



草原健康、退化与恢复一体化评估: 概念与方法

黄麟¹, 樊江文^{1*}, 杨智², 王冠聪², 李愈哲¹, 张海燕¹, 张雅娴³, 石俊华⁴, 王穗子¹

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 国家林业和草原局草原管理司, 北京 100714;

3. 西南民族大学草地资源学院, 成都 610041;

4. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714

* 联系人, E-mail: fanjw@igsrr.ac.cn

草原是我国面积最大的陆地生态系统, 具有重要的水库、钱库、粮库、碳库功能, 在生物多样性保护、气候和水的调节以及全球生物地球化学循环中发挥着关键作用, 为人类提供了广泛的物质和非物质利益, 特别是食物生产、水供应和调节、碳储存和气候减缓、授粉和文化服务^[1-3]。健康的草原具有活力和弹性, 能够维持其组织并保持自身运作能力^[4], 持续为人类提供良好的生态功能和服务, 与人类可持续发展密切相关。然而, 由于气候变化、生物入侵、过度放牧、无序征占用等因素^[4-7], 全球多达49%的草原发生了不同程度的退化^[5,8-11], 破坏了其支持生物多样性、生态系统服务和人类福祉的能力, 草原退化对依靠草原获取食物、燃料、纤维和药用产品以及文化价值的数亿人构成巨大威胁^[12]。近几十年, 世界各地开展了大量退化草地恢复的研究和实践, 但普遍难以将草原的生物多样性及生态功能恢复到原始状态^[13], 加之气候变化威胁, 增加了退化草地恢复过程中的不确定性^[14]。因此, 掌握并推动草原退化问题的解决, 是实现《生物多样性公约》的爱知生物多样性目标、联合国可持续发展目标、联合国生态系统恢复十年(2021~2030年)的一个迫切需求^[10,15]。

作为一个国内外尚未彻底解决的难题, 尽管诸多学者提出草地健康、退化的理论、方法及标准^[16-21], 但是多数研究并未厘清草地健康与草地退化的关系, 相关标准存在争议、缺少系统与综合的理解, 当前仍停留在表观描述和表征治理阶段^[21,22], 健康状况与退化、恢复过程之间的关系亟须深入研究。同时, 区域间和区域内草原的类型多样性, 以及产生草原退化的许多驱动因素, 意味着在我国广大草原区使用一套完全统一的准则不具备现实性。此外, 宏观层面的管理和决策需求需要一个相对统一的标准化方法。故而, 在提高对草原健康、退化与恢复认识的基础上, 需要制定标准化的评估指标体系与技术方法, 既能够科学、快速、高效地掌握我国草原的健康状况、退化程度以及过去的恢复水平, 也能够实现对草原作为“三生”空间与“四库”作用以满足各方面利益相关者需求的认知, 有助于制定生态解决方案来对抗退化和促



樊江文 中国科学院地理科学与资源研究所研究员, 中国草学会副理事长, 中国草学会草地资源与利用专业委员会主任委员。长期从事草地生态系统管理、草地生态系统变化监测与评估、草地生态系统对全球变化的响应与适应等研究。

进恢复, 推动国家和地方层面的草原保护和修复, 并将这些措施纳入可持续发展政策, 有效提升草原的社会经济、文化和生态效益。

1 草原及其健康、退化与恢复的概念辨析

过去并未严格区分草地和草原的用法, 关于草原的科学定义, 至今尚未统一。20世纪50年代以来, 早期强调草原是生长牧草的地类, 后期逐渐认识到草原是草及其着生的土地构成的综合体, 近期认为草原不仅包括草和土地, 还应包括动物、微生物等其他生物资源及其生态环境^[23]。本研究认为草原是具有一定分布面积、由生长草本植物为主的天然草地(包括草山和草坡)和人工草地(包括改良草地和退耕还草地)以及其上着生的植物群落、其他生物和环境构成的有机整体。我国已发布与草原健康、草原退化相关的多个标准文件(表1和S1), 其中, 关于草原健康的定义一致性较强, 而草原退化的定义有所差异、评价方法也各有不同。然而, 都未将草原健康与草原退化进行一体化考虑。

草原健康的定义, 20世纪90年代由美国首先提出, 即草原生态系统中土壤、植被、水、空气以及生态过程的完整性得到平衡和持续的程度, 包括土壤稳定性、水文学功能和生物群落完整性^[16-18]。任继周^[20]将其定义为草原生态系统的结构稳定和功能正常的状态。表1中GB/T 21439-2008将其定

表 1 现有标准中草原健康相关内容对比

Table 1 Comparison of existing standards relating to grassland health

名称	定义	评估指标	评估方法	参照系
草原健康状况评价 (GB/T 21439-2008)	草原生态系统中的生物和非生物结构的完整性、生态过程的平衡及其可持续发展的程度	(1) 土壤稳定性; (2) 水文功能; (3) 生物完整性	分级评分, 加权综合	评价区内顶级植物群落为参照
草地植被健康监测评价方法 (NY/T 3648-2020)	草地群落具有较高比例的原生建群植物和优良植物, 能够长期稳定维持植物、动物正常生长发育的状态	(1) 植被盖度; (2) 建群植物优良产量; (3) 退化指示植物地上生物量	健康指数, 分为健康、较健康、亚健康、不健康	同期同类型健康草地为参照
天然草地景观生态质量评价技术 规程(DB15/T 2386 2021)	未给出定义	(1) 景观天然性; (2) 土壤稳定性; (3) 植物群落完整性	分级定分, 权重由专家赋值, 综合指数	具有或接近于顶极的天然草地为参照

义为草原生态系统中的生物和非生物结构的完整性、生态过程的平衡及其可持续发展的程度。草原健康评价主要采用单因子罗列、单因子复合、功能评价、界面过程评价等方法, 比如活力-组织-恢复力(Vigor-Organization-Resilience, VOR)、基况-活力-组织-恢复力(Condition-Vigor-Organization-Resilience, CVOR)评价体系模型、压力-状态-响应(Pressure-State-Response, PSR)评价模型、层析分析法、指数评价法、主成分分析法、模糊综合评价法、聚类分析法与属性综合评价法^[19,21,24-26], 发展趋势是逐渐由样地尺度扩展到区域尺度、由单一指标向多指标发展^[21,22]。健康与否的评价指标以草原植被、土壤、地表特征以及生态功能为主^[24-26]。

由于对草原退化的定义具有较大差异, 导致不同区域对草原退化的认知产生较大差别^[10], 实际上主要取决于利益相关者的需求^[27,28]。广义的草原退化是指不利自然因素或不合理利用或人为破坏草原植被, 引起草原生态恶化, 牧草产量降低、品质下降, 草原利用性能降低甚至失去利用价值的过程(<https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D77C23D3A7E05397BE0A0AB82A>)。大部分评估认为我国70%~90%可利用天然草原退化且具有明显的区域差异^[29,30], 青藏高原90%草原在某种程度上已经退化^[10]。当前, 多利用植被覆盖度、生物量、生产力、物种丰富度以及土壤侵蚀程度或土壤表面特征等指标来判断草原退化^[5,31-33], 或构建草原退化指数^[34], 按照一定标准区分轻、中、重等不同程度草原退化。也从植被物种组成角度, 基于高光谱遥感估算植被结构特征值, 开展草原退化监测^[35]。草原退化评估面临的主要问题包括基线评估和指标体系的完整性与可行性冲突, 仅依靠归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)等遥感数据源所得结果的不确定性^[36,37]。

草原恢复是通过自然或人工干预使受损草原生态系统恢复到接近于受损前状态的过程, 自然恢复需依靠草原生态系统自身调节和恢复能力向原生顶级群落演替的过程, 而人工干预引导或促进草地生态自然演化过程的恢复称之为草

原修复^[10,13,20,38]。早期退化草原的恢复多以原生植被的盖度恢复为目标^[39,40], 也有将土壤碳库作为恢复目标^[41], 还有生产力、目标物种、植物群落结构、土壤性质等^[40], 而近年来注重防风固沙、碳固定等生态系统功能的恢复^[42]。退化草原恢复目标设置需要考虑当地的限制条件和利益相关者的需求^[43], Bardgett等人^[10]提出可通过对退化与恢复草原的潜在生态系统服务权衡的标准化评估来平衡利益相关者的需求, 并确定一个参照生态系统以指导恢复目标, 并为监测和评估提供参考。此外, 退化草原土壤的修复对草原的可持续发展至关重要^[44]。

参考上述已有定义, 结合当前草原科学保护修复与生态可持续利用的需求, 本研究认为草原健康是草原生态系统当前的状态, 即健康程度现状, 而草原退化是当前健康程度与理想健康状态相比, 发生退化演变的过程。因此, 给出草原健康、草原退化、草原恢复的定义如下: 草原健康是草原生态系统综合特性所呈现的状态, 是草原生态系统结构和功能完整, 并良好运行的体现。健康的草原, 其生态系统能量和物质流动相对活跃, 可维持系统的组织结构, 在压力下能够自我恢复, 系统整体具有良好的稳定性、多样性、复杂性、平衡性和可持续性。草原退化是在不合理人为活动或不利自然因素的作用下, 使得草原出现植被及土壤衰退、生物量降低、牧草品质下降、生态功能减弱, 所能提供生态系统产品和服务的能力下降甚至失去利用价值的现象, 是草原健康状态不断衰退的演变过程。草原恢复是在自然因素或人为介入作用下, 已经退化、损害或者彻底破坏的草原生态系统恢复到原有或应有健康状态的过程。在恢复过程中, 草原生态系统呈现出生产力增加, 土壤肥力增强, 物种多样性和生态系统完整性逐步恢复, 所提供生态系统产品和服务逐渐提升。

2 一体化评估的技术框架

本研究构建了一个标准化的草原健康、退化与恢复一体化评估技术框架(图1), 不仅可以根据实际需求对草原健康

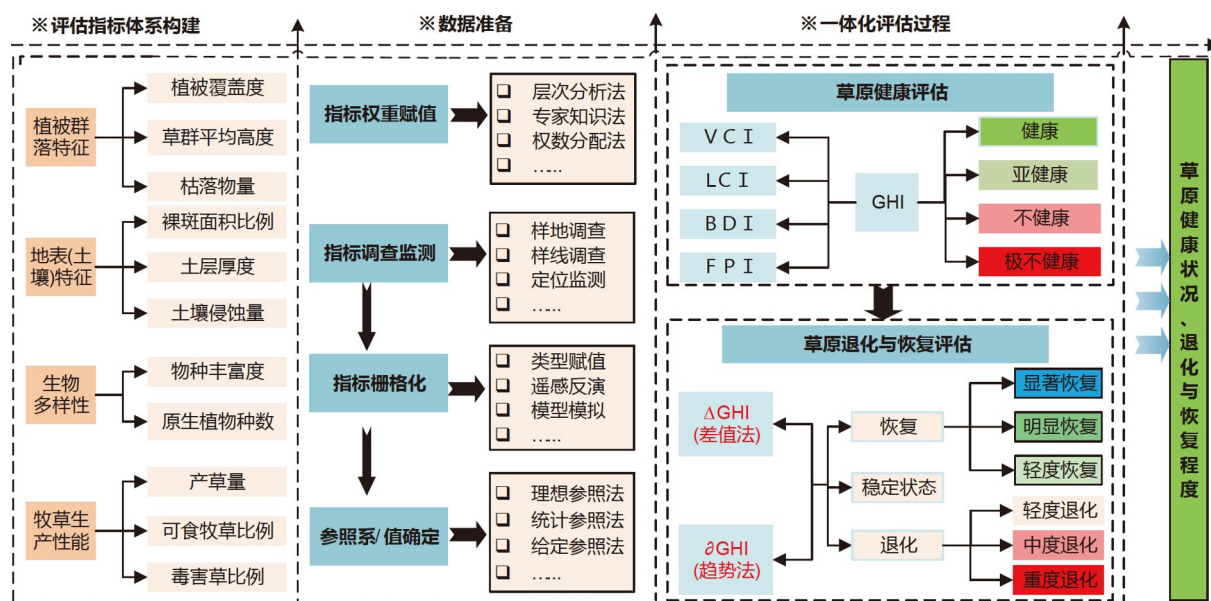


图1 (网络版彩色)草原健康、退化与恢复评估技术框架

Figure 1 (Color online) Technical framework for the assessment of grassland health, degradation, and restoration

状况进行监测,同时评估草原退化的严重程度及其恢复成效。第一,按照评估区域草原基本特性及其气候地理特征,确定评估指标体系;第二,利用草原调查监测基础数据,采用层次分析法并结合专家知识和管理者经验,确定各指标的权重系数;第三,针对评估指标整理历史时期草原调查监测数据并开展有针对性的补充调查监测,形成地面数据集,利用空天地融合系列方法进行指标空间化处理,形成栅格数据集;第四,通过选择理想参照值法、统计参照值法、给定参照值法并结合专家知识,确定各指标的参照值;第五,利用地面和栅格数据集,可在不同空间尺度开展草原健康状况评估;第六,采用差值法或趋势法进行草原退化与恢复程度的评估。

遵循科学性、可操作性、代表性、系统性等原则,参考相关的国家和行业标准,结合全国草原调查监测技术规程,构建草原健康状况、退化与恢复程度评估指标体系。该指标体系包括植被群落状况、地表(土壤)特征、生物多样性、牧草生产性能等4个一级指标和11个二级指标(表2)。

以数据可获得性和评估可操作性为原则,参考全国草原调查监测的草原样地调查因子,确定了评估指标的必选或可选属性,其中,必选指标4个,可选指标7个。对于一级指标,首先开展64名草原学专家和草原管理者的问卷调查,利用专家打分法提供4个指标相对重要性的打分判断矩阵,结合层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)汇总计算得到判断矩阵,进而得到4个指标的权重系数。对于二级指标,首先根据必选与可选属性,按所属一级指标的总权数为1,必选与可选指标的权数之比为2:1,得到初步权重系数,再通过专家知识法调整得到最终的权重系统。实际评估时,除必选指标以

外,根据需求选择可选指标,再按权数法调整权重系数。

3 评估指标量化方法

利用地面样方、样线调查和定位监测所获取的评估指标数据,通过类型赋值、遥感反演、模型模拟等方法进行评估指标的栅格空间化处理,形成地面和栅格的指标数据集,为统计汇总、分析评估、“一张图”制图奠定数据基础。

植被覆盖度:选取7~9月的哨兵2号(Sentinel-2)卫星影像数据,经过数据预处理和质量控制,采用最大值合成法获得草原生长最旺盛时期影像数据。根据不同草原类型的植被特征,分别选择NDVI、增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)与地面样方数据,采用一元线性回归、多元线性回归、机器学习等方法,建立植被覆盖度与植被指数的经验关系,构建不同草原类型植被覆盖度反演模型,并根据样方数据进行模型验证优选^[45],最终根据优选后的模型反演评估区域草原植被覆盖度。

枯落物量:依据地面样方得到的枯落物量数据,建立不同草原类型枯落物量与地上生物量、年均温、年降水量等因素的相关关系,构建枯落物量估算模型,得到评估区域草原枯落物量的空间分布数据。

裸斑面积比例:基于空间分辨率优于30 m的遥感影像,判读识别评估区域内的裸斑,并采用地面数据进行验证,在此基础上,统计评估单元的裸斑面积及其比例,进而得到空间分布数据。

土层厚度:以中国土壤厚度空间分布数据为基础,该数据根据土壤普查获取到的土壤剖面数据编制而成。结合地面

表 2 草原健康状况、退化与恢复程度评估指标体系

Table 2 A system of indicators to assess the grassland health, grassland degradation and restoration

一级指标		二级指标		方向	属性
指标名称	权重系数	指标名称	权重系数		
1. 植被群落状况	0.30	(1) 植被覆盖度(%)	0.40	正	必选
		(2) 草群平均高度(cm)	0.30	正	可选
		(3) 枯落物量(g/m ²)	0.30	正	可选
2. 地表(土壤)特征	0.20	(4) 裸斑面积比例(%)	0.50	负	必选
		(5) 土层厚度(cm)	0.25	正	可选
		(6) 土壤侵蚀量(t/km ²)	0.25	负	可选
3. 生物多样性	0.25	(7) 物种丰富度	0.50	正	可选
		(8) 原生植物种数(种)或占比(%)	0.50	正	必选
		(9) 产草量(kg/hm ²)	0.50	正	必选
4. 牧草生产性能	0.25	(10) 可食牧草比例(%)	0.25	正	可选
		(11) 毒害草比例(%)	0.25	负	可选

调查土层厚度数据进行校正, 获得评估区域的土层厚度空间分布.

土壤侵蚀量: 采用修正的土壤侵蚀方程(Revised Universal Soil loss Equation, RULSE)、修正的土壤风蚀方程(Revised Wind Erosion Equation, RWEQ)等成熟的统计、物理、过程和经验模型进行土壤侵蚀量计算, 并采用地面调查数据进行参数本地化和结果验证, 得到评估区域土壤侵蚀量的空间分布数据.

物种丰富度: 依据地面样方植物种数数据, 计算物种丰富度, 基于光谱变异性与物种丰富度有很好相关关系的光谱异质性假说, 利用Sentinel-2卫星影像, 以草原类型空间分布为基础, 结合赋值法与光谱得到评估区域的物种丰富度空间分布数据^[46,47].

产草量: 根据不同草原类型特征, 采用经验模型、生态模型等^[48]计算得到评估区域的产草量空间分布数据, 并利用地面数据进行参数本地化和结果验证.

其他指标: 以草原小班为基本单元, 依据地面样方得到的草群平均高度、原生植物种数(种)或占比数据、可食牧草比例、毒害草比例, 统计得到评估区域内不同草原类型的相应指标量, 根据草原类型空间分布, 采用赋值法得到评估区域的原相应指标空间分布数据.

4 草原健康状况评估方法

依据草原健康、退化与恢复一体化评估技术框架, 构建草原健康指数(Grassland Healthy Index, GHI)反映草原生态系统的整体状况, GHI由植被群落状况指数(Vegetation Community Index, VCI)、地表(土壤)特征指数(Land surface Characteristic Index, LCI)、生物多样性指数(Biodiversity Index,

BDI)、牧草生产性能指数(Forage Performance Index, FPI)4个分指数构成, 分别反映草原植被的生长状况好坏、草原地表基况优劣、生物多样性丰富程度多少和草原生产能力高低:

$$GHI = 0.3 \times VCI + 0.2 \times LCI + 0.25 \times BDI + 0.25 \times FPI, \quad (1)$$

$$VCI = \left(\frac{VC}{VC_r} \times 0.4 + \frac{H}{H_r} \times 0.3 + \frac{L}{L_r} \times 0.3 \right) \times 100, \quad (2)$$

式中, VC是植被覆盖度(%), VC_r是植被覆盖度的参照值, H是草群平均高度(cm), H_r是草群平均高度的参照值, L是枯落物量(g/m²), L_r是枯落物量的参照值.

$$LCI = \left(\frac{BP}{BP_r} \times 0.5 + \frac{ST}{ST_r} \times 0.25 + \frac{SE_r}{SE} \times 0.25 \right) \times 100, \quad (3)$$

式中, BP是裸斑面积比例(%), BP_r是裸斑面积比例的参照值, ST是土层厚度(cm), ST_r是土层厚度的参照值, SE是土壤侵蚀量, SE_r是土壤侵蚀量的参照值.

$$BDI = \left(\frac{SR}{SR_r} \times 0.5 + \frac{DN}{DN_r} \times 0.5 \right) \times 100, \quad (4)$$

式中, SR是物种丰富度, 可包括植物、动物、微生物等物种; SR_r是物种丰富度的参照值; DN是原生植物种数(种)或占比; DN_r是原生植物种数(种)或占比的参照值.

$$FPI = \left(\frac{FP}{FP_r} \times 0.5 + \frac{EF}{EF_r} \times 0.25 + \frac{PH_r}{PH} \times 0.25 \right) \times 100, \quad (5)$$

式中, FP是产草量(kg/hm²), FP_r是产草量的参照值, EF是可食牧草比例(%), EF_r是可食牧草比例的参照值, PH是毒害草比例(%), PH_r是毒害草比例的参照值.

表3 基于GHI的草原健康状况等级划分及说明

Table 3 Classification and description of grassland health degrees based on GHI

序号	指数	等级	说明
I	$GHI \geq 80$	健康	草原植被覆盖度高、枯落物厚, 植被群落状况优; 无明显土壤侵蚀, 地表特征完整; 原生植物物种丰富度高, 生物多样性丰富; 可食牧草产量高, 毒害草极少, 牧草生产性能强
II	$60 \leq GHI < 80$	亚健康	草原植被覆盖度较高、枯落物较厚, 植被群落状况良好; 轻度土壤侵蚀, 地表特征较完整; 原生植物物种丰富度较高, 生物多样性较高; 可食牧草产量较高, 毒害草少, 牧草生产性能较强
III	$40 \leq GHI < 60$	不健康	草原植被覆盖度低、枯落物少, 植被群落状况差; 裸斑面积大, 中度土壤侵蚀, 地表破碎; 原生植物物种较不丰富, 生物多样性贫乏; 可食牧草产量低, 毒害草多, 牧草生产性能弱
IV	$GHI < 40$	极不健康	草原植被覆盖度极低、枯落物无, 植被群落状况极差; 裸斑面积极大, 重度及以上土壤侵蚀, 地表极为破碎; 原生植物物种极不丰富, 生物多样性极为贫乏; 可食牧草产量极低, 毒害草比例极高, 牧草生产性能差

根据GHI计算结果, 将草原健康状况分为4个等级: 健康、亚健康、不健康、极不健康(表3)。

5 评估的参照值确定方法

确定参照值是草原健康评估的一个关键因素, 现有理想参照值法、统计参照值法、历史状况对比法、样地内外对比法、现状最大/最小/平均值对比法、专家给定经验值法等多个参照值确定方法。其中, 理想参照值法是在评估区域内, 按照生态地理分区和草原类型, 以长期监测的围封样地、或主要受气候影响而较少受人类干扰、并且结构和功能优质的草原作为参照系, 以参照系各个指标的最优值作为参照值。统计参照值法是依据草原样方调查数据, 统计得到不同草原类型各指标的最优值作为参照值。给定参照值法是基于20世纪80年代以来的历史调查结果, 结合专家知识给定各指标的参照值。

本文以4个必选指标为例, 先采用统计参照值法在全国尺度上给出不同草原类型必选指标的初步参照值, 再利用专家给定经验值法调整给定参照值。首先, 收集了大量文献、历史资料、调查数据, 侧重收集了20世纪80年代全国第一次草地资源调查的相关统计数据, 初步确定了一套不同草原类型的参照值。这些资料数据包括: (1) 草地资源调查统计数据^[49,50]; (2) 根据全国草调样地统计数据^[51,52]和800多个草地型统计数据汇总确定的相关数据^[51,52]; (3) DB15/T 2384-2021参照值(<https://dbba.sacinfo.org.cn>); (4) 全国草原监测样方数据。然后, 结合专家知识, 修订初步确定参照值, 给出了必选指标参照值(表4), 适用于全国的横向比较。在行政单元层面或区域应用中, 可根据评估区域的实际情况给定更为精细的区域性分区分类参照值。

对于给定参照值, 下一步还需要解决以下问题: (1) 目前给定的参照值是80年代全国第一次草地调查的各草原类型平均数据, 而不是最大数值, 因此, 给定参照值并不高; (2) 我国广袤分布的草原在不同地区间的差异极大, 目前仅给定一套全国各草原类型的参照值, 没有地域分区差异, 需要按照不同区域不同草原类型给定差异化的参照值; (3) 目前按照草原类型分别给定参照值, 从精确角度需要深入研究草原型

的参照值; (4) 第一次草地调查至今已过去40多年, 剧烈气候变化与人类活动背景下, 需要根据近些年草原监测数据进行参照值调整; (5) 目前给定的参照值数值, 可根据空间化指标获得相应的空间参照值。

6 草原退化与恢复程度评估方法

可选择差值法或趋势法进行草原退化与恢复程度的评估。

6.1 差值法

根据评估年与基准年份GHI的变化情况(ΔGHI), 判断草原是否退化或恢复, 并评估退化或恢复程度。

$$\Delta GHI = GHI_a - GHI_b \quad (6)$$

式中, GHI_a 是评估年GHI, GHI_b 是基准年份GHI。基准年应为一个时段, 可选择采用全国第一次草地资源调查作为基准年份。若 ΔGHI 为负值, 判断为草原退化; 若 ΔGHI 为正值, 则判断为未退化或恢复。

因此, 依据 ΔGHI 将草原健康变化划分为3个草原退化等级、3个草原恢复等级以及1个稳定状态类型(表5)。

6.2 趋势法

具备5年以上调查数据的情况下, 适用趋势法。根据评估时段GHI的年际变化趋势(δ_{GHI}), 判断草原是否退化或恢复, 并评价退化或恢复程度。可利用线性回归法或Sen斜率估计与Mann-Kendall检验法等计算 δ_{GHI} 。若 δ_{GHI} 为负值, 则判断为草原退化, 若 δ_{GHI} 为正值, 则判断为未退化。依据 δ_{GHI} 将草原退化或恢复划分不同等级(表5)。

7 讨论

本研究在厘清草原健康与草原退化、恢复之间关系的基础上, 以草原健康状况作为现状, 以其变化作为草原退化与恢复程度的动态, 将之融合到一个评估系统中进行描述, 与之前的草原健康状况评价^[16,17]、草原退化评估^[11,31-37]相

表 4 草原健康评估指标的给定参照值

Table 4 Given reference values for the assessment of grassland health

草原类组	草原类型	植被覆盖度(%)	裸斑面积比例(%)	原生植物种数(种)	产草量(kg/hm ²)
草原类组	温性草甸草原	80	10	20	1500
	温性典型草原	50	30	15	1000
	温性荒漠草原	35	40	10	500
	高寒草甸草原	50	10	10	400
	高寒草原	40	20	10	300
	高寒荒漠草原	25	50	8	200
荒漠类组	温性草原化荒漠	20	60	8	500
	温性荒漠	20	70	5	400
	高寒荒漠	10	80	4	100
草丛和灌草丛类组	暖性草丛	80	5	15	2000
	暖性灌草丛	85	5	15	2200
	热性草丛	90	5	15	2700
	热性灌草丛	90	5	15	2600
	干热稀疏灌草丛	85	5	15	2000
草甸类组	低地草甸	90	10	10	2000
	山地草甸	90	10	20	1800
	高寒草甸	90	10	10	1000

表 5 草原退化与恢复程度等级划分

Table 5 Classification and description of grassland degradation or restoration degrees

差值法	趋势法	等级	说明
$\Delta\text{GHI}>40$	$\delta_{\text{GHI}}>3$	极显著恢复	草原健康状况由极不健康转变为健康
$20<\Delta\text{GHI}\leq 40$	$1<\delta_{\text{GHI}}\leq 3$	明显恢复	草原健康状况变好, 由不健康转变为健康或极不健康转变为亚健康
$0\Delta\text{GHI}\leq 20$	$0<\delta_{\text{GHI}}\leq 1$	轻度恢复	草原健康状况有所好转, 可以是同一个健康等级内的变化; 也可能是健康等级跨级的变化, 包括由亚健康转变为健康或不健康转变为亚健康或极不健康转变为不健康
$\Delta\text{GHI}\approx 0$	$\delta_{\text{GHI}}\approx 0$	稳定状态	草原健康状况不变甚至有所好转
$-20\leq\Delta\text{GHI}<0$	$-1\leq\delta_{\text{GHI}}<0$	轻度退化	草原健康状况有所变差, 可以是同一个健康等级内的变化; 也可能是健康等级跨级的变化, 包括由健康转变为亚健康或亚健康转变为不健康或不健康转变为极不健康
$-40\leq\Delta\text{GHI}<-20$	$-3\leq\delta_{\text{GHI}}<-1$	中度退化	草原健康状况变差, 由健康转变为不健康或亚健康转变为极不健康
$\Delta\text{GHI}<-40$	$\delta_{\text{GHI}}<-3$	重度退化	草原健康状况由健康转变为极不健康

比, 避免相互独立和割裂. 健康表征的是一种“状态”, 即草原目前的状况. 退化或恢复表征的是一个“变化过程”, 即草原健康状况变化的过程. 在上述基础上, 本研究提出了较为系统完整的草原健康、退化与恢复评估指标体系, 然而, 受限于当前技术手段与数据获取难易程度的差异, 在国家层面应用中目前仅考虑6个指标, 各省(自治区、直辖市)可根据需要开展6+X个指标的调查.

指标选取中需要注意的几个问题: (1) 可获得性, 以草原调查监测中已有的相关指标为主, 能够保证数据可获取; (2) 简单实用, 指标不能太多, 8~11个为宜; (3) 全面系统, 尽量能

够涵盖植被群落、地表(土壤)特征、生物多样性、牧草生产性能等, 根据实际情况考虑是否包含草原的动物、微生物等组分. 关于裸斑面积比例, 由于难以确定裸斑是草原退化形成的, 还是历史上一直存在的裸露地表, 因此, 该指标可能是植被覆盖度的反向指标. 关于原生植物物种数, 对天然草原来说, 非原生植物很少, 且部分区域较难判定哪些是原生植物, 这个指标很重要但也可能成为不确定性较大的一个. 关于可食牧草比例, 对于草原畜牧业生产而言是很好的指标, 但是对于具有特定生态功能的国家公园、自然保护区、生态红线区等区域, 其适用性需要多加考虑. 毒害草比例也是

相对草原畜牧业生产而言的, 实际上是可食牧草比例的反向指标, 与其有所重合, 牧草地上除毒害草以外, 其他植物基本都可食, 只是适口性和喜好的差异。

本研究提出的GHI及计算方法, 其核心是各指标的权重设置与参照值确定, 通过专家咨询和层次分析法得到的系列权重有待实际应用中进一步修改完善, 如果形成6+X指标也需要重新确定权重和参照值。对于权重问题, 权重的设置往往争议较大, 但是, 如果各区域每年都按照设定的权重保持不变, 年际间对比实际上就基本消除了权重带来的误差。此外, 指标的空间化是十分重要和必要的, 植被覆盖度、裸斑面积比例现有比较成熟的方法, 然而, 当前的空间化方法还存在许多技术问题, 如何得到时空精细化的指标需要攻关解决, 利用地面调查-无人机航拍-卫星遥感结合的天空地立体技术方法进行一体化的草原健康、退化与恢复评估是今后的发展方向。

关于草原退化与恢复程度的评估方法, 差值法和趋势法适用对象不同, 历史调查数据有限可选前者、丰富可选后者。对于草原健康状况等级划分, 目前的指数等级参考了《岩溶地区草地石漠化遥感监测技术规程》等多个相关标准, 是按照等比例简单划分。健康草原规定为 $GHI \geq 80$ 而不是 $GHI \geq 100$, 主要原因是考虑到如果设定 $GHI \geq 100$, 可能很多地区的草原都会处于不健康的状态。因此, 从综合平衡的角度考虑, 适当

降低了健康的标准, 即达到80年代草原水平的80%即认为是健康的, 如果GHI大于100则按100处理。由于不同地区之间草原健康状况及其变化态势乃至驱动因素的差异较大, 因此, 健康等级划分及退化与恢复程度的划分, 都可以结合评估区域的需求及差异进行细化, 有助于提高一体化评估体系的应用潜力。

8 结语

草原健康、退化与恢复都是学术界与管理部门关注的热点问题, 由于对其定义的理解差异导致相关评估理论和方法都未形成统一认识, 采用不同的评估方法、指标、方法量化草地健康状况、退化程度, 由此发布了各类国家、行业、地方标准, 草原健康状况、退化或恢复程度的判定结果各异, 难以科学指导草原管理及保护修复。本研究梳理探讨草原健康与草原退化、恢复之间的关系并给出了概念, 提出草原健康、退化与恢复一体化评估技术框架, 构建草原健康状况、退化与恢复程度的评估指标体系, 提出结合管理与学理需求的GHI, 通过GHI变化趋势判断草原退化或恢复的方向与程度, 有助于掌握我国草原健康、退化与恢复状况并实现“一张图”管理目标。目前, 通过各省草原一体化评估的示范试点, 后续还需要在分区分类细化、参照系优化、指标空间化方法等方面进行深入研究与优化完善。

推荐阅读文献

- 1 Tilman D, Downing J A. Biodiversity and stability in grasslands. *Nature*, 1994, 367: 363–365
- 2 O'Mara F P. The role of grasslands in food security and climate change. *Ann Bot*, 2012, 110: 1263–1270
- 3 Bai Y, Cotrufo M F. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 2022, 377: 603–608
- 4 Costanza R, Mageau M. What is a healthy ecosystem? *Aquat Ecol*, 1999, 33: 105–115
- 5 Gang C, Zhou W, Chen Y, et al. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environ Earth Sci*, 2014, 72: 4273–4282
- 6 Hilker T, Natsagdorj E, Waring R H, et al. Satellite observed widespread decline in Mongolian grasslands largely due to overgrazing. *Glob Change Biol*, 2014, 20: 418–428
- 7 Zhang G, Biradar C M, Xiao X, et al. Exacerbated grassland degradation and desertification in Central Asia during 2000–2014. *Ecol Appl*, 2018, 28: 442–456
- 8 Burrell A L, Evans J P, De Kauwe M G. Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nat Commun*, 2020, 11: 3853
- 9 Gibbs H K, Salmon J M. Mapping the world's degraded lands. *Appl Geogr*, 2015, 57: 12–21
- 10 Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, et al. Combatting global grassland degradation. *Nat Rev Earth Environ*, 2021, 2: 720–735
- 11 Wang Z S, Jiang L L, Wang S P, et al. Assessment methods for grassland restoration (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2022, 42: 6464–6473 [王宗松, 姜丽丽, 汪诗平, 等. 草地退化恢复评估方法述评. *生态学报*, 2022, 42: 6464–6473]
- 12 Chaplin-Kramer R, Sharp R P, Weil C, et al. Global modeling of nature's contributions to people. *Science*, 2019, 366: 255–258
- 13 Török P, Brudvig L A, Kollmann J, et al. The present and future of grassland restoration. *Restor Ecol*, 2021, 29: e13378
- 14 Wilsey B. Restoration in the face of changing climate: Importance of persistence, priority effects and species diversity. *Restor Ecol*, 2020, 29: 1–25
- 15 Dudley N, Eufemia L, Fleckenstein M, et al. Grasslands and savannahs in the UN Decade on Ecosystem Restoration. *Restor Ecol*, 2020, 28: 1313–1317
- 16 National Research Council (NRC). Rangeland Health: New Methods to Classify, Inventory and Monitor Rangelands. Washington DC: National Academy Press, 1994

- 17 Pyke D A, Herrick J E, Shaver P, et al. Rangeland health attributes and indicators for qualitative assessment. *J Range Manage*, 2002, 55: 584–597
- 18 Pellant M, Shaver P, Pyke D A, et al. Interpreting Indicators of Rangeland Health, Version 4. Technical Reference 1734-6, 2005
- 19 Liang Y, Han G D, Zhao M L, et al. The content and method of grassland ecosystem health assessment (in Chinese). *Ecol Eng*, 2004, 6: 107–109 [梁燕, 韩国栋, 赵萌莉, 等. 草地生态系统健康评价的内容与实施方法. *生态工程*, 2004, 6: 107–109]
- 20 Ren J Z. Dictionary of Grassland Science (in Chinese). Beijing: China Agriculture Publishing House, 2008 [任继周. 草业大辞典. 北京: 中国农业出版社, 2008]
- 21 Ye X, Zhou H K, Zhao X Q, et al. Review on grassland ecosystem health (in Chinese). *Pratac Sci*, 2011, 5: 549–560 [叶鑫, 周华坤, 赵新全, 等. 草地生态系统健康研究述评. *草业科学*, 2011, 5: 549–560]
- 22 Dong S K, Zhang Y H, Wang G C. Assessment of grassland health and degradation: Concepts, principles, and methods (in Chinese). *Pratac Sci*, 2023, 41: 1–11 [董世魁, 张宇豪, 王冠聪. 草地健康与退化评价: 概念、原理及方法. *草业科学*, 2023, 41: 1–11]
- 23 Natural Resources Survey and Monitoring Department of the Ministry of Natural Resources. Mechanisms of Comprehensive Investigation and Monitoring of Forest, Grassland, Water, Wetland, Sea and Island Resources (in Chinese). Beijing: China Commercial Publishing, 2021 [自然资源部自然资源调查监测司. 林草水湿海资源综合调查监测机制研究. 北京: 中国商务出版社, 2021]
- 24 Hou F J, Yu Y W, Fu H, et al. CVOR index for health evaluation of Alashan grazing land (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2004, 13: 117–126 [侯扶江, 于应文, 傅华, 等. 阿拉善草地健康评价的CVOR指数. *草业学报*, 2004, 13: 117–126]
- 25 Chen C B, Peng J, Li G Y. Evaluating ecosystem health in the grasslands of Xinjiang (in Chinese). *Arid Zone Res*, 2022, 39: 270–281 [陈春波, 彭建, 李刚勇. 新疆草地生态系统健康评价体系构建. *干旱区研究*, 2022, 39: 270–281]
- 26 Xu D, Guo X. Some insights on grassland health assessment based on remote sensing. *Sensors*, 2015, 15: 3070–3089
- 27 Manning P, van der Plas F, Soliveres S, et al. Redefining ecosystem multifunctionality. *Nat Ecol Evol*, 2018, 2: 427–436
- 28 Castro A J, Verburg P H, Martín-López B, et al. Ecosystem service trade-offs from supply to social demand: A landscape-scale spatial analysis. *Landscape Urban Plan*, 2014, 132: 102–110
- 29 Han J G, Zhang Y J, Wang C J, et al. Rangeland degradation and restoration management in China. *Rangel J*, 2008, 30: 233–239
- 30 Huang L, Zhai J, Zhu P, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of livestock-carrying pressure in China and its implications for grassland ecosystem conservation pattern (in Chinese). *Acta Geogr Sin*, 2020, 75: 2396–2407 [黄麟, 翟俊, 祝萍, 等. 中国草畜平衡状态时空演变指示的草地生态保护格局. *地理学报*, 2020, 75: 2396–2407]
- 31 Li S, Verburg P H, Lv S, et al. Spatial analysis of the driving factors of grassland degradation under conditions of climate change and intensive use in Inner Mongolia, China. *Reg Environ Change*, 2012, 12: 461–474
- 32 Yang Y, Wang Z, Li J, et al. Comparative assessment of grassland degradation dynamics in response to climate variation and human activities in China, Mongolia, Pakistan and Uzbekistan from 2000 to 2013. *J Arid Environ*, 2016, 135: 164–172
- 33 Jamsranjav C, Reid R S, Fernández-Giménez M E, et al. Applying a dryland degradation framework for rangelands: The case of Mongolia. *Ecol Appl*, 2018, 28: 622–642
- 34 Tong C, Wu J, Yong S, et al. A landscape-scale assessment of steppe degradation in the Xilin River Basin, Inner Mongolia, China. *J Arid Environ*, 2004, 59: 133–149
- 35 Lyu X, Li X, Dang D, et al. A new method for grassland degradation monitoring by vegetation species composition using hyperspectral remote sensing. *Ecol Indicators*, 2020, 114: 106310
- 36 Gu Z H, Shi P J, Chen J, et al. Estimation of grassland degradation based on maximum response of vegetation to climate (in Chinese). *J Nat Disast*, 2010, 1: 13–20 [辜智慧, 史培军, 陈晋, 等. 基于植被-气候最大响应模型的草地退化评价. *自然灾害学报*, 2010, 1: 13–20]
- 37 Gedefaw M G, Geli H, Abera T A. Assessment of rangeland degradation in New Mexico using time series segmentation and residual trend analysis (TSS-RESTREND). *Remote Sens*, 2021, 13: 1–27
- 38 Andrade B O, Koch C, Boldrini I I, et al. Grassland degradation and restoration: A conceptual framework of stages and thresholds illustrated by southern Brazilian grasslands. *Nat Conserv*, 2015, 13: 95–104
- 39 Baer S G, Adams T, Scott D A, et al. Soil heterogeneity increases plant diversity after 20 years of manipulation during grassland restoration. *Ecol Appl*, 2020, 30: 1–15
- 40 Shang Z H, Dong S K, Zhou H K, et al. Synthesis-review for research cases of grassland ecological restoration: Years, effect, and method (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2017, 37: 8148–8160 [尚占环, 董世魁, 周华坤, 等. 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: 8148–8160]
- 41 He N, Wu L, Wang Y, et al. Changes in carbon and nitrogen in soil particle-size fractions along a grassland restoration chronosequence in northern China. *Geoderma*, 2009, 150: 302–308
- 42 Kollmann J, Meyer S T, Bateman R, et al. Integrating ecosystem functions into Restor Ecology—Recent advances and future directions. *Restor Ecol*, 2016, 24: 722–730
- 43 Ehrenfeld J G. Defining the limits of restoration: The need for realistic goals. *Restor Ecol*, 2000, 8: 2–9

- 44 Gao L, Ding Y. Progress in research and practice of restoration of degraded grassland around the world (in Chinese). *Acta Pratac Sin*, 2022, 31: 189–205 [高丽, 丁勇. 世界退化草地恢复研究和实践进展. 草业学报, 2022, 31: 189–205]
- 45 Tian H J, Wang L, Han L L, et al. Grassland vegetation coverage retrieval based on Sentinel-2 multi-spectral remote sensing data: A case study of Inner Mongolia Autonomous Region (in Chinese). *Forest Resour Manag*, 2022, 4: 134–140 [田海静, 王林, 韩立亮, 等. 基于哨兵2号多光谱遥感数据的草原植被盖度反演——以内蒙古自治区为例. 林业资源管理, 2022, 4: 134–140]
- 46 Zhao Y P, Wang Z W, Wendu R G, et al. Remotely sensed monitoring method of grassland plant functional diversity and its relationship with productivity based on Sentinel-2 satellite data (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2022, 46: 1234–1250 [赵晏平, 王忠武, 温都日根, 等. 基于Sentinel-2数据的草地植物功能多样性遥感反演及其与生产力的关系. 植物生态学报, 2022, 46: 1234–1250]
- 47 Muro J, Linstädter A, Magdon P, et al. Predicting plant biomass and species richness in temperate grasslands across regions, time, and land management with remote sensing and deep learning. *Remote Sens Environ*, 2022, 282: 113262
- 48 Xu B, Yang X C, Tao W G, et al. Remote sensing monitoring upon the grass production in China (in Chinese). *Acta Ecol Sin*, 2007, 27: 405–413 [徐斌, 杨秀春, 陶伟国, 等. 中国草原产草量遥感监测. 生态学报, 2007, 27: 405–413]
- 49 Department of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Ministry of Agriculture, National Animal Husbandry and Veterinary Station. Rangeland Resources of China (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 1996 [中华人民共和国农业部畜牧兽医司、全国畜牧兽医总站. 中国草地资源. 北京: 中国科学技术出版社, 1996]
- 50 Department of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Ministry of Agriculture, Institute of Grassland Research of CAAS, Commission for Integrated Survey of Natural Resources. Rangeland Resource Database of China (in Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1994 [中华人民共和国农业部畜牧兽医司, 中国农业科学院草原研究所, 中国科学院-国家计划委员会自然资源综合考察委员会. 中国草地资源数据. 北京: 中国农业科技出版社, 1994]
- 51 Cheng H, He X W. Grassland resources of China (in Chinese). In: *Handbook of Natural Resources in China*. Beijing: Science Press, 1990 [程鸿, 何希吾. 草地资源. 见: 中国自然资源手册. 北京: 科学出版社, 1990]
- 52 Fan J W. Grassland resources (in Chinese). In: Huang W X, ed. *Agricultural Natural Resources*. Beijing: Science Press, 1998 [樊江文. 中国草地资源. 见: 黄文秀, 编. 农业自然资源. 北京: 科学出版社, 1998]

补充材料

表S1 现有标准中草原退化相关内容对比

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “草原健康、退化与恢复一体化评估: 概念与方法”

All-in-one assessment of grassland health, degradation, and restoration: The concepts and methods

Lin Huang¹, Jiangwen Fan^{1*}, Zhi Yang², Guancong Wang², Yuzhe Li¹, Haiyan Zhang¹, Yaxian Zhang³, Junhua Shi⁴ & Suizi Wang¹

¹ Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Grassland Management Department, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China;

³ College of Grassland Resources, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China;

⁴ Academy of Forestry and Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

* Corresponding author, E-mail: fanjw@igsnrr.ac.cn

Healthy grasslands provide an optimum range of material and non-material benefits to human beings. However, when grasslands are degraded, their ability to provide benefits to humans can be undermined by multiple declines in biodiversity, ecological functions and services. As an international and domestic problem that has not yet been thoroughly solved, although many scholars have proposed theories, methods and standards of grassland health and degradation, most researches endeavors largely fall short in explicating the nuanced relationship between the health and degradation of grasslands. The relevant criteria are controversial, and lack systematic and comprehensive understanding. They are still at the stage of superficially describing and characterizing governance. It is therefore imperative to explore the complex relationship between health status and the processes of degradation and restoration.

Furthermore, the health, degradation and restoration of grasslands are all hot issues that are of concern to both academia and management communities. Disparities in the conceptualization of their definitions have resulted in a lack of consistent understanding of relevant assessment theories and methods. Diverse assessment methods, indicators and approaches have been adopted to quantify the health status and degradation degree of grasslands, resulting in the promulgation of various national, industrial and local standards. The outcomes in determining the health, degradation or restoration of grasslands manifest variances, making it difficult to provide scientific guidance for the management, conservation and restoration of grasslands.

This paper clarifies the relationships between grassland health, degradation and restoration. Grassland degradation and restoration are the processes by which grassland health changes. Based on this understanding, we propose a technical framework for the integrated assessment of grassland health, degradation and restoration. The framework allows not only to monitor the health of grasslands according to actual needs, but also to assess the severity of grassland degradation and the effectiveness of grassland restoration. A comprehensive assessment index system for grassland health, degradation and restoration has been developed. The Vegetation Community Index (VCI), Land Surface Characteristic Index (LCI), Biodiversity Index (BDI), Forage Performance Index (FPI) were applied to reflect the growth condition of grassland vegetation, the quality of the grassland surface, the richness of biodiversity, and the degree of grassland production capacity, respectively. We define a Grassland Health Index (GHI) to facilitate operational assessment and provide a scheme for calculating the GHI, and then the methods for classifying the health status according to expert knowledge assigned weights and reference values.

Preliminary reference values have been assigned to the indicators based on the results of a historical grassland survey in the 1980s, and in combination with expert knowledge. By analyzing the difference or trend value of the change in GHI between the assessment year and the base year, we can assess the direction and degree of grassland degradation or restoration. Changes in grassland health were classified into three classes of grassland degradation, three classes of grassland restoration, and one steady state type. The three degradations include mild, moderate, and severe degradation. The three restorations include very significant, obvious, and slight restoration. Considering the principles of science, reasonableness, and feasibility, we have designed spatialization methods such as type assignment, remote sensing inversion and model simulation, to realize the coupling of ground monitoring and investigation with remote sensing observation and simulation, subsequently forming a “one map” of grassland health, degradation, and restoration. In the future, in-depth research and optimization will be needed to refine the zoning classification, optimize the reference system, and spatialization methods for indicators.

grassland health index, grassland degradation, grassland restoration, all-in-one assessment

doi: [10.1360/TB-2023-1247](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1247)