

DOI: 10.5846/stxb202104291129

胡一帆,王浩,焦磊,张立伟,南维鸽,董治宝.青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系.生态学报,2022,42(18):7565-7576.

Hu Y F, Wang H, Jiao L, Zhang L W, Nan W G, Dong Z B. Evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration of major construction projects on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18): 7565-7576.

青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系

胡一帆,王 浩*,焦 磊,张立伟,南维鸽,董治宝

陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

摘要:青藏高原作为我国重要的生态屏障和战略资源基地,兼顾经济社会的发展和生态环境的保护,是当前区域发展的主要目标。为实现该目标,国家先后开展了多项推动当地经济发展的重大建设工程项目,并在项目开展的过程中,针对出现的生态问题,实施了一系列的生态修复措施。目前针对青藏高原重大建设工程生态修复的研究,在多工程类型修复效益的融合,以及宏观空间布局尺度上对生态修复成效的评估还相对较少,并且缺乏统一的评价标准。故本研究选取青藏高原道路、水电和矿产开发三类典型的重大建设工程,结合区域及工程特点,通过文献调研、业界专家咨询等方法手段,以生态修复后的生态系统结构、质量和服务为核心架构,筛选能够综合客观的反映该地区生态修复效益的具体指标,最终构建系统、合理和科学的青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系。该评估指标体系涉及生态系统结构、质量和服务三大指标类别,包括 10 个主题指标,21 个具体指标。以期为青藏高原重大建设工程生态修复效益的总体认知和长期监测,以及未来生态修复工程的制定、建设工程的布局及其他生态系统管理措施的实施,和未来生态修复评估的相关研究提供科学参考和理论支撑。

关键词:生态修复;综合效益;评估指标体系;青藏高原

Evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration of major construction projects on the Qinghai-Tibet Plateau

HU Yifan, WANG Hao*, JIAO Lei, ZHANG Liwei, NAN Weige, DONG Zhibao

School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

Abstract: The Qinghai-Tibet Plateau serves as a key ecological barrier and strategic resource base in China, and one of the most important goals of regional development on the plateau is to strike a balance between the needs of social and economic growth and ecological protection. This goal has been achieved through a series of major construction projects that have been carried out successively by the Chinese government to promote local economic development, as well as through the implementation of a series of ecological restoration measures that have been put in place to address the environmental issues that have arisen during the course of the project's development. At the moment, there are just a few studies on the ecological restoration of big construction projects on the Qinghai-Tibet Plateau. Studies on the integration of the restoration benefits of multiple construction project types, as well as the effectiveness evaluation of ecological restoration at a macro-spatial layout scale, are still relatively rare. Furthermore, there are still no regionally harmonized evaluation standards for evaluating the ecological restoration benefits of big construction projects in the region. For this reason, it is necessary to construct an index system for conducting a comprehensive assessment of the ecological impacts caused by the construction projects and the benefits resulting from the ecological restoration projects in the region from the perspective of the whole Tibetan Plateau.

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0403)

收稿日期:2021-04-29; 采用日期:2022-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: foreva@snnu.edu.cn

Therefore, this study selected three typical major construction projects of Qinghai-Tibet Plateau, including road works, hydropower projects, and mineral development projects, to develop a scientifically sound and systematic evaluation index system for the comprehensive benefits of ecological restoration associated with major construction projects in the region. The ecosystem structure, quality, and service provided by the ecosystem following ecological restoration served as the core framework for this indicator system. After taking into account the characteristics of the region as well as the construction and ecological restoration projects, specific indicators that could be used to measure the ecological restoration benefits of the region were identified through literature research, industry consultation, and other methods. Finally, a systematic, logical, and scientific index system for evaluating the comprehensive benefits of ecological restoration associated with significant building projects on the Qinghai-Tibet Plateau was constructed. The evaluation indicator system consisted of three indicator categories, ten thematic indicators, and twenty-one particular indicators. This study could provide scientific reference and theoretical guidance for overall cognition and long-term monitoring of the ecological restoration benefits of major construction projects in the Qinghai-Tibet Plateau. It could also be used to formulate future ecological restoration projects, plan the layout of construction projects, put in other ecosystem management measures, and conduct ecological restoration assessment studies in the future.

Key Words: ecological restoration; comprehensive benefits; evaluation index system; Qinghai-Tibet Plateau

青藏高原由于其在地形地貌、气候、水文和植被等方面的复杂性和特殊性,既是生态保护区也是生态脆弱区,更是我国重要的生态屏障区^[1-4]。自新中国成立以来,为推进当地的经济建设和社会发展,国家先后开展了以道路工程、水电工程以及矿产开发工程为主的多项重大建设工程项目,例如青藏铁路、川藏铁路等的建设,龙羊峡、李家峡水电站等的建设和玉龙铜矿、甲玛铜多金属矿等的开发^[5-7]。随着工程项目的建设和投入使用,在提高当地资源利用效率、推动经济发展的同时,也产生了一系列的生态环境问题。其中,以工程建设时大量的挖方填土、土地占用、废弃物堆放、引水开渠和大坝建设等活动所造成的地表植被和表土破坏、地形地貌改变、地表塌陷/崩塌、水土流失/侵蚀加剧、生态系统退化、生物多样性锐减、生境完整性被破坏、形成生态阻隔和环境污染等一系列问题最具代表性^[8-15]。为解决或改善工程建设所带来的生态环境压力,近十几年来,国家根据生态环境受损和被破坏的现状,结合当地社会发展情况,采取了一系列诸如地貌重塑、植被重建和边坡护理等有针对性的修复措施^[16-18]。同时,以国土空间修复规划为着手点,国家发改委对未来青藏高原地区经济、社会、生态发展提出需求,以全面提升青藏高原自然生态系统稳定性和服务功能、着力解决重点生态问题为目标,站在保障中华民族永续发展的战略高度,加强青藏高原生态保护和修复工作^[19]。因此,以第二次青藏科考的逐步开展为契机^[20],有必要对该区生态修复所产生的综合生态效益进行全面评估,这不仅能直观体现实施生态修复工程的效果,同时也可以为未来生态修复工程的制定、建设工程的布局及其他生态系统的管理提供科学参考和理论指导,促进区域生态质量和服务功能的稳步提升,助力青藏高原生态安全屏障的全面构筑。

生态系统具有复杂性和多样性,易受到环境变化和人类活动的影响^[21]。生态修复效益的影响绝不仅仅局限于某一个流域或者区域,也不会限定于某一个特定生态系统,所以有必要从青藏高原全局的角度来评估能源利用、环境安全及工程布局优化对区域生态修复工程效果的影响,从而为区域规划和管理提供参考。现有的针对重大建设工程生态修复评估的研究还比较薄弱,研究多集中于选定某个特定的典型区域,如澜沧江流域、青藏铁路沿线、长江源区等,或者多限定于对特定生态修复措施的效应评估方面,如对生态修复建植技术的对比分析、对恢复治理模式的评估等^[8,22-24]。这些研究的评估结果,有利于在实践中总结各类建设工程面临的生态问题,有助于进一步优化针对单一工程类型的生态修复措施。然而,目前针对青藏高原重大建设工程,从多工程类型修复效益融合和宏观空间布局尺度上对生态修复成效进行评估的研究还相对较少。

建立基于区域尺度的评估指标体系,是实现青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估的基础。现有

研究中评估指标的应用,多为对单一指标时空变化的分析或利用多指标对单一工程的评价,主要用于评估一些典型地区矿产、水电资源开发和道路建设等过程对当地生态环境的影响^[25-27],呈现出评估工程目标单一、评估指标对象单一、对区域布局优化或整体效益评估研究较为缺乏等问题。同时,出于自身研究需求的不同考量,研究中所涉及的评估指标往往仅侧重于某一领域,且因侧重点不同,各建设工程间相同修复措施的实施效果缺乏统一的评价标准。这些因素限制了对青藏高原区域内重大建设工程生态修复效益的总体认知和长期监测,不利于未来青藏高原区域内各建设工程的合理空间布局与生态风险管理。因此,针对青藏高原重大建设工程的生态修复综合效益,亟需构建科学、合理和系统的评估指标体系。

综上所述,本文基于对青藏高原区域内较为典型的重大建设工程的实地调查,结合区域及工程特点,通过文献调查分析、业界专家咨询等方法手段,以生态修复后的生态系统结构、质量和服务为核心构架,筛选出能够综合、客观反应该地区生态修复效益的具体指标,梳理构建青藏高原区域重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系。

1 研究区概况

青藏高原位于我国西南部(26°00'—39°47'N, 73°19'—104°47'E),包含西藏和青海全部、新疆、甘肃、四川、云南的部分,总计6省216个县,总面积约为250万km²,平均海拔4000m以上,有“世界屋脊”之称。青藏高原高山密集,落差极大,是我国众多大江大河的发源地,被誉为“亚洲水塔”^[28-29]。高原地区辐射强,日照多,气温日较差大,受西南季风影响,干湿分明,夏季多雨,冬季干冷,从西北到东南依次出现高寒荒漠、高寒草原、高寒草甸和森林等植被类型^[30]。

青藏高原作为亚洲水塔和我国重要的战略资源储备基地^[5],基于其特殊的地质条件,其水能资源和铜、金、铅、锌等重要矿产资源储量十分丰富^[31]。矿产开发工程主要分布在青藏高原的东北部和西南部(图1),集中分布在青海省和西藏自治区,开采矿种多集中在金矿、铁矿、铜矿、铅矿、煤矿和盐矿等,较为典型的有千万吨级的玉龙铜矿、都兰县跃进山铁矿等^[32];水电工程主要分布在青藏高原的东北部和东南部,集中位于雅鲁藏布江、怒江、澜沧江、黄河上游等主要的大江大河上,较为典型的有龙羊峡水电站、李家峡水电站等。为提高青藏高原地区与外界沟通,促进自身发展,道路建设也是青藏地区工程建设重中之重,自新中国成立以来,青藏高原地区陆续建设开通了青藏线、川藏线、滇藏线等多条重要的铁路公路,初步实现了青藏高原连接南北、贯通东西的目标。多项重大的建设工程,充分发挥和利用了青藏高原的自然优势,促进青藏高原地区的经济、社会发展及文化交流,但同时也对地区生态环境变化产生了深远的影响。因此,本文选择青藏高原的矿产、水电开发和道路建设工程作为重大建设工程的典型代表,建立评估工程建设过程中生态修复综合效益的指标体系。

2 指标体系的构建原则与方法

2.1 生态修复概念的界定

目前有关生态修复的相关研究较为丰富,针对不同的研究区域、目标和主题,对生态修复的概念有着不同的界定,在生态修复概念中强调的方面也不尽相同。本研究基于文献调研,对涉及生态修复概念的主要文献进行了梳理,具体结果见表1。有关生态修复的定义存在以下两方面的共同点,涵盖生态修复的方式和目标两部分。生态修复方式主要分为自然措施和人工措施两种:自然措施主要依靠生态系统的自组织和自调节能力;人工措施包含以生物修复为基础,结合物理修复、化学修复以及工程技术措施,进行适当的人为引导等方法。生态修复目标主要涵盖实现生态系统受干扰前的稳定状态、遏制生态系统进一步的退化或者促使生态系统向有利于人类可持续利用的方向发展等方面^[33-45]。

总的来说,生态修复的核心思想是通过采取人工和自然相结合的措施来帮助退化、受损或被毁坏的生态系统恢复正常功能的过程。围绕本研究中青藏高原重大建设工程的生态修复特点,结合以上生态修复的相关

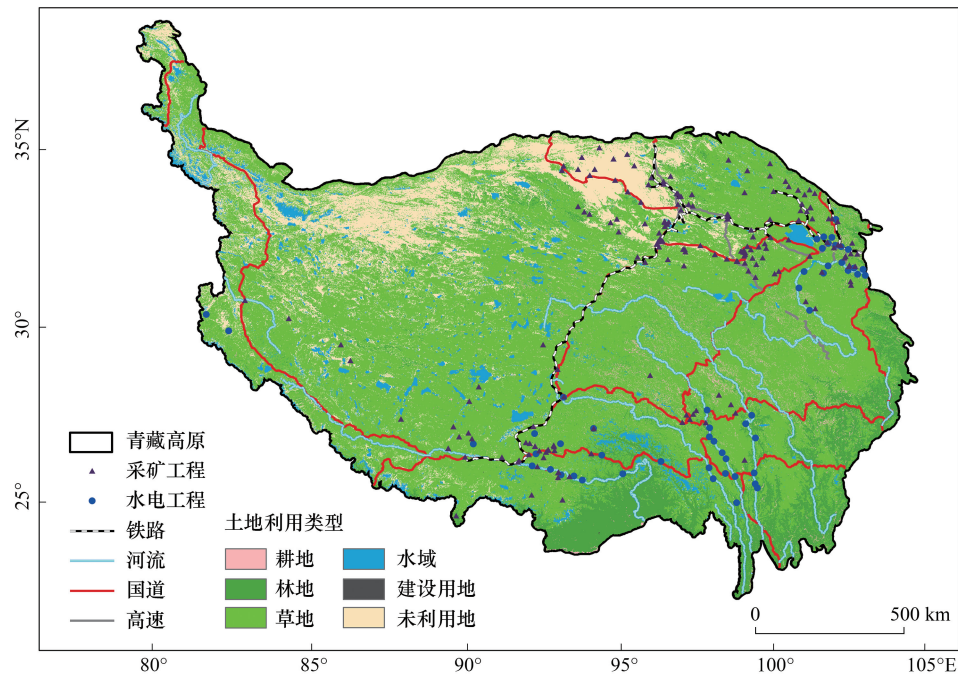


图 1 研究区概况图(基于 2015 年土地利用数据)

Fig.1 Overview map of the study area(Based on 2015 land use data)

理论,本研究对青藏高原重大建设工程中生态修复的概念进行了针对性的解释,即本研究中涉及的生态修复是指遵循生态学规律,结合生态系统自身的组织调节能力,通过生态工程和措施的实施,逐步阻止生态系统退化,并促使生态系统恢复到接近于它受干扰前的自然状态,达成生态系统良性发展和生态资源可持续利用的目标。具体来说,针对建设工程的生态修复,其目的是克服工程建设对生态系统的负面影响,优化生态系统结构,提高生态系统质量,并最终调节生态系统各项服务,从环境、社会和经济效益三方面实现生态修复效果的最大化。

表 1 生态修复概念总结

Table 1 The concept of ecological restoration summary

时间 Time	来源 Source	研究主题 Research topics	定义 Definitions
2003	王治国	关于生态修复若干概念与问题的讨论	生态修复可以理解为“生态的修复”,即应用生态系统自组织和自调节能力对环境或生态本身进行修复 ^[33]
2003	焦居仁	生态修复的要点与思考	为了加速已被破坏生态系统的恢复,可以辅助人工措施为生态系统健康运转服务,而加快恢复则被称为生态修复 ^[34]
2004	SER	The SER International Primer on Ecological Restoration	生态恢复是协助恢复退化、破坏或被破坏的生态系统的过程 ^[35]
2006	周启星	生态修复	生态修复是在生态学原理指导下,以生物修复为基础,结合各种物理修复、化学修复以及工程技术措施,通过优化组合,使之达到最佳效果和最低耗费的一种综合的修复污染环境的方法 ^[36]
2006	焦士兴	关于生态修复几个相关问题的探讨	生态修复是遵循生态学规律,主要依靠生态系统的自组织、自调节能力对环境或生态系统本身进行修复,进行适当 的人为引导,遏止生态系统的进一步退化,并使退化的生态系统尽快恢复原有的结构和功能 ^[37]
2007	朱丽	关于生态恢复与生态修复的几点思考	生态修复是指利用大自然的自我修复能力,在适当的人工措施辅助下,恢复生态系统原有的保持水土,调节小气候、维护生物多样性的生态功能和开发利用等经济功能。生态修复不是指将生态系统完全恢复到原始状态,而是指通过修复使生态系统的功能不断得到改善 ^[38]

续表			
时间 Time	来源 Source	研究主题 Research topics	定义 Definitions
2014	孙晓萌	中国生态修复成效评估方法研究	对退化、受损或完全破坏的单一环境因子或生态系统,通过物理、化学或生物修复等工程技术手段进行人为干预,实现生态系统的健康、完整和可持续发展 ^[39]
2019	曹宇	国土空间生态修复:概念思辨与理论认知	生态修复是指以受到人类活动或外部干扰负面影响的生态系统为对象,旨在使生态系统回归其正常发展与演化轨迹”,并同时以提升生态系统稳定性和可持续性为目标的有益活动的总称。此外,生态系统的发展通常表现出一种动态的平衡状态,修复的是一条被中断的生态轨迹,通过减少人类活动的影响,使整个生态系统恢复到更为自然或原始状态” ^[40]
2019	刘少君	矿山生态修复研究综述	矿山生态修复指将采矿破坏的生态环境因地制宜地恢复到所期望状态的行动和过程。所期望的状态包括将受损生态系统恢复到被干扰之前的生态结构,人为地创造或促进生态系统发展成符合人类某种有益用途的状态,恢复成与其周围环境相协调融合的其他状态 ^[41]
2019	付战勇	生态保护与修复理论和技术国外研究进展	辅助退化、受损或被破坏的生态系统而进行的恢复过程。在生态学原理指导下,以生物修复为基础,结合物理修复、化学修复和工程技术措施,通过优化组合,使之达到最佳效果的修复技术 ^[42]
2020	常俊杰	生态脆弱区生态修复综合效益评价思考——以陕西省为例	是帮助退化、受损或毁坏的生态系统恢复正常功能的过程,是改善生态系统服务功能的有效手段。是在生态学原理指导下,以生物修复为基础,结合物理修复、化学修复以及工程技术措施,通过优化组合,使之达到最佳效果和最低耗费的一种综合性修复生态环境方法 ^[43]
2020	关军洪	矿山废弃地生态修复研究进展	在生态系统退化与机理等相关理论研究基础上,建立相应的技术体系,指导恢复因采矿活动所破坏的生态系统,进而服务于矿山废弃地土地资源利用和生物多样性的保育理论与实践活动,从而将受损的生态系统恢复到接近于矿山开采前的自然状态,或重建成符合人类某种有益用途的状态,或是恢复成与其周围环境相协调的其它状态 ^[44]
2020	胡亮	矿山生态修复技术研究进展	生态修复是指停止对生态系统的干扰和破坏,因地制宜、因矿施治,利用生态系统的自我修复功能,借助人工干预措施,使被毁坏的生态系统恢复到预期状态或使生态系统向良性循环方向发展,从而取得生态、经济、社会三者的综合效益 ^[45]

2.2 指标体系构建的基本原则及技术路线

青藏高原重大建设工程生态修复评估指标体系构建时的基本原则应包括以下几个方面(图2):(1)科学性和客观性原则:基于生态学基本原理,充分结合青藏高原的区域特点和重大建设工程的特殊性,尊重客观事实,选取适合且具有代表性的指标,避免指标涵盖内容的重复,提高评价的准确性和高效性。(2)整体性和层次性结合原则:根据生态系统中整体大于部分之和的原理^[46],结合指标类别中生态系统结构、质量和服务的递进层次关系来选取评价指标,逐级细化的完成指标体系的构建。(3)全面性与典型性兼顾原则:针对青藏高原重大建设工程的类别和特殊性,在指标选取时,要全面考虑到各项工程所产生的生态环境影响,结合所实施的生态修复工程的共性特点及特殊性,有针对性地选取评价指标。(4)易获取性和可操作性原则:结合青藏高原地区重大建设工程的特殊性,对于选取的评价指标所涉及到的数据,在保证数据真实性和准确性的前提下,应当满足易获取且易计算的条件^[47]。

基于以上基本原则,本研究对构建指标体系的技术路线总结如下(图3)。以青藏高原为研究区,结合区域气候、水文、地形和植被等生态环境特点,聚焦青藏高原地区为实现经济发展而开展的典型建设工程项目以及为兼顾生态保护所实施的众多修复措施。通过对已有文献资料数据以及评估方法模型的系统收集和整理,遵循指标体系构建的基本原则,从中总结出具有代表性、可操作性的指标和方法,建立涵盖生态系统结构、质量和服务三个层次的生态修复综合效益评估指标体系,同时结合工程具体的修复措施与实地调研经验,进一步确定和优化该评估指标体系,以期为针对青藏高原重大建设工程的生态影响和生态修复效益的评估提供参考。

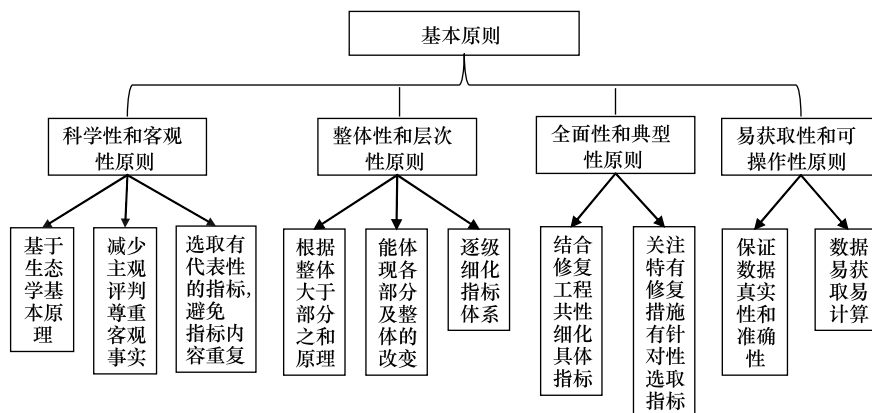


图2 指标体系构建的基本原则

Fig.2 The basic principles of constructing the evaluation index system

2.3 构建指标体系的方法

本文主要采取文献调查法和专家咨询法来筛选确定青藏高原重大建设工程生态修复综合效益的评估指标体系^[47]。通过广泛收集关于道路工程、水电工程和矿产开发工程在内的,以及研究区涉及青藏高原地区,涵盖生态修复评价、生态恢复评价、生态风险评估、生态安全评估等的国内外文献资料^[16—18, 48—50],对重大建设工程的生态修复措施进行了梳理总结(表2)。各工程的修复措施,基本围绕植被恢复、水土保持和生物多样性保护等核心展开,包含地貌重塑、植被重建和边坡护理等方面,不同建设工程所开展的修复措施有所不同,具体的措施会根据不同工程所造成的破坏程度大小,因地制宜的实施可操作性较强的生态修复措施。大多数的研究表明,往往多种修复措施的结合施用,可以达到较好的修复效果^[42]。因此,结合不同类型的文献资料,兼顾不同工程、研究范围以及评价目标的特点,总结其中所使用的具体评价指标,采用频次分析法筛选出使用频率较高的指标,最后结合青藏高原的区域特点并征求专家意见,最终确定生态修复评估指标体系。

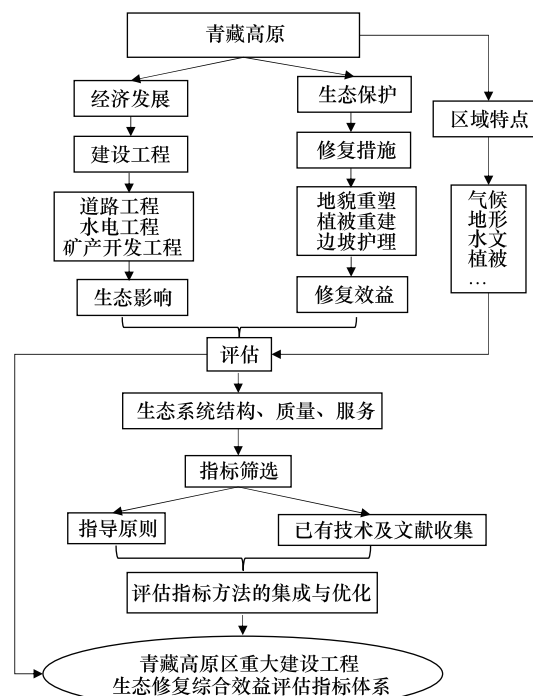


图3 指标体系构建的技术路线图

Fig.3 Technical roadmap for the construction of the indicator system

3 重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系

3.1 概念框架

围绕上文所给出的生态修复的概念及评估指标流程的梳理,本研究在文献调研的基础上,构建了青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系的概念框架(图4)。该框架主要分为生态系统结构、质量和服务3个方面。其中在生态系统结构方面,围绕生态系统组分结构丰度、时空结构变化以及宏观结构格局,探寻工程建设及修复措施开展前后时期内,区域生态系统结构的变化趋势。同时,利用具有代表性的生态参数,衡量与工程建设和生态修复紧密相关的植被、土壤所反应的生态系统质量。生态系统结构和质量的变化,将最终影响人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益,即表现为供给、调节和支持等生态系统服务的时空

变化^[51—52]。评估重大建设工程的生态影响与生态修复工作的成效,是一个涵盖环境、社会和经济三方面效益的综合性问题^[39],与人类福祉、社会高质量发展及生态文明建设息息相关,最终影响国家未来的政策决策以及发展规划,在不同规划及发展政策的背景下,生态系统的驱动力也会发生相应的变化,从而影响生态系统的结构和质量,构成自然和社会的循环。本框架所描述的指标体系,旨在通过不同类别指标的时空差异,为判断生态修复措施效果和调整生态修复战略提供参考依据^[30]。

表 2 生态修复工程介绍

Table 2 The introduction of ecological restoration project

生态修复措施 Ecological restoration projects	操作方法/具体功能 Operate methods/Specific functions	道路工程 Road works	水电工程 Hydropower project	矿产开发 Mineral development
建设缓坡地,耕作层覆土,坡面整治,修筑排水系统 Construction of gently sloping land, Cultivation layer mulching, Slope remediation, Construction of drainage system	按照土地复垦的要求,对建设工程破坏的地形、地貌进行工程设计施工,防治水土流失	√		√
截水排洪设施 Water interception and flood drainage facilities	为边坡周边截水和坡面径流引流,防止雨水形成沟流侵蚀坡面		√	
客土喷播绿化 Guest soil spraying greening	在边坡采用重新覆土、喷播绿化的方法恢复植被	√		√
灌溉管网建设 Irrigation pipe network construction	建设合理的灌溉管道网络,保证植被的健康持续生长	√		√
生态虹吸管 Ecological siphon	由跨越坝体的一系列串联管道和辅助设施组成,利用虹吸原理,将坝上游侧水体引流至下游侧,达到泄放流量的目的		√	
河道纵向深槽 Longitudinal deep channel of river	用于河道修复中储蓄水量,为生物提供良好的栖息环境		√	
碛步 step-stone bridge	是一种简单且古老的梁桥,具有拦截部分河流,减少水分流散,为水生生物提供不同栖息地的作用		√	
生态护坡 Ecological slope protection	不仅能满足稳定性,达到抗冲蚀、抗滑动的效果,而且能够使水分与土壤相沟通,保护当地生物的多样性	√		
边坡绿化笼砖技术 Slope greening cage brick technology	采用砖状土坯,在砖坯上播种草花灌等植物种子,生长形成草砖后,将草砖装入过塑网笼砖内,形成绿化笼砖,将笼砖固定在岩质坡面上,达到即时绿化效果,解决了较陡的石壁边坡的绿化难题	√		√
滚水坝 Rolling dam	可为河道形成局部壅水,保持河道一定的水位,是城市河道中常用的水利设施		√	
生态泄流 Ecological drainage	维持河流生态系统各项服务功能所需的流量,包括维持生物正常栖息所需水量,维持河道水质稀释净化所需最小水量,维持河道泥沙运移所需最小水量等		√	
生态丁坝 Ecological ding dam	在传统丁坝功能的基础上,将植物作为材料的一部分运用到工程当中,植物的根系能够增加丁字坝整体稳定性和强度,还能拦截河沙		√	
边坡水路引导工程 Slope waterway guidance project	主要方法为边坡周边截水和坡面径流引流,来防止雨水形成沟流侵蚀坡面	√		√
渗漏泵站扩容改造 Leakage pumping station expansion and renovation	考虑坝体地质安全,避免因根系穿孔而造成渗漏等安全问题		√	
边坡基质喷附技术 Slope substrate spray attachment technology	在边坡上重建因工程建设破坏的地表植被	√		√

3.2 指标体系

围绕概念框架,综合考虑指标筛选的各项基本原则,结合研究区的区域特点及工程需求,基于文献及资料的调研结果,构建青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系(表 3)。该指标体系包含生态系统结构、质量和服务三大指标类别,包括 10 个主题指标,21 个具体指标,同时将这些具体指标对应到三大建设工程上,便于后续对工程项目评估时的指标选取。其中,在生态系统结构指标类别下,包含宏观生态状况、物

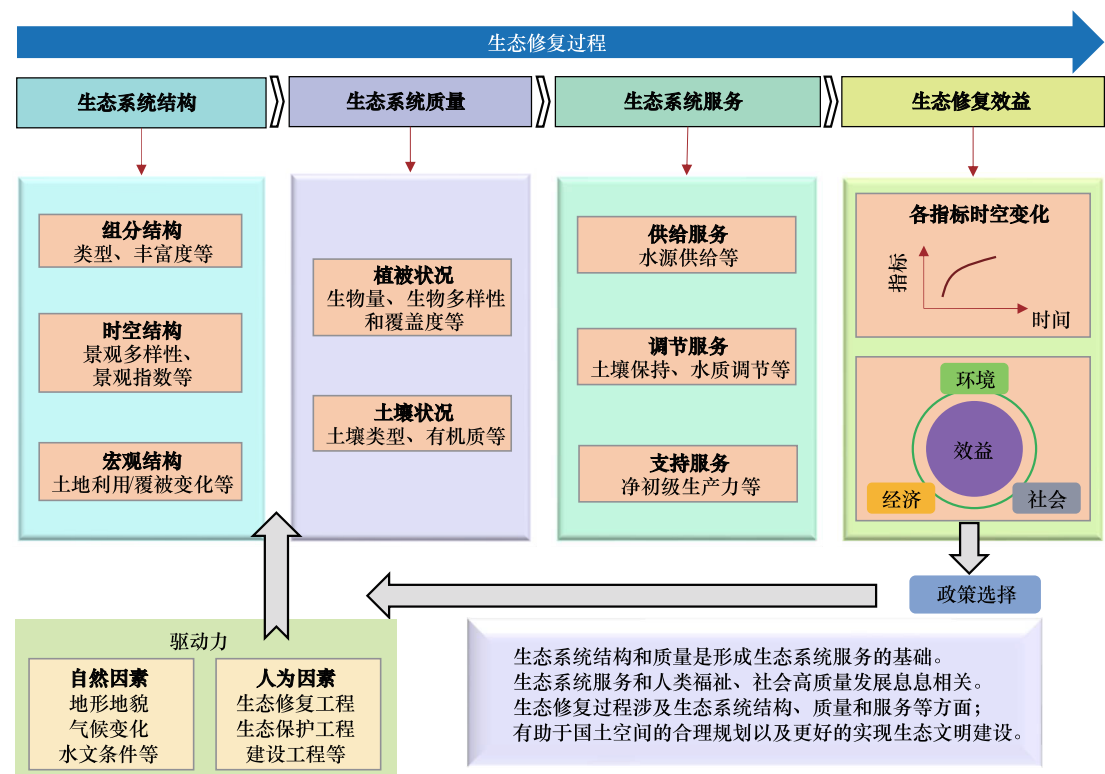


图 4 生态修复评估指标体系概念框架

Fig.4 Conceptual framework of evaluation index system for ecological restoration

表 3 青藏高原重大建设工程生态修复效益综合评价指标体系

Table 3 Comprehensive evaluation index system of ecological restoration benefits of major construction projects on the Qinghai-Tibet Plateau					
指标类别 Type of indicators	主题指标 Subject indicators	具体指标 Specific indicators	道路工程 Road works	水电工程 Hydropower project	矿产开发 Mineral development
I.生态系统结构 I.Ecosystem structure	I.1 宏观生态状况	1) 土地利用/覆被	✓	✓	✓
	I.2 物种丰富度	2) 物种多样性指数		✓	✓
	I.3 景观格局	3) 景观破碎度	✓	✓	
		4) 景观均匀度		✓	✓
		5) 景观脆弱度	✓		
		6) 景观优势度	✓	✓	✓
		7) 香浓多样性指数		✓	✓
II.生态系统质量 II.Ecosystem quality	II.1 土壤状况	8) 土壤养分		✓	✓
		9) 土壤类型	✓	✓	✓
		10) 土壤重金属	✓	✓	✓
		11) 土壤 pH 值		✓	✓
		12) 植被类型	✓	✓	✓
	II.2 植被状况	13) 植被覆盖度	✓	✓	✓
		14) 植被净初级生产力		✓	✓
		15) 偏离指数	✓	✓	✓
	II.3 生态系统质量变化指数	16) 净生态系统生产力	✓	✓	✓
	III.生态系统服务 III.Ecosystem services	III.1 碳固存			
III.2 水源涵养		17) 水源涵养量		✓	
III.3 水土保持		18) 土壤侵蚀模数	✓	✓	✓
		19) 地形起伏度		✓	✓
		20) 水土流失面积		✓	
		21) 生境质量指数	✓	✓	✓

种丰富度和景观格局 3 个主题指标;在生态系统质量的指标类别下,涵盖土壤状况、植被状况、生态系统质量变化指数 3 个部分;在生态系统服务的指标类别下,选取了碳固存、水源涵养、水土保持和生境提供这四项来反映其供给服务、支持服务和调节服务的大小。

本指标体系充分考虑了青藏高原重大建设工程的项目特征,如道路、水电以及矿产开发工程在施工建设过程中都会产生土地利用改变、景观切割、植被破坏和土壤侵蚀等变化,故选取土地利用/覆被变化、景观破碎度、土壤重金属含量、植被覆盖度和土壤侵蚀模数等指标,来表征各建设工程实施生态修复工程后的效益。指标的选取在兼顾各类工程之间共有特点的同时,也不能忽略不同工程的独特性。例如,水电工程对生态环境的突出影响在于引起水环境、水生态的改变,进而造成生态系统所提供的产水服务与生境质量的改变;矿产开发工程对生态环境的突出改变在土地破坏和土壤污染;道路工程对生态环境的影响多集中于道路两侧的一定范围。故在评估生态修复工程的效益时,不仅要关注工程所造成的普遍影响,更应关注不同工程的特殊影响,进而更全面的衡量其生态修复效益的变化和改善。

3.3 指标说明及获取方法

在选取指标时,应重点关注指标数据的可获取性及易操作性。指标获取方式以遥感解译和反演、实地观测和样方调查、文献数据整理相结合为主(表 4)^[30,53]。其中,土地利用/覆被、植被覆盖度和地形起伏度等指标的数据主要通过遥感解译和反演的方式获取;物种多样性、土壤养分和重金属含量等数据可通过实地样方调查和文献整理的方式来获取,再结合简单的计算得到指标结果。

指标之间并不是完全独立的,有些指标可基于对其它指标的计算和分析得到,也可以成为指标计算结果精度验证的数据来源。例如,景观指数、植被覆盖度和植被净初级生产力等指标数据,主要是基于对遥感数据的解译和反演得到,之后再通过特定的模型计算得到指标结果。同时,遥感解译和反演的结果以及实际样方调查的数据可互为检测对象,进一步确保数据的准确性,更加具体、切实的反映青藏高原地区重大建设工程的生态修复效益。

4 讨论

4.1 特点和优势

青藏高原是我国重要的生态保护区和生态脆弱区,重点关注该地区较为典型的三大工程项目(道路工程、水电工程和矿产开发工程),对提升该地区重大建设工程生态修复效益的总体认知、长期监测以及未来生态修复工程措施的制定、合理的空间布局有着重要的科学参考意义。综合来看,本研究所构建的指标体系有以下特点:首先基于研究区和研究对象的特殊性,结合实地调查和文献资料的整理,提出了基于青藏高原重大建设工程的生态修复措施特点的生态修复的概念,并据此进一步确定指标体系框架,建立分为生态系统结构、质量和服务三个层次,包含 10 个主题指标和 21 个具体指标的生态修复综合效益评估指标体系。

目前,针对青藏高原地区及其建设工程,进行区域尺度上生态修复成效评估的研究相对较少,现有研究涉及的尺度有限,局限于特定的建设工程或生态修复工程,很少有从整体上综合反映该地域生态修复效益的评估^[8,25-27]。因此,本文根据青藏高原重大建设工程之间的共性和个性特点,总结文献中涉及到的相关评估指标,结合不同时期多源遥感数据、野外实地调查和监测数据的可获取性及可操作性,有针对性地选取具体指标,进而确定青藏高原重大建设工程生态修复综合效益的评估指标体系。基于该指标体系,结合具体研究区的数据进行计算分析,可以系统了解工程建设对生态系统的影响和变化,评估不同生态修复措施对生态系统结构、质量和服务的影响,进而明确生态修复对区域生态系统变化的贡献,在定量化表征建设工程生态修复效益的同时,也从整体上反映青藏高原的环境变化。

4.2 局限和展望

生态修复措施和工程是针对当前社会经济活动所产生的生态问题和不良的生态影响而实施开展的生态保护行为,但生态修复措施实施后所产生的影响和效应,却不仅局限于改善和解决特定的生态问题,同时也会

表 4 具体指标数据和获取与计算方法
Table 4 Specific index data and acquisition and calculation methods

具体指标 Specific indicators	指标解释 Index explanation	数据获取方式、方法 Data acquisition and methods
1) 土地利用/覆被变化 Land use/cover change	衡量土地覆被状况及其反映的生态系统综合功能	遥感解译
2) 物种多样性指数 Species diversity index	指生物群落中种类与个体数的比值	样方调查与文献整理
3) 景观破碎度 Landscape fragmentation	景观被分割的破碎程度,反映人类活动对景观干扰强度	利用 Fragstats 软件及土地利用数据进行计算
4) 景观均匀度 Landscape fragmentation	描述景观中各组分分配均匀程度的指标,值越大表明景观各组分分配越均匀	
5) 景观脆弱度 Landscape fragility	景观对外界施加胁迫或干扰的抵抗力	
6) 景观优势度 Landscape fragility	用于测量景观多样性对最大多样性偏离程度	
7) 香浓多样性指数 Shannon diversity index	反映景观要素的多少和各景观要素所占比例的变化	
8) 土壤养分 Soil nutrient	有机质、N、K、P 等	样方调查与文献整理
9) 土壤类型 Soil type	可以分为砂质土、黏质土、壤土等类型	
10) 土壤重金属 Soil heavy metal	Pb、Cu、Ni、Zn 等	
11) 土壤 pH 值 Soil pH value	土壤酸碱度	
12) 植被种类 Vegetation types	植被类型分布	植被类型图
13) 植被覆盖度 Vegetation coverage	植被在地面的垂直投影面积占区域总面积的百分比	基于 NDVI 数据进行遥感反演
14) 植被净初级生产力 Net primary productivity	绿色植物光合作用后产生的有机物质总量减去自身呼吸消耗后的实际累积量	基于 CASA 模型利用遥感数据估算
15) 偏离指数 Deviation index	生态系统与顶级生态系统状态的距离	恢复生态系统现状与地带顶级本底的差值
16) 净生态系统生产力 Net ecosystem productivity	指净第一生产力中再减去异养呼吸所消耗的光合产物碳通过陆地生态系统循环的部分	遥感反演
17) 水源涵养量 Water conservation	生态系统对降水截留、渗透、蓄积的能力	基于 InVEST 模型产水模块估算
18) 土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	单位时空范围内的土壤侵蚀总量	修正土壤流失方程(RUSLE)
19) 地形起伏度 Terrain relief	指在一个特定的区域内,最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值	DEM 数据
20) 水土流失面积 Soil erosion area	由于自然或人为因素的影响,雨水冲刷土壤造成水分和土壤同时流失的现象	修正土壤流失方程(RUSLE)
21) 生境质量指数 Habitat quality index	生境为个体或者种群的生存提供适宜条件的能力	基于 InVEST 模型生境模块估算

对整个生态系统产生一定的影响^[54]。故生态修复的过程及其所产生的效益和影响涉及生态系统中水源、土壤、植被、生物等多个方面,所以在进行评估时,只从单一的指标出发是不全面的^[39],对指标进行权重设置后再进行评估是更加准确的。由于综合考虑到青藏高原有关数据的代表性、可获取性以及可操作性,本文并没有进行相应指标权重的设置,在进一步研究时可根据具体的评估目标和对象,结合相关文献资料,选用诸如层次分析法、专家打分发等方法来进行指标权重的设置,开展更全面的评估。

生态修复措施和过程是复杂的,且具有多样性和综合性^[43],结合青藏高原重大建设工程的特殊性,所涉及到的指标复杂多样,对于指标体系的实地检验和评估,是提升指标体系实践性和可操作性,进一步完善和改

进指标体系的重要依据。结合国内外文献资料的整理结果,现有的研究多是针对不同研究区和研究对象建立评估指标^[55-56],缺乏对相应指标体系的实地验证研究。故本文建立的指标体系也还需结合实地特征,开展针对不同工程的案例研究,依据实际评估结果进一步对指标体系改进和完善。

当前,系统实施国土空间生态修复成为新时期国家生态文明建设的重大战略需求,未来生态修复评估研究应与国土空间规划以及生态文明建设紧密结合,将生态系统的“格局与过程耦合—时空尺度—生态系统服务—可持续性”研究路径融入生态修复研究,可为国土空间生态修复提供重要的学科理论支撑^[57](图5)。未来生态修复评估的研究可依据格局与过程互馈机理,识别退化和受损的生态系统,基于生态系统结构、质量和服务的评估指标体系,通过构建数据模型,量化生态系统现状,制定合理的修复措施,减小生态系统服务之间的权衡效应,促进各服务协调发展。同时,关注社会—生态需求确定修复目标,从片面追求生态修复的规模 and 效果转向社会—生态目标下的规模、质量和发展并重,提高生态系统稳定性和社会福祉效益^[58]。最终为实现社会、经济和生态等多方面的可持续发展提供理论支撑。

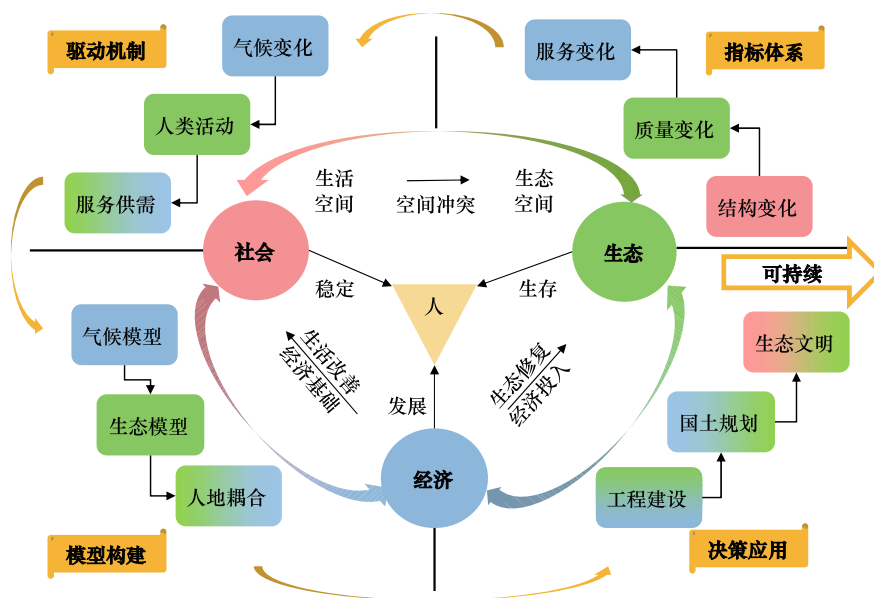


图5 生态修复评估研究理论框架

Fig.5 Theoretical framework for ecological restoration assessment studies

参考文献 (References):

- [1] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 张镱锂. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设. 地理学报, 2012, 67(1): 3-12.
- [2] 徐增让, 张镱锂, 成升魁, 郑度. 青藏高原区域可持续发展战略思考. 科技导报, 2017, 35(6): 108-114.
- [3] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源区草地生态系统综合评估指标体系. 地理研究, 2009, 28(2): 273-283.
- [4] Xia M, Jia K, Zhao W W, Liu S L, Wei X Q, Wang B. Spatio-temporal changes of ecological vulnerability across the Qinghai-Tibetan Plateau. Ecological Indicators, 2021, 123: 1-11.
- [5] 高卿, 苗毅, 宋金平. 青藏高原可持续发展研究进展. 地理研究, 2021, 40(1): 1-17.
- [6] 杨与靖. 高原高山峡谷区矿产资源开发地质环境问题及防治研究—以西藏甲玛、玉龙铜矿为例. 四川地质学报, 2019, 39(S1): 106-115.
- [7] 王勤, 唐菊兴, 谢富伟, 林彬, 李玉彬, 郭晓宇. 青藏高原铜矿资源研究进展. 科技导报, 2017, 35(12): 89-95.
- [8] 刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 甘淑. 道路对景观的影响及其生态风险评价—以澜沧江流域为例. 生态学杂志, 2005, 24(8): 897-901.
- [9] 李俊生, 张晓岚, 吴晓蕾, 全占军, 范俊韬. 道路生态影响研究综述. 生态环境学报, 2009, 18(3): 1169-1175.
- [10] 侯湖平, 张绍良, 闫艳, 郭士永, 顿德光, 金玉洁. 基于 RS, GIS 的徐州城北矿区生态景观修复研究. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 504-510.
- [11] 李江平, 许捍卫. 基于遥感与 GIS 技术的矿区生态适宜性评价与变化过程分析. 工程勘察, 2017, 45(10): 52-58.
- [12] Li S C, Xiao W, Zhao Y L, Lv X J. Incorporating ecological risk index in the multi-process MCRE model to optimize the ecological security pattern in a semi-arid area with intensive coal mining: A case study in northern China. Journal of Cleaner Production, 2020, 247(C): 1-16.
- [13] Yang X Y, Wang L, Wu T, Qiu Q Y. Ecological risk assessment based on road network development analysis of Xiamen city, China. International Journal of Sustainable Development & World Ecology, 2018, 25(5): 458-467.

- [14] Chen L, Huang K D, Zhou J Z, Duan H F, Zhang J H, Wang D W, Qiu H Y. Multiple-risk assessment of water supply, hydropower and environment nexus in the water resources system. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 1-15.
- [15] Yan G L, Xue F, Li Z X. Research on Ecological Restoration Mechanism of Rare-Earth Mines Based on Evolutionary Game. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020: 1-16.
- [16] 尚生勇, 孙嘉, 李世春, 高同雨. 北京门头沟地区典型道路边坡生态修复技术评价. *水利技术监督*, 2020, (2): 269-272.
- [17] 田佳榕, 马伟波, 戚旭东, 许素, 徐雁南, 李海东. 内蒙古某铁矿尾矿库生态修复区的植被恢复效果. *农业资源与环境学报*, 2020, 37(4): 601-608.
- [18] 叶鑫, 石松林, 顾羊羊, 张琨, 王浩, 李思远. 紫金矿山生态影响与生态修复效果研究. *环境生态学*, 2019, 1(1): 84-90.
- [19] 国家发展改革委. 青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021-2035年). 中国: 自然资源部, 2021.
- [20] 姚檀栋. 青藏高原水-生态-人类活动考察研究揭示"亚洲水塔"的失衡及其各种潜在风险. *科学通报*, 2019, 64(27): 2761-2762.
- [21] 方精云. 构建新时代生态学学科体系. *人民日报*, 2021-04-27(9) [2022-02-14]. http://paper.people.com.cn/rmrb/html/2021-04/27/nw.D110000renmrh_20210427_2-09.htm.
- [22] 董政博. 不同建植技术对高寒区铁路路域环境生态修复效果研究. *青海交通科技*, 2016, (3): 23-28.
- [23] 李贤, 王福德, 张江华, 乔冈, 刘瑞平. 青南高原砂金地质环境恢复治理模式探讨. *中国矿业*, 2013, 22(10): 73-75.
- [24] 付梦娣, 唐文家, 刘伟玮, 何跃君, 朱彦鹏. 基于生态系统服务视角的生态风险评估及生态修复空间辨识—以长江源区为例. *生态学报*, 2021, 41(10): 3846-3855.
- [25] 吕敦玉, 余楚, 周爱国, 张溪, 龙翔. 青藏高原矿产资源开发的环境适宜性评价—以西藏达孜-工布江达地区为例. *水文地质工程地质*, 2011, 38(4): 88-94.
- [26] 何云蛟, 张曦. 玉曲河流域水电开发生态风险评价指标体系研究. *北方环境*, 2013, 25(10): 28-33.
- [27] 张德铨, 刘林山, 摆万奇, 郑度, 李双成, 阎建忠. 青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响—以格尔木至唐古拉山段为例. *地理学报*, 2002, 57(3): 253-266.
- [28] 陈心盟, 王晓峰, 冯晓明, 张欣蓉, 罗广祥. 青藏高原生态系统服务权衡与协同关系. *地理研究*, 2021, 40(1): 18-34.
- [29] 张德铨, 李炳元, 郑度. 论青藏高原范围与面积. *地理研究*, 2002, (1): 1-8.
- [30] 王壮壮, 王浩, 冯晓明, 王晓峰, 张立伟, 傅伯杰. 重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系. *生态学报*, 2019, 39(20): 7356-7366.
- [31] 潘桂棠, 丁俊, 王立全, 李光明, 尹福光. 加强青藏高原矿产资源勘查与研究保障国家资源供应. *国土资源科技管理*, 2004, 21(1): 1-4.
- [32] 陈有顺, 房后国, 刘娉慧, 李善平, 李智敏. 青藏高原矿产资源的分布、形成及开发. *地理与地理信息科学*, 2009, 25(6): 45-50.
- [33] 王治国. 关于生态修复若干概念与问题的讨论(续). *中国水土保持*, 2003, (11): 24-25.
- [34] 焦居仁. 生态修复的要点与思考. *中国水土保持*, 2003, (2): 1-2.
- [35] Society for Ecological Restoration International. The SER International Primer on Ecological Restoration. [2021-03-14]. https://cdn.ymaws.com/www.ser.org/resource/resmgr/custompages/publications/ser_publications/ser_primer.pdf
- [36] 周启星, 魏树和, 张倩茹. 生态修复. 北京: 中国环境科学出版社, 2006: 1-9.
- [37] 焦士兴. 关于生态修复几个相关问题的探讨. *水土保持研究*, 2006, 13(4): 127-129.
- [38] 朱丽. 关于生态恢复与生态修复的几点思考. *阴山学刊: 自然科学版*, 2007, 21(1): 71-73.
- [39] 孙晓萌, 彭本荣. 中国生态修复成效评估方法研究. *环境科学与管理*, 2014, 39(7): 153-157.
- [40] 曹宇, 王嘉怡, 李国煜. 国土空间生态修复: 概念思辨与理论认知. *中国土地科学*, 2019, 33(7): 1-10.
- [41] 刘少君, 刘博. 矿山生态修复研究综述. *世界有色金属*, 2019, (10): 170-171.
- [42] 付战勇, 马一丁, 罗明, 陆兆华. 生态保护与修复理论和技术国外研究进展. *生态学报*, 2019, 39(23): 9008-9021.
- [43] 常俊杰. 生态脆弱区生态修复综合效益评价思考—以陕西省为例. *中国土地*, 2020, (9): 36-38.
- [44] 关军洪, 郝培尧, 董丽, 李雄. 矿山废弃地生态修复研究进展. *生态科学*, 2017, 36(2): 193-200.
- [45] 胡亮, 贺治国. 矿山生态修复技术研究进展. *矿产保护与利用*, 2020, 40(4): 40-45.
- [46] 蒙古军, 赵春红. 区域生态风险评价指标体系. *应用生态学报*, 2009, 20(4): 983-990.
- [47] 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.
- [48] 刘璐璐, 曹巍, 邵全琴. 三江源生态工程实施前后长江源区宏观生态状况变化分析. *地球信息科学学报*, 2016, 18(8): 1069-1076.
- [49] 山长鑫. 长白山区小型水电站脱水电段修复方案研究[D]. 吉林: 长春工程学院, 2020.
- [50] 王超, 曹小璐. 基于层次分析法和VRM系统的矿坑生态修复利用探究. *浙江农业科学*, 2016, 57(9): 1527-1533.
- [51] Costanza R, Groot R D, Braat L, Kubiszewski I, Fioramonti L, Sutton P, Farber S, Grasso M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, 2017, 28: 1-16.
- [52] 张晓瑶, 陆林, 虞虎, 张潇, 李冬花. 青藏高原土地利用变化对生态系统服务价值影响的多情景模拟. *生态学杂志*, 2021, 40(3): 887-898.
- [53] 王丽艳, 王竹益, 刘光正, 岳军伟, 金洪平. 赣南稀土矿区植被生态修复评价及模式选择. *南方林业科学*, 2016, 44(6): 49-53.
- [54] 王振波, 李嘉欣, 郭义强, 梁龙武. 青藏高原山水林田湖草生态保护修复模式—以拉萨河流域为例. *生态学报*, 2019, 39(23): 8966-8974.
- [55] 刘剑锋, 张可慧, 马文才. 基于高分一号卫星遥感影像的矿区生态安全评价研究—以井陘矿区为例. *地理与地理信息科学*, 2015, 31(5): 121-126.
- [56] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 刘璐璐. 基于目标的三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估及政策建议. *中国科学院院刊*, 2017, 32(1): 35-44.
- [57] 彭建, 吕丹娜, 董建权, 刘焱序, 刘前媛, 李冰. 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(1): 3-13.
- [58] 王晨旭, 刘焱序, 于超月, 刘小茜. 国土空间生态修复布局研究进展. *地理科学进展*, 2021, 40(11): 1925-1941.