



# 草甸草原放牧场退化定量评估指标体系建立

闫瑞瑞<sup>1</sup>, 高娃<sup>1</sup>, 沈贝贝<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 王淼<sup>1</sup>, 朱晓昱<sup>1,2</sup>, 辛晓平<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup> 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站, 北京 100081; <sup>2</sup> 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191

**摘要:**【背景】内蒙古草原是我国北方重要的天然生态屏障, 其中草甸草原处于森林向草原过渡地带, 在我国温性草甸草原是一种非常宝贵的自然再生资源。且内蒙古草原在我国温性草甸草原所占比例最大, 其中大部分是放牧场。放牧是人类影响草地生态系统最主要的方式之一, 过度的放牧会导致草原群落发生逆行演替, 草地的生产性能不断降低, 从而限制了草地畜牧业的稳定发展。【目的】全面准确及时地评估放牧场退化状况, 为维护和促进草地可持续利用提供支持。【方法】通过总结草地放牧场退化演替规律及驱动机制, 采用层次分析、专家调查以及比较矩阵分析方法, 构建了内蒙古草甸草原放牧场退化指标体系, 包括地上生物量、盖度、平均高度、植物种数、枯落物量、退化指示植物比例、土壤有机碳含量、土壤容重共 8 个指标。基于评估综合指数模型的建立, 提出对照基准指标的参数, 利用定量评估的综合指数反映草甸草原放牧场退化的整体状况。同时, 探讨和研究了内蒙古草甸草原放牧场退化定量评估指标体系构建及其技术方法, 以呼伦贝尔谢尔塔拉控制放牧试验为基础, 对该方法进行了评估验证。【结果】研究得出内蒙古草甸草原放牧场评价指标体系的 8 项指标权重由大到小依次为地上生物量、盖度、平均高度、退化指示植物比例、植物种数、枯落物量、土壤有机碳含量、土壤容重增加比例。草甸草原退化分级可以分为未退化、轻度退化、中度退化、重度退化 4 个等级, 当放牧等于零或很轻的放牧状态时草地属于未退化草地范围。当放牧为 90% 以上时草原属于重度退化草地范围。【结论】基于上述研究, 建议在今后的研究中进行更长时期的探讨, 对基准参考值做进一步的完善和更新, 对放牧场退化评估指标体系更加完善和成熟有利, 可以为放牧场退化定量评估提供依据。

**关键词:** 草甸草原; 放牧场退化; 指标筛选; 定量评估

## Index System for Quantitative Evaluation of Pasture Degradation in Meadow Grassland of Inner Mongolia

YAN RuiRui<sup>1</sup>, GAO Wa<sup>1</sup>, SHEN BeiBei<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, WANG Miao<sup>1</sup>, ZHU XiaoYu<sup>1,2</sup>, XIN XiaoPing<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Hulunbeir Grassland Ecosystem Research Station, Beijing 100081; <sup>2</sup>Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191

**Abstract:** 【Background】 Inner Mongolia grassland is an important natural ecological barrier in northern China, among which meadow steppe is located in the transition zone from forest to grassland, and it is a very valuable natural renewable resource in China. The proportion of meadow grassland in Inner Mongolia is the largest in China, most of which are pastures. Grazing is one of the

收稿日期: 2020-07-01; 接受日期: 2021-05-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0500601, 2017YFE0104500)、国家自然科学基金面上项目(31971769)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2020YJ19, 1610132021016)、呼伦贝尔市科技计划项目(YYFHZ201903)、国家现代农业产业技术体系、农业基础性长期性科技工作(NAES037SQ18)

联系方式: 闫瑞瑞, E-mail: yanrui@caas.cn. 通信作者辛晓平, E-mail: xinxiaoping@caas.cn

most important ways for human beings to affect grassland ecosystem. Excessive grazing will lead to retrograde succession of grassland community, and grassland production performance will be continuously reduced, thus limiting the stable development of grassland animal husbandry. **【Objective】** Comprehensive, accurate and timely assessment of pasture degradation is of great significance for maintaining and promoting sustainable grassland utilization. **【Method】** In this study, the degradation succession law and driving mechanism of grassland pasture were summarized, and the degradation index system of grassland pasture in Inner Mongolia was established by using analytic hierarchy process (AHP), expert investigation and comparative matrix analysis methods, which included 8 indexes, such as aboveground biomass, coverage, average height, plant species, litter, proportion of degradation indicator plant, soil organic carbon content and soil bulk density. Based on the establishment of the comprehensive evaluation index model, the parameters of the reference index were put forward, and the comprehensive index of quantitative evaluation was used to reflect the overall situation of grassland degradation. At the same time, the quantitative evaluation index system of grassland degradation in Inner Mongolia and its technical method were discussed and studied. This method was evaluated and verified based on the controlled grazing experiment in Xeltala of Hulunbuir. **【Result】** The results showed that the weight of the eight indexes from the largest to the smallest in the evaluation index system of Inner Mongolia meadow steppe were aboveground biomass, coverage, average height, proportion of degraded plants, number of plant species, litter, soil organic carbon content, and proportion of soil bulk density increase. Meadow grassland degradation could be classified into four grades: non-degradation, mild degradation, moderate degradation and severe degradation. When the grazing was equal to zero or very light grazing, the grassland belonged to the scope of non-degraded grassland. When the grazing rate was above 90%, the grassland belonged to the range of severely degraded grassland.

**【Conclusion】** It was suggested that a longer period of discussion should be carried out in the future research to further improve and update the benchmark reference value, which was conducive to the improvement and maturity of the evaluation index system of pasture degradation, and could provide a basis for quantitative assessment of pasture degradation.

**Key words:** meadow steppe; degradation of grazing land; index screening; quantitative evaluation

## 0 引言

**【研究意义】** 温性草甸草原生态系统是我国地带性草地生态系统的重要类型之一, 主要集中分布于内蒙古大兴安岭东西两麓。它以世界最好草地而著称, 构成欧亚大陆草原生态系统最东部的生态屏障。据研究报道, 内蒙古草甸草原放牧场普遍存在不同程度退化现象, 过度放牧或放牧利用不合理导致植物群落发生退化演替, 引起生境旱化、土壤理化性质恶化、土壤肥力降低、草地生产性能不断降低, 限制了草地畜牧业的稳定发展<sup>[1-3]</sup>。正确评价草甸草原放牧场退化状况, 是制定保护措施和管理的重要前提。**【前人研究进展】** 目前尚未有针对内蒙古草甸草原放牧场退化评估指标体系的专门研究, 但是与其相关的研究较多。许多学者对草地退化演替进行了大量研究<sup>[4-7]</sup>, 揭示了放牧对草地退化演替的影响<sup>[8]</sup>。有些学者以草甸草原放牧利用为研究对象, 从不同角度揭示了生态学 and 草地学众多指标特征及其内在联系, 以及放牧退化演替规律及机制<sup>[9-11]</sup>。这些草地放牧演替的基本理论和基础数据, 有利于了解草地放牧退化性质及特征, 为放牧场退化评估奠定基础。刘兴元等<sup>[12]</sup>关于生态系统服务功能分类和货币化评估, 奠定了生态服务功能及其价值评估方法与理论。随之推动了国内外对

生态系统服务功能价值评估研究<sup>[13-15]</sup>。**【本研究切入点】** 对于草地退化定量化评估而言, 2003 年我国农业部颁发了 GB 19377-2003, 规定了天然草地退化、沙化、盐渍化的分级和指标, 提出必须监测项目和辅助监测项目以及评定退化的方法。XU 等<sup>[16]</sup>2019 年依据半干旱牧区天然打草场合理利用和清查研究, 采用 5 级级差法及指标阈值范围, 构建了我国北方半干旱天然打草场退化分级的评估指标体系。放牧场草地定量化评估指标体系建立一直以来是草地学面临的难题, 需要进一步研究。**【拟解决的关键问题】** 本文基于内蒙古草甸草原放牧系统, 利用定量化评估指标体系建立的原则和方法, 从评估指标筛选、指标赋权、基准指标参数选择、综合指标计算模型建立和综合指标指数分级等方面, 研究和探讨草甸草原放牧场退化指标体系和评估方法, 以期在草原利用和管理中为科学评判草甸草原放牧场退化程度提供技术手段。

## 1 评估指标体系构建的思路与原则

以草地生态学及可持续发展理论为基础, 通过分析历史资料和控制放牧试验研究, 根据内蒙古草甸草原生态系统的结构特点及其内蒙古草甸草原放牧场退化特性, 借鉴国内外相关评估指标体系构建的

思路和方法, 构建反映草甸草原放牧场退化基本内涵的评价指标体系。通过总结相关评价指标体系建立的原则<sup>[17-18]</sup>, 提出内蒙古草甸草原放牧场评价指标体系应遵循的原则: ①量化、易获取原则, 选择指标应可测量、易于计算, 指标定义准确清晰, 数据来源可靠或权威。②操作性原则, 构建评估指标体系要从实际出发, 与经济、技术发展水平相适应, 为不同层次水平和不同专业的使用者之用, 评估方法及过程, 简单、易于应用和推广。③主导性、代表性原则, 影响放牧场植被和生境变化的评估因子十分复杂, 限于现有条件, 选择其中主导作用强的指标反映总体特征, 以符合放牧场生产、生态安全为目标, 避免指标重叠。④科学性原则, 在科学的基础上建立指标体系, 包括指标权重、基准指标参数、指标筛选以及综合指标计算模型等, 必须以公认的科学理论为依据, 同时数据应有连续性和可比性, 确保评估指标体系的科学性和合理性。

## 2 指标的筛选方法

指标的筛选在草甸草原放牧场退化评估指标体系(图 1)中为基础指标(指标层)的筛选, 基础指标需要地面实测或其他手段来获取。基础指标的筛选是在资料收集的基础上, 全面掌握内蒙古草甸草原及其放牧场退化状况的同时, 采用频度分析等方法首先进行指标的初选, 再利用专家调查法和数学模型法对初选指标进一步优化, 进而选择出符合要求的基础指标。

### 2.1 基础资料的收集

广泛收集、调研国内、外相关标准、规范、技术文献等资料。针对草业生产中放牧场退化评价需求, 收集了国内外天然草地健康评价<sup>[19-20]</sup>、天然草地退化、沙化、盐渍化的指标分级<sup>[21]</sup>与放牧草场退化评价以及相关草地管理措施等文献资料; 收集了国家和各地区有关草地调查、监测的技术手册和相关试验数据及统计数据, 包括上世纪八十年代内蒙古第一次统一草地调查数据集和内蒙古草地资源编著<sup>[22]</sup>、2000 年以来草原生态建设工程及生产力监测数据及监测报告, 以及中国农业科学院农业资源与农业区划研究所开展的草甸草原放牧控制试验以及国家重点研发“北方草甸草原退化草地治理技术与示范”等研究成果。收集查阅了林业资源评价、土地荒漠化评价<sup>[23-25]</sup>等不同行业相关文献资料。这些资料为草甸草原放牧场退化评估指标体系的研究提供了数据来源和可借鉴的经验。

### 2.2 指标的初选

指标初选是对基础指标筛选范围的确立。初选指标重在指标体系的全面性, 可允许重复, 为进一步指标优化提供选择的可能性。草地放牧场退化可理解为天然草地由于放牧干扰而引起的植物群落出现稀疏低矮、地上生物量减少、物种组成下降和土壤状况变差及生境恶化现象。按定量评估指标体系建立思路 and 原则, 在查阅分析大量文献和试验研究资料基础上, 参考草地监测与管理实践中经常应用的指标, 首先选择那些使用频度较高的指标作为基础指标。在众多指标的分析 and 归纳过程中, 发现使用频度较高的指标主要集中于草地植被、土壤性质及其生态环境。草甸草原放牧场退化的本质是草地生态系统的生物量和生产力及其复杂性下降, 它包含了草地植被的长期减少和土壤性状的衰退。然而草地及放牧场退化过程中, 植被因素反应最为敏感和直接, 同时一定程度上影响到土壤性状。当放牧场植被和土壤发生退化演变时, 必然影响到草地的生境及生态环境。因此, 植被、土壤及其生态环境三大类可作为指标体系的准则层(图 1), 符合草地放牧场退化特征的内涵。

在大量文献资料中, 收集符合要求的大量指标, 并按植被、土壤、生态环境进行归类 and 指标筛选。初选指标范围包括平均高度、地上生物量、盖度、中型禾草(一般为优良牧草)占比例、枯落物量、退化指示植物比例、裸斑、盐碱斑比例、可食草种占总量比例、可食草种增加率、不可食草占总量比例、有害草占总量比例、土壤侵蚀模数增加比例、鼠洞面积占草地面积比例、土层土壤容重增加比例、土层全氮含量减少比例、土壤含盐量增加比例、有机质含量减少比例、禾草类占比例、沙化指示植物增加比例、盐渍化指示植物增加比例、土壤有机碳含量比例、植物种类, 共 22 个指标。

### 2.3 指标的优化

**2.3.1 指标比较判断矩阵** 采用层次分析法对 22 个初选指标进一步筛选和优化。层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是美国运筹学家 SSTTY 等人提出的一种将定性 with 定量相结合多准则分析测评方法<sup>[26]</sup>, 被广泛应用于各领域评估中。通过构造层次分析的结构, 排列组合得到优劣的次序是 AHP 的基本原理。在指标选择中, 首先把指标对象分层系列化, 其次, 是构造判断矩阵, 主要依据常用的 1—9 标度法来进行判别。构造的判断矩阵做层次单排序和一次性检验<sup>[26]</sup>。层次单排序原因是为了确定基础指标对整体指标体系的影响程度<sup>[26]</sup>。因此, 由 12 名专家根据经

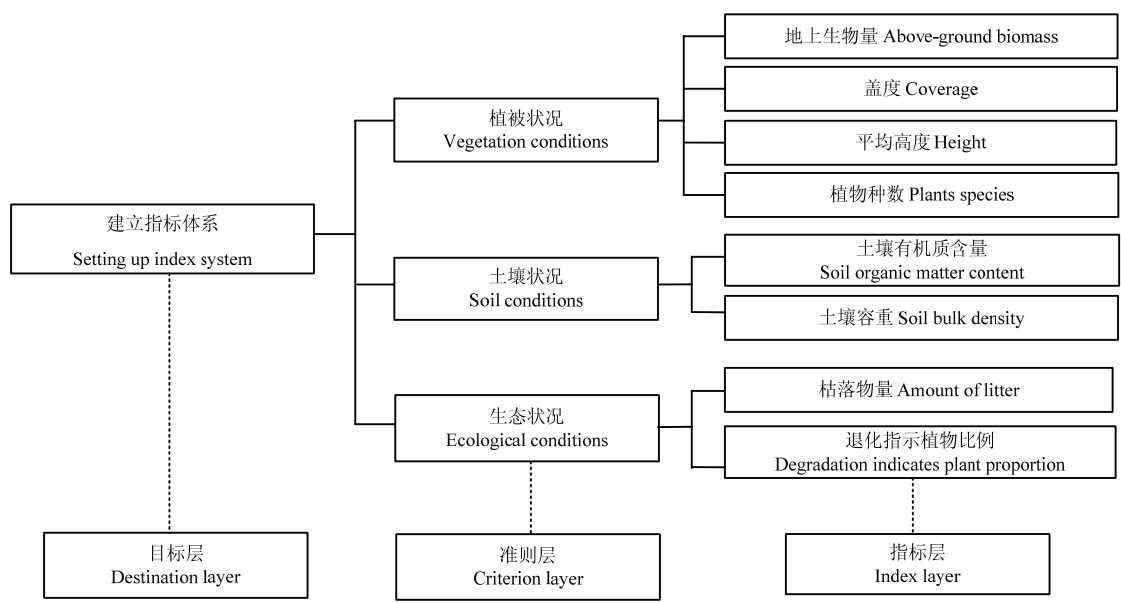


图 1 草甸草原放牧场退化指标体系的结构

Fig. 1 Structure of pasture degradation index system in meadow grassland

验对初选指标进行判断打分。专家打分法是一种最适用、最简单、且易于应用的指标选择方法。然后将打分结果进行汇总，将各指标进行两两比较判断，创建了矩阵（表 1），计算出了最大特征根以及相对应的特征向量，根据最终权重大小（表 2）选取该标准具有代表性的相关指标。量化指标重要性比较，范围在 1—9，所表示的为从同等重要到极端重要。重要数值的倒数表明相对不重要的程度，即 1/9 表示最不重要。同时要保持判断的一致性和连续性。

**2.3.2 指标权重计算与排序** 利用最大特征值及其特征向量是反映专家调查法指标判断矩阵的指标权重的大小顺序。最大特征向量的计算是将判断矩阵的每一列元素进行归一化处理，其元素一般项的公式为：

$$b_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_{ij}} \quad (i,j=1,2,\dots,n)$$

将每一列经归一化处理后的判断矩阵按行相加：

$$W_i = \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (i,j=1,2,\dots,n)$$

对向量  $W=(W_1,W_2,\dots,W_n)t$

$$W_i = \frac{W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (i=1,2,\dots,n)$$

所求的特征向量的近似解为： $W=(W_1,W_2,\dots,W_n)t$

通过最大特征向量的计算，结果得出指标的权重大小排序见表 2。

**2.3.3 指标判断矩阵一致性检验** 由于专家调查打分法确定权重具有一定的主观性，为了衡量 AHP 方法得出的结果是否合理，需要对判别矩阵作一致性检验，来对判断矩阵的合理性进行整体判别。判断矩阵一致性检验的值应小于 0.1<sup>[27]</sup>，判断矩阵一致性检验的步骤主要包括以下两个过程：

（1）判断矩阵最大特征根的计算：

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BW)_i}{nW_i}$$

$B$  为前面的比较矩阵， $W$  为前面已经求出的特征根。

（2）判断矩阵一致性指标为  $C.i.$ (Consistency index)，计算公式：

$$C.i. = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

得出  $C.i.=0.03$ ，指标的一致性通过，由此，表 2 指标权重排序大小具有合理性。

**2.4 指标体系的结构**

依据表 1 指标权重大小排序，将指标权重 $\geq 0.052$ 的 9 个指标作为备选指标，对 9 个指标再进行筛选优化，依据指标尽可能不重叠，结合生态学和草地学及实际应用的经验，最终筛选出代表性和主导性的 8 个指标，其中植被指标 4 个，土壤指标 2 个，生态指标 2 个。图 1 为草甸草原放牧场退化指标体系的结构组成，包括目标层、准则层和指标层。

表 1 专家调查法筛选指标判断矩阵

Table 1 Expert survey method for screening index judgment matrix

指标 Factor	平均高度 Height	地上生物量 Above-ground biomass	盖度 Coverage	中型禾草 占比例 Proportion of medium grasses	枯落物量 Amount of litter	退化指示 植物比例 Degradation indicates plant proportion	裸斑、盐 碱斑比例 Bare spot, saline-alkali spot ratio	可食草种 占总量比例 Proportion of herbivores in the total	可食草种 增加率 Increase rate of herbivores	不可食草 占总量比例 Non-herbivores as a percentage of the total	有害草占 总量比例 Proportion of harmful grass in total
平均高度 Height	1	1	1	2	4	1	2	2	3	2	2
地上生物量 Above-ground biomass	1	1	1	2	5	1	2	2	4	3	3
盖度 Coverage	1	1	1	2	4	1	2	2	3	2	3
中型禾草占比例 Proportion of medium grasses	1/2	1/2	1/2	1	2	1/2	1	1	2	1	2
枯落物量 Amount of litter	1/4	1/5	1/4	1/2	1	1/4	1/2	1/2	1	1/2	1
退化指示植物比例 Degradation indicates plant proportion	1	1	1	2	4	1	2	1	3	2	2
裸斑、盐碱斑比例 Bare spot, saline-alkali spot ratio	1/2	1/2	1/2	1	2	1/2	1	1	2	1	1
可食草种占总量比例 Proportion of herbivores in the total	1/2	1/2	1/2	1	2	1	1	1	2	2	2
可食草种增加率 Increase rate of herbivores	1/3	1/4	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1/2	1	1	1
不可食草占总量比例 Non-herbivores as a percentage of the total	1/2	1/3	1/2	1	2	1/2	1	1/2	1	1	1
有害草占总量比例 Proportion of harmful grass in total	1/2	1/3	1/3	1/2	1	1/2	1	1/2	1	1	1
土壤侵蚀模数增加比例 Soil erosion patterns increase in proportion	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1/3	1/2	1/2	1	1	1
鼠洞面积占草地面积比例 Proportion of rat hole area to grassland area	1/5	1/5	1/5	1/3	1	1/4	1/2	1/3	1/2	1/2	1/2
土壤容重增加比例 Proportion of soil bulk density increased	1/2	1/2	1/2	1	3	1	1	1	2	1	2
土壤全氮减少比例 Proportion of TN decreased	1/4	1/4	1/4	1/2	1	1/3	1/2	1/2	1	1/2	1/2
土壤含盐量增加比例 Proportion of soil salt increased	1/9	1/9	1/9	1/6	1/3	1/9	1/6	1/7	1/4	1/5	1/4
有机质含量减少比例 Organic matter content decreases proportionally	1/2	1/2	1/2	1	2	1/2	1	1	1	1	1
禾草类占比例 Proportion of grasses	1/4	1/5	1/5	1/3	1	1/4	1/2	1/3	1/2	1/2	1/2
沙化指示植物增加比例 Desertification indicates an increased proportion of plants	1/4	1/4	1/4	1/2	1	1/3	1/2	1/2	1	1/2	1/2
盐渍化指示植物增加比例 Salinization indicates an increased proportion of plants	1/4	1/5	1/4	1/2	1	1/2	1/2	1/3	1/2	1/2	1/2
土壤有机碳比例 Proportion of SOC	1/2	1/2	1/2	1	3	1	1	1	2	1	2
植物种类 Plants species	1/2	1/2	1/2	1	3	1	1	1	2	2	2

续表 1 Continued table 1

指标 Factor	土壤侵蚀模 增加比例 Soil erosion patterns increase in proportion	鼠洞面积占草 地面积比例 Proportion of rat hole area to grassland area	土壤容重 增加比例 Proportion of soil bulk density increased	土壤全氮减少 比例 Proportion of TN decreased	土壤含盐量 增加比例 proportion of soil salt increased	有机质含量 减少比例 Organic matter content decreases proportionally	禾草类占比例 Proportion of grasses	沙化指示植物 增加比例 Desertification indicates an increased proportion of plants	盐渍化指示植 物增加比例 Salinization indicates an increased proportion of plants	土壤有机碳 比例 Proportion of SOC	植物种类 Plants species
平均高度 Height	3	5	2	4	9	2	4	4	4	2	2
地上生物量 Above-ground biomass	3	5	2	4	9	2	5	4	4	2	2
盖度 Coverage	3	5	2	4	9	2	5	4	4	2	2
中型禾草占比例 Proportion of medium grasses	2	3	1	2	6	1	3	2	2	1	1
枯落物量 Amount of litter	1	1	1/3	1	3	1/2	1	1	1	1/3	1/3
退化指示植物比例 Degradation indicates plant proportion	3	4	1	3	9	2	4	3	2	1	1
裸斑、盐碱斑比例 Bare spot, saline-alkali spot ratio	2	2	1	2	6	1	2	2	2	1	1
可食草种占总量比例 Proportion of herbivores in the total	2	3	1	2	7	1	3	2	3	1	1
可食草种增加率 Increase rate of herbivores	1	2	1/2	1	4	1	2	1	2	1/2	1/2
不可食草占总量比例 Non-herbivores as a percentage of the total	1	2	1	2	5	1	2	2	2	1	1/2
有害草占总量比例 Proportion of harmful grass in total	1	2	1/2	2	4	1	2	2	2	1/2	1/2
土壤侵蚀模增加比例 Soil erosion patterns increase in proportion	1	1	1/2	1	4	1	2	1	2	1/2	1/2
鼠洞面积占草地面积比例 Proportion of rat hole area to grassland area	1	1	1/3	1	2	1/2	1	1	1	1/3	1/3
土壤容重增加比例 Proportion of soil bulk density increased	2	3	1	2	7	1	3	2	3	1	1
土壤全氮减少比例 Proportion of TN decreased	1	1	1/2	1	3	1/2	1	1	1	1/2	1/3
土壤含盐量增加比例 Proportion of soil salt increased	1/4	1/2	1/7	1/3	1	1/5	1/2	1/3	1/3	1/7	1/8
有机质含量减少比例 Organic matter content decreases proportionally	1	2	1	2	5	1	2	2	2	1	1
禾草类占比例 Proportion of grasses	1/2	1	1/3	1	2	1/2	1	1	1	1/3	1/3
沙化指示植物增加比例 Desertification indicates an increased proportion of plants	1	1	1/2	1	3	1/2	1	1	1	1/3	1/3
盐渍化指示植物增加比例 Salinization indicates an increased proportion of plants	1/2	1	1/3	1	3	1/2	1	1	1	1/3	1/3
土壤有机碳比例 Proportion of SOC	2	3	1	2	7	1	3	3	3	1	1
植物种类 Plants species	2	3	1	3	8	1	3	3	3	1	1



表 2 指标的权重大小排序

Table 2 Weight ranking of indicators

指标 Factor	权重 Weight
地上生物量 Above-ground biomass	0.093
盖度 Coverage	0.089
平均高度 Average height	0.087
退化指示植物比例 Degradation indicates plant proportion	0.071
植物种类 Plants species	0.056
枯落物量 Amount of litter	0.055
土壤有机碳比例 Proportion of SOC	0.053
可食草种占总量比例 Proportion of herbivores in the total	0.052
土壤容重增加比例 Proportion of soil bulk density increased	0.052
中型禾草占比例 Proportion of medium grasses	0.048
裸斑、盐碱斑比例 Bare spot, saline-alkali spot ratio	0.045
有机质含量减少比例 Organic matter content decreases proportionally	0.041
不可食草占总量比例 Non-herbivores as a percentage of the total	0.038
有害草占总量比例 Proportion of harmful grass in total	0.033
可食草种增加率 Increase rate of herbivores	0.029
土壤侵蚀模增加比例 Soil erosion patterns increase in proportion	0.028
全氮减少比例 Proportion of TN decreased	0.022
沙化指示植物增加比例 Desertification indicates an increased proportion of plants	0.022
盐渍化指示植物增加比例 Salinization indicates an increased proportion of plants	0.020
鼠洞面积占草地面积比例 Proportion of rat hole area to grassland area	0.019
禾草类占比例 Proportion of grasses	0.018
土壤含盐量增加比例 proportion of soil salt increased	0.008

植被状况：包括地上部生物量、盖度、平均高度、多年生物种数。地上现存量指单位面积多年生植物地上部分的干重；盖度指植物地上部分垂直投影面积占地表面积的比例；平均高度指草群的平均自然高度；植物种数指单位面积多年生植物的数量。放牧场退化的重要标志，首先是从地上部生物量、盖度、平均高度、多年生物种数的减少和损失开始，它们是植物群落生态学研究的常用指标，被广泛应用于草地植被退化的监测和研究。

土壤状况：土壤有机碳含量是指通过土壤中微生物的作用所形成的腐殖质、动植物残体和微生物体的合称，其中的碳元素含量就是土壤有机碳，是反映草地健康与土壤品质和的重要指标之一，且对草地群落的生产力和土壤肥力产生着直接的影响<sup>[28-29]</sup>。许多研究表明，土壤碳储量与利用方式和管理策略具有显著关系。放牧减少了碳素向土壤输入而减少了土壤有机

碳含量，通过植物生产、土壤微环境等途径对土壤碳库造成影响，过度放牧一般减少土壤有机碳含量而引起草地退化。土壤容重是指单位容积土壤的质量，是反映土壤的坚实度的指标。土壤容重大小在一定程度上可以预警草地退化状况，可以作为草地放牧退化的土壤因子的重要指标。有关研究表明土壤容重与土壤孔隙度、渗透率密切相关，并可以反映土壤熟化程度和结构。一般而言，随放牧强度的增大，土壤容重增加，土壤的保水和持水能力下降。

生态状况：退化指示植物指具有指示天然草地质量下降的植物。草甸草原放牧场退化的常见指示植物一般包括冷蒿（*Artemisia frigida*）、糙隐子草（*Cleistogenes squarrosa*）、星毛委陵菜（*Potentilla acaulis*）、二裂委陵菜（*Potentilla bifurca*）、寸草苔（*Carex duriuscula*）、狼毒（*Stellera chamaejasme*）、披针叶黄华（*Thermopsis lanceolata*）等。退化指标植

物比例是一个关键的预警指标，表明草甸草原放牧地处于退化状况，需要同时控制放牧强度和改变管理措施。枯落物量是单位面积地上立枯和地面凋落物的总量。通过枯枝落叶和陈旧腐烂枯落物在地面的覆盖程度，可以判断该生境的水分保持功能。枯落物量高分值意味着水分得到保持，条件有利于水分渗入土壤；低枯落物量分值意味着水分保持能力较差，生境土壤侵蚀加剧。

2.5 指标的测定

2.5.1 指标测定时间和样地样方布设 指标测定时间为草原放牧结束的隔年，当地植物生长旺期，一般在7月20日至8月10日测定。样地设置在有代表性的地段，每个样地代表面积不小于100 hm<sup>2</sup>。采用定位、目视判断和访问调查方法进行描述。样方布设在样地内代表性地段设置样线，沿样线以50 m的间隔布设5—7个样方，样方为1 m<sup>2</sup>。

2.5.2 指标测定的方法 地上现存量：各样方内全部植物按退化指示植物、其他植物分别齐地面剪割，称取鲜重，取500 g装袋，鲜重不足500 g的应全部收获带回，带回的样品经65℃烘干24 h至恒重。按样方数据计算样地单位面积现存量干重。

盖度：样方内分植物种用网格法估测1 m<sup>2</sup>样方内的植物地上部分垂直投影面积占单位面积的百分比。

平均高度：样方内测定从地面至草群顶部的自然高度，每个样方内随机测定7—10次，计算平均值。

植物种数：样方内计数多年生植物，计算平均值。

枯落物量：收集各样方内全部枯落物，称取鲜重，取500 g装入袋内，鲜重不足500 g的应全部收获带回，

带回的样品经65℃烘干24 h至恒重。按样方数据计算样地单位面积枯落物干重。

退化指示植物比例：测定全部植物地上现存量，计算退化指示植物地上现存量占全部植物地上现存量的百分比。

土壤有机碳含量：选择5个样方，植物地上现存量剪割后，将取样面修理平整，用土钻按0—10 cm采集土壤有机碳样品，重复采样10次混合取500 g装入自封袋。土壤有机碳含量测定按HJ 695-2014执行。

土壤容重：按农业行业标准《土壤检测第4部分：土壤容重的测定》进行。

2.6 指标的赋权

在草甸草原放牧退化综合评价中，各指标权重值的高低直接影响着综合评价指数值大小及评价结果，科学地确定各评价指标权重在综合评价中是非常重要的。权重相互独立地反映各指标在不同方面的重要性，权重赋值主要考虑各指标对放牧响应的程度。在草甸草原放牧场退化状况评价中，各指标相对重要性主要从几个方面来考察：一是各指标对放牧响应敏感性；二是指标独立性的多少；三是指标测定值获取的主观性大小；四是指标参数的生态安全阈值。

各评价指标权重确定采用了专家调查、咨询法的方法，充分收集专家的意见，使指标赋权更科学、客观、合理。收集了12位对天然草地资源和草甸草原放牧场生态系统有深入了解的专家意见，让他们各自单独对已经确定的最终的8个指标赋权值，再把专家意见汇集在一起，最后将每个指标权数的平均值进行计算。专家对各评价指标赋权统计分析及汇总见表3。

表3 专家对各价指标赋权分析及汇总  
Table 3 Weighting analysis and summary of each price index by experts

因子 Factor	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	权重平均 Average weight
地上生物量 Above-ground biomass (kg·hm <sup>-2</sup> )	0.2	0.2	0.15	0.15	0.25	0.2	0.2	0.25	0.2	0.2	0.2	0.25	0.20
盖度 Coverage (%)	0.15	0.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.15	0.25	0.15	0.2	0.1	0.15
平均高度 Average height (cm)	0.1	0.15	0.1	0.2	0.1	0.2	0.1	0.05	0.15	0.2	0.2	0.2	0.15
植物种数 Plants species (种/m <sup>2</sup> )	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.10
枯落物量 Amount of litter (kg·hm <sup>-2</sup> )	0.05	0.1	0.1	0.05	0.1	0.05	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.10
退化指示植物比例 Degradation indicates plant proportion (%)	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.05	0.11
土壤有机碳含量 Soil organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	0.1	0.15	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.05	0.05	0.1	0.1	0.05	0.10
土壤容重 Soil bulk (g·cm <sup>-3</sup> )	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.05	0.1	0.1	0.1	0.10



2.7 基准指标参数

基准指标是判断是否退化的可参照指标。理论上基准指标参数应以同类草地的顶级作为基准参数标准。SAMPSON<sup>[26]</sup>将顶级与植物演替理论引入草地研究中，把生态演替的阶段类型与不同类型植被草地的放牧价值联系起来。1935 年，TANSELY<sup>[30]</sup>发表观点，放牧会使草地生态系统出现一个亚顶级，也就是在演替的过程中，由于放牧干扰导致草地植被群落停留在演替过程中的一个阶段，若之后将放牧干扰移除，演替还可以在这个阶段继续按照原来的演替方向进行。DYSTERHUIS<sup>[31]</sup>则认为一种草地类型只会包含一个稳态，可以通过对由于不合理的、过度的放牧导致逆行演替的草地进行适当管理（包括减轻或者禁止放牧等）来使草地得到恢复，另外草地的退化和恢复是途径相同、放牧相反的过程。这是近几年研究关于放牧草地工作的理论基础<sup>[2, 32]</sup>。然而，在草地监测工作中，目前顶级草地难以寻求，因此，基准指标采用历史调查或研究资料，选取草地未退化或接近原生状况出现过的指标最大值，作为评估基准指标的参考最大值。指标参考最大值作为退化评价和监测的基准参数，为不同退化程度的草地提供了比较的基础。因此，基准指标参考最大值的数据来源，采用内蒙古 20 世纪 60 年代和 80 年代草地研究和调查资料、自然保护区及科学研究试验区资料等。草甸草原放牧退化定量评估指标参考最大值（表 4）。

3 草地退化评估

3.1 评估综合指数模型

3.1.1 指标归一化处理 为了消除不同指标间量纲

表 4 草甸草原放牧退化定量评估指标参考最大值  
Table 4 The maximum reference value of quantitative evaluation index of grazing degradation in meadow grassland

指标 Factor	评估指标参考最大值 (A <sub>xn</sub> )
地上现存量 Aboveground stock (kg·hm <sup>-2</sup> )	3400
盖度 Coverage (%)	87
平均高度 Average height (cm)	75
植物种数 Plants species (种/m <sup>2</sup> )	50
枯落物量 Amount of litter (kg·hm <sup>-2</sup> )	2600
退化指示植物比例 Degradation indicates plant proportion (%)	90
土壤有机碳含量 Soil organic carbon (g·kg <sup>-1</sup> )	45
土壤容重 Soil bulk (g·cm <sup>-3</sup> )	1.35

的差异，需要对指标值作标准化处理，将不同量纲的指标通过适当的变换，为无量纲的标准化指标。

指标归一化处理：归一化后的指标=归一化前指标×归一化系数。其中：归一化系数=100/A<sub>xn</sub>，n=1,2,...,8。A<sub>xn</sub> 为被计算指标归一化处理前的各指标参考最大值。各指标的 A<sub>xn</sub> 见本标准（表 4）。

3.1.2 综合指数模型 依据统计学加权方法进行指数综合，加法合成一般适用于各评价指标之间相对独立的场合。草甸草原放牧退化定量评估的综合指数按式（1）计算。

$$EI=0.2X_1(100/A_{X1})+0.15X_2(100/A_{X2})+0.15X_3(100/A_{X3})+0.1X_4(100/A_{X4})+0.1X_5(100/A_{X5})+0.1[100-X_6(100/A_{X6})]+0.1X_7(100/A_{X7})+0.1[100-X_8(100/A_{X8})]$$
（1）

式中：EI—综合指数；X<sub>1</sub>—地上现存量测定值；X<sub>2</sub>—盖度测定值；X<sub>3</sub>—平均高度测定值；X<sub>4</sub>—多年生物种数；X<sub>5</sub>—枯落物量测定值；X<sub>6</sub>—退化指示植物比例；X<sub>7</sub>—土壤有机碳含量测定值；X<sub>8</sub>—土壤容重测定值；A<sub>xn</sub>—各指标参考最大值（表 1）。

3.2 退化程度分级

草甸草原退化程度分级的主要依据是通过国家重点研发“北方草甸退化草地治理技术与示范”项目试验相关研究成果进行总结归纳，参考相关资料，综合分析了草甸草原退化的植被和土壤的特征，确定了草甸草原退化程度的技术指标及技术方法。评价指标和标准力求简洁、准确，可操作性强。评价的技术和方法，既要有前瞻性，也要考虑目前草原监测和管理的技术水平。最终将草甸草原的退化程度划分成四级，分别为未退化、轻度退化、中度退化、重度退化。退化程度分级，草甸草原放牧退化程度分级见表 5。

3.3 评估指标体系的验证

在内蒙古呼伦贝尔草原生态系统国家野外科学观测研究站进行控制放牧试验，试验设计不放牧（0）为未退化；轻度放牧（23%—34%）为轻度退化；中度放牧（46%）为中度退化；重度放牧（69%—92%）为

表 5 草甸草原放牧退化程度分级  
Table 5 Grazing degradation degree of meadow grassland

退化程度分级 Grade of degradation	综合指标指数 (EI)
未退化 No degradation	EI≥65
轻度退化 Mild degradation	50≤EI <65
中度退化 Moderate degradation	35≤EI <50
重度退化 heavy degradation	EI <35

重度退化,草地退化程度随着放牧强度的加重而增加已被许多人研究而证明。利用 2013—2018 年草甸草原放牧强度的野外调查 67 个样地 141 个样方资料,对指标参数以及评估方法进行精度检验,结果显示正确率在 91.17%。试验放牧强度与综合指数相关性见图 2。当放牧等于零或很轻的放牧状态时,综合指标指数为  $50 \leq EI < 65$ ,属于未退化草地范围。当放牧在 90% 以上时的放牧状态,综合指标指数为  $EI < 35$ ,属于重度退化草地范围。

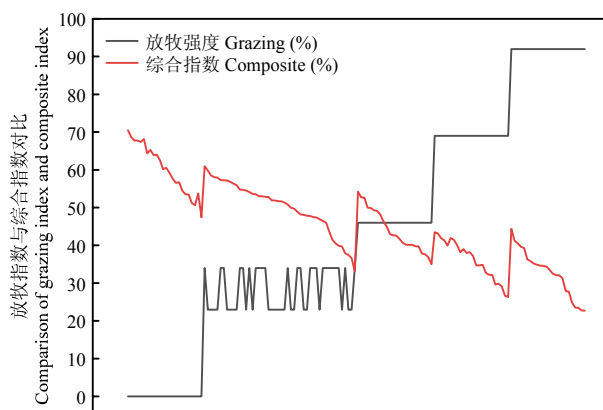


图 2 试验放牧强度与综合指数相关性

Fig. 2 Correlation between experimental grazing intensity and comprehensive index

## 4 讨论

依据内蒙古草甸草原放牧场评价指标体系构建的原则,基于频度法确立了基础指标的范围,经计算得到一致性指标,  $C_i=0.03$ , 均值小于 0.10, 表明所建判断矩阵均具有满意的一致性,其权重排序可以作为最终决策依据。依据研究结果看出,将指标权重  $\geq 0.052$  的 9 个指标作为备选指标,其中可食草种占总量比例和土壤容重增加比例均  $=0.052$ , 鉴于指标筛选的代表性,征求有关专家的意见,认为保留土壤容重增加比例为土壤状况准则层之一更加科学,故应排除可食草种占总量比例指标。研究结果得出内蒙古草甸草原放牧场评价指标体系应包括 8 项,按着指标权重由大到小依次为地上生物量、盖度、平均高度、退化指示植物比例、植物种数、枯落物量、土壤有机碳含量、土壤容重增加比例(表 2)。依据指标的敏感性、独立性、主观性、生态安全阈值,采纳了 12 位专家对指标赋权值(表 3)。评估指标参考最大值( $A_{xn}$ )来源

于历史数据(表 4)。采用综合指数法,建立了内蒙古草甸草原放牧退化定量评估的综合指数计算公式(EI)。

经相关数据的总结和归纳,将草甸草原退化分级为未退化、轻度退化、中度退化、重度退化四个等级(表 5)。当  $EI \geq 65$  时,为未退化,表明当前的放牧水平和管理是一种肯定的,是可持续的;当  $50 \leq EI < 65$  时,为轻度退化,说明放牧生产力和生态环境无明显变化,可以自然恢复,实施合理放牧对策;当  $35 \leq EI < 50$  时,为中度退化,放牧生产力和生态环境发生明显变化,自然恢复力弱,实施降低放牧强度的对策;当  $EI < 35$  时,为重度退化,草地生产力和生态环境发生根本性变化,不能自然恢复,必须进行重大的管理改进,实施禁牧或培育对策。

## 5 结论

内蒙古草甸草原放牧场退化定量评估指标体系的精度检验数据来源于放牧控制试验,正确率达到 91.17%。该评估指标体系应具有一定的可操作性、合理性和科学性,为我国草甸草原放牧场退化评价体系的构建和区域各类草地放牧场退化评估体系的构建奠定了重要基础。

本研究虽然从理论和实践层面上展开的,由于收集的历史调查和科学试验数据可能存在一定的局限性,需要在长期的探讨和实践研究中,对基准参考值做进一步的完善和更新。内蒙古草甸草原放牧场生态系统结构复杂,不同群落特征及其生态条件各异。因此,在今后的研究和应用中,内蒙古草甸草原放牧场退化评估指标体系需要长期的实践验证,有利于更加完善和成熟。

## 参考文献 References

- [1] 于丰源,秦洁,靳宇曦,韩梦琪,王舒新,康静,韩国栋.放牧强度对草甸草原植物群落特征的影响.草原与草业,2018(2): 31-37.  
YU F Y, QIN J, JIN Y X, HAN M Q, WANG S X, KANG J, HAN G D. Effect of grazing intensity on vegetation plant community characteristic of meadow steppe. Grassland and Prataculture, 2018(2): 31-37.(in Chinese)
- [2] 孙海群,周禾,王培.草地退化演替研究进展.中国草地,1999, 21(1): 51-56.  
SUN H Q, ZHOU H, WANG P. Progress on grassland degenerated succession. Grassland of China, 1999, 21(1): 51-56.(in Chinese)
- [3] 萧运峰,李世英.羊草草原放牧退化演替及其退化原因分析.中国

- 草原,1980(3):20-27.
- XIAO Y F, LI S Y. Analysis on the degradation succession of *Leymus chinensis* grassland and its causes. Chinese Grassland, 1980(3): 20-27. (in Chinese)
- [4] 周丽艳, 王明玖, 韩国栋. 不同强度放牧对贝加尔针茅草原群落和土壤理化性质的影响. 干旱区资源与环境, 2005(S1): 182-187.
- ZHOU L Y, WANG M J, HAN G D. Effects of different grazing intensities on community and soil physical and chemical characteristics in *Stipa baicalensis* steppe. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005(S1): 182-187.(in Chinese)
- [5] 潘学清, 李章春, 吕新龙. 呼伦贝尔主要天然草场生产力和放牧演替规律的初步研究. 中国草原, 1987(3):36-40.
- PAN X Q, LI Z C, LÜ X L. Preliminary study on productivity and Succession law of main natural grassland in Hulun Buir. China's Grasslands, 1987(3):36-40.(in Chinese)
- [6] 郝敦元, 刘钟龄, 王炜, 梁存柱. 内蒙古草原退化群落恢复演替的研究: 群落演替的数学模型. 植物生态学报, 1997(6): 503-511.
- HAO D Y, LIU Z L, WANG W, LIANG C Z. Research on the restoring succession of the degenerated grassland in Inner Mongolia iii A mathematical model for plant community succession. Acta Phytocologica Sinica, 1997(6): 503-511.(in Chinese)
- [7] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 1997(6): 1-9.
- LI B. The rangeland degradation in North China and its preventive strategy. Scientia Agricultura Sinica, 1997(6): 1-9.(in Chinese)
- [8] 孙海群, 周禾, 王培. 草地退化演替研究进展. 中国草地, 1999(1): 51-56.
- SUN H Q, ZHOU H, WANG P. Progress on grassland degenerated succession. Grassland of China, 1999(1): 51-56.(in Chinese)
- [9] 蒙旭辉, 李向林, 辛晓平, 周尧治. 不同放牧强度下羊草草甸草原群落特征及多样性分析. 草地学报, 2009, 17(2): 239-244.
- MENG X H, LI X L, XIN X P, ZHOU Y Z. Study on community characteristics and  $\alpha$  diversity under different grazing intensity on *Leymus chinensis*(trin.)Tzvel.Meadow steppe of Hulunbeier. Acta Agrectir Sinica, 2009, 17(2): 239-244.(in Chinese)
- [10] 李永宏, 汪诗平. 放牧对草原植物的影响. 中国草地, 1999, 21(3): 11-19.
- LI Y H, WANG S P. Response of plant and plant community to different stocking rates. Grassland of China, 1999, 21(3): 11-19.(in Chinese)
- [11] 乌仁其其格, 武晓东, 闫瑞瑞. 呼伦贝尔草甸草原羊草群落不同退化程度土壤理化指标. 干旱区资源与环境, 2009(9):123-127.
- WURENQIQIGE, WU X D, YAN R R. Studies on the physical and chemical indicators of soil under different degree of degradation in *Leymus chinensis* community of Hulunbuir meadow steppe. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009(9):123-127.(in Chinese)
- [12] 刘兴元, 龙瑞军, 尚占环. 草地生态系统服务功能及其价值评估方法研究. 草业学报, 2011(1): 167-174.
- LIU X Y, LONG R J, SHANG Z H. Evaluation method of ecological services function and their value for grassland ecosystems. Acta Prataculturae Sinica, 2011(1): 167-174.(in Chinese)
- [13] 张志强, 徐中民, 程国栋. 生态系统服务与自然资本价值评估. 生态学报, 2001(11): 1918-1926.
- ZHANG Z Q, XU Z M, CHENG G D. Valuation of ecosystem services and natural capital. Acta Ecologica Sinica, 2001(11): 1918-1926. (in Chinese)
- [14] 傅伯杰, 刘世梁, 马克明. 生态系统综合评价的内容与方法. 生态学报, 2001(11): 1885-1892.
- FU B J, LIU S L, MA K M. The contents and methods of integrated ecosystem assessment (IEA). Acta Ecologica Sinica, 2001(11): 1885-1892.(in Chinese)
- [15] 陈仲新, 张新时. 中国生态系统效益的价值. 科学通报, 2000, 45(1): 17-22.
- CHEN Z X, ZHANG X S. The value of ecosystem benefits in China. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(1): 17-22.(in Chinese)
- [16] XU L J, SHEN B B, NIE Y Y, XIN X P, GAO W, LI D, WANG D, YAN R R, CHEN B R. Degradation classification of natural grazing land in semi-arid pastoral areas in northern China. Journal of Resources and Ecology, 2019(2): 163-173.
- [17] 唐善茂, 张瑞梅. 区域旅游可持续发展评价指标体系构建思路探讨. 桂林工学院学报, 2006, 26(1): 143-147.
- TANG S M, ZHANG R M. Establishment and evaluation of index system for sustainable development of regional tourism. Journal of Guilin University of Technology, 2006, 26(1): 143-147.(in Chinese)
- [18] 尹剑慧, 卢欣石. 中国草原生态功能评价指标体系. 生态学报, 2009, 29(5): 2622-2630.
- YIN J H, LU X S. Construction of evaluation indicator system of China grassland ecological function. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2622-2630.(in Chinese)
- [19] 单贵莲, 徐柱, 宁发. 草地生态系统健康评价的研究进展与发展趋势. 中国草地学报, 2008, 30(2): 98-103, 115.
- SHAN G L, XU Z, NING F. Study progresses and development directions in grassland ecosystem health evaluation. Chinese Journal of Grassland, 2008, 30(2): 98-103, 115. (in Chinese)
- [20] 任继周. 草地资源的属性、结构与健康评价. 中国草地科学进展: 第四届第二次年会暨学术讨论会文集, 1996.

- REN J Z. Attribute, structure and health evaluation of grassland resources//Advances in Grassland Science in China: Proceedings of the 4th 2nd Annual Conference and Symposium, 1996. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 中国标准书号 GB/T 5795—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. China STANDARD book numbering. GB/T 5795—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004. (in Chinese)
- [22] 《内蒙古草地资源》编委会. 内蒙古草地资源. 呼和浩特: 内蒙古人民出版社, 1990.
- Editorial Board of Inner Mongolia Grassland Resources. Inner Mongolia Grassland Resources. Hohhot: Inner Mongolia People's Publishing House, 1990. (in Chinese)
- [23] 吴波, 苏志珠, 杨晓晖, 刘文, 鞠洪波, 刘燕. 荒漠化监测与评价指标体系框架. 林业科学研究, 2005, 18(4): 490-496.
- WU B, SU Z Z, YANG X H, LIU W, JU H B, LIU Y. A framework of indicator system for desertification monitoring and evaluation. Forest Research, 2005, 18(4): 490-496.(in Chinese)
- [24] 刘玉平. 荒漠化评价的理论框架. 干旱区资源与环境, 1998(3): 74-82.
- LIU Y P. Theoretic framework for desertification assessment. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998(3): 74-82.(in Chinese)
- [25] 党普兴, 侯晓巍, 惠刚盈, 赵中华. 区域森林资源质量综合评价指标体系和评价方法. 林业科学研究, 2008, 21(1): 84-90.
- DANG P X, HOU X W, HUI G Y, ZHAO Z H. Evaluation indicator system and evaluation method of regional forest resource quality. Forest Research, 2008, 21(1): 84-90.(in Chinese)
- [26] SAMPSON A W. Plant succession in relation to range management. Ieice Transactions on Communications, 1919, 89-B(12):3425-3427.
- [27] 陈结平. 基于水质净化及环境景观的焦岗湖水生植物优化配置研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
- CHEN J P. Research on optimal allocation of aquatic plants in Jiaogang Lake based on water quality purification and environmental landscape[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [28] 王东波, 陈丽. 土壤有机碳及其影响因素. 黑龙江科技信息, 2015(27): 126.
- WANG D B, CHEN L. Soil organic carbon and its influencing factors. Heilongjiang Science and Technology Information, 2015(27): 126.(in Chinese)
- [29] 阿穆拉, 赵萌莉, 韩国栋, 贾乐, 董亭. 放牧强度对荒漠草原地区土壤有机碳及全氮含量的影响. 中国草地学报, 2011, 33(3): 115-118.
- AMULA, ZHAO M L, HAN G D, JIA L, DONG T. Influences of grazing intensity on carbon and nitrogen contents in desert steppe. Chinese Journal of Grassland, 2011, 33(3): 115-118.(in Chinese)
- [30] TANSLEY A G. The use and abuse of vegetational concepts and terms. Ecology, 1935, 16: 284-307.
- [31] DYSTERHUIS E J. Condition and management of range land based on quantitative ecology. Journal of Range Management, 1949, 2(3): 104-115.
- [32] ANDERSON T W. An Introduction to Multivariate Statistical Analysis. 2nd ed. New York: Wiley-Interscience, 1984.

(责任编辑 林鉴非)