协同发展,为中国南方红壤丘陵区资源综合开发和生态经济可持续发展探索出一条成功之路,被联合国推荐为全球生态修复“百佳”之一,成为生态恢复的国际样板。

千烟洲站面向国家生态文明建设和区域发展的重大需求,针对中国南方林种结构单一,生态服务功能低等问题,自2009年起,开展典型低效人工林改造关键技术与试验示范研究,提炼出一套适合红壤丘陵区的人工林近自然经营的管理技术和模式。通过合理的间伐、开林窗、补植乡土阔叶树、伐除干扰树等措施,千烟洲站将低效人工林改造成能够自我更新的复层—异龄—混交林,提高了生态系统综合服务功能和抗逆性。具体包括以下3种模式:①松杉纯林近自然改造模式:原有林分密度大,无自我更新能力。间伐后补植木荷、枫香、深山含笑、火力楠、闽楠等乡土阔叶树种。发展模式为松杉纯林—针阔混交林—近自然林。立地条件好的林分,则培育闽楠等大径材珍贵用材树种,提高林地的产出。②杉阔混交林近自然改造模式:原有林分密度大,有一定自我更新能力。阔叶树为枫香,杉阔比例为9:1。通过伐针保阔,增大阔叶树种的比例,提高林分的自我更新能力,最终发展成为近自然林。③阔叶混交林近自然经营模式:原有林分密度大,自我更新能力强,直接采用近自然林经营措施,即伐除干扰树,促进目标树的生长,同时适当开林窗,促进林下更新层发育。

拉萨站面向高原生态安全屏障保护和建设及农牧业可持续发展的重大需求,针对高原局地退化、沙化严重等生态问题,在高原生态系统管理方面,首先揭示了高寒草地生态系统的变化及其驱动机制。由于自然条件恶劣,以高寒草地为主体的高原生态系统深受气候变化和人类活动的双重影响,高原生态屏障功能正面临日益严峻的威胁。研究发现2000—2009年气候变化是驱动青藏高原草地生态系统变化的主要因素,返青期提前有利于植被的生长^[23],加之退牧还草等生态工程的实施,高原草地生产力呈现整体增加的趋势,而由于超载放牧等引起的草地生产力减少的面积不超过总草地面积的5%^[48-49]。为了建立有效的草地分类治理与管理模式,近年来重点开展了量化辨识气候变化和人类活动对高寒草地生态系统影响的相对贡献研究。基于草地退化机理的认识,针对不同退化程度的草地采取相应的恢复措施,提出轻度退化草地的“封育”、中度退化草地的“施肥+封育”、重度退化草地的“补播+施肥+封育”等3种草地恢复措施;特别是针对重度退化草地,集成了围栏、施肥(包括微生物肥料)、毒杂草治理、鼠虫害防治等综合技术措施,研发了“中华羊茅+垂穗披碱草+草地早熟禾”的混合补播模式,草地产草量提升了30%以上,最终形成一套西藏高原生态草牧业发展关键技术模式。筛选了西藏可利用野生牧草种质资源,驯化选育出“巴青披碱草”等野生牧草新品系,提出了人工饲草基地建设时空拓展理念并突破了荒地和中低产田牧草种植、粮饲复种技术瓶颈,攻克了主栽牧草与农作物秸秆混合青贮、干草加工及高效利用关键技术,研制了6项牧草种植和2项混合青贮技术标准,在拉萨、山南和日喀则等地建立良种繁育示范基地1000余亩,累计种植示范面积达50万亩,建立了生态保护和精准脱贫双赢的发展模式,并提出了农牧系统耦合优化管理模式。

以高寒草地为支撑的高原畜牧业仍沿袭传统模式,农牧民收入现状及趋势与全国平均水平还有一定的差距,农牧业生态系统管理方式亟需优化^[50]。针对这一突出问题,拉萨站在藏北牧区的那曲、当雄和拉萨河谷农区的达孜、林周分别设立长期试验基地,开展了农区种植业和牧区畜牧业相结合的试验示范工作。根据西藏地域和气候的分异特点,重点研究农区和牧区互动耦合的可持续发展模式^[51],即通过农区和牧区的互动耦

合,在农区大力发展牧草种植业,为藏北牧区提供饲草来源,从而降低牲畜对藏北草地的压力,实现西藏退化草地自然恢复和农牧民增收的双赢。

从黄土高原的主要限制要素土壤水分出发,提出了黄土高原植被恢复的长效机制。黄土高原是中国的重要生态屏障,大部分位于干旱、半干旱气候区,生态环境脆弱,土壤侵蚀严重,植被恢复是水土资源合理利用的有效措施。植被类型、规模和结构对水土过程有显著影响,而水分供给决定了植被生态系统的健康和可持续性。黄土高原出现的土壤干燥化和人工植被退化等现象,是生态建设中面临的重大现实问题。以土壤—植被系统水动力学与调控为主线,服务黄土高原旱地农业和植被建设的国家需求。在基础理论方面,建立了土壤水的广义相似理论和溶质迁移的边界层理论,提出了土壤水运动参数的积分法和相似法,积分法可获得全部水动力学参数,相似法拓展了传统法的测定范围;在方法应用方面,研究了变容重条件下和土石混合介质土壤水分运动过程,构建了变容重土壤水分动力学的基本框架,提出了黄土区土壤水分有效性动力学模式,为农业节水提供了重要科学依据;在实践应用方面,探明了黄土高原土壤水分时空分异特征和土壤干层的形成与分布,建立了小流域土壤水分植被承载力模型,确定了黄土区土壤水分对3种典型林、灌、草人工植被的承载力,为黄土高原合理的植被建造和土壤干层的防控提供了依据;在前沿探索方面,研究了黄土关键带土壤水分及水力性质垂直分异特征,建立了全剖面(50~200 m)黄土水力参数的传递函数模型和状态空间模型,量化了深厚黄土包气带储水量及空间分布,阐明了黄土关键带降水对地下水的补给通量及对土地利用变化的响应特征,为黄土区水资源管理及可持续性提供了科学依据。

在生态系统服务功能评估方面,通过开展典型生态系统服务功能的机理及评估方法的研究,从理论上揭示了生态系统服务功能的本质、生态服务功能发挥的作用机制以及生态服务功能的内涵与外延;以重要生态系统服务功能(水源涵养、大气调节、气候调节、水土流失、初级生产力、休闲旅游)为切入点,确定中国农田、森林、草地、湿地、海岸等典型生态系统服务功能的内涵、评价指标和评价方法;提出重要生态系统服务功能的形成机制、评价指标和评价体系,阐明生态系统服务功能价值化的理论和核算方法,为中国生态功能区划、区域生态恢复与建设、生态补偿制度和生态环境经济综合的国民经济综合核算体制的实施提供科学依据^[52]。开展了生态补偿的国家战略框架设计、理论方法,以及流域、矿产资源开发、森林和自然保护区生态补偿等6个方面的研究,2007年出版了《中国生态补偿机制与政策研究》专著,成为该领域研究的重要参考和依据。2008年李文华牵头与美国佛蒙特大学(University of Vermont)GUND生态经济研究所所长Robert Constanza教授合作,筹建了“中美生态系统服务研究中心”,为中国和美国生态系统服务研究学者提供了一个学术交流平台,发挥中国在生态系统服务研究领域的作用,推动国际生态系统服务研究的发展。

4 未来展望

经过几十年的开拓和努力,地理资源所的生态系统科学研究得到了迅速发展,取得了一系列的原创性成果和重要成绩,推动了生态系统生态学、生物地理生态学、全球变化生态学和生态信息科学技术的发展。但目前对复杂生态系统的认知仍然有限,未来将重点面向生态学科学前沿和国家生态文明建设需求,不断深入生态信息的数据管理与模拟分析、生态系统碳氮水通量及其耦合机制、陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制、生态系统功能及特征的生物地理格局、生态系统管理等方向的研究^[53],

逐步建成以生态系统生态学研究为核心,国际知名、具有持续创新能力的研究机构,成为中国生态系统与环境变化关系及调控管理的科学研究中心、国家生态环境变化观测与模拟分析平台、国家生态系统观测研究网络科学数据资源中心,以及生态学研究领域的国际合作和学术交流中心。

在生态信息的数据管理与模拟分析研究方向,未来将加强生态科学数据质量、数据安全及数据标准建设,完善生态系统科学数据产品分类分级,利用最新的物联网、大数据、先进计算等信息化技术,构建新一代生态科学数据云平台,结合生态系统模型、模型数据融合、人工智能等方法,对生态系统科学数据进行深度挖掘和产品开发,继续发展和改进生态系统过程模型和模型数据融合系统,实现对生态系统历史演变、现状评价、变化预测和生态灾害的预警。

在生态系统碳氮水通量及其耦合机制研究方向,未来将基于中国区域和全球尺度的国际长期生态研究网络和陆地生态系统碳、氮、水通量及其环境要素网络的观测和实验研究数据,以“大数据、大科学、解决大尺度生态环境问题”为理念,通过数据整合与多源数据融合,深入研究区域和大陆尺度生态系统碳、氮、水交换通量及其耦合关系、过程、地理学格局及其驱动机制。

在陆地生态系统对全球变化响应和适应的时空格局与过程机制研究方向,未来将以不同时空尺度变异规律与生物和环境调控机制为核心科学问题,综合研究生态系统结构、功能及其关键过程对人类活动影响和全球变化的响应与适应机制。重点揭示生态系统关键过程与环境变化之间的相互作用机制,认知大气氮沉降、降水变化和极端气候事件等全球变化因素对生态系统结构、功能和水碳氮循环过程的影响;模拟预测全球变化影响下的生态系统长期演化趋势,促进全球变化生态学的发展和知识创新。

在生态系统功能及特征的生物地理格局研究方向,未来将重点关注生态系统功能与气候变化关系、生态系统格局与演化以及生态功能退化与恢复等方面的研究,定量表达从局地到区域尺度的生态系统结构与格局的时空分异特征,辨识在不同尺度上控制生态系统格局变化的主导因素,深化生态系统与气候、生物和土壤空间格局之间的协同与相互作用机制的理解,发展生物地理生态学理论和技术体系,服务于气候变化的适应对策、宏生态系统系统管理等国家战略需求。

在生态系统管理与生态系统服务研究方向,未来将面向国家发展需求,如美丽中国建设、新农村建设、国家生态环境监测等,继续推进生态系统管理研究与示范,加强青年科学家和示范应用人才的培养以及国际交流与合作,推动中国生态系统管理与示范的技术体系应用于全球类似气候区。依托生态系统生态学科学理念,丰富观测研究平台,综合研究生态过程的环境效应,集成生态系统管理技术模式,为破解区域生态环境问题提供共性关键技术科学支撑。发展和完善生态系统服务功能价值评估体系,综合自然、人文、经济等多类指标,增强评估体系的合理性和应用性。

参考文献(References)

- [1] Yu G R, Wen X F, Sun X M, et al. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 125-137.
- [2] Yu Guirui, Sun Xiaomin. *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems*. Beijing: Higher Education Press, 2006. [于贵瑞, 孙晓敏. 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.]
- [3] Yu Guirui, Zhang Leiming, Sun Xiaomin. Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 2014, 33(7): 903-917. [于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.]
- [4] Luo Tianxiang. Patterns of net primary productivity for Chinese major forest types and their mathematical models.

- Resources Science, 1996, 18(5): 41. [罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 资源科学, 1996, 18(5): 41.]
- [5] Yu G R, Li X R, Wang Q F, et al. Carbon storage and its spatial pattern of terrestrial ecosystem in China. *Journal of Resources and Ecology*, 2010, 1(2): 97-109.
- [6] Cao Mingkui, Yu Guirui, Liu Jiyuan, et al. Multi scale experimental observation and cross scale mechanism simulation of carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Scientia Sinica Terrae*, 2004, 34(Suppl.2): 1-14. [曹明奎, 于贵瑞, 刘纪远, 等. 陆地生态系统碳循环的多尺度试验观测和跨尺度机理模拟. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(Suppl.2): 1-14.]
- [7] Cao M K, Prince S D, Li K R, et al. Response of terrestrial carbon uptake to climate interannual variability in China. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 536-546.
- [8] Hu Zhongmin, Fan Jiangwen, Zhong Huaping, et al. Temporal and spatial variability of aboveground productivity along precipitation gradient in temperate grassland of China. *Scientia Sinica Terrae*, 2006(12), 1154-1162. [胡中民, 樊江文, 钟华平, 等. 中国温带草地地上生产力沿降水梯度的时空变异性. 中国科学(D辑: 地球科学), 2006(12): 1154-1162.]
- [9] Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *PNAS*, 2014, 111: 4910-4915.
- [10] He N P, Liu C C, Piao S L, et al. Ecosystem traits linking functional traits to macroecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2019, 34(3): 200-210.
- [11] Ma Z Q, Guo D L, Xu X L, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 2018, 555(7694): 94-97.
- [12] Li Wenhua, Ouyang Zhiyun, Zhao Jingzhu. Research on Ecosystem Service Function. Beijing: China Meteorological Press, 2002. [李文华, 欧阳志云, 赵景柱. 生态系统服务功能研究. 北京: 气象出版社, 2002.]
- [13] Gu F X, Zhang Y D, Huang M, et al. Nitrogen deposition and its effect on carbon storage in Chinese forests during 1981-2010. *Atmospheric Environment*, 2015, 123: 171-179.
- [14] Zhang L, Mao J F, Shi X Y, et al. Evaluation of the Community Land Model simulated carbon and water fluxes against observations over ChinaFLUX sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 226/227: 174-185.
- [15] Ge R, He H L, Ren X L, et al. Underestimated ecosystem carbon turnover time and sequestration under the steady state assumption: A perspective from long-term data assimilation. *Global Change Biology*, 2019, 25(3): 938-953.
- [16] Zhang L, Luo Y Q, Yu G R, et al. Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of eastern China: Applications of probabilistic inversion. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2010, 115: G01010. Doi: 10.1029/2009jg001004.
- [17] Ren X L, He H L, Moore D J P, et al. Uncertainty analysis of modeled carbon and water fluxes in a subtropical coniferous plantation. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4): 1674-1688.
- [18] He H L, Liu M, Xiao X M, et al. Large-scale estimation and uncertainty analysis of gross primary production in Tibetan alpine grasslands. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(3): 466-486.
- [19] Ren X L, He H L, Zhang L, et al. Modeling and uncertainty analysis of carbon and water fluxes in a broad-leaved Korean pine mixed forest based on model-data fusion. *Ecological Modelling*, 2018, 379: 39-53.
- [20] Zhu X J, Yu G R, He H L, et al. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: Results from upscaling network observations. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 52-61.
- [21] Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *PNAS*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [22] Gao Y, Yu G R, Yang T T, et al. New insight into global blue carbon estimation under human activity in land-sea interaction area: a case study of China. *Earth-Science Review*, 2016, 159: 36-46.
- [23] Jia Y L, Yu G R, He N P, et al. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity. *Scientific Reports*, 2014, 4. Doi: 10.1038/srep03763.
- [24] Gao Y, He N P, Yu G R, et al. Impact of external nitrogen and phosphorus input between 2006 and 2010 on carbon cycle in China seas. *Regional Environmental Change*, 2015, 15(4): 631-641.
- [25] Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 2013, 19(3): 798-810.
- [26] Chen Z, Yu G R, Zhu X J, et al. Covariation between gross primary production and ecosystem respiration across space and the underlying mechanisms: A global synthesis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 203: 180-190.
- [27] Zhang Y J, Yu G R, Yang J, et al. Climate-driven global changes in carbon use efficiency. *Global Ecology and Biogeography*, 2014, 23(2): 144-155.

- [28] Jia Y L, Yu G R, Gao Y N, et al. Global inorganic nitrogen dry deposition inferred from ground and space- based measurements. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19810. Doi: 10.1038/srep19810.
- [29] Yu G R, Jia Y L, He N P, et al. Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience*, 2019, 12: 424-429.
- [30] Xia J Y, Niu S L, Ciais P, et al. Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology. *PNAS*, 2015, 112(9): 2788-2793.
- [31] Niu S L, Fu Z, Luo Y Q, et al. Interannual variability of ecosystem carbon exchange: From observation to prediction. *Global Ecology and Biogeography*, 2017, 26(11): 1225-1237.
- [32] Hu Z M, Guo Q, Li S G, et al. Shifts in the dynamics of productivity signal ecosystem state transitions at the biomescale. *Ecology Letters*, 2018, 21(10): 1457-1466.
- [33] Li Y, Niu S L, Yu G R. Aggravated phosphorus limitation on biomass production under increasing nitrogen loading: A meta-analysis. *Global Change Biology*, 2016, 22(2): 934-943.
- [34] Niu S L, Classen A T, Dukes J S, et al. Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle. *Ecology Letters*, 2016, 19(6): 697-709.
- [35] Tian D S, Reich P B, Chen H Y H, et al. Global changes alter plant multi-element stoichiometric coupling. *New Phytologist*, 2018, 221(2): 807-817.
- [36] Kou L, Jiang L, Fu X L, et al. Nitrogen deposition increases root production and turnover but slows root decomposition in *Pinus elliotii* plantations. *New Phytologist*, 2018, 218: 1450-1461.
- [37] Kou L, Jiang L, Hättenschwiler S, et al. Diversity-decomposition relationships in forests worldwide. *eLife Sciences*, 2020, 9: e55813. Doi: 10.7554/eLife.55813.
- [38] Qiao N, Schaefer D, Blagodatskaya E, et al. Labile carbon retention compensates for CO₂ released by priming in forest soils. *Global Change Biology*, 2014, 20(6): 1943-1954.
- [39] Song M H, Guo Y, Yu F H, et al. Shifts in priming partly explain impacts of long- term nitrogen input in different chemical forms on soil organic carbon storage. *Global Change Biology*, 2018, 20: 1943-1954.
- [40] Zhang G L, Zhang Y J, Dong J W, et al. Green-up dates in the Tibetan Plateau have continuously advanced from 1982 to 2011. *PNAS*, 2013, 110(11): 4309-4314.
- [41] Quan Q, Tian D S, Luo Y Q, et al. Water scaling of ecosystem carbon cycle feedback to climate warming. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaav1131. Doi: 10.1126/sciadv.aav1131.
- [42] Zhou Yurong, Yu Zhenliang, Zhao Shidong. Carbon storage and budget of major chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000(5): 518-522. [周玉荣, 于振良, 赵士洞. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. *植物生态学报*, 2000(5): 518-522.]
- [43] Hu Z M, Shi H, Cheng K L, et al. Joint structural and physiological control on the inter-annual variation in productivity in a temperate grassland: A data-model comparison. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 2965-2979.
- [44] Fan Jiangwen, Zhong Huaping, Liang Biao, et al. Carbon stock in grassland ecosystem and its affecting factors. *Grassland of China*, 2003(6): 52-59. [樊江文, 钟华平, 梁彪, 等. 草地生态系统碳储量及其影响因素. *中国草地*, 2003 (6): 52-59.]
- [45] Wang Shaoqiang, Zhou Chenghu, Li Kerang, et al. Analysis on Spatial Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon Reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000(5): 533-544. [王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. *地理学报*, 2000(5): 533-544.]
- [46] Kong D L, Ma C G, Zhang Q, et al. Leading dimensions in absorptive root trait variation across 96 subtropical forest species. *New Phytologist*, 2014, 203(3): 863-872.
- [47] Li L, McCormack M L, Ma C G, et al. Leaf economics and hydraulic traits are decoupled in five species-rich tropical-subtropical forests. *Ecology Letters*, 2015, 18(9): 899-906.
- [48] Zhang Xianzhou, Yang Yongping, Piao Shilong, et al. Ecological change on the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(32): 3048-3056. [张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 等. 青藏高原生态变化. *科学通报*, 2015, 60(32): 3048-3056.]
- [49] Chen B X, Zhang X Z, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 189/190: 11-18.
- [50] Zhang Xianzhou, He Yongtao, Shen Zhenxi, et al. Frontier of the ecological construction support the sustainable development in Tibet Autonomous Region. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(3): 306-312. [张宪洲, 何永涛, 沈振西, 等. 西藏地区可持续发展面临的主要生态环境问题及对策. *中国科学院院刊*, 2015, 30(3): 306-312.]

- [51] He Yongtao, Zhang Xianzhou, Yu Chengqun. Coupling crop farming and pastoral system for regional development and their ecological effects on the Tibetan Plateau. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2016, 31(1): 112-117. [何永涛, 张宪洲, 余成群. 青藏高原农牧系统耦合发展及其生态效应. *中国科学院院刊*. 2016, 31(1): 112-117.]
- [52] Li Wenhua, et al. *Theory, Method and Application of Ecosystem Service Function Value Evaluation*. Beijing: China Renmin University Press, 2008. [李文华, 等. 生态系统服务功能价值评估的理论、方法与应用. 北京: 中国人民大学出版社, 2008.]
- [53] Li Wenhua, et al. *Current Status of Ecology Research in China*. Beijing: Science Press, 2013. [李文华, 等. 中国当代生态学研究. 北京: 科学出版社, 2013.]

Ecosystem science research and ecosystem management

YU Guirui, LI Wenhua, SHAO Ming'an, ZHANG Yangjian, WANG Shaoqiang,
NIU Shuli, HE Honglin, DAI Erfu, LI Fadong, MA Zeqing

(Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and
Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Ecosystem ecology is the core content of ecosystem science in the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (IGNSRR). Our first mission is to develop techniques and methods of ecosystem monitoring and simulation, by which we explore the theories and pathways in solving eco-environmental issues at regional scales. Second, we monitor ecosystem changes, identify the dynamics and patterns, and advance the discipline developments of ecosystem ecology, biogeography ecology, global change ecology, and eco-informatics. Third, we serve for the national and regional ecological constructions by addressing issues related to global changes and regional sustainable developments. To meet national needs, we synthesize and innovate technique and modes of ecosystem management for typical regions of China, i.e. agricultural regions of northern China, hilly red soil forestry regions of southern China, agricultural and pastoral regions of the Tibetan Plateau and Loess Plateau. Utilizing these innovated management modes, we aim to solve fundamental problems in ecological construction and adapt to global changes, and facilitate science advance in regional ecosystem management. Our research directions comprise the following five fields: (1) network monitoring, simulation and ecosystem data management; (2) ecosystem structure, process and function; (3) ecosystem pattern and the underlying mechanism; (4) ecosystem responses and adaptation to global change; (5) ecosystem management and ecosystem services. Centered around the above five foci research directions, we systematically explore theories of ecosystem ecology and their applications, through which we position our research in frontier lines of China and the world.

Keywords: ecosystem; eco-informatics; global change; ecosystem management; ecosystem services; sustainable development