



渐进式生态修复理论

刘俊国*, 崔文惠, 田展, 贾金霖

南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055

* 联系人, E-mail: junguo.liu@gmail.com, liujg@sustech.edu.cn

2020-09-07 收稿, 2020-11-19 修回, 2020-11-20 接受, 2020-11-23 网络版发表

国家重点研发计划(2018YFE0206200)、国家杰出青年科学基金(41625001)和南方科技大学高水平专项(G02296302, G02296402)资助

摘要 生态修复是建设生态文明和实现可持续发展的重要途径. 发达国家学者多主张将生态系统修复至退化前状态, 这种模式在生态系统遭严重退化的地区短期内难以推广应用. 本研究提出了渐进式生态修复理论, 旨在充分考虑生态系统退化状况, 分阶段、分步骤地采取“环境治理、生态修复、自然恢复”的修复治理模式, 对受损生态系统进行循序渐进的修复. 该理论强调在生态监测的基础上, 科学选择参考生态系统, 并精准定位生态修复目标. 渐进式生态修复应当充分考虑气候变化影响, 面向“未来”进行修复, 而非修复“历史”. 这种修复模式需要厘清修复场地与流域/区域之间的关联与互馈关系, 坚持系统治理的思路; 也需要充分利用生态大数据, 发挥遥感、无人机等新技术作用. 同时, 渐进式生态修复需要明晰生态修复与居民生计和人类福祉之间的关系. 渐进式生态修复为全球生态系统保护和修复提供了重要理论.

关键词 渐进式生态修复, 自然恢复, 生态修复, 环境治理, 参考生态系统

生态修复是促进全球可持续发展的重要途径. 随着全球气候变化、生态系统退化、环境污染等问题日趋严重, 世界上很多生态系统的服务功能逐渐减弱. 生态修复有助于提高生物多样性, 改善人类健康和福祉, 保障粮食安全和饮水安全, 实现经济繁荣, 并增强生态系统的弹性以及适应性^[1,2]. 全球范围内生态修复研究的起源可以追溯到20世纪初欧美国家率先开启的自然资源保护、利用和生态修复活动^[3]. 20世纪30年代北美的“黑色风暴”敲响了美国和加拿大保护自然资源和生态环境的警钟, 两国随后开展了为期数十年的“北美大平原”的生态修复工程. 20世纪50年代开始, 地球资源的过度开发引发了严重的生态危机, 欧美国家开展了基于生物技术的矿山复垦、水土流失整治、森林恢复等措施, 取得一定成效^[4,5]. 20世纪70年代之后, 生态修复理论开始逐步建立. 1975年在国际上第一次专门讨论生态修复的会议上探讨了生态系

统退化以及修复的原理和特征等问题. 1987年, 国际恢复生态学学会(Society for Ecological Restoration, SER)在美国成立; 2002年, SER提出“生态恢复(ecological restoration)是协助已退化、损害或彻底破坏的生态系统恢复、重建和改善的过程”^[6], 界定了生态恢复的定义及基本原则. 2019年, SER发布了《生态恢复实践的国际原则与标准(第二版)》, 确立了生态恢复实践的八项原则^[7]. 修复和重建退化生态系统已经成为自然资源管理的重要途径, 是人类实现可持续发展目标的重要手段. 2019年, 联合国大会宣布2021~2030年为“生态系统恢复10年”, 将通过大规模地开展生态修复工作, 应对气候危机, 保障用水安全、粮食安全和生物多样性.

开展生态修复, 既是我国促进可持续发展的重大需求, 也是建设生态文明建设的重要举措. 自1978年改革开放至今, 我国的发展大致经历了3个阶段, 生态修复也

引用格式: 刘俊国, 崔文惠, 田展, 等. 渐进式生态修复理论. 科学通报, 2021, 66: 1014–1025

Liu J G, Cui W H, Tian Z, et al. Theory of stepwise ecological restoration (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 1014–1025, doi: 10.1360/TB-2020-1128

源于20世纪70年代末,并在每个阶段扮演了不同的角色(图1)。1978~2000年是我国的“经济优先”发展阶段。改革开放给中国带来了前所未有的发展,然而GDP的增长常以环境破坏为代价,生态环境问题日益突出^[8]。为了防治沙漠化和沙尘暴,1979年开始,我国在西北、华北和东北地区开启了为期70年的“三北防护林”工程。2000~2012年是我国从经济优先向生态优先的过渡阶段。日益严重的环境污染问题加大了政府对环境治理的重视程度。2000年,中国开始实行“退耕还林”、“退耕还牧”等政策,以应对水土流失和植被破坏等问题^[9],促进了生态修复科学研究和实践的发展。2012年以后,随着“生态文明”政策的提出和深入,中国的生态修复有了跨越式的发展,进入“生态优先”阶段。2017年起,原环境保护部和国家旅游局开始施行国家公园制度,开启资源保护与开发利用新模式^[10]。2020年,国家发展改革委员会、自然资源部联合印发了《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021~2035年)》。如何科学精准地实施生态修复工程,成为我国生态环境治理的关键问题和技术难题。

经过几十年的生态修复实践,中国以高达25%的贡献率引领了全球2000~2017年间绿地面积的增长^[11]。由于国家政府层面的高度重视,“山、水、林、田、湖、

草”生态修复工程逐渐从理论走向实践,相关论文以及报道数量迅猛增长(图1)。我国在退化生态系统的类型、分布、特点,生态系统退化机理、程度、诊断,以及退化生态系统恢复重建的机理、模式和技术等方面都开展了大量的研究^[9,12]。生态修复研究涉及的地域范围涵盖了从干旱区到湿润区,热带到寒带,平原到高原山地;生态系统类型多样,包括河流、湿地、森林、草地、农田、采矿废弃地等^[13]。同时,对生态系统退化典型的地区,如农牧交错带、喀斯特地区等,也有专门的探究^[14]。

虽然生态修复在中国已获得了高度重视,然而我国现阶段在生态修复理论以及工程实践方面的研究多聚焦在特定的生态系统类型,缺少具有普适性的生态修复理论。比如,针对河流生态系统,1999年刘树坤^[15,16]提出了“大水利”框架;2003年,董哲仁^[17]提出了“生态水工学”。针对城市生态系统的修复,俞孔坚^[18,19]提出利用生态基础设施来综合解决生态环境问题。另一方面,国外发达国家对生态修复的认识较早,并制定了相关政策、指南和标准,比如《恢复项目开发和管理指南》^[20]、《保护区的生态恢复:原则、指南和最佳实践》^[21]、《生态恢复实践的国际原则与标准(第二版)》^[7]等。目前,我国生态修复多借鉴国外发达国家

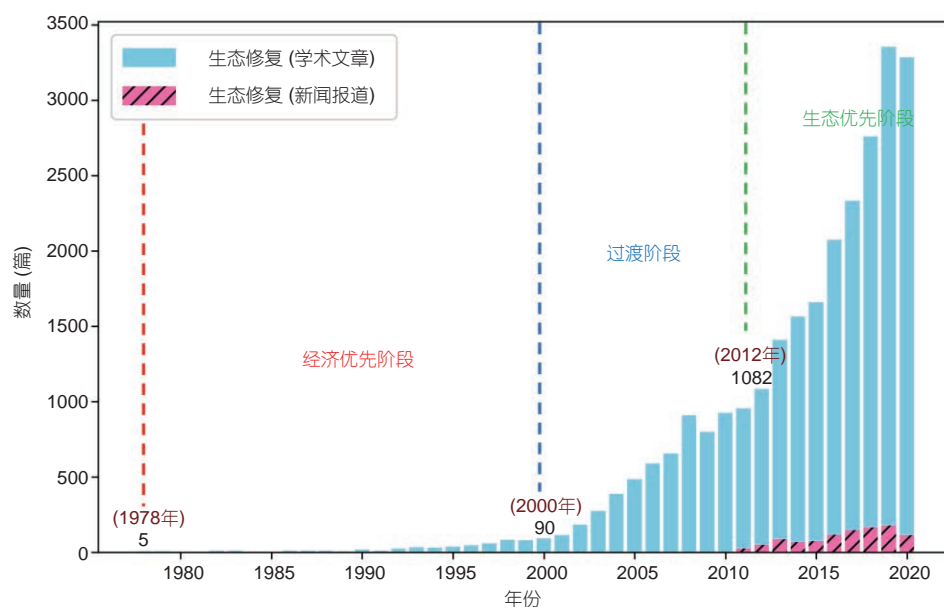


图1 (网络版彩色)以“生态修复”为“篇名、关键词、摘要”检索词,中国知网在3个阶段期间录用的论文数量(实心柱状图)以及以“生态修复”为主题词,中国知网在3个阶段期间相关新闻报道数量(阴影柱状图)。统计日期:2021-01-04

Figure 1 (Color online) Numbers of papers published at CNKI in three periods, searching with “ecological restoration” in the “title or key words or abstract” of the papers, as shown with the solid histogram; numbers of news published at CNKI in three periods, searching with “ecological restoration” as the subject, as shown with the shadow histogram. Retrieved on Jan. 04, 2021

的经验和理论,尚缺乏基于我国国情的系统的、全面的生态理论指导^[13]。但近年来,我国科学家开始尝试建立通用性的国际生态修复标准。例如,刘俊国和安德鲁·克莱尔^[2]提出了生态修复的执行标准,涵盖9项主要内容,要求生态修复项目在规划和实施阶段出具受损生态系统状态报告,确定参考模型,消除胁迫因子,改善场地环境状况等。这份标准被《生态恢复实践的国际原则与标准(第二版)》^[7]重点借鉴。

国外生态修复理论或准则强调对生态系统的自然恢复,进而达到生态系统的长期可持续性^[22]。然而,这种模式在生态严重退化地区以及经济落后或者技术不成熟地区短期内难以推广应用。并且,人类对植被和环境破坏的速度和强度已经远远超过了生态系统自然恢复的时间和能力^[23]。发达国家近自然式的恢复理论不一定符合我国当前的需要,生态修复目标的制定需要与中国社会经济发展实情相匹配。此外,开展生态修复需要确定一个或若干个环境和自然生态相似的本地原生生态系统作为参考生态系统^[13]。“参照模型”用来表征生态系统修复预期要达到的状态。尽管刘俊国和安德鲁·克莱尔^[2]在生态修复中重点强调了参照模型的重要性,但参照模型在我国生态修复实践中还很少被采用,再加上国内生态修复项目对监测重视不够,导致生态修复的效果很难评价^[2,24],也阻碍了对修复前后生态系统结构和功能的深层理解^[25]。

针对生态修复研究和实践中存在的问题,本文提出了渐进式生态修复理论,根据生态系统退化程度,分阶段、分步骤地采取“环境治理、生态修复、自然恢

复”的修复治理模式。

1 渐进式生态修复理论

渐进式生态修复是在生态学原理指导下,充分考虑区域生态退化的历史条件和现实状况,在一定社会投资和技术水平约束条件下,分阶段、分步骤地采取“环境治理、生态修复、自然恢复”的修复治理模式,对受损生态系统进行循序渐进的修复和治理的方法。渐进式生态修复有助于确定在特定环境、社会、经济、技术约束条件下最适合的生态修复措施。渐进式生态修复主要包括3种生态修复模式(图2)。

1.1 环境治理

环境治理是针对遭重度破坏的生态系统而采取的预防与治理措施。环境治理是生态修复的前提。环境治理包括对地形地貌的整改、减少或去除土壤和水环境中的污染物、减少环境污染的驱动因素等。在环境污染非常严重的情况下,只有首先去除环境污染的影响,才能保障生态修复的顺利开展^[2]。比如,去除有毒污染物(包括重金属、农药和泄漏的石油等)、清除固体废弃物(包括垃圾、废弃的建筑材料和农田水渠瓦片等)、改良土壤以提高土壤的生产力、减少过量的营养物质流入水体、去除干扰生态系统恢复的动植物等都属于环境治理的范畴^[13,26-28]。

1.2 生态修复

生态修复是针对严重受损的生态系统采取人工措



图2 渐进式生态修复,对受损生态系统进行循序渐进的修复和治理

Figure 2 Stepwise ecological restoration: Restore degraded ecosystems progressively

施将生态系统尽可能修复到某一参照状态的过程。生态修复的重点是在人工措施辅助下, 依靠生物修复、物理修复和化学修复等技术, 增加生态系统的服务功能, 并增加生物多样性和生态系统弹性^[29]。需要采取什么样的人工措施取决于生态系统的类型和生态系统的受损程度。在生态修复之前, 首先要根据退化程度和当前的限制条件确定修复目标, 并选择参考生态系统, 进一步决定所要采取的修复措施^[7]。常用的生态修复技术有植物、动物、微生物及其联合修复技术, 具体如补播、植被恢复、生态浮岛、生物塘、人工湿地、生态护岸、生境条件重建等^[30-33]。

1.3 自然恢复

自然恢复属于生态修复的更高级阶段。自然恢复是针对轻度退化的生态系统, 或通过生态修复措施生态系统状况得到很大程度改进后, 依靠生态系统的自我恢复能力, 实现生态系统的恢复。自然恢复是在生态修复取得一定效果后, 生态系统依靠自身能够维持其过程、功能和服务功能, 并朝着提高生物多样性、生态完整性和生态服务功能的方向发展^[2]。自然恢复强调生态系统重建原生生物种群, 包括物种组成和群落结构^[7]。完整而健康的生态系统具有生态弹性, 能抵御胁迫因子的不良影响, 在受到干扰后会迅速地自我恢复^[34]。

2 生态系统调查和监测——渐进式生态修复的基础

选择生态修复模式和参考生态系统, 需要以生态系统调查和监测为基础, 以人类干扰程度和生态系统受损程度为标准, 根据当地社会投资和技术水平来确定。生态系统调查和监测是实施渐进式生态修复的基础。提高生态系统调查和监测技术有利于更好地实践渐进式生态修复理论。

生态修复项目初期要编制基准条件数据库, 以确定生态系统的受损程度以及人类干扰的程度, 结合当地社会经济条件以及相关技术的情况, 明确修复目标, 并为修复后效果提供对照。基准条件数据库包括项目现场的物种组成和群落结构, 土壤、水文条件等环境现状, 导致生态系统受损的因素及其对生态系统的影响程度, 周围景观特征对项目场地生态功能的影响, 以及对生态系统功能受损的综合评估^[2]。

在生态修复项目开始时, 需要可量化的总体目标

和确定监测的具体目标。生态修复项目重点针对6类关键生态属性开展监测: 物理状况(如河流底质的物理化学性质、水量、水质等)、物种组成、结构多样性、生态系统功能、外部交换、生态退化胁迫因子等^[7,35]。涵盖以上6种关键生态属性的“生态恢复轮”可以辅助生态修复管理者和实践者记录不同阶段中生态系统属性的变化, 评估生态修复的程度, 跟踪生态修复的进程(图3)^[36]。整个监测计划应包括对基准条件进行抽样设计、监测实施、数据后处理、记录、归档和分析, 以及制定适应性管理战略^[37]。在生态修复项目开展期间, 邀请利益相关方一起参与项目设计、数据收集与分析, 有助于协助决策及加强与利益相关方的长期合作^[7]。当修复项目完成后, 仍然需要定期监测以检查生态退化是否会再次发生, 确保生态恢复的前期投入的有效性 & 修复效果的持续性^[2]。

3 明确生态修复目标和参考生态系统——渐进式生态修复的关键

在调查和监测的基础上明确修复目标和选择参考生态系统(或参照模型)是生态修复项目成功与否的关键环节^[7,38]。基于基准条件以及调查监测结果, 确定生态系统受损程度以及人类干扰程度, 并结合当地的社会、经济、技术等约束条件, 选择合适的生态修复模式和目标(图4)。若生态系统刚刚开始退化或者退化程度较轻, 此时可以自然恢复为主, 采用较少的干预将生态系统恢复到自身能够维持过程、功能和服务的状态; 若生态系统已经严重受损, 此时可以在人工措施的辅助下, 借助生态修复技术, 完善生态系统的功能, 提高生态系统弹性; 若生态系统受损程度极重并受到人类极强的干扰, 此时可以先针对污染破坏而采取一定的预防和治理措施, 以环境治理为主, 在系统功能逐步恢复后, 开始采用生态修复的措施, 并在条件成熟情况下逐步向自然恢复过渡。

生态修复目标应明确每个生态属性的恢复程度, 并在生态恢复项目启动前使用特定和可测量的指标来修复场地的生态属性^[7]。项目实施后也需监测相同的指标, 以评估所采用的干预措施是否有利于实现生态恢复目标。生态修复项目包括一个或多个目标, 并且目标会在项目进行期间根据实际情况进行调整或增减。渐进式生态修复理论将生态修复目标分为环境治理目标、生态修复目标和自然恢复目标(图4)。

生态修复还需要选择一个参照模型, 用于表征生

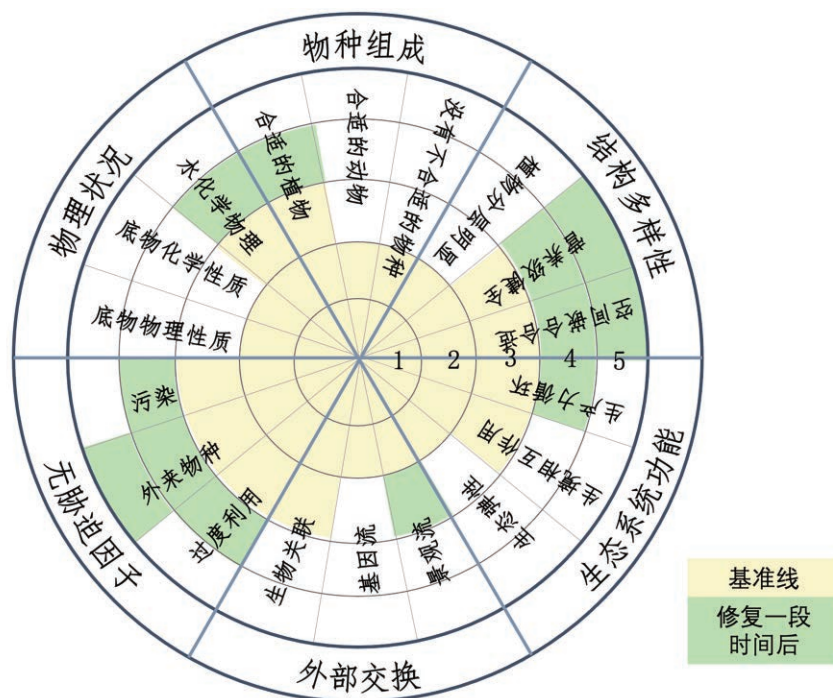


图 3 (网络版彩色)基于六类关键生态属性并用于评估修复效果的生态恢复轮^[7,36]。图的设计借鉴了文献[7,36]。数字1~5代表了与参照模型相比生态系统的修复程度,数字越高恢复程度越高

Figure 3 (Color online) The ecological recovery wheel based on six key ecological attributes^[7,36]. The figure is adapted from Refs. [7,36]. 1–5 are for conveying progress of recovery of ecosystem attributes compared to those of a reference model

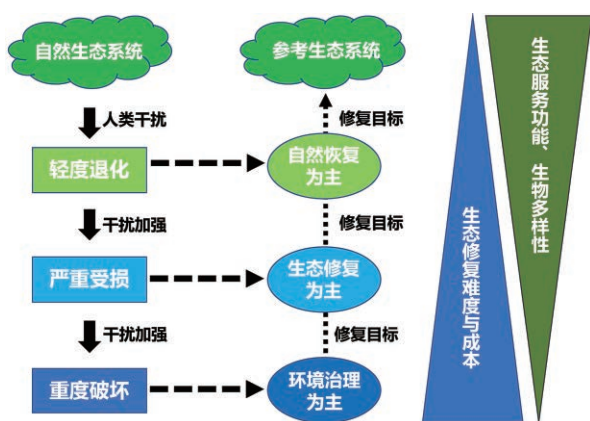


图 4 (网络版彩色)渐进式生态修复的模式与目标

Figure 4 (Color online) Modes and goals of stepwise ecological restoration

态系统修复预期要达到的状态。理想情况下,参照模型的状况需要和生态系统退化前的状况类似,如生物多样性(如动植物群)、非生物环境条件(如基质条件)以及与周边景观的相互作用等方面^[2,7]。在修复前,项目管理者需要对修复对象以及参考生态系统开展基准条件调查以确定二者存在的显著差异性条件,作为制定修

复策略和计划的依据。在选择参考模型时,实践者需要将各种胁迫因子纳入模型中,以评估胁迫因子对生态功能的潜在影响^[2]。

4 渐进式生态修复理论与其他理论的对比

国外对生态修复的认识要早于国内,比如Clewell等人^[20]提出生态修复并不是简单地恢复生态系统服务,强调其在恢复生物多样性中的重要性;Chazdon^[39]提出与自然共生,依靠自然自身的演替过程实现生态修复。我国现阶段在生态修复理论以及工程实践方面的研究多聚焦在特定的生态系统类型。比如针对河流生态系统,刘树坤^[15,16]于1999年提出了“大水利”理论框架,强调对水资源环境和生态功能的综合整治;董哲仁^[17]于2003年提出“生态水工学”,强调了生态学原理在水利工程中的应用。近几年,针对城市生态系统,俞孔坚^[18,19]提出采用生态学原理结合景观设计学方法进行城市防洪和雨洪管理,并提出利用生态基础设施来综合解决生态环境问题,进一步修复城市生态环境。2017年,刘俊国和安德鲁·克莱尔^[2]出版了《生态修复学导论》,系统阐述了生态修复可以实现的个人

价值、生态价值、社会经济价值和文化价值,并提出通过修复生态特征,协助生态系统回归健康轨道的生态修复理念。“生态特征修复”理念同时强调了利益相关方参与、生态修复目标、参照模型等在生态修复中的重要作用,对不同生态系统具有一定的普适性^[2]。

本文提出的集“环境治理-生态修复-自然恢复”于一体的渐进式生态修复理论,充分考虑当地经济社会发展状况以及技术约束条件,根据基准条件数据库确定生态修复目标,科学选定参考生态系统,制定最适合当地的修复模式和方案,对不同生态系统具有普适性,为发展具有中国特色的生态修复学提供了理论基础。本文提出的渐进式生态修复理论和其他理论的对比见表1。

5 渐进式生态修复理论的应用案例——深圳市河流的生态治理之路

近年来,由于深圳经济和人口爆发式增长,污水大量排入河流,超过了水体的自身承载能力,造成了严重的河流污染,生态系统退化严重。2010年开始,深圳市政府对全市河流开展了治污治水攻坚战,坚持“全面截污、雨污分流、全面清淤、修复生态、全面补水、活水保质”。渐进式生态修复理论已初步被应用到深圳市茅洲河、新圳河、西乡河等河流治理过程中,取得了一定成效。

在河流治理初期,通过对茅洲河、新圳河以及西乡河的环境基准条件进行了调查,在分析生态环境问题和研判退化机制的基础上,确定三条河流首先需要开展“环境治理”,并在“环境治理”的基础上进行“生态

修复”。通过沿河截污、河道整治、生态补水等一系列整治工作,河流水环境总体得到显著改善。利用基于基质材料的污染物光催化降解技术、超微净化黑臭河水旁路处理等环境治理技术,河流污染源得以控制和去除(图5)。

在环境治理措施取得一定效果后,植被修复、生态护坡等生态修复技术开始在河流修复中发挥重要作用,以完善生态系统结构,增强生态系统服务功能,提高生物多样性,实现了“生态修复”的目标(修复前后对比见图6)。由于深圳河流普遍面临严重的污染,消除黑臭水体是“十三五”期间治水提质的重点,自然恢复的模式还未在河流治理中得到广泛应用。但未来随着生态系统状况得到改进,河内动植物组成和群落结构不断完善,生物多样性、生态系统完整性和生态服务功能进一步提升,小部分河流生态系统的自我恢复能力会明显增强,生态弹性增加。当这些河段不依靠人工修复措施,仅依靠河流自身就能够维持健康的水文生态过程时,则可以重点以自然恢复为主。

6 渐进式生态修复的重要研究方向

6.1 充分考虑气候变化的影响

渐进式生态修复是个动态的过程,现代意义上的“恢复”旨在维持或恢复生物多样性和生态系统的组成、结构、功能和服务,以使生态系统适应不确定的未来,而不是将生态系统恢复到静态的过去状态^[29]。全球气候变暖是21世纪人类面临的最严重的挑战之一,

表1 生态修复相关理论/理念对比^{a)}

Table 1 Comparison among different ecological restoration theories

生态修复相关理论或理念	考虑的生态系统	是否强调分步骤的修复模式	修复目标的确定是否参考当地社会经济发展因素和退化情况	是否恰当使用参考生态系统	文献
以生物多样性恢复为本	全部	×	×	√	[20]
考虑面向未来的修复	全部	×	√	√	[40]
生态特征修复	全部	√	×	√	[2]
与自然共生	森林	×	×	√	[39]
环境治理,绿色发展	矿山农田	×	×	×	[41]
基于自然,让自然做功	城市	×	√	×	[19]
生态重建理论	全部	√	×	×	[23]
“大水利”理论	河流	×	×	×	[16]
生态水工学理论	河流	×	×	×	[17]
渐进式生态修复理论	全部	√	√	√	本研究

a) “√”代表“是”,“×”代表“否”



图5 (网络版彩色)环境治理技术。(a)超微净化一体化技术;(b)环境友好底质材料;(c)微纳米高级氧化技术。照片来源:深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司

Figure 5 (Color online) Environmental remediation technology. (a) Ultrafine purification integrated equipment; (b) environmentally friendly substrate materials; (c) nanometer advanced oxidation equipment. Pictures were provided by Shenzhen Shengang Industry-University-Research Environmental Protection Engineering Technology Co. LTD (IEREC)



图6 (网络版彩色)西乡河和新圳河修复前后对比。修复前和修复中的图片来自深圳市深港产学研环保工程技术股份有限公司;修复后的图片来自本文作者

Figure 6 (Color online) Photos before and after ecological restoration of Xixiang River and Xinzhen River, which were respectively provided by IEREC and the authors

对生态系统产生了深刻影响^[42,43]。在全球变化的背景下,将生态系统恢复到参考模型所表征的历史状态不太容易,甚至不可能。墨守成规地坚持对生态系统进行历史条件的恢复是不合理的,参考生态系统的选择必须将气候变化对修复实践的影响考虑在内,制定相宜的适应性管理策略,修复“未来”而非修复“历史”^[44,45]。比如,成功的河流修复应该创造适宜的水文、地貌和生态条件,不仅仅要恢复到退化前的状态,而且需要增加河流生态系统的弹性和可持续性,使其能够从外界环境变化(如极端降雨事件引发的洪水)中恢复,并更好

地在不确定的未来条件下持续存在^[46]。因此,气候变化背景下如何实施渐进式生态修复成为未来一个重要的研究方向。

6.2 考虑独立修复单元与流域/区域之间的关联与互馈关系

早期的生态修复技术常针对单独的修复单元,如湖泊、河段等,其措施缺少全局性、长久性的考量。渐进式生态修复强调采用系统的方法开展生态修复与保护。未来的生态修复项目应当以系统的眼光来看待,将

山、水、林、田、湖、草等修复单元有机结合^[47]。作为系统的不同组成部分,各修复单元是有关联的。比如以水为介质的流域,上、中、下游有着不同的生态系统^[48],不同修复单元会随着水流关联起来。未来应当结合生态学的分布格局、种间关系、生态位、群落演替等原理^[49],构建系统性的生态修复技术。在局地尺度开展修复技术的同时,在流域和区域尺度上统筹“山、水、林、田、湖、草”治理,提高生态系统的服务功能和保护生物多样性,最终达到生态修复的目的^[50]。如何考虑独立修复单元与流域/区域之间的关联与互馈是顺利开展渐进式生态修复的一个关键科学问题。

6.3 充分利用生态大数据

生态大数据是融合了地域性、季节性、多样性、周期性等特征后产生的来源广泛、类型多样、结构复杂的数据^[51]。搜集、分析生态数据,集成统筹技术,在未来实施渐进式生态修复项目中至关重要^[52]。渐进式生态修复需要充分研究物理状况(如河流底质的物理化学性质、水量、水质等)、物种组成、结构多样性、生态系统功能、外部交换、生态退化胁迫因子等关键生态属性的特点。同时,也需要利用实地监测、卫星遥感、无人机监测、实验室试验、云计算等多种技术与方法^[53],整合不同部门、不同气候区域的历史文献、统计资料,开展大气-水-植被-土壤不同生物圈的大数据分析。基于生态大数据从不同时空维度进行生态监测和评估^[54],是成功实施渐进式生态修复的重要基础。

6.4 发挥卫星遥感、无人机等新技术作用

在中国以往的生态修复工程中,卫星遥感技术不仅用于监测土壤侵蚀、生态环境破坏的状况^[55],评估退耕还林还草项目中植被的生长状况^[56],监测水土保持综合治理各项措施的数量和质量^[57],还被成功应用到水生态管理领域^[58,59]。与地面监测相比,卫星遥感可节省大量人力、物力和时间,更容易获得范围广泛的监测结果^[57]。遥感技术不仅可以帮助项目人员从区域尺度掌握生态环境的特征,而且根据获得的连续时间序列的空间影像,有利于阐释环境问题的根源、演变以及污染物的迁移过程。另外,无人机具有成本低、操作简单、数据获取便捷、搭载平台多样、数据质量高等优势,逐渐成为科学研究、工程设计、抢险救灾、环保督察等的重要辅助手段之一。利用无人机搭载多光谱相机,可以快速获取高精度、高分辨率和高时效

的场地信息,并以此为基础构建三维模型,辅助生态修复工程^[60]。借助无人机航拍,还可以对某些关键修复区域进行重点调查,获取更多细节信息,如对项目区域的地形、坡度、道路系统以及配套设施进行无人机航测,评估项目治理的现状,实施适应性管理。无人机在水土保持、地址灾害调查、土地整治项目、土地监测等方面发挥了极大的优势,其在生态修复方面的应用是未来的趋势所向^[61]。随着传感器技术的提升,高空间分辨率卫星以及多光谱或者高光谱探测器越来越普及,无人机遥感等技术越来越先进。在未来的渐进式生态修复中,需要发挥卫星遥感、无人机等新技术作用,开展更大范围的、动态的“天-地-空-水”生态监测,辅助生态修复工程的实施。

6.5 明晰生态修复与居民生计和人类福祉之间的关系

趋紧的资源约束、严重的环境污染和生态系统退化是制约我国当前社会经济可持续发展的主要问题^[62]。随着人口的增长与全球气候变化,我国生态脆弱区贫困化与环境保护的矛盾日益突出,探索生态脆弱区如何摆脱“贫困陷阱”、实现生态保护与社会经济可持续发展,是地球圈层人类环境和生态系统脆弱性和恢复力等相关研究的关键科学问题之一^[63,64]。一方面,生态修复可以提升生态系统的水源涵养、水土保持和生物多样性等功能,为人类获取清洁水源、安全食品以及多样的基因等提供了保障,从而促进人类福祉的提升^[65,66]。另一方面,部分研究表明在生态脆弱地区,生态修复工程导致了失业率的增加以及居民收入的减少,当地居民的生计无法得到保障,贫困增加^[67,68]。在今后的生态修复活动中,科学地选择优势物种,优化生态修复配置模式,结合绿色企业的发展,探索消除贫困的模式,推动流域上下游或者跨流域之间的生态补偿,改善生态脆弱区居民的生产生活,是成功生态恢复的前提条件^[69,70]。另外,在变化环境下,脆弱生态系统受到人类活动和气候变化双重作用,居民生计和生态修复之间的耦合关系需要哪些方面的调整?渐进式生态修复强调根据当下社会经济情况和生态系统状况来动态选择修复目标并制定相应的修复措施,对以上问题的回答将有利于促进渐进式生态修复理论的有效实践,实现生态修复的效益最大化,达到生态保护和社会经济发展的双赢模式,实现山水林田湖草的生态修复与人类福祉和可持续发展的良性互动。

参考文献

- 1 Aronson J, Alexander S. Ecosystem restoration is now a global priority: Time to roll up our sleeves. *Restor Ecol*, 2013, 21: 293–296
- 2 Liu J G, Clewell A. Management of Ecological Rehabilitation Projects (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017 [刘俊国, 安德鲁·克莱尔. 生态修复学导论. 北京: 科学出版社, 2017]
- 3 Vaughn K J, Porensky L M, Wilkerson M L, et al. Restoration ecology. *Nat Educ Knowl*, 2010, 3: 66
- 4 Brenner F J. Restoration of Natural ecosystems on surface coal mine lands in the northeastern United States. *Stud Environ Sci*, 1984, 25: 211–225
- 5 Laestadius L, Buckingham K, Maginnis S, et al. Before Bonn and beyond: The history and future of forest landscape restoration. Rome, 2015, 66: 11–18
- 6 Society for Ecological Restoration Science and Policy Working Group. The SER Primer on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration, 2002, www.ser.org/
- 7 Gann G D, McDonald T, Walder B, et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restor Ecol*, 2019, 27(S1): S1–S46
- 8 Hu C H, Zhu D, Wang Q, et al. Eco-city construction and sustainable development (in Chinese). *Environ Sci Technol*, 2005, S1: 157–159 [胡春华, 朱丹, 汪茜, 等. 生态城市建设与可持续发展. 环境科学与技术, 2005, S1: 157–159]
- 9 Yi X, Bai C Q, Liang L W, et al. The evolution and frontier development of land ecological restoration research (in Chinese). *J Nat Resour*, 2020, 35: 37–52 [易行, 白彩全, 梁龙武, 等. 国土生态修复研究的演进脉络与前沿进展. 自然资源学报, 2020, 35: 37–52]
- 10 He S, Su Y, Wang L, et al. Taking an ecosystem services approach for a new national park system in China. *Resour Conserv Recycl*, 2018, 137: 136–144
- 11 Chen C, Park T, Wang X, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain*, 2019, 2: 122–129
- 12 Cui B S, He Q, Gu B H, et al. China's coastal wetlands: Understanding environmental changes and human impacts for management and conservation. *Wetlands*, 2016, 36(S1): S1–S9
- 13 Fu Z Y, Ma Y D, Luo M, et al. Research progress on the theory and technology of ecological protection and restoration abroad (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 9008–9021 [付战勇, 马一丁, 罗明, 等. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. 生态学报, 2019, 39: 9008–9021]
- 14 Tong X, Brandt M, Yue Y, et al. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nat Sustain*, 2018, 1: 44–50
- 15 Liu S K. Discussion on China's macro-water resources development in the 21st century (in Chinese). *China Water Resour*, 1999, 9: 16–17 [刘树坤. 21世纪中国大水利建设探讨. 中国水利, 1999, 9: 16–17]
- 16 Liu S K. Liu Shukun's visiting report in Japan: Environmental remediation and ecological restoration of river ecosystem (in Chinese). *Haihe Water Resour*, 2002, 5: 64–66 [刘树坤. 刘树坤访日报告: 河流整治与生态修复. 海河水利, 2002, 5: 64–66]
- 17 Dong Z R. Theoretical framework for eco-hydraulics (in Chinese). *J Hydr Eng*, 2003, 1: 1–6 [董哲仁. 生态水工学的理论框架. 水利学报, 2003, 1: 1–6]
- 18 Yu K J. Green infrastructure through the revival of ancient wisdom (in Chinese). *Landsc Arch Front*, 2018, 6: 6–11 [俞孔坚. 复兴古老智慧, 建设绿色基础设施. 景观设计学, 2018, 6: 6–11]
- 19 Yu K J. Work with and by nature: The essence of territorial spatial planning and ecological restoration (in Chinese). *Landsc Arch Front*, 2020, 8: 6–9, 4–5 [俞孔坚. 基于自然, 让自然做功: 国土空间规划与生态修复之本. 景观设计学, 2020, 8: 6–9, 4–5]
- 20 Clewell A, Rieger J, Munro J. Guidelines for Developing and Managing Ecological Restoration Projects. 2nd ed. Washington DC: Society for Ecological Restoration International, 2005
- 21 Keenleyside K, Dudley N, Cairns S, et al. Ecological Restoration for Protected Areas: Principles, Guidelines and Best Practices. Gland: International Union Conservation of Nature, 2012
- 22 Crouzeilles R, Ferreira M S, Chazdon R L, et al. Ecological restoration success is higher for natural regeneration than for active restoration in tropical forests. *Sci Adv*, 2017, 3: e1701345
- 23 Zhang X S. Ecological restoration is the core of ecological civilization (in Chinese). *Sci Sin Vitae*, 2014, 44: 221–222 [张新时. 生态重建是生态文明建设的核心. 中国科学: 生命科学, 2014, 44: 221–222]
- 24 Ye C, Li C H, Yu H C, et al. Study on ecological restoration in near-shore zone of a eutrophic lake, Wuli Bay, Taihu Lake. *Ecol Eng*, 2011, 37: 1434–1437
- 25 Suding K N. Toward an era of restoration in ecology: Successes, failures, and opportunities ahead. *Annu Rev Ecol Evol Syst*, 2011, 42: 465–487
- 26 Zhou K, Zhong X Y, Yu C R, et al. Water depth impact on nutrients re-release from sediment in Taihu River Channel (in Chinese). *Acta Sci Circumst*, 2020, 40: 597–603 [周锴, 钟小燕, 庾从蓉, 等. 太湖河道水深对底泥营养物质再释放过程的影响. 环境科学学报, 2020, 40: 597–603]

- 27 Zhao Y, Yao R H, Xu M, et al. Study on the practice and route of combating urban black-and-malodorous water body (in Chinese). *Environ Protect*, 2015, 13: 27–29 [赵越, 姚瑞华, 徐敏, 等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨. *环境保护*, 2015, 13: 27–29]
- 28 Sun L J, Qin Q, Song K, et al. The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: A review (in Chinese). *Ecol Environ Sci*, 2018, 27: 1377–1386 [孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展. *生态环境学报*, 2018, 27: 1377–1386]
- 29 Society for Ecological Restoration International Science and Policy Working Group. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International, 2004
- 30 Gao T M, Zhang R Q, Liu Z. Degradation mechanism and applicability of several rehabilitation techniques on Xilamuren Grassland (in Chinese). *Pratac Sci*, 2010, 27: 42–46 [高天明, 张瑞强, 刘昭. 希拉穆仁草原草地退化机理及各种修复技术的适用性. *草业科学*, 2010, 27: 42–46]
- 31 Xu J, Xu D Y. The application of water ecological restoration technology in stream remediation (in Chinese). *Chem Enterp Manage*, 2020, 20: 60–61 [徐军, 徐丹阳. 基于水生态修复技术在河道治理中的应用分析. *化工管理*, 2020, 20: 60–61]
- 32 Fan Q J. Application of bioremediation technology in urban water environment management (in Chinese). *Urban Roads Bridges Flood Control*, 2018, 10: 108–111 [范群杰. 生物修复技术在城市水环境治理中的应用. *城市道桥与防洪*, 2018, 10: 108–111]
- 33 Wang X L. Review of river restoration (in Chinese). *Water Resour Electr Power*, 2010, 36: 6–16 [汪秀丽. 浅议河流生态修复. *水利电力科技*, 2010, 36: 6–16]
- 34 Holling C S. Resilience and stability of ecological systems. *Annu Rev Ecol Syst*, 1973, 4: 1–23
- 35 Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, et al. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services. *Nat Commun*, 2018, 9: 4839
- 36 McDonald T, Jonson J, Dixon K W. National standards for the practice of ecological restoration in Australia. *Restor Ecol*, 2016, 24: S6
- 37 Nilsson C, Aradottir A L, Hagen D, et al. Evaluating the process of ecological restoration. *Ecol Soc*, 2016, 21: 41
- 38 Suding K N, Gross K L. *Foundations of Restoration Ecology*. Washington DC: Island Press, 2006
- 39 Chazdon R L, Bodin B, Guariguata M R, et al. *Partnering with Nature: The Case for Natural Regeneration in forest and Landscape Restoration*. FERI Policy Brief. Montreal: Center for International Forestry Research, 2017
- 40 Choi Y D. Theories for ecological restoration in changing environment: Toward ‘futuristic’ restoration. *Ecol Res*, 2004, 19: 75–81
- 41 Liu X R, Tan K Y, Huang Y Y, et al. *Ecological Restoration Theory and Practices* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2020 [刘晓瑞, 谭科艳, 黄园英, 等. 生态修复理论与实践. 北京: 地质出版社, 2020]
- 42 Harris J A, Hobbs R J, Higgs E, et al. Ecological restoration and global climate change. *Restor Ecol*, 2006, 14: 170–176
- 43 Fang J Y, Zhu J L, Shi Y. The responses of ecosystems to global warming (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 136–140 [方精云, 朱江玲, 石岳. 生态系统对全球变暖的响应. *科学通报*, 2018, 63: 136–140]
- 44 Hiers J K, Mitchell R J, Barnett A, et al. The dynamic reference concept: Measuring restoration success in a rapidly changing no-analogue future. *Ecol Restor*, 2012, 30: 27–36
- 45 Hanberry B B, Noss R F, Safford H D, et al. Restoration is preparation for the future. *J Forry*, 2015, 113: 425–429
- 46 Palmer M A, Bernhardt E S, Allan J D, et al. Standards for ecologically successful river restoration. *J Appl Ecol*, 2005, 42: 208–217
- 47 National Development and Reform Commission, Ministry of Natural Resources. *National Master Plan for Major Ecosystem Protection and Restoration Projects (2021–2035)* (in Chinese). 2020 [国家发展和改革委员会, 自然资源部. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划 (2021–2035年). 2020]
- 48 Gao J X. The exploration of essential theories about regional ecology (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2018, 63: 693–700 [高吉喜. 区域生态学核心理论探究. *科学通报*, 2018, 63: 693–700]
- 49 Cheng D B, Cai C F, Sun Y Y. Discussion on revegetation research of degraded ecosystem (in Chinese). *World For Res*, 2006, 19: 7–14 [程冬兵, 蔡崇法, 孙艳艳. 退化生态系统植被恢复理论与技术探讨. *世界林业研究*, 2006, 19: 7–14]
- 50 Gao J X, Zou C X, Wu D, et al. Regional ecosystem restoration by ecological regulation approaches (ERA) (in Chinese). *J Ecol Rural Environ*, 2017, 33: 1–6 [高吉喜, 邹长新, 吴丹, 等. 区域减压增效生态调控修复模式研究. *生态与农村环境学报*, 2017, 33: 1–6]
- 51 Fan J M, Xing Q, Ji D C, et al. The application of big-data in grassland restoration (in Chinese). *Grassl Pratac*, 2017, 29: 1–6 [樊俊梅, 邢旗, 纪大才, 等. 生态大数据在草原生态修复中的应用. *草原与草业*, 2017, 29: 1–6]
- 52 Perring M P, Standish R J, Price J N, et al. Advances in restoration ecology: Rising to the challenges of the coming decades. *Ecosphere*, 2015, 6: 131
- 53 Lester R E, Close P G, Barton J L, et al. Predicting the likely response of data-poor ecosystems to climate change using space-for-time substitution across domains. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 3471–3481
- 54 Devictor V, Bensaude-Vincent B. From ecological records to big data: The invention of global biodiversity. *Hist Philos Life Sci*, 2016, 38: 13
- 55 Cao Q, Wu J, Yu D, et al. The biophysical effects of the vegetation restoration program on regional climate metrics in the Loess Plateau, China. *Agric For Meteorol*, 2019, 268: 169–180

- 56 Wang F, Pan X B, Gerlein-Safdi C, et al. Vegetation restoration in northern China: A contrasted picture. *Land Degrad Dev*, 2020, 31: 669–676
- 57 Wu X. The applications of remote sensing in the ecological restoration (in Chinese). *Survey Mapp Geol Min Resour*, 2020, 3: 53–54 [吴霞. 遥感技术在山水林田湖草生态修复的应用. *地矿测绘*, 2020, 3: 53–54]
- 58 Dai Y, Feng L, Hou X, et al. Policy-driven changes in enclosure fisheries of large lakes in the Yangtze Plain: Evidence from satellite imagery. *Sci Total Environ*, 2019, 688: 1286–1297
- 59 Feng L, Hou X, Zheng Y. Monitoring and understanding the water transparency changes of fifty large lakes on the Yangtze Plain based on long-term Modis observations. *Remote Sens Environ*, 2019, 221: 675–686
- 60 Librán-Embí F, Klaus F, Tschamtké T, et al. Unmanned aerial vehicles for biodiversity-friendly agricultural landscapes—A systematic review. *Sci Total Environ*, 2020, 732: 139204
- 61 Xie J L, Liu H F. Application of UAV remote sensing in ecological restoration (in Chinese). *Energy Sav Nonferrous Metall*, 2019, 35: 40–43 [谢金亮, 刘慧芳. 无人机遥感在生态修复中的应用. *有色冶金节能*, 2019, 35: 40–43]
- 62 Wang J, Zhong L N. Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grassland (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2019, 39: 8702–8708 [王军, 钟莉娜. 生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用. *生态学报*, 2019, 39: 8702–8708]
- 63 Cao S X, Xia C Q, Li W M, et al. Win-win path for ecological restoration. *Land Degrad Dev*, 2020, <https://doi.org/10.1002/ldr.3739>
- 64 Dou Y, Zhen L, Yu X, et al. Assessing the influences of ecological restoration on perceptions of cultural ecosystem services by residents of agricultural landscapes of western China. *Sci Total Environ*, 2018, 646: 685–695
- 65 Feng W L, Li S Z, Li C. Overview and frame work for ecosystem services and human well-being (in Chinese). *Resour Sci*, 2013, 35: 1482–1489 [冯伟林, 李树苗, 李聪. 生态系统服务与人类福祉——文献综述与分析框架. *资源科学*, 2013, 35: 1482–1489]
- 66 Fu B J, Yu D D, Lü N. An indicator system for biodiversity and ecosystem services evaluation in China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 341–348 [傅伯杰, 于丹丹, 吕楠. 中国生物多样性与生态系统服务评估指标体系. *生态学报*, 2017, 37: 341–348]
- 67 Weyerhaeuser H, Wen S, Kahrl F. Emerging Forest Associations in Yunnan, China: Implications for Livelihoods and Sustainability. IIED Small and Medium Forest Enterprise Series No. 13, International Institute for Environment and Development, Edinburgh, UK, 2006
- 68 Zhen N, Fu B, Lü Y, et al. Changes of livelihood due to land use shifts: A case study of Yanchang County in the Loess Plateau of China. *Land Use Pol*, 2014, 40: 28–35
- 69 Cao S, Zhong B, Yue H, et al. Development and testing of a sustainable environmental restoration policy on eradicating the poverty trap in China's Changting County. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2009, 106: 10712–10716
- 70 Peng J, Lü D N, Dong J Q, et al. Processes coupling and spatial integration: Characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology (in Chinese). *J Nat Resour*, 2020, 35: 3–13 [彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知. *自然资源学报*, 2020, 35: 3–13]

Summary for “渐进式生态修复理论”

Theory of stepwise ecological restoration

Junguo Liu^{*}, Wenhui Cui, Zhan Tian & Jinlin Jia

School of Environmental Science and Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

^{*} Corresponding author, E-mail: junguo.liu@gmail.com, liujg@sustech.edu.cn

The United Nations General Assembly declared 2021–2030 as the “Decade of Ecosystem Restoration”, which positions “the restoration of ecosystems as a major nature-based solution towards meeting a wide range of global development goals and national priorities”. Ecological restoration, when it was implemented effectively, contributes to improving food and water security, mitigating climate change, protecting biodiversity, boosting economic prosperity and benefiting human health and well-being. Thus, ecological restoration is fundamental for the success of ecological civilization and sustainable development.

Ecological restoration theories in developed countries usually require restoring the ecosystem to the status prior to degradation, and this requirement is difficult to achieve in regions with serious degradation, especially in developing countries. We developed a new theory of ecological restoration, or stepwise ecological restoration (STERE), which comprises three modes in different restoration stages: Environmental remediation in the initial stage with serious degradation, ecological rehabilitation for moderately degraded ecosystems, and natural restoration for slightly degraded ecosystems. Environmental remediation aims to reduce environmental pollution through the removal or detoxification of pollutants or excess nutrients from soil and water. Ecological rehabilitation is the process of assisting the recovery of an ecosystem that has been degraded, damaged, or destroyed through various physical, chemical and biological restoration strategies. Natural restoration aims to restore ecosystem functions and services and improve ecosystem resilience without much human assistance. Environmental remediation is fundamental and needs to be implemented prior to ecological rehabilitation and natural restoration in places where pollution is severe. Only the former is successfully carried out; however, when the ecosystem is moderately degraded, ecological rehabilitation can be effectively implemented. In places where the ecosystem is slightly degraded, natural restoration is recommended. The processes of ecological rehabilitation and natural restoration will result in ecological functions that are more complete, an increase in biodiversity, and improved ecosystem resilience.

For STERE, appropriate restoration goals should be formulated based on the degree of degradation, local funding support, and technological development. The new theory proposed in this study emphasizes the application of reference ecosystems in restoration projects and the importance of ecological monitoring. It also requires an adaptive restoration management framework that considers the influence of global climate change. STERE should be implemented for future ecosystems rather than only for restoring an ecosystem to a status similar to the condition prior to degradation. Moreover, STERE promotes systematic large-scale landscape restoration by considering the interactions between individual small scales (e.g., field scale) and large scales (e.g., catchment scale). In addition, technologies such as unmanned aerial vehicles and remote sensing should be more widely used in future STERE projects. Ecological restoration databases should be established for restorative activities in mountains, waters, forests, farms, lakes and other ecosystems. The newly proposed STERE theory would play an important role in developing restoration projects worldwide, especially in developing countries.

stepwise ecological restoration (STERE), natural restoration, ecological rehabilitation, environmental remediation, reference ecosystem

doi: 10.1360/TB-2020-1128