

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.022

引用格式:符天昊,刘兴义,董乙强,等.不同退化程度蒿类荒漠草地群落结构与博乐绢蒿构件分配格局[J].草地学报,2026,34(6):2196–2206

FU Tian-hao, LIU Xing-yi, DONG Yi-qiang, et al. Community Structure and Modular Biomass Allocation Patterns of *Seriphidium borotalense* in Sagebrush Deserts at Different Degradation Gradients[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6):2196–2206

不同退化程度蒿类荒漠草地群落结构与 博乐绢蒿构件分配格局

符天昊¹, 刘兴义^{1,2*}, 董乙强^{1,3,4}, 颜安^{1,3,4}, 宋勇康¹, 杨春莹¹, 单兴芸¹, 雷雅欣¹, 吴凯¹

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆博乐市草原工作站, 新疆博乐 833400;
3. 新疆草地资源与生态自治区重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 4. 西部干旱区草地资源与生态教育部重点实验室,
新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:为探究不同退化程度下蒿类荒漠草地群落结构与博乐绢蒿构件分配格局对退化的响应,本研究以博乐绢蒿(*Seriphidium borotalense*)荒漠草地为对象,对未退化(UD)、轻度退化(LD)、中度退化(MD)和重度退化(HD)区群落数量特征、植物多样性、博乐绢蒿种群及构件特征进行测定分析,发现随退化程度增加,群落高度、盖度及地上生物量显著下降,密度显著升高($P<0.05$),Patrick指数未见变化,其余植物多样性指数均显著下降;博乐绢蒿高度、盖度和地上生物量显著下降($P<0.05$),密度于LD达最大值,HD未发现博乐绢蒿;博乐绢蒿株高、茎长、叶重等茎叶构件分配均显著下降($P<0.05$),根重、根粗、根重比等根系构件分配均于LD达最大值;冗余分析表明,群落盖度是驱动博乐绢蒿构件分配格局的最关键环境因子。综上,博乐绢蒿通过调整构件分配格局以应对草地退化,且于LD、MD间存在耐受阈值。

关键词:蒿类荒漠;植物群落特征;博乐绢蒿;构件分配格局

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2196-11

Community Structure and Modular Biomass Allocation Patterns of *Seriphidium borotalense* in Sagebrush Deserts at Different Degradation Gradients

FU Tian-hao¹, LIU Xing-yi^{1,2*}, DONG Yi-qiang^{1,3,4}, YAN An^{1,3,4}, SONG Yong-kang¹, YANG Chun-ying¹,
SAN Xing-yun¹, LEI Ya-xin¹, WU Kai¹

(1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Bole Prairie Workstation, Bole, Xinjiang 833400, China; 3. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang 830052, China;
4. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: In order to explore the response of sagebrush deserts grassland community structure and biomass component allocation pattern of *Seriphidium borotalense* to degradation under different degradation degrees, the plant community characteristics, plant community diversity index, species diversity characteristics, and modular biomass allocation patterns of *S. borotalense* desert grassland in undegraded (UD), lightly degraded (LD), moderately degraded (MD), and highly degraded (HD) areas were measured and analyzed. It was found that with the increase of degradation degree, the community height, coverage and aboveground biomass decreased significantly, and the density increased significantly ($P<0.05$). The Patrick index did not change, and the other diversity indexes decreased significantly. The height, coverage and aboveground biomass of *S. boro-*

收稿日期:2025-09-28;修回日期:2026-01-23

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFD1300305)资助

作者简介:符天昊(2002-),汉族,新疆精河人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态方向研究,E-mail: 2292948573@qq.com;*通信作者
Author for correspondence, E-mail: 284751536@qq.com

talense decreased significantly ($P < 0.05$), and the density reached the maximum at LD, but no *S. borotalense* was found at HD. The distribution of stem and leaf components such as plant height, stem length and leaf weight decreased significantly ($P < 0.05$), and the distribution of root components such as root weight, root diameter and root weight ratio reached the maximum at LD. Redundancy analysis showed that community coverage was the most critical environmental factor driving the component allocation pattern of *S. borotalense*. To sum up, *S. borotalense* responded to grassland degradation by optimizing the component allocation pattern, and the optimization threshold was between LD and MD.

Key words: Sagebrush desert; Plant community characteristics; *Seriphidium borotalense*; Modular biomass allocation patterns

蒿类荒漠是新疆荒漠草地中一种典型的生态景观, 在新疆面积为 $1.42 \times 10^7 \text{ hm}^2$, 占荒漠草地面积 52.8%^[1-2], 其具有防风固沙、水土保持和维持生物多样性的关键功能。但由于其生态特性较为脆弱, 蒿类荒漠对环境变化具有较高的敏感性, 从而极易遭受到损害^[3]。近年来, 在气候变化与过度放牧的双重压力下, 该类草地正经历严重退化, 表现为植被生产力下降、建群种衰退及生物多样性丧失^[4]。博乐绢蒿是荒漠草地重要的优等牧草, 且在晚春之前和秋霜之后适口性最佳, 因此, 博乐绢蒿荒漠草地可作为重要的春秋牧场^[5]。目前, 该类荒漠建群种和优势种逐渐被适口性差、饲用价值低的一年生草本植物所取代。博乐绢蒿作为荒漠草地的重要建群种之一, 其种群稳定性直接决定生态系统结构与功能。因此, 研究博乐绢蒿在不同退化程度下如何维持其种群稳定性是关键。

对于荒漠生态系统建群种(如博乐绢蒿), 其构件分配格局直接决定种群稳定性, 并深刻影响群落结构与功能^[6-7]。在资源受限环境中, 植物通过调整构件分配策略(如根、茎、叶分配比例)优化资源获取与生存竞争力, 这一过程遵循“最优分配理论”(Optimal Partitioning Theory)^[8]。当前研究证实, 草地退化导致建群种地上部分(茎、叶)衰退^[9-10], 但对其地下器官(根、根颈)的分配响应机制仍存在关键争议, 部分学者认为退化胁迫会引起资源向地下转移的“保守策略”(根冠比升高)^[11]; 还有研究表明重度退化将全面抑制植物营养分配的能力, 导致地下器官同步崩溃^[12]。这种分歧源于对不同退化程度下构件分配动态轨迹缺乏系统观测, 尤其忽视构件尺度的差异化响应。

目前, 大量研究多聚焦于群落尺度, 表明植物群落高度、盖度和地上生物量随退化程度加剧呈持续下降趋势^[13-15], 而对退化梯度下建群种构件分配策略的适应性响应及其与群落结构、多样性变化的耦合关系仍缺乏系统解析。因此, 深入研究荒漠草

地退化对植物群落数量特征、物种多样性、种群特征以及优势种构件分配策略的影响, 对于制定合理的草地放牧管理和退化草地恢复策略具有重要意义。本文将聚焦于不同退化程度下博乐绢蒿种群特征及其构件分配策略的适应性变化, 旨在为评估草地退化程度及制定有效恢复策略提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山北坡西段博乐市境内($81^\circ 39' 51.57'' \sim 81^\circ 50' 18.05'' \text{E}$, $44^\circ 50' 51.7'' \sim 45^\circ 04' 10.49'' \text{N}$), 地处欧亚大陆腹地, 准噶尔盆地西南缘, 属于温带大陆性干旱气候, 夏季炎热, 冬季寒冷, 年均气温为 8°C , 年均降雨量为 211.6 mm。研究区退化前均为典型的博乐绢蒿荒漠, 未退化草地(UD)优势种为博乐绢蒿, 伴生种为小蓬(*Nanophyton erinaceum*)、毛叶黄芪(*Astragalus pallasii*)、条叶庭荠(*Meniocus linifolius*)等, 土壤类型为灰钙土, 利用方式为禁牧; 轻度退化草地(LD)优势种为博乐绢蒿, 伴生种为小蓬、毛叶黄芪、条叶庭荠等, 土壤类型为灰钙土, 利用方式为放牧; 中度退化草地(MD)优势种为博乐绢蒿、散枝猪毛菜(*Pyankovia brachiata*), 伴生种为角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)、小蓬、条叶庭荠等, 土壤类型为灰钙土, 利用方式为放牧; 重度退化草地(HD)优势种为角果藜、角果毛茛(*Ceratocephala testiculata*), 伴生种为木地肤、条叶庭荠、絮菊(*Filago arvensis*)等, 土壤类型为灰钙土, 利用方式为放牧。

1.2 试验设计

2025年5月博乐绢蒿生长旺盛期对未退化(UD)、轻度退化(LD)、中度退化(MD)和重度退化(HD)这4个不同退化程度下的荒漠草地样地进行植被调查, 在每个样地布设5条长50 m、间距20 m

表 1 研究区基本概况

Table 1 Basic overview of the study area

退化程度 Degradation degree	地理位置 Geographical position	海拔 Elevation/m	优势种 Dominant species
未退化 UD	81°39'51.57" E 44°50'56.01" N	1116.13	博乐绢蒿 <i>Seriphidium borotalense</i>
轻度退化 LD	81°39'50.91" E 44°50'51.74" N	1122.05	博乐绢蒿 <i>Seriphidium borotalense</i>
中度退化 MD	81°39'52.66" E 44°52'54.86" N	970.56	博乐绢蒿, 散枝猪毛菜 <i>Seriphidium borotalense</i> <i>Pyankovia brachiata</i>
重度退化 HD	81°50'18.05" E 45°04'10.49" N	917.89	角果藜, 角果毛茛 <i>Ceratocarpus arenarius</i> <i>Ceratocephala testiculata</i>

注:草地退化等级基于《DB65/T 4348.1 草地退化状况评价技术规范第 1 部分:温性荒漠类》划分标准,依据草地植被建群种变化(60%)、草地植被覆盖度(20%)、草地水土流失情况(13%)、草地植被层片结构(4%)、扩散种分布状况(3%)进行打分(<60、60~74、75~84、85~100),分值由低到高划分为重度退化草地(HD)、中度退化草地(MD)、轻度退化草地(LD)、未退化草地(UD)。采样点均位于植被生长均匀且坡度<5°的平原地带

Note: The grassland degradation grade is based on the classification standard of DB65/T 4348.1 technical specification for grassland degradation assessment Part 1: warm desert, and is scored (<60, 60-74, 75-84, 85-100) according to the changes of grassland vegetation species (60%), grassland vegetation coverage (20%), grassland water and soil loss (13%), grassland vegetation layer structure (4%), and the distribution of diffuse species (3%). The score is divided into highly degraded grassland (HD), moderately degraded grassland (MD), lightly degraded grassland (LD), and undegraded grassland (UD) from low to high. The sampling points are located in the plain with uniform vegetation growth and slope<5°

的样线作为重复,每条样线布设 3 个 1 m²的调查小样方,测定时,记录各样方中的物种种类,并分种进行高度、盖度、密度及生物量的测定。在每个不同退化程度蒿类荒漠草地中挖掘 20 株具有代表性的全株博乐绢蒿,并对其根长、株高、茎长、根颈粗、根系干重、叶片干重和茎干重(生殖枝的茎+营养枝上除叶以外的部分)进行测定。

1.3 样品采集及测量方法

1.3.1 植物群落数量特征 每个样地布设 5 条样线作为重复,每条样线布设 3 个 1 m²的调查小样方,调查小样方时,高度采用常规方法测量自然高度(cm);物种盖度(%)采用针刺法测定;密度(株·m⁻²)为直接计数法记录株丛数;地上生物量(g·m⁻²)就地称鲜重,并带回实验室置于烘箱 105℃下杀青 30 min 后,80℃烘干 24 h 至恒重后称干重;地下生物量用土块挖掘法,在每条样线内随机布设 3 个面积为 10 cm×20 cm 的小样方,分层获取根系主要集中的 0~10 cm、10~20 cm 的土样,分别置于做好标签的尼龙袋(孔径为 0.5 mm)中,带回室内,利用水洗法获得地下根系生物量(80℃,24 h)。

1.3.2 博乐绢蒿构件特征 在每个不同退化程度蒿类荒漠草地中挖掘 20 株具有代表性的全株博乐绢蒿,将每株博乐绢蒿整株放入预先准备好的网袋(80 目)中,系好标签带回实验室供实验分析,室内植物样品阴干后,将单株植物根系上的土轻轻抖

掉,利用直尺测量其根长、株高、茎长;用游标卡尺测量根粗(根最粗处)、茎粗(茎秆最粗处)、根颈粗(地上 1 cm 的木质化部分最粗处);利用千分之一天平称其单株根系干重、叶片干重、茎干重(生殖枝的茎+营养枝上除叶以外的部分)。

1.4 数据处理

1.4.1 群落多样性指数 采用丰富度指数(Patrick 指数)、物种多样性指数(Shannon-Wiener 指数)、均匀度指数(Pilou 指数)和优势度指数(Simpson 指数)作为群落多样性指标。

计算公式如下:

重要值=(相对生物量+相对密度+相对高度)/3

Patrick 丰富度指数 $P=S$

Shannon-Wiener 多样性指数 $H=-\sum P_i \ln P_i$

Pielou 均匀度指数 $E=H/\ln S$

Simpson 优势度指数 $D=1-\sum P_i^2$

式中, S 为样地总物种数; P_i 为第 i 个物种重要值。

1.4.2 生物量分配指标计算 采用茎叶比、根重比、茎重比、叶重比和根冠比作为分配策略指标。

茎叶比=茎干重/叶干重

根重比=根干重/植株总干重

茎重比=茎干重/植株总干重

叶重比=叶干重/植株总干重

博乐绢蒿根冠比=地下生物量/地上生物量

1.5 数据分析

采用 Excel 2019 进行数据汇总;数据分析前,对所有数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk 检验)和方差齐性检验(Levene 检验),对于不满足正态分布的数据进行对数转换;统计分析采用 SPSS 26,对于满足方差齐性的数据,采用单因素方差分析(One-way ANOVA),对于不满足方差齐性的数据,则采用稳健方差分析(Welch's ANOVA);当方差分析结果显示显著差异时,对满足方差齐性的数据采用 Duncan 法比较其差异显著性;选用 Origin 2021 进行图形的绘制;选用 CANOCO 5 软件的 RDA 排序分析群落结构与博乐绢蒿构件分配格局变化的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同退化程度蒿类荒漠草地植物物种重要值的变化

随着退化程度的增加,半灌木和多年生草本呈下降趋势,一、二年生草本呈增加趋势(表 2)。半灌木重要值呈下降趋势,由 74.59% 下降至 1.35%,下降了 98.19%,其中建群种博乐绢蒿是半灌木主要组成部分,其重要值由 UD 的 67.51% 下降至 MD 的 20.02%,下降了 70.35%,且 HD 未发现博乐绢蒿。一、二年生草本重要值呈增加趋势,由 15.21% 上升至 95.81%,上升了 529.91%,其中角果藜在一、二年生草本中占比逐渐增加,重要值由 3.99% 上升至 75.74%,上升了 1798.25%。多年生草本物种变化不明显。

表 2 不同退化程度植物物种重要值
Table 2 Importance values of plant species with different degradation degrees

生活型 Life form	物种 Species	重要值 Importance value/ %			
		UD	LD	MD	HD
半灌木	博乐绢蒿 <i>Seriphidium borotalense</i>	67.51	69.47	20.02	/
	木地肤 <i>Bassia prostrata</i>	1.03	1.01	1.43	1.35
	小蓬 <i>Nanophyton erinaceum</i>	6.05	6.48	7.85	/
多年生草本	糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>	4.12	2.47	1.51	/
	毛叶黄芪 <i>Astragalus pallasii</i>	5.20	4.59	/	/
	镰芒针茅 <i>Stipa caucasica</i>	0.88	1.00	/	/
	腋球顶冰花 <i>Gagea bulbifera</i>	/	/	/	1.56
	藁草属 <i>Carex</i> sp.	/	/	/	1.28
一、二年生草本	角果藜 <i>Ceratocarpus arenarius</i>	3.99	1.64	18.26	75.74
	条叶庭荠 <i>Meniocus linifolius</i>	6.14	9.62	1.90	1.07
	石果鹤虱 <i>Lappula spinocarpos</i>	3.38	2.24	2.14	0.54
	大苞点地梅 <i>Androsace maxima</i>	1.38	0.54	/	/
	篇蓄 <i>Polygonum aviculare</i>	0.18	0.78	0.21	0.16
	弯果胡卢巴 <i>Trigonella arcuata</i>	0.14	0.16	0.54	1.94
	絮菊 <i>Filago arvensis</i>	/	/	1.06	5.74
	四齿芥 <i>Tetradlea quadricornis</i>	/	/	0.91	/
	散枝猪毛菜 <i>Pyankovia brachiata</i>	/	/	43.97	/
	角果毛茛 <i>Ceratocephala testiculata</i>	/	/	0.20	10.62

2.2 不同退化程度蒿类荒漠草地植物群落特征的变化

随退化程度增加,草地群落高度、盖度和地上生物量均呈显著下降趋势,而密度呈显著上升趋势(表 3)。LD、MD、HD 的高度和盖度均显著低于 UD($P<0.05$),MD 与 HD 间无显著差异;MD、HD 的地上生物量显著低于 UD 和 LD($P<0.05$),UD 和 LD 间无显著差异;UD、LD、MD 的密度显著低于 HD($P<0.05$),UD 和 LD 间无显著差异。高度、盖度以及地上生物量分别下降了 24.57%~74.48%,

27.63%~63.15%,16.79%~81.22%;密度上升了 16.33%~757.67%。

随退化程度增加,Patrick 指数变化不明显,而 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 指数均呈显著下降趋势(表 3)。其中,UD 的 Simpson 指数、Shannon-Wiener 指数和 Pielou 指数均显著高于 MD 和 HD($P<0.05$)。Shannon-Wiener 指数下降了 12.99%~59.74%;Simpson 指数下降了 10.61%~60.61%;Pielou 指数下降了 7.94%~57.14%。

表 3 不同退化程度植物群落特征及多样性指数

Table 3 Characteristics and diversity index of plant communities with different degradation degrees

指标 Index	未退化 Undegraded grassland	轻度退化 Lightly degraded grassland	中度退化 Moderately degraded grassland	重度退化 Highly degraded grassland
群落高度 Community height/cm	5.29±1.02 ^a	3.99±0.85 ^b	1.46±0.29 ^c	1.35±0.18 ^c
群落盖度 Community coverage/%	40.90±8.10 ^a	29.60±1.39 ^b	11.77±1.39 ^c	15.07±2.44 ^c
群落密度 Community density/(株·m ⁻²)	89.00±14.62 ^c	103.53±18.57 ^c	334.60±135.60 ^b	763.33±200.98 ^a
群落地上生物量 Community aboveground biomass/(g·m ⁻²)	66.63±16.54 ^a	55.44±7.90 ^a	29.90±7.40 ^b	12.51±4.31 ^c
Patrick 指数 Patrick index	11.80±2.17 ^a	10.60±3.21 ^a	13.60±1.14 ^a	10.60±1.52 ^a
Shannon-Wiener 指数 Shannon-Weiner index	1.54±0.11 ^a	1.34±0.29 ^{ab}	1.17±0.08 ^b	0.62±0.10 ^c
Simpson 指数 Simpson index	0.66±0.03 ^a	0.59±0.09 ^{ab}	0.53±0.07 ^b	0.26±0.05 ^c
Pielou 指数 Pielou index	0.63±0.05 ^a	0.58±0.07 ^a	0.45±0.03 ^b	0.27±0.04 ^c

注:同行不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同

Note: Different letters among the same row indicate significant differences ($P<0.05$), the same as below

2.3 不同退化程度蒿类荒漠草地博乐绢蒿种群特征的变化

博乐绢蒿种群特征随蒿类荒漠草地退化加剧呈显著下降趋势,且HD未发现博乐绢蒿。博乐绢蒿植株高度、盖度和地上生物量(图1a,b,d)在UD、LD和MD之间表现出显著差异($P<0.05$);博乐绢蒿种群密度(图1c)呈先升高后降低的单峰变化趋势,LD样地达峰值,且LD、UD、MD间表现出显著差异($P<0.05$)。高度方面从7.09 cm下降到2.32 cm;盖度方面从37.13%下降到5.5%;密度方面从48.47 株·m⁻²上升后下降到21.93 株·m⁻²;地上生物量方面从48.99 g·m⁻²下降到12.52 g·m⁻²。

2.4 不同退化程度蒿类荒漠草地博乐绢蒿构件分配格局的变化

博乐绢蒿形态特征对退化程度的响应各异(表4),HD未发现博乐绢蒿。博乐绢蒿的根长、茎粗在各样地的根长差异不显著;根粗和根颈粗随退化程度增加呈下降趋势,且UD和LD均显著高于MD($P<0.05$),根粗和根颈粗分别下降了30.75%和35.55%;茎长和株高均随退化程度加剧而呈下降趋势,其中UD的茎长、株高均显著高于LD和MD

($P<0.05$),茎长和株高分别下降了68.73%和68.86%。

博乐绢蒿营养分配对退化程度的响应各异。博乐绢蒿的根重呈下降趋势(图2a),UD和LD根重显著高于MD($P<0.05$),博乐绢蒿的根重上升至LD的1.84 g·株⁻¹后下降了52.72%;博乐绢蒿的茎重和叶重均随退化程度加剧而呈下降趋势(图2b,c),其中UD的茎重和叶重均显著高于LD和MD($P<0.05$),而LD和MD之间的差异不显著,其茎重和叶重分别下降了49.38%和80.67%;博乐绢蒿茎叶比呈持续增长趋势(图2d),不同退化程度间差异显著($P<0.05$),茎叶比从282.53%提升到了735.46%;博乐绢蒿的根重比和根冠比均在LD上上升至最高后下降(图2e,h),LD根重比和根冠比显著高于UD和MD($P<0.05$),LD根重比和根冠比分别为47.10%,95.57%;博乐绢蒿的茎重比随退化程度加剧在LD下降后上升(图2f),UD、LD、MD之间表现出显著差异($P<0.05$),分别为52.15%,42.61%,57.94%;博乐绢蒿叶重比随退化程度加剧呈持续下降趋势(图2g),LD和MD之间差异不显著,但均显著低于UD($P<0.05$),UD叶重比为20.23%。

表 4 不同退化程度蒿类荒漠博乐绢蒿形态特征

Table 4 Morphological characteristics of *Seriphidium borotalense* in sagebrush deserts across degradation gradients

指标 Index	未退化 Undegraded grassland	轻度退化 Lightly degraded grassland	中度退化 Moderately degraded grassland
株高 Plant height/cm	20.84±8.71 ^a	7.07±3.54 ^b	6.49±5.22 ^b
根长 Root length/cm	23.06±5.54 ^a	25.87±10.24 ^a	23.05±8.35 ^a
茎长 Stem length/cm	27.47±9.98 ^a	9.97±4.69 ^b	8.59±6.54 ^b
根粗 Root diameter/mm	5.04±0.96 ^a	5.03±1.55 ^a	3.49±1.28 ^b
茎粗 Stem diameter/mm	4.51±1.23 ^{ab}	5.09±1.52 ^a	4.05±1.22 ^b
根颈粗 Root collar diameter/mm	8.58±2.63 ^a	8.57±2.64 ^a	5.53±2.51 ^b

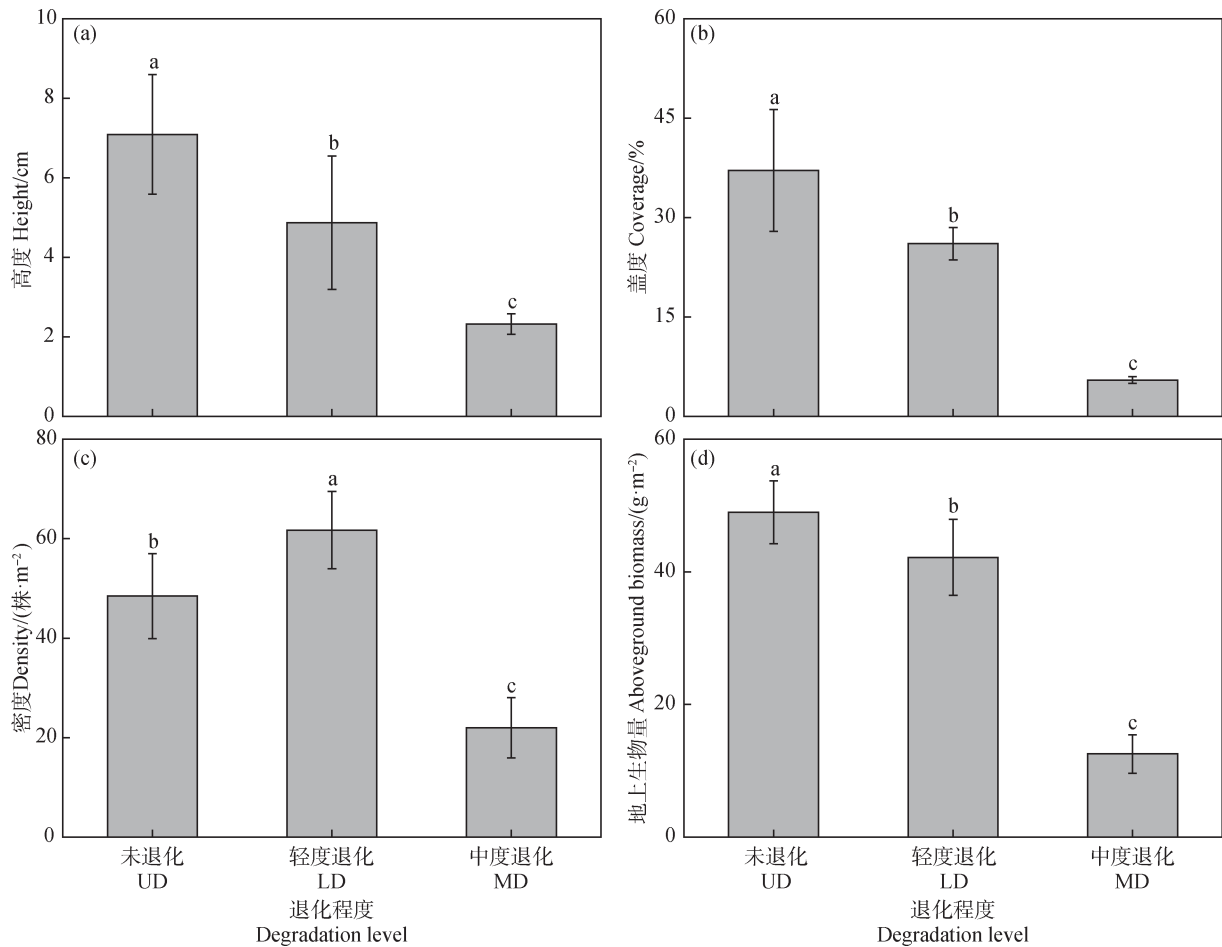


图1 不同退化程度蒿类荒漠博乐绢蒿种群特征

Fig. 1 Population characteristics of *Seriphidium borotalense* in sagebrush deserts under different degradation gradients

注:图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$),下同

Note: Different letters in the figure indicate significant differences ($P < 0.05$), the same as below

2.5 植物群落特征对博乐绢蒿构件分配格局的冗余分析

以博乐绢蒿构件特征和形态特征为响应变量,植物群落特征(群落高度、群落盖度、群落密度、群落地上生物量及群落根冠比)和植物群落多样性指数(丰富度指数、物种多样性指数、均匀度指数和优势度指数)为解释变量进行冗余分析(图4),结果表明,第一轴解释了变量的53.39%,第二轴解释了变量的24%,累计解释量达77.39%。其中群落盖度与博乐绢蒿构件特征有极显著相关关系($P < 0.01$),解释了博乐绢蒿构件特征的48.7%。

3 讨论

3.1 荒漠草地退化对群落结构和多样性的影响

随着退化程度加剧,群落高度、盖度、地上生物量均呈现显著下降趋势,而群落密度呈现上升趋

势,特别是在MD、HD中显著高于UD,这一结果与王合云等^[16]的研究结果一致。随着退化程度的加剧半灌木由主导地位到逐渐消失,多年生草本重要值逐渐降低,一、二年生草本则上升到主导地位(表2),这一结果与吴昱萱等^[17]的研究结果一致。草地退化是多因素主导的结果,放牧干扰是其中重要因素之一。放牧通过直接采食和践踏植物,首先表现为植物整体受损,即高度、盖度和地上生物量的下降,这反映了退化草地上植被生产力的整体降低。同时,选择或优先采食适口性较好的半灌木和多年生草本,使得半灌木和多年生草本重要值降低甚至消失,这反映了退化草地上冠层结构趋于简单化。这些与一、二年生草本重要值急剧上升共同反映了蒿类荒漠草地正处于逆向演替阶段。这种现象深刻揭示了蒿类荒漠草地退化机制,即过度放牧导致作为优势种或建群种的半灌木衰退,削弱了其对生态位的竞争抑制,释放出的资源与空间被一、二年生

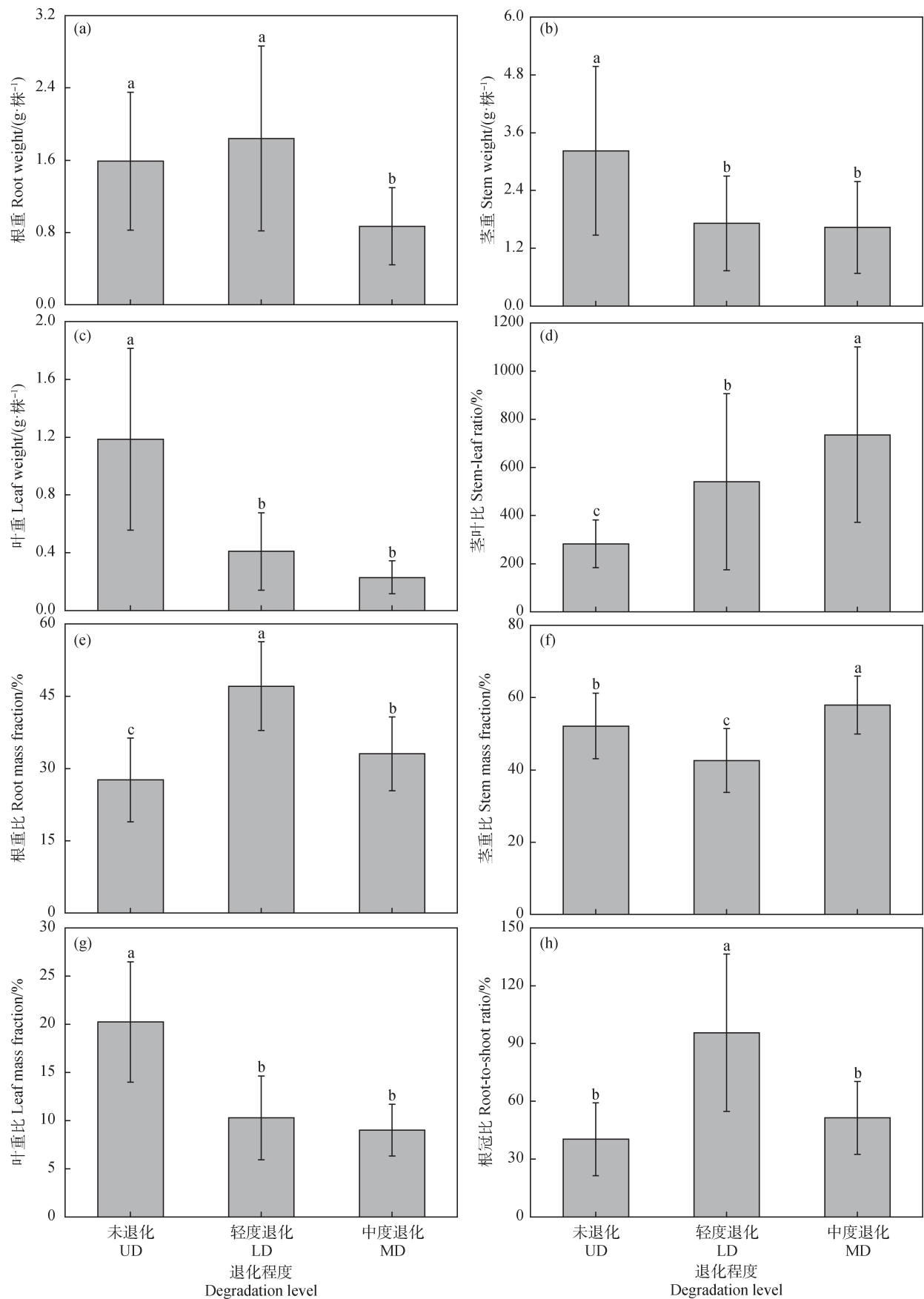


图 2 不同退化程度蒿类荒漠博乐绢蒿生物量分配格局

Fig. 2 Modular Biomass allocation patterns of *Seriphidium borotalense* in sagebrush deserts across degradation gradients

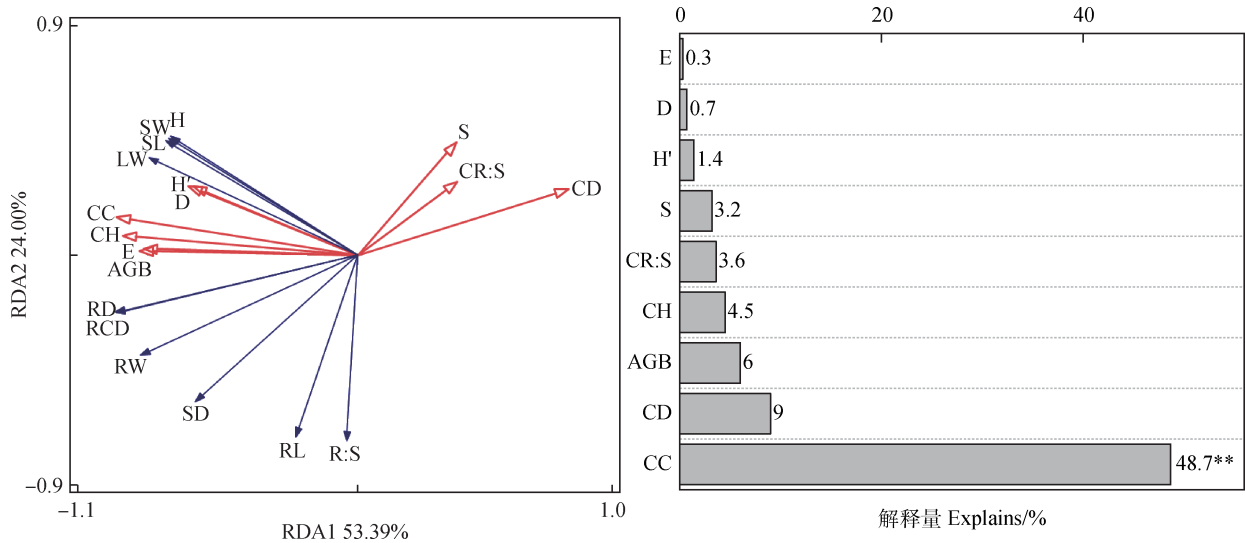


图3 植物群落特征对博乐绢蒿构件分配格局的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of modular allocation patterns in *Seriphidium borotalense* driven by plant community characteristics
注:图中蓝线箭头为响应变量(博乐绢蒿构件特征以及形态特征),红线箭头为解释变量(植物群落特征),RW、SW、LW、R:S、H、RL、RD、SL、SD、RCD、CH、CC、CD、AGB、CR:S、S、H'、D和E,分别代表根重、茎重、叶重、博乐绢蒿根冠比、株高、根长、根粗、茎长、茎粗、根颈粗、群落高度、群落盖度、群落密度、群落地上生物量、群落根冠比、丰富度指数、物种多样性指数、均匀度指数和优势度指数。**, $P < 0.01$

Note: The blue line arrow in the figure is the response variable (component characteristics and morphological characteristics of *S. borotalense*), and the red line arrow is the explanatory variable (plant community characteristics). RW, SW, LW, R:S, H, RL, RD, SL, SD, RCD, CH, CC, CD, AGB, CR:S, S, H', D and E, respectively representing root weight, stem weight, leaf weight, root shoot ratio, plant height, root length, root diameter, stem length, stem diameter, root collar diameter, community height, community coverage, community density, aboveground biomass, root shoot ratio, richness index, species diversity index, evenness index and dominance index. **, $P < 0.01$

草本植物快速占据并大量繁殖,导致群落密度显著增加,但群落整体趋于矮小化、结构简化^[18-19]。与UD相比,LD地上生物量降幅未达显著水平,表明此阶段群落生产力尚能维持一定水平,然而,高度和盖度的同步下降,以及密度的显著增加,已共同预示着群落结构变化的开始^[20]。草地群落从高大、高覆盖变为矮小、高密度,是荒漠草地退化最直观的体现^[21-22]。

群落的 Shannon-Wiener、Simpson 与 Pielou 指数均随退化程度加剧呈持续下降趋势,这与植物群落特征的下降趋势高度一致。这种下降表明蒿类荒漠草地群落组成趋向单一化,物种间个体分布的均匀度降低,群落的稳定性和复杂性受损^[23]。Patrick 指数呈现先升后降的趋势,各退化程度间差异不显著。这反映了建群种衰退释放生态位与资源,为耐干扰、适应性强的一年生植物提供短暂定植窗口,致使物种数暂时增加^[24]。但这种 Patrick 指数的稳定是以牺牲群落多样性为代价的。当退化进一步加剧至重度时,严酷的环境最终可能导致 Patrick 指数也显著下降,群落陷入单一化和低多样性的状态。因此,荒漠草地退化驱动了群落特征和植物多样性的一系列协同变化,共同标志着生态系统稳定

性和功能性的衰退。

3.2 荒漠草地退化对博乐绢蒿种群特征的影响

博乐绢蒿作为研究区的建群种、优势种,其种群对蒿类荒漠草地退化极端敏感(图1)。博乐绢蒿高度、盖度和地上生物量均随退化加剧而持续显著下降,密度为先升后降趋势,至HD时,博乐绢蒿已完全消失。建群种的崩溃是荒漠草地退化的重要表现形式^[25]。但通过其密度变化可知,博乐绢蒿种群对退化的响应并非线性的,而是表现出明显的阈值,博乐绢蒿密度在LD的显著上升,可能是一种对退化胁迫的补偿性响应,以期通过数量优势来维持种群在群落中的竞争力,而种群密度的增加可能源于土壤种子库大量萌发,抑或是其强大的营养繁殖能力^[26]。草地群落特征和博乐绢蒿种群特征随退化程度加剧的共同表现也再次证明建群种的衰退为一些耐旱、耐贫瘠、植株矮小的一、二年生草本释放了生态位,加速了群落组成的改变^[18]。因此,综合考量博乐绢蒿种群的高度、密度、盖度和地上生物量等指标的变化,而非单一指标,是评估该类草地退化程度的核心方法。

3.3 荒漠草地退化对博乐绢蒿构件分配格局的影响

生物量分配是植物对资源分配策略的体现,是通过光合和呼吸作用在不同器官间分配的结果^[27]。博乐绢蒿在面对退化带来的如水分限制^[28]、养分限制^[29]、竞争格局改变^[30]等胁迫时,其通过调整构件分配格局以适应环境。博乐绢蒿根长无显著差异;根粗与根颈粗均在LD后显著下降,而根重比和根冠比于LD显著升高后下降,这与Shan等^[31]研究结果一致,即在水分和养分条件贫瘠的干旱地区,植物通过优先扩张根系、提高根冠比,将光合产物集中输向地下器官,以最大化对水分和养分的获取效率。该分配模式符合“资源分配权衡”(Trade-off)策略^[32],即植物将更多的资源分配于地下器官,用来维系根的生长,旨在维系根的吸收、运输和储存能力,以应对日益严峻的环境压力^[33]。与此同时,博乐绢蒿地上部分茎重和叶重呈显著下降趋势,而茎重比呈现出先降后升趋势,茎叶比呈显著上升趋势,这可能是因为植物将资源用于维系根的生长,逐渐减少了对茎和叶的供给;相对茎而言,叶片对环境波动更为敏感,在缺少供给的情况下,叶片更易受损,在严重胁迫下叶片会加速黄化、脱落甚至枯死;相比之下,茎的代谢消耗相对较低,在逆境中更易保存,即便茎的绝对重量也在下降,但下降速度慢于叶片,导致茎叶比显著上升。这与党晶晶等^[34]在高寒退化草地研究中,甘肃臭草在斑块衰退阶段的表现一致。该策略倾向于维持自身水分和养分运输安全的保守型策略,而非促进地上部分快速生长抢占冠层、地下部分扩大吸收范围的竞争型策略,但其适应能力存在耐受极限^[35]。随着退化程度加剧至MD,不仅地上部分持续衰退,其优先分配资源的地下部分也显著低于UD和LD。因此,当退化胁迫超过博乐绢蒿耐受阈值时,其资源优先分配地下部分的分配模式无法维持资源获取与消耗间的平衡,导致种群在HD中消失。结果表明博乐绢蒿在面对退化风险时,其资源分配呈现出明显主次:首先,优先分配地下器官,以保障资源吸收,而非冠层竞争;其次,地下器官资源分配中,更侧重于运输与储存结构,而非扩大资源获取范围。

3.4 群落结构对博乐绢蒿构件分配格局的影响

博乐绢蒿荒漠草地群落结构的变化与博乐绢蒿

生物量分配策略之间存在密切的相互作用。退化导致的群落结构变化也可能是驱动博乐绢蒿生物量分配调整的重要因素之一^[36]。随退化程度增加,草地群落和博乐绢蒿种群的高度、盖度和地上生物量同步下降,草地群落密度显著上升,博乐绢蒿种群密度表现为先升后降。密度的增加意味着单位面积内个体数量增多,致使种内和种间对光照、水分、养分的竞争加剧。这种资源竞争压力的增加,很可能是促使博乐绢蒿在LD优先投资地下器官的直接原因,即LD群落层片以矮小型草本为主,对冠层竞争压力相对缓和,博乐绢蒿遂将资源转向地下器官,以优先保障水分与养分的吸收^[37]。同时,草地群落盖度的下降可能导致地表蒸发加剧、微生物环境恶化等,进一步放大了植物对水分吸收与储存能力的迫切需求^[38-39]。因此,草地群落特征的改变不仅是退化的直接表现,也通过改变资源可得性与竞争强度,影响博乐绢蒿构件分配格局。LD地下投资达峰值,既可能是对退化胁迫的响应,也可能是对激烈的种间、种内竞争环境的适应,而当群落结构退化超过其耐受阈值时,该策略无法维持博乐绢蒿资源获取和消耗间的平衡,导致其无法存活。

4 结论

随草地退化程度增加,群落高度、盖度及地上生物量显著下降而密度显著升高,与重要值、多样性指数的变化综合说明群落结构趋于简化。博乐绢蒿种群高度、盖度及地上生物量显著下降,密度于LD显著增加后下降,茎叶构件分配均显著下降,根系构件分配均于LD达最大值后下降,发现其可通过增加种群密度、优化构件分配格局以应对草地退化,且LD与MD间存在阈值,HD未发现博乐绢蒿。冗余分析显示,博乐绢蒿种群特征及其构件分配格局与群落特征密切相关,与最重要的环境因子群落盖度为正相关关系,群落盖度可预测博乐绢蒿生长及恢复潜力。综上,群落盖度、博乐绢蒿种群特征及其构件分配格局可作为评估该类草地退化程度的重要指标。

参考文献

- [1] 田梦,孙宗玖,李莹,等. 蒿类荒漠草地土壤种子库特征及其萌发植物多样性对降水增加的响应[J]. 草业学报,2019,28(12):17-28
TIAN M, SUN Z J, LI Y, et al. Response to increasing precipitation in Artemisia desert grassland of soil seed bank composi-

- tion and species diversity of germinating plants[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(12): 17-28
- [2] 周时杰,董乙强,阿斯太肯·居力海提,等. 天山北坡蒿类荒漠植物群落数量特征及其多样性[J]. *新疆农业科学*, 2023, 60(9): 2298-2305
- ZHOU S J, DONG Y Q, Asitaiken Julihaiti, et al. Quantitative characteristics and diversity of sagebrush desert plant communities on the northern slope of Tianshan Mountains[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2023, 60(9): 2298-2305
- [3] 李文雄,靳瑰丽,刘文昊,等. 基于无人机遥感的荒漠草地上生物量反演研究[J]. *草地学报*, 2025, 33(4): 1258-1266
- LI W X, JIN G L, LIU W H, et al. Research on aboveground biomass inversion of desert grassland based on UAV remote sensing[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(4): 1258-1266
- [4] 孙沛沛,钱朝菊,尹晓月,等. 半干旱区沙地蒿类植被建成对土壤细菌的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5783-5792
- SUN P P, QIAN C J, YIN X Y, et al. Effects of *Artemisia* vegetation built on soil bacteria in semi-arid sandy land[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(16): 5783-5792
- [5] 贾慎修,祝廷成,黄兆华,等. 中国饲用植物志[M]. 北京:农业出版社, 1989: 233-235
- JIA S X, ZHU T C, HUANG Z H, et al. Chinese Forage Plant Records[M]. Beijing: Agricultural Press, 1989: 233-235
- [6] SCHENK H J, JACKSON R B. The global biogeography of roots[J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(3): 311-328
- [7] BARDGETT R D, MOMMER L, DE VRIES F T. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2014, 29(12): 692-699
- [8] BLOOM A J, CHAPIN F S. Resource limitation in plants an economic analogy[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1985, 16: 363-392
- [9] XIANG M X, LUO R K, WU J X, et al. Grazing intensity modifies Alpine grassland fine root traits on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plant Ecology*, 2025, 226(4): 363-374
- [10] ZHOU H K, YANG X Y, ZHOU C Y, et al. Alpine grassland degradation and its restoration in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Grasses*, 2023, 2(1): 31-46
- [11] FRESCHET G T, VIOLLE C, BOURGET M Y, et al. Allocation, morphology, physiology, architecture: the multiple facets of plant above- and below-ground responses to resource stress[J]. *New Phytologist*, 2018, 219(4): 1338-1352
- [12] WANG X X, DONG S K, SHERMAN R, et al. A comparison of biodiversity-ecosystem function relationships in Alpine grasslands across a degradation gradient on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *The Rangeland Journal*, 2015, 37(1): 45-55
- [13] 李浩天,党晓宏,高永,等. 西乌珠穆沁草甸草地退化对植物群落结构与土壤特性的影响[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2025, 23(6): 115-124
- LI H T, DANG X H, GAO Y, et al. The impact of grassland degradation on plant community structure and soil characteristics in Xiuzhumuqin Grassland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2025, 23(6): 115-124
- [14] 曹颖,聂明鹤,沈艳,等. 宁夏干旱风沙区荒漠草原不同退化阶段植被土壤变化特征及其相关性[J]. *草业学报*, 2024, 33(8): 1-14
- CAO Y, NIE M H, SHEN Y, et al. Changes in vegetation and soil characteristics and their correlations in grasslands at different stages of degradation on the desert steppe in an arid wind-sandy area of Ningxia[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(8): 1-14
- [15] 杜金山,蒲俊宇,黄晶,等. 温带羊草草原退化对羊草根系形态特征的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(10): 3147-3154
- DU J S, PU J Y, HUANG J, et al. Effects of temperate *Leymus chinensis* steppe degradation on the root morphological traits of *Leymus chinensis* [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(10): 3147-3154
- [16] 王合云,郭建英,李红丽,等. 短花针茅荒漠草原不同退化程度的植被特征[J]. *中国草地学报*, 2015, 37(3): 74-79
- WANG H Y, GUO J Y, LI H L, et al. Vegetation characteristics of *Stipa breviflora* desert steppe in different degradation degree[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2015, 37(3): 74-79
- [17] 吴昱萱,王平,胡晓生,等. 呼伦贝尔草地退化现状评估与植被特征变化[J]. *生物多样性*, 2025, 33(2): 36-47
- WU Y X, WANG P, HU X S, et al. Evaluation of grassland degradation status and vegetation characteristics changes in Hulunbuir[J]. *Biodiversity Science*, 2025, 33(2): 36-47
- [18] 段俊光,房凯,褚建民,等. 退化程度对典型草原物种多样性和土壤养分关系的影响[J]. *草地学报*, 2025, 33(9): 2890-2899
- DUAN J G, FANG K, CHU J M, et al. Effect of degradation stage on the relationship between species diversity and soil nutrients in typical steppe[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(9): 2890-2899
- [19] 王婷,杨思维,花蕊,等. 高寒草原植物功能群组成对退化程度的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(7): 2225-2233
- WANG T, YANG S W, HUA R, et al. Response characteristics of composition of plant functional groups to various grassland degradation conditions in alpine steppe on the Tibetan Plateau, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2225-2233
- [20] 王公鑫,井长青,董萍,等. 新疆荒漠草地地上和地下生物量分配格局[J]. *草业科学*, 2023, 40(5): 1201-1209
- WANG G X, JING C Q, DONG P, et al. Distribution patterns of aboveground and underground biomass in desert grasslands in Xinjiang[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(5): 1201-1209
- [21] 薛昌琳,董瑞,吕世杰,等. 荒漠草原中不同放牧强度下植物群落的相似性研究[J]. *草原与草业*, 2024, 36(4): 22-27
- XUE C L, DONG R, LYU S J, et al. Study on the similarity of plant communities in desert steppe under different grazing intensities[J]. *Grassland and Prataculture*, 2024, 36(4): 22-27
- [22] 李凤霞,张德罡. 草地退化指标及恢复措施[J]. *草原与草坪*, 2005, 25(1): 24-28
- LI F X, ZHANG D G. Indicators and recovery approaches of degenerated grassland in China[J]. *Grassland and Turf*, 2005, 25(1): 24-28
- [23] 魏卫东,刘育红,马辉,等. 退化高寒沼泽草甸植物功能群特

- 征与土壤理化因子间的关系[J]. 草业科学, 2026, 43(1): 15-28
- WEI W D, LIU Y H, MA H, et al. The relationship between plant functional group characteristics and soil physical and chemical factors in degraded alpine swamp meadow[J]. Prata-cultural Science, 2026, 43(1): 15-28
- [24] 刘育红, 杨元武, 张英. 退化高寒草甸植物功能群与土壤因子关系的冗余分析[J]. 生态与农村环境学报, 2018, 34(12): 1112-1121
- LIU Y H, YANG Y W, ZHANG Y. Redundancy analysis of the relationship between plant functional groups and soil factors in the degraded alpine meadow [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2018, 34(12): 1112-1121
- [25] 闫玉春, 唐海萍. 草地退化相关概念辨析[J]. 草业学报, 2008, 17(1): 93-99
- YAN Y C, TANG H P. Differentiation of related concepts of grassland degradation[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(1): 93-99
- [26] 尚占环, 徐鹏彬, 任国华, 等. 土壤种子库研究综述——植被系统中的作用及功能[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 175-183
- SHANG Z H, XU P B, REN G H, et al. Review of soil seed bank studies—soil seed bank function in natural ecosystem[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(2): 175-183
- [27] 黄明泉. 典型地段思茅松天然林生物量分配的比较分析及环境解释[D]. 昆明: 西南林业大学, 2018: 20-35
- HUANG M Q. Comparative analysis and environmental interpretation of the biomass distribution of Simao pine natural forest in typical section [D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2018: 20-35
- [28] MUNSON S M. Plant responses, climate pivot points, and trade-offs in water-limited ecosystems[J]. Ecosphere, 2013, 4(9): art109
- [29] 安立伟, 李志刚. 退化荒漠草地恢复对土壤有机碳及其驱动因子的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(13): 5519-5531
- AN L W, LI Z G. Effects of the degraded desert grassland restoration on soil organic carbon and its driving factors[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5519-5531
- [30] PIERCE N A, ARCHER S R, BESTELMEYER B T, et al. Grass-shrub competition in arid lands: an overlooked driver in grassland-shrubland state transition?[J]. Ecosystems, 2019, 22(3): 619-628
- [31] SHAN L S, ZHANG X M, WANG Y K, et al. Influence of moisture on the growth and biomass allocation in *Haloxylon ammodendron* and *Tamarix ramosissima* seedlings in the shelterbelt along the Tarim Desert Highway, Xinjiang, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(2): 93-101
- [32] KLEYER M, MINDEN V. Why functional ecology should consider all plant organs: an allocation-based perspective [J]. Basic and Applied Ecology, 2015, 16(1): 1-9
- [33] 詹瑾, 李玉霖, 韩丹, 等. 半干旱沙区3种优势固沙灌木生物量分配及其生态学意义[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 149-157
- ZHAN J, LI Y L, HAN D, et al. Biomass allocation and its ecological significance of three dominant sand-fixing shrubs in the semi-arid desert area[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 149-157
- [34] 党晶晶, 赵成章, 王继伟. 高寒草地甘肃臭草斑块不同发育阶段茎-叶生物量分配: 异速生长分析[J]. 生态学杂志, 2015, 34(6): 1540-1545
- DANG J J, ZHAO C Z, WANG J W. Biomass allocation of stems and leaves in *Melica przewalskyi* under different developmental stages in Alpine grassland: allometric scaling analysis [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, 34(6): 1540-1545
- [35] ZHANG H X, MCDOWELL N G, LI X R, et al. Hydraulic safety and growth rather than climate of origin influence survival in desert shrubs and trees [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 543: 121130
- [36] 王敏, 张鲜花, 袁小强, 等. 干扰程度对典型草原植物群落数量特征及物种多样性的影响[J]. 草原与草坪, 2023, 43(4): 122-129, 136
- WANG M, ZHANG X H, YUAN X Q, et al. Effects of disturbance degree on quantitative characteristics and species diversity in typical steppe plant communities [J]. Grassland and Turf, 2023, 43(4): 122-129, 136
- [37] TIEMUERBIEKE B, MIN X J, ZANG Y X, et al. Water use patterns of co-occurring C(3) and C(4) shrubs in the Gurban-tonggut desert in northwestern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 634: 341-354
- [38] 胡中民, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 生态系统水分利用效率研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1498-1507
- HU Z M, YU G R, WANG Q F, et al. Ecosystem level water use efficiency: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(3): 1498-1507
- [39] STEUDLE E. Water uptake by plant roots: an integration of views[J]. Plant and Soil, 2000, 226(1): 45-56

(责任编辑 彭露茜)