



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2405746

引用格式:毕晓婷,杨浚恒,崔海军,等.纳帕海湖滨沼泽化草甸表层土壤种子库特征对短期围封禁牧的响应[J].科学技术与工程,2025,25(13):5359-5368.

Bi Xiaoting, Yang Junheng, Cui Haijun, et al. Response of surface soil seed bank characteristics to short-term grazing exclusion in swamp meadows of Napahai Lake[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(13): 5359-5368.

生物科学

纳帕海湖滨沼泽化草甸表层土壤种子库特征 对短期围封禁牧的响应

毕晓婷^{1,2,3,4}, 杨浚恒^{1,2,3,4}, 崔海军^{1,2,3,4*}, 宋维峰^{1,2,3,4}, 赵旭燕⁵, 石珣珣^{1,2,3,4},
张璞韬^{1,2,3,4}, 元素瑶^{1,2,3,4}, 李云华^{1,2,3,4}

(1. 西南林业大学云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室, 昆明 650224;

2. 西南林业大学云南滇池湿地生态系统国家定位观测研究站, 昆明 650224;

3. 西南林业大学滇池湖泊生态系统云南省野外科学观测研究站, 昆明 650224;

4. 西南林业大学生态与环境学院(湿地学院)国家高原湿地研究中心, 昆明 650224; 5. 纳帕海省级自然保护区管护局, 香格里拉 674499)

摘要 土壤种子库是植被恢复及更新演替的种源基础,对于维持生物多样性和生态平衡具有重要作用。聚焦于滇西北高原湿地纳帕海湖滨沼泽化草甸,探讨短期围封禁牧对土壤种子库的影响。通过野外采样和种子萌发鉴定,比较了放牧和短期围封禁牧(3年)对表层土壤种子库物种组成、多样性及功能类群结构的影响。研究发现,短期围封禁牧显著改变了土壤种子库的多样性,降低了土壤种子库 Shannon-Wiener 和 Pielou 指数($P < 0.05$),同时显著增加了莎草种子密度($P < 0.05$);杂类草种子数、物种数在禁牧与放牧条件下占据绝对优势,而禾草、莎草次之,豆科最小(几乎为零)。围封禁牧导致杂类草物种数百分比下降,莎草物种数百分比上升,禾草和豆科物种数百分比无明显变化。此外,土壤种子库中杂类草重要值与禾草类、莎草类重要值呈显著负相关($P < 0.05$),而禾草类密度与莎草类密度呈显著正相关($P < 0.05$)。这些结果表明,短期围封禁牧后,沼泽化草甸土壤种子库的多样性有所降低,但莎草类群种子得到了一定程度的补充和恢复,为湿地生态系统的恢复管理提供了新的见解。

关键词 沼泽化草甸; 土壤种子库; 多样性; 功能群; 种子密度

中图分类号 Q148; 文献标志码 A

Response of Surface Soil Seed Bank Characteristics to Short-term Grazing Exclusion in Swamp Meadows of Napahai Lake

BI Xiao-ting^{1,2,3,4}, YANG Jun-heng^{1,2,3,4}, CUI Hai-jun^{1,2,3,4*}, SONG Wei-feng^{1,2,3,4},
ZHAO Xu-yan⁵, SHI Xun-xun^{1,2,3,4}, ZHANG Pu-tao^{1,2,3,4}, YUAN Su-yao^{1,2,3,4}, LI Yun-hua^{1,2,3,4}

(1. Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2. National Wetland Ecosystem Fixed Research Station of Yunnan Dianchi, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

3. Dianchi Lake Ecosystem Observation and Research Station of Yunnan Province, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

4. National Plateau Wetlands Research Center, College of Ecology and Environment (College of Wetlands), Southwest Forestry University,

Kunming 650224, China; 5. Napahai Provincial Nature Reserve Management and Protection Bureau, Shangri-La 674499, China)

[Abstract] Soil seed banks serve as the foundation for plant restoration and succession, playing a crucial role in sustaining biodiversity and ecological balance. The effect of short-term enclosure and grazing ban on soil seed bank was studied in the marsh meadow of Napahai Lake in northwest Yunnan Plateau. Through field sampling and seed germination identification, the effects of grazing and short-term confinement (3 years) on species composition, diversity and functional group structure of topsoil seed bank were compared.

收稿日期: 2024-07-31 修订日期: 2025-02-08

基金项目: 国家自然科学基金(32160272); 云南省重点研发计划(202203AC100002-03); 云南省“兴滇英才支持计划”青年人才项目(XDYC-QNRC-2023-0212)

第一作者: 毕晓婷(1998—), 女, 汉族, 云南昆明人, 硕士研究生。研究方向: 高原湿地植被恢复。E-mail: arrebol98@126.com。

* 通信作者: 崔海军(1985—), 男, 汉族, 河北沧州人, 博士, 副教授。研究方向: 高原湿地生态系统结构与功能和高原湿地保育、恢复与重建。E-mail: haijun_cui@swfu.edu.cn。

The findings show that short-term grazing exclusion significantly alters the diversity of the soil seed bank, reducing the Shannon-Wiener and Pielou indices ($P < 0.05$) and increasing the density of sedge seeds ($P < 0.05$). Weeds dominate in both enclosed and grazed conditions, with grasses and sedges following, and legumes being minimal. The percentage of weed species decreases, while that of sedge species increases under grazing exclusion, with no significant change observed in grasses and legumes. Weed importance values are significantly negatively correlated with grass and sedge importance values ($P < 0.05$), and grass density is significantly positively correlated with sedge density ($P < 0.05$). These results indicate that while short-term grazing exclusion reduces the diversity of the soil seed bank in swamp meadows, it also enhances the replenishment and recovery of sedge seeds, offering new insights for the restoration management of wetland ecosystems.

[**Keywords**] swamp meadow; soil seed bank; diversity; functional group; seed density

土壤种子库是指在土壤中储存并且具有在环境条件适合时进行萌发的种子^[1]。湿地土壤种子库为植物群落的更新和生态恢复提供了基础^[2-3],影响着区域湿地环境的群落演替^[2],同时发挥着维持生物多样性、调节湿地水文等的作用^[4-5]。干扰会影响土壤种子库的物种多样性、种子密度以及种子的萌发潜力^[6],可能会导致土壤中某些植物种子的消失。过度放牧降低了草地土壤种子库密度以及改变土壤种子库的物种组成^[7],造成植物群落稳定性下降,导致草地受损^[8]。

湿地在水文调节、生物地球化学循环和生态服务方面发挥着重要作用^[9],对维持和改善环境条件具有显著影响^[10]。由于纳帕海湿地不仅是黑颈鹤等越冬珍稀水禽的重要栖息地,也是该地区藏族同胞畜牧业发展的优良牧场。近年来过度放牧使草甸发生了不同程度的退化,生态及经济承载力大幅削弱,引起湿地植物群落结构和多样性的改变,对草甸的保护与恢复迫在眉睫。围封作为一种投资少、效果显著的用于退化草甸恢复与重建的手段,主要是消除了牲畜的影响而使退化草甸进行自然恢复^[11]。围封区的设立,预期能够减少湿地受到的干扰,促进植被恢复,改善生态环境,丰富的物种多样性能够增强湿地水源的涵养能力^[12],从而增强湿地的自我修复能力和生物多样性。

围封对土壤种子库的影响主要体现在土壤种子库密度和土壤种子库群落多样性,这种影响具有差异性。对科尔沁沙质草地的研究发现围封可以提高土壤种子库的种子密度、物种多样性^[13]。而马妙君等^[14]对青藏高原东部封育和退化的草甸土壤种子库研究后发现,封育样地的土壤种子库密度显著低于退化样地,但是封育样地土壤种子库的物种多样性却显著高于退化样地。另外,研究地区、围封年限等因素的不同也会导致土壤种子库特征对围封的响应有所差别。长年封育导致草甸群落多样性降低^[15],也会造成土壤种子库物种组成结构发生变化。目前对围封禁牧条件下纳帕海湿地沼泽化草甸土壤种子库的研究较少,对围封禁牧的效果研究和评价多集中于地上植物群落物种组成、结构

及土壤理化性质的变化,这造成生态恢复过程研究及效果评价缺乏完整性和综合性。研究湿地受损草甸经过围封禁牧的管理措施后,草甸恢复进程中土壤种子库的变化对理解湿地植被的恢复、演替及在干扰条件下的稳定性机制具有重要意义。

因此现选择纳帕海放牧与围栏禁牧(3年)条件下的典型沼泽化草甸优势植物群落土壤种子库为研究对象,比较两种处理条件下土壤表层(0~10 cm)种子库物种组成、种子库密度、多样性、功能类群组成之间的差异,探讨土壤种子库特征对短期围封禁牧的响应。以期对于纳帕海沼泽化草甸地下生态学恢复过程的深入了解有所贡献,对于沼泽化草甸科学保护、恢复及管理提供重要的现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

纳帕海地处青藏高原东南部,具有显著的高原特征,即太阳辐射强烈,年日照时数平均达到2 180 h,气温年较差较小,但日较差显著。因冬夏季节分别受西风带南支西风急流和西南季风为主的交替控制,具有干湿季分明的显著特点,多年平均降雨量约为 6.586×10^3 mm。降水主要集中在一年中的6—10月,占全年80%左右;11—次年5月为干季,干季降水占全年20%左右。研究区优势群落为木里苔草(*Carex muliensis*)群落,主要物种有发草(*Deschampsia cespitosa*)、长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)、云雾苔草(*Carex nubigena*)、疏花车前(*Plantago asiatica* subsp. *Erosa*)、两栖蓼(*Polygonum amphibium*)。

1.2 样地设置与取样

野外选择沼泽化草甸的优势群落展开研究,两个处理,分别为放牧与围封禁牧(3年),围封与放牧沼泽化草甸各设置3个20 m × 30 m大样地(site),每个大样地中随机选择设置7个1 m × 1 m的小样方(plot)进行取样,每个1 m × 1 m的小样方用内直径7 cm取土器分别取两个0~10 cm土柱,同一小样方两个土柱组成一个样本,则每个处理共有21个样本。

1.3 土壤种子库萌发试验

放牧与围封禁牧沼泽化草甸所取土壤样品运回实验室进行风干, 然后进行破碎过粗筛, 去除土壤中的植物根系残体与小石块等杂物, 亦可确保土壤均匀。每个样本的土壤均匀散布在铺满相同厚度的泥炭土的育苗盘上, 每天进行浇水, 保持各样本土壤湿润, 进行连续萌发实验。待各个样本的育苗盘中萌发的幼苗可鉴定到物种类别(5~8 cm), 记录物种及萌发幼苗数量, 并进行拔除, 以免对后续种子萌发产生不利影响。无法鉴定到种的幼苗先命名为未知种 X(1、2、3、…), 进行移栽若干株, 然后进行记名、计数拔除, 待幼苗长大后可鉴定物种名称时进行正式命名。萌发实验大约持续 6 个月, 从 2022 年 11 月一直持续到 2023 年 5 月, 直到两周没有新幼苗在萌发出来为止。萌发实验在温室大棚中进行, 可避免其他繁殖体(种子等)传入。其中泥炭土可能会含有种子, 使用前均进行了高温灭杀(80 °C)处理, 可灭杀种子。这样就获得了每个样本土壤种子库物种信息, 包括物种及各物种的种子数。把土壤种子库萌发物种分为 4 个功能群, 4 个功能群包括莎草(Cyperaceae)、禾草(Poaceae)、豆科(Leguminosae)、杂草(Forbs)。最后结束实验后, 如表 1 所示, 计算土壤种子库物种重要值、群落多样性指数、功能群重要值及密度(即每 1 m²种子的数量)等指标。

1.4 统计分析

基于土壤种子库组成物种的重要值数据进行主成分分析, 探索两处理间土壤种子库组成差异。基于布雷柯蒂斯距离(Bray-Curtis distance) 通过 Adonis 置换检验进行放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库组成差异显著性分析。采用配对样本 *t* 检验法分析比较土壤种子库植物群落 α 多样性指数、功能类群重要值及密度在放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库差异显著性, 后检验采用最小显著性差异(least significant difference, LSD)。采用 Pearson 相关分析方法分析土壤种子库植物群落特征指标(功能类群重要值、密度及群落 α 多样性指数)之

间的相关性。其中, α 多样性指数计算及 PCA、Adonis 均利用 R 语言 4.2.2 软件中程序包“vegan”进行; LSD 事后检验在 R 语言中程序包“agricolae”进行; Pearson 相关分析在 R 语言中程序包“corrplot”进行, 其他所有制图均在 R 语言中程序包“ggplot2”中完成。

2 结果与分析

2.1 放牧与围封禁牧下沼泽化草甸土壤种子库物种组成比较

如表 2 所示, 经萌发实验, 放牧沼泽化草甸的土壤种子库中出现植物 14 种, 禁牧沼泽化草甸的土壤种子库中出现 18 种植物, 其中白车轴草 *Trifolium repens*、蕨麻 *Argentina anserina*、北水苦苣 *Veronica anagallis-aquatica*、泽泻 *Alisma plantago-aquatica*、木里苔草、总状绿绒蒿 *Meconopsis racemosa*、漆姑草 *Sagina japonica* 7 个物种只在禁牧条件下萌发, 表明围封禁牧在一定程度上增加了沼泽化草甸表层土壤种子库的物种种类。

如图 1 所示, 主成分分析表明, 放牧与禁牧对沼泽化草甸土壤种子库物种组成的解释率为 62.46%, 主成分 1 和主成分 2 的方差解释率分别为 47.53% 和 14.93%, 并且通过欧式距离检验发现两种处理的沼泽化草甸土壤种子库的物种组成具有显著差异($R^2 = 0.34, P = 0.001$)。如表 2 所示, 鼠曲草 *Pseudognaphalium affine*、水毛茛 *Batrachium bungei*、沼生蔊菜 *Rorippa palustris* 在主成分 1 上有较高载荷, 说明这些物种是导致禁牧与放牧条件下沼泽化草甸中土壤种子库物种组成出现显著差异的主要原因。

2.2 放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库多样性比较

如图 2 所示, 沼泽化草甸在不同处理条件下土壤种子库的 Richness 丰富度指数和 Simpson 优势度指数差异不显著, 但 Simpson 优势度指数在禁牧土壤种子库中最低; Shannon-Wiener 指数、Pielou 均匀度指数均在放牧土壤种子库中最高, 且显著高于禁牧($P < 0.05$)。

表 1 植物群落多样性指数计算方法

Table 1 Calculation methods for plant community diversity indices

植物多样性指数	表达意义	计算公式	参数说明
Richness 丰富度指数(<i>R</i>)	群落中物种多寡的参数	$R = S$	<i>S</i> 为萌发土壤样本中物种总数量; <i>N</i> 为萌发土壤样本中所有物种的个体数总和; P_i 为第 <i>i</i> 个物种在萌发土壤样本中的重要值, 即物种 <i>i</i> 的重要值为物种 <i>i</i> 的株数占萌发土壤样本物种总株数的比例
Shannon-Wiener 指数(<i>H</i>)	群落组成物种多样性和异质性的度量, 综合反映群落物种丰富度和均匀度	$H = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$	
Simpson 优势度指数(<i>D</i>)	侧重于群落中多度最大的种, 对物种丰富度不太敏感, 群落组成越均匀, 它的值越大	$D = 1 - \sum_{i=1}^S P_i^2$	
Pielou 均匀度指数(<i>J</i>)	反映群落中物种个体数分布的均匀程度	$J = H/\ln S$	

表2 放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库物种信息及物种的因子得分
Table 2 Species composition in the soil seed bank of swamp meadows and their factor scores under grazing and enclosure exclusion management

物种名	拉丁名缩写	科	属	功能群	主成分1	主成分2	IS10 样地	OS10 样地
早熟禾 <i>Poa annua</i>	<i>P. ann</i>	禾本科	早熟禾属	禾本科	0.247 266	-0.727 2	+	+
水毛茛 <i>Batrachium bungei</i>	<i>B. bun</i>	毛茛科	水毛茛属	杂草	0.632 433	0.132 123	+	+
沼生薹菜 <i>Rorippa palustris</i>	<i>R. pal</i>	十字花科	薹菜属	杂草	0.608 363	0.521 831	+	+
匍枝毛茛 <i>Ranunculus repens</i>	<i>R. rep</i>	毛茛科	毛茛属	杂草	0.150 672	0.087 283	+	+
鼠曲草 <i>Pseudognaphalium affine</i>	<i>P. aff</i>	菊科	鼠麴草属	杂草	-0.936 09	0.513 019	+	+
白车轴草 <i>Trifolium repens</i>	<i>T. rep</i>	豆科	车轴草属	豆科	-0.012 5	-0.021 33	+	-
疏花车前 <i>Plantago asiatica</i> subsp. <i>erosa</i>	<i>P. asi</i>	车前科	车前属	杂草	0.005 354	0.119 948	+	+
蕨麻 <i>Argentina anserina</i>	<i>A. ans</i>	蔷薇科	蕨麻属	杂草	-0.331 22	-0.157 19	+	-
北水苦苣 <i>Veronica anagallis-aquatica</i>	<i>V. ana</i>	玄参科	婆婆纳属	杂草	-0.050 16	-0.069 00	+	-
细莞 <i>Isolepis setacea</i>	<i>I. set</i>	莎草科	蕨草属	莎草科	-0.224 63	-0.272 11	+	+
簇生泉卷耳 <i>Cerastium fontanum</i> subsp. <i>vulgare</i>	<i>C. fon</i>	石竹科	卷耳属	杂草	0.361 667	-0.055 29	+	+
华扁穗草 <i>Blysmus sinocompressus</i>	<i>B. sin</i>	莎草科	扁穗草属	莎草科	-0.364 81	-0.253 1	+	+
水马齿 <i>Callitriche palustris</i>	<i>C. pal</i>	水马齿科	水马齿属	杂草	0.023 63	0.027 919	+	+
泽泻 <i>Alisma plantago-aquatica</i>	<i>A. pla</i>	泽泻科	泽泻属	杂草	-0.008 3	-0.071 45	+	-
通泉草 <i>Mazus pumilus</i>	<i>M. pum</i>	玄参科	通泉草属	杂草	0.065 113	0.043 215	+	+
刘氏荸荠 <i>Eleocharis liouana</i>	<i>E. lio</i>	莎草科	荸荠属	莎草科	0.024 732	-0.016 68	-	+
木里苔草 <i>Carex muliensis</i>	<i>C. mul</i>	莎草科	薹草属	莎草科	-0.034 81	-0.088 64	+	-
石龙芮 <i>Ranunculus sceleratus</i>	<i>R. sce</i>	毛茛科	毛茛属	杂草	0.405 191	0.120 242	-	+
总状绿绒蒿 <i>Meconopsis racemosa</i>	<i>M. rac</i>	罂粟科	绿绒蒿亚属	杂草	-0.008 22	0.001 606	+	-
曲升毛茛 <i>Ranunculus nephelogenes</i> var. <i>geniculatus</i>	<i>R. nep</i>	毛茛科	毛茛属	杂草	0.024 325	0.023 735	-	+
漆姑草 <i>Sagina japonica</i>	<i>S. jap</i>	石竹科	漆姑草属	杂草	-0.038 84	0.001 176	+	-

注: I代表围栏内(In fence); O代表围栏外(Out fence); S代表沼泽化草甸; 10代表0~10 cm土壤; +代表出现; -代表未出现。

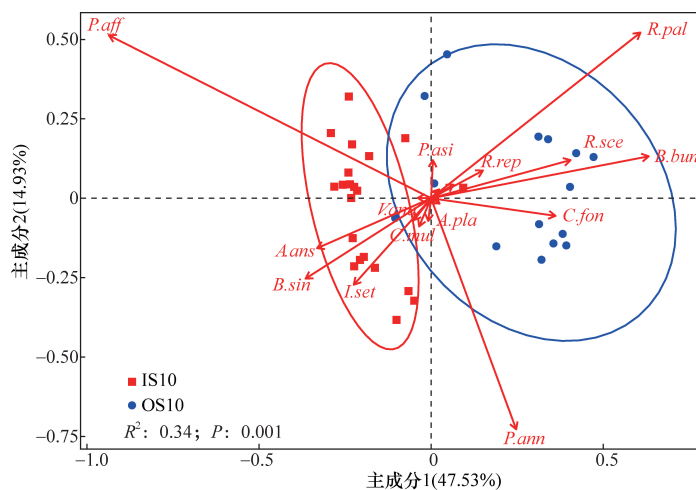


图1 基于物种重要值的放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库组成的主成分分析

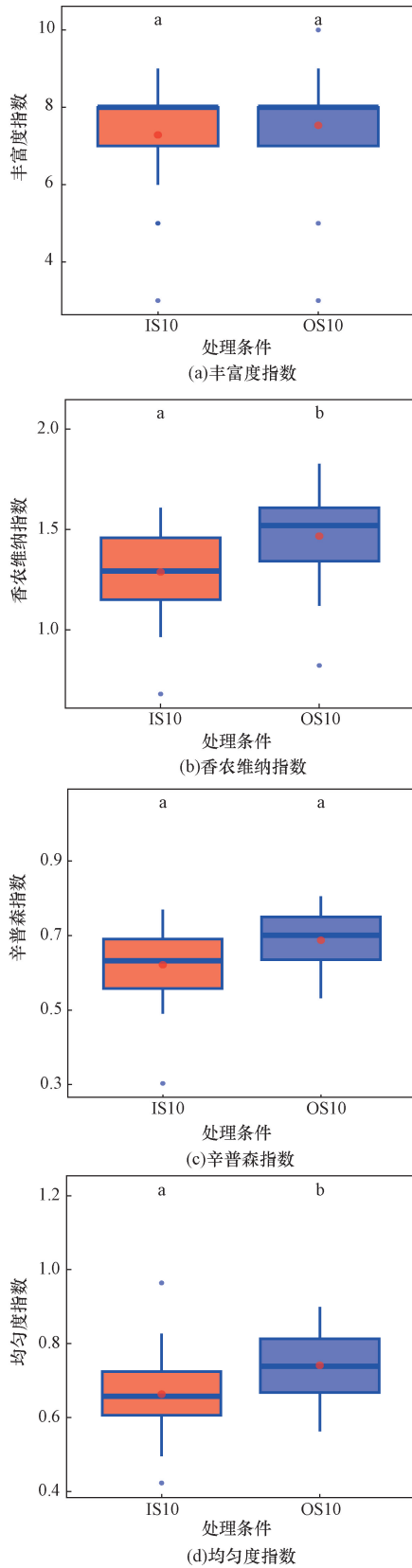
Fig. 1 Principal component analysis of soil seed bank composition in swamp meadows under grazing and enclosure exclusion based on species importance values

2.3 放牧与禁牧沼泽化草甸土壤种子库功能结构的比较

如图3所示,土壤种子库中各植物功能群重要值因处理方式不同而表现出差异,禁牧显著提高了莎草植物的重要值($P < 0.05$);放牧与禁牧对禾草、杂草和豆科重要值的影响无显著差异($P > 0.05$)。

如图4所示,从土壤种子库功能群密度来看,禁牧莎草种子密度显著高于放牧($P < 0.05$);禾草、豆科和杂类草种子密度差异不显著($P > 0.05$),但禁牧条件下土壤种子库中杂类草的种子密度高于放牧条件。

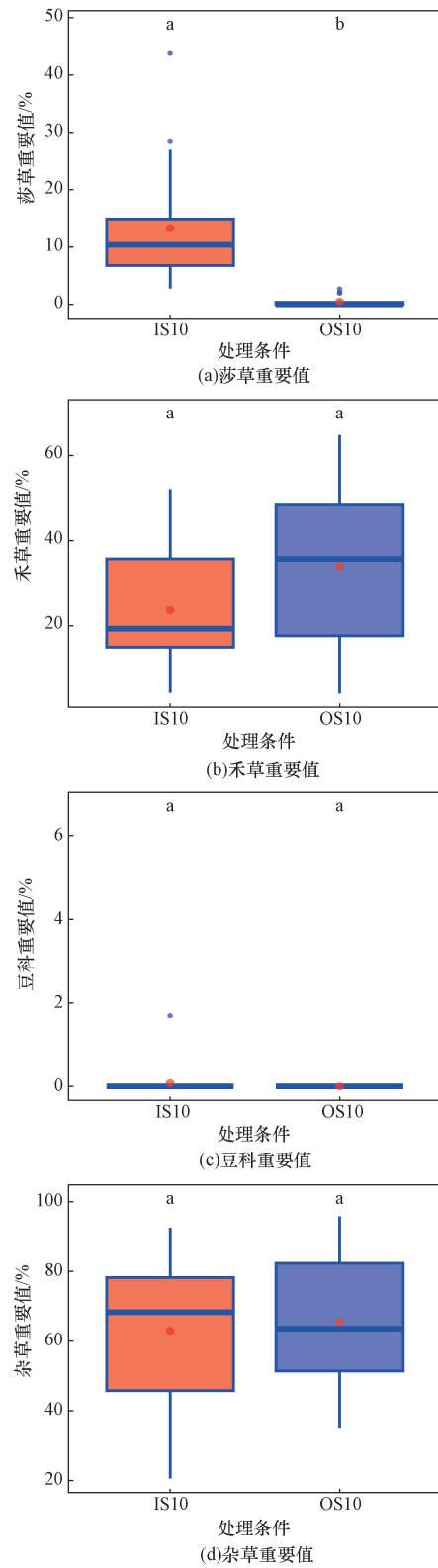
如图5所示,杂类草种子数、物种数在禁牧与放



标注不同小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

图2 放牧(OS10)与围封禁牧(IS10)沼泽化草甸土壤种子库物种组成的多样性指数比较

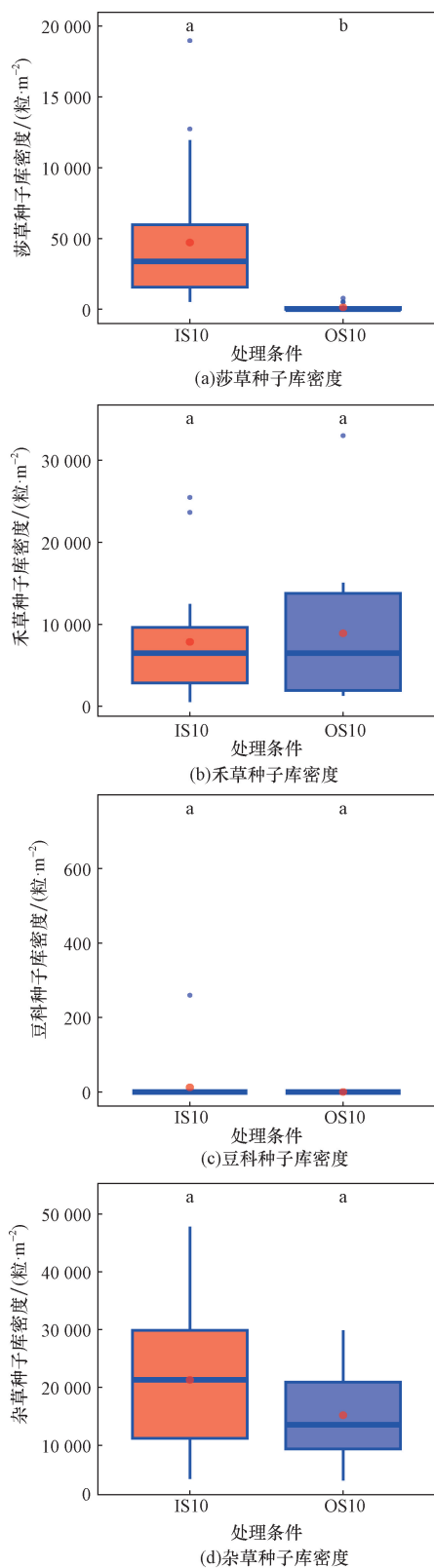
Fig. 2 Comparison of species diversity indices of soil seed bank between grazing (OS10) and enclosed (IS10) swamp meadow



标注不同小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

图3 放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库功能群组成(重要值)比较

Fig. 3 Comparative analysis of functional group composition in soil seed banks of swamp meadows under grazing (OS10) and enclosure exclusion (IS10) management, based on species importance values



标注不同小写字母表示不同样地间差异显著 ($P < 0.05$)

图4 放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库功能群种子密度比较

Fig. 4 Comparison of functional group seed density in soil seed banks of swamp meadows under grazing and enclosure exclusion management

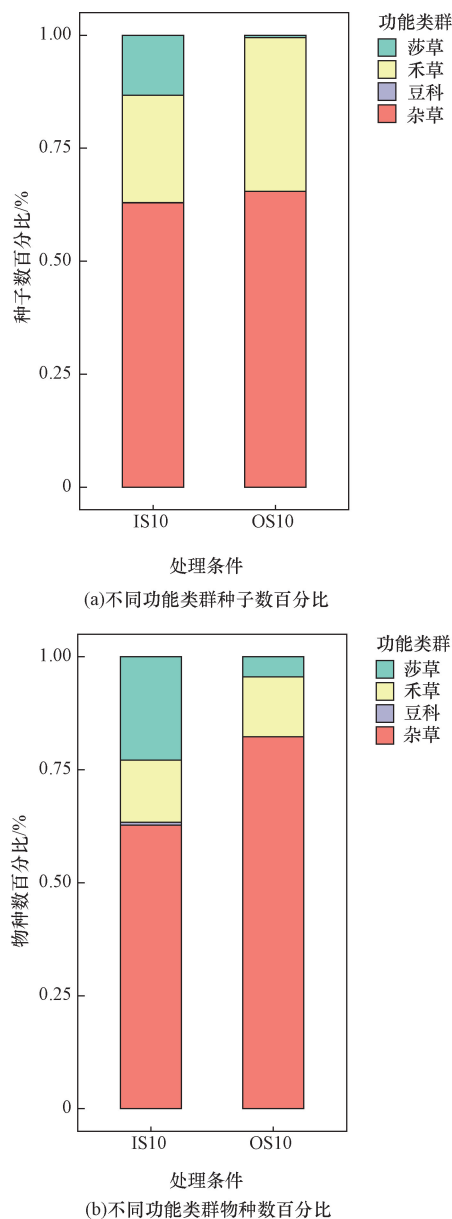


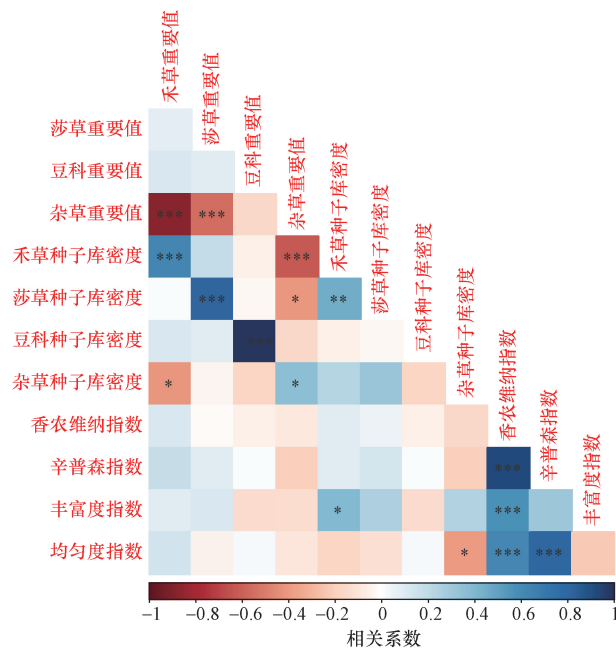
图5 放牧与围封禁牧沼泽化草甸土壤种子库功能群种子数量百分比和物种数百分比比较

Fig. 5 Comparison of functional group seed abundance and species richness in soil seed banks of swamp meadows under grazing and enclosure exclusion management

牧条件下占比均最大,在植物群落中处于优势地位。与放牧相比,禁牧条件下禾本科种子数占比降低,莎草科种子数占比明显增加。禁牧降低了杂类草物种数的百分比,明显增加莎草科物种数的占比;禾本科、豆科物种数百分比在两处理间的变化不明显。

2.4 沼泽化草甸土壤种子库特征指标间相关性分析

如图6所示,相关性分析发现,杂草重要值与禾草、莎草重要值以及禾草种子密度呈极显著负相关关系 ($P < 0.001$),而与莎草种子密度呈极显著正相



* 代表 $P < 0.05$; ** 代表 $P < 0.01$; *** 代表 $P < 0.001$

图6 土壤种子库特征指标间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis of soil seed bank characteristics

关系($P < 0.01$)。禾草种子密度与土壤种子库丰富度指数呈显著正相关关系($P < 0.05$), 杂类草种子密度与土壤种子库均匀度指数呈显著负相关关系($P < 0.05$)。

3 讨论

3.1 放牧与围栏禁牧对土壤种子库组成与结构的影响

相比其他人为干扰,放牧对草地土壤种子库的影响较大^[16],导致种子库的种类构成和功能群结构发生变化^[17],研究发现^[18-20]围封对草甸植物群落结构的恢复具有重要作用,改善了草地的生态环境。李锋瑞等^[21]的研究结果表明围封显著增加了退化沙质草地土壤种子库植物种数;李国旗等^[6]对宁夏荒漠草原苦豆子群落和芨芨草群落的土壤种子库研究也得到了相同的结果,即封育后两种植物群落的土壤种子库物种数均有增加。研究发现与放牧相比,围封禁牧3年在一定程度上增加了沼泽化草甸土壤种子库的植物种类。并且放牧与禁牧条件下的沼泽化草甸土壤种子库的物种组成具有显著差异。对内蒙古巴林右旗退化草原的研究发现在围封过程中土壤种子库的物种组成发生了变化,而且随着围封年限的增加,草原群落土壤种子库的植物种数也增加^[22]。不同的是,邓斌等^[23]对封育3年的青藏高原高寒草地群落研究发现封育对各草地群落土壤种子库的物种数影响差异不显著,出现这一

结果可能是该地区鼠类活动频繁的原因^[24]。

土壤种子库的形成直接依赖于地上植被的丰富度,同时,土壤种子库也对地上植物群落的构建及其物种多样性产生深远的影响。研究中,放牧与禁牧条件下土壤种子库的 Richness 丰富度指数和 Simpson 优势度指数差异不显著($P > 0.05$),但围封条件下沼泽化草甸中土壤种子库的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数值显著低于放牧($P < 0.05$)。这说明短期围封禁牧降低了沼泽化草甸土壤种子库的多样性和均匀度。对封育和放牧条件下退化荒漠草地的研究表明^[25],2年的研究结果都是封育样地的土壤种子库物种 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数低于放牧样地。围封时间也是影响物种多样性变化的因素。纪磊等^[26]的研究表明高寒草地随着禁牧年限的增加,植物群落的 Shannon-Wiener 指数和 Pielou 均匀度指数呈现增加-下降-增加的趋势。围封禁牧这一举措不仅有利于牧草的返青和生长,更为草地提供了宝贵的休养生息的机会,从而有效地促进了植物种子的生产和繁衍。但是应根据草地的实际情况决定围封时间的长短,长期围封会导致种群趋于平衡,地上植株呈均匀分布,在一定程度上减少了植物群落的物种数^[27]。

围封禁牧3年提高了莎草和杂类草的种子密度,对禾草和豆科的种子密度影响不大,总体来说与放牧草甸比较,围封增加了沼泽化草甸土壤种子库的密度。这与先前的研究结果一致^[28-29]。围封提高了莎草和杂类草的种子密度,原因可能是莎草为优良牧草,放牧条件下家畜采食、践踏影响了植物的有性繁殖,降低其种子密度^[30],而围封禁牧消除了放牧对草地的干扰,例如避免家畜采食植物的生殖枝,较大程度保障了植物种子的产量和质量^[31],显著增加了莎草的种子密度;并且显著提高了莎草类群的重要值,说明围封增加了优良牧草(如莎草)的恢复力,有效提高了沼泽化草甸的牧草生产力。家畜虽不喜食杂类草,但放牧条件下杂类草会被家畜践踏,种子产量受到影响,围封为杂类草生长、发育、繁殖创造了更有利的环境,种子密度相对增加。此外,围封后植被地上生物量高于放牧地^[32],围封内能够积聚大量带有种子的凋落物,这也是造成土壤种子库密度增加的原因。赵盼盼等^[33]指出围封能够增加土壤种子库中多年生植物的比例。研究结果显示,围封条件下莎草类群种子数占比、物种数百分比均增高。放牧和围封条件下沼泽化草甸均以杂类草为优势种,种子数和物种数占比较高,杂类草放牧条件下处于优势地位可能与

放牧强度有关,研究中放牧的强度对杂类草来说也许较为合适。研究发现在放牧的强度和周期适合的情况下,杂类草在种子库中的物种数和多样性最高^[27]。有研究表明^[17],对荒漠草原进行季节性放牧能增加土壤种子库中的多年生植物种类、密度以及种子库物种多样性。因此对草甸应实施合理的封育与放牧措施才能为草甸提供有利的生态保护。

3.2 土壤种子库特征指标间相关性分析

研究结果显示土壤种子库中功能群的各指标间呈现极显著正相关或极显著负相关的关系。地下功能群之间的这种关系与功能群在地上植物群落中的关系相似。相似性关系反映了地上植物群落影响着土壤种子库的数量动态^[34];同样反映了地上植物间的竞争,竞争对地上植物群落的结构组成和多样性产生影响,进而造成局部生态环境的稳定性发生变化^[35],而这种竞争最终会反馈给土壤种子库。面对有限的资源和强烈的竞争,物种会进行分配资源,比如将更多的资源用于根茎的生长,则分配给植株种子的资源较少,影响了种子的产量与质量。

4 结论

(1) 沼泽化草甸在放牧与围封禁牧两种处理条件下土壤种子库组成具有显著差异,鼠曲草、水毛茛及沼生薹菜在两处理土壤种子库组成成分中贡献较大。

(2) 围封禁牧处理下土壤种子库 Shannon-Wiener 指数、Pielou 指数均显著低于放牧处理,而 Richness 指数、Simpson 指数在两处理间均无显著差异。围封禁牧显著增加了莎草的重要值及莎草种子密度,而对其他功能类群对应值均无显著影响。

(3) 杂草类种子数百分比、物种数百分比均占据绝对优势,禾草、莎草次之,豆科最小(几乎为零)。围封禁牧与放牧相比,杂草物种数百分比明显下降,莎草物种数百分比明显上升,禾草和豆科物种数百分比无明显变化。

(4) 土壤种子库中杂草类重要值与禾草类、莎草类重要值均呈显著负相关,而禾草类密度与莎草类密度呈显著正相关。土壤种子库禾草类种子密度与 Richness 指数呈显著正相关。

综上所述,沼泽化草甸土壤种子库在短期围封禁牧后多样性有所降低,而莎草类群的种子得到一定的补充恢复。

参 考 文 献

[1] 于顺利,陈宏伟,郎南军. 土壤种子库的分类系统和种子在土

- 壤中的持久性[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 2099-2108.
- Yu Shunli, Chen Hongwei, Lang Nanjun. The classification systems of soil seed banks and seed persistence in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 2099-2108.
- [2] 李文成,黄爱萍,刘苗,等. 繁殖体简述及其对高寒草地生态系统恢复的影响[J]. 草业科学, 2022, 39(11): 2361-2379.
- Li Wencheng, Huang Aiping, Liu Miao, et al. Review on propagules and its application in the restoration of alpine grassland ecosystems[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(11): 2361-2379.
- [3] 赵延彤,赵美玲,王国栋,等. 大兴安岭和三江平原地区灰脉薹草沼泽土壤种子库特征及其与环境因子的关系[J]. 湿地科学, 2021, 19(4): 471-478.
- Zhao Yantong, Zhao Meiling, Wang Guodong, et al. Characteristics of soil seed banks and their relationships with environmental factors in *Carex appendiculata* Marshes in the Great Khingan Mountains and Sanjiang Plain areas[J]. Wetland Science, 2021, 19(4): 471-478.
- [4] 李雪华,季飞龙,刘志民,等. 土壤种子库与植被的关系: 种子在生态系统恢复中的作用[J]. 生态学杂志, 2024, 43(7): 1966-1972.
- Li Xuehua, Ji Feilong, Liu Zhimin, et al. Relationship between soil seed bank and vegetation: role of seeds in ecosystem restoration[J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(7): 1966-1972.
- [5] Yang X, Baskin C C, Baskin J M, et al. Global patterns of potential future plant diversity hidden in soil seed banks[J]. Nature Communications, 2021, 12(1): 7023.
- [6] 李国旗,邵文山,赵盼盼,等. 封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 52-61.
- Li Guoqi, Shao Wenshan, Zhao Panpan, et al. Effects of enclosure on the soil seed bank of two plant communities on the desert steppe[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(6): 52-61.
- [7] 全川,冯秀,张远鸣,等. 锡林郭勒退化草原不同禁牧恢复演替阶段土壤种子库比较[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 1991-2002.
- Tong Chuan, Feng Xiu, Zhang Yuanming, et al. Soil seed banks in different grazing exclusion restoring succession stages in the Xiligole degraded steppe[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(5): 1991-2002.
- [8] 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[J]. 草业科学, 2018, 35(4): 791-799.
- Shen Bo, Ma Qingqing, Cheng Yunxiang, et al. Effect of grazing systems on soil seedbank: a case study of an alpine meadow in the eastern Qinghai-Tibet Plateau[J]. Pratacultural Science, 2018, 35(4): 791-799.
- [9] 叶岷,李景文,尚红喜. 北京市湿地植物多样性及旱生植物入侵对生物多样性的影响[J]. 科学技术与工程, 2006, 6(18): 2858-2863, 2867.
- Ye Di, Li Jingwen, Shang Hongxi. Plant diversity and impact by xerophytes invasion in wetland in Beijing[J]. Science Technology and Engineering, 2006, 6(18): 2858-2863, 2867.
- [10] 汪海,路明,邹胜章,等. 会仙岩溶湿地生态系统健康评价[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3380-3386.
- Wang Hailun, Lu Ming, Zou Shengzhang, et al. Health assessment on Huixian karst wetland ecosystem[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(8): 3380-3386.

- [11] 闫玉春, 唐海萍, 辛晓平, 等. 围封对草地的影响研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 5039-5046.
Yan Yuchun, Tang Haiping, Xin Xiaoping, et al. Advances in research on the effects of enclosure on grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(9): 5039-5046.
- [12] 蒋桂芹, 毕黎明, 贺逸清. 若尔盖湿地水源涵养时空变化及影响因素[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12688-12694.
Jiang Guiqin, Bi Liming, He Yiqing. Spatiotemporal variation of water conservation and its influencing factors in Zoigê wetland[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(29): 12688-12694.
- [13] 赵丽娅, 李兆华, 赵锦慧, 等. 科尔沁沙质草地放牧和围封条件下的土壤种子库[J]. 植物生态学报, 2006, 30(4): 617-623.
Zhao Liya, Li Zhaohua, Zhao Jinhui, et al. Comparison on the difference in soil seed bank between grazed and enclosed grasslands in Horqin sandy land[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2006, 30(4): 617-623.
- [14] 马妙君, 周显辉, 吕正文, 等. 青藏高原东缘封育和退化高寒草甸种子库差异[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3658-3664.
Ma Miaojun, Zhou Xianhui, Lü Zhengwen, et al. A comparison of the soil seed bank in an enclosed vs. a degraded alpine meadow in the eastern Tibetan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(7): 3658-3664.
- [15] 姚喜喜, 才华, 李长慧. 封育和放牧对高寒草甸植被群落特征和土壤特性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(S1): 128-136.
Yao Xixi, Cai Hua, Li Changhui. Effects of fencing and grazing on vegetation community characteristics and soil properties in an alpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(S1): 128-136.
- [16] 连仲民, 徐文轩, 杨维康, 等. 放牧对草地土壤种子库的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(12): 2301-2307.
Lian Zhongmin, Xu Wenxuan, Yang Weikang, et al. Effects of livestock grazing on soil seed bank: a review[J]. Pratacultural Science, 2014, 31(12): 2301-2307.
- [17] 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[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2378-2388.
Liu Jindi, Ma Hongbin, Zhou Yao, et al. Effects of rotation grazing time on the characteristics of soil seed bank in desert steppe[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 2378-2388.
- [18] 聂莹莹, 陈金强, 辛晓平, 等. 呼伦贝尔草甸草原区主要植物种群生态位特征与物种多样性对封育年限响应[J]. 草业学报, 2021, 30(10): 15-25.
Nie Yingying, Chen Jinqiang, Xin Xiaoping, et al. Responses of niche characteristics and species diversity of main plant populations to duration of enclosure in the Hulun Buir meadow steppe[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2021, 30(10): 15-25.
- [19] Chen B, Zhang X, Tao J, et al. The impact of climate change and anthropogenic activities on alpine grassland over the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 189: 11-18.
- [20] Yang Y H, Fang J Y, Pan Y D, et al. Aboveground biomass in Tibetan grasslands[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(1): 91-95.
- [21] 李锋瑞, 赵丽娅, 王树芳, 等. 封育对退化沙质草地土壤种子库与地上群落结构的影响[J]. 草业学报, 2003, 12(4): 90-99.
Li Fengrui, Zhao Liya, Wang Shufang, et al. Effects of enclosure management on the structure of soil seed bank and standing vegetation in degraded sandy grasslands of eastern Inner Mongolia[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2003, 12(4): 90-99.
- [22] 黄欣颖, 王堃, 王宇通, 等. 典型草原封育过程中土壤种子库的变化特征[J]. 草地学报, 2011, 19(1): 38-42.
Huang Xinying, Wang Kun, Wang Yutong, et al. Soil seed bank dynamics during natural restoration by fence in a typical steppe of Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2011, 19(1): 38-42.
- [23] 邓斌, 任国华, 刘志云, 等. 封育三年对三种高寒草地群落土壤种子库的影响[J]. 草业学报, 2012, 21(5): 23-31.
Deng Bin, Ren Guohua, Liu Zhiyun, et al. Effect of 3-year fencing on soil seed banks of three alpine grassland communities[J]. Acta Pratacultural Sinica, 2012, 21(5): 23-31.
- [24] 尚占环, 龙瑞军. 青藏高原“黑土型”退化草地成因与恢复[J]. 生态学杂志, 2005, 24(6): 652-656.
Shang Zhanhuan, Long Ruijun. Formation reason and recovering problem of the black soil type degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(6): 652-656.
- [25] 孙建华, 王彦荣, 曾彦军. 封育和放牧条件下退化荒漠草地土壤种子库特征[J]. 西北植物学报, 2005(10): 2035-2042.
Sun Jianhua, Wang Yanrong, Zeng Yanjun. Characteristics of the soil seed banks in degenerated grasslands under grazing and grazing suspension[J]. Acta Botanica Boreali Occidentalia Sinica, 2005(10): 2035-2042.
- [26] 纪磊, 干友民, 刘忠义, 等. 禁牧对阿坝县退化草地植被恢复的效用[J]. 中国草地学报, 2013, 35(5): 108-112.
Ji Lei, Gan Youmin, Liu Zhongyi, et al. Effect of grazing-prohibited on the vegetation restoration of degraded grassland in A'ba County[J]. Chinese Journal of Grassland, 2013, 35(5): 108-112.
- [27] 许明圆, 朱文琰, 杨畅, 等. 不同放牧强度对高寒草甸土壤种子库的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(6): 1461-1471.
Xu Mingyuan, Zhu Wenyan, Yang Chang, et al. Effects of different grazing intensities on the soil seed bank in an alpine meadow[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(6): 1461-1471.
- [28] 詹学明, 李凌浩, 李鑫, 等. 放牧和围封条件下克氏针茅草原土壤种子库的比较[J]. 植物生态学报, 2005, 29(5): 747-752.
Zhan Xueming, Li Linghao, Li Xin, et al. Effects of grazing on the soil seed bank of a *Stipa kryovi* steppe community[J]. Journal of Plant Ecology, 2005, 29(5): 747-752.
- [29] Sudebilige H, Li Y H, Yong S P, et al. Germinable soil seed bank of *Artemisia frigida* grassland and its response to grazing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2000, 20(1): 43-48.
- [30] Sternberg M, Gutman M, Perevolotsky A, et al. Effects of grazing on soil seed bank dynamics: an approach with functional groups[J]. Journal of Vegetation Science, 2003, 14(3): 375-386.
- [31] 赵凌平, 程积民, 万惠娥, 等. 黄土高原草地封育与放牧条件下土壤种子库特征[J]. 草业科学, 2008, 25(10): 78-83.
Zhao Lingping, Cheng Jimin, Wan Huie, et al. Characteristics of soil seed banks in grassland under fencing and grazing in Loess

- Plateau[J]. Pratacultural Science, 2008, 25(10): 78-83.
- [32] 聂莹莹, 徐丽君, 辛晓平, 等. 围栏封育对温性草甸草原植物群落构成及生态位特征的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(11): 11-22.
Nie Yingying, Xu Lijun, Xin Xiaoping, et al. Effects of fence enclosure on the plant community composition and niche characteristics in a temperate meadow steppe[J]. Acta Prataculturalae Sinica, 2020, 29(11): 11-22.
- [33] 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[J]. 草业学报, 2018, 27(1): 42-52.
Zhao Panpan, Li Guoqi, Shao Wenshan, et al. Effects of herbivore exclusion on the soil seed bank and aboveground vegetation characteristics of *Agropyron mongolicum* dominant desert steppe grassland [J]. Acta Prataculturalae Sinica, 2018, 27(1): 42-52.
- [34] Wang W, Wang Q, Wang H. The effect of land management on plant community composition, species diversity, and productivity of alpine Kobersia steppe meadow [J]. Ecological Research, 2006, 21(2): 181-187.
- [35] 张辛阳, 商佳慧, 何诗静. 草湖湿地自然保护区植物群落物种多样性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(21): 92-98.
Zhang Xinyang, Shang Jiahui, He Shijing. Species diversity of plant communities in Caohu wetland natural reserve[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(21): 92-98.