

DOI: 10.5846/stxb202301040026

李琪琪, 黄小娟, 李岚, 常生华, 侯扶江. 黄土高原典型草原群落结构和土壤水分对划破的响应. 生态学报, 2023, 43(15): 6131-6142.

Li Q Q, Huang X J, Li L, Chang S H, Hou F J. Responses of plant community and soil moisture to ripping intensity in the typical steppe of the Loess Plateau of China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6131-6142.

黄土高原典型草原群落结构和土壤水分对划破的响应

李琪琪^{1,2,3}, 黄小娟^{1,2,3}, 李 岚^{1,2,3}, 常生华^{1,2,3}, 侯扶江^{1,2,3,*}

1 兰州大学草地农业科技学院, 兰州 730020

2 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 兰州 730020

3 农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州 730020

摘要:划破是草原改良的基础措施之一,划破强度是划破措施的关键环节,划破对草原健康持续管理有重要意义。目前的研究主要集中在划破对植物群落结构和生产力的影响上,然而草原植物群落与土壤水分对划破强度的响应尚不清楚。在黄土高原典型草原开展不同程度的草地划破试验,探究不同划破强度(27.4%、46.3%和61.9%)对草地植物群落物种多样性、生物量和土壤水分的影响。结果表明,3个划破强度下划破带物种丰富度显著低于未划破带1—3种/m²,划破带和未划破带群落相似性分别低于整区23.85%—119.23%和44.43%—84.55%。地上生物量随物种丰富度的增加而增大,且地上生物量与Simpson指数和Shannon Weiner指数显著负相关。3个划破强度下未划破带地下生物量和总生物量分别高于划破带88.2%—134.6%、52.4%—67.8%、2.5%—16.6%和103.9%—152.9%、59.3%—75.8%、9.1%—22.6%。植物群落物种丰富度和地上生物量随划破强度的增加呈“驼峰”型曲线变化,当划破强度分别为43.7%—55.3%和43.8%—45.7%时,植物群落物种丰富度和生物量均最高。本试验阐明了划破对典型草原植物群落特征和土壤水分的作用机制,研究结果为采用划破措施实现草地培育和草原修复提供了科学依据,对保护草地生物多样性和提高生产力具有重要意义。

关键词:划破强度;生物量;物种丰富度;草原修复;生物多样性-生产力关系

Responses of plant community and soil moisture to ripping intensity in the typical steppe of the Loess Plateau of China

LI Qiqi^{1,2,3}, HUANG Xiaojuan^{1,2,3}, LI Lan^{1,2,3}, CHANG Shenghua^{1,2,3}, HOU Fujiang^{1,2,3,*}

1 College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China

2 State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Lanzhou 730020, China

3 Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation Ministry of Agriculture, Lanzhou 730020, China

Abstract: Ripping is one of the basic measures for grassland improvement, and its intensity a key link in the process. Ripping is greatly significance for the sustainable management of grassland sustainability. The available studies have mainly focused on the impacts of the ripping on the plant community structure and productivity, while the response of plant community and soil moisture to the ripped intensity is still unclear. In order to explore the impact of the intensity of grassland ripped (27.4%, 46.3% and 61.9%) on the species richness, biomass and soil moisture of plant community, grassland ripped experiments were carried out in the typical steppe of the Loess Plateau. The results showed that the ripped intensity significantly affected the biomass of the plant community, species richness and soil moisture. The species richness of the ripped belt was significantly lower than that of the unripped belt by 1—3 species/m² under three ripped intensities.

基金项目:科技部国家科技援助项目(KY202002011);宁夏回族自治区林业和草原局重点研发计划(2021NXLCZDYF01);教育部创新团队发展计划项目(IRT-17R250);兰州市兰州大学人才合作项目

收稿日期:2023-01-04; **网络出版日期:**2023-05-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cyhoufj@lzu.edu.cn

Compared with the whole area, the similarity of plant community in the ripped belt was lower by 23.85%—119.23%, while the unripped belt was lower by 44.43—84.55%. The aboveground biomass (AGB) of the ripped belt, unripped belt and whole area all increased with the increase of species richness and aboveground biomass was negatively correlated with Simpson index and Shannon Weiner index. When the ripped intensity was 27.4% and 61.9%, the AGB of the ripped belt and the unripped belt decreased with the increase of soil moisture. The belowground biomass (BGB) and total biomass of each ripped intensity were significantly negatively correlated with soil moisture. The BGB of the unripped belt under three ripped intensities was 88.2%—134.6%, 52.4%—67.8% and 2.5%—16.6% higher than that of the ripped belt, respectively. The biomass was 103.9%—152.9%, 59.3%—75.8% and 9.1%—22.6% higher than that of the ripped belt. The species richness and AGB of the plant community first increased and then decreased with the increase of the ripping intensity. When the ripping intensity was 43.7%—55.3% and 43.8%—45.7%, the species richness and biomass of the plant community reached the highest. The species richness, community similarity index, root—to shoot ratio and other indicators of the community were integrated to analyze the impact of ripped intensity on plant community diversity, biomass and soil moisture, and clarified the impact rule and mechanism of ripped on the characteristics of typical steppe plant community and soil moisture in this experiment. The results provide a scientific basis for the adoption of ripped measures to achieve grassland cultivation and restoration, and is of great significance for protecting grassland biodiversity and improving grassland productivity.

Key Words: ripping intensity; biomass; species richness; grassland restoration; biodiversity-productivity relationship

草原是全球和我国面积最大的陆地生态系统^[1],是人类重要的生态安全、食物安全和社会安全屏障^[2]。然而,由于人为活动和自然因素的共同影响,世界草原约 70%退化,我国黄土高原是世界上受侵蚀最严重的地区之一,主要表现为植被稀疏,黄土裸露,生态系统脆弱^[3],威胁社会经济可持续发展^[4],因此,退化草原修复是黄土高原生态恢复的关键。划破作为草原生态修复的基础性措施,为补播、施肥和有害生物防控等其它草原改良措施创造条件^[5]。然而,划破强度对草原植被和土壤的影响缺乏深入研究,这却是草原生态修复和可持续管理的基础之一。

划破改善土壤的通透性和透水性,促进植物生长发育,提高地上生物量^[6-7];也可能改变草原植物的群落组成,影响草原土壤理化性质^[8]。德国中部沼泽区,划破提高草原生态系统的稳定性,6—10年后草原生态修复较为理想^[9]。巴西喜拉多热带草原,划破通过改变土壤微生物和养分,促进植被恢复^[10]。青海省高寒草甸,划破提升退化草原地上生物量 30%—50%,维持土壤稳定性^[11]。甘肃省甘南州亚高山草甸,轻度和中度划破增加草原物种丰富度,重度划破则相反^[12]。甘肃省玛曲县高寒草甸,划破增加草原生产力,降低物种丰富度,轻度划破提高禾草丰富度和优质牧草占比^[13]。综上,划破强度是影响草原生产力和物种多样性的重要因素之一,并对生产力—物种多样性关系的作用呈“驼峰”型曲线变化,存在明显阈值,在阈值的左侧,随着划破强度增加,植物群落物种多样性和生物量逐渐增大,当划破强度超过阈值,植物群落物种多样性和生物量显著降低,因此,明确划破强度的阈值是通过划破改良草原的关键(图 1)。

黄土高原位于我国东部季风区向西北干旱区的过渡地带,草原面积 20.15 万 km²,天然草原面积占该区草原总面积的 92.2%^[14],是全球受人类活动影响历史最

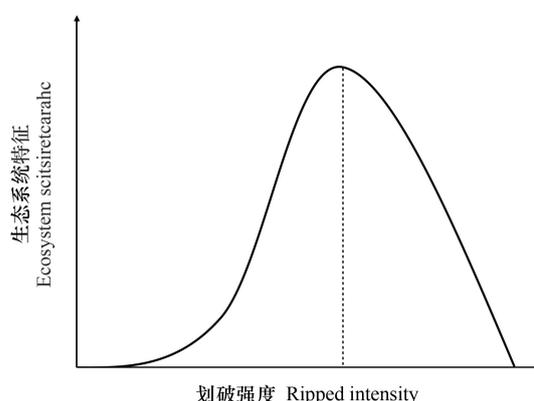


图 1 划破强度对生态系统的作用概念图

Fig. 1 Conceptual diagram of the effect of ripped intensity on ecosystem

悠久、强度最大的草原之一^[15],对划破敏感^[16]。划破作为一种有效的草原修复方式,可以显著提高草原物种多样性和生产力。因此,为了恢复退化草原,保持草原稳定健康发展,本研究在黄土高原典型草原设置了3个划破强度,通过比较3年后划破带和未划破带的植物群落物种多样性、生物量和土壤水分,试图明确划破强度对草原生态修复是否存在作用和阈值,为草原生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于兰州大学环县草地农业试验站,地处甘肃省环县甜水镇大良洼村(37.12°N, 106.82°E,海拔1650 m)。温带大陆性季风气候,年平均气温7.1℃,年平均降水量359.3 mm(图2),年平均蒸发量1993.3 mm^[17]。土壤类型为砂质黄绵土,草原类型为微温微干典型草原^[18],植物群落由10科植物组成,其中豆科植物7种,禾本科植物7种,菊科植物5种,3科植物共占植物群落总数的67.9%(表1)。生活型以多年生植物为主,主要优势物种有达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)、长芒草(*Stipa bungeana Trin.*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaris Thunb.*)^[19]等。植物返青期为3月下旬至4月上旬,枯黄期为9月下旬至10月上旬。

表1 植物群落生活型组成

Table 1 Life form composition of plant community

植物种类 Species	科 Department	植物生活型 Plant life form
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>	豆科	多年生
沙打旺 <i>Leguminosae</i>	豆科	多年生
苜蓿 <i>Medicago Sativa</i> Linn	豆科	多年生
米口袋 <i>Gueldenstaedtia verna</i> (Georgi) Boriss	豆科	多年生
黄花棘豆 <i>Oxytropis ochrocephala</i> Bunge	豆科	多年生
乳白花黄芪 <i>Astragalus galactites</i> Pall	豆科	多年生
砂珍棘豆 <i>Oxytropis psamocharis</i>	豆科	多年生
早熟禾 <i>Poa annua</i> L	禾本科	一年生
赖草 <i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel	禾本科	多年生
白草 <i>Pennisetum centrasiaticum</i> Tzvel	禾本科	多年生
狗尾草 <i>Setaria viridis</i> (L.) Beauv	禾本科	一年生
长芒草 <i>Stipa bungeana</i> Trin	禾本科	多年生
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i> (Trin.) Keng	禾本科	多年生
野黍 <i>Eriochloa villosa</i> (Thunb.) Kunth	禾本科	一年生
蒲公英 <i>Taraxacum mongolicum</i> Hand.-Mazz	菊科	多年生
冷蒿 <i>Artemisia frigida</i> Willd	菊科	多年生
阿尔泰狗娃花 <i>Heteropappus altaicus</i> (Willd.) Novopokr	菊科	多年生
茵陈蒿 <i>Artemisia capillaris</i> Thunb	菊科	多年生
山苦荬 <i>Ixeris denticulata</i>	菊科	多年生
田旋花 <i>Convolvulus arvensis</i> L	旋花科	多年生
打碗花 <i>Calystegia hederacea</i> Wall	旋花科	一年生
扁蓄 <i>Polygonum aviculare</i> L	藜科	一年生
沙蓬 <i>Agriophyllum squarrosum</i> (L.) Moq	藜科	一年生
二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i> Linn	蔷薇科	多年生
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i> (Freyn) K. Schum.	萝藦科	多年生
远志 <i>Polygala tenuifolia</i> Willd	远志科	多年生
酢浆草 <i>Oxalis corniculata</i> L	酢浆草科	多年生
虻果芥 <i>Torularia humilis</i> (C. A. Mey.) O. E. Schulz	十字花科	多年生

1.2 样地设置

于 1998 年选择地形平坦、植物群落较为一致的区域,随机设置了 3 个 100 m×100 m 的样地。采用耙宽 3.6 m 的圆盘耙划破草原,划破深度为 10 cm,耙片划破间距为 25 cm(图 3)。划破强度(Ripped intensity, RI)为划破带(Ripped belt, RB)占整个区域(Whole area, WA)的面积比例,共设 27.4% (RB₁), 46.3% (RB₂)和 61.9% (RB₃) 3 个划破强度,与这三个划破强度相对应的是 3 个未划破带(Unripped belt, URB),面积分别为 72.6% (URB₁), 53.7% (URB₂)和 38.1% (URB₃),每个区域 4 次重复。

1.3 植被测定与样品采集

划破带和未划破带的每个区域随机设置 4 个 1 m×1 m 的样方。划破 3 年后,在植物生长旺盛期 8 月进行植被调查并取样,分种统计植物物种数量,随后齐地面分种刈割植物地上部分,65℃ 烘至恒重,获取植物地上生物量指标。然后在每个样方中,用直径 100 mm 的根钻分层(10 cm 一层)取 2 钻 0—40 cm 的土样。土样过 2 mm 筛获得根样,蒸馏水洗净烘干至恒重,获取植物地下生物量指标。少部分土壤样品放置铝盒中,105℃ 烘至恒重,获取土壤水分。

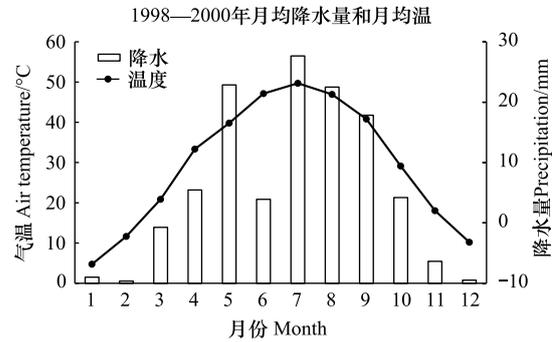


图 2 研究区 1998—2000 年月均降水量和月均温

Fig. 2 Monthly average precipitation and temperature in the study area from 1998 to 2000

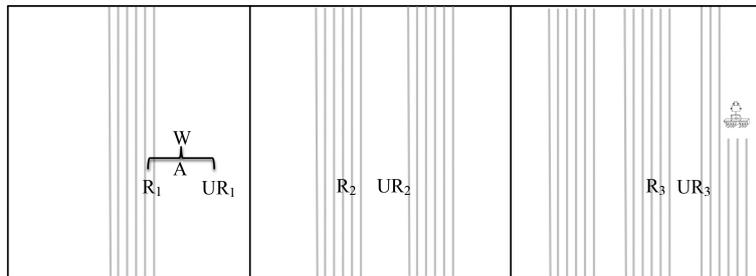


图 3 划破强度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ripping intensity

灰色的线条代表划破区(R), 空白区域为未划破区(UR); WA:整区; RB:划破带; URB:未划破带

1.4 数据分析

群落生物量包括地上生物量(Aboveground biomass, AGB)、地下生物量(Belowground biomass, BGB)和总生物量(Total biomass, TB)。

每个划破强度 WA 的生物量为划破带和未划破带生物量与其面积比例的加权平均值。

$$AGB_{WAi} = AGB_{RBi}^+ \times i + AGB_{URBi}^- \times (100 - i) \tag{1}$$

式中, AGB_{WAi} 、 AGB_{RBi}^+ 和 AGB_{URBi}^- 为划破强度 i 的整区、划破带和未划破带的地上生物量。

同理计算 UGB_{WAi} 、 TB_{WAi} 和土壤水分。

根冠比(Root-shoot ratio, RSR)为每个区域 UGB 与 AGB 的比值。

总物种数是一个区域内所有物种数, 3 个整区仅计算总物种数。

物种丰富度(SR)是一个区域内单位面积的物种数。

Shannon Weiner 指数
$$H' = - \sum P_j \ln P_j \tag{2}$$

Simpson 指数
$$D = 1 - \sum P_j^2 \tag{3}$$

$$\text{均匀度指数} \quad E = H' / \ln(s) \quad (4)$$

式中, P_j 是样方内第 j 个物种数量与群落物种数的比例^[20]。

群落 Sørensen 相似性指数

$$r = 2c / (SR_a + SR_b) \quad (5)$$

式中, $SR_a + SR_b$ 分别为 a 和 b 两个样地的物种数, c 为两个样地共有的物种数^[21]。

1.5 统计分析

使用 SPSS 23.0 (IBM, 美国) 进行数据统计分析。采用单因素方差 (one-way ANOVA) 分析划破强度对植物群落物种多样性、生物量、根冠比和土壤水分的影响, Duncan 法比较 3 个划破强度下各指标之间的差异 ($\alpha=0.05$), 划破强度对相关指标的影响采用二次项回归, 植物群落物种多样性、生物量及土壤水分之间的相关性采用 Origin Pro 2022b 插件 correlation plot 分析, 利用 Excel 2018 和 Origin Pro 2022b 软件作图。图表中数据为平均值±标准误。

2 结果与分析

2.1 植物群落物种多样性、生物量和土壤水分对划破强度和划破区域的响应

划破强度和划破区域显著影响植物群落物种多样性、生物量和土壤水分。在 3 个划破强度下, 划破带和整区的地上生物量、地下生物量和总生物量差异显著 ($P<0.05$)。划破带、未划破带和整区的地上生物量、地下生物量和总生物量在 27.4% 和 46.3% 划破强度下差异显著 ($P<0.05$), 物种丰富度、土壤水分和根冠比在 61.9% 划破强度下差异显著 ($P<0.05$) (图 4)。

2.2 划破强度对植物群落物种多样性的影响

划破带、未划破带和整区的植物群落物种丰富度随划破强度的增加呈“驼峰”型曲线变化, 划破强度为 46.3% 时最高, 分别为 14、16 和 22 种/ m^2 。3 个划破强度下未划破带植物群落物种丰富度分别高于划破带 9.1%—27.3%、6.3%—60.8% 和 7.1%—9.1%。划破带和未划破带总物种数随划破强度的增加呈“驼峰”型曲线变化, 在 46.3% 划破强度下最高达到 18 和 20 种/ m^2 , 整区总物种数随划破强度的上升呈“马鞍”型曲线变化, 总物种数依次为未划破带>划破带>整区。根据拟合方程, 划破强度为 43.7%、50.1% 和 55.3% 时, 划破带、未划破带和整区植物群落物种丰富度分别达到峰值, 划破强度为 43.7%—55.3% 时物种丰富度最高 (图 5)。

3 个划破强度中, 划破带和未划破带的 Simpson 指数、Shannon Weiner 指数和均匀度指数差异显著 ($P<0.01$)。划破带 Simpson 指数、Shannon Weiner 指数和均匀度指数较未划破带高。划破强度为 46.3% 时, Simpson 指数、Shannon Weiner 指数和均匀度指数均最低 (表 2)。

表 2 不同划破强度下物种多样性指数

Table 2 Species diversity index under different ripping intensity

划破强度/% Ripping intensity	取样区域 Sampling area	Simpson 指数 Simpson index	Shannon Weiner 指数 Shannon Weiner index	均匀度指数 Evenness index
27.4	未划破带	0.46±0.00B	1.14±0.01B	0.45±0.01B
	划破带	0.82±0.01A	1.95±0.05A	0.81±0.01A
46.3	未划破带	0.24±0.04B	0.62±0.07B	0.22±0.02B
	划破带	0.76±0.03A	1.67±0.07A	0.63±0.03A
61.9	未划破带	0.71±0.01A	1.51±0.03A	0.58±0.02A
	划破带	0.76±0.02AB	1.97±0.08AB	0.71±0.03B
误差来源 Source of error				
划破强度 Ripping intensity		***	***	***
取样区域 Sampling area		***	***	***
划破强度×取样区域 Ripping intensity×Sampling area		***	***	***

A 和 B 表示对应划破强度下划破带与未划破带的 Simpson 指数、Shannon Weiner 指数及均匀度指数的显著性

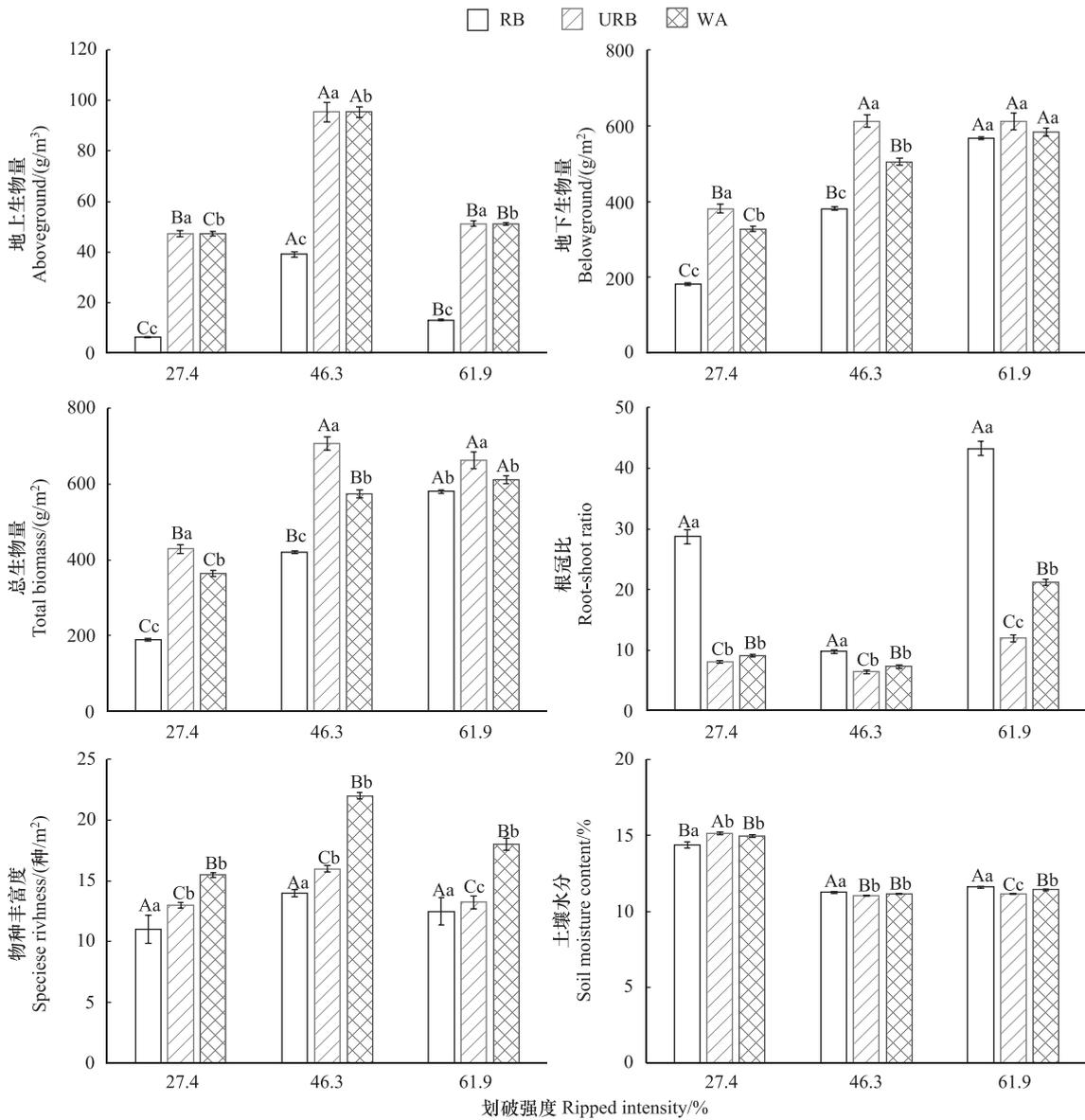


图4 植物群落物种多样性、生物量和土壤水分对划破强度和划破区域的响应

Fig.4 Response of plant community species diversity, biomass and soil moisture to ripped intensity and ripped area

大写字母代表三个划破强度下划破带、未划破带和整区各指标之间的差异,小写字母代表同一划破强度下划破带、未划破带和整区各指标之间的差异

划破带和整区的植物群落相似性随划破强度的增加呈先降低后升高的“马鞍”型曲线变化,整区的植物群落相似性显著高于划破带 23.85%—119.23%和未划破带 44.43%—84.55%,划破带和未划破带的群落相似性较低。3 个划破强度下,未划破带和划破带植物群落相似性负相关,整区植物群落相似性的拟合优度最高(图 6)。

2.3 划破强度对草原植物群落生物量的影响

划破带、未划破带和整区的地上生物量随划破强度的增加呈“驼峰”型曲线变化,划破强度为 46.3%时最高,分别为 33.90 g/m²、95.38 g/m²、69.32 g/m²。3 个划破强度下未划破带地上生物量分别是划破带的 5.63%—7.53、1.21—1.62、2.63—3.1 倍。划破带和未划破带地下生物量随划破强度的上升分别呈“马鞍”型和“驼峰”型曲线变化,未划破带地下生物量最高,3 个划破强度下分别高于划破带 88.2%—134.6%、52.4%—

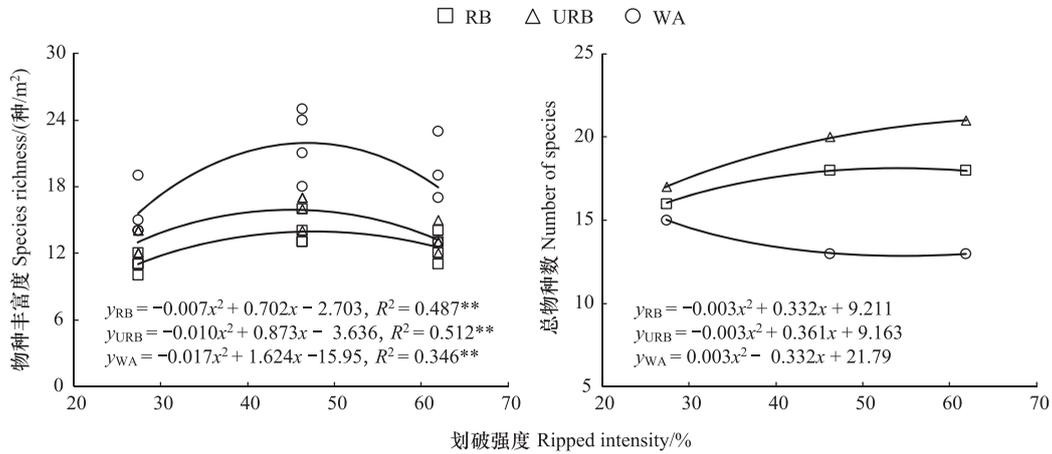


图 5 划破强度对植物群落物种丰富度的影响

Fig.5 Effect of ripped intensity on species richness

** ,P <0.01

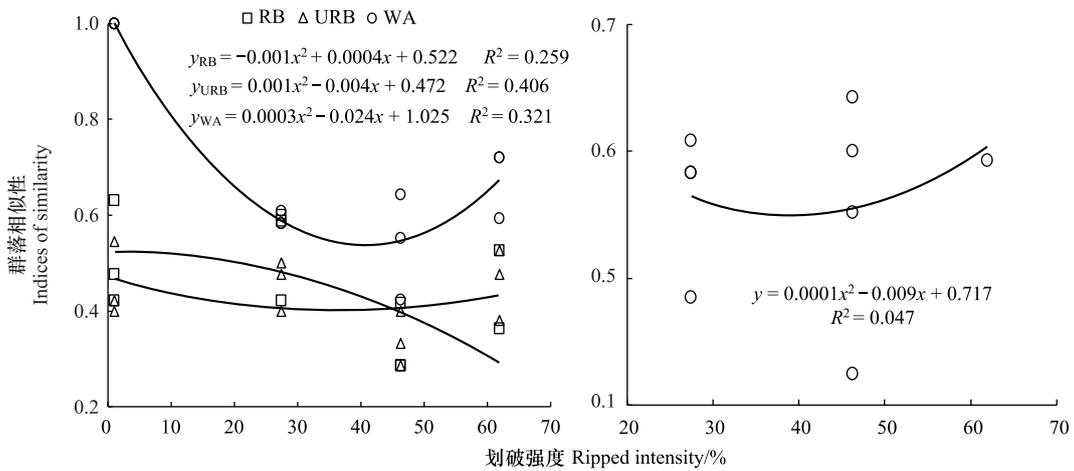


图 6 划破强度对植物群落相似性的影响

Fig.6 Effect of ripped intensity on similarity of plant communities

67.8%、2.5%—16.6%。总生物量随划破强度的增强呈“驼峰”型曲线变化,划破带总生物量增速较未划破带和整区快,未划破带总生物量高于划破带 103.9%—152.9%、59.3%—75.8%、9.1%—22.6%。根冠比随划破强度的增大呈“马鞍”型曲线变化,3 个划破强度下划破带的根冠比显著高于未划破带 0.21—3.15、0.46—0.63、2.12—3.00 倍(图 7)。

划破强度为 45.7%、45.2%和 43.8%时,划破带、未划破带和整区的地上生物量分别达到峰值 39.4 g/m²、96.5 g/m²和 70.4 g/m²,分别可解释群落地上生物量 99.4%、96.5%和 98.2%的变异。综上所述,当划破强度为 43.8%—45.7%时群落植被地上生物量最高。

2.4 划破强度对草原土壤水分的影响

划破带、未划破带和整区的土壤水分随划破强度的增加呈“马鞍”型曲线变化,在 46.3%划破强度下最低,分别为 11.26%、11.02%和 11.13%。未划破带的土壤水分在 27.4%划破强度下高于划破带 2.9%—9.8%。划破强度为 46.3%和 61.9%时,划破带土壤水分分别高于未划破带 0.9%—3.2%和 3.5%—4.6%。根据拟合方程,划破强度为 56.2%、50.1%和 56.0%时,划破带、未划破带和整区的土壤水分最低,分别为 9.9%、11.9%和

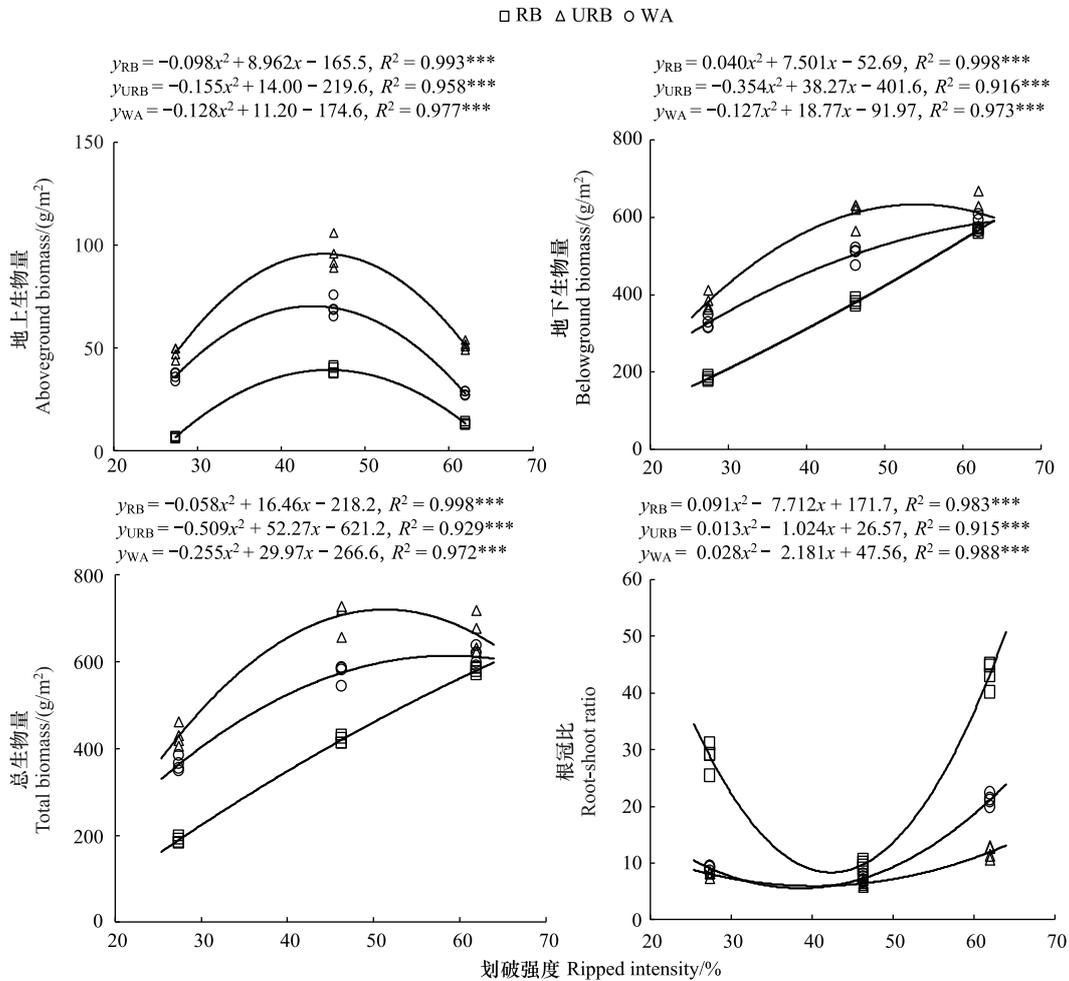


图 7 划破强度对植物群落生物量的影响

Fig.7 Effect of ripped intensity on plant community biomass

***, $P < 0.001$

9.7% (图 8)。

2.5 划破强度对群落物种多样性-生产力关系的影响

划破带地上生物量与物种丰富度显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Shannon Weiner 指数和均匀度指数显著负相关 ($P < 0.05$)。未划破带地上生物量与物种丰富度显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Shannon Weiner 指数、Simpson 指数和均匀度指数显著负相关 ($P < 0.05$), 根冠比与 Shannon Weiner 指数、Simpson 指数和均匀度指数显著正相关 ($P < 0.05$)。整区地上生物量与物种丰富度显著正相关 ($P < 0.05$), 与 Shannon Weiner 指数、Simpson 指数和均匀度指数显著负相关 ($P < 0.05$), 总生物量与 Simpson 指数和均匀度指数显著负相关 ($P < 0.05$) (图 9)。

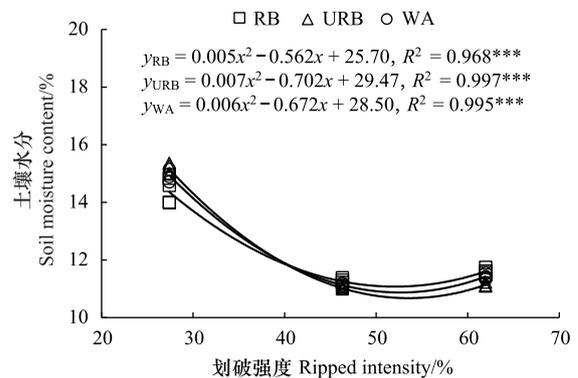


图 8 划破强度对土壤水分的影响

Fig.8 Effect of ripped intensity on soil moisture content

***, $P < 0.001$

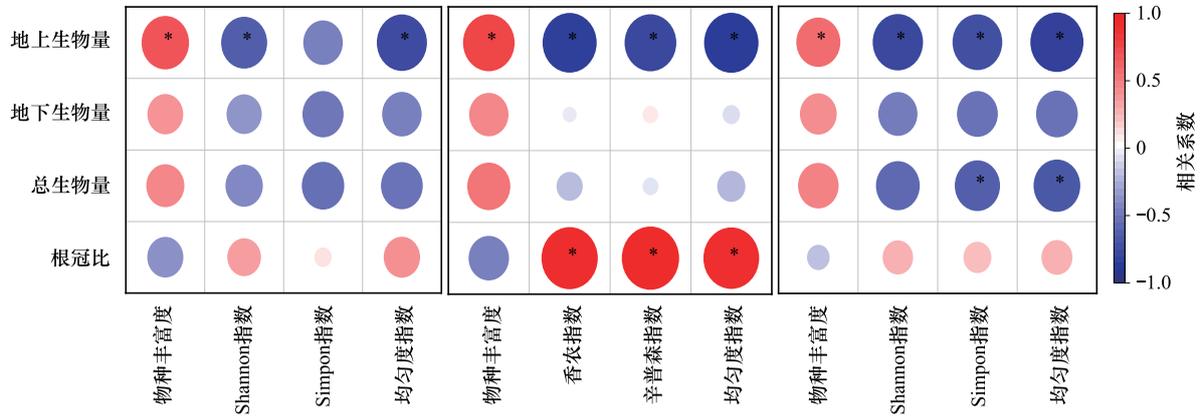


图9 植物群落物种多样性-生产力关系对划破强度的响应

Fig.9 Response of plant community species diversity-productivity relationship to ripped intensity

图依次代表划破带、未划破带和整区植物群落地上生物量、地下生物量、总生物量和根冠比与生物多样性的关系, *, $P < 0.05$

2.6 划破强度对土壤水分-生产力关系的影响

划破强度为 27.4%和 61.9%时,划破带和未划破带的地上生物量与土壤水分显著负相关($P < 0.05$),划破带地上生物量在 46.3%划破强度下与土壤水分显著负相关($P < 0.05$)。划破带、未划破带和整区的地下生物量、总生物量与土壤水分显著负相关($P < 0.05$) (图 10)。

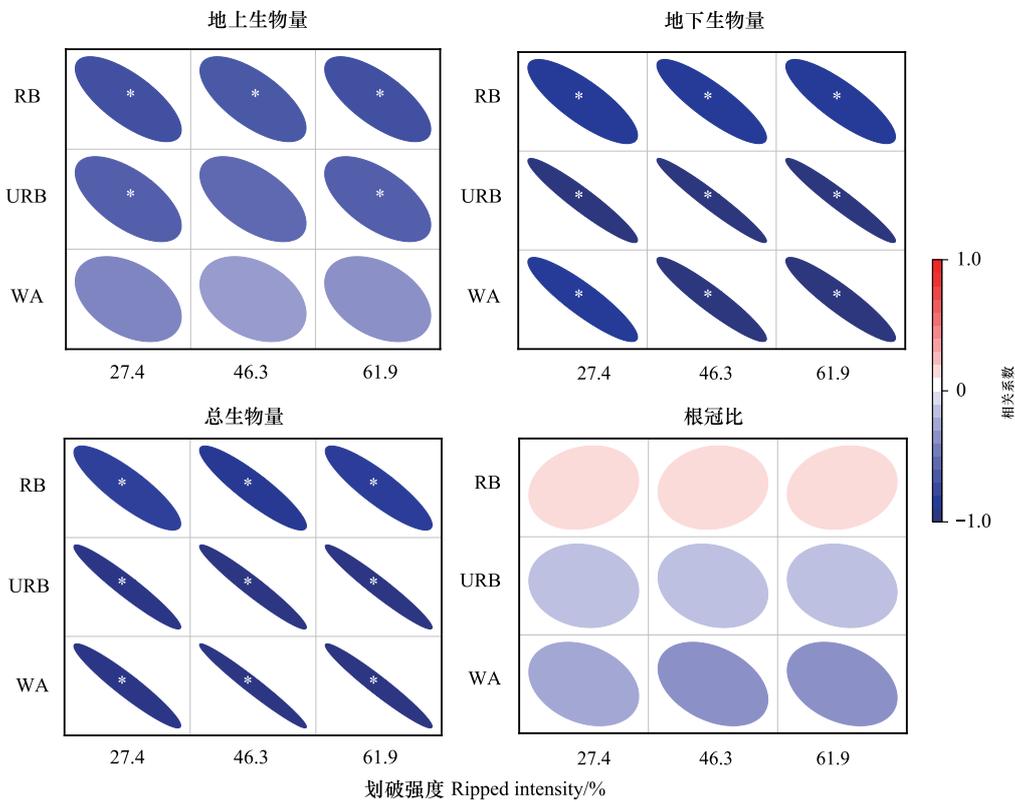


图 10 植物群落生物量与土壤水分的关系

Fig.10 Relationship between plant biomass and soil moisture constant

*, $P < 0.05$

3 讨论

3.1 划破强度对植物群落物种多样性的影响

土壤水分是植物生产力的重要限制因素,划破调节土壤水分,不断变化的水分状况影响养分的吸收和运输^[22],进而改变群落物种组成^[23]。划破带物种丰富度低于未划破带,可能由于划破引起较高的土壤透气性诱导了土壤保水率降低,抑制了植物生长所需的水资源分配,无法满足植物生长所需的基本条件,物种多样性降低^[24]。另一方面,划破较大程度上抑制了矮小的物种以及实生苗的生长并降低了它们对其它物种的竞争能力,物种丰富度随之降低^[25]。

物种多样性随划破强度增加呈“驼峰”型曲线变化。划破强度为 46.3%时植物群落物种丰富度最高,可能是因为划破改善土壤中枯死的根系絮结,提高生境质量^[26],有利于植物生长和其它物种的入侵,从而增加物种丰富度^[27]。在此范围内,生物量随物种丰富度的上升而增加,且与地下生物量不同的是划破带地上生物量随物种丰富度和 Simpson 指数的增加呈“马鞍”型曲线变化。一般而言,物种丰富度和 Simpson 指数较高时,群落地上生物量也较高^[20],在山地草甸和荒漠草甸的研究中也得到了同样的结论^[28]。但本研究结果与之不同的是物种丰富度或 Simpson 指数较高时具有较低的地上生物量,其原因可能是群落中物种较多(表 1),植物根系优先生长,地上部分发育缓慢,生物量低。不同的划破强度改变了植物群落的组成,一定程度上减少了竞争的相互作用,促进了优势种和从属种的共存^[29]。划破降低凋落物盖度,提高一年生物种的光照利用率^[30]。相反,27.4%划破强度下物种丰富度最低,可能是划破的干扰大于土壤水分的限制,在本研究区域中土壤水分对植物生长的影响效应降低,划破后物种间对光照和营养元素等资源的竞争加剧,导致群落物种多样性降低^[31]。在 61.9%划破强度下,凋落物的分解速率降低,形成物理屏障,影响种子的萌发和幼苗的存活^[32],植物生长发育所需的养分传输受到抑制,导致植物长势弱且多样性降低。

3.2 划破对草原植物群落生物量的影响

黄土高原典型草原划破 3 年后,未划破带地上、地下生物量显著高于划破带,可能因为:一划破去除多年生植物群落地上部分,影响水分迁移,进而抑制了植物群落地上部分的再生,导致群落发生低补偿生长^[33-34],在祁连山高寒矮蒿草甸的研究中也得到同样的结论^[6];二划破过程中机械损伤以及人为干扰等因素破坏地表结构减少植被覆盖,土壤水分蒸发加剧,不利于地下部分的生长发育^[35-36]。另外,划破也可以通过降低土壤紧实度,削弱了土壤保水保肥能力,抑制植物根部生长^[11],使划破带植物群落地下生物量低于未划破带,这与在祁连山中度退化高寒草甸的研究结果相反,可能因为高寒草甸的年均降水量大于黄土高原典型草原,砂质土壤的保水能力较差,土壤含水量也随之降低^[37-38];三划破可以减少凋落物的覆盖,导致土壤水分流失加剧,影响土壤温度,土壤受侵蚀程度大^[39],不利于植物的生长和恢复^[40];四划破降低了土壤微生物活性,抑制土壤有机碳矿化^[41],减少植物群落生物量^[42]。

划破强度为 46.3%时植物群落地上部生长发育较好,此时植物对资源的分配和利用效率最高,并能削弱划破对土壤水分的负作用^[43]。27.4%划破强度下群落生物量偏低,可能因为植物根系呼吸受到抑制,影响养分吸收效率。61.9%划破强度较大幅度地破坏了植被和土壤原有结构,增加了植物种子的掩埋深度,抑制种子萌发、植被恢复和地上部分的生长^[44]。

划破对植物群落地上、地下生物量之间分配的影响是植物对资源的权衡和环境适应能力的体现。划破带根冠比显著高于未划破带,说明划破作为一种对草原的干扰方式和管理手段,会导致大量氮从草原生态系统中去除,从而减少土壤中氮的可用性,迫使植物将更多的光合产物分配给地下器官^[45],进而导致群落内植物出现矮小化和向下生长的趋势^[46]。划破强度为 46.3%时根冠比最低,表明该划破强度下分配模式倾向于地上部分的生长,以达到植物对光资源竞争的最大利用率^[47]。61.9%划破强度下土壤水分增加,植物生长竞争力强,更容易吸收深层土壤水分,诱导更大的地下生物量分配^[48]。

4 结论

本试验以黄土高原典型草原为研究对象,旨在探讨不同划破强度对草原植物群落物种多样性、生物量和土壤水分的影响。通过对比三个划破强度下退化草原的恢复状况,发现:

划破是草地培育和草原修复的重要技术措施,在生态环境较为脆弱的黄土高原采用划破可以改善退化草地,维持生态系统的稳定性。划破强度显著影响退化草地恢复状况,黄土高原典型草原植物群落对划破强度存在响应阈值,划破强度为 43.7%—55.3% 时,植物群落物种丰富度最高,划破强度为 43.8%—45.7% 时植物群落地上生物量最高,表明划破强度对典型草原的作用阈值为 43.7%—55.3%。

参考文献 (References):

- [1] Hou F J, Jia Q M, Lou S N, Yang C T, Ning J, Li L, Fan Q S. Grassland agriculture in China: a review. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2021, 8(1): 35.
- [2] Bardgett R D, Bullock J M, Lavorel S, Manning P, Schaffner U, Ostle N, Chomel M, Durigan G, Fry E L, Johnson D, Lavelle J M, Provost G L, Luo S, Png K, Sankaran M, Hou X Y, Zhou H K, Ma L, Ren W B, Li X L, Ding Y, Li Y H, Shi H X. Combating global grassland degradation. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(10): 720-735.
- [3] Dong L B, Li J W, Liu Y L, Hai X Y, Li M Y, Wu J Z, Wang X Z, Shanguan Z P, Zhou Z C, Deng L. Forestation delivers significantly more effective results in soil C and N sequestrations than natural succession on badly degraded areas: Evidence from the Central Loess Plateau case. *Catena*, 2022, 208: 105734.
- [4] Gang C C, Zhou W, Chen Y Z, Wang Z Q, Sun Z G, Li J L, Qi J G, Odeh I. Quantitative assessment of the contributions of climate change and human activities on global grassland degradation. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72(11): 4273-4282.
- [5] Wang S L, Hu A, Zhang J, Hou F J. Effects of grazing season and stocking rate on seed bank in sheep dung on the semiarid Loess Plateau. *The Rangeland Journal*, 2019, 41(5): 405.
- [6] 李小龙, 曹文侠, 张晓燕, 李文, 徐长林, 师尚礼. 划破草皮对祁连山不同地形高寒矮高草甸土壤呼吸特征的影响. *草原与草坪*, 2020, 40(2): 30-38.
- [7] Mayel S, Jarrah M, Kuka K. How does grassland management affect physical and biochemical properties of temperate grassland soils? A review study. *Grass and Forage Science*, 2021, 76(2): 215-244.
- [8] 刘晶晶, 尹亚丽, 李世雄, 赵文, 董怡玲, 苏世锋. 不同调控措施对中度退化高寒草甸植被及土壤理化性质的影响. *草地学报*, 2021, 29(9): 2074-2080.
- [9] Streitberger M, Holtmann L, Bültmann H, Schmidt C, Fartmann T. Effects of montane heathland rejuvenation on phytodiversity depend on management intensity and succession. *Ecological Engineering*, 2021, 168: 106292.
- [10] Assis G B, Pilon N A L, Siqueira M F, Durigan G. Effectiveness and costs of invasive species control using different techniques to restore cerrado grasslands. *Restoration Ecology*, 2021, 29: e13219.
- [11] 李小龙, 曹文侠, 李文, 张晓燕, 徐长林, 韦应莉, 师尚礼. 划破草皮对不同地形高寒草甸草原土壤特征及地下生物量的影响. *草业学报*, 2016, 25(6): 26-33.
- [12] Wang Y X, Sun Y, Chang S H, Wang Z F, Fu H, Zhang W G, Hou F J. Restoration practices affect alpine meadow ecosystem coupling and functions[J]. *Rangeland Ecology & Management*, 2020, 73(3): 441-451.
- [13] Wang Y F, Cai Y F, Hou F J, Jia Z J, Bowatte S. Sheep grazing impacts on soil methanotrophs and their activity in typical steppe in the Loess Plateau China. *Applied Soil Ecology*, 2022, 175: 104440.
- [14] 袁梓裕, 张路, 廖李容, 王杰, 雷石龙, 刘国彬, 方怒放, 张超. 黄土高原草地植物多样性与群落稳定性的关系及其驱动因素. *生态学报*, 2023, 43(1): 60-69.
- [15] Naeem S, Zhang Y Q, Zhang X Z, Tian J, Abbas S, Luo L L, Meresa H K. Both climate and socioeconomic drivers contribute to vegetation greening of the Loess Plateau. *Science Bulletin*, 2021, 66(12): 1160-1163.
- [16] Hu A, Chang S H, Chen X J, Hou F J, Nan Z B. Temporal heterogeneity has no effect on the direction of succession in abandoned croplands in a semiarid area of northwest China. *Land Degradation & Development*, 2021, 32(1): 91-100.
- [17] Li L, Zhang J, He X Z, Hou F J. Different effects of sheep excrement type and supply level on plant and soil C: N: P stoichiometry in a typical steppe on the loess plateau. *Plant and Soil*, 2021, 462(1): 45-58.
- [18] Ren J Z, Hu Z Z, Zhao J, Zhang D G, Hou F J, Lin H L, Mu X D. A grassland classification system and its application in China. *The Rangeland Journal*, 2008, 30(2): 199.
- [19] Li L, He X Z, Zhang X M, Hu J Q, Wang M Y, Wang Z, Hou F J. Different effects of grazing and nitrogen addition on ecosystem multifunctionality are driven by changes in plant resource stoichiometry in a typical steppe. *Plant and Soil*, 2022, 481(1): 179-194.
- [20] 周洁艳, 安玉峰, 李多才, 张育文, 李岚. 祁连山高寒草原 α 多样性与生产力关系的研究. *中国草地学报*, 2022, 44(3): 9-16.

- [21] Buss J, Pinno B D, Quideau S. A comparison between reclamation stockpile and boreal forest seed banks and plant communities. *Restoration Ecology*, 2020, 28(5): 1247-1256.
- [22] Fischer C, Leimer S, Roscher C, Ravenek J, Kroon H D, Kreuziger Y, Baade J, Beler H, Eisenhauer N, Weigelt A, Mommer L, Lange M, Gleixner G, Wilcke W, Schröder B, Hildebrandt A. Plant species richness and functional groups have different effects on soil water content in a decade-long grassland experiment. *Journal of Ecology*, 2019, 107(1): 127-141.
- [23] Liu M, Liu G H, Zheng X X. Spatial pattern changes of biomass, litterfall and coverage with environmental factors across temperate grassland subjected to various management practices. *Landscape Ecology*, 2015, 30(3): 477-486.
- [24] Vogel A, Scherer-Lorenzen M, Weigelt A. Grassland resistance and resilience after drought depends on management intensity and species richness. *PloS one*, 2012, 7(5): e36992.
- [25] 徐鑫磊, 宋彦涛, 赵京东, 乌云娜. 施肥和刈割对呼伦贝尔草甸草原牧草品质的影响及其与植物多样性的关系. *草业学报*, 2021, 30(7): 1-10.
- [26] 李小龙, 曹文侠, 徐长林, 李文, 刘浩栋, 张晓燕, 师尚礼. 划破草皮对不同地形高寒草甸草原植被特征的影响. *草地学报* 2016 24(02): 309-316.
- [27] 王悦骅, 靳宇曦, 王忠武, 韩国栋. 8 年围封对内蒙古荒漠草原植物和土壤的影响. *草地学报*, 2021, 29(10): 2339-2345.
- [28] Chen L L, Baoyin T, Minggagud H. Effects of mowing regimes on above- and belowground biota in semi-arid grassland of Northern China. *Journal of Environmental Management*, 2021, 277: 111441.
- [29] Li D, Nie Y Y, Xu L J, Ye L M. Enclosure in combination with mowing simultaneously promoted grassland biodiversity and biomass productivity. *Plants*, 2022, 11(15): 2037.
- [30] Miao R H, Ma J, Liu Y Z, Liu Y C, Yang Z L, Guo M X. Variability of aboveground litter inputs alters soil carbon and nitrogen in a coniferous-broadleaf mixed forest of Central China. *Forests*, 2019, 10(2): 188.
- [31] 王萌, 徐冰, 张大勇, 朱璧如. 内蒙古草原锡林河流域植物群落生物量及多样性沿土壤水分含量梯度的变化. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2016, 52(4): 445-449.
- [32] Chen B M, D'Antonio C M, Molinari N, Peng S L. Mechanisms of influence of invasive grass litter on germination and growth of coexisting species in California. *Biological Invasions*, 2018, 20(7): 1881-1897.
- [33] 包乌云, 赵萌萌, 红梅, 高新磊. 刈割对人工草地产量和补偿性生长的影响. *中国草地学报*, 2015, 37(5): 46-51.
- [34] Wang B, Li P P, Huang C H, Liu G B, Yang Y F. Effects of root morphological traits on soil detachment for ten herbaceous species in the Loess Plateau. *Science of The Total Environment*, 2021, 754: 142304.
- [35] Yang Z P, Minggagud H, Baoyin T, Li Y H. Plant production decreases whereas nutrients concentration increases in response to the decrease of mowing stubble height. *Journal of environmental management*, 2020, 253: 109745.
- [36] 李凤霞, 李晓东, 周秉荣, 祁栋林, 王力, 傅华. 放牧强度对三江源典型高寒草甸生物量和土壤理化特征的影响. *草业科学*, 2015, 32(1): 11-18.
- [37] 孙天雨, 王雪, 李丹洋, 刘欣蕊, 王瑞丽, 张硕新. 黄土高原草地根系生物量沿环境梯度变化规律. *生态学报*, 2021, 41(15): 6234-6244.
- [38] 刘晶晶, 尹亚丽, 李世雄, 赵文, 苏世锋, 董怡玲. 调控措施对祁连山中度退化高寒草甸土壤的影响. *应用生态学报*, 2022, 33(4): 988-994.
- [39] Lu X, Song X Y, Fu N, Cui S Y, Li L J, Li H Y, Li Y L. Effects of forest litter cover on hydrological response of hillslopes in the Loess Plateau of China. *Catena*, 2019, 181: 104076.
- [40] Kotas P, Choma M, Šantrůčková H, Lepš J, Tríska J, Kaštovská E. Linking above-and belowground responses to 16 years of fertilization, mowing, and removal of the dominant species in a temperate grassland. *Ecosystems*, 2017, 20(2): 354-367.
- [41] Zhang S B, Fang Y Y, Luo Y, Li Y C, Ge T D, Wang Y X, Wang H L, Yu B, Song X Z, Chen J H, Zhou J S, Li Y F, Chang S X. Linking soil carbon availability, microbial community composition and enzyme activities to organic carbon mineralization of a bamboo forest soil amended with pyrogenic and fresh organic matter. *Science of The Total Environment*, 2021, 801: 149717.
- [42] 蒋翔, 马建霞. 我国草地生态恢复对不同因素响应的 Meta 分析. *草业学报*, 2021, 30(2): 14-31.
- [43] 张存厚, 杨丽萍, 越昆, 刘朋涛, 张德龙. 锡林郭勒典型草原土壤水分对降水过程的响应. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(8): 133-139.
- [44] Sun J, Ma B B, Lu X Y. Grazing enhances soil nutrient effects: Trade-offs between aboveground and belowground biomass in alpine grasslands of the Tibetan Plateau. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(2): 337-348.
- [45] Luo Y, Wang X Y, Cui M, Wang J, Gao Y Z. Mowing increases fine root production and root turnover in an artificially restored Songnen grassland. *Plant and Soil*, 2021, 465(1): 549-561.
- [46] 张晴晴, 梁庆伟, 娜日苏, 杨秀芳. 刈割对天然草地影响的研究进展. *畜牧与饲料科学*, 2018, 39(1): 33-42.
- [47] Wen J, Qin R M, Zhang S X, Yang X Y, Xu M H. Effects of long-term warming on the aboveground biomass and species diversity in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau of China. *Journal of Arid Land*, 2020, 12(2): 252-266.
- [48] Zhou L Y, Zhou X H, He Y H, Fu Y L, Du Z G, Lu M, Sun X Y, Li C H, Lu C Y, Liu R Q, Zhou G Y, Bai S H, Thakur M P. Global systematic review with meta-analysis shows that warming effects on terrestrial plant biomass allocation are influenced by precipitation and mycorrhizal association. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 4914.