

DOI: 10.5846/stxb202002210301

王宗松, 姜丽丽, 汪诗平, 王艳芬, 周华坤. 草地退化恢复评估方法述评. 生态学报, 2022, 42(16): 6464-6473.

Wang Z S, Jiang L L, Wang S P, Wang Y F, Zhou H K. Assessment methods for grassland restoration. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6464-6473.

草地退化恢复评估方法述评

王宗松^{1,2}, 姜丽丽^{1,*}, 汪诗平¹, 王艳芬³, 周华坤⁴

1 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100101

2 中国科学院大学生命科学学院, 北京 100049

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

4 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008

摘要:世界范围内草地生态系统的大面积退化严重影响了其生产和生态功能,因此对退化草地进行恢复成为世界范围内的持久不衰的研究热点,同时针对恢复实践效果的评估方法也在逐渐地发展和完善。在退化草地恢复进程中及时准确地评估恢复的效果有利于指导今后的恢复实践。研究概述了退化草地恢复的措施和恢复目标,对退化草地恢复的评估方法从不同的组织尺度上进行综述。研究中大多采取指示物种、植物群落的多样性和群落结构、活力-组织-恢复力(VOR)及其改良模型以及一系列数学分析方法等来评价退化草地的恢复状况。通过述评这些方法的应用和效果可以为未来的退化草地恢复实践的实施、恢复效果的科学评估以及后续的草地管理提供理论基础。

关键词:草地退化;恢复;评估方法

Assessment methods for grassland restoration

WANG Zongsong^{1,2}, JIANG Lili^{1,*}, WANG Shiping¹, WANG Yanfen³, ZHOU Huakun⁴

1 Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2 College of Life Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

Abstract: The large-scale degradation of grassland ecosystem in the world has seriously affected its production and ecological function. Therefore, the restoration of degraded grassland has become a persistent research focus in the world. Meanwhile, the evaluation methods for the practical effect of restoration are gradually developing and improving. In the process of restoration of degraded grassland, it is helpful to evaluate the effect of restoration practice timely and accurately. This review first summarizes the measures and goals of the restoration of degraded grassland, and then summarizes the evaluation methods of degraded grassland restoration from different organizational scales. In most studies, indicator species, plant community diversity and community structure, VOR and its improvement model, and a series of mathematical analysis methods were used to evaluate the restoration of degraded grassland. By reviewing the application and effects of these methods, it can provide a theoretical basis for the implementation of future degraded grassland restoration practices and the scientific evaluation of restoration effects.

Key Words: grassland degradation; restoration; assessment method

基金项目:第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0302);国家自然科学基金面上项目(31872994);中科院先导(A)项目(XDA20050104);青海省自然科学基金创新团队项目(2021-ZJ-902)

收稿日期:2020-02-21; 采用日期:2022-05-12

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lljiang@itpcas.ac.cn

草地占据地球陆地面积的 37%, 是陆地生态系统的重要组成部分^[1], 也是承载人类活动最集中的区域^[2]。草地具有缓和气候变化、影响碳循环等重要作用^[3]; 同时, 草地在维持生物多样性以及水资源的调节和供给方面也发挥着重要作用^[4]。草地生态系统持有大约全球碳储量的 20%, 其在平衡温室气体浓度方面的作用也不可忽视^[5]。然而由于人类活动和气候变化, 全球草地出现了大面积退化^[1]。在世界范围内, 接近 50% 的草地发生退化, 其中 5% 正在经历严重退化, 草地退化已经成为人类需要面对的重要问题^[6]。在中国, 天然草地的面积大约为 3920 万 hm^2 ^[7], 但是自 20 世纪 50 年代以来由于气候变暖、人口增长以及经济发展、过度放牧和无序开发, 导致中国北方近 90% 的草原出现一定程度的退化, 并且以每年 6700 km^2 的速度增加^[8]。近年来, 由于国家退耕还草等草地工程项目实施, 草地退化速度得以减缓, 但退化依然比较严重。草地退化降低植被覆盖度、植物地上和地下生物量以及导致生物多样性丧失、群落组成改变^[9-11], 土壤表层有机碳、氮含量显著下降^[12]; 此外土壤容重随退化程度的加深而增大, 土壤的结构稳定性显著下降, 水土流失严重^[13], 土壤水源涵养功能降低甚至丧失。

由于草地退化带来的负面效应以及国家层面的重视, 草地恢复逐渐成为生态学研究的一个重要方面^[14]。虽然世界范围内的草地恢复实践较多, 但由于对恢复目标不清楚、恢复措施不准确以及恢复评估标准不统一, 导致恢复效果并不总尽如人意^[15-16]。因此, 本文归纳了退化草地恢复的目标、指标和措施, 综述了退化草地恢复的评估方法, 以期对退化草地恢复及效果评估提供依据和有效支撑。

1 退化草地恢复的目标和指标

国际恢复生态学学会(Society for Ecological Restoration, SER)将生态恢复定义为: 帮助遭受退化和破坏的生态系统恢复的过程^[17-18]。草地恢复中的重点就是恢复目标, 目标的选择直接决定了恢复的难度和成本。退化草地恢复的目标主要集中于生态功能和生产功能两个方面^[19]。生产功能往往以产量、生物量或生产力来衡量恢复效果, 而生态功能一般以生态系统属性作为衡量恢复成功的指标。国际生态恢复协会提供了 9 个生态系统属性作为衡量恢复成功的指标: (1) 与参考点具有相似的物种多样性和群落结构; (2) 存在本地物种; (3) 存在贡献长期稳定性的功能群; (4) 维持种群再生的自然环境; (5) 正常的功能; (6) 与景观的一体性; (7) 消除潜在的威胁; (8) 抵抗自然干扰的能力; (9) 自我可持续发展^[18]。虽然测定所有的属性能够完美的评价草地恢复的效果, 但是由于经济、时间的制约, 很少有研究会顾及所有的方面, 在实践中大多数的测量可以划分为三个生态系统属性: (1) 多样性; (2) 植被结构; (3) 生态过程^[20-21]。在已有的案例中恢复目标大多是植物多样性和土壤养分。生物多样性因其与生态系统功能和生态系统服务之间联系非常紧密, 例如生物多样性提高能够增加群落生产力、增加土壤肥力、维持群落和生态系统的稳定性等, 因此生物多样性常被做为恢复实践是否成功的评价标准^[22]。由于生物多样性的多维性, 近年来一些研究从更多的角度探讨生物多样性的恢复, 例如在物种多样性的基础上增加考虑功能多样性^[23]以及遗传多样性^[24-25]。土壤是生态系统提供生态服务的支持者, 但是随着退化加剧出现了养分匮乏并且难以维持正常的生产和生态功能的后果^[26]。因此有研究将恢复实践后的土壤养分状况作为恢复的目标^[27]。此外群落结构也是维持正常的生态系统功能以及抵抗外界干扰的必要条件, 对于植物或者微生物均是如此^[28]。其他如土壤微生物、土壤无脊椎动物(甲壳虫、蜘蛛、草螨等)和昆虫群落^[29-30]等也可作为恢复目标, 但案例较少^[19]。实际恢复中研究人员发现至少选择两个关乎生态系统功能的变量, 并且应该找到至少两个参考点来捕获生态系统退化恢复中产生的变化才能使得对恢复效果的评估更加客观^[20]。

2 退化草地恢复的措施

退化草地恢复按照恢复措施不同, 又分为被动恢复和主动恢复^[31]。被动恢复指恢复一个生态系统的第一步是要消除或者至少减少导致生态系统退化的原因, 从而使该系统能够通过自然过程自行恢复^[32-33]。例如禁止放牧使得美国中部盆地牧场原生河岸植被的全面恢复^[34]; 围封目标区域, 限制人类进入使地中海沿岸

沙丘得到了恢复^[35]。然而,当物种、地点或者景观已经被改变到仅靠被动恢复难以挽回的状态时,就必须采取多方面的人为干预,也称主动恢复,即通过种植植被、除草、焚烧来管理土地,以达到理想的结构^[31]。在这种情况下首选的是基于过程的恢复,目的是恢复创造和维持生态系统的基本过程,例如扩散、生物地球化学循环、水文动力学、流域渗透能力等^[36]。现在实施的草地恢复措施主要有围栏封育、合理放牧、翻耕、补播、施肥以及建立人工草地等^[37-42],其具体的作用效果见表 1。

表 1 退化草地恢复措施以及影响

Table 1 Restoration measures and impacts of degraded grassland

恢复策略 Recovery strategy	具体措施 Specific measures	影响 Effect	参考文献 References
主动恢复 Active restoration	翻耕	浅耕激活种子库,提高植被均匀度与多样性;深耕提高土壤蓄水量	[43—44]
	补播	增加植被盖度,地上地下生物量,植物多样性	[41] [45]
	施肥	提高植株高度、盖度、多样性、改善群落结构,提高群落稳定性	[25, 46]
	刈割	提高生物量,改善牧草品质	[40, 47]
	人工草地	提高草地生产力,改善草地质量	[42, 48]
	草皮移植	提高植物多样性	[41]
	微生物添加	提高植物群落多样性,生产力,抑制毒杂草	[49—50]
被动恢复 Passive restoration	围栏封育	增加土壤有机质和养分,提高植物生产力、多样性	[51—52]
	合理放牧	提高生产力,多样性	[38]

3 草地生态系统退化恢复的评估方法

此前有大量的研究采用一些植被以及土壤肥力参数来评价草地恢复的好坏,如归一化植被指数^[53]、盖度、生物量、群落组成、多样性^[16, 54-56]以及土壤养分和容重等理化性状^[57]。但是单从植被以及土壤的简单指标中难以得出恢复效果的全面评估结果,因此退化草地恢复的评估方法也在逐渐发展以适应不同空间尺度和更全面、合理的指导恢复实践的需求。退化草地恢复的评估方法在不同的生态复杂度上有不同的方法,包括种群、群落、生态系统和景观,不同尺度采取的评价方法及评价内容如表 2。

表 2 草地退化恢复的主要评估方法及原理

Table 2 Main assessment methods and principles of grassland degradation restoration

组织水平 Organization level	方法 Methods	内容 Content	参考文献 References
种群 Population	目标物种	通过动植物的某几个关键种的覆盖度、多样性以及结构表征生态系统的状况	[58]
群落 Community	与参考点的动植物群落比较	比较恢复点和参考点的群落多样性、结构及功能属性	[59]
生态系统 Ecosystem	VOR	从生态系统的活力、组织和恢复力三方面综合评定恢复状况	[60]
	CVOR	在 VOR 的基础上增加基况信息	[61]
	PSR	从压力、状态、反应三方面出发,分别选取指标建立评价体系	[62]
	层次分析法	将分析指标彼此间的关系进行层次化,分层次分析评价	[63]
	主成分分析法	将原来的指标减少到几个综合指标(主成分)	[64]
景观 Landscape	自然度指数法	对植物的生存状态进行评分用来指示环境状况	[65—66]

VOR: 活力-组织-恢复力 Vigor-Organization-Resilience; CVOR: 基况-活力-组织-恢复力 Condition-Vigor-Organization-Resilience; PSR: 压力-状态-反应 Pressure-State-Response

3.1 种群尺度上的评估方法

在种群尺度上的评价是指从目标物种种群的遗传结构、年龄结构以及营养和繁殖能力等方面进行评价^[67]。早在 1997 年有学者强调种群生物学在生态恢复中的作用,并主张当种群重新建立到能够使其长期存在的水平时,恢复就应该被认为是成功的^[58]。但是与从群落和生态系统的角度对退化草地恢复进行评价的

研究相比,种群尺度的研究相对较缺乏。

从种群角度对草地恢复进行评价时对目标物种的选择会因为草地退化的原因以及恢复目的的不同而不同,例如有关键种^[68]、指示种^[69]、稀有种^[70]和入侵种^[71]等。对目标物种定植成功的影响因素也不尽相同,包括栖息地的生物和非生物条件。在比利时北部的农业景观中研究了当地的草本植物百里香的种子的远距离传播和遗传结构,表明修复目标区域的非生物栖息地条件不能保证目标植物的有效恢复,而限制该物种定植的关键因素是种群间有效的种子传播^[72]。不同的恢复措施也可能会影响目标植物的定植。在对美国爱荷华州东北部高草草原的恢复中发现主要植物种群的基因组变化受到恢复措施的影响^[73],尤其是种子添加,该措施降低了原生种群的繁殖成功率。当目标植物定植后,评估其发展的可持续性也是一项重要内容。在瑞士的农业景观中对剪秋罗的研究表明,在自然种群之间其基因交流要比在恢复和自然种群之间的基因交流的水平高,表明恢复后的种群之间的功能连通度还是较低^[74]。该研究表明遗传方法为研究恢复措施对植物种群功能连通性的影响提供了有价值的工具。

随着现代分子技术的发展,对种群的遗传结构和多样性以及种群之间的基因交流的研究才逐渐增加^[24]。种群的大小、遗传多样性和增长率能够很好的预测当下恢复的种群是否能够更好的抵御环境变化的干扰以及种群本身的适应度^[58, 75]。但是对种群的研究通常只是在特定点对少数几个物种的表现进行评价,难以推广到其他物种和其他地点,并且与调查物种多样性和植被盖度、生物量等方法相比,种群研究的方法显然在时间和经费上的消耗要更大。

3.2 群落尺度上的评估方法

在群落水平上对草地恢复进行评估的方法是最为常见的。一般采取比较恢复点和参考点的植物群落的多样性和群落结构^[59]。此外也有研究将动物群落结构进行比较。例如在日本熊本县阿苏山周围的半天然草地的恢复研究利用植被的相似性指数评估恢复情况^[40]。瑞典北部草地恢复实践中采用减少干扰以及增加生境的异质性的方法并利用植物物种丰富度和植物群落组成来评估恢复情况^[76]。在南非的自然保护区将蚂蚁群落的组成和丰富度与参考点进行比较,发现 23 年后仍然未达到完全恢复的状态^[77]。

除了对恢复点和参考点的植物群落组成和多样性等指标,近年来越来越多的研究将群落的功能属性应用到恢复评价中^[23]。有研究者指出如果仅仅靠植被的群落结构来评价恢复是否成功太过于保守,因为植物群落的恢复可能会需要上百年,并且研究发现功能多样性和组成与物种的多样性和组成在恢复进程中的表现是不一致的,相比于植物的恢复,功能的恢复要更快^[78],而功能的恢复为之后本地物种的自然定植也会提供必要条件。此外,由于参考点和恢复点的环境因素可能不会完全相同,同时植物的组成和结构高度依赖于环境因素,所以可能恢复点的植物群落会达到另一个相对稳定并能够提供必要的功能属性的群落^[59]。因此有研究利用群落水平的比叶面积、叶片干物质含量以及种子的大小和数量等属性对德国的冲击平原草地恢复进行评价,发现尽管植物群落未达到和参考点一致,但是功能多样性和组成已达到恢复成功状态^[23]。所以从群落功能的角度评估恢复效果既可以验证传统方法的有效性,又可以识别特定退化草地中哪些是能够快速恢复的功能。在当今全球范围内植物属性数据日益增加的背景下,将群落功能属性结合植物的群落结构和多样性对草地恢复进行评估能得到更加具有指导意义的结论。

3.3 生态系统尺度上的评估方法

在生态系统尺度上,可以运用一系列评价生态系统健康的方法作为退化草地恢复的评估方法,其中包括指示物种和指标体系法。指示物种是在一定的区域范围内,反应环境某一方面的特征的物种,最初是由 Wilhelmi 提出将小头虫用于指示海洋污染状况,之后相继有研究利用浮游生物以及鱼类等评估海洋和湖泊等水生生态系统的健康状况^[79-80]。在陆地生态系统中有研究利用蜘蛛^[81]、昆虫^[82]、植物物种以及其他节肢动物^[83]等的群落多样性和结构来指示森林和草地生态系统的健康状况。但是由于生态系统结构和功能复杂且处于动态变化中,仅从单一物种来评估其效果意义有限,并且指示物种的指示作用强弱不明确,无法反映出生态系统总体的结构和功能恢复情况,因此越来越多的研究综合多个指标来进行评估^[84]。指标体系法是将一

组相互联系的指标整合成系统性的整体的方法。在退化草地恢复的研究中常运用不同的方法将一系列结构和功能指标进行整合来对其状态进行评估。

3.3.1 VOR 模型

Costanza 提出,生态系统的健康应该与可持续性密切相关,可持续性意味着系统在面对外部压力时能够长期保持其结构(组织)和功能(活力),提出用于生态系统健康评价的 VOR 模型^[85]。在该模型中,V 表示生态系统活力,包括生态系统活动、生产力、代谢,O 表示生态系统组织,包括生态系统多样性和食物网络的连接性,R 代表生态系统恢复力,表示生态系统在扰动后的恢复力^[60]。该方法主要依靠恢复点与参考点的对比得出生态系统每一项的得分,从而判断生态系统恢复的状况。在对内蒙古退化草地进行围封处理后通过 VOR 模型得出草地恢复向好的结论^[86]。虽然该方法早在 1999 年就被国际生态系统健康大会所认可,但是因为该方法主要是考虑植被的状态,没有将环境因素考虑进去,在实际应用中也是更多和其他方法结合起来评价草地恢复状况。

3.3.2 CVOR 模型

由于 VOR 评价体系缺少对生态系统具有重要影响的环境指标,并且在不同的草地类型间不具有可比性,所以任继周提出将基况信息加入 VOR 体系的 CVOR 综合评价体系,其中基况代表生态系统的大气、土地与位点等因子的综合^[61]。侯扶江等将 CVOR 综合评价体系应用于阿拉善草地的健康评价,将土壤有机碳作为评价草地基况的重要指标,综合评定了阿拉善草地健康随放牧水平和管理方式不同的变化,反应了比 VOR 更加准确的草地健康信息^[87]。陆均等基于 CVOR 指数对巴音布鲁克高寒草原自 2004 年至 2012 年的草地健康状况进行评价,发现该生态系统 CVOR 指数逐渐上升^[88]。虽然该方法被广泛应用于评价草地健康,但是在研究中基况的选择往往局限于土壤有机质^[86, 88],所以该评价方法可能也会对实际的恢复效果做出片面的评价。

3.3.3 PSR 模型

PSR 由联合国经济合作与发展组织(OECD)和联合国环境署(UNEP)于 20 世纪 80 年代末提出,其基本思想如下:由于人类活动对环境施加的压力使得环境状态发生改变,然后人类应该对环境的变化作出反应,施加措施以使其恢复原来的状态。该模型中“压力”表示人类活动对环境造成的负面影响;“状态”表示现有的环境质量以及自然资源状况;“反应”是人类对所面临问题的反应^[62]。对于将各准则层综合起来的方法有简单的加权求和以及改进的公式等^[89]。该方法相比于 VOR 和 CVOR 模型而言将更多的指标纳入到评价体系中,并且将社会经济指标,例如人口密度、城市化率和人均生产总值等包含进去。该模型能够更加贴近实际情况对退化草地的恢复情况做出评价。赵玉婷等基于 PSR 模型压力、状态和响应三个层面,分别选取一系列指标建立评价体系对甘南州高寒草地生态系统 2001 年至 2013 年的健康状况进行评价,结果表明近 13 年来该区域大部分草地健康状况的负向变化趋势明显^[89]。

3.3.4 层次分析法

层次分析法(Antalytical Hierarchy Process, AHP)由美国运筹学家 A.L.Saaty 提出,结合定性与定量分析,用于得出不同方案的重要程度的权重^[90],其基本思想是将要分析的指标按照彼此间的关系进行层次化,再分层次分析评价^[91]。层次分析法主要是对影响目标的各因素进行权重的计算,因此需要构建层次化的结构模型,例如生态系统健康评价的 PSR 模型,然后依次构造每一层的判断矩阵并计算权重值,最后得到每个指标对目标层的合成权重。周华坤等对江河源区退化高寒草甸运用层次分析法进行退化成因分析和恢复措施的有效性分析,得出该区域的超载放牧与气候变暖以及鼠害增加和人类干扰等因素对草地退化的相对贡献量^[63]。吴蓉蓉等对青海省河南县高寒草地运用层次分析法得出该区域大部分草地的健康状况较好,该方法可以给草原管理与退化恢复的措施选择以及合理利用草地资源提供定量依据^[92]。

3.3.5 主成分分析法

在评价草地恢复状况中由于测量指标数量众多并且相互之间存在一定程度的相关性,而主成分分析法可以将原来的指标减少到几个综合指标(主成分),在分析中可以有效避免众多指标之间相互干扰以便更好的

研究样本间的规律^[93]。该方法基本步骤为(1)设置观测样本矩阵;(2)标准化原始数据;(3)计算指标之间相关系数矩阵;(4)计算特征值与特征向量;(5)计算贡献率与累计贡献率并提取主成分。许新忠等利用主成分分析法宁夏荒漠草原不同恢复年限的生态效应进行评价,结果表明5年围栏封育的效果较好^[94]。

越来越多的研究将多种评价方法应用于一个生态系统的评估,刘延斌等利用 VOR 和 CVOR 评价体系对不同措施管理下的退化高寒草地进行评估,对未来的草地管理提供更加科学有效的理论依据^[44]。俞鸿千等也是结合 VOR 和 CVOR 评价体系以及其他多样性指数对宁夏干旱风沙区荒漠草原健康进行评价,分别得出该区域草地健康状况为“不健康”和“警戒”状态,表明该区域草地恢复工作还有待加强^[95]。单贵莲等同样利用 VOR 和 CVOR 评价内蒙古典型草原的放牧与围封样地的健康状况,证明围封确实对草地恢复起到重要作用^[86]。赵玉婷等将 PSR 模型与 AHP 层次分析法结合对高寒牧区草地进行评估,得出该区域大面积的草地健康状况处于负向变化趋势的结论^[89]。

3.4 景观尺度上的评估方法

景观包括两个或者多个相互影响的生态系统以及生态系统之间的群落过渡带^[96]。有研究指出了一系列从景观尺度上描述生态恢复的指标,这些指标可以分为三大类:结构和生物组成;生态系统之间的功能上的相互作用;景观破碎化和退化的程度、类型和原因^[97]。

在欧洲草地的景观尺度上的生态恢复研究发现补播草地的基础物种和建立缓冲区可以有效减少草地的破碎化和化学负荷,能够使退化草地向半自然草地演替。该研究为恢复和管理植被和生境多样性的空间变异性提供了范例^[98]。在瑞典南部草地的恢复研究发现植物传粉昆虫之间的营养关系在提高了不同草地之间的连通性后得到了更好的恢复,表明恢复措施应该考虑景观的空间配置:在独立性高的草地生态系统中应该着重恢复该系统的质量,而在连接性较高的草地中应该更关注恢复草地和保存完好的草地之间的联系^[76]。

有研究表明在景观尺度上依据目标物种的分布特征计算其功能连接度对恢复评估有重要意义。因其易于应用且结果合理,对未来的恢复决策有重要的指导意义^[99]。有研究利用自然度指数(naturalness indicator values, NIVs)^[100]来检验草地恢复的程度,因为植物可以作为反应环境某些特性的生物指标,而自然度指数法是赋予植物不同的得分,根据不同的环境梯度,如温度、光照或土壤湿度,物种根据它们实现的生态最佳状态得到分数(即指标值),最初由 Borhidi 对潘诺尼亚区域的维管植物赋予相应的得分,从“-3”(指示严重退化的物种)到“+6”(指示完好状态的物种)依次代表环境变化趋好^[65]。该方法的优点在于可以不依赖于参考点而对恢复效果做出评价,这对区域尺度上的恢复效果评价有很大的帮助,因为在大尺度上较难选定统一的参考点^[66]。

4 存在的问题及发展趋势

恢复的评估方法的发展方向是逐渐复杂。传统的方法是从简单的生态系统属性(物种丰富度或生态系统功能)对恢复效果进行评估,但是过度的简化不利于指导未来的恢复实践。随着技术的发展和人们认识的提高,评估的角度逐渐复杂,例如物种丰富度、物种组成、功能多样性、遗传多样性和交互网络的复杂度的梯度变化。在分析中将动植物和微生物结合起来,运用跨域生态网络的分析方法,通过与参考点的网络属性的比较判断恢复状况,并且可以识别出该区域的关键组分和不同组分之间的相互作用,为后续的恢复提供新的见解。所以未来对退化恢复的草地进行评估时应从更加复杂的生态系统的角度(互作网络)进行分析。

考虑到草地生态系统的完全恢复可能需要较长的时间(几十至几百年),并且现在的评估方法大都依赖于参考系统的状态,因此对退化草地进行评估时应当加入动态评估的要素,例如考虑未来气候变化,将现阶段的生态系统组分及其相互作用与环境和社会变化之间建立联系并构造模型,描述恢复和参考系统的演替轨迹。考虑恢复和参考生态系统的自然演替能够给退化草地恢复效果的评价带来更具价值的信息。

参考文献(References):

[1] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavelle J M, Le Provost

- G, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735.
- [2] Scurlock J M O, Johnson K, Olson R J. Estimating net primary productivity from grassland biomass dynamics measurements. *Global Change Biology*, 2002, 8(8): 736-753.
- [3] Yang Y H, Fang J Y, Tang Y H, Ji C J, Zheng C Y, He J S, Zhu B. Storage, patterns and controls of soil organic carbon in the Tibetan grasslands. *Global Change Biology*, 2008, 14(7): 1592-1599.
- [4] O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change. *Annals of Botany*, 2012, 110(6): 1263-1270.
- [5] Chen Y Z, Mu S J, Sun Z G, Gang C C, Li J L, Padarian J, Groisman P, Chen J M, Li S W. Grassland carbon sequestration ability in China: a new perspective from terrestrial aridity zones. *Rangeland Ecology & Management*, 2016, 69(1): 84-94.
- [6] Gang C C, Zhou W, Chen Y Z, Wang Z Q, Sun Z G, Li J L, Qi J G, Odeh I. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [7] Wang X G, Han J G, Dong Y P. Recent grassland policies in China: an overview. *Outlook on Agriculture*, 2005, 34(2): 105-110.
- [8] Kang L, Han X G, Zhang Z B, Sun O J. Grassland ecosystems in China: review of current knowledge and research advancement. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2007, 362(1482): 997-1008.
- [9] 徐翠, 张林波, 杜加强, 郭杨, 吴志丰, 徐延达, 李芬, 王凤玉. 三江源区高寒草甸退化对土壤水源涵养功能的影响. *生态学报*, 2013, 33(8): 2388-2399.
- [10] Wang Z Q, Zhang YZ, Yang Y, Zhou W, Gang C C, Zhang Y, Li J L, An R, Wang K, Odeh I, Qi J G. Quantitative assess the driving forces on the grassland degradation in the Qinghai - Tibet Plateau, in China. *Ecological Informatics*, 2016, 33: 32-44.
- [11] 尚占环, 董全民, 施建军, 周华坤, 董世魁, 邵新庆, 李世雄, 王彦龙, 马玉寿, 丁路明, 曹广民, 龙瑞军. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近 10 年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. *草地学报*, 2018, 26(1): 1-21.
- [12] 伍星, 李辉霞, 傅伯杰, 靳甜甜, 刘国华. 三江源地区高寒草地不同退化程度土壤特征研究. *中国草地学报*, 2013, 35(3): 77-84.
- [13] Yuan Z Q, Jiang X J, Liu G J, Jin H J, Chen J, Wu Q B. Responses of soil organic carbon and nutrient stocks to human-induced grassland degradation in a Tibetan alpine meadow. *CATENA*, 2019, 178: 40-48.
- [14] 王健, 李傲瑞, 李娟, 卢垟杰. 基于 Web of Science 数据库的我国草地生态修复文献计量学研究. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2019, 4(8): 64-70.
- [15] Conrad M K, Tischew S. Grassland restoration in practice; do we achieve the targets? A case study from Saxony-Anhalt/Germany. *Ecological Engineering*, 2011, 37(8): 1149-1157.
- [16] Waldén E, Lindborg R. Long term positive effect of grassland restoration on plant diversity-success or not? *PLoS One*, 2016, 11(5): e0155836.
- [17] Jackson L L, Lopoukhine N, Hillyard D. Ecological restoration: a definition and comments. *Restoration Ecology*, 1995, 3(2): 71-75.
- [18] Balensiefer M, Rossi R, Ardinghi N, Cenni M, Ugolini M. *SER International Primer on Ecological Restoration*, 2004.
- [19] 尚占环, 董世魁, 周华坤, 董全民, 龙瑞军. 退化草地生态恢复研究案例综合分析: 年限、效果和方法. *生态学报*, 2017, 37(24): 8148-8160.
- [20] Ruiz-Jaen M C, Aide T M. Restoration success: how is it being measured? *Restoration Ecology*, 2005, 13(3): 569-577.
- [21] Hobbs R J. Setting effective and realistic restoration goals: key directions for research. *Restoration Ecology*, 2007, 15(2): 354-357.
- [22] Tilman D, Isbell F, Cowles J M. Biodiversity and ecosystem functioning. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2014, 45: 471-493.
- [23] Engst K, Baasch A, Erfmeier A, Jandt U, May K, Schmiede R, Bruelheide H. Functional community ecology meets restoration ecology: assessing the restoration success of alluvial floodplain meadows with functional traits. *Journal of Applied Ecology*, 2016, 53(3): 751-764.
- [24] Aavik T, Helm A. Restoration of plant species and genetic diversity depends on landscape-scale dispersal. *Restoration Ecology*, 2018, 26(S2): S92-S102.
- [25] Brandt A J, Seabloom E W, Cadotte M W. Nitrogen alters effects of disturbance on annual grassland community diversity: implications for restoration. *Journal of Ecology*, 2019, 107(5): 2054-2064.
- [26] Liu S B, Zamanian K, Schleuss P M, Zarebanadkouki M, Kuzyakov Y. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 252: 93-104.
- [27] Rosenzweig S T, Carson M A, Baer S G, Blair J M. Changes in soil properties, microbial biomass, and fluxes of C and N in soil following post-agricultural grassland restoration. *Applied Soil Ecology*, 2016, 100: 186-194.
- [28] Graham E B, Knelman J E, Schindlbacher A, Siciliano S, Breulmann M, Yannarell A, Beman J M, Abell G, Philippot L, Prosser J, Foulquier A, Yuste J C, Glanville H C, Jones D L, Angel R, Salminen J, Newton R J, Bürgmann H, Ingram L J, Hamer U, Siljanen H M P, Peltoniemi K, Potthast K, Bañeras L, Hartmann M, Banerjee S, Yu R Q, Nogaro G, Richter A, Koranda M, Castle S C, Goberna M, Song B, Chatterjee

- A, Nunes O C, Lopes A R, Cao Y P, Kaisermann A, Hallin S, Strickland M S, Garcia-Pausas J, Barba J, Kang H, Isobe K, Papaspyrou S, Pastorelli R, Lagomarsino A, Lindström E S, Basiliko N, Nemergut D R. Microbes as engines of ecosystem function: when does community structure enhance predictions of ecosystem processes? *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 214.
- [29] Luong J C, Turner P L, Phillipson C N, Seltmann K C. Local grassland restoration affects insect communities. *Ecological Entomology*, 2019, 44 (4): 471-479.
- [30] Casimiro M S, Sansevero J B B, Queiroz J M. What can ants tell us about ecological restoration? A global meta-analysis. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 593-598.
- [31] Atkinson J, Bonser S P. "Active" and "passive" ecological restoration strategies in meta-analysis. *Restoration Ecology*, 2020, 28(5): 1032-1035.
- [32] Batchelor J L, Ripple W J, Wilson T M, Painter L E. Restoration of riparian areas following the removal of cattle in the Northwestern Great Basin. *Environmental Management*, 2015, 55(4): 930-942.
- [33] Auestad I, Austad I, Rydgren K. Nature will have its way: local vegetation trumps restoration treatments in semi-natural grassland. *Applied Vegetation Science*, 2015, 18(2): 190-196.
- [34] Hough-Snee N, Roper B B, Wheaton J M, Budy P, Lokteff R L. Riparian vegetation communities change rapidly following passive restoration at a northern Utah stream. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 371-377.
- [35] Acosta A T R, Jucker T, Prisco I, Santoro R. Passive recovery of Mediterranean coastal dunes following limitations to human trampling//Martínez M L, Gallego-Fernández J B, Hesp P A, eds. *Restoration of Coastal Dunes*. Berlin: Springer, 2013: 187-198.
- [36] Beechie T J, Sear D A, Olden J D, Pess G R, Buffington J M, Moir H, Roni P, Pollock M M. Process-based principles for restoring river ecosystems. *BioScience*, 2010, 60(3): 209-222.
- [37] 赫凤彩, 张婧斌, 邢鹏飞, 赵祥, 任国华. 围封对晋北赖草草地土壤碳氮磷生态化学计量特征的影响及其与植被多样性的关系. *草地学报*, 2019, 27(3): 644-650.
- [38] 陈冬明, 张楠楠, 刘琳, 仲波, 唐中林, 严文超, 徐良英, 孙庚. 不同恢复措施对若尔盖沙化草地的恢复效果比较. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 573-578.
- [39] Scotton M. Establishing a semi-natural grassland: effects of harvesting time and sowing density on species composition and structure of a restored *Arrhenatherum elatius* meadow. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 220: 35-44.
- [40] Koyama A, Koyanagi T F, Akasaka M, Takada M, Okabe K. Combined burning and mowing for restoration of abandoned semi-natural grasslands. *Applied Vegetation Science*, 2017, 20(1): 40-49.
- [41] Sengl P, Magnes M, Weithaler K, Wagner V, Erdös L, Berg C. Restoration of lowland meadows in Austria: a comparison of five techniques. *Basic and Applied Ecology*, 2017, 24: 19-29.
- [42] 仁增旺姆, 姜丽丽, 贾书刚. 氮磷添加对青稞人工草地生产生态功能的影响分析. *高原科学研究*, 2018, 2(4): 7-13.
- [43] 曲文杰, 宋乃平, 陈林, 刘秉儒, 杨新国. 荒漠草原两种沙化草地对浅耕翻的响应. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 85-89, 94-94.
- [44] 刘延斌, 张典业, 张永超, 石明明, 尚振艳, 贺磊, 宗文杰, 傅华, 牛得草. 不同管理措施下高寒退化草地恢复效果评估. *农业工程学报*, 2016, 32(24): 268-275.
- [45] 李以康, 杜岩功, 张正芝, 林丽, 郭小伟, 张法伟, 李茜, 周华坤, 曹广民. 种子补播恢复退化草地研究进展. *草地学报*, 2017, 25(6): 1171-1177.
- [46] 宋君祥, 雷雄, 叶明清, 张惊乐, 杨颖, 蔡东阳, 扎德. 生物有机肥对川西北退化草地群落结构和生产性能的影响. *草地学报*, 2019, 27 (5): 1355-1363.
- [47] 曹凯, 徐珍珍, 孟翔, 孙伶俐, 王丹, 刘伟, 谢开云. 刈割和施肥对新疆半干旱区退化补播草地生产力的影响. *新疆农业大学学报*, 2021, 44(1): 62-71.
- [48] 王书转, 郝明德, 普琼, 吴振海. 黄土区苜蓿人工草地群落生态与生产功能演替. *草业学报*, 2014, 23(6): 1-10.
- [49] Koziol L, Bever J D. The missing link in grassland restoration: arbuscular mycorrhizal fungi inoculation increases plant diversity and accelerates succession. *Journal of Applied Ecology*, 2017, 54(5): 1301-1309.
- [50] Neuenkamp L, Prober S M, Price J N, Zobel M, Standish R J. Benefits of mycorrhizal inoculation to ecological restoration depend on plant functional type, restoration context and time. *Fungal Ecology*, 2019, 40: 140-149.
- [51] 徐粒, 高琼, 王亚林. 围封 6 年对温带典型草原坡地物种多样性及其与地上生物量的关系的影响. *生态环境学报*, 2014, 23(3): 398-405.
- [52] 肖金玉, 蒲小鹏, 徐长林. 禁牧对退化草地恢复的作用. *草业科学*, 2015, 32(1): 138-145.
- [53] 冯云飞, 李猛, 李少伟, 邸迎伟, 沈振西, 张宪洲, 余成群, 严俊, 席永土, 武建双. 2010-2017 年藏北高寒退化草地禁牧恢复效果评价. *草业科学*, 2019, 36(4): 1148-1162.
- [54] Martin L M, Moloney K A, Wilsey B J. An assessment of grassland restoration success using species diversity components. *Journal of Applied*

- Ecology, 2005, 42(2): 327-336.
- [55] 武胜男, 张曦, 高晓霞, 许驭丹, 吴晓慧, 单席凯, 刘世梁, 董全民, 董世魁, 温璐. 三江源区“黑土滩”型退化草地人工恢复植物群落的演替动态. 生态学报, 2019, 39(7): 2444-2453.
- [56] Trowbridge C C, Stanley A, Kaye T N, Dunwiddie P W, Williams J L. Long-term effects of prairie restoration on plant community structure and native population dynamics. Restoration Ecology, 2017, 25(4): 559-568.
- [57] 宿婷婷, 马红彬, 周瑶, 贾希洋, 张蕊, 张双乔, 胡艳莉. 黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应. 草业学报, 2019, 28(4): 34-46.
- [58] Montalvo A M, Williams S L, Rice K J, Buchmann S L, Cory C, Handel S N, Nabhan G P, Primack R, Robichaux R H. Restoration biology: a population biology perspective. Restoration Ecology, 1997, 5(4): 277-290.
- [59] Kollmann J, Meyer S T, Bateman R, Conradi T, Gossner M M, de Souza Mendonça Jr M, Fernandes G W, Hermann J M, Koch C, Müller S C, Oki Y, Overbeck G E, Paterno G B, Rosenfield M F, Toma T S P, Weisser W W. Integrating ecosystem functions into restoration ecology—recent advances and future directions. Restoration Ecology, 2016, 24(6): 722-730.
- [60] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering. Ecological Engineering, 2012, 45: 24-29.
- [61] 任继周. 草地资源的属性、结构与健康评价//中国草地科学进展: 第四届第二次年会暨学术讨论会文集. 厦门: 中国草学会, 1996.
- [62] Chen L R, Li Q, Ding Y. The evaluation of household pasture's sustainable development based on PSR frame//Proceedings of 2007 International Conference on Convergence Information Technology. Gwangju: IEEE, 2007.
- [63] 周华坤, 赵新全, 周立, 唐艳鸿, 刘伟, 师燕. 层次分析法在江河源区高寒草地退化研究中的应用. 资源科学, 2005, 27(4): 63-70.
- [64] 张光茹, 李红琴, 杨永胜, 王军邦, 祝景彬, 罗谨, 贺慧丹, 李英年. 基于主成分分析对退化高寒草甸不同恢复方式下草地质量的综合评价. 中国草地学报, 2020, 42(2): 76-82.
- [65] Erdős L, Bátor Z, Penksza K, Dénes A, Kevey B, Kevey D, Magnes M, Sengl P, Tölgyesi C. Can naturalness indicator values reveal habitat degradation? A test of four methodological approaches. Polish Journal of Ecology, 2017, 65(1): 1-13.
- [66] Sengl P, Magnes M, Erdős L, Berg C. A test of naturalness indicator values to evaluate success in grassland restoration. Community Ecology, 2017, 18(2): 184-192.
- [67] Harzé M, Monty A, Boisson S, Pitz C, Hermann J M, Kollmann J, Mahy G. Towards a population approach for evaluating grassland restoration—a systematic review. Restoration Ecology, 2018, 26(2): 227-234.
- [68] Cosentino B J, Schooley R L, Bestelmeyer B T, McCarthy A J, Sierzeza K. Rapid genetic restoration of a keystone species exhibiting delayed demographic response. Molecular Ecology, 2015, 24(24): 6120-6133.
- [69] González E, Rochefort L, Boudreau S, Poulin M. Combining indicator species and key environmental and management factors to predict restoration success of degraded ecosystems. Ecological Indicators, 2014, 46: 156-166.
- [70] Martin L M, Wilsey B J. Assessing grassland restoration success: relative roles of seed additions and native ungulate activities. Journal of Applied Ecology, 2006, 43(6): 1098-1109.
- [71] Cox R D, Allen E B. The roles of exotic grasses and forbs when restoring native species to highly invaded southern California annual grassland. Plant Ecology, 2011, 212(10): 1699-1707.
- [72] Vanden Broeck A, Ceulemans T, Kathagen G, Hoffmann M, Honnay O, Mergey J. Dispersal constraints for the conservation of the grassland herb *Thymus pulegioides* L. in a highly fragmented agricultural landscape. Conservation Genetics, 2015, 16(4): 765-776.
- [73] Delaney J T, Baack E J. Intraspecific chromosome number variation and prairie restoration—A case study in Northeast Iowa, U.S.A. Restoration Ecology, 2012, 20(5): 576-583.
- [74] Aavik T, Holderegger R, Edwards P J, Billeter R. Patterns of contemporary gene flow suggest low functional connectivity of grasslands in a fragmented agricultural landscape. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(2): 395-403.
- [75] Harzé M, Mahy G, Bizoux J P, Piqueray J, Monty A. Specialist plant species harbour higher reproductive performances in recently restored calcareous grasslands than in reference habitats. Plant Ecology and Evolution, 2015, 148(2): 181-190.
- [76] Rotchés-Ribalta R, Winsa M, Roberts S P M, Öckinger E. Associations between plant and pollinator communities under grassland restoration respond mainly to landscape connectivity. Journal of Applied Ecology, 2018, 55(6): 2822-2833.
- [77] Jamison S L, Robertson M, Engelbrecht I, Hawkes P. An assessment of rehabilitation success in an African grassland using ants as bioindicators. Koedoe, 2016, 58(1): a1383.
- [78] Tölgyesi C, Török P, Kun R, Csathó A I, Bátor Z, Erdős L, Vadász C. Recovery of species richness lags behind functional recovery in restored grasslands. Land Degradation & Development, 2019, 30(9): 1083-1094.
- [79] 罗先香, 杨建强. 海洋生态系统健康评价的底栖生物指数法研究进展. 海洋通报, 2009, 28(3): 106-112.
- [80] 马克明, 孔红梅, 关文彬, 傅伯杰. 生态系统健康评价: 方法与方向. 生态学报, 2001, 21(12): 2106-2116.

- [81] 马艳滢, 李巧, 冯萍, 杨自忠. 云南苍山火烧迹地不同恢复期地表蜘蛛群落多样性. 生态学报, 2013, 33(3): 964-974.
- [82] 张红玉, 欧晓红. 以昆虫为指示物种监测和评价森林生态系统健康初探. 世界林业研究, 2006, 19(4): 22-25.
- [83] 刘满强, 胡锋, 李辉信, 陈小云, 何圆球. 退化红壤不同人工林恢复下土壤节肢动物群落特征. 生态学报, 2002, 22(1): 54-61.
- [84] 李巧, 陈彦林, 周兴银, 贝荣塔, 尹立红, 熊忠平. 退化生态系统生态恢复评价与生物多样性. 西北林学院学报, 2008, 23(4): 69-73.
- [85] Costanza R. Toward an operational definition of ecosystem health//Costanza R, Norton B G, Haskell B D, eds. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management. Washington: Island Press, 1992: 239-256.
- [86] 单贵莲, 陈功, 刘钟龄, 闫志坚, 初晓辉. 典型草原健康评价的 VOR 和 CVOR 指数. 草地学报, 2012, 20(3): 401-406.
- [87] 侯扶江, 于应文, 傅华, 朱宗元, 刘钟龄. 阿拉善草地健康评价的 CVOR 指数. 草业学报, 2004, 13(4): 117-126.
- [88] 陆均, 胡玉昆, 岳平, 李凯辉. 基于 CVOR 指数的巴音布鲁克高寒草原健康评价. 干旱区研究, 2017, 34(4): 862-869.
- [89] 赵玉婷, 李文龙, 陈迪, 余翠, 赵新来, 许静, 郭旭临. 高寒牧区草地生态系统健康动态评价——以甘南地区为例. 草业科学, 2017, 34(1): 16-29.
- [90] 高卓, 何鑫, 胡祖芳, 罗荐文. 层次分析法在生态系统健康评价指标体系中的应用. 中央民族大学学报: 自然科学版, 2017, 26(1): 61-66.
- [91] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 陈俊羊, 赵俊峰. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [92] 吴蓉蓉, 史惠兰, 王维, 李江鹏, 姚卫康, 李希来. 青海河南高寒草地生态系统健康评价. 安徽大学学报: 自然科学版, 2018, 42(3): 98-108.
- [93] 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 主成分分析对恢复过去植被和环境作用的再分析——以北京坟庄剖面为例. 地理科学, 1997, 17(4): 316-322.
- [94] 许新忠, 许冬梅. 宁夏荒漠草原自然恢复演替过程中生态效应的评价. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11781-11783.
- [95] 俞鸿千, 蒋齐, 王占军, 何建龙, 何晨. VOR、CVOR 指数在宁夏干旱风沙区荒漠草原健康评价中的应用——以盐池县为例. 草地学报, 2018, 26(3): 584-590.
- [96] Aronson J, Le Floch E. Vital landscape attributes: missing tools for restoration ecology. Restoration Ecology, 1996, 4(4): 377-387.
- [97] Radeloff V C, Mladenoff D J, Boyce M S. A historical perspective and future outlook on landscape scale restoration in the northwest Wisconsin pine barrens. Restoration Ecology, 2000, 8(2): 119-126.
- [98] Lengyel S, Varga K, Kosztyi B, Lontay L, Déri E, Török P, Tóthmérész B. Grassland restoration to conserve landscape-level biodiversity: a synthesis of early results from a large-scale project. Applied Vegetation Science, 2012, 15(2): 264-276.
- [99] Volk X K, Gattringer J P, Otte A, Harvolk-Schöning S. Connectivity analysis as a tool for assessing restoration success. Landscape Ecology, 2018, 33(3): 371-387.
- [100] Borhidi A. Social behaviour types, the naturalness and relative ecological indicator values of the higher plants in the Hungarian flora. Acta Botanica Hungarica, 1995, 39: 97-181.