

DOI: 10.11686/cyxb2025021

http://cyxb.magtech.com.cn

刘晨旭, 宋彦涛, 孙磊, 等. 围封改变了羌塘草原植物群落多样性和地上生物量间的关系. 草业学报, 2025, 34(12): 62-72.

LIU Chen-xu, SONG Yan-tao, SUN Lei, et al. Grazing exclusion modifies the relationship between plant community diversity and aboveground biomass in the Qiangtang grassland. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(12): 62-72.

围封改变了羌塘草原植物群落多样性和地上生物量间的关系

刘晨旭¹, 宋彦涛^{1*}, 孙磊², 彭滔¹, 乌云娜¹

(1. 大连民族大学环境与资源学院, 辽宁 大连 116000; 2. 西藏农牧学院动物科学学院, 西藏 林芝 860000)

摘要: 围封是恢复退化草原生态系统的有效措施之一。为探寻围封对草原植物群落的影响, 本研究在那曲市班戈县, 以羌塘草原围封区域为研究对象, 选取围封5、9、13、17以及21年样地, 对照为各围封年限样地围栏外自由放牧样地。通过方差分析、回归分析和相关性分析研究两种土地利用方式对植物群落特征、植物群落多样性以及两者间关系的影响。结果表明: 围封增加了优势种紫花针茅的重要值, 围封不同年限后地上生物量、盖度、高度和密度均有不同程度的提高, 其中在围封9、21年后围栏内显著高于围栏外($P < 0.05$)。围封9年后, 围栏内 α 多样性指数显著低于围栏外($P < 0.05$)。并且围封后, 地上生物量和植物群落多样性的关系发生改变, 围栏外地上生物量和植物群落多样性的关系呈正相关趋势, 但并不显著($P > 0.05$), 而围栏内二者的关系呈显著的负相关趋势($P < 0.05$)。综上所述: 羌塘草原围封9年左右是较为合理的时间, 而围封后, 根据“质量比假说”优势种(紫花针茅)地上生物量的增加是影响地上生物量和植物群落多样性关系的关键因子。

关键词: 围封; 羌塘草原; 植物多样性; 地上生物量; 重要值

Grazing exclusion modifies the relationship between plant community diversity and aboveground biomass in the Qiangtang grassland

LIU Chen-xu¹, SONG Yan-tao^{1*}, SUN Lei², PENG Tao¹, Wuyunna¹

1. College of Environmental and Bioresources, Dalian Minzu University, Dalian 116000, China; 2. College of Animal Science, Xizang Agriculture Animal Husbandry University, Nyingchi 860000, China

Abstract: Grazing exclusion is one of the effective measures for restoring degraded grassland ecosystems. The aim of this study was to examine the effect of fencing for various periods on grassland plant communities in the Qiangtang grassland. A field study was conducted in Nagqu City, Bangor County, where grassland plots enclosed for 5, 9, 13, 17, and 21 years were selected for analysis, with freely-grazed areas outside the enclosures as the control plots. We assessed the effects of enclosure and free-grazing practices on plant community characteristics, plant community diversity, and their relationships by analysis of variance, regression analysis, and correlation analysis. The results indicate that enclosure increased the importance value of the dominant species, *Stipa purpurea*. Varying levels of enhancement in aboveground biomass (AGB), coverage, height, and density were observed after different periods of enclosure, with significant differences detected between the free-grazed and enclosed plots after 9 and 21 years

收稿日期: 2025-01-20; 改回日期: 2025-03-17

基金项目: 大连民族大学-西藏农牧学院联合基金(DLMZ-NMXY2021002), 辽宁省科技计划联合计划应用基础研究项目(2023JH2/101700027)和中央高校基本科研业务费(2025)资助。

作者简介: 刘晨旭(1999-), 男, 河北张家口人, 在读硕士。E-mail: 1767911069@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: yantaosong@dlnu.edu.cn

($P < 0.05$). Notably, the alpha diversity of the plant community was significantly lower in enclosed plots than in free-grazed plots after 9 years of enclosure ($P < 0.05$). Following initial grazing exclusion, the relationship between AGB and plant community diversity underwent a pronounced shift. In non-enclosed (grazed) areas, AGB and diversity indices exhibited a positive, albeit non-significant correlation ($P > 0.05$). Conversely, within the enclosures, AGB and diversity indices showed statistically significant negative correlations ($P < 0.05$). These results collectively indicate that enclosure for 9 years optimizes grassland management outcomes for the Qiangtang grassland. Crucially, the post-enclosure increases in the AGB of the dominant species (*S. purpurea*) serve as the primary mechanistic driver underlying the change in the AGB-diversity relationship, consistent with the mass ratio hypothesis.

Key words: enclosure; Qiangtang grassland; plant diversity; aboveground biomass; importance value

青藏高原包含我国面积最大的草地资源,约有8800万 hm^2 ^[1],又被誉为“世界屋脊”“亚洲水塔”,在亚洲水资源和动物肉制品供应方面有着举足轻重的地位^[2]。一段时间以来,由于全球气候变化以及人们超载过牧对草原生态系统的影响日益增加,青藏高原草原发生不同程度的退化,初级生产力降低,土壤侵蚀加快和土壤质量退化^[3]。

生物多样性对于维持草原生态系统的结构、功能、稳定方面发挥着极其重要的作用^[4]。而植物多样性更是生物多样性必不可少的组成部分,有着维护生态系统稳定和健康发展的重要作用^[5],在一定程度上反映了植物群落的复杂性^[6],而且影响着植物群落的组成和类型。地上生物量是草原生态系统物质与能量流动的核心载体,能直接反映系统生产力水平^[7],是生态系统一项重要的功能。生物多样性和地上生物量是生态系统的两个基本属性^[8]。研究两者间关系对于理解全球生物多样性的驱动因素至关重要^[9]。虽然已经有大量的文献研究两者关系,但对地上生物量与生物多样性关系的模式仍存在争议^[10],这包括已有研究得出“驼峰形”模式、正相关和负相关以及无相关性^[11-13]。而两者关系在很大程度上因地理、气候、环境条件变化和物种组成的不同而不同^[14]。

国家为解决生态恢复和退化草原保护等生态问题,于2004年起开始实施“退牧还草工程”^[15-16]。其中围封禁牧是恢复退化草原的重要措施,通过隔绝牲畜在草原上的采食与践踏,减少对草原的干扰^[17],可以促进退化草原生态系统生产力的恢复,改善退化草原植物群落特征^[18-19]。前人已围绕围封以及围封年限对植物群落地上生物量和植物群落多样性的影响开展了大量的研究工作。在一项关于藏北高寒草甸围封10年后的研究^[20]中发现,围封提高了优良牧草的优势度,禁牧样地植物群落高度、盖度和生物量均显著高于对照样地,但围封对植物群落多样性并无显著影响。另一项对藏北古露高寒草地围封3年后的研究^[21]发现,围封提高了平均高度、盖度和地上生物量,降低了植物群落多样性。一项关于西藏高寒草甸进行围封5、7、11年等不同围封年限序列的研究^[22]发现,不同的围封年限均显著提升了退化草甸植物群落多样性以及盖度和地上生物量,其中围封5和7年更有利于退化高寒草甸的植被恢复。以往在青藏高原羌塘草原进行围封的研究,主要集中于围封及围封年限序列对地上植物群落数量特征(盖度、高度、密度、地上生物量)以及植物群落多样性的影响,但关于围封以及围封年限序列是如何影响植物群落多样性和地上生物量之间关系的研究较少,以及其背后的机制仍不清楚。

本研究以青藏高原羌塘草原为研究对象,通过空间代替时间法研究已围封5、9、13、17和21年的草地植物群落特征以及植物群落多样性的变化情况,探讨不同围封年限对植物群落生产力及多样性间关系的影响,以期为羌塘退化草原生态系统的治理恢复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

样地位于西藏自治区那曲市班戈县(88°56′-91°18′E, 29°55′-32°15′N)。该地区属于典型高寒草地,平均海拔为4750 m,气候类型属高原亚寒带半干旱季风气候,年均温度0℃左右,年均降水量为480 mm,80%降水量集中在生长期6-8月,年蒸发量为1993.4~2104.1 mm^[23]。土壤类型主要为寒冻钙土,植物群落优势种为紫花

针茅(*Stipa purpurea*)。

1.2 试验设计与样品采集

所选样地分别为果加村(2000年围封)、那查玉(2004年围封)、谢麦珠(2008年围封)、杂空组(2012年围封)以及嘎凉村(2016年围封)(表1)。对照处理选于与围栏间隔超过10 m的无限制放牧区域。通过运用空间代替时间法^[24],于2021年8月中下旬对不同围封年限的样地进行物种调查。在每个围栏内外设置3个间隔不少于20 m的0.5 m×0.5 m的样方,共计3次重复。分别记录植物群落的物种数、盖度、高度、密度。植物物种数采用计数法,植物盖度测定采用目测法,用卷尺对植物自然高度进行测量,地上生物量则通过齐地刈割法按物种装入信封袋并运至实验室。

1.3 指标测定与计算

样品放入烘箱在105℃下杀青30 min,在65℃下烘干至恒重并称重,精确至0.01 g,分别记录干重,各个样方生物量为样方内各物种干重的和,样地地上生物量为3个样方地上生物量的平均值,重要值(important value, IV)、相对重要值(P_i)和4种生物多样性[物种丰富度 Margalef 指数(Ma),物种多样性 Shannon—Wiener 指数(H),物种优势度 Simpson 指数(D),物种均匀度 Pielou 指数(J)]指数计算公式如下^[25]:

$$IV = (\text{相对高度} + \text{相对盖度} + \text{相对密度}) / 3$$

$$P_i = IV_i / \sum IV$$

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

$$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

$$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$$

$$J = H / \ln S$$

式中: IV_i 代表第*i*个物种重要值; P_i 代表第*i*个物种的相对重要性; S 代表样方内植被群落物种总数; N 为样方内所有植物数目之和。

响应比计算公式为^[26]:

$$RR = \ln \frac{X_A}{X_G}$$

式中: RR 为响应比值; X_A 为围封内禁牧植物群落特征值; X_G 为围封外放牧的植物群落特征值。

1.4 数据分析

采用 Excel 2017 整理和分析所有数据,SPSS 19.0 进行双因素方差分析、显著性分析以及线性回归分析,结果以平均值±标准误差(mean±SE)表示。进行 Pearson 相关性分析,相关性分析图、柱状图和回归分析图通过 Origin 2024 绘制。

2 结果与分析

2.1 围封对优势种重要值的影响

无论围栏内外,紫花针茅都占据绝对优势地位,并且随着围封年限的增加,呈先上升再下降并趋于平稳的趋势(图1a)。在围栏内,紫花针茅重要值占比分别为在 WF5 时 33.61%、WF9 时 70.00%、WF13 时 30.19%、WF17 时 63.96% 以及 WF21 时 61.00%(图1a)。而放牧样地紫花针茅重要值占比分别为在 FM5 时 36.21%、FM9 时 41.99%、FM13 时 36.80%、FM17 时 44.74% 和 FM21 时 50.96%(图1b)。

围封增加了紫花针茅的重要值(图1),WF9 比 FM9 增加了 28.01%、WF17 比 FM17 增加了 19.22%,WF21 比 FM21 增加了 10.04%。

表1 研究区概况

Table 1 Information of study area

样地 Plot	围封年限 Exclosure period (a)	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	海拔 Altitude (m)
嘎凉村 Galiang Village	5	89°36'23"	31°10'25"	4840
杂空组 Zakongzu	9	90°59'08"	30°59'07"	4750
谢麦珠 Xiemaizhu	13	89°43'14"	31°47'05"	4600
那查玉 Nachayu	17	89°36'20"	31°56'45"	4580
果加村 Guojia Village	21	89°45'10"	31°10'20"	4590

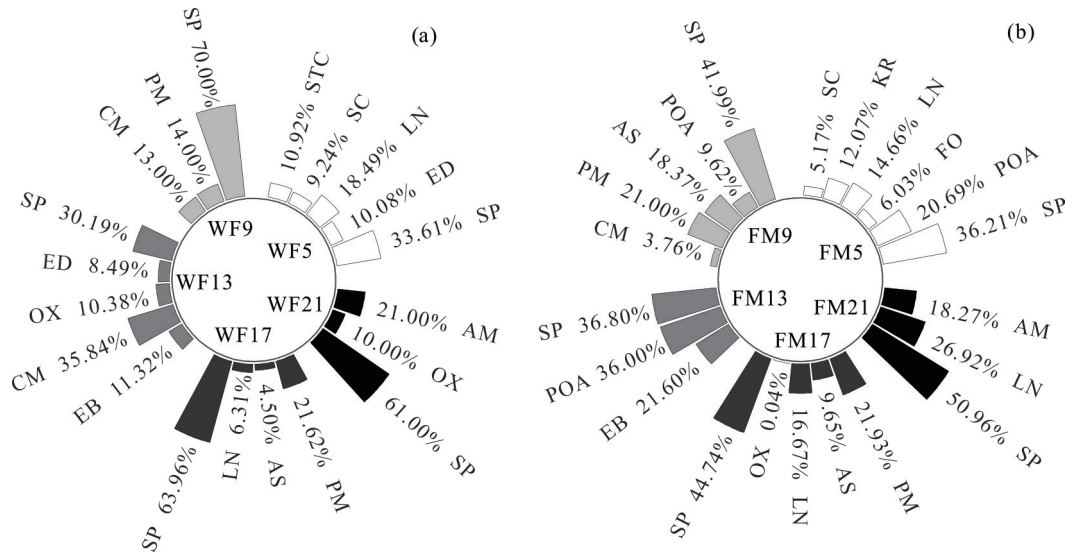


图 1 围封对优势种重要值的影响

Fig. 1 Effect of enclosure on important value of dominant species

WF5, WF9, WF13, WF17, WF21 分别为围封 5, 9, 13, 17, 21 年 Enclosed for 5, 9, 13, 17, 21 years, respectively; FM5, FM9, FM13, FM17, FM21 分别为放牧 5, 9, 13, 17, 21 年 Grazed for 5, 9, 13, 17, 21 years, respectively; SP: 紫花针茅 *S. purpurea*; PM: 多裂叶委陵菜 *Potentilla multifida*; CM: 青藜苔草 *Carex moorcroftii*; ED: 披碱草 *Elymus dahuricus*; OX: 棘豆 *Oxytropis*; EB: 雪灵芝 *Eremogone brevipetala*; LN: 矮火绒草 *Leontopodium nanum*; AM: 昆仑蒿 *Artemisia manschanica*; SC: 狼毒草 *Stellera chamaejasne*; POA: 早熟禾 *Poa annua*; AS: 阿尔泰狗娃花 *Aster altaicus*; FO: 羊茅 *Festuca ovina*; KR: 粗壮蒿草 *Kobresia robusta*; STC: 西藏凤毛菊 *Saussurea tibetica*; 下同 The same below.

2.2 围封对植物群落数量特征的影响

双因素方差分析表明(表 2),围封和围封年限对植物群落地上生物量有极显著的影响($P < 0.001$),二者的交互作用对地上生物量也有显著的影响($P < 0.01$)。围封后,围栏内地上生物量均高于围栏外(图 2),其中围封 9、21 年样地围栏内显著高于围栏外($P < 0.05$)。围封 21 年响应比最高,其次围封 9 年(图 2)。随着围封时间的增加,围栏内总地上生物量在围封 9 年后达到峰值,在围封 13 和 17 年后下降,围封 21 年后有所上升。在围封之后,围封 9、17 和 21 年样地的紫花针茅地上生物量占比由围栏外 45%、31%、23% 提升至 84%、75% 以及 46%。而在围封 5、13 年样地的优势种紫花针茅地上生物量占比无显著变化(图 3)。

围封和围封年限对植物群落盖度有极显著的影响($P < 0.001$, 表 2),二者交互作用对植物群落无显著影响($P > 0.05$)。在不同的围封年限下,围栏内盖度高于围栏外(图 2),围封 21 年时围栏内显著高于围栏外($P < 0.05$)。围封 9、21 年盖度显著高于 5、13 年($P < 0.05$, 图 2)。最高盖度值出现在围封 21 年(图 2)。

围封处理和围封年限以及二者交互作用对植物群落高度都有显著的影响($P < 0.05$, 表 2)。除围封 5 年后围栏外高于围栏内,其他围封年限样地围栏内均高于围栏外(图 4),其中在围封 9 年后围栏内显著高于围栏外($P < 0.05$)。

围封处理对单位面积植物密度有显著的影响($P < 0.05$, 表 2),围封年限对密度有极显著影响($P < 0.001$),但两者的交互作用对密度的影响并不显著($P > 0.05$)。围封对单位面积植物群落密度有所改善,在围封 5、9、17、21 年围栏内单位面积密度高于围栏外(图 4),围封 17 年时围栏内外差异显著($P < 0.05$)。

表 2 围封处理和围封年限双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA for enclosure treatment and enclosure duration

项目 Item	ET	EP	ET×EP
地上生物量 AGB	***	***	**
盖度 Coverage	***	***	ns
高度 Height	*	**	*
密度 Density	*	***	ns
多样性指数 H	ns	*	ns
优势度指数 D	ns	*	ns
丰富度指数 Ma	ns	***	ns
均匀度指数 J	ns	**	ns

ET: 围封处理 Enclosure treatment; EP: 围封年限 Exclosure period; AGB: Aboveground biomass; *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$; ns: 没有显著差异 No significant difference; 下同 The same below.

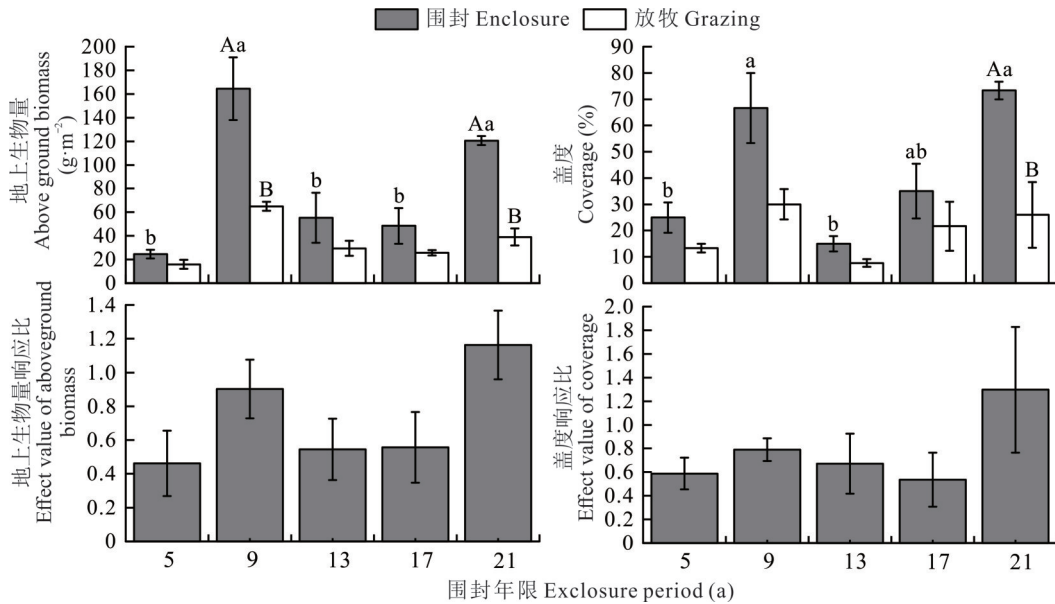


图2 围封对地上生物量、盖度特征的影响

Fig. 2 Effect of enclosure on aboveground biomass and coverage characteristics

不同大写字母表示两种不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 不同小写字母表示在同一处理下不同年限间差异显著 ($P < 0.05$), 下同 Different capital letters indicate significant differences between the two different treatments ($P < 0.05$), while different lowercase letters indicate significant differences among different durations within the same treatment ($P < 0.05$), the same below.

2.3 围封对植物群落 α 多样性的影响

围封年限对 α 多样性指数有显著的影响 ($P < 0.05$), 围封以及二者交互作用对 α 多样性指数无显著影响 ($P > 0.05$, 表2)。与放牧区相比, 在围封5、9、17和21年后的Simpson指数呈下降的趋势(图5), 而围封13年后Simpson指数高于放牧区, 但都未达到显著水平 ($P > 0.05$)。Simpson指数在围封9年后围栏内外差异最大, 并且显著低于围封5和13年样地 ($P < 0.05$), 略低于围封17、21年样地。相较于围栏外, 围封5、9、17年后的Shannon—Wiener指数降低(图5), 其中围封9年显著低于围栏外 ($P < 0.05$)。而围封13、21年后的Shannon—Wiener指数略高于放牧区, 但差异并不显著 ($P > 0.05$)。

丰富度指数与Shannon—Wiener指数的变化趋势一致(图5, 图6)。而均匀度指数在围封5、13年后略高于放牧区, 在围封9、17、21年后低于放牧区, 其中在围封9年时, 围栏内显著低于围栏外 ($P < 0.05$, 图6)。随着放牧年限的增加, 围栏外Simpson、Shannon—Wiener、丰富度指数呈下降的趋势, 均匀度指数没有出现明显的变化趋势(图5、图6)。

2.4 围封对地上生物量和 α 多样性关系的影响

围封改变了地上生物量和 α 多样性的关系(图7)。其中在放牧条件下, 地上生物量与优势度指数、均匀度指数、丰富度指数、多样性指数均呈正相关趋势但并不显著 ($P > 0.05$) (图7)。在围封后, 回归分析表明地上生物量与优势度指数、均匀度指数、多样性指数均呈显著负相关 ($P < 0.05$)。通过相关性分析(表3), 在围栏外, 总地上生物量和优势物种地上生物量呈极显著正相关关系 ($P < 0.001$), 与盖度、密度呈显著正相关关系 ($P < 0.05$), 优

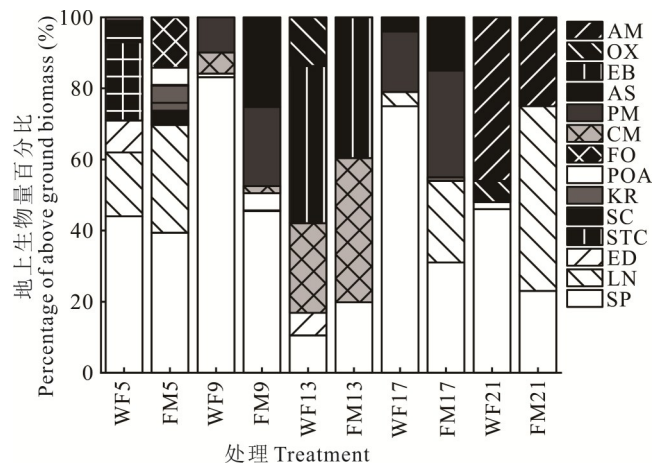


图3 围封对不同物种地上生物量百分比的影响

Fig. 3 Effect of enclosure on percentage of aboveground biomass among different species

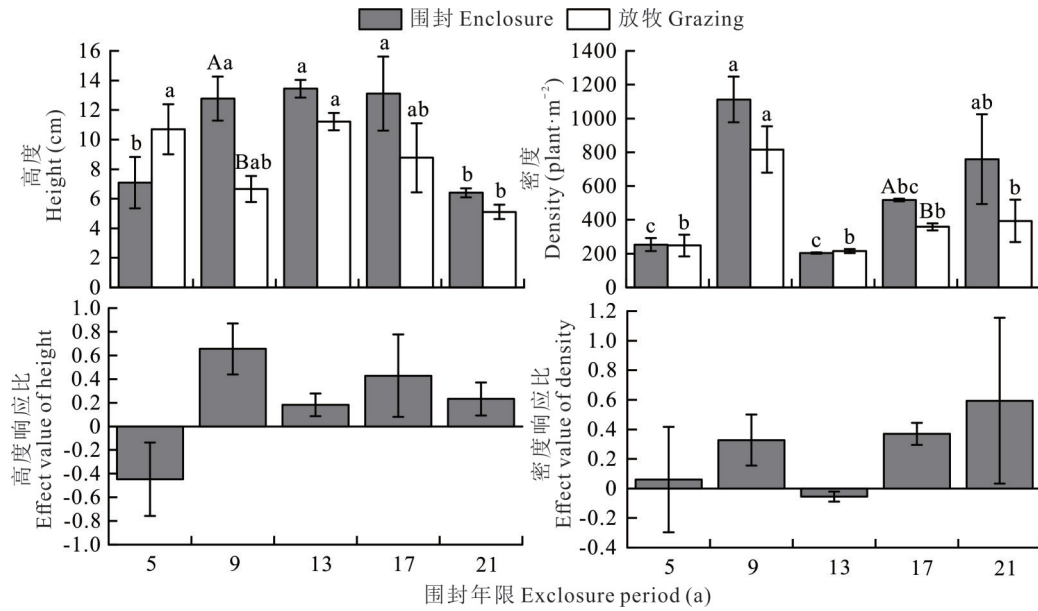


图 4 围封对高度、密度特征的影响

Fig. 4 Effect of enclosure on height and density characteristics

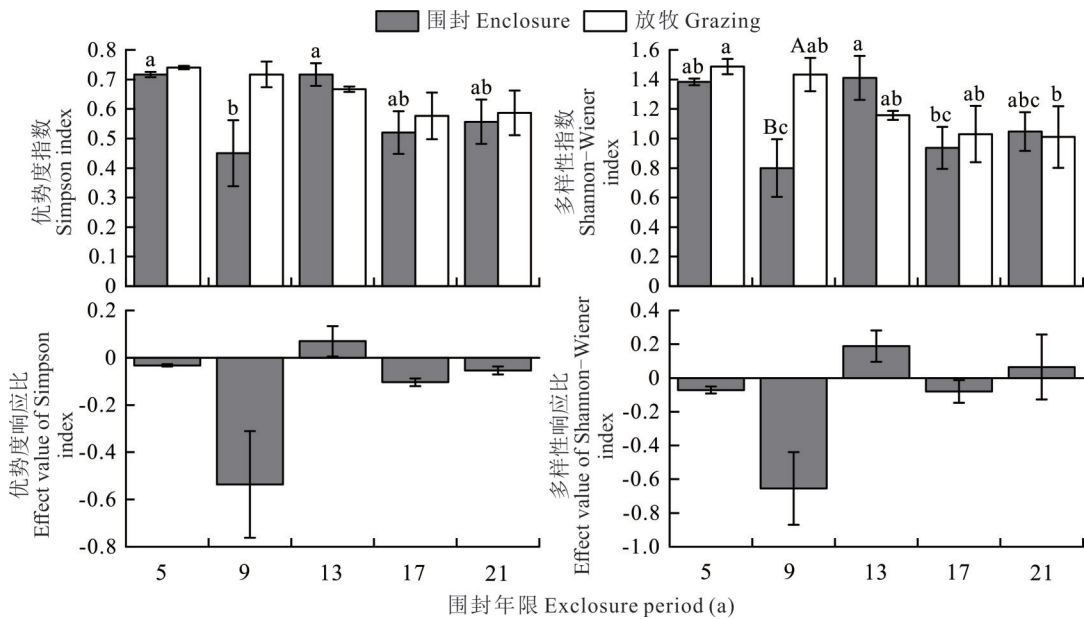


图 5 围封对优势度指数、多样性指数的影响

Fig. 5 Effect of enclosure on the Simpson and Shannon-Wiener index

势种地上生物量与丰富度指数、优势度指数、多样性指数、均匀度指数均呈正相关趋势,但并不显著($P > 0.05$)。而围封并未改变总地上生物量和优势种地上生物量的关系(表 3),但优势种地上生物量和丰富度指数、优势度指数、多样性指数、均匀度指数均呈显著负相关关系($P < 0.001$)。

3 讨论

3.1 围封对优势种重要值的影响

重要值是确定群落中优势种的重要指标,可以反映植物在群落中的地位^[27]。在本研究中发现,不同围封年限处理下会改变高寒草原植物群落结构,但并不会改变优势物种的优势地位,这表明紫花针茅能很好地适应高寒草

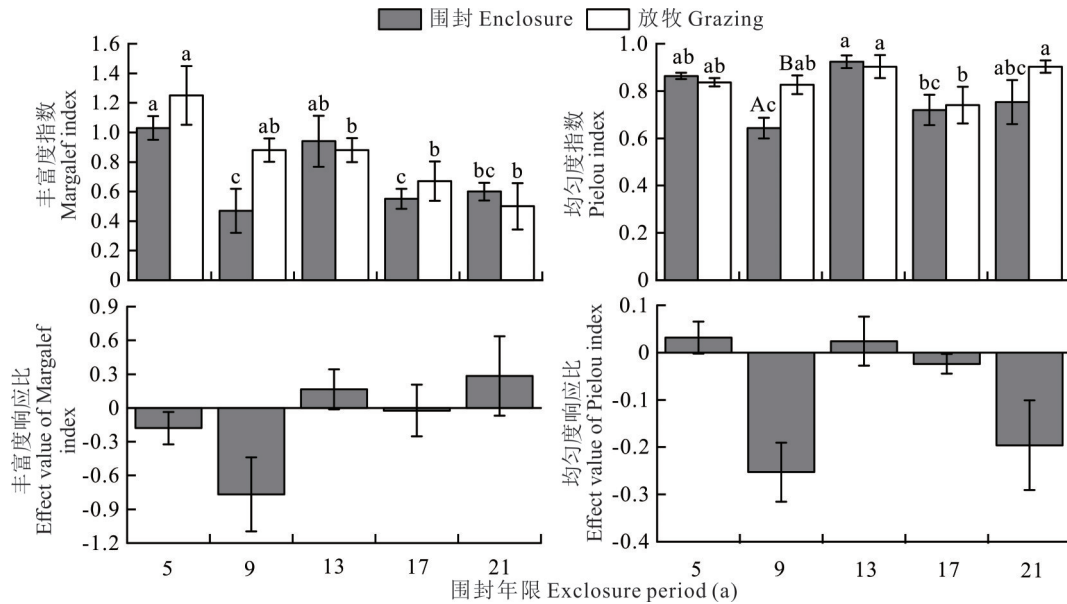


图6 围封对丰富度指数、均匀度指数的影响

Fig. 6 Effect of enclosure on the Margalef and Pielou index

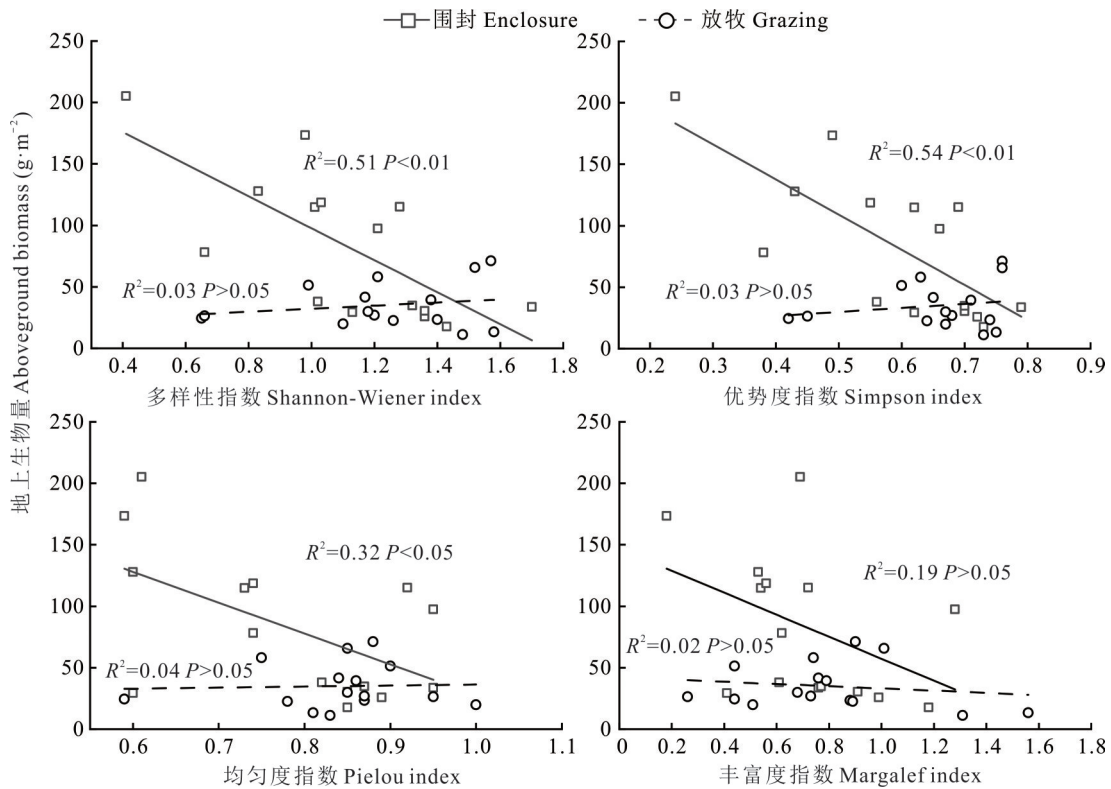


图7 地上生物量和 α 多样性指数的回归分析

Fig. 7 Regression analysis of aboveground biomass and alpha diversity index

原的生态环境,并且在植物群落中有着极强的竞争力。在围封9、17和21年样地中,围封增加了优势种重要值和相对生物量(图1、图4)。这可能是因为围封后,草食动物啃食和践踏等活动降低^[28],导致紫花针茅这类适口性好的植物生长不会受到干扰,进而获得了更高的生态位,从而抑制了其他植物的生长^[29]。

3.2 围封对植物群落数量特征的影响

在高寒草原中植物群落的地上生物量、高度、盖度、密度对围封都有着积极的响应,这与之前的多数研究一

表 3 植物群落特征与 α 多样性指数的相关性

Table 3 Correlation between plant community characteristics and alpha diversity index

项目 Item	地上生物量 AGB	地上生物量 AGB		盖度 Coverage	高度 Height	密度 Density	丰富度 <i>Ma</i>	优势度 <i>D</i>	多样性 <i>H</i>	均匀度 <i>J</i>
		DAGB	NDAGB							
地上生物量 AGB		0.88***	0.26	0.82***	0.18	0.80***	-0.43	-0.74**	-0.72**	-0.69**
DAGB	0.81***		-0.23	0.77***	0.29	0.87***	-0.58*	-0.84***	-0.78***	-0.82***
NDAGB	0.31	-0.18		0.11	-0.22	-0.13	0.29	0.19	0.12	0.26
盖度 Coverage	0.57*	0.38	0.20		-0.14	0.74**	-0.56*	-0.70**	-0.65**	-0.72**
高度 Height	-0.46	-0.27	-0.30	-0.55*		0.08	-0.06	-0.37	-0.36	-0.21
密度 Density	0.80***	0.85***	-0.21	0.58*	-0.36		-0.61*	-0.81***	-0.80***	-0.85***
丰富度 <i>Ma</i>	0.00	0.27	-0.23	0.03	0.33	0.08		0.47	0.44	0.58*
优势度 <i>D</i>	0.27	0.44	0.04	-0.03	0.35	0.17	0.77***		0.97***	0.92***
多样性 <i>H</i>	0.31	0.51	-0.05	0.09	0.29	0.26	0.85***	0.98***		0.90***
均匀度 <i>J</i>	0.04	-0.06	0.36	-0.05	-0.30	-0.19	-0.10	0.03	-0.04	

DAGB: 优势种地上生物量 Dominant species aboveground biomass; NDAGB: 非优势种地上生物量 Non-dominant species aboveground biomass; 表格上半部分为围封, 下半部分为放牧 The upper half of the Table represents enclosure, and the lower half represents grazing.

致^[30-32]。这可能是因为, 在自由放牧样地中主要通过家畜的啃食、踩踏和排泄物来影响草原生态系统, 而围封后降低了家畜啃食的干扰, 所以植物群落得到了一定的恢复^[33]。围封后优势种紫花针茅地上生物量得以提高, 优势种生物量的变化导致样地总地上生物量发生变化^[34]。本研究发现, 在围封 9 年后总地上生物量达到峰值, 之后呈先下降再上升的趋势。这可能是因为, 在围封 9 年后, 形成了以紫花针茅为单一优势种的草地生态系统, 导致草地生态系统稳定性下降, 草原对外界环境因素的抵抗力降低^[35]。往往优势种能对生态系统的生产力和功能产生影响。一项关于短花针茅(*Stipa breviflora*) 荒漠草原的研究表明, 在短期内单一优势物种(短花针茅)表现出较高的生产力, 伴随着时间的递增, 生产力下降^[36]。

3.3 围封对植物群落多样性的影响

关于围封对植物群落多样性的研究很多, 不同的研究者得到了不同的研究结果, 这可能与研究的时间跨度、研究区域地理位置和样本量有关。在本研究中, 除了围封 9 年对植物多样性有显著降低影响, 其他样地变化幅度不大。这可能与围封前的放牧史有关^[37]。之前的研究表明, 围封对于不同程度退化的草地恢复效果不同^[38]。在本研究中, 围封 9 年样地在围封前可能已经处于重度退化程度, 而其他围封样地在围封前可能处于轻度和中度退化程度。另一个原因可能是围封后, 植物枯落物层增加, 植被渐渐被高大的禾本科植物所主导, 这使得植物群落多样性下降^[39]。

3.4 围封对地上生物量和植物群落多样性关系的影响

在围封外, 植物群落地上生物量与植物群落多样性呈正相关的趋势, 但并不显著, 这与之前的研究^[40-41]结果一致。这可能是因为, 在自由放牧中, 牲畜的踩踏和啃食使得高大且适口植物减少, 导致竞争相互作用发生变化, 一些竞争力较低的物种能够生长, 由于生态互补效应, 丢失的生物量由其他竞争力弱的植物所弥补, 因此在自由放牧样地中群落物种增加^[42]。地上生物量与植物群落多样性的正相关趋势突出了植物对资源利用效率的提高和不同物种间的互补效应^[43]。

本研究结果表明, 在围封后, 植物群落多样性主要是通过“质量比效应”影响了地上生物量, 而不是“互补效应”, 这使得围封内植物群落地上生物量和植物群落多样性的关系发生变化, 呈显著负相关关系, 这与之前的研究^[44]结果一致, 这可能是因为, 在围封后, 优势物种的地上生物量与植物群落地上生物量呈极显著的正相关关系 ($P < 0.001$, 表 3)。在之前的研究中^[45]发现, 当植物群落中物种数量下降, 地上生物量增加, 这说明只有少数高产

的优势种才是大部分牧场地上生物量高低与否的重要解释因子。优势物种地上生物量的增加导致了地上生物量的增加,而由于优势物种的竞争力强,掠夺了更多的资源。使低竞争力的物种减少,导致植物群落多样性下降。优势种在草地生态系统中有重要的地位,在地上生物量和植物群落多样性方面起主导作用^[46]。

围封后,地上生物量的增加可能会导致植物群落多样性的减小,为了草原的长期可持续发展,应该权衡二者的重要性。在长期围封的地区,更应该重视优势物种的主导地位,避免形成单一优势物种的生态系统。

4 结论

本研究结果表明在退化高寒草原上实施围封措施,植物群落地上生物量、盖度、高度和密度等植物群落特征显著提升,但并没有随围封年限的延长而递增。围封后, α 多样性指数在围封9年后显著低于围栏外($P < 0.05$),其他围封年限样地无显著变化($P > 0.05$)。围封改变了地上生物量和植物群落多样性的关系,优势种在二者的关系中起决定作用。

本研究表明羌塘草原围封9年左右是一个比较合理的年限。长期的全年禁牧对生态系统多样性的弊大于利,虽然植物群落总地上生物量得到了恢复,但这很可能是由于优势物种地上生物量的贡献,在已经形成单一优势种的草地生态系统中应该进行合理的轮牧,以帮助草地生态系统恢复多样性,提高对外界环境风险的抵抗能力。

参考文献 References:

- [1] Cao X J, Ganjurjav H, Liang Y, *et al.* Temporal and spatial distribution of grassland degradation in northern Tibet based on NDVI. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(3): 1–8.
曹旭娟, 干珠扎布, 梁艳, 等. 基于NDVI的藏北地区草地退化时空分布特征分析. *草业学报*, 2016, 25(3): 1–8.
- [2] Li J X, Zhang Q S, Wu Y, *et al.* Research progress on the effects of enclosure on grassland vegetation growth and soil properties. *Chinese Journal of Grassland*, 2023, 45(5): 137–150.
李佳秀, 张青松, 吴勇, 等. 围封对草地植被生长和土壤特性的影响研究进展. *中国草地学报*, 2023, 45(5): 137–150.
- [3] Conant R T, Paustian K. Potential soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 90–99.
- [4] Bennett J A, Koch A M, Forsythe J, *et al.* Resistance of soil biota and plant growth to disturbance increases with plant diversity. *Ecology Letters*, 2020, 23(1): 119–128.
- [5] Sun W, Li S, Wang J, *et al.* Effects of grazing on plant species and phylogenetic diversity in alpine grasslands, Northern Tibet. *Ecological Engineering*, 2021, 170: 106331.
- [6] Schuldt A, Ebeling A, Kunz M, *et al.* Multiple plant diversity components drive consumer communities across ecosystems. *Nature Communications*, 2019, 10: 1460.
- [7] Sanaei A, Sayer E J, Yuan Z, *et al.* Grazing intensity alters the plant diversity-ecosystem carbon storage relationship in rangelands across topographic and climatic gradients. *Functional Ecology*, 2023, 37(3): 703–718.
- [8] Whittaker R J. Meta-analyses and mega-mistakes: Calling time on meta-analysis of the species richness-productivity relationship. *Ecology*, 2010, 91(9): 2522–2533.
- [9] Cusens J, Wright S D, McBride P D, *et al.* What is the form of the productivity-animal-species-richness relationship? A critical review and Meta-analysis. *Ecology*, 2012, 93(10): 2241–2252.
- [10] Grace J B, Adler P B, Seabloom E W, *et al.* Response to comments on “Productivity is a poor predictor of plant species richness”. *Science*, 2012, 335(6075): 1441.
- [11] Ma Y, Ma W, Zhong L, *et al.* Monitoring and modeling the Tibetan Plateau’s climate system and its impact on East Asia. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 44574.
- [12] Li W, Li J, Liu S, *et al.* Magnitude of species diversity effect on aboveground plant biomass increases through successional time of abandoned farmlands on the eastern Tibetan Plateau of China. *Land Degradation Development*, 2017, 28(1): 370–378.
- [13] Grace J B, Anderson T M, Seabloom E W, *et al.* Integrative modelling reveals mechanisms linking productivity and plant species richness. *Nature*, 2016, 529(7586): 390–393.
- [14] Sanaei A, Ali A, Chahouki M A Z, *et al.* Plant coverage is a potential ecological indicator for species diversity and aboveground

- biomass in semi-steppe rangelands. *Ecological Indicators*, 2018, 93: 256–266.
- [15] Dong S K, Gao H W, Xu G C, *et al.* Farmer and professional attitudes to the large-scale ban on livestock grazing of grasslands in China. *Environmental Conservation*, 2007, 34(3): 246–254.
- [16] Wu J, Zhang X, Shen Z, *et al.* Effects of livestock exclusion and climate change on aboveground biomass accumulation in alpine pastures across the Northern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2014, 59: 4332–4340.
- [17] Bang S H, Zhao W, Yao W W, *et al.* Effects of fertilization and enclosure on the temporal stability of aboveground net primary productivity in an alpine meadow of the Tibetan Plateau. *Pratacultural Science*, 2024, 41(3): 611–619.
蚌绍豪, 赵维, 姚万万, 等. 施肥和围封对青藏高原高寒草甸生产力稳定性的影响. *草业科学*, 2024, 41(3): 611–619.
- [18] Wu J B, Wang X D. Effect of enclosure ages on community characters and biomass of the degraded alpine steppe at the Northern Tibet. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(2): 261–266.
吴建波, 王小丹. 围封年限对藏北退化高寒草原植物群落特征和生物量的影响. *草地学报*, 2017, 25(2): 261–266.
- [19] Fedrigo J K, Ataide P F, Filho J A, *et al.* Temporary grazing exclusion promotes rapid recovery of species richness and productivity in a long-term overgrazed Campos grassland. *Restoration Ecology*, 2018, 26(4): 677–685.
- [20] Yang J, Zhan W, Wang X T. Effects of enclosure on plant community characteristics of degraded alpine steppe in Northern Tibet. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 44–49, 140.
杨军, 詹伟, 王向涛. 10年围栏封育对藏北退化高寒草甸植物群落特征的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(6): 44–49, 140.
- [21] Gao F, Wang B, Shi Y X, *et al.* The response of alpine grasslands ecosystem in the North Tibet to short-term enclosure. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(13): 4366–4374.
高风, 王斌, 石玉祥, 等. 藏北古露高寒草地生态系统对短期围封的响应. *生态学报*, 2017, 37(13): 4366–4374.
- [22] Danzengtaqing, Baimagaweng, Duoqidunzhu, *et al.* Effects of livestock exclusion duration years on plant and soil properties in a Tibetan alpine meadow. *Pratacultural Science*, 2018, 35(1): 10–17.
旦增塔庆, 白玛嘎翁, 多吉顿珠, 等. 围封年限对西藏高寒草甸植被特征与土壤养分的影响. *草业科学*, 2018, 35(1): 10–17.
- [23] Li Z W, Miao Y J, Zong N. Effects of grazing exclusion on plant diversity and ecosystem multifunctionality of alpine grassland in Northern Xizang. *Acta Agrestia Sinica*, 2025, 33(2): 596–608.
李振威, 缪雨珏, 宗宁. 围栏封育对藏北高寒草地植物多样性与生态系统多功能性的影响. *草地学报*, 2025, 33(2): 596–608.
- [24] Hao H M, Liu Y, Wang D, *et al.* Influence of restoration on community plant diversity and spatial structure of typical grasslands. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(4): 754–759.
郝红敏, 刘玉, 王冬, 等. 典型草原开垦弃耕后不同年限群落植物多样性和空间结构特征. *草地学报*, 2016, 24(4): 754–759.
- [25] Guo Z L, Ma Y D, Zheng J P, *et al.* Biodiversity of tree species, their populations' spatial distribution pattern and interspecific association in mixed deciduous broadleaved forest in Changbai Mountations. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004(11): 2013–2018.
郭忠玲, 马元丹, 郑金萍, 等. 长白山落叶阔叶混交林的物种多样性、种群空间分布格局及种间关联性研究. *应用生态学报*, 2004(11): 2013–2018.
- [26] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The Meta-analysis of response ratios in experimental ecology. *Ecology*, 1999, 80(4): 1150–1156.
- [27] Wang Y T, Liu J K, Wu Z J, *et al.* Impact of enclosure on characteristics diversities of typical vegetation communities in desert grasslands. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1): 121–130, 140.
王益涛, 刘建康, 武志嘉, 等. 围封对荒漠草原典型植物群落特征及多样性的影响. *水土保持研究*, 2025, 32(1): 121–130, 140.
- [28] Yan Y C, Tang H P, Xin X P, *et al.* Advances in research on the effects of enclosure on grasslands. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(9): 5039–5046.
闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 围封对草地的影响研究进展. *生态学报*, 2009, 29(9): 5039–5046.
- [29] Zhao L Y, Zhong H S, Zhao M Y, *et al.* Effect of enclosure and grazed management on aboveground biomass and species diversity in sandy grasslands of Horqin Sandy Land, Eastern Inner Mongolia, China. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(10): 1783–1790.
赵丽娅, 钟韩珊, 赵美玉, 等. 围封和放牧对科尔沁沙地群落物种多样性与地上生物量的影响. *生态环境学报*, 2018, 27(10):

1783—1790.

- [30] Huang C, Peng F, You Q, *et al.* The response of plant and soil properties of alpine grassland to long-term enclosure in the Northeastern Qinghai—Tibetan Plateau. *Frontiers in Environmental Science*, 2020, 8: 589104.
- [31] Han M Q, Wang Z W, Jin Y X, *et al.* Response of species diversity and productivity to long-term grazing in the *Stipa breviflora* desert steppe. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2017, 37(11): 2273—2281.
韩梦琪, 王忠武, 靳宇曦, 等. 短花针茅荒漠草原物种多样性及生产力对长期不同放牧强度的响应. *西北植物学报*, 2017, 37(11): 2273—2281.
- [32] Xu H B, Su Y L, Zhang L, *et al.* Effects of ten years enclosure on species diversity and spatial distribution pattern of dominant species in desert steppe communities. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(10): 4334—4341.
许宏斌, 苏艳龙, 张雷, 等. 围封10年对荒漠草原群落物种多样性与优势种空间分布格局的影响. *生态学报*, 2024, 44(10): 4334—4341.
- [33] Zhang C X, Nan Z B. Research progress on effects of grazing on physical and chemical characteristics of grassland soil. *Acta Prataculturae Sinica*, 2010, 19(4): 204—211.
张成霞, 南志标. 放牧对草地土壤理化特性影响的研究进展. *草业学报*, 2010, 19(4): 204—211.
- [34] Zhao F X, Xu M. Research progress on the relationship between productivity and biodiversity. *Journal of Natural Resources*, 2018, 33(11): 2046—2056.
赵峰侠, 徐明. 生产力与生物多样性关系的研究进展. *自然资源学报*, 2018, 33(11): 2046—2056.
- [35] Bai W Y, Hou X Y. Research progress on the effects of climate change on dominant plant species of grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2021, 43(4): 107—114.
白乌云, 侯向阳. 气候变化对草地植物优势种的影响研究进展. *中国草地学报*, 2021, 43(4): 107—114.
- [36] Wang Z H, Lyu S J, Wang Z W, *et al.* The relationship between species diversity and aboveground standing crop of plant community in the desert steppe. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(6): 1856—1863.
王梓晗, 吕世杰, 王忠武, 等. 荒漠草原物种多样性与植物群落地上现存量的关系. *草地学报*, 2024, 32(6): 1856—1863.
- [37] Qin H R. The effects of enclosure on species diversity in degraded alpine meadow of “Black Soil Type”. *Prataculture Animal Husbandry*, 2008(10): 8—13.
秦海蓉. 围栏封育对“黑土型”退化高寒草甸植物群落的影响. *草业与畜牧*, 2008(10): 8—13.
- [38] Nan W L, Xie Y Z, Peng W D, *et al.* Restoration effects of reseeded and enclosure on the vegetation of different degraded desert steppes. *Pratacultural Science*, 2024, 41(5): 1068—1077.
南万璐, 谢应忠, 彭文栋, 等. 补播与围封对不同退化程度荒漠草地植被的恢复效果. *草业科学*, 2024, 41(5): 1068—1077.
- [39] Niu Y, Knops J M H, Hua L, *et al.* Flawed restoration plans on Tibetan Plateau. *Science*, 2024, 386(6727): 1233—1234.
- [40] Sanaei A, Ali A, Chahouki M A Z. The positive relationships between plant coverage, species richness, and aboveground biomass are ubiquitous across plant growth forms in semi-steppe rangelands. *Journal of Environmental Management*, 2018, 205: 308—318.
- [41] Hossain M L, Li J. Species richness and dominant functional groups enhance aboveground biomass, with no effect on belowground biomass in Qinghai—Tibet Plateau’s grasslands. *Ecological Informatics*, 2024, 82: 102688.
- [42] Spehn E M, Hector A, Joshi J, *et al.* Ecosystem effects of biodiversity manipulations in European grasslands. *Ecological Monographs*, 2005, 75(1): 37—63.
- [43] Bai Y, Wu J, Xing Q, *et al.* Primary production and rain use efficiency across a precipitation gradient on the Mongolia Plateau. *Ecology*, 2008, 89(8): 2140—2153.
- [44] Kouba Y, Doghbage A, Merdas S, *et al.* Grazing exclusion modulates the effects of different components of plant diversity on biomass production in semiarid rangeland. *Agriculture, Ecosystems Environment*, 2024, 365: 108914.
- [45] Sanaei A, Chahouki M A Z, Ali A, *et al.* Abiotic and biotic drivers of aboveground biomass in semi-steppe rangelands. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 895—905.
- [46] Qin J R, Ma H B, Shen Y, *et al.* Plant community species diversity of desert steppe in sandy area of Eastern Ningxia. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2015, 35(9): 1891—1898.
秦建蓉, 马红彬, 沈艳, 等. 宁夏东部风沙区荒漠草原植物群落物种多样性研究. *西北植物学报*, 2015, 35(9): 1891—1898.