

亚洲区域陆地生态系统碳通量观测研究进展*

于贵瑞^{①**} 张雷明^{①②} 孙晓敏^① 李正泉^{①②} 伏玉玲^{①②}

(① 中国科学院地理科学与资源研究所, CERN 综合研究中心, 北京 100101; ② 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 作为 FLUXNET 的重要组成部分, 亚洲区域以其广阔的地域、独特的气候、丰富多样的植被类型等特点, 日益成为全球碳通量观测研究的热点地区之一. 目前在亚洲地区已经成立了 AsiaFlux (日本), KoFlux (韩国) 和 ChinaFLUX (中国) 区域性观测研究网络, 约有 54 个不同生态系统类型的通量观测站点, 观测区域覆盖了从 2°N 到 63°N 的热带雨林、常绿阔叶林、针阔混交林、灌木草地、高寒草甸和各种农田等陆地生态系统. 各观测站点都在以涡度相关技术为主体对植被-大气间的 CO₂, H₂O 和能量通量、以及生态系统水碳循环的关键过程进行着长期和连续的观测, 所获取的观测数据将被用于量化和对比分析研究区域内的生态系统碳收支与水平衡特征及其对环境变化的响应, 验证土壤-植物-大气连续系统的物质交换模型, 服务于陆地生态系统碳、水循环的集成性研究. 长期以来, 亚洲地区的科学家在观测理论与技术、生态系统通量特征和模拟模型等领域取得了许多成就, 为全球通量观测事业的发展做出了重要贡献. 但是, 为进一步提高亚洲地区的通量观测研究水平、加速观测数据的积累、提高数据质量和数据资源的共享水平, 急需建立复杂地形和夜间 NEE 质量评价与校正的方法论体系, 构建和发展通量观测网络与稳定性同位素观测网络、水碳循环过程实验网络以及遥感观测或高空对地观测网络有机结合的综合观测与研究体系, 并建立新的亚太地区区域合作与交流机制.

关键词 陆地生态系统 通量观测网络 稳定性同位素观测网络 碳通量 涡度相关 亚洲

自工业革命以来, 由于大规模人类活动改变了生态系统碳循环的自然过程以及生物圈固有的收支平衡, 导致大气中 CO₂, CH₄ 和 N₂O 等温室气体浓度的持续升高, 引发了全球变暖等一系列严重的全球环境问题, 严重威胁着人类社会的生存和可持续发展^[1].

研究地球系统的碳循环过程和控制机理, 评价陆地生态系统对温室气体的吸收或排放能力, 分析全球碳源/汇的时-空分布特征, 预测未来的气候变化趋势和评价生态系统碳循环对全球变化的响应与适应特征, 是现代地球系统科学、生态与环境科学关注

2004-07-14 收稿, 2004-11-01 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目(编号: G2002CB412501)和中国科学院知识创新工程重大项目(编号: KZCX1-SW-01-01A)共同资助

** E-mail: yugr@igsrr.ac.cn

的重大科学问题^[1-3], 这些科学问题成为 IGBP, WCRP, IHDP 和 DIVERSITAS 等国际合作研究计划的核心^[1]. 2003 年启动的全球碳计划(Global Carbon Project, GCP), 将全球规模的碳循环研究推向了一个新的历史阶段^[4].

在对全球碳、水循环关键过程的研究中, 需要大尺度、长期和连续的生物圈-大气之间的 CO_2 , H_2O 和能量通量观测数据的支撑, 全球通量观测网络 (FLUXNET, <http://daad.esd.ornl.gov/FLUXNET>) 作为获取生态系统与大气之间的 CO_2 , H_2O 和能量交换信息的有效手段, 为分析地圈-生物圈-大气圈的相互作用, 评价陆地生态系统在全球碳循环中的作用提供了重要的数据基础^[5]. 目前 FLUXNET 主要由 AmeriFlux(美洲)、CarboEurope(欧洲)、OzFlux(澳洲)、Fluxnet-Canada(加拿大)、AsiaFlux(日本)、KoFlux(韩国)和 ChinaFLUX(中国)等 6 个地区性研究网络组成, 共有 266 个注册观测站点(截止到 2004 年 10 月), 正在开展地区尺度或大洲尺度的 CO_2 , H_2O 和能量通量的观测研究. 各通量网络都强调采用多种手段和多种方法, 对土壤、植被和大气的各种要素, 以及生态系统碳循环与水循环的多种关键过程进行综合观测, 为开展陆地生态系统碳、水循环和能量传输过程的综合研究提供有效数据集和实验研究平台^[5].

亚洲地区作为世界上最大的大陆板块, 拥有广阔的地域空间, 具有复杂而独特的地貌特征、丰富的气候类型和生态系统类型. 与此同时, 亚洲区域不同国家/地区的经济发展水平存在着极大的差异, 这为开展人类活动对全球变化影响的研究提供了良好的社会和经济背景. 因此亚洲日益成为全球碳通量观测研究的热点地区之一. AsiaFlux 和 KoFlux 分别于 1999 和 2000 年在日本和韩国建立. 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)是在中国生态研究网络(CERN)的基础上于 2002 年建立的. ChinaFLUX 的建立填补了欧亚大陆通量观测的空白区域, 增加了生态系统类型的代表性. 目前, 亚洲地区通量观测研究网络约有 54 个注册观测站点, 观测区域覆盖了从 2°N 到 63°N 的热带雨林、常绿阔叶林、针阔混交林、灌木草地、高寒草甸和农田等不同纬度的陆地生态系统. 但现有的观测站点在地域

与生态系统类型上的分布并不均衡. 按地带性划分, 26 个站点分布在温带地区, 约占总数的一半. 按生态系统类型划分, 30 个集中在森林, 农田观测站点也大部分集中于稻田. 由此可见, 现有的站点还远远不能覆盖各区域的主要生态系统类型, 还需要不断增加观测站点的数量, 增强观测站点的区域和生态系统的代表性, 以准确评价亚洲区域的陆地生态系统碳源、汇强度. 近年来, 中国的通量观测保持了很好的发展势头, 中国林业科学院和国家气象局都在启动一定规模的通量观测研究计划(个人交流), 将为发展亚洲地区的通量观测事业起到进一步的推动作用. 值得关注的是, 亚洲区域的一些卫星遥感和环境监测方面的大型研究计划正在与通量观测研究网络密切配合(图 1), 这无疑会极大地提高通量观测研究网络的综合研究能力, 拓宽观测成果的应用领域.

本文重点评述了亚洲地区在通量观测设备研发、观测技术改进、典型生态系统 CO_2 通量特征及环境控制机理和生态系统碳循环模型模拟等研究领域所取得的重要进展, 并探讨了亚洲地区通量观测研究所面临的主要科学问题、解决途径和新的区域合作机制.

1 亚洲区域通量观测技术与 *NEE* 评价方法的研究进展

植被与大气间的碳交换通量的准确和长期观测是评价陆地生态系统碳源、汇功能的基础和前提. 亚洲地区的通量观测研究已有十多年的发展历史, 不仅在观测仪器研发、观测技术方面取得了很大的进步, 积累了大量的观测研究数据, 而且在复杂地形条件下和夜间的 CO_2 净交换量(*NEE*)评价方法等方面也开展了较为深入的研究.

1.1 CO_2 通量观测技术研究

(1) 涡度相关观测技术. 虽然早期的涡度相关技术多用于分析大气边界层湍流结构和热量与动量传输, 但这为开展生态生态系统的植被-大气之间 CO_2 交换研究奠定了理论和实验基础^[6]. 目前涡度相关法已经成为近年来测定生态系统碳、水交换通量的

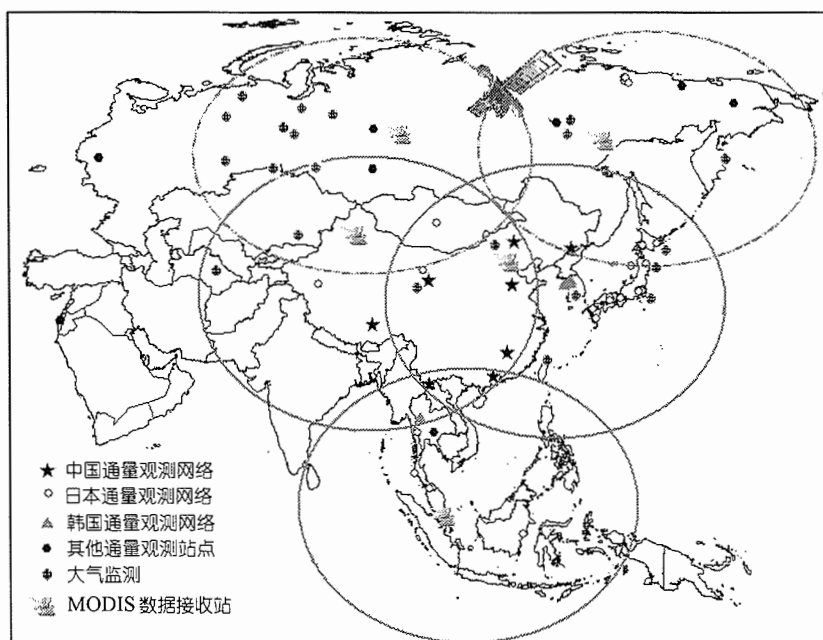


图1 亚洲区域通量观测研究站点和环境监测计划

关键技术, 得到了越来越广泛的应用^[6,7]. Baldocchi 对涡度相关技术的研发和应用进行了系统和详细的评述^[6]. 需要指出的是亚洲的科学工作者在涡度相关观测仪器开发和观测技术研究方面也做出了重要的贡献. 早在 20 世纪 60 年代 Kaimal 和 Businger 研究和开发超声风速仪的同时^[8], 日本学者 Mitsuta 等就在开发 DAT-600 超声风速仪(KAIJO Co., Japan)在亚洲, 特别是在 AsiaFlux 中得到了广泛的应用^[9]. 随着超声风速仪的不断改进, 实用性和商业化的超声风速仪不断推出^[10,11], 为通量观测研究提供了性能良好的关键观测设备.

日本学者 Ohtaki 和 Matsui 首先发明了开路红外 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪, 被用于通量观测中的 CO_2 和 H_2O 浓度脉动的同步测定^[11,12]. 现在的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪主要有两种类型, 一种是开路系统(Open-Path), 如 LI7500 (LiCor Inc, 美国)和 Advanet-E009 系列(Advanet Co., 日本), 另一种类型是闭路系统(Closed-Path), 如 LI7000/LI6262 (LiCor Inc, USA)等. 闭路系统以其性能稳定和对环境适应性强的特点为日本通量界所青睐^[13]. AsiaFlux 主要是利用闭路系统的 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪与超声风速仪组合而成的闭路涡度相关观测系统

进行观测与研究^[13~18], 并对开路系统和闭路系统进行了平行对比观测研究^[13, 16, 17]. Yasuda 和 Watanabe 在比较开路系统和闭路系统观测结果时, 提出了一种校正闭路系统响应时间不足所导致的 CO_2 通量观测误差的新方法^[16]. 随着开路系统 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪稳定性和对环境适应能力的提高, 使这一系统用于野外的长期观测成为可能^[6]. China-FLUX 在观测研究中采用了两者进行平行观测的技术方案, 以检验二者观测结果的差异.

(2) 涡度相关技术替代观测方法及改进. 尽管涡度相关技术已经成为生态系统通量测定的标准方法, 但是如何利用以往大量的常规微气象观测资料, 如何在实际的应用过程中克服可能面临的经济或观测环境等方面的限制, 需要研究涡度相关技术的替代方法, 改进观测系统的适应能力. 因此, 长期以来, 在亚洲区域涡度相关技术替代方法的研究也受到了高度重视. 常用的替代观测技术包括: Vertical Gradient(VG, 空气动力学法或梯度法)^[19~22]、Bandpass Eddy Covariance(BP)^[23~25]和 Relaxed Eddy Accumulation(REA, 涡度积聚法)^[26~28]等.

空气动力学法或梯度法是利用空气动力学原理,

通过测定群落两个高度的 CO_2 和 H_2O 浓度来间接计算物质和能量通量。虽然这种技术对于裸地和低矮植被的通量观测较为准确,但对于复杂群落而言,其应用往往比较困难,在 CO_2 的垂直梯度很小时,梯度法无法应用^[6,13,29]。Yamamoto 等利用高山(Takayama)温带落叶林 1994~1996 年的观测资料,对比了空气动力学和涡度相关法的通量观测结果^[15]。研究表明尽管二者测定的 NEE 存在着一定的偏差,但总体来看,二者之间的吻合性很好,并利用历史的常规观测数据计算了该森林生态系统 1994~2000 年 NEE 的长期变化特征,验证与补充了涡度相关的观测结果,很好地发挥了常规观测数据的作用^[30]。Monji 等提出了两种改进的梯度法以估算 CO_2 和 H_2O 通量。其一是利用显热涡度扩散系数,其二是利用理查孙数(R_i)的普适函数 Φ_m 和 Φ_h 所建立的通量-梯度关系实现的^[21]。Monji 等利用上述方法很好地测定了泰国红树林在旱季和雨季的 CO_2 和热量通量^[22]。

Bandpass Eddy Covariance (BP)技术是一种对仪器响应的订正方法,其目的是校正由于 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪器的时间响应慢,或闭路系统物质浓度衰减以及分析仪与超声风速仪相对位置等因素引起的高频损失^[13]。Watanabe 等提出了一个经验的频率-响应方程,以扩展 bandpass 频率谱带,实现了对低显热条件下物质通量的校正计算,对慢响应仪器的测定结果进行了有效订正。结果表明,应用改进的 BP 技术,测定的湍流物质通量与开路涡度相关系统之间有很好的可比性,并认为这种改进的 BP 技术可应用于长期的通量观测^[25]。

Relaxed Eddy Accumulation(REA)作为一种重要的替代技术在亚洲的通量观测研究中也得到了广泛应用^[13, 26~28]。Hamotani 等将 REA 和开路涡度相关法的测定结果进行了对比分析,证明两种方法之间存在着显著的线性关系,并确定了 REA 方法中的关键参数^[26]。Monji 等通过利用 REA 方法对针叶林的 NEE 进行了连续 5 个月的连续观测认为,在只有慢响应分析仪的条件下,REA 不失为一种可行的替代方法^[13]。

(3) 箱式法观测技术。植被-大气间的 CO_2 净交换量(NEE)是生态系统光合作用与呼吸作用两大基本生理过程之间平衡的结果^[7]。生态系统呼吸作用包括

自养呼吸和异养呼吸,还可以细致地分解为土壤的微生物呼吸,植物根、茎干和叶片呼吸等成分。将生态系统的光合作用以及生态系统呼吸的各分量从 NEE 中分离出来,对于正确理解生态系统碳循环过程和环境控制机制,开发生态系统过程机理模型具有重要的意义,而箱式法在这类研究中具有独特的作用^[31]。

箱式法可以分静态箱法和动态箱法。前者是在一定的时间内将箱体置于研究对象之上(如土壤和植物),测定结束之后将箱体移开;而后者在测定之后,箱体上部可以自动打开,使箱内环境与外界保持一致,不必移走箱体。静态箱移动方便、成本较低,但不能进行连续观测;动态箱可以实现长期和连续观测,但系统复杂,成本较高。根据箱体的透明与否,箱式法又可以分透明箱法和暗箱法,由于透明箱易引起测定期间内的箱体中温度和湿度等环境因子的很大变化,因此多用暗箱进行呼吸强度的测定。

利用箱式法测定呼吸强度的主要方式有:静态箱-碱液吸收法、静态箱-气相色谱法(GC)和动态箱-红外分析法等。受技术与仪器成本的限制,现在主要是应用前两种方式开展野外观测^[31~33]。随着红外 CO_2 分析技术的成熟,动态箱-红外分析法也得到了越来越广泛的应用^[34]。Miyama 等还设计了用于测定植物枝条 CO_2 吸收通量的自动测定箱,适合于进行通量的季节变化测定,而且其测定结果和便携式气体分析仪(LCA-3)基本吻合^[35]。Liang 等开发了一套多通道的自动箱观测系统,并用于土壤 CO_2 通量及其空间变异性的长期观测,在 AsiaFlux 和 KoFlux 的观测中已经开始采用,其测定结果与 LI6400-09 和土壤 CO_2 梯度法的测定结果比较一致^[36]。近来他们还设计了适合于植物茎干和枝叶的自动观测箱,已经开始在观测实践中得到应用。

CH_4 和 N_2O 也是重要的温室气体。Wang 和 Wang 等对传统的静态箱-气相色谱法进行了重大改进^[31]。用塑料注射器进行野外实地取样,在室内利用改进的进样系统和装有 FID 和 ECD 的气相色谱仪(GC),可一次性分析所采集气体的 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 浓度,计算出 3 种痕量温室气体的交换速率^[31]。这种箱式观测技术已经在中国的草地^[37,38]、农田^[39]、湿地^[40]和森

林^[41,42]等不同类型的生态系统类型上得到了广泛的应用, 成为 ChinaFLUX 各通量观测站土壤呼吸的重要研究技术之一。同时利用这种改进系统, 配合以生物量、根系呼吸和地上部呼吸的测定, 可以实现对生态系统 CO_2 净交换量(NEE)的估算^[39,43]。

1.2 生态系统 CO_2 净交换量(NEE)的评价方法

涡度相关技术应用于通量观测和生态系统 CO_2 净交换量(NEE)的评价, 具有严格的植被下垫面状况和气象条件的限制。在复杂地形或气象条件不能满足湍流交换理论假设条件的情况下, 所计算的 NEE 与真实值可能会产生较大的误差。所以 NEE 的评价是通量观测中必须解决的技术性问题。

(1) 通量平均周期与坐标轴系统。通量平均周期和坐标系的选择与变换, 是通量观测数据的计算与处理过程中必须考虑的技术问题。研究表明, 通量的平均周期过长, 显然会造成高频的损失。而平均周期过短, 不仅会明显削弱低频的贡献, 导致对 NEE 的低估, 而且也会引起湍流信号噪声的增多^[44]。

在数据处理过程中, 最常用的坐标系统是自然坐标系统^[45], 或称为流线坐标系统^[46]。这种坐标系统通过坐标轴旋转, 强迫每个通量平均时间内的垂直风速等于零。但这种方法不仅会导致通量计算中的严重偏差或系统性低估^[47], 而且会明显削弱湍流中的低频贡献^[44]。近年来, Wilczak 等和 Paw 等提出了一种新的坐标旋转方法为平面拟合法(Planar Fit, PF)^[46,48]。该方法强调在多个平均时间或长时间内使垂直风速等于零, 而在每一个平均时间内的垂直风速则不必为零。虽然这种方法比三次坐标旋转更具合理性, 但其对长期的 CO_2 通量和碳收支的影响还需要分析评价, 特别是在复杂地形条件下^[13]。目前在亚洲的通量数据处理过程中, 较多的是应用前一种坐标系统, 以减少水平与垂直平流的影响^[13-18,49,50]。Monji 等通过对坡地地形(坡度为 10° 左右)上针叶林生态系统 CO_2 通量坐标旋转与否的对比分析表明, 坐标旋转对 CO_2 通量大小有明显影响; 但是旋转与否, 需要根据研究目的和精度要求具体确定^[13]。

(2) 复杂地形条件与夜间 NEE 的评价和估算方法。在大气稳定、植被均一和下垫面平坦的条件下,

涡度相关技术可以准确地测定生态系统/植被-大气间的 CO_2 交换量。而当下垫面景观复杂和大气处于稳定层结时, 需要考虑大气储存、通量辐散和平流等因素对 NEE 的影响^[6]。但至今就造成 NEE “失真”的具体原因和规范的校正方法, 在通量界仍没有达成一致的意见^[6,47,51]。在亚洲地区, 大多数的通量观测站点都同时受这两种条件的制约, 导致涡度相关测定结果的可信度受到怀疑。因此, 复杂地形条件与夜间测定的 NEE 的校正方法倍受关注。

目前, 评价 NEE 观测效果的方法主要采用两种方式, 其一是将涡度相关测定的结果与替代观测方法进行比较(如空气动力学方法、能量平衡法和箱式法等); 二是利用多个涡度相关系统的平行对比观测。Yamamoto 等通过涡度相关与能量平衡法的比较分析指出, 由于复杂地形的影响, 涡度相关测定的 NEE 可能偏低 40%, 其原因是因为对夜间呼吸量的过低评价造成的^[15]。Saigusa 等分析指出, 由于能量不闭合所引起的通量误差可达到 24%~35%^[17]。Kominami 等在同一小流域内设置了两套涡度相关观测系统和一套箱式法观测系统, 对生态系统的 CO_2 通量进行的平行观测表明, 尽管两套涡度相关在白天的测定结果比较相似, 但在夜晚位于山谷中的涡度相关观测系统的观测结果比山脊上的涡度相关系统偏高 36%。涡度相关的观测值比箱式法偏低 60%。利用强湍流交换条件下($u_* \geq 0.25 \text{ m s}^{-1}$)夜间 NEE 与土壤表层(2 cm)温度的关系所估算的通量值仍然比箱式法的测定值偏低 32%。他们认为水平平流是造成这种偏差的主要原因, 而冠层储存的影响相对较小^[51]。

受研究技术的限制, 目前还无法对夜间涡度相关观测的各影响因子进行量化分析, 因此对夜间通量的校正主要通过以下几种途径: 第一种途径是利用箱式法的观测结果订正涡度相关数据; 第二种途径是通过强湍流交换条件下所建立的夜间通量与环境因子, 如温度和土壤水分之间的关系, 重新估算稳定层结条件下的夜间通量^[6]。其中摩擦风速(u_*)经常被用于评价湍流强度, 而且 u_* 临界值的大小的选择对年度 NEE 有很大影响^[53]。可是现阶段如何确定合理的 u_* 临界值还没有形成统一的意见。此外, 水平风速也可以反映湍流交换的强弱^[15], 但是也同样存在与

u_* 相似的临界值确定问题. Yasuda 等, Saigusa 等和 Hirano 等研究表明, 湍流强度对 NEE 和温度的关系有明显影响^[14,17,18]. 当湍流交换强、上下层空气混合度较好时, 夜间通量和气温之间存在着显著的指数关系, 通过这种关系估算得到的夜间 CO_2 通量明显高于直接观测的结果. 而当湍流交换较弱时, 夜间通量和气温之间关系较弱或者没有明显的相关关系. 第三种途径是利用能量闭合度校正 NEE ^[54], Yamamoto 等和 Saigusa 等也利用这一方法校正了测定的 NEE ^[15,17]. 但是这种方法依赖于对有效能量通量(显热通量+潜热通量)、净辐射和土壤热通量的准确测定. 涡度相关通常反映的是较大空间范围内的平均状况, 而净辐射和土壤热通量仅仅是在观测塔附近的小范围内测定结果, 不仅无法准确代表大范围内的空间变异性, 而且在空间上与涡度相关观测区域明显地不匹配^[55]. 因此, 利用能量闭合度校正 NEE 的方法的正确性与适用性还需要进一步分析与评价^[6].

(3) Fetch、Footprint 与生态系统尺度的 NEE 评价. 观测塔的通量观测数据表示的是通量贡献区域(Fetch)内的平均状况. 对于面积足够大、下垫面均一的生态系统而言, 涡度相关的观测值可反映生态系统真实的 NEE . 可是由于生态景观的破碎化, 以及地形因子的影响, 一般的生态系统多为斑块型的镶嵌结构. 因此, 深入了解通量观测塔的代表性和观测塔周围的空间变异性, 定量评价 Fetch 的大小和空间分布与 CO_2 通量的来源, 是评价通量观测数据的区域代表性、尺度转换与过程机理分析的基础.

当大气逐渐变得稳定时, Fetch 将迅速扩展^[52], 并且可能超出所调查植被类型的空间范围. 然而, 现有的 Fetch 评价模型都是基于近中性条件下的涡度扩散理论建立的, 难以对稳定层结情况下的状况给予客观的评价. 另一方面, 当测定高度改变之后, Fetch 的范围也将随之改变^[55]. Hamotani 等采用 REA 方法, 借助滞空气球, 在稻田近地层(2 m)和上方(20 m)处分别观测了 CO_2 和 CH_4 通量. 研究表明, 由于 Fetch 的不同, 两高度之间的物质通量存在较大的差异. 当测定高度为 2 m 时, 100 m 的 Fetch 的贡献只有 60%^[27]. 因此对于复杂地形的森林生态系统而言, 确定适宜的仪器安装高度, 以满足通量观测所需要的 Fetch 相

当困难. 在实际的观测中, 还很难简单的判定观测高度和 Fetch 之间的关系^[55].

Footprint 是指涡度相关系统在观测中可能“观察”到的下垫面的空间范围. Footprint 分析技术作为定量评价 Fetch 的一种有效途径, 可以将涡度相关所观测的空间进行定量化, 评价观测数据的代表性. 但由于技术限制, 目前这一分析方法在亚洲的应用还不多见. 目前估算 Footprint 的模型很多, 如 Footprint 分析模型、Lagrangian 模型(LS 模型)和基于大涡模拟(LES)的 Footprint 模型等^[56]. 可是对现有模型的模拟结果还缺乏有效的观测数据验证, 而且往往是算法复杂, 实用性较差, 对植被冠层结构、水平异质性、森林边缘和林窗以及地形地貌等影响因素的分析还不全面, 需要进一步地完善.

2 亚洲区域的陆地生态系统碳通量特征与模型研究进展

2.1 主要生态系统类型的 CO_2 源汇功能强度

评价生态系统的 CO_2 汇源功能强度及其时空变异性是通量观测网络的主要任务之一. 目前, 已经对亚洲区域不同类型陆地生态系统开展了不同程度的碳通量观测研究, 如温带落叶林^[14,15,17,30,50,57]、温带混交林^[51]、温带落叶松林^[18]、热带红树林^[28]、高山草甸^[58]、热带雨林^[49]、农田^[59,60]等, 并对一些典型生态系统的 CO_2 源汇功能强度已经给予了初步的评价(表 1). 由表 1 可以明显看出, 在亚洲区域不仅不同生态系统之间的 NEE 测定值存在着很大差异, 而且在同一生态系统内, 不同年份之间 NEE 的差别也相当明显. 虽然这些观测资料为评价亚洲区域的生态系统碳平衡提供了重要的数据支撑, 但是其极大的不确定性说明, 对该区域的生态系统碳汇功能的评价还需要更多的数据积累.

2.2 生态系统通量的季节变化与年际变化

生态系统 CO_2 通量因植被和环境因子的变化, 具有明显的季节变化特征, 对形成这种季节变化特征的机制分析, 可以为揭示 NEE 的生物和环境控制机制、评价模型的开发提供重要知识. 在亚洲区域所获得的最长时间系列的通量观测数据是从 1993 年开

表 1 亚洲区域部分生态系统的 NEE

站点	生态系统类型	年均温度/℃	年均降水/mm	海拔/m	$LAI^{a)}/m^2\ m^{-2}$	$NEE^{b)}/gC\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$	时间/a	文献
高山	冷温带阔叶落叶林	7.3	2382	1420	3.5	-114	1994	[15]
						-65	1995	[15]
						-136	1996	[15]
						-214	07/1998~07/1999	[17]
札幌	冷温带阔叶落叶林	6.5	1100	180	4	-260	2000	[50]
	冷温带阔叶落叶林					-357	06/1997~05/1998	[14]
越川	暖温带阔叶落叶林	15	1400	30	5.5	-300	1997~1999	[30]
苫小牧	温带落叶松林	7.7	1250	140	2.1	-220	07/2000~06/2001	[30]
		5.9	1265	140		-293	09/2000~08/2001	[18]
富士吉田	温带常绿针叶林	10	713	738	3.5	-330	2001	[30]
熊本	温带常绿针叶林	16			-570		[30]	
长白山	温带针叶阔叶混交林	3.6			-184	2003	[61]	
千烟洲	亚热带混交人工林	17.8	1471	100	4	-553~-645	2003	[62]
Sakaerat	热带季雨林	24	2000	-600			[30]	
Bukit Soeharto	次生热带雨林	27	3300	-340~-460			[30]	
拉萨	高寒草甸	-1.2	380	4800		-71.12	2000	[63]

a) 对于落叶林, 表中的 LAI 指的是生长季节的最大叶面积指数. b) NEE 负值表示生态系统从大气中吸收 CO₂, 而正值表示释放

始的在高山(Takayama)森林通量观测站的连续 10 年的观测结果^[30]. 研究表明, 受环境和植被生长状况的影响, 该观测站的 NEE 表现出明显的季节和年际变化. 引起年际变异的原因可能包括: (i) 春季降雪、冰雪融化时间和温度的年际变化; (ii) 从 LAI 估算得到的生长季节长度的年际变化; (iii) 雨季温度和降水的年际变化等^[30].

2.3 生态系统碳循环模型与尺度扩展

通量观测塔的观测数据仅仅可以代表有限空间范围内植被下垫面的平均状况^[55]. 这种观测数据主要用于: (i) 定量评价所代表植被类型的碳、水和能量通量; (ii) 分析植被-大气边界层的物质与能量传输过程; (iii) 认识典型生态系统的碳循环与水循环的控制机制; (iv) 服务于生态系统过程模型的参数化等方面. 将站点的观测结果扩展到较大的空间尺度, 主要有两个途径: 其一是将不断增加观测塔密度与精细的土地利用/土地覆被分类方法相结合, 通过观测值的直接空间内插扩展, 来估算区域陆地生态系统碳水通量; 其二是基于各站点获得的知识和模型参数方案, 构建区域尺度陆地生态系统碳循环模型, 在空间化了的植被和环境要素数据库支持下, 进行尺度扩展和区域碳通量的评价. 第一种途径不仅需要大规模的人力和物力投入, 而且因为生态系统

空间格局的复杂性和多样性, 理论上是不可能获得地球上所有生态系统类型的实际观测资料, 所以在有限的将来要想实现对较大区域的碳收支评价是难以实现的, 即使在其程度上可以实现, 该方法所获得的结果也无法用于对未来气候变化情景下的预测. 因此, 现阶段普遍认为可行的途径是第二种途径, 即通过生态系统碳循环的模拟技术, 实现从观测站点向区域尺度的扩展, 也只有这一途径才有可能实现对未来气候变化情景下的预测. 所以, 陆地生态系统碳循环模型的构建, 模型的参数化方法, 以及模型与遥感技术的应用就成为通量观测研究中不可或缺的重要内容和手段.

从现有的各种模型结构和特征来看, 现有的模型大致可分为两类. 一类是主要以遥感资料为驱动变量, 以 GIS 的植被或空间化的环境数据库为支撑的遥感模型. 例如, CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)、VPM(Vegetation Photosynthesis Model)和 SiB₂ (Revised Simple Biosphere Model)等都是该类模型的代表. Piao 等利用 GIS 和遥感图象结合植被、气候、土壤类型和太阳辐射的空间资料, 使用 CASA 模型模拟了 1997 年中国陆地植被 NPP 的时空分布^[64]. Xiao 等使用了两个改进的遥感植被指数 EVI(增强植被指数)和 LSWI(陆地表面水分指数), 利用 VPM 模型很好地模拟了美国缅因州(Maine)常绿针叶林的

GPP 季节变化和年际变化^[65]。

另一类模型是基于生态系统过程的机制模型。这类模型是以气候资料和其他环境变量作为驱动因子, 重点在于模拟土壤-植物-大气间的物质、能量传输过程、植被生产力形成与演化等过程。例如, Chikugo^[66], CENTURY^[67], FOREST-BGC^[68], AVIM^[69], TEM^[70], CEVSA^[71]和 Sim-CYCLE^[72]等。这类模型可以反映生物对环境响应的机制, 从而对过去和未来的气候变化条件下生态系统水碳循环过程进行预测。同时, 该类模型通常是基于观测站点的过程研究和观测数据建立起来的, 对小尺度的生态系统具有很强的模拟功能, 在精细的空间尺度参数化方案和空间化的植被和环境数据的 GIS 系统支撑下, 能够模拟生态系统碳循环的空间格局, 也便于与 GCMs 实现有效的对接。

在亚洲区域具有较大影响的植被生产力(NPP)模型是 Uchijima 和 Seino 提出的 Chikugo 模型, 他们利用日本各县的生物生产力普查数据证明了模型具有较好的预测能力, 并利用模型绘制了日本全国的植被净第一性生产力(NPP)分布图, 分析了 CO₂ 倍增及气候变化对日本全国植被净第一性生产力的影响^[66]。但是, Chikugo 模型是一种半经验的统计模型, 并且在模型的构建中隐含着植被的水分利用效率(WUE)为常数的基本假定。近年来, Yu 等的一系列研究工作证明, 植物的 WUE 不可能是常数, 它随着环境条件和植物类型变化具有极大的变异性, 并提出了一种基于植物行为的蒸腾-光合作用统合模型(SMPTSB)和水分利用效率评价模型^[73-75]。另外, Ji 构建了模拟大气-植被-土壤系统物质传输的生物物理模型(AVIM 和 AVIM₂), 可以用于单站或大区域的碳通量评价和预测, 并利用该模型在内蒙古半干旱草原、长白山森林和华北农田等地区模拟了在大气胁迫条件下, 各类生态系统的初级生产力与植被-大气间的 CO₂ 通量^[69]。Cao 和 Woodward 构建了基于植被光合作用、碳素分配、凋落物和土壤有机碳分解的碳循环过程的模型(CEVSA), 可用于研究陆地生态系统的碳交换及其对气候变化的响应^[71]。Ito 和 Oikawa 提出了一个能反映多种陆地生态系统的碳动态变化, 模拟它们对全球气候变化响应的新一代陆地碳循环模型(Sim-

CYCLE), 并结合碳稳定同位素的观测资料, 模拟了大气和生物圈之间 CO₂ 交换的时空分布^[72]。

生态系统的尺度具有多维性特点, 即空间尺度、时间尺度和功能尺度。功能尺度和时空尺度既有区别又相互联系。如何有效地将通量站点的资料和遥感资料结合, 把观测站点的观测结果扩展到区域或全球尺度是个复杂的问题。张仁华等利用遥感资料和辅助的微气象观测资料, 建立了一个计算麦田 CO₂ 通量的遥感模型, 估算了区域尺度 CO₂ 通量^[76]。Xiao 等利用 VPM 模型将通量塔观测得到的森林的 GPP 扩展到了区域^[65]。但是可以认为, 现阶段通量观测结果尺度转化中的科学问题和技术并没有得到很好的解决, 是今后区域尺度的通量观测研究中必须关注的重大问题之一。

3 ChinaFLUX 的研究进展

自从 ChinaFLUX 于 2002 年 8 月正式启动以来, 在我国森林、农田和草地等 10 种不同类型的陆地生态系统开展了长期、连续的通量观测与研究, 不仅积累了大量的观测数据, 为我国陆地生态系统碳循环研究提供了重要的基础数据支撑, 而且在涡度相关观测技术与方法、生态系统通量特征和模型开发等多方面取得了较大的进展。

3.1 通量观测研究技术

(1) 通量平均周期与坐标轴旋转。在利用涡度相关技术进行通量的观测研究中, 根据观测站点具体的环境特点确定适宜的平均周期和坐标轴旋转方法, 是通量观测中必须解决的技术问题, 特别是在地形地势复杂条件下进行的通量观测更为重要。孙晓敏等通过对 ChinaFLUX 的禹城农田和长白山森林两个观测站的 10 Hz 原始涡度相关数据的分析, 提出了确定涡度相关测定中平均周期范围的归一化比值方法。分析指出, 下垫面的属性对涡度相关技术中平均周期的确定有重要的影响。对于下垫面较均一的禹城而言, 适宜的平均周期范围为 10~60 min。而对于森林生态系统而言, 适宜的平均周期为 30~60 min, 而且与农田相比较, 在一定范围内随着平均周期长度的增加, NEE 有增大的倾向^[77]。这一研究表明, Chi-

naFLUX 所采取的 30 min 分钟平均时间是比较适宜的。吴家兵等的研究表明, 在长白山森林生态系统, 平面拟合坐标变换要优于流线坐标变换, 后者会导致通量低估, 且低估量与仪器或下垫面倾斜度有关^[78]。朱治林等分析了 2 次和 3 次坐标轴旋转以及平面拟合等 3 种不同坐标轴旋转方法对禹城农田、内蒙古草原、长白山和千烟洲森林生态系统通量计算结果的影响。研究表明, 3 种旋转方法均可实现对 *NEE* 的合理校正, 但其效果主要取决于观测站点的坡度、坡向、风速和风向等因素^[79]。

(2) *NEE* 的评价和校正。如何评价和校正非理想条件下由涡度相关测定的 *NEE*, 是通量观测研究中急需但仍然没有很好解决的问题。温学发等利用谱分析、方差相似性关系和能量平衡闭合分析三种途径对千烟洲人工林两个高度的通量观测数据的质量进行了分析。在惯性子区内, 不同测定高度的三维风速、 CO_2 、 H_2O 和温度的功率谱基本符合 -2/3 定律, 而 CO_2 、 H_2O 和温度与垂直风速的协谱也基本符合 -4/3 定律。大尺度运动对物质和能量传输的贡献随测定高度的增加而增加, 现有的涡度相关系统对高频信号的响应能力(10 Hz)可以满足观测要求。相似性分析表明, 两个高度的垂直风速和温度归一化的方差都是大气稳定度的普适函数, 并确定了该生态系统夜间适宜的摩擦风速界限值。当摩擦风速大于界限值时, 千烟洲人工林能量平衡闭合程度可以达到大约 72%~81% 左右^[80]。张军辉等则通过对长白山针阔混交林冬季 *NEE* 特征的分析指出, 强风速条件下的压力脉动及平流过程是冬季负净 CO_2 通量形成的主要原因, 并提出了一种强风条件下摩擦风速的修正方法, 对合理解决冬季出现的碳吸收问题进行了尝试^[81]。吴家兵等定量分析了频率响应修订和平流损失修订对 *NEE* 的影响。在白天和夜间, *NEE* 频率响应局限的修订量分别为 3.0% 和 9.0%, 且修订结果与林内大气层结稳定性密切相关。在平坦下垫面条件下, 夜间垂直平流损失对 *NEE* 的影响可达到 18% 左右^[78]。由于 ChinaFLUX 的大多数站点地形比较复杂, 因此对 *NEE* 的评价和校正仍然是需要进一步深入研究的重要问题。

(3) 开路与闭路涡度相关系统的对比观测。在现

有的通量观测研究中, 开路和闭路观测系统均得到了广泛的应用, ChinaFLUX 在长白山和千烟洲森林通量观测站也同时开展了这两种系统的平行对比观测, 以检验不同系统之间通量观测结果的差异。宋霞等将长白山和千烟洲的开路和闭路系统的实时观测数据进行了对比分析。在惯性子区内, 两种观测系统观测数据的功率谱与协谱分别符合 -2/3 和 -4/3 定律^[82], 这与温学发等的研究结论相似^[80]。在长白山和千烟洲通量观测站, 闭路观测系统的 *NEE* 略低于开路系统, 而两种系统观测的 *NEE* 的日变化趋势具有很好的相关性。因此, 开路与闭路涡度相关系统在长期的通量观测研究中可以进行合理的相互校验与缺失数据的互补。

(4) 能量平衡分析。能量平衡状况是评价涡度相关数据质量的一种重要方法。李正泉等通过运用 OLS, RMA, EBR 和频率分布四种统计方法对 ChinaFLUX 各站点的能量平衡闭合状况的综合评价指出, 各站点能量平衡都没有完全闭合, 但不闭合程度在站点之间略有差异, 而且在夜间不闭合的现象比白天更加明显, 闭合程度随摩擦风速的增大而有所改善^[83]。这与世界上其它通量观测站的研究结果是一致的。其原因可能与通量观测中的采样误差、不同仪器测量产生的系统偏差、其他能量吸收项的作用、高频与低频湍流通量损失以及平流作用的影响有关, 但如何验证和量化这些因素的影响仍然是通量观测研究中相当棘手的理论和技术问题。同时由于影响能量平衡的因素多, 既包括对 *NEE* 测定有影响的因素, 也包括对 *NEE* 测定无影响的因素, 如能量平衡方程中忽略了土壤和生物量中的热储存通量等相关能量项, 因此, 能量平衡闭合评价仅可作为数据质量评价的重要参考指标^[80]。

3.2 碳通量的环境响应机理

生态系统的 *NEE* 在植被环境条件的影响下表现出明显的日、季节和年际变化特征, 分析 *NEE* 的变化特征及其环境控制机制, 有助于深刻理解生态系统过程和相关的过程机理模型的开发。在叶片尺度, 石培礼等分析了高原稀薄大气环境下 C_3 作物冬小麦叶片的表观光合量子产额(α)随叶温和胞间 CO_2 浓度的

变化规律^[84]. 研究表明, a 主要受到温度和 $[\text{CO}_2]/[\text{O}_2]$ 分压比的综合影响, a 随温度升高呈线性降低, 在一定 $[\text{O}_2]$ 下, a 与胞间 CO_2 浓度呈双曲线关系. 与低海拔地区相比, 高原地区的 a 对 CO_2 浓度的升高更敏感. 在生态系统尺度上, 关德新等, 刘允芬等, 徐玲玲等, 徐世晓等通过对长白山温带阔叶红松林^[61], 千烟洲人工针叶林^[62], 高寒草甸生态系统^[85]和青藏高原高寒灌丛^[86] NEE 的季节变化特征和环境响应机制的分析指出, NEE 主要受到了光合有效辐射($PPFD$), 温度和水分环境等环境因子的影响, 在植被的生长季节, 白天生态系统的 NEE 主要受 $PPFD$ 控制, 利用直角双曲线方程可以很好地描述二者之间的关系^[61,62,85,86], 而夜间 NEE 与温度存在显著的指数关系^[61,62]. 在不同的时间尺度上, NEE 的主控因子是不同的. 长白山森林生态系统日尺度的 NEE 主要受日平均温度影响, 而季节变化则受温度和光照共同作用的影响, 6 月份生态系统的碳汇强度最大, 年度 NEE 为 $-184 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[61]. 千烟洲人工针叶林在全年的各个月均表现为碳汇功能, 碳汇强度也表现出明显的季节变化, 在 5 月和 6 月最高, 之后由于受干旱及持续高温的影响, 碳汇强度受到明显抑制, 全年的 NEE 在 $-553 \sim -645 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间^[62]. 对于青藏高原高寒灌丛生态系统, 生长季节 (5~9 月) 的 NEE 主要受 $PPFD$ 的控制, 整个生长季 NEE 的总量达 $-583 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$, 而在非生长季节 NEE 主要受土壤温度的影响, 整个非生长季 NEE 为 $356 \text{ g CO}_2 \cdot \text{m}^{-2}$ ^[86]. 高寒草甸生态系统的表观量子产额(a)随生长季依次为草盛期>草盛初期>种子成熟期>枯黄期, 最大为 $0.0244 \mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$, 最小仅 $0.0098 \mu\text{mol} \cdot \mu\text{mol}^{-1}$; 而表观最大光合速率($P_{\max}$) 在草盛初期、草盛期、种子成熟期变化不大, 平均为 $9.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[85].

当同时考虑温度和土壤水分对生态系统呼吸的影响时, 通常是采用二者的响应函数的连乘形式, 即 $NEE = f(T)f(S_w)$ 来描述, 其中 $f(T)$ 和 $f(S_w)$ 分别是夜间 NEE 的温度和土壤水分函数. 于贵瑞等的研究指出, 对受到干旱胁迫的生态系统而言, 尽管温度是控制生态系统呼吸特征的主导因素之一, 但水分条件也可能转化成为影响生态系统呼吸的主导因素, 而且在干燥的气候条件下, Q_{10} 模型对水分的响应能力比

温度和水分的连乘模型更敏感, 更能准确地描述生态系统呼吸的季节模式^[87].

3.3 土壤呼吸

土壤呼吸是生态系统呼吸的重要部分, 由于受研究技术的限制, 对土壤呼吸过程和机理的认识存在很大的不确定性, 因此在全球碳循环研究中受到了广泛的重视. ChinaFLUX 在利用涡度相关技术开展碳通量观测研究的同时, 在 16 个生态实验站, 开展了利用箱式法对地表 CO_2 通量的长期观测研究. 沙丽清等、周存宇等和张宪洲等分别利用静态箱-气相色谱法测定了西双版纳热带季节雨林^[88]、鼎湖山亚热带森林^[89]和高原高寒草原生态系统^[63]的土壤呼吸. 西双版纳热带季节雨林的土壤、凋落物层和地表低矮植物呼吸分别占总呼吸的 65.2%, 22.3% 和 12.5%. 土壤呼吸速率与表层土壤温度呈显著的指数关系, 而与土壤含水量则表现出显著的抛物线关系, 表明水分过多将抑制土壤呼吸^[88]. 在鼎湖山亚热带地区, 季风林、混交林和松林地地表 CO_2 通量(即土壤呼吸速率)年平均值分别为 359.7 , 233.33 和 $178.56 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; 而来源于凋落物分解的 CO_2 通量分别为 116.28 , 167.27 和 $73.76 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 以混交林为最高, 这与其凋落物现存量最高是一致的^[89]. 高寒草原生态系统的土壤呼吸连续两年的定点观测表明, 土壤 CO_2 排放的日变化呈现单峰曲线, 最高点出现在当地时间的 14:00 左右, 最低点在当地时间的凌晨 5:00 左右. 土壤 CO_2 排放表现出明显的夏季增强而冬季减弱的季节变化特征, 日平均值和年总量分别为 $21.39 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $187.46 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 通过与 NPP 观测结果的对比, 结合高寒草地净生产量的观测结果, 表明青藏高原高寒草原生态系统是碳汇^[89].

3.4 模型模拟

基于过程的机理模型在通量观测数据向区域的空间扩展中发挥了重要作用. ChinaFLUX 在开展通量长期观测的同时, 相当重视模型的研究与开发工作. 曹明奎等指出陆地生态系统碳循环研究发展方向是应用多尺度试验观测和跨尺度机理模拟方法认识和定量表达不同尺度生态过程相互作用对碳循环通量

和贮量的控制作用。而数据-模型融合(Data-model fusion)途径在今后的生态系统碳循环研究中具有重要的应用价值。这种途径包括应用多尺度观测数据通过“前推”和“反演”相结合的方法建立跨尺度机理模拟模型;应用多种观测数据在不同尺度上对模型进行检验和验证;应用动态观测数据驱动和引导(steering)机理模拟,以现实地评估和预测生态系统碳循环变化^[90]。王秋凤等以基于过程的 BEPS 模型为基础,开发了可用于模拟小时尺度生态系统通量的机理模型(BEPSh),并应用该模型对 2003 年长白山温带阔叶红松林生长季内的 CO_2 和水热通量进行了很好的模拟。同时通过气候变化情景分析指出,该生态系统的 NEE 对气候变化比较敏感,在气候变暖条件下该生态系统的碳汇功能有减弱趋势^[91]。任传友等在气孔导度-光合-蒸腾耦合模型 SMPTSB 基础上,通过模拟冠层内的光分布,实现了由单叶向冠层的尺度转换,并建立了冠层尺度上的生态系统光合-蒸腾耦合模型。该模型具有简单且易于求解,便于应用的特点,可以作为构建土壤-植被-大气连续体水碳耦合模型的基础^[92]。张永强等利用分层模型,通过群体净光合速率($A_{n,c}$)与冠层导度的耦合模式,建立了植被群体光合-冠层导度-蒸散的耦合模型(CPCEM),并利用该模型模拟了禹城农田生态系统的 NEE 的变化规律^[93]。

4 亚洲地区通量观测研究的展望

尽管亚洲区域的通量观测研究在许多方面取得了较大的进展,但要揭示碳循环关键过程的变化机理,准确地评价和对比分析研究区域内的生态系统碳/源汇的时空分布特征及其对环境变化的响应/适应和开展陆地生态系统碳循环的集成性研究,仍然需要开展大量、深入的研究工作。当前,亚洲区域的通量观测研究面临的重要科学问题包括:(i) 建立 NEE 质量评价和校正的方法论体系,尤其需要深入研究复杂地形下的通量观测与分析技术,这是由亚洲通量观测站点的地形地势条件所决定的,同时也是世界范围内通量观测研究中面临的重大技术问题。(ii) 生态系统碳循环关键过程的变化机理和各种复杂过程与多种影响因素之间的相互作用关系,这是

深刻理解生态系统碳循环过程和开发相关的过程机理模型的前提与基础。(iii) 如何实现通量观测研究结果的尺度扩展,以准确地评价研究区域内生态系统碳/源汇的时空分布特征及其对环境变化的响应,为制订国际碳减排计划服务。针对以上问题,亚洲的通量观测研究应加强以下几个方面的工作:

4.1 加强复杂地形与夜间 NEE 的校正和估算方法的研究

建立复杂地形和夜间 NEE 质量评价和校正的方法论体系,是亚洲地区通量观测研究中所面临的首要任务。在以往的夜间通量低估和平流对通量影响的研究中,大多是定性或半定量化的,难以在实际中运用。加强以下 6 个方面的综合研究工作将有助于这一问题的解决。(i) 涡度相关观测和箱式法、空气动力学方法的平行观测对比;(ii) 观测塔的涡度相关观测与边界层 CO_2 高空观测的相互比较;(iii) 涡度相关观测和生物调查的对比;(iv) Footprint 气候学与尺度效应分析;(v) 复杂地形条件下湍流运动特征和通量贡献区分布特征的数值模拟;(vi) 生态系统的水-碳耦合循环的机制与模拟。

4.2 加强通量观测、稳定性同位素观测、过程研究与遥感观测的综合集成研究

由于生态系统碳循环受到许多物理的、生物的、生态和人类活动的综合影响,而且具有高度的时间和空间异质性和变异性,因此对生态系统的水和碳循环的研究需要开展多尺度、多途径和多学科集成性的工作,以揭示碳循环关键过程的变化机理和各种复杂过程与多种影响因素之间的相互作用关系。稳定性同位素技术以其具有可以区分生态系统的各组成部分对 CO_2 , H_2O 和能量通量的贡献,在生态学研究中具有独特和不可替代性的作用,逐渐得到了广泛的应用^[94~96]。在亚洲区域的通量观测研究中,这一技术的应用还十分有限,需要进一步加强。生态系统碳循环的生理生态过程研究是解释和论证通量观测结果的必要手段,也是建立生态系统过程模型,提高观测数据利用效率的迫切需要,所以加强观测站点的植物光合作用、生长规律和凋落物分解与土壤呼吸

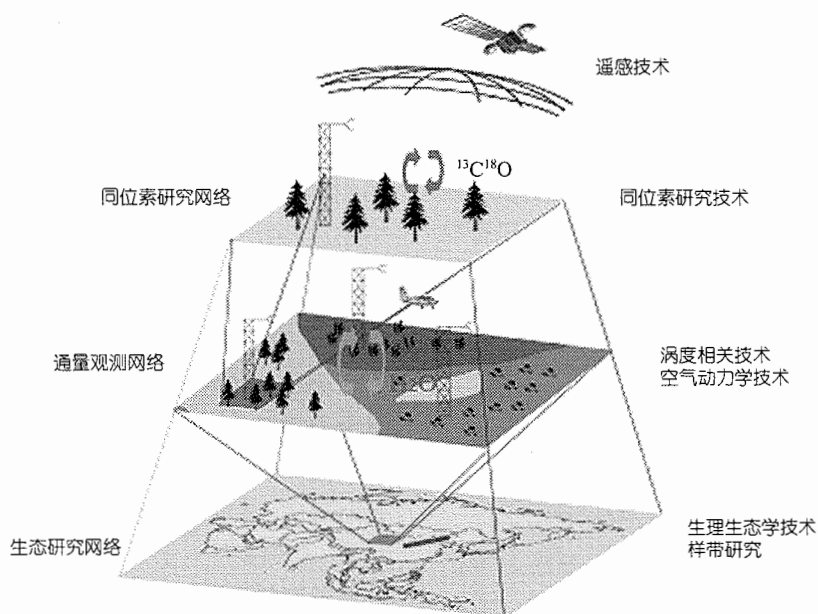


图 2 综合性区域性通量观测网络的结构

作用等生态学过程的精细调查与试验研究,对推动通量观测研究事业的发展和成果产出具有重要的意义。要实现通量塔观测数据有效地向区域尺度扩展,预测未来的变化趋势,必须依靠卫星遥感技术(RS),数字模拟技术,以及地理信息技术(GIS)的支持。鉴于上述理由,我们认为一个综合的区域性通量观测网络应该是建立在生态系统研究网络的基础之上,通量观测与生物圈-大气稳定性同位素观测,卫星遥感观测,生态学过程研究以及模型开发研究紧密结合综合性研究组织(图 2)。

4.3 加强亚洲区域通量观测研究的区域合作与交流

尽管现有的亚洲各区域通量观测网络已经开始对亚洲地区的主要类型生态系统开展了通量的观测研究工作,但是要想阐明不同类型生态系统的通量特征和环境响应机制,评价亚洲地区的陆地生态系统对全球变化的贡献和响应,现有的观测站点的空间布局依然满足不了对观测数据的需求。亚洲区域通量观测网络的发展,需要在进一步增加观测站点的空间和类型代表性的同时,更应加强由观测站点

向区域尺度扩展的研究力度,需要强化和综合各种小尺度(plot-scale)通量观测数据的整合和数据资源共享。为此,当前亚洲区域通量观测网络急需通过 AsiaFlux, KoFlux, ChinaFLUX 和 OzFlux 的合作,建立亚太地区通量观测研究网络联合组织,以有效地组织和协调各子网络间的合作与观测数据资源共享,确定通量观测技术指南、组织观测技术培训和观测系统的标定,促进科学家之间的交流与合作,提高亚太地区观测研究网络的综合研究能力和数据服务能力。

参 考 文 献

- 1 IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (ed By Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2001
- 2 Goulden M L, Munger J W, Fan S M, et al. Exchange of carbon dioxide by a deciduous forest: response to interannual climate variability. *Science*, 1996, 271: 1576 ~ 1578.
- 3 Schimel D S, House J I, Hibbard K A, et al. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature*, 2001, 414: 169 ~ 172
- 4 Global Carbon Project. Science framework and implementation. Earth System Science Partnership (IGBP, IHDP, WCRP, DIVER-

- SITAS) Report No. 1; Global Carbon Project Report No. 1, 2003, Canberra
- 5 Baldocchi D, Falge E, Gu L, et al. 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*, 2001, 82: 2415 ~ 2434
- 6 Baldocchi D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9: 479 ~ 492
- 7 Valentini R, Matteucci G, Dolman A J, et al. Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 2000, 404: 861 ~ 865
- 8 Kaimal J C, Businger J A. A continuous wave sonic anemometer-thermometer. *Journal of Applied Meteorology*, 1963, 2: 156 ~ 164
- 9 Mitsuda Y. Sonic anemometer-thermometer for general use. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1966, 44: 12 ~ 24
- 10 Kaimal J C, Gaynor J E, Zimmerman H A, et al. Minimizing flow distortion errors in a sonic anemometer. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 53: 103 ~ 115
- 11 Ohtaki E, Matsui T. Infrared device for simultaneous measurement of fluctuations of atmospheric carbon dioxide and water vapor. *Boundary-Layer Meteorology*, 1982, 24: 109 ~ 119
- 12 Ohtaki E. Application of an infrared carbon dioxide and humidity instrument to studies of turbulent transport. *Boundary-Layer Meteorology*, 1984, 29: 85 ~ 107
- 13 文字信貴. 植物と微気象、群落大気の乱れとフラックス. 大阪: 大阪公立大学共同出版会, 2003
- 14 Yasuda Y, Watanabe T, Ohtani Y, et al. Seasonal variation of CO₂ flux over a broadleaf deciduous forest. *Japan Society of Hydrology and Water Resources*, 1998, 11 (6): 575 ~ 585
- 15 Yamamoto S, Murayama S, Saigusa N, et al. Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus B*, 1999, 51: 402 ~ 413
- 16 Yasuda Y, Watanabe T. Comparative measurements of CO₂ flux over a forest using closed-path and open-path CO₂ analysers. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 100: 191 ~ 208
- 17 Saigusa N, Yamamoto S, Murayama S, et al. Gross primary production and net ecosystem exchange of a cool-temperate deciduous forest estimated by the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112: 203 ~ 215
- 18 Hirano T, Hiratai R, Fujinuma Y, et al. CO₂ and water vapor exchange of a larch forest in northern Japan. *Tellus B*, 2003, 55: 244 ~ 257
- 19 Inoue I. An aerodynamic measurement of photosynthesis over a paddy field. In: *Processing of the 7th Japan National Congress of Applied Mechanics*, 1958. 211 ~ 214
- 20 Yabuki K, Aoki M. The effect of wind speed on the photosynthesis of rice field. In: *Ecophysiology of photosynthetic productivity* (ed. By Monsi M, Saeki T.). JIBP Synthesis, Vol.19, Univ. Tokyo: Tokyo Press, 1978. 152 ~ 159
- 21 Monji N, Hamotani K, Tosa R, et al. CO₂ and water vapor flux evaluations by modified gradient methods over a Mangrove forest. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 2002, 58 (2): 63 ~ 69
- 22 Monji N, Hamotani K, Hamada Y, et al. Exchange of CO₂ and heat between Mangrove forest and the atmosphere in wet and dry seasons in southern Thailand. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 2002, 58 (2): 71 ~ 77
- 23 Ohtaki E. On the similarity in atmospheric fluctuations of carbon dioxide, water vapor and temperature over vegetated fields. *Boundary-Layer Meteorology*, 1985, 32: 25 ~ 37
- 24 Yasuda Y, Watanabe T, Yamaoki K, et al. Measurement of scalar flux from a forest using the bandpass covariance method. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 1997, 52: 493 ~ 496
- 25 Watanabe T, Yamanoi K, Yasuda Y. Testing of the bandpass eddy covariance method for a long-term measurement of water vapor flux over a forest. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 96: 473 ~ 491
- 26 Hamotani K, Uchida Y, Monji N, et al. A system of the relaxed eddy accumulation method to evaluate CO₂ flux over plant canopies. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 1996, 52: 135 ~ 139
- 27 Hamotani K, Yamamoto H, Monji N, et al. Development of a mini-sonde system for measuring trace gas fluxes with the REA method. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 1997, 53: 301 ~ 306
- 28 Monji N, Hamotani K, Hirano T, et al. CO₂ and heat exchange of a mangrove forest in Thailand. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 1996, 52: 149 ~ 154
- 29 Raupach M R. Anomalies in flux-gradient relationships over forests. *Boundary-Layer Meteorology*, 1979, 16: 467 ~ 486
- 30 Yamamoto S, Saigusa N, Murayama S, et al. Findings through ten-years flux measurement at Takayama and remaining subjects. In: *Proceedings of synthesis workshop on the carbon budget in Asian monitoring network, the decennial anniversary of the observation at Takayama site*, 2003. 15 ~ 18
- 31 Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20 (5): 842 ~ 844
- 32 齐玉春, 罗 辑, 董云社, 等. 贡嘎山山地暗针叶林带森林土壤温室气体 N₂O 和 CH₄ 排放研究. *中国科学, D 辑*, 2003, 32(11): 934 ~ 941
- 33 董云社, 章 申, 齐玉春, 等. 内蒙古典型草地 CO₂, N₂O, CH₄ 通量的同时观测及其日变化. *科学通报*, 2000, 45(3): 318 ~ 322
- 34 Liang N, Inoue G, Fujinuma Y. A multichannel automated chamber system for continuous measurement of forest soil efflux. *Tree Physiology*, 2003a, 23: 825 ~ 832
- 35 Miyama T, Kominami Y, Tamai K, et al. Automated foliage chamber method for long-term measurement of CO₂ flux in the

- uppermost canopy. *Tellus B*, 2003, 55: 322 ~ 330
- 36 Liang N S, Nakadai T, Hirano T, et al. In situ comparison of four approaches to estimating soil CO₂ efflux in a northern larch (*Larix kaempferi* Sarg.) forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003b, 123: 97 ~ 117
- 37 Wang Y S, Hu Y Q, Ji B M, et al. An investigation on the relationship between emission/uptake of greenhouse gases and environmental factors in semiarid grassland. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(1): 119 ~ 127
- 38 王跃思, 胡玉琼, 纪宝明, 等. 放牧对内蒙古草原温室气体排放的影响. *中国环境科学*, 2002, 22(6): 490 ~ 494
- 39 郑循华, 徐仲均, 王跃思, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增高影响稻田—大气 CO₂ 净交换的静态暗箱法观测研究. *应用生态学报*, 2002, 13(10): 1240 ~ 1244
- 40 郝庆菊, 王跃思, 宋长春, 等. 三江平原湿地 CH₄ 排放通量研究. *水土保持学报*, 2004, 18(3): 194 ~ 199
- 41 Xiao D M, Wang M, Wang Y S, et al. Fluxes of soil carbon dioxide, nitrous oxide and firedamp in broad-leaved Korean pine forest. *Journal of Forestry Research*, 2004, 15(2): 107 ~ 112
- 42 周存宇, 张德强, 王跃思, 等. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化. *生态学报*, 2004, 24(8): 1741 ~ 1745
- 43 邹建文, 黄耀, 郑循华, 等. 基于静态暗箱法的陆地生态系统—大气 CO₂ 净交换估算. *科学通报*, 2004, 49(3): 258 ~ 264
- 44 Finnigan J J, Clement R, Malhi Y, et al. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques Part I: Averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 1 ~ 48
- 45 Kaimal J C, Finnigan J J. *Atmospheric boundary layer flows—their structure and measurement*. New York: Oxford University Press, 1994. 289
- 46 Wilczak J M, Oncley S P, Stage S A. Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 2001, 99: 127 ~ 150
- 47 Lee X. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39 ~ 49
- 48 Paw U K T, Baldocchi D D, Meyers T P, et al. Correction of eddy-covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97: 487 ~ 511
- 49 Yasuda Y, Ohtani Y, Watanabe T, et al. Measurement of CO₂ flux above a tropical rain forest at Pasoh in Peninsular Malaysia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 114: 235 ~ 244
- 50 Nakai Y, Kitamura K, Suzuki S, et al. Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan. *Tellus B*, 2003, 55: 305 ~ 312
- 51 Massman W J, Lee X. Eddy covariance corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 121 ~ 144
- 52 Kominami Y, Miyama T, Tamai K, et al. Characteristics of CO₂ flux over a forest on complex topography. *Tellus B*, 2003, 55: 313 ~ 321
- 53 Aubinet M, Grelle A, Ibrom A, et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the EUROFLUX methodology. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30: 113 ~ 175
- 54 Twine T E, Kustas W P, Norman J M, et al. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103: 279 ~ 300
- 55 Schmid H P. Source areas for scalar and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 1994, 67: 293 ~ 318
- 56 Schimel H P. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: A review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 159 ~ 183
- 57 Choi T, Kim J, Lim J H. CO₂ exchange in Kwangneung broadleaf deciduous forest in a hilly terrain in the summer of 2002. *Korea Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 5 (2): 70 ~ 80
- 58 Gu S, Tang Y H, Du M Y, et al. Short-term variation of CO₂ flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai ~ Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D21): 4670
- 59 王树森, 朱治林, 孙晓敏, 等. 拉萨地区农田能量物质交换特征. *中国科学, D 辑*, 1996, 26(4): 359 ~ 364
- 60 Miyata A, Leuning R, Denmead O T, et al. Carbon dioxide and methane fluxes from an intermittently flooded paddy field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 102: 287 ~ 303
- 61 关德新, 吴家兵, 于贵瑞, 等. 主要气象条件对长白山阔叶红松林 CO₂ 通量的影响. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 103 ~ 108
- 62 刘允芬, 宋霞, 孙晓敏, 等. 千烟洲人工针叶林 CO₂ 通量季节变化及其环境因子的影响. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 109 ~ 117
- 63 张宪洲, 石培礼, 刘允芬, 等. 青藏高原高寒草原生态系统土壤 CO₂ 排放及其碳平衡. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 193 ~ 199
- 64 Piao S L, Fang J Y. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25 (5): 603 ~ 608
- 65 Xiao X M, Hollinger D, Aber J. Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needle leaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 89: 519 ~ 534
- 66 Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic evaluation of net primary productivity of natural vegetations (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)*, 1985, 40(4): 343 ~ 352
- 67 Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic levels of grasslands in the Great Plains. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1173 ~ 1179
- 68 Running SW, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications, I. Hydrologic balance, canopy

- gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 125 ~ 154
- 69 Ji J J, Yu L. A Simulation Study of Coupled Feedback Mechanism between Physical and Biogeochemical Processes at the Surface. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1995, 23 (4): 439 ~ 448
- 70 Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential net primary productivity in south America: Application of a global model. *Ecological Application*, 1991, 4: 399 ~ 429
- 71 Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, 4: 185 ~ 198
- 72 Ito A, Oikawa T. A simulation model of the carbon cycle in land ecosystems (Sim-CYCLE): A description based on dry-matter production theory and plot-scale validation. *Ecological Modelling*, 2002, 151: 143 ~ 176
- 73 Yu G R, Wang Q F, Zhuang J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161(3): 303 ~ 318
- 74 Yu G R, Tatsuaki K, Zhuang J, et al. A coupled model of photosynthesis-transpiration based on the stomatal behavior for maize (*Zea mays* L.) grown in the field. *Plant and Soil*, 2003, 249 (2): 401 ~ 415
- 75 Yu G R, Zhuang J, Yu Z L. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158: 861 ~ 874
- 76 张仁华, 孙晓敏, 朱治林, 等. 遥感区域地表植被二氧化碳通量的机理及其应用. *中国科学, D 辑*, 2000, 30(2): 215 ~ 224
- 77 孙晓敏, 朱治林, 许金萍, 等. 涡度相关测定中平均周期参数的确定及其影响分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 30 ~ 36
- 78 吴家兵, 关德新, 孙晓敏, 等. 长白山阔叶红松林 CO₂ 交换的涡动通量修订. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 95 ~ 102
- 79 朱治林, 孙晓敏, 袁国富, 等. 非平坦下垫面涡度相关通量的校正方法及其在 ChinaFLUX 中的应用. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 37 ~ 45
- 80 温学发, 于贵瑞, 孙晓敏, 等. 复杂地形条件下森林植被湍流通量测定的分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 57 ~ 66
- 81 张军辉, 韩士杰, 孙晓敏, 等. 冬季强风条件下森林冠层/大气界面开路涡动相关 CO₂ 净交换通量的 UU*修正. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 77 ~ 83
- 82 宋霞, 于贵瑞, 刘允芬, 等. 开路与闭路涡度相关系统通量观测比较研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 67 ~ 76
- 83 李正泉, 于贵瑞, 温学发, 等. 中国通量观测网络(ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 46 ~ 56
- 84 石培礼, 张宪洲, 钟志明. 西藏高原低大气压下冬小麦表观光合量子产额及其对温度和胞间 CO₂ 浓度变化的响应. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 161 ~ 166
- 85 徐玲玲, 张宪洲, 石培礼, 等. 青藏高原高寒草甸生态系统表观量子产额和表观最大光合速率的确定. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 125 ~ 130
- 86 徐世晓, 赵新全, 李英年, 等. 青藏高原高寒灌丛生长季和非生长季 CO₂ 通量分析. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 118 ~ 124
- 87 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 84 ~ 94
- 88 沙丽清, 郑征, 唐建维, 等. 西双版纳热带季节雨林的土壤呼吸研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 167 ~ 174
- 89 周存宇, 周国逸, 王迎红, 等. 鼎湖山森林地表 CO₂ 通量及其影响因子的研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 175 ~ 182
- 90 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*, 2004, 34(增刊 II): 1 ~ 14
- 91 王秋凤, 牛栋, 于贵瑞, 等. 长白山森林生态系统 CO₂ 和水热通量的模拟研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 131 ~ 140
- 92 任传友, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 冠层尺度的生态系统光合-蒸腾耦合模型研究. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 141 ~ 151
- 93 张永强, 于强, 刘昌明, 等. 植被光合、冠层导度和蒸散的耦合模拟. *中国科学, D 辑*, 2004, 34(增刊 II): 152 ~ 160
- 94 Yakir D, Sternber L D S L. The use of stable isotopes to study ecosystem gas exchange. *Oecologia*, 2000, 123: 297 ~ 311
- 95 Battle M, Bender M L, Tans P P, et al. Global carbon sinks and their variability inferred from atmospheric O₂ and $\delta^{13}\text{C}$. *Science*, 2000, 287: 2467 ~ 2470
- 96 Bowling D R, Tans P P, Monson R K. Partitioning net ecosystem carbon exchange with isotopic fluxes of CO₂. *Global Change Biology*, 2001, 7: 127 ~ 145

