植物生态学报 2025, **49** (1): 129-137 DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125
Chinese Journal of Plant Ecology CSTR: 32100.14.cjpe.2024.0125

草原植物繁殖体调控技术: “蘖芽岛”的培育与移植

孙佳美[1,2] 安冰儿[1,2] 刘 伟[1] 王 璟[1] 潘庆民[1,2*]

[1]中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 国家植物园, 北京 100093; [2]中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 草原生态系统退化严重制约着我国生态安全和经济发展, 如何有效地恢复退化草原是草原牧区面临的重要科学与技术挑战。目前国内已经研发了多项退化草原修复技术, 这些技术的实施对促进草原恢复发挥了重要作用, 但是对群落结构退化严重、繁殖体库严重缺乏的退化草原却作用有限。为此, 该研究探索了用于中度、重度退化草原优质牧草定向修复的植物繁殖体调控技术, 包括“蘖芽岛”培育与移植两个关键技术环节, 其中“蘖芽岛”培育是基于培养钵种植目标物种, 结合对应管理措施促进植株根茎(或侧芽)快速生长, 最终培育成具有丰富繁殖体库(分蘖根茎或枝生芽)的目标物种“蘖芽岛”; “蘖芽岛”移植的主要目的是补充退化草原繁殖体库, 充分发挥优质牧草无性繁殖能力强的优势, 快速扩繁恢复群落结构及功能。根据在草甸草原进行的技术示范, 羊草(*Leymus chinensis*)和野苜蓿(*Medicago falcata*) “蘖芽岛”培育与移植技术具有良好的恢复效果, 能够使退化草原的群落生产力从214.5 g·m^{-2}分别提高到358.7和286.4 g·m^{-2}, 优质牧草比例从18.4%分别提高到54.7%和31.5%。该技术能够为繁殖体限制草原的定向修复提供重要的数据和技术支撑。

关键词 草原退化; 草原恢复; 繁殖体; 蘖芽岛; 培育; 移植

孙佳美, 安冰儿, 刘伟, 王璟, 潘庆民 (2025). 草原植物繁殖体调控技术: “蘖芽岛”的培育与移植. 植物生态学报, 49, 129-137. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

Propagule regulation technique in grasslands: cultivation and transplantation of “propagule island”

SUN Jia-Mei[1,2], AN Bing-Er[1,2], LIU Wei[1], WANG Jing[1], and PAN Qing-Min[1,2*]

[1]State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, China National Botanical Garden, Beijing 100093, China; and [2]University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract

Aims The severe degradation of grassland ecosystems is restricting China’s ecological security and economic development, and this makes it a scientific and technological challenge for pastoral areas to effectively restore degraded grasslands. To date, multiple grazing management and human assisted improvement techniques have been developed, the implementation of these techniques played important roles in grassland restoration, but their effectiveness was constrained for degraded grasslands with severe damaged community structure and propagule shortage.

Methods We introduce a propagule regulation technique which can remove propagule limitation and target at restoring moderately and severely degraded grasslands. This technique includes two key technical aspects, namely, cultivation and transplantation of “propagule island”. The cultivation of “propagule island” is planting high-quality forage combining with nutrient management to promote the rapid growth of rhizomes (or lateral buds), i.e., cultivating “propagule island” with rich propagule pool (tiller rhizomes or branching buds). The transplantation of “propagule island” is replenishing the propagule pool to degraded grasslands, and restores grasslands relying on clonal growth (or asexual reproduction) of high-quality forage.

Important findings The main purpose of this technique is to rapidly restore the structure and function of communities in degraded grasslands taking the advantages of clonal growth of high-quality forage. According to the technical demonstration in the meadow grassland, “propagule island” of *Leymus chinensis* and *Medicago falcata* had significant effects on restoration, and they increased the productivity of the two communities from

收稿日期Received: 2024-04-23 接受日期Accepted: 2024-09-30
基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(A类) (XDA26020101)、国家重点研发计划(2022YFF1300602)和内蒙古自治区科技成果转化专项资金项目(2020CG0124)。Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (XDA26020101), the National Key R&D Program of China (2022YFF1300602), and Nei Mongol Autonomous Region Science and Technology Achievement Transformation Special Fund Project (2020CG0124).
* 通信作者Corresponding author (pqm@ibcas.ac.cn)

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

214.5 to 358.7 and 286.4 g·m^{-2}, respectively. They also increased the proportions of high-quality forage from 18.4% to 54.7% and 31.5%, respectively. This technique can provide important data and technical supports for the targeted restoration of propagule-restricted grasslands.

Key words grassland degradation; grassland restoration; propagule; propagule island; cultivation; transplantation

Sun JM, An BE, Liu W, Wang J, Pan QM (2025). Propagule regulation technique in grasslands: cultivation and transplantation of "propagule island". *Chinese Journal of Plant Ecology*, 49, 129-137. DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

草原是我国最大的陆地生态系统，面积约为3.9亿hm^2，占国土面积的40.9% (沈海花等, 2016)。广袤的草原具有防风固沙、涵养水源、固碳增汇、发展畜牧业等多重生态和生产功能，是我国生态安全与生态文明建设的重要战略资源(李博, 1997)。但是由于长期以来对草原不合理的利用，加上气候灾害和鼠虫等生物灾害频繁发生(许志信和郭丽珍，2000; 关振寰等，2020)，60%以上的草原发生了不同程度的退化(Zhou et al., 2014)，植被和土壤状况均发生了改变，主要表现为：高产优质的牧草种类减少、比例降低(李永宏，1988；刘钟龄等，2002)，家畜不采食的有毒有害物种蔓延(黄梅和尚占环, 2019)，土壤有机质含量降低(Hoffmann et al., 2008；乌仁其其格等，2009)。这些变化导致草原生产力显著降低，严重制约草原发挥生态和生产功能，因此，如何有效地恢复退化草原是我国草原牧区面临的重要科学与技术挑战。

目前，在退化草原恢复方面，国内已经研发了一些技术，概括起来可以分为两个方面，一方面是包括围封禁牧、休牧、轮牧和牧刈轮替等技术的放牧管理制度(李勤奋等, 2003；李青丰等, 2005；朱立博等，2008)；另一方面是包括草地浅耕和松耙、草地施肥和牧草补播等技术的人为辅助恢复(周国英等, 2005；郑华平等, 2007；张洪生等, 2010)。这些草地恢复技术的研发与实施一定程度上遏制了草原退化，使我国草原植被发展整体向好(张骞等，2019；董世魁等，2020)，但是这些技术大多具有一定的局限性，例如牧草补播等措施一次性投入较大，并且干旱等因素会影响牧草出苗率和定植率，因此存在较大风险(潘庆民等，2018；贺金生等，2020)；禁牧和休牧等措施要兼顾草地的恢复与利用，如果草原退化到优势种已经被劣质杂草或半灌木所替代的程度，通过放牧管理措施恢复草场需要很长时间；同时，草地浅耕、松耙、施肥等措施在草场群落结构发生重度退化、优势种比例较低时发挥的作用也非常有限，这主要是由于草原退化后优势牧草种子库和营养繁殖体减少阻碍了植物的有性和无性繁殖，成为草原难以恢复的关键限制因子(潘庆民等，2023)。

对于繁殖体限制的退化草原，由于优质牧草比例减少、土壤养分缺乏等问题，完全依靠自然恢复进程十分缓慢，大约20–25年以后其生产和生态功能才能逐步恢复到较低水平的平衡(潘庆民等，2023)；免耕补播是提升优质牧草比例的有效途径，但是存在发芽率低、存活率低、有性繁殖能力弱等卡点问题(张英俊等, 2020)。近年来有较多证据表明，无性繁殖对植物的克隆繁殖和再生具有重要意义，已有试验证明依托克隆繁殖特性构建植物"安全岛"能够促进喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*) (Guo & Hu, 2012)和双穗雀稗(*Paspalum paspaloides*) (Luo et al., 2017)在退化水生生态环境扩张，同时促进植物在镉污染环境的扩繁生长(Zheng et al., 2023)，这主要是由于植入的植物"安全岛"与周围环境有显著的空间异质性，具有对植物生长有利的环境空间，能够增大植物对环境的适应潜力，从而充分发挥植物克隆繁殖特性，恢复特异环境胁迫条件下的生态系统(Zheng et al., 2023)。因此，本研究将通过技术研发试验来探索在地下繁殖体库重度退化的草原，依托优质牧草无性繁殖能力强的优势，培育与移植优质牧草"蘖芽岛"，辅助养分管理措施，从而扩大退化草原优质牧草的繁殖体库，提高优质牧草移植进入退化草原群落后的竞争能力，快速恢复群落中优质牧草比例以及群落生产力。该项技术能够实现草原群落结构的定向恢复，缩短恢复进程，为促进重度退化草原生态和生产功能恢复提供技术支撑。

1 技术研发背景

草原是多物种共存的陆地生态系统，各个植物具有不同的繁殖策略，有的植物以无性繁殖为主，有的以有性繁殖为主，而有的则通过有性繁殖和无性繁殖两种方式来实现种群的维持与扩张(李金花等, 2004; Zhao et al., 2019)，植物繁殖体库包括维系

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

植物无性繁殖的芽库和植物有性繁殖的土壤种子库(潘庆民等, 2023)。在我国主要的草原类型中, 退化草原的优质牧草繁殖体库显著下降, 其中种子库以北方温带草原下降最为严重, 降幅达78.8%, 而青藏高寒草原种子库降幅最低, 为42.7% (图1), 同时其优质牧草的蘖芽库分别下降了92.7%和61.5% (图1); 这主要是由于草原退化后, 植被盖度降低, 多样性程度降低, 随着退化程度的加剧, 群落中占优势地位的优质牧草种子库和蘖芽库随之逐渐减少或缺失(孙启忠和桂荣, 2000)。由于植物群落结构的维持是通过植物体不断再生和繁殖的动态过程来实现的, 因此繁殖体库的缩小可能是草原恢复最主要的限制因子(潘庆民等, 2023)。

在退化草原进行牧草补播是恢复退化草原植被繁殖体库的一项重要措施, 这是因为补播可以快速补充优质牧草种子库, 提高优质牧草比例和群落生产力(杨增增等, 2018; 刘玉玲等, 2022)。但是, 由于新播种的牧草竞争力相对较弱, 或者播后遇到长时间的干旱, 可能导致牧草补播效果不理想(阎子盟等, 2014; 张英俊等, 2020; 高丽和丁勇, 2022)。事实上, 草原上的一些多年生优质牧草在适应干旱、寒冷等自然环境胁迫和动物采食的过程中, 进化出了以无性繁殖为主、有性繁殖为辅的繁殖策略(李金花等, 2004), 如内蒙古草原的优势植物羊草(*Leymus chinensis*)是根茎型禾草, 根茎蘖芽是其主要繁殖器官, 苜蓿(*Medicago sativa*)等豆科牧草也会通过根蘖繁殖来扩繁, 地下有充足的储备芽库供生长季快速繁殖生长(Dalgleish & Hartnett, 2009); 而在非生

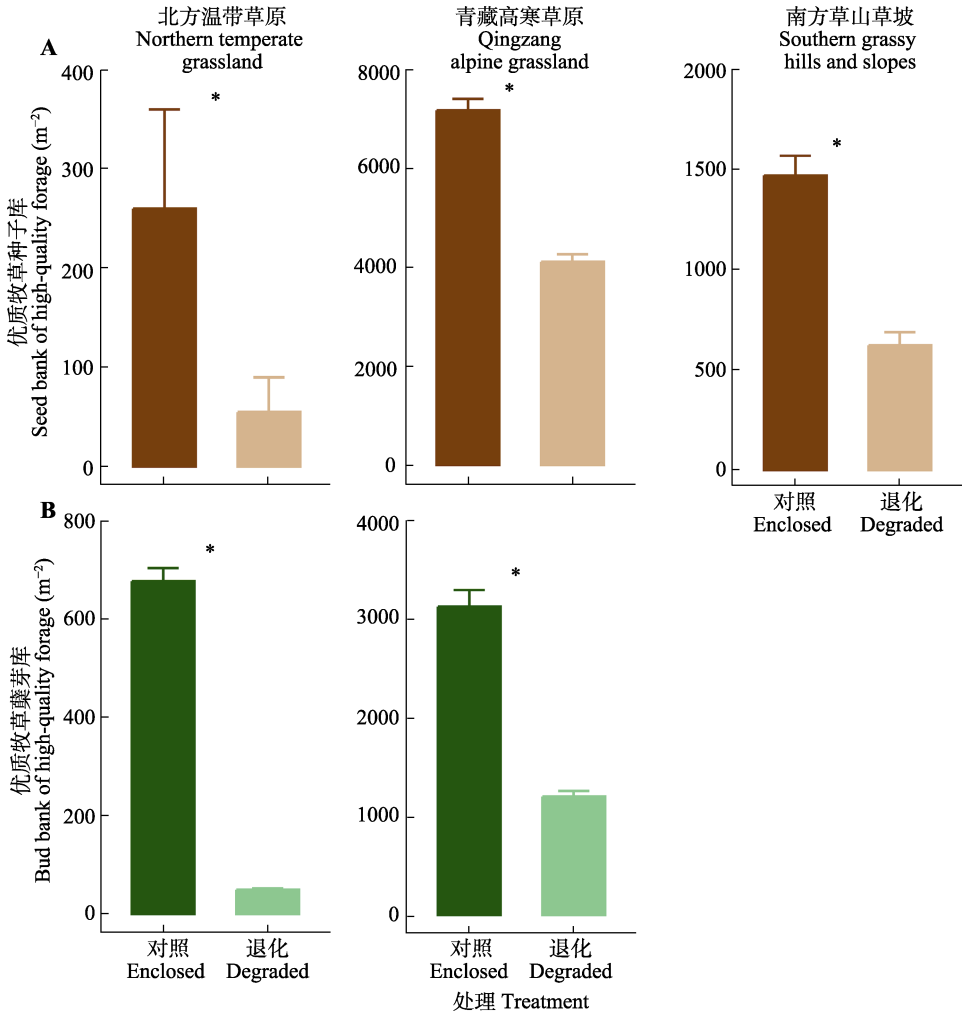


图1 草原退化群落与围封样地(对照)优质牧草种子库(**A**)和芽库(**B**)的差异(平均值±标准差)。数据来源: 北方温带草原(潘庆民等, 2023)、青藏高寒草原(邓斌等, 2012; 王倩, 2022)和南方草山草坡(韩学琴等, 2023)。*, $p < 0.05$。

Fig. 1 Differences in seed bank and bud bank of high-quality forage between degraded (**A**) and enclosed (**B**) grassland communities (mean ± *SD*). Data resources: northern temperate grassland (Pan et al., 2023), Qingzang alpine grassland (Deng et al., 2012; Wang, 2022), and southern grassy hills and slopes (Han et al., 2023). *, $p < 0.05$.

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

长季, 蘖芽则进入休眠期(Benson & Hartnett, 2006), 这些植物的芽库对于它们越冬后返青以及种群的存续与扩张极为关键, 然而是否可以充分利用植物的无性繁殖策略来加速退化草原修复还缺乏相关的技术研发与试验示范证据。因此本研究拟探索植物繁殖体调控技术, 通过“蘖芽岛”培育与移植扩充植物繁殖体库, 促进草原的定向恢复。具体操作方法为: 基于培养钵种植优质牧草的方式, 结合养分管理, 促进植株根茎或侧芽快速生长出用于无性繁殖的分蘖根茎或枝生芽, 培育出具有丰富蘖芽库的优质牧草“蘖芽岛”, 再移植到退化草原补充地下繁殖体库, 充分发挥牧草无性繁殖能力强的繁殖特点, 促进优质牧草种群的扩繁, 从而恢复退化草原群落的结构和功能。

2 材料和方法

2.1 目标物种选择

“蘖芽岛”培育的目标物种可以选择以无性繁殖为主, 有性繁殖为辅的植物, 代表性优质禾本科牧草为羊草、冰草(*Agropyron cristatum*)、野燕麦(*Avena fatua*)等(李博, 1997; 张洪生等, 2010); 也可以选择有性、无性繁殖并重, 但种子小并且补播后萌发的幼苗竞争力弱的优质豆科牧草, 如野苜蓿(*Medicago falcata*)、救荒野豌豆(*Vicia sativa*)等(杜雨等, 2023)。本研究探索的“蘖芽岛”培育目标物种为北方温带草原优质牧草羊草和野苜蓿, 其中羊草是我国内蒙古草原主要的建群种, 牲畜适口性好, 营养价值高, 因此恢复群落中羊草比例对于北方温带草原具有重要意义(陈佐忠等, 1985; 李博, 1997); 野苜蓿是典型的多年生豆科牧草, 具有抗逆性强、抗寒、抗旱、耐贫瘠、寿命长等优良特性, 营养价值高, 产草量高, 并且适口性好, 宜于放牧或刈割利用(杜雨等, 2023)。豆科牧草对于放牧型草原的恢复非常重要, 能够提高牲畜蛋白饲料供给, 解决北方草原蛋白质饲料不足的问题, 同时能够通过固氮作用提高土壤肥力(阎子盟等, 2014; 朱亚琼等, 2020)。

2.2 “蘖芽岛”培育技术

2.2.1 苗床准备

育苗地选择地势平坦、背风向阳、土质肥沃的地块, 要有水浇条件。如果条件适宜, 选择距离退化草地较近的撂荒地或废弃地, 并且尽量选择保水保肥能力高的地点, 根据地形和地块的大小, 分成宽100–120 cm、长度根据地块大小决定的苗床, 翻耕15–20 cm同时清除土壤中的杂草、草根和碎石。随后将基肥均匀撒施于苗床并充分混匀, 基肥施用量因物种而异, 羊草育苗基肥为腐熟的羊粪或商品化有机肥2.25 kg·m^{-2}、尿素30 g·m^{-2}、磷酸二铵15 g·m^{-2}, 能够使羊草密度和蘖芽数提高2.7和4.9倍(图2); 苜蓿育苗基肥为尿素22.5 g·m^{-2}、磷酸二铵15 g·m^{-2}、复硝酚钠6.8 mg·m^{-2}, 该养分管理能够显著提高野苜蓿密度和蘖芽数3.2倍左右(图2)。

2.2.2 “蘖芽岛”培育

由于羊草种子发芽率较低, 通常采用无性繁殖策略进行种群扩张, 因此本研究中羊草“蘖芽岛”通过移植野外纯羊草田的羊草无性繁殖体(即根茎-蘖芽复合体)到培养钵内进行培育管理来实现。具体步骤为: 在种植质量较好(地上植株成活率高、地下芽库充足)的羊草田进行根茎-蘖芽复合体采集, 春季气温超过12 ℃, 即可采集根茎-蘖芽复合体, 使用直径8 cm土钻钻取深度为8–10 cm的土柱, 采集的土柱以地上部分有3–5株存活的羊草为佳, 并且地下根系发达。采集后立即将土柱放入直径9 cm、深度12 cm的可降解育苗袋中, 装袋后紧密地排放在苗床上, 减少育苗袋之间的空隙, 对于尚不密实的空隙, 用苗床土弥合。移植后进行浇水管理, 确保水分条件良好, 以保证羊草“蘖芽岛”成活率。培育周期60–90天, 培育期间进行浇水、防虫、防病的管理, 最终培育成具有充足繁殖体和较强扩繁能力的羊草“蘖芽岛”。

野苜蓿种子发芽率较高, 因此通过在培养钵内直接播种来培育野苜蓿“蘖芽岛”, 具体步骤为: 将混合了配方肥的土壤装入直径为10 cm、深度为15 cm的可降解纤维制成的育苗钵中, 装土高度为12 cm, 将土壤压实, 随后将装满土的育苗钵整齐摆于育苗地, 取土后的地块留出距离地面10–12 cm的土槽。在100–120 cm宽的土槽中每行摆放10–12个育苗钵, 略低于地面便于储水, 摆满一个地块后, 将育苗钵之间的空隙装满土, 保持育苗钵和育苗地连成一个整体, 给摆满育苗钵的地块浇透水。播种量依据种子发芽率确定, 当气温稳定超过15 ℃即可进行播种。将种子均匀地覆盖在培养钵的表面, 在种子上面轻轻覆盖0.5 cm的土层, 保证种子被完全覆盖, 用喷头给撒好种子盖好土的育苗钵浇水, 保证土壤完全湿润。随后每3–5天浇一次水, 使育苗钵保持湿

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

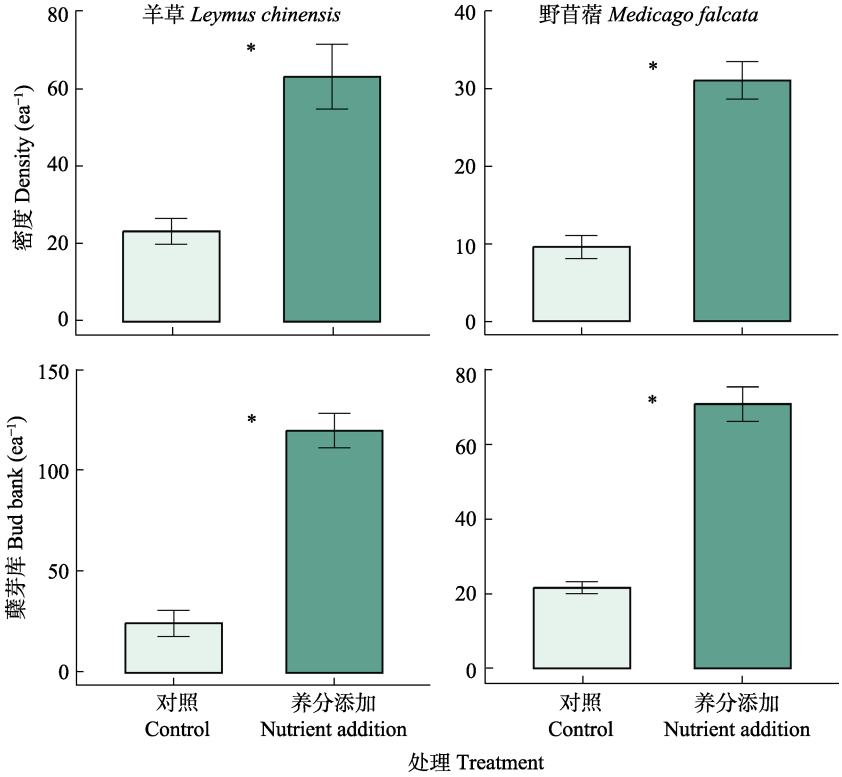


图2 对照和养分添加处理条件下每个羊草和野苜蓿“蘖芽岛”中植株株丛数和蘖芽数量(蘖芽岛(ea)尺寸: 直径9 cm, 深度12 cm) (平均值±标准差)。*, $p < 0.05$。

Fig. 2 Plant individuals and tiller buds of “propagule island” of *Leymus chinensis* and *Medicago falcata* under control and nutrient addition treatment (propagule island (ea) size: 9 cm in diameter and 12 cm in depth) (mean ± *SD*). *, $p < 0.05$.

润, 培育周期40–70天, 幼苗生长培育期间, 清除杂草, 防病防虫, 最终培育成具有充足繁殖体的野苜蓿“蘖芽岛”。

2.3 “蘖芽岛”移植技术

“蘖芽岛”移植是基于培育成的具有丰富地下蘖芽库的“蘖芽岛”, 配合对应“蘖芽岛”直径尺寸的土钻, 按照一定的移植密度移植到退化草原(Zheng et al., 2023), 其中羊草“蘖芽岛”移植株距和行距为2 m × 2 m, 野苜蓿“蘖芽岛”移植株距和行距为1 m × 2 m。移苗前对样地进行刈割处理, 留茬高度为5–8 cm, 从而避免本地植物与移植物种之间的竞争降低移植定植率。移植幼苗时间一般在雨季雨前进行。移植时注意选择在阴天或傍晚蒸发量较小时进行, 用直径12 cm、型号为TOSRWELL68CC的地钻(道什威尔, 浙江)打孔, 打孔深度18–20 cm, 将育苗钵“蘖芽岛”整体植入孔中, 周围用土填满压实, 最上端与草地地面留有1–3 cm的距离, 形成一个浅坑, 每个育苗钵浇0.5–1 L水。移植幼苗后如果有降雨, 则不需要浇水, 如果移植后15天内没有降雨, 需要漫灌一次保证移植成活率。移植后的次年8月20日左右(生长季旺盛期)进行移植效果调研。

2.4 数据处理

图中数据均为平均值±标准差(mean ± *SD*), 处理之间的差异用*t*检验方法进行显著性检验, 数据分析和作图均用R 4.2.3软件进行。

3 技术示范结果与讨论

3.1 示范区概况

示范地选择在草地退化严重, 优质牧草比例较低的天然草场进行, 本研究中移植示范在内蒙古自治区呼伦贝尔市谢尔塔拉农牧场天然草地恢复示范区(119.96° E, 49.31° N)进行。该区域气候属于寒温带半干旱大陆性草原气候, 土壤类型为黑钙土, 总体特征呈现为: 春季多风, 蒸发量大; 夏季温凉, 降水集中; 秋季降温快, 霜冻早; 冬季严寒, 地面积雪时间长。年降水量为370 mm左右, 平均年日照时间为2 800 h, 平均无霜期130天。该示范草场为围封的退化放牧场, 多年的放牧已经使草原退化, 优质牧草显著减少, 禾本科和豆科等优质牧草生物量比例低于20%。

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

3.2 恢复效果分析

羊草是禾本科赖草属一种具有广泛耐受性的多年生根茎型禾草，是北方温带草原的主要建群种之一 (李博, 1997; 张洪生等, 2010)，但是随着近年来草地的退化，群落结构发生了显著的变化，羊草生物量比例逐渐降低，羊草繁殖体库也随之逐渐缩小，因此本技术选择在羊草退化严重的草原群落(羊草密度<10 plants·m^{-2})进行“蘖芽岛”培育与移植技术示范，移植后的群落调研结果表明，示范区植物群落中以羊草为代表的优质牧草比例与对照小区相比提高了近3倍，同时群落生产力提高了67.2% (图3)，这主要是由于羊草地下根茎强大，横向根茎穿透拓展能力强，能够形成强大密集的根网结构。但是羊草有性繁殖能力较弱，因此通过移植羊草繁殖体到退化草原群落，能够充分发挥羊草无性繁殖强、成活率高、生长快的特性，在适当的水分、温度、通气性和土壤肥力条件下，迅速扩张种群，提高其在群落中的竞争力，从而起到恢复羊草草原的作用。

野苜蓿是一种根蘖型苜蓿，具有较多的水平根，能生出很多不定芽，萌发形成新的植株，具有较强的伸展习性，单株覆盖面积比非根蘖型植物大，对养分水分的竞争力强，因此可以基于野苜蓿无性繁殖较强的特点进行草地恢复(Dalgleish & Hartnett, 2009)。本技术通过在豆科牧草地下营养繁殖体库极度缺乏的草地进行野苜蓿“蘖芽岛”培育与移植来补充繁殖体库，充分发挥苜蓿无性繁殖强的特性，提高豆科牧草在群落中的繁殖力与竞争力，移植后的群落调研表明本技术能够使群落中优质牧草比例从18.4%提高到31.5%，同时群落生产力从214.5 g·m^{-2}提高到286.4 g·m^{-2} (图3)，充分起到恢复退化草地中豆科牧草的效果。

3.3 讨论

在内蒙古草原，优质牧草减少是草原群落结构退化的重要特征，免耕补播是主要的群落结构修复技术，但是有众多因素会影响补播的成功，其中最常见的问题是补播发芽的植物种苗根系不发达，因此对水分养分等资源竞争力较弱，尤其随着原生植物的快速生长，可能导致较为矮小的补播种苗能获取的光资源急剧减少，进而影响种苗定植(张英俊等, 2020)。本研究经过试验探索证明“蘖芽岛”培育与移植技术能够克服草原多年生优质牧草有性繁殖弱和物种竞争的卡点问题，实现优质牧草的定向恢复，这主要是由于“蘖芽岛”可以为优质牧草提供资源相对丰富的生长环境，在“蘖芽岛”内通过管理措

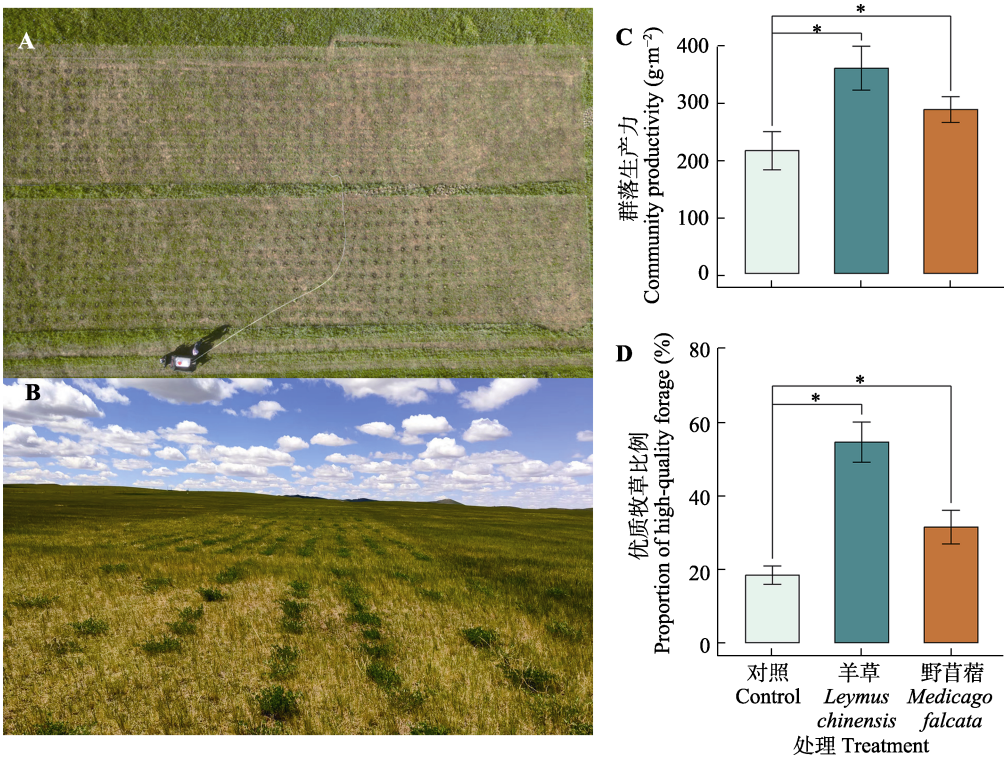


图3 羊草和野苜蓿“蘖芽岛”移植(**A**、**B**)以及对群落生产力(**C**)和优质牧草比例(**D**)的恢复效果(平均值±标准差)。*, $p < 0.05$。
Fig. 3 Transplantation of “propagule island” of *Leymus chinensis* (**A**) and *Medicago falcata* (**B**), and the effects of restoration on community productivity (**C**) and high-quality forage proportion (**D**) (mean ± *SD*). *, $p < 0.05$.

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

施去除种间植物的竞争, 促进目标物种生长, 充分发挥植物的无性繁殖优势进行扩繁, 达到恢复草原的效果。

“蘖芽岛”的尺寸选择是影响本技术成功的关键因素, 当“蘖芽岛”尺寸相对较小时, 植物根系生长不足, 可能降低移植后的成活率, 针对不同直径营养钵对“蘖芽岛”培育影响的探索试验证明: 直径为8–12 cm的营养钵较为适宜, 既能保证有足够的根茎繁殖体进行定植, 又能够显著减少培育的经济投入, 同时具有显著的恢复效果; 而较小的“蘖芽岛”(直径<5 cm)由于地下繁殖体数量少且植株较小, 会降低移植后的定植率。同时“蘖芽岛”土壤环境也是影响牧草定植是否成功的关键因素, 主要是指土壤养分条件, 基于以往的试验探索我们发现适量的氮(6 g·m^{-2})和磷(2 g·m^{-2})肥料的添加(未发表数据)能够显著促进植物根茎繁殖体数量, 从而提高“蘖芽岛”移植的成功率。然而我们的技术研发主要在内蒙古呼伦贝尔草甸草原进行, 其技术参数也是主要针对该地区的目标物种和土壤条件, 当该技术推广到其他目标物种和地区时还需要进行进一步的技术指标优化, 包括“蘖芽岛”尺寸、养分管理措施、培育周期、移植时间等。

本研究中的“蘖芽岛”培育与移植技术除了能够促进优质牧草的定向恢复, 还可以为其他目标物种的定向恢复提供技术支撑, 例如防风(*Saposhnikovia divaricata*)、北柴胡(*Bupleurum chinense*)等中草药植物以及油用牡丹(*Paeonia suffruticosa*)等特色经济作物, 主要途径是基于该技术的参数, 研制适合目标物种“蘖芽岛”培育的尺寸、培育周期和管理措施, 随后进行“蘖芽岛”移植, 实现目标物种的定向恢复, 这些高价值作物的恢复与推广对于提高农牧民的经济收入具有重要意义, 因此本技术具有广阔的应用前景。

4 结论与展望

恢复退化草原是我国生态文明建设的重大需求。本研究在综合分析退化草原恢复植物繁殖体限制的瓶颈问题的基础上, 提出在地下繁殖体库重度缺乏的草地, 可以通过“蘖芽岛”培育与移植的方法, 提高优质牧草的繁殖体库, 充分发挥一些优质牧草无性繁殖能力强的特点加速退化草原的恢复。基于以上方法, 在内蒙古呼伦贝尔草甸草原进行了“蘖芽岛”的培育与移植试验示范, 结果显示羊草和野苜蓿“蘖芽岛”能够有效提高优质牧草比例, 恢复群落结构和功能。本技术的探索能够为严重退化的繁殖体限制草原定向恢复提供数据和技术支撑, 同时本技术中包括的“蘖芽岛”种植与示范能够推广应用到其他目标物种的定向恢复, 如防风、柴胡等中草药植物以及油用牡丹等高值经济作物, 这些高值作物的恢复与推广能够在提供农牧民经济收入的同时恢复草原的生态与生产功能。

参考文献

Benson EJ, Hartnett DC (2006). The role of seed and vegetative reproduction in plant recruitment and demography in tallgrass prairie. *Plant Ecology*, 187, 163-178.

Chen ZZ, Sheng XW, Yang ZG, Huang DH (1985). The ecological effects of fertiltzation during rainy season on various types of steppe on the Xilin River Valley, Inner Mongolia//Inner Mongolia Grassland Ecosystem Research Station, Academia Sinica. *Research on Grassland Ecosystem: No. 1*. Science Press, Beijing. 225-232. [陈佐忠, 盛修武, 杨宗贵, 黄德华 (1985). 不同类型草原群落雨季施肥的生态效应//中国科学院内蒙古草原生态系统定位站. 草原生态系统研究: 第一集. 科学出版社, 北京. 225-232.]

Dalgleish HJ, Hartnett DC (2009). The effects of fire frequency and grazing on tallgrass prairie productivity and plant composition are mediated through bud bank demography. *Plant Ecology*, 201, 411-420.

Deng B, Ren GH, Liu ZY, Shang ZH, Pei SF (2012). Effect of 3-year fencing on soil seed banks of three alpine grassland communities. *Acta Prataculturae Sinica*, 21(5), 23-31. [邓斌, 任国华, 刘志云, 尚占环, 裴世芳 (2012). 封育三年对三种高寒草地群落土壤种子库的影响. 草业学报, 21(5), 23-31.]

Dong SK, Yang MY, Ren JZ, Shang ZH, Zhao XY, Dong QM, Liu WT, Renqinduanzhi, Dou SY, Zhou XL, Tudanjia, Shi DJ (2020). Sustainable grassland management based on grazing system unit: concepts and models. *Pratacultural Science*, 37(3), 403-412. [董世魁, 杨明岳, 任继周, 尚占环, 赵昕月, 董全民, 刘文亭, 仁钦端治, 窦声云, 周学丽, 土旦加, 史德军 (2020). 基于放牧系统单元的草地可持续管理: 概念与模式. 草业科学, 37(3), 403-412.]

Du Y, Yu XM, Wang P, Wang YX, Zhang B (2023). Study on the effect of different treatments on breaking hard seed of *Medicago falcata* L. in Xinjiang. *Seed*, 42(12), 145-151. [杜雨, 于秀明, 汪鹏, 王玉祥, 张博 (2023). 不同处理破除新疆黄花苜蓿种子硬实效果的研究. 种子, 42(12), 145-151.]

Gao L, Ding Y (2022). Progress in research and practice of

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

restoration of degraded grassland around the world. *Acta Prataculturae Sinica*, 31(10), 189-205. [高丽, 丁勇 (2022). 世界退化草地恢复研究和实践进展. 草业学报, 31(10), 189-205.]

Guan ZH, Liu GH, He JS (2020). Literature analysis on the research status and development of grassland conservation technology. *Pratacultural Science*, 37, 703-717. [关振寰, 刘国华, 贺金生 (2020). 草地保护技术研究现状及发展趋势的文献分析. 草业科学, 37, 703-717.]

Guo W, Hu ZH (2012). Effects of stolon severing on the expansion of *Alternanthera philoxeroides* from terrestrial to contaminated aquatic habitats. *Plant Species Biology*, 27, 46-52.

Han XQ, Liu JD, Deng HS, Luo HY, Li LH, Jin J (2023). Effects of different grazing intensities on soil seed bank of natural grassland in the dry-hot valley of Jinsha River. *China Herbivore Science*, 43(5), 16-22. [韩学琴, 刘进娣, 邓红山, 罗会英, 李莲红, 金杰 (2023). 放牧对金沙江干热河谷草地土壤种子库的影响. 中国草食动物科学, 43(5), 16-22.]

He JS, Bu HY, Hu XW, Feng YH, Li SL, Zhu JX, Liu GH, Wang YR, Nan ZB (2020). Close-to-nature restoration of degraded alpine grasslands: theoretical basis and technical approach. *Chinese Science Bulletin*, 65, 3898-3908. [贺金生, 卜海燕, 胡小文, 冯彦皓, 李守丽, 朱剑霄, 刘国华, 王彦荣, 南志标 (2020). 退化高寒草地的近自然恢复: 理论基础与技术途径. 科学通报, 65, 3898-3908.]

Hoffmann C, Funk R, Wieland R, Li Y, Sommer M (2008). Effects of grazing and topography on dust flux and deposition in the Xilingele grassland, Inner Mongolia. *Journal of Arid Environments*, 72, 792-807.

Huang M, Shang ZH (2019). Research progress on poisonous weeds treatment technology in Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 27, 1107-1116. [黄梅, 尚占环 (2019). 青藏高原毒草型退化草地治理技术研究进展. 草地学报, 27, 1107-1116.]

Li B (1997). The rangeland degradation in North China and its preventive strategy. *Scientia Agricultura Sinaca*, 30, 1-9. [李博 (1997). 中国北方草地退化及其防治对策. 中国农业科学, 30, 1-9.]

Li JH, Pan HW, Wang G (2004). Reproductive strategy of grassland plant. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 24, 352-355. [李金花, 潘浩文, 王刚 (2004). 草地植物种群繁殖对策研究. 西北植物学报, 24, 352-355.]

Li QF, Han GD, Ao TG, Peng SL (2003). Approach on restoration mechanism of rotational grazing system on desert steppe. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 19, 224-227. [李勤奋, 韩国栋, 敖特根, 彭少麟 (2003). 划区轮牧制度在草地资源可持续利用中的作用研究. 农业工程学报, 19, 224-227.]

Li QF, Zhao G, Zheng MA, Armin BH (2005). Delay grazing a practical approach to grassland environment protection and sustainable animal production in grassland of northern China. *Acta Agrestia Sinica*, 13(S1), 53-66. [李青丰, 赵钢, 郑蒙安, 阿民布和 (2005). 春季休牧对草原和家畜生产力的影响. 草地学报, 13(S1), 53-66.]

Li YH (1988). The divergence and convergence of *Aneurolepidium chinense* steppe and *Stipa grandis* steppe under the grazing influence in Xilin River valley, Inner Mongolia. *Acta Phytoecologica et Geobotanica Sinica*, 12, 189-196. [李永宏 (1988). 内蒙古锡林河流域羊草草原和大针茅草原在放牧影响下的分异和趋同. 植物生态学与地植物学学报, 12, 189-196.]

Liu YL, Wang DP, Zhang HB, Wang GF, Li PZ, Rong YP (2022). Effects of reseeding time and species on plant community of meadow steppe in Hulunbeir. *Acta Agrestia Sinica*, 30, 3098-3105. [刘玉玲, 王德平, 张泓博, 王国富, 李鹏珍, 戎郁萍 (2022). 补播时间和补播草种对退化草甸草原植物群落的影响. 草地学报, 30, 3098-3105.]

Liu ZL, Wang W, Hao DY, Liang CZ (2002). Probes on the degeneration and recovery succession mechanisms of Inner Mongolia steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 16(1), 84-91. [刘钟龄, 王炜, 郝敦元, 梁存柱 (2002). 内蒙古草原退化与恢复演替机理的探讨. 干旱区资源与环境, 16(1), 84-91.]

Luo FL, Xing YP, Wei GW, Li CY, Yu FH (2017). Clonal integration facilitates spread of *Paspalum paspaloides* from terrestrial to cadmium-contaminated aquatic habitats. *Plant Biology*, 19, 859-867.

Pan QM, Xue JG, Tao J, Xu MY, Zhang WH (2018). Current status of grassland degradation and measures for grassland restoration in Northern China. *Chinese Science Bulletin*, 63, 1642-1650. [潘庆民, 薛建国, 陶金, 徐明月, 张文浩 (2018). 中国北方草原退化现状与恢复技术. 科学通报, 63, 1642-1650.]

Pan QM, Yang YH, Huang JH (2023). Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic scientific issues. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 37, 571-579. [潘庆民, 杨元合, 黄建辉 (2023). 我国退化草原恢复的限制因子及需要解决的基础科学问题. 中国科学基金, 37, 571-579.]

Shen HH, Zhu YK, Zhao X, Geng XQ, Gao SQ, Fang JY (2016). Analysis of current grassland resources in China. *Chinese Science Bulletin*, 61, 139-154. [沈海花, 朱言坤, 赵霞, 耿晓庆, 高树琴, 方精云 (2016). 中国草地资源的现状分析. 科学通报, 61, 139-154.]

Sun QZ, Gui R (2000). Research on decline law and recovery technique of *Astragalus adsurgens* meadow on Kerqin sand land. *Acta Agrestia Sinica*, 8, 253-261. [孙启忠, 桂荣 (2000). 科尔沁沙地沙打旺草地衰退规律与恢复技术研究. 草地学报, 8, 253-261.]

Wang Q (2022). *Effect of Distubance by Plateau Pika on the Characteristics of Belowground Bud Bank and Soil Seed*

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology

Bank in Alpine Meadows. PhD dissertation, Lanzhou Univeristy, Lanzhou. 35-36. [王倩 (2022). 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物地下芽库和土壤种子库特征的影响. 博士学位论文, 兰州大学, 兰州. 35-36.]

Wuranqiqige, Wu XD, Yan RR (2009). Studies on the physical and chemical indicators of soil under different degree of degradation in *Leymus chinensis* community of Hulunbuir meadow steppe. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 23, 123-127. [乌仁其其格, 武晓东, 闫瑞瑞 (2009). 呼伦贝尔草甸草原羊草群落不同退化程度土壤理化指标. 干旱区资源与环境, 23, 123-127.]

Xu ZX, Guo LZ (2000). Strenthenning grassland construction and promoting the development of animal husbandry. *Journal of Neimongol Prataculture*, 12(3), 1-6. [许志信, 郭丽珍 (2000). 加强草原建设促进畜牧业发展. 内蒙古草业, 12(3), 1-6.]

Yan ZM, Zhang YJ, Pan L, Tang SM, Wang K, Huang D (2014). Research progress of reseeding forage legumes into natural grassland. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(29), 1-7. [阎子盟, 张玉娟, 潘利, 唐士明, 王堃, 黄顶 (2014). 天然草地补播豆科牧草的研究进展. 中国农学通报, 30(29), 1-7.]

Yang ZZ, Zhang CP, Dong QM, Yang XX, Chu H, Li XA, Wei LN, Zhang YF (2018). Effects of reseeding on plant community composition and diversity of moderately degraded alpine grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. *Acta Agrestia Sinica*, 26, 1071-1077. [杨增增, 张春平, 董全民, 杨晓霞, 褚晖, 李小安, 魏琳娜, 张艳芬 (2018). 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响. 草地学报, 26, 1071-1077.]

Zhang HS, Shao XQ, Liu GH, Han JG (2010). Effects of enclosing and shallow ploughing as improvement technologies on the vegetation restoration of degraded *Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel. meadow grassland. *Acta Agrestia Sinica*, 18, 339-344. [张洪生, 邵新庆, 刘贵河, 韩建国 (2010). 围封、浅耕翻改良技术对退化羊草草地植被恢复的影响. 草地学报, 18, 339-344.]

Zhang Q, Ma L, Zhang ZH, Xu WH, Zhou BR, Song MH, Qiao AH, Wang F, She YD, Yang XY, Guo J, Zhou HK (2019). Ecological restoration of degraded grassland in Qinghai-Tibet alpine region: degradation status, restoration measures, effects and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 39, 7441-7451. [张骞, 马丽, 张中华, 徐文华, 周秉荣, 宋明华, 乔安海, 王芳, 佘延娣, 杨晓渊, 郭婧, 周华坤 (2019). 青藏高寒区退化草地生态恢复: 退化现状、恢复措施、效应与展望. 生态学报, 39, 7441-7451.]

Zhang YJ, Zhou JQ, Yang GW, Jing JY, Liu N (2020). Theory and application of no-tillage reseeding in degraded grasslands. *Chinese Science Bulletin*, 65, 1546-1555. [张英俊, 周冀琼, 杨高文, 荆晶莹, 刘楠 (2020). 退化草原植被免耕补播修复理论与实践. 科学通报, 65, 1546-1555.]

Zhao LP, Wang D, Liang FH, Liu Y, Wu GL (2019). Grazing exclusion promotes grasses functional group dominance via increasing of bud banks in steppe community. *Journal of Environmental Management*, 251, 109589. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.109589.

Zheng HP, Chen ZX, Wang SR, Niu JY (2007). Effects of fertilizer on plant diversity and productivity of desertified alpine grassland at Maqu, Gansu. *Acta Prataculturae Sinica*, 16(5), 34-39. [郑华平, 陈子萱, 王生荣, 牛俊义 (2007). 施肥对玛曲高寒沙化草地植物多样性和生产力的影响. 草业学报, 16(5), 34-39.]

Zheng LL, Yao SM, Xue W, Yu FH (2023). Small islands of safety promote the performance of a clonal plant in cadmium-contaminated soil. *Plant and Soil*, 489, 453-464.

Zhou GY, Chen GC, Zhao YL, Wang SZ, Sun J (2005). Comparative studies on the influences of chemical fertilizer application and enclosure on alpine steppes in Qinghai Lake area II—Seasonal and annual biomass dynamics. *Pratacultural Science*, 22(1), 59-63. [周国英, 陈桂琛, 赵以莲, 王顺忠, 孙菁 (2005). 施肥和围栏封育对青海湖地区高寒草原影响的比较研究II——地上生物量季节动态. 草业科学, 22(1), 59-63.]

Zhou W, Gang C, Zhou L, Chen Y, Li J, Ju W, Odeh I (2014). Dynamic of grassland vegetation degradation and its quantitative assessment in the Northwest China. *Acta Oecologica*, 55, 86-96.

Zhu LB, Zeng ZH, Zhao BP, Wang X, Hu YG, Hai T (2008). Effect of spring rest-grazing on steppe vegetation. *Acta Agrestia Sinica*, 16(3), 278-282. [朱立博, 曾昭海, 赵宝平, 王旭, 胡跃高, 海棠 (2008). 春季休牧对草地植被的影响. 草地学报, 16(3), 278-282.]

Zhu YQ, Jian DW, Zheng W, Wang P, Li SS, Hao S, Naerkezi, Liu YH, Ailifeire (2020). Effects of improving soil fertility by planting different leguminous green manure plants under different mixed cropping patterns. *Pratacultural Science*, 37, 889-900. [朱亚琼, 简大为, 郑伟, 王朴, 黎松松, 郝帅, 娜尔克孜, 刘岳含, 艾丽菲热 (2020). 不同种植模式下豆科绿肥对土壤改良效果的影响. 草业科学, 37, 889-900.]

责任编委: 于飞海 责任编辑: 乔鲜果

DOI: 10.17521/cjpe.2024.0125

©植物生态学报 Chinese Journal of Plant Ecology