

高寒草甸健康评价方法的研究与应用

李帅¹, 花立民², 杨思维^{3,4}

(1. 四川开放大学, 四川 成都 610000; 2. 甘肃农业大学草业学院, 国家林业草原高寒草地鼠害防控工程技术研究中心, 甘肃 兰州 730070 3. 四川省草原科学研究院, 青藏高原高寒草地生态修复工程技术研究中心/色达草地生态四川省野外科学观测研究站, 四川 成都 611731; 4. 毕节市畜牧兽医科学研究所, 四川 毕节 551700)

摘要:本研究以服务于基层草地管理者及牧民为目标, 研发科学、便捷、实用的高寒草甸健康评价方法。以甘肃省天祝县高寒草甸区为例, 选择5块不同放牧强度的草地, 进行健康状况评价。选取反映高寒草甸健康状况的生态指标(总盖度、群落层片结构和风蚀/水蚀状况)以及生产指标(总产草量、可食牧草比例和新鼠丘/鼠洞密度), 并利用层次分析法和数据包络分析法计算指标权重组, 运用灰色关联度法构造出最优指标集合。分别采用目测法、步测法、干重排序法等获得相应指标数据。结果表明: 各指标权重为总盖度(0.232)、群落层片结构(0.341)、风蚀/水蚀(0.277)、总产草量(0.103)、可食牧草比例(0.037)、新鼠丘/鼠洞密度(0.011); 5块不同放牧强度草地(A₁—A₅)健康评价结果为: A₁亚健康(68分)、A₂健康(80分)、A₃亚健康(79分)、A₄亚健康(74分)、A₅警告(55分)。本研究研发的草地健康评分表便于基层草地管理者及牧民对拟监测的高寒草甸健康状况进行监测评价。

关键词:高寒草甸; 健康评价; 指标

中图分类号:S812.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)02-0001-10

DOI: 10.13817/j.cnki.cyycp.2022.02.001



我国高寒草甸面积辽阔, 约占全国草地总面积的22.1%, 是面积最大的一个草地类型^[1]。近些年由于气候变暖, 加上不合理的草地利用, 导致高寒草甸生态系统严重受损, 草地健康水平日趋恶化, 严重影响到高寒草甸区生态、生产安全和社会经济的可持续发

展^[2]。草地健康状况评价是判断草地生态系统服务功能是否正常的重要手段。通过草地健康评价, 可及时准确地反映草地生态系统的变化, 对于科学地管理草地, 发展草地畜牧业以及保护生态都具有重要的指导意义。

国内对于草地健康评价的研究起步较晚, 草地健康概念传入国内之初, 许多学者对此展开了具有一定研究价值的工作, 为后续的研究奠定了理论基础^[3]。1997年, 李博^[4]在草地类型演替的基础上, 以轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化4个等级权衡了草地退化水平, 并根据不同的植被类型、地上生物量及植被覆盖情况提出了中国北方草地退化分级指标体系。2000年, 任继周^[5]将基况加入到评价指数中, 形成了CVOR综合指数模型, 更加全面地在评价草地健康状况。2005年, 高安社^[6]对不同放牧强度下草原生态系统健康诸因子进行分析研究, 确立了7个健康指标, 即: 草群产量、草群盖度、建群种羊草地上净生产量、5月凋落物量、土壤全磷、土壤有机质、0~20 cm土壤中

收稿日期:2021-07-31; **修回日期:**2021-09-08

基金项目:四川省公益性科研院所基本科研业务费项目; 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2019]2857号); 甘肃省教育厅产业支持计划项目(2021CYZC-05)

作者简介:李帅(1991-), 辽宁阜新人, 硕士, 研究实习员, 研究方向为草地生态。

E-mail: lishuai9255@163.com

花立民为通信作者。

E-mail: huaim@gsau.edu.cn

杨思维为通信作者。

E-mail: yangsiwei@photo@163.com

>0.05 mm 沙砾含量倒数指标。2008 年,草地健康评价国家标准^[7]选取水文、生物、土壤 3 大类 12 个具体的指标。然而,其中有难以测定且过于专业的指标,无法满足基层草地管理者和牧民实际操作过程中的需要^[8]。因此,有必要在高寒草甸区开发一种科学合理、快速准确,且适用于基层人员实地操作的草地健康评价方法,为监测草地健康状况、保护和合理利用草地资源提供科学的评判标准和理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

本研究试验地选址在甘肃省天祝县抓喜秀龙乡,位于青藏高原祁连山东段高寒草甸区。地理坐标为 N 37°11', E 102°32'。该地平均海拔 2 700~3 100 m,年均降水量 416 mm,主要集中在 7、8、9 月,年蒸发量 1 592 mm,无绝对无霜期,年均气温 - 0.1 °C, 7 月和 1 月平均气温分别为 12.7 和 -18.3 °C, ≥0 °C 的年积温为 1 380 °C,植物生长期 120~140 d。属于大陆性高寒半湿润山地气候,土壤以亚高山黑钙土、亚高山草甸土等为主。放牧方式为夏、冬季节性轮牧,以藏羊、藏牦牛为主^[9]。该地区植物优势种为矮嵩草(*Kobresia humilis*)、线叶嵩草(*K. capilli folia*)、草地早熟禾(*Poa pratensis*)、珠芽蓼(*Polygonum viviparum*)、车前(*Plantago asiatica*)等。其中有毒植物共计 18 科、32 属、61 种,常见种为翻白委陵菜(*Potentilla discolor*)、高山韭(*Allium sikkimense*)、黄芪(*Astragalus membranaceus*)、甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)、乌头(*Aconitum carmichaeli*)、银莲花(*Anemone cathayensis*)、狼毒(*Stellera chamaejasme*)^[10]。

1.2 试验设计

1.2.1 样地设置 在研究区内选取 5 块不同放牧强度的草地作为试验样地。每个样地面积均超过 1 hm²,皆为二级阶地。样地依次标记为 A₁、A₂、A₃、A₄、A₅,放牧强度从小至大依次为 A₃ < A₄ < A₂ < A₅ < A₁(表 1)。

1.2.2 筛选指标 筛选指标遵循代表性强、易获取、相对重叠小、定性与定量指标相结合、生态与生产功能相兼顾的原则^[11-12]。最终筛选出总盖度(coverage)、群落层片结构(community layer structure)、风蚀/水蚀(soilerosion)、总产量(total yield)、可食牧草比例

表 1 样地设计

Table 1 Design of sample sites

样地编号	样地面积/ hm ²	放养羊数/只	放牧强度/ (只·hm ⁻²)
A ₃	2.18	6	2.75
A ₄	1.10	4	3.63
A ₂	1.61	7	4.36
A ₅	1.26	6	4.78
A ₁	2.50	13	5.19

(edible forage biomass)、新鼠丘/鼠洞密度(new mounds or holes)6 项指标^[13-14]。其中,生态指标包括总盖度、群落层片结构、风蚀/水蚀 3 项指标;生产指标包括总产量、可食牧草比例、新鼠丘/鼠洞密度 3 项指标。指标中总盖度、总产量、可食牧草比例为定量指标;群落层片结构、风蚀/水蚀、新鼠丘/鼠洞密度为定性指标。全部指标都可通过目测、步测、干重排序法(Dry-Weight Rank, DWR)直接获得^[15]。由此,形成高寒草甸健康评价指标体系(图 1)。其中:B 层为一级指标层,包括生态指标和生产指标;C 层为二级指标层。

1.2.3 指标权重计算 为排除人为主观因素影响指标权重赋值,本研究采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)与数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA)相结合的方式计算高寒草甸健康评价指标综合权重组^[16-17],运用灰色关联度法(Grey Relational Analysis, GRA)构造最优指标集合模拟生态对照区,与对照相比趋势相似程度最高的一组确定为最优指标权重。

(1)基于 AHP 法构造判断矩阵 构造判断矩阵是本层次与上层次因素之间相对重要性的比较。为了使决策判断量化,本研究采用 1~9 标度法。首先邀请在高寒草甸区从事科研、技术推广和生产工作多年的 9 位专家对 B 层、C 层指标分别在层内做 1~9 度指标相对重要打分,打分规则为前一项与后一项指标相比较;同等重要,其权重取 1;稍重要取 3;明显重要取 5;很重要取 7;绝对重要取 9。由此构造出比较判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{n \times n}$$

(2)计算指标权重值 本研究采用和法计算判断矩阵的最大特征值及其对应的特征向量。

(3)一致性检验 比较判断矩阵是通过专家组对各指标进行比较得到的,凭经验形成的矩阵与理论比

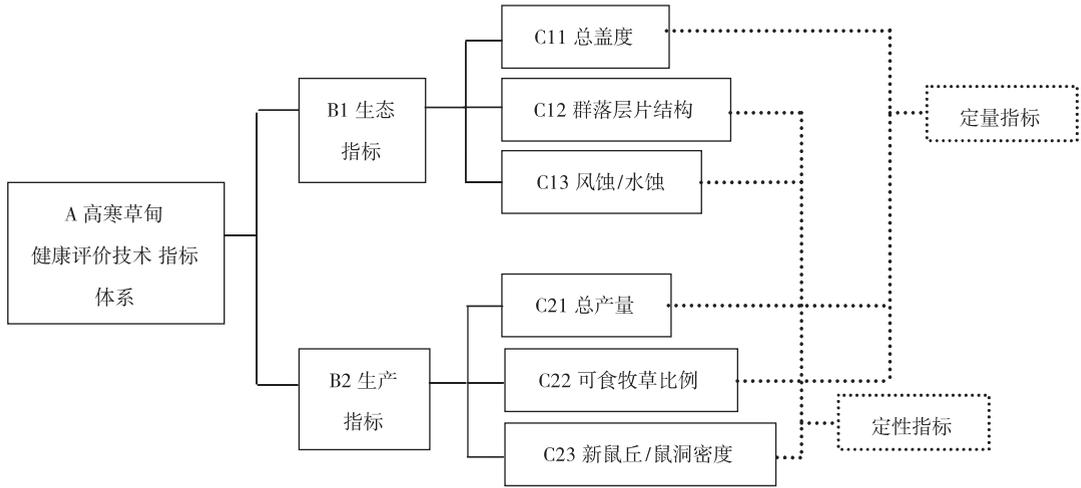


图 1 高寒草甸健康评价指标体系

Figure 1 The indicator system of healthy assessment of alpine meadow

较矩阵有误差,为了降低这种误差,计算比较矩阵的最大特征值 λ_{max} ,并与阶数 n 的相对误差作为比较矩阵的一致性指标,即 CI 。

①计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max}

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{A(\omega)_i}{\omega_i}$$

②计算一致性指标 CI

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

③计算随机一致性比率 CR

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

(4)基于 DEA 法构建 C^2R 模型,可得到如下线性规划模型:

$$\begin{aligned} \max \quad & h_{io} = \sum_{t=1}^q u_t y_{ti} \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{s=1}^p v_s X_{si} - \sum_{t=1}^q u_t y_{ti} \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, \\ & m \end{aligned}$$

$$\sum_{s=1}^p v_s X_{sio} = 1$$

$$V = (v_1, v_2, \dots, v_s, \dots, v_p)^T$$

$$U = (u_1, u_2, \dots, u_t, \dots, u_q)^T$$

(5)无量纲化处理 本研究所采用处理方法为线性比例法。求解上述线性规划模型即可得到各指标相应的权重,将其进行归一化处理,最终可得到:

$$W_i = (v'_1, v'_2, \dots, v'_s, \dots, v'_p, u'_1, u'_2, \dots, u'_t, \dots, u'_q)^T$$

(6)计算综合权重:

$$W_i^* = \alpha W + (1 - \alpha) W_i = [W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*]^T$$

式中, W_i^* 为第 i 个评价指标的综合权重, α 为主观偏好系数, $1 - \alpha$ 为客观偏好系数, $\alpha \in [0, 1]$, α 具体由决策者根据偏好给出,由此得出综合权重组。

(7)基于 AHP 法和 DEA 法的 GRA 法分析模型确定最优方案指标集

最优方案指标集 $D_0 = (d_{01}, d_{02}, \dots, d_{0n})$, 式中 d_{0j} ($j = 1, 2, \dots, n$) 为第 j 个指标的最优值。选定最优指标集后,可构造矩阵 G :

$$G = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ \vdots \\ D_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{01} & d_{02} & \dots & d_{0n} \\ d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \ddots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{2mn} \end{bmatrix}$$

(8)指标值的规范化处理 由于评价指标量纲和数量级不同,因此不能直接进行比较,需要对矩阵 G 进行规范化处理,本文采用极值处理法得到矩阵 H 。

$$H = \begin{bmatrix} D_0^* \\ D_1^* \\ D_2^* \\ \vdots \\ D_m^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{01}^* & d_{02}^* & \dots & d_{0n}^* \\ d_{11}^* & d_{12}^* & \dots & d_{1n}^* \\ d_{21}^* & d_{22}^* & \ddots & d_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ d_{m1}^* & d_{m2}^* & \dots & d_{2mn}^* \end{bmatrix}$$

(9)关联系数矩阵的确定 可得第 i 个方案的第 j 的指标与第 j 个最优指标的关联系数 ϵ_{ij} :

$$\epsilon_{ij} = \frac{\min_i \min_j |d_{ij}^* - d_{0j}^*| + \rho \max_i \max_j |d_{ij}^* - d_{0j}^*|}{|d_{ij}^* - d_{0j}^*| + \rho \max_i \max_j |d_{ij}^* - d_{0j}^*|}$$

式中, ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$, 一般 $\rho = 0.5$ 。由 ϵ_{ij} 可得关联系数矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \cdots & \epsilon_{1n} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \ddots & \epsilon_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \epsilon_{m1} & \epsilon_{m2} & \cdots & \epsilon_{mn} \end{bmatrix}$$

(10) 灰色关联度的确定 根据关联系数行向量 E_i 和指标权重向量 W_i^* , 可求得各方案的关联度 R_i ($i = 1, 2, \dots, m$)。

$$R_i = E_i \times W_i^* = [\epsilon_{i1}, \epsilon_{i2}, \dots, \epsilon_{in}] \times \begin{bmatrix} W_1^* \\ W_2^* \\ \vdots \\ W_n^* \end{bmatrix}$$

关联度 R_i 越大, 方案集 D_i 与最优指标集 D_0 越接近, 说明两个因素变化趋势相似程度越高, 由此可得出最优指标权重组合, 并将这一组合确定为高寒草甸健康评价方法最终指标权重。

1.2.4 指标分级标准 指标分级标准参照国家草地健康状况评价标准^[17], 所有指标均采用百分制赋分。定量化指标至少设置四级标准, 每一级都说明具体评分规则与得分标准; 定性化指标设置九级标准, 每一级之间相对重叠小, 且无需实验室分析与计算, 仅通过目测即可获得指标分值。

1.2.5 健康评价评分表 综合评价指标、权重、分级

标准形成可视化评价评分表, 共划分四个评价等级, 详见表 2。

表 2 健康评价等级表

Table 2 Score table of healthy assessment

健康评价	100~80 分	79~60 分	59~50 分	50 分以下
	健康	亚健康	警告	崩溃临界

评价最终总得分计算公式如下:

$$\text{总得分 Total Scores} = \sum_{i=1}^6 s \times q$$

式中: s 为指标现场打分; q 为指标综合权重。

2 结果与分析

2.1 健康评价指标得分一致性检验结果

将样地 $A_1 - A_5$ 的 6 项指标原始数据依照指标换算规则得到各项指标评分(表 3)。

经计算, 生态层的一致性比率为 $0.037 < 0.1$, 生产层一致性比率为 $0.073 < 0.1$, 说明判断矩阵 $A(C_1)$ 与 $A(C_2)$ 具有满意的一致性。

2.2 基于 AHP 健康评价的指标权重结果

依据 9 位专家打分, 可得高寒草甸生态功能与生产功能的重要性比值为 $7:3$, 且专家认为 C 层中指标重要性依次为: 总盖度 > 总产量 > 群落层片结果 > 风蚀/水蚀 > 可食牧草比例 > 新鼠丘/鼠洞密度(表 4)。

表 3 健康评价指标得分

Table 3 Score of index of healthy assessment method

评价样地	总盖度 (C_{11})	群落层片 结构(C_{12})	风蚀/水蚀 (C_{13})	总产量 (C_{21})	可食牧草比例 (C_{22})	新鼠丘/鼠洞 密度(C_{23})
A_1	96	50	60	68	99	90
A_2	95	70	80	68	98	80
A_3	86	80	70	76	97	70
A_4	82	80	60	64	95	70
A_5	76	40	50	54	97	60

表 4 AHP 指标权重值

Table 4 Value of weight of AHP

评价指标	B 层各元素权重		C 层各元素总权重
	生态 0.700	生产 0.300	
C_{11} 总盖度	0.586		0.410
C_{12} 群落层片结构	0.291		0.204
C_{13} 风蚀/水蚀	0.123		0.086
C_{21} 总产量		0.686	0.206
C_{22} 可食牧草比例		0.243	0.073
C_{23} 新鼠丘/鼠洞密度		0.071	0.021

2.3 基于 DEA 健康评价的指标权重结果

健康评价的 6 项指标中,总盖度(u_1)、群落层片结构(u_2)、总产量(u_3)及可食牧草比例(u_4)为取值越大越好的指标,可作为输出指标;风蚀/水蚀(v_1)与新鼠丘/鼠洞密度(v_2)为取值越小越好的指标,可作为输入指标。在建立模型之前首先对原始数据进行无量纲化处理,可得到矩阵 B:

$$B = \begin{bmatrix} 1.000 & 0.625 & 0.750 & 0.833 & 1.000 & 1.000 \\ 0.990 & 0.875 & 1.000 & 0.833 & 0.990 & 0.889 \\ 0.896 & 1.000 & 0.845 & 1.000 & 0.980 & 0.778 \\ 0.792 & 0.500 & 0.625 & 0.417 & 0.980 & 0.667 \end{bmatrix}$$

针对方案 A_1 ,可建立如下模型:

$$\max h_1 = u_1 + 0.625u_2 + 0.833u_3 + u_4$$

$$\begin{aligned} s. t. & 0.750v_1 + v_2 - u_1 - 0.625u_2 - 0.833u_3 - u_4 \geq 0 \\ & v_1 + 0.889v_2 - 0.990u_1 - 0.875u_2 - 0.833u_3 - \\ & 0.990u_4 \geq 0 \\ & 0.875v_1 + 0.778v_2 - 0.896u_1 - u_2 - u_3 - 0.980u_4 \\ & \geq 0 \\ & 0.750v_1 + 0.778v_2 - 0.854u_1 - u_2 - 0.750u_3 - \\ & 0.960u_4 \geq 0 \\ & 0.625v_1 + 0.667v_2 - 0.792u_1 - 0.500u_2 - \\ & 0.417u_3 - 0.980u_4 \geq 0 \\ & 0.750v_1 + v_2 = 1 \\ & V = (v_1, v_2)^T \geq 0 \\ & U = (u_1, u_2, u_3, u_4)^T \geq 0 \end{aligned}$$

通过 Excel 的非线性 GRG 规划求解,可得到 DEA 理论最优解指标权重值(表 5)。

表 5 DEA 指标权重值

Table 5 Value of weight of DEA

评价指标	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
C_{11} 总盖度	0.423	0.053	0.108	0.239	0.266
C_{12} 群落层片结构	0.106	0.479	0.424	0.287	0.261
C_{13} 风蚀/水蚀	0.182	0.469	0.424	0.402	0.340
C_{21} 总产量	0.289	0	0.006	0.050	0.071
C_{22} 可食牧草比例	0	0	0.039	0.022	0.061
C_{23} 新鼠丘/鼠洞密度	0	0	0	0	0

2.4 健康评价综合权重重组结果

在确定综合权重时,定义主观偏好系数 $\alpha = 0.5$, 可得 $W_i^* = \alpha W + (1-\alpha) W_i = 0.5W + 0.5W_i$ 。

将 AHP 方法得到的指标权重结果与 DEA 方法得到的最优解各占 0.5 的比例得到指标的综合权重重组(表 6)。

表 6 指标综合权重

Table 6 Value of comprehensive weight

评价指标	综合权重				
	W_1^*	W_2^*	W_3^*	W_4^*	W_5^*
C_{11} 总盖度	0.417	0.232	0.259	0.324	0.338
C_{12} 群落层片结构	0.155	0.341	0.314	0.246	0.233
C_{13} 风蚀/水蚀	0.134	0.277	0.255	0.244	0.213
C_{21} 总产量	0.248	0.103	0.106	0.128	0.138
C_{22} 可食牧草比例	0.037	0.037	0.056	0.048	0.067
C_{23} 新鼠丘/鼠洞密度	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011

2.5 灰色关联度分析结果

根据 $A_1 - A_5$ 样地原始数据,筛选出各项指标相对最优值组成最优方案指标集,即盖度 96%,层片结构 8 级,风蚀/水蚀 2 级,总产量 2 400 kg/hm²,可食牧草比例 99%,新鼠丘/鼠洞密度 1 级,得到 $D_0 = (96, 8, 2, 2400, 99, 1)$,进一步构造出矩阵 G:

$$G = \begin{bmatrix} D_0 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \\ D_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 96 & 8 & 2 & 2400 & 99 & 1 \\ 96 & 5 & 4 & 2000 & 99 & 1 \\ 95 & 7 & 2 & 2000 & 98 & 2 \\ 86 & 8 & 3 & 2400 & 97 & 3 \\ 82 & 8 & 4 & 1500 & 95 & 3 \\ 76 & 4 & 5 & 1000 & 97 & 4 \end{bmatrix}$$

采用极值法对矩阵 G 进行规范化处理。健康评价的 6 项指标中,总盖度(C_{11})、群落层片结构(C_{12})、总产量(C_{21})、可食牧草比例(C_{22})为取值越大越好的指标,即为极大型指标;风蚀/水蚀(C_{13})、新鼠丘/鼠洞密度(C_{23})为取值越小越好的指标,所以为极小型指标。将不同指标带入不同的极值法公式中,得到标准化矩阵 H :

$H =$

$$\begin{bmatrix} 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 & 1.000 \\ 1.000 & 0.250 & 0.333 & 0.814 & 1.000 & 1.000 \\ 0.950 & 0.750 & 1.000 & 0.714 & 0.747 & 0.667 \\ 0.499 & 1.000 & 0.667 & 1.000 & 0.495 & 0.333 \\ 0.299 & 1.000 & 0.333 & 0.571 & 0.000 & 0.333 \\ 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.000 & 0.495 & 0.000 \end{bmatrix}$$

本研究将 ρ 定义为 0.5。因此,求得第 i 个方案的第 j 的指标与第 j 个最优指标的关联系数 ϵ_{ij} :

$$\epsilon_{ij} = \frac{0.5}{|d_{ij}^* - d_{0j}^*| + 0.5}$$

由 ϵ_{ij} 可得关联系数矩阵 E :

$$E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ E_4 \\ E_5 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1.000 & 0.400 & 0.429 & 0.636 & 1.000 & 0.000 \\ 0.909 & 0.667 & 1.000 & 0.636 & 0.664 & 0.600 \\ 0.500 & 1.000 & 0.600 & 1.000 & 0.497 & 0.428 \\ 0.416 & 1.000 & 0.429 & 0.538 & 0.333 & 0.428 \\ 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.333 & 0.497 & 0.333 \end{bmatrix}$$

由此可得 $A_1 - A_5$ 样地灰色关联度依次为:

$$R_1 = E_1 \times W_1^* = (1.000, 0.400, 0.429, 0.636, 1.000, 1.000) \times (0.417, 0.155, 0.134, 0.248, 0.037, 0.011)^T = 0.740$$

$$R_2 = E_2 \times W_2^* = (0.909, 0.667, 1.000, 0.636, 0.664, 0.600) \times (0.232, 0.341, 0.277, 0.103, 0.037, 0.011)^T = 0.811$$

$$R_3 = E_3 \times W_3^* = (0.500, 1.000, 0.600, 1.000, 0.497, 0.428) \times (0.259, 0.314, 0.255, 0.106, 0.056, 0.011)^T = 0.734$$

$$R_4 = E_4 \times W_4^* = (0.416, 1.000, 0.429, 0.538, 0.333, 0.428) \times (0.324, 0.246, 0.244, 0.128, 0.048,$$

$$0.011)^T = 0.574$$

$$R_5 = E_5 \times W_5^* = (0.333, 0.333, 0.333, 0.333, 0.497, 0.333) \times (0.338, 0.233, 0.213, 0.138, 0.067, 0.011)^T = 0.344$$

关联度 R_i 越大,说明方案集 D_i 与最优指标集 D_0 越接近,因此可根据关联度的大小对方案进行优劣排序,可得 $R_2 > R_1 > R_3 > R_4 > R_5$,即 R_2 所对应综合权重 W_2^* (0.232, 0.341, 0.277, 0.103, 0.037, 0.011) 为最终指标权重值。

2.6 高寒草甸 A1—A5 样地健康评价结果

将样地 $A_1 - A_5$ 指标监测分值分别带入综合权重 W_2^* 中。结果 A_2 样地 80 分最高,为健康, A_5 样地 55 分最低,为警告,其余 3 块样地 A_1 68 分、 A_3 79 分、 A_4 74 分且评价结果均为亚健康。

3 讨论

草地生态系统健康评价的研究最早起源于美国,美国学者 Dyksterhuis 等在 1948 年提出草地基况的概念,1949 年进一步提出了草地地境学说,将植被按照减少者、增加者、入侵者分组,进行了草地基况评价。至今草地基况分类法仍是草地属性评价的主要方法和标准。草地基况即草地当前的状况,强调当前草地植物群落与历史顶级或理想植物群落的植被组成、生产力等指标进行比较,根据其相似程度,将草地评价为四个等级,即“极好”“好”“中等”及“差”,随着评价等级不断下降,随之采用相应的管理措施。1999 年 8 月国际生态系统健康大会讨论了生态系统的健康诊断,决定采用美国生态学家 Costanza(1992)和 Rapport(1998)提出的 VOR 评价体系。活力(V)代表草地的功能,草地的能量输入越多物质循环越快活力就越高;组织力(O)是草地的结构,草地的结构越优化就越健康;恢复力(R)是草地反弹回复的速率,弹性越大恢复力越强。根据这 3 项指标,借助于系统测量和预测公式的运算,求出健康指数 $HI = V \times O \times R$ 。应用健康指数,把草地生态系统划分为 4 个时期:健康、警戒、不健康和崩溃,找出预警指标及阈值。但这种评价体系可操作性差,只能进行理论研究。

我国学者在草地退化与草地健康评价方面也做了大量的研究。李博^[4]以植物种类组成、地上生物量与盖度及土壤等指标为基础,拟定了中国北方草地退化

分级指标体系,并且划分出了四个草地退化等级,即:轻度退化、中度退化、重度退化与极度退化。郝敦元等^[18]、刘钟龄等^[19]对草地植被退化演替的进程与诊断进行了 10 余年连续不断的研究,取得了一系列的创造性成果。任继周^[5]以界面理论为指导,提出草地健康评价的 4 种状态和 3 项阈值,建立 CVOR 评价体系。侯扶江等^[20]采用牧草生理低限(PLL)、生理上限(PUL)和再生长期(R 期)长度/放牧期(G 期)长度的比(R/G)等指标,构建了放牧草地健康评价的生理阈值双因子法,并于 2004 年以阿拉善草地生态系统中的地理环境——牧草界面的关键生态过程为基础,以任继周提出的 COVR 指数评价思路为指导,建立了 COVR 综合指数的计算模型和方法。

本研究致力服务于草地基层管理者和牧民,草地健康评价方法科学、快速、易操作是开发的初衷和落脚点。其中评价指标如何筛选是决定评价方法是否具备科学性与可行性的前提。遥感技术、无人机等技术的兴起,使草地调查方式与途径发生变化,刘晓峰等^[21]利用遥感影像获取色达县草地健康监测模型,通过 GDI 将色达县退化草地划分为不退化、轻度、中度和重度退化 4 个等级。然而遥感技术专业性强且成本偏高,不利于在牧民中推广。目前,国内多采用任继周 CVOR 评价体系,该体系可相对全面地反映草地健康水平,但基况(C)有机质的测定需在实验室内完成,严重制约了牧民的使用。综上,将定性定量指标相结合,生态与生产功能兼顾,筛选出总盖度、群落层片结构、风蚀/水蚀、总产量、可食牧草比例、新鼠丘/鼠洞密度 6 项指标间接反映草地结构完整性、功能稳定性、系

统持续性等方面,其中将风蚀/水蚀作为草地基况土壤指标。以上 6 项指标均可在现场通过目测、步测、干重排序法(DWR 法)获得,其中 DWR 法为 0.1 m²样方快速监测技术,牧民可自制样方,仅需一次培训即可掌握使用方法^[15]。

指标权重关乎健康评价结果的合理性与准确性,为避免人为主观因素影响指标权重赋值,本研究结合层次分析法与数据包络分析法两种方法计算得到指标综合权重。运用灰色关联度法可有效解决样地无实际对照的问题。当监测不同样地时,可从理论上快速建立空白对照,选择关联度最大的一组作为最优指标权重,结合样地指标监测得分,可快速实现高寒草甸草地健康评价。通过对天祝县抓喜秀龙乡实地评价,本方法可快速得出 5 块样地(A1—A5)健康评价结果为:A1 亚健康(68 分)、A2 健康(80 分)、A3 亚健康(79 分)、A4 亚健康(74 分)、A5 警告(55 分),其结果符合中度放牧理论。

高寒草甸生态系统十分复杂,本技术 6 项指标具有一定代表性但不具有完整性,后续还需开发一些便于使用者实地监测草地健康水平的指标。为更好地开展草地健康评价研究,时空尺度的转化与扩展十分重要^[22]。建议长期进行健康评价,才能对现状及其未来变化趋势做出正确的评估。

4 结论

本研究研发的草地健康评分表便于基层草地管理者或牧民对拟监测的高寒草甸健康状况进行监测评价。

高寒草甸健康评分表

——打分样表

地区 _____ 观测人员 _____ 时间 _____ 草场面积 _____ GPS 坐标(纬度) _____ (经度) _____

1. 总盖度(4 级) _____ (权重系数 0.232)

第 1 级:盖度落在 100%~80%,对应分值 100~80 分,盖度每降低 1%减 1 分

第 2 级:盖度落在 79%~60%,对应分值 79~60 分,盖度每降低 1%减 1 分

第 3 级:盖度落在 59%~50%,对应分值 59~50 分,盖度每降低 1%减 1 分。

第 4 级:盖度落在 50%以下(不包含 50%),对应分值 49~0 分,盖度每降低 1%减 1 分。

2. 群落层片结构(9 级) _____ (权重系数 0.341)

夏场(对照)	冬场(对照)		
	阴坡	平地	阳坡
<p>健康草地(5个层片结构):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 高山柳、高山杜鹃(大型灌木)。 2. 锦鸡儿、绣线菊、金露梅(小型灌木)。 3. 苔草、早熟禾、虎耳草。 4. 珠芽蓼、银莲花、金莲花、唐松草、野草莓。 5. 苔藓(地被植物) <p>亚健康草地(3个层片结构):</p> <p>表现为大型灌木消失,存在部分小灌木以金露梅为主。苔草减少,嵩草增加,火绒草出现。</p> <p>不健康草地(2个层片结构):</p> <p>棘豆出现、嵩草减少,优势种以委陵菜、珠芽蓼为主。地被植物消失不见。有明显水蚀沟出现。</p>	<p>健康草地(4个层片结构):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 金露梅 2. 披碱草、鹅观草 3. 嵩草、苔草 4. 珠芽蓼、球花蒿、毛茛、乳浆大戟、火绒草、扁蓿豆、唐松草 <p>亚健康草地(3个层片结构):</p> <p>灌丛消失,狼毒出现,嵩草增加,唐松草与扁蓿豆增加。</p> <p>不健康草地(2个层片结构):</p> <p>矮嵩草、球花蒿为优势种。风毛菊等贴地植物出现,火绒草低矮生长。</p>	<p>健康草地(3个层片结构):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 禾本科、披碱草 2. 苔草、嵩草、珠芽蓼、球花蒿 3. 翻白委陵菜、扁蓿豆、唐松草、毛茛 <p>亚健康草地(2个层片结构):</p> <p>嵩属为主,扁蓿豆、火绒草出现。</p> <p>不健康草地(2个层片结构):</p> <p>兰石草、车前、风毛菊等植物增加。扁蓿豆、矮嵩草等为主要优势植物</p>	<p>健康草地(3个层片结构):</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 赖草、洽草、针茅、扁穗冰草 2. 矮嵩草、苔草 3. 扁蓿豆、冷蒿、球花蒿 <p>亚健康草地(2个层片结构):</p> <p>洽草及赖草为主要优势植物,冷蒿和嵩草也有所增加。</p> <p>不健康草地(2个层片结构):</p> <p>赖草很少,异叶青兰出现。醉马草大量出现。狼毒、棘豆、乳白香青、黄芪有所增加,毒草为主要优势种。</p>

注:与夏、冬场层片结构对照比较。1—3级,分别对应100、90、80分;4—5级,分别对应70、60分;6—9级打分,分别对应50、35、20、0分。

3. 风蚀或水蚀(9级) _____ (权重系数 0.277)

第1—3级:没有明显风蚀、水蚀沟,拨开草可细微发现,但地表没有石砾出现在草地表面,对应100、90、80分。

第4—5级:风蚀、水蚀沟明显但宽度、深度不超过10 cm,地表有明显石砾暴露,直径不超过10 cm,对应70、60分。

第6—9级:风蚀、水蚀沟非常明显且宽度、深度超过10 cm,地表有明显石砾暴露,直径超过10 cm,对应50、35、20、0分。

4. 总产量(4级) _____ (权重系数 0.103)

第1级:产量落在3 500 kg/hm²以上(不包含3 500 kg/hm²),对应分值100分。

第2级:产量落在3 500~2 600 kg/hm²,对应分值98~80分,产量每降低100 kg/hm²减2分。

第3级:产量落在2 500~1 600 kg/hm²,对应分值78~60分,产量每降低100 kg/hm²减2分。

第4级:产量落在1 500~600 kg/hm²,对应分值59~50分,产量每降低100 kg/hm²减1分。

第5级:产量落在500 kg/hm²及以下,对应分值49~0分,产量每降低100 kg/hm²减10分。

5. 可食牧草比例(4级) _____ (权重系数 0.037)

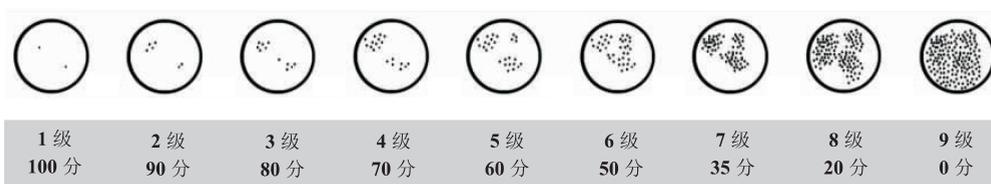
第1级:可食用牧草占总产草量的100%~80%,对应分值100~80分,比例每降低1%减1分。

第2级:可食用牧草占总产草量的79%~60%,对应分值79~60分,比例每降低1%减1分。

第3级:可食用牧草占总产草量的59%~50%,对应分值59~50分,比例每降低1%减1分。

第 4 级:可食用牧草占总产草量的 50%以下(不包含 50%),对应分值 49~0 分,比例每降低 1%减 1 分。

6. 鼠丘情况(9 级) _____ (权重系数 0.011)



区域得分(总分数)

总得分计算公式:

$$\text{总得分 Total Scores} = \sum_{i=1}^6 s_i \times q_i$$

$$= s_1 \times 0.232 + s_2 \times 0.341 + s_3 \times 0.277 + s_4 \times 0.103 + s_5 \times 0.037 + s_6 \times 0.011$$

$$= \text{TS}_1 + \text{TS}_2 + \text{TS}_3 + \text{TS}_4 + \text{TS}_5 + \text{TS}_6$$

(s:该指标现场打分;q:该指标所对应权重系数;TS:该指标对应权重下得分)

健康评价	100~80 分	79~60 分	59~50 分	50 分以下
	健康	亚健康	警告	崩溃临界

参考文献:

[1] 贾志锋,王伟,石红霄. 称多县高寒草甸草地资源健康评价研究[J]. 青海畜牧兽医杂志,2012,42(5):6-9.

[2] 李秋年. 高寒草甸退化草地植物群落结构特征及物种多样性的初步分析[J]. 青海环境,2004(1):30-33.

[3] 周立业,郭德,刘秀梅,等. 草地健康及其评价体系[J]. 草原与草坪,2004(4):17-20.

[4] 李博. 中国北方草地退化及其防治对策[J]. 中国农业科学,1997,30(6):2-10.

[5] 任继周,南志标,郝敦元. 草业系统中的界面论[J]. 草业学报,2000(1):1-8.

[6] 高安社. 羊草草原放牧地生态系统健康评价[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 草原健康状况评价:GB/T 21439-2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[8] 柴勇. 适于牧民的草地健康评价体系[J]. 甘肃畜牧兽医,2017,47(10):122-126.

[9] 牛钰杰,杨思维,花立民. 放牧强度与季节因子变化对高寒草甸植物群落组成的影响[J]. 草原与草坪,2020,40(6):16-23.

[10] 刘雪松,宋积成,朱蓉雪,等. 天祝草原主要有毒植物及其药用价值[J]. 草业科学,2014,31(3):543-550.

[11] 董全民,周华坤,施建军,等. 高寒草地健康定量评价及生产-生态功能提升技术集成与示范[J]. 青海科技,2018,25(1):15-24.

[12] 龙瑞军. 青藏高原草地生态系统之服务功能[J]. 科技导报,2007,25(9):26-28.

[13] 刘焯. 川西北高寒草地生态系统健康评价[D]. 雅安:四川农业大学,2014.

[14] 王婷. 黄河源区高寒草原退化特征及健康评价研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2019.

[15] 李帅,花立民,聂中南等. 草地干重排序快速监测方法在高寒草甸中的应用[J]. 生态学杂志,2015,34(12):3575

- 3580.
- [16] 王先甲,张熠. 基于 AHP 和 DEA 的非均一化灰色关联方法[J]. 系统工程理论与实践, 2011, 31(7): 1222—1229.
- [17] 朱兆钰,刘胜男. 中部六省国家可持续发展实验区创新能力评价研究—基于 AHP 和 DEA 的非均一化灰色关联方法[J]. 经济研究导刊, 2018(8): 38+119.
- [18] 郝敦元,刘钟龄,王伟,等. 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[J]. 植物生态学报, 1997, 21(6): 503—511.
- [19] 王立新,刘钟龄,刘华民,等. 内蒙古典型草原生态系统健康评价[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 544—550.
- [20] 侯扶江,李广,常生华. 放牧草地健康管理的生理指标[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1049—1053.
- [21] 刘晓枫,道里刚,周俗等. 基于遥感技术的川西北牧区草地退化研究[J]. 草学, 2020(4): 43—46+52.
- [22] 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[J]. 中国草地学报, 2008, 30(2): 98—103+115.

Research and application of health assessment method in alpine meadow

LI Shuai¹, HUA Li-min², YANG Si-wei^{3,4}

(1. *The Open University of Sichuan, Chengdu 610000, China*; 2. *College of Grassland Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China*; 3. *Sichuan Academy of Grassland Sciences/ Institute of Alpine Grassland Ecological Restoration Engineering technology on Qinghai-Tibet Plateau/ The Field Scientific Observation Research Station of Seda grassland ecology in Sichuan province, Chengdu 61173, China*; 4. *Institute of Animal and Veterinary Science, Bijie 551700, China*)

Abstract: A health assessment technology in alpine meadow for grass-roots grassland managers, technicians and farmers has been developed. Taking the alpine meadow area of Tianzhu County, Gansu Province as an example, five grassland with different grazing intensity were selected to carry out the application of health status assessment technology. The ecological index (total coverage, the layer structure and wind/water erosion conditions) and the production index (total yield and edible grass proportion and new molehills/rat hole density) that reflects the health of the alpine meadow were selected for the study. Analytic hierarchy process (ahp) and data envelopment analysis method was used to calculate index right of restructuring. The optimal index set is constructed by applying the method of grey correlation degree. The corresponding index data were obtained by visual observation, step survey, and dry weight rank method. The results showed that the weight of each index was as follows: total coverage (0.232), community layer structure (0.341), wind/water erosion (0.277), total forage yield (0.103), edible forage ratio (0.037), new rodent mounds or holes density (0.011). The health evaluation results of five different grazing intensities (A_1 - A_5) were as follows: A_1 sub-health (68 points), A_2 health (80 points), A_3 sub-health (79 points), A_4 sub-health (74 points) and A_5 warning (55 points). The grassland health assessment technology in this study is convenient for grass-roots grassland managers, technicians and farmers to monitor and evaluate the health status of alpine meadow to be monitored.

Key words: alpine meadow; health assessment; index weight