植物生态学报 2025, **49** (1): 42-58 DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152
Chinese Journal of Plant Ecology CSTR: 32100.14.cjpe.2024.0152

呼伦贝尔草甸草原退化特征因子识别与快速诊断指标体系构建

许梦真[1,2] 卢正宽[1,2] 谭星儒[1,2] 王彦兵[1,2] 苏天成[1,2] 窦山德[1,3] 潘庆民[1,2] 陈世苹[1,2*]

[1]中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 国家植物园, 北京 100093; [2]中国科学院大学, 北京 100049; [3]内蒙古锡林郭勒草原生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古锡林郭勒 026000

摘 要 中国是草地资源大国, 但由于气候变化和人类活动的双重影响, 近70%的草原存在不同程度的退化, 因此明确草原退化特征因子, 构建草原退化快速诊断指标体系, 对准确评价草原的退化状况至关重要。通过在内蒙古呼伦贝尔草甸草原选取未退化、轻度退化、中度退化、重度退化样地进行群落调查, 获取相关植被和土壤指标, 运用随机森林模型进行退化指标的筛选和权重赋值, 并兼顾政府和牧民对生态系统服务的需求, 构建草甸草原退化快速诊断指标体系。随退化程度的增加, 群落地上生物量、凋落物生物量、群落高度、叶片厚度等指标均显著降低; 植物多样性、土壤全氮含量、有机碳含量等指标呈先上升后下降的趋势; 而群落氮磷含量、土壤密度等指标表现出显著上升的趋势。基于随机森林重要值和指标获取的难易程度, 该研究筛选出地上生物量、优质牧草比例、群落高度、凋落物生物量、物种丰富度、叶干物质含量、叶片厚度、土壤密度、土壤含水量、土壤无机氮含量共10个退化特征因子, 涉及牧草供应、侵蚀控制、多样性保护、植被抗逆、水分养分调节多个生态系统服务。以未退化样地作为参照, 构建了内蒙古草甸草原退化指数(DI), 并明确了不同退化程度下DI的变化范围, 为国家与地方现行标准指标选取的合理性提供了数据支持。

关键词 草地退化; 生态系统服务; 随机森林算法; 退化指标

许梦真, 卢正宽, 谭星儒, 王彦兵, 苏天成, 窦山德, 潘庆民, 陈世苹 (2025). 呼伦贝尔草甸草原退化特征因子识别与快速诊断指标体系构建. 植物生态学报, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

Identification of key factors and construction of a rapid diagnostic indicator system for evaluation of grassland degradation in Hulun Buir meadow grasslands

XU Meng-Zhen[1,2], LU Zheng-Kuan[1,2], TAN Xing-Ru[1,2], WANG Yan-Bing[1,2], SU Tian-Cheng[1,2], DOU Shan-De[1,3], PAN Qing-Min[1,2], and CHEN Shi-Ping[1,2*]

[1]State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, China National Botanical Garden, Beijing 100093, China; [2]University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; and [3]National Field Research Station of Xilin Gol Grassland Ecosystem, Xilin Gol, Nei Mongol 026000, China

Abstract

Aims China harbors extensive grassland resources, yet nearly 70% of these grasslands are afflicted by varying degrees of degradation under the combined pressure of climate change and human activities. Pinpointing the pivotal factors driving grassland degradation and establishing a rapid diagnostic system is imperative for precise condition assessments.

Methods This study was conducted in the Hulun Buir meadow steppe of Nei Mongol. The selected sites were categorized into four degradation levels: non-degraded, lightly degraded, moderately degraded, and heavily degraded. Vegetation and soil indicators were collected. Leveraging the random forests algorithm, degradation indicators were screened and weighted, with efforts made to reconcile ecosystem service priorities between the government and pastoralists.

Important findings This study identified ten key factors characterizing degradation, including aboveground biomass, proportion of high-quality forage, community height, litter biomass, species richness, leaf dry matter

收稿日期Received: 2024-05-13 接受日期Accepted: 2024-12-10
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类) (XDA26020101)和国家自然科学基金(U22A20559和32071565)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA26020101) and the National Natural Science Foundation of China (U22A20559 and 32071565).
* 通信作者Corresponding author (spchen@ibcas.ac.cn)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

content, leaf thickness, soil density, soil water content and soil inorganic water content. These indicators encapsulate diverse ecosystem services, including forage supply, erosion control, biodiversity conservation, vegetation resilience, and water and nutrient regulation. Using non-degraded sites as a benchmark, a degradation index (DI) for the meadow steppes of Nei Mongol was developed, accompanied by delineated DI thresholds for different degradation levels. This study provides foundational data to support judicious selection of indicators for both national and regional standards.

Key words grassland degradation; ecosystem services; random forests algorithm; degradation indicator

Xu MZ, Lu ZK, Tan XR, Wang YB, Su TC, Dou SD, Pan QM, Chen SP (2025). Identification of key factors and construction of a rapid diagnostic indicator system for evaluation of grassland degradation in Hulun Buir meadow grasslands. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

草地覆盖全球约40%的陆地面积, 发挥着食物生产、多样性保护、水源涵养、气候调节等多个生态系统服务功能(Havstad et al., 2007; Bengtsson et al., 2019), 对社会经济活动以及人类福祉等方面具有重要影响。然而, 受气候变化和人类活动的双重影响(Zhou et al., 2017b; Díaz et al., 2019), 草原生态系统正遭受前所未有的压力, 出现不同程度的退化, 具体表现为生产力显著降低, 生物多样性减少, 生态系统服务功能持续下降(Bardgett et al., 2021)。我国拥有丰富的草地资源, 天然草地占国土面积的27.5%, 但随着经济和人口的增加, 长期超载过牧和粗放管理使我国的天然草地有近70%处于不同程度的退化, 因此准确评价草原的退化状况是至关重要的。

随着研究者对退化草原结构与功能认识的深入, 特别是生态系统多功能性概念的提出, 对草原退化的定义与判别标准从仅仅聚焦草原生产功能的下降, 发展到逐步关注草原多种生态功能的变化(Lyu et al., 2022; Tian et al., 2022)。草原退化不仅表现为地上生物量、植被高度、盖度、优势种多度减少等植被的退化, 也表现在土壤有机碳、氮、磷含量及土壤持水能力、团聚体稳定性下降等土壤理化性质的改变(张扬建等, 2020; 潘庆民等, 2023; 乌云嘎等, 2023)。对多样性的研究也已从单纯关注物种数量, 发展到更加强调功能多样性的变化(江小雷和张卫国, 2010)。植物功能性状能更全面地反映植物对资源环境变化的响应策略, 因而在功能多样性研究中被广泛使用(Cornelissen et al., 2003)。在北美、英国、澳大利亚等畜牧业发达国家和地区, 对草原退化的评估不仅考虑到了地上生物量、盖度、植物功能群组成、适宜物种的比例等生产功能指标, 通常还涉及土壤碳含量、地表径流等生态功能相关的指标(Gretton & Salma, 1996; Bezzano, 2018; USDA, 2022)。目前我国对草原退化评估的现行标准中, 大部分仅使用了生产力、盖度、原生群落优势物种生物量等植被相关指标, 并没有把退化过程中土壤结构与功能的变化、功能多样性与群落稳定性关系的研究成果应用到评估标准中。随着从生产和生态多维度评估退化草地服务功能变化需求的增加, 如何将这些与草原生态功能相关的指标纳入到草原退化评价体系中尚缺少相关研究。

不同指标在表征草原退化上存在差异性, 因此需赋予相应的权重。例如, 闫瑞瑞等(2021)认为地上生物量是表征草甸草原退化最有效的指标, 因此设置了最高的权重, 而植物多样性、土壤指标的权重较低。在近期修订的内蒙古自治区地方标准《草原退化分级指标》(内蒙古自治区市场监督管理局, 2021)中, 对原生群落优势植物地上生物量相对值赋予的权重最高, 而对凋落物量指标设置为最低的权重。在这些评价体系中, 对指标权重的赋值通常使用的是专家打分法, 主观性强, 对退化评估的结果缺乏一致性(Chen et al., 2020)。随机森林模型作为一种强大的机器学习技术, 是通过构建多个决策树为分类和回归问题建立多指标预测模型(Breiman, 2001)。而随机森林预测模型中的各指标重要值可以为指标权重赋值提供一个客观评价的方法, 近年来已经被应用于土地利用分类(Gislason et al., 2006; Zhao et al., 2022)和草原退化评估(Yan et al., 2022)等方面。

草甸草原约占内蒙古呼伦贝尔草原区面积的19.56% (徐大伟, 2019), 是我国自然禀赋最好、牧草产量最高的天然草场(李博等, 1980)。长期的超载过牧和粗放经营使呼伦贝尔草原退化面积超过了66% (匡文慧等, 2018), 其中中度和重度退化面积比例超过了90% (李杰等, 2013)。因此, 对草甸草原退化程度的准确评估将有助于该区域草原利用管理方式的

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

优化。本研究的研究地点选择在内蒙古呼伦贝尔草甸草原, 根据草原退化程度(未退化、轻度退化、中度退化、重度退化)选取9条退化序列, 对植被和土壤相关指标进行野外调查。主要目标是: 1)明确草甸草原不同退化程度植被生产力、多样性、物种关键功能性状、土壤理化性质的变化; 2)采用随机森林方法, 筛选可以指示草甸草原退化程度的敏感性指标, 并量化各指标权重, 构建适合指示草甸草原退化的指标体系; 3)兼顾不同草原服务对象的权益, 考虑草原生态系统的多功能性与多服务性, 完善草甸草原退化状况评估量化方法。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究区域位于内蒙古呼伦贝尔, 地理范围115.52°–121.58° E, 47.33°–50.83° N, 属于温带大陆性气候。根据当地气象站的长期气象数据(1960–2020年), 本区域年平均气温–1.5 ℃, 年降水量380–400 mm, 大部分降水(超过80%)发生在生长季(6–9月)。土壤类型为黑钙土和暗栗钙土。

本区域为温带草甸草原, 是温带草原中气候较湿润、种类组成较丰富、生产力较高的一类。以狼针草(*Stipa baicalensis*)草原、羊草(*Leymus chinensis*)草原、线叶菊(*Filifolium sibiricum*)草原为主要草甸草原群落类型。

1.2 样地选择

2021–2022年生长季(7–8月), 参考《天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003)和《内蒙古天然草地退化标准》(内蒙古自治区畜牧厅, 1999)地上生物量、退化指示种、植被盖度、土壤表面状况等指标, 结合样地的利用强度背景, 在内蒙古呼伦贝尔3种草甸草原类型(狼针草草原、羊草草原和线叶菊草原)选取了9条退化序列。每条序列包括4个不同退化程度的样地, 即未退化、轻度退化、中度退化和重度退化样地。每条序列各样地间距离不超过20 km, 保证植被和土壤条件的一致性, 样地详细信息参见表1。除其中两条线叶菊草原未退化样地(序列7和8)为当地草原站的监测围栏样地, 其他未退化样地均为内蒙古呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站和中国科学院额尔古纳森林草原过渡带生态系统研究站的长期围封样地(围封期>10年)。野外样地中, 放牧场多为中度和重度退化程度, 鲜少为轻度退化; 轻度退化样地均为利用强度相对较低的长期打草场, 打草场每年8月中下旬进行打草, 留茬高度通常为10–15 cm。在长期放牧场中度和重度退化样地的选择过程中, 除了根据现行的退化标准外, 其距离村庄和水源地的距离也是重要的参考依据(乌仁其其格, 2009; Eldridge et al., 2024)。

1.3 植被生物量与多样性相关指标

1.3.1 地上、地下生物量与植被养分

在每个样地内设置5个不分种样方(1 m × 1 m), 记录样方内植物的总盖度和冠层高度。收集样方中的地上凋落物, 并将植物地上部分齐地面剪下装信封带回实验室, 65 ℃烘干至质量不再改变, 称量地上生物量(AGB)和凋落物生物量。用根钻(直径7 cm)分层采集样方中0–50 cm的根系样品, 放入尼龙根袋(网眼孔径40目)中带到实验室用清水冲洗至无泥沙残存, 65 ℃烘干至质量不再改变, 称质量计算群落地下生物量(BGB)。将地上植物样品混合后研磨过60目筛, 用于测定植物碳、氮和磷(PC、PN、PP)含量。其中植物碳氮含量使用元素分析仪

表1 呼伦贝尔草甸草原退化样地概况
Table 1 Description of research site in the Hulun Buir meadow degradation steppe

序列 Sequence	群落类型 Community type	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)
1	狼针草群落 *Stipa baicalensis* community	120.12°	49.35°	672
2	狼针草群落 *Stipa baicalensis* community	119.67°	48.49°	756
3	羊草群落 *Leymus chinensis* community	119.39°	50.17°	528
4	羊草群落 *Leymus chinensis* community	120.05°	49.33°	630
5	羊草群落 *Leymus chinensis* community	120.03°	49.37°	637
6	羊草群落 *Leymus chinensis* community	120.15°	49.44°	687
7	线叶菊群落 *Filifolium sibiricum* community	120.73°	49.68°	867
8	线叶菊群落 *Filifolium sibiricum* community	119.35°	50.62°	592
9	线叶菊群落 *Filifolium sibiricum* community	120.03°	49.52°	817

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

(Vario EL III, Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany)测定, 磷含量使用酸溶-钼锑抗比色法测定。

1.3.2 物种组成与群落多样性

在每个样地内设置3–5个分种样方(1 m × 1 m), 记录每个物种高度和株丛数, 分种剪取各物种地上部分, 带回实验室烘干称质量, 用于计算物种丰富度、优质牧草比例、α和β多样性等指标。

物种丰富度(SR)为样方中平均物种数量。优质牧草比例(HR)为样方中多年生禾本科与豆科植物地上生物量占总地上生物量的比例。

α多样性采用Shannon-Wiener多样性指数(H') (Chao et al., 2014)表示, 其公式如下:

$$H' = -\sum_{i=1}^{N}(P_i \times \ln P_i) \quad (1)$$

式中, N为物种数目, P_i为i物种的相对生物量。

β多样性采用Bray-Curtis群落距离表示(Oksanen et al., 2024), 距离的值范围从0到1, 其中0表示两个样本在物种组成上完全相同, 而1表示两个样本在物种组成上完全不同, 公式如下:

$$D_{\text{Bray-Curtis}} = \frac{\sum_{i=1}^{j,\,k=n} |x_{ij} - x_{ik}|}{\sum_{i=1}^{j,\,k=n} |x_{ij} + x_{ik}|} \quad (2)$$

式中, x_{ij}和x_{ik}分别为群落j和k第i个物种的相对生物量。

1.4 植物功能性状指标

在每个样地选择8–10个优势物种(生物量占比85%以上), 测定9个植物功能性状指标: 植株高度(H)、叶片厚度(LT)、叶片碳含量(LCC)、叶片氮含量(LNC)、叶片磷含量(LPC)、比叶面积(SLA)、叶干物质含量(LDMC)、叶茎比(LS ratio)、叶绿素含量(Chl)。对同一物种选择5株长势良好的植株个体, 使用卷尺测量其营养枝最高点到地面的垂直高度, 用均值作为该物种的植株高度。采集植株地上部分, 将茎叶分离, 65 ℃烘干48 h, 称质量后计算叶茎比。每种植物采集10株个体的健康叶片, 放入盛有冰袋的纯净水中浸泡2 h充分吸水至饱和后擦干铺在透明塑料板上, 用扫描仪(Epson Perfection V19II, Bekasi, Indonesia)扫描叶片图像, 随后用1/1000电子天平称量叶片饱和鲜质量, 后将其放入65 ℃的烘箱中烘干48 h并称质量。采用Image J软件处理叶片图片获取叶面积, 叶面积与叶片干质量的比值为比叶面积, 叶片干质量和叶片饱和鲜质量的比值为叶干物质含量。用便携式叶绿素仪SPAD-502 (Konica Minolta, Tokyo, Japan)测定叶片的相对叶绿素含量, 用游标卡尺测定自然展开叶片的厚度。每个物种采集足量(干质量大于3 g)的健康叶片, 105 ℃杀青0.5 h后65 ℃烘干24 h, 球磨仪研磨过60目筛后用于测定叶片碳、氮、磷含量。

采用加权均值法计算群落水平各功能性状均值(CWM), 用于表征群落水平功能性状(Garnier et al., 2004), 公式如下:

$$\text{CWM} = \sum_{i=1}^{N}(P_i \times \text{trait}_i) \quad (3)$$

式中, P_i为i物种的相对生物量, trait_i为i物种某功能性状的测定值。在本研究指标筛选中均采用群落水平功能性状均值。

1.5 土壤理化性质

用土钻在5个不分种样方中钻取0–10 cm的土壤样品装入自封袋中, 过2 mm筛去除植物残体和砾石后, 风干保存用于土壤理化性质测定。具体测试方法如下: 土壤pH测定采用电位法, 土壤速效磷含量(AP)采用碳酸氢钠浸提-钼蓝比色法, 土壤无机氮含量(SIN)采用流动分析仪法, 土壤全氮含量(TN)采用元素分析仪法, 土壤全磷含量(TP)采用酸溶-钼锑抗比色法, 土壤有机碳含量(SOC)采用重铬酸钾外加热法, 土壤含水量(SWC)采用烘干法。采用环刀法测定0–10 cm土壤密度(SD)和田间持水量(FC)。

1.6 随机森林模型建立与指标筛选

采用随机森林模型分别对植被结构功能与多样性、植物功能性状以及土壤指标数据集进行了重要性排序和指标的初步筛选。根据草原不同退化程度的分类变量, 本研究从整体样本中随机选取了70%作为训练集, 进行超参数优化确定了模型的最优配置, 以此生成相应的分类树, 并通过测试集混淆矩阵给出的分类精度衡量模型预测的准确度。

随机森林模型在构建决策树时可能会过拟合训练数据, 因此本研究采用10折交叉验证在多个子集上重复训练和验证模型获取交叉验证精度, 评估模型的泛化能力并检验其过拟合风险(Breiman, 2001)。

为提高模型的预测精度并减少模型计算的复杂性, 本研究采用递归特征消除法(Guyon et al., 2002)

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

分别对植被结构功能与多样性指标、植物功能性状、土壤指标数据集进行指标个数的筛选, 结合指标在不同退化程度的变化规律, 减少指标所指征生态系统功能的冗余性, 确保模型分类精度的前提下保留了对退化敏感的指标, 所保留的指标需要遵循有效、实用、检测快速且成本低的原则。

1.7 指标权重赋值与退化指数计算

对通过初步筛选保留的指标建立随机森林模型, 将模型中的各指标重要性得分作为该指标的权重赋值依据, 该权重用于度量指标对草原退化程度的指示能力。

根据已有研究对生态系统服务功能指标的划分(赵同谦等, 2004; Bardgett et al., 2021), 将各指标划分到其对应的生态系统服务功能, 包括供给、调节、支持服务(表2)。鉴于不同利益群体(如政府和牧民)对生态系统服务(如支持、调节、供给等)的需求不同, 参考目前已有的相关研究(Manning et al., 2018; Bardgett et al., 2021; 井新和贺金生, 2021), 将每项生态系统服务所对应的指标按照不同利益群体的特定需求设置相应的权重(附录I), 通过计算两者权重的平均值作为利益群体权重, 该指标用于平衡政府与牧民对草原生态系统服务的需求。

表2 生态系统服务功能及其对应的相关指标
Table 2 Ecosystem services and their corresponding indicators

类型 Type	生态系统服务 Ecosystem service	指标名称 Indicator name
调节 Regulating	水分调节 Water regulation	土壤密度 Soil density
		土壤含水量 Soil water content
		田间持水能力 Field water holding capacity
	气候调节 Climate regulation	地下生物量 Belowground biomass
		植物群落碳含量 Plant community carbon content
		叶片碳含量 Leaf carbon content
	土壤肥力的维持 Maintenance of soil fertility	pH
		土壤有机碳含量 Soil organic carbon content
		土壤全氮含量 Soil total nitrogen content
		土壤全磷含量 Soil total phosphorus content
		土壤无机氮含量 Soil inorganic nitrogen content
		土壤速效磷含量 Soil available phosphorus content
	土壤侵蚀控制 Soil erosion control	群落高度 Community height
		植株高度 Plant height
		凋落物生物量 Litter biomass
		植被覆盖度 Vegetation cover
供应 Provisioning	牧草供应能力 Forage supply capability	地上生物量 Aboveground biomass
	牧草品质 Forage quality	优质牧草比例 High quality forage ratio
		植物群落氮含量 Plant community nitrogen content
		植物群落磷含量 Plant community phosphorus content
		叶片氮含量 Leaf nitrogen content
		叶片磷含量 Leaf phosphorus content
支持 Supporting	多样性保护 Diversity conservation	香农-维纳多样性 Shannon-Wiener diversity
		物种丰富度 Species richness
		β多样性 β diversity
	植被抗逆能力 Vegetation resilience	叶片厚度 Leaf thickness
		叶干物质含量 Leaf dry matter content
	植被光合能力 Vegetation photosynthetic ability	比叶面积 Specific leaf area
		叶茎比 Leaf to stem ratio
		叶绿素含量 Chlorophyll content

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

根据指标的重要性权重、利益群体权重和指标参考值, 计算草甸草原退化指数(DI), 计算公式如下:

$$DI = 1 - (\sum_{j=1}^{n}(\sum_{i=1}^{m}(\frac{\text{实测指标}_{ij}}{\text{指标的参考值}_{ij}} \times \text{重要性权重}_{ij}) \times \text{利益群体权重}_{j})) \quad (4)$$

式中, j代表不同生态系统服务功能类型, 如土壤侵蚀控制等; i代表生态系统服务功能类型中的各项指标, 如植株高度等(表2); 采用未退化样地各指标平均值作为退化指数计算的参考值(表3)。

根据上述公式使用不同退化程度的样地实测数据计算DI, 并依据DI的取值范围对草原退化程度进行等级划分。

上述草甸草原退化相关指标筛选与快速诊断指标体系构建的具体流程参见图1。

1.8 数据分析

统计分析前对数据分布的正态性和齐性进行检验, 对不满足正态性的数据进行对数转换。使用R软件“vegan”包计算植物多样性指标, 使用“nlme”包中的线性混合效应模型检验不同退化程度样地间植被和土壤相关指标的差异显著性, 将群落类型与样地作为随机因子, 并采用Tukey HSD检验进行样地间多重比较。使用“mlr3verse”包构建随机森林模型, 并使用“caret”程序包实现对指标数量的筛选。上述统计检验的显著水平均设为$p < 0.05$, 数据分析和图形绘制均使用R 4.1.1软件。

2 结果

2.1 不同退化程度草甸草原植被和土壤指标的变化

植被生产力与多样性指标: 随着退化程度的增加, 草甸草原地上生物量、凋落物生物量、植被碳含量、优质牧草比例、群落高度、植被盖度呈显著降低趋势; 植被氮含量、植被磷含量呈上升趋势; 而地下生物量、物种丰富度、香农-维纳多样性指数、β多样性呈单峰变化趋势(图2A–2L)。

植物功能性状指标: 如图2M–2U所示, 随着退化程度增加, 群落水平的叶干物质含量、植株高度、叶片厚度、叶片碳含量显著下降; 而群落水平的比叶面积、叶茎比、叶片氮含量、叶片磷含量随着退化程度的增加逐渐增大; 群落水平的叶绿素含量在未退化样地中最低, 在其他样地间无显著差异(图2M–2U)。

土壤理化性质指标: 各土壤指标在不同退化阶段呈现出不一致的变化趋势(图2V–2AD), 随着退化程度的增加, 土壤全氮含量、土壤有机碳含量呈单峰变化趋势; 土壤的速效磷含量、土壤无机氮含量、土壤pH随着退化程度的增加呈先降低后增加的趋势; 土壤全磷含量、土壤密度呈现上升的趋势; 而田间持水量和土壤含水量随着退化程度的增加呈逐渐下降的趋势。

2.2 植被和土壤退化指标的筛选

本研究采用随机森林的方法对植被结构与多样

表3 呼伦贝尔草甸草原退化指示指标参考值、重要性权重及其所对应的指标类别、服务功能与利益群体权重

Table 3 Reference values, importance weights, and corresponding categories, services, and stakeholder weights for indicators of degradation in the Hulun Buir meadow steppe

类型 Type	生态系统服务 Ecosystem service	利益群体权重 Interest group weight	指标分类 Indicator category	指标名称 Indicator name	重要性权重 Importance weight	参考值 (平均值±标准差) Reference value (mean ± *SD*)
调节 Regulating	侵蚀控制 Erosion control	0.20	植被群落结构 Vegetation community structure	群落高度 CH (cm)	0.8	50.84 ± 15.26
				凋落物生物量 Litter ($g \cdot m^{-2}$)	0.7	188.00 ± 116.27
	水分养分调节 Water and nutrient regulation	0.10	土壤特征 Soil characteristics	土壤密度 SD ($g \cdot cm^{-3}$)	–0.1	1.00 ± 0.11
				土壤含水量 SWC (%)	0.1	28.62 ± 10.26
				土壤无机氮含量 SIN ($mg \cdot kg^{-1}$)	0.1	4.99 ± 2.35
供给 Provisioning	牧草供应 Forage supply	0.40	牧草生产 Forage production	地上生物量 AGB ($g \cdot m^{-2}$)	0.7	336.05 ± 82.34
				优质牧草比例 HR (%)	0.1	44.25 ± 21.60
支持 Supporting	多样性保护 Diversity protection	0.15	生物多样性 Biodiversity	物种丰富度 SR	0.2	23.00 ± 7.77
	植被抗逆 Vegetation resilience	0.15	植物功能性状 Plant functional traits	叶片厚度 LT (mm)	0.4	0.26 ± 0.06
				叶干物质含量 LDMC (%)	0.1	37.91 ± 2.87

AGB, aboveground biomass; CH, community height; HR, high quality forage ratio; LDMC, leaf dry matter content; Litter, litter biomass; LT, leaf thickness; SD, soil density; SIN, soil inorganic nitrogen content; SR, species richness; SWC, soil water content.

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

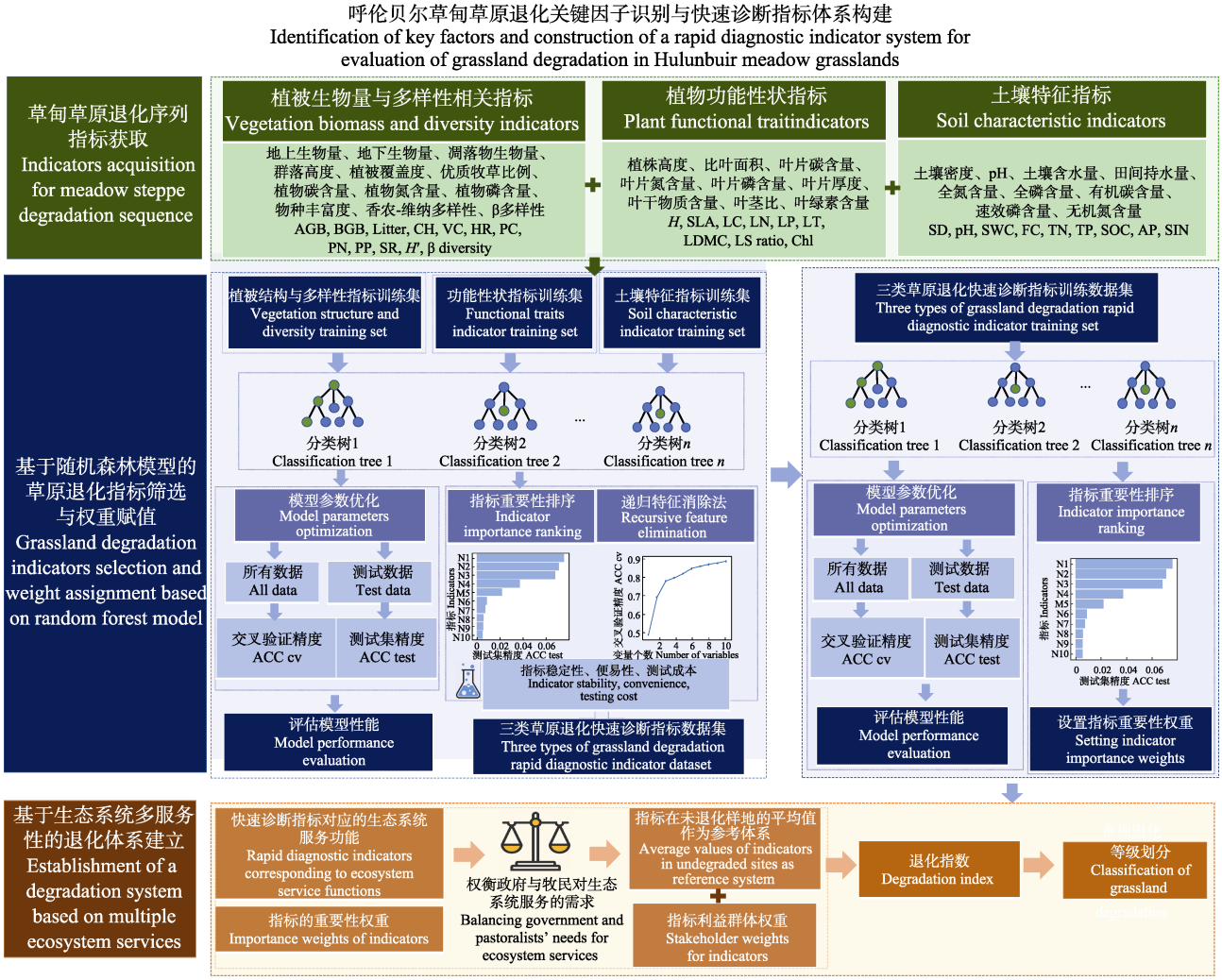


图1 草甸草原退化指标识别与快速诊断指标体系构建流程图。

Fig. 1 Process diagram for identifying degradation indicators and constructing a rapid diagnostic indicator system for meadow steppe degradation. ACC cv, cross-validation accuracy; ACC test, test set accuracy; AGB, aboveground biomass; AP, soil available phosphorus content; BGB, belowground biomass; CH, community height; Chl, chlorophyll content; FC, field water holding capacity; *H*, height; *H'*, Shannon-Wiener diversity index; HR, high quality forage ratio; LC, leaf carbon content; LDMC, leaf dry matter content; Litter, litter biomass; LN, leaf nitrogen content; LP, leaf phosphorus content; LS ratio, leaf to stem ratio; LT, leaf thickness; PC, plant community carbon content; PN, plant community nitrogen content; PP, plant community phosphorus content; SD, soil density; SIN, soil inorganic nitrogen content; SR, species richness; SOC, soil organic carbon content; SWC, soil water content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; VC, vegetation cover.

性指标、植物功能性状、土壤相关指标分别构建模型，筛选出呼伦贝尔草甸草原退化的关键指标。使用12个植被结构与多样性指标所构建的随机森林模型在测试集上的分类精度和交叉验证的精度分别为0.83和0.74 (图3A)，9个功能性状指标所构建的随机森林模型分类精度和交叉验证精度分别为0.83和0.76 (图3C)，9个土壤指标建模的分类精度和交叉验证精度分别为0.67和0.49 (图3E)。

在植被结构与多样性指标中，地上生物量与群落高度是重要性得分最高的两个变量，β多样性和地下生物量的重要性得分较低(图3A)。递归特征消除法的结果表明，模型精度随着变量个数的增加迅速增长，当变量个数增加到5个时，模型精度增长速度变缓(图3B)。根据变量的重要性排序结果，结合指标随着退化程度增加的变化规律，保留了在退化过程中变化方向一致性较好、测定时间较短和成本较低、可兼顾服务功能多样性的地上生物量、群落高度、凋落物生物量、物种丰富度、优质牧草比例。使用以上5个变量，模型的分类精度和交叉验证精度分别为0.78和0.72，与使用12个变量相比，模型精度下降0.05，分类精度与交叉验证精度差距减小到0.06，模型的过拟合现象已经大幅度减少(附录II)。

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

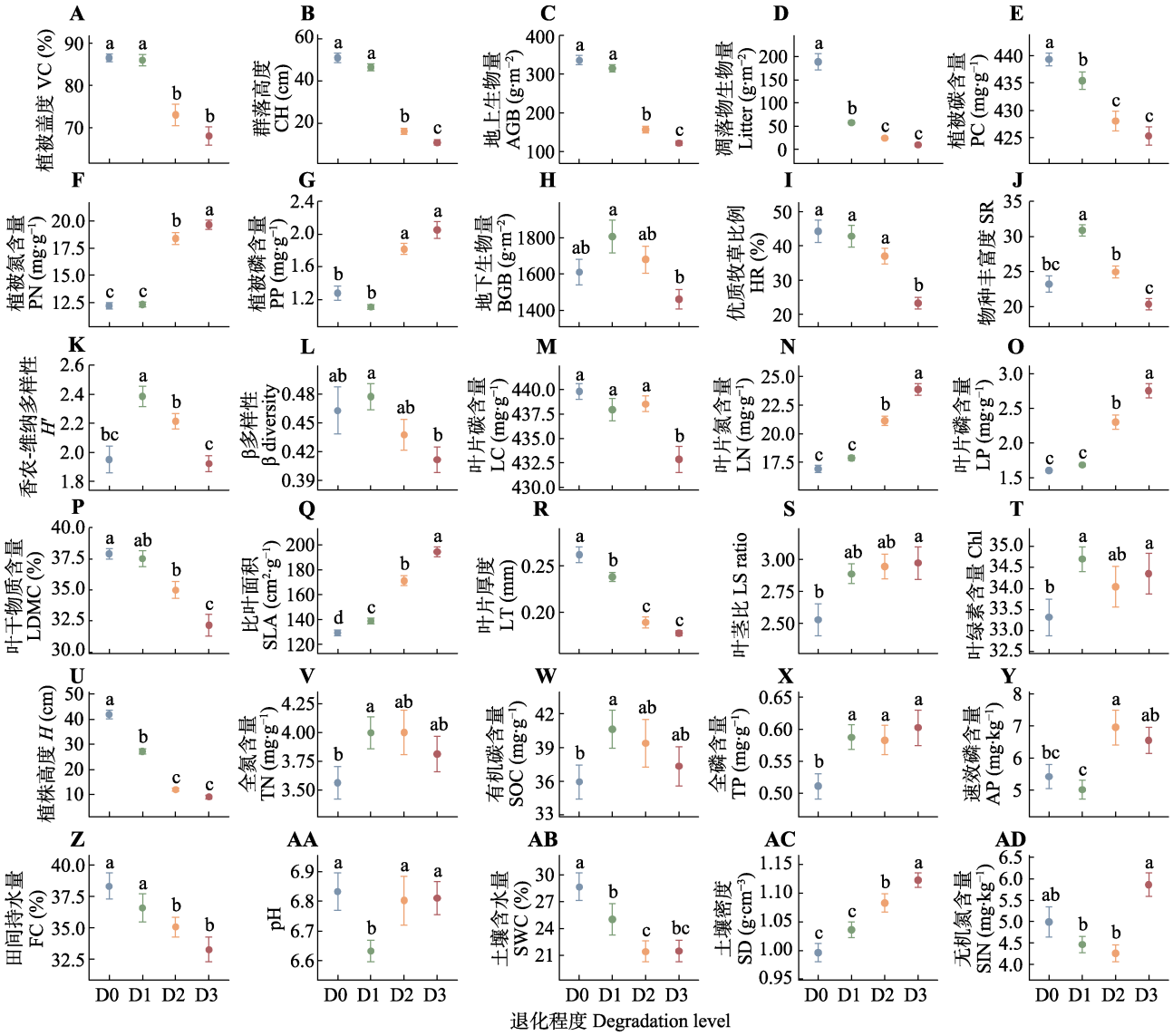


图2 草甸草原不同退化程度下植被与土壤指标的变化(平均值±标准误)。D0, 未退化; D1, 轻度退化; D2, 中度退化; D3, 重度退化。**A–L**代表植被群落结构与多样性指标; **M–U**代表植物功能性状指标; **V–AD**代表土壤特征指标。不同小写字母表示不同退化程度间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 2 Changes in vegetation and soil indicators across various degradation levels of meadow steppe (mean ± *SE*). D0, no degradation; D1, slight degradation; D2, moderate degradation; D3, severe degradation. **A–L** represent indicators of vegetation community structure and diversity; **M–U** denote plant functional trait indicators; **V–AD** indicate soil characteristic indicators. Different lowercase letters indicate significant differences among different degrees of degradation ($p < 0.05$). AGB, aboveground biomass; AP, soil available phosphorus content; BGB, belowground biomass; CH, community height; Chl, chlorophyll content; FC, field water holding capacity; *H*, plant height; *H*′, Shannon-Wiener diversity; HR, high quality forage ratio; LC, leaf carbon content; LDMC, leaf dry matter content; Litter, litter biomass; LN, leaf nitrogen content; LP, leaf phosphorus content; LS ratio, leaf to stem ratio; LT, leaf thickness; PC, plant community carbon content; PN, plant community nitrogen content; PP, plant community phosphorus content; SD, soil density; SIN, soil inorganic nitrogen content; SOC, soil organic carbon content; SR, species richness; SWC, soil water content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; VC, vegetation cover.

在功能性状指标中, 植株高度的重要性最高, 叶片碳含量是重要性最低的变量(图3C)。递归特征消除法的结果表明, 当变量个数从1增加到3的过程精度增长速度较为快速, 且模型精度已经达到0.70以上。根据变量的重要性排序和指标的筛选原则, 保留了植株高度、叶片厚度、叶干物质含量共3个指标。使用以上指标, 模型的分类精度为0.72, 交叉验证精度为0.70, 与使用9个指标相比, 模型精度下降0.11, 分类精度与交叉验证精度差距减小到0.02, 模型几乎不存在过拟合现象(附录II)。

对退化最敏感的土壤指标是土壤密度(图3E), 递归特征消除法的结果表明, 模型变量的个数在达

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

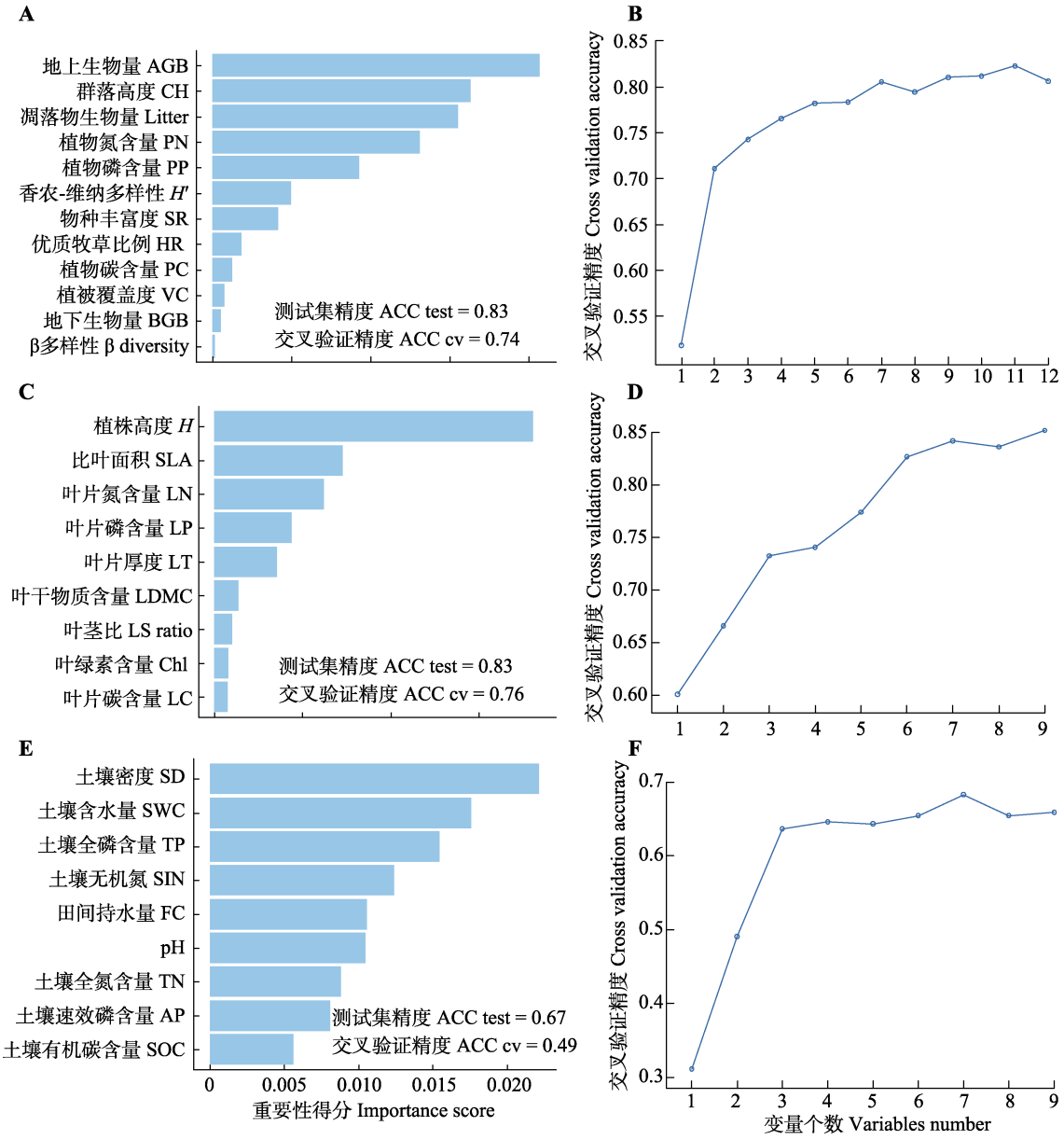


图3 随机森林方法筛选退化指标。**A、C、E,** 植被结构与多样性指标、植物功能性状指标、土壤指标的重要性排序。**B、D、F**, 递归式特征消除法筛选植被结构与多样性、植物功能性状、土壤指标的个数。

Fig. 3 Random forest method for screening degradation indicators**, A, C, E,** Importance ranking of vegetation structure and diversity indicators, plant functional traits**,** and soil indicators. **B, D, F,** Recursive feature elimination for selecting numbers of vegetation structure and diversity, plant functional traits, and soil indicators; red dots indicate optimal number of indicator. ACC cv, cross-validation accuracy; ACC test, test set accuracy. AGB, aboveground biomass; AP, soil available phosphorus content; BGB, belowground biomass; CH, community height; Chl, chlorophyll content; FC, field water holding capacity; *H*, plant height; *H*′, Shannon-Wiener diversity; HR, high quality forage ratio; LC, leaf carbon content; LDMC, leaf dry matter content; LN, leaf nitrogen content; LP, leaf phosphorus content; LS ratio, leaf to stem ratio; LT, leaf thickness; Litter, litter biomass; PC, plant community carbon content; PN, plant community nitrogen content; PP, plant community phosphorus content; SD, soil density; SIN, soil inorganic nitrogen content; SOC, soil organic carbon content; SR, species richness; SWC, soil water content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; VC, vegetation cover.

到3个时模型精度已经趋于平稳(图3F), 因此保留了土壤密度、土壤含水量和土壤无机氮含量。使用以上3个指标, 模型分类精度为0.61, 交叉验证精度为0.45, 与使用9个变量相比, 模型精度下降0.06, 分类精度与交叉验证精度差距减小到0.16, 减小了模型的过拟合现象(附录II)。

2.3 草甸草原退化快速诊断指标的优化与权重赋值

将上面筛选出的11个植被、功能性状与土壤指标作为退化敏感指标, 考虑到功能性状指标中的植株高度和植被结构指标中的群落高度之间的自相关

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

性, 选择了野外获取更加简单的群落高度作为最终入选指标。最终采用10个退化敏感指标构建随机森林模型(图4A), 分类精度为0.83, 交叉验证精度为0.76, 表明模型的预测性和泛化能力均较好。模型中最重要的3个指标分别是群落高度、地上生物量和凋落物生物量, 随着进入指标的增加, 模型预测的精度不断提高, 在全部10个变量均纳入时, 模型达到了最高的精度(图4B)。

2.4 兼顾生态系统多服务功能的草甸草原退化程度评估

如表3所示, 不同类型指标分别对应着生态系统不同的服务功能, 包括侵蚀控制、牧草生产、植被抗逆、多样性保护、水分养分调节等。在量化草原多服务功能退化程度时, 需要明晰各项功能所占权重。本研究依据随机森林模型中各指标的重要性得分, 作为各指标在生态系统功能计算时的权重赋值(表3)。

考虑到不同对象群体(如政府和牧民)对草原生态系统各服务功能需求的差异, 进一步根据每个对象群体对各服务功能的需求进行权重赋值(表4), 其中土壤密度的方向与生态系统服务功能的方向相反, 所以对该指标的方向设为负, 其他指标均是正向。采用政府和牧民群体对草原多服务功能需求的权重均值来计算DI, 计算公式如下:

$$\begin{aligned} DI = 1 - & \left(\frac{CH \times 0.8}{50.84} + \frac{Litter \times 0.7}{188.00}\right) \times 0.2 \\ & + \left(\frac{SWC \times 0.1}{28.62} + \frac{SIN \times 0.1}{4.99} - \frac{SD \times 0.1}{1.00}\right) \times 0.1 \\ & + \left(\frac{AGB \times 0.7}{336.05} + \frac{HR \times 0.1}{44.25}\right) \times 0.4 + \left(\frac{SR \times 0.2}{23.00}\right) \\ & \times 0.1 + \left(\frac{LT \times 0.4}{0.26} + \frac{LDMC \times 0.1}{37.91}\right) \times 0.15 \end{aligned} \quad (5)$$

将本研究样地的调查数据代入以上公式计算各样地DI, 未退化、轻度、中度和重度退化样地的DI平均值分别为0.26、0.39、0.67、0.75 (图5)。根据DI在各退化阶段的平均值, 本研究将草原退化划分了4个等级: DI ≤ 0.35, 未退化; 0.35 < DI ≤ 0.55, 轻度退化; 0.55 < DI ≤ 0.75, 中度退化; DI > 0.75, 重度退化(表5)。

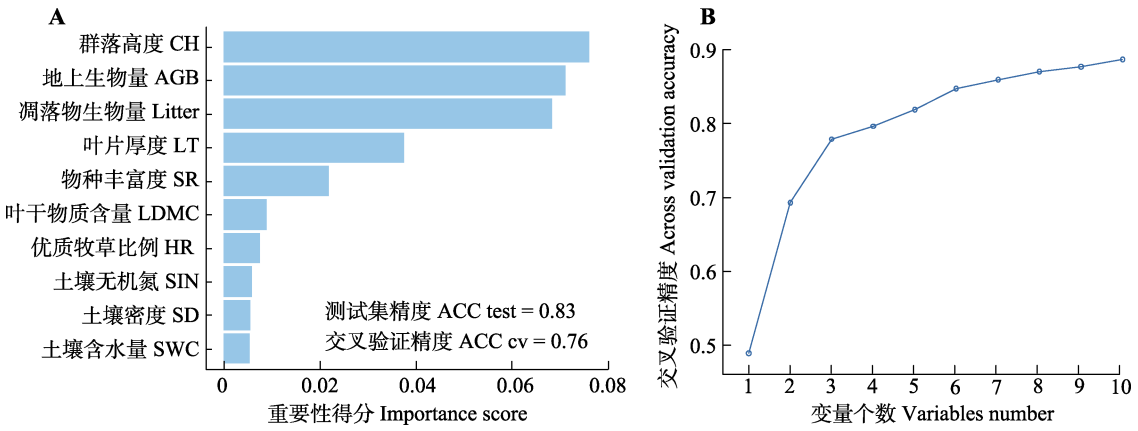


图4 草甸草原退化诊断指标的筛选。**A,** 随机森林方法对退化指标的重要性排序。**B,** 递归式特征消除法筛选指标的个数。
Fig. 4 Selection of diagnostic indicators for meadow steppe degradation. **A,** Importance ranking of degradation indicators by random forest method. **B,** Number of indicators selected by recursive feature elimination. ACC cv, cross-validation accuracy; ACC test, test set accuracy. AGB, aboveground biomass; CH, community height; HR, high quality forage ratio; LDMC, leaf dry matter content; LT, leaf thickness; Litter, litter biomass; SD, soil density; SIN, soil inorganic nitrogen content; SR, species richness; SWC, soil water content.

表4 不同利益群体(政府与牧民)对草原生态系统服务功能的需求差异与权重赋值
Table 4 Differences in demand and weight assignment for grassland ecosystem services between stakeholder groups (government and herders)

功能类型 Function type	生态系统服务 Ecosystem service	政府 Government	牧民 Herdsman	平均 Average
调节 Regulating	侵蚀控制 Erosion control	0.35	0.05	0.20
	水分养分调节 Water and nutrient regulation	0.15	0.05	0.10
供给 Provisioning	牧草供应 Forage supply	0.20	0.60	0.40
支持 Supporting	多样性保护 Diversity protection	0.20	0.10	0.15
	植被抗逆 Vegetation resilience	0.10	0.20	0.15

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

表5 草甸草原退化评估指标等级划分
Table 5 Grading of degradation assessment indicators in meadow grasslands

草甸草原退化等级 Degradation levels of meadow steppe	未退化 No degradation	轻度退化 Light degradation	中度退化 Moderate degradation	重度退化 Heavy degradation
指数范围 Index range	DI ≤ 0.35	0.35 < DI ≤ 0.55	0.55 < DI ≤ 0.75	DI > 0.75

DI, 退化指数。
DI, degradation index.

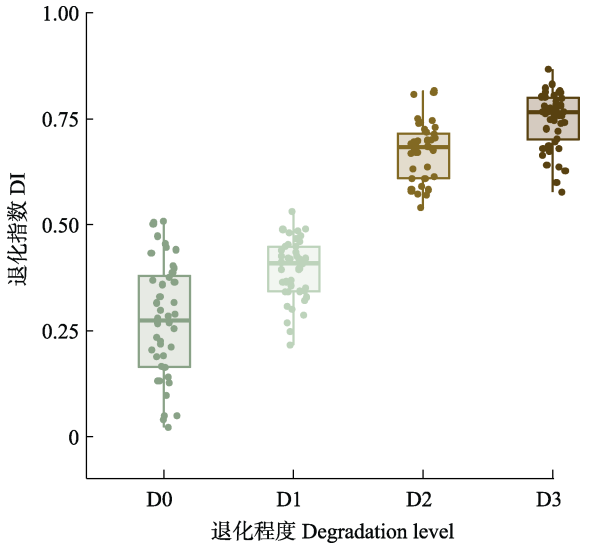


图5 研究区域中不同退化等级样地的退化指数(DI)。D0, 未退化; D1, 轻度退化; D2, 中度退化; D3, 重度退化。
Fig. 5 Degradation index (DI) of sample plots at different degradation levels in the study area. D0, no degradation; D1, slight degradation; D2, moderate degradation; D3, severe degradation.

3 讨论

3.1 不同退化程度植被和土壤指标的变化

随着退化程度的增加, 植被指标中的群落高度、植被盖度、地上生物量、凋落物生物量、优质牧草比例均呈现显著下降趋势, 与已有研究结果(张璐璐等, 2018; Jiang et al., 2020)一致。地下生物量在退化过程中表现为单峰变化趋势, 适度的干扰通过补偿机制促进根系生长, 促使植物将更多资源分配至根系(Milchunas & Lauenroth, 1993; Zheng et al., 2023)。中度、重度退化样地土壤具有较高的氮磷养分含量, 这也与已有的研究结果(王向涛等, 2010; Zhang et al., 2023)一致, 一方面, 植株被牲畜不断地采食, 植物为了快速完成生活史从而提高了自身的氮含量(侯路路等, 2020); 另一方面, 随着退化程度的增加, 群落中一二年生植物等快速生长型的物种占据主导地位, 这类植物往往含有较高的氮磷含量(孟婷婷等, 2007; Quétier et al., 2007)。随着退化程度的增加, 植物α多样性、β多样性均呈现单峰趋势(图2J–2L), 草原适度的干扰可以显著提高植物多样性(Gao & Carmel, 2020)。

植物功能性状指标中, 群落水平的植株高度、叶片厚度、叶片碳含量、叶干物质含量随着退化程度的增加显著降低, 叶茎比、叶片氮含量、叶片磷含量、比叶面积、叶绿素含量显著增加(图2M–2U)。这与已有的研究结果一致, 在退化过程中具有快速生长的资源利用策略的物种会渐渐占主导(Wright et al., 2004; 任海彦等, 2009; Bai et al., 2012), 退化过程中植物体型变小, 一些一年生、矮小和匍匐植物更易生存(Díaz et al., 2001)。Niu等(2016)在高寒草甸的放牧对比实验中发现, 草原退化后群落水平的叶干物质含量显著降低, 植物叶片氮磷浓度、比叶面积增加。

对于土壤指标, 中度和重度退化显著降低了土壤含水量、田间持水量, 增加了土壤密度, 轻度退化对其影响较小, 这与已有研究结果(Zhou et al., 2017a; Zhang et al., 2018; 杜志勇和丛楠, 2024)一致。土壤有机碳含量、土壤全氮含量随着退化程度的增加呈现单峰变化的趋势, 且在退化样地中均具有较高的土壤有机碳含量、土壤全氮含量、土壤全磷含量, 闫瑞瑞等(2014)、王淼(2022)、陈思思等(2023)在内蒙古草甸草原发现, 轻度、中度、重度的退化草原仍具有较高的土壤有机碳、全氮含量。轻度退化草原有较高的地下生物量, 土壤中根系分泌物的增加可能会增强表层土壤碳的累积和氮的可利用性(Zhou et al., 2017a), 在中重度退化草原中, 牲畜粪尿返还会使土壤中的氮磷含量增加, 牲畜的践踏作用也会加速凋落物中的碳归还土壤(杜子银等, 2019)。

3.2 草甸草原退化指标筛选与权重赋值

本研究基于随机森林模型, 在考虑指标对退化程度解释重要性的前提下, 兼顾指标测定的简便与快捷性。筛选出了群落高度、凋落物生物量、地上生物量、优质牧草比例、物种丰富度、叶干物质含量、叶片厚度、土壤密度、土壤含水量、土壤无机

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

氮含量10个指标作为草甸草原退化评估的关键诊断指标。本研究的结果表明, 群落高度和凋落物生物量等植被指标在草地退化状态评估中具有重要作用(图3A), 这与现行的国家和内蒙古地方标准中常用的退化指标(内蒙古自治区畜牧厅, 1999; 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003)是一致的。虽然植被盖度也常被用作草原退化指示指标, 但在降水相对丰沛的草甸草原, 该指标对退化的敏感性并不高。随着退化程度加剧, 特别是在重度退化草甸草原, 一二年生植物的大量增加导致植被覆盖度并没有发生显著的下降。这表明相对植被盖度而言, 物种组成特别是优质牧草比例的下降能更准确地指示草原退化程度(Liu et al., 2015; Miao et al., 2021)。因此在对草原生产功能的评价中, 本研究既选取了地上生物量指标从“量”的角度评价牧草供应能力, 又选取了优质牧草比例实现了对牧草供应能力“质”的评估。虽然植物的氮磷含量常被用作评价牧草品质的重要指标(石岳等, 2013), 但本研究发现在退化过程中植被的氮磷含量增加与一二年生植物的比例显著提高有关。这表明在草甸草原群落水平养分含量的提高并不一定可以准确地指示牧草的品质, 因此采用优质牧草比例这一指标可以更好地指示牧草品质。在指标的重要性排序结果中, 物种丰富度和香农-维纳指数的排序接近, 因此本研究选择了测量与计算都更为简单的物种丰富度作为多样性评估指标。最终, 在12个植被结构与多样性指标中筛选出了4个指标, 优化指标后的模型精度仅降低0.05, 优化后的指标对指征草原退化仍具有很好的代表性; 在功能性状指标的重要性排序中(图3C), 虽然比叶面积对退化的敏感性较高, 但是有研究表明该指标会在重度退化下减小(王晓芳等, 2022), 比叶面积在退化过程中方向并不明确, 因此并没有选择该指标。优化后的功能性状指标精度仍大于0.7, 在植物功能性状指标中具有较好的代表性; 在土壤指标的筛选中, 选择了土壤密度、土壤含水量和土壤无机氮含量, 土壤密度和土壤含水量反映了土壤对水分的调节能力(Håkansson & Lipiec, 2000), 也是评估草原退化的常用指标(闫瑞瑞等, 2021; 潘庆民等, 2023)。虽然有些研究使用了土壤有机碳含量、土壤全氮含量等养分指标指征草原退化(宿婷婷等, 2019; 董世魁等, 2023), 但在本研究中发现土壤有机碳含量和土壤全氮含量对退化并不敏感, 且指标随着退化程度变化的方向呈现单峰变化趋势。土壤无机氮含量与土壤全磷含量重要性排序接近, 土壤无机氮含量作为一个敏感指标, 不仅能够反映土壤肥力的变化, 还可以与土壤含水量同时获取, 评估效率得到了提高。土壤含水量、土壤无机氮含量指标测定的取样工作需避开降雨事件的干扰, 在不同样地取样时尽可能缩短取样时间间隔, 增加指标可比性。

不同的指标在表征草原退化程度的能力上存在差异, 因此量化各指标的权重, 在退化评估体系构建中是非常重要的。在以往研究中, 对草原退化指标的权重大多使用专家打分法。如董世魁等(2023)对温性草原的健康评价中, 将植被覆盖度指标的权重设置为最高, 地上生物量指标的权重次之, 优势植物生物量权重最低。黄麟等(2024)在草原退化评价体系中, 将地上生物量、原生优势物种生物量占比赋最高权重, 植被覆盖度指标次之, 因此指标间的权重赋值存在不确定性。但专家打分法主观性较强, 在不同研究中指标权重赋值难以统一, 并缺乏可比性(薛存芳和张玮, 2009)。本研究采用随机森林模型中各指标重要值作为权重量化依据, 对筛选出的每个指标进行权重赋值, 尽可能减少了评估过程中的人为赋权的不确定性。在随机森林模型的指标的重要性排序中, 与植物相关的指标重要性得分均高于土壤指标(图4A), 表明植被因子在反映草原退化程度时的敏感性更高(李凤霞和张德罡, 2005; 闫玉春和唐海萍, 2008; Xiong et al., 2016)。这也与现行国家标准中将植被指标作为主要评估参考指标, 而将土壤指标作为辅助监测指标(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003)基本一致。

草地退化威胁到生态系统服务的持续提供(Smith et al., 2016), 对当地牧民的生计构成挑战, 因此 Bardgett等(2021)建议应从社会生态学的角度对草原退化进行定义, 当多种生态系统服务的供应低于草原利益相关者的需求时, 则认为草地已经退化。草原的不同利益相关群体对生态系统服务功能的需求不同: 牧草的产量与牧民的生计问题息息相关, 因此牧民对草原的生产功能需求最高, 更在意草原退化过程中牧草产量和质量的退化。政府对草原的生态服务功能需求相对更高, 首先关注的是草原生态系统水源涵养、气候调节等服务功能, 其次, 政府也要考虑到牧民的生计和社会经济的稳定, 对

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

牧草生产功能也非常重视。Stosch等(2019)认为, 考虑不同利益相关群体对生态系统服务的认知和偏好, 对实现不同群体间利益最大化至关重要。利益群体的权重可通过问卷调查或情景模拟结果进行设置(Allan et al., 2015; Manning et al., 2018)。本研究通过借鉴已有研究对不同利益群体的权重设置(附录I), 尝试将不同利益群体对草原生态系统多服务的需求反映到了草甸草原退化指数的量化中, 以期更全面地反映草原服务功能的变化。

3.3 草甸草原退化快速诊断指标体系的建立与草原退化分级

在生态系统退化程度量化评估过程中, 明确参照标准值是极其重要的(杜晓军等, 2003)。现行草原退化评估国家标准建议使用附近未退化草地监测点、保护区或20世纪80年代调查数据作为参照标准。本研究采用围封样地的均值作为基准, 提供了内蒙古草甸草原植被结构与多样性、功能性状、土壤指标的参照值(表3), 也为该区域退化草甸草原恢复提供参考。退化等级划分为草地退化提供了清晰的定量描述, 但因为不同研究所使用的指标、研究区域的不一致性, 对于界限的划分很难得到统一(李博, 1997; 闫玉春和唐海萍, 2008)。建立草原退化的分级标准通常有两个方法(闫玉春等, 2007), 一是根据专家的经验进行划分, 在以往的研究中大多使用这个方法, 李博(1997)将中国北方草地的退化分为了轻度、中度、重度、极度退化, 刘钟龄等(1998)对内蒙古草甸草原、典型草原、荒漠草原的退化分成了未退化、轻度、中度、重度退化。另一个是通过数学方法进行定量划分, 薛存芳和张玮(2009)通过计算草地植被退化指数(GDI), 根据GDI的取值范围, 在0.8、0.35、0.1三个区间将草原退化分为未退化、轻度退化、中度退化、重度退化。本研究也是使用数学的方法, 参考不同退化程度下DI的均值, 对退化草原进行分级(表5)。

4 结论

本研究基于呼伦贝尔草甸草原9条退化序列35个样地30个植被和土壤指标的野外调查数据集, 采用随机森林方法对草原退化关键指示指标进行筛选与权重赋值, 在权衡政府和牧民对草原生态系统多服务功能差异化需求的基础上, 建立了由地上生物量、优质牧草比例、群落高度、凋落物生物量、物种丰富度、叶干物质含量、叶片厚度、土壤密度、土壤含水量、土壤无机氮含量共10个退化特征因子构成的草甸草原退化快速诊断指标体系, 并提出了草甸草原退化指数DI, DI ≤ 0.35, 未退化; 0.35 < DI ≤ 0.55, 轻度退化; 0.55 < DI ≤ 0.75, 中度退化; DI > 0.75, 重度退化。本研究进一步证实了植被指标(特别是植被高度和凋落物量)在草甸草原退化程度评估中的重要作用, 为现行国家和地方评价标准中指标选取的合理性提供了数据支持。同时, 在目前草原生产和生态功能并重的研究背景下, 本研究也强调了植物功能性状、土壤养分和水分等指标在草原退化程度特别是多服务功能供给能力评估中的重要性。在未来草原退化相关国家和地方标准修订中, 应该给予考量, 构建一个更全面客观的草原退化评估指标体系。

参考文献

Allan E, Manning P, Alt F, Binkenstein J, Blaser S, Blüthgen N, Böhm S, Grassein F, Hölzel N, Klaus VH, Kleine-becker T, Morris EK, Oelmann Y, Prati D, Renner SC, et al. (2015). Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition. *Ecology Letters*, 18, 834-843.

Bai Y, Wu J, Clark C, Pan Q, Zhang L, Chen S, Wang Q, Han X (2012). Grazing alters ecosystem functioning and C:N:P stoichiometry of grasslands along a regional precipitation gradient. *Journal of Applied Ecology*, 49, 1204-1215.

Bardgett RD, Bullock JM, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry EL, Johnson D, Lavallee JM , Le Provost G, Luo S, Png K, Sankaran M, et al. (2021). Combatting global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2, 720-735.

Bengtsson J, Bullock JM, Egoh B, Everson C, Everson T, O'Connor T, O'Farrell PJ, Smith HG, Lindborg R (2019). Grasslands—More important for ecosystem services than you might think. *Ecosphere*, 10, e02582. DOI: 10.1002/ecs2.2582.

Bezzano M (2018). UK natural capital: developing semi-natural grassland ecosystem accounts. [2024-05-06]. https://www.ons.gov.uk/economy/environmentalaccounts/methodologies/uknaturalcapitaldevelopingseminaturalgrasslandecosystemaccounts.

Breiman L (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5-32.

Chao A, Chiu CH, Jost L (2014). Unifying species diversity, phylogenetic diversity, functional diversity, and related similarity and differentiation measures through hill numbers. *Annual Review of Ecology, Evolution and*

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Systematics, 45, 297-324.

Chen SS, Wang M, Zhang C, Xin XP, Zhu XY, Guo LF, Yan RR (2023). Effects of different grazing intensities on soil active organic carbon in *Leymus chinensis* meadow steppe in Hulunbuir. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, (11), 16-24. [陈思思, 王淼, 张楚, 辛晓平, 朱晓昱, 郭雷风, 闫瑞瑞 (2023). 不同放牧强度对呼伦贝尔羊草草甸草原土壤活性有机碳的影响. 中国土壤与肥料, (11), 16-24.]

Chen Y, Wang W, Guan Y, Liu FZ, Zhang YB, Du JH, Feng CT, Zhou Y (2020). An integrated approach for risk assessment of rangeland degradation: a case study in Burqin County, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, 113, 106203. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.106203.

Cornelissen JHC, Lavorel S, Garnier E, Díaz S, Buchmann N, Gurvich DE, Reich PB, ter Steege H, Morgan HD, van der Heijden MGA, Pausas JG, Poorter H (2003). A handbook of protocols for standardised and easy measurement of plant functional traits worldwide. *Australian Journal of Botany*, 51, 335-380.

Díaz S, Noy-Meir I, Cabido M (2001). Can grazing response of herbaceous plants be predicted from simple vegetative traits? *Journal of Applied Ecology*, 38, 497-508.

Díaz S, Settele J, Brondízio ES, Ngo HT, Agard J, Arneth A, Balvanera P, Brauman KA, Butchart SHM, Chan KMA, Garibaldi LA, Ichii K, Liu J, Subramanian SM, Midgley GF, et al. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366, eaax3100. DOI: 10.1126/science.aax3100.

Dong SK, Zhang YH, Wang GC (2023). Assessment of grassland health and degradation: concepts, principles, and methods. *Pratacultural Science*, 40, 2971-2981. [董世魁, 张宇豪, 王冠聪 (2023). 草地健康与退化评价: 概念、原理及方法. 草业科学, 40, 2971-2981.]

Du XJ, Gao XM, Ma KP (2003). Diagnosis of the degree of degradation of an ecosystem: the basis and precondition of ecological restoration. *Acta Phytoecologica Sinica*, 27, 700-708. [杜晓军, 高贤明, 马克平 (2003). 生态系统退化程度诊断: 生态恢复的基础与前提. 植物生态学报, 27, 700-708.]

Du ZY, Cai YJ, Wang XD, Zhang B (2019). Research progress on yak grazing behavior and its influence on the soil properties of alpine grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 28(7), 186-197. [杜子银, 蔡延江, 王小丹, 张斌 (2019). 放牧牦牛行为及其对高寒草地土壤特性的影响研究进展. 草业学报, 28(7), 186-197.]

Du ZY, Cong N (2024). Responses of vegetation and soil characteristics to degraded grassland under different degrees on the Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 44, 2504-2516. [杜志勇, 丛楠 (2024). 植被与土壤特征对青藏高原不同程度退化草地的响应. 生态学报, 44, 2504-2516.]

Eldridge DJ, Ding J, Dorrough J, Delgado-Baquerizo M, Sala O, Gross N, Le Bagousse-Pinguet Y, Mallen-Cooper M, Saiz H, Asensio S, Ochoa V, Gozalo B, Guirado E, García-Gómez M, Valencia E, et al. (2024). Hotspots of biogeochemical activity linked to aridity and plant traits across global drylands. *Nature Plants*, 10, 760-770.

Gao J, Carmel Y (2020). A global meta-analysis of grazing effects on plant richness. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107072. DOI: 10.1016/j.agee.2020.107072.

Garnier E, Cortez J, Billès G, Navas ML, Roumet C, Debussche M, Laurent G, Blanchard A, Aubry D, Bellmann A, Neill C, Toussaint JP (2004). Plant functional markers capture ecosystem properties during secondary succession. *Ecology*, 85, 2630-2637.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (2003). Grading indicators for natural grassland degradation, desertification, and salinization (GB 19377-2003). [2024-05-06]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D77C23D3A7E05397BE0A0AB82A [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 (2003). 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标(GB 19377-2003). [2024-05-06]. https://std.samr.gov.cn/gb/search/gbDetailed?id=71F772D77C23D3A7E05397BE0A0AB82A.]

Gislason PO, Benediktsson JA, Sveinsson JR (2006). Random Forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, 27, 294-300.

Gretton P, Salma U (1996). Land degradation and the Australian agricultural industry. [2024-05-06]. https://www.pc.gov.au/research/supporting/land-degradation.

Guyon I, Weston J, Barnhill S, Vapnik V (2002). Gene selection for cancer classification using support vector machines. *Machine Learning*, 46, 389-422.

Håkansson I, Lipiec J (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53, 71-85.

Havstad KM, Peters DPC, Skaggs R, Brown J, Bestelmeyer B, Fredrickson E, Herrick J, Wright J (2007). Ecological services to and from rangelands of the United States. *Ecological Economics*, 64, 261-268.

Hou LL, Yan RR, Zhang Y, Xin XP (2020). Effects of grazing intensity on the functional traits of *Leymus chinensis* in meadow steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 53, 2562-2572. [侯路路, 闫瑞瑞, 张宇, 辛晓平 (2020). 放牧强度对草甸草原羊草功能性状的影响. 中国农业科学, 53, 2562-2572.]

Huang L, Fan JW, Yang Z, Wang GC, Li YZ, Zhang HY, Zhang YX, Shi JH, Wang SZ (2024). All-in-one assessment of grassland health, degradation, and restoration: the concepts and methods. *Chinese Science Bulletin*, 15, 2015-2024. [黄麟, 樊江文, 杨智, 王冠聪, 李愈哲, 张

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

海燕, 张雅娴, 石俊华, 王穗子 (2024). 草原健康、退化与恢复一体化评估: 概念与方法. 科学通报, 15, 2015-2024.]

Inner Mongolia Autonomous Region Market Supervision and Management Bureau (2021). Degradation grading indicators for grasslands (DB15/T 2384-2021). [2024-05-06]. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=CE22979AC9AE3A22E05397BE0A0A76AB. [内蒙古自治区市场监督管理局 (2021). 草原退化分级指标 (DB15/T 2384-2021). [2024-05-06]. https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=CE22979AC9AE3A22E05397BE0A0A76AB.]

Inner Mongolia Livestock Department (1999). Inner Mongolia local standards for natural grassland degradation. *Inner Mongolia Grass Industry*, 11, 62-63. [内蒙古自治区畜牧厅 (1999). 内蒙古自治区地方标准: 内蒙古天然草地退化标准. 内蒙古草业, 11, 62-63.]

Jiang XL, Zhang WG (2010). Functional diversity and its research method. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 2766-2773. [江小雷, 张卫国 (2010). 功能多样性及其研究方法. 生态学报, 30, 2766-2773.]

Jiang ZY, Hu ZM, Lai DYF, Han DR, Wang M, Liu M, Zhang M, Guo MY (2020). Light grazing facilitates carbon accumulation in subsoil in Chinese grasslands: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 26, 7186-7197.

Jing X, He JS (2021). Relationship between biodiversity, ecosystem multifunctionality and multiserviceability: literature overview and research advances. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 45, 1094-1111. [井新, 贺金生 (2021). 生物多样性与生态系统多功能性和多服务性的关系: 回顾与展望. 植物生态学报, 45, 1094-1111.]

Kuang WH, Yan HM, Zhang SW, Li XY, Bao ZY, Ning J, Zhang PA, Fan B, Wang SS (2018). Forage-livestock status in farms and ranches of ecological grass-animal husbandry construction and allocation model of grain-warp-feed in Hulunbuir Agricultural Reclamation Group. *Chinese Science Bulletin*, 63, 1711-1721. [匡文慧, 闫慧敏, 张树文, 李孝永, 包正义, 宁静, 张平安, 范冰, 王珊珊 (2018). 呼伦贝尔农垦集团草畜平衡状况与粮经饲配置模式. 科学通报, 63, 1711-1721.]

Li B (1997). Degradation of grasslands in northern China and its prevention strategies. *Chinese Journal of Agricultural Science*, 6, 2-10. [李博 (1997). 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 6, 2-10.]

Li B, Sun HL, Zeng SD, Pu HX (1980). Discussion on grassland vegetation resources and their utilization direction in Hulunbeier pastoral area. *Natural Resources*, 2, 30-36. [李博, 孙鸿良, 曾泗弟, 浦汉昕 (1980). 呼伦贝尔牧区草场植被资源及其利用方向的探讨. 自然资源, 2, 30-36.]

Li FX, Zhang DG (2005). Indicators and recovery approaches of degenerated grassland in China. *Grassland and Turf*, 1, 24-28. [李凤霞, 张德罡 (2005). 草地退化指标及恢复措施. 草原与草坪, 1, 24-28.]

Li J, Wurenqiqige, Huang ZY (2013). Analysis on characteristic of plant community species composition under different degeneration degree grassland in the meadow steppe of Hulunbuir. *Guangdong Agricultural Sciences*, 40, 139-143. [李杰, 乌仁其其格, 黄振艳 (2013). 呼伦贝尔草甸草原不同退化程度草地群落物种组成特征分析. 广东农业科学, 40, 139-143.]

Liu B, You GY, Li R, Shen WS, Yue YM, Lin NF (2015). Spectral characteristics of alpine grassland and their changes responding to grassland degradation on the Tibetan Plateau. *Environmental Earth Sciences*, 74, 2115-2123.

Liu ZL, Wang W, Liang CZ, Hao DY (1998). The regressive succession pattern and its diagnostic of Inner Mongolia steppe in sustained and superstrong grazing. *Acta Agrestia Sinica*, 6, 244-251. [刘钟龄, 王炜, 梁存柱, 郝敦元 (1998). 内蒙古草原植被在持续牧压下退化演替的模式与诊断. 草地学报, 6, 244-251.]

Lyu X, Li XB, Dang DL, Dou HS, Wang K, Gong JR, Wang H, Liu SL (2022). A perspective on the impact of grassland degradation on ecosystem services for the purpose of sustainable management. *Remote Sensing*, 14, 5120. DOI: 10.3390/rs14205120.

Manning P, van der Plas F, Soliveres S, Allan E, Maestre FT, Mace G, Whittingham MJ, Fischer M (2018). Redefining ecosystem multifunctionality. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 427-436.

Meng TT, Ni J, Wang GH (2007). Plant functional traits, environments and ecosystem functioning. *Journal of Plant Ecology* (*Chinese Version*), 31, 150-165. [孟婷婷, 倪健, 王国宏 (2007). 植物功能性状与环境和生态系统功能. 植物生态学报, 31, 150-165.]

Miao L, Sun Z, Ren Y, Schierhorn F, Müller D (2021). Grassland greening on the Mongolian Plateau despite higher grazing intensity. *Land Degradation & Development*, 32, 792-802.

Milchunas DG, Lauenroth WK (1993). Quantitative effects of grazing on vegetation and soils over a global range of environments. *Ecological Monographs*, 63, 327-366.

Niu K, He J, Lechowicz MJ (2016). Grazing-induced shifts in community functional composition and soil nutrient availability in Tibetan alpine meadows. *Journal of Applied Ecology*, 53, 1554-1564.

Oksanen J, Simpson GL, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'Hara RB, Solymos P, Stevens MHH, Szoecs E, Wagner H, Barbour M, Bedward M, Bolker B, Borcard D, et al. (2024). Vegan: community ecology package. [2024-05-21]. https://CRAN.R-project.org/package=vegan.

Pan QM, Yang YH, Huang JH (2023). Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 37, 571-579. [潘庆民, 杨元合, 黄建辉 (2023). 我国退化草原恢复的限制因子及需要解决的基础科学问题. 中国科学基金, 37, 571-579.]

Quétier F, Lavorel S, Thuiller W, Davies I (2007). Plant-trait-based modeling assessment of ecosystem-service sensitivity to land-use change. *Ecological Applications*, 17, 2377-2386.

Ren HY, Zheng SX, Bai YF (2009). Effects of grazing on foliage biomass allocation of grassland communities in Xilin river basin, Inner Mongolia. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1065-1074. [任海彦, 郑淑霞, 白永飞 (2009). 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响. 植物生态学报, 33, 1065-1074.]

Shi Y, Ma YL, Ma WH, Liang CZ, Zhao XQ, Fang JY, He JS (2013). Large scale patterns of forage yield and quality across Chinese grasslands. *Chinese Science Bulletin*, 58, 226-239. [石岳, 马殷雷, 马文红, 梁存柱, 赵新全, 方精云, 贺金生 (2013). 中国草地的产草量和牧草品质: 格局及其与环境因子之间的关系. 科学通报, 58, 226-239.]

Smith P, House JI, Bustamante M, Sobocká J, Harper R, Pan GX, West PC, Clark JM, Adhya T, Rumpel C, Paustian K, Kuikman P, Cotrufo MF, Elliott JA, McDowell R, et al. (2016). Global change pressures on soils from land use and management. *Global Change Biology*, 22, 1008-1028.

Stosch KC, Quilliam RS, Bunnefeld N, Oliver DM (2019). Quantifying stakeholder understanding of an ecosystem service trade-off. *Science of the Total Environment*, 651, 2524-2534.

Su TT, Ma HB, Zhou Y, Jia XY, Zhang R, Zhang SQ, Hu YL (2019). Response of typical steppe grassland soil physical and chemical properties to various ecological restoration measures in the Ningxia Loess Hill Region. *Acta Prataculturae Sinica*, 28(4), 34-46. [宿婷婷, 马红彬, 周瑶, 贾希洋, 张蕊, 张双乔, 胡艳莉 (2019). 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, 28(4), 34-46.]

Tian D, Xiang Y, Seabloom E, Chen HYH, Wang J, Yu G, Deng Y, Li Z, Niu S (2022). Ecosystem restoration and belowground multifunctionality: a network view. *Ecological Applications*, 32, e2575. DOI: 10.1002/eap.2575.

USDA (US Department of Agriculture) (2022). National Range and Pasture Handbook. [2024-05-06]. https://directives.sc.egov.usda.gov/landingpage/34155.

Wang M (2022). *Effects of Different Grazing Intensities on Carbon, Nitrogen and Phosphorus Stoichiometric Characteristics and Stocks of Meadow Steppe Ecosystems*. Master degree dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. 30-31. [王淼 (2022). 不同放牧强度对草甸草原生态系统碳氮磷化学计量特征及储量影响. 硕士学位论文, 中国农业科学院, 北京. 30-31.]

Wang XF, Ma HB, Liu J, Miao HT, Shen Y, Zhou Y, Ma JL (2022). Research advances on the effects of grazing on plant functional traits in grassland. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 33, 569-576. [王晓芳, 马红彬, 刘杰, 苗海涛, 沈艳, 周瑶, 马静利 (2022). 放牧对草原植物功能性状影响研究进展. 应用生态学报, 33, 569-576.]

Wang XT, Zhang SH, Chen DD, Tan YR, Sun DS, Du GZ (2010). The effects of natural grazing intensity on plant community and soil nutrients in alpine meadow. *Acta Agrestia Sinica*, 18, 510-516. [王向涛, 张世虎, 陈懂懂, 谈嫣蓉, 孙大帅, 杜国祯 (2010). 不同放牧强度下高寒草甸植被特征和土壤养分变化研究. 草地学报, 18, 510-516.]

Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gulias J, Hikosaka K, et al. (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821-827.

Wurenqigege (2009). *Studys of the Characteristic of Vegetation and Soil and Indication Under the Different Degeneration Degree in the Meadow Steppe*. PhD dissertation, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot. 12-13. [乌仁其其格 (2009). 草甸草原不同退化程度下植被与土壤特征与指示度研究. 博士学位论文, 内蒙古农业大学, 呼和浩特. 12-13.]

Wuyunga, Wulantuya, Zhang WQ, Siqinchaoketu, Gaosuriguga, Bao MS (2023). Analysis of the evolution of the grassland degradation evaluation index system in China based on CiteSpace. *Chinese Journal of Grassland*, 45(5), 125-136. [乌云嘎, 乌兰图雅, 张卫青, 斯琴朝克图, 高苏日固嘎, 包木苏 (2023). 基于CiteSpace的中国草地退化评价指标体系演进分析. 中国草地学报, 45(5), 125-136.]

Xiong DP, Shi PL, Zhang XZ, Zou CB (2016). Effects of grazing exclusion on carbon sequestration and plant diversity in grasslands of China—A meta-analysis. *Ecological Engineering*, 94, 647-655.

Xu DW (2019). *Distribution Change and Analysis of Different Grassland Types in Hulunber Grassland*. PhD dissertation, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing. 41-42. [徐大伟 (2019). 呼伦贝尔草原区不同草地类型分布变化及分析. 博士学位论文, 中国农业科学院, 北京. 41-42.]

Xue CF, Zhang W (2009). The dynamic variation of grassland vegetation degeneration based on remote sensing MODIS data. *Remote Sensing for Land & Resources*, 21, 97-101. [薛存芳, 张玮 (2009). 基于MODIS数据的内蒙古草地植被退化动态监测研究. 国土资源遥感, 21, 97-101.]

Yan H, Ran QW, Hu RH, Xue K, Zhang B, Zhou ST, Zhang ZP, Tang L, Che RX, Pang Z, Wang F, Wang D, Zhang J, Jiang LL, Qian Z, et al. (2022). Machine learning-based

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

prediction for grassland degradation using geographic, meteorological, plant and microbial data. *Ecological Indicators*, 137, 108738. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108738.

Yan RR, Gao W, Shen BB, Zhang Y, Wang M, Zhu XY, Xin XP (2021). Index system for quantitative evaluation of pasture degradation in meadow grassland of Inner Mongolia. *Scientia Agricultura Sinica*, 54, 3343-3354. [闫瑞瑞, 高娃, 沈贝贝, 张宇, 王淼, 朱晓昱, 辛晓平 (2021). 草甸草原放牧场退化定量评估指标体系建立. 中国农业科学, 54, 3343-3354.]

Yan RR, Xin XP, Wang X, Yan YC, Deng Y, Yang GX (2014). The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1587-1595. [闫瑞瑞, 辛晓平, 王旭, 闫玉春, 邓钰, 杨桂霞 (2014). 不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应. 生态学报, 34, 1587-1595.]

Yan YC, Tang HP (2008). Differentiation of related concepts of grassland degradation. *Acta Prataculturae Sinica*, 17(1), 93-99. [闫玉春, 唐海萍 (2008). 草地退化相关概念辨析. 草业学报, 17(1), 93-99.]

Yan YC, Tang HP, Zhang XS (2007). Diagnosis of grassland degradation degree and its perspectives. *Chinese Journal of Grassland*, 29(3), 90-97. [闫玉春, 唐海萍, 张新时 (2007). 草地退化程度诊断系列问题探讨及研究展望. 中国草地学报, 29(3), 90-97.]

Zhang LL, Wang XA, Zhu ZH, Li YN (2018). The effects of simulated grazing intensity and fertilizing on the community characteristics and diversity in alpine meadow of Qinghai-Tibet Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 27, 406-415. [张璐璐, 王孝安, 朱志红, 李英年 (2018). 模拟放牧强度与施肥对青藏高原高寒草甸群落特征和物种多样性的影响. 生态环境学报, 27, 406-415.]

Zhang M, Li XB, Wang H, Huang Q (2018). Comprehensive analysis of grazing intensity impacts soil organic carbon: a case study in typical steppe of Inner Mongolia, China. *Applied Soil Ecology*, 129, 1-12.

Zhang M, Delgado-Baquerizo M, Li G, Isbell F, Wang Y, Hautier Y, Wang Y, Xiao Y, Cai J, Pan X, Wang L (2023). Experimental impacts of grazing on grassland biodiversity and function are explained by aridity. *Nature Communications*, 14, 5040. DOI: 10.1038/s41467-023-40809-6.

Zhang YJ, Zhu JT, Shen RN, Wang L (2020). Research progress on the effects of grazing on grassland ecosystem. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 553-564. [张扬建, 朱军涛, 沈若楠, 王荔 (2020). 放牧对草地生态系统影响的研究进展. 植物生态学报, 44, 553-564.]

Zhao TQ, Ouyang ZY, Jia LQ, Zheng H (2004). Ecosystem services and their valuation of China grassland. *Acta Ecologica Sinica*, 24, 1101-1110. [赵同谦, 欧阳志云, 贾良清, 郑华 (2004). 中国草地生态系统服务功能间接价值评价. 生态学报, 24, 1101-1110.]

Zhao YF, Zhu WW, Wei PP, Fang P, Zhang XW, Yan NN, Liu WJ, Zhao H, Wu QR (2022). Classification of Zambian grasslands using random forest feature importance selection during the optimal phenological period. *Ecological Indicators*, 135, 108529. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108529.

Zheng JH, Zhang B, Zhang F, Zhao TQ, Wang Q, Han GD, Zhao ML (2023). Effects of fencing on near-term ecosystem multifunctionality in a typical steppe in Inner Mongolia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 342, 108238. DOI: 10.1016/j.agee.2022.108238.

Zhou G, Zhou X, He Y, Shao J, Hu Z, Liu R, Zhou H, Hosseinibai S (2017a). Grazing intensity significantly affects belowground carbon and nitrogen cycling in grassland ecosystems: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 23, 1167-1179.

Zhou W, Yang H, Huang L, Chen C, Lin XS, Hu ZJ, Li JL (2017b). Grassland degradation remote sensing monitoring and driving factors quantitative assessment in China from 1982 to 2010. *Ecological Indicators*, 83, 303-313.

责任编委: 梁存柱　责任编辑: 李　敏

附录I　已有文献中生态系统服务所对应的不同利益群体权重
Supplement I　Weights of different interest groups corresponding to ecosystem services in existing literature
https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2024.0152-S1.pdf

附录II　三类数据集筛选指标后的测试集与验证集精度
Supplement II　Test and validation set accuracy after filtering indicators for three categories of datasets
https://www.plant-ecology.com/fileup/1005-264X/PDF/cjpe.2024.0152-S2.pdf

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

许梦真, 卢正宽, 谭星儒, 王彦兵, 苏天成, 窦山德, 潘庆民, 陈世苹 (2025). 呼伦贝尔草甸草原退化特征因子识别与快速诊断指标体系构建. 植物生态学报, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152
Xu MZ, Lu ZK, Tan XR, Wang YB, Su TC, Dou SD, Pan QM, Chen SP (2025). Identification of key factors and construction of a rapid diagnostic indicator system for evaluation of grassland degradation in Hulun Buir meadow grasslands. ***Chinese Journal of Plant Ecology*****, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152**
https://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2024.0152

附录**II** 三类数据集筛选指标后的测试集与验证集精度

Supplement II Test and validation set accuracy after filtering indicators for three categories of datasets

指标类型 Indicator type	变量个数 Number of variables	变量名称 Variable names	验证集精度 Test set accuracy	交叉验证精度 Cross-validation accuracy
植被结构与多样性指标 Vegetation biomass and diversity indicators	12	地上生物量、地下生物量、凋落物生物量、群落高度、植被覆盖度、优质牧草比例、植物碳含量、植物氮含量、植物磷含量、物种丰富度、香农–维纳多样性、β多样性 AGB, BGB, Litter, CH, VC, HR, PC, PN, PP, SR, *H*′, β diversity	0.83	0.74
	5	地上生物量、群落高度、凋落物生物量、优质牧草比例、物种丰富度 AGB, CH, Litter, HR, SR	0.78	0.72
植物功能性状指标 Plant functional trait indicators	9	植株高度、比叶面积、叶片碳含量、叶片氮含量、叶片磷含量、叶片厚度、叶干物质含量、叶茎比、叶绿素含量 H, SLA, LC, LN, LP, LT, LDMC, LS ratio, Chl	0.83	0.76
	3	植株高度、叶片厚度、叶干物质含量 H, LT, LDMC	0.72	0.70
土壤特征指标 Soil characteristic indicators	9	土壤密度、pH、土壤含水量、田间持水量、全氮含量、全磷含量、有机碳含量、速效磷含量、无机氮含量 SD, pH, SWC, FC, TN, TP, SOC, AP, SIN	0.67	0.49
	3	土壤密度、土壤含水量、土壤无机氮含量 SD, SWC, SIN	0.61	0.45

AGB, aboveground biomass; AP, soil available phosphorus; BGB, belowground biomass; CH, canopy height; Chl, chlorophyll content; FC, field water holding capacity; H, height; *H*′, Shannon-Wiener diversity; HR, high quality forage ratio; LC, leaf carbon content; LDMC, leaf dry matter content; LN, leaf nitrogen content; LP, leaf phosphorus content; LS ratio, leaf to stem ratio; LT, leaf thickness; Litter, litter biomass; PC, plant community carbon content; PN, plant community nitrogen content; PP, plant community phosphorus content; SR, species richness; SIN, soil inorganic nitrogen content; SD, Soil density; SOC, soil organic carbon content; SWC, soil water content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; VC, vegetation cover.

许梦真, 卢正宽, 谭星儒, 王彦兵, 苏天成, 窦山德, 潘庆民, 陈世苹 (2025). 呼伦贝尔草甸草原退化特征因子识别与快速诊断指标体系构建. 植物生态学报, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152
Xu MZ, Lu ZK, Tan XR, Wang YB, Su TC, Dou SD, Pan QM, Chen SP (2025). Identification of key factors and construction of a rapid diagnostic indicator system for evaluation of grassland degradation in Hulun Buir meadow grasslands. ***Chinese Journal of Plant Ecology*****, 49, 42-58. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0152**
https://www.plant-ecology.com/CN/10.17521/cjpe.2024.0152

附录**II** 三类数据集筛选指标后的测试集与验证集精度

Supplement II Test and validation set accuracy after filtering indicators for three categories of datasets

指标类型 Indicator type	变量个数 Number of variables	变量名称 Variable names	验证集精度 Test set accuracy	交叉验证精度 Cross-validation accuracy
植被结构与多样性指标 Vegetation biomass and diversity indicators	12	地上生物量、地下生物量、凋落物生物量、群落高度、植被覆盖度、优质牧草比例、植物碳含量、植物氮含量、植物磷含量、物种丰富度、香农–维纳多样性、β多样性 AGB, BGB, Litter, CH, VC, HR, PC, PN, PP, SR, *H*′, β diversity	0.83	0.74
	5	地上生物量、群落高度、凋落物生物量、优质牧草比例、物种丰富度 AGB, CH, Litter, HR, SR	0.78	0.72
植物功能性状指标 Plant functional trait indicators	9	植株高度、比叶面积、叶片碳含量、叶片氮含量、叶片磷含量、叶片厚度、叶干物质含量、叶茎比、叶绿素含量 H, SLA, LC, LN, LP, LT, LDMC, LS ratio, Chl	0.83	0.76
	3	植株高度、叶片厚度、叶干物质含量 H, LT, LDMC	0.72	0.70
土壤特征指标 Soil characteristic indicators	9	土壤密度、pH、土壤含水量、田间持水量、全氮含量、全磷含量、有机碳含量、速效磷含量、无机氮含量 SD, pH, SWC, FC, TN, TP, SOC, AP, SIN	0.67	0.49
	3	土壤密度、土壤含水量、土壤无机氮含量 SD, SWC, SIN	0.61	0.45

AGB, aboveground biomass; AP, soil available phosphorus; BGB, belowground biomass; CH, canopy height; Chl, chlorophyll content; FC, field water holding capacity; H, height; *H*′, Shannon-Wiener diversity; HR, high quality forage ratio; LC, leaf carbon content; LDMC, leaf dry matter content; LN, leaf nitrogen content; LP, leaf phosphorus content; LS ratio, leaf to stem ratio; LT, leaf thickness; Litter, litter biomass; PC, plant community carbon content; PN, plant community nitrogen content; PP, plant community phosphorus content; SR, species richness; SIN, soil inorganic nitrogen content; SD, Soil density; SOC, soil organic carbon content; SWC, soil water content; TN, soil total nitrogen content; TP, soil total phosphorus content; VC, vegetation cover.