

阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康评价

殷锡凯¹, 叶茂^{1,2}, 赵凡凡¹, 周泉¹

(1.新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054;

2.新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: [目的] 对阿勒泰林区放牧前后的草地生态系统进行健康评价, 为该区退化草地恢复与管理提供科学依据。[方法] 运用了 VOR 综合指数生态系统健康评价模型, 并结合物种多样性测度中的 Margalef 丰富度指数、Simpson 优势度指数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Alatalo 均匀度指数, 对阿勒泰林区草地生态系统整体状况进行了评估。[结果] ①各监测点 Margalef 指数差异表现在旅游区放牧前后差异极显著 ($p < 0.01$), 牧道放牧前后差异显著 ($p < 0.05$); 前山山坡、牧道的 Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数的放牧前后均表现出差异极显著 ($p < 0.01$); 各监测点 Alatalo 指数放牧前后差异不显著。②阿勒泰林区放牧后草地生态系统结构较稳定; 阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康的组织力 (O)、恢复力 (R) 值差异显著 ($p < 0.05$)。③VOR 指数表现为牧道放牧前后差异极显著 ($p < 0.01$), 其他监测点的 VOR 指数放牧前后差异不显著。④各监测点放牧前后草地健康状况评价结果一致, 为“健康”状态, 但各监测点的 VOR 综合指数值存在差异。[结论] 阿勒泰林区放牧后草地生态系统结构较稳定, 监测点旅游区的 Margalef 丰富度放牧前后差异极显著 ($p < 0.01$), 前山山坡、牧道的 Simpson 优势度和 Shannon-Wiener 多样性放牧前后均差异极显著 ($p < 0.01$); 各监测点放牧前后草地健康状况评价为“健康”。

关键词: 草地生态系统; 物种多样性; VOR 值; 放牧前后; 阿勒泰林区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0220-06

中图分类号: S812.6

文献参数: 殷锡凯, 叶茂, 赵凡凡, 等. 阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 220-225. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.029; Yin Xikai, Ye Mao, Zhao Fanfan, et al. Ecosystem health evaluation of grassland ecosystem before and after grazing in Aletai forest region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 220-225.

Ecosystem Health Evaluation of Grassland Ecosystem Before and After Grazing in Aletai Forest Region

Yin Xikai¹, Ye Mao^{1,2}, Zhao Fanfan¹, Zhou Quan¹

(1. School of Geographical and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China;

2. Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources in Arid Zone, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract: [Objective] The health of the grassland ecosystem before and after grazing in the Altay forest area was assessed, in order to provide a scientific basis for the restoration and management of degraded grassland in the area. [Methods] The VOR ecosystem health evaluation model was used combined the Margalef richness index, Simpson dominance index, Shannon-Wiener diversity index, and Alatalo evenness index to evaluate the overall status of the grassland ecosystem in the Aletai forest area. [Results] ① The Margalef index of each monitoring point was high significantly different before and after grazing in tourist areas ($p < 0.01$), and was significantly different before and after grazing in pastoral roads ($p < 0.05$); The Simpson index and Shannon-Wiener index of the front mountain slopes and pastoral roads showed extremely significant differences before and after grazing ($p < 0.01$); The Alatalo index of each monitoring site had no significant difference before and after grazing. ② The structure of the grassland ecosystem after grazing in the Aletai

收稿日期: 2021-04-26

修回日期: 2021-07-12

资助项目: 阿尔泰山生态保护管理规划项目

第一作者: 殷锡凯(1996—), 男(汉族), 贵州省惠水县人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区生态水文过程。Email: y1x2k3yxk@163.com。

通讯作者: 叶茂(1977—), 女(汉族), 陕西省绥德县人, 博士, 教授, 主要从事干旱区生态水文过程方面的研究。Email: yemao1111@163.com。

forest area was relatively stable; The organizational strength (O) and the resilience (R) value of the healthy grassland ecosystem before and after grazing in the Aletai forest area were significantly different ($p < 0.05$). ③ The VOR index showed that the difference before and after grazing was extremely significant ($p < 0.01$), while the VOR index of other monitoring points had no significant difference. ④ The evaluation results of the health status of the grassland before and after grazing at each monitoring point were consistent, which was a “healthy” state, but the VOR composite index value of each monitoring point was different. [Conclusion] The grassland ecosystem structure is relatively stable after grazing in the Aletai forest area. The Margalef abundance in the tourist area of the monitoring point is significantly different before and after grazing ($p < 0.01$). The Simpson dominance and Shannon-Wiener diversity of the front mountain slopes and pastoral roads are all different before and after grazing. The health status of the grassland before and after grazing at each monitoring point was evaluated as “healthy”.

Keywords: grassland ecosystem; species diversity; VOR value; before and after grazing; Aletai forest region

生态系统健康是生态学研究的前沿与热点之一。草地是十分重要的自然资源,是我国陆地上面积最大的生态系统^[1],不仅维持着生物多样性、水土保持、防风固沙、涵养水源、干旱区防治等,同时起着保护生态安全的屏障作用。它的健康既是全球自然生态系统健康的重要组成部分,也对人类社会产生重要影响。关于草地生态系统健康评价的方法主要有:VOR指数评价模型^[2-3]、CVOR评价模型^[4-5]、PSR评价模型^[6-7]、层次分析法^[8-9]、指数评价法^[6]、模糊综合评价法^[10]和聚类分析法等^[11]。其中,VOR综合指数模型是基于活力(vigor, V)、组织力(organization, O)和恢复力(resilience, R)构建,用来评价草地生态系统健康情况的综合指数^[12]。该方法不仅能很好的评价草地生态系统,而且对于评价个别年份的草地健康状况具有一定的优势,能综合反映草地结构特征和健康状态。单贵莲等^[3]用VOR和CVOR指数模型评价了不同围封禁牧年限典型草原的健康状况;姜佳昌等^[13]用VOR指数评价了甘肃省肃南县退牧还草工程前后的3个草原类型的植物群落结构特征;俞鸿千等^[14]用VOR和CVOR评价模型评估了宁夏干旱风沙区荒漠草原恢复状况。

目前草地生态系统评价研究多侧重于生态系统经济价值及服务价值评估^[15-17]、土壤质量评价^[18]、群落结构及多样性和稳定性评价等^[19-20]领域。新疆阿勒泰林区存在草地退化、沙漠化^[21]以及草—畜不平衡^[22]现象,严重影响阿勒泰林区畜牧业发展。同时阿勒泰林区草地的研究主要在生态环境^[21]、草地退化原因^[22-23]、退牧还草工程效益分析^[24]以及补偿机制绩效分析等^[25]方面,但对草地健康状况综合评价的研究较少。为此,本研究以阿勒泰林区草地为研究对象,通过调查春秋季节阿勒泰林区草地群落的盖

度、高度、密度、频度、生物量等,计算草地群落的多样性、优势度、丰富度和均匀度,并利用VOR生态系统健康评价模型进行定量评价,诊断阿勒泰林区草地生态系统健康状态和放牧前后差异特征,为阿勒泰林区退化草地恢复与管理提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新疆阿勒泰林区地处阿尔泰山南麓,西北与布尔津县相邻,西南与吉木乃县交界,东北与蒙古国接壤。地理坐标 $87^{\circ}25'—88^{\circ}38'E, 47^{\circ}46'—48^{\circ}39'N$,地势北高南低,海拔 $600—3914\text{ m}$,属温带半干旱大陆性气候区,南北气候差异较大,年均气温 4°C ,多年年平均降水量 194.2 mm 。草地植被种类繁多,以寒生羊茅(*Festuca kryloviana*)、新疆针茅(*Stipa sareptana*)、沙生针茅(*S. glareosa*)等为主要建群种,以蒿草(*Kobresia capillifolia*)、千叶蓍(*Achillea millefolium*)、黄花苜蓿(*Medicago falcata*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、车轴草(*Trifolium repens*)、老鹳草(*Geranium wilfordii* Maxim.)等为主要伴生种植物。

1.2 试验设计

对阿勒泰林区放牧前后草地群落进行了调查,依据海拔梯度、河流、牧道和旅游区等影响因素,将阿勒泰林区设置为6个监测点,每个监测点周围布设调查样地和样方。放牧前后各布设74个调查样地,162个样方,样地大小为 $20\text{ m} \times 20\text{ m}$,同时每个样地布设3个 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的草地样方(后山河流、牧道为1个);其中前山山坡15个样地,45个样方;前山河流6个样地,18个样方;后山山坡10个样地,30个样方;后山河流6个样地,6个样方;旅游区13个样地,39个样方;牧道24个样地,24个样方。每个样方内,详细测量和记录草的种类、数量、高度、盖度等指标。监测

完后,对每个样方内采用刈割法,称取每个物种的地上生物量鲜重。同时记录经纬度及海拔高度基本信息。本次调查时间为(放牧前)2020年5月28日至6月29日,(放牧后)2020年9月1日至10月3日。

1.3 物种多样性计算分析

本研究采用多样性测度中的 Margalef 丰富度指数(S)、Simpson 优势度指数(D)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Alatalo 均匀度指数(E_a)^[26-27],其计算公式为:

Margalef 丰富度指数(S):

$$S = (S - 1) / \ln(N) \quad (1)$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum P_i^2 \quad (2)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = 1 - \sum P_i \ln P_i \quad (3)$$

Alatalo 均匀度指数(E_a):

$$E_a = [(\sum P_i^2)^{-1} - 1] / [\exp(-\sum P_i \ln P_i) - 1] \quad (4)$$

式中: S 为样方中的总物种数; N 为样方中的总个体数; N_i 为第*i*种植物的个体数; P_i 为*i*种植物个体数占总个体数比例。

1.4 VOR 综合指数评价

利用研究区草地现状调查资料,结合研究区退化草地的演替方向,进一步结合活力(V)、组织力(O)、恢复力(R)等各项单项指标,采用 VOR 评价方法对草地生态系统健康进行评价。

VOR 综合指数计算模型^[2,28]为: $VOR = W_V \cdot V + W_O \cdot O + W_R \cdot R$,其中:①活力(V)用草地的地上生物量进行相关测算: $V = B_x / B_{ck}$;式中: B_x 为监测点内样方草地群落的地上生物量; B_{ck} 为对照样地地上生物量的平均值。②组织力(O)用草地群落的物种频度、高度以及生物量进行计算, $O = O_x / O_{ck}$, $O_x = \sum [(F_i + B_i + H_i) / 3]$,式中: $F_i = f_i / f$ 表示相对频度, f_i 为监测点样地内草地的物种*i*的频度, f 为监测点样地内草地物种频度测量总数; $B_i = b_i / b$ 为相对草地的地上生物量, b_i 为样方内草地物种*i*的地上生物量, b 为草地样方内的总地上生物量; $H_i = h_i / h_{i,max}$ 表示相对高度, h_i 为样方草地物种*i*的平均高度, $h_{i,max}$ 为*h_i*中的最大值。 O_{ck} 为对照样地的平均值。③恢复力(R), $R = S_x / S_{ck}$, $S_x = [\sum_{i=1}^n (L_i \cdot I_i \cdot V)] P$,式中: L_i 为草地物种*i*的寿命; I_i 为物种*i*的相对生物量; P 为物种数量; S_{ck} 为对照样地平均值。

各指标对照样地选择是各个监测点周围未受人

为干扰、生长状况良好的天然群落作为对照值。 W_V, W_O, W_R 分别对应各部分的指数权重数, $W_V = W_O = W_R = 1/3$,则: $W_V + W_O + W_R = 1$ 。计算 VOR 综合指数时,各个单项指数 $V, O, R \in [0, 1]$,值大于 1 时均取值为 1^[3,29]。结合国内对寒区旱区草地生态系统健康等级划分方法,采用四分法将生态系统健康状态指数划分为 4 个不同等级(表 1)^[30]来评价草地生态系统的健康状况。

表 1 草地生态系统健康指数及健康等级

健康指数	1.00~0.75	0.75~0.50	0.50~0.25	0.25~0.00
健康等级	健康	不健康	警戒	崩溃

2 结果与分析

2.1 阿勒泰林区各监测点放牧前后草地物种多样性差异性分析

由图 1 可知, Margalef 丰富度指数表现为放牧前前山河流最高,后山山坡最低;放牧后前山河流最高,牧道最低;前山山坡、前山河流、牧道放牧前的指数值高于放牧后。Simpson 优势度指数表现为放牧前前山河流最高,旅游区最低;放牧后前山河流最高,牧道最低;前山山坡、前山河流、后山山坡、牧道放牧前的指数值高于放牧后。Shannon-Wiener 多样性指数表现为放牧前前山河流最高,旅游区最低;放牧后前山河流最高,牧道最低;前山山坡、前山河流、后山山坡、牧道放牧前的指数值高于放牧后。Alatalo 均匀度指数表现为放牧前前山河流最高,后山河流最低;放牧后后山山坡最高,旅游区最低;后山山坡、后山河流、旅游区、牧道放牧前的指数值低于放牧后。

由图 2 可以看出,各监测点放牧前的草地生物量高于放牧后草地生物量。表 2 为各监测点放牧前后草地物种多样性差异性指数,可知 Margalef 丰富度指数表现为旅游区放牧前后差异极显著($p < 0.01$),牧道放牧前后差异显著($p < 0.05$)。Simpson 优势度指数表现为前山山坡、牧道的放牧前后差异极显著($p < 0.01$)。Shannon-Wiener 多样性指数表现为前山山坡、牧道的放牧前后差异极显著($p < 0.01$)。Alatalo 均匀度指数表现为各监测点放牧前后差异不显著($p > 0.05$)。前山山坡、牧道分别是过渡牧场、夏牧场,由于牧民放牧的原因,可能造成前山山坡和牧道的优势度指数、多样性指数放牧前后差异极显著。

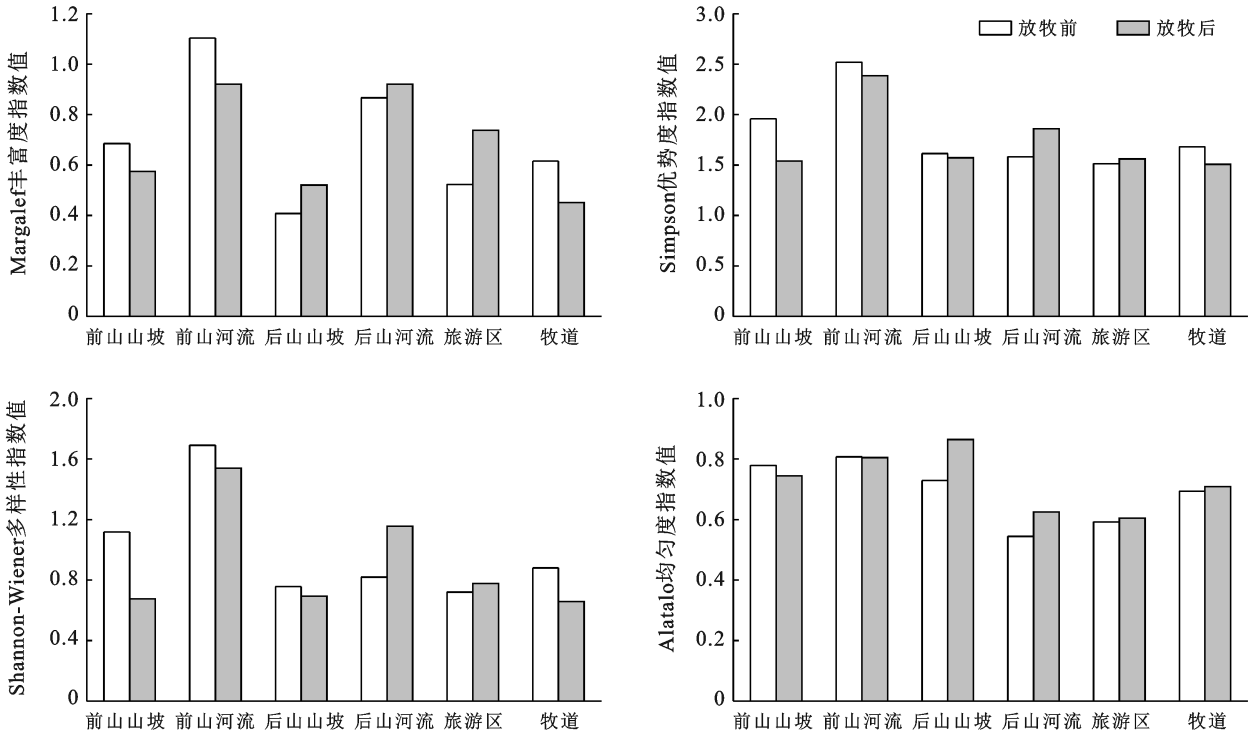


图 1 阿勒泰林区各监测点放牧前后物种多样性指数值

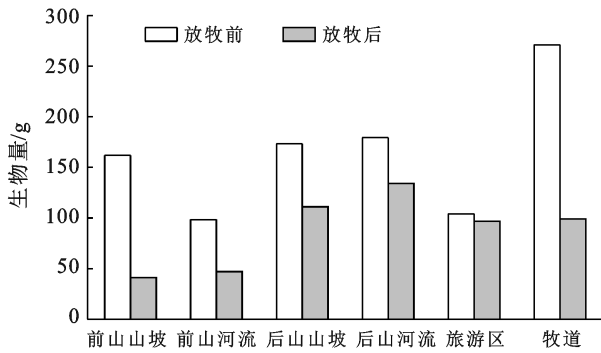


图 2 阿勒泰林区各监测点放牧前后草地生物量

2.2 放牧前后草地生态系统健康各项指数整体评价

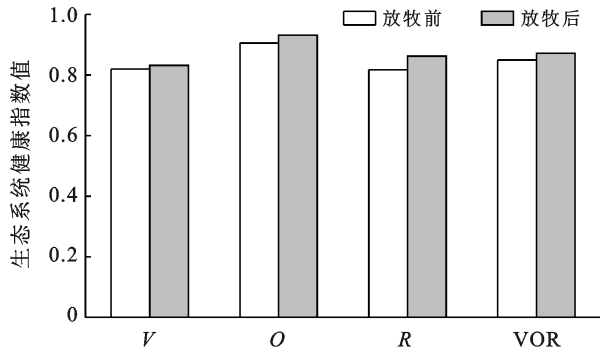
阿勒泰林区草地生态系统的活力(V)、组织力(O)、恢复力(R)和健康指数(VOR)的计算结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,放牧前后阿勒泰林区草地生态系统平均健康指数(VOR)分别为 0.84 和 0.87(>0.75),都达到健康水平。放牧前草地的 V 值、O 值和 R 值均低于放牧后,但都大于 0.75 的健康标准。说明整体上阿勒泰林区放牧后草地系统的活力、组织能力和恢复力较强,系统结构比较稳定。对阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康评价各项指标进行整体差异性分析(表 3),结果表明阿勒泰林区整体上放牧前后草地生态系统健康的 O, R 值差异显著($p < 0.05$),其他指数值放牧前后差异均不显著。

表 2 阿勒泰林区各监测点放牧前后草地物种多样性差异性分析

监测点	指数	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
前山山坡	Margalef	0.091	1	0.091	2.063	0.162
	Simpson	1.319	1	1.319	21.430	0.000 **
	Shannon-Wiener	1.463	1	1.463	27.333	0.000 **
	Alatalo	0.009	1	0.009	0.504	0.484
前山河流	Margalef	0.099	1	0.099	2.277	0.162
	Simpson	0.053	1	0.053	1.945	0.193
	Shannon-Wiener	0.070	1	0.070	2.852	0.122
	Alatalo	0.000	1	0.000	0.007	0.935
后山山坡	Margalef	0.063	1	0.063	1.959	0.179
	Simpson	0.009	1	0.009	0.148	0.705
	Shannon-Wiener	0.019	1	0.019	0.337	0.569
	Alatalo	0.091	1	0.091	0.753	0.397
后山河流	Margalef	0.009	1	0.009	0.314	0.588
	Simpson	0.230	1	0.230	1.658	0.227
	Shannon-Wiener	0.341	1	0.341	2.797	0.125
	Alatalo	0.020	1	0.020	1.066	0.326
旅游区	Margalef	0.299	1	0.299	10.230	0.004 **
	Simpson	0.014	1	0.014	0.123	0.728
	Shannon-Wiener	0.022	1	0.022	0.201	0.658
	Alatalo	0.001	1	0.001	0.065	0.801
牧道	Margalef	0.325	1	0.325	4.526	0.039 *
	Simpson	0.365	1	0.365	7.581	0.008 **
	Shannon-Wiener	0.589	1	0.589	11.646	0.001 **
	Alatalo	0.003	1	0.003	0.171	0.681

注: ** 表示 $p < 0.01$ 水平差异极显著; * 表示 $p < 0.05$ 水平差异显著。下同。



注:V,O,R,VOR 分别表示阿勒泰林区草地生态系统的活力、组织力、恢复力和健康指数。下同。

图 3 阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康各项指数整体评价

表 3 阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康整体差异性分析

指数	平方和	自由度	均方	F	显著性
V	0.003	1	0.003	0.051	0.822
O	0.051	1	0.051	3.928	0.049*
R	0.233	1	0.233	4.163	0.043*
VOR	0.054	1	0.054	2.492	0.117

2.3 各监测点放牧前后草地健康指数评价差异性分析

表 4 为各监测点综合评价模型指数,可知活力指数 V 表现为各监测点放牧前后差异不显著($p > 0.05$)。组织力指数 O 表现为牧道的放牧前后差异显著($p < 0.05$)。恢复力指数 R 表现为牧道的放牧前后差异极显著($p < 0.01$)。草地生态系统健康指数 VOR 表现为牧道的放牧前后差异极显著($p < 0.01$),其他监测点的 VOR 指数放牧前后差异不显著。

2.4 阿勒泰林区各监测点天然草地 VOR 综合指数评价

根据天然草地评价系统健康等级(表 1)及阿勒泰林区天然草地 VOR 综合指数(图 4)可以看出,各监测点放牧前后 VOR 综合指数都达到“健康”等级,但是放牧前后存在差异。其中,放牧前的后山河流 VOR 值最高,为 0.92;牧道 VOR 值最低,为 0.79。放牧后的后山河流 VOR 值最高,为 0.94;前山山坡 VOR 值最低,为 0.80。

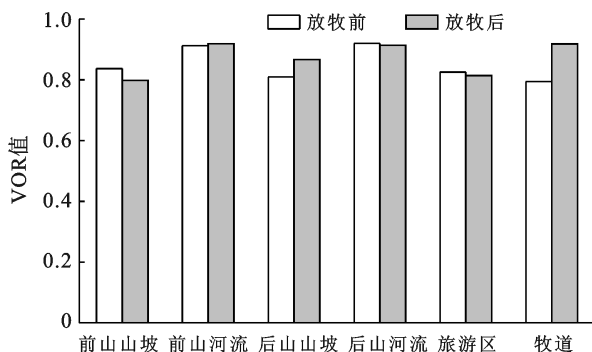


图 4 阿勒泰林区各监测点放牧前后天然草地 VOR 指数评价

表 4 阿勒泰林区各监测点放牧前后草地生态系统健康差异性分析

监测点	指数	平方和	自由度	均方	F 值	显著性
前山山坡	V	0.021	1	0.021	0.426	0.519
	O	0.003	1	0.003	0.263	0.612
	R	0.033	1	0.033	0.584	0.451
	VOR	0.011	1	0.011	0.581	0.452
前山河流	V	0.000	1	0.000	0.002	0.963
	O	0.002	1	0.002	0.556	0.473
	R	0.001	1	0.001	0.112	0.745
	VOR	0.000	1	0.000	0.045	0.837
后山山坡	V	0.019	1	0.019	0.203	0.658
	O	0.001	1	0.001	0.032	0.860
	R	0.043	1	0.043	0.635	0.436
	VOR	0.016	1	0.016	0.340	0.567
后山河流	V	0.007	1	0.007	0.836	0.382
	O	0.002	1	0.002	0.307	0.592
	R	0.001	1	0.001	0.067	0.801
	VOR	0.000	1	0.000	0.057	0.817
旅游区	V	0.000	1	0.000	0.003	0.954
	O	0.004	1	0.004	0.496	0.488
	R	0.000	1	0.000	0.003	0.958
	VOR	0.001	1	0.001	0.030	0.865
牧道	V	0.007	1	0.007	0.183	0.671
	O	0.117	1	0.117	6.340	0.015*
	R	0.749	1	0.749	13.140	0.001**
	VOR	0.185	1	0.185	12.524	0.001**

3 讨论

目前许多研究^[31-33]证明了外界干扰对草地植被的影响体现在草地植被群落的演替过程中,适当放牧能提高草地植被更新速度,家畜采食、踩踏、排泄等活动对天然草地影响,在一定程度上有利于草地生态系统的健康。过度放牧对草地植被、土壤、牲畜产生不良影响,造成草本植被生长受到抑制、稳定的物质平衡被打破、土壤退化等^[34-35]。通过分析阿勒泰林区草地生态系统放牧前后生物多样性及生态系统健康状态,可以看出,阿勒泰林区放牧后草地生态系统的活力、组织能力和恢复力较强,系统结构较稳定,草地生态系统发展较好,说明放牧干扰对阿勒泰林区草地生态系统影响不大。但放牧前后不同监测地点草地健康状态存在差异性,表现在前山山坡样地放牧后的 VOR 指数低于放牧前,牧道样地放牧后 VOR 指数高于放牧前,后山河流周围样地 VOR 指数值为最高。由于前山山坡是过渡牧场,在放牧后牲畜啃食牧草,使得草地植被的种群数量在逐渐的减少,后山河

流和牧道是夏牧场,在夏季放牧后进行转场,牧草得以恢复生长,使得后山河流和牧道放牧后的 VOR 综合指数评价处于“健康”。基于该区域生态地位的特殊性和重要性,管理部门应以科学的手段及方法为草地生态系统健康提高科学合理的生态效益,是维持草地生态系统平衡的重要保障。

4 结论

(1) Margalef 指数差异表现在阿勒泰林区旅游区样地放牧前后差异极显著,而牧道样地放牧前后差异显著;Simpson 指数和 Shannon-Wiener 指数在前山山坡样地、牧道样地也表现出差异极显著。Alatalo 指数在各监测点差异不显著,表明各监测点放牧前后草地群落均匀度变化不大。

(2) 阿勒泰林区放牧前后草地生态系统的平均健康指数(VOR)分别为 0.84 和 0.87(>0.75),都达到健康水平。阿勒泰林区放牧后草地系统的活力、组织力和恢复力较强,生态系统结构较稳定。阿勒泰林区放牧前后草地生态系统健康的 O 值、 R 值差异显著($p < 0.05$),其他值放牧前后差异不显著。

(3) 活力指数表现为各监测点放牧前后差异不显著($p > 0.05$)。组织力指数表现为牧道放牧前后差异显著($p < 0.05$)。恢复力指数表现为牧道放牧前后差异极显著($p < 0.01$)。VOR 指数表现为牧道放牧前后差异极显著($p < 0.01$),其他监测点 VOR 指数放牧前后差异不显著。

(4) 各监测点放牧前后 VOR 综合指数评价都达到“健康”等级。放牧前的后山河流 VOR 值最高,为 0.92;牧道 VOR 值最低,为 0.79。放牧后的后山河流 VOR 值最高,为 0.94;前山山坡 VOR 值最低,为 0.80。

[参 考 文 献]

[1] 赵同谦,欧阳志云,贾良清,等.中国草地生态系统服务功能间接价值评价[J].生态学报,2004,24(6):1101-1110.

[2] Costanza R, Mageau M T. What is a healthy ecosystems [J]. Aquatic Ecology, 1999,33(1):105-115.

[3] 单贵莲,陈功,刘钟龄,等.典型草原健康评价的 VOR 和 CVOR 指数[J].草地学报,2012,20(3):401-406.

[4] Allen E. Forest health assessment in Canada [J]. Ecosystem Health, 2001,7(1):28-34.

[5] 侯扶江,于应文,傅华,等.阿拉善草地健康评价的 CVOR 指数[J].草业学报,2004,13(4):117-126.

[6] 刘春青,张韬,刘佳慧,等.辉腾锡勒风电场草地生态系统健康评价[J].西北林学院学报,2019,34(2):213-221.

[7] 赵玉婷,李文龙,陈迪,等.高寒牧区草地生态系统健康动态评价:以甘南地区为例[J].草业科学,2017,34(1):16-29.

[8] 吴蓉蓉,史惠兰,王维,等.青海河南高寒草地生态系统健康评价[J].安徽大学学报(自然科学版),2018,42(3):98-108.

[9] 徐丽君.华北农牧交错带紫花苜蓿人工草地健康评价[D].北京:中国农业科学院,2009.

[10] 邹蕴.锡林浩特市露天矿区草地生态系统健康评价[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2019.

[11] 都耀庭.聚类分析法在高寒草甸生态系统健康评价中的应用:以青海玉树县为例[J].土壤通报,2014,45(2):307-313.

[12] 侯扶江,徐磊.生态系统健康的研究历史与现状[J].草业学报,2009,18(6):210-225.

[13] 姜佳昌,孙斌,潘冬荣,等.基于 VOR 指数的肃南县草地生态系统健康评价[J].中国草食动物科学,2020,40(4):39-43.

[14] 俞鸿千,蒋齐,王占军,等. VOR, CVOR 指数在宁夏干旱风沙区荒漠草原健康评价中的应用:以盐池县为例[J].草地学报,2018,26(3):584-590.

[15] Costanza R, d'Arge R, de Groot R. et al. The value of world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997,387(6630):253-260.

[16] Richard T W, Wui Y A. The economic value of wetland services: A meta-analysis [J]. Ecological Economics, 2001,37(2):257-270.

[17] 高雅,林慧龙.草地生态系统服务价值估算前瞻[J].草业学报,2014,23(3):290-301.

[18] 张晓娜,蒙仲举,杨振奇.不同封育措施下希拉穆仁荒漠草原土壤质量评价[J].土壤通报,2018,49(4):788-793.

[19] 董世魁,汤琳,张相锋,等.高寒草地植物物种多样性与功能多样性的关系[J].生态学报,2017,37(5):1472-1483.

[20] 张建贵,王理德,姚拓,等.祁连山高寒草地不同退化程度植物群落结构与物种多样性研究[J].草业学报,2019,28(5):15-25.

[21] 韩晓玲.浅谈阿勒泰市草地生态环境保护对策[J].当代畜牧,2013,31(32):10-11.

[22] 俞婷.阿勒泰市草地退化的原因及对策分析[D].新疆乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.

[23] 加那尔别克·黑勒白.阿勒泰市草原退化的主要原因及其治理对策[J].现代农业研究,2018,24(7):63-64.

[24] 王小红,陈玉兰.阿勒泰市退牧还草工程效益分析[J].天津农业科学,2018,24(1):30-32.

[25] 张炜.新疆退牧还草补偿机制绩效分析[D].新疆乌鲁木齐:新疆农业大学,2013.

[26] 马克平.生物群落多样性的测度方法(I): α 多样性的测度方法(上)[J].生物多样性,1994,2(3):162-168.

[27] 马克平,刘玉明.生物群落多样性的测度方法(I): α 多样性的测度方法(下)[J].生物多样性,1994,2(4):231-239.

- derma, 2009, 152(3/4):195-207.
- [45] 刘旭, 贡璐, 解丽娜. 种植模式对阿克苏绿洲农田土壤肥力的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8):100-106.
- [46] Song Fangfang, Xu Minggang, Duan Yinghua, et al. Spatial variability of soil properties in red soil and its implications for site-specific fertilizer management [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2020, 19(9):2313-2325.
- [47] Dai Wanhong, Huang Yao. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China [J]. Catena, 2005, 65(1):87-94.
- [48] Amrit K, Rajeev K M, Kiranmay S. Mapping spatial distribution of traffic induced criteria pollutants and associated health risks using kriging interpolation tool in Delhi [J]. Journal of Transport & Health, 2020, 18:100879.
- [49] Kim Sunyoung, Yi Seonju, Young Seobeum, et al. Ordinary Kriging approach to predicting long-term particulate matter concentrations in seven major Korean cities [J]. Journal of Environmental Toxicology, 2014, 29:e2014012-e2014012.
- [50] Dash J P, Sarangi A, Singh D K. Spatial variability of groundwater depth and quality parameters in the national capital territory of Delhi [J]. Environmental Management, 2010, 45(3):640-650.
- [51] 王宗明, 张柏, 黄素军, 等. 基于 GIS 和信息熵的松嫩平原土地利用结构演化分析: 兼论系统无序度、复杂性与多样性[J]. 农业系统科学与综合研究, 2005(3):196-200.
- [52] Shannon C E. A mathematical theory of communication [J]. Bell System Technical Journal, 1948, 27(3):379-423.
- [53] 徐全智, 吕恕. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [54] Meyer W B, Turner B L. Change in Land Use and Land Cover: A Global Perspective(II) [M]. London: Cambridge University Press, 1994.
- [55] 刘焕军, 谢雅慧, 潘越, 等. 黑土区田块土壤有机质空间分异及分布研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(6):1445-1451.
- [56] 武治华, 牛继平. 青海省耕层土壤养分含量相关性分析研究[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(23):101-105.
- [57] Gu Xiaobo, Cai Huanjie, Fang Heng, et al. Soil hydrothermal characteristics, maize yield and water use efficiency as affected by different biodegradable film mulching patterns in a rain-fed semi-arid area of China [J]. Agricultural Water Management, 2021, 245:106560.
- [58] 吴利杰, 于娟, 王成敏, 等. 长尺度气候变化下土壤钾素演变规律的研究: 以泾河中游将军村黄土剖面为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(1):69-73.
- [59] 孙笑梅, 闫军营, 程道全, 等. 河南省耕地土壤酸碱度状况与酸化土壤治理途径[J]. 中国农学通报, 2017, 33(24):91-94.

(上接第 225 页)

- [28] Lu Fan, Li Zizhen. A model of ecosystem health and its application [J]. Ecological Modeling, 2003, 170(1):55-59.
- [29] Ptthoff M, Jackson L E. Soil biological and chemical properties in restored perennial grassland in California [J]. Restoration Ecology, 2005, 13(1):61-73.
- [30] 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.
- [31] 薛睿, 郑淑霞, 白永飞. 不同利用方式和载畜率对内蒙古典型草原群落初级生产力和植物补偿性生长的影响[J]. 生物多样性, 2010, 18(3):300-311.
- [32] Rosen E, van der Maare E. Restoration of alvar vegetation on Oland, Sweden [J]. Applied Vegetation Science, 2000, 3(1):65-72.
- [33] Oosterheld M, McNaughton S J. Effects of stress and time for recovery on the amount of compensatory growth after grazing [J]. Oecologia, 1991, 85(3):305-313.
- [34] 李西良, 刘志英, 侯向阳, 等. 放牧对草原植物功能性状及其权衡关系的调控[J]. 植物学报, 2015, 50(2):159-170.
- [35] Fan Jianling, Jin Hao, Zhang Chuanhong, et al. Grazing intensity induced alternations of soil microbial community composition in aggregates drive soil organic carbon turnover in a desert steppe [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2021, 40(10):73-87.