DOI:10.11686/cyxb2025484 http://cyxb.magtech.com.cn
臧志发, 杨培志. 青藏高原高山嵩草的研究进展. 草业学报, 2026, 35(11): 211－226.
ZANG Zhi-fa, YANG Pei-zhi. Research progress with *Carex parvula* on the Qinghai-Xizang Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(11): 211－226.

青藏高原高山嵩草的研究进展

臧志发[1,2],杨培志[1*]
(1. 西北农林科技大学草业与草原学院,陕西 杨凌 712100;2. 拉萨市农业农村局,西藏 拉萨 850000)

摘要:高山嵩草作为青藏高原高寒草甸的优势建群种,具有重要的生态功能和经济价值,能够有效保持水土、涵养水源,在全球碳氮循环和气候调节中具有关键作用。近年来,受人类活动和全球气候变化等因素的共同影响,高山嵩草出现不同程度的退化现象,威胁青藏高原区域生态安全与畜牧业的可持续发展。本研究系统梳理了高山嵩草在种质资源评价、种子萌发特性、生态响应与适应性、退化与恢复机制等方面的进展,涵盖种质资源遗传多样性、种子萌发限制因子与解除技术、对放牧和高原鼠兔等关键干扰因子的响应阈值、分级恢复技术体系等方面,强调了多因子(气候－放牧－鼠害)耦合作用对高山嵩草的影响,以期为高山嵩草的保护和利用提供一定参考。

关键词:高山嵩草;青藏高原;种质资源;萌发特性;退化恢复

Research progress with *Carex parvula* on the Qinghai-Xizang Plateau

ZANG Zhi-fa[1,2], YANG Pei-zhi[1*]
1. *College of Grassland and Grassland Science, Northwest A&F University, Yangling* 712100, *China*; 2. *Lhasa Municipal Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Lhasa* 850000, *China*

Abstract: *Carex parvula* is a dominant pioneer species in the alpine meadows of the Qinghai-Xizang Plateau, plays a crucial ecological role and has significant economic value. *C. parvula* effectively prevents soil erosion and maintains water resources, playing a key role in global carbon and nitrogen cycles as well as climate regulation. In recent years, due to the combined impacts of human activities and global climate change, *C. parvula* swards have exhibited varying degrees of degradation, posing a threat to the ecological security of the Qinghai-Xizang Plateau region and the sustainable development of local animal husbandry. This study systematically reviews research progress with *C. parvula*, including germplasm resource evaluation, seed germination characteristics, ecological responses and adaptability, as well as degradation and restoration mechanisms. Key topics include genetic diversity of germplasm resources, limiting factors and alleviation techniques for seed germination, response thresholds to key disturbance factors such as grazing and plateau pikas, and hierarchical restoration technology systems. The study emphasizes the coupled effects on *C. parvula* of multiple factors (climate－grazing－rodent damage), aiming to provide valuable references for its conservation and utilization.

Key words: *Carex parvula*; Qinghai-Xizang Plateau; germplasm resources; germination characteristics; degradation and restoration

收稿日期:2025-11-27;改回日期:2026-01-15
基金项目:财政部和农业农村部-国家现代农业产业技术体系资助。
作者简介:臧志发(1993－),男,河北枣强人,在读硕士。E-mail: 2521284426@qq.com
*通信作者 Corresponding author. E-mail: yangpeizhi@126.com

高山嵩草(*Carex parvula*,异名*Kobresia pygmaea*)属于莎草科(Cyperaceae),在西藏、青海、云南、四川、甘肃等地均有分布,多生于海拔3700～5300 m的山坡、沟谷的高山草甸上[1-3],草甸植被中高山嵩草的盖度40%～60%,伴生植物种包括矮生嵩草(*Carex alatauensis*,异名*Kobresia humilis*)、青藏薹草(*Carex moorcroftii*)、垂穗披碱草(*Elymus nutans*)、高原早熟禾(*Poa alpigena*)、紫花针茅(*Stipa purpurea*)、羊茅(*Festuca ovina*)、委陵菜(*Potentilla chinensis*)、垫状点地梅(*Androsace tapete*)、矮火绒草(*Leontopodium nanum*)和毛葶蒲公英(*Taraxacum eriopodum*)等。高山嵩草具有耐低温[4]、抗旱[5]、耐践踏[6]等优良特性,其开花期的粗蛋白含量占绝对干物质的19.92%[7],高于野生豆科牧草花苜蓿(*Medicago ruthenica*)开花期的粗蛋白含量(15.91%),营养价值较高,不仅能够保持水土、固存碳氮,更是当地畜牧业发展的物质基础,在维持青藏高原地区生态环境稳定方面具有重要意义。

青藏高原素有“世界屋脊”“亚洲水塔”和“地球第三极”之称,是我国重要的生态安全屏障,其生态系统以草地为主体,是我国气候变化的“敏感区”“启动区”和全球变化的“驱动机”“放大器”[8]。20世纪以来,全球气候快速变暖,青藏高原近50年来的变暖速度超过了全球同期平均升温率的2倍,升温速度达到了每10年0.3～0.4 ℃[9]。近年来,受气候变化和人类活动加剧等多重因素的共同影响,高山嵩草退化面积呈持续升高趋势。2025年6月17日,青藏高原草地植被群系图1∶500000发布,显示其分布扩张与人类活动干扰密切相关[10]。西藏第二次草原普查结果显示[11],全区草地共8.67×10^7 hm^2,天然草地已退化2.35×10^7 hm^2,约占草地总面积的26.7%,其中高山嵩草的退化尤为严重,甚至引发“黑土滩”化[12-13],这不仅会威胁青藏高原区域生态安全,还会削弱草原生产力与生态系统服务功能。

近年来,围绕高山嵩草在气候变化响应、生态功能维持、抗逆适应机制及资源管理等多方面已积累较多研究成果,为高山嵩草的遗传育种、抗逆性研究等工作创造了条件。尽管已有研究在高山嵩草的遗传背景、生理生态及恢复技术等方面取得了进展,但如何整合多学科成果,明晰其适应与退化机制,仍是当前研究的薄弱环节。本研究系统梳理了高山嵩草在种质资源评价、种子萌发特性、生态响应与适应性、退化与恢复机制等方面的进展,新增了对多因子耦合作用(如气候变暖、放牧强度和鼠兔干扰)的定量分析,并整合了遗传多样性分子标记、种子萌发突破技术(如氢氧化钠处理)以及生态阈值(如放牧和鼠兔干扰的临界点)等研究成果,以期为下一步高山嵩草的深入研究和利用提供理论参考,维持青藏高原地区的生态平衡和可持续发展。

1 种子萌发特性

种子萌发是指具有生活力的种子在适宜环境条件(水分、温度、氧气等)的诱导下,打破休眠,启动并完成从胚根突破种皮到形成幼苗的生理过程[14]。种子萌发是植物有性繁殖和生命周期中的关键环节,对种群的更新和繁衍至关重要。这一复杂的生理过程,主要受到温度、水分、氧气以及化学信号等多种因子的综合影响。高山嵩草种子的萌发主要受温度、氢氧化钠浓度等因素的影响。

1.1 氢氧化钠浓度对种子萌发的影响

高山嵩草种子萌发的主要限制因素之一是其坚硬且机械组织发达的保护性种皮[15]。该结构虽有利于抵御严寒,但也严重阻碍了水分和氧气的进入,导致野外发芽率极低。多项研究表明,化学试剂处理是打破此种物理休眠的有效手段,与其他化学试剂相比,使用氢氧化钠(NaOH)溶液处理高山嵩草种子效果显著[16-19]。它能够均匀地腐蚀掉种子表层的角质和蜡质,软化坚硬的机械组织,改善种皮的透水透气性,使水分和氧气进入,有效提高高山嵩草种子的发芽率。研究发现,经氢氧化钠(NaOH)溶液处理后的高山嵩草种子,发芽率优于赤霉素(gibberellic acid, GA)、聚乙二醇(polyethylene glycol, PEG)、硫酸(H_2SO_4)等处理。进一步研究发现,不同浓度的NaOH处理对高山嵩草种子发芽率的提升效果存在差异。褚希彤等[17]用20 g·L^{-1}的NaOH溶液对高山嵩草进行浸种处理,种子发芽率由0提高到8.67%,显著高于未经处理的对照组。黄锦华等[18]用不同浓度NaOH溶液处理嵩草种子,结果显示,40 g·L^{-1}的NaOH溶液处理下高山嵩草种子发芽率达到了46%。张国云等[19]研究结果表明,40 g·L^{-1} NaOH溶液处理下的高山嵩草种子发芽率由未经任何预处理的0提高到50%。一般认为,40 g·L^{-1}的NaOH溶液处理效果较好。针对NaOH溶液提高高山嵩草种子发芽率的作用机制,黄锦华等[18]研究了其种子

休眠前后内源脱落酸(abscisic acid, ABA)的含量,结果表明,经 40 g·L^{-1} NaOH 溶液处理后的高山嵩草种子 ABA 含量下降了 60.34%。由于 ABA 是一种重要的萌发抑制激素,其含量的下降有助于解除生理休眠,从而协同促进高山嵩草种子萌发。

1.2　温度对种子萌发的影响

温度是调控高山嵩草种子萌发的另一个关键环境因子。高山嵩草在长期适应高寒环境的过程中,形成了独特的萌发温度需求特性。研究表明,高山嵩草种子在自然条件下的发芽率极低,仅有 1% 甚至为 0[20]。王向涛等[21]研究了西藏中部高寒草甸草原植物种子萌发对试验增温的响应,结果表明,不同温度处理对高山嵩草种子萌发的直接影响不显著。高山嵩草种子擦破种皮后,在 15～25 ℃的温度内进行培养,萌发率和萌发指数得到了显著提高。研究人员采用光期 25 ℃/暗期 15 ℃的变温培养模式进行处理[22],擦破种皮后的嵩草种子平均发芽率可达到 80%。这说明高山嵩草种子萌发本身可能受种皮硬度等关键因素限制,而非单一温度。此外,作为高寒植物种子打破休眠的关键因子,冷湿层化(低温层积)[23]可软化种皮、降低休眠相关激素水平。张国云等[24]使用低温层积处理法处理高山嵩草种子,结果表明,0～4 ℃低温层积处理较未处理的蒿草种子萌发开始时间和发芽曲线峰值出现时间明显提前,萌发曲线峰值出现的时间也更加集中,较对照提前 6～8 d 完成萌发。

1.3　其他因素对种子萌发的影响

对高山嵩草种子萌发的研究除氢氧化钠浓度、温度外还包含其他方面(表 1)。邓自发等[25]对高山嵩草繁殖策略进行了研究,发现其种子在高寒环境中(年均温 −2～5 ℃)的萌发率极低,室内和野外萌发率分别为 4% 和 1%,营养繁殖和有性繁殖的比例约为 9∶1,营养繁殖为主、有性繁殖为辅的繁殖策略一定程度上影响种子的萌发。王向涛等[26]对围栏和退化条件下高山嵩草土壤种子库进行了比较研究,结果表明,围栏减少了牦牛、藏绵羊等家畜的地上干扰,使高山嵩草获得了较为充足的光照和养分,有利于植物积累资源并增加土壤种子库的数量,间接为高山嵩草种子萌发创造更有利的条件。此外,通过物理(如砂纸摩擦、针刺、低温研磨)[22]破除高山嵩草种皮能够有效解除其机械休眠,搭配冷湿层化处理可显著提升萌发率[24]。这也是高山嵩草种子野外萌发率低的重要原因之一,自然条件下需依赖冻融、动物踩踏等物理作用破坏种皮。

综上,高山嵩草种子萌发是“多因子协同调控”的结果,受到种皮特性、内源激素、温度条件以及外界环境扰动的复杂调控。通过氢氧化钠(NaOH)等化学处理软化种皮或物理划破种皮,并结合适宜的萌发温度,能够有效提

表 1　不同处理对高山嵩草种子发芽的影响

Table 1　Effects of different treatments on seed germination of *C. parvula*

处理方法 Treatment method	条件 Conditions	发芽率 Germination rate (%)	作用机制 Mechanism of action	参考文献 Reference
对照 Control	自然条件 Natural conditions	0～1.00	土壤冻融,牲畜踩踏 Soil freeze-thaw cycles and livestock trampling	[20]
化学处理 Chemical treatment (NaOH)	20 g·L^{-1}	8.67	腐蚀种皮,改善透性 Scarifying the seed coat and enhancing permeability	[17]
	40 g·L^{-1}	46.00～50.00	软化种皮,降低内源脱落酸含量 Softening the seed coat and reducing endogenous abscisic acid levels	[18－19]
物理处理 Physical treatment	砂纸摩擦 Sanding with sandpaper	0～10.00	直接破除种皮物理障碍 Directly removing the physical barrier of the seed coat	[22]
物理＋变温 Physical treatment＋temperature variation	擦破种皮后,25 ℃/15 ℃变温 After scarifying the seed coat, alternating temperatures of 25 ℃/15 ℃	80.00	破除物理休眠,提供适宜萌发温度 Breaking physical dormancy and providing suitable germination temperatures	[22]
低温层积 Low-temperature stratification	0～4 ℃湿沙埋藏 Stratification in moist sand at 0－4 ℃	＜5.00	软化种皮,调节内源激素平衡 Softening the seed coat and regulating the balance of endogenous hormones	[23－24]
综合处理 Comprehensive treatment	NaOH＋低温层积 NaOH treatment and cold stratification	45.00～50.00	协同破除物理和生理休眠 Synergistically breaking physical and physiological dormancy	[24]

高其发芽率,对青藏高原高山嵩草草地的植被恢复、生态建设和草地畜牧业生产具有积极的作用。

2 种质资源评价

2.1 遗传多样性

遗传多样性(genetic diversity),又称基因多样性,指一个物种的基因组成中遗传特征的多样性,包括种内不同种群之间或同一种群内不同个体的遗传变异性,表现为分子、细胞、个体等层次的差异[27]。对青藏高原高山嵩草遗传多样性的深入研究,为其资源评估、有效保护与合理利用奠定了科学基础。多种分子标记如扩增片段长度多态性(amplified fragment length polymorphism, AFLP)、相关序列扩增多态性(sequence-related amplified polymorphism, SRAP)研究一致表明,高山嵩草在物种和种群水平均存在较高的遗传多样性。郑红梅等[28]采用AFLP扩增技术对11个嵩草种群进行了标记分析,结果表明嵩草的11个自然种群种质资源间存在丰富的遗传多样性。刘伟等[29]借助SRAP分子标记,研究了高山嵩草种群在不同放牧强度下遗传多样性的变化规律,发现高山嵩草在放牧干扰下仍能够保持较高的遗传多样性水平。高山嵩草种群内较高的遗传多样性可能与其繁殖策略密切相关,尽管高山嵩草主要以营养繁殖为主,但实生苗的补充对维持遗传多样性至关重要[30]。进一步研究发现,高山嵩草的遗传结构与环境因子之间存在复杂关系。其种群的遗传分化受到生境异质性的影响[28],一般认为生境异质性越高,越容易阻碍基因交流,从而导致遗传分化更多的存在于种群之间。随着放牧强度的增加,种群间遗传多样性逐渐减少,遗传分化也逐渐增大[29],这说明放牧干扰减少了高山嵩草种群间的基因交流,进而引发遗传分化,导致遗传多样性的丧失。此外,多项研究证实[28-30],高山嵩草种群的遗传多样性高低、种群间的遗传距离与海拔高度和地理距离并未表现出简单的线性相关性,遗传相似系数与海拔之间无显著相关性。这可能与高山嵩草以根茎克隆生长为主的繁殖策略有关,强大的基因流在一定程度上削弱了地理隔离的影响,局部的微环境差异、特定的自然选择压力等因素共同塑造了高山嵩草复杂的遗传结构。

2.2 生长特性

高山嵩草是垫状草本植物,秆高1.0~3.5 cm,圆柱形,具细棱,基部密被褐色宿存叶鞘。叶片线形,宽约0.5 mm,与秆近等长,腹面具沟,边缘粗糙。穗状花序雄雌顺序排列,长3~5 mm,含5~7个支小穗,顶生2~3个雄性小穗,侧生雌性小穗;雌花鳞片卵形至卵状长圆形,纸质具褐色边缘;小坚果椭圆形或倒卵状椭圆形,长1.5~2.0 mm,成熟时暗褐色,无光泽[31]。高山嵩草物候期紧凑,生长季短暂,一般在5月上旬开始返青,之后经历约20 d的迅速生长阶段,在6月下旬进入开花期,随后结实。到10月中下旬枯黄,整个生育期3个多月,持青期4个多月[7]。在高寒、生长季短暂的环境中,高山嵩草依靠种子进行有性繁殖的成功率低且风险高,为了正常的生长繁殖,高山嵩草形成了以营养繁殖(无性繁殖)为主的繁殖策略[32],通过根茎和根蘖进行克隆生长,在土壤表层形成了10 cm左右的致密草根层(图1),建立了极为发达的根系系统[33],这种结构不仅在生态上发挥着水土保持的重要功能,



图1 高山嵩草草甸及植株构型

Fig. 1 *C. parvula* meadow and plant architecture

a: 高山嵩草垫状聚集生长方式 Cushion-like clumped growth pattern of *C. parvula*; b: 土壤中根系分布及生长情况 Root system distribution and growth status in the soil.

也使其具有较强的耐牧性和耐践踏能力。高山嵩草通过其独特的形态特征、紧凑的物候期以及“克隆生长为主、有性繁殖为辅”的繁殖策略，成功适应了青藏高原高寒严酷的环境。然而，其有性繁殖成功率极低，种子萌发成为种群更新的关键限制环节。当前对其生长特性的描述偏重形态和物候，对资源分配策略、克隆整合机制等内在生理生态过程的研究尚不深入。

2.3　资源价值

高山嵩草资源价值主要体现在生态、经济及遗传等多个层面。其草质柔软、营养丰富，粗蛋白含量较高，超过野生豆科牧草花苜蓿[7]，同时粗纤维含量较低，这使得其消化率高、适口性好，为牦牛、藏绵羊、藏马等牲畜所喜食，是青藏高原地区畜牧业的重要优良牧草，常作为夏秋季家畜的饲草来源。邹君洪等[34]研究了高山嵩草的饲用价值，结果表明，在营养生长期，高山嵩草的营养价值较高，高于西藏嵩草（*C. tibetikobresia*，异名 *Kobresia tibettica*）、垂穗披碱草及羊茅等植物，适合做放牧草地。高山嵩草分蘖能力较强，研究表明，适度放牧干扰，能够刺激高山嵩草的营养繁殖，使其在竞争中保持优势，有助于维持群落物种多样性[35]。高山嵩草发达根系形成致密草根层，能够有效固持土壤、防止水土流失，在维持区域生态平衡方面起着关键作用。其作为高寒生态系统的关键种，巨大的碳汇功能在应对气候变化方面具有潜在生态价值。王文颖等[36]对高寒草甸植物吸收土壤氮素多元化途径的研究表明，高山嵩草能直接吸收土壤中的有机氮源（如甘氨酸），并可能与外生菌根真菌共生，这种能力在氮元素稀缺的高山土壤中极具竞争优势。高山嵩草在长期适应高寒环境的过程中[37]，形成了强大的生理生态适应性和抗逆性，具备耐寒、耐旱、耐践踏、耐风雪、耐放牧的特性。研究表明[4−5]，其叶片半致死温度（lethal temperature 50，LT_{50}）可低至 −25 ℃以下，在 5～15 ℃内仍能维持较高的光合速率与光合系统Ⅱ（photosystem Ⅱ，PSⅡ）活性，对强光和干旱交互胁迫表现出较强的光保护能力与胁迫适应潜力。高山嵩草集优质的饲用价值、关键的生态价值与独特的抗逆基因价值于一身，是青藏高原生态与经济系统中的重要一环。

目前，高山嵩草的资源价值正面临着过度放牧和气候变化等因素的影响，过度放牧会抑制其生长，导致退化，甚至演变为生产力极低的“黑土滩”，造成生态系统碳汇功能减弱和水土流失加剧[38]。杜雪燕等[39]对高山嵩草草地牧草营养价值与载畜量的研究表明，在青草期高山嵩草的营养价值和载畜量最高，牧草产量、营养价值和最适载畜量随物候期推进呈现先升高后降低的趋势。因此，科学地评估、保护和可持续利用其资源价值，对于维护区域生态环境和支持畜牧业发展具有长远的意义。

3　生态响应与适应性

3.1　对温度的适应

低温胁迫会导致植物叶绿体膜结构破坏、细胞膜流动性降低、光合作用和呼吸作用受抑制以及根系吸收功能下降等问题，严重时可导致植株死亡[40]。高山嵩草光合结构对低温胁迫表现出较强的适应性。师生波等[41]研究了青藏高原高山嵩草光合功能对模拟夜间低温的响应，结果表明，0 ℃夜间低温未影响高山嵩草光合机构活性，但在较低光强条件下导致光合诱导时间延长。进一步的研究[4]揭示了低温是影响高山嵩草 PSⅡ最大光化学量子效率（variable fluorescence/maximum fluorescence，F_v/F_m）的关键因素，其叶片 F_v/F_m 的适宜温度在 5 和 15 ℃之间，最适温度在 10 ℃左右，变异系数较小。生理上，其通过积累脯氨酸等渗透调节物质增强抗寒性。李莉莎等[42]对高山嵩草叶、根抗寒性生理特征进行了研究，结果表明，高山嵩草叶片脯氨酸含量在返青期最高，根中脯氨酸含量在植物生长中后期较高，这种渗透调节物质的积累有助于增强细胞的抗寒能力。高山嵩草长期生长在年均温约 0 ℃的高海拔寒冷气候中，能够通过调节细胞膜透性、提高抗氧化酶活性及积累渗透调节物质等生理生化变化来应对低温胁迫。

近年来，青藏高原气候变暖[43]对高山嵩草的生理特性及物候产生了影响。模拟增温试验表明[44]，适度升温可缓解低温胁迫，提高光合能力，但物候期（如返青、开花）的推迟也可能影响其生殖投入。增温处理能降低高山嵩草体内的丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量，使过氧化物酶（peroxidase，POD）、超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）活性提高 20% 以上，叶绿素浓度也呈增加趋势，说明增温减轻了低温胁迫，增强高山嵩草光合作用能力，从而促进植被生长。作为植物对气候变化最明显和敏感的响应特征，物候变化是一种植物对气候与环

境变化最敏感且易观测的综合标志。夏璟钰等[45]针对那曲地区高山嵩草物候对增温的响应进行了研究,结果表明,高山嵩草返青、现蕾和开花等物候期的推迟幅度与温度升高幅度呈正相关关系。黄瑞灵等[46]关于长江源地区高山嵩草物候对气候变化的响应研究也表明高山嵩草物候期与生长季各月气温呈显著的正相关关系。总体而言,适度的增温对高山嵩草的光合作用能力起到了促进作用,有利于其生理代谢和生长[47-48]。Niu等[49]研究了季节性增温对高山嵩草的影响,结果表明,高山嵩草在面临增温(尤其是生长季增温)不利影响时采取胁迫回避策略,这种保守策略导致高山嵩草的频度和株高降低,最终引起植物群落退化,这从分子层面解释了其对增温的生理响应机制。此外,增温背景下高山嵩草可能面临氮限制增加的情况,其氮磷重吸收效率比(nitrogen resorption efficiency:phosphorus resorption efficiency, NRE:PRE)与氮磷比(nitrogen:phosphorus, N:P)表现出相同的变化趋势[50]。现有研究多集中在短期增温效应方面,长期气候变暖对其种群动态与群落结构的深远影响仍需持续观测。

3.2 放牧干扰的响应

放牧家畜的选择性采食、践踏等行为,直接影响高山嵩草的生长发育和生理状况。适度放牧对高山嵩草产生了积极的影响,家畜的啃食能够刺激其分蘖,增强营养繁殖能力。在与其他植物的竞争中,适度放牧因家畜选择性采食不耐牧的禾本科植物(如紫花针茅),间接为植株矮小但耐牧性较强的高山嵩草创造了更有利的生长环境,促进了高山嵩草的生长,增加了优势度[51]。付娟娟等[52]研究了高山嵩草营养成分对放牧的响应,结果表明,适度放牧下,高山嵩草能通过补偿性生长等机制,促进对土壤氮、钙和磷的吸收,增加体内粗蛋白含量,并降低粗纤维含量,改善牧草品质。

然而,近年来的过度放牧对高山嵩草造成了显著的负面影响。过度频繁的采食会削弱植株的竞争能力和有性繁殖能力。许岳飞等[53]、周国利等[54]、高永恒等[55]和益西措姆等[56]研究了放牧强度对高山嵩草的影响,结果表明,随着放牧强度的增加,高山嵩草的植株高度和盖度降低(表2),优势地位下降,被适口性差的杂类草所取代。同时,过度放牧导致的土壤紧实、孔隙度减小、透气性和透水性变差[54],以及有机质[6]、全氮和速效氮磷[53]等关键养分流失等问题,对高山嵩草的生长造成了不良影响。综上所述,适度放牧在一定程度上有利于高山嵩草的生长发育和维持其竞争力,而过度放牧会抑制其生长,甚至导致草场退化。

表2 不同放牧强度对高山嵩草盖度、密度及高度的影响

Table 2 Effects of different grazing intensities on coverage, density, and height of *C. parvula*

放牧处理 Grazing treatment	盖度 Coverage (%)	密度 Density (%)	高度 Height (cm)	参考文献 Reference
对照 Control	72.00±11.27a	78.33±23.29c	2.39±0.22a	[56]
适度放牧 Moderate grazing	66.89±7.68a	87.89±6.43b	2.00±0.53a	
重度放牧 Heavy grazing	64.22±11.08a	90.78±20.24a	1.73±0.37b	

注:不同字母表示差异显著($P<0.05$),下同。

Note: Different letters indicate significant differences ($P<0.05$), the same below.

3.3 高原鼠兔的干扰效应

高原鼠兔(*Ochotona curzoniae*)是青藏高原的特有种和关键种,是兔形目鼠兔科鼠兔属哺乳动物,营家族式群居生活,又称黑唇鼠兔,主要分布在青海、西藏、四川等海拔3100~5100 m的高寒草甸和草原地带。由于高原鼠兔偏好植被低矮的开阔环境,采食以高山嵩草为主的莎草科植物,穴居并形成复杂洞系,对高山嵩草造成了广泛的影响[57]。张红艳等[58]研究了高原鼠兔干扰对高山嵩草繁殖分配的影响,结果表明,高山嵩草的总生物量和地上生物量随高原鼠兔干扰强度增加呈先增加后降低趋势,而生殖枝与营养枝的比值以及根冠比呈先降低后增加趋势。进一步研究发现,随着高原鼠兔干扰强度和年份的增加,高山嵩草的繁殖分配由营养生长转向生殖生长,营养资源更多地向生殖生长倾斜,高山嵩草的重要值呈下降趋势[59-60]。

多项研究表明,高原鼠兔的有效洞口数密度对高山嵩草生长呈现出典型的“阈值效应”。当高原鼠兔有效洞

口数密度小于21个·625 m^{-2}时，有利于高山嵩草的生长，而当超过这个数值时，高山嵩草的植株高度、地上生物量等均呈下降趋势（表3），高山嵩草的优势地位受到削弱，其优势度逐渐下降[61-62]。这一发现为高原鼠兔种群管理提供了生态学依据。贾婷婷等[63]研究了有效洞穴密度对高山嵩草生态位的影响，结果表明，当有效洞穴密度低于或等于21个·625 m^{-2}时，优势种高山嵩草生态位宽度位居第一，超过这个密度生态位宽度下降。此外，高原鼠兔的干扰还会影响高山嵩草的叶片养分含量及其化学计量特征。李倩倩等[64]研究发现，高山嵩草叶片N含量随高原鼠兔有效洞穴密度增加而显著增加，但叶片P含量表现为先增加后降低的趋势，叶片N:P呈先降低后增加趋势。这说明高原鼠兔的干扰驱动了高山嵩草在生物量分配、繁殖策略和养分代谢等方面的适应性调整，因此，科学管理高原鼠兔的干扰强度并进行动态监测与评估，将其种群数量控制在生态阈值以内，对于维持高山嵩草的稳定生长以及生态系统的健康至关重要。

表3　高原鼠兔有效洞穴密度对高山嵩草的影响

Table 3　Effects of effective burrow density of *O. curzoniae* on *C. parvula*

主要指标 Main indicators	有效洞穴密度 Available burrow densities				参考文献 Reference
	10 No.·625 m^{-2}	15 No.·625 m^{-2}	21 No.·625 m^{-2}	31 No.·625 m^{-2}	
优势度 Dominance	0.191	0.181	0.163	0.152	[61]
重要值 Importance value	0.173	0.147	0.149	0.128	[62]
分布格局 Distribution pattern	聚集分布 Clumped distribution	聚集分布 Clumped distribution	随机分布 Random distribution	均匀分布 Uniform distribution	[62]
生态位宽度 Niche breadth	0.476	0.474	0.475	0.472	[63]
生物量 Biomass（g·m^{-2}）	34.000	28.000	30.000	13.000	[64]
叶片氮含量 Leaf nitrogen content（mg·g^{-1}）	14.300b	14.800a	15.000a	14.800a	[64]
叶片磷含量 Leaf phosphorus content（mg·g^{-1}）	1.800c	2.200a	2.200a	2.000b	[64]
氮:磷 Nitrogen:phosphorus	8.000a	6.800c	6.900c	7.300b	[64]

4　退化与恢复机制

4.1　高山嵩草的退化

近年来，由于青藏高原恶劣的环境因素以及人类不合理的利用方式，导致高山嵩草个体生长与繁殖功能持续衰退，草地生态环境日趋恶化[65]，青藏高原区域生态保护和社会发展功能被削弱。气候变化被认为是高山嵩草退化的一个重要因素。全球变暖导致青藏高原地区气温升高，降水格局发生变化[66]，打破了高山嵩草长期适应的水热平衡，增温导致的生理干旱与物候紊乱，使其生长进程受阻。过度放牧也是高山嵩草退化的主要原因之一。魏兴琥等[67]对那曲地区中部高山嵩草草甸不同超载程度草地植被进行了调查分析，结果表明，定居点附近超载高达3.73倍，超载最轻的草地也达到1.75倍。家畜的高频啃食直接破坏高山嵩草的生长点，导致植株高度难以提升，光合组织持续损失，削弱了高山嵩草的营养繁殖与竞争能力，影响高山嵩草个体的自然更新。过度放牧直接破坏其生长点，削弱繁殖能力；气候变暖则通过改变水热平衡加剧生理干旱，影响物候进程。

高山嵩草退化过程中，个体生长与繁殖特性发生显著改变。彭艳等[68]研究表明，随着退化程度的加剧，高山嵩草的优势度显著下降，植株高度、单株地上生物量持续降低。同时，土壤总空隙度、毛管孔隙度以及土壤总库容呈现下降趋势[69]，土壤碳含量和体积含水量与地下生物量均呈现显著的正相关关系[70]，土壤有机碳、全氮、全磷、速效氮磷钾等关键养分含量显著下降[71]，这些变化直接限制高山嵩草根系发育与水分吸收，导致个体生长发育受阻。李希来等[72]研究了不同退化程度“黑土滩”高山嵩草的克隆生长特性，结果表明，随着退化程度加剧，高山嵩草的繁殖策略由最初的“有性生殖和无性生殖相对均衡”转变为“舍弃有性生殖，强化营养繁殖”，优先将资源分配给营养分株。极度退化的草地已呈现典型的“黑土滩”景观，克隆生长严重受阻，营养繁殖和种子繁殖能力均降至

极低水平。林丽等[73]研究了高山嵩草的稳态特征及退化演替过程,结果表明,当退化超过生态阈值时,系统各组分(植被-土壤-微生物)的异步性响应和负反馈机制被破坏,高山嵩草可能从“被动退化”(可逆)转为“主动退化”(不可逆)。

4.2 高山嵩草的保护与恢复

近年来,各地通过技术示范、工程干预和科学管理等措施,使得高山嵩草的保护与恢复取得一系列积极进展。当前成效表明,短期工程干预(如围栏封育)与长期生态调控的结合可有效促进其生长与繁殖功能的修复。围栏封育是提高草地生产力的重要手段之一[74-75],研究表明,短期围栏禁牧下高山嵩草的高度增加(表4),还可以促进土壤种子库的自然恢复和积累[39],增加繁殖体的数量,为高山嵩草个体的自然更新奠定基础。围栏禁牧能够短期内恢复高山嵩草植株形态和生物量,但长期可能导致物种多样性降低[76],需要与动态放牧相结合。肖金玉等[77]的研究进一步细化了管理策略,对高山嵩草轻度退化的区域推行科学划区轮牧,通过控制放牧强度与周期可以促进高山嵩草个体的自然更新。这种“恢复与利用动态平衡”的模式,既能逐步提升高山嵩草的恢复,又能通过草畜资源优化配置实现畜产品稳定产出,推动高山嵩草的可持续发展。因此,在长期以单一畜种牦牛为主的高寒草甸,合理规划牦牛放牧强度[78-79],对维持高山嵩草持续健康生长至关重要。

表4 围栏封育与自由放牧对高山嵩草的影响

Table 4 Effects of fencing enclosure and free grazing on *C. parvula*

围封年限 Enclosure duration	盖度 Coverage (%)	高度 Height (cm)	营养枝数 Number of vegetative branches (No.·plant^{-1})	生殖枝数 Number of reproductive branches (No.·plant^{-1})	地上生物量 Aboveground biomass (g·m^{-2})	重要值 Importance value	参考文献 Reference
围封10年 Fenced and ungrazed for ten years	9.6b	1.33±0.72a	23.41±4.58b	11.54±3.67a	0.16±0.06a	0.262	[74-75]
围封5年 Fenced and ungrazed for five years	13.2b	2.16±0.15a	21.77±0.68b	11.27±3.01a	0.16±0.08a	0.272	
自由放牧 Free grazing grassland	97.1a	1.66±0.15a	35.28±5.31a	11.80±7.11a	0.14±0.13a	0.379	

研究表明[80],高山嵩草严重退化时,土壤-植被间水分和营养供求失调,此时仅靠围栏封育难以恢复。在阶段性围封禁牧基础上,通过氢氧化钠(NaOH)等处理打破种子休眠,补播高山嵩草种子[81],并结合施肥[82]和划破草皮等人工干预措施能够加速生态修复。冯忠心等[83]研究了补播和划破草皮对高山嵩草恢复的影响,结果表明,划破草皮能够改善土壤通透性、渗水性和蓄水保墒能力,为高山嵩草种子萌发和幼苗定植创造有利苗床条件,而与补播配合时,能显著提升个体密度与单株生物量,同时增加个体间的生长均匀度。此外,施肥作为一种外部干预措施,也被广泛应用于草地恢复中,在划破草皮基础上附加施肥,能更快补充养分,短期内对地上生物量提升的效果显著。都耀庭[84]研究发现,施用化肥(如尿素)能够显著提高高山嵩草的地上生物量,相比之下,有机肥的效果则不太明显,这可能与其释放速度较慢有关。樊博等[85]研究进一步表明,采取划破草皮加施肥的措施对高山嵩草恢复效果最佳,显著优于单一划破草皮措施或划破草皮加补播的联合措施。

综上所述,针对高山嵩草退化问题,需采取差异化恢复策略(表5)。轻度退化区,应以适度放牧管理为主,通过家畜采食调节竞争,促进高山嵩草营养繁殖。中、重度退化区,需人工辅助更新,如结合划破草皮、种子补播和施肥,并短期围封保障幼苗定植。“黑土滩”型极度退化区,依靠高山嵩草本身难以自然恢复,需重建人工或半人工草地,逐步改善生境后再引入高山嵩草。现有恢复技术虽取得一定成效,但措施组合的长期生态效应、成本效益分析以及恢复过程中的群落演替规律仍有待系统评估。

5 总结与展望

高山嵩草作为青藏高原高寒草甸生态系统的关键建群种与优势牧草,在维系区域生态安全(如水土保持、碳氮固存)和支持畜牧业可持续发展方面发挥着不可替代的双重作用。本研究系统梳理了近年来高山嵩草在种质

表 5　高山嵩草主要恢复措施及成效

Table 5　Main restoration measures and their effects of *C. parvula*

恢复措施 Restoration measures	适用退化程度 Applicable degradation level	主要成效 Primary outcomes	潜在问题 Potential issues	参考文献 Reference
围栏封育 Fenced enclosure	轻度～中度 Mild to moderate	封育3～5年，地上生物量可恢复至退化前的70%～80%，植被盖度显著提升。After 3－5 years of grazing exclusion, the aboveground biomass can recover to 70%－80% of the pre-degradation level, with a significant increase in vegetation cover.	长期(＞5年)围栏可能导致物种多样性降低。Long-term fencing (over 5 years) may lead to a reduction in species diversity.	［39,74,76］
划破草皮 Turf slitting	中度 Moderate	有效改善土壤物理结构，提升渗透性。Effectively improving soil physical structure and enhancing permeability.	单独使用对植被恢复的直接贡献有限；操作不当可能加剧水土流失。When used alone, it has limited direct contribution to vegetation restoration; improper implementation may exacerbate soil erosion.	［7,83］
划破草皮＋补播 Turf slitting＋reseeding	中度～重度 Moderate to severe	能显著提高高山嵩草个体密度(增加约50%)，促进植株均匀生长。It can significantly increase the individual density of *Kobresia pygmaea* (by approximately 50%) and promote uniform plant growth.	补播成功率高度依赖于种子预处理(如NaOH浸泡)效果。The success rate of reseeding is highly dependent on the effectiveness of seed pretreatment, such as NaOH soaking.	［81,83］
划破草皮＋施肥 Turf slitting＋fertilization	中度～重度 Moderate to severe	短期内(1～2年)对地上生物量提升效果最快、最显著，增幅在30%以上。In the short term (1－2 years), it yields the most rapid and significant effect on increasing aboveground biomass, with a potential increase of over 30%.	化肥长期施用存在土壤板结风险；有机肥见效慢。Long-term application of chemical fertilizers carries the risk of soil compaction; organic fertilizers are slow to show effects.	［82,84－85］
人工种草(重建) Artificial reseeding (reestablishment)	重度～“黑土滩” Severe to “black soil beach”	快速建立植被覆盖，是极度退化区生态系统重建的必要初始步骤。Rapid establishment of vegetation cover is an essential initial step for ecosystem reconstruction in severely degraded areas.	成本高昂，需持续养护；群落结构简单，稳定性较差。Costly and requires ongoing maintenance; the community structure is simple with poor stability.	［81－82］

资源评价(涵盖遗传多样性、生长特性与资源价值)、种子萌发特性(关键限制因素与解除途径)、生态响应与适应性(对温度、放牧、高原鼠兔干扰的响应机制)以及退化与恢复机制等方面的研究进展。现有研究已初步揭示了其适应高寒环境的生理生态策略，以及在多重胁迫下的退化过程，并为退化草甸的恢复实践(如围栏封育、划破草皮、补播施肥等综合技术)提供了重要的科学依据。

尽管已取得显著进展，但当前研究仍存在一些薄弱环节。首先，对高山嵩草适应性内在分子机制的认识尚浅，缺乏对其关键抗逆基因功能及其调控网络的深入解析。其次，在生态响应方面，多数研究侧重于单一因子(如温度或放牧)的影响，对气候变化(升温、降水格局改变)、人类活动(放牧制度调整)及生物干扰(高原鼠兔)等多因子耦合效应的研究仍较缺乏，难以准确预测未来情景下生态系统的演变趋势。再者，种子萌发率低仍是植被自然更新与人工恢复的主要瓶颈，其休眠与萌发的综合调控网络尚不清晰，高效、低成本的种子处理与育苗技术研发滞后。最后，现有恢复技术多侧重于短期工程措施效应评估，对其长期生态效益、可持续性以及与社会经济维度相结合的适应性管理范式研究不足。

基于以上分析，未来研究可在以下方面深化拓展：

1)深入解析抗逆分子机制：综合利用基因组学、蛋白组学、代谢组学等现代生物技术，挖掘高山嵩草耐寒、耐旱、耐践踏等优良性状的关键基因，阐明其分子调控通路，为抗逆种质创新与分子育种提供理论支撑与基因资源。

2)加强多因子耦合效应研究：未来应侧重开展控制试验与长期定位观测，揭示气候变化、放牧制度和高原鼠兔活动等多重驱动因子的交互作用及其对高山嵩草种群动态、群落结构及生态系统功能的复杂影响，构建更准确

的生态响应与演化预测模型。

3)突破种子萌发与育苗技术瓶颈:重点研究种子深度休眠的生理与分子机制(如种皮结构、激素平衡、信号转导),探索物理、化学及生物处理相结合的高效破眠技术,并研发低成本、高成活率的人工育苗与机械化播种技术,为大规模生态修复提供种苗保障。

4)优化并评估生态恢复技术体系:针对不同退化阶段(轻度退化、"黑土滩")和区域特点,需要系统研究并优化包括适度放牧、围栏封育、物理处理(划破草皮)、生物措施(补播、微生物肥料)等在内的近自然、综合性恢复技术组合,并对其长期生态效益(如生物多样性恢复、碳汇功能提升)、经济可行性及社会可接受度进行综合评估。

5)构建可持续适应性管理范式:推动生态学与牧区社会学、经济学等多学科交叉,研究并建立基于"生态红线"和"以草定畜"原则的适应性管理策略,例如推行科学的划区轮牧、季节性休牧与冬季补饲相结合的模式,实现生态保护与牧民生计可持续发展的双赢目标。通过多学科的交叉融合与持续创新,提升高山嵩草优质牧草价值与生态保护功能,实现生态效益与经济效益的双赢。

参考文献 References:

[1] Wang W Y, Wang Q J, Deng Z F. Communities structural characteristic and plant distribution pattern in alpine *Kobresia* meadow, Haibei region of Qinghai Province. Acta Phytoecologica Sinica, 1998, 22(4): 336-343.
王文颖, 王启基, 邓自发. 青海海北地区高山嵩草草甸植物群落的结构特征及其分布格局. 植物生态学报, 1998, 22(4): 336-343.

[2] Wu L, Wang M, Ouyang H, *et al*. Spatial distribution modelling of *Kobresia pygmaea* (Cyperaceae) on the Qinghai-Tibetan Plateau. Journal of Resources and Ecology, 2017, 8(1): 20-29.
吴良, 王敏, 欧阳华, 等. 青藏高原高山嵩草(*Kobresia pygmaea*)空间分布模拟. 资源与生态学报, 2017, 8(1): 20-29.

[3] Wang C T, Long R J, Ding L M. Study of alpine meadow of basic characteristic in Qinghai-Tibetan Plateau. Pratacultural Science, 2004, 21(8): 16-19.
王长庭, 龙瑞军, 丁路明. 青藏高原高寒嵩草草甸基本特征的研究. 草业科学, 2004, 21(8): 16-19.

[4] Shi S B, Shi R, Zhou D W, *et al*. Effects of low temperature on photochemical and non-photochemical energy dissipation of *Kobresia pygmaea* leaves. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(10): 1441-1452.
师生波, 师瑞, 周党卫, 等. 低温对高山嵩草叶片光化学和非光化学能量耗散特征的影响. 植物生态学报, 2023, 47(10): 1441-1452.

[5] Shi S B, Li T C, Wang W, *et al*. Interaction effect of soil drought and strong light on photosynthetic performance of *Kobresia pygmaea* on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(4): 724-731, 748.
师生波, 李天才, 王伟, 等. 土壤干旱和强光交互作用对青藏高原高山嵩草光合功能的影响. 草地学报, 2017, 25(4): 724-731, 748.

[6] Su Z S, Sun Y F, Fu J J, *et al*. Effects of grazing intensity on soil nutrient of *Kobresia pygmaea* meadow in Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2015, 32(3): 322-328.
苏振声, 孙永芳, 付娟娟, 等. 不同放牧强度下西藏高山嵩草草甸土壤养分的变化. 草业科学, 2015, 32(3): 322-328.

[7] Miao Y J, Xu Y M, Hu T M, *et al*. Germplasm resources evaluation of *Kobresia pygmaea* in Tibet. Caoye Yu Xumu, 2008(11): 10-13.
苗彦军, 徐雅梅, 呼天明, 等. 高山嵩草种质资源评价研究. 草业与畜牧, 2008(11): 10-13.

[8] Yao T D, Thompson L, Yang W, *et al*. Different glacier status with atmospheric circulations in Tibetan Plateau and surroundings. Nature Climate Change, 2012, 2(9): 663-667.

[9] Chen D L, Xu B Q, Yao T D, *et al*. Assessment of past, present and future environmental changes on the Tibetan Plateau. Science Bulletin, 2015, 60(32): 3025-3035.
陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估:过去、现在与未来. 科学通报, 2015, 60(32): 3025-3035.

[10] Wang Y F. Floristic map of grassland vegetation in the Qinghai-Tibet Plateau (1:500000). Beijing: Science Press, 2025.
王艳芬. 青藏高原草地植被群系图1:500000. 北京: 科学出版社, 2025.

[11] Department of Agriculture and Animal Husbandry, Xizang Autonomous Region. Second grassland census data show: Tibet grassland area exceeds 1.3 billion mu. Agricultural Science-Technology and Information, 2016(30): 142.
西藏自治区农牧厅. 第二次草原普查数据显示:西藏草原面积超13亿亩. 农业科技与信息, 2016(30): 142.

[12] Li X L. Natural factors and formative mechanism of "Black Beach" formed on grassland in Qinghai-Tibetan Plateau. Pratacultural Science, 2002, 19(1): 20－22.
李希来. 青藏高原"黑土滩"形成的自然因素与生物学机制. 草业科学, 2002, 19(1): 20－22.

[13] Han L H, Shang Z H, Ren G H, *et al*. The response of plants and soil on black soil patch of the Qinghai-Tibetan Plateau to variation of bare-patch areas. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(1): 1－6.
韩立辉, 尚占环, 任国华, 等. 青藏高原"黑土滩"退化草地植物和土壤对秃斑面积变化的响应. 草业学报, 2011, 20(1): 1－6.

[14] Song S Q, Tang C F, Cheng H Y, *et al*. Research progress in regulation of seed germination. Scientia Sinica Vitae, 2024, 54(7): 1226－1253.
宋松泉, 唐翠芳, 程红焱, 等. 种子萌发调控的研究进展. 中国科学(生命科学), 2024, 54(7): 1226－1253.

[15] Zhang S R. Revision of *Kobresia* (Cyperaceae) in Xizang (Tibet). Acta Phytotaxonomica Sinica, 2004, 42(3): 194－221.
张树仁. 西藏嵩草属(莎草科)的修订. 植物分类学报, 2004, 42(3): 194－221.

[16] Zhang G Y, He X H, Guo F Z. Application of SEM in research of *Kobresia* seeds structures and germination. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(28): 9670－9673.
张国云, 何晓华, 郭付振. 扫描电镜在嵩草种子结构及发芽研究中的应用. 安徽农业科学, 2014, 42(28): 9670－9673.

[17] Chu X T, Fu J J, Sun Y F, *et al*. Research on germination of Tibet *Kobresia* from different altitudes. Pratacultural Science, 2013, 30(7): 1025－1030.
褚希彤, 付娟娟, 孙永芳, 等. 不同海拔梯度嵩草种子的萌发机制. 草业科学, 2013, 30(7): 1025－1030.

[18] Huang J H, Hu T M, Zheng H M. The break dormancy and quantity of abscisic acid in *Kobresia* Willd. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(3): 152－155.
黄锦华, 呼天明, 郑红梅. 3种藏嵩草种子休眠及内源脱落酸含量的研究. 西北农业学报, 2009, 18(3): 152－155.

[19] Zhang G Y, Hu T M, Wang Q Z, *et al*. Effects of different treatments on structure of seed vessels and germination percentage of 7 species of *Kobresia* seeds in Tibet. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2008, 36(11): 21－28.
张国云, 呼天明, 王佺珍, 等. 不同处理对西藏7种嵩草种子果皮结构和发芽率的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(11): 21－28.

[20] Li X L, Huang B N, Qiao Y M, *et al*. Seedling development and biomass accumulation of *Kobresia* on the Qinghai-Tibetan Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 1996, 5(4): 48－54.
李希来, 黄葆宁, 乔有明, 等. 青藏高原几种嵩草的生物量及其幼苗生长发育的初步研究. 草业学报, 1996, 5(4): 48－54.

[21] Wang X T, Niu B, Zhang X Z, *et al*. Seed germination in alpine meadow steppe plants from central Tibet in response to experimental warming. Sustainability, 2020, 12(5): 1884.

[22] Hu T M, Wang Q Z, Miao Y J, *et al*. Method for germination treatment of Tibetan *Kobresia* seeds: China, 200710017658. 2007-10-31.
呼天明, 王佺珍, 苗彦军, 等. 西藏嵩草种子萌发处理方法: 中国, 200710017658. 2007-10-31.

[23] Luo X, Pan Y Z, Yang X J, *et al*. Effect of cold stratification on dormancy and germination of four *Carex* species seeds. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(3): 117－123.
罗弦, 潘远智, 杨学军, 等. 低温层积处理对4种苔草种子休眠与萌发的影响. 草业学报, 2010, 19(3): 117－123.

[24] Zhang G Y, Li Y F, Hu T M. Effects of sodium hydroxide and cold stratifying treatments on germination of *Kobresia* seeds. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2010, 19(12): 104－108.
张国云, 李艳芳, 呼天明. 氢氧化钠及低温层积处理对嵩草种子萌发的影响. 西北农业学报, 2010, 19(12): 104－108.

[25] Deng Z F, Xie X L, Zhou X M, *et al*. Study on reproductive ecology of *Kobresia pygmaea* population in alpine meadow. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2002, 22(2): 344－349.
邓自发, 谢晓玲, 周兴民, 等. 高寒草甸小嵩草种群繁殖生态学研究. 西北植物学报, 2002, 22(2): 344－349.

[26] Wang X T, Gao Y, Miao Y J, *et al*. Comparison of soil seed banks under fenced and degraded conditions in alpine meadow of Tibet. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 203－209.
王向涛, 高洋, 苗彦军, 等. 围栏和退化条件下西藏高山嵩草草甸土壤种子库的比较. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 203－209.

[27] Li Q X, Zhao Q F. Genetic diversities of *Kobresia royleana* in the east-southern of Qinghai-Tibet Plateau. Chinese Journal of Grassland, 2009, 31(3): 36－40.
李巧峡, 赵庆芳. 青藏高原喜马拉雅嵩草的遗传多样性研究. 中国草地学报, 2009, 31(3): 36－40.

[28] Zheng H M, Hu T M, Wang Q Z, *et al*. Research of genetic diversity in seven *Kobresia* by AFLP Tibet Plateau of China. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(9): 2820－2825.
郑红梅, 呼天明, 王佺珍, 等. 青藏高原7种嵩草遗传多样性AFLP研究. 中国农业科学, 2008, 41(9): 2820－2825.

[29] Liu W, Wang X, Gan Y M, *et al*. Genetic diversity of *Kobresia pygmaea* populations along a grazing gradient. Chinese Journal of Plant Ecology, 2009, 33(5): 966－973.
刘伟, 王曦, 干友民, 等. 高山嵩草种群在放牧干扰下遗传多样性的变化. 植物生态学报, 2009, 33(5): 966－973.

[30] Li X, Hu X Y, Yang Y P. Research of important forage *Kobresia pygmaea* in Qinghai-Tibet Plateau. Caoye Yu Xumu, 2013(1): 30－39.
李雄, 胡向阳, 杨永平. 青藏高原重要牧草高山嵩草的研究现状. 草业与畜牧, 2013(1): 30－39.

[31] Wei W, Zhou J J, Baimagaweng, *et al*. Study of resource investigation of *Kobresia* in Tibetan Plateau. Chinese Wild Plant Resources, 2019, 38(3): 80－85.
魏巍, 周娟娟, 白玛嘎翁, 等. 西藏高原嵩草属植物资源调查研究. 中国野生植物资源, 2019, 38(3): 80－85.

[32] Gao X Z, Li X L, Ma G H, *et al*. A primary study on propagation strategy of *Kobresia pygmaea* and *Kobresia humilis* under different degenerative gradation in alpine meadow. Caoye Yu Xumu, 2008(1): 7－11.
高新中, 李希来, 马桂花, 等. 不同退化高寒草甸矮嵩草和高山嵩草无性系繁殖规律. 草业与畜牧, 2008(1): 7－11.

[33] Xiao Y, Wang G X, Yang Y, *et al*. Effect of simulative warming on growth and antioxidative characteristics of *Kobresia pygmaea* and *K. tibetica* in the permafrost region of Qinghai-Tibetan Plateau, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(4): 1161－1167.
肖瑶, 王根绪, 杨燕, 等. 模拟增温对青藏高原多年冻土区小嵩草和藏嵩草生长与抗氧化特征的影响. 应用生态学报, 2017, 28(4): 1161－1167.

[34] Zou J H, Liu L, Tang C J, *et al*. Wild forage resources and evaluation of their feeding value in natural grassland of northwest Sichuan. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(2): 461－467.
邹君洪, 刘琳, 唐川江, 等. 川西北天然草地野生饲用植物资源及饲用价值评价. 草地学报, 2020, 28(2): 461－467.

[35] Xu Y F, Fu J J, Yixicuomu, *et al*. Effects of different grazing intensities on community characteristics and soil physicochemical properties of alpine *Kobresia* meadows in Tibet//Proceedings of the symposium on the integrated development of agriculture and animal husbandry in northwest China. Yangling: Northwest A&F University, 2016.
许岳飞, 付娟娟, 益西措姆, 等. 不同放牧强度对西藏高山嵩草草甸群落特征和土壤理化性质的影响//西北地区农牧结合发展草牧业研讨会论文集. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.

[36] Wang W Y, Ma Y G, Xu J, *et al*. Study on diversified pathways for soil nitrogen uptake by plants in alpine *Kobresia humilis* meadows. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42(8): 1264－1272.
王文颖, 马永贵, 徐进, 等. 高寒矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸植物吸收土壤氮素的多元化途径研究. 中国科学(地球科学), 2012, 42(8): 1264－1272.

[37] Yang Y, Wang G X, Yang L D, *et al*. Physiological responses of *Kobresia pygmaea* to warming in Qinghai-Tibetan Plateau permafrost region. Acta Oecologica, 2012, 39(1): 109－116.
杨阳, 王根绪, 杨林栋, 等. 青藏高原多年冻土区高山嵩草对增温的生理响应. 生态学报, 2012, 39(1): 109－116.

[38] Huo J J, Song M H. Changes in nitrogen uptake rate of plant species in different degradation stages of an alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(2): 16－26.
霍佳娟, 宋明华. 青藏高原高寒草甸不同退化阶段植物氮利用速率变化. 草业学报, 2025, 34(2): 16－26.

[39] Du X Y, Chai S T, Wang X, *et al*. Study on nutritional value and carrying capacity of *Kobresia pygmea* pasture in Henan

County. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2015, 44(11): 141－146.
杜雪燕, 柴沙驼, 王迅, 等. 河南县高山嵩草草地牧草营养价值与载畜量研究. 河南农业科学, 2015, 44(11): 141－146.

[40] Wang Y, Wang J, Leiheman·Sarwar, *et al*. Research progress on the physiological response and molecular mechanism of cold response in plants. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1334913.

[41] Shi S B, Zhou D W, Li T C, *et al*. Responses of photosynthetic function of *Kobresia pygmaea* to simulated nocturnal low temperature on the Qingzang Plateau. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(3): 361－373.
师生波, 周党卫, 李天才, 等. 青藏高原高山嵩草光合功能对模拟夜间低温的响应. 植物生态学报, 2023, 47(3): 361－373.

[42] Li L S, Xu H Y, Wu X D, *et al*. Cold resistance physiology characteristics of leaf and root of *Kobresia pygmaea* on the Tibetan Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2020, 28(6): 1544－1551.
李莉莎, 徐海燕, 吴晓东, 等. 青藏高原高山嵩草叶、根抗寒性生理特征. 草地学报, 2020, 28(6): 1544－1551.

[43] Zhao L, Xue D J, Zhang X X, *et al*. Estimation of daily mean land surface temperature over the Qinghai-Tibet Plateau based on an RTM-DTC model. Atmosphere, 2023, 14(10): 1559.

[44] Ji G H. Physiological characteristics of *Kobresia pygmaea* in different habitats in upper reaches of Heihe. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2020.
纪庚好. 黑河上游不同生境高山嵩草生理特性研究. 兰州: 兰州交通大学, 2020.

[45] Xia J Y, Zhang Y J, Zheng Z T, *et al*. Asynchronous response of plant phenology to warming in a *Kobresia pygmaea* meadow in Nagqu, Qingzang Plateau. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(2): 183－194.
夏璟钰, 张扬建, 郑周涛, 等. 青藏高原那曲高山嵩草草甸植物物候对增温的异步响应. 植物生态学报, 2023, 47(2): 183－194.

[46] Huang R L, Zhou H K, Liu Z H, *et al*. Response of *Kobresia pygmaea* phenology and biomass to climate change in the Yangtze River Headwaters Region. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32(5): 1021－1026.
黄瑞灵, 周华坤, 刘泽华, 等. 长江源区高山嵩草物候与生物量动态及其对气候变化的响应. 西北植物学报, 2012, 32(5): 1021－1026.

[47] Qi W, Chen K L, Li L, *et al*. Effect of simulated warming on the *Kobresia pygmaea* diurnal characteristics of summer photosynthesis in Qinghai Lake. Ecological Science, 2025, 44(3): 197－201.
祁闻, 陈克龙, 李琳, 等. 模拟增温对青海湖高山嵩草夏季光合作用日变化特征的影响. 生态科学, 2025, 44(3): 197－201.

[48] Li J X, Zhang Y J, Zhu J T, *et al*. Responses of community characteristics and productivity to a warming gradient in a *Kobresia pygmaea* meadow of Tibetan Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 474－485.
李军祥, 张扬建, 朱军涛, 等. 藏北高山嵩草草甸群落特征及生产力对模拟增温幅度的响应. 生态学报, 2019, 39(2): 474－485.

[49] Niu Q C, Jin G F, Yin S X, *et al*. Transcriptional changes underlying the degradation of plant community in alpine meadow under seasonal warming impact. Plant, Cell & Environment, 2025, 48(1): 526－536.

[50] Zheng L, Cao X, Yang Z Y, *et al*. Effects of warming conditions on plant nitrogen-phosphorus stoichiometry and resorption of three plant species in alpine meadows on the Tibetan Plateau. Journal of Plant Ecology, 2024, 17(3): 73－83.
郑朗, 曹轩, 杨志勇, 等. 增温条件对青藏高原高寒草甸三种植物氮磷化学计量及重吸收的影响. 植物生态学报, 2024, 17(3): 73－83.

[51] Nan J, Siqueduoji, Gazangjia, *et al*. Effects of microclimate and moderate grazing on the characteristics of alpine meadow plant community. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2503－2515.
南吉, 斯确多吉, 尕藏加, 等. 微气候和适度放牧对高寒草甸植物群落特征的影响. 草业科学, 2022, 39(12): 2503－2515.

[52] Fu J J, Yixicuomu, Chen H, *et al*. Responses of dominant plant nutrients to grazing intensity in *Kobresia pygmaea* meadow of the Qinghai-Tibet plateau. Pratacultural Science, 2013, 30(4): 560－565.
付娟娟, 益西措姆, 陈浩, 等. 青藏高原高山嵩草草甸优势植物营养成分对放牧的响应. 草业科学, 2013, 30(4): 560－565.

[53] Xu Y F, Yixicuomu, Fu J J, *et al*. Response of plant diversity and soil nutrient to grazing intensity in *Kobresia pygmaea*

meadow of Qinghai-Tibet Plateau. Acta Agrestia Sinica, 2012, 20(6): 1026－1032.
许岳飞, 益西措姆, 付娟娟, 等. 青藏高原高山嵩草草甸植物多样性和土壤养分对放牧的响应机制. 草地学报, 2012, 20(6): 1026－1032.

[54] Zhou G L, Cheng Y X, Ma Q Q, *et al*. Effects of grazing intensity on community structure and the soil's physical and chemical properties in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibet Plateau. Pratacultural Science, 2019, 36(4): 1022－1031, 918.
周国利, 程云湘, 马青青, 等. 牦牛放牧强度对青藏高原东缘高寒草甸群落结构与土壤理化性质的影响. 草业科学, 2019, 36(4): 1022－1031, 918.

[55] Gao Y H, Chen H, Luo P, *et al*. Effect of grazing intensity on biomass of alpine meadow and its allocation in the northwestern Sichuan. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(3): 26－32.
高永恒, 陈槐, 罗鹏, 等. 放牧强度对川西北高寒草甸植物生物量及其分配的影响. 生态与农村环境学报, 2008, 24(3): 26－32.

[56] Yixicuomu, Xu Y F, Fu J J, *et al*. Effects of grazing intensity on vegetation community and soil physicochemical properties of alpine meadow in Tibet. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 27－33.
益西措姆, 许岳飞, 付娟娟, 等. 放牧强度对西藏高寒草甸植被群落和土壤理化性质的影响. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 27－33.

[57] Pang X P, Guo Z G. Plateau pika disturbances alter plant productivity and soil nutrients in alpine meadows of the Qinghai-Tibetan Plateau, China. Rangeland Journal, 2017, 39(2): 133－144.

[58] Zhang H Y, Wang Q, Yu C, *et al*. Effect of plateau pika disturbance on reproductive allocation of *Kobresia pygmaea*. Pratacultural Science, 2018, 35(3): 566－573.
张红艳, 王倩, 于成, 等. 高原鼠兔干扰对高山嵩草繁殖分配的影响. 草业科学, 2018, 35(3): 566－573.

[59] Zhou R, Hua R, Hua X Z, *et al*. Temporal and spatial dynamics of plant community structure under the disturbance of plateau pika (*Ochotona curzoniae*). Grassland and Turf, 2021, 41(1): 1－7.
周睿, 花蕊, 华铣泽, 等. 高原鼠兔干扰下高寒草甸植物群落结构的时空动态特征. 草原与草坪, 2021, 41(1): 1－7.

[60] Wang Y, Pang X P, Xiao Y, *et al*. The effect of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) disturbance on the relationship between plant diversity and soil nutrients of alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(17): 5485－5496.
王莹, 庞晓攀, 肖玉, 等. 高原鼠兔干扰对高寒草甸植物多样性与土壤养分间关系的影响. 生态学报, 2016, 36(17): 5485－5496.

[61] Pang X P, Wang Q, Jia T T, *et al*. Effect of burrow entrance densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on interspecific association in *Kobresia pygmaea* meadow. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(5): 224－230.
庞晓攀, 王倩, 贾婷婷, 等. 高原鼠兔有效洞口数密度对高山嵩草草甸植物种间联结性的影响. 草业学报, 2015, 24(5): 224－230.

[62] Pang X P, Jia T T, Li Q Q, *et al*. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on characteristics and distribution pattern of *Kobresia pygmaea* community. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 873－884.
庞晓攀, 贾婷婷, 李倩倩, 等. 高原鼠兔有效洞穴密度对高山嵩草群落及其主要种群空间分布特征的影响. 生态学报, 2015, 35(3): 873－884.

[63] Jia T T, Mao L, Guo Z G. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on plant niche of alpine meadow communities in the Qinghai-Tibet Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(4): 869－877.
贾婷婷, 毛亮, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对青藏高原高寒草甸群落植物生态位的影响. 生态学报, 2014, 34(4): 869－877.

[64] Li Q Q, Zhao X, Guo Z G. Effect of available burrow densities of plateau pika (*Ochotona curzoniae*) on leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry of dominant plants and soil in alpine meadow. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(5): 1212－1223.
李倩倩, 赵旭, 郭正刚. 高原鼠兔有效洞穴密度对高寒草甸优势植物叶片和土壤氮磷化学计量特征的影响. 生态学报, 2014, 34(5): 1212－1223.

[65] Zhou L, Zhang D G, Yun X J, *et al*. The vegetation and soil characteristics of degraded alpine meadow. Pratacultural Science, 2016, 33(11): 2196－2201.
周丽, 张德罡, 贠旭江, 等. 退化高寒草甸植被与土壤特征. 草业科学, 2016, 33(11): 2196－2201.

[66] Wang Z Y, Li Z Y, Dong S K, *et al*. Evolution of ecological patterns and its driving factors on Qinghai-Tibet Plateau over the past 40 years. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(22): 8941－8952.
王子滢, 李周园, 董世魁, 等. 近40年青藏高原生态格局演变及其驱动因素. 生态学报, 2022, 42(22): 8941－8952.

[67] Wei X H, Yang P, Li S, *et al*. Effects of over-grazing on vegetation degradation of the *Kobresia pygmaea* meadow and determination of degenerative index in the Naqu Prefecture of Tibet. Acta Prataculturae Sinica, 2005, 14(3): 41－49.
魏兴琥, 杨萍, 李森, 等. 超载放牧与那曲地区高山嵩草草甸植被退化及其退化指标的探讨. 草业学报, 2005, 14(3): 41－49.

[68] Peng Y, Sun J Y, Ma S J, *et al*. Plant community composition and soil nutrient status of degraded alpine meadow sites in northern Tibet. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(8): 49－60.
彭艳, 孙晶远, 马素洁, 等. 藏北不同退化阶段高寒草甸植物群落特征与土壤养分特性. 草业学报, 2022, 31(8): 49－60.

[69] Fan Y J, Hou X Y, Zhao D P, *et al*. Preliminary study on soil water-holding capacity along degradation gradients of alpine meadow. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2019, 45(1): 10－15.
范月君, 侯向阳, 赵得萍, 等. 不同退化演替阶段高寒草甸表层土壤持水特性的初步研究. 西南民族大学学报(自然科学版), 2019, 45(1): 10－15.

[70] Chen N, Zhang Y J, Zhu J T, *et al*. Nonlinear responses of productivity and diversity of alpine meadow communities to degradation. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(1): 50－65.
陈宁, 张扬建, 朱军涛, 等. 高寒草甸退化过程中群落生产力和物种多样性的非线性响应机制研究. 植物生态学报, 2018, 42(1): 50－65.

[71] Yang J, Liu Q R, Wang X T. Plant community and soil nutrient of alpine meadow in different degradation stages on the Tibetan Plateau, China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(12): 4067－4072.
杨军, 刘秋蓉, 王向涛. 青藏高原高山嵩草高寒草甸不同退化阶段植物群落与土壤养分. 应用生态学报, 2020, 31(12): 4067－4072.

[72] Li X L, Yang Y W, Zhang J, *et al*. Growth characteristics of *Kobresia pygmaea* clones in the "black soil beach" with different degradation. Acta Prataculturae Sinica, 2003, 12(3): 51－56.
李希来, 杨元武, 张静, 等. 不同退化程度"黑土滩"高山嵩草克隆生长特性. 草业学报, 2003, 12(3): 51－56.

[73] Lin L, Lan Y T, Li B C, *et al*. Study on steady-state characteristics and degradation succession process of alpine *Kobresia* meadow. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(22): 10178－10188.
林丽, 兰玉婷, 李本措, 等. 高寒嵩草草甸稳态特征及退化演替过程. 生态学报, 2024, 44(22): 10178－10188.

[74] Shi H X, Fan Y J, Hou X Y, *et al*. Analysis of plant community characteristics of *Kobresia pygmaea* meadow in the Three Headwaters under fencing and grazing. Chinese Journal of Grassland, 2014, 36(3): 67－72.
石红霄, 范月君, 侯向阳, 等. 三江源区围栏与放牧高山嵩草草甸植物群落特征分析. 中国草地学报, 2014, 36(3): 67－72.

[75] Fan Y J, Hou X Y. Effects of fencing and grazing on individual morphological characteristics of plants in *Kobresia pygmaea* meadow. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2016(15): 117－119.
范月君, 侯向阳. 围栏与放牧对高山嵩草草甸植物个体形态特征的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2016(15): 117－119.

[76] Mekuria W, Veldkamp E, Haile M. Effectiveness of exclosures to restore degraded soils as a result of overgrazing in Tigray, Ethiopia. Journal of Arid Environments, 2007, 69(2): 270－284.

[77] Xiao J Y, Pu X P, Xu C L. Effects of grazing prohibition on restoration of degraded grassland. Pratacultural Science, 2015, 32(1): 138－145.
肖金玉, 蒲小鹏, 徐长林. 禁牧对退化草地恢复的作用. 草业科学, 2015, 32(1): 138－145.

[78] Chai L R, Sun Y, Wang H, *et al*. Effect of yak grazing intensity on characteristics of plant communities and forage quality in Gannan alpine meadow. Pratacultural Science, 2018, 35(1): 18－26.
柴林荣, 孙义, 王宏, 等. 牦牛放牧强度对甘南高寒草甸群落特征与牧草品质的影响. 草业科学, 2018, 35(1): 18－26.

[79] Wang L, Bai M M, Wei K T, *et al*. Effects of Tibetan sheep and yak grazing on organic carbon storage in alpine meadow of Tibetan Plateau. Grassland and Turf, 2025, 45(1): 25－34.
王琳, 白梅梅, 魏孔涛, 等. 藏羊和牦牛放牧对青藏高原高寒草甸有机碳储量的影响. 草原与草坪, 2025, 45(1): 25－34.

[80] Cao G M, Du Y G, Liang D Y, *et al*. Character of passive-active degradation process and its mechanism in alpine *Kobresia* meadow. Journal of Mountain Science, 2017, 25(6): 641-648.
曹广民, 杜岩功, 梁东营, 等. 高寒嵩草草甸的被动与主动退化分异特征及其发生机理. 山地学报, 2007, 25(6): 641-648.

[81] Liu Y L, Wang D P, Zhang H B, *et al*. Effects of reseeding time and species on plant community of meadow steppe in Hulunbeir. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(11): 3098-3105.
刘玉玲, 王德平, 张泓博, 等. 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, 2022, 30(11): 3098-3105.

[82] Jiang Z H, Kang W J, Liu X N, *et al*. Effects of fertilizing and reseeding on carrying capacity of alpine meadow grassland. Grassland and Turf, 2018, 38(6): 68-78.
姜哲浩, 康文娟, 柳小妮, 等. 施肥和补播对高寒草甸草原载畜能力的影响. 草原与草坪, 2018, 38(6): 68-78.

[83] Feng Z X, Zhou J J, Wang X R, *et al*. Effects of reseeding and sward ripping on vegetation restoration in degraded subalpine meadow. Pratacultural Science, 2013, 30(9): 1313-1319.
冯忠心, 周娟娟, 王欣荣, 等. 补播和划破草皮对退化亚高山草甸植被恢复的影响. 草业科学, 2013, 30(9): 1313-1319.

[84] Du Y T. Effects of organic fertilizer application on aboveground biomass of typical alpine *Kobresia* meadow in Chengduo County. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2016(9): 157-158.
都耀庭. 施用有机肥对称多县典型高山嵩草草甸地上生物量的影响. 黑龙江畜牧兽医, 2016(9): 157-158.

[85] Fan B, Lin L, Guo X W, *et al*. Effect of sod cutting techniques on soil and vegetation restoration of degraded *Kobresia pygmaea* alpine meadows. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(2): 194-205.
樊博, 林丽, 郭小伟, 等. 划破草皮技术对退化高寒小嵩草草甸土壤及植被恢复的影响. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(2): 194-205.