

DOI:10.11686/cyxb2025196

http://cyxb.magtech.com.cn

李豫悦, 魏浩男, 马兴忠, 等. 轮牧对荒漠草原土壤种子库特征的影响. 草业学报, 2026, 35(4): 1-13.

LI Yu-yue, WEI Hao-nan, MA Xing-zhong, et al. Effects of rotational grazing on characteristics of the soil seed bank in desert steppe. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(4): 1-13.

轮牧对荒漠草原土壤种子库特征的影响

李豫悦¹, 魏浩男², 马兴忠², 姜海鑫¹, 聂明鹤¹, 周瑶¹, 代成江³, 田小武⁴, 王国会¹,
马红彬^{1*}

(1. 宁夏大学林业与草业学院, 农业农村部饲草高效生产模式创新重点实验室, 宁夏草业工程技术研究中心, 宁夏银川 750021; 2. 中宁县林业和草原局, 宁夏中卫 755100; 3. 固原市原州区林业和草原发展服务中心, 宁夏固原 756000; 4. 中卫市国有林业总场, 宁夏中卫 755000)

摘要: 土壤种子库对维持草地植物群落的稳定性、多样性和遗传性至关重要, 研究放牧干扰对草地土壤种子库的影响对草地的科学管理具有重要意义。以宁夏砾质灰钙土荒漠草原和沙壤灰钙土荒漠草原为研究对象, 通过野外轮牧试验和室内萌发试验, 探讨了短期轮牧对土壤种子库特征的影响。结果表明: 两种土壤质地的荒漠草原在轮牧下种子库种子密度无显著变化, 但多年生植物种子比例增加, 主要集中于 0~5 cm 土层中; 相对于封育, 轮牧下砾质灰钙土荒漠草原种子库种子 Shannon 指数提升、Simpson 指数下降, 而沙壤灰钙土荒漠草原轮牧下 Margalef 指数与 Simpson 指数上升, 两种土壤质地草原的 Pielou 指数均无显著变化; 种子库物种与地上植被物种相似性较低, 其中沙壤灰钙土荒漠草原的相似性整体高于砾质灰钙土荒漠草原; 砾质荒漠草原土壤种子库主要受土壤速效钾、pH 的影响, 而沙壤灰钙土荒漠草原种子库则受全磷、铵态氮的影响。研究认为, 轮牧对干旱区荒漠草原土壤种子库的物种组成及密度影响显著, 土壤质地和环境因子共同影响着土壤种子库的变化。

关键词: 土壤种子库; 组成和密度; 多样性和相似性; 短期轮牧; 荒漠草原

Effects of rotational grazing on characteristics of the soil seed bank in desert steppe

LI Yu-yue¹, WEI Hao-nan², MA Xing-zhong², JIANG Hai-xin¹, NIE Ming-he¹, ZHOU Yao¹, DAI Cheng-jiang³,
TIAN Xiao-wu⁴, WANG Guo-hui¹, MA Hong-bin^{1*}

1. College of Forestry and Prataculture, Key Laboratory for Model Innovation in Forage Production Efficiency, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, Ningxia Grassland and Animal Husbandry Engineering Technology Research Center, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2. Zhongning County Bureau of Forestry and Grassland, Zhongwei 755100, China; 3. Guyuan Yuanzhou District Forestry and Grassland Development Service Center, Guyuan 756000, China; 4. Zhongwei State-Owned Forestry General Farm, Zhongwei 755000, China

Abstract: The soil seed bank is crucial for maintaining the stability, diversity, and genetic integrity of grassland plant communities. Knowledge of the impact of grazing disturbance on the soil seed bank is essential for the scientific management of grasslands. This research focused on two desert grasslands in gravelly sierozem desert steppe and sandy loam sierozem desert steppe. Field rotational grazing experiments and indoor germination tests were conducted to examine the effects of short-term rotational grazing on the soil seed bank. Results indicate that rotational grazing is not significantly altering soil seed bank density in desert grassland of either soil texture; however, it is driving an

收稿日期: 2025-05-19; 改回日期: 2025-08-07

基金项目: 宁夏中央引导地方科技发展专项(2023FRD05035), 国家自然科学基金(32371783), 中卫市 2024 年退化草原生态修复项目监测与评价项目, 原州区草原季节性放牧试点效应监测评价项目(2023)和中卫市沙坡头区 2024 年防沙治沙示范建设项目资助。

作者简介: 李豫悦(2002-), 男, 宁夏银川人, 在读硕士。E-mail: YuyueLi111@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: ma_hb@nxu.edu.cn

increase in perennial plant seed proportions, with seeds showing strong concentration within the 0–5 cm soil layer. Compared to grazing exclusion by fencing, the gravelly sierozem desert steppe under rotational grazing showed an increase in the Shannon index and a decrease in the Simpson index. In contrast, the sandy loam sierozem desert steppe had increases in both the Margalef and Simpson indices. However, the Pielou index of the seed bank did not change significantly with rotational grazing in either type of grassland. The similarity between the seed bank species and aboveground vegetation species was low, with the sandy loam sierozem desert steppe showing overall higher similarity than the gravelly sierozem desert steppe. In the gravelly sierozem desert steppe, the seed bank was mainly influenced by soil factors such as available potassium and pH, while in the sandy loam sierozem desert steppe, it was more affected by total phosphorus and ammonium nitrogen. This study suggests that rotational grazing has a significant impact on the species composition and density of the soil seed bank in desert steppe. Soil texture and environmental factors collectively impact soil seed bank dynamics.

Key words: soil seed bank; composition and density; diversity and similarity; short-term rotational grazing; desert steppe

土壤种子库是指存在于土壤和土壤表层凋落物中全部活性种子的总和^[1]。作为草地生态系统的重要组成部分,草地土壤种子库不仅是草地恢复和重建中不可或缺的天然种质资源,更是草地生态系统抵御环境扰动的重要屏障^[2–3]。土壤种子库通过参与群落的更新影响群落多样性^[4–5],对维持草地生态系统群落结构的稳定性、多样性和遗传性发挥着关键作用^[6]。近30年来,土壤种子库研究方向持续受到国内外学者的广泛关注,是生态学研究活跃的领域之一^[7]。目前,国内外土壤种子库研究热点主要聚焦于气候变化与极端环境对土壤种子库的影响、种子库在生态修复和生物多样性保护中的作用、微生物—种子库互作机制、种子库遗传性等方面^[8–10]。

放牧作为草地利用的主要方式之一,其对土壤种子库的影响具有多途径、多层次的复杂性。家畜通过采食、践踏、排泄物返还等一系列行为对土壤种子库的组成、密度、相似性、多样性产生深远的影响^[11]。目前关于放牧对土壤种子库影响的研究主要集中在不同放牧强度或封育下土壤种子库与地上植被多样性、相似性的关系^[12],以及不同轮牧时间对土壤种子库特征的影响等^[13]。但研究结果不尽一致。有研究发现,家畜通过采食地上部分,会直接减少地上植物的光合作用和生殖投入导致种子产量下降^[14];家畜践踏会导致土壤紧实度增加,种子被埋入更深层的土壤中,影响其萌发^[15],过度践踏会破坏种子结构并抑制种子萌发^[16];家畜介导下的种子传播过程会通过其消化道内环境促进部分种子萌发^[17]。土壤理化性质是放牧影响土壤种子库的关键中介变量,放牧会导致土壤质地与结构、pH与盐分以及养分循环发生变化,从而间接影响种子的萌发和存活^[18]。亦有研究表明土壤种子库及植被多样性是评估放牧效应的核心^[19],适度放牧可通过抑制竞争种而提高植物群落的Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数^[20];而过度放牧通常导致Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef指数下降而Simpson优势度指数增加,比较种子库和地上植被多样性指数可以更全面地揭示放牧对土壤种子库的影响,了解种子库多样性和植被多样性的异同^[21]。可见,放牧对土壤种子库的组成、密度及多样性影响显著^[22],土壤种子库的变化与草地的类型、草地环境、放牧强度等密切相关。

荒漠草原是我国草地生态系统的重要组成部分之一,宁夏荒漠草原地处我国干旱、半干旱地区,生态环境尤为脆弱。在划区轮牧下,草地植物因间隔性休牧导致种子结实发生变化,影响土壤种子库,但目前荒漠草原在划区轮牧下土壤种子库变化及其影响因子尚不明晰。为此,本研究以宁夏砾质灰钙土荒漠草原和沙壤灰钙土荒漠草原为研究对象,探究短期轮牧对土壤种子库组成、密度的影响,分析种子库多样性与地上植被多样性的关系,旨在揭示短期轮牧干扰下荒漠草原土壤种子库的响应机制,为荒漠草原科学放牧管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究区位于宁夏回族自治区中宁县新堡镇刘营村(37°45' N, 106°13' E)和利通区扁担沟镇白塔水村

(37°47' N, 106°13' E)。其中,新堡镇刘营村地处黄土高原北部向鄂尔多斯台地过渡区域,海拔 1330~1350 m,属于温带大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,年平均气温 11.5 °C,年平均降水量约 205.4 mm,年平均蒸发量约 1614.1 mm,土壤为砾质灰钙土,植被类型为荒漠草原类,主要为短花针茅(*Stipa breviflora*)、冰草(*Agropyron cristatum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)等。扁担沟镇白塔水村位于毛乌素沙地西南缘的沙质缓岗地貌区,海拔 1328~1340 m,属于温带大陆性季风气候,年平均气温 9.0 °C,年平均降水量约 192.9 mm,年均蒸发量约 2018 mm,土壤主要为沙壤灰钙土,植被属荒漠草原类,主要有短花针茅、牛枝子(*Lespedeza potaninii*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)、老瓜头(*Cynanchum komarovii*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等。研究区的草原植被和土壤基本情况见表 1。

表 1 研究区草原植被和土壤基本情况

Table 1 Basic situation of grassland vegetation and soil in the study area

草原类型 Grassland type	土壤有机质含量 Soil organic matter content (g·kg ⁻¹)	土壤容重 Soil bulk density (g·cm ⁻³)	土壤砂粒含量 Soil sand content (%)	地上生物量 Above ground biomass (g·m ⁻²)	植被盖度 Plant coverage (%)
砾质灰钙土荒漠草原 GSDS	11.93±1.42	1.61±0.03	55.35±3.21	55.99±7.49	53±4.84
沙壤灰钙土荒漠草原 SLSDS	3.23±0.67	0.77±0.02	37.31±2.89	69.93±5.88	57±3.42

GSDS: 砾质灰钙土荒漠草原 Gravelly sierozem desert steppe; SLSDS: 沙壤灰钙土荒漠草原 Sandy loam sierozem desert steppe. 下同 The same below.

1.2 试验设计

在研究区土壤类型、地形、植被种类等一致的地段,以封育草地为对照,设置轮牧处理。每个处理 3 个重复,每个研究区共 12 个小区,小区间架设围栏,根据团队前期研究^[23]结合试验区牧草返青枯黄日期,确定载畜率为 0.75 只·hm⁻²、放牧日期为 90 d 左右、放牧方式为三区轮牧^[24],放牧时间为 2023 和 2024 年,每年选择体重约 20 kg 的滩羊为放牧羊只,按载畜率核算放牧羊只数并分组,各组间体重差异不显著($P < 0.05$)^[24],根据载畜率和滩羊日均采食量计算出牧草利用率。放牧试验开始前,给试验羊打耳标,体内体外驱虫后,按试验设计的放牧时间进行放牧。放牧期间每个放牧小区放置一个定期移动的水源和舔砖,设置一个遮阳棚,供放牧羊只休息。其他管理措施按当地农民的放牧习惯采取相同的措施。放牧羊只数、放牧具体时间等见表 2。

表 2 放牧试验设计

Table 2 Design of grazing experiment

草原类型 Grassland type	处理 Treatment	代号 Code mark	小区面积 Plot area (hm ²)	小区数 No. of plots	放牧羊只数 No. of sheep	放牧频率 Frequency of grazing	轮牧周期 Rotational grazing cycle (d)	放牧日期 The date of grazing	牧草利用率 Pasture utilization ratio (%)
GSDS	FY	LCK	110	1	0	0	0	不放牧 No grazing	0.00
	SG	LLM	110	3	248	3	30	06-20—09-17, 90 d	65.23
SLSDS	FY	SCK	180	1	0	0	0	不放牧 No grazing	0.00
	SG	SLM	180	3	368	3	33	06-24—09-30, 99 d	52.10

FY: 禁牧封育 No grazing and pasture restoration; SG: 划区轮牧 Rotational grazing.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤种子库的采集与萌发

于 2024 年 10 月采用自制土壤种子库取样器(10 cm×10 cm×5 cm)对土壤种子库进行采集。采集前对样方地表的枯落叶、植物根以及杂类物进行清除。采用对角线法^[25],选取 10 个采样点,分别按 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 3 个土层进行取样,带回实验室后采用幼苗萌发法^[25]对种子库进行鉴

定。先对土样进行风干处理并过2 mm孔径土壤筛(除去大石块、植物的营养器官),在花盆的底部铺设厚约4 cm的经过高温(105 °C烘干8 h)杀灭植物繁殖体的蛭石。将处理好的土样铺设在花盆内。在温室大棚进行萌发试验,每天定时浇水以保持土壤湿润,记录盆中新生幼苗数量,确定幼苗种属后将其从盘中移除。为促进种子萌发,在萌发后期,每15 d轻轻翻动一次土壤。若连续观测6周无新幼苗出现,则认为土壤中的种子已完全萌发。萌发试验时间为2024年10月—2025年3月。

1.3.2 地上植被调查 于2024年在植物生长旺盛期,于各个试验样地进行植被调查,在各个样地中,采用网状等距布设5个1 m×1 m的样方,调查并记录每个样方中植物的种类、数量、高度以及频度。密度采用单位面积内植物出现的数量进行测定;频度采用样圆法^[26]进行测定;盖度采用针刺法^[26]进行测定。

1.3.3 土壤采集与测定 采用重铬酸钾比色法^[27]测定有机碳(soil organic carbon, SOC)含量;采用凯氏定氮仪(KjelFlex-K-360)测定全氮(total nitrogen, TN)含量;采用靛酚蓝比色法^[27]测定铵态氮(ammonium nitrogen, AN)含量;采用钼锑抗比色法^[27]测定速效磷(available phosphorus, AP)和全磷(total phosphorus, TP)含量;采用火焰光度法^[27]测定速效钾(available potassium, AK)含量;采用玻璃电极法测定土壤pH^[27]。

1.4 数据处理

1.4.1 种子库密度统计 采用样地内单位面积土壤所萌发的全部种子数量表示土壤种子库密度(平均值±标准差),将取样面积内(10 cm×10 cm)所萌发种子数目换算为1 m×1 m面积的萌发种子数。

1.4.2 物种多样性计算 采用Shannon多样性指数(H)、Margalef丰富度指数(R)、Pielou均匀度指数(E)、Simpson优势度指数(D)表示土壤种子库与地上植被的多样性,公式如下^[28]:

$$H = -\sum P_i \ln P_i$$

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

$$E = H / \ln S$$

$$D = 1 - \sum P_i^2$$

式中:S为物种总数(土壤种子库或地上植被); P_i 为物种*i*的相对丰度; N 为物种个体总数(土壤种子库或地上植被)。

1.4.3 相似性指数 采用Sorensen相似性系数^[29]计算各处理土壤种子库与对应的地上植物群落相似性,由此分析干旱、半干旱地区群落演替及变化特征和地上植被物种组成与土壤种子库的耦合关系。

$$S_c = 2w / (a + b)$$

式中: w 为土壤种子库与地上植被中均存在的物种; a 和 b 分别代表种子库以及地上植被的物种数。

采用Excel 2024对数据进行整理,分析结果采用平均值±标准偏差表示,采用SPSS 21.0软件对数据进行显著性分析和单因素方差分析(one way ANOVA)。土壤种子库特征与土壤因子间的冗余分析(redundancy analysis, RDA)排序采用Canoco 5.0进行,Pearson相关性分析及柱状图绘制使用Origin 2021软件完成。

2 结果与分析

2.1 轮牧对荒漠草原土壤种子库组成和密度的影响

2.1.1 土壤种子库组成和密度的变化 萌发试验统计出的土壤种子库共有11科17种,其中砾质灰钙土荒漠草原种子库共有5科6种,主要由禾本科、豆科、菊科组成(表3)。从植物生活型来看,LCK下种子库由多年生(75%)和半灌木(25%)组成,总密度为(5218±2431)粒·m⁻²,而LLM下种子库由多年生种子(75%)和一年生种子(25%)组成,总密度为(2280±480)粒·m⁻²,两个处理下只有短花针茅和猪毛蒿同时出现且猪毛蒿对两种类型种子库的总密度贡献均最高。沙壤灰钙土荒漠草原种子库共有9科14种,主要由禾本科、豆科、菊科组成。SCK下种子库生活型以一年生为主(62.5%),多年生为次要部分(37.5%),总密度为(3249±1687)粒·m⁻²。而SLM生活型则表现出相反的趋势,其多年生种子比例(58.3%)高于一年生(33.3%)和半灌木(8.3%),种子库总密度为(2724±815)粒·m⁻²,其中,虫实和二裂委陵菜分别对SCK和SLM种子库的密度贡献最高。

表 3 不同土质荒漠草原短期轮牧时间下土壤种子库的组成及密度

Table 3 Composition and density of soil seed bank under short-term rotational grazing time in desert steppe with different soil types (No. · m⁻²)

科名 Family name	物种 Species	生活型 Life form	砾质灰钙土荒漠草原 GSDS		沙壤灰钙土荒漠草原 SLSDS	
			LCK	LLM	SCK	SLM
禾本科 Poaceae	狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	A	—	—	340±206a	233±46a
	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	P	367±170a	150±50a	480±117a	364±31a
	糙隐子草 <i>C. squarrosa</i>	P	—	—	—	267±125
豆科 Leguminosae	苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	P	—	—	160±80a	133±45a
	猫头刺 <i>Oxytropis aciphylla</i>	S	133±47	—	—	167±47
苋科 Amaranthaceae	猪毛菜 <i>Salsola collina</i>	A	—	—	667±249a	194±100a
	刺沙蓬 <i>Salsola tragus</i>	A	—	—	—	110±70
	虫实 <i>Corispermum hyssopifolium</i>	A	—	—	725±497a	300±100a
菊科 Asteraceae	中华苦苣菜 <i>Ixeris chinensis</i>	P	—	130±56	—	—
	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	P	4200±2083a	2000±374a	340±250a	306±67a
旋花科 Convolvulaceae	银灰旋花 <i>Convolvulus ammannii</i>	P	—	—	—	133±40
石蒜科 Amaryllidaceae	细叶韭 <i>Allium tenuissimum</i>	P	400±82	—	—	—
紫草科 Boraginaceae	鹤虱 <i>Lappula myosotis</i>	A	—	—	320±264	—
车前科 Plantaginaceae	细叶车前 <i>Plantago minuta</i>	A	—	—	217±24	—
蔷薇科 Rosaceae	二裂委陵菜 <i>Potentilla bifurca</i>	P	—	—	—	400±82
唇形科 Lamiaceae	冬青叶兔唇花 <i>Lagochilus ilicifolius</i>	P	—	—	—	117±62
蒺藜科 Zygophyllaceae	蒺藜 <i>Tribulus terrestris</i>	A	—	118±49	—	—
总计 Total			5218±2431a	2280±480a	3249±1687a	2724±815a

P: 多年生植物 Perennial plant; A: 一年生植物 Annual plant; S: 半灌木 Subshrub; —: 未出现此植物 This plant didn't appeared; 不同小写字母表示同一试验区内两个不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercase letters in the same experimental area indicate significant differences between two different treatments in the same experimental site ($P < 0.05$).

2.1.2 土壤种子库的垂直分布 LCK 下土壤种子库垂直分布从高到低表现为 $0\sim 5\text{ cm} > 5\sim 10\text{ cm} > 10\sim 15\text{ cm}$, 其中 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层种子库密度显著大于其他两个土层 (图 1)。LLM 下土壤种子库密度同样在 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层最大, 但远小于 LCK 处理, $10\sim 15\text{ cm}$ 土层种子库密度略高于 $5\sim 10\text{ cm}$ 。SCK 下 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层种子库密度最高, 随土层深度增加种子库密度表现为下降趋势。SLM 中 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层种子库密度与前者表现一样, 但 $10\sim 15\text{ cm}$ 土层种子库密度略高于 $5\sim 10\text{ cm}$ 。从不同土质荒漠草原看, 禁牧封育下同一土层的种子库密度整体大于划区轮牧。

2.2 轮牧对荒漠草原土壤种子库物种多样性的影响

在砾质灰钙土荒漠草原中, LCK 种子库的 Shannon 指数为 0.17, 远小于 LLM (0.29), 地上植被的则恰好相反 (图 2)。地上植被的 Pielou 指数表现为 LCK 较 LLM 高, 但种子库间无显著差异。种子库或地上植被的 Margalef 指数在 LLM 和 LCK 间无显著差异, 但种子库的 Margalef 指数显著低于地上植被。种子库和地上植被的 Simpson 指数在 LLM 与 LCK 间无显著性差异。在沙壤灰钙土荒漠草原, SCK 处理下地上植被的 Shannon 指数显著小于 SLM, 而种子库表现为 SCK 与 SLM 间无显著性差异。种子库的 Pielou 指数 SLM 小于 SCK, 而地上植被为 SLM 显著大于 SCK。Simpson 指数在种子库与地上植被中均表现为 SLM 大于 SCK, Margalef 指数在种子库与地上植被中均为 SCK 小于 SLM。可见, 除 Shannon 指数外, 砾质灰钙土荒漠草原种子库多样性指数在划区轮牧与封育间未表现出显著性差异; 地上植被的多样性指数呈划区轮牧小于封育, 而沙壤灰钙土荒漠草原的地上植被多样性指数表现为划区轮牧大于封育。

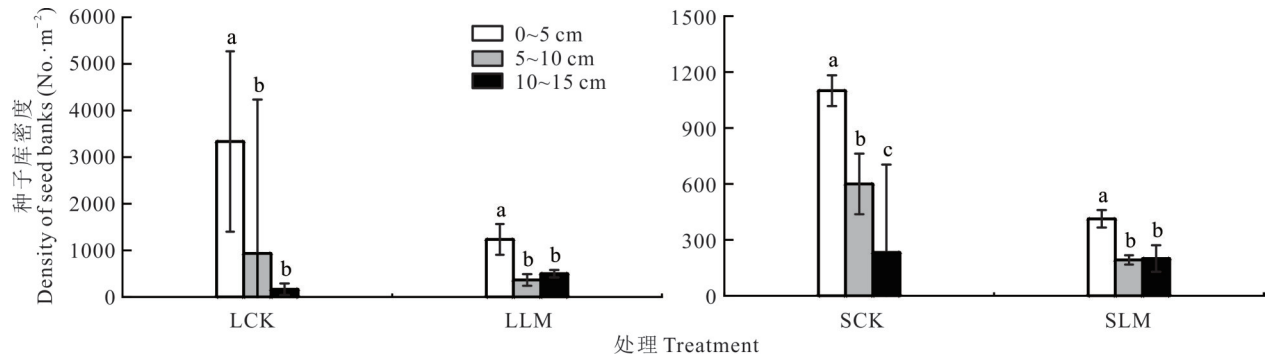


图1 不同土质荒漠草原短期轮牧与封育处理下土壤种子库的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil seed bank under short-term rotational grazing and enclosure treatments in desert steppe with different soil types

不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),下同。The different small letters indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

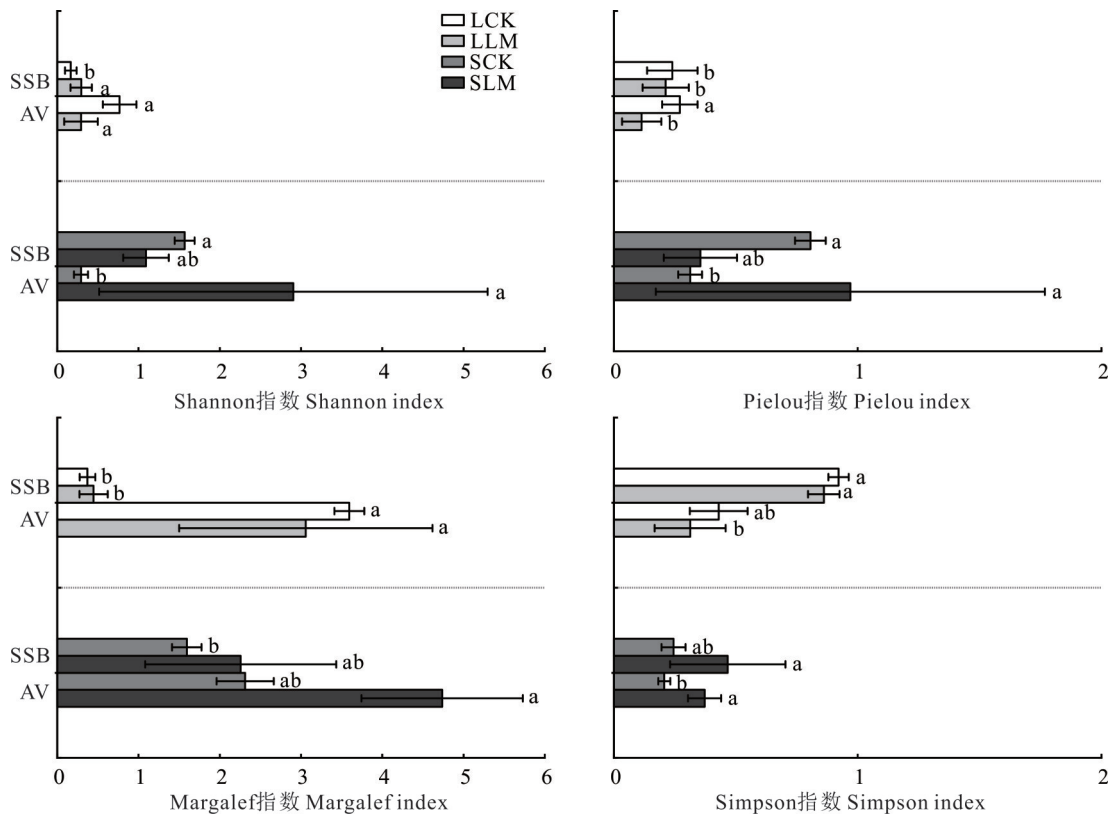


图2 不同土质荒漠草原土壤种子库及地上植被多样性特征

Fig. 2 Diversity characteristics of soil seed bank (SSB) and aboveground vegetation (AV) in desert steppe with different soil types

2.3 土壤种子库与地上植被的相似性

LLM下土壤种子库与地上植被相似性指数最低,为0.12,且种子库与地上植被的共有物种个数仅为1(表4)。而SCK下种子库与地上植被的共有物种数为4,相似性指数为0.44,相似性最高;SLM下相似性指数为0.34。两种土壤质地荒漠草原放牧干扰下相似性指数为0.12~0.44,相似性指数整体较低,其中沙壤灰钙土荒漠草原的相似性指数整体高于砾质灰钙土荒漠草原。

2.4 土壤种子库与土壤理化性质的关系

砾质灰钙土荒漠草原中,RDA排序中前两轴的解释率占总排序轴的76.88%,解释程度较高,可以较好地反

表 4 不同土质荒漠草原土壤种子库与地上植被的相似性

Table 4 Similarity between soil seed bank and aboveground vegetation in desert steppe with different soil types

处理 Treat- ment	地上植被物种数 Species number of aboveground vegetation	种子库物种数 Species num- ber of seed bank	共有物种数 Number of species by both	地上植被优势种 Dominant species of aboveground vegetation	种子库优势种 Seed bank dominant species	相似性 指数 Similarity index
LCK	17	4	3	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.29
LLM	13	4	1	短花针茅 <i>S. breviflora</i>	猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.12
SCK	11	7	4	猪毛菜 <i>S. collina</i> 、冰草 <i>A. cristatum</i>	短花针茅 <i>S. breviflora</i> 、虫实 <i>C. hyssopifolium</i>	0.44
SLM	20	15	6	猪毛菜 <i>S. collina</i>	短花针茅 <i>S. breviflora</i> 、猪毛蒿 <i>A. scoparia</i>	0.34

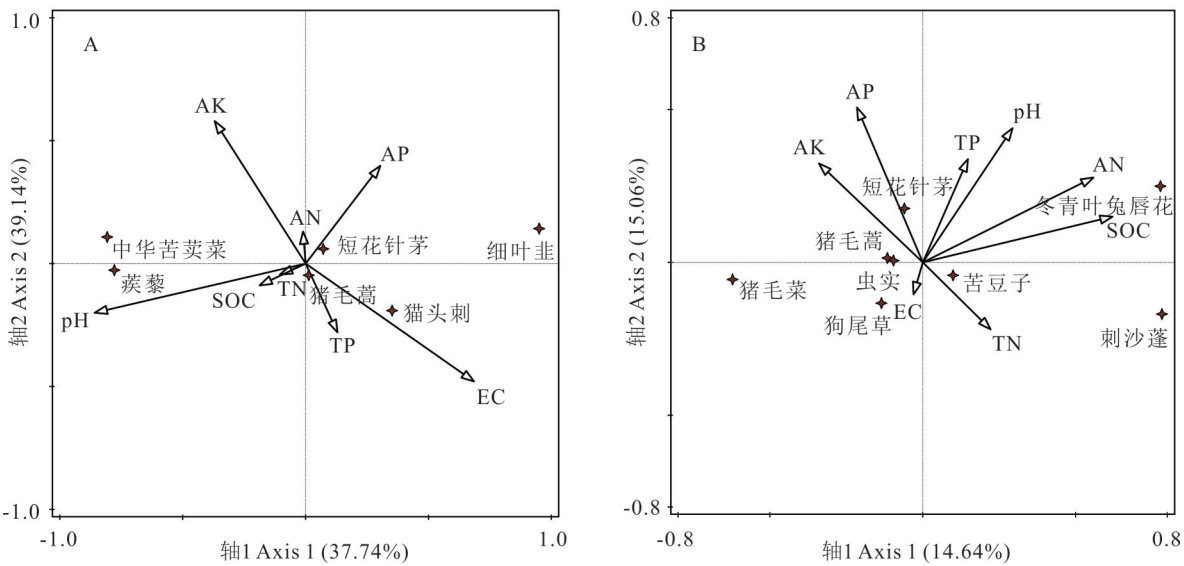


图 3 不同土质荒漠草原土壤种子库组成与土壤理化性质的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis of soil seed bank composition and soil physical and chemical properties in desert steppe with different soil types

A: 砾质灰钙土荒漠草原 Gravelly sierozem desert steppe; B: 沙壤灰钙土荒漠草原 Sandy loam sierozem desert steppe; SOC: 土壤有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; AK: 速效钾 Available potassium; AN: 铵态氮 Ammonium nitrogen; AP: 速效磷 Available phosphorus; EC: 电导率 Electrical conductivity; 中华苦苣菜: *I. chinensis*; 短花针茅: *S. breviflora*; 猪毛蒿: *A. scoparia*; 蒺藜: *T. terrestris*; 猫头刺: *O. aciphylla*; 细叶韭: *A. tenuissimum*; 猪毛菜: *S. collina*; 虫实: *C. hyssopifolium*; 苦豆子: *S. alopecuroides*; 冬青叶兔唇花: *L. ilicifolius*; 刺沙蓬: *S. tragus*; 狗尾草: *S. viridis*. 下同 The same below.

映土壤种子库与土壤环境因子的大部分关系(图3)。速效钾、pH、电导率及速效磷对土壤种子库有较高影响。沙壤灰钙土荒漠草原的RDA排序中前两轴的解釋率为29.70%，远小于砾质灰钙土荒漠草原，解釋程度较低。同时沙壤灰钙土荒漠草原中土壤种子库的物种受到速效钾、速效磷、全磷、铵态氮、pH、土壤有机碳的影响较大。

砾质灰钙土荒漠草原种子库组成中猪毛蒿、细叶韭、短花针茅、中华苦苣菜、蒺藜、猫头刺与电导率、pH呈显著相关关系，猪毛蒿、细叶韭和猫头刺的组成与AK表现出显著正相关关系，而中华苦苣菜和蒺藜的组成则表现为显著负相关(图4)；种子库中所有物种组成与全磷和全氮无显著相关性。沙壤灰钙土荒漠草原种子库组成中只有刺沙蓬的组成与pH显著负相关，其余种子库物种与土壤理化性质未表现出显著相关性。

3 讨论

3.1 轮牧对土壤种子库组成和密度的影响

土壤种子库的来源主要分为七大类，分别为植物自生繁殖与种子的脱落、动物传播、风传播、水流传播、人类

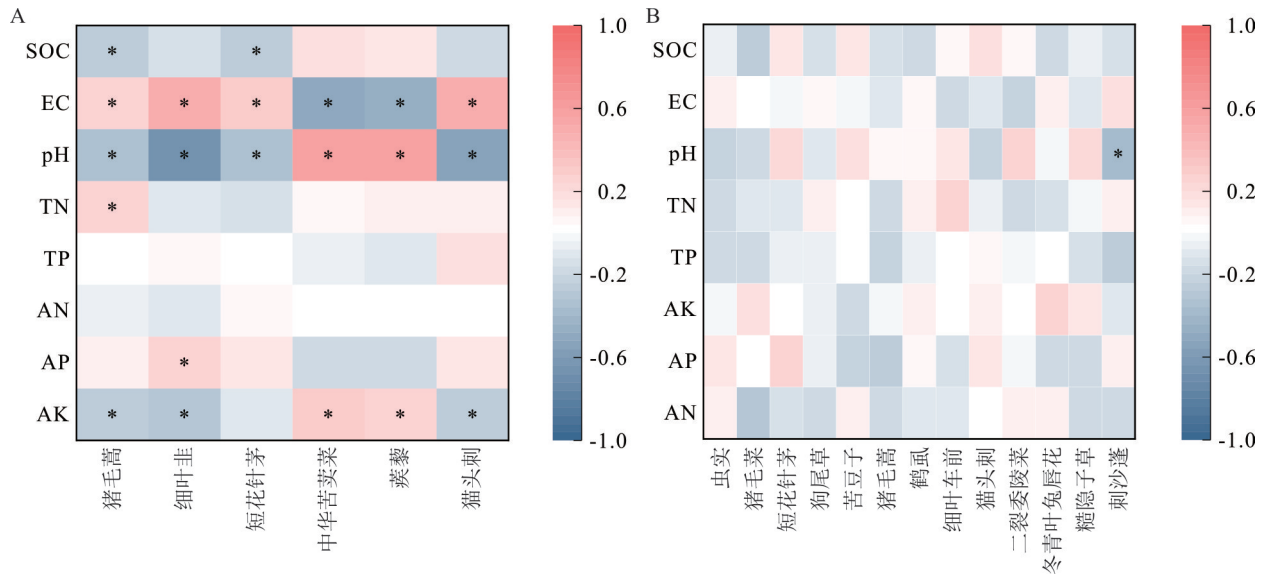


图4 不同土质荒漠草原土壤理化性质与土壤种子库组成的 Pearson 相关性

Fig. 4 Pearson correlation between soil physical-chemical properties and soil seed bank composition in desert steppe with different soil types

*: $P < 0.05$; 鹤虱: *L. myosotis*; 细叶车前: *P. minuta*; 二裂委陵菜: *P. bifurca*; 糙隐子草: *C. squarrosa*.

活动引起的传播以及长期休眠种子的积累^[30]。放牧干扰下,家畜的踩踏、采食等一系列行为活动会对种子的传播、数量以及种子库的组成造成影响^[31-32]。本研究发现,在砾质灰钙土荒漠草原封育下种子库中多年生占比为50%,一年生和半灌木各占25%,而在短期放牧处理下多年生种子库占比为75%。在沙壤灰钙土荒漠草原中多年生种子占比为38%,一年生占比为62%,在短期轮牧处理下,多年生种子库占比为58%,一年生占比为33%,灌木占比为9%。总体来看荒漠草原在短期轮牧的影响下,多年生种子库的占比均有提高而一年生的种子库降低。有研究表明^[33],随着轮牧时间的加长,种子库中一年生种子占比会增加而多年生种子比例会降低。而本研究中,可能因为一年生植物依赖快速生长去适应环境的波动变化,放牧家畜采食地上部分导致种子产量受到抑制^[34],也可能是因为放牧家畜选择性采食导致种子库组成发生变化^[35]。

放牧对土壤种子库密度的影响是一个复杂的生态过程,其中涉及多种直接和间接的作用机制^[11]。在放牧过程中家畜采食时会对植物的地上部分进行啃食从而导致植物无法完成种子的生产,加之放牧行为可能会导致植被的地表覆盖度降低^[36],种子更易受到高温、冷冻或紫外线等伤害,导致产量、密度降低^[37]。同时,植物本身的繁殖时间也会对种子库密度产生影响^[38]。本研究砾质灰钙土荒漠草原和沙壤灰钙土荒漠草原中,虽然封育下种子库密度大小有高于短期轮牧处理的趋势,但差异不显著。沙壤灰钙土荒漠草原短期轮牧的土壤种子库密度大于砾质灰钙土荒漠草原,可能因为沙壤灰钙土荒漠草原土壤以细沙为主,土质较为疏松,从而使进入土壤中的种子数量增加^[39]。而砾质灰钙土荒漠草原土壤颗粒较大^[40],在其土壤种子库中,猪毛蒿种子密度占比较大,作为一年生植物,对于降水的变化极为敏感,且2024年宁夏荒漠草原地区降水增多使得其种子数量大幅度增加。从物候期来看,猪毛蒿结实期为9—10月^[41],其结实器官会在轮牧过程中被家畜直接采食,直接导致其种子库密度锐减。试验区短花针茅结实期在6—7月^[41],其部分种子在轮牧初期已成熟,加之短花针茅在开花结实期间适口性下降导致家畜选择性采食减少,所以种子密度受轮牧干扰的影响较小。沙壤灰钙土荒漠草原中,虫实的结实期在7—9月^[41],覆盖轮牧周期,导致种子密度下降,表明轮牧时间(家畜选择性采食)与植物物候期共同影响着种子库的密度^[13]。从牧草利用率对种子库的影响来看,砾质灰钙土荒漠草原划区轮牧处理的牧草利用率为65.23%(表2),导致LCK下种子库总密度相较于LLM下降程度较大,而沙壤灰钙土荒漠草原划区轮牧处理的牧草利用率为52.10%,其SCK与SLM种子库的总密度差异不显著,这也印证了牧草利用率与种子生产的负反馈关系^[35]。

在草地生态系统中,土壤种子库的垂直分布呈明显的结构性特征^[15]。这种立体分布格局会对种子库的萌发

动态和持久性产生调控作用,从而对未来植被的恢复和重建产生潜在影响^[5]。本研究中,荒漠草原土壤种子库在封育下其密度均呈 $0\sim 5\text{ cm} > 5\sim 10\text{ cm} > 10\sim 15\text{ cm}$,这与部分研究结果一致^[42],尤其集中分布在 $0\sim 5\text{ cm}$ 土层,这与申波等^[43]的研究结果一致。短期轮牧下,土壤种子库垂直分布的总体趋势与封育相似,但两种土壤质地的荒漠草原类型土壤种子库密度在 $10\sim 15\text{ cm}$ 均略高于 $5\sim 10\text{ cm}$ 土层。这可能是因为在家畜的踩踏过程中其蹄部的作用力促使种子发生了二次迁移,使得种子在土壤孔隙网络中有更深层次的渗透^[44]。

3.2 轮牧对荒漠草原土壤种子库物种多样性的影响

群落的物种多样性指数可以反映其生态属性(稳定性与抵抗能力、资源利用效率及生态系统服务功能)^[45-46]。土壤种子库与地上群落存在地上地下耦合关系,地上群落的物种组成会直接通过种子雨影响种子库的输入^[47]。本研究中,砾质灰钙土荒漠草原短期轮牧下种子库 Shannon 指数相较于封育条件下显著提高,这可能是由于短期轮牧抑制了优势群落的生长导致其他物种的优势度增加^[48],而地上植被的 Shannon 指数则表现出相反的趋势,这种地上、地下的不同响应变化一方面可能源于家畜的采食削减了优势种生长从而导致群落结构简化^[49],还可能因为牧草的高利用率导致猪毛蒿的优势受到抑制^[50]。另一方面短期轮牧下家畜的采食和践踏会改变群落的物种组成,影响种子库的输入,同时种子库的萌发会存在滞后性,这也导致部分土壤种子库会因为踩踏作用被埋在深层土壤中未能及时萌发^[51]。值得注意的是,地上植被的 Margalef 指数在轮牧后有下降趋势,同时种子库的 Simpson 指数也表现出下降趋势,这种地上植被变化与地下种子库变化的不同步,也从侧面反映出砾质荒漠草原土壤的低保水率是限制种子库未能及时向地上植被补充的原因^[52]。

在沙壤灰钙土荒漠草原中,短期轮牧对地上植被和土壤种子库呈更加复杂的响应模式。轮牧后地上植被的 Shannon 指数和 Margalef 指数呈显著性增加,同时土壤种子库的 Margalef 指数也表现出增加趋势,这可能是因为家畜的选择性采食抑制了猪毛菜等优势种的生长,改变了糙隐子草等中度喜食种的生态位宽度^[51]。从 Pielou 指数看,种子库在封育和轮牧下未表现出显著性差异,而地上植被的显著性差异明显,这可能是种子库受到生态系统的“记忆效应”和“及时响应”的影响,而地上植被对短期轮牧产生了动态响应变化^[53]。

3.3 土壤种子库与地上植被的相似性

相似性指数是评估生态系统结构和功能的重要参数^[54],研究土壤种子库与地上植被的相似性有助于更好地预测未来植物群落的改变以及生态系统的变化^[55]。已有研究表明,放牧活动下,土壤种子库和地上植被的相似性会呈不同结果:相似性增多^[43]、降低^[56]或无相似性^[57]。本研究中,两种土壤质地的荒漠草原短期轮牧后,种子库与地上植被的相似性指数均表现出封育大于短期轮牧,且沙壤灰钙土荒漠草原的相似性整体高于砾质灰钙土荒漠草原,这可能是因为两处荒漠草原不同土质影响种子的萌发和滞留^[46]。还可能因为放牧干扰、物种物候的差异机制^[50]。沙壤灰钙土荒漠草原中,由于家畜的采食和践踏降低了地上植被优势种比例、促进了其他物种的生长使得其地上植被、种子库及共有物种数都有增长。而砾质灰钙土荒漠草原相似性低的原因可能是其在更加干旱的环境以及放牧的共同作用下,种子库的“保险功能”^[58]被激发,导致其长期无法萌发从而降低相似性。

3.4 土壤种子库与土壤理化性质的关系

在草地生态系统中,土壤种子库受到多种因素的影响,其中土壤环境因子与土壤种子库的变化息息相关^[58]。天然草地的放牧过程中,家畜的采食、践踏以及排泄等行为同样影响着地上地下植被和土壤理化性质,进而对土壤种子库产生影响^[18]。本研究 RDA 分析和 Pearson 相关性分析发现,砾质灰钙土荒漠草原中 AK、pH、EC 和 AP 对种子库的解释率高达 76.3%,这可能因为砾质灰钙土荒漠草原中土壤保水能力弱,淋溶作用强而导致土壤中速效养分成为影响土壤种子库的关键因子之一^[59]。从砾质灰钙土荒漠草原土壤组成来看,其富含丰富的钾,但土壤中较高的 pH 和较低的有机质导致钾离子被固定于黏土与矿物层之间^[60],使得 AK 等速效养分与土壤种子库紧密耦合,而在沙壤灰钙土荒漠草原中,环境因子对土壤种子库解释率仅为 29.7%,远低于砾质灰钙土荒漠草原。这种显著性差异的产生或也源于两类土壤的物理结构、养分固持能力以及植物适应性策略的不同^[61]。相对于砾质灰钙土荒漠草原,沙壤灰钙土荒漠草原的土壤颗粒质地更加细致,孔隙结构更加均质,这种结构有利于水分均匀下渗,并间接削弱了速效养分的空间异质性^[62],故使土壤具有较高的 SOC 含量,其中 TP 和 AN 也在养分释放

过程中起到关键作用,但空间异质性的下降使土壤性状对种子库变化的解释力变小,这与Kushbokov等^[42]提出的“干旱区植物—土壤反馈机制”理论一致,即物种通过差异化资源利用策略适应异质性土壤环境。

由于客观条件限制及当地传统放牧多为高强度自由放牧,因此本研究聚焦于两种土壤质地的荒漠草原禁牧封育与轮牧处理对土壤种子库特征的对比分析,未涉及传统放牧对土壤种子库的影响,这还有待于今后进一步的研究。

4 结论

本研究探讨了短期轮牧对不同土壤质地荒漠草原土壤种子库特征的影响发现,短期轮牧没有显著改变砾质灰钙土荒漠草原和沙壤灰钙土荒漠草原的种子库密度,但改变了土壤种子库的组成,提高了多年生种子比例,种子库垂直分布具有表聚性。短期轮牧对土壤种子库和地上植被产生了差异化调控,在砾质灰钙土荒漠草原中,Shannon指数上升与Simpson指数下降共同揭示了物种分布的均衡化趋势,表明轮牧削弱了优势种的绝对优势;而沙壤灰钙土荒漠草原中,Margalef指数与Simpson指数上升则反映了深层休眠种子的激活与特定物种的竞争优势强化趋势。两类草原种子库的Pielou指数均未发生显著变化,但地上植被的均匀度显著提高,种子库物种与地上植被物种的相似性较低,其中沙壤灰钙土荒漠草原的相似性更高;砾质荒漠草原种子库动态主要受到AK、pH等因子影响,而沙壤荒漠草原土壤主要通过全磷、速效氮调控种子库的物种组成。

参考文献 References:

- [1] Bakker J P, Poschlod P, Strykstra R J, *et al.* Seed banks and seed dispersal: important topics in restoration ecology. *Acta Botanica Neerlandica*, 1996, 45(4): 461–490.
- [2] Zhao P, Peng S L, Zhang J W. Restoration ecology—An effective way to restore biodiversity of degraded ecosystems. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(1): 53–58.
赵平, 彭少麟, 张经纬. 恢复生态学——退化生态系统生物多样性恢复的有效途径. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 53–58.
- [3] Yang Y J, Sun X Y, Wang B P. Forest soil seed bank and natural regeneration. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(2): 304–308.
杨跃军, 孙向阳, 王保平. 森林土壤种子库与天然更新. *应用生态学报*, 2001, 12(2): 304–308.
- [4] Yang Y J, Sun X Y, Wang B P. A preliminary study on the soil seed banks of the dominant vegetation forms on Baohua Mountain. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 1996, 20(1): 41–50.
杨跃军, 孙向阳, 王保平. 宝华山主要植被类型土壤种子库初探. *植物生态学报*, 1996, 20(1): 41–50.
- [5] Li H Y, Mo X Q, Hao C. A review of study on soil seed bank in the past thirty years. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 731–737.
李洪远, 莫训强, 郝翠. 近30年来土壤种子库研究的回顾与展望. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 731–737.
- [6] Shiferaw W, Demissew S, Bekele T. Ecology of soil seed banks: Implications for conservation and restoration of natural vegetation: A review. *International Journal of Biodiversity and Conservation*, 2018, 10(10): 380–393.
- [7] Du Z Y, Wang J, Chen G C. Response of soil seed banks to global change and human activity: current knowledge and advances. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2024, 48(12): 1561–1575.
杜忠毓, 王佳, 陈光才. 土壤种子库特征对全球变化和人类活动的响应: 研究进展与展望. *植物生态学报*, 2024, 48(12): 1561–1575.
- [8] Walck J L, Hidayati S N, Dixon K W, *et al.* Climate change and plant regeneration from seed. *Global Change Biology*, 2011, 17(6): 2145–2161.
- [9] Salimi H, Samavat S. Effect of flaming on wild mustard (*Sinapis arvensis* L.) soil seed bank, soil microorganisms and physicochemical characteristics. *Journal of Agroecology*, 2011, 3(4): 468–475.
- [10] Gregory C J, Konrad P, Dawn F, *et al.* The Western English Channel contains a persistent microbial seed bank. *The ISME Journal*, 2012, 6(6): 1089–1093.
- [11] Van Langevelde F V, Tessema K Z, Boer D F W, *et al.* Soil seed bank dynamics under the influence of grazing as alternative explanation for herbaceous vegetation transitions in semi-arid rangelands. *Ecological Modelling*, 2016, 337: 253–261.
- [12] Lian Z M, Xu W X, Yang W K, *et al.* Effects of livestock grazing on soil seed bank: A review. *Pratacultural Science*, 2014,

- 31(12): 2301—2307.
- 连仲民, 徐文轩, 杨维康, 等. 放牧对草地土壤种子库的影响. 草业科学, 2014, 31(12): 2301—2307.
- [13] Liu J D, Ma H B, Zhou Y, *et al.* Effects of rotation grazing time on the characteristics of soil seed bank in desert steppe. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(7): 2378—2388.
- 刘进娣, 马红彬, 周瑶, 等. 轮牧时间对荒漠草原土壤种子库特性的影响. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2378—2388.
- [14] Zhang J, Chen X J, Hou F J. Effects of livestock excreta on herbage seed dispersal and germination. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10): 2070—2079.
- 张静, 陈先江, 侯扶江. 家畜排泄物对牧草种子传播和萌发的作用. 草业科学, 2017, 34(10): 2070—2079.
- [15] Shen Y, Liu C F, Ma H B, *et al.* Response of a soil seed bank to modes of grassland management on a desert steppe. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(14): 4725—4732.
- 沈艳, 刘彩凤, 马红彬, 等. 荒漠草原土壤种子库对草地管理方式的响应. 生态学报, 2015, 35(14): 4725—4732.
- [16] Couvreur M, Christiaen B, Verheyen K, *et al.* Large herbivores as mobile links between isolated nature reserves through adhesive seed dispersal. *Applied Vegetation Science*, 2004, 7(2): 229—236.
- [17] Lu W H, Wan J J, Yang J J, *et al.* Review of endozoochory of plant seeds by herbivores. *Acta Prataculturae Sinica*, 2013, 22(3): 306—313.
- 鲁为华, 万娟娟, 杨晶晶, 等. 草食动物对植物种子的消化道传播研究进展. 草业学报, 2013, 22(3): 306—313.
- [18] Gao C F, Zhang X P, Li Z L. Grazing: Effects on soil physical and chemical properties and vegetation diversity. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(8): 98—104.
- 高承芳, 张晓佩, 李兆龙. 放牧对土壤理化性状及植被多样性的影响. 中国农学通报, 2020, 36(8): 98—104.
- [19] Zhao L P, Su J S, Wu G L, *et al.* Long-term effects of grazing exclusion on aboveground and belowground plant species diversity in a steppe of the Loess Plateau, China. *Plant Ecology and Evolution*, 2011, 144(3): 313—320.
- [20] Li W L, Liu C L, Wang W Y, *et al.* Effects of different grazing disturbances on the plant diversity and ecological functions of alpine grassland ecosystem on the Qinghai—Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 765070.
- [21] Xie Y Y, Liu Y J, Li W C, *et al.* Fencing vs. grazing: divergent effects on soil seed bank structure and grassland recovery pathways in Northern Tibetan alpine grasslands. *Plants*, 2025, 14(6): 900.
- [22] Duan J C, Zhou H K, Wang S P, *et al.* The advance and prospect of soil seed bank in the alpine grassland. *Pratacultural Science*, 2009, 26(2): 39—46.
- 段吉闯, 周华坤, 汪诗平, 等. 高寒草地土壤种子库研究进展及展望. 草业科学, 2009, 26(2): 39—46.
- [23] Zhou Y, Ma H B, Jia X Y, *et al.* Effects of enclosure and level trench engineering on soil biological characteristics of typical steppe in Loess Hilly Area in Ningxia. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(3): 263—270.
- 周瑶, 马红彬, 贾希洋, 等. 封育和水平沟生态恢复措施对宁夏黄土丘陵区典型草原土壤生物学特性的影响. 水土保持学报, 2017, 31(3): 263—270.
- [24] Zhou J J, Ma H B, Zhou Y, *et al.* Effects of different rotational grazing ways on grazing characteristics, weight and reproductive performance of Tan sheep in desert steppe. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(8): 1525—1534.
- 周静静, 马红彬, 周瑶, 等. 轮牧方式对荒漠草原滩羊牧食特征、体重及繁殖性能的影响. 中国农业科学, 2017, 50(8): 1525—1534.
- [25] Feng W, Wang X J, Xuan L, *et al.* Review of the research methods of forest soil seed bank. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, 36(9): 3657—3659.
- 冯伟, 汪小进, 宣力, 等. 森林土壤种子库研究方法综述. 安徽农业科学, 2008, 36(9): 3657—3659.
- [26] Feng B, Yang X X, Liu Y Z, *et al.* Effects of different livestock classes on species diversity, niches, and interspecific associations in alpine grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2025, 34(8): 1—14.
- 冯斌, 杨晓霞, 刘玉祯, 等. 不同放牧方式对高寒草地物种多样性、生态位与种间联结性的影响. 草业学报, 2025, 34(8): 1—14.
- [27] Bao S D. *Soil agricultural chemical analysis*. Beijing: China Agricultural Press, 2000: 10—29.
- 鲍士旦. 土壤农化分析. 北京: 中国农业出版社, 2000: 10—29.
- [28] Wang Y F, Li G Q, Shi Y, *et al.* Analysis of relationship between soil seed bank and aboveground vegetation in low mountain area of Helan Mountain. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(1): 166—172.
- 王雅芳, 李国旗, 石云, 等. 贺兰山低山区土壤种子库与地上植被关系分析. 草地学报, 2023, 31(1): 166—172.
- [29] Peet R K. The measurement of species diversity. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1974, 5(1): 285—307.

- [30] Baskin C C, Baskin J M. Seeds: ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination. New York: Academic Press, 2000.
- [31] Hu A, Chen H, Chen X J, *et al.* Soil seed banks of cropland and rangeland on the Loess Plateau. *Pratacultural Science*, 2015, 32(7): 1035–1040.
胡安, 陈皓, 陈先江, 等. 黄土高原农田与草原土壤种子库. *草业科学*, 2015, 32(7): 1035–1040.
- [32] Du Z Y, Cai Y J, Wang X D, *et al.* Research progress on yak grazing behavior and its influence on the soil properties of alpine grassland. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2019, 28(7): 186–197.
杜子银, 蔡延江, 王小丹, 等. 放牧牦牛行为及其对高寒草地土壤特性的影响研究进展. *草业学报*, 2019, 28(7): 186–197.
- [33] Li S Y, Zhang B, Li Y N, *et al.* Long-term grazing exacerbates soil microbial carbon and phosphorus limitations in the desert steppe of Inner Mongolia—a study based on enzyme kinetics. *Applied Soil Ecology*, 2024, 194: 105192.
- [34] McNaughton S J. Compensatory plant growth as a response to herbivory. *Oikos*, 1983, 40(3): 329–336.
- [35] Kemp D R, Han G D, Hou X Y, *et al.* Innovative grassland management systems for environmental and livelihood benefits. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(21): 8369–8374.
- [36] Ni F F, Lv S J, Qu Z Q, *et al.* Effects of vegetation characteristics of desert steppe in the non-growing season on near-surface dust flux under different stocking rates. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2022, 31(3): 26–33.
倪芳芳, 吕世杰, 屈志强, 等. 不同载畜率下荒漠草原非生长季植物群落特征对近地面风沙通量的影响. *草业学报*, 2022, 31(3): 26–33.
- [37] Ma M J, Walck J I, Ma Z, *et al.* Grazing disturbance increases transient but decreases persistent soil seed bank. *Ecological Applications*, 2018, 28(4): 1020–1031.
- [38] Gomaa H N. Reproductive traits, flowering phenology and seed bank dynamics in *Retama raetam* (Fabaceae) in a hyper-arid environment. *Arid Land Research and Management*, 2019, 33(1): 70–90.
- [39] Xie L N, Li Y C, Guo H Y, *et al.* Sandy habitats play an important role in shrub encroachment in grasslands. *Agronomy*, 2022, 12(11): 2858.
- [40] Eichberg C, Donath W T. Sheep trampling on surface-lying seeds improves seedling recruitment in open sand ecosystems. *Restoration Ecology*, 2018, 26(S2): S211–S219.
- [41] Ma D Z. Flora of Ningxia. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2007.
马德滋. 宁夏植物志. 银川: 宁夏人民出版社, 2007.
- [42] Kushbokov A, Deák B, Valkó O. Characteristics of soil seed bank in global drylands—A review. *Arid Land Research and Management*, 2025, 39(3): 289–310.
- [43] Shen B, Ma Q Q, Cheng Y X, *et al.* Effect of grazing systems on soil seedbank: A case study of an alpine meadow in the eastern Qinghai—Tibet Plateau. *Pratacultural Science*, 2018, 35(4): 791–799.
申波, 马青青, 程云湘, 等. 不同放牧制度对土壤种子库的影响——以青藏高原东缘高寒草甸为例. *草业科学*, 2018, 35(4): 791–799.
- [44] He Y H, Liu X P. Grazing effects on seedling emergence in contrasting wet and dry year in a semiarid grassland. *Agronomy*, 2022, 12(9): 2131.
- [45] Lucie M, Philippe C, Pierre D, *et al.* Trade-offs and synergies between ecosystem productivity and stability in temperate grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 2023, 32(4): 561–572.
- [46] Zhao P P, Li G Q, Shao W S, *et al.* Influence of herbivore exclusion on the soil seed bank and the aboveground vegetation characteristics of *Agropyron mongolicum* dominant desert steppe grassland. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2018, 27(1): 42–52.
赵盼盼, 李国旗, 邵文山, 等. 围封对荒漠草原区沙芦苇群落土壤种子库及地上植被的影响. *草业学报*, 2018, 27(1): 42–52.
- [47] Kalamees R, Püssa K, Zobel K, *et al.* Restoration potential of the persistent soil seed bank in successional calcareous (alvar) grasslands in Estonia. *Applied Vegetation Science*, 2012, 15(2): 208–218.
- [48] Li W, Su T T, Shen Y, *et al.* Effects of warming seasonal rotational grazing on plant communities' structure and diversity in desert steppe. *Ecology and Evolution*, 2023, 13(1): e9748.
- [49] Li Y Z, Fan J W, Zhang L X, *et al.* The impact of different land use and management on community composition, species diversity and productivity in a typical temperate grassland. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2013, 22(1): 1–9.
李愈哲, 樊江文, 张良侠, 等. 不同土地利用方式对典型温性草原群落物种组成和多样性以及生产力的影响. *草业学报*,

- 2013, 22(1): 1–9.
- [50] Yan R R, Yu T Q, Liu H M, *et al.* Effects of different grassland utilization methods on the germinable soil seed bank of the Hulunbuir meadow steppe. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1230725.
- [51] Pykälä J. Cattle grazing increases plant species richness of most species trait groups in mesic semi-natural grasslands. *Plant Ecology*, 2004, 175(2): 217–226.
- [52] Zeinivand R, Ajourlo M, Ariapour A. Plant species diversity response to animal grazing intensity in semi-steppe rangelands. *Journal of Rangeland Science*, 2018, 8(4): 383–393.
- [53] DeMalach N, Kigel J, Sternberg M. The soil seed bank can buffer long-term compositional changes in annual plant communities. *Journal of Ecology*, 2020, 109(3): 1275–1283.
- [54] Shen Z J, Ou Z L, Tian S N, *et al.* Characters of soil seed bank in copper tailings and its adjacent habitat. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(7): 2121–2130.
沈章军, 欧祖兰, 田胜尼, 等. 铜尾矿废弃地与相邻生境土壤种子库特征的比较. *生态学报*, 2013, 33(7): 2121–2130.
- [55] Beatrijs B, Butaye J, Honnay O. Seed bank composition of open and overgrown calcareous grassland soils—a case study from Southern Belgium. *Journal of Environmental Management*, 2006, 79(4): 364–371.
- [56] Agra H, Ne’eman G. Composition and diversity of herbaceous patches in woody vegetation: The effects of grazing, soil seed bank, patch spatial properties and scale. *Flora*, 2012, 207(4): 310–317.
- [57] Zhao L Y, Li F R, Zhang H, *et al.* Characteristics of the soil seed bank at the fenced sandy meadow in Horqin sandy land. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(2): 45–49.
赵丽娅, 李锋瑞, 张华, 等. 科尔沁沙地围封沙质草甸土壤种子库特征的研究. *生态学杂志*, 2004, 23(2): 45–49.
- [58] Wang X F, Ma H B, Shen Y, *et al.* Effects of different rotational grazing patterns on plant community characteristics in desert steppe grassland. *Acta Prataculturae Sinica*, 2019, 28(4): 23–33.
王晓芳, 马红彬, 沈艳, 等. 不同轮牧方式对荒漠草原植物群落特征的影响. *草业学报*, 2019, 28(4): 23–33.
- [59] Zhang Z G, Jiao J Y, Jia Y F, *et al.* Interpretation proportion analysis of different environmental factors on vegetation variations in the Hilly-gully area of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation*, 2010, 8(2): 59–67.
张振国, 焦菊英, 贾燕锋, 等. 黄土丘陵沟壑区不同立地环境因子对植被变化的解释比例分析. *中国水土保持科学*, 2010, 8(2): 59–67.
- [60] Du W, Wang S F, Yang Y Z, *et al.* Carbonate weakens the interactions between potassium and calcareous soil. *RSC Advances*, 2024, 14(48): 35275–35285.
- [61] Plue J, Calster H V, Auestad I, *et al.* Buffering effects of soil seed banks on plant community composition in response to land use and climate. *Global Ecology and Biogeography*, 2021, 30(1): 128–139.
- [62] Neupane J, Guo W X. Agronomic basis and strategies for precision water management: A review. *Agronomy*, 2019, 9(2): 87.