

DOI: 10.5846/stxb201905291110

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(23): 8702-8708.

Wang J, Zhong L N. Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grassland. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8702-8708.

生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用

王 军^{1,*}, 钟莉娜^{1,2}

1 自然资源部国土整治中心自然资源部土地整治重点实验室, 北京 100035

2 天津财经大学商学院, 天津 300222

摘要: 科学有效的理论基础是推进山水林田湖草生态保护修复工程顺利实施的保障。探讨了生态系统服务理论在山水林田湖草生态保护修复中的应用, 以“压力-状态-响应”为主线构建了不同时空尺度上山水林田湖草与生态系统服务之间的关系认知框架, 分析了山水林田湖草系统修复工程中生态系统服务研究的关键问题: (1) 山水林田湖草系统修复工程区主要生态系统服务的时空演变规律与驱动机制; (2) 山水林田湖草系统修复工程区多种生态系统服务之间的权衡与协同关系; (3) 山水林田湖草系统修复工程区生态系统服务集成与生态系统管理策略; (4) 山水林田湖草系统修复工程调控及其尺度效应; (5) 探索优质生态产品价值实现机制, 阐述了生态系统服务理论在山水林田湖草系统修复中的现实意义, 以期有效推动山水林田湖草生态保护修复工程从科学到实践的深入。

关键词: 山水林田湖草; 生态系统服务; 生态保护与修复

Application of ecosystem service theory for ecological protection and restoration of mountain-river-forest-field-lake-grassland

WANG Jun^{1,*}, ZHONG Lina^{1,2}

1 Land Consolidation and Rehabilitation Center, Key Laboratory of Land Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035, China

2 Business School, Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China

Abstract: A theoretical basis guarantees the smooth implementation of ecological protection and restoration projects of mountain-river-forest-field-lake-grassland. This paper discusses the application of ecosystem service theory in mountain-river-forest-field-lake-grassland ecosystem conservation and restoration. A cognitive framework of the relationship between mountain-river-forest-field-lake-grassland and ecosystem services on different spatial and temporal scales was established based on the principle of “pressure-state-response”, and the key issues of ecosystem services research in mountain-river-forest-field-lake-grassland system restoration projects were analyzed. The key issues were as follows: (1) spatial-temporal evolution and driving mechanisms of major ecosystem services in mountain-river-forest-field-lake-grassland project areas. (2) Trade-offs and synergy among various ecosystem services in mountain-river-forest-field-lake-grassland project areas. (3) Strategies of ecosystem service integration and ecosystem management in mountain-river-forest-field-lake-grassland project areas. (4) Regulation strategy and scale effect of mountain-river-forest-field-lake-grassland ecosystem rehabilitation projects. (5) Exploration of the value realization mechanism of high-quality ecological products. The results of this study

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41771207)

收稿日期: 2019-05-29; 修订日期: 2019-09-09

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangjun@lrcr.org.cn

will promote the translation of science to practice, and the application of ecological protection and restoration projects of mountain-river-forest-field-lake-grassland.

Key Words: mountain-river-forest-field-lake-grassland; ecosystem services; ecological protection and restoration

随着人口增加和社会经济发展,人类对自然生态系统的控制力不断提高,强烈干预生态系统的结构和功能、过度消费生态系统服务^[1],人类对生态系统的负面影响逐渐扩大,全球出现了严重的生态破坏与环境污染问题^[2]。生态系统退化使人类从生态系统中得到的收益减少,即生态系统服务降低,不仅危及了当代人类社会的福祉,也对后代从生态系统中获得的收益产生了影响^[3]。生态系统的不断恶化引起了国内外专家学者和政府部门的广泛关注,先后提出并实施了一系列科学研究计划,如联合国千年生态系统评估计划(MA, Millennium Ecosystem Assessment)、生物多样性和生态系统服务政府间科学—政策平台(IPBES, Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services)、未来地球计划(Future Earth)等。2019年5月发布的《IPBES评估报告》指出迄今为止,人类活动已使超过75%的陆地环境发生严重改变,人类和所有其他物种赖以生存的生态系统健康状况正在以前所未有的速度恶化。生态系统服务已成为国际生态学和相关学科研究的热点与前沿问题^[4-5]。

资源约束趋紧、环境污染严重、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。为扭转生态环境恶化的趋势,满足人民群众对良好生态环境的需求,党的十八大做出“大力推进生态文明建设”的战略决策,第十三届全国人民代表大会将“生态文明建设”写入宪法,把生态文明建设纳入中国国家发展总体布局。近年来,生态文明建设成效明显,但由于对生态系统各要素之间的流动性、区域内社会经济与环境的协调性、生态系统的整体性认识不到位等原因,生态文明建设推进过程中存在规划缺乏统一性、系统性和整体性,相关部门各自为战等问题^[6]。为此,习近平总书记提出了山水林田湖草是一个生命共同体的理念和思想^[7-9],为如何系统推进生态文明建设提供了根本指引。

山水林田湖草生态保护修复工程项目内容繁杂、工程量巨大,涵盖了矿山生态系统修复治理、水环境综合治理、农田整治、退化污染土地修复治理、森林草原生态系统修复治理、生物多样性保护等多种类型^[10]。强有力的理论基础是山水林田湖草生态保护修复工程顺利实施的保障。生态系统服务是连接人与自然之间的桥梁,生态系统服务与人类福祉之间存在着密不可分的关系^[11]。以整体和系统的方法来解决问题是生态系统服务理论的核心观点之一,这与“山水林田湖草是一个生命共同体”思想的主旨不谋而合,因此将生态系统服务理论应用于山水林田湖草系统修复,采用整体和系统的方法进行生态修复是破解我国当前生态环境难题的有效措施。基于此,本文探讨了生态系统服务理论在山水林田湖草生态保护修复中的应用,以“压力-状态-响应”为主线建立了不同时空尺度上山水林田湖草与生态系统服务之间的关系认知框架,分析了山水林田湖草系统修复工程中生态系统服务研究的关键问题,提出了生态系统服务理论在山水林田湖草修复中的现实意义,以期有效推动生态系统服务理论在山水林田湖草生态保护修复工程中从科学到实践的深入。

1 生态系统服务与山水林田湖草系统修复的关系

1.1 生态系统服务理论

生态系统服务是生态系统提供的产品和服务的总称,是人类直接或间接从生态系统中得到的惠益,是连接生态系统功能与人类福祉的重要纽带,包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务4种类型^[12]。供给服务是指人类从生态系统中获得的各种产品,比如食物、纤维、水和各种生物资源等;调节服务是指人类从生态系统过程的调节作用中获得的惠益,例如气候调节、空气净化及侵蚀控制等;文化服务是指通过丰富精神生活、发展认知、大脑思考、美学欣赏和休闲娱乐等方式,而使人类从生态系统中获得的非物质收益;支持服务是指生产其他生态系统服务所不能或缺的服务,如初级生产、养分循环和形成土壤等^[13-14]。

(1) 生态系统服务价值及其权衡与协同

生态系统服务价值一般情况下采用货币单位来衡量。欧阳志云等将生态系统服务价值划分为4类:直接利用价值主要指生态系统产品所产生的价值;间接利用价值主要指无法商品化的生态系统服务的价值;选择价值是指人们为了将来能直接利用和间接利用某种生态系统服务的支付意愿;存在价值是指人们为确保生态系统服务继续存在的支付意愿,是生态系统本身具有的价值^[15]。可以采用市场价值法、替代市场价值法、假象市场价值法等方法对生态系统服务价值进行评估。

当人们消费某一种或某几种生态系统服务时,就会有意或无意地对其他生态系统服务的提供产生影响,随即产生生态系统服务的权衡与协同问题^[16]。当某一种生态系统服务的增加引起了另外一种生态系统服务的减少时,则产生了权衡;当某一种生态系统服务由于另一种生态系统服务的增加而增加时,则产生了协同^[14,17]。通常供给服务的增加会导致调节服务、文化服务及生物多样性的降低,例如在山地农业区,粮食产量的提高往往伴随着生物多样性的降低和水土流失风险的增加。在自然资源短缺日益突出的背景下,不能仅仅追求一种生态系统服务的收益,必须同时考虑多种生态系统服务,才能实现生态系统服务总价值的最大化。研究生态系统服务的权衡与协同问题是进行生态系统服务管理的前提^[18]。

(2) 生态系统服务集成

不同的生态系统服务之间存在着十分复杂的权衡与协同关系,单独研究一种或几种生态系统服务之间的权衡与协同关系无法系统的揭示多种生态系统服务之间的关联特征^[19-20]。生态系统服务集成研究是通过权衡不同生态系统服务之间的关系,采用科学的方法集成多项生态系统服务,从而实现生态系统服务的整体优化^[16]。生态系统服务集成研究的重点是探索不同生态系统服务之间的关系并进行优化,其结果可以为生态系统管理决策提供科学依据。生态系统服务集成研究的一般思路为:①分析不同生态系统服务之间的相互作用及其时空变异特征,探讨不同情境下的生态系统服务集成方法;②构建生态系统服务的集成模型,实现区域多种生态系统服务的集成;③分析区域生态系统服务的动态演变及其空间分异规律;④发展区域生态系统服务的空间表征方法,进行区域生态系统的管理^[21]。

(3) 生态系统管理

生态系统管理是在对生态系统组成、结构和功能过程充分理解的基础上,以恢复或维持生态系统整体性和可持续性为目标,利用生态学、经济学、社会学和管理学原理,制定的一系列适应性的管理措施以及与此有关的政策、制度、教育、规章和公众行为的总称^[22]。生态系统管理的实质是协调人与自然的矛盾,使人类活动遵从自然发展的规律,促进人类社会与自然的和谐、可持续发展^[23]。生态系统管理策略制定的关键是如何协调不同尺度上多种生态系统服务之间的权衡与协同关系和生态系统服务集成。生态系统服务是生态系统管理的核心^[24]。开展生态系统管理需要紧密结合经济子系统、社会子系统和生态环境子系统,着眼于系统整体的互利互动和协调一致,采用法律、教育、经济和行政手段扭转生态环境恶化的趋势,保护和合理利用资源。

(4) 生态系统服务的尺度效应

生态学中的“尺度”既包括空间尺度(生态系统面积的大小),又包括时间尺度(生态系统动态的时间间隔)。尺度效应分析主要是评价和理解尺度变化对研究结果的影响^[25],如随着尺度增加而造成景观格局的简单化、景观多样性的降低、优势生态系统服务的转移等。生态系统服务具有较强的尺度依赖性,某一尺度上得到的概括性结论必须经过尺度转换研究才能推广到另外一种尺度上应用,任何离开尺度的生态系统服务研究都是没有意义的。在进行尺度转换时,必须要先分析地理现象与过程的尺度特征与变化规律,抓住不同尺度上生态系统服务变化的主要影响因子,分析其尺度变化对生态系统服务的影响^[21]。

1.2 山水林田湖草系统修复与生态系统服务的关系认知

山水林田湖草系统修复工程是人类有目的改变土地利用和覆被变化的过程,通过改变景观数量和景观格局,影响生态系统的结构与功能,生态系统所提供的支持服务、调节服务、供给服务和文化服务及其权衡与协同关系也随之改变,最终影响人类福祉和人类生存环境与社会经济的可持续发展。在山水林田湖草系统修复

工程对人类福祉和可持续发展影响评估的基础上,从经济子系统、社会子系统和生态环境子系统 3 个方面提出合理的生态系统管理有效策略,通过山水林田湖草系统修复工程具体落实,使生态系统能够提供更多的优质生态产品。以生态系统服务为桥梁实现山水林田湖草与人类福祉和可持续发展之间的良性互动。以“压力-状态-响应”为主线构建了不同时空尺度上山水林田湖草生态保护修复工程与生态系统服务之间的关系认知框架(图 1)。

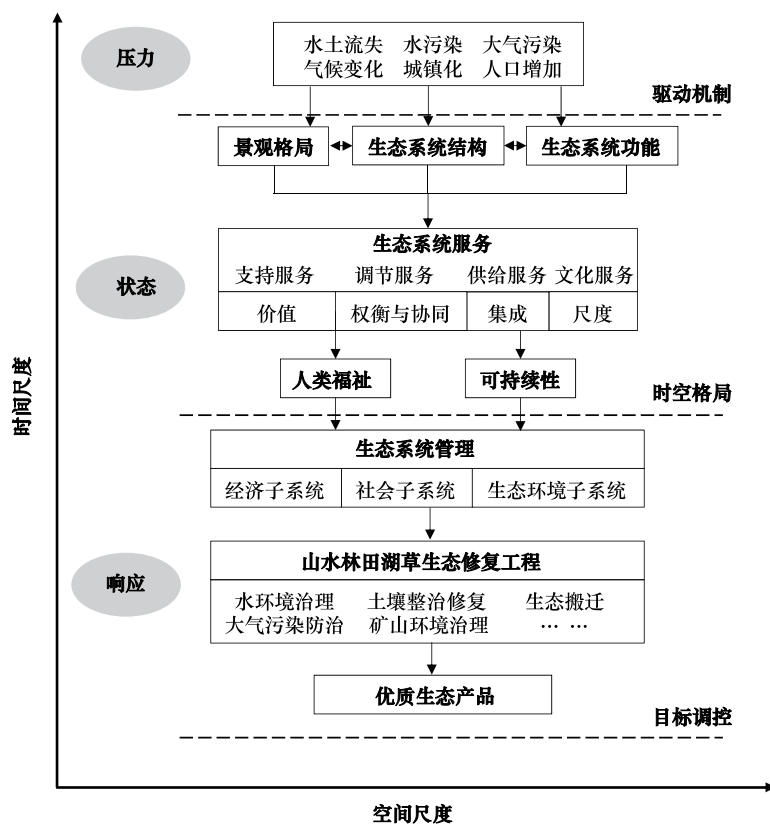


图 1 山水林田湖草生态保护修复工程与生态系统服务之间的关系认知框架

Fig.1 Cognitive framework of the relationship between ecological protection and restoration project of mountain-river-forest-field-lake-grassland and ecosystem services

2 “山水林田湖草生命共同体”对生态保护修复的内在要求

2.1 优化景观格局

景观格局是大小和形状各异的景观要素在空间上的排列和组合,包括景观组成单元的类型、数目及空间分布与配置。景观格局优化是构建生态网络的有效途径,能显著提升区域的生态安全^[26]。流域、区域等大尺度上的景观格局优化要关注生态系统的完整性和系统性。以往生态文明建设推进过程中对生态环境问题的治理往往存在“头疼医头,脚疼医脚”的现象,对生态系统的完整性和系统性认识不到位。“山水林田湖草是生命共同体”强调了区域复合生态系统中林地、草地、河流、湖泊、农田、湿地等景观要素之间相互依存、相互制约的关系,反映了山水林田湖草生态系统的整体性和系统性^[6],也就是要求生态保护修复工程设计和实施的时候要先了解各景观要素在区域复合生态系统中的作用、改变景观格局会对区域复合生态系统产生怎样的影响,进而按照生态学的基本原理,通过调整景观要素和景观格局,实现区域景观格局的优化。

另外,在山水林田湖草生态保护修复工程的规划设计中要整合景观的“斑块-廊道-基质”,加强景观综合管理方法的应用。通过生态廊道等方式沟通空间上分布较为孤立和分散的生态单元,充分发挥景观的自然和

人文美学功能,形成具有独特景观特征的“绿色生态带”。

2.2 构建仿自然生态系统结构

生态系统结构是生态系统的构成要素在空间上和时间上相对有序且稳定的状态^[27]。人类通过改变生态系统组成要素和格局的方式实现对生态系统结构的调控^[28]。传统的生态修复工程多采用混凝土、水泥、钢筋等材料,往往会造成生物多样性降低、景观异质性降低、生态系统遭到破坏等后果。随着人们回归自然、融入自然意识的增强,仿自然生态设计的理念在生态修复工程中的应用逐渐广泛。仿自然生态设计强调人与自然的可持续发展理念,以接近自然、模拟自然为手段构建结构合理、功能完善的自然生态系统结构。例如,在进行排洪水道设计时,要在保证排洪水道行洪与蓄水两方面要求的同时,在条件允许的情况下,恢复水道的凸岸、凹岸、浅滩等自然分布,并选择当地乡土的植物和石材、采用自然材料护坡,营造贴近自然的、适合动植物生长的生境,维护生态平衡和生物多样性^[29]。

2.3 改善和提升生态系统功能

生态系统功能是生态系统体现的各种功效或作用,主要包括物质循环、能量流动、信息传递以及生态系统本身的动态演化等方面。“山水林田湖草是生命共同体”生态保护修复工程的最终目的是扭转生态环境恶化的趋势,获得区域生态系统服务的最优化,使生态系统能够提供更多的优质生态产品以满足人民日益增长的生态环境需求,改善和提升区域的生态系统功能是其实现途径。

2.4 提高优质生态产品供给能力

我国人民消费正在升级,期待天更蓝、地更绿、水更清,提供更多优质生态产品已成为社会主义现代化建设的重要任务。提供优质生态产品的前提是有一个稳定、健康的生态系统。“山水林田湖草是生命共同体”生态保护修复工程通过调整和优化景观格局与生态系统结构、改善和提升生态系统功能,创建和维持生态系统的健康与稳定,以提升优质生态产品的供给,不断满足人民日益增长的美好生活需要。

3 山水林田湖草系统修复与生态系统服务研究的关键科学问题

围绕山水林田湖草与生态系统服务之间的关系认知框架,根据“山水林田湖草生命共同体”对生态保护修复的内在要求,结合目前山水林田湖草系统修复研究现状与存在问题,从生态系统服务的角度提出了山水林田湖草系统修复研究的几个关键科学问题。

3.1 山水林田湖草系统修复工程区主要生态系统服务的时空演变规律与驱动机制

分析山水林田湖草系统修复工程区的自然资源情况和社会经济情况,针对面临的主要生态环境问题选择其主要生态系统服务进行分析。结合长期野外监测数据、遥感监测数据和社会经济数据等,应用 InVEST、ARIES、SolVES 等模型对工程区的主要生态系统服务进行价值量评估,分析其近年来主要生态系统服务的时空演变规律,模型模拟和系统分析气候变化、城镇化、土地利用变化等自然和社会因素对主要生态系统服务的影响,确定主要生态系统服务变化的自然和社会驱动机制。目前大部分的山水林田湖草系统修复工程实施方案多是在分析区域生态环境问题的基础上提出相应的生态修复措施,取得了一定的成效,但对生态环境问题的产生机制仍不清楚,忽视了生态因子之间的相互作用及生态环境的整体性,难以取得效益的最优化。

3.2 山水林田湖草系统修复工程区多种生态系统服务之间的权衡与协同关系

进行生态系统服务的权衡与协同研究首先要对各项生态系统服务进行空间制图,判定不同生态系统服务在空间上的权衡与协同关系,对工程区尺度上的多种生态系统服务权衡与协同的空间分布进行量化描述。同时结合均方根偏差等统计分析方法对生态系统服务之间的权衡关系进行量化,分析影响生态系统服务权衡与协同关系的原因。例如,钟莉娜^[5]定量评估了建溪流域农用地整理对区域粮食生产、土壤保持和碳存储 3 种生态系统服务之间权衡与协同关系的影响并揭示了其主要影响因素,在此基础上提出了基于生态系统服务的农用地整理工程优化调控措施。

3.3 山水林田湖草系统修复工程区生态系统服务集成与生态系统管理策略

生态系统服务集成的前提是要对工程区的生态系统结构、过程和服务及多种服务之间的权衡与协同关系

有一个充分的了解,再在此基础上进行生态系统的集成与优化。采用应用统计学方法、地理信息系统等方法,建立地理-生态过程模型、区域综合模型等,通过模型模拟获得山水林田湖草等不同土地利用方式的最优面积比例、主要生态系统服务的承载边界和影响因素的最佳模拟值。结合影响因素的最佳模拟值、不同土地利用方式的最优面积比例、主要生态系统服务的承载边界和工程区的实际情况,从经济子系统、社会子系统和生态环境子系统 3 个方面提出合理的生态系统管理策略。在自然资本项目新开发的资源投资优化体系(The Resource Investment Optimization System, RIOS)的基础上,结合生态、社会和经济数据,确定生态系统修复的最佳位置与范围,在保证合理生态投资回报率的前提下提出山水林田湖草系统修复工程实施方案。

3.4 山水林田湖草系统修复工程调控及其尺度效应

根据生态系统管理策略制定山水林田湖草生态修复工程措施,通常包括水环境治理工程、土壤整治修复工程、大气污染防治工程、矿山环境治理工程和生态搬迁工程等等。在制定山水林田湖草生态修复工程措施时要考虑生态系统服务及其权衡关系的尺度效应,选择合适的尺度实施相应的生态修复工程措施,或是首先对生态修复工程区进行生态系统服务重要性评估和生态系统敏感性评估,识别影响区域安全、需要优先保护和修复的重点区域,然后对生态修复工程区进行细致分区,根据不同区的主要环境问题确定生态保护修复工程的内容。例如,拉萨河生态保护修复工程,以“保障拉萨河源头水质、截污限养求发展、封山育林治周边”为纲领,以拉萨河流域资源环境承载力为底线,根据拉萨河流域由东北向西南贯穿拉萨市的流域特点,结合拉萨河流域周边生物多样性分布、水土流失分布及矿山分布状况,构建了以“上游中下游及周边”三片区为主体的修护工程分区方案,三区分别为:上游水源涵养区、中下游环境综合整治区以及周边生态保护与修复区,重点推进水环境保护与整治、生物多样性保护、水土流失治理、矿山治理与修复等一系列生态建设工程。

3.5 探索优质生态产品价值实现机制

提供更多的优质生态产品是山水林田湖草系统修复工程的主要目的。基于生态环境监测、水文监测和气象监测以及遥感影像、社会经济统计数据等资料核算生态系统生产总值,从景观格局、生态系统结构、生态系统功能、制度政策设计等方面探讨优质生态产品价值实现机制。江西省依托贫困地区资源禀赋和发展条件,不断发展生态产业,促进生态产品价值转化,把绿水青山当作“第四产业”来经营,因地制宜开发优质生态产品,充分挖掘贫困地区农业生态、林下经济、旅游观光、文化教育等多种产业功能,整合“红、绿、古”资源,建设一批农旅结合、林旅结合的山水田园综合体,促进了优质生态产品的价值实现,使贫困地区人民步入“生态环境建设-摆脱贫困-生态系统功能提升-走向富裕”的良性循环。

4 生态系统服务理论在山水林田湖草系统修复中应用的现实意义

4.1 丰富了“山水林田湖草是生命共同体”的实践路径

“山水林田湖草是生命共同体”要求生态系统修复工程的实施必须要基于区域特征和存在的生态问题,因地制宜,着眼于整个生态系统,充分考虑各生态要素之间相互联系、相互制约、相互依存的特点,整合多种方法、多方力量修复生态系统功能,也就是生态系统修复工程要遵循系统性、整体性和区域性 3 个原则。生态系统修复工程的实施有正确的原则指引,但在具体实施时理论支撑不够。生态系统服务理论与“山水林田湖草是生命共同体”的系统性、整体性和区域性原则完全契合。基于生态系统服务理论可以识别多尺度研究区面临的生态环境问题,分析生态环境问题产生的原因,对研究区进行分区分尺度研究并提出具有针对性的“山水林田湖草是生命共同体”生态修复措施,丰富了“山水林田湖草是生命共同体”的实践路径,为“山水林田湖草是生命共同体”生态修复工程提供了强有力的理论支撑。

4.2 推动了人类福祉的实现和人与自然的和谐共生

人类福祉是一种人们正在享受的、有价值的体验^[12],包括维持高质量生活所需要的物质、健康良好的社会关系、安全、自由权和选择权 5 个方面^[30]。生态系统提供了几乎所有的人类福祉要素。生态修复工程通过修复和保护生态系统提高了生态系统服务,从而促进了人类福祉的提升。例如,生态修复通过改善生态系统

的水源涵养、生物多样性和文化景观等功能,提高了人类从生态系统中获得清洁的水、多样的基因和独特的风景等服务,从而对人类福祉产生了积极的作用^[11]。基于生态系统服务理论分析区域生态环境保护中面临的主要问题,并提出相应的“山水林田湖草是生命共同体”生态修复措施对于政府相关部门提出科学合理的生态系统管理策略、实现生态系统改善和人类福祉提升的共赢具有重要意义,是推动人与自然和谐共生与可持续发展的重要动力。

参考文献 (References):

- [1] 李双成. 生态系统服务地理学. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 王军, 钟莉娜, 应凌霄. 土地整治对生态系统服务影响研究综述. 生态与农村环境学报, 2018, 34(9): 803-812.
- [3] 赵军, 高超, 胡秀芳, 魏伟. 基于文献分析方法的生态系统服务研究热点、前沿与发展趋势分析. 中国农学通报, 2017, 34(34): 132-137.
- [4] 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(2): 341-348.
- [5] 钟莉娜. 农用地整理对区域生态系统服务的影响[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- [6] 邹长新, 王燕, 王文林, 徐德琳, 林乃峰, 李文静. 山水林田湖草系统原理与生态保护修复研究. 生态与农村环境学报, 2018, 34(11): 961-967.
- [7] 习近平. 关于《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》的说明. (2017-10-28)[2019-05-08]. <http://cpc.people.com.cn/xuexi/n/2015/0720/c397563-27331312.html>.
- [8] 李慧. 国家公园: 让绿色发展成为文化标识. 光明日报, 2017-07-29(012).
- [9] 新华社. 习近平出席全国生态环境保护大会并发表重要讲话. (2018-05-19)[2019-05-08]. https://www.cenews.com.cn/subject/2018/0516/a/201805/t20180519_874754.html.
- [10] 张惠远, 李圆圆, 冯丹阳, 郝海广. 明确内容标准 强化实施监管——山水林田湖草生态保护修复的路径探索. 中国生态文明, 2019, (1): 66-69.
- [11] 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(7): 1482-1489.
- [12] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: Current State and Trends. Washington, DC: Island press, 2005.
- [13] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, Farber S, Grasso M, Hannon B, Limburg K, Naeem S, O'Neill R V, Paruelo J, Raskin R G, Sutton P, van den Belt M. The value of the world's ecosystem services and natural capital. Ecological Economics, 1998, 25(1): 3-15.
- [14] Fu B J, Wang S, Su C H, Forsius M. Linking ecosystem processes and ecosystem services. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(1): 4-10.
- [15] 欧阳志云, 王如松, 赵景柱. 生态系统服务功能及其生态经济价值评价. 应用生态学报, 1999, 10(5): 635-640.
- [16] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. 资源科学, 2016, 38(1): 1-9.
- [17] Turner K G, Odgaard M V, Bøcher P K, Dalgaard T, Svenning J C. Bundling ecosystem services in Denmark: trade-offs and synergies in a cultural landscape. Landscape and Urban Planning, 2014, 125: 89-104.
- [18] Verhagen W, van der Zanden E H, Strauch M, van Teeffelen A J A, Verburg P H. Optimizing the allocation of agri-environment measures to navigate the trade-offs between ecosystem services, biodiversity and agricultural production. Environmental Science & Policy, 2018, 84: 186-196.
- [19] Li B Y, Wang W. Trade-offs and synergies in ecosystem services for the Yinchuan Basin in China. Ecological Indicators, 2018, 84: 837-846.
- [20] Galicia L, Zarco-Arista A E. Multiple ecosystem services, possible trade-offs and synergies in a temperate forest ecosystem in Mexico: a review. International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management, 2014, 10(4): 275-288.
- [21] 傅伯杰. 地理学综合研究的途径与方法: 格局与过程耦合. 地理学报, 2014, 69(8): 1052-1059.
- [22] 赵云龙, 唐海萍, 陈海, 秦向阳, 李新宇. 生态系统管理的内涵与应用. 地理与地理信息科学, 2004, 20(6): 94-98.
- [23] 袁吉有, 欧阳志云, 郑华, 徐卫华. 中国典型脆弱生态区生态系统管理初步研究. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(3): 97-99.
- [24] Ghazoul J. Recognising the complexities of ecosystem management and the ecosystem service concept. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society, 2007, 16(3): 215-221.
- [25] Gago-Ferrero P, Gros M, Ahrens L, Wiberg K. Impact of on-site, small and large scale wastewater treatment facilities on levels and fate of pharmaceuticals, personal care products, artificial sweeteners, pesticides, and perfluoroalkyl substances in recipient waters. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1289-1297.
- [26] 陆禹, 余济云, 罗改改, 陈彩虹, 余宇晨, 黎长青. 基于粒度反推法和 GIS 空间分析的景观格局优化. 生态学杂志, 2018, 37(2): 534-545.
- [27] Bueno-Pardo J, García-Seoane E, Sousa A I, Coelho J P, Morgado M, Frankenbach S, Ezequiel J, Vaz N, Quintino V, Rodrigues A M, Leandro S, Luis A, Serôdio J, Cunha M R, Calado A J, Lillebø A, Rebelo J E, Queiroga H. Trophic web structure and ecosystem attributes of a temperate coastal lagoon (Ria de Aveiro, Portugal). Ecological Modelling, 2018, 378: 13-25.
- [28] Karl D M, Church M J. Ecosystem structure and dynamics in the North Pacific Subtropical Gyre: new views of an old ocean. Ecosystems, 2017, 20(3): 433-457.
- [29] 满慧, 李飞. 无锡市基康里排洪渠“近自然”生态设计. 农业科技与信息(现代园林), 2010, (1): 33-36.
- [30] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Well-being: A Framework for Assessment. Washington, DC: Island Press, 2003.