

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

于贵瑞^{1,2}, 张雷明^{1,2}, 孙晓敏^{1,2}

(1. 中国科学院生态网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 基于微气象学理论的涡度相关通量观测技术实现了对生态系统尺度的生产力、能量平衡和温室气体交换等功能和过程的直接测定, 特别是全球尺度通量塔观测网络的联合观测是实现从生态现象观察和生态要素观测跨越到全球尺度生态系统功能状态变化观测的重大突破。本文回顾了中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的创建及发展历程, 系统介绍了ChinaFLUX的科学目标和设计理念、观测技术体系、观测数据的标准化处理及长期积累; 综合评述了ChinaFLUX在陆地生态系统碳—氮—水的收支评估和交换过程的环境响应、碳通量时空格局及其形成机制等方面所取得的主要研究进展。最后, 在探讨未来全球尺度通量塔观测网络发展趋势的基础上, 提出了ChinaFLUX的主要发展方向、关键科学问题与未来工作重点, 为中国通量观测研究事业的进一步发展提供理论参考。

关键词: 涡度相关; 碳氮水通量; 耦合循环; 生态预测; 协同观测; ChinaFLUX

doi: 10.11820/dlkxjz.2014.07.005

中图分类号:P467

文献标识码:A

1 引言

地球系统已经进入了人类世的新时代(Crutzen et al, 2003; Zalasiewicz et al, 2010; Steffen et al, 2011), 人类以超越地球上所有生物的姿态, 利用和开发着其力所能及的各类资源, 影响和干预着支撑自身生存和发展的生物和环境系统(Vitousek et al, 1997; Galloway et al, 2004; Raupach et al, 2010), 并且这种干扰和影响也随着科技进步和人口规模的增大而与日俱增, 已经造成了不可自我恢复或不可逆转的全球规模的生物圈结构和功能的改变, 导致了人类生产、生活和生态环境的破坏(Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Brook et al, 2013)。以气候变化为标志的全球环境变化引发了人类社会的广泛关注, 成为资源环境以及地球和生命科学的研究的热点领域(IPCC, 2007)。

碳循环是全球环境变化科学研究的基础问题之一。评估全球、不同区域以及各国陆地碳收支和碳交换通量, 既是全球变化成因分析和科学预测的重大科技需求, 也是支撑IPCC全球温室气体管理、

国际社会联合减排和共同应对全球气候变化的科技需求(于贵瑞, 方华军等, 2011; Le Quéré et al, 2013; Baldocchi et al, 2014)。近几十年来, 在中国社会经济快速发展的同时, 温室气体排放量的增长速率也跃居世界第一, 不仅使中国面临着巨大的温室气体减排压力, 而且也成为中国大气环境污染、威胁人类健康和社会经济可持续发展的瓶颈因素。由此可见, 开展中国陆地生态系统碳源/汇时空分布格局、增汇潜力和技术途径的综合研究, 是现阶段解决环境问题和应对全球变化急迫而重大的科技命题(于贵瑞, 王秋凤, 朱先进, 2011; 于贵瑞, 何念鹏等, 2013; Gao et al, 2012)。

生态系统与大气之间的碳氮温室气体通量是揭示生态系统碳汇功能及其变异的重要指标, 多过程、多要素的长期协同观测将为陆地生态系统碳—氮—水循环过程的机理研究以及碳源/汇的时空分布评价提供重要的观测数据(于贵瑞等, 2006; Baldocchi et al, 2014)。在全球尺度的陆地生态系统碳—氮—水循环科学的研究中, 科学家采用多种观测技术开展了广泛的研究工作, 积累了大量的科学数据

收稿日期: 2014-07; 修订日期: 2014-07。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833500); 国家自然科学基金项目(31170422, 30900198)。

作者简介: 于贵瑞(1957-), 辽宁大连人, 研究员, 主要从事陆地生态系统碳循环与气候变化研究, E-mail: yugr@igsnrr.ac.cn。

(于贵瑞, 王秋凤, 刘迎春等, 2011; 于贵瑞, 何念鹏等, 2013)。其中, 常用的观测技术包括群落清查、通量观测、同化箱测定、模型模拟和遥感反演等。近几十年来, 随着基于微气象学理论的涡度相关观测技术的发展和成熟, 生态系统尺度的碳水交换通量的直接测定得以实现, 并形成了全球和多个区域性的通量观测网络, 为评价全球尺度的碳水收支以及各类生态系统和典型区域陆地生态系统碳水平衡, 分析生态系统对全球变化的响应和适应提供了重要的科学知识和数据基础(于贵瑞等, 2008; 于贵瑞, 方华军等, 2011; 于贵瑞, 高扬等, 2013; Baldocchi, 2001)。

中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)于2001年正式创建, 并开始了长期联网观测。经过10余年的发展, 在数据积累、过程机理、模型模拟和区域评价等方面均取得了重要进展, 推动了中国通量观测研究事业的发展与壮大(于贵瑞等, 2006; Yu et al, 2006), 引起了国内外的广泛关注(Leuning et al, 2006; Baldocchi, 2008; Doherty et al, 2009; Saigusa et al, 2013; Stoy et al, 2013)。本文在简要回顾ChinaFLUX发展历史的基础上, 总结和评述了ChinaFLUX在通量观测技术、生态系统碳—氮—水交换过程及其环境控制机理、碳水通量模型模拟和区域碳收支评估等研究领域所取得的主要科学进展, 并就全球通量塔观测网络以及ChinaFLUX的未来科学使命, 提出了中国区域陆地生态系统碳—氮—水通量协同观测研究网络的发展方向、关键科学问题及其工作重点。

2 ChinaFLUX的目标、理念和发展历程

2.1 ChinaFLUX的科学目标

ChinaFLUX创建伊始, 就面向中国应对气候变化和生态建设的国家需求以及发展生态系统碳循环与全球变化科学的迫切任务, 设定了以下几个长期的科学目标(图1)。其一是创建中国陆地生态系统通量观测平台, 提升国家生态系统观测研究网络的综合观测能力, 积累多要素长期观测数据。其二是构建生态系统碳—氮—水通量的观测理论和方法论体系, 构建支撑科学的研究的野外观测平台、数据—模型融合平台和国际合作平台。其三是开展生态系统—样带—区域尺度碳—氮—水循环过程机理研究, 评价生态系统碳源/汇强度及其时空分布格

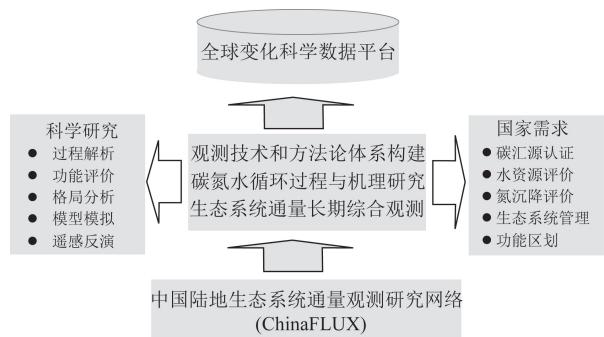


图1 ChinaFLUX的科学目标

Fig.1 Scientific objectives of ChinaFLUX

局, 服务于国家陆地碳收支评估和碳汇定量认证。

2.2 ChinaFLUX的设计理念与科学布局

在ChinaFLUX的设计过程中, 率先提出了通量观测网络与全球变化陆地样带整合的设计理念, 通过ChinaFLUX观测站的优化布局, 构建面向国际科学研究前沿的中国生态系统科学观测与研究平台。ChinaFLUX的站点布局强调了生态系统格局的区域地理分异性、区域尺度生态系统类型的多样性以及关键地带的代表性;采用观测站点—样带—区域的优化布局, 有机地整合了全球变化陆地样带与生态过程实验研究平台。ChinaFLUX观测技术系统强调多种物质通量—环境要素—生态过程以及生态系统碳—氮—水通量与循环过程的协同观测;并且前瞻性地开展了碳通量时间变化过程的动力学机制、空间格局的生物地理生态学机制以及碳—氮—水耦合循环机制的理论研究(图2)。

在ChinaFLUX的台站布局和建设过程中, 依

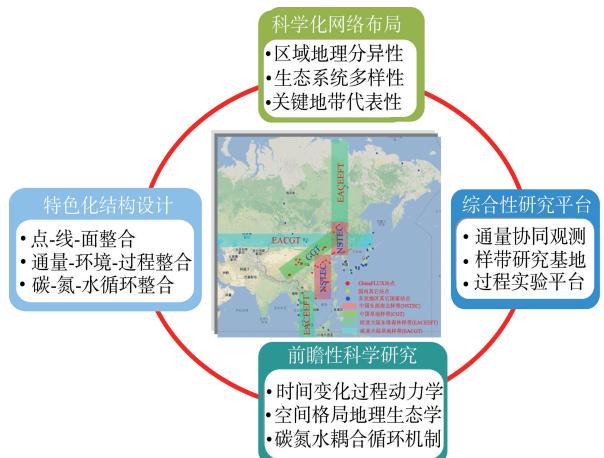


图2 ChinaFLUX的设计理念、空间布局及其关注的科学问题
Fig.2 Design concept, site distribution and scientific inquiries of ChinaFLUX

据欧亚大陆森林和草地的地理分布特征、结合中国气候区划成果，在原有的东北样带(NECT)和东部南北样带(NSTEC)基础上，又提出了中国草地样带(CGT)、欧亚大陆东缘森林样带(EACEFT)和欧亚大陆草地样带(EACGT)的新概念，构建了亚洲区域通量观测和全球变化科学的研究的样带体系(于贵瑞等, 2006, 2008; Yu et al, 2006)。在此基础上，整合欧亚大陆样带研究与台站的观测资源，发展了基于ChinaFLUX的亚洲区域陆地生态系统碳计划(CarbonEastAsia)国际合作的基础平台，填补了亚洲季风区观测研究的空白，增强了ChinaFLUX的区域代表性，提高了ChinaFLUX在全球通量观测研究网络(FLUXNET)中的地位和作用(图2)。

2.3 ChinaFLUX的创建及其发展历程

ChinaFLUX 是依托中国生态系统研究网络(CERN),在中国科学院知识创新工程重大项目“中国陆地和近海生态系统碳收支研究”项目的支持下创建的。2001年启动了ChinaFLUX的建设,通过对观测台站和通量观测塔选址、观测系统设计、观测仪器选型等技术方案的反复论证,以及野外工程实施和观测系统安装与调试,2002年ChinaFLUX的首期6个观测研究站(含8个生态系统,即4个森林、3个草地和1个农田)和1个综合中心初步建成,并在国内率先开展了多站点联合的生态系统碳水

通量长期观测研究(图3)。

ChinaFLUX的建立和运行为中国全球变化和碳循环领域的科学的研究提供了重要的科技平台,先后支撑了国家重点基础研究发展计划项目“中国陆地生态系统碳循环及其驱动机制”、国家自然科学基金重大研究项目“我国主要陆地生态系统对全球变化的响应与适应性样带研究”、中国科学院知识创新工程重要方向项目“陆地生态系统碳氮通量过程及其耦合关系集成研究”、国家重点基础研究发展计划项目“中国陆地生态系统碳—氮—水通量的相互关系及其环境影响机制”、国家自然科学基金A3计划重大国际合作研究项目“CarbonEastAsia: 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”、中国科学院战略性先导科技专项项目“陆地生态系统固碳现状、速率、机制和潜力”和国家自然科学基金重大项目“森林生态系统碳—氮—水耦合循环过程的生物调控机制”等多个重大研究计划。同时,在这些重大研究计划的带动下,ChinaFLUX也取得了阶段性的跨越发展,已经成为中国生态系统研究网络(CERN)的一个特色鲜明的专项观测网络。该网络的观测站点已经由2002年的6个扩展到目前的45个,其中森林站12个、草地(含荒漠)站22个、农田站11个,其生态观测站点基本涵盖了中国主要的地带性陆地生态系统类型(图3)。

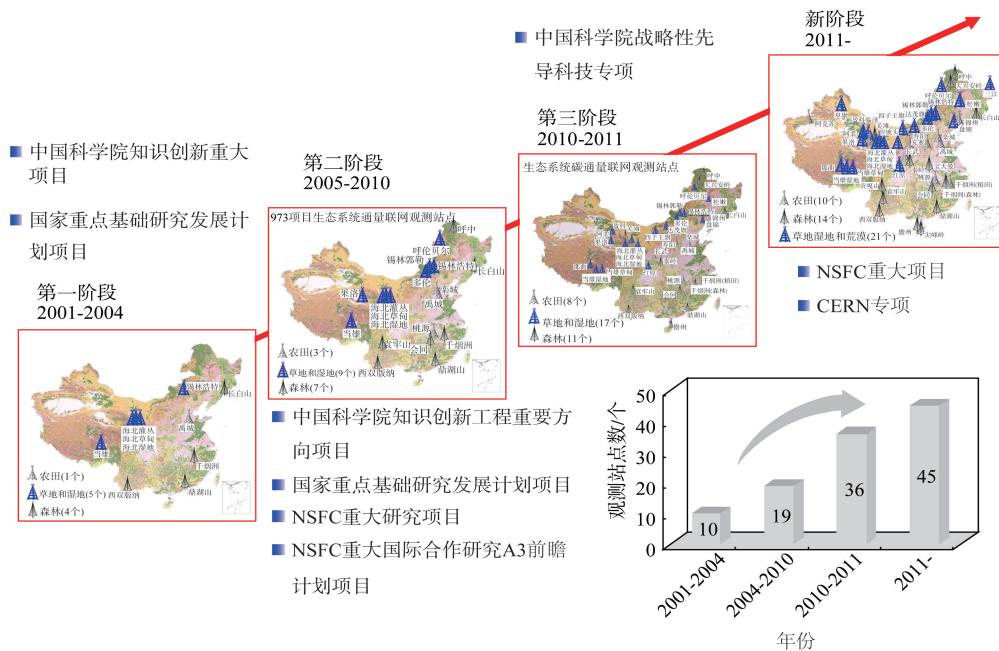


图3 ChinaFLUX的观测研究平台发展及其支撑的重要科学项目

Fig.3 The development and important supports of ChinaFLUX

ChinaFLUX的建设和科学研究还带动了中国林业、气象和农业部门以及部分高校的碳水通量观测站的建设。据不完全统计,目前全国范围内已经建设了200余个通量观测研究站,形成了具有相当规模的生态系统碳、氮、水和能量通量观测研究资源,为多部门联合观测和数据资源整合共享奠定了基础。ChinaFLUX为FLUXNET的重要组成部分和亚洲区域的主体,促成了原亚洲通量网络(Asia-FLUX)的重组,实现了中国通量观测研究事业从无到有、由国内起步走向国际前沿的跨越发展。

3 ChinaFLUX的主要进展

3.1 陆地生态系统碳水通量观测技术体系研究

ChinaFLUX系统性地研究了陆地生态系统碳水和能量通量观测的理论和方法论,设计了多尺度、多要素协同观测的技术体系和数据—模型融合系统,特别是在以下3个方面形成明显的特色:一是将ChinaFLUX的观测站点和全球变化陆地样带有机结合,构建了站点—样带—区域生态系统通量的多尺度综合观测技术体系(FTR);二是率先研制碳—氮—水同位素通量原位连续观测新技术,建成了生态系统水—碳—氮通量与同位素通量整合的综合观测系统(EMI);三是基于协同观测数据,结合改进的生态过程机理模型和遥感反演模型构建了数据—模型融合系统(MDFS)。

3.1.1 多尺度综合观测技术体系

以CERN观测站点和全球变化陆地样带为基础,构建了中国站点—样带—区域生态系统通量多尺度综合观测技术体系(FTR),奠定了国家尺度通量观测网络的基本构架。FTR的构建实现了典型生态系统碳—氮—水通量动态变化的过程机制研究与区域尺度空间格局的生物地理生态机制研究两大科学任务统筹兼顾的网络设计理念(图4)。

3.1.2 生态系统碳—氮—水过程协同观测技术系统

以生态系统碳水同位素通量原位连续观测新技术研发为突破口,通过生态学—气象学—同位素技术的系统集成,前瞻性地构建了生态系统水—碳—氮通量与同位素通量整合的综合观测系统(EMI)。运用生态系统碳—氮—水同位素通量的原位连续观测新技术,解决了仪器非线性响应难题,突破了涡度相关与稳定同位素技术协同观测的技术瓶颈,实现了生态系统碳水通量及 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 、 $\delta^{13}\text{C}$

和 $\delta^{15}\text{N}$ 通量的协同观测(Wen et al, 2008, 2010, 2012)。此外,还研究制定了生态系统氮输入和输出通量的联网观测技术规范,实现了不同类型生态系统碳—氮—水通量的协同观测(图5)。

3.1.3 通量观测数据—模型融合系统(MDFS)

ChinaFLUX采用模型引进、改良与自主开发相结合的技术途径,发展了适应于不同时间和空间尺度的碳水循环和通量评估模型体系。先后引进和改良了CEVSA(顾峰雪等, 2008; Cao et al, 2005; Gu et al, 2010)、In-Tec(Wang et al, 2007)、EALCO(米娜等, 2007; Mi et al, 2009)和BEPS(Wang et al, 2005; Ju et al, 2010)等生态过程模型,以及VPM(Li et al, 2007; Wu et al, 2008)等遥感反演模型,自主开发了AVIM2(Ji et al, 2008; Huang et al, 2014)、CEVSA2(顾峰雪等, 2010)和蒸发散(黄辉等, 2008; Ren et al, 2005; Hu et al, 2013)等碳水循环过程模型、PCM遥感模型(Gao et al, 2014)以及GSM地理统计学模型(Yu et al, 2010; Zheng et al, 2010; Zhu, Yu, He, et al, 2014)。在此基础上,进而以生态系统碳循环过程模型和遥感反演模型为基础,开发了数据—模型融合技术(张黎等, 2009; 任小丽等, 2012;

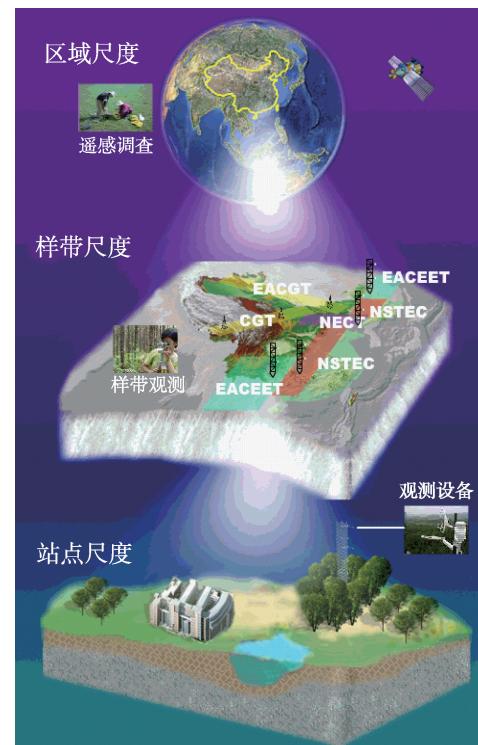


图4 站点—样带—区域碳通量多尺度综合观测技术体系(FTR)

Fig.4 Site-transect-region (FTR) complex multi-scale flux observation system

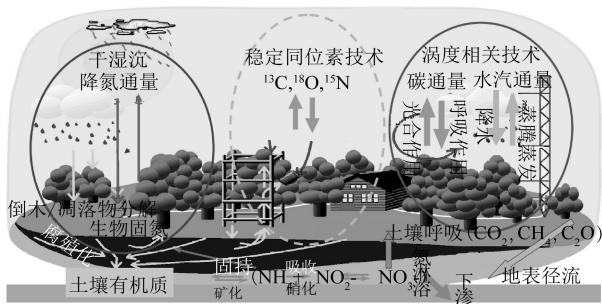


图5 生态学—气象学—同位素技术的综合观测体系

Fig.5 Ecological-meteorological-isotopic measurement system (EMI)

Zhang L et al, 2010),构建了服务于区域碳收支评估的模型—数据融合系统(MDFS),为单站点长期观测与区域综合评估两者之间的尺度转换提供了有效的解决方案,也为开展国家尺度的陆地生态系统碳收支和水平衡综合评估提供了模拟分析平台(何洪林等,2012)(图6)。

3.2 陆地生态系统碳水通量观测技术和数据质量控制规范研究

ChinaFLUX系统解决了复杂地形条件下的碳水通量观测技术难题,研制了中国区域通量观测研究和数据分析的技术规范,得到了国际学术界的认可,被国内同行普遍采用。同时,根据野外台站多分布在偏远山区、公共通讯基础设施薄弱的特点,设计了观测塔—研究台站—综合中心之间的远程传输和设备监控系统,实现了观测系统的远程操控和观测数据的在线处理分析,有效提高了ChinaFLUX的观测效率和观测能力。

3.2.1 复杂地形地貌条件下的碳水通量观测技术体系

由于中国多个通量观测站建在山区复杂地形条件下,可能存在 CO_2 和水汽的储存、平流、泄漏等

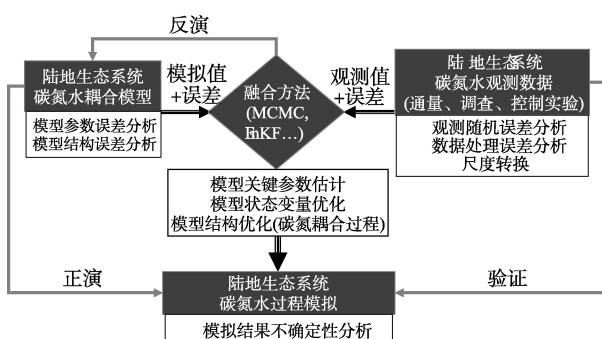


图6 ChinaFLUX模型—数据融合系统(MDFS)

Fig.6 Model-data fusion system of ChinaFLUX

现象,影响测定数据准确度。针对这些实际问题,根据边界层扩散理论,研制了复杂地形和夜间大气稳定层结条件下的通量观测技术及其数据处理方法。通过试验研究,解决了采样频率与平均周期确定(Sun et al, 2006)、坐标轴选择和变换方法(Zhu et al, 2005)、夜间通量低估校正(张一平等, 2005; Wen et al, 2005; Zhang et al, 2005; Zhu et al, 2006)、冠层储存项计算(张弥等, 2010; 姚玉刚等, 2011; Han et al, 2003)、能量闭合(Li et al, 2004)、高频信号损失校正与低频大气传输对通量影响(Wen et al, 2005; Wu et al, 2005)、开闭路观测系统性能对比(Song et al, 2005)、箱式法和涡度相关法(郑泽梅等, 2008)、缺失数据插补策略(李春等, 2008; 刘敏等, 2010; He et al, 2006; Zhang, Yu, et al, 2006a)、辐射仪器衰减校正(朱治林等, 2011)、通量覆盖区评价(Mi et al, 2006)和通量数据不确定性分析(Liu et al, 2009, 2012; He et al, 2010)等技术难点,建立了复杂地形/植被条件下生态系统碳水通量观测技术与数据分析方法论(于贵瑞等, 2008)。

3.2.2 观测数据质量控制、远程传输和在线处理系统

基于通量观测理论和技术研究成果,ChinaFLUX在系统评价观测仪器精度和稳定性的基础上,研究制定了统一的联网观测数据流程和技术规范(于贵瑞等, 2008; Yu et al, 2006)。自主开发了观测系统远程监控和数据实时传输系统,以及研制了通用性的碳水通量数据分析和计算机自动化处理系统(于贵瑞等, 2008; 何洪林等, 2012; Liu et al, 2012),保障了观测技术的规范性、观测数据的可比性和网络管理的高效性(图7)。

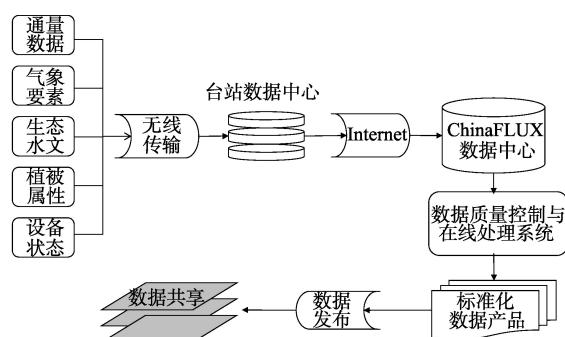


图7 生态系统碳水通量和视频数据的实时采集—传输—处理—可视化—共享的一体化流程

Fig.7 Flowchart of data collection, transfer, processing, visualization and sharing system for flux data and videos from local sites

3.3 陆地生态系统碳循环及其通量动态过程机制

ChinaFLUX 经过连续 10 余年的联网观测, 获取中国唯一的碳通量/储量动态变化科学数据, 填补了东亚季风区通量观测数据的区域空白。进而开展了生态系统碳—氮—水收支评价、通量交换过程动态变化规律及其环境控制机制, 以及生态系统碳通量空间格局及其生物地理生态学机制等方面的研究, 并且取得了一系列的重要进展。

3.3.1 生态系统碳汇功能评价和碳—氮—水通量特征的统计分析

基于 ChinaFLUX 的长期观测研究, 给出了中国不同类型生态系统的碳—氮—水通量的科学评估。数据统计分析表明, 中国东部森林生态系统表现为净 CO₂ 吸收, 并进一步确认了中国老龄林(如长白山、哀牢山和鼎湖山)(Guan et al, 2006; Wang et al, 2006; Zhang J H, et al, 2006; Zhang, Yu et al, 2006a; Yu et al, 2008, 2013; Tan et al, 2010, 2012; Zhang, Tan et al, 2010; Yan et al, 2013; Liu et al, 2014)和南方亚热带人工林(Liu et al, 2006; Wen et al, 2010)具有显著的固碳能力。中国北方草地生态系统总体上表现为较弱的碳汇, 但在不同生态系统和年份之间存在很大的变异性, 并易受到年际环境变化等因素的干扰而表现为碳源(Fu et al, 2006, 2009; Hao, 2006; Li Y N et al, 2006; Shi et al, 2006; Zhao et al, 2006; Wang et al, 2011; Yu et al, 2013)。在不考虑籽粒和秸秆移出的情况下, 中国华北地区农田表现出较强的吸收能力(Li J, et al, 2006; Yu et al, 2013)。

生态系统的水分利用效率(WUE)是表征生态系统碳水关系的重要指标。研究揭示了 WUE 的空间格局规律及其时空变化的“保守性和变异性”特征, 发现并揭示了温带和亚热带森林(Yu et al, 2008)、草地(Hu et al, 2008)和农田(Zhao et al, 2007)生态系统碳—水通量动态变化过程的“耦合与解耦”及其环境与生物学控制机制。同时, 基于观测数据还揭示了不同地带性生态系统 WUE 对环境响应的差异(Zhu, Yu, Wang et al, 2014)。

对中国区域的水分利用效率, 造林固碳成本以及植物水分效率的综合分析发现, 在中国存在着以 400~500 mm 降雨分界线的造林固碳成本临界阈值, 在该边界以北区域大规模开展造林固碳工程, 存在一定的环境风险(Gao et al, 2014)。同时, 西南地区的橡胶林种植也会引起水分的大量消耗(Tan et al, 2011)。因此, 中国开展造林运动需要充分考

虑该地区的水分利用效率和造林固碳成本。

通过 3 年观测研究发现, 中国东部主要森林生态系统大气无机氮沉降通量平均值为 10.6 kg N hm⁻²a⁻¹, 其中 70% 以上为铵态氮沉降(Sheng et al, 2011, 2012); 并且在当前的大气氮沉降水平下, 中国森林生态系统仍处于“氮限制”状态(Sheng et al, 2014; Zhan et al, 2014)。基于 280 个站点观测数据的地统计研究表明, 中国无机氮湿沉降平均水平由 1990s 的 11.11 kg N hm⁻²a⁻¹ 上升到 2000s 的 13.87 kg N hm⁻²a⁻¹, 增加了近 25%。氮沉降通量空间格局的形成主要由氮肥施用、能源消耗和降水 3 个因子决定; 1990s 到 2000s 的氮沉降年代际变化主要是由能源消费量和氮肥施用量的增加引起的(Jia et al, 2014)。

3.3.2 生态系统碳水通量的动态变化规律及其环境控制机制

通量观测为认识生态系统碳水交换过程的动态变化规律及其环境控制机制提供了直接观测数据。基于 ChinaFLUX 连续观测资料, 分析了不同类型生态系统碳通量的日、季节和年际变化特征及其生物和环境控制机制, 生态系统总初级生产力(GPP)、生态系统呼吸(Re)和净生态系统生产力(NEP)对辐射、气温、风速等气象因子, 土壤水分和氮素养分等土壤因子, 以及植物物候、叶面积指数等生物因子的响应过程, 以及这些响应关系的定量表达函数。

基于对生态系统碳通量观测数据的分析, 发现了生态系统碳交换过程中的一些重要的生态学现象, 并对这些现象的形成原因和内在机制开展了深入分析与探讨。例如, 发现了温带草原和高寒草甸群落尺度的“光抑制”现象及其内在形成机制与差异性(Fu et al, 2006, 2009)、生态系统碳通量对温度的非线性响应(于贵瑞等, 2008)、土壤呼吸温度响应的异质性(贾丙瑞等, 2013; Wang et al, 2007; Zheng, 2009; Song et al, 2013; Tan et al, 2013)、生态系统碳通量组分间的“同向偶联”(Chen et al, 2013; Yu et al, 2013)等新的生态学现象。分析评估了散射辐射对碳通量的影响(张弥, 2009; Zhang, Yu, et al, 2010, 2011; Fan et al, 2011)、土壤水分对生态系统呼吸的控制作用(Wen et al, 2006)、脉冲降水对碳通量的激发效应(Hao et al, 2010, 2011, 2013)、山地的碳湖效应(姚玉刚等, 2012; Yao et al, 2012)、干旱作用对碳通量的制约作用(郝彦宾等, 2010; Wang et al, 2011; Yan et al, 2011a, 2011b)、季节性干旱或降水季节分配变化对碳汇功能的影响(Yu et al, 2005; Wen et al, 2006,

2010; Zhang, Tan, 2010)。揭示了群落光能利用效率的时空变异 (Zhang, Yu, et al, 2006b; Wu et al, 2008; Yuan et al, 2010)、生态系统碳通量年际变异(Wen et al, 2010; Zhang W J, et al, 2011; Tan et al, 2012; Yan et al, 2012, 2013)等变化规律及其形成机制。

3.4 生态系统碳通量的空间格局及其生物地理生态学机制

以 ChinaFLUX 的生态系统碳通量观测数据为基础,结合亚洲和全球的观测数据,定量评价和刻画了中国和东亚地区的生态系统碳通量空间变异特征,揭示了区域尺度上温度和降水对生态系统碳通量空间格局的生物地理学控制机制,发展了简单、有效的区域尺度生态系统碳交换通量空间格局的地学统计评估模型。

3.4.1 发现了“东亚季风区森林碳汇功能区”并揭示了其成因

通过对亚洲区域生态系统碳通量观测数据的整合分析,发现了一个长期被忽视的具有巨大潜力的“亚洲东部亚热带森林碳汇功能区”。该区域的NEP年总量约0.87 Pg C,年均值为362.1 g C m⁻²,高于已经被国际学术界广泛认可的“北美和欧洲温带森林”两大碳汇区。进一步的分析证实,该区域高强度的NEP是由于氮沉降增加与林龄结构和气候特征的叠加作用所决定的(Yu et al, 2014)。

3.4.2 揭示了生态系统碳通量空间格局生物地理生态学机制

整合分析中国区域52个观测站、亚洲和北半球182个观测站的通量数据,发现中国和亚洲陆地生态系统GPP、Re和NEP存在显著的纬向和经向地带性分布规律。研究表明,年均温度(MAT)和降水量(MAP)的空间格局决定了亚洲地区生态系统GPP、Re和NEP空间变异的75%、68%~78%和48%~66%,并且GPP、NEP和Re之间存在着空间上的“耦联共变规律”,单位GPP的变化对Re的贡献率为0.68,对NEP的贡献率为0.29(Chen et al, 2013; Yu et al, 2013)。这些研究工作重新论证了气候因素决定生态系统碳吸收和排放通量格局生物地理生态学基本规律及其机制的科学认知。

3.4.3 开发了评估生态系统碳交换通量空间格局的地统计模型

根据对生态系统GPP、Re、NEP及土壤呼吸(RS)空间格局生物地理学机制的认知,首次建立了中国区域GPP、NEP、Re和Rs的生物地理学统计模式,量化了中国陆地生态系统的碳汇强度。评估结

果表明:21世纪初,中国区域GPP、NEP、Re和Rs分别为7.78、1.71、6.05和3.96 Pg C a⁻¹,分别占全球总量的4.45%~7.04%、8.14%~11.40%、5.87%~6.30%和4.93%。中国区域陆地碳汇强度为0.18~0.375 Pg C,以全球碳汇强度(2.5 Pg C a⁻¹)计算,则中国区域的碳汇量占全球的7.2%~15%(Yu et al, 2010; Zhu, Yu, He, et al, 2014)。

4 全球尺度通量塔观测网络的发展趋势与 ChinaFLUX 的发展展望

4.1 新时代的生态学研究对生态观测技术的革新和科学数据积累的迫切需求

生态学作为研究生物圈变化机制、可持续利用和管理的基础学科,其基本任务是发现生态现象、认识生态规律、揭示过程机理、定量评估功能、科学预测变化,其科学理念和科学原理及关键技术已经成为产业发展、自然保护和社会秩序设计的指导原则和理论基础(Odum et al, 2005; Chapin III et al, 2011)。生态学作为生物科学的一个分支,经过了长期的孕育、阶跃式的发展和不断地演变和进化。经典生态学主要关注生物与其生存环境的相互作用关系;自20世纪60年代以来随着生态系统概念的普及,生态系统生态学得以快速发展。经过60年代国际生物学研究计划(IPB),70年代的人与生物圈计划(MAB),以及80年代开始的国际地圈—生物圈计划(IGBP),生态学研究的重点逐渐趋向于关注全球和区域的可持续发展问题。

全球气候变化、粮食安全、清洁水安全、生物多样性丧失和生态系统服务退化等全球范围内的重大问题日益严重化(Millennium Ecosystem Assessment, 2005; IPCC, 2007; Barnosky et al, 2012; Brook et al, 2013),为生态学研究带来了巨大压力,也为生态学进入新的发展时代提供了机遇(Carpenter et al, 2009; Chave, 2013)。如何将生态学研究尽快地推进到大尺度、定量化、可预测和可预警的新时代,不仅成为生态学自身发展的迫切愿望,也是区域和全球可持续发展的迫切需求,更是社会公众的殷切期待。

然而,这一愿望的实现必须突破来自多方面的制约,其中最根本性的制约是缺乏可以直接观测生态系统结构和功能变化的技术手段,生态系统尺度的科学数据积累还无法满足实现生态学研究从定性走向定量、从典型生态系统到区域/全球、从现象

分析和机制阐释到科学预测的现实发展需求。

生态系统通量观测技术的发明正是生态观测的一次重大技术革命,它实现了对生态系统尺度的生产力、能量平衡和温室气体交换等功能和过程的直接测定,特别是全球尺度通量塔观测网络(Global Flux Tower Conjoint Observation, GFTCO)的联合观测,最有可能带来生态系统研究从生态现象观察和生态要素观测跨越到全球生态系统功能状态变化监测的重大突破。

4.2 全球气象观测事业及其科技发展过程对全球通量观测研究的启示

气象观测事业经过了几百年的努力才逐步实现了由单个气象要素的人工观测,走向多要素的自动化协同观测、区域性的高空—卫星—雷达联合观测,以及涵盖全球的地面观测—航空观测—卫星遥感的立体观测体系。基于这些观测技术,通过近百年的科学数据积累和应用研究,直到20世纪50年代才发明了气象数值模拟和预测预报技术;80年代进而诞生了气象预报事业和气候预测,到20世纪末又建立了全球气候变化科学的理论和应用技术体系,其中观测技术的革新和应用在气象学从单要素测定到全球尺度气候观测和预测的发展过程中发挥了重要的支撑作用。

回顾全球气象观测事业的发展历史及其科技贡献,为重新认识通量观测事业的科学使命提供了重要借鉴和启示:一个定量化、可预测和可预报科学的诞生与发展必须依靠观测技术的科技进步和基础性科学数据的长期积累。

基于通量观测技术在生态系统研究中的独特价值,生态学家们有理由相信,该技术将会推动生态观测事业从生态要素观测向生态系统功能监测跨越的重大革命,因而GFTCO必将会为生态学研究进入大尺度、定量化、可预测和可预警的新阶段奠定数据基础。这些科学数据将会促进生态学研究由定性走向定量、由生态分析走向科学预测,由基础理论研究走向直接服务全球可持续发展的定量评估、科学预测、情景预估和生态安全预警的重大转变。因此可以认为:“走气象观测研究事业发展之路,奠定生态预测科学的数据基础”,是全球尺度通量观测研究事业发展的必由之路。

4.3 全球通量观测是奠定生态预测科学数据基础的技术途径

生态学家们从气象观测事业和科学发展过程

中得到了启示,期望以通量塔观测网络为基础,建立起生态系统结构和功能的多要素自动化系统观测、区域性高空—卫星—雷达的联合观测,以及涵盖全球的地面观测—航空观测—卫星遥感立体观测网络体系。

但遗憾的是,全球尺度通量观测的独特优势和潜在价值以及对可持续发展的重大意义和作用仍未被科技界、公众和政府充分认识,导致了推动全球通量塔观测网络的标准化建设、观测行动以及数据资源共享等事业的发展仍然步履艰难。

当前,需要重新认识全球通量观测事业的科学使命,寻求实现长期科学数据积累的技术途径,建立起未来50~100年的生态观测事业的发展路线图,为生态学理论研究提供更为充实的科学数据。可以借鉴气象观测事业发展的经验,按照世界气象组织(WMO)的组织形式,深度整合全球通量观测网络与生态观测网络的科技资源,构建世界生态组织(World Ecological Organization, WEO),有效组织和开展涵盖全球尺度的生态系统、自然景观、重要区域以及全球生态系统的生态观测网络,并以这一网络为基础,发展生态观测卫星系统,推动生态系统自动化、立体化、标准化观测技术体系的发展和完善,改进和优化生态系统与生物地球化学模型体系,采用“多尺度观测,多方法印证,多过程融合,跨尺度认知,跨尺度模拟”的新路径,逐步实现直接面向全球可持续发展的定量评估、科学预测、情景预估和生态安全预警等科学目标。

4.4 ChinaFLUX的主要发展方向、关键科学问题与工作重点

ChinaFLUX 经过10余年的发展,不仅填补了亚洲季风区观测研究的区域空白,成为FLUXNET中的主要区域性网络,而且在通量观测技术、生态系统碳—氮—水交换过程及其环境控制机理、模型模拟和区域碳—氮—水收支评估等研究领域取得了重要进展。但是,目前全球通量观测研究正向着多目标、精细化和集成化的研究方向快速发展,ChinaFLUX如何适应这一发展趋势,迎接来自多方面的重大挑战,这就需要认真思考中国区域的陆地生态系统碳—氮—水通量协同观测研究网络的发展方向、关键科学问题及其和未来的工作重点(图8)。

4.4.1 主要发展方向

(1) 构建多目标痕量温室气体通量观测体系,

从现有的CO₂、H₂O和能量通量观测逐步向CO₂、H₂O、CH₄、NO、NO₂、N₂O、NH₃、HNO₃等多类型碳—氮—水痕量气体通量的综合观测体系发展。

(2) 开展多站点协同观测,提高观测站点的空间代表性,以获取更多类型生态系统的直接观测数据,服务于生态系统对全球变化的响应和适应研究。

(3) 形成以温室气体通量为核心的立体化观测体系,充分获取不同空间尺度上的通量信息,服务于区域和全球尺度的碳源/汇评估。

4.4.2 关键科学问题

生态系统碳—氮—水耦合循环是生态系统与全球变化研究的科学前沿,为准确地评价生态系统过程和功能对全球变化的响应和适应,客观上也必须开展碳—氮—水耦合循环的综合观测与研究。

生态系统碳—氮—水通量及其相互关系是解析其耦合循环的重要指标,而生态系统碳—氮—水通量受多个生理生态过程的调控,同时,气候变化对碳—氮—水交换过程和平衡关系也产生重要影响。因此,未来ChinaFLUX需要重点解决以下4个基本科学问题:①陆地生态系统碳—氮—水耦合循环的关键过程及其生物调控机制;②生态系统碳—

氮—水耦合循环通量的计量平衡关系及其环境影响机制;③生态系统碳—氮—水耦合循环对陆地生态系统碳源/汇时空格局的调控机制;④生态系统碳—氮—水耦合循环的生物过程对全球变化的响应和适应机制。

对于这些基本科学问题的解决不仅可以深入认知生态系统碳—氮—水耦合循环过程机制,而且有助于寻求生态系统碳—氮—水循环及其服务功能调控的技术路径和科学原理,具有重要的科学价值和广泛的应用前景。

4.4.3 近期工作重点:

(1) 观测体系的完善。通过技术更新和提升,尽快构建站点尺度多目标、多过程的痕量温室气体的长期观测技术体系,更好地服务于生态系统碳源/汇及其环境响应的科学评价。

(2) 观测能力的提升。在借鉴国际通量观测研究发展趋势的基础上,提高ChinaFLUX整体观测水平,实现地基观测和天基遥感相互配合的一体化综合性观测体系。

(3) 协同观测研究的开展。进一步加强与国内通量观测站点的协作与联合,推动现有观测资源和

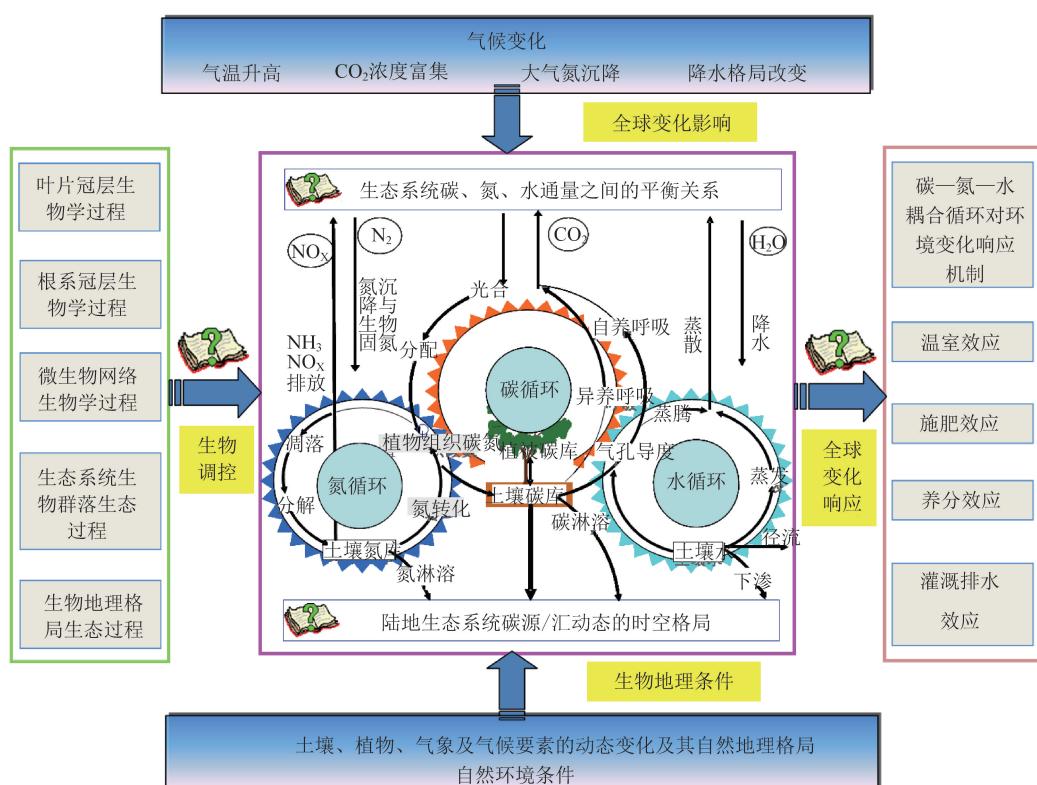


图8 生态系统碳氮水循环过程及其全球变化响应

Fig.8 Ecosystem carbon, nitrogen and water cycles and their responses to global change

数据资源的共享与交流,服务于社会公众和科学的研究需求。

(4) 集成研究工作的加强。通过数据集成和数据挖掘,充分发挥观测数据的潜在价值;通过综合分析,回答目前碳循环和全球变化领域面临的区域和全球尺度科学问题。

(5) 人才队伍的培养。通过举办不同层次和形式的培训班与研讨会,培养一批稳定的通量观测研究队伍,为中国通量观测研究事业的持续发展提供人才支持。

参考文献(References)

- 顾峰雪,陶波,温学发,等. 2010. 基于CEVSA2模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟. 生态学报, 30(23): 6598-6605. [Gu F X, Tao B, Wen X F, et al. 2010. Modeling long-term changes in carbon fluxes and storage in a subtropical coniferous plantation based on CEVSA2 model. *Acta Ecologica Sinica*, 30(23): 6598-6605.]
- 顾峰雪,于贵瑞,温学发,等. 2008. 干旱对亚热带人工针叶林碳交换的影响. 植物生态学报, 32(5): 1041-1051. [Gu F X, Yu G R, Wen X F, et al. 2008. Drought effects on carbon exchange in a subtropical coniferous plantation in China. *Journal of Plant Ecology*, 32(5): 1041-1051.]
- 郝彦宾,王艳芬,崔骁勇. 2010. 干旱胁迫降低了内蒙古羊草草原的碳累积. 植物生态学报, 34: 898-906. [Hao Y B, Wang Y F, Cui X Y. 2010. Drought stress reduces the carbon accumulation of the *leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia, China. *Journal of Plant Ecology*, 34: 898-906.]
- 何洪林,张黎,黎建辉,等. 2012. 中国陆地生态系统碳收支集成研究的E-Science系统构建. 地球科学进展, 27(2): 246-254. [He H L, Zhang L, Li J H, et al. 2012. E-Science system for carbon budget integration research of Chinese terrestrial ecosystem. *Advances in Earth Science*, 27(2): 246-254.]
- 黄辉,于贵瑞,伏玉玲,等. 2008. 温带阔叶红松林生态系统潜热通量模拟:气孔导度组合模型在Shuttleworth-Wallace双源模型中的应用. 生态学报, 28(7): 3212-3220. [Huang H, Yu G R, Fu Y L, et al. 2008. Simulation of latent heat flux over a temperate mixed forest: application of a combination model to Shuttleworth-Wallace model. *Acta Ecologica Sinica*, 28(7): 3212-3220.]
- 贾丙瑞,周广胜,蒋延玲,等. 2013. 寒温针叶林土壤呼吸作用的时空特征. 生态学报, 33(23): 7516-7524. [Jia B R, Zhou G S, Jiang Y L, et al. 2013. Temporal-spatial characteristics of soil respiration in Chinese boreal forest ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 33(23): 7516-7524.]
- 李春,何洪林,刘敏,等. 2008. ChinaFLUX CO₂通量数据处理系统与应用. 地球信息科学, 10(5): 557-565. [Li C, He H L, Liu M, et al. 2008. The design and application of CO₂ flux data processing system at ChinaFLUX. *Geo-Information Science*, 10(5): 557-565.]
- 刘敏,何洪林,于贵瑞. 2010. 数据处理方法不确定性对CO₂通量组分估算的影响. 应用生态学报, 21(9): 2389-2396. [Liu M, He H L, Yu G R, 2010. Impacts of uncertainty in data processing on estimation of CO₂ flux components. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(9): 2389-2396.]
- 米娜,于贵瑞,王盘兴,等. 2007. 基于EALCO模型对中亚热带人工针叶林CO₂通量季节变异的模拟. 植物生态学报, 31(6): 1119-1131. [Mi N, Yu G R, Wang P X, et al. 2007. Modeling seasonal variation of CO₂ flux in a subtropical coniferous forest using the EALCO model. *Journal of Plant Ecology*, 31(6): 1119-1131.]
- 任小丽,何洪林,刘敏,等. 2012. 基于模型数据融合的千烟洲亚热带人工林碳水通量模拟. 生态学报, 32(23): 7313-7326. [Ren X L, He H L, Liu M, et al. 2012. Modeling of carbon and water fluxes of Qianyanzhou subtropical coniferous plantation using model-data fusion approach. *Acta Ecologica Sinica*, 32(23): 7313-7326.]
- 盛文萍,于贵瑞,方华军,等. 2010. 大气氮沉降通量观测方法. 生态学报, 29(8): 1671-1678. [Sheng W P, Yu G R, Fang H J, et al. 2010. Observation methods for atmospheric nitrogen deposition. *Chinese Journal of Ecology*, 29(8): 1671-1678.]
- 姚玉刚,张一平,于贵瑞,等. 2011. 热带森林植被冠层CO₂储存项的估算方法研究. 北京林业大学学报, 33(1): 23-29. [Yao Y G, Zhang Y G, Yu G R, et al. 2011. Estimation of CO₂ storage flux between forest and atmosphere in a tropical forest. *Journal of Beijing Forestry University*, 33(1): 23-29.]
- 姚玉刚,张一平,于贵瑞,等. 2012. 热带季节雨林近地层CO₂堆积的气象条件分析. 应用基础与工程科学学报, 20(1): 36-45. [Yao Y G, Zhang Y P, Yu G R, et al. 2012. An analysis of meteorological conditions causing CO₂ pooling in the surface layer in a tropical seasonal rain forest, SW China. *Journal of Basic Science and Engineering*, 20(1): 36-45.]
- 于贵瑞,方华军,伏玉玲,等. 2011. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. 生态学报, 31(19): 5449-5459. [Yu G R, Fang H J, Fu Y L, et al. 2011. Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 31(19): 5449-5459.]
- 于贵瑞,高扬,王秋凤,等. 2013. 陆地生态系统碳-氮-水循环的关键耦合过程及其生物调控机制探讨. 中国生态农业学报, 21(1): 1-13. [Yu G R, Gao Y, Wang Q F, et al. 2013. Discussion on the key processes of carbon-nitrogen-water coupling cycles and biological regulation mechanisms in terrestrial ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 21(1): 1-13.]
- 于贵瑞,何念鹏,王秋凤. 2013. 中国区域生态系统碳收支及碳汇功能:理论基础与综合评估. 科学出版社: 1-321. [Yu G R, He N P, Wang Q F. 2013b. Carbon budget and carbon sink in China: theoretical basis and comprehen-

- sive assessment. Beijing: Science Press: 1-321.]
- 于贵瑞,王秋凤,刘迎春,等.2011.区域尺度陆地生态系统固碳速率和增汇潜力概念框架及其定量认证科学基础.地理科学进展,30(7): 771-787. [Yu G R, Wang Q F, Liu Y C, et al. 2011. Conceptual framework of carbon sequestration rate and potential increment of carbon sink of regional terrestrial ecosystem and scientific basis for quantitative carbon authentication. *Progress in Geography*, 30(7): 771-787.]
- 于贵瑞,王秋凤,朱先进.2011.区域尺度陆地生态系统碳收支评估方法及其不确定性.地理科学进展,30(1): 103-113. [Yu G R, Wang Q F, Zhu X J. 2011. Methods and uncertainties in evaluating the carbon budgets of regional terrestrial ecosystems. *Progress in Geography*, 30(1): 103-113.]
- 于贵瑞,孙晓敏.2008.中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征.科学出版社:1-676. [Flux measurement and research of terrestrial ecosystem in China. 2008. Science Press: 1-676.]
- 于贵瑞,孙晓敏,等.2006.陆地生态系统通量观测的原理与方法.高等教育出版社:1-508. [Principles of flux measurement in terrestrial ecosystems. 2006. China Higher Education Press: 1-508.]
- 张黎,于贵瑞,Luo Yiqi,等.2009.基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟.植物生态学报,33(6): 1044-1055. [Zhang L, Yu G R, Luo Y Q, et al. 2009. Carbon cycle modeling of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain of China using the model-data fusion approach. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(6): 1044-1055.]
- 张弥,温学发,于贵瑞,等.2010.二氧化碳储存通量对森林生态系统碳收支的影响.应用生态学报,21(5): 1201-1209. [Zhang M, Wen X F, Yu G R, et al. 2010. Effects of CO₂ storage flux on carbon budget of forest ecosystem. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21(5): 1201-1209.]
- 张弥,于贵瑞,张雷明,等.2009.太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响.植物生态学报,33(2): 270-282. [Zhang M, Yu G R, Zhang L M, et al. 2009. Effects of solar radiation on net ecosystem exchange of broad-leaved-korean pine mixed forest in Changbai Mountain, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33(2): 270-282.]
- 张一平,窦军霞,孙晓敏,等.2005.热带季节雨林林冠碳通量不同校正方法的比较分析.应用生态学报,16(12): 2253-2258. [Zhang Y P, Dou J X, Sun X M, et al. 2005. A comparison of various correction methods for calculating carbon flux above tropical seasonal rainforest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 16(12): 2253-2258.]
- 郑泽梅,于贵瑞,孙晓敏,等.2008.涡度相关法和静态箱/气相色谱法在生态系统呼吸观测中的比较.应用生态学报,19(2): 290-298. [Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, et al. 2008. Comparison of eddy covariance and static chamber/gas chromatogram methods in measuring ecosystem respiration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(2): 290-298.]
- 朱治林,孙晓敏,于贵瑞.2011.典型森林生态系统总辐射和光合有效辐射长期观测中的仪器性能衰变和数据校正.应用生态学报,22(11): 2954-2962. [Zhu Z L, Sun X M, Yu G R, 2011. Radiometers performance attenuation and data correction in long-term observation of total radiation and photosynthetically active radiation in typical forest ecosystems in China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22(11): 2954-2962.]
- Baldocchi D. 2008. Breathing of the terrestrial biosphere: lessons learned from a global network of carbon dioxide flux measurement systems. *Australian Journal of Botany*, 56(1): 1-26.
- Baldocchi D . 2014. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere-the state and future of the eddy covariance method. *Global Change Biology*, doi: 10.1111/gcb.12649.
- Baldocchi D, Falge E, Gu L H, et al. 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82: 2415-2434.
- Barnosky A D, Hadly E A, Bascompte J, et al. 2012. Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature*, 486: 52-58.
- Brook B W, Ellis E C, Perring M P, et al. 2013. Does the terrestrial biosphere have planetary tipping points? *Trends in Ecology & Evolution*, 28, 396-401.
- Cao M K, Yu G R, Liu J Y, et al. 2005. Multi-scale observation and cross-scale mechanistic modeling on terrestrial ecosystem carbon cycle. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 17-32.
- Carpenter S R, Armbrust E V, Arzberger P W, et al. 2009. Accelerate synthesis in ecology and environmental sciences. *Bioscience*, 59: 699-701.
- Chapin III FS, Matson, PA, Vitousek P. 2011. Principles of terrestrial ecosystem ecology (2ed). New York, NY: Springer: 544.
- Chave J. 2013. The problem of pattern and scale in ecology: what have we learned in 20 years? *Ecology Letters*, 16: 4-16.
- Chen Z, Yu G R, Ge J P, et al. 2013. Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182: 266-276.
- Crutzen P J, Steffen W. 2003. How long have we been in the Anthropocene era? *Climatic Change*, 61(3): 251-257.
- Doherty S, Bojinski S, Henderson-Sellers A, et al. 2009. Lessons learned from IPCC AR4: scientific developments needed to understand, predict, and respond to climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(4): 497-513.
- Fan Y Z, Zhang X Z, Wang J S, et al. 2011. Effect of solar radiation on net ecosystem CO₂ exchange of alpine meadow on the Tibetan Plateau. *Journal of Geographical Sciences*

- ences, 21(4): 666-676.
- Fu Y L, Yu G R, Sun X M, et al. 2006. Depression of net ecosystem CO₂ exchange in semi-arid *leymus chinensis* steppe and alpine shrub. Agricultural and Forest Meteorology, 137: 234-244.
- Fu Y L, Zheng Z M, Yu G R, et al. 2009. Environmental influences on carbon dioxide fluxes over three grassland ecosystems in China. Biogeosciences, 6: 2879-2893.
- Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. 2004. Nitrogen cycles: past, present, and future. Biogeochemistry, 70: 153-226.
- Gao Y, Yu G R, He N P, et al. 2012. Is there an existing healthy threshold for carbon storage in the ecosystem? Environmental Science and Technology, 46(9): 4687-4688.
- Gao Y, Zhu X J, Yu G R, et al. 2014. Water use efficiency threshold for terrestrial ecosystem carbon sequestration in China under afforestation. Agricultural and Forest Meteorology, 195-196: 32-37.
- Gao Y N, Yu G R, Yan H M, et al. 2014. A MODIS-based photosynthetic capacity model to estimate gross primary production in Northern China and the Tibetan Plateau. Remote Sensing of Environment, 148: 108-118.
- Gu F X, Zhang Y D, Tao B, et al. 2010. Modeling the effects of nitrogen deposition on carbon budget in two temperate forests. Ecological Complexity, 7: 139-148.
- Guan D X, Wu J B, Zhao X S, et al. 2006. CO₂ FLUX over an old, temperate mixed forest in Northeastern China. Agricultural and Forest Meteorology, 137: 138-149.
- Han S J, Lin LS, Yu G R, et al. 2003. Dynamics of profiles and storage of carbon dioxide in broadleaved/Korean forest in Changbai Mountain. Journal of Forestry Research, 14(4): 275-279.
- Hao Y B, Kang X M, Wu X, et al. 2013. Is frequency or amount of precipitation more important in controlling CO₂ fluxes in the 30-year-old fenced and the moderately grazed temperate steppe? Agriculture, Ecosystems and Environment, 171(1): 63-71.
- Hao Y B, Niu H S, Wang Y F, et al. 2011. Rainfall variability in ecosystem CO₂ fluxes studies. Climate research, 46: 77-83.
- Hao Y B, Wang Y F, Mei X R, et al. 2010. The response of ecosystem CO₂ exchange to small precipitation pulses over a temperate steppe. Plant Ecology, 209(2): 335-347.
- Hao Y B, Wang Y F, Sun X M, et al. 2006. Seasonal variation in carbon exchange and its ecological analysis over *Leymus chinensis* steppe in Inner Mongolia. Science in China: Earth Sciences, 49(SII): 186-195.
- He H L, Liu M, Sun X M, et al. 2010. Uncertainty analysis of eddy flux measurements in typical ecosystems of ChinaFLUX. Ecological Informatics, 5(6): 492-502.
- He H L, Yu G R, Zhang L M, et al. 2006. Simulating CO₂ FLUX of three different ecosystems in ChinaFLUX based on artificial neural networks. Science in China: Earth Sciences, 49(SII): 252-261.
- Hu Z M, Li S G, Yu G R, 2013. Modeling evapotranspiration by combining a two-source model, a leaf stomatal model, and a light-use efficiency model. Journal of Hydrology, 501: 186-192.
- Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, et al. 2008. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. Global Change Biology, 14(7): 1609-1619.
- Huang M, Ji J J, Deng F, et al. 2014. Impacts of extreme precipitation on tree plantation carbon cycle. Theoretical and Applied Climatology, 115(3-4): 655-665.
- IPCC. 2007. Climate change 2007: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change//Core Writing Team, R. K. Pachauri and A. Reisinger. 2007. Intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland, 104.
- Ji J J, Huang M, Li K R. 2008. Prediction of carbon exchanges between China terrestrial ecosystem and atmosphere in 21st century. Science in China: Earth Sciences, 51(6): 885-898.
- Jia Y L, Yu G R, He N P, et al. 2014. Spatial and decadal variations in inorganic nitrogen wet deposition in China induced by human activity. Scientific Reports, doi: 10.1038/srep03763.
- Ju W M, Wang S Q, Yu G R, et al. 2010. Modeling the impact of drought on canopy carbon and water fluxes for a subtropical evergreen coniferous plantation in southern China through parameter optimization using an ensemble Kalman filter. Biogeosciences, 7(3): 845-857.
- Le Quéré C, Andres R J, Boden T, et al. 2013. The global carbon budget 1959-2011. Earth System Science Data, 5: 165-185.
- Leuning R, Yu G R. 2006. Carbon exchange research in ChinaFLUX. Agricultural and Forest Meteorology, 137: 123-124.
- Li J, Yu Q, Sun X M, et al. 2006. Carbon dioxide exchange and the mechanism of environmental control in a farmland ecosystem in North China Plain. Science in China: Earth Sciences, 49(SII): 226-240.
- Li Y N, Sun X M, Zhao X Q, et al. 2006. Seasonal variations and mechanism for environmental control of NEE of CO₂ concerning the *potentilla fruticosa* in alpine shrub meadow of Qinghai-Tibet Plateau. Science in China: Earth Sciences, 49(SII): 174-185.
- Li Z Q, Yu G R, Wen X F, et al. 2005. Energy balance closure at ChinaFLUX sites. Science in China: Earth Sciences, 48(SI): 51-62.
- Li Z Q, Yu G R, Xiao X M, et al. 2007. Modeling gross primary production of alpine ecosystems in the Tibetan Plateau using MODIS images and climate data. Remote Sensing

- of Environment, 107(3): 510-519.
- Liu M, He H L, Yu G R, et al. 2009. Uncertainty analysis of CO₂ flux components in subtropical evergreen coniferous plantation. *Science in China: Earth Sciences*, 52: 257-268.
- Liu M, He H L, Yu G R, et al. 2012. Uncertainty analysis in data processing on the estimation of net carbon exchanges at different forest ecosystems in China. *Journal of Forest Research*, 17(3): 312-322.
- Liu Y C, Yu G R, Wang Q F, et al. 2014. How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests? *Global Ecology and Biogeography*, 23: 323-333.
- Liu Y F, Yu G R, Wen X F, et al. 2006. Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China: Earth Sciences*, 49(SII): 99-109.
- Mi N, Yu G R, Wang P X, et al. 2006. A preliminary study for spatial representativeness of flux observation at ChinaFLUX sites. *Science in China: Earth Sciences*, 49(SII): 24-35.
- Mi N, Yu G R, Wen X F, et al. 2009. Use of ecosystem flux data and a simulation model to examine seasonal drought effects on a subtropical coniferous forest. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45(2): 207-220.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and human well-being: synthesis. Washington, DC: Island Press.
- Odum E P, Barrett C W. 2005. Fundamentals of ecology (5ed). Florence, Italy: Thomson Brooks/Cole Publishing.
- Raupach M R, Canadell J G. 2010. Carbon and the anthropocene. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2: 210-218.
- Ren C Y, Yu G R, Wang Q F, et al. 2005. Photosynthesis-transpiration coupling model at canopy scale in terrestrial ecosystem. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 160-171.
- Saigusa N, Li S G, Kwon H, et al. 2013. Dataset of CarboEast-Asia and uncertainties in the CO₂ budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research*, 18(1): 41-48.
- Sheng W P, Ren S J, Yu G R, et al. 2011. Patterns and driving factors of WUE and NUE in natural forest ecosystems along the North-South transect of Eastern China. *Journal of Geographical Sciences*, 21(4): 651-665.
- Sheng W P, Yu G R, Fang H J, et al. 2014. Regional pattern of ¹⁵N natural abundance in the forest ecosystems along a large transect in eastern China. *Scientific Reports*, doi: 10.1038/srep04249.
- Sheng We P, Yu G R, Jiang C M, et al. 2012. Monitoring nitrogen deposition in typical forest ecosystems along a large transect in China. *Environmental Monitoring and Assessment*. doi:10.1007/s10661-012-2594-0.
- Shi P L, Sun X M, Xu L L, et al. 2006. Net ecosystem CO₂ exchange and controlling factors in a steppe-Kobresia meadow on the Tibetan Plateau, *Science in China: Earth Sciences*, 49(SII): 207-218.
- Song Q H, Tan Z H, Zhang Y P, et al. 2013. Spatial heterogeneity of soil respiration in a seasonal rainforest with complex terrain. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 6: 65-72.
- Song X, Yu G R, Liu Y F, et al. 2005. Comparison of flux measurement by open-path and close-path eddy covariance systems. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 48 (SI): 74-84.
- Steffen W, Persson A, Deutsch L, et al. 2011. The anthropocene: from global change to planetary stewardship. *Ambio*, 40: 739-761.
- Stoy P, Mauder M, Foken T, et al. 2013. A data-driven analysis of energy balance closure across FLUXNET research sites: the role of landscape scale heterogeneity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171: 137-152.
- Sun X M, Zhu Z L, Wen X F, et al. 2006. The impact of averaging period on eddy fluxes observed at ChinaFLUX sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 188-193.
- Tan Z H, Zhang Y P, Liang N S, et al. 2012. An observational study of the carbon-sink strength of East Asian subtropical evergreen forests. *Environmental research letters*, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/044017.
- Tan Z H, Zhang Y P, Liang N S, et al. 2013. Soil respiration in an old-growth subtropical forest: patterns, components, and controls. *Journal of Geophysical Research- Atmospheres*, 118(7): 2981-2990.
- Tan Z H, Zhang Y P, Song Q H, et al. 2011. Rubber plantations act as water pumps in tropical China. *Geophysical Research Letters*, doi: 10.1029/2011GL050006.
- Tan Z H, Zhang Y P, Yu G R, et al. 2010. Carbon balance of a primary tropical seasonal rain forest. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2009JD 012913.
- Vitousek P M, Mooney H A, Lubchenco J, et al. 1997. Human domination of Earth's ecosystems. *Science*, 277: 494-499.
- Wang C L, Yu G R, Zhou G Y, et al. 2006. CO₂ flux evaluation over the evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China. *Science in China: Earth Sciences*, 49(SII): 127-138.
- Wang Q F, Niu D, Yu G R, et al. 2005. Simulating the exchanges of carbon dioxide, water vapor and heat over Changbai Mountains temperate broad-leaved Korean pine mixed forest ecosystem. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 148-159.
- Wang S Q, Chen J M, Ju W M, et al. 2007. Carbon sinks and sources in China's forests during 1901-2001. *Journal of Environmental Management*, 85(3): 524-537.
- Wang Y F, Cui X Y, Hao Y B, et al. 2011. The fluxes of CO₂ from grazed and fenced temperate steppe during two drought years. *Science of the total environment*, 410-411: 182-190.
- Wang Y D, Li Q K, Wang H M, et al. 2011. Precipitation frequency controls interannual variation of soil respiration by affecting soil moisture in a subtropical forest planta-

- tion. Canadian Journal of Forest Research, 41(9): 1897-1906.
- Wen X F, Lee X H, Sun X M, et al. 2012. Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China. *Oecologia*, 168: 549-561.
- Wen X F, Sun X M, Zhang S C, et al. 2008. Continuous measurement of water vapor D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ isotope ratios in the atmosphere. *Journal of Hydrology*, 349: 489-500.
- Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. 2005. Turbulence flux measurement above the overstory of a subtropical *Pinus* plantation over the hilly region in southeastern China. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 63-73.
- Wen X F, Yu G R, Sun X M, et al. 2006. Soil moisture effects on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical *Pinus* plantation of southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 166-175.
- Wen X F, Zhang S C, Sun X M, et al. 2010. Water vapor and precipitation isotope ratios under the influence of the Asian monsoon climate. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, doi:10.1029/2009JD012408.
- Wu J B, Guan D X, Sun X M, et al. 2005. Eddy flux corrections for CO_2 exchange in broad-leaved Korean pine mixed forest of Changbai Mountains. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 106-115.
- Wu W X, Wang S Q, Xiao X M, et al. 2008. Modeling gross primary production of a temperate grassland ecosystem in Inner Mongolia, China, using MODIS imagery and climate data. *Science in China: Earth Sciences*, 51(10): 1501-1512.
- Yan J H, Liu X Z, Tang X L, et al. 2012. Substantial amounts of carbon are sequestered during dry periods in an old-growth subtropical forest in South China. *Journal of Forest Research*, doi: 10.1007/s10310-012-0363-0.
- Yan J H, Zhang Y P, Yu G R, et al. 2013. Seasonal and interannual variations in net ecosystem exchange of two old-growth forests in southern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182(SI): 257-265.
- Yan L M, Chen S P, Huang J H, et al. 2011a. Increasing water and nitrogen availability enhanced net ecosystem CO_2 assimilation of a temperate semiarid steppe. *Plant and Soil*, 349: 227-240.
- Yan L M, Chen S P, Huang J H, et al. 2011b. Water regulated effects of photosynthetic substrate supply on soil respiration in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 17: 1990-2001.
- Yao Y G, Zhang Y P, Liang N S, et al. 2012. Pooling of CO_2 within a small valley in a tropical seasonal rain forest. *Journal of Forest Research*, 17: 241-252.
- Yu G R, Chen Z, Piao S L, et al. 2014. High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111: 4910-4915.
- Yu G R, Song X, Wang Q F, et al. 2008. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 177(4): 927-937.
- Yu G R, Wen X F, Li Q K, et al. 2005. Seasonal patterns and environmental control of ecosystem respiration in subtropical and temperate forest in China. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 93-105.
- Yu G R, Wen X F, Sun X M, et al. 2006. Overview of China-FLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 125-137.
- Yu G R, Zhang L M, Sun X M, et al. 2008. Environmental controls over carbon exchange of three forest ecosystems in Eastern China. *Global Change Biology*, 14(11): 2555-2571.
- Yu G R, Zheng Z M, Wang Q F, et al. 2010. Spatiotemporal pattern of soil respiration of terrestrial ecosystems in China: the development of a geostatistical model and its simulation. *Environmental Science and Technology*, 44: 6074-6080.
- Yu G R, Zhu X J, Fu Y L, et al. 2013. Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 19(3): 798-810.
- Yuan W P, Liu S G, Yu G R. 2010. Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 114: 1416-1431.
- Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, et al. 2010. The new world of the anthropocene. *Environmental Science & Technology*, 44: 2228-2231.
- Zhan X Y, Yu G R, He N P, et al. 2014. Nitrogen deposition and its spatial pattern in main forest ecosystems along north-south transect of Eastern China. *Chinese Geographical Science*, 24(2): 137-146.
- Zhang J H, Han S J, Sun X M, et al. 2005. UU* filtering of nighttime net ecosystem CO_2 exchange flux over forest canopy under strong wind in wintertime. *Science in China: Earth Sciences*, 48(SI): 85-92.
- Zhang J H, Han S J, Yu G R. 2006. Seasonal variation in carbon dioxide exchange over a 200-year-old Chinese broad-leaved Korean pine mixed forest. *Agriculture and Forest Meteorology*, 137: 150-165.
- Zhang L M, Yu G R, Sun X M, et al. 2006a. Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern forest transect in China. *Science in China: Earth Sciences*, 49(SII): 47-62.
- Zhang L M, Yu G R, Sun X M, et al. 2006b. Seasonal variations of ecosystem apparent quantum yield (α) and maximum photosynthesis rate (P_{\max}) of different forest ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 137: 176-187.
- Zhang L, Luo Y Q, Yu G Q, et al. 2010. Estimated carbon residence times in three forest ecosystems of Eastern China:

- applications of probabilistic inversion. *Journal of Geophysical Research- Biogeosciences*, doi:10.1029/2009JG001004.
- Zhang M, Yu G R, Zhang L M, et al. 2010. Impact of cloudiness on net ecosystem exchange of carbon dioxide in different types of forest ecosystems in China. *Biogeosciences*, 7: 711-722.
- Zhang M, Yu G R, Zhuang J, et al. 2011. Effects of cloudiness change on net ecosystem exchange, light use efficiency, and water use efficiency in typical ecosystems of China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(7): 803-816.
- Zhang W J, Wang H M, Yang F T, et al. 2011. Underestimated effects of low temperature during early growing season on carbon sequestration of a subtropical coniferous plantation. *Biogeosciences*, 8, 1667-1678.
- Zhang Y P, Tan Z H, Song Q H, et al. 2010. Respiration controls the unexpected seasonal pattern of carbon flux in an Asian tropical rain forest. *Atmospheric Environment*, 44: 3886-3893.
- Zhao F H, Yu G R, Li S G, et al. 2007. Canopy water use efficiency of winter wheat in the North China Plain. *Agricultural Water Management*, 93(3): 99-108.
- Zhao L, Li Y N, Xu S X, et al. 2006. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO₂ exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 12 (10): 1940-1953.
- Zheng Z M, Yu G R, Fu Y L, et al. 2009. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: a trans-China based case study. *Soil Biology & Biochemistry*, 41: 1531-1540.
- Zheng Z M, Yu G R, Sun X M, et al. 2010. Spatio-temporal variability of soil respiration of forest ecosystems in China: influencing factors and evaluation model. *Environment Management*, 46(4): 633-642.
- Zhu X J, Yu G R, He H L, et al. 2014. Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from upscaling network observations. *Global and Planetary Change*, 118: 52-61.
- Zhu X J, Yu G R, Wang Q F, et al. 2014. Seasonal dynamics of water use efficiency of typical forest and grassland ecosystems in China. *Journal of Forest Research*, 19(1): 70-76.
- Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, et al. 2006. Study on the processing method of nighttime CO₂ eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China: Earth Sciences*, 49 (S2): 36-46.
- Zhu Z L, Sun X M, Zhou Y L, et al. 2005. Correcting method of eddy covariance fluxes over non-flat surfaces and its application in ChinaFLUX. *Science in China: Earth Sciences*, 48(S1): 42-50.

Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX)

YU Guirui^{1,2}, ZHANG Leiming^{1,2}, SUN Xiaomin^{1,2}

(1. Key laboratory of network observation and model simulation, CAS, Beijing 100101, China;
2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: Eddy Covariance technique (EC) achieves the direct measurement of system functions and processes such as plant productivity, energy balance, and greenhouse gas exchange at ecosystem scale. Coordinated observation through the global flux observation network represents a breakthrough from the observation of ecological phenomena and factors to the measurement of changes in functions of the global ecosystem. This paper first reviews the foundation and development of the Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). It then systematically introduces the scientific objectives, design concept, measurement system, standardization of observed data, and long-term data accumulation of the network. The paper also assesses the main progresses in research of terrestrial carbon-water-nitrogen budgets, environmental responses of the coupled ecosystem carbon-nitrogen-water cycles, and the spatiotemporal patterns of ecosystem carbon fluxes and mechanisms. Based on an analysis of the trend of development and emerging missions of the global flux network, this paper proposes the directions, key scientific questions and emphases of research of ChinaFLUX to provide references for the development of flux observation and research in China.

Key words: eddy covariance technique; carbon-nitrogen-water fluxes; coupling cycles; ecological prediction; coordinated observation; ChinaFLUX