

DOI: 10.5846/stxb201908161708

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): - .

Wang Z Z, Wang H, Feng X M, Wang X F, Zhang L W, Fu B J. Evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration in key ecologically vulnerable regions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): - .

重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系

王壮壮¹, 王浩^{1,*}, 冯晓明², 王晓峰³, 张立伟¹, 傅伯杰²

¹ 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119

² 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

³ 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054

摘要:生态恢复是扭转由人类活动引起的生态环境退化和生物多样性损失,并保证生态系统服务可持续供给的一项主要战略措施。20 世纪 90 年代以来我国针对重点脆弱生态区(北方风沙区、黄土高原区、西北干旱区、青藏高原区和西南喀斯特地区)实施了一系列的生态恢复工程。科学合理地评估重点脆弱生态区生态恢复综合效益,对生态恢复措施的进一步优化调整具有重要的理论与实践意义。然而,在重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估的集成研究方面,由于没有形成统一的指标体系,阻碍了区域内综合性和长期性的生态恢复综合效益评估和监测,因此亟需构建一套面向我国重点脆弱生态区的生态恢复综合效益评估指标体系。以我国 5 个重点脆弱生态区为研究区,根据“生态恢复—生态系统结构—质量—服务—效益”级联式概念框架,在指标筛选原则和方法的指导下,参考现有的生态恢复评估成果,构建科学化、系统化和规范化的生态恢复综合效益评估指标体系。研究结果以期为重点脆弱生态区生态恢复评估研究和管理应用提供理论与技术支撑。

关键词:生态恢复;综合效益;评估指标体系;重点脆弱生态区;中国

Evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration in key ecologically vulnerable regions

WANG Zhuangzhuang¹, WANG hao^{1,*}, FENG Xiaoming², WANG Xiaofeng³, ZHANG Liwei¹, FU Bojie²

¹ School of Geography and Tourism of Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

² Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

³ School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract: Ecological restoration is a major strategy to reverse the ecological degradation and biodiversity loss caused by human activities and to ensure a sustainable supply of ecosystem services. Since the 1990s, China has implemented a series of ecological restoration projects in key ecologically vulnerable regions (Windy and sandy regions of northern China, Loess Plateau, Arid regions in northwest china, Tibetan Plateau, and karst regions). Scientifically and reasonably evaluating the comprehensive benefits of ecological restoration in key ecologically vulnerable regions has important theoretical and practical significance for further optimization and adjustment of ecological restoration measures. However, due to the lack of a unified index system, research on ecological restoration is limited in terms of comprehensive and long-term assessment and monitoring of ecological restoration benefits in key ecologically vulnerable regions. As a result, there is an urgent need for a systematic, scientific, and comprehensive evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration in ecologically vulnerable regions of China. We investigated five key ecologically vulnerable regions in China, and based on the

基金项目:中国科学院科技服务网络计划(KFJ-STZ-ZDTP-036);国家自然科学基金(41801180,41871187);第二次青藏高原综合科学考察研究资助(2019 QZKK0403)

收稿日期:2019-08-16; 修订日期:2019-00-00

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

cascade conceptual framework of "ecological restoration-ecosystem structure-quality-services-benefits" and guided by the proposed principles and methods for screening indices, we constructed a scientific, systematic, and standardized evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration. The results of this study are expected to provide theoretical and technical support for future evaluation studies and management of application of ecological restoration in key ecologically vulnerable regions.

Key Words: ecological restoration; comprehensive benefits; evaluation index system; key ecologically vulnerable regions; China

生态恢复是帮助退化、受损或毁坏的生态系统恢复正常功能的过程^[1-2],以生态恢复为目的的生态恢复工程被认为是应对生态环境退化,改善生态系统服务的有效手段^[2-5]。我国脆弱生态区范围广、面积大、人类活动剧烈,脆弱的生态环境加之不合理的开发利用,导致其区域内植被退化、水土流失、荒漠化等各类生态问题突出,对生态脆弱区进行生态保护及恢复的需求十分迫切^[6]。20 世纪 90 年代以来,我国针对重点脆弱生态区(图 1)开展了三北防护林、退耕还林还草和天然林保护等一系列的生态恢复工程^[7]。工程实施近几十年来,重点脆弱生态区生态恢复效益如何?选取何种指标用于生态恢复效益评估?成为众多学者关注的焦点问题,也是我国进一步开展生态文明建设的重大迫切需求。科学合理地评估生态恢复工程实施后的生态恢复效益,及时掌握生态系统当前的恢复程度、演变方向、存在问题等方面的信息,不仅能为进一步调整和改进行恢复方案提供科学依据,而且能为生态系统管理提供决策支持^[6,8]。

近年来,针对重点脆弱生态区的生态恢复效益评估已经开展了大量研究^[9-15],研究区域已经涵盖了北方风沙区、黄土高原区、西北干旱区、西南喀斯特地区和青藏高原区等关键区域^[10-15]。例如,刘国彬等^[12]评估了 20 世纪 80 年代以来黄土高原生态工程的生态成效,结果表明黄土高原地区水土流失范围明显缩小、程度明显减轻,区域生态状况向良性发展,但局部地区水土流失依然严重。邵全琴等^[14]评估了三江源生态保护和建设一期工程的生态成效,结果表明工程实施 8 年来草地持续退化趋势得到初步遏制,水体与湿地生态系统有所恢复,但是整体恢复效果与生态恢复的预期目标还存在差距。这些针对我国重点脆弱生态区的生态恢复效益评估有利于明晰各个区域的生态恢复状况,并为生态恢复工程的进一步实施和生态系统管理提供决策依据。然而,现有的评估研究往往针对某一个脆弱生态区或区域内的某一部分,面向我国重点脆弱生态区生态恢复评估的集成研究还比较缺乏,这限制了对重点脆弱生态区生态恢复效果的整体认识,以及各脆弱生态区之间生态恢复效果的对比参照。

构建科学合理的评估指标体系是生态恢复综合效益评估成功的关键^[16]。目前我国重点脆弱生态区的生态恢复效益评估已经积累了丰富的案例和应用指标。综合来看,这些指标体系的应用可以分为以下 2 个方向。①指标直接比较法^[6-7,17-21]。这种评估方法是指研究人员选取一种或多种指标对生态恢复工程实施前后的指标数据进行对比,从而分析区域内的生态恢复成效^[6,17]。常见的评估指标包括土地利用变化^[18]、生态系统服务^[19]、植被覆盖度^[20]、土壤水分^[21]等。例如,Lu 等^[7]研究了我国已启动的 6 个重点生态恢复工程对陆地碳固存的贡献,结果表明生态恢复工程显著增加了工程区的生态系统碳汇。指标直接对比方法具有简单直观的优点,但是这种评估方法只能进行单指标对比,无法形成对研究区域生态恢复效果的整体认识^[18,20-21]。而且,由于没有形成系统综合的框架,在指标选取的过程中容易产生不全面或不合理的问题^[17]。②综合效益评估方法^[6,14,22]。这种评估方法是指研究人员在一定的理论框架下设置多目标、多层次、多指标的综合效益指标体系,并赋予各指标相应的权重值,最终分析区域内生态恢复的整体效果^[6,17]。这种方法的优点是综合性较强,适合不同区域之间生态恢复效果的横向对比,但是由于指标体系过于复杂,部分指标的数据相对难以获取^[6]。整体来看,现有的生态恢复效益评估以指标直接对比方法为主,适合我国重点脆弱生态区的生态恢复综合效益评估指标体系还比较缺乏^[18,20-21]。此外,大部分研究在评估过程中没有形成系统的理论框架,因

此评估指标常常侧重于某一个领域,缺乏统一的标准^[6]。这些限制性因素阻碍了我国重点脆弱生态区综合性和长期性的生态恢复评估和监测,影响了对区域内生态恢复效果的科学认识和生态恢复措施的进一步实施调整。因此,我国重点脆弱生态区亟需构建一套系统、科学、全面的生态恢复综合效益评估指标体系。

本文以我国重点脆弱生态区(北方风沙区、黄土高原区、西北干旱区、青藏高原区和喀斯特地区)为研究区,借鉴现有的国内外生态恢复评估文献和技术方法,在“生态恢复—生态系统结构—质量—服务—效益”级联式概念框架下,采用文献调查法、频次分析法和专家咨询法,进行生态恢复效益评价指标的梳理和筛选,最终构建科学化、系统化和规范化的重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系,研究结果能够为我国重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估与管理应用提供理论与技术支撑。

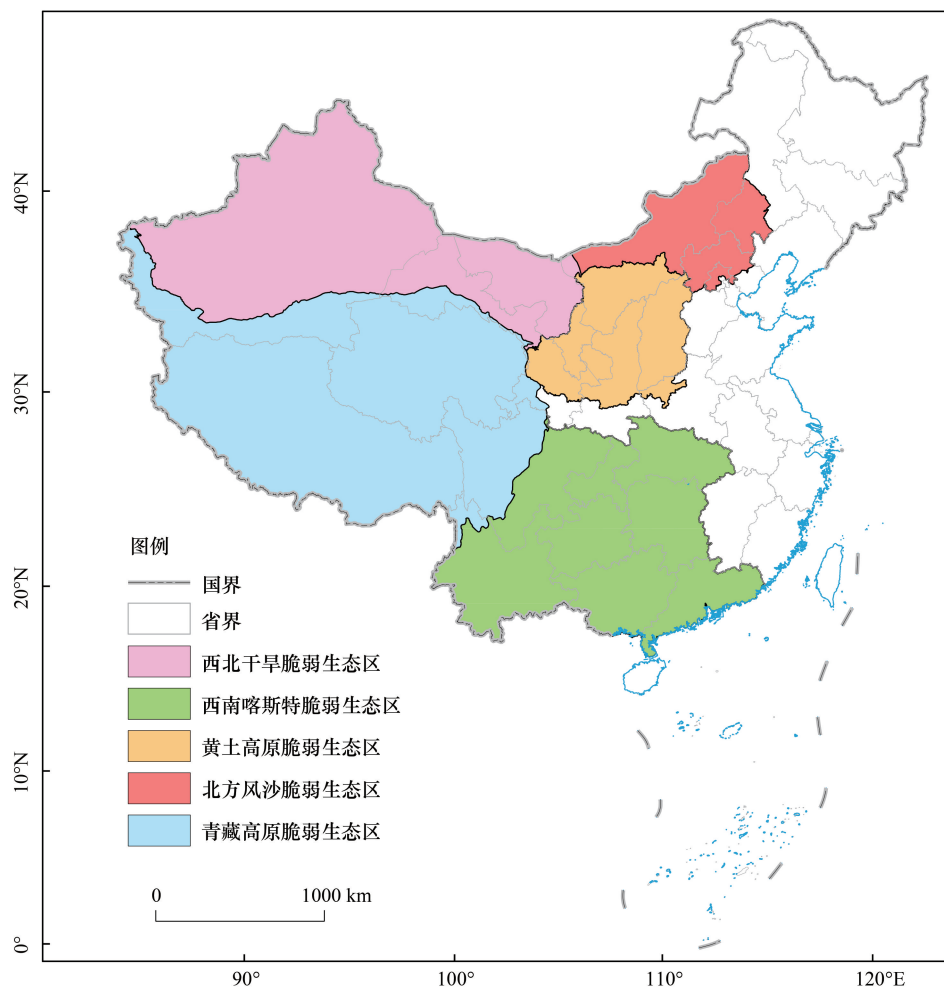


图 1 中国重点脆弱生态区范围

Fig.1 Scope of key ecologically vulnerable regions in China

1 重点脆弱生态区概况

脆弱生态区是指生态系统结构稳定性较差,抵抗外在干扰和维持自身稳定的能力较弱,易于发生生态退化且难以自我修复的区域^[23]。我国脆弱生态区类型多,范围广,比较典型的重点脆弱生态区有 5 个,分别是北方风沙区、西北干旱区、黄土高原区、青藏高原区和西南喀斯特地区^[23-24](图 1)。由于地理位置、气候、地形和人类活动等影响因素的差异,这 5 个脆弱生态区存在各自独特的区域特点和生态问题(表 1)。因此,构建生态恢复综合效益评估指标体系时,应该充分考虑各个区域的特殊性和恢复需求,构建适宜于各个脆弱生态

区的生态恢复综合效益评估指标体系。

表 1 重点脆弱生态区区域概况
Table 1 Regional overview of key ecologically vulnerable regions

脆弱生态区 Ecologically vulnerable regions	区域概况 Regional overview
北方风沙区 Windy and sandy regions of northern China	位于我国西北部(38°50′—46°40′N, 109°30′—119°20′E), 大体包括内蒙中东部贺兰山以东地区, 陕西榆林风沙与黄土高原交错区以北, 面积约 4.6×10 ⁵ km ² ; 属于温带干旱、半干旱气候, 降水稀少, 蒸发量大, 大风及沙尘暴频发 ^[25] ; 植被稀少, 主要的植被类型为典型草原、荒漠草原、疏林灌木草原, 局部高山地区分布有森林; 土壤类型以风沙土、棕漠土和栗钙土为主 ^[26] ; 风力侵蚀严重, 局部地区风蚀与水蚀并存; 草场退化和土地沙化等生态问题突出; 实施了三北防护林工程、京津风沙源治理工程和天然林保护工程
黄土高原区 Loess Plateau	位于我国北部黄河中上游地区(33°43′—41°16′N, 100°54′—114°33′E), 大致范围包括太行山, 日月山—贺兰山以东, 秦岭以北, 阴山以南广大区域, 地跨陕、甘、青、晋、宁、豫、内蒙 7 省, 面积约 6.3×10 ⁵ km ² ; 从东南到西北分别为暖温带半湿润、半干旱和干旱气候, 降水多集中在 7—9 月份, 且多暴雨; 植被类型从南到北分别是森林—草原、草原和荒漠—草原 ^[21] ; 土壤类型以土质疏松、抗侵蚀能力差的黄绵土为主; 水土流失严重, 地表千沟万壑 ^[12] ; 实施了退耕还林还草工程
西北干旱区 Arid regions in northwest china	位于我国西北部(34°22′—49°33′N, 73°32′—109°30′E), 包括昆仑山—阿尔金山—祁连山和长城一线以北的广大地区, 面积约 17.5×10 ⁵ km ² ; 属于温带干旱、半干旱大陆性季风气候, 气候干燥, 降水由东向西锐减, 最低在 100 mm 以下 ^[27] ; 生态系统类型由东向西依次为森林草原、典型草原、荒漠草原和荒漠 ^[28] ; 广泛分布着沙沙漠和戈壁沙漠; 土地盐碱化、沙漠化现象严重, 水资源缺乏; 实施了三北防护林工程和天然林保护工程
青藏高原区 Tibetan Plateau	位于我国西南部(26°00′—39°47′N, 73°19′—104°47′E), 包括西藏自治区、青海省、四川省西北部、甘肃省南部, 面积约 25×10 ⁵ km ² , 平均海拔 4000 m 以上, 是中国众多河流的发源地; 东南部暖热湿润, 西北部寒冷干旱, 大部分地区年均温在 0℃ 以下; 降水受西南季风控制, 自东南到西北逐渐减少, 雨季和旱季分明 ^[29] ; 植被类型从东南到西北依次为高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠 ^[29-30] ; 草地退化严重; 实施了湿地保护工程和三江源生态保护与建设工程
西南喀斯特地区 Karst regions in southwestern China	位于我国西南部(20°16′—33°12′N, 97°31′—117°3′E), 主要分布于贵州、广西、云南等西南地区, 面积约 16.6×10 ⁵ km ² ; 属于亚热带季风气候, 夏季高温多雨; 主要的植被类型为常绿落叶灌木林、常绿针叶林和常绿落叶阔叶林 ^[20] ; 基岩以纯碳酸盐岩和不纯碳酸盐岩为主; 水土流失、土壤贫瘠和石漠化等生态问题突出 ^[31] ; 实施了天然林保护工程和喀斯特石漠化综合控制和恢复工程

2 指标体系构建的概念框架、原则与方法

2.1 指标体系构建的概念框架

本文在参考傅伯杰等^[16], 邵全琴等^[14]相关研究成果的基础上, 构建了“生态恢复—生态系统结构—质量—服务—效益”级联式概念框架, 为生态恢复综合效益评估指标体系的构建提供理论支撑(图 2)。生态恢复是指帮助退化、受损或毁坏的生态系统恢复正常功能的过程^[2-5], 可以分为主动恢复和被动恢复两种类型。其中, 主动恢复是指人类采取积极的生态恢复政策加速和影响恢复的进程, 被动恢复是指去除或者减少人为干扰之后利用生态系统的自我调节能力自行恢复^[32-33]。Holl 和 Aide 认为一些退化的生态系统在减少或者去除人类干扰的情况下能够迅速恢复, 耗费大量资源的生态修复工程并不总是必要的, 因此在选择生态恢复方法之前应该考虑一系列的生态和人为因素, 选择最佳的生态恢复战略^[33]。生态恢复的措施确定之后, 在生态恢复的过程中, 一些自然和人为驱动因素对生态系统的结构和质量施加影响, 从而改变生态系统的演变过程, 最终影响到生态系统服务的提供^[19]。生态系统服务是人类直接或间接从生态系统中获得的各种惠益, 主要包括供给服务、调节服务、文化服务和支持服务四种类型^[34-35], 它是生态恢复成效的最终体现。生态恢复综合效益评价是一个多属性和多准则的问题, 可以从环境效益、社会效益和经济效益三方面进行衡量^[6, 8, 17]。生态恢复综合效益评估结果与恢复目标之间的对比, 是判断生态恢复工程成功与否与调整生态恢复战略的主要依据(图 2)。

2.2 指标体系构建的原则与方法

2.2.1 指标体系构建的原则

(1) 科学性原则。生态恢复综合效益评估应结合脆弱生态区生态恢复需求, 联系区域内业已开展的生态

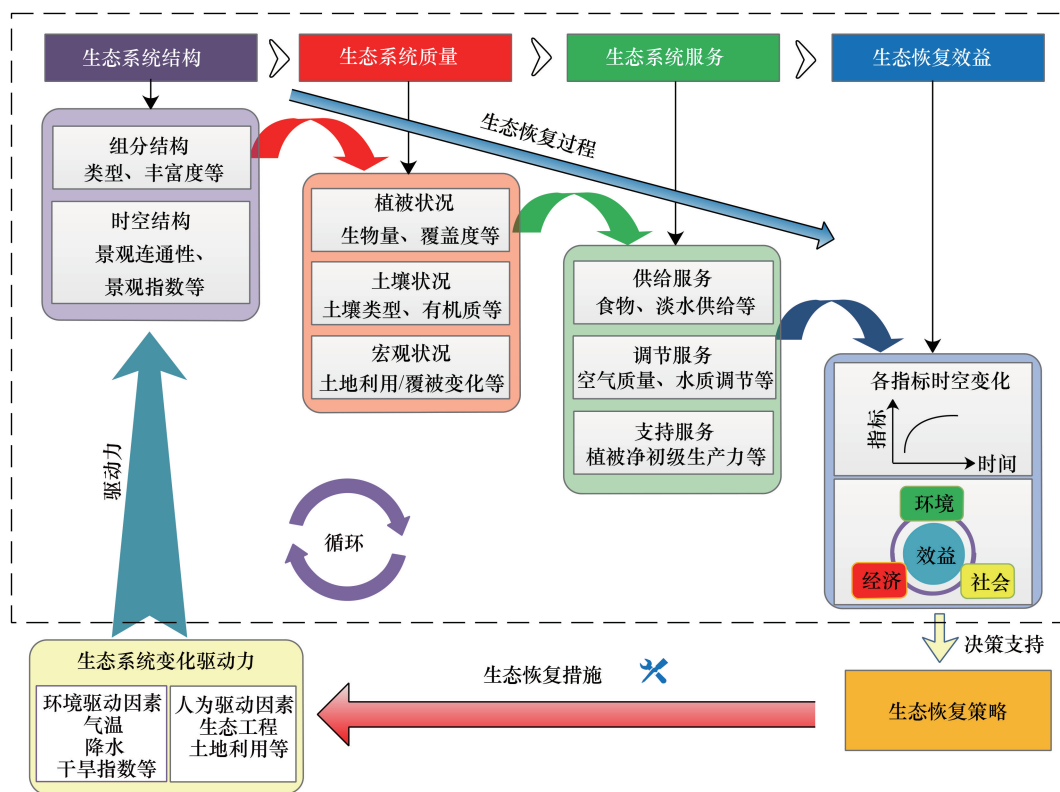
图2 “生态恢复-生态系统结构-质量-服务-效益”级联式概念框架^[14,16]

Fig.2 A modified cascade framework of “ecological restoration-ecosystem structure-quality-services-benefits”

工程,选取最具代表性的指标,从而实现追求指标体系准确性的同时控制指标数量,提高评价工作效率。同时应避免指标间的信息重叠而影响评估结果的客观性与科学性^[9,14]。

(2)全面性与典型性相结合原则。脆弱生态区生态恢复时间长、范围广、内容丰富,为兼顾不同脆弱生态区之间的共性和特性,应将生态恢复的总体目标和区域目标加以区分。根据生态系统结构、质量、服务和变化驱动因素选取通用评价指标,再根据不同脆弱生态区特性及恢复措施设置区域指标^[14]。

(3)稳定性与可持续性原则。生态恢复是生态系统动态演替的过程,生态系统的结构和功能恢复可能需要几年、几十年甚至更多的时间^[8,33]。因此,选取的评估指标内容应处于可持续发展的动态过程中,能够从时间和空间上体现生态系统的时空演变及分布规律。同时指标自身应相对稳定,不易随时空变化而发生质变,进而影响指标的可比性。

(4)简便性与可操作性原则。生态恢复综合效益评估指标应简单明了、意义明确^[6,8,17]。需进行实验监测的指标其实实验设计应具备较强的可操作性;需进行计算推导的指标其本底数据应容易获得,其统计及计算方式明确可靠。

2.2.2 评估指标筛选的方法

本文采用文献调查法、频次分析法和专家咨询法筛选生态恢复综合效益评估指标^[16]。首先,广泛搜集国内外关于生态恢复评估的文献资料,并从中筛选出涉及到的生态恢复评估指标。这些文献资料主要包括关于我国重点脆弱生态区的生态恢复评估中英文论文和生态恢复评估报告,以及一些国际组织(例如,国际自然保护联盟、生态修复学会、生物多样性和生态系统服务政府间科学政策平台)和各个国家(例如,美国、加拿大、澳大利亚、荷兰、肯尼亚等)关键的生态恢复评估报告。其次,采用频次分析法对使用频率较高的指标体系进行初步筛选。最后,结合我国重点脆弱生态区的区域特点并征询专家意见,最终构建生态恢复综合效益评估指标体系^[16]。

3 重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系

3.1 生态恢复综合效益评估指标体系

根据上述指标体系筛选的原则、方法,并结合我国重点脆弱生态区的区域特点及恢复需求(表1),构建面向各个脆弱生态区的生态恢复综合效益评估指标体系,最后综合构建面向整个脆弱生态区的评估指标体系(表2)。在级联式概念框架的指导下,该指标体系分为指标类别、主题指标和具体指标3个层次,其中指标类别指示生态恢复综合效益评估的4个方面,分别为生态系统的结构、质量、服务和驱动力。这4个方面反映了生态恢复的具体过程,即目标生态系统在自然和人为因素(驱动力)的影响下改变生态系统的结构和质量,从而影响生态系统服务提供水平,因此该指标体系可用于追踪生态恢复的各个过程。指标类别由主题指标构成,反映指标类别的具体方面。具体指标对应于主题指标,保证其可以被直接量化和比较(表2)。

表2 重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系

Table 2 Evaluation index system of comprehensive benefits of ecological restoration in key ecologically vulnerable regions

指标类别 Type of indicator	主题指标 Subject indicator	具体指标 Specific indicators	北方风沙区 Northern wind-sand region	黄土高原区 Loess Plateau	西北干旱区 Arid regions in Northwest China	青藏高原区 Tibetan Plateau	喀斯特地区 Karst regions in southwestern China	重点脆弱生态区 Key ecologically vulnerable regions
I.生态系统结构与质量 I. Ecosystem structure and quality	I.1 植被状况	1) 植被覆盖度	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		2) 植被生物量	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		3) 林、草地退化、恢复面积	✓	✓		✓		
		4) 草地载畜量	✓			✓		
	I.2 土壤状况	5) 土壤有机质	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		6) 土壤水分	✓	✓	✓		✓	
		7) 土壤盐分			✓			
		8) 石漠化等级					✓	
	I.3 物种丰富度	9) 物种丰富度	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	I.4 宏观生态状况	10) 土地利用/覆被变化	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		11) 坡度		✓			✓	
	I.5 生态系统质量变化指数	12) 恢复指数	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		13) 偏离指数	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	I.6 景观破碎化	14) 景观多样性指数						✓
		15) 景观均匀度指数						✓
II.生态系统服务 II. Ecosystem services	II.1 碳固存	16) 植被净初级生产力	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	II.2 水源涵养	17) 水源涵养量		✓		✓	✓	✓
	II.3 水土保持	18) 土壤侵蚀模数	✓	✓			✓	✓
		19) 水土流失面积	✓	✓			✓	✓
	II.4 生物多样性	20) 生境质量指数					✓	✓
	II.5 产水服务	21) 径流量				✓		✓
		22) 湖泊面积与水量				✓		✓
	II.6 粮食供给	23) 粮食产量		✓				
	II.7 防风固沙	24) 土壤风蚀模数	✓		✓			
	III.生态系统变化驱动力 III. Ecosystem change drivers	25) 气温	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		26) 降水	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		27) 干旱指数		✓		✓	✓	✓
		28) 扬沙、浮尘天气	✓					
		29) 生态工程实施面积	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	III.2 人类活动	30) 气候因子贡献率	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		31) 人为因子贡献率	✓	✓	✓	✓	✓	✓
		32) 冗余分析	✓	✓	✓	✓	✓	✓

“✓”表示在进行生态恢复综合效益评估时选择该指标

在构建各个脆弱生态区的指标体系过程中,着重考虑了各个脆弱生态区的生态恢复特点。例如,北方风

沙区与西北干旱区土地沙化严重,沙尘暴天气频繁,严重影响周边地区居民的生产生活。因此,在生态系统服务评估中,选取防风固沙服务作为生态恢复后生态系统服务变化的评估指标。此外,西北干旱区降水稀少、蒸发量大,除了土壤水分匮乏外,土壤盐碱化问题突出,严重影响农作物生长。因此,在生态系统服务结构与质量评估中,选取土壤盐分作为生态恢复后土壤状况的评估指标。在黄土高原和西南喀斯特地区,坡度是影响水土流失的一个重要地形因子,因此选取坡度作为水土保持措施实施后土壤侵蚀情况的评估指标。而在青藏高原区和北方风沙区,畜牧活动是当地人类的主要土地利用方式,特别是青藏高原区高寒草地的退化与人类放牧活动密切相关,因此选取载畜量作为退牧还草等生态恢复措施实施后该区域植被状况的评估指标。在构建面向整个脆弱生态区的指标体系过程中,同时兼顾了脆弱生态区之间共有的生态恢复特点,着重考虑指标的通用性。具体来看,生态系统结构与质量通过植被状况、土壤状况、物种丰富度、宏观生态状况、生态系统质量变化指数、景观破碎化共 6 项主题指标进行衡量;生态系统服务通过碳固存、水源涵养、水土保持、生物多样性、产水服务共 5 项主题指标进行衡量;生态系统变化驱动通过气候变化、人类活动和驱动分析 3 项主题指标进行衡量(表 2)。

3.2 指标解释、数据获取与量化方法

在选取具体指标时,着重考虑了指标数据的易获取性、计算方式的可靠性和易操作性。各指标数据的获取方式以地面观测、遥感解译与反演相结合为主。其中,草地载畜量、土壤有机质、土壤水分、土壤盐分、物种丰富度、径流量等具体指标的数据可以通过地面观测与文献搜集的方式获取,并通过简单的计算获取指标结果。而植被覆盖度、土地利用/覆被变化、水源涵养量、土壤侵蚀模数等具体指标的数据可以通过遥感解译与反演的方式获取,并通过特定的模型计算获取指标结果(表 3)。值得注意的是,一些指标的计算结果也可以成为其他指标模型计算或者精度验证的数据来源。例如,在水源涵养服务的计算中需要用到降水、气温、土地利用等数据,而水文站点观测的径流量数据可以用来对模型计算结果的精度验证。

表 3 具体指标解释、数据获取与计算方法
Table 3 Interpretation, data acquisition and calculation methods of specific index

具体指标 Specific indicators	指标解释 Index explanation	数据获取与计算方法 Data acquisition and calculation methods	
		遥感反演与模型计算 Remote sensing inversion and model calculation	地面观测与文献搜集 Ground observation and literature collection
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	遥感反演与计算获取归一化植被指数(NDVI)	
植被生物量 Vegetation biomass	植被在某一时刻单位面积内的有机质(干重)总量	遥感反演地上植被生物量	采样实验,单位面积生物量
林、草地退化、恢复面积 Degradation and restoration area of forest and grassland	生态恢复前林、草地退化面积和生态恢复后林、草地恢复面积	生态恢复前后遥感影像解译提取林地和草地	生态恢复工程项目区统计资料
草地载畜量 Animal carrying capacity of grassland	放牧期内草地所能放养的牲畜数		统计年鉴统计资料,牲畜数
土壤有机质 Soil organic matter	土壤中含碳的有机化合物		野外采样检测,单位土壤重量中的有机质含量
土壤水分 Soil moisture	土壤水分含量,是植物吸收水分的主要来源。	基于多源微波、光学遥感、以及地面实测等数据,采用多源数据协同的土壤水分反演模型	野外仪器观测,土壤饱和含水率
土壤盐分 Soil salt content	土壤盐分含量		野外采样检测,单位土壤重量中的盐分含量

续表

具体指标 Specific indicators	指标解释 Index explanation	数据获取与计算方法 Data acquisition and calculation methods	
		遥感反演与模型计算 Remote sensing inversion and model calculation	地面观测与文献搜集 Ground observation and literature collection
石漠化等级 Rocky desertification grade	石漠化现象的严重程度		文献资料, 无石漠化、轻度石漠化、中度石漠化和重度石漠化
物种丰富度 Species richness	群落中物种数目的多少		动、植物物种数
土地利用/覆被变化 Land use/cover change	人类改变土地利用和管理方式, 导致土地覆被变化	遥感解译获取土地利用类型数据	
坡度 Slope	地表单元陡缓的程度, 是影响水土流失的重要地形因子	基于数字高程模型 (DEM) 数据的坡度 (slope) 计算	
恢复指数 Recovery index	生态系统与过去相比的恢复程度	恢复生态系统现状与历史动态本底的差值	
偏离指数 Deviation index	生态系统与顶极生态系统状态的距离	恢复生态系统现状与地带顶极本底的差值	
景观多样性指数 Landscape diversity index	景观要素的多少和各景观要素所占比例的变化, 反映景观类型的丰富程度。	利用 Fragstats 软件计算景观多样性 H 指数。所需数据为土地利用类型	
景观均匀度指数 Landscape diversity index	反映了景观受到一种或几种优势斑块类型所支配	利用 Fragstats 软件计算景观均匀度指数 E 指数。所需数据为土地利用类型	
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积累量	可利用 CASA 模型计算。所需数据包括 NDVI, 土地利用类型, 气温, 降水, 太阳辐射	
水源涵养量 Water Conservation	生态系统对降水进行截留、渗透、蓄积的功能	利用 InVEST 模型的产水模块计算。所需数据包括土地利用类型, 降水, 参考蒸散发、土壤属性等	
土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus	单位时空范围内的土壤侵蚀总量	可利用修正土壤流失方程 (RUSLE) 计算。所需数据包括植被类型、土壤类型、DEM、降水等	
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	遥感反演水土流失面积	
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。	可利用 InVEST 模型的生境质量模块计算。所需数据包括土地利用类型、威胁因子 (如交通、人口密度)、威胁可达性数据	
径流量 Runoff	某一时段内河流通过某一水断面的水量		水文站点观测
湖泊面积与水量 Lake area and water volume			实地观测与文献查阅,
粮食产量 Grain yield			统计年鉴, 粮食产量

续表		数据获取与计算方法	
具体指标 Specific indicators	指标解释 Index explanation	Data acquisition and calculation methods	
		遥感反演与模型计算 Remote sensing inversion and model calculation	地面观测与文献搜集 Ground observation and literature collection
土壤风蚀模数 Wind erosion modulus	单位时空范围内的土壤风蚀总量	可利用 RWEQ 模型计算。所需数据包括风速、土地利用类型、土壤类型等	
气温 Temperature			气象站点观测,包括最高气温、最低气温和平均气温
降水 Precipitation			气象站点观测,包括平均降水量、极端降水量等
干旱指数 Drought index	反映干旱程度	可采用帕默尔干旱指数 PDSI 计算。所需数据包括降水、潜在蒸散量、土壤最大有效持水量	
扬沙、浮尘天气 Sand and dust weather			气象站点观测,扬尘、浮尘天气天数
生态工程实施面积 Ecological engineering implementation area			生态恢复工程项目区统计资料
气候因子贡献率 Contribution rate of climate factor	气候变化引起的生态恢复贡献率	情景模拟,相关性分析等方法	
人为因子贡献率 Contribution rate of human factor	人类工程措施引起的生态恢复贡献率	情景模拟,土地利用变化,相关性分析,主成分分析等方法	
冗余分析 Redundancy analysis	一种回归分析结合主成分分析的排序方法	可利用 canoco 软件计算	

4 结论与讨论

4.1 指标体系的特点与优势

本文在“生态恢复-生态系统结构-质量-服务-效益”级联式概念框架下,综合集成国内外生态恢复评估研究成果,采用文献调查法、频次分析法和专家咨询法,构建了我国重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系。该指标体系对指导我国重点脆弱生态区的生态恢复评估具有重要的理论和实践意义,有利于明晰各个脆弱生态区的生态恢复效果,从而实现生态恢复措施优化调整和资源优化配置。

综合来看,本研究构建的指标体系具有以下优点。首先,概念框架是构建指标体系的前提和理论基础^[16]。然而,目前针对我国重点脆弱生态区的生态恢复效益评估研究,大多没有形成系统的理论框架,使得评估指标不全面或缺乏合理性^[6]。本文根据“生态恢复-生态系统结构-质量-服务-效益”级联式概念框架,构建的重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系分指标类别、主题指标和具体指标 3 个层次,生态系统的结构、质量、服务和驱动力 4 个部分,使得该指标体系更具系统性和科学性。其次,我国重点脆弱生态区数量多、面积大,而且各重点脆弱生态区之间具有明显的区域差异性、独特的生态问题和恢复需求^[23-24]。因此,在构建评估指标体系时需要兼顾各个脆弱生态区之间的普遍性和特殊性。然而,大多数评估研究仅仅针对某个脆弱生态区或区内的某一部分^[12-15]。本文不但根据各个脆弱生态区的区域特点、生态问题和恢复措施构建了适用于各个重点脆弱生态区的评估指标体系,而且在综合的基础上构建了针对整个脆弱生态区的综合指标体系,这使得本文构建的指标体系既有针对性又有综合性。最后,本文在筛选评估指标时考虑了各个指标数据的易获取性和计算的方便性,因此该指标体系可操作性强且便于对我国重点脆弱生态区的生态恢复效果进行长期跟踪和对比。

4.2 指标体系的局限性与展望

在生态恢复过程中,生态恢复综合效益体现在生态系统结构和质量改善、生态系统服务能力提升等各个

方面^[14],并且随着生态恢复实施区域的不同,各生态效益之间的显著性与相对重要性也存在差异。例如,北方风沙区对防风固沙服务的需求高于碳固存服务。而青藏高原区作为我国的三江源区,水源涵养服务的需求较为迫切。因此,为生态恢复综合效益评估指标体系设置指标权重对于生态恢复效益评估具有重要意义。然而,在生态恢复综合效益评估过程中,指标数量较多,历史本底数据难以获取,成为指标权重设置的主要限制性因素。此外,在具体的生态恢复综合效益评估中,可能会由于评估区域的特殊性、数据获取难度不同以及评估目标差异等因素,使得评估人员选取不同的指标以及设置不同的权重。因此,基于以上考虑本文不再设置具体的指标权重,研究人员可以根据实际情况采用专家打分法、层次分析法等方法,并结合其研究需求从而确定具体的指标权重^[36]。

生态恢复效益评估内容丰富,评估指标的选择具有多样性^[6,8],这决定了在构建指标体系时必须做出取舍。同样,根据提出的指标筛选的原则和方法,本文构建的指标体系选取了其中一些具有典型性和代表性的评估指标。在这种情况下,主题指标可能只涵盖了指标类别的某个或某些方面,相对应地具体指标可能只涵盖了主题指标的某个或某些方面^[16]。生态恢复综合效益评估具有较强的实践性,其评估结果可以直接为生态恢复措施提供决策支持^[14]。生态恢复评估指标体系的应用能够提供有关指标体系合理性和有效性的反馈信息,进而促进指标体系进一步修改、调整和完善。因此,虽然本文构建了重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系,但评估指标的进一步验证和完善还需要结合我国重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估广泛的案例研究,以提高评估指标体系的适用性,进一步为我国生态恢复措施的实施和调整提供决策支持。

参考文献 (References):

- [1] 任海, 王俊, 陆宏芳. 恢复生态学的理论与研究进展. 生态学报, 2014, 34(15): 4117-4124.
- [2] Benayas J M R, Newton A C, Diaz A, Bullock J M. Enhancement of biodiversity and ecosystem services by ecological restoration: a meta-analysis. *Science*, 2009, 325(5944): 1121-1124.
- [3] Bullock J M, Aronson J, Newton A C, Pywell R F, Rey-Benayas J M. Restoration of ecosystem services and biodiversity: conflicts and opportunities. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, 26(10): 541-549.
- [4] Jones H P, Jones P C, Barbier E B, Blackburn R C, Rey Benayas J M, Holl K D, McCrackin M, Meli P, Montoya D, Mateos D M. Restoration and repair of Earth's damaged ecosystems. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018, 285(1873): 20172577.
- [5] Wortley L, Hero J M, Howes M. Evaluating ecological restoration success: a review of the literature. *Restoration Ecology*, 2013, 21(5): 537-543.
- [6] 吴丹丹, 蔡运龙. 中国生态恢复效果评价研究综述. 地理科学进展, 2009, 28(4): 622-628.
- [7] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [8] 杨兆平, 高吉喜, 周可新, 郑好, 王燕, 李慧敏. 生态恢复评价的研究进展. 生态学杂志, 2013, 32(9): 2494-2501.
- [9] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 杨帆, 刘华, 杨秀春, 许明祥, 侯鹏, 郭兴健, 黄麟, 李愈哲. 重大生态工程生态效益监测与评估研究. 地球科学进展, 2017, 32(11): 1174-1182.
- [10] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1019-1022.
- [11] Wang H, Liu G H, Li Z S, Wang P T, Wang Z Z. Comparative assessment of vegetation dynamics under the influence of climate change and human activities in five ecologically vulnerable regions of China from 2000 to 2015. *Forests*, 2019, 10(4): 317.
- [12] 刘国彬, 上官周平, 姚文艺, 杨勤科, 赵敏娟, 党小虎, 郭明航, 王国梁, 王兵. 黄土高原生态工程的生态成效. 中国科学院院刊, 2017, 32(1): 11-19.
- [13] 吴丹, 巩国丽, 邵全琴, 曹巍. 京津风沙源治理工程生态效应评估. 干旱区资源与环境, 2016, 30(11): 117-123.
- [14] 邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 黄麟, 曹巍, 徐新良, 葛劲松, 吴丹, 李志强, 巩国丽, 聂学敏, 贺添, 王立亚, 邴龙飞, 李其江, 陈卓奇, 张更权, 张良侠, 杨永顺, 杨帆, 周万福, 刘璐璐, 祁永刚, 赵国松, 李愈哲. 三江源生态保护和建设一期工程生态成效评估. 地理学报, 2016, 71(1): 3-20.
- [15] 张明阳, 王克林, 刘会玉, 王静, 岳跃民. 生态恢复对桂西北典型喀斯特区植被碳储量的影响. 生态学杂志, 2014, 33(9): 2288-2295.

- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 张海燕, 樊江文, 邵全琴. 2000-2010 年中国退牧还草工程区土地利用/覆被变化. 地理科学进展, 2015, 34(7): 840-853.
- [19] 张琨, 吕一河, 傅伯杰. 生态恢复中生态系统服务的演变: 趋势、过程与评估. 生态学报, 2016, 36(20): 6337-6344.
- [20] 张雪梅, 王克林, 岳跃民, 童晓伟, 廖楚杰, 张明阳, 姜岩. 生态工程背景下西南喀斯特植被变化主导因素及其空间非平稳性. 生态学报, 2017, 37(12): 4008-4018.
- [21] 梁海斌, 薛亚永, 安文明, 王帅, 李宗善, 吕一河. 黄土高原不同退耕还林植被土壤干燥化效应. 水土保持研究, 2018, 25(4): 77-85.
- [22] 邓健. 陕北黄土丘陵区典型退耕流域农林景观配置模式综合评价及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [23] 刘军会, 邹长新, 高吉喜, 马苏, 王文杰, 吴坤, 刘洋. 中国生态环境脆弱区范围界定. 生物多样性, 2015, 23(6): 725-732.
- [24] 许尔琪, 张红旗. 中国生态脆弱区土地可持续利用评价研究. 中国农业资源与区划, 2012, 33(3): 1-6.
- [25] 王白春, 许林军, 朱莉莉, 杨亚娟. 北方风沙区水土保持三级区划分成果浅析. 中国水土保持, 2015, (12): 28-31.
- [26] 孙小东, 宁志英, 杨红玲, 张子谦, 李玉霖. 中国北方典型风沙区土壤碳氮磷化学计量特征. 中国沙漠, 2018, 38(6): 1209-1218.
- [27] 陈亚宁, 王怀军, 王志成, 张辉. 西北干旱区极端气候水文事件特征分析. 干旱区地理, 2017, 40(1): 1-9.
- [28] 李奇虎, 陈亚宁. 1981-2006 年西北干旱区 NDVI 时空分布变化对水热条件的响应. 冰川冻土, 2014, 36(2): 327-334.
- [29] 康琳琦, 周天财, 干友民, 孙建, 王金牛. 1984-2013 年青藏高原土壤侵蚀时空变化特征. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 245-253.
- [30] 张宪洲, 杨永平, 朴世龙, 包维楷, 汪诗平, 王根绪, 孙航, 罗天祥, 张扬建, 石培礼, 梁尔源, 沈妙根, 王景升, 高清竹, 张懿铨, 欧阳华. 青藏高原生态变化. 科学通报, 2015, 60(32): 3048-3056.
- [31] 陈洪松, 岳跃民, 王克林. 西南喀斯特地区石漠化综合治理: 成效、问题与对策. 中国岩溶, 2018, 37(1): 37-42.
- [32] Roa-Fuentes L L, Martínez-Garza C, Etchevers J, Campo J. Recovery of soil C and N in a tropical pasture: passive and active restoration. Land Degradation & Development, 2015, 26(3): 201-210.
- [33] Holl K D, Aide T M. When and where to actively restore ecosystems? Forest Ecology and Management, 2011, 261(10): 1558-1563.
- [34] Costanza R, De Groot R, 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.
- [35] 傅伯杰, 张立伟. 土地利用变化与生态系统服务: 概念、方法与进展. 地理科学进展, 2014, 33(4): 441-446.
- [36] 丁新辉, 刘孝盈, 刘广全, 朱毕生, 王伟伟. 京津风沙源区沙障固沙技术评价指标体系构建. 生态学报, 2019, 39(16): 5778-5786.