

DOI:10.11686/cyxb2024306

http://cyxb.magtech.com.cn

朱炳淑, 樊江文, 张海燕, 等. 三江源国家公园黄河源园区高寒草地健康评价. 草业学报, 2025, 34(7): 13-27.

ZHU Bing-shu, FAN Jiang-wen, ZHANG Hai-yan, *et al.* Grassland health assessment of alpine grassland in the Yellow River Source Park of Three-Rivers Headwaters National Park. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(7): 13-27.

三江源国家公园黄河源园区高寒草地健康评价

朱炳淑^{1,2}, 樊江文^{1*}, 张海燕¹, 黄麟¹, 田海静³, 王林³, 王守兴⁴, 杨明新⁴, 郭炎明^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家林业和草原局林草调查规划院(国家林业和草原局草原资源监测中心), 北京 100714; 4. 中国地质调查局西宁自然资源综合调查中心, 青海 西宁 810000)

摘要: 草地健康是草地生态系统完整性、稳定性和可持续发展程度的关键表征, 近年来三江源国家公园黄河源园区对退化草地进行恢复治理, 但对当前草地健康状况仍缺乏系统评估。本研究参考生态系统健康理论, 解析草地健康概念, 基于高寒草地特点, 运用专家经验, 构建综合反映草地健康整体状况的草地健康指数 (grassland healthy index, GHI), 包括植被状况、地表生物特征、生物多样性和牧草生产性能特征等, 分区、分类、分型评价 2022 年黄河源园区高寒草地健康状态和等级。结果表明: 1) 高寒草原类和高寒草甸类草地在植被群落特征指数、地表特征指数、生物多样性指数和牧草生产性能指数等方面存在差异, 尤以生物多样性指数差异最为明显。2) 黄河源园区当前草地健康指数 (64.98) 整体呈亚健康状态, 高寒草原类 GHI (66.70) 略高于高寒草甸类 (62.30), 高寒草原类下的早熟禾型与其他两种草地型均存在显著差异, 但紫花针茅型与蒿型之间的差异不显著, 高寒草甸类下各型存在显著差异。3) 从功能分区来看, 核心保护区草地健康指数 (59.30) 较一般控制区 (69.50) 更低, 可能是生态本底脆弱、历史上长期过度放牧和区划变动等因素导致高寒草地尚未完全恢复。本研究可为三江源国家公园生态保护与区域高质量发展提供新的方法视角, 同时可为提升自然保护地体系空间布局提供科学参考。

关键词: 健康评价; 草地健康指数; 理想参照系; 高寒草地; 三江源国家公园

Grassland health assessment of alpine grassland in the Yellow River Source Park of Three-Rivers Headwaters National Park

ZHU Bing-shu^{1,2}, FAN Jiang-wen^{1*}, ZHANG Hai-yan¹, HUANG Lin¹, TIAN Hai-jing³, WANG Lin³, WANG Shou-xing⁴, YANG Ming-xin⁴, GUO Yan-ming^{1,2}

1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Key Laboratory of Natural Resource Coupling Process and Effects, Ministry of Natural Resources, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Academy of Forestry Inventory and Planning (Grassland Monitoring Center), National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China; 4. Xining Center of Natural Resources Comprehensive Survey, China Geological Survey, Xining 810000, China

Abstract: Grassland health is a key indicator of the integrity, stability, and sustainability of grassland ecosystems. In recent years, conservation efforts in the Yellow River Source Park of Three-Rivers Headwaters National Park have restored degraded grasslands. However, a systematic assessment of the current grassland health status is still

收稿日期: 2024-07-31; 改回日期: 2024-09-30

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (2019QZKK0608), 国家重点研发计划 (2021YFD1300501, 2021YFB2600102), 中国地质调查项目 (DD20220959) 和中国地质调查局东北地质科技创新中心区创基金项目 (QCJJ2022-9) 资助。

作者简介: 朱炳淑 (2001-), 女, 天津人, 在读博士。E-mail: zhubingshu4728@igsnr.ac.cn

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: fanjw@igsnr.ac.cn

lacking. This study draws on ecosystem health theory to clarify the concept of grassland health. Based on the characteristics of alpine grasslands, and application of expert experience, a comprehensive grassland health index (GHI) was developed to reflect the overall grassland health status. The GHI includes indicators such as vegetation community, land surface characteristics, biodiversity, and forage performance. The health status and grades of alpine grasslands in the Yellow River Source Park in 2022 were assessed by zone, type, and class. The results show that: 1) Alpine steppe and alpine meadow differ in their vegetation community characteristic index (VCI), land surface characteristic index (LCI), biodiversity index (BDI), and forage production performance index (FPI), with the most significant difference observed in the BDI. 2) The overall GHI (64.98) of the Yellow River Source Park indicates a sub-healthy status, with the alpine steppe GHI (66.70) slightly higher than the alpine meadow GHI (62.30). The *Poa annua* alpine steppe has significant differences from other alpine steppe types, and there are also significant differences in GHI among the types of alpine meadow. 3) From the functional zoning perspective, the GHI of the core protected area (59.30) is lower than that of the general controlled area (69.50), likely due to fragile ecological conditions, historical long-term overgrazing, and the fact that newly designated core protected areas have yet to fully recover. This study provides a new methodological perspective for the ecological protection and future improvement of the conservation status of the Three-Rivers Headwaters National Park and provides a scientific criterion for improving the spatial layout of the natural reserve system.

Key words: health assessment; grassland healthy index; ideal reference; alpine grassland; Three-Rivers Headwaters National Park

草地是我国重要的陆地生态系统之一,面积约占我国土地面积的40%,提供了水土保持、气候调节、物种生境维持等多重生态功能^[1-2]。生态系统健康理论源于20世纪80年代,强调生态系统完整性和可持续性^[3],多从复原力、活力和组织力角度进行健康状态评估^[4]。三江源国家公园黄河源园区作为重要水源地之一,其草地健康状况对水源涵养和区域生态安全具有深刻影响^[5]。基于生态系统健康理论,草地健康评价指标旨在反映维持组织结构的能力、从干扰中恢复的能力以及提供生态系统服务的能力^[6]。根据《草原健康状况评价》(GB/T 21439-2008)^[7]与《草原植被健康监测评价方法》(NY/T 3648-2020)^[8],草地健康定义为草地生态系统结构完整性、生态过程的平衡及其可持续的程度,主要体现在植被、地表、生物多样性等方面。健康的草地具有完整的生态结构和良好运行的状态,能量和物质流动活跃,能够维持系统的组织结构,并在外部压力下自我恢复,具有良好的稳定性、多样性、复杂性、平衡性和可持续性^[9]。掌握并准确评价草地的健康状况对于制定草地保护与利用对策、保障草地生态系统的完整性和多样性具有重要意义^[9-10]。

当前草地健康评估主要采取野外调查^[11]、遥感监测^[12]和无人机航测^[13]等多种手段。野外调查采集土壤理化性质、物种多样性等详细信息;遥感技术可大尺度反演草地植被覆盖度、生物量等指标;而无人机航测可以获取草地高精度微地形、植被分布等数据。在评估指标选取上,早期研究主要采用植被指数^[14]、净初级生产力^[15]等单一指标来对草地退化或健康状况进行判定;但使用单一指标很难准确衡量草地健康状况,国内外学者逐步引入“基况—活力—组织力—恢复力”(condition—vigor—organization—resilience, CVOR)、“活力—组织力—恢复力—生态系统服务”(vigor—organization—resilience—ecosystem services, VORS)与“压力—状态—响应”(pressure—state—response, PSR)框架来开展研究,如陆均等^[16]利用CVOR综合指数对2004—2012年新疆巴音布鲁克草地进行健康状况评估;陈春波等^[17]根据CVOR构建新疆草地生态系统健康评价总体框架;Wang等^[18]基于PSR框架量化了退耕还草政策对内蒙古锡林郭勒盟草地健康的影响;Li等^[19]在PSR框架中纳入了评估生态系统基况的指标,评估了甘南地区高寒生态系统健康状况。虽然综合指标法提升了评估的全面性,但也存在CVOR框架中部分指标难以量化,PSR框架在不同研究区的泛化能力较差等问题。此外,草地管理目标影响草地健康评估结果,以畜牧业生产为目的的草地健康评估存在一定缺陷,如忽视生态系统的整体健康,导致生态风险转移,对草地的

可持续发展构成威胁等。而本研究侧重于草地健康生态方面的评估,注重整体生态效益,有助于促进草地生态系统的持续发展和全面保护。

草地健康评价是理解和解决退化草地问题的关键。通过对草地健康状况的全面评估,可以深入了解退化草地所面临的问题,识别引发草地退化的关键因素,并为制定针对性的修复策略提供科学依据。三江源国家公园黄河源园区位于青藏高原腹地,是最为典型的高寒草地,但同时其生态环境脆弱,受气候变化与人类活动的干扰更为敏感^[20]。自2005年实施三江源工程以来,对不同程度的退化草地进行了恢复治理^[21],但仍缺乏对草地生态系统健康状况的评估。目前关于如何建立科学合理的草地健康评价体系,以及如何准确评估黄河源园区高寒草地健康状况的有效方法仍然尚未建立。随着国家公园草地功能重心从生产建设向生态建设转型,需要明确草地的多重修复目标,制定针对不同退化程度和成因的分区分类修复策略和措施^[22-23],因此,本研究综合考虑黄河源园区高寒草地本底状况,构建适宜高寒地区的草地健康评价指标体系,准确评价草地健康状况,为更好地开展退化草地的保护修复和科学管理提供依据,为草地生态保护与可持续发展提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

三江源国家公园是全国首批、面积最大、海拔最高、高寒生物多样性最丰富的国家公园,其中黄河源园区是三江源国家公园中最东边的园区,面积31667.75 km²,主要涉及青海省果洛藏族自治州玛多县和青海省玉树藏族自治州曲麻莱县(图1a)。黄河源园区气候寒冷,属高原大陆性半湿润气候,冷季干燥寒冷,暖季湿润凉爽,年均温-5.3~-2.4℃,年降水量247.8~484.8 mm。研究区以草地生态系统为主,面积占比约为86.18%。高寒草甸和高寒草原是主要的天然草地类型,紫花针茅(*Stipa purpurea*)、多裂委陵菜(*Potentilla multifida*)、二裂委陵菜(*Potentilla bifurca*)、早熟禾(*Poa annua*)、西藏嵩草(*Carex tibetikobresia*)是其优势种。扎陵湖-鄂陵湖、星星海为代表的高原湖泊群,包括草地、湖泊、冰川等多样生态景观。按照《三江源国家公园总体规划(2023-2030年)》^[24]分区管控要求,划分为一般控制区与核心保护区,其中核心保护区占全区面积的41.81%(图1)。

1.2 高寒草地健康评估方法

1.2.1 草地健康评估指标体系构建 依据草地健康的概念,以及独立性、可获取性、易操作性、科学性,综合考虑了区域高寒草地特点与生态地理本底状况,结合专家经验和相关文献资料^[9],构建包含植被群落特征、地表特征、生物多样性状态以及牧草生产性能共4个一级指标、9个二级指标(表1)的指标体系。同时,选取64名相关领域专家和技术人员开展了问卷调查,采用专家打分法获取各指标相对重要性的判断矩阵,然后应用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对矩阵进行汇总计算,从而得到4个一级指标和9个二级指标的权重系数。结合专家知识对初步权重进行了调整,最终形成适用于黄河源园区高寒草地健康状况评价的指标体系。

草地健康评价首先从直接表观的植被与营养级联的土壤两个角度进行分析,其次从生态保护重要指标生物多样性与生产性能的牧草供给两个角度来进行补充分析,各具体评估指标内涵如下:

1) 植被覆盖度:单位面积内植被垂直投影面积占总面积的百分比^[25]。

2) 草群平均高度:指在调查范围内多数植物枝条或草层集中分布的平均自然高度,反映草地植被的生长状况^[26]。

3) 裸地(斑)面积比例:指在一定区域内裸地(或裸斑)面积与总土地面积之间的比例关系,表示了未被植被覆盖或被植被覆盖较少的地表区域的比例。

4) 土壤侵蚀量:指在特定时间内,单位水平投影面积上发生的土壤侵蚀总量^[27],其程度通过土壤侵蚀模数进行量化,单位为t·hm⁻²·yr⁻¹。

5) 物种丰富度:指在特定地区或生态系统中所存在的不同物种数量,反映了该地区或生态系统中物种的多样性程度和丰富程度^[28]。

6) 原生植物种数占比:指特定区域内原生植物种数与该区域总植物种数之比,表征该区域原生植物的丰富度。

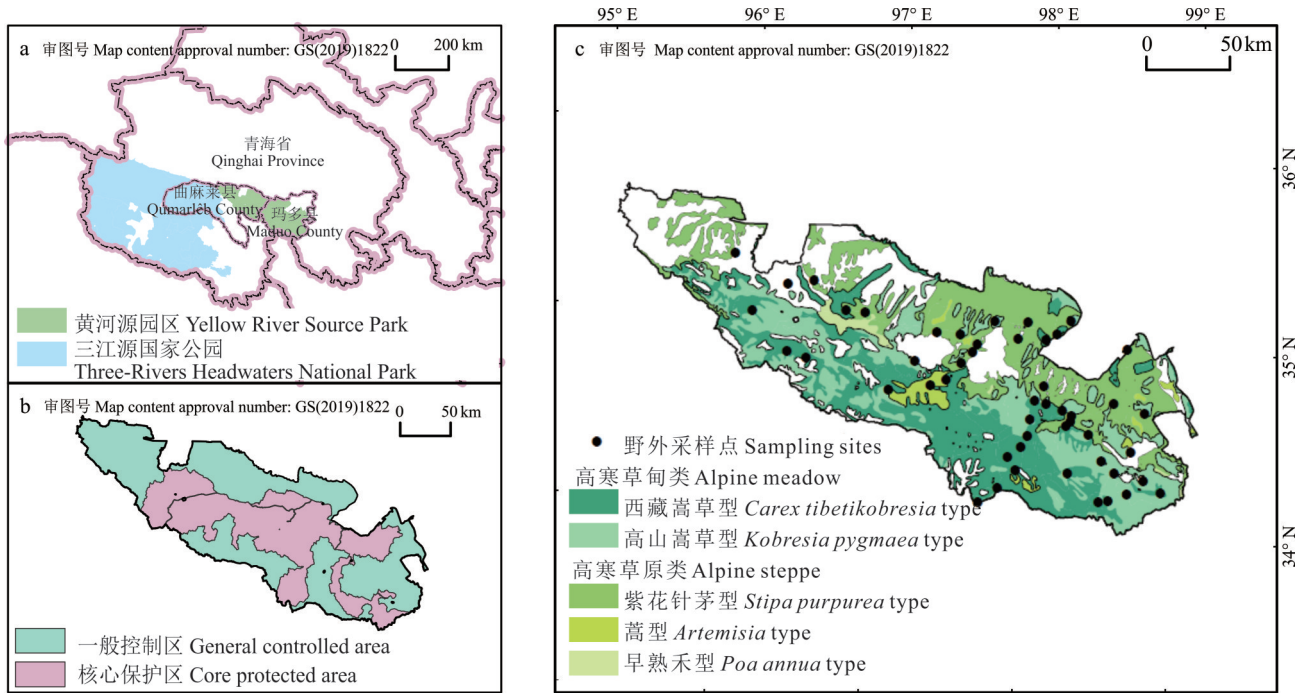


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

a: 三江源国家公园和黄河源园区空间分布 Spatial distribution of the Three-Rivers Headwaters National Park and the Yellow River Source Park; b: 黄河源园区内各分区空间分布 Spatial distribution of the Yellow River Source Park; c: 研究区内野外采样点与草地类型空间分布 Spatial distribution of the sampling sites and grassland types in the study area. 基于自然资源部标准地图服务网站 GS(2019)1822 号标准地图制作, 底图边界无修改。Based on the standard map service website GS (2019) 1822 of the Ministry of Natural Resources, the boundary of the base map is not modified.

表 1 高寒草地健康状况评估指标体系

Table 1 Alpine grassland health assessment index system

一级指标 First-level indicators		二级指标 Second-level indicators		方向
类别 Category	权重系数 Weight coefficient	名称 Name	权重系数 Weight coefficient	Direction
1. 植被群落特征 Vegetation community characteristic	0.30	1) 植被覆盖度 Vegetation coverage (%)	0.60	正 Positive
		2) 草群平均高度 Average height of grassland communities (cm)	0.40	正 Positive
2. 地表(土壤)特征 Land surface (soil) characteristic	0.20	3) 裸地(斑)面积比例 Proportion of bare patch area (%)	0.50	负 Negative
		4) 土壤侵蚀量 Soil erosion amount ($t \cdot hm^{-2} \cdot yr^{-1}$)	0.50	负 Negative
3. 生物多样性 Biodiversity	0.25	5) 物种丰富度 Species richness	0.50	正 Positive
		6) 原生植物种数占比 Proportion of native plant species (%)	0.50	正 Positive
4. 牧草生产性能 Forage production performance	0.25	7) 产草量 Grassland yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	0.50	正 Positive
		8) 可食牧草比例 Proportion of edible forage (%)	0.25	正 Positive
		9) 毒害草比例 Proportion of poisonous weeds (%)	0.25	负 Negative

7) 产草量:指一年中单位面积草地齐地表刈割的植物地上部分的累计总重量^[29]。

8) 可食牧草比例:依据《天然草地合理载畜量的计算》(NY/T 635-2015)^[30],可食牧草定义为毒草和不可食草之外的植物(含饲用灌木和饲用乔木的嫩枝叶)。可食牧草比例为样地内可食牧草种数占总植物种数的比例。

9) 毒害草比例:为样地内毒害草种数占总植物种数的比例,研究区毒害草主要包括狼毒(*Stellera chamaejasme*)、棘豆属植物(*Oxytropis* spp.)和披针叶黄华(*Thermopsis lanceolata*)等。

1.2.2 草地健康指数计算方法 依据生态系统健康理论,基于草地健康评估指标体系,本研究构建草地健康指数(grassland healthy index, GHI)反映黄河源园区草地整体状况。研究区内草地类型分布特征明显,为考虑不同草地类型间的差异,分草地类、草地型进行评价。草地健康指数由植被群落特征指数(vegetation community characteristic index, VCI)、地表特征指数(land surface characteristic index, LCI)、生物多样性指数(biodiversity index, BDI)、牧草生产性能指数(forage production performance index, FPI)4个分指数构成,分别表征植被生长状态、草地地表基况、生态系统稳定性和牧草实际生产能力^[9]。

$$GHI = (0.3 \times VCI + 0.2 \times LCI + 0.25 \times BDI + 0.25 \times FPI) \times 100 \quad (1)$$

$$VCI = \frac{VC}{VC_r} \times 0.6 + \frac{AH}{AH_r} \times 0.4 \quad (2)$$

式中:VC是植被覆盖度(vegetation coverage, %); VC_r 是植被覆盖度的参照值(%);AH是草群平均高度(average height of grassland communities, cm); AH_r 是草群平均高度的参照值(cm), $VCI > 1$ 时取1。

$$\begin{cases} LCI = \frac{BP_r}{BP} \times 0.5 + \frac{SE_r}{SE} \times 0.5 & (BP > 0 \text{ 且 } SE > 0) \\ LCI = 0.5 + \frac{SE_r}{SE} & (BP = 0) \\ LCI = 0.5 + \frac{BP_r}{BP} & (SE = 0) \\ LCI = 1 & (BP = 0 \text{ 且 } SE = 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中:BP是裸斑面积比例(proportion of bare patch area, %); BP_r 是裸斑面积比例的参照值(%);SE是土壤侵蚀量(soil erosion amount, $t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$); SE_r 是土壤侵蚀量的参照值($t \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)。

$$BDI = \frac{SR}{SR_r} \times 0.5 + \frac{NS}{NS_r} \times 0.5 \quad (4)$$

式中:SR是物种丰富度(species richness); SR_r 是物种丰富度的参照值;NS是原生物种比例(proportion of native plant species, %); NS_r 是原生物种比例的参照值(%)。

$$\begin{cases} FPI = \frac{FP}{FP_r} \times 0.5 + \frac{EF}{EF_r} \times 0.25 + \frac{PH_r}{PH} \times 0.25 & (PH > 0) \\ FPI = \frac{FP}{FP_r} \times 0.5 + \frac{EF}{EF_r} \times 0.25 + 0.25 & (PH = 0) \end{cases} \quad (5)$$

式中:FP是产草量(grassland yield, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); FP_r 是产草量的参照值($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);EF是可食牧草比例(proportion of edible forage, %); EF_r 是可食牧草比例的参照值(%);PH是毒害草比例(proportion of poisonous weeds, %); PH_r 是毒害草比例的参照值(%)。

根据GHI的计算结果,结合黄河源园区草地生态条件、实际草地管理需求及专家经验设定相应分类阈值,将草地健康状况分为极不健康、不健康、亚健康、健康4个等级(表2)。

1.2.3 草地健康指数参照系确定 本研究基于理想参照系方法^[31],综合20世纪80年代以来的历史草地调查监测结果与黄河源园区草地类、型特点,根据园区内各草地类差异划分评估单元,选取2022年各草地型的所有指标观测值,分析其概率分布,确定理想参照系的阈值^[32]。以多个参照站点正向指标90%分位数平均值,负向指标10%分位数平均值作为草地健康指数参考值,代表该草地型的自然生态条件。确定参照系后依据草地健康指数计算方法,将各草地健康评价指标处理为无量纲的数值(表3)。

1.3 实地调查内容与方法

基于草地植被生长规律,集中在2022年7—10月进行野外草地采样工作,同时综合考虑草地类、亚类、型等因素的分布特征,采用分层抽样和随机抽样相结合的方法,在高寒草原类与高寒草甸类草地设置54个样地,获取定点观测数据并调查样地内草地类、草地型、草地起源、植被结构、植被盖度、植被高度、单位面积鲜草产量、单位面积干草产量、可食牧草比例等指标(图2)。依据《国家林草生态综合监测评价技术规程》^[33]进行观测样地选择与

表2 草地健康指数分级与说明

Table 2 Grassland healthy index grading and description

序号 Order	草地健康指数分级 Grassland healthy index classification (GHI)	健康状况 Health status	说明 Description
I	$70 \leq \text{GHI} \leq 100$	健康 Healthy	草地植被覆盖度高, 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。Grassland vegetation coverage is high, and vegetation communities are in excellent condition; No significant soil erosion and surface features are intact; Native plant species richness and biodiversity are high; Edible forage yield is high, with minimal poisonous grasses and strong forage production performance.
II	$55 \leq \text{GHI} < 70$	亚健康 Sub-healthy	草地植被覆盖度较高, 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。Grassland vegetation coverage is relatively high, and vegetation communities are in good condition; Slight soil erosion with relatively intact surface features; Native plant species richness and biodiversity are relatively high; Edible forage yield is relatively high, with a low proportion of poisonous grasses and strong forage production performance.
III	$35 \leq \text{GHI} < 55$	不健康 Un-healthy	草地植被覆盖度低, 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。Grassland vegetation coverage is low, and vegetation communities are in poor condition; Large areas of bare patches with moderate soil erosion and fragmented surface; Native plant species are less abundant and biodiversity is poor; Edible forage yield is low, with a high proportion of poisonous grasses and weak forage production performance.
IV	$0 < \text{GHI} < 35$	极不健康 Extreme-ly un-healthy	草地植被覆盖度极低, 植被群落状况极差; 裸斑面积极大, 土壤侵蚀处于重度及以上状态; 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。Grassland vegetation coverage is extremely low, and vegetation communities are in extremely poor condition; Extremely large areas of bare patches with severe soil erosion; Native plant species are extremely sparse, and biodiversity is extremely poor; Edible forage yield is extremely low, with an extremely high proportion of poisonous grasses and very weak forage production performance.

表3 黄河源园区高寒草地健康评价参照系

Table 3 Reference system for evaluating the health of alpine grassland in the Yellow River Source Park

类别 Category	具体指标 Specific indicator	高寒草甸类 Alpine meadow		高寒草原类 Alpine steppe		
		西藏嵩草型 <i>C. tibetico- bresia</i> type	高山嵩草型 <i>K. pygmaea</i> type	紫花针茅 型 <i>S. pur- purea</i> type	蒿型 <i>Artemis- ia</i> type	早熟禾 型 <i>P. an- nua</i> type
1. 植被群落特征 Vegetation community characteristic	植被覆盖度 Vegetation coverage (%)	100.00	90.38	100.00	64.25	62.17
	草群平均高度 Average height of grassland communities (cm)	10.07	5.67	9.60	7.13	14.07
2. 地表(土壤)特征 Land surface (soil) characteristic	裸斑面积比例 Proportion of bare patch area (%)	1.75	0.85	1.75	5.89	5.13
	土壤侵蚀量 Soil erosion amount ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{yr}^{-1}$)	0.28	0.01	0.13	0.05	0.10
3. 生物多样性 Biodiversity	物种丰富度 Species richness	12	12	9	7	10
	原生植物占比 Proportion of native plant species (%)	61.69	54.11	49.30	54.94	39.00
4. 牧草生产性能 Forage production performance	产草量 Grassland yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	845.87	688.17	611.32	719.55	375.85
	可食牧草比例 Proportion of edible forage (%)	99.31	97.44	99.37	93.84	99.76
	毒害草比例 Proportion of poisonous weeds (%)	0.80	0.11	0.35	0.20	1.18

样方设置, 采用全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)进行样地中心点定位, 以样地中心为起点, 分别向正北、东南、西南方向设置夹角为 120° 的3条40 m长的样线, 主要用于调查样地植被盖度和裸地(斑)面积比例(图2)。按照代表性、均匀性原则, 在每条样线的任意一侧5 m以内选择能代表样地的典型区域设置3

个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的样方,用于调查草本植物及小灌木的盖度、高度、产量、物种数量等。

同时,于 2022 年 7—8 月进行实地考察工作,与研究区三江源国家公园管理局、当地林草主管部门进行座谈,并进行牧户调研,整合相关资料,剖析黄河源园区草地生态保护修复历程与演变特征、草地保护恢复技术措施以及存在的问题。针对三江源国家公园黄河源园区草地健康状况,充分征询主管部门领导、领域内专家学者意见,对国家公园内高寒草地健康评价指标体系的构建与具体指标计算方法进行研究讨论。



图 2 研究区内定点观测、野外采样和草地样方、样线布设示意

Fig. 2 Schematic diagram of fixed observation, field sampling, grassland quadrats and sample lines in the study area

1.4 数据来源与整理

通过野外采样、收集整理获得的地面数据和土壤侵蚀量数据,形成黄河源园区高寒草地健康评价数据库。其中植被覆盖度、草群平均高度、裸地(斑)面积比例和物种丰富度 4 个指数直接来源于草地地面调查采样。植被覆盖度和裸地(斑)面积比例由目测法估计样方内所有植物垂直投影的面积得出;草群平均高度采用样方法,记录不同植物的自然高度,通过加权平均计算得出;物种丰富度是对样方内植物种进行分类判读,记录样方内植物种数;产草量获取是将每个样方地上部分齐地面刈割,去除黏附的土壤、砾石,在野外采样当天使用天平测定鲜重,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min,经 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 恒温烘干 48 h 至恒重,记录干物质量。原生植物种数占比、可食牧草比例和毒害草比例经查阅相关标准^[7-8,30]和专家判读原生植物种、可食牧草物种和毒害草类型,按种数占样地全部种数的比例计算获得。土壤侵蚀量指标使用青藏高原土壤侵蚀量数据,该数据基于修正通用土壤流失方程(the revised universal soil loss equation, RUSLE)进行计算,侵蚀程度经实地调查验证,土壤侵蚀量经过站点实测数据验证, R^2 为 0.89,空间分辨率为 250 m ^[34]。

2 结果与分析

2.1 高寒草地具体各指标分析

在研究区内不同类型草地之间,各类别的具体指标存在差异(表 4)。植被群落特征和地表特征方面,高寒草甸的植被覆盖度较高,其中西藏嵩草型达 82.22%,高山嵩草型为 68.87%;裸地面积比例相对较低,分别为 3.90% 和 11.68%。而高寒草原则表现较差,其中紫花针茅型植被覆盖度为 72.52%,嵩型仅为 57.04%,裸地面积高达 15.05%。早熟禾型植被覆盖度较低(57.28%),裸地面积最小(2.08%)。生物多样性方面,高寒草甸的物种丰富度较高,西藏嵩草型为 8 种,高山嵩草型为 9 种。而高寒草原的物种丰富度分别为 8,5,8 种。但从原生植物的占比来看,高寒草原(29.97%~41.87%)普遍高于高寒草甸(30.47%、33.80%)。牧草生产性能指标表现出明显的类型差异,大部分天然草地如高山嵩草型高寒草甸、早熟禾型高寒草原等的可食牧草比例较高(78.05%~93.95%),而毒害草比例普遍不高(5.47%~9.00%)。

2.2 高寒草地分类别指标分析

高寒草原、高寒草甸在植被状况、地表特征、生物多样性和牧草生产性能等方面存在差异。对各草地类的 4

个分指数进行分析,结果表明(图3),2022年黄河源园区高寒草甸植被群落特征指数(VCI)为22.30,高寒草原VCI为21.82。地表特征指数(LCI)方面,高寒草甸为9.14,高寒草原为10.74。高寒草原在地表特征方面略优于高寒草甸,裸地(斑)面积比例较低(表4)。在生物多样性指数(BDI)方面,高寒草原的原生物种占比更高,维持了更好的生物多样性状况。高寒草甸牧草生产性能指数(FPI)为15.20,高寒草原FPI为15.70,各种草地类牧草生产性能类似。差异较大的分指数为地表特征指数和生物多样性指数。

表4 研究区内各指标均值

Table 4 Average values of different indicators in the study area

类别 Category	名称 Name	高寒草甸类 Alpine meadow		高寒草原类 Alpine steppe		
		西藏嵩草型 <i>C. tibetico- brescia</i> type	高山嵩草型 <i>K. pygmaea</i> type	紫花针茅型 <i>S. purpurea</i> type	蒿型 <i>Artemis- ia</i> type	早熟禾型 <i>P. annua</i> type
1. 植被群落特征 Vegetation community characteristic	植被覆盖度 Vegetation coverage (%)	82.22	68.87	72.52	57.04	57.28
	草群平均高度 Average height of grassland communities (cm)	7.46	3.77	6.39	4.51	8.93
2. 地表(土壤)特征 Land surface (soil) characteristic	裸斑面积比例 Proportion of bare patch area (%)	3.90	11.68	3.20	15.05	2.08
	土壤侵蚀量 Soil erosion amount ($t \cdot hm^{-2} \cdot yr^{-1}$)	0.56	0.99	1.54	0.95	0.42
3. 生物多样性 Biodiversity	物种丰富度 Species richness	8	9	8	5	8
	原生物种占比 Proportion of native plant species (%)	30.47	33.80	29.97	41.87	32.16
4. 牧草生产性能 Forage production performance	产草量 Grassland yield ($kg \cdot hm^{-2}$)	502.25	471.03	396.65	430.77	288.16
	可食牧草比例 Proportion of edible forage (%)	89.89	78.05	88.08	66.73	93.95
	毒害草比例 Proportion of poisonous weeds (%)	8.66	6.61	9.00	8.93	5.47

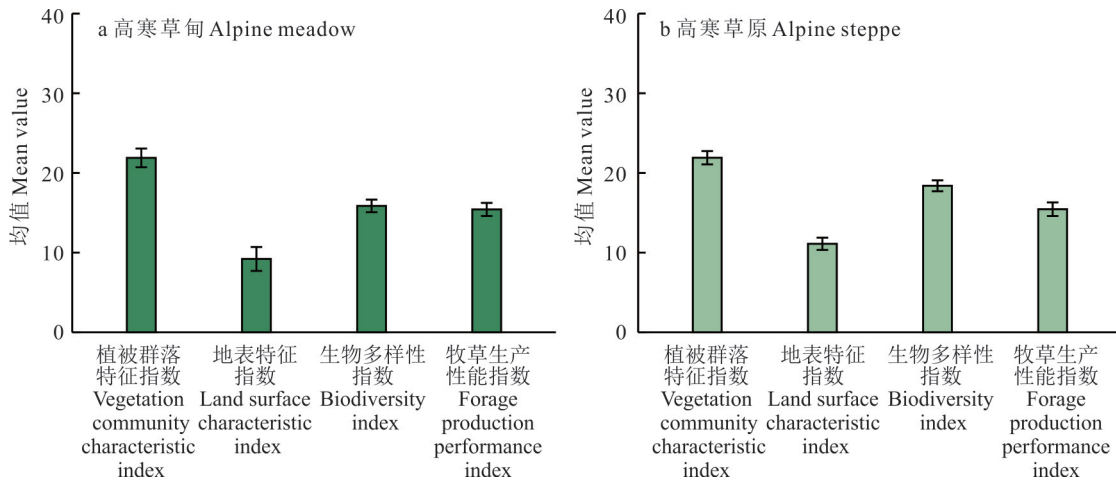


图3 研究区不同草地类的各指数对比

Fig. 3 Comparison of sub-indices of different grassland types in the study area

2.3 各草地类草地健康状况

2022年研究区草地健康指数为64.98,草地健康状况整体处于亚健康水平。对比不同草地类的草地健康指数(GHI),高寒草甸类草地健康指数为62.30,处于亚健康状态,高寒草原类草地健康指数为66.70,处于亚健康状态。如图4所示,不同草地类型GHI值的分布和离散状况,高寒草甸GHI均值与中位数位于较低区间,数据相对较为集中并趋于低值区域。高寒草原GHI值总体上分布更加离散,GHI中位数更高且变异性更大。

2.4 各草地型草地健康状况

研究区内不同草地型草地健康状况有较大差异(图5)。高寒草甸下西藏嵩草型GHI均值为67.79,高山嵩草

型 GHI 均值为 58.31, 两种草地型均处于亚健康状态, 西藏嵩草型与高山嵩草型的草地健康状况存在显著差异 ($P < 0.05$)。高寒草原下紫花针茅型 GHI 均值为 63.88, 嵩型 GHI 均值为 64.62, 均处于亚健康状态。早熟禾型 GHI 均值最高, 为 79.18, 草地处于健康状态。高寒草原类下的早熟禾型与其他两种草地型均存在显著差异 ($P < 0.05$), 但紫花针茅型与嵩型之间的差异不显著 ($P > 0.05$)。

2.5 分区草地健康状况

黄河源园区内不同分区草地健康状况存在明显差别 (图 6), 核心保护区 GHI 均值为 59.30, 处于亚健康状态, 而一般控制区 GHI 均值为 69.50, 基本上处于健康状态, 表明该区域草地生态系统的健康状况相对较好。一般控制区的 GHI 整体上高于核心保护区, 中位数和均值都较高, 分布也更为集中。核心保护区的 GHI 值分布范围更广, 数据较为分散, 但大部分值集中

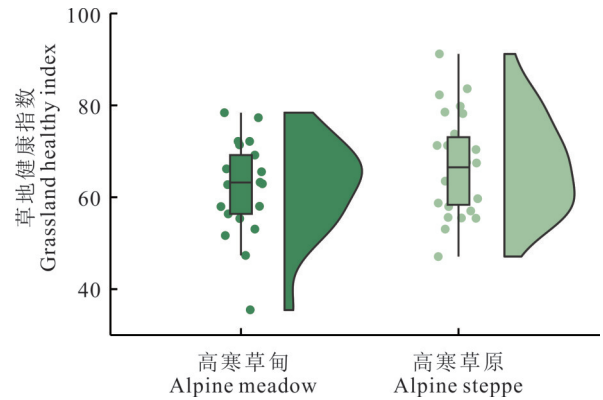


图 4 研究区不同草地类的草地健康指数对比
Fig. 4 Comparison of grassland healthy index of different grassland types in the study area

半小提琴图展示草地健康指数值的分布和概率密度, 散点则表明每个单独的草地健康指数值, 箱线图展示草地健康指数值的分位数和异常值。下同。The half violin plot shows the distribution and probability density of the grassland healthy index (GHI) value, the scatter plot shows each individual GHI value, and the box plot shows the quantile and outliers of the GHI value. The same below.

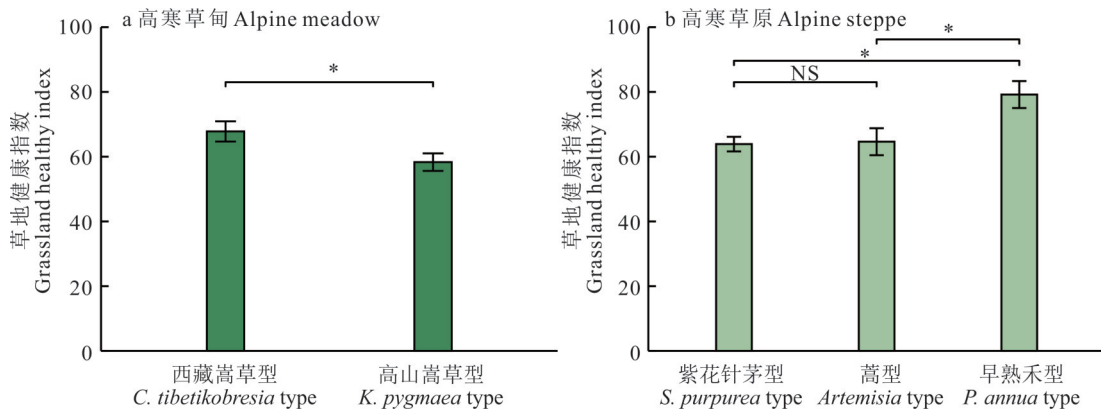


图 5 研究区不同草地型的草地健康指数对比

Fig. 5 Comparison of grassland healthy index of different grassland types in the study area

“*”表示草地型之间差异显著 ($P < 0.05$), NS 表示草地型之间无显著差异 ($P > 0.05$)。“*” indicates significant differences among different grassland types ($P < 0.05$), NS indicates no significant difference among different grassland types ($P > 0.05$).

在较低 (50~70) 的区间。而一般控制区的 GHI 值分布则相对较为集中, 数据集中在较高值 (60~80) 的区间。

3 讨论

3.1 不同类型天然草地健康对比分析

从植被覆盖度、裸地面积比例等指标来看, 高寒草甸的植被状况整体优于高寒草原, 可能由于其分布区降水较多, 气候条件相对适宜所致^[35]。而高寒草原内部各草地型差异较大, 体现了不同草地类型对环境适应能力的差异, 如早熟禾型高寒草原植被盖度较高、裸地面积少, 而嵩型高寒草原则植被盖度低、裸地

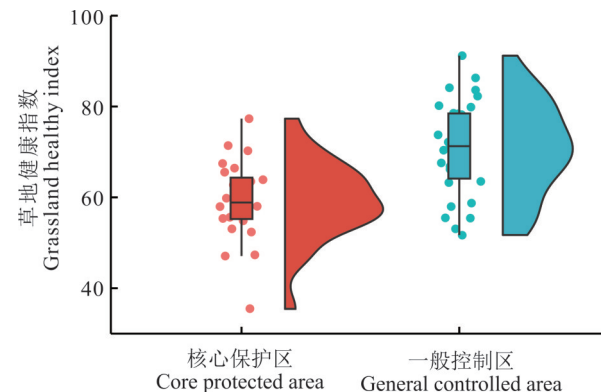


图 6 研究区不同分区的草地健康指数对比

Fig. 6 Comparison of grassland healthy index in different subdivisions of the study area

面积较大。

生物多样性方面,高寒草甸物种数高于大部分草地类型。但原生植物占比这一指标,高寒草原(29.97%~41.87%)普遍高于高寒草甸(30.47%、33.80%),可能与高寒草甸分布区放牧强度较大^[36],并存在外来物种入侵有关^[37]。对于可食牧草比例这一指标,大部分草地均较高(66.13%~93.95%),而毒害草比例普遍不高(5.47%~9.00%)。

整体来看,高山嵩草型高寒草甸和蒿型高寒草原的表现较差,植被状况和牧草质量都不佳,已经出现一定程度的退化^[22],需要加强监测,制定恢复措施,避免进一步退化。而其他类型草地目前状况尚可,但仍需防患于未然,建议采取禁牧封育、合理轮牧等保护管理措施。

3.2 气候变化对不同草地类型健康状况的影响分析

黄河源园区高寒草地脆弱,一旦受到干扰,则易发生退化且难以恢复^[38-39]。气候变化影响草地健康状况,主要表现为暖湿化对植被物候、土壤水分、冰川冻土等方面的影响^[40-41],且不同草地类型响应机制不同。随着三江源地区暖湿化进程的加快^[42-44],促进了高寒草原植被生长^[45-46],提高植被覆盖度^[47],增加生物量^[48-49]等。而高寒草甸本身需水量较高,由于温度升高和太阳辐射增强引起蒸腾作用加强与土壤蒸散加剧^[50-51],造成了高寒草甸土壤水分亏损,导致植被生长受限。

其次,水热条件的改变影响了植被群落组成,主要表现为灌木入侵改变了土壤水分的时空分配格局,限制了莎草科植物的存活^[52]。高寒草甸植被群落以莎草科薹草属(*Carex* spp.)植物为主,更易受到灌木入侵影响^[53],从而改变其群落物种组成与物种演替^[40]。此外,高寒草甸面临严峻的草地灌丛化挑战^[54-55],灌木入侵不仅改变了高寒草甸物种组成,还增加了区域土壤侵蚀量^[56],对高寒草甸的草地健康造成明显不利的影响。而黄河源园区高寒草原耐寒、耐旱,植被群落以禾本科针茅属和早熟禾属植物为主,对草地灌丛化导致的土壤缺水不敏感,因此可能导致高寒草甸草地健康状况差于高寒草原。

此外,气候变暖导致冻土消融,从而对不同草地健康状况产生了不同影响^[45]。黄河源园区高寒草甸分布海拔与坡度较大,冻土消融产生的水分流向低坡度低海拔地区,不仅直接加剧了高寒草甸的水土流失,而且还带走植被根系水分,进而降低高寒草甸植被覆盖度、生物量等^[41,45],导致草地健康状况较差。相反,高寒草原主要分布在低坡度地区,其水分迁移范围很小,并能获得高坡度地区水分流入,因此冻土消融在一定程度上改善了植被的水分状况,改善了高寒草原健康状况。综上,在长期气候变化差异性影响的背景下,黄河源园区高寒草原健康状况优于高寒草甸(图4)。

3.3 人类活动对不同草地类型健康状况的影响

研究区草地健康状况同时也受人类活动的影响,尤其是放牧活动^[57]。在过去的半个世纪里,黄河源园区长期的过度放牧被认为是导致草地退化的主要原因之一^[58],持续的高强度放牧活动对生态环境造成不利影响^[59-60],尤其是大部分被纳入核心保护区的玛多县和曲麻莱县,生态环境更为脆弱,生态系统稳定性差,呈重度退化状态^[61-63]。放牧家畜种类不同和放牧强度差异对高寒草甸和高寒草原也产生了不同影响。高寒草甸的主要放牧家畜为牦牛和绵羊,高寒草原放牧家畜则以绵羊和山羊为主。而牦牛放牧压力大、践踏强度高^[64],加剧了高寒草甸的退化可能性,从而导致高寒草甸比高寒草原更易受到破坏^[48],高寒草甸草地健康状况较差^[65]。

三江源国家公园内核心保护区原则上禁止一切人类活动,而一般控制区可以进行较低强度的人类活动(如放牧、打草等)^[66-67]。当前研究普遍认为国家公园核心保护区生态环境质量优于一般控制区^[68],但本研究发现一般控制区草地健康指数高于核心保护区,草地健康状况更好。根据2023年9月青海省政府颁布的三江源国家公园最新规划《三江源国家公园总体规划(2023-2030年)》^[24],功能分区由三区(核心保育区、生态保育修复区、传统利用区)调整为两区(核心保护区和一般控制区)。一般控制区和核心保护区虽然都属于国家公园范畴,但二者在地理位置、地形地貌、土壤类型等环境条件上存在差异,核心保护区海拔高、坡度大,即使人为干扰降到最小,自然环境条件也限制了其草地健康状况的改善。

黄河源区核心保护区内的主要草地类型为高寒草甸,其一旦受到过度放牧和践踏干扰,极易发生退化,草地

健康状况也相对较差^[69]。生态保护措施存在时滞效应,恢复过程的时间跨度可能长达几十年^[70-72],且草地退化程度越严重,修复所需时间越长,由于新增核心保护区范围内的地区过去受人类活动干扰较大,草地遭到不同程度破坏,新的保护和恢复建设措施还未来得及全面实施,因此这部分新增核心保护区范围内的草地健康状况目前可能仍较差,从而影响整体核心保护区的草地健康水平。

3.4 未来展望

气候变化和人类活动是导致高寒草地退化的两大主要驱动力,其中高寒草甸由于环境及生态脆弱性,受到的胁迫更为严重。保护高寒生态系统的可持续性,提高整体草地健康状况,需要考虑气候和人为因素的综合影响。未来可以通过增加样本数量、引入更多的指标内容,以及考虑更长时间尺度的变化,进一步探讨草地健康与人类活动、气候变化等因素的关系。此外,为促进整个核心保护区内草地修复保护,尤其是高寒草甸的尽快恢复,除了继续实施生态修复工程外,还需对新增核心保护区范围制定重点恢复方案,加快其恢复进程。

4 结论

本研究基于黄河源园区草地野外采样数据与模型反演数据,提出了草地健康指数的概念,构建草地健康评估指标体系,并基于理想参照系方法确定各评估指标值,分别核算植被群落特征指数(VCI)、地表特征指数(LCI)、生物多样性指数(BDI)、牧草生产性能指数(FPI)分项指标与草地健康指数(GHI),进行分级,最终分区、分类、分型分析草地健康状况,并从气候变化和人类活动等角度探讨了草地健康影响机理,得出以下结论:

1) 在研究区内不同类型草地植被群落特征、地表特征、生物多样性和牧草生产性能指标存在一定差异,其中地表特征和生物多样性差异表现较为明显。高寒草甸相比高寒草原在植被覆盖度、生物多样性等方面表现更优。

2) 黄河源区的草地健康指数全区均值为64.98,总体处于亚健康水平。高寒草甸类和高寒草原类草地健康指数分别为62.30和66.70,均处于亚健康状态。黄河源园区高寒草甸的健康状况略低于高寒草原,可能由于高寒草甸分布区域生态环境脆弱;气候暖湿化和草地灌丛化对高寒草甸的不利影响更显著;高寒草甸主要放牧家畜为牦牛和绵羊,放牧强度较大,对草地破坏力更强。

3) 核心保护区与一般控制区均处于亚健康状态,但核心保护区草地健康指数更低,可能是由于核心保护区虽规避了人为活动的直接干扰,但其特殊的地理环境条件以及历史上长期过度放牧造成的时滞效应,制约了其草地健康状况的改善。

为保护和改善高寒草地生态系统的健康状况,需要综合考虑气候变化、人类活动以及管理策略等因素的影响,并采取相应的措施,如合理调整放牧策略、加强生态保护和恢复工作等,同时在国家公园建设过程中因地制宜进行退化草地修复工作,基于草地健康状况对功能区划和修复措施进行动态调整,以改善草地健康状况,实现草地资源的合理利用和区域高质量可持续发展。

参考文献 References:

- [1] Liu X Y, Mu Y T. Research progress in the ecosystem services function and value of grasslands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 286-295.
刘兴元,牟月亭. 草地生态系统服务功能及其价值评估研究进展. *草业学报*, 2012, 21(6): 286-295.
- [2] Zhao Y Y, Liu Z F, Wu J G. Grassland ecosystem services: a systematic review of research advances and future directions. *Landscape Ecology*, 2020, 35(4): 793-814.
- [3] Rapport D J. What constitutes ecosystem health. *Perspectives in Biology and Medicine*, 1989, 33(1): 120-132.
- [4] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health. *Trends in Ecology & Evolution*, 1998, 13(10): 397-402.
- [5] Rao P Z, Wang Y C, Wang F. Analysis on the NDVI change and influence factors of vegetation cover in the Three-River Headwaters Region. *Acta Agrestia Sinica*, 2021, 29(3): 572-582.
饶品增,王义成,王芳. 三江源植被覆盖区NDVI变化及影响因素分析. *草地学报*, 2021, 29(3): 572-582.
- [6] Costanza R. Ecosystem health and ecological engineering. *Ecological Engineering*, 2012, 45(8): 24-29.
- [7] National Standardization Administration Committee. Grassland health status evaluation, GB/T 21439-2008. Beijing: Standards

Press of China, 2008.

国家标准化管理委员会. 草原健康状况评价, GB/T 21439-2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.

- [8] Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Methods for monitoring and evaluation of grassland vegetation health, NY/T 3648-2020. Beijing: China Agriculture Press, Standard and Quality Publishing Branch, 2020.
农业农村部. 草原植被健康监测评价方法, NY/T 3648-2020. 北京: 中国农业出版社标准质量出版分社, 2020.
- [9] Huang L, Fan J W, Yang Z, *et al.* All-in-one assessment of grassland health, degradation, and restoration: The concepts and methods. *Chinese Science Bulletin*, 2024, 69(15): 2015–2024.
黄麟, 樊江文, 杨智, 等. 草原健康、退化与恢复一体化评估: 概念与方法. *科学通报*, 2024, 69(15): 2015–2024.
- [10] Zhang Y X, Fan J W, Wang S Z, *et al.* Grassland investigation, monitoring and evaluation: international experience and insight. *Acta Prataculturae Sinica*, 2023, 32(6): 203–213.
张雅娴, 樊江文, 王穗子, 等. 草原调查、监测与评价的国际经验和启示. *草业学报*, 2023, 32(6): 203–213.
- [11] Yin Y T, Yun X J, Guo M Y, *et al.* Rangeland health assessment in the meadow steppe region of Inner Mongolia: Integrating herder perception and field sampling. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 709–716.
尹燕亭, 运向军, 郭明英, 等. 基于牧户感知和野外调查相结合的内蒙古东部草甸草原健康评价. *生态学报*, 2019, 39(2): 709–716.
- [12] Mallick J, Alqadhi S, Talukdar S, *et al.* A novel technique for modeling ecosystem health condition: a case study in Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 2021, 13(13): 2632.
- [13] Luo Y, Ji W, Wu W, *et al.* Grassland health assessment based on indicators monitored by UAVs: a case study at a household scale. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1150859.
- [14] Zhang J, Li G C, Liu X H, *et al.* Monitoring of vegetation degradation in typical grassland with grassland health index. *Chinese Journal of Ecology*, 2005(12): 1392–1396.
张剑, 李贵才, 刘先华, 等. 利用草场健康指数监测典型草原的植被退化. *生态学杂志*, 2005(12): 1392–1396.
- [15] Gang C, Zhou W, Chen Y, *et al.* Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273–4282.
- [16] Lu J, Hu Y K, Yue P, *et al.* Assessment on the health of alpine steppe in Bayinbuluk based on CVOR index. *Arid Zone Research*, 2017, 34(4): 862–869.
陆均, 胡玉昆, 岳平, 等. 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.
- [17] Chen C B, Peng J. Evaluating ecosystem health in the grasslands of Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2022, 39(1): 270–281.
陈春波, 彭建. 新疆草地生态系统健康评价体系构建. *干旱区研究*, 2022, 39(1): 270–281.
- [18] Wang Z, Yu Q, Guo L. Quantifying the impact of the grain-for-green program on ecosystem health in the typical agro-pastoral ecotone: A case study in the Xilin Gol League, Inner Mongolia. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(16): 5631.
- [19] Li W, Xie S, Wang Y, *et al.* Effects of urban expansion on ecosystem health in Southwest China from a multi-perspective analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 294: 126341.
- [20] Shao Q Q, Liu S C, Ning J, *et al.* Assessment of ecological benefits of key national ecological projects in China in 2000–2019 using remote sensing. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(9): 2133–2153.
邵全琴, 刘树超, 宁佳, 等. 2000–2019年中国重大生态工程生态效益遥感评估. *地理学报*, 2022, 77(9): 2133–2153.
- [21] Shao Q Q, Fan J W, Liu J Y, *et al.* Target-based assessment on effects of first-stage ecological conservation and restoration project in Three-River Source Region, China and policy recommendations. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(1): 35–44.
邵全琴, 樊江文, 刘纪远, 等. 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.
- [22] Liu Y J, Yang Q. Research progress and prospect of degraded grassland restoration in Qinghai–Tibet Plateau. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(10): 131–143.
刘永杰, 杨琴. 青藏高原退化草地修复研究进展及展望. *中国草地学报*, 2023, 45(10): 131–143.
- [23] Wang Y, Lv W, Xue K, *et al.* Grassland changes and adaptive management on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(10): 668–683.
- [24] Three-River-Source National Park Administration. Three-River Source National Park master plan (2023–2030). (2023-08-23) [2023-09-13]. <https://sjy.qinghai.gov.cn/news/gy/25748.html>.

- 三江源国家公园管理局.《三江源国家公园总体规划(2023—2030)》. (2023-08-23)[2023-09-13]. <https://sjy.qinghai.gov.cn/news/gy/25748.html>.
- [25] Anatoly A G, Yoram J K, Robert S, *et al.* Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 80(1): 76—87.
- [26] Chang S H, Wang L, Jiang J C, *et al.* Developments course and prospect of grassland survey and monitoring domestic and abroad. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(5): 1281—1292.
常生华, 王蕾, 姜佳昌, 等. 国内外草原调查监测历程与展望. *草地学报*, 2023, 31(5): 1281—1292.
- [27] Wischmeier W H, Smith D D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, D. C. : U. S. Government Printing Office, 1978.
- [28] Zhao X X, Feng Y H, Xu K X, *et al.* Canopy structure: An intermediate factor regulating grassland diversity-function relationships under human disturbances. *Fundamental Research*, 2023, 3(2): 179—187.
- [29] Zhang X Y, Li Z C. Monitoring and evaluation of the ecological construction effects of natural grasslands. *Pratacultural Science*, 2003, 20(9): 1—4.
张新跃, 李正川. 天然草地生态建设效果监测与评价. *草业科学*, 2003, 20(9): 1—4.
- [30] Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Calculation of reasonable livestock carrying capacity of natural grassland, NY/T 635-2015. Beijing: China Agriculture Press, Standard and Quality Publishing Branch, 2015.
农业农村部. 天然草地合理载畜量的计算, NY/T 635-2015. 北京: 中国农业出版社标准质量出版分社, 2015.
- [31] He H L, Ren X L, Zhang L, *et al.* Research on ecosystem assessment method based on reference-state-deviation. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 2049—2060.
何洪林, 任小丽, 张黎, 等. 基于“参照系—现状—变化量”的生态系统评估方法. *生态学报*, 2023, 43(5): 2049—2060.
- [32] He N P, Xu L, He H L. The methods of evaluation ecosystem quality: Ideal reference and key parameters. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1877—1886.
何念鹏, 徐丽, 何洪林. 生态系统质量评估方法——理想参照系和关键指标. *生态学报*, 2020, 40(6): 1877—1886.
- [33] National Forestry and Grassland Administration. Technical specification for the national forestry and grassland comprehensive monitoring and evaluation. (2021-06) [2022-06-20]. <https://lycy.gansu.gov.cn/lycy/c105816/202107/1677045/files/e2d20ce9d1554b4586961ba2d0903428.pdf>.
国家林业和草原局. 国家林草生态综合监测评价技术规程. (2021-06)[2022-06-20]. <https://lycy.gansu.gov.cn/lycy/c105816/202107/1677045/files/e2d20ce9d1554b4586961ba2d0903428.pdf>.
- [34] Wang Q, Cao W, Huang L. Evolution characteristics of ecosystem functional stability and ecosystem functional zoning on the Qinghai—Tibet Plateau. *Journal of Geographical Sciences*, 2023, 33(11): 2193—2210.
- [35] Li C, Lai C, Peng F, *et al.* Dominant plant functional group determine the response of the temporal stability of plant community biomass to 9-year warming on the Qinghai—Tibetan Plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 704138.
- [36] Wei D, Zhao H, Zhang J, *et al.* Human activities alter response of alpine grasslands on Tibetan Plateau to climate change. *Journal of Environmental Management*, 2020, 262: 110335.
- [37] Li W J, Zhang Y M. Study of invasion of three alien species around Haibei alpine meadow ecosystem station. *Pratacultural Science*, 2007, 24(11): 22—25.
李文靖, 张堰铭. 海北站周围3种外来物种入侵状况的初步研究. *草业科学*, 2007, 24(11): 22—25.
- [38] Wang G, Wang Y, Li Y, *et al.* Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai—Tibet Plateau, China. *Catena*, 2007, 70(3): 506—514.
- [39] Ran Q, Hao Y, Xia A, *et al.* Quantitative assessment of the impact of physical and anthropogenic factors on vegetation spatial-temporal variation in Northern Tibet. *Remote Sensing*, 2019, 11(10): 1183.
- [40] Aguirre D, Benhumea A E, McLaren J R. Shrub encroachment affects tundra ecosystem properties through their living canopy rather than increased litter inputs. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108121.
- [41] Wang G X, Li Y M, Wu Q B, *et al.* Impacts of permafrost changes on alpine ecosystem in Qinghai—Tibet Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(11): 1156—1169.
- [42] Liang D L, Tang H P. Analysis of vegetation changes and water temperature driving factors in two alpine grasslands on the Qinghai—Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(1): 287—300.
梁大林, 唐海萍. 青藏高原两种高寒草地植被变化及其水温驱动因素分析. *生态学报*, 2022, 42(1): 287—300.
- [43] Ding Y H, Liu Y J, Xu Y, *et al.* Regional responses to global climate change: progress and prospects for trend, causes, and

projection of climatic warming-wetting in Northwest China. *Advances in Earth Science*, 2023, 38(6): 551.

丁一汇, 柳艳菊, 徐影, 等. 全球气候变化的区域响应: 中国西北地区气候“暖湿化”趋势、成因及预估研究进展与展望. *地球科学进展*, 2023, 38(6): 551.

- [44] Tian H, Lan Y C, Wen J, *et al.* Evidence for a recent warming and wetting in the source area of the Yellow River (SAYR) and its hydrological impacts. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 25(6): 643–668.
- [45] Hao A, Duan H, Wang X, *et al.* Different response of alpine meadow and alpine steppe to climatic and anthropogenic disturbance on the Qinghai–Tibetan Plateau. *Global Ecology and Conservation*, 2021, 27: e01512.
- [46] Li M, Wu J, Song C, *et al.* Temporal variability of precipitation and biomass of alpine grasslands on the Northern Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 2019, 11(3): 360.
- [47] Zhao Z W, Liang S H, Wan L, *et al.* Analysis on characteristics of climate change and warm-humid in the source region of the Yellow River in recent 60 years. *Yellow River*, 2014, 36(11): 9–12.
赵珍伟, 梁四海, 万力, 等. 黄河源区近60a气候变化特征及暖湿化分析. *人民黄河*, 2014, 36(11): 9–12.
- [48] Guo J, Zhai L, Sang H, *et al.* Effects of hydrothermal factors and human activities on the vegetation coverage of the Qinghai–Tibet Plateau. *Scientific Reports*, 2023, 13(1): 12488.
- [49] Wei Y, Lu H, Wang J, *et al.* Dual influence of climate change and anthropogenic activities on the spatiotemporal vegetation dynamics over the Qinghai–Tibetan Plateau from 1981 to 2015. *Earth’s Future*, 2022, 10(5): 1–23.
- [50] Wang H, Liu D, Lin H, *et al.* NDVI and vegetation phenology dynamics under the influence of sunshine duration on the Tibetan Plateau. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(5): 687–698.
- [51] Zhang X, Ren Y, Yin Z Y, *et al.* Spatial and temporal variation patterns of reference evapotranspiration across the Qinghai–Tibetan Plateau during 1971–2004. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D15): 1–14.
- [52] Liu Y F, Zhang Z, Liu Y, *et al.* Shrub encroachment enhances the infiltration capacity of alpine meadows by changing the community composition and soil conditions. *Catena*, 2022, 213: 106222.
- [53] Sun J, Cheng G W, Li W P. Meta-analysis of relationships between environmental factors and aboveground biomass in the alpine grassland on the Tibetan Plateau. *Biogeosciences*, 2013, 10(3): 1707–1715.
- [54] Brandt J S, Haynes M A, Kuemmerle T, *et al.* Regime shift on the roof of the world: Alpine meadows converting to shrublands in the southern Himalayas. *Biological Conservation*, 2013, 158: 116–127.
- [55] Wang Y X, Chen X J, Lou S N, *et al.* Woody-plant encroachment in grasslands: a review of mechanisms and aftereffects. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(5): 219–227.
王迎新, 陈先江, 娄珊宁, 等. 草原灌丛化入侵: 过程、机制和效应. *草业学报*, 2018, 27(5): 219–227.
- [56] Romero Ovalle P E, Bisigato A J, Campanella M V. Soil erosion facilitates shrub encroachment in Patagonian herbaceous steppes. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(11): 3377–3385.
- [57] Naeem S, Zhang Y, Tian J, *et al.* Quantifying the impacts of anthropogenic activities and climate variations on vegetation productivity changes in China from 1985 to 2015. *Remote Sensing*, 2020, 12(7): 1113.
- [58] Li X L, Gao J, Brierley G, *et al.* Rangeland degradation on the Qinghai–Tibet Plateau: implications for rehabilitation. *Land Degradation & Development*, 2013, 24(1): 72–80.
- [59] Fan J W, Shao Q Q, Liu J Y, *et al.* Assessment of effects of climate change and grazing activity on grassland yield in the Three Rivers Headwaters Region of Qinghai–Tibet Plateau, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 170(1): 571–584.
- [60] Cheng G, Wu T. Responses of permafrost to climate change and their environmental significance, Qinghai–Tibet Plateau. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2007, 112(F2): 1–10.
- [61] Su P, Bian L L, Wang J L. Calculation and evaluation of ecological carrying capacity in Maduo County. *China Population, Resources and Environment*, 2018, 28(Supple1): 90–93.
苏萍, 边玲玲, 王卷乐. 玛多县生态环境承载力计算与评价. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(增刊1): 90–93.
- [62] Li J Y, Hu G Z, Zeng W H. Assessment of grassland ecosystem stability based on system dynamics—taking Maduo County, the source of the Yellow River in Sanjiangyuan National Park, as an example. *China Environmental Science*, 2024, 44(6): 3419–3433.
李佳颖, 胡官正, 曾维华. 基于系统动力学的草地生态系统稳定性评价——以三江源国家公园黄河源玛多县为例. *中国环境科学*, 2024, 44(6): 3419–3433.
- [63] Liu J Y, Xu X L, Shao Q Q. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters

- Region in Qinghai Province. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(4): 364–376.
- 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. *地理学报*, 2008, 63(4): 364–376.
- [64] Yang H, Sun J, Xu C, *et al.* Hoof pressure and trampling intensity of yaks are higher than those of Tibetan sheep in a Tianzhu alpine meadow. *The Rangeland Journal*, 2019, 41(2): 125–133.
- [65] Wang Y, Wesche K. Vegetation and soil responses to livestock grazing in Central Asian grasslands: a review of Chinese literature. *Biodiversity and Conservation*, 2016, 25(12): 2401–2420.
- [66] Tang X P, Jiang Y F, Liu Z L, *et al.* Top-level design of the natural protected area system in China. *Forest Resources Management*, 2019(3): 1–7.
- 唐小平, 蒋亚芳, 刘增力, 等. 中国自然保护地体系的顶层设计. *林业资源管理*, 2019(3): 1–7.
- [67] Tang X P. Functional orientation and spatial attribute analysis of the National Park Planning System of China. *Biodiversity*, 2020, 28(10): 1246–1254.
- 唐小平. 国家公园规划制度功能定位与空间属性. *生物多样性*, 2020, 28(10): 1246–1254.
- [68] Fu J X, Cao G C, Guo W J. Spatial-temporal differentiation of mountain-water-forest-farmland-lake-grass system in Qinghai area of the Qilian Mountain National Park, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(8): 2866–2874.
- 付建新, 曹广超, 郭文炯. 祁连山国家公园青海片区山水林田湖草的时空分异. *应用生态学报*, 2021, 32(8): 2866–2874.
- [69] Shang Z, Long R. Formation causes and recovery of the “Black Soil Type” degraded alpine grassland in Qinghai–Tibetan Plateau. *Frontiers of Agriculture in China*, 2007, 1(2): 197–202.
- [70] Brierley G J, Li X, Cullum C, *et al.* Landscape and ecosystem diversity, dynamics and management in the Yellow River Source zone. Berlin, German: Springer International Publishing, 2016.
- [71] Kuussaari M, Bommarco R, Heikkinen R K, *et al.* Extinction debt: a challenge for biodiversity conservation. *Trends in Ecology & Evolution*, 2009, 24(10): 564–571.
- [72] Watts K, Whytock R C, Park K J, *et al.* Ecological time lags and the journey towards conservation success. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(3): 304–311.