



Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Views & Comments

基于自然的生态工程范式——共生、耦合与协同

王夏晖^{a,b,c,#}, 王金南^{b,#}, 王波^{a,b,#}, Benjamin Burkhard^d, 车璐璐^a, 戴超^a, 郑利杰^a

^a Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

^b Joint Laboratory of Ecological Products and Natural Capital, Beijing 100012, China

^c Center of Biodiversity and Nature Reserves, Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China

^d Institute of Physical Geography and Landscape Ecology, Leibniz University Hannover, Hannover LS 30167, Germany

1. 引言

当前，全球面临生物多样性丧失、气候变化和污染加剧三重生态威胁，陆地和海洋生态系统的退化使32亿人的福祉受损，损失约占全球年生产总值的10%，对人类生存和发展构成重大风险[1–2]。同时，新型冠状病毒肺炎疫情仍在全球大流行，表明人类与自然的关系尚不协调，仍需保护自然以维持生态系统自身的恢复力。为此，联合国先后启动了“可持续发展十年”“生态系统恢复十年”和“海洋科学促进可持续发展十年”等行动计划，制定2020年后全球生物多样性框架。在此背景下，人类将进入一个人与自然关系重构的新时代，未来十年是提升人类福祉、缓解气候和生物多样性危机的关键期，关乎2030年联合国可持续发展目标的实现。

生态工程是推动生态恢复（ecological restoration, ER）的关键手段，其概念的提出距今已60多年，全球很多学者对其理论与实践进行了探讨。欧美等国家开展生态保护与恢复研究较早，通过实践形成一些成功案例，如美国黄石国家公园建设、欧洲莱茵河生态恢复、澳大利亚矿山生态恢复等。进入21世纪，为有效应对全球生态危机，生态工程已成为各国主要政治议题和优先事项[3]。生态工

程通常侧重于生态系统和景观尺度，而非更小的物种或群落尺度研究，强调生态系统自我恢复的阈值概念[4]，重视“人”的因素在生态恢复中的作用[5]，开展多领域、跨学科理论与方法的互鉴融合，关注生态系统的格局、过程、服务和可持续管理等科学问题，促进退化生态系统恢复和可持续生态系统构建目标协同实现[6]，推动了生态工程学科的长足发展。2016年，国际恢复生态学学会（Society for Ecological Restoration, SER）发布《生态恢复实践的国际原则与标准》（第一版），并于2019年修订后发布第二版[7]。2020年，世界自然保护联盟（International Union for Conservation of Nature, IUCN）发布《IUCN基于自然的解决方案（Nature-based Solution, NbS）全球标准》[8]。

中国早期的桑基鱼塘（一种种桑养蚕与池塘养鱼相结合的生态农业模式）、多水塘系统（一种由多个池塘和沟渠连接而成的湿地系统）等诸多朴素自发的生态工程实践活动是中国生态工程思想诞生和发展的起源。2013年，中国首次提出“山水林田湖是一个生命共同体”的理念，强调遵循自然规律，注重对自然生态系统的整体保护、系统修复，充分发挥大自然的自我恢复能力，科学推进生态系统保护修复。在此理念引领下，中国在国家重点生态功

[#] These authors contributed equally to this study.

能区等地区，先后实施了25个山水林田湖草生态保护修复工程试点，通过生态保护修复、创新管理制度、建立多元投入机制等措施，取得了生态、社会和经济等多重效益[9]，整体提升了重点生态区和生态节点的生态系统服务功能，65个国家级贫困县受益；中国退耕还林工程通过补偿退耕农户、植树造林等措施，在实现增加森林覆盖率、减少水土流失等生态目标的同时，也实现了工程区群众减贫等社会目标[10]。与此同时，中国学者开展了试点工程的内涵特征、理论认知、实践路径等方面研究[11]，认为试点工程有别于以往单要素治理为主的生态工程，注重综合治理、系统治理、源头治理，但仍有待进一步揭示山水林田湖草沙等要素的生态耦合机理、区域生态系统服务时空演变特征等。

这一时期，学界有关生态工程的研究对象、尺度、目标、构成等均逐步发生了变化，研究对象从单一的自然要素转向自然-社会多重要素，研究尺度从中微观生态系统服务提升转向多尺度生态安全格局重塑，研究目标从生态系统自身结构与功能优化转向人类生态福祉提升[11-12]，应用领域涵盖森林、草原、河湖等自然生态系统和矿山、农田、城市等人工生态系统。这些研究新动向，标志着生态工程正进入一个新的历史发展阶段，在人与自然和谐共生目标引领下，一种新的生态工程范式——基于自然的生态工程（*nature-based ecological engineering, NbEE*），正在加快形成。

本文提出了NbEE的概念和特征，按照“监测评估—耦合机理—模型模拟—预测优化”的研究模式，利用生态系统“格局—过程—服务—福祉”级联关系，构建了NbEE的概念模型，搭建以“目标协同、成因诊断、格局优化、过程调控、评估反馈”为基本构架的生态工程范式，为科学开展生态保护与修复、应对全球生态危机提供新路径。

2. NbEE概念与特征

2.1. 概念

近年来，在国际生态工程学会（International Ecological Engineering Society, IEES）的组织下，汇集全球生态学家智慧，生态工程概念逐步统一，即“为了提高人类福祉，利用生态学的基本原理和整体思维方式作为解决问题方法的一门工程学”[13]。生态恢复（*ecosystem restoration, ER*）是生态工程学的一个重要部分，由于其与气候变化响应、生物多样性保护、可持续发展等密切相关，已经成为全球最为关注的学科领域之一[7]。SER将ER定义

为，对已退化、损害或彻底破坏的生态系统进行恢复的过程，并得到国际广泛认可[14]。IUCN将NbS定义为，保护、可持续利用和修复自然的或被改变的生态系统的行动，从而有效地和适应性地应对当今社会面临的挑战，同时提供人类福祉和生物多样性[8]。与此同时，中国学者围绕ER也开展大量研究，尤其是近年来在“人与自然和谐共生”“山水林田湖草沙生命共同体”等生态文明理念引领下，以注重生态系统的整体性、系统性、完整性为特征的国土空间生态修复逐渐成为研究热点。

生态学研究对象逐渐从微观生命现象转向中观和宏观生态调控，进入一个多尺度、大数据、跨学科的新时代。然而，经典生态学研究多以小尺度、单一现象或过程为主体，存在系统性不足、知识片段化和分散孤立的局限[15]，人们期望生态工程学能够提供一种“以自然之道，养万物之生”的系统性可持续解决方案，例如，IUCN提出的NbS是集成了森林景观恢复（*forest and landscape restoration, FLR*）、基于生态系统的适应（*ecosystem-based adaptation, EbA*）、生态系统方法（*ecosystem approach, EA*）等多种方法的解决方案，已被很多国家应用于生物多样性保护、气候变化适应和减缓、自然资源可持续利用等领域[16]。

基于人与自然关系的最新认知，依托生态保护与修复最新理论和实践进展，加之大数据、人工智能等现代新技术的推广，为生态工程范式创新提供了契机，使得多要素、多尺度、多层次、多目标的过程耦合和空间集成成为可能。NbEE可定义为：为促进自然生态系统服务和人类社会福祉协同增益，在遵循自然演替规律和整体思维方式的前提下，通过不同空间尺度（流域或区域、景观、生态系统、地块）耦合关联，以山水林田湖草沙生态系统服务功能保育提升为关键内容，以推动构建人与自然和谐共生关系为核心目标的一种多要素、多尺度、多层次、多目标、多手段综合运用的生态保护修复活动。

2.2. 特征

NbEE是在当前构建人与自然和谐共生、协同增益新关系的时代背景下发展起来的一种新的生态系统治理范式，其基本特征包括：

第一，NbEE强调人与自然的共生关系和协同增益。生态系统服务是链接自然过程和社会过程的纽带，不同服务间具有此消彼长的权衡或相互增益的协同关系[17]。通过工程实施，促进受益者由原来的自然受益或人类受益单一关系变为人与自然同时受益的双向关系。工程目标由纯粹的修复生态环境，拓展为人与自然协同增益，实现人与

自然和谐共生、经济社会与生态环境协调发展。工程涉及要素从自然要素转向自然-社会多要素及其耦合体，由生物组分和功能优化转向人类生态福祉提升，强调自然恢复与社会、人文、管理决策的耦合，推动生态产品价值实现。

第二，NbEE 强调基于自然规律实现生态系统过程耦合和自我演替。“基于自然”的核心是遵循自然演替规律，按照“整体、协调、再生、循环”生态工程基本原理[18]，发挥生态系统的强大缓冲、净化、调节、保育等生态服务功能，提高生态系统质量和稳定性，源于自然，回馈自然。考虑到自然生态系统的时空动态特征和恢复过程的不确定性，更加强调生态过程系统耦合和精准调控，注重生态系统恢复的适应性管理[19]。通过对工程实施区域范围内社会-自然要素的优化调控，提升区域整体生态服务功能。所选用的技术多为纯自然或拟自然技术，最大限度降低人类对生态系统正向演进过程的干扰，培育提升生态系统自我演替机能。

第三，NbEE 强调系统调控、空间关联与协同效应。NbEE 坚持整体系统观，统筹要素与要素、结构与功能、人与自然的多元关系，开展生态系统的全要素、全过程、全链条优化调控。考虑不同尺度的生态问题和不同的胁迫因子，需分类型提出有针对性的生态保护与修复路径，如在种群尺度关注物种恢复和群落演替；在生态系统尺度关

注结构和功能变化；在景观尺度关注生态安全格局、源汇关系、生态廊道等；在宏观尺度关注区域大尺度生态系统状态变化，为生态监测、评估、预测、预警及可持续管理奠定基础。通过构建“格局—过程—服务—福祉”的级联关系，在时空尺度上有效耦合保护、修复、重建等生态和人类利用过程，产生生态系统服务与人类福祉全面提升的协同效应。

2.3. 范式比较

为深入理解NbEE 范式，对生态工程领域国际主流化不同范式进行了比较（表1）。选取的范式分别为SER 的ER 实践原则与标准（第二版）、IUCN 的NbS 国际标准（第一版）。

(1) 在核心理念上，ER、NbS 和NbEE 一脉相承，均坚持尊重自然、顺应自然、保护自然的生态理念；ER 强调遵循自然规律，侧重于自我设计与人为设计相结合，发挥生态系统自我恢复力[7]；NbS 主张“基于自然”的理念，依靠自然力量应对各类社会挑战[16,20]；NbEE 融合了中国生态哲学思想，强调“人与自然和谐共生”“山水林田湖草沙是一个生命共同体”等理念。

(2) 在研究背景上，三种范式均是在气候变化、生物多样性丧失等全球生态危机背景下形成的，ER 关注退化生态系统的恢复，NbS 强调生物多样性净增长和生态系统

表1 ER、NbS 和NbEE 范式的比较

Aspects	Paradigm		
	ER	NbS	NbEE
Core ideas	Following the laws of nature and giving full play to the self-resilience of ecosystems	Advocating the idea of “nature-based” and relying on natural forces to deal with various social challenges	Emphasizing the idea of “harmonious coexistence between man and nature” and “mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, and grasslands are part of a community of life”
Research background	Due to disorderly human activities, the degradation of ecosystems in large areas has occurred and the capacity of ecosystem service has been damaged	In response to crises such as global change and biodiversity loss, people have gradually realized the important role played by nature conservation actions	The systematic and holistic thinking of ecological protection and restoration has become the mainstream of the times, relying on coordination to break through the bottleneck of ecosystem service improvement
Research objects	Degraded ecosystems	Social–ecological systems	Social–ecological systems
Research scales	Based on the ecosystem scale	Based on the landscape scale	Emphasizing the landscape scale and paying attention to multiscale nested research
Research objectives	Achieving ecosystem restoration	Addressing one or more social challenges while providing benefits for human wellbeing and biodiversity	Achieving economic and ecological goals together and improving human ecological wellbeing
Implementation processes	Planning and design, implementation, monitoring and evaluation, and successive maintenance	Identifying problems, screening measures, designing a scheme, implementing the scheme, communicating with relevant parties, correcting the scheme, and quantifying benefits	Target coordination, cause diagnosis, pattern optimization, process regulation, and evaluation feedback

完整性，同时也注重经济可行性、社会公平性和制度合理性[16]，NbEE则是在已有范式基础上，融入中国生态文明理念和重大生态工程实践经验的优化治理模式。

(3) 在研究对象上，ER 以退化生态系统为主要研究对象，近年来也加强社会经济和文化因素研究，为量化 ER 项目实现社会目标的程度，引入了“社会福利轮”等概念[7]；NbS 和 NbEE 在研究对象上均为社会-生态系统，强调应对社会多方面挑战，构建人与自然的共生关系和实现协同增益。

(4) 在研究尺度上，ER 涉及物种、种群、生态系统或景观等多尺度的恢复[21]，依据 SER 的定义，通常以生态系统尺度为主；由于生态系统通常是开放系统，会受到更大尺度的陆地和海洋生态系统的影响，因此 NbS 倾向于更大尺度的研究，通常以景观尺度为主[22]；NbEE 则注重多尺度系统调控和空间嵌套耦合，以发挥工程实施的最大效能[12]。

(5) 在研究目标上，ER 不坚持将生态系统一定要恢复到原始状态，而是主张在一定程度上恢复生态系统功能，以提供与原生态系统相似的生态系统服务[7]；NbS 和 NbEE 则将保障社会可持续发展作为首要目标，特别强调实现提供人类福祉、生物多样性保护等综合效益[16]。

(6) 在实施流程上，ER 提出了规划与设计、实施、监测评估、后期维护 4 方面流程[7]，NbS 提出了识别问题、筛选措施、设计方案、执行方案、沟通相关方、方案修正、量化效益 7 方面流程[23]，NbEE 对现有范式进行融合优化，实施流程包括目标协同、成因诊断、格局优化、过程调控、评估反馈 5 方面。

综上，各类范式的形成有其特定的背景、对象和目标等，是对已有理论和实践的升华。不同生态工程范式都以生态系统原理和科学规范为基础，在人与自然的相互关系认知基础上，借鉴和重视不同来源的知识，并在实践上不断总结提升。正如 SER 认为，ER 是对其他保护活动和 NbS 的补充[7]，IUCN 认为 NbS 全球标准是对使用其他标准的补充而不是取代[16]，NbEE 也应是对 ER 和 NbS 的补充、优化，是基于中国生态文明建设理念与重大实践的创新成果，有助于丰富新时期生态保护修复理论、路径和模式。

3. NbEE 范式构建

3.1. 概念模型

围绕人-自然互馈共生关系构建，基于人与自然共生原理和生态系统自身演替规律，有效识别“格局—过程—

服务—福祉”级联关系，构建多要素、多尺度、多层次、多目标的 NbEE 概念模型（图 1）。其中，“多要素”是指森林、草地、湿地等自然要素和城乡、人口、产业等社会要素；“多尺度”是指种群、生态系统、景观、流域或区域等尺度；“多层次”是指生态系统的要素、结构和功能等属性层次，如傅伯杰[12]研究国土空间修复时提出，应该从生物地理和生态功能多个层次识别重点修复区域；“多目标”是指生态工程在多尺度、多要素等情景下所对应的多个目标，如 Hallett 等[24]通过对 200 多个全球恢复网络工程分析，认为大多数工程都设置了生态类目标，而社会类目标对工程长期目标至关重要。NbEE 概念模型由目标协同、驱因诊断、格局优化、过程调控、评估反馈 5 个基础模块构成，不同模块间相互影响、层次递进。基于生态系统服务协同理论认知，利用景观格局-生态过程互馈机理，该模型可识别退化生态系统的关键区域、驱动因素和互馈关系，阐释和量化人类活动对生态系统服务的影响，评估生态工程在提升生态系统质量和稳定性、人类社会可持续发展方面的综合效应，进而采取适应性管理，调控和优化工程目标路径，协同推进受损生态系统恢复和人类社会可持续发展。

3.2. 模块 I：目标协同——基于时空演变的工程目标确定

自然-社会共生系统的空间分布和时间演变具有尺度效应。受时空不均衡性、异质性等影响，生态系统服务间此消彼长、相互影响，需规避分割、强化协同（图 2）。在空间尺度上，景观尺度往往对应工程区域，注重生态安全格局优化、生态系统连通性提升等，目标定位于生态系统质量和人类福祉提高；生态系统尺度对应工程项目，由山水林田湖草沙等要素构成，注重生态系统结构调整和过程耦合等，目标定位于生态系统健康和功能提升；地块尺度对应工程单元，注重生态设计、绿色材料应用等，目标定位于退化区域生态修复、生态系统结构完善等，如 Wu [25] 认为景观恢复需深入了解景观组成、结构和功能，以及生态完整性与满足人类需求间的关系，而这些景观属性不同于在生态系统、群落、物种等尺度上进行生态恢复所考虑的属性。在时间尺度上，随着人与自然关系协调性增强，工程目标由近及远先后经历协调布局、系统治理、人地和谐三个演进阶段[12]，目标协同度逐步提升，生态系统质量和稳定性逐渐增加。

3.3. 模块 II：驱因诊断——多层次生态系统退化驱动机理揭示

自然-社会共生系统是要素、结构、功能等自然属性

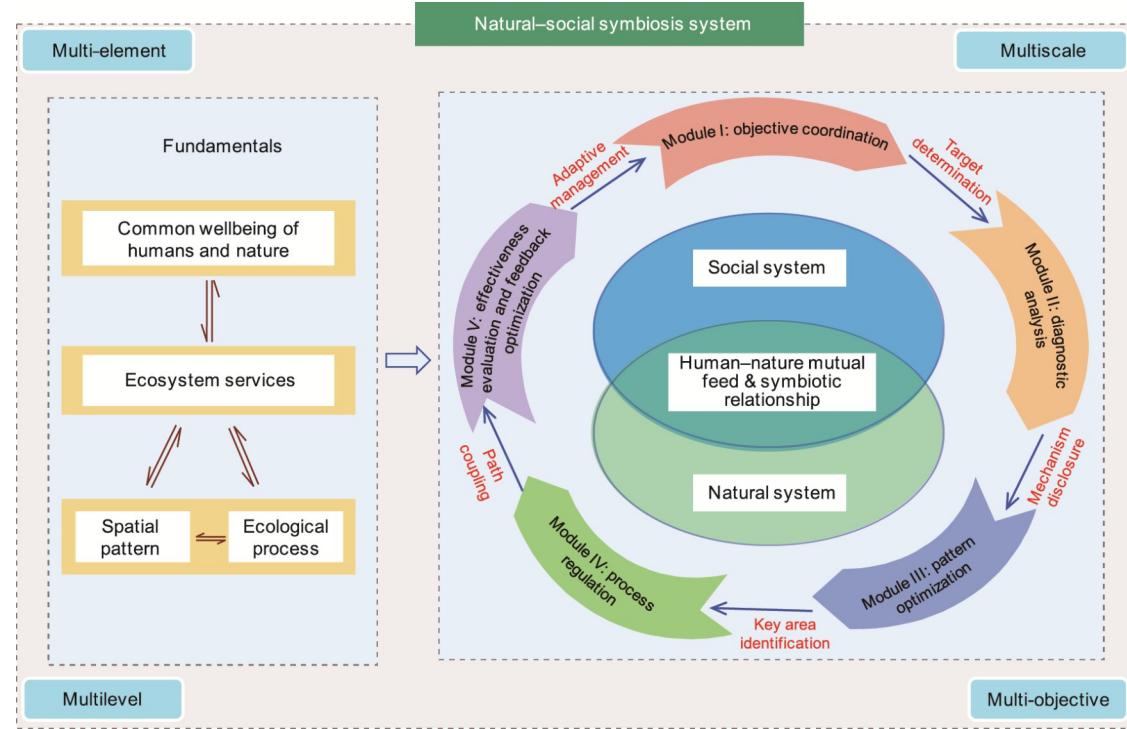


图1. NbEE范式概念模型。

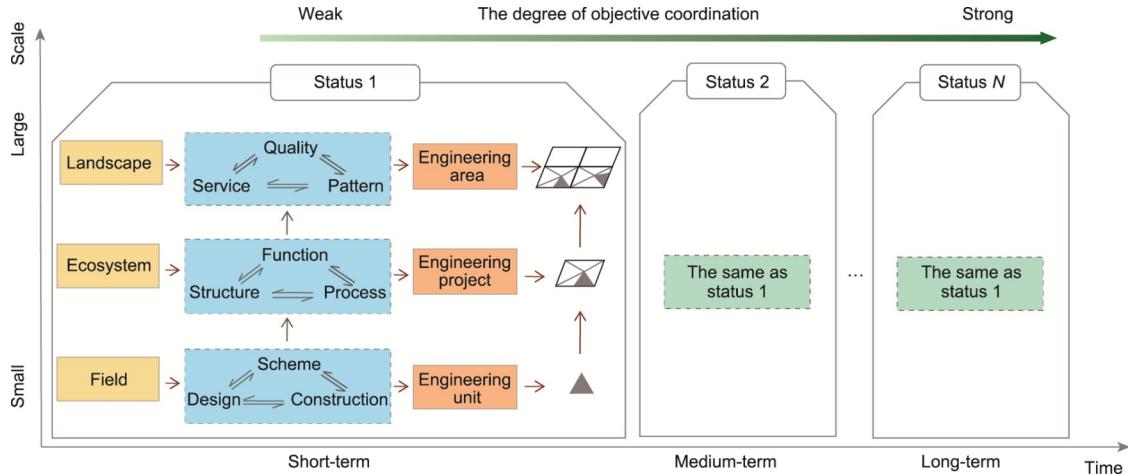


图2. 基于时空演变的工程目标确定模块。

和城乡、人口、产业等社会属性的集成体现，具有多层次性。理清多尺度、多层次生态退化机理，是提高生态工程科学性的关键环节。利用压力-状态-响应（PSR）分析框架，开展生态安全评价，是揭示退化机理的基本方法[26]，通过评价生态系统健康状态，分析生态问题及其驱动力，揭示各类驱动因素对生态系统结构、过程和功能的影响机理，从而提出有针对性的工程和管理措施（图3）。考虑到不同尺度差异性，生态问题诊断和驱因分析时，应分别从景观、生态系统、地块等不同尺度，分析生态退化驱动力，建立关键驱动因子清单。如彭羽等[27]在研究不同尺度草场退化生态因子时的结果显示，小尺度（300

$m \times 300 m$ ）主要为海拔高度、坡向和年均降水量，中尺度（ $1 km \times 1 km$ ）为年均温度、坡度、土地利用类型，大尺度（ $5 km \times 5 km$ ）为年均温度；Gann等[7]认为景观恢复涉及生态系统在多个尺度上的生物等级，需考虑景观内生态系统的类型和比例，以及景观单元的空间结构和功能。

3.4. 模块III：格局优化——多尺度生态保护修复关键区域识别

准确识别生态修复关键区域是提升工程成效的重要措施。生态安全格局由区域中某些生态源、生态节点、生态廊道及其生态网络等关键要素构成[28]。利用“源地—廊

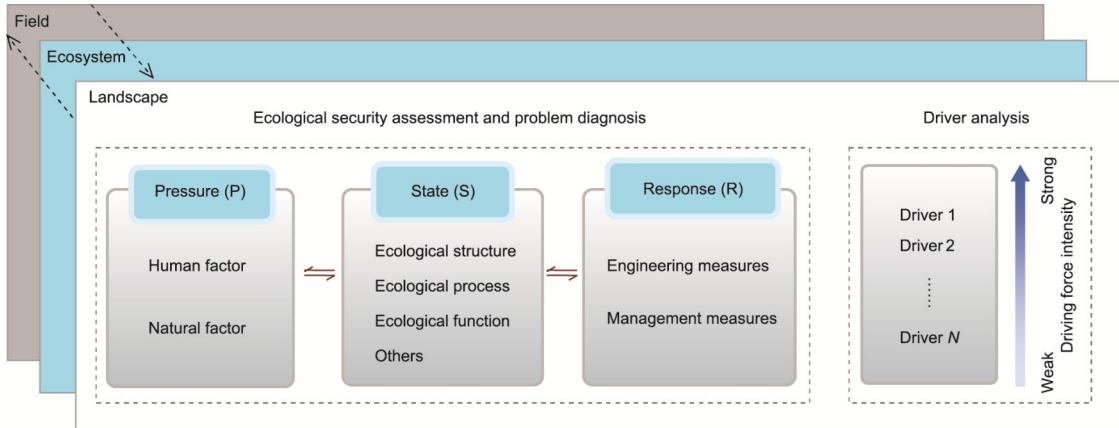


图3. 基于PSR框架的生态系统退化机理与驱动力诊断模块。

道一节点”识别的生态安全格局构建模式，可为确定关键生态修复区域提供方法支撑[29]，但仍需从自然与社会要素耦合角度，加强区划理论方法研究[12]，提出生态保护修复区划方案，明确工程空间位置与准确边界、生态问题与风险、主攻方向与措施（图4）。同时，生态安全格局优化具有空间异质性和尺度依赖性，即某一尺度存在的问题，需要在更小尺度上解释其成因机制，在更大尺度上寻求解决问题的综合路径[30]，如Zhang等[31]研究表明，降雨增加降低了高寒原生草地的土壤微生物多样性，主要原因是受大尺度气候变化和人类活动因素影响，改变了草地生态系统尺度上土壤养分和水分，进而影响了土壤微生物多样性。为此，NbEE强调构建多尺度协同的生态安全格局。

3.5. 模块IV：过程调控——多类型生态保护与修复路径耦合

依据人为干扰程度，将生态保护与修复路径分为保育恢复、辅助再生、生态重建三个类型[7]；在干扰程度上，保育恢复类型最弱，辅助再生类型次之，生态重建类型最

强（图5）。生态工程过程调控应系统认知景观、系统、地块尺度的空间嵌套和结构、功能、服务属性的层次递进。在空间尺度上，需聚焦关键区域和主控因子，科学配置保护恢复、辅助再生、生态重建等措施。在时间尺度上，近期多为人与自然关系的不协调凸显期，工程实施以辅助再生、生态重建等措施为主，对重要生态区采取保育恢复措施；中期处于人与自然关系缓和期，辅助再生、生态重建等措施逐步减少，保育恢复措施将发挥更大作用；远期处于人与自然关系和谐期，主要措施为保育恢复。

3.6. 模块V：评估反馈——生态工程效应的动态监测与措施优化

生态工程实施通常具有长期性、复杂性和不确定性，有必要对其采取适应性管理，通过监测、评估、模拟、优化等措施，对不符合工程目标的活动及时进行调控（图6）。而生态系统适应性管理的效果，也依赖于对工程目标、布局、项目、政策的全过程调控。需要按照全程监测—效果评估—场景模拟—动态反馈的思路，开展工程的动态监测与优化。同时，人类社会与山水林田湖草沙等自

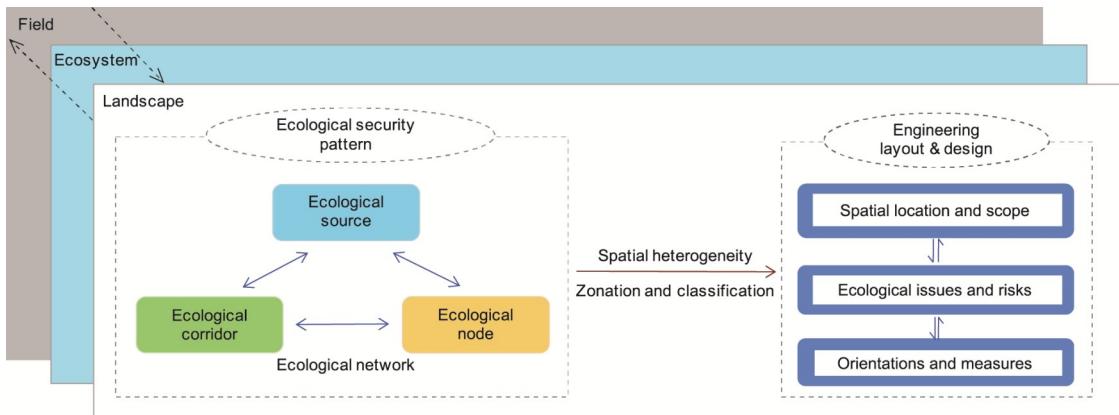


图4. 基于生态安全格局的生态工程布局设计模块。

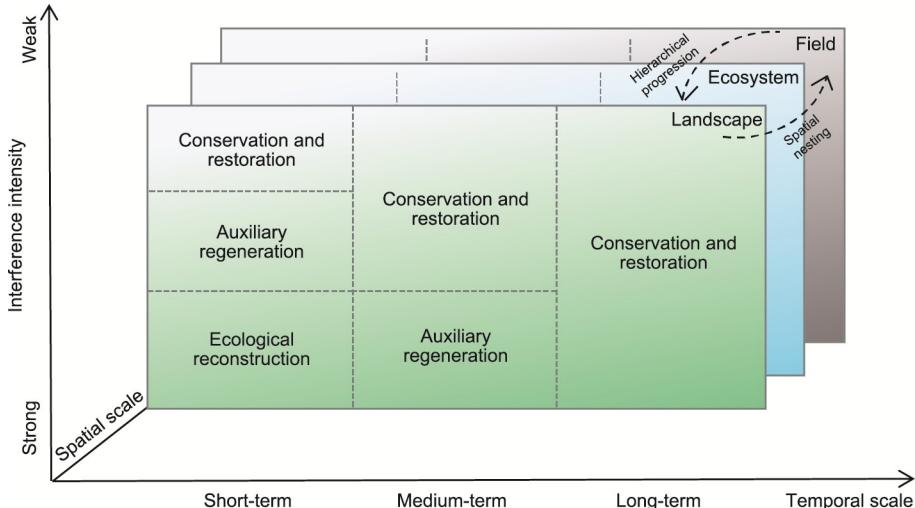


图5. 多类型生态保护与修复路径的过程调控模块。

然生态系统共同构成了生命共同体，决定了生态工程的适应性管理需要强化人为因素管控，特别是要建立长期的可持续管护制度，消除对生态系统产生不利影响的人为干扰因子，确保工程效果可长期发挥。如 Lengefeld 等[32]认为，解决好社会经济因素对于恢复实践的有效性至关重要，而忽视关键性社会因素的做法是危险的[33]。

4. 结语

当前，生态工程正进入新发展阶段。在全球气候变化和生态风险加剧的宏观背景下，自然生态系统与人类社会

互动和影响日益加深，生态退化驱动因素趋于多源化、复合化，人类亟需在生态工程学基本原理基础上，谋求一种人与自然共生关系重塑，具备多要素、多尺度、多层次、多目标过程耦合和生态系统服务协同增益的生态保护修复新路径。中国“山水林田湖草生命共同体”理念引领重大生态工程的理论与实践取得新成果，推动了NbEE范式的形成。NbEE依托生态学“格局—过程—服务—福祉”级联关系认知，开展以“目标协同、驱因诊断、格局优化、过程调控、评估反馈”为核心的生态工程规律认识、布局设计和系统实施，为突破传统生态工程瓶颈提供了新思路和新路径。考虑到气候变化对生态系统服务和人类福祉的

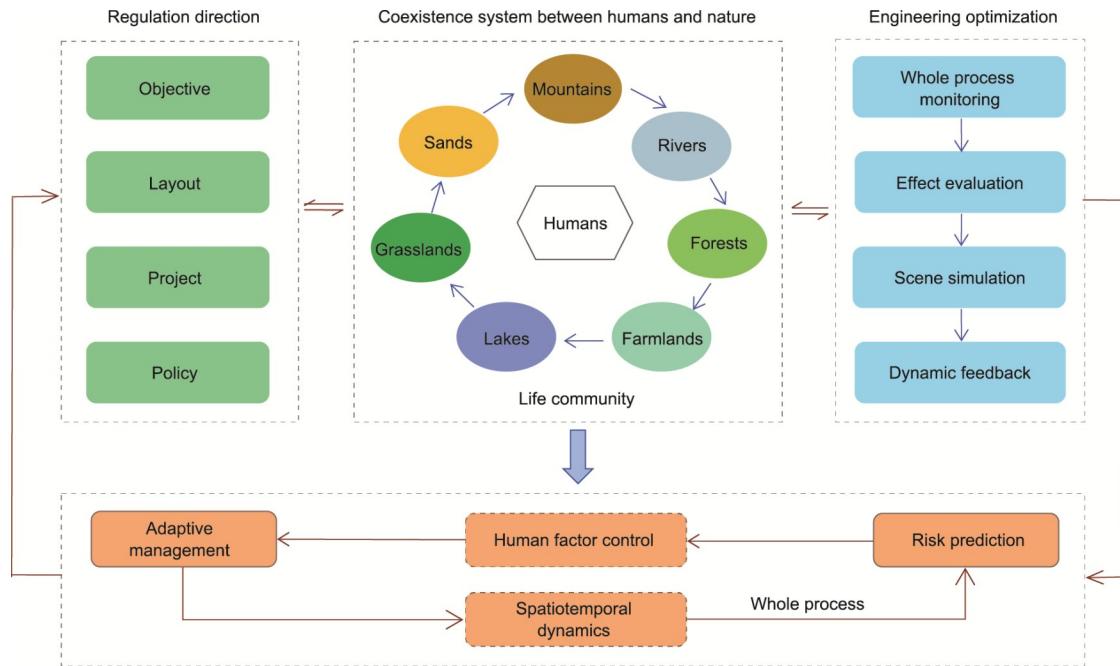


图6. NbEE 动态监测与优化调控模块。

影响是全面的，人类社会需求增长对复杂多维自适应生态系统的胁迫是系统的，未来还需要融合更多的自然和社会多学科理论，深刻阐释全球气候变化下生态系统时空演变规律及生态工程调控机理，进一步深化和完善NbEE范式，将生态工程理论与实践研究推向新高度。

致谢

感谢两位匿名审稿人对本文提出的建设性意见，这些意见在提高稿件质量方面非常有帮助。本工作得到中国工程院“黄河流域生态保护和高质量发展战略研究”（2020-zd-18）和自然资源保护协会（NRDC）“推动基于自然的解决方案纳入国家气候政策主流项目”的资助。

Reference

- [1] NationsUnited. United Nations decade on ecosystem restoration (2021–2030). In Resolution adopted by the General Assembly [Internet]. New York City: United Nations; 2019 Mar 1 [cited 2022 May 20]. Available from: <https://undocs.org/A/RES/73/284>.
- [2] Xinhua News Agency. Guterres launches UN decade on ecosystem restoration [Internet]. Beijing: XINHUANET; 2019 Jun 5 [cited 20 May 2022]. Available from: http://www.xinhuanet.com/english/2021-06/05/c_139989761.htm.
- [3] Aronson J, Alexander S. Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves. Restor Ecol 2013;21(3):293–6.
- [4] Bestelmeyer BT. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: the good, the bad, and the insidious. Restor Ecol 2006;14(3): 325–9.
- [5] Shackelford N, Hobbs RJ, Burgar JM, Erickson TE, Fontaine JB, Laliberté E, et al. Primed for change: developing ecological restoration for the 21st century. Restor Ecol 2013;21(3):297–304.
- [6] Mitsch WJ. When will ecologists learn engineering and engineers learn ecology? Ecol Eng 2014;65:9–14.
- [7] Gann GD, McDonald T, Walder B, Aronson J, Nelson CR, Jonson J, et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. 2nd ed. Restor Ecol 2019;27(S1):1–46.
- [8] IUCN Global standard for Nature-based Solutions: a user-friendly framework for the verification, design and scaling up of NbS. Global standard. Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN); 2020.
- [9] Luo M, Yu EY, Zhou Y, Ying LX, Wang J, Wu G. Distribution and technical strategies of ecological protection and restoration projects for mountains–rivers–forests–farmlands–lakes–grasslands. Acta Ecol Sin 2019;39 (23): 8692–701. Chinese.
- [10] Gao Y, Liu Z, Li R, Shi Z. Long-term impact of China's returning farmland to forest program on rural economic development. Sustainability 2020; 12(4): 1492.
- [11] Peng J, Li B, Dong JQ, Liu YX, Lv DN, Du RR, et al. Basic logic of territorial ecological restoration. China Land Sci 2020;34(5):18–26. Chinese.
- [12] Fu BJ. Several key points in territorial ecological restoration. Bull Chin Acad Sci 2021;36(1):64–9. Chinese.
- [13] Mitsch WJ. What is ecological engineering? Ecol Eng 2012;45:5–12.
- [14] Martin DM. Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. Restor Ecol 2017;25(5):668–73.
- [15] Yu GR, Zhagn L, He HL, Yang M. A process-based model and simulation system of dynamic change and spatial variation in large-scale terrestrial ecosystems. Chin J Appl Ecol 2021;32(8):2653–65. Chinese.
- [16] IUCN. Guidance for using the IUCN global standard for nature-based solutions. A user-friendly framework for the verification, design and scaling up of Nature-based Solutions. Gland: International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN); 2020.
- [17] Xu S, Liu Y, Wang X, Zhang G. Scale effect on spatial patterns of ecosystem services and associations among them in semi-arid area: a case study in Ningxia Hui Autonomous Region. China Sci Total Environ 2017;598: 297–306.
- [18] Ge F, Ouyang ZY. Integrity, coordination, circulation, self-generation—Ma Shijun's academic thoughts and contributions. Acta Ecol Sin 2015;35(24): 7926–30. Chinese.
- [19] Liu J, Mooney H, Hull V, Davis SJ, Gaskell J, Hertel T, et al. Systems integration for global sustainability. Science 2015;347(6225):1258832.
- [20] Cohen-Shacham E, Andrade A, Dalton J, Dudley N, Jones M, Kumar C, et al. Core principles for successfully implementing and upscaling Nature-based Solutions. Environ Sci Policy 2019;98:20–9.
- [21] Mace GM. Whose conservation? Science 2014;345(6204):1558–60.
- [22] Sowińska-Świerkosza B, Garcibaj J. What are nature-based solutions (NBS)? Setting core ideas for concept clarification. Nature-Based Solutions 2022; 2: 100009.
- [23] Li YJ, Wang P, Xiao RB. International experience in territorial ecological restoration and its implementation path in Guangdong Province. Acta Ecol Sin 2021;41(19):7637–47. Chinese.
- [24] Hallett LM, Diver S, Eitzel MV, Olson JJ, Ramage BS, Sardinas H, et al. Do we practice what we preach? Goal setting for ecological restoration. Restor Ecol 2013;21(3):312–9.
- [25] Wu J. Landscape sustainability science: ecosystem services and human wellbeing in changing landscapes. Landsc Ecol 2013;28(6):999–1023.
- [26] Ying LX, Kong LQ, Xiao Y, Ouyang ZY. The research progress and prospect of ecological security and its assessing approaches. Acta Ecol Sin 2020;42(5): 1–14. Chinese.
- [27] Peng Y, Mi L, Qing FT, Feng JZ, Xue DY. Spatial scale effects of ecological factors on vegetation degradation—Helin case study. J Basic Sci Eng 2015; 23(S1): 11–9. Chinese.
- [28] Peng J, Zhao HJ, Liu YX, Wu JS. Research progress and prospect on regional ecological security pattern construction. Geogr Res 2017;36(3):407–19. Chinese.
- [29] Su C, Dong JQ, Ma ZG, Qiao N, Peng J. Identifying priority areas for ecological protection and restoration of mountains–rivers–forests–farmlands–lakes–grasslands based on ecological security patterns: a case study in Huaying Mountain, Sichuan Province. Acta Ecol Sin 2019;39(23): 8948–56. Chinese.
- [30] Zeng H, Chen LD, Ding SY. Landscape ecology. Beijing: Higher Education Press; 2017.
- [31] Zhang Y, Dong S, Gao Q, Liu S, Zhou H, Ganjurjav H, et al. Climate change and human activities altered the diversity and composition of soil microbial community in alpine grasslands of the Qinghai–Tibetan Plateau. Sci Total Environ 2016;562:353–63.
- [32] Lengefeld E, Metternicht G, Nedungadi P. Behavior change and sustainability of ecological restoration projects. Restor Ecol 2020;28(4):724–9.
- [33] Cao SX, Ma H, Yuan WP, Wang X. Interaction of ecological and social factors affects vegetation recovery in China. Biol Conserv 2014;180:270–7.