

中国科学院学部 科学与技术前沿论坛简报 第 83 次

学部工作局学术与文化处
《中国科学》杂志社 编报

2019 年 2 月 18 日

“生态系统生态学”科学与技术前沿论坛综述

一、背景

生态系统生态学（Ecosystem ecology）是研究生态系统中生物和非生物因素及其相互关系的生态学分支学科，它在整个生态学科体系中占有十分重要的位置。生态系统生态学不仅研究生态系统的自然属性，也强调人文社会因素的作用。因此，生态系统生态学不仅是一门自然科学属性很强的学科分支，也成为支撑人类社会可持续发展的重要理论基础。

生态系统的概念提出于 1936 年，并得到了快速发展，特别是 20 世纪 50、60 年代关于生态系统物质循环和能量流动的研究将生态系统研究推向了新的高度，生态系统生态学也随之成为一门成熟的分支学科。之后，在国际生物学计划（IBP，1965~1974）、“国际地圈生物圈计划”（IGBP，1986~2015）及其后续的研究计划（又称“后 IGPB”）等推动下，生态系统生态学研究得到了空前的进步。我国的生态系统研究自 20 世纪 80 年代初改革开放后得到了快速发展，由 80 年代的起步与跟踪、90 年代的追赶，到目前在部分领域已接近或达到国际先进

水平，特别在陆地碳循环、生态系统服务、生态系统恢复与管理等方面的研究独具特色，成果显著。近年来，党的“十八大”提出“生态文明建设”五位一体的战略布局，党的“十九大”提出“建设美丽中国”新理念，为我国生态学的发展提供了巨大的动力。我国的生态学研究，特别是生态系统的研究已经进入了发展的快车道。

为了进一步推动我国“生态系统生态学”学科发展，研讨生态系统生态学未来发展趋势及其在生态文明建设实践中的应用，由北京大学主持，联合中国科学院植物研究所、地理科学与资源研究所、动物研究所以及清华大学、复旦大学等国内优势单位，同时邀请海外著名生态学家参与，于2017年启动了“生态系统生态学发展战略研究”项目。项目围绕8个生态系统生态学的核心问题，就其国内外研究现状、发展历史和主要国家的研究布局开展了系统性调研，并就未来的发展趋势进行了综合分析和评估。

本次论坛以“生态系统生态学”为主题，希望借助中国科学院学部平台的学术影响力和组织号召力，充分听取专家学者的学术观点，对目前生态系统生态学的发展现状进行深入讨论，对学科发展路径进行全面梳理，提出我国生态系统生态学的学科发展战略，为我国未来10~20年相关学科的发展和重要方向的凝练提供咨询和参考。

二、论坛概况

2018年10月22日，“生态系统生态学”科学与技术前沿论坛在中国科学院学术会堂举行。北京大学教授、中国科学院植物研究所学术所长方精云院士、中国科学院植物研究所黄耀研究员和中国科学院地理科学与资源研究所于贵瑞研究员共同担任论坛主席。来自北京师范大学、复旦大学、武汉大学、厦门大学、中山大学、东北师范大学、华东师范大学、北京大学以及中国科学院动物研究所、地理科学与资源研究所、生态环境研究中心、南京土壤研究所、植物研究所等23个单位的60余名专家学者和50余名研究生参加了论坛。

本次论坛由中国科学院学部主办，中国科学院生命科学和医学学部、学部学术与出版工作委员会共同承办，中国科学院植物研究所、北京大学、《中国科学》杂志社协办。论坛的学术报告以视频资料的方式得以保存。

三、论坛重点关注的问题

本次论坛汇集了我生态学研究领域的一批优秀学者，分别从生态系统生态学的学科定位及其发展趋势、生态系统组成结构、物质循环和能量流动、生物多样性与生态系统功能、全球变化和人类活动对生态系统的影响、生态系统恢复和管理与可持续发展等方面进行了系统总结，并对生态系统生态学研究的新技术、新方法以及联网实验平台等进行了详细介绍。这些报告高度凝练了生态系统生态学领域的前沿科学问题，充分促进了“生态系统生态学”发展战略研究的系统深入开展。

四、报告内容

（一）方精云院士：生态系统生态学的学科定位及其发展趋势

生态系统是在一定时间和空间范围内，由生物群落与非生物环境构成的具有特定组成、结构和功能的，其生物组分及其与环境之间相互作用、相互依存的动态复合体。生态系统生态学是研究生生态系统的组成要素、结构与功能、变化与演替，以及人为影响与调控机制的生态学分支学科，个体、种群和群落生态学是其发展的基石。同时，生态系统生态学是生物学、地球科学和环境科学的交叉学科，涉及到进化生物学、遗传学、动植物与微生物学以及气候学等多个学科。

报告回顾了生态系统生态学相关重要概念、理论的形成及发展趋势，简述了目前国内外生态系统生态学研究存在的问题及面临的挑战，并指出了未来发展方向。生态系统生态学研究未来需在以下几方面取得突破：（1）生态系统各营养级之间的互作网络关系。将生态系统作

为一个整体，研究生产者、消费者、分解者之间的互作网络关系；(2) 物种多样性形成与维持机制。发展出统一的生物多样性维持机制理论，评价不同尺度过程的相对重要性，对物种多样性维持、物种的多度与分布、物种多样性大尺度格局等科学问题给出明确的答案；(3) 地下生态学过程与交互作用机制。将生物多样性与生态学动态分析结合起来，探讨不同类群的微生物如何与生态系统物质循环过程紧密相关；(4) 碳-氮-水循环耦合过程及区域格局。采用微观与宏观技术相结合，野外长期定位观测与生态系统模型模拟、多源遥感数据相结合的研究方法，开展碳-氮-水循环耦合研究，并深化研究生物学过程机理；(5) 生态系统对极端事件的响应。利用长期观测、控制实验、模型模拟等手段，研究生态系统关键生态学过程对极端气候事件的响应，揭示生态系统在极端事件干扰后的恢复过程与机制；(6) 生态系统时空格局及机理集成分析。通过对我国和全球长期气候和生态数据的整合分析，研究我国典型生态系统的结构与功能对环境变化的响应和适应机理，揭示不同时空尺度环境因子对生态系统关键过程的控制机制。

(二) 刘玲莉研究员：生态系统的组成、结构与变化

生态系统有其形态结构，如种群的空间格局、群落的垂直和水平结构等；生态系统中生产者、消费者和分解者间通过取食和被取食的关系网络，发生密切的物质循环和能量流动，形成营养结构。同时，生态系统也是一个动态变化的系统，存在短期、周期性的变化（如季节节律），中长期的动态（如生境演替），以及在地质时间尺度上生态系统无机环境与生物的演化。生态系统的组成、结构与变化的研究是生态系统生态学的基础。近 30 年间在三个方向上取得了重要进展：(1) 营养级研究：过去多关注单一营养级或者相邻营养级的关系，近年来对多营养级的研究成为重点，并拓展到地上-地下关系、间接关系等方面；对营养级的控制效应的量化研究取得较大进展，对营养级控制效应的性质（正相互作用、负相互作用、top-down、bottom-up）以及作

用的强度进一步深入；(2) 食物网研究：利用同位素、DNA barcoding 等实验手段，结合模型研究，食物网结构分析、食物网构建的进化和生态调控机制、种间关系对生态功能的影响、食物网与稳定性的关系等方面取得了较大的进展；(3) 干扰对营养级和食物网的影响：在全球变化的背景下，进一步探讨了由于气候变化、过度捕猎、栖息地丧失引起的营养级错位、关键种丧失、物种入侵等对食物网结构的影响。报告总结了现有的研究成果，并对前沿方向提出了以下三条展望：第一，推进种间关系的研究，尤其是种间关系与协同进化、地上-地下/植物-微生物等种间关系方面的认识需要进一步加强；第二，进一步解析食物网与生态系统功能关系，在食物网复杂性对生态系统稳定性的贡献、多营养级与生物多样性和生态系统功能的关系方面开展实验与模型相结合的研究；第三，整合生态系统组成、结构与动态的研究，探索生态系统时空结构的形成机制，解析生态系统演替过程的食物网偶联关系（例如退化与恢复过程、演替），深化食物网对全球变化的响应及生态效应的认识。

(三) 何念鹏研究员：生态系统物质循环与能量流通

生态系统具有特定的边界或空间的开放系统，不仅内部存在物质传递和能量交换，与外界也存在物质和能量的交换。虽然生态系统空间大小差异很大，类型千奇百怪，但却具有一个基本一致的物质循环和能量流动模式，即能量和物质沿食物网或营养级逐级递减式地传递，二者密切相关。然而，虽然绝大多数生态系统物质循环和能量流动都是同时发生的，但由于不同营养级生物自身对元素需求的变化很大，且不同化学反应间能量交换过程复杂且数量差异很大，导致生态系统能量流动和物质循环间的关系难以定量化，因此，在实际研究过程中，二者经常是分别进行的。报告分析了生态系统物质循环和能量流动的特点，指出其研究应密切围绕如下几个关键概念展开：库（Pool）和流（Flow）、周转速率（Turnover rate）和周转时间（Turnover time）。

基于上述理念，报告将生态系统物质循环和能量流动的核心领域及其重要进展按以下几个方面简要总结和概述：（1）生态系统物质贮存及分配；（2）生态系统冠层-大气界面物质交换；（3）土壤-大气界面物质交换；（4）根系-土壤物质交换；（5）分解过程物质交换；（6）径流物质交换；（7）物质和能量沿营养级传递及其效率。此外，结合当前生态系统物质循环和能量流动的研究最新进展，报告指出了前沿方向及优先建议领域，它们分别是化学计量生态学与生态系统物质循环、生态系统碳氮水耦合过程和机制、特殊生境生态系统物质循环、跨类型、区域、洲际生态系统固碳效应的整合。

会后，专家们对“物质循环与元素循环关系”“物质循环和能量流动能否量化”“库流模式 vs. C、N、P、H₂O 模式”等进行了广泛交流，并初步形成一致意见，按库流模式进一步凝练重要进展和前沿。

（四）王志恒研究员：生物多样性与生态系统功能

随着人类活动和全球变化的不断加剧，地球的生物多样性面临着巨大威胁。生物多样性的丧失可显著影响生态系统的功能，并进而改变生态系统服务人类社会的能力。因此，关于生物多样性与生态系统功能关系（Biodiversity and Ecosystem Functioning, BEF）的研究已成为近 20 年来生态学的热点问题之一。BEF 研究主要关注生态系统中生物组分对生态系统功能和服务的影响，是群落生态学与生态系统生态学的交叉学科。生物多样性指的是一定区域内生命的变异程度，包括基因、物种和生态系统三个层次的变异。生态系统功能指的是内部成分与外部环境之间所发生的物质循环、能量流动和信息传递的总和，以及这些过程面临干扰时的稳定性。而生态系统服务则指人类从生态系统获得的所有惠益，包括供给服务（如提供食物和水）、调节服务（如控制洪水和疾病）、文化服务（如精神、娱乐和文化收益）以及支持服务（如维持地球生命生存环境的养分循环），是人类赖以生存和发展的基础。报告回顾了 BEF 研究的发展历史。BEF 研究最早可追溯至 1809

年在英国沃本庄园开展的牧草种植实验，基于这一实验，达尔文在《物种起源》中提出，生态系统生产力会随物种多样性增加而增加。在之后的约一个半世纪中，该问题并未成为生态学研究的核心问题之一。近年来，随着全球生物多样性面临的威胁逐渐加强，BEF 研究才逐渐受到人们越来越多的关注。通过检索 Web of Science 数据库发现，近 20 年来，关于 BEF 的文章数量快速增长，其增长数率显著高于生态学领域整体的增长速率，显示该领域是当前生态学研究中最为活跃的前沿领域之一。

报告分析了当前 BEF 研究的热点问题，包括：（1）生物多样性对碳、氮、磷和其他元素以及水在生物与大气、水体和土壤之间的循环；（2）生物多样性如何影响绿色植物和藻类光合作用以及能量通过食物网在生产者、采食者、捕食者和分解者等不同营养级中的传递和分配过程；（3）生物多样性如何影响生态系统的稳定性，包括生态系统的抵抗力、恢复力、局地稳定性和全局稳定性等；（4）生物多样性如何影响生态系统对人类社会的服务功能。当前的 BEF 研究多基于野外观测数据、生物多样性控制实验以及模型模拟等多种方法，其中生物多样性控制实验已成为当前 BEF 研究的重要手段。

报告指出 BEF 研究需在以下方面取得突破：（1）朝 4M 方向发展；（2）BEF 的多尺度格局；（3）BEF 中的生态与进化反馈机制；（4）BEF 对环境变化的响应；（5）BEF 与生态系统管理。

（五）牛书丽研究员：全球变化和人类活动对生态系统的影响

当前人类活动的强度和广度已经对全球环境和生态系统产生了深刻的影响，全球变化与生态系统研究也由此兴起，并成为集宏观与微观相互交叉、多学科相互渗透的前沿科学领域，重点研究生态系统结构和功能对全球变化的响应及其反馈作用，其目标是实现人类对生态系统服务的可持续利用。报告在对国内外全球变化研究进行了历史回顾和综合分析的基础上，总结了全球变化与生态系统研究的阶段

性重大进展及存在的主要问题，并对全球变化研究的前沿方向进行了展望和建议。根据研究内容和对象，报告系统综述了不同全球变化因子，包括 CO₂ 和 O₃ 浓度升高、气候变暖、降雨格局改变、氮沉降加剧、土地利用变化等对生态系统内个体、种群、群落及生态系统水平（包括淡水和海洋生态系统）的影响；探讨了全球变化过程中生物地球化学循环以及生物多样性的变化；在明确全球变化生态影响的基础上，阐明了这些影响对气候和环境变化的反馈机制；为构筑全球变化的适应对策提供生态学理论基础。报告指出，在过去 50 年，科研人员在全球变化对生物多样性、群落结构和生态系统功能影响三个方面都取得了突破性的进展，持续关注物种分布、生物多样性、生物群区对全球变化的响应、生态系统生产力、碳源汇功能、生态系统的脆弱性与生态系统健康变化等焦点问题；越来越多的研究揭示了生态系统过程对全球变化因子的非线性响应；目前的研究正在从关注单一要素变化对生态系统过程的影响转向多种环境要素间的协同作用。尽管各国科学家已经开展了大量的研究和探索，但无论是在全球变化与生态系统的相互作用机理，还是在其响应调控对策方面仍然存在许多未知的领域。

报告给出了全球变化与生态系统研究的未来发展趋势，包括：（1）开展维持生态系统稳定性和可持续性的生物学机制研究，制定适应和减缓全球变化的对策；（2）综合考虑自然和人为等多因素的影响及其反馈作用；（3）基于多数据、多方法的多尺度综合集成研究；（4）加强对极端气候事件以及对脆弱和变化敏感区域（如山地、极地、湿地、热带雨林分布区）的研究。

（六）黄振英研究员：生态系统恢复和管理与可持续发展

恢复生态学是研究生态系统退化的原因、退化生态系统恢复与重建的技术与方法、过程与机理的科学。研究对象为退化的生态系统，研究目标是为受损的生态系统提供恢复和重建的科学依据与方法论，

从而实现生态系统有效恢复和可持续发展。恢复生态学研究包括基础理论研究和应用技术研究两部分。恢复生态学的基本理念源于农业文明，理论体系始于 20 世纪 80 年代，1985 年国际恢复生态学会成立。报告简述了恢复生态学在核心领域/方向取得的重要进展，包括：（1）森林生态系统：演替理论作为森林生态恢复的基础理论，开展水土气等非生物或环境要素的恢复技术；（2）草地生态系统：理论包括中度干扰假说与放牧优化假说、放牧促进/减缓生态系统养分循环假说等，技术包括退化草地的生态恢复技术等；（3）沙地生态系统：适度发展原则以及生态、经济及社会效益统一的原则等；（4）湖泊生态系统：控制和消除湖泊水体中营养盐的含量是湖泊生态系统修复理论和实践的重点。

报告分析了恢复生态学研究存在的主要问题，包括：（1）生态系统恢复的不确定性；（2）在持续干扰时，很难恢复到理想状态；（3）生态系统退化与干扰因子很难概括到易测定的具体指标；（4）生态系统恢复与自然的正向演替都是使生态系统向理想状态转变的动态过程，两者很难区分，（5）退化生态系统恢复与重建技术尚未成熟。

总结现有的研究成果及主要问题，报告对前沿方向提出了以下四方面展望：（1）整合众多理论，提出新的理论；（2）宏观方法与微观技术在生态恢复中的应用，时空尺度的扩展研究；（3）实验恢复生态学方法的多样化与创新；（4）定量化研究的深入。

报告还指出，未来恢复生态学研究需在以下方面取得突破：（1）加强对不同类型退化生态系统的定位观测试验，获取有关的生态学参数，并建立相应的基础数据库；（2）系统总结和完善恢复生态学有关理论和方法、生态工程设计、恢复与重建的操作程序、风险效益评价等内容；（3）加强对退化生态系统的恢复与重建技术的研究。

（七）温学发研究员：生态系统研究的新技术与新方法

生态系统研究的对象包括生物部分和非生物部分。其中生物部分

包括生产者（植物）、消费者（动物）和分解者（微生物）；非生物部分也称环境系统，是生态系统的物质和能量的来源，包括生物活动的空间和参与生物生理代谢过程的各种要素（土壤、大气等）。生态系统研究要从时间和空间尺度上考虑生态系统要素、结构和功能，主要的技术和方法包括观测、模拟与评价。报告对生态系统研究的新技术和新方法进行了详细的介绍。

生态观测技术与方法，包括野外观测与控制实验和室内分析与模拟实验；生态模拟与评价方法，包括生态模型和生态评价。要实现“生态系统”天地空一体化“观测模拟+评价”研究体系。根据调查和研究对象，可以分为调查、采样、定位观测、控制/模拟实验、高空/遥感观测、模型模拟、系统评价等技术和方法。要考虑样点尺度、景观尺度和区域尺度，考虑土壤-根系-微生物、土壤-植物-大气、生态系统内（生物-环境）、生态系统间（环境梯度）等。

生态观测的新技术与方法主要包括：（1）土壤-根系-微生物观测技术；（2）生物标记物示踪技术；（3）温室气体通量的连续观测技术；（4）环境与生物要素的调控技术；（5）同位素自然示踪和人工标记技术；（6）天地空遥感综合观测技术；（7）动物/昆虫动态监测技术。

生态模拟与评价新方法包括：（1）生态系统模拟研究，包括模型参数标定（Calibration）、优化（Optimization），模型验证（Validation），模型不确定性（Uncertainty）；（2）生态系统评价研究，包括数据集成分析（Integrative analysis）、数据整合分析（Meta-analysis）、生态大数据分析（Big data in ecology）。

（八）杨元合研究员：陆地生态系统联网观测与实验

长期观测与控制实验是生态系统生态学研究中的重要手段。然而，不同研究中实验处理、测定指标以及测定方法存在较大差异，使得这些单点尺度上的研究结果很难外推至大尺度，从而限制了我们对区域及全球生态问题的认识。当前普遍发生的全球生态与环境问题促使生

态学研究的尺度从站点扩展至区域，进而推动了联网观测与联网实验的建立。报告对目前国内外陆地生态系统联网监测与实验的核心目标、设计理念及重要的研究成果等进行了详细的介绍。报告指出，国家与全球尺度的生态系统观测研究网络实现了地面观测与遥感等多尺度观测的有机集合，并基于统一方法获取可比较的数据，为监测和研究区域性的生态问题提供了有效途径，提升了我们对生态系统结构、功能和过程的系统了解。针对全球气候变化、养分变化及生物多样性改变等问题建立的联网实验，同样采用统一方法收集数据，量化了全球尺度上环境变化对生态系统过程和功能的影响，同时为地球系统模型提供持续基准数据，有助于准确预测生态过程对全球变化的响应。与国际联网研究相比，中国目前已建立了较为完善的联网观测平台，中国生态系统研究网络（CERN）及中国通量观测研究联盟（ChinaFLUX）等观测网络在监测中国生态系统变化及优化生态系统中发挥了重要作用。然而在联网实验方面，中国仍与国际存在较大差距，目前的研究多局限于单点控制实验，未来应着重发展联网实验以更好地理解与预测国家尺度上生态问题对全球变化的响应。

五、论坛总结

本次论坛系统总结了生态系统生态学领域最新研究进展，前瞻性地分析了该领域中长期发展趋势，总结并凝练了该领域短期及中长期能取得重大突破的前沿科学问题和研究方向，进一步深化了生态系统生态学研究发展战略。与会专家高度肯定了本次论坛的选题及其重要意义，并一致建议围绕论坛主要议题，组织出版专辑（将发表于《中国科学：生命科学》）并撰写科学发展战略研究报告。本次论坛通过前沿科学理论和技术探讨，启迪不同学科领域专家的新思维，充分发挥了中国科学院学部对学科战略规划的引领作用。

（作者：方精云院士，北京大学、中国科学院植物研究所；刘玲莉、黄振英、杨

元合，中国科学院植物研究所研究员；何念鹏、牛书丽、温学发，中国科学院地理科学与资源研究所研究员；王志恒，北京大学城市与环境学院研究员)