

# 生态系统研究与管理简报

立足科学 服务决策 促进人与自然和谐发展

2009 年第 1 期 (总第 20 期)

3 月 10 日印发

## BigFoot 计划综述

—基于野外观测结合遥感技术与过程模型验证 MODIS 陆地碳循环相关产品

中国生态系统研究网络综合研究中心 编译

**【编者按】** BigFoot计划是为MODLand的土地覆盖、叶面积指数 (LAI),  $f_{APAR}$ , 以及NPP产品提供地表验证而实施的计划。多上美国长期生态学网站 (US LTER) 的生态站参加了该计划。自 1999 年到 2003 年美国实施的BigFoot计划为MODIS陆地碳循环相关产品的地表验证做出了重要的贡献。我国面临着对相关遥感产品进行有效验证的需求, BigFoot计划为我国制定和实施相关计划提供了基本思路和方法指导, 对推动我国开展野外地面观测与遥感相结合的相关工作具有借鉴意义, CERN综合中心高彦华博士编写了该计划的综述, 供CERN与有关机构参阅。

## 一、引言

BigFoot计划是为MODLand的土地覆盖、叶面积指数(LAI),  $f_{APAR}$ , 以及NPP产品提供地表验证而实施的计划。该计划关注的重点在于应用遥感以及生态系统过程模型对通量塔footprint范围内的观测数据进行尺度扩展。“BigFoot”一词用来表达该计划实行地表验证所采用的多个尺度, 或不同footprint尺度(图1)。



图1 BigFoot 数据获取的空间尺度示意图

野外台站是实现遥感产品地表验证的基本平台, BigFoot最初只有4个站点, 其中两个站点在1999年就开始了野外测量工作。这四个站点分别代表不同的全球主要生态系统。NOBS (Northern Old Black Spuce) 站属于北方常绿针叶林生态系统。HARV (the Harvard Forest LTER site) 站属于温带针阔混交林生态系统。AGRO (a.k.a. Bondville) 站属于农田生态系统, 主要种植玉米和大豆。KONZ (the Konza Prairie LTER site) 站属于高草草原生态系统。BigFoot计划最初主要验证MODIS的土地覆盖、LAI、以及NPP产品。随后BigFoot计划又增加了对 $f_{APAR}$ 的验证, 并增加了5个属于不同生态系统的新站点, 使得MODIS产品得到更广泛的验证。新站点所属生态系统包括沙漠草地生态系统 (SEVI, the Sevilleta LTER), 靠近北极海滨平原的苔原冻土

生态系统 (TUND, AK)，以及位于亚马逊盆地的热带常绿阔叶林生态系统 (TAPA, the Tapajos Primary Forest site of LBA)。此外，还有两个站点，分属于次生温带针阔混交林生态系统 (CHEQ) 和温带常绿针叶林生态系统 (METL)。与其他相关计划相比，BigFoot包含更多的生态系统类型。

基于 BigFoot 分属于 8 个生态系统类型的 9 个站点，不仅可以进行 MODIS 产品的验证，还可以对碳含量及 NPP 进行定量分析及其时空变化分析，并分析 NPP 与气象参数的相关关系。总的来说，不同生态系统的 NPP 差异反映了生物物理过程及各影响因子对 NPP 的影响，以及这些影响因子对气候变化和土地利用变化的敏感性。BigFoot 的标准化测量数据也可以直接检验光能利用率是否因植被功能型不同而不同，或随季节变化而变化。该计划也可以服务于对生态系统健康监测结果的检验。

除了 BigFoot 计划，还有几个其他的相关全球陆地监测和验证计划，其中包括全球初级生产力数据计划 (GPPDI, Global Primary Production Data Initiative)，国际通量观测研究网络 (FLUXNET)，MODLand 相关验证计划，植被/生态系统模拟分析计划 (VEMAP, Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project) 等等。随着这些计划的开展，使人们认识到全球陆地监测系统的形成需要考虑几个关键因素：野外实地测量、通量塔的观测、基于遥感的植被面上数据，以及生态系统过程模型。然而，这些计划或者只具备单一的关键因素（例如 FLUXNET），或者仅仅结合了上述的一两个关键因素（例如 GPPDI, VEMAP）。而 BigFoot 结合了上述的全部关键因素，基于合适的空间尺度服务于相关传感器和模型模拟产品的验证（图 2）。

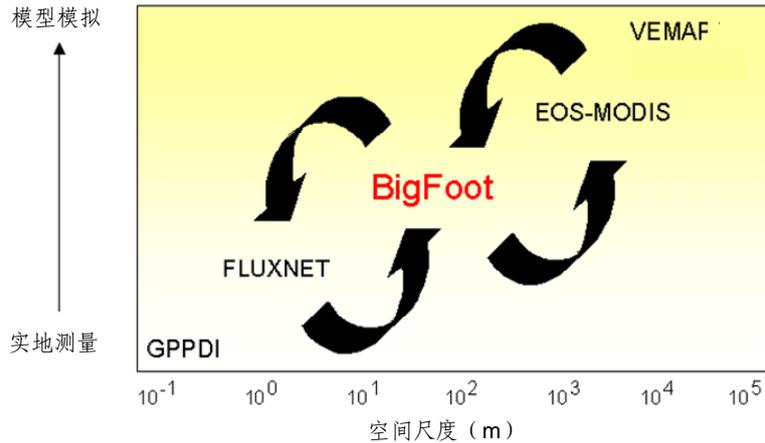


图 2 BigFoot 在尺度转换和产品验证中的关键作用

## 二、BigFoot 计划的目的

BigFoot 计划的主要目的是为 MODLand (MODIS Land Science Team) 的产品提供验证, 包括对土地覆盖、叶面积指数 (LAI)、光合有效辐射吸收比率 ( $f_{APAR}$ ), 以及 NPP 产品的验证。这些产品的有效验证, 需要具备代表不同类型生态系统的站点尺度测量数据、遥感数据, 以及相关的生态系统过程模型。BigFoot 站点包括  $CO_2$  通量塔 footprint ( $\approx 1 \text{ km}^2$ ) 为中心的  $5 \times 5 \text{ km}$  的空间范围。基于各个站点对碳循环相关的生态系统结构和功能特性进行多年实地观测, 多年测量数据可以确保 MODLand 产品的验证, 也使得各产品的年际变化得到可靠评价。

BigFoot 计划涉及的具体内容包括:

- 1、基于 BigFoot 站点, 对碳循环相关的生态系统特性进行多年野外实地观测。BigFoot 采样点的设计能够在细小尺度上清楚地反应这些生态系统特性, 而且基于野外观测提供通量塔 footprint 范围内的生态系统特征。而多年的观测也为准确评价 MODLand 产品的动态变化提供保证。
- 2、采用野外实地观测与 Landsat ETM+ 数据结合的方式, 生成多年的站点尺度的土地覆盖、LAI、以及  $f_{APAR}$  面上数据, 并评价这些面上数据的误差。
- 3、基于土地覆盖数据、LAI 数据以及气象等数据, 应用两个生态系统过程模型模拟各个站点  $5 \times 5 \text{ km}$  BigFoot footprint 范围内多年

NPP。通过对比模拟 NPP 与实测 NPP 的来评价这两个模型模拟 NPP 的精度。

- 4、验证MODLand土地覆盖、LAI、 $f_{APAR}$ ，以及NPP数据，并分析各重要参数的尺度效应对MODLand 和 BigFoot面上数据之间差异的影响。验证工作包括MODLand数据与BigFoot野外测量数据及BigFoot面上数据间的直接比较。尺度效应分析检验的因子包括土地覆盖类型随尺度扩展的变化、分辨率大小的变化，以及光能利用率 ( $f_{APAR}$ ) 是否符合相应的土地覆盖类型。
- 5、明确MODLand产品是否能够响应气候的年际变化对植被覆盖、LAI、 $f_{APAR}$ ，以及NPP的影响，同时明确不同站点间，以及不同植被类型间光能利用率存在怎样的变化。

### 三、BigFoot 野外实验场设计

BigFoot每个站点都设计 100 个采样点观测地表覆盖类型、LAI、 $f_{APAR}$ ，以及NPP（图 3）。每个样地大小为 25 x 25 m，大体上相当于 ETM+数据的像元大小。通量塔所在的 1 x 1 km区域的中心设置 60-80 个采样点，其余 20-40 个采样点设置在通量塔 1 x 1 km范围外，5 x 5 km BigFoot footprint内的区域。通量塔footprint范围内的样地密度可以确保该范围内的地表属性够得到充分的反映。处于通量塔footprint范围外（即，除通量塔所在像元外的其他 24 个像元内）的 20-40 个采样点分属于不同的基本土地覆盖类型，使得这些采样点都可以作为独立的验证点对BigFoot footprint范围的面上产品进行验证。

为更好的掌握通量塔footprint范围内的生态特征，样方设计在空间分布上采用嵌套的方式。这种设计为较容易观测的参数（植被覆盖和LAI）提供相对多的采样点，为难于观测的参数（ $NPP_A$ 和 $NPP_B$ ）设置较少的采样点。嵌套设计的优点在于：当 25m空间尺度向 1km空间尺度扩展，嵌套设计可以使样方分布数量在一定的间隔情况下实现最大化。当数据用于地质统计分析的时候，样方数量的最大化通常是重要的需求。此外，嵌套设计也有助于研究数据的观测尺度对MODIS

NPP估算的影响。

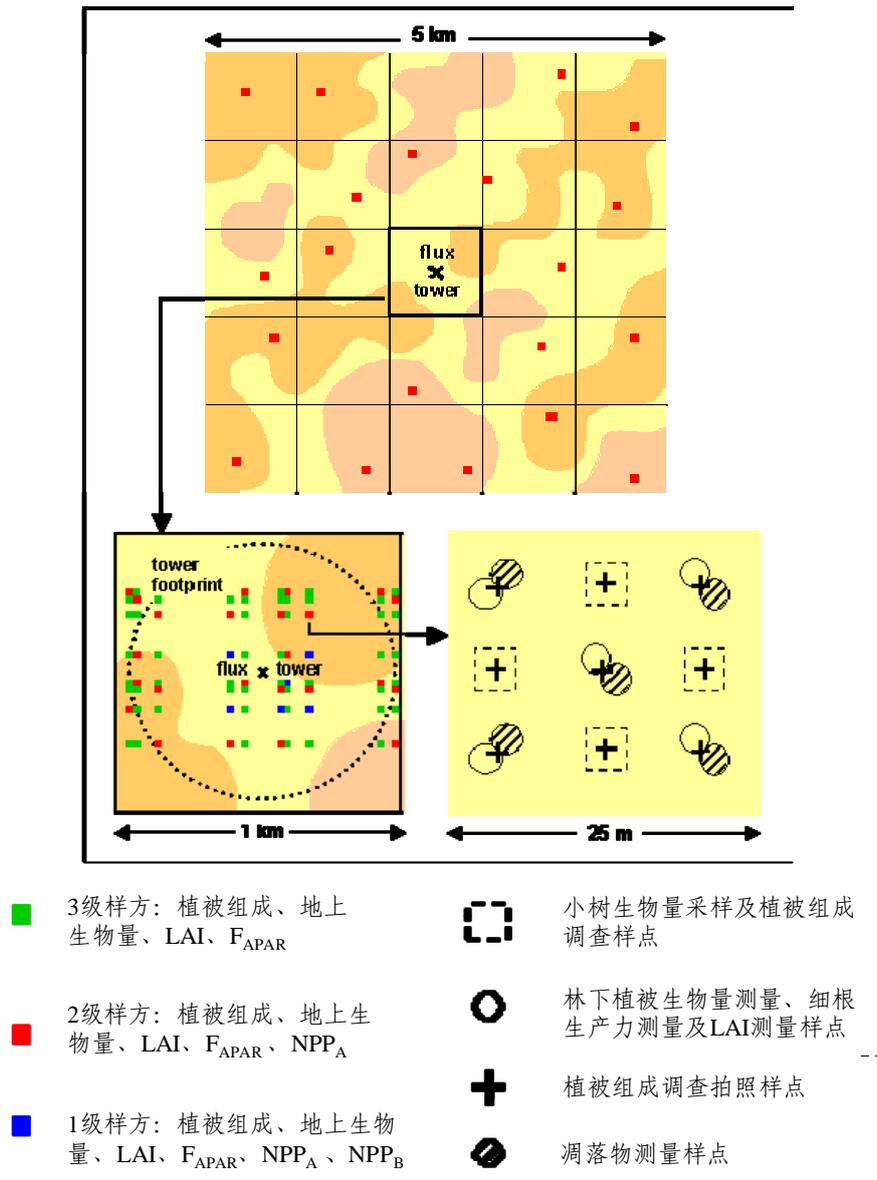


图 3 BigFoot 实验场设计

#### 四、BigFoot 野外实验和产品验证方法

BigFoot地表验证实验在  $1\text{km}^2$ 通量塔footprint范围内以及  $25\text{ km}^2$ 的BigFoot footprint范围内同时实施。BigFoot的核心产品是  $25\text{km}^2$ 的面上数据, 包括  $25\text{m}$ 空间分辨率的土地覆盖、LAI、 $f_{APAR}$ , 以及NPP数据, 其中土地覆盖和LAI数据基于ETM+数据生成, 而NPP基于生态系统过程模型生成。BigFoot 土地覆盖和LAI面上数据的验证基于地表观测。BigFoot碳、水通量面上产品的验证则基于通量塔的观测数据, 空间范

围限定在通量塔footprint范围内，时间尺度为天。

## 1、土地覆盖、LAI、 $f_{APAR}$ 、NPP的野外测量方法

BigFoot站点内各样方的中心用木桩作为标记，样方内设置几个亚样方观测植被覆盖类型、LAI、 $f_{APAR}$ 、以及NPP。LAI的测量方法采用直接测量和光学测量两种方法。直接测量方法主要是对非林地覆盖区进行定期的面积采集，对林地覆盖区则基于LAI与树干胸径(D)的异速生长方程测量LAI。LAI和 $f_{APAR}$ 也可以用Li-Cor LAI-2000 (Fassnacht et al. 1994, Chen et al. 1997, Gower et al. 1997, Gower et al. 1999) 间接测量。各个站点LAI/ $f_{APAR}$ 的测量次数是不同的，因为不同的生态系统LAI随时间的变化不同，甚至同一个生态系统的不同年份间LAI也存在差异。因此，在林地站点LAI和 $f_{APAR}$ 每年测量3次，其他站点每年测4-6次。

$f_{APAR}$ 的测量采用两个途径：一是通过Li-Cor LAI-2000获得，二是采用连续的PAR轨道测量系统获得。简单的说，轨道测量方法是沿着30m的轨道分别在冠层的上方和下方测量入射PAR和反射PAR。另外，由于直射PAR与散射PAR的比率影响光能利用率(LUE)的大小，而两者的比率随冠层结构的变化而变化，连续的测量能够更好的反映 $f_{APAR}$ 的日变化特征及其季节模式，因此轨道测量法有其特有的优点。

NPP包括地上部分NPP( $NPP_A$ )和地下部分NPP( $NPP_B$ )， $NPP_A$ 和 $NPP_B$ 的测量有多种方法，有些方法更适合低矮的植被(草地、苔原、农田等)。NPP可以用下面的方程表示：

$$NPP = NPP_W + NPP_F + NPP_{CR} + NPP_{FR} + NPP_U + NPP_{GC}$$

其中：W = 地上木质部分(即，树茎 + 树枝)；F = 叶子；CR = 粗根；FR = 细根；U = 林下植被；GC = 地被物(即，苔藓等)。该方程适用于任何陆地生态系统，但对于不同生态系统，野外测量各个组成的方法是不同的(Gower et al. 1999)。地上木质部分生物量和粗根生物量是基于各组分生物量与胸径的异速生长方程获得。

对于叶的生物量测量，由于很多生物和非生物因子影响新生叶生

物量的异速生长系数，因此对于没有建立异速生长方程的林木，其新生叶的生物量是通过每年的凋落物的量来估算的 (Gower et al. 1999)。这种方法的假设条件是冠层生物量是稳定不变的。叶的生物量和叶面积的计算方程来源于文献。也可将不同站点同一树种的采伐木的生物量或叶面积数据组合在一起，建立广义的回归方程估算各站点的生物量和叶面积。

灌丛和草本层的 $NPP_A$ 的获得采用收割法 (clip plots)，这种方法可用于非林地站点整个生长季的生物量的测量。苔藓、地衣等植物的 $NPP_A$ 测量方法来源于相关文献 (Gower et al. 1997)。细根的 $NPP$ 测量采用minirhizotrons法 (Steele et al. 1997)。考虑到获取和处理 $NPP_B$ 数据的难度， $NPP_B$ 的测量仅限于对站点内两个优势植被类型的测量。

## 2、土地覆盖和 LAI 面上数据生成

这部分的目标是生成高质量的土地覆盖和 LAI 面上数据，以便应用于 NPP 模型以及与 MODLand 相关产品的比较，这两个数据的生成主要基于 ETM+数据。数据的误差通过单独的野外观测数据来评估。

土地覆盖数据的制图采用非监督分类、回归分析，以及其他技术结合的方式对一年内多时相影像进行综合分析处理得到的。首先采用非监督分类区分植被和非植被类别 (例如，水体、荒地、居民区等)，再针对植被类别做相应的分类。非监督分类后需要采取的处理过程要依据站点的特点来定。例如，在农田站点可以在非监督分类区分植被和非植被类别后再采用监督分类分离玉米和大豆等作物；对于温带针阔混交林站点，在非监督分类的基础上，利用不同时相的数据 (例如，处于生长季的数据和落叶期的数据) 区分出针叶林。对于土地覆盖变化较小的站点，如森林站，连续年份的土地覆盖制图依赖于变化检测，将检测出的变化区域赋予新的覆盖类型。

LAI 和  $f_{APAR}$ 的制图主要关注生长季内LAI和 $f_{APAR}$ 的最大值，最大值可以通过回归分析获得。此外，可以利用波谱特征的季节变化来反映最大LAI，因此可以采用典型相关分析法 (canonical correlation

analysis, CCA, Seal 1964), 基于波谱数据与LAI/ $f_{APAR}$ 间相关性进行分析和估算。此外, 土地覆盖、LAI及 $f_{APAR}$  面上数据的误差影响MODIS产品的验证的可靠性, 因此需利用参考数据(野外观测数据以及其他辅助信息)及交叉验证的方法评价这些面上数据的误差。

### 3、模拟 5 x 5 km BigFoot footprint 范围内 NPP 的方法

生态系统过程模型是实现尺度扩展的主要方式, 模型输入参数包括土地覆盖数据、LAI 数据、土壤数据, 以及气象数据等(图 4)。模型参数化取决于土地覆盖类型。气候驱动参数来源于通量塔半小时的观测数据, 并基于 DEM 数据将气象数据插补到每个栅格。最后, 将模型模拟的通量塔及通量塔邻近区域的日 GPP 数据与基于塔测量数据计算得到的 GPP 进行对比验证。同样, 模型模拟 NPP 值与地表测量的 NPP 值进行对比验证。

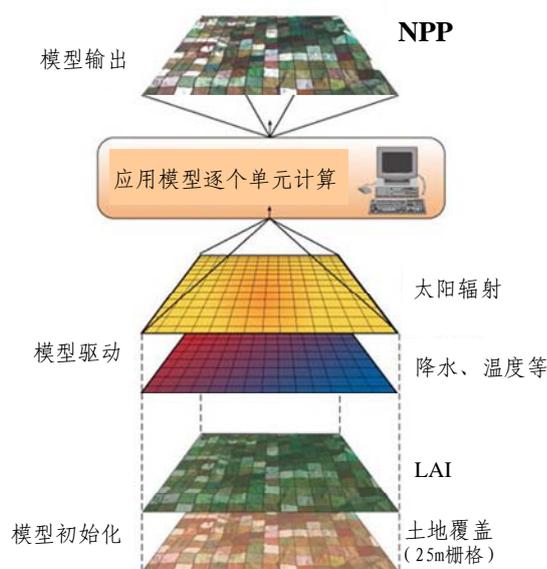


图 4 BigFoot 模型模拟 5 x 5 km 验证数据的概念模型

BigFoot 采用两个不同的生态系统过程模型模拟 5 x 5 km MODLand footprint 范围内的 NPP, 这两个模型分别是 Biome-BGC 模型和 IBIS 模型。Biome-BGC 模型可以与遥感数据结合来描述 NPP 的空间分布 (Hunt et al. 1996)。在 MODIS 的 GPP 算法中 Biome-BGC 模型也用于确定不同植被类型光能利用率, 因此该模型有助于分析 MODLand 产品和 BigFoot 产品间的差异。而 IBIS 模型是模拟陆地

生态系统碳、水通量的综合模型，而且模拟结果已在多个生态系统得到验证。而且该模型可以采用不同的时间步长，包括以小时为单位的时间步长，而 Biome-BGC 的时间步长是天。此外，IBIS 能模拟生态系统碳收支，以至于模型输出结果可以直接与通量塔观测的 NEE 进行对比验证。

#### 4、MODLand 土地覆盖、LAI、fAPAR, 以及 NPP 产品的验证

BigFoot采用几种方式验证MODLand产品，最简单明了的方式就是地图与地图之间的比较，BigFoot的土地覆盖、LAI、 $f_{APAR}$ ，以及NPP面上数据都采用这种方式与MODIS产品进行比较。在MODIS的  $1\text{km}^2$  像元内，有 1600 个  $625\text{m}^2$ 的栅格单元，因此，MODLand土地覆盖数据的验证采用的是将每个栅格单元BigFoot数据值的频数分布与这个MODIS的像元值进行对照的方式实现的。对于数值型面上数据（例如LAI数据）则计算每个小栅格的平均值，将平均值与MODLand产品相应像元值进行比较。MODLand产品可直接与野外观测数据进行比较，但这样的比较很可能仅在通量塔所在的像元内有效，因为通量塔所在的像元内设置的观测样方的密度较高。

## 参考文献:

- [1] Chen, J., P.W. Rich, S.T. Gower, J.M. Norman, and S. Plummer. 1997. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques and measurements. *J. Geophys. Res.* 102 D24:29,429- 29,444.
- [2] Fassnacht, K.S., S.T. Gower, J.M. Norman and R.E. McMurtrie. 1994. A comparison of optical and direct methods for estimating foliage surface area index in forests. *Agr. Forest Meteorol.* 71:183-207.
- [3] Gower, S.T., J. Vogel, J.M. Norman, C.J. Kucharik, S.J. Steele, T.K. Stow. 1997. Carbon distribution and net primary production of aspen, jack pine and black spruce BOREAS forests. *J. Geophys. Res.* 102 D24:29,029-29,041.
- [4]Gower, S.T., Kucharik, C.J., and J.M. Norman. 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 70:29-51.
- [5] Hunt, E.R., Jr., S.C. Piper, R. Nemani, C.D. Keeling, R.D. Otto, and S.W. Running. (1996). Global net carbon exchange and intra-annual atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations Predicted by an Ecosystem Process Model and Three-Dimensional Atmospheric Transport Model. *Global Biogeochemical Cycles* 10: 431-456.
- [6]Steele, S.J., S.T. Gower, J. Vogel, J.M. Norman. 1997. Root mass, production and turnover of boreal aspen, jack pine and black spruce forests. *Tree Physiol.* 17:577-587.

报告整理: 高彦华

责任编辑: 于秀波

# 生态系统研究与管理简报

立足科学 服务决策 促进人与自然和谐发展

## (2007年目录)

- 11月20日 第8期 英国生态系统长期监测与研究进展  
Terry Parr (国际长期生态学研究网络主席、英国环境变化网络主席)
- 12月28日 第9期 湿地生物多样性保护主流化的探索与实践  
UNDP/GEF 中国湿地生物多样性保护项目

## (2008年目录)

- 1月24日 第1期 生态系统研究的新领域、新技术与新方法  
中国生态系统研究网络综合研究中心
- 2月20日 第2期 在 NEON 内发展同位素网络的计划  
中国生态系统研究网络水分分中心 编译
- 5月15日 第3期 加强生态站长期观测与研究 提升区域综合研究能力  
韩兴国 (中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站)
- 9月5日 第4期 气候变化与生态系统适应性——聚焦长江流域  
中国生态系统研究网络综合研究中心
- 11月15日 第5期 台湾人工林的适应性管理  
金恒镛 (国际长期生态学研究网络原主席)

## (2009年目录)

- 3月10日 第1期 **BigFoot** 计划综述—基于野外观测结合遥感技术与过程模型验证 MODIS 陆地碳循环相关产品  
中国生态系统研究网络综合研究中心 编译

## 关注中国生态系统监测、研究、评估、管理与政策进展

主办单位:

国家生态系统观测研究网络综合研究中心  
中国生态系统研究网络综合研究中心  
中国生态系统研究网络科学委员会秘书处  
中科院生态网络观测与模拟重点实验室

编辑部:

于贵瑞、欧阳竹、于秀波 (常务)

通信地址: 北京市朝阳区大屯路甲11号  
中科院地理科学与资源研究所  
CERN 综合研究中心

邮政编码: 100101

传 真: 010-6486 8962

电子邮件: [cef@cern.ac.cn](mailto:cef@cern.ac.cn)

网 页: <http://www.cern.ac.cn>