

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

2008 年第 2 期（总第 16 期）

2 月 20 日印发

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

【编者按】2004 年 9 月和 12 月，美国的有关生态学家、大气科学家、联邦机构代表等专门召开会议，研讨如何在美国国家生态观测网络（NEON）项目中推动同位素网络监测计划，本报告是这两次研讨会的总结，提出了在 NEON 中开展同位素监测的具体行动方案，包括基础设施、监测与研究能力、培训、质量控制、教育和推广等内容。2008 年 4 月，有关科学家将聚集美国洛杉矶召开会议进一步讨论这一计划。

为了推动同位素技术在我国生态系统监测和联网研究领域的应用，中国生态系统研究网络（CERN）水分分中心组织编译了该报告的主要部分，供 CERN 和有关机构参阅。

一、前言

土地利用变化、大气中痕量气体增加、地下水减少、废水处理和排放以及有机和无机污染物排放等过程，向社会发起挑战，要求量化并减缓那些对国家的自然、农业和城市环境有潜在破坏性的改变。人类生活健康和维系我们生活方式的经济体系需要提高研究上述问题的能力。在过去的几十年中，生态学领域取得了很大进步，科学家们已能定量地分析各种大的时空尺度的问题，例如：

- (1) 污染物进入食物和水资源的程度有多大？来源是什么？
- (2) 在众多环境污染物的来源中，哪些是迫切需要减少的？
- (3) 地下水是如何受到地上生态系统和人类利用影响的？
- (4) 入侵物种是如何改变生产力和景观的经济价值的？
- (5) 特定种群在生态系统中起着什么作用，其保护为什么是至关重要的？
- (6) 疾病传播媒介的来源和迁移模式是什么？
- (7) 气候变化改变自然和人工生态系统生产力的程度有多大？
- (8) 有没有能有效指示生态系统紊乱的综合指标？尤其是能反映早期重要变化指标？

这些广泛的问题要求使用综合性的观测，这种观测允许我们跟踪环境中的关键要素，而且在数量上能说明关注的过程进展到了什么程度。科学家越来越多地使用同位素分析来探讨上述的关键问题。对重要的生态和环境参数的同位素分析提供了一种可以综合、指示、记录和示踪生态学基本过程的观测。生命的重要元素（H,C,O,N,S）中呈现的同位素变化提供了一些自然、农业与城市生态系统状况和服务的定量化信息。近 15 年来，分析方法上的技术进步使生态学家能够研究越来越复杂的问题。正因为如此，同位素分析将会在 NEON 的科学和教育活动中扮演重要角色。

过去十年，同位素方法在生态学上得到了普遍的应用。

(1) 同位素综合时间和空间上的生态学过程。植物和动物组织以及土壤中有机和无机化合物（包括气体）的同位素比表征了在景观

尺度上的重要生理和生态过程在时间上的综合。这个综合的时间尺度取决于待研组织或“库”中元素的周转速率。此外，充分混合的环境库，例如大气、河流以及含水层的同位素比，通常表征了源的输入在更大空间尺度上的一个综合。

(2) 同位素指示关键生态过程的存在和程度。很多生态学过程产生一个明确特色的同位素痕迹。这样的过程存在与否，以及这些过程相对于其他过程所发生改变的程度可以通过同位素比值相对于已知背景值的变化来表达。

专栏 1

什么是同位素？

每个原子的核子包括质子和中子。质子数定义的是元素(例如：氢、碳等)，质子数和中子数之和，即原子量。中子数定义了元素的同位素。例如，大部分碳(约 99%)都有 6 个质子和 6 个中子，并写成 ^{12}C 来反映它的原子量。然而，地球生物圈中大约 1% 的碳有 6 个质子和 7 个中子(^{13}C)，形成了这个重要元素的稳定重同位素。稳定同位素不会衰变成另外的元素。与此对应，放射性同位素(例如： ^{14}C)不稳定，会衰变成另一种元素。

某个元素丰度较小的稳定同位素，其中子数比质子数多 1 或 2 个，因此比本元素常见稳定同位素重。稳定重同位素和轻同位素都自由参与化学反应以及生物学和地球化学过程，但是在物理或化学反应期间两种同位素的反应速率却不相等。稳定重同位素的化学键和原子间的吸引力大于这种元素的较常见且较轻的同位素。因此，重同位素反应速率小于轻同位素，从而引起在物理和生物学反应过程中的反应物和产物之间的同位素分离或分馏。轻重同位素的分馏是很重要的，因为 a)它导致生态系统中不同源库的稳定同位素比发生变化，b)他建立了一个同位素信号，可以反映元素循环中关键过程的存在方式或程度。

一个分子化合物的稳定同位素浓度用重同位素与轻同位素分子量之比来表示。由于这个比值很小，所以我们一般地用相对于一个国际标准的稳定同位素丰度来表达，标样可以从国际原子能机构 (IAEA) 和美国国家标准技术研究所 (NIST) 获得，标样的使用有利于提高测量精度，且便于各实验室之间的比较。

(3) 同位素记录生物对地球环境条件变化的响应。对于那种以一种不断增加的形式发展的物质和残留物来说，例如树轮，动物毛发，冰芯，其同位素比可用来记录系统对环境条件变化的响应或者作为对环境变化的一种间接记录。

(4) 同位素示踪关键元素和物质的来源以及运动。由于伴随着物理和生物学反应中的同位素分馏，在生态系统内以及不同生态系统间的营养和元素库的同位素比值通常是不同的。因而，利用同位素比就可以容易地示踪有机体获得的基本元素和资源的来源。同位素信号变化的强烈的地理分布模式为示踪从景观到大陆尺度上的物质或成分的运动和来源提供了手段。

本报告描述了这样一个模式：在构建于现有的区域能力基础上的一个集中网络内如何建立起一个与 NEON 相关的同位素分析、培训和教育活动。由于稳定同位素分析能探询人类活动的经济和社会影响，所以它们的应用可以把那些传统上学科相互分离的科学家整合在一起形成一个跨学科的合作，这既有利于“硬”科学发展，也对社会科学研究有帮助。这样的努力将会使很多学科受益，同时也提高了我们对人类持续生存关键问题的认识能力。

这里描述的在 NEON 内利用稳定同位素构建研究体系的模式，要求建立以下这些要素：

(1) 一个或多个协调设施，作为高水平技术培训和分析支持服务的骨干基础设施，帮助技术创新，推动质量保证/质量控制(QA/QC)过程的发展，以及标样的研制与发放；

(2) 由多种同位素质谱仪以及相关的外围设备组成的区域分析中心（全国联网），目的是实施与 NEON 相关的长期监测、教育以及科学研究的同位素分析；

(3) 一个有着空间地理分布的早期预警信号同位素网络(INEWS)，目的是通过同位素监测和分析，快速识别全国陆地、水域以及大气生态状况的变化以及与这些变化有关的潜在机制。

(4) 一个综合的、多学科的培训和教育项目，促进稳定同位素方法的创新和跨学科上的应用，并且确保那些建立在同位素信息上的政策和管理决策是通过一种受教育和被了解的方式制定的。

一个非集中化的管理和组织结构可能也会服务于既定目标并满足于 NEON 的某些要求。因此在本文中，我们在关键地方也包括了对我们提出的初始模式的不同替代方案。

二、为什么要发展同位素网络

NEON 活动将会探询当今社会面临的很多重要的生态学挑战。要想有效地探询这些挑战，需要有新技术，数据整合以及网络化的分析设备来促进多尺度，多学科的科学研究。无论是长期的监测还是作为探索从局地到大陆尺度生态模式的必要观测工具，同位素观测能够而且将会在这种大范围的科学研究中起重要的作用，原因是某种化合物或材料的同位素组成能提供很多额外的信息。所有的与 NEON 相关的同位素分析，培训以及教育不可能在单一的实验室设备下发生。目前，同位素分析在遍布美国的多区域进行，在全国范围的培训，标准化以及监测计划的驱动下，形成一个同位素生态学家网络。生态学家如何进行地球生态系统的研究并把他们运用到 NEON 概念中，这一过程正在发生广泛的变化，这种变化强调了在培训和标准化中需要立即建立全国性的同位素监测网络并协调工作，这将会远远超越单个科学家事业的时间框架，而且要求全国尺度的站点之间的整合。只有通过集中式的网络才能完成与 NEON 相关的同位素分析的特殊要求：

(1) 一个国家尺度的监测以及研究工作要求全国范围的实验室之间的校准，通用规范以及有关标样的发放。

(2) 长期监测和采样要求采用通用的方法和标准，只有通过一个协调的网络才能完成。

(3) 通过集中的短期课程来实施跨学科的研究生和博士后教学，这在网络背景下是可行的。

(4) 在网络内部进行集中管理，专门的技术培训能力才是最有效的。

三、同位素方法的核心与独特作用

同位素分析提供了关于生态和环境系统的结构，功能和动力学特征的各种交叉信息。正因如此，它们提供了迎接 21 世纪社会面临的生态学挑战所需要的独特信息。NEON 包含的 8 个主要的科学主题——生物多样性、水文生态学、生物地球化学循环、传染病、气候变化、生物入侵、土地利用以及正在出现的问题，都可以在某一水平上利用同位素观测来进行探讨。本报告的附件举例说明了同位素测量如

何探讨这些问题，给出了关于 NEON 每个科学主题的例子，阐明了同位素如何独特地探讨这些领域的观测挑战。

四、同位素网络的结构组成

一个多学科、多尺度的同位素生态网络正在形成。2004 年 9 月在犹他州的 Park 市以及 2004 年 12 月在加利福尼亚的旧金山，代表美国不同区域，生态学不同分支学科以及学院和政府实验室的 29 个同位素生态学者，聚集在一起讨论一个同位素生态学国家网络的形成。在国家层面上已经存在的同位素网络为发展更大，更多样化的 NEON 相关同位素生态网络提供了有用的指导。例如，生物圈-大气圈稳定同位素网络(BASIN)是一个由美国国家自然科学基金(NSF)资助的研究合作网络(RCN)，目的是巩固稳定同位素数据集，建立通用规范和方法，将站点网络化，并通过研讨会和论坛的形式来提供培训，这个网络最初关注的是了解陆地生态系统和大气之间的相互作用。BASIN 组织在 Park 市和旧金山市举办与 NEON 相关的同位素研讨会。参与者认识到：为了识别陆地，水域以及大气生态环境几十年的变化模式，NEON 将迫切需要建立长期的综合的同位素观测网络，而且其范围远远大于现有网络探讨的范围。本文综合了上述两个研讨会的建议和提出的信息。

协调设备和区域实验室。NEON 内同位素生态网络结构的一个方案包括建立一个或几个专门的协调设备，中心位于有共同边界的美国境内，这样可以与那些较小的 NEON 区域分析实验室保持紧密的工作联系。协调设备应该放置在有极好的飞机交通条件而且有较多高水平的技术人才，可以吸引并留住能构建、管理以及操作这些设备的技工。协调设备将具备标样发放，高水平的技术培训，QA/QC 过程，取样、存储、准备和分析过程以及高级技术支持等功能，而且还是开发新标样，技术和方法的创新中心。协调设备也可以承载大型或昂贵的，超出了区域中心能够操作的仪器范围的仪器。这些仪器可能是用于 ^{14}C 测量的加速质谱仪或次级离子质谱仪，这种次级离子质谱仪可以使 NEON 的科学家将来能够测量单个微生物细胞的同位素含量。

较小的 NEON 实验室应建在不同的 NEON 区域中，因为在采样点附近要求当地具备常规的分析能力。致力于 NEON 相关项目的科

学家要在尽可能短的周期内获取同位素的精确数据。从实践和经济的角度来看，满足 NEON 科研目标的最合理的方法是提高区域的能力，而不是将所有 NEON 相关的同位素分析集成到一个或几个协调设备。区域实验室将会进行大多数与 NEON 相关的科学、监测以及与技术培训相关的常规同位素分析。应该鼓励区域实验室参与甚至领导创新。协调设备可以帮助其进行革新。然而，非常专业的方法只有在协调设备下才能执行。

有别于个人实验室的设备。区域实验室应该区别于美国现有的政府，大学以及私人实验室。这个建议是基于几个客观事实。首先，单个研究者没有很大的动力去执行支持 NEON 相关活动所需要的额外的监督和管理。其次，政府中的单个成员以及研究带头人随时间而变化，而有持续的分析能力以及固定位置将更适合 NEON 的长期利益。专家意见已经表明在特定区域和机构内安置 NEON 区域实验室将有益于现有的实验室以及 NEON 相关的活动。需要激励 NEON 的区域组织参与一个特定组织或这个组织的研究团体。一个成功的 NEON 计划应该是科学团体实施“大宗买进”的计划。区域实验室应该置于对大尺度的调查研究有长期稳定科研兴趣包括长期监测的地方。

监测与研究的需要。为了满足全国尺度的长期生态学挑战所需要的科学和教育要求，NEON 将会建设基础设施。一个 NEON 相关的同位素网络应该服务于两个主要的科学需要：用于传统科学研究的分析支持，以及用于监测全国尺度环境和生态变化的取样和分析的基础设施。NEON 核心的协调设施以及区域实验室应该具备固有的能力可以满足监测、调查和创新的目标。同位素监测应该是 NEON 内大型监测计划的一部分。

作为培训的提供者和使用者的网络。对那些在 NEON 内进行样品采集和同位素分析的博士后研究人员、研究生和技术人员的培训，一个公共网络将会更好的实施这一培训。通过网络可以最有效地组织和管理关于样品采集、准备、存储和分析的技术方面的短期专业课程以及研讨会。在一个由不同专家组成或能组织不同专家的区域实验室，以及一个中心协调设备机构内，才能够实施这样的培训计划。在任一种情况中，这种自上而下的培训组织和活动是确保长期采样，分

析和数据解释的质量维持在最高水平的关键。

发展适合于研究生、博士后、全体教师以及 K-12 教师的转变型跨学科课程。同位素方法已经集合了传统上相互分离学科的科学家，例如，生物学、物理学以及社会学。由于对关键元素循环中的相互兴趣，以及同位素作为一种基础的和跨学科使用的工具，来自地球化学、动物学、植物生理学、水文学、地质学、大气科学、土壤科学、地理学以及地球系统科学等不同领域的科学家相互合作并横向研究这些生态与环境的关键问题。美国的很多大学都出现了关于同位素应用的跨学科课程，很多机构都面向全世界的学生开设了短期的特定同位素课程。生态学领域的重大挑战是大陆和全球尺度的，它要求传统生态学领域外的其他学科之间相互合作。同位素分析获得的综合信息为大尺度生态过程的转换和跨学科教育提供平台。

一个替代方案。一个替代上述集中式的组织结构，即 NEON 协调设施以及综合的 NEON 区域实验室的方案，是将现有的研究实验室(政府、大学或私人机构)加入到一个松散的网络，这个网络通过 NEON 来组织和增强。这种结构的优势在于：单个实验室团体在创新、发现以及动员探讨出现的问题等方面将维持完全的自主制度。通过国际原子能机构(IAEA)协调，全球性同位素监测网络为这个结构提供了极好的借鉴。

五、早期预警信号的同位素网络(INEWS)

同位素分析能够综合，指示，记录并示踪生态过程，这在 NEON 内发展一个全国尺度的监测网络进而探测基础层次上的生态变化提供了无与伦比的机会。我们建议在 NEON 内建立早期预警信号的同位素网络(INEWS)，用来监测陆地，水域以及大气环境参数的同位素。在这个框架内的同位素监测能够超越生态学上所有的挑战区域。这种监测网络对国家的潜在好处是巨大的，而且可以匹敌源于土地覆盖变化卫星遥感所带来的利益。对关键性的陆地、水体和大气环境参数的频繁采样和同位素分析能够被用来识别与重要生态过程变化有关的系统异常行为。人的心率、血压和体温可以反映人体潜在的疾病发生，然后可以对这种潜在异常进行更加详细的检查。同理，同位素观测可以监测并反映全国生态支撑体系中尺度生态环境状况。这种监测将

作为生态变化的早期警告,这些生态变化然后需要更复杂缜密的方法来详细研究。

目前我们还没有足够多的长期的环境参数同位素数据集,因此不能利用同位素监测来解释潜在的生态变化。然而,有几个同位素监测网络的重要例子,现在正在产生关于大尺度过程的重要认识。国际原子能机构正在发起建立降水同位素的全球网络(GNIP)。GNIP正在测量自1961年以来世界各地降水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 。这些数据用于水文学,海洋学,水文气象学以及生态学领域以及与全球水循环和气候变化有关的调查研究中。生物圈—大气圈稳定同位素网络(BASIN)是另一个例子。BASIN仅仅在1995年才开始运作,但是已经在从生态系统、区域到全球尺度的碳、水循环过程的认识,以及碳水循环从季节到年际波动特征认识上,产生了大量的新认识。其他的独立研究人员也正在监测环境内的同位素组成。例如,从1996年以来,T. Coplen(USGS)开始监测USGS的40个大河NASQAN站点中河水的 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^2\text{H}$, C. Kendall(USGS)正在监测这些河水中微粒有机质的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 。去年,Kendall也一直在监测这些站点中硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 。在NEON项目中应该加强和协调这些活动。

美国的很多BASIN采样点也是美国通量的站点。美国的GNIP站点是国家大气沉降计划(NADP)的采样点。NEON相关的同位素监测网络的建立和运转为在样品储存和存档,采样和分析方法的发展,数据材料整理和解释以及设备的维护方面提出了独特的挑战。应该通过NEON在国家水平上协调和推动以下这些活动:

(1) 全国陆地生态系统的一个早期预警监测网络。

植被和土壤的同位素组成记录那些影响植物新陈代谢和重要营养物质的生物地球化学循环的胁迫因子的综合影响。植物和土壤 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值可以识别与生态系统水,碳以及营养物质交换有关的基本过程的扰动。在这种监测框架内收集和分析叶片和土壤样是很容易的。在贯穿景观中的代表性地段频繁采样并分析植物叶片和土壤的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$,将会形成指示生态变化的极有用的数据库。采样应该选择那些具有较高社会经济和生态价值的生态系统以及对环境和生态变化非常敏感的生态系统。在这个监测计划中,群落交错区域,城市

—荒地，农业—荒地以及河滨区域可能是尤其重要的采样点。

专栏 2

每种同位素提供了什么信息？

(1) $\delta^{13}\text{C}$ ——叶片内外 CO_2 浓度的比值(C_i/C_a)反映了植物胁迫和植物水分利用效率的综合测量结果。光合作途径不同的植物如 C_3 (大部分植物) C_4 (一些谷物和牧草种)，它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 也不同，这为土地利用变化和历史提供了极好的示踪剂。

(2) $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ ——水文和气候过程的指示剂。这些同位素在水文过程中发生可预测的转变，这样就可以示踪水源和地理起源，气候的重建以及计算能量平衡和蒸发。

(3) $\delta^{15}\text{N}$ ——营养源的指示剂，也是土壤，植物和水体氮转化以及循环的示踪剂。

(4) $\delta^{34}\text{S}$ ——是水域和陆地食物链研究的重要示踪剂，在识别大气和水生环境中有机和无机污染物的来源和处理方面也非常重要。

(5) $\Delta^{14}\text{C}$ ——是有机物年龄的独特示踪剂，而仅有稳定同位素是不能鉴别有机质年龄的。放射性碳可以用来估算生态系统碳库的年龄以及周转时间，因此可以示踪碳循环的速率变化以及碳底物的来源。它也是化石燃料碳是否存在的极好指示剂，即化石燃料中的放射性碳全部衰变并消失，与当代大气 CO_2 中放射性碳可测量的数量正好相反。

(6) $\text{O}_2/\text{Ar}, \text{O}_2/\text{N}_2$ ——许多元素比提供生态过程对生物地球化学循环贡献的重要信息。这些本质上并不是同位素比值，但是常常使用相似的方法和仪器进行测量。

(2) 全国水域生态系统以及流域的一个早期预警监测网络。

河流中溶解的有机和无机物的同位素组成综合和指示了流域尺度的生态过程和生态条件。在 USGS 的国家水质评估计划(NAWQA)中已经存在河流监测站点的分布式网络。一个对全美所有河流实施的，广泛分布的，国家尺度的河流同位素监测网络将会对全国流域生态条件发生的重要潜在变化发出预警。关键性的测量包括：水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ，溶解有机物和颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{34}\text{S}$ ，溶解无机碳的 $\delta^{13}\text{C}$ ，溶解氧的 $\delta^{18}\text{O}$ ， O_2/Ar 比，硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以及铵的 $\delta^{15}\text{N}$ 。

(3) 全国大气库的一个早期预警监测网络。

大气成分的同位素浓度综合了生物圈通量源，并且也指示一个大区域内的碳，水以及营养交换过程的变化。目前正在通过 BASIN 在

全国有限站点收集 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ，但是这个同位素监测网络目前还没有监测其他大气成分，而且也没有设置在所有生态重要位置包括城市和农业用地。为监测全国大气库以及景观尺度的生态状况，以下大气化合物需要得到监测： CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ，水汽的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ，颗粒有机物的 $\delta^{13}\text{C}$ ， N_2O 的 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ ，甲烷的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^2\text{H}$ 以及 O_2/N_2 比。与陆地和水域系统的采样原理相同，大气取样和监测应该在美国不同的生态区域上进行，尤其应该关注对生态变化可能很敏感的系统。为了详细调查应该着重关注城市的大气库，农业用地以及含有荒地系统的过度区域。这个取样应该与 AmeriFlux，NOAA，CMDL(Cooperative Air Sampling Network)，NADP 有关的现有的大气监测网络相互协调。

六、数据质量控制与标准化

考虑到 NEON 相关的同位素网络的范围和复杂性，按照一组系统综合的操作步骤、同位素标准、相互符合并可行的 QA/QC 计划来组织网络中的每个区域，这对于 NEON 的成功是很重要的。很多野外实验常常由时空目标有限的单个位置的测量组成。这些计划的本质并不需要研究人员去着重研究准确度、精确度以及实验室间的校正问题，尽管这些问题本应该是谨慎对待或有用的。然而，当由多个实验室的很多不同测量值组成的大型数据集出现时，其结果是没有意义的，除非同位素数据是由类似的取样准备，类似的质谱仪操作，相同的数据处理而产生的，而且要受实验室使用标样的控制，将初始参考材料在常规基础上加以校准。

发展能满足相互比较和长期质量保证的必须的高标准的实验室网络，其关键要素是：

(1) 发展关于样品收集，样品储存，样品准备以及同位素分析的工作方法库。

(2) 针对每个分析，促进 QA/QC 过程的发展；设计一个数据发布系统，用以有效地编译并报告来源于各区域实验室的结果。

(3) 为各区域实验室生产、分配以及维护一套适合所有核心的 NEON 同位素测量的一系列 NEON 标准参考物(例如，气体样，碳酸盐样，有机物样，水样)。

(4) 等分同一样品并在所有的区域实验室进行分析，促进实验室之间样品的相互比较。

(5) 参考物在不同实验室之间循环流通，对其进行一系列的校准，既有利于中间标样的生产，也有助于检验实验室间的相互比较。

(6) 与美国国家标准技术研究所(NIST)以及国际原子能机构(IAEA)合作，开发新的标样，包括碳酸盐和大气中的 CO₂，以及适合 NEON 核心同位素测量的其他物质。

(7) 开发并维护一个可以获取和分析的数据库系统。

(8) 确保实验室之间交换新观点、创新、解决问题的方法等方面的沟通能一直进行。

实施上述多目标的框架，最好能通过协调设施和区域实验室之间的合作来实现。另外，需要国内参与的科研小组一致认可的意见来发展 QA/QC 框架。协调设施应该是一个明显的地方，在那里要能产生提议测量的同位素质量控制必需的 NEON 标准。这些地方也适合发展和维护数据协调系统。努力的关键将是各种综合规范和来自于其他大尺度测量网络的经验教训。例如，全球碳同位素学界已经进行某些实践，帮助解决一些与尺度的一致性和数据集相互比较有关的问题，包括那些连接不同实验室的基于网络的数据管理软件和关于频繁采样相互比较项目的报告。

这种活动的基本组织可能包括在管理结构上自上而下或者自下而上的组织结构。尽管如此，这些组织结构之间的平衡应该引导数据在大陆尺度上的无缝整合，而不会牺牲在局地尺度上的参与、创新，灵活性以及创造性调查。

七、仪器与设备配置

本文描述了支持基础性研究、监测和培训所需要的 NEON 相关的稳定同位素监测网络。我们建议网络应该有很多由一个或几个协调设施促进的区域实验室。协调设施将会促进培训，QA/QC 发展，标样的开发和发放，监测网络，分析服务以及在一定程度上聚焦于创新。建立协调设施以及所有的区域实验室都需要相当多的资源以确保给它们进行必要的装备，目的是为了应对 NEON 相关的研究和教育挑战。以本文列出的方案为基础，我们估计了创办 NEON 相关的稳定

同位素网络的成本。

(1) 协调设施或装置。需要一个(约 10 万美元)启动资金来获得, 检验, 校准以及存储标样确保实验室间比较和数据质量。校正进而监测标样需要 6 个同位素比质谱仪(约 108 万美元); 发展、常规性升级并修改采样和测量规范; 为区域实验室的技术员提供培训和支持; 并满足特定分析的需求。

(2) 区域设施。我国陆地, 水域以及大气环境的早期预警信号的同位素网络(INEWS), NEON 相关的研究, 以及为了教育而使用设备, 都要求建立重要的区域分析能力。我们估计成本的基础是, 假设监测和研究各占 45% 的区域能力, 其余 10% 则致力于教育和培训。每台仪器每年共能分析 12,000 个样品(未知的和标样)。假设这些样品的 45% 是为了 INEWS, 那么大概每个区域需要 4 台质谱仪。

(3) 人力资本和持续性投资。需要高水平的技术员来操作、管理协调设施以及区域的实验室装置。一个技术员能够操作并维护 4 台带有外围设备的质谱仪。这种安排也有时间来满足关于支持 NEON 研究员、数据分析、当地培训等的其他需求。以这个比值为基础, 协调设施将需要 2 个高水平的质谱仪技术员。每个区域需要一个质谱仪技术员。

NEON 计划是一个 30 年的项目。监测技术会进步, 而原先的设备会由于磨损而丧失性能。我们强烈建议 NEON 保持财政能力, 至少每十年进行一次设备更新。

附件:

同位素技术在生态系统观测与研究中的应用实例

1、物种入侵以及生物多样性变化的烙印

生态学家如今认识到生物多样性和生态系统功能之间的重要联系以及物种入侵破坏这种联系稳定性的影响。下面列举了3个例子,强调了稳定同位素分析如何用来理解生态系统内生物多样性的重要性以及物种入侵在生态系统动力和功能中起的作用。

实例1: 同位素指示温带松树林的植物生活型多样性的功能贡献。植物功能型的多样性在生态系统模型和尺度扩展中是一个有用的参数。通常假设功能属性与优势植物种生活型的差异有关。Brooks et al.(1997)显示了如何利用叶片的 $\delta^{13}\text{C}$ 来量化北方森林生态系统不同植物生活型之中的功能多样性。基于叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值,这些森林生态系统中的不同生活型显示了明显的聚类。C3植物叶片 $\delta^{13}\text{C}$ 值与气孔“开度”有关——这是一种叶绿体光合需求以及通过叶片气孔的 CO_2 供给之间的平衡。在 Brook et al.(2000)研究中,北部生态系统中落叶树的气孔“开度”相对于常绿树种来说,其“开度”要更大(通过气孔的 CO_2 供给大于叶绿体的需求)。这种同位素研究在一个容易测量的群体结构多样性指标和与叶片光合作用有关的重要功能特点之间建立了一个关键的联系。

实例2: 通过结合土壤过程,同位素可以指示入侵雀麦属草对美国西部半干旱生态系统的影响。外来种的入侵是全球变化的最重要代表性事件之一。外来植物的引入可能会通过改变植物生长可利用的氮,即改变枯枝落叶的质量, N_2 的固定速率或氮循环和损失速率,进而使生态系统的稳定性降低。已经确定了北美最重要的植物入侵之一,即 Intermountain West 干旱地区 *Bromus tectorum* 的传播。土壤

$\delta^{15}\text{N}$ 与 $\ln(\text{土壤含氮量})$ 之间的瑞利关系表征了入侵对土壤氮的影响。在科罗拉多州高原上,分别对非入侵,最近入侵(5年),以及历史上入侵(大于30年)站点上进行了测量(图1)。入侵站点的 $\delta^{15}\text{N}$ 总是较高,表明氮的损失大于新输入的量(Evans and Ehleringer,1993;Evans and Belnap,1999)。此外,每种入侵机制的瑞利关系都是线性的,这样就可以用作入侵对土壤氮动力学影响的综合“计时器”,还可以作为生态系统入侵后健康状态的指示工具。

2、量化水文生态输入源的变化

维持人类健康和幸福的最重要的资源是淡水。理解干旱和人类利用以及淡水资源的变化对生态系统的影响是生态学和水文学界的一个重要挑战。同位素为致

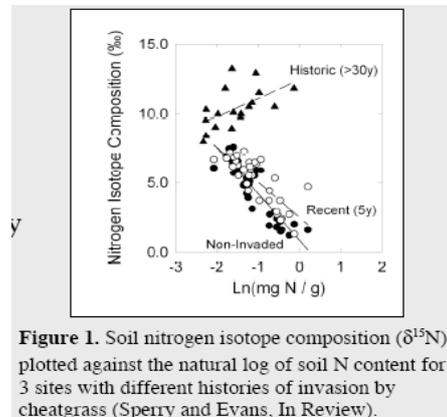


Figure 1. Soil nitrogen isotope composition ($\delta^{15}\text{N}$) plotted against the natural log of soil N content for 3 sites with different histories of invasion by cheatgrass (Sperry and Evans. In Review).

力于了解水的来源，排放以及循环的研究提供了极好的示踪剂。

实例 3: 同位素示踪一个敏感沙漠河滨生态系统中树利用的水源。美国西南边的河滨生态系统极大的受河流转向，干旱以及地下水抽取的影响。

假设河滨环境中的树主要是通过深根吸收地下水来维持生存。亚利桑那州东南边的圣彼得河上，其河滨树吸收的水的氢氧同位素比值表明季风雨的输入是树木生长季期间重要的蒸腾水源 (Sydner and Williams,2000)，但是这主要取决于地下水的深度以及树种(图 2)。我们对依赖地下水系统的植物—水分相互作用的了解,对采用一个生态持续发展的模式来制定为不断增加的人口提供淡水的策略规划是很必要的。

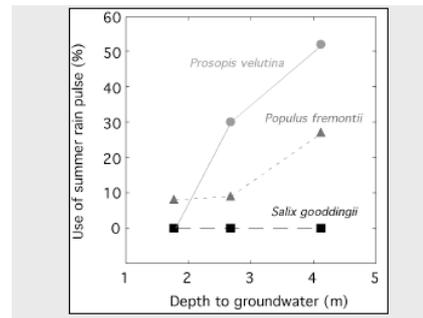


Figure 2. Uptake of growing season rainfall by three riparian tree species determined from the stable isotope ratio values of plant xylem water. Redrawn from Snyder and Williams (2000).

3、分割来源并揭示生物地球化学循环过程

同位素分析对生态学最大的贡献可能是它对陆地，水体以及大气的生物地球化学循环和过程的研究。同位素分析是研究生态系统碳和氮循环的基本方法，而且对我们了解痕量元素循环起着重要的作用。

实例 4: 同位素综合河流的硝酸盐来源并指示硝化反应在硝酸盐流失中的重要性。Mayer et al.(2002)关于美国东北 16 个流域的一个比较研究,显示了河流硝酸盐的 $\delta^{15}\text{N}$ 如何阐明这个营养物质的来源和转变。在森林覆盖的流域中其河流的硝酸盐浓度以及 $\delta^{15}\text{N}$ 值最低,然而拥有大量城市和农业土地的流域其 $\delta^{15}\text{N}$ 和硝酸盐浓度都比较高(图 3)。源于城市废水和农业施肥的硝酸盐对后者流域中河流的硝酸盐贡献极大。然而,仅有 $\delta^{15}\text{N}$ 还不足以将陆地污染物和土壤硝化反应从大气硝酸盐沉淀源到流域泄流中区分出来。但是将 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 结合起来就可以区分这些来源了(Mayer et al.2002)。

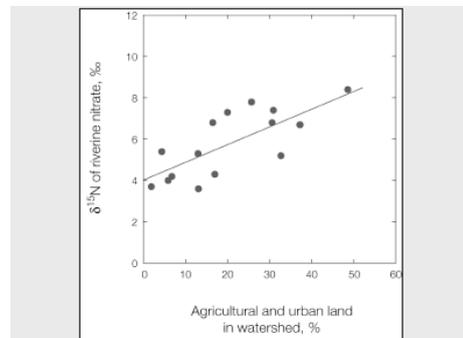


Figure 3. Mean nitrogen isotope ratio of nitrate in rivers draining 16 watersheds in the mid-Atlantic and New England states, USA plotted against percent agricultural plus urban land within each watershed. Redrawn from data in Mayer et al. 2002.

实例 5: 同位素指示鲑鱼产卵将海洋的氮输入到陆地生态系统中。太平洋的鲑鱼从海洋中携带大量的氮到它们繁殖的陆地生态系统中。用氮的稳定同位素组成($\delta^{15}\text{N}$)可以量化源于海洋输入陆地生态系统以及陆地植被的氮施肥作用的氮通量。例如, Helfield and Naiman(2001)研究阿拉斯加州东南边的树形仙人掌植物种叶片的 $\delta^{15}\text{N}$, 目的是为了确定在河流剖面有和没有产卵鲑鱼的两种情况下, 源于

鲑鱼的氮对植被营养的贡献比例。海洋氮的稳定重同位素远远比陆地氮富集(^{15}N)。Helfield 和 Naiman(2001)收集的鲑鱼,其 $\delta^{15}\text{N}$ 的平均值是 13.4‰,然而无产卵鲑鱼的参考区域,其河滨植物的叶片的 $\delta^{15}\text{N}$ 范围-3.3 到-0.9‰。Helfield 和 Naiman(2001)研究的 4 个植物种中的 3 个,在鲑鱼产卵区域其树叶 $\delta^{15}\text{N}$ 远远大于参考区域(图 4),表明有大量的海洋氮输入。

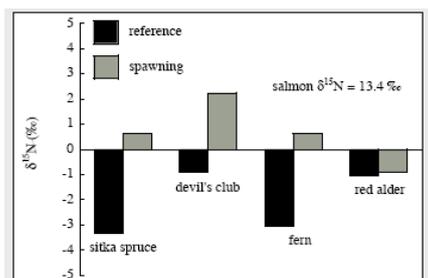


Figure 4. Foliar nitrogen isotope values for four riparian plant species collected from a salmon spawning area and from a reference area blocked from salmon access (redrawn from data in Helfield and Naiman 2001)

基于一个简单的混合关系, Helfield 和 Naiman(2001)计算得到: 鲑鱼产卵区域的植物中 22 到 24% 的氮来源于鲑鱼从海洋携带的氮。

4、识别传染病以及病菌介质的地理起源

利用同位素分析可以探知生态学至少 2 个重要的方面以及传染病的传播。环境中出现的同位素信号有一个系统性的地理变化。因为在动物的皮毛, 骨头, 羽毛等部位的同位素记录了它们的食物以及水的来源, 所以每个迁徙动物都携带了一种同位素标签可以确定景观内动物的活动。这样的信息对模拟种群生态学、病菌介质的迁徙行为以及了解传染病的传播是很有用的。利用同位素可以识别病菌孢子的地理起源。

实例 6: 同位素示踪与鸟类疾病地理起源有关的鸟迁徙模式。要了解禽类疾病如何获得并传播, 需要通过鸟的个体来识别迁移的空间模式。例如, Smith et al.(2004)介绍了如何利用尖胫骨鹰羽毛中的氢同位素比($\delta^2\text{H}$)示踪逗留在新墨西哥进行孵化的个体的迁徙路径, 由于折磨这种鹰的鸟血液疾病的分布状况是已知的, 示踪其迁徙路径就能了解这种鸟类的疾病来源。鹰羽毛中的 $\delta^2\text{H}$ 反映了当地降水的 $\delta^2\text{H}$ 值, 后者沿纬度梯度的变化是可以预测的, 因此仅仅只有起源于北美西南的尖胫骨鹰中含有一种血液寄生生物, *Haemoproteus janovyi*。

实例 7: 同位素能示踪微生物孢子的地理起源。因为北美大陆的降水同位素组成($\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$)以可预测的方式变化, 所以生物体携带了地理起源地的同位素“指纹”。微生物孢子也不例外。Kreuzer-Martin et al.(2003)证明培养介质水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 以精确的预测方式融入杆状细菌的孢子生物量中(图 5)。一个同位素分馏模型在 95% 的置信区间内预测了来源于美国 5 个区域的培养介质水的 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。

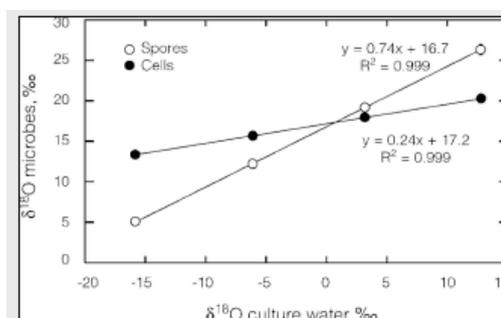


Figure 5. Relationships between the $\delta^{18}\text{O}$ value of microbial biomass and that of the water present in culture media (from Kreuzer-Martin et al. 2003).

5、评价区域气候变化和气候周期的影响

很多动物和植物的组织记录了气候变化的生理学响应。树轮是植物界最好的例子，但是鲸鱼的鲸须，绝大多数动物的皮毛，牙釉质，爪子，指甲以及触角中也记录着这样的信息。

实例 8：在树轮中同位素记录气候变化的影响。除了因为植物年生长差异导致树轮宽度变化记录的极好信息外，每个树轮纤维素的 $\delta^{13}\text{C}$ 还记录与气候年波动有关的植物生理情况。光合作用期间叶片内部和环境 CO_2 浓度比(C_i/C_a)的变化引起 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化，图 6 显示了由松木和冷杉木树轮中提取的纤维素 $\delta^{13}\text{C}$ 计算得到的 C_i/C_a 年波动与 Bryce Canyon National Park, UT 年降水的波动极其相近 (Ehleringer and Verville, unpublished)。这样的信息允许研究者定量研究气候变化导致的植被的生理学响应的年际变化。

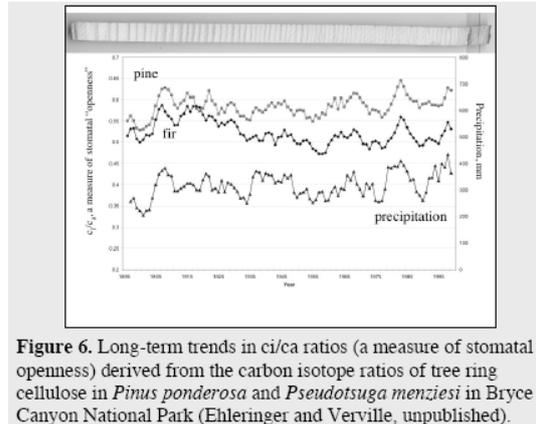


Figure 6. Long-term trends in c_i/c_a ratios (a measure of stomatal openness) derived from the carbon isotope ratios of tree ring cellulose in *Pinus ponderosa* and *Pseudotsuga menziesii* in Bryce Canyon National Park (Ehleringer and Verville, unpublished).

6、量化土地利用变化对生态过程的影响

土地利用和土地覆盖变化与其他全球变化因子相互作用，而且对陆地，水域以及大气生态过程产生影响。同位素比的测量对量化从区域到全球尺度上的土地利用变化的影响是很有用的。

实例 9：同位素示踪城市生态系统污染物的来源。稳定同位素比的分析证明对了解城市背景下大气污染物的来源是很有用的。Pataki et al.(2003)证明 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分析可用于确定盐湖城大气库中 CO_2 混合比的季节变化以及来源。因为汽油燃烧，天然气燃烧以及植物和土壤呼吸产生的 CO_2 各有独特的同位素信号，所以可以区分上述来源对大气库 CO_2 混合比的贡献(图 7)。这个城市区域中空气 CO_2 中很大一部分的贡献来自于生物呼吸。

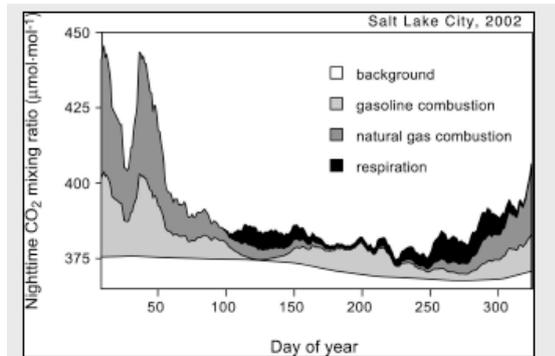


Figure 7. Contribution of different anthropogenic and natural sources of CO_2 to the Salt Lake City airshed during 2002. Figure from Pataki et al. (2003).

实例 10：同位素指示输入干旱生态系统中的主要氮源并综合了土地覆盖变化对土壤氮动力的影响。这对于理解生态系统对全球变化的潜在响应至关重要。大气沉淀或生物固氮都有氮输入的产生。在很多干旱地区，氮的主要输入源是生物学土壤结皮；它们是由可固氮的蓝细菌和青苔控制。在初始植物种群中，土壤

结皮形成了连续的覆盖，而且空间的覆盖范围常常大于脉管植物群。干旱生态系统中表面干扰比较普遍并导致生物学土壤结皮减少。因此鉴别氮输入是否是由物理(大气沉淀)或生物(固氮)过程控制，对确定生态系统氮循环中表面干扰的潜在影响是很重要的。Evans and Ehleringer(1993)利用瑞利关系来评估科罗拉多州高原的松柏林中物理和生物过程的相对贡献。利用土壤的值建立了土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 和 $\ln(\text{土壤含氮量})$ 之间的线性预测关系(图 8)。表明氮的主要输入源

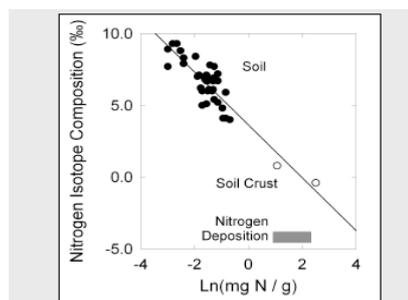


Figure 8. Relationship between soil $\delta^{15}\text{N}$ and $\ln(\text{soil nitrogen content})$ in soils and in two potential sources of N in a cold desert ecosystem in southern Utah.

是生物固氮，而且土地利用的变化可能会通过除去这种源进而改变氮输入和损失之间的平衡。Evans and Belnap(1999)已经证实了这点，他们观测到受干扰站点相对于未受干扰的站点而言，其土壤含氮量较低而土壤 $\delta^{15}\text{N}$ 较高。

7、探询生态学正在出现的议题

因为 NEON 将是一个长期的、大陆尺度的项目，所以它将会以固有的灵活性来探讨生态学中正在出现的具有国家意义的问题。同位素分析可能会在确认上述问题以及研究其原因和影响中起着重要的作用。原因是同位素比可以综合，指示，记录，示踪生态学基本过程，而且可以在传统上完全不同的学科之间架起桥梁。环境同位素的长期和空间分布监测(下面将描述)将会以一种目前还没有实现的方式阐明变化的模式。这种长期的，大尺度的数据集将专注于那些正在出现的、需要引起国家注意的议题和机遇。这样的议题可能包括沙漠化和城市化的影响，大气尘埃和其他气溶胶的来源以及影响，反应性痕量气体的复杂化学性质和传输过程，陆地和水生生态系统中有毒重金属的生物地球化学性质，以及与国家安全有关的生态学习题。

探讨这些生态学中正在出现的议题的一个关键要求是建立未来科学问题和应用需要的新技术和新方法发展的创新能力。

8、“固体源”的同位素测量在生态学中的重要性

到目前为止，我们已经强调了同位素应用于一些重要的轻同位素 H, C, N, O, S, 而这些元素一般用“气体源”的同位素质谱仪进行分析。分析生态学上其他一些重要的示踪元素需要使用热电离子的质谱仪。锶(Sr)可能是生态学研究中最有用的固体源同位素，主要应用于气候变化的研究(例如，长期和短期的森林干扰)，植物 Ca 的生物地球化学循环，河流中碱性钙的来源以及确定景观和陆地

尺度上动植物组织的起源地。硼(B)用于确定海水侵入地下水的量以及示踪水中来自人类 vs 动物 vs 自然污染物的来源。锂(Li)有时候也用于这些研究中。

9、放射性碳同位素测量在生态学中的重要性

放射性碳比较稀少，C的放射性同位素产生于平流层中宇宙射线的作用，随后氧化成二氧化碳并进入海洋和陆地上的地球碳循环中。放射性碳最后自发地衰变成半衰期是5730年的 ^{14}N 。生成和衰变之间的这种平衡使大气中 ^{14}C 的自然丰度在1950年之前仅仅是万亿分之一(10⁻¹²)。然而，1950年之后地上核武器试验使大气中生成了其他的放射性碳。1964年前后核武器试验处于高峰期， ^{14}C 浓度接近原来的两倍，如今由于核试验的禁止， ^{14}C 浓度也在减小。总之，放射性碳衰变和源于核武器试验的脉冲标记能提供在不同时间尺度下生物圈中C周转率的独特信息，而用稳定同位素则不能得到这些信息。

加速质谱仪(AMS)技术在过去几十年的发展，使得它可能高精度地分析少量的有机物和CO₂。然而，成本过高限制了AMS的普及，美国只有一些大的实验室用AMS来分析样品。调查生态学过程要求相对较多的样品，目的是描述大的空间尺度以及解决影响较小尺度上碳循环过程的异质性。最近，较低能量AMS的发展使较低成本的 $\Delta^{14}\text{C}$ 测量成为可能。这种技术的出现将会深刻地影响到 $\Delta^{14}\text{C}$ 在C循环研究中的应用。如今这种技术的传播需要有集中化的设备，还要有精通采样、准备样品以及解释 $\Delta^{14}\text{C}$ 数据的受过教育且数目逐渐增加的使用者群。

报告翻译：张 娜

报告审阅：袁国富

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)

- 2月1日 第2期 **CERN在地球系统科学中的作用与发展思路**
傅伯杰(中国科学院)
- 3月20日 第3期 **美国土地休耕计划**
中国生态系统研究网络综合研究中心
- 4月15日 第4期 **澳大利亚自然遗产信托基金**
中国生态系统研究网络综合研究中心
- 9月10日 第5期 **中国流域综合管理战略研究**
流域综合管理核心专家组
- 10月20日 第6期 **国际长期生态学研讨会的总结及其对CERN发展的启示**
赵士洞、于贵瑞、于秀波(中国生态系统研究网络)
- 11月16日 第7期 **美国长期生态研究的新方向**
G. Philip Robertson(美国长期生态学研究网络主席、密歇根州立大学教授)
- 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

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

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
网 页: http://www.cern.ac.cn

编辑部: 于贵瑞、欧阳竹、于秀波(常务)