



青藏高原退化草地生态修复与耐逆草种创新应用

丁励^{1†}, 杜鹏飞^{1†}, 张菲¹, 孙铭¹, 刘静¹, 闫利军³, 李平⁴, 鄢家俊¹, 刘琳², 李达旭³, 马啸², 白史且^{1*}

1. 西南科技大学生命科学与农林学院, 绵阳 621010

2. 四川农业大学草业科技学院, 成都 611130

3. 四川省草原科学研究院, 成都 611731

4. 贵州大学动物科学学院, 贵阳 550025

† 同等贡献

* 联系人, E-mail: baishiqie@swust.edu.cn

收稿日期: 2025-08-06; 接受日期: 2025-11-07; 网络版发表日期: 2026-04-09

呼和浩特市引进高层次人才(团队)项目(批准号: 2023RC-高层次-5)、绵阳科技城引进高层次人才(团队)项目(批准号: 202401001)、西南科技大学自然科学基金(批准号: 21zx7120)和甘孜、阿坝天然退化草原补播修复“生态种子包”研制与示范(批准号: 2022-国林草-004(1))资助

摘要 青藏高原作为“亚洲水塔”和全球重要碳汇库, 其草地生态系统对区域生态安全与可持续发展至关重要。然而, 青藏高原高寒草地近50年退化风险加剧, 主要表现为植被盖度下降、土壤碳氮流失、微生物功能失衡及生产力降低。当前近自然修复技术聚焦乡土草种混播, 模拟天然群落组成, 促进土壤养分与微生物协同修复, 提升恢复草地的稳定性和抗干扰能力, 但多元化耐逆草种供给不足是当前近自然修复技术实施中的核心瓶颈问题。未来研究应聚焦三大方向: (i) 系统收集与精准鉴定乡土草种, 结合智能育种技术改良牧草品质与适应性; (ii) 筛选适宜草种组配, 强化良种繁育; (iii) 深入研究土壤-植物-微生物互作机制。建议国家启动青藏高原草地修复重大科技项目, 构建科研与管理协同的“双轮驱动”模式, 提升草地生态系统的稳定性和服务功能。

关键词 青藏高原, 高寒退化草地, 近自然修复, 耐逆草种选育, 草种组配, 乡土草种创制

青藏高原作为“世界屋脊”与“亚洲水塔”, 是全球生物多样性保护的关键区域, 其生态系统服务功能对我国及亚洲的生态安全与可持续发展具有不可替代的作用^[1]。该区域草地面积占我国草地总面积33.2%, 是维系区域生态功能的核心载体, 具体表现为: (i) 覆盖1.28亿公顷草地资源, 通过植被-土壤系统年涵养水源量达 $4 \times 10^{11} \text{ m}^3$, 并储存0~100 cm土层有机碳37.26 Pg 碳(草地占比54.59%), 是全球重要的碳汇库与水源调

节区^[2-4]; (ii) 支撑长江黄河上游1200万农牧民生计, 并为下游10亿人口提供生态安全保障^[4]。近40年来, 青藏高原草地虽总体呈变绿趋势, 但约90%的青藏高原草地生产力呈现退化且具有较强的空间异质性, 其中重度退化占35%, 典型退化类型包括“黑土滩”(植被盖度<20%)、沙化草地、退化沼泽草地等。退化区域集中于人类活动密集的中南部及三江源地区, 其恢复力丧失面积为恢复力增加面积的1.16~1.44倍, 且2014年

引用格式: 丁励, 杜鹏飞, 张菲, 等. 青藏高原退化草地生态修复与耐逆草种创新应用. 中国科学: 生命科学

Ding L, Du P-F, Zhang F, et al. Ecological restoration of degraded grasslands and innovative application of stress-tolerant grass species in the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). Sci Sin Vitae, doi: 10.1360/SSV-2025-0155

后退化速率倍增^[5]。全球气候变化和超载过牧是青藏高原草地生态系统退化的主要因素,而适应性管理措施能有效恢复退化草地^[6]。草地退化导致土壤养分失衡(如“黑土滩”氮磷匹配失调)、微生物群落衰退(菌根真菌与促生菌减少)及草种单一化(群落禾本科占比过高,优质豆科牧草匮乏),进一步削弱系统稳定性^[7-9]。理论上,青藏高原退化草地自然恢复需要20~25年达到低水平平衡,而人工辅助修复(如混播、施肥)可在2~3年内显著提升生产与生态功能。然而,单一草种建植易导致群落稳定性不足,需从“生物多样性-多功能性-稳定性”的近自然修复理论出发,通过乡土草种混播、土壤-微生物协同修复,增强系统抗干扰能力,实现生态服务功能的全面恢复^[10]。然而,当前高寒草地生态修复面临双重技术瓶颈。现行修复方案不仅存在同质化倾向,缺乏与退化梯度相匹配的高效技术体系,在草种应用层面亦存在结构性矛盾;外来草种因抗逆性弱、越冬存活率低难以适应高原环境^[11],而具备显著生态位优势的乡土草种虽能维持系统稳定性,却受制于良种繁育体系不完善,现有商品化高寒乡土草物种比较单一,以少数禾本科物种为主,而豆科、莎草科等关键功能群商品种子或种苗缺口巨大,严重制约退化草地难以重建种间互作网络及生物多样性稳态。

针对高寒地区人工草地建植或天然草地改良的耐逆乡土草种和品种单一、部分草种产量低质量差、诸多群落优势草种获取困难等诸多因素,加之受高寒气候的限制,群落稳定性和可持续性不强,使得生态系统多功能性和多服务性往往难以完全恢复。从生物多样性、生态系统多功能性和多服务性、生态系统稳定性的理论出发,结合青藏高原高寒生态系统的特点,建立基于乡土草功能性状谱的“适地适种”技术体系,即构建建多科属协同的乡土草种质资源库,选育耐逆乡土草种,优化混播组合,模拟天然群落组成,促进土壤养分与微生物协同修复,提升恢复草地的稳定性和抗干扰能力,是提升高寒草地修复成效的关键路径,对筑牢高原生态安全屏障具有重要实践价值。

1 高寒草地退化机制与修复需求

1.1 草地退化现状与驱动因素

青藏高原草地退化是气候变化、人类活动及土壤条件共同作用的结果。研究表明土壤因素对退化的总

影响最大,其次是气候和人类活动^[12];过度放牧与土地利用变化贡献25%的退化驱动力,直接导致54.78%草地持续退化^[13]。土壤侵蚀与草地退化呈显著正相关关系,退化草地土壤含水量、有机质含量显著下降,速效磷钾及碱性磷酸酶活性上升^[14];冻融丘数量与土壤有机碳、总氮呈极显著负相关,导致微生物功能失衡,原核生物多样性降低,真菌多样性增加,共生/腐生菌比例改变^[15]。植物群落演替呈现阶段性特征,表现为地上生物量峰值现于轻度退化阶段,重度和严重退化后显著下降,地下根系向深层迁移,总根长显著降低^[16];深层土壤(>30 cm)根系生物量占比随退化加剧上升,整体地下生物量显著降低;物种多样性衰减,且物种多样性指数与土壤养分正相关,与土壤容重负相关^[14]。高寒沼泽草地生态系统随退化加剧,植物高度、盖度与生物量显著降低,土壤pH、容重和电导率上升,含水量下降,土壤有机碳、全氮、全磷及C:P、N:P比值均下降,其中土壤容重与含水量是植物-土壤养分变化的主要驱动因子^[17]。高寒草地退化前后植物功能性状和微生物群落对退化环境的生态适应与协同演化给退化草地的恢复带来困境。

1.2 草地退化对土壤、植被和微生物的系统性影响

青藏高原高寒草地退化对土壤、植被和微生物产生系统性影响。土壤理化性质与微生物功能协同失衡,退化草地土壤结构与养分动态呈现pH升高、容重增加、黏粒含量降低,进而加速有机质分解^[18];冻融作用加剧碳氮流失,0~30 cm土层碳氮储量锐减^[18]。高寒草甸植物生长受温度主导,而高寒草原则受温度与土壤湿度的协同限制^[19];气候变暖降低土壤团聚体稳定性,但降水增加可提升土壤碳的团聚体保护效应^[20,21];草地退化驱动碳流失,退化草地0~10 cm表层土壤有机碳减少,颗粒有机碳掺入量在顶层减少,中底层趋近于零^[22];真菌碳同化贡献下降,细菌分解活性增强,加速原始土壤有机碳矿化^[22]。草地退化过程中,受空间环境异质性、利用方式等影响,不同区域植被演替过程及物种组成差异较大。总体上表现为优势种植物由禾本科、莎草科向菊科、蔷薇科及杂类草转变,植物物种多样性下降且趋于单一化^[23]。随退化程度的加剧,群落中莎草科和禾本科植物盖度沿退化梯度显著降低,而杂类草盖度普遍上升,各草地类型地上生产力的

下降均主要与原生优势种盖度的降低密切相关^[24]。此外,退化草地土壤微生物群落重构表现为原核生物多样性降低^[12,14];草地退化增加了高寒草原土壤原生动物的多样性,其网络复杂性和稳定性通过调控微生物生物量间接影响土壤多功能性^[25];放牧-鼠兔联合干扰导致细菌-真菌网络稳定性下降,加剧细菌-古菌竞争,削弱生态系统多功能性^[26,27]。气候变暖与人为干扰驱动生态系统多功能性衰退,亟需针对性恢复策略。

1.3 现有退化草地生态修复技术

青藏高原退化草地缺乏统一的分类定级标准,根据相关研究与实践,一般可分为未退化、轻度退化、中度退化、重度退化和极度退化等五种类型(网络版附表1),其主要修复措施包括合理放牧、免耕补播、施肥、浅翻松耙、围栏封育、划破草皮、鼠害防治和毒害草防控等^[23,28]。目前多采用“分区、分类、分级”的生态恢复技术模式^[29],并创造性地提出“近自然修复”理论^[30]。实践证明地上群落组成对高寒草原生态系统多功能性恢复起决定性作用^[31],而外来草种引种风险较高,选育适于适生乡土草品种尤为关键。人工种草和免耕补播作为目前主要的生态修复技术措施,其核心在于保障多年生乡土草品种和高质量种子的足量供应^[32]。混播组合先锋种是保障播种当年草地生态和生产功能的关键^[23],通常组配燕麦(*Avena sativa* Linn.)、箭筈豌豆(*Vicia sativa* Linn.)等一年生草种或杯腺柳(*Salix cupularis* Rehder)作为先锋草种或先锋灌木,通过减少牲畜或鼠类扰动形成的土壤资源岛效应,促进垂穗披碱草(*Elymus nutans* Griseb.)、老芒麦(*Elymus sibiricus* Linn.)和中华羊茅(*Festuca sinensis* Keng ex E.B.Alekseev)等高原多年生乡土牧草出苗,对草本群落恢复形成重要的护理效应^[33]。退化草地的系统修复需采取多维度协同策略:实施围栏封育和禁牧措施,物理隔离消除过度放牧压力,可有效遏制土壤侵蚀并促进原生植物群落演替,为原生植被提供自然恢复窗口期;引入免耕补播技术通过机械开缝(划破草皮)方式植入适生草种,既减少土壤扰动引发的碳损失,又能有效提升植物多样性。围栏封育显著提升植被盖度(峰值现于中期)、地上/地下生物量及物种丰富度,长期封育(>5年)可降低土壤容重与pH,提高有机质、速效氮及酶活性^[34]。配合精准施肥方案,可在不破坏土壤微生物群落的前提下改善养分供给,其中微生物-化

学协同修复技术,氮磷肥配施微生物菌肥可同步提高地上生物量与土壤多功能性^[35];同时,种衣剂优化使用“养分+菌剂+生长调节剂”包衣处理使垂穗披碱草出苗率提高27%,草地早熟禾生物量提升44%^[36]。此外,沙化草地修复使用草方格与微生物固沙结合,提升土壤团聚体稳定性,氮限制取代磷限制^[37],划破草皮改善土壤透气性,促进种子萌发,无纺布覆盖保水控温,使幼苗成活率提升30%^[38]。值得注意的是,高寒草甸植物群落和土壤种子库对退化的响应存在差异,后者作为潜在恢复资源具有重要价值^[39]。

1.4 耐逆乡土草种选择局限性

青藏高原草原修复实践中,受限于耐逆草种选育及植被-微生物协同机制研究的不足,存在诸多突出问题:(i)可供选择的商业化耐逆草种类和品种有限、供给不足;(ii)部分多年生乡土草种可利用年限短,存在有品种无商业种子、品种育繁推体系不健全、种子生产技术滞后、种子生产成本高、机械化水平低以及土地使用限制等因素制约;(iii)针对特定区域的生态草品种较少。上述问题叠加草地管理与修复措施的协同性不足,致使部分区域修复效果欠佳,植被多样性和生产力维持能力较弱,生态系统抵抗力弱。值得注意的是,多元化耐逆草种供给不足是当前生态修复技术实施中的核心瓶颈问题,具体表现为:(i)重要乡土草种资源调查收集与精准鉴定不足、抗逆适应性进化机制不清、抗逆功能基因挖掘和利用滞后,基础生物学研究薄弱;(ii)适配退化高寒草原生态修复亟需的抗旱、耐寒、耐瘠薄、耐牧、耐生存竞争等生态型品种少、种子生产技术落后^[40,41],这些导致针对性特定修复技术模式难以全面实施。

2 青藏高原耐逆草种选育与组合优化

2.1 种质资源评价与抗逆机制解析

乡土草种凭借其生态适应性优势,在维持脆弱生态系统稳定性、降低引种风险、促进退化草地修复及生态屏障功能强化方面发挥关键作用,兼具生态安全和经济价值。作为全球生物多样性热点区域,青藏高原蕴藏经极端生境自然选择的丰富多样性乡土植物资源,其高寒、干旱、强辐射与贫瘠土壤环境长期驱动本地植物抗逆基因的演化,为抗逆草种选育提供了天

然基因库^[42,43]。据不完全统计, 青藏高原抗逆草种质资源收集已逾3.4万份, 相关科研团队对若干乡土草物种的种质资源开展形态学、生理生化及分子遗传学等多维度综合评价^[44], 以期优异种质资源的精准鉴定和耐逆品种的选育奠定基础。然而, 相对于广泛分布的大量乡土草物种及种质资源, 目前其评价利用仍明显不足^[45], 制约了突破性耐逆乡土草品种的选育工作。近年来, 青藏高原乡土草及适生草的遗传基础研究取得突破性进展, 已完成老芒麦^[46]、垂穗披碱草^[47]、拟鹅观草(*Pseudoroegneria libanotica* Hackel)^[48]、草地早熟禾(*Poa pratensis* Linn.)^[49]、狭叶红景天(*Rhodiola kirilowii* (Regel) Maxim.)^[50]、箭筈豌豆^[51]、燕麦^[52]等耐逆乡土草的全基因组测序, 系统解析了其耐寒性与耐热、抗旱、耐盐、抗紫外等特性的分子机制^[40]。在耐寒研究中, 垂穗披碱草 α -亚麻酸代谢关键基因 *EnPLAI*^[53]、川草2号老芒麦中 *ATPase* 亚基基因 *apA*^[54]、早熟禾钙信号通路相关基因(*CML*, *CPK*, *CALM*等)^[55]的鉴定为低温适应提供分子依据; 在干旱响应方面, 老芒麦 *EsSnRK2*, *EsCER1*^[56]基因鉴定揭示了水分胁迫调控网络; 在盐胁迫方面, 老芒麦 *EsABIS* 抗盐基因的鉴定^[57]为阐明离子稳态机制提供依据; 在种子脱落调控方面, 已从老芒麦中鉴定出低木质素合成基因 *4CL* 和 *CCoAOMT*^[58]等。在抗紫外辐射机制方面, 垂穗披碱草 *MAPKKK18* 基因的功能验证拓展了光胁迫响应通路认知^[47]。在遗传转化体系构建方面, 建立老芒麦^[59]、草地早熟禾^[60]、中华羊茅^[61]、燕麦^[62]等生态修复常用草种的遗传转化体系, 为高原生态修复及抗逆牧草育种提供关键技术支撑。

2.2 耐逆草品种选育与种子生产

基于种质资源评价与基因解析相关成果, 种质资源创制和耐逆品种选育已取得显著进展。当前青藏高原地区优异种质创制主要通过驯化选育和杂交等传统技术产生^[63~65], 而倍性育种、智能育种技术应用较少^[40]。兰州大学南志标院士团队经多代轮回选择获得适应高原生境的优质“兰箭”系列箭筈豌豆品种^[66], 并通过杂交选育获得甘青歪头菜(*Vicia unijuga* var. *ganqing*)品种^[67], 缓解高原豆科饲草品种短缺问题^[64]。四川省草原科学研究院/西南科技大学团队选育出川草1号、川草2号和麦洼老芒麦, 川西短芒披碱草(*Elymus breviaristatus* Keng ex P.C.Keng)、康巴短芒披碱草、

川西垂穗披碱草、阿坝硬秆仲彬草(*Kengyilia rigidula* cv. *Aba*)以及川西藜草(*Phalaris arundinacea* Linn.)等多个耐逆草品种^[68]。青海省畜牧兽医科学院选育出环湖、青牧1号、青牧2号等老芒麦, 环湖毛稈羊茅(*Festuca kirelowii* Steud.)、青海草地早熟禾^[69]以及青燕系列燕麦等品种; 四川农业大学选育出雅江老芒麦、康北垂穗披碱草等品种; 西南民族大学选育出康南垂穗披碱草、民大1号老芒麦、柯鲁柯中华羊茅等品种(网络版附表2)。截至2024年, 我国农业农村部和国家林业和草原局共审定登记的适宜青藏高原地区种植的国审草品种共46个, 其中披碱草属品种最多共计19个; 燕麦属有10个品种; 羊茅属4个品种; 早熟禾属和藜草属都只有3个品种; 豆科牧草品种极度缺乏, 仅有4个品种(网络版附表2)。

披碱草属作为青藏高原生态修复的核心乡土草种, 其种子基地规模和产能均在我国乡土草种前列。在草种成果转化方面, 四川省探索了“政府购买品种、授权企业生产、项目配套转化”的突破性品种阿坝垂穗披碱草推广模式。《2025年度全国草种供需分析报告》显示, 2024年全国主要生态修复用多年生草种总产量约为1.92万吨^[70], 其中披碱草产量达1.04万吨, 但仅“三北”工程、退化草原修复、盐碱地治理等场景的生态修复草种子年需求量就高达7万~8万吨, 实际产量仅能覆盖约25%的需求。

综上所述, 尽管披碱草属以超54%的产量占比成为青藏高原生态修复用核心草种, 但总体生态修复用草种和品种结构失衡, 许多天然分布的优势草种(如, 紫花针茅(*Stipa purpurea* Griseb.)、青藏苔草(*Carex moorcroftii* Falc. ex Boott))没有品种或品种极少, 豆科草种仅占8.7%, 严重制约生物多样性提升, 亟待加强多元化和多用途草品种选育以支撑高寒草地生态系统的可持续修复。

2.3 草种组配类型应用

青藏高原退化草地的土壤修复依赖于牧草混播组合的协同增效机制, 科学的草种组配策略通过功能互补与生态适配原则, 显著提升草地生态系统恢复效率(图1)。基于植物群落自然演替规律, 优先选择本土适生草种构建功能互补的混播组合, 其核心理念在于模拟自然生态过程, 实现生物多样性恢复与生态系统功能提升。研究证明, 传统的单一草种补播模式易导致

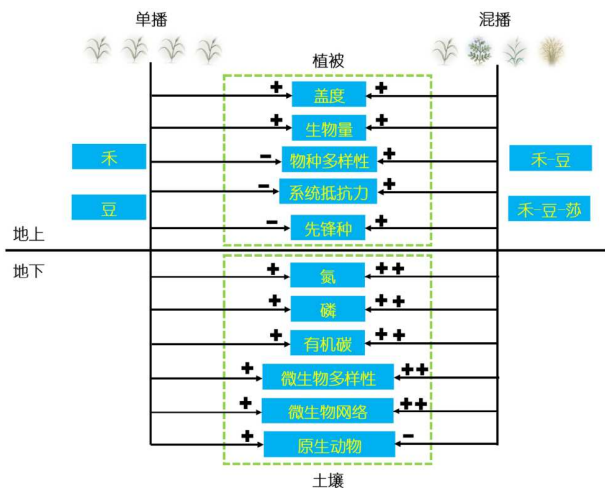


图1 混播与单播对地上和地下生态系统的作用比较
Figure 1 Comparisons of the effects of intercropping and monoculture on ecosystems aboveground and belowground

群落稳定性不足, 而“禾本科+莎草科+豆科”的立体配置模式, 如垂穗披碱草(深层根系固土)、高山嵩草(*Kobresia pygmaea* C.B. Clarke ex Hook. f., 耐寒簇生)和青海野豌豆(*Vicia sativa* Linn., 固氮改良土壤)的组合通过多物种协同作用可显著改善土壤理化性质, 增强生态系统的抗逆性与可持续性^[9,71]。实践案例显示, 混播垂穗披碱草、冷地早熟禾(*Poa crymophila* Keng ex C. Ling)等乡土禾草与豆科草(如扁蓿豆 *Melissitus ruthenicus* (L.) C.W. Chang)的组合, 可优化地上-地下资源分配, 提升土壤有机碳、有效磷及微生物生物量, 同时通过代谢物(如海藻糖、缬氨酸)的调控增强植物抗逆性^[72]。草种组配需兼顾功能群平衡与生态位分化, 例如采用上繁草(短芒披碱草+垂穗披碱草, 物种比例为1:1, 播种量分别为4.5 g/m²)、下繁草(冷地早熟禾+大油芒(*Borago officinalis* Linn.)+中华羊茅, 物种比例为1:1:1, 播种量分别为2.25 g/m²)混播混合, 既能提高地表覆盖度, 又能通过根茎扩展增强土壤固持能力, 缓解裸斑退化的“黑土滩”问题^[73]。草种配比设计需综合考虑萌发时序、生态位分化及抗逆性梯度, 通常以建群种(50%~60%)、伴生种(30%)和先锋种(10%~20%)形成稳定群落, 结合微地形改造与种子包衣技术提升萌发率, 同时引入土壤微生物制剂促进土壤养分循环如免耕补播结合菌肥添加, 既保护原生草毡层, 又能促进种子萌发与根系发育^[36]。例如, 青海省玛沁县通过乡土草种组合(如禾(中华羊茅、阿洼早熟禾(*Poa ara-*

ratica Trautv.)、草地早熟禾, 物种比例为1:1:1, 播种量共为4.5 g/m²) + 豆(救荒野豌豆+多枝黄耆(*Astragalus polycladus* Bur. et Franch.) + 青海苜蓿(*Medicago archiducis-nicolai* Sirjaev), 物种比例为1:1:1, 播种量共为4.5 g/m²) + 莎(移栽量10丛(5 cm×5 cm)/m²) + 杂类草组合(麻花艽(*Gentiana straminea* Maxim.) + 珠芽蓼(*Polygonum viviparum* Linn.), 物种比例为1:1, 播种量3.0 g/m²)与有机肥配比补播, 植被盖度和草产量显著提升, 同时土壤微生物群落结构显著改善^[74]。此外, 动态监测与精准管护(如围栏封育与放牧强度调控)是维持恢复效果的关键, 可确保群落在自然演替中逐步稳定。四川农业大学在若尔盖草原的实践验证了老芒麦、垂穗披碱草等乡土草种在防风固沙与饲草生产中的双重效益^[33]。综上, 青藏高原退化草地的近自然修复需以科学组配多元草种和混播技术为核心, 结合适应性管理, 才能最终实现生态屏障功能与牧区可持续发展的双赢目标。

3 耐逆草种修复成效与典型案例

以多元化抗逆草品种为核心的植被重建能显著改善退化草地修复进程, 提高饲草供给、碳储量和土壤保持价值^[75], 实现生态安全、牧业振兴协同增效。研究表明, 乡土耐逆草种垂穗披碱草和川草2号老芒麦在混播中表现出关键作用, 例如垂穗披碱草+紫羊茅(*Festuca rubra* Linn.)+沙生冰草(*Agropyron desertorum* (Fisch.) Schult.)+多花黑麦草(*Lolium multiflorum* Lam.)按1:1:1:1混播, 群落具有较高的盖度、生物量和多样性指数, 适合恢复川西北地区的退化、沙化草原植被, 而其他混播植被群落川草2号老芒麦、垂穗披碱草和沙生冰草也为优势物种^[76]。类似地, 禾豆协同模式(如燕麦与饲用豌豆7:3混播)通过固氮作用使土壤有机质和有效磷分别增加18%~25%^[77]。此外, 采用青海草地早熟禾+冷地早熟禾+星星草(*Puccinellia tenuiflora* Scribner & Merrill)+甘肃马先蒿(*Pedicularis kansuensis* Maxim.)的组合, 高寒地区植被覆盖度达97.33%, 土壤有机质提升37.05%, 且全氮、全磷和全钾分别提高了28.11%, 34.68%和10.14%^[78]。通过太空诱变选育无芒披碱草(*Elymus submuticus* Keng ex Keng f.)、渐尖早熟禾(*Poa attenuata* Czetz.)等抗逆草种新品系, 出苗率>75%, 显著提升退化区补播效率。极重度退化

区人工建植垂穗披碱草后, 植被盖度从30%提升至60%以上, 土壤团聚体稳定性提升40%, 碳汇功能增强^[79]。连续3年的混播实验表明, 禾草混播组合、禾-豆混播组合、禾-豆-莎多物种混播组合, 在高寒退化草甸的修复过程中保持较好的群落稳定性和草地生产性能, 植被盖度>60%, 群落稳定性提高20%^[71]。豆科牧草通过调控禾本科根际细菌群落的网络稳定性和复杂度, 显著促进牧草产量, 其根际微生物对植物生长的促进作用尤为关键^[80]。青藏高原乡土草麦宾草(*Elymus tangutorum* (Nevski) Hand.-Mazz.)能够有效降低土壤流失率、减缓地表径流、降低输沙能力和防止土壤流失的积极作用^[81]。高原早熟禾(*Poa alpigena* Lindm.)根际微生物对草地生态恢复和碳氮循环具有重要作用, 植物根系通过分泌物塑造微生物群落, 根际富集碳代谢和甲烷代谢微生物与微小单胞菌, 可减少温室气体排放, 协同促进植物抗逆和有机物降解^[38]。

案例一: 黑土滩型退化草原生态修复模式。针对黑土滩生态恢复, 发展“分区-分类-分级-分段”的技术体系, 通过人工建植混播本地草地早熟禾、中华羊茅、短芒披碱草、冷地早熟禾、垂穗披碱草, 混作显著富集抗逆性代谢物, 优化氮代谢通路, 微生物响应细菌群落结构稳定^[72]。同时, 禾+豆+莎混播可实现土壤养分恢复与生产力提升的协同效应^[74], 上繁草+下繁草组配增加土壤有机碳、有效磷、铵态氮、硝态氮含量, 促进三江源人工草地生态功能恢复^[73]。禁牧与自然恢复表明, 禁牧后34.3%三江源退化草地实现自然恢复, 水源涵养量增加12亿m³/年, 植被盖度提升30%, 土壤侵蚀模数降低40%^[6]。此外, 扁茎早熟禾(*Poa pratensis* var. *anceps*)、星星草、麦宾草、梭罗草(*Kengyilia thoroldiana* (Oliv.) J.L.Yang, C.Yen & B.R.Baum)和疏花针茅(*Stipa penicillata* Hand.-M22z.)也被证实为适宜黑土滩栽培的优良牧草种^[11]。

案例二: 沙化草原生态修复模式。四川阿坝州红原县瓦切乡高寒沙化草地修复实践表明, 乡土植物具有促进沙化地土壤微生物发育的基本特性, 可高效地治理高寒沙化草地。在植被治理初期(前5年), 狭叶红景天相比, 表现出比杯腺柳和硬秆仲彬草更强的土壤修复能力, 狭叶红景天种植5年后, 促进沙化地土壤微生物的发育, 提高土壤微生物组成中真菌的比例, 促使可分泌土壤有机质形成的功能酶的真菌发育得更好, 还可有效地缓解土壤微生物缺乏磷的状况^[82]。根系分泌

物分析表明, 杯腺柳和狭叶红景天是高寒沙化地生态修复的优异先锋植物^[83]。作为先锋灌木, 杯腺柳通过形成“资源岛效应”促进垂穗披碱草等草本植物出苗, 其根系分泌物直接输入碳氮养分, 激活微生物驱动的碳氮循环, 形成“植物-微生物”协同机制^[84]。此外, 中华羊茅和青海早熟禾混播可显著提升青海湖周边沙化草地土壤总磷、铵态氮及有机碳含量, 优化根际微环境, 提升土壤养分与代谢功能, 是该地区沙化草地修复的高效策略^[72]。

案例三: 沼泽草原生态修复模式。针对若尔盖湿地因开沟疏水、过度放牧和气候变化导致的严重萎缩, 四川省草原科学研究院采用“免耕补播+施肥”“有机肥+无机肥”“移栽多年生根茎型禾草”等综合技术措施进行治疗, 在积水和季节性积水区采用移栽耐涝草种(高山猫尾草(*Phleum alpinum* Linn.)+川草引3号藜草), 成活率95%以上; 退化草地区采用混播一年生黑麦草+垂穗披碱草+老芒麦, 治理后植被盖度从退化状态升至98%, 生物量达未治理区的2倍, 显著增强水源涵养能力。青海河南蒙古族自治县克其合滩地处三江源区, 因过度放牧和鼠害导致高寒沼泽草地严重退化, 原生莎草科植被锐减, 草毡层破坏, 形成大面积黑土滩。中国科学院西北高原生物研究所周华坤团队^[28]提出了“一控二补三调”的退化草地综合治理体系, 即控制鼠害, 补充土壤养分、补播乡土草种(垂穗披碱草+青海早熟禾)、添加菌肥(丛枝菌根真菌)和有机肥, 调节放牧措施、调节土壤微生物组成、调节土壤理化属性。轻度退化区采用围栏封育3年, 辅以浅耙松土(深度<5 cm), 改善土壤通气性。中重度退化区采用“人工适度干预+自然恢复”模式, 通过微耕埋种、覆土保墒, 促进种子萌发。该技术亮点在于筛选耐寒、高水分利用效率草种(如中华羊茅), 提升出苗率和越冬率(达76.5%)。克其合滩案例证明, 融合乡土草种补播、微生物调控与季节性围封的“近自然修复”模式, 可有效打破退化沼泽草地植物-土壤水分失衡的负反馈循环, 为高寒湿地系统性治理提供可推广范式。

4 挑战与未来突破方向

青藏高原草地修复已从单一技术向“近自然修复”的模式转型, 当前修复技术存在三大瓶颈: (i) 补播草种单一、出苗率低, 需强化种衣剂研发; (ii) 长期围栏

封育可能引发生物多样性“过饱和”衰退; (iii) 微生物菌剂稳定性不足. 未来策略应聚焦乡土草种选育, 开发多物种组合及其种衣剂和抗逆型复合微生物菌剂, 结合种子引发处理技术, 集成免耕补播、微生物-化学协同及物理覆盖技术, 构建兼顾土壤结构-微生物功能-植物群落的生态修复模式, 实现碳固存与生态系统韧性同步提升. 然而, 目前乡土草种供给面临多重瓶颈, 商业化耐逆草种及品种结构单一, 关键草种遗传背景不明、适应性进化机制不清、关键抗逆功能基因挖掘利用不够、草种组配与不同退化类型草地匹配度低、高寒区专用菌肥稀缺、科技研发与生产管理脱节等方面面临诸多挑战. 未来亟需突破的研究方向及建议.

(i) 亟需加强青藏高原乡土草种智能培育进程, 培育新型智能品种^[41,85]. 开展青藏高原乡土草种质资源普查与精准鉴定, 建立区域性种质基因库. 整合AI、大数据、基因组学、转录组学、代谢组学、蛋白组学和表观组学技术等前沿技术, 实现生物技术与AI的深度融合. 构建高效遗传转化体系, 结合CRISPR/Cas9等基因编辑技术, 提高育种效率和精准度, 培育兼具生态适应性与饲用价值的新品种, 逐步实现分子育种到设计育种的迈进(图2), 为青藏高原高寒草地生态建设和草牧业可持续发展提供种源保障.

(ii) 加强良种繁育与生态草种组配优化是植被恢复的关键路径. 首先是优先推动关键草种代表性品种的种子生产技术创新与标准化体系建设. 通过政策扶持引导社会资本参与草种子产业, 优化种子生产带布局, 加快构建区域性良种繁育基地, 完善原种圃、扩繁基地与产业化示范区的衔接, 强化种子清选、贮藏及质量追溯能力, 在优良品种推广模式上突破体制机制障碍, 推动形成“育繁推一体化”的产业生态(图2). 其次是筛选抗逆性强、生态位互补的乡土草种, 建立多物种协同的复合组配方案, 研发集成营养基质、共生菌剂及缓释保水剂的种子包衣技术标准.

(iii) 聚焦土壤-植物-微生物互作网络的生态机制研究, 揭示根系分泌物介导的碳氮循环耦合规律及微生物功能群落的定向调控机制. 基于菌丝桥养分传递、根际促生菌激活植物抗逆基因等发现, 研发多菌系协同的复合微生物菌肥. 通过固氮解磷菌株与丛枝菌根真菌的生态位互补, 提升土壤有机质转化效率, 同时诱导植物合成抗病代谢物, 为草地生态修复提供兼具生产力提升与碳封存功能的近自然修复模式.

(iv) 针对退化高寒草地, 探索“政府+科研机构+企业”三方经营模式, 基于“近自然修复”理念, 引导并加速生态系统依靠自身的恢复力向原生群落演替. 实

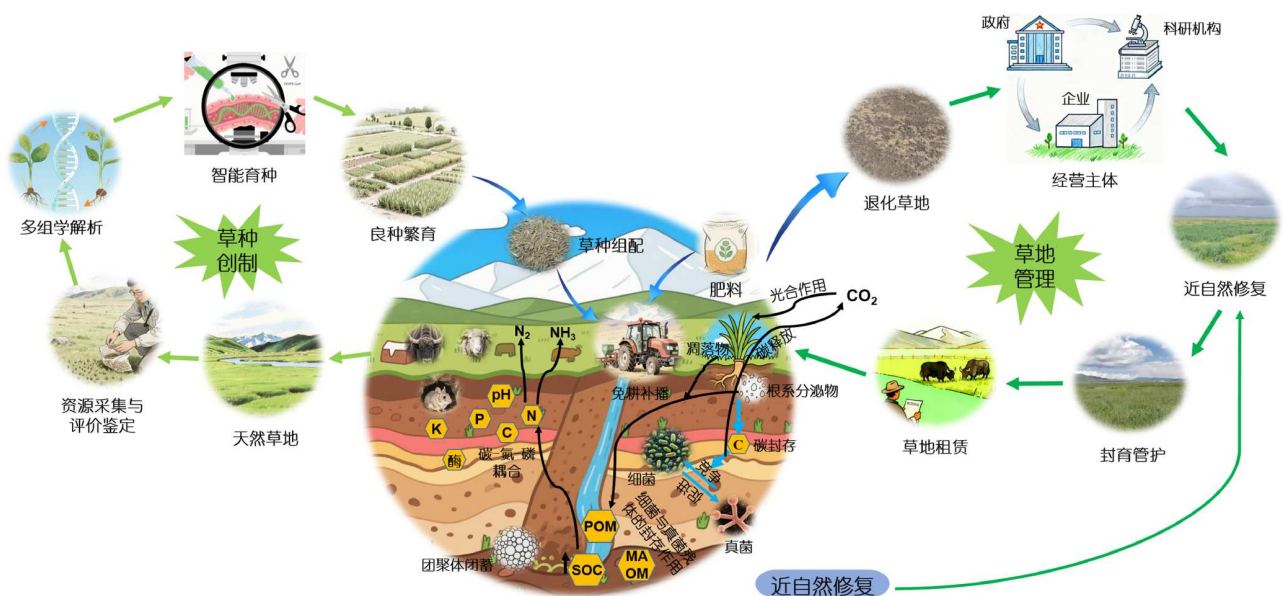


图2 青藏高原退化草地“草种创制+近自然修复+草地管理”的可持续恢复模式

Figure 2 Integrated sustainable restoration model of “grass germplasm innovation + close-to-natural restoration + grassland management” for degraded alpine grasslands in the Qinghai-Tibetan Plateau

施严格的“封育管护”，为乡土草种的萌发、生长与竞争提供必要的窗口期，从而有效恢复植被盖度、物种多样性及土壤肥力。在生态系统功能初步恢复后，引入“草地租赁”机制，通过科学划定载畜量、规定放牧时段与方式，将草地使用权有条件地租赁给牧民，以期实现从“掠夺式利用”向“契约化管护”的转变。此模

式将政府监管、生态恢复与牧区生计有机结合，形成“退化-修复-可持续利用”的良性闭环，继承和发展高寒草地可持续发展路径(图2)。

(v) 建议国家启动青藏高原退化草地修复与耐逆草种利用重大科技项目，从技术研发、产品创新、应用推广和政策保障四大维度构建系统性解决方案。

参考文献

- 1 Fu B J, Liu Y X, Zhao W W, et al. Optimization for Qinghai-Xizang Plateau ecological security barrier system (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2024, 39: 1882–1893 [傅伯杰, 刘焱序, 赵文武, 等. 青藏高原生态安全屏障体系优化. 中国科学院院刊, 2024, 39: 1882–1893]
- 2 Chen F, Man W, Wang S, et al. Southeast Asian ecological dependency on Tibetan Plateau streamflow over the last millennium. *Nat Geosci*, 2023, 16: 1151–1158
- 3 Chen H, Ju P, Zhu Q, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nat Rev Earth Environ*, 2022, 3: 701–716
- 4 Dong S. Revitalizing the grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Grassland Res*, 2023, 2: 241–250
- 5 Liu Y, Xiao P, Zhang X, et al. Accelerated decline in vegetation resilience on the Tibetan Plateau. *Land Degrad Dev*, 2025, 36: 295–306
- 6 Wang Y, Lv W, Xue K, et al. Grassland changes and adaptive management on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Nat Rev Earth Environ*, 2022, 3: 668–683
- 7 Dong Q, Ren S, Willing C E, et al. Xizang meadow degradation alters resource exchange ratio, network complexity, and biomass allocation tradeoff of arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytol*, 2025, 245: 1288–1301
- 8 He J S, Liu Z P, Yao T, et al. Analysis of the main constraints and restoration techniques of degraded grassland on the Tibetan Plateau (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2020, 17: 66–80 [贺金生, 刘志鹏, 姚拓, 等. 青藏高原退化草地恢复的制约因子及修复技术. 科技导报, 2020, 17: 66–80]
- 9 Yang Y H, Peng Y F. Limiting factors and key techniques for restoration of degraded grasslands in China (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 49: 1–6 [杨元合, 彭云峰. 我国退化草地恢复的限制因子与关键技术研究. 植物生态学报, 2025, 49: 1–6]
- 10 Pan Q M, Yang Y H, Huang J H. Limiting factors of degraded grassland restoration in China and related basic scientific issues (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2023, 37: 571–579 [潘庆民, 杨元合, 黄建辉. 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, 2023, 37: 571–579]
- 11 Ma Y S, Shi J J, Dong Q M, et al. Study on screening of forage species fittingly cultivated in black-soil beach (in Chinese). *Chin Qinghai J Anim Vet Sci*, 2011, 41: 1–4 [马玉寿, 施建军, 董全民, 等. 适宜黑土滩栽培的牧草品种筛选研究. 青海畜牧兽医杂志, 2011, 41: 1–4]
- 12 Wang S, Dai E, Jia L, et al. Assessment of multiple factors and interactions affecting grassland degradation on the Tibetan Plateau. *Ecol Indicators*, 2023, 154: 110509
- 13 Wang L, Yan L, Zhang J, et al. Spatiotemporal patterns and alleviating of grassland overgrazing under current and future conditions in Qinghai-Tibetan Plateau. *J Environ Manage*, 2025, 376: 124456
- 14 Zhou T, Sun J, Shi P, et al. Mechanism of plant-soil feedback in a degraded alpine grassland on the Tibetan Plateau. *J Plant Ecol*, 2024, 17: rtac025
- 15 Shang Z H, Dong Q M, Shi J J, et al. Research progress in recent ten years of ecological restoration for ‘black soil land’ degraded grassland on Tibetan Plateau—concurrently discuss of ecological restoration in Sangjiangyuan region (in Chinese). *Acta Agrestia Sin*, 2018, 26: 1–21 [尚占环, 董全民, 施建军, 等. 青藏高原“黑土滩”退化草地及其生态恢复近10年研究进展——兼论三江源生态恢复问题. 草地学报, 2018, 26: 1–21]
- 16 Liu W H, Song X Y, Cairenduojie, et al. Effects of degradation degree on the root morphological traits and biomass of dominant plant species in alpine meadows (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2024, 48: 1666–1682 [刘位会, 宋小艳, 才仁多杰, 等. 退化程度对高寒草甸不同优势植物根系形态性状和生物量的影响. 植物生态学报, 2024, 48: 1666–1682]
- 17 Liu M, Shi J, Zhang X. Responses of ecological stoichiometry of plants and soils to degradation levels in alpine wetlands of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Environ Manage*, 2025, 75: 2258–2271

- 18 Song M, Pang R, Tian Y, et al. Functional shift in soil microbiome with decline in photosynthetic carbon input signifies rapid decrease of soil organic carbon during alpine grassland degradation. *Biol Fertil Soils*, 2025, 61: 893–908
- 19 Li Z J, Gao C P, Wang Z W, et al. Research status and suggestions for grassland carbon sequestration and emission reduction in China (in Chinese). *Acta Pratacult Sin*, 2023, 32: 191–200 [李紫晶, 高翠萍, 王忠武, 等. 中国草地固碳减排研究现状及其建议. *草业学报*, 2023, 32: 191–200]
- 20 Liu S, Zamanian K, Schleuss P M, et al. Degradation of Tibetan grasslands: consequences for carbon and nutrient cycles. *Agr Ecosyst Environ*, 2018, 252: 93–104
- 21 Wang Y, Xia A, Xue K. Cold and humid climates enrich soil carbon stock in the Third Pole grasslands. *Innovation*, 2024, 5: 100545
- 22 Song M, Tian Y, Li Y, et al. Loss of taxonomic and functional diversity and decrease in primary productivity with nitrogen enrichment after a long-term release from grazing in an alpine grassland. *Sci Total Environ*, 2024, 957: 177570
- 23 Liu Y J, Yang Q. Research progress and prospect of degraded grassland restoration in Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2023, 45: 131–143 [刘永杰, 杨琴. 青藏高原退化草地修复研究进展及展望. *中国草地学报*, 2023, 45: 131–143]
- 24 Niu Y P, Gao X X, Yao S T, et al. Linkages of plant diversity and functional groups to aboveground productivity upon alpine grassland degradation (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 49: 83–92 [牛亚平, 高晓霞, 姚世庭, 等. 退化高寒草地植物多样性和功能群组成与地上生产力的关系. *植物生态学报*, 2025, 49: 83–92]
- 25 Hu Y, Zhang H, Sun X, et al. Impact of grassland degradation on soil multifunctionality: linking to protozoan network complexity and stability. *Sci Total Environ*, 2024, 929: 172724
- 26 Li J, Wang Q, Zhu B, et al. Plateau Pika disturbance changes soil bacterial functions and exoenzyme abundance to modulate the C cycle pathway in alpine grasslands. *Int J Mol Sci*, 2024, 25: 12775
- 27 Yang J, Wang S, Su W, et al. Animal activities of the key Herbivore Plateau Pika (*Ochotona curzoniae*) on the Qinghai-Tibetan Plateau affect grassland microbial networks and ecosystem functions. *Front Microbiol*, 2022, 13: 950811
- 28 Zhou H K, Shao X Q, Sun J, et al. Alpine Grassland Ecological Restoration Technologies and Management Models (in Chinese). Beijing: Science Press, 2024 [周华坤, 邵新庆, 孙建, 等. 高寒草地生态恢复技术与管理模式. 北京: 科学出版社, 2024]
- 29 Wang R J, Feng Q S, Jin Z R, et al. A study on restoration potential of degraded grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Acta Pratacult Sin*, 2022, 31: 11–22 [王瑞泾, 冯琦胜, 金哲人, 等. 青藏高原退化草地的恢复潜势研究. *草业学报*, 2022, 31: 11–22]
- 30 He J S, Bu H Y, Hu X W, et al. Close-to-nature restoration of degraded alpine grasslands: theoretical basis and technical approach (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 3898–3908 [贺金生, 卜海燕, 胡小文, 等. 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*, 2020, 65: 3898–3908]
- 31 Xu Y, Dong S, Gao X, et al. Aboveground community composition and soil moisture play determining roles in restoring ecosystem multifunctionality of alpine steppe on Qinghai-Tibetan Plateau. *Agr Ecosyst Environ*, 2021, 305: 107163
- 32 Bai S Q. Several crucial key issues in ecological restoration of degraded grassland (in Chinese). *CAO XUE*, 2019, 2019: 1–3 [白史且. 退化草原生态修复中不容忽视的几个关键问题. *草学*, 2019, 2019: 1–3]
- 33 Li Q, Shen X, Huang Q, et al. Resource islands of *Salix cupularis* facilitating seedling emergence of the companion herbs in the restoration process of desertified alpine meadow, the Tibetan Plateau. *J Environ Manage*, 2021, 289: 112434
- 34 Zhang D J, Gong C W, Mi Y W, et al. Research progress on degradation and restoration of alpine meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau (in Chinese). *Gansu Agr Sci Techn*, 2022, 53: 7–11 [张东佳, 龚成文, 米永伟, 等. 青藏高原高寒草甸退化与修复研究进展. *甘肃农业科技*, 2022, 53: 7–11]
- 35 Xu J X, Xiao Y M, Wang X Y, et al. Effects of microbial fertilizer and nitrogen and phosphorus fertilizer backfilling on soil physicochemical properties and enzyme activities in degraded alpine meadows (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 49: 159–172 [徐嘉昕, 肖元明, 王小赞, 等. 微生物菌肥与氮磷肥回补对退化高寒草甸土壤理化性质和酶活性的影响. *植物生态学报*, 2025, 49: 159–172]
- 36 Wang L, Li X, Wang X, et al. Effects of different coating agents on seed growth and planting of native grasses in alpine grassland (in Chinese). *Ecol Eng*, 2025, 49: 118–128 [王麟, 李雪, 王愉, 等. 不同配方种衣剂对高寒草地乡土草种子生长与建植的影响. *植物生态学报*, 2025, 49: 118–128]
- 37 Du Z, Zhou R, Chen Y, et al. Effects of long-term vegetation restoration on soil aggregate and aggregate-associated nutrient stoichiometry of desertified grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Agr Ecosyst Environ*, 2025, 388: 109661
- 38 Wei B, Xu Q, Kong J, et al. Metagenomics-based study of rhizospheric microorganisms of *Poa alpigena* L. in Qinghai Lake, Ganzi River Plateau.

- [Front Plant Sci](#), 2025, 15: 1518637
- 39 Zhang H, Zhao Y P, Liu X C, et al. Dynamics of soil seed bank and its role in plant community regeneration during alpine meadow degradation (in Chinese). [Chin J Plant Ecol](#), 2025, 49: 74–82 [张辉, 赵赟鹏, 刘晓琛, 等. 高寒草甸退化过程中土壤种子库的变化及其在植物群落更新中的潜在作用. *植物生态学报*, 2025, 49: 74–82]
- 40 Liu Q, Huang G, Zhang Z, et al. Forage crop research in the Modern Age. [Adv Sci](#), 2025, 12: 2415631
- 41 Jing H C, Hu W J, Jin J B, et al. Accelerate innovation of forage intelligent breeding technology: reflection and suggestions (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2025, 40: 310–319 [景海春, 胡伟娟, 金京波, 等. 加快饲草智能育种科技创新的思考与建议. *中国科学院院刊*, 2025, 40: 310–319]
- 42 Bai S Q, Yan J J. Research and Utilization of *Elymus sibiricus* Germplasm Resources (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020 [白史且, 鄢家俊. 老芒麦种质资源研究与利用. 北京: 科学出版社, 2020]
- 43 Nan Z B, Wang Y R, Fu H, et al. Stress Biology of Native Grasses (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [南志标, 王彦荣, 傅华, 等. 乡土草抗逆生物学. 北京: 科学出版社, 2021]
- 44 Chen C J, Wang X M, Liu W H, et al. Research advances on genetic diversity of grass germplasm (in Chinese). *Acta Agrestia Sin*, 2024, 32: 349–357 [陈彩锦, 王学敏, 刘文辉, 等. 草种质资源遗传多样性研究进展. *草地学报*, 2024, 32: 349–357]
- 45 Wan T, Shi F L. Collection and evaluation of excellent native grass germplasm resources (in Chinese). *Grassl Pratacul*, 2022, 34: 63 [宛涛, 石凤翎. 优良乡土草种质资源的收集与评价. *草原与草业*, 2022, 34: 63]
- 46 Li X, Zhang C, Wang L, et al. High-quality reference genome and population analysis of allotetraploid *Elymus sibiricus* provide insight into genome origin and environmental adaptations to the Qinghai-Tibetan Plateau. [Sci China Life Sci](#), 2025, 68: 2332–2347
- 47 Xiong Y, Yuan S, Xiong Y, et al. Analysis of allohexaploid wheatgrass genome reveals its Y haplome origin in Triticeae and high-altitude adaptation. [Nat Commun](#), 2025, 16: 3104
- 48 Zhai X, Wu D, Chen C, et al. A chromosome level genome assembly of *Pseudoroegneria Libanotica* reveals a key *Kcs* gene involves in the cuticular wax elongation for drought resistance. [BMC Genomics](#), 2024, 25: 253
- 49 Phillips A R, Seetharam A S, Albert P S, et al. A happy accident: a novel turfgrass reference genome. [G3-Genes Genomes Genet](#), 2023, 13: jkad073
- 50 Zhang J, Zhao W, Tang X, et al. Chromosome-level genome and annotation of the tetraploid *Rhodiola kirilowii*. [Sci Data](#), 2025, 12: 620
- 51 Li M, Pu J, Jia C, et al. The genome of *Vicia sativa* ssp. *amphicarpa* provides insights into the role of terpenoids in antimicrobial resistance within subterranean fruits. [Plant J](#), 2024, 119: 2654–2671
- 52 Kamal N, Tsardakas Renhuldt N, Bentzer J, et al. The mosaic oat genome gives insights into a uniquely healthy cereal crop. [Nature](#), 2022, 606: 113–119
- 53 Fu J, Miao Y, Shao L, et al. *De novo* transcriptome sequencing and gene expression profiling of *Elymus nutans* under cold stress. [BMC Genomics](#), 2016, 17: 870
- 54 He W X, Xu Y, Tang L, et al. Molecular cloning regulation of chilling-repressed gene *atpA* in *Elumus sibiricus* (in Chinese). *Prog Biochem Biophys*, 2005, 32: 67–74 [何文兴, 徐莺, 唐琳, 等. 川草2号老芒麦(*Elymus sibiricus* L.) *atpA*基因的克隆及其调控表达. *生物化学与生物物理进展*, 2005, 32: 67–74]
- 55 Zhao C X, Ma X, Dong W K, et al. Transcriptome comparative analysis of different Qinghai wild *Poa pratensis* under low temperature stress (in Chinese). *Acta Agrestia Sin*, 2020, 28: 305–318 [赵春旭, 马祥, 董文科, 等. 低温胁迫下不同青海野生草地早熟禾的转录组比较分析. *草地学报*, 2020, 28: 305–318]
- 56 An Y, Wang Q, Cui Y, et al. Comparative physiological and transcriptomic analyses reveal genotype specific response to drought stress in Siberian wildrye (*Elymus sibiricus*). [Sci Rep](#), 2024, 14: 21060
- 57 De Y, Shi F, Gao F, et al. Siberian wildrye (*Elymus sibiricus* L.) abscisic acid-insensitive 5 gene is involved in abscisic acid-dependent salt response. *Plants*, 2021, 10: 1351.
- 58 Zhao X, Xie W, Zhang J, et al. Histological characteristics, cell wall hydrolytic enzymes activity and candidate genes expression associated with seed shattering of *Elymus sibiricus* accessions. [Front Plant Sci](#), 2017, 08: 606
- 59 Du P F, Wang Y, Cao Y P, et al. Establishment of biolistic mediated transformation system for *Elymus sibiricus* (in Chinese). *Chin Bull Botany*, 2021, 56: 62–70 [杜鹏飞, 王玉, 曹英萍, 等. 基因枪介导的老芒麦遗传转化体系的建立. *植物学报*, 2021, 56: 62–70]
- 60 Li C, Meng C, Wang X, et al. CRISPR/Cas9-targeted mutagenesis of the *PpTCP4* gene increased tiller number in *Poa pratensis*. [Plant Physiol](#)

- Bioch, 2025, 229: 110588
- 61 Hu T, Geng J, Li Z X, et al. A method for callus induction from mature embryos and plant regeneration in *Festuca sinensis* (in Chinese). Invention Patent. CN118020639B. 2024 [胡涛, 耿婕, 李忠祥, 等. 一种中华羊茅成熟胚愈伤组织诱导及再生体系建立方法. 发明专利. CN118020639B. 2024]
 - 62 Shi K, Huang W, Zhu M, et al. Efficient genetic transformation and genome editing via an *Agrobacterium*-mediated in commercial oat (*Avena sativa* L.) cultivars. *J Integr Plant Biol*, 2025, 67: 1697–1699
 - 63 Liu Z P, Liu W X, Yang Q C, et al. Progress and existing problems of forage breeding in China (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2023, 37: 528–536 [刘志鹏, 刘文献, 杨青川, 等. 我国牧草育种进展及存在问题. 中国科学基金, 2023, 37: 528–536]
 - 64 Xie W G, Liu Z P, Liu G S, et al. Current situation, scientific problem and prospect of native grass breeding in China (in Chinese). *Bull Natl Nat Sci Found China*, 2023, 37: 552–559 [谢文刚, 刘志鹏, 刘公社, 等. 我国乡土草选育的现状、关键科学问题及发展方向. 中国科学基金, 2023, 37: 552–559]
 - 65 Bai J F. Introduction and domestication of wild *Elymus sibiricus* (in Chinese). *China Agric Inf*, 2016, 2016: 139–140 [白杰峰. 野生老芒麦的引种驯化. 中国农业信息, 2016, 2016: 139–140]
 - 66 Nan Z B, Wang Y R, Nie B, et al. Breeding of Lanjian No.3 common vetch and evaluation of its characteristics (in Chinese). *Acta Pratacult Sin*, 2021, 30: 111–120 [南志标, 王彦荣, 聂斌, 等. 春箭筈豌豆新品种“兰箭3号”选育与特性评价. 草业学报, 2021, 30: 111–120]
 - 67 Zhou F F. Study of growth and sexual reproduction characteristics of *Vicia unijuga* var. ganqing in Gannan Alpine Grassland (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Lanzhou: Lanzhou University, 2023 [周方方. 甘青歪头菜(*Vicia unijuga* var. ganqing)在甘南高山草原生长和有性繁殖特性的研究. 博士学位论文. 兰州: 兰州大学, 2023]
 - 68 Bai S Q, Li D X, Ma X, et al. Exploitation and utilization of characteristic forage germplasm resources from the Qinghai-Tibetan Plateau and their breeding application-Second Prize of the 2017 National Scientific and Technological Progress Award (in Chinese). *CAOXUE*, 2019, 87 [白史且, 李达旭, 马啸, 等. 青藏高原特色牧草种质资源挖掘与育种应用2017年度国家科学技术进步奖二等奖. 草学, 2019, 87]
 - 69 Wang L Y, Bi Y F, Ma Y S, et al. Breeding of a new variety *Poa pratensis* L. cv. Qinghai for tolerance to low temperature (in Chinese). *Chin J Grassland*, 2010, 32: 16–20 [王柳英, 毕玉芬, 马玉寿, 等. 耐寒新品种青海草地早熟禾的选育. 中国草地学报, 2010, 32: 16–20]
 - 70 Huang S. 2025 National forest and grassland seed and seedling supply and demand analysis report released (in Chinese). *For Sci Technol*, 2024, 70 [黄山. 2025年度全国林草种苗供需分析报告发布. 林业科技通讯, 2024, 70]
 - 71 Ma D F, Jia C Z, Wang X P, et al. Effect of multi-species grouping on restoration of alpine degraded meadows in Gannan, China (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 9: 93–102 [马东峰, 贾存智, 王学朋, 等. 甘南高寒退化草甸多物种组配的修复效果评估. 植物生态学报, 2025, 49: 93–102]
 - 72 Zhang X, Zhang C, Liu Y, et al. Effects of planting patterns on physicochemical properties, metabolites and microbial community structure of rhizosphere soil in perennial cultivated grassland. *Sci Rep*, 2025, 15: 12047
 - 73 Ma L H, Meng X C, Wang G Q, et al. Effects of moss crust inoculation on soil properties and microbial communities in alpine meadow in Sanjiangyuan, China (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 49: 173–188 [马录花, 孟宪超, 王贵强, 等. 藓类结皮接种对三江源高寒草甸土壤性状和微生物的影响. 植物生态学报, 2025, 49: 173–188]
 - 74 Wang W Y, Xiao Y M, Wang X Y, et al. Relationship between plant diversity and ecosystem multifunctionality in degraded alpine meadows under multifunctional group species combination models (in Chinese). *Chin J Plant Ecol*, 2025, 49: 103–117 [王雯莹, 肖元明, 王小赞, 等. 多功能群物种配置模式下退化高寒草甸植物多样性与生态系统多功能性的关联. 植物生态学报, 2025, 49: 103–117]
 - 75 Du J, Wei P, Bahadur A, et al. The impacts of revegetation on ecosystem services in the extremely degraded alpine grassland of permafrost regions. *Sustainability*, 2025, 17: 1512
 - 76 He W X, Li H M, Chen F. Community characteristics of grassland sowed with mixed perennial gramineous species on desertified areas of northwest Sichuan (in Chinese). *Chin J Ecol*, 2008, 27: 2079–2082 [何文兴, 李洪梅, 陈放. 川西北草原沙化区多年生禾混播草地的群落学特征. 生态学杂志, 2008, 27: 2079–2082]
 - 77 Li F, De K J, Feng T X, et al. Effect of different grain-bean mixing patterns on root morphology of forage grasses and soil nutrients in the Sanjiangyuan area (in Chinese). *Southwest China J Agric Sci*, 2025, 38: 1–16 [李菲, 德科加, 冯廷旭, 等. 三江源区不同禾豆混播模式对根系形态及土壤养分的影响. 西南农业学报, 2025, 38: 1–16]
 - 78 Liu Q, Lv L, He M, et al. Screening of suitable mixed grass species and seeding rates of four native grass seeds in an alpine mining area. *Sustainability*, 2024, 16: 9587

- 79 Jia Y, Chen S, Wu M, et al. Improved permafrost stability by revegetation in extremely degraded grassland of the Qinghai-Tibetan Plateau. *Geoderma*, 2023, 430: 116350
- 80 Yan H, Gu S, Li S, et al. Grass-legume mixtures enhance forage production via the bacterial community. *Agr Ecosyst Environ*, 2022, 338: 108087
- 81 Liu Y, Zhao L, Liu Y, et al. Restoration of a hillslope grassland with an ecological grass species (*Elymus tangutorum*) favors rainfall interception and water infiltration and reduces soil loss on the Qinghai-Tibetan Plateau. *CATENA*, 2022, 219: 106632
- 82 Liu L, Zeng K, Wu N, et al. Variation in physicochemical and biochemical soil properties among different plant species treatments early in the restoration of a desertified alpine meadow. *Land Degrad Dev*, 2019, 30: 1889–1903
- 83 Huang Q, Zeng K, Chen D, et al. Selecting suitable shrub and herb species to revegetation from the perspective of root exudates: an implication for ecological restoration of desertification in an alpine meadow of the eastern Tibetan Plateau. *Rhizosphere*, 2022, 22: 100506
- 84 Li Q, Yan F, Chen D, et al. Root exudates of *Salix cupularis* orchestrate the accumulation of soil carbon and nitrogen in the rhizosphere during the restoration of a desertified alpine meadow. *Appl Soil Ecol*, 2025, 209: 106041
- 85 Yu H, Bai S W, Li J Y. Towards Breeding 5.0: smart variety by intelligent breeding (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 4687–4690 [余泓, 白世伟, 李家洋. 迈向育种5.0: 智能品种的智能培育. 科学通报, 2024, 69: 4687–4690]

Ecological restoration of degraded grasslands and innovative application of stress-tolerant grass species in the Qinghai-Tibetan Plateau

DING Li^{1†}, DU Peng-Fei^{1†}, ZHANG Fei¹, SUN Ming¹, LIU Jing¹, YAN Li-Jun³, LI Ping⁴,
YAN Jia-Jun¹, LIU Lin², LI Da-Xu³, MA Xiao² & BAI Shi-Qie^{1*}

¹ School of Life Sciences and Agriculture-Forestry, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China

² College of Grassland Science and Technology, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

³ Sichuan Academy of Grassland Sciences, Chengdu 611731, China

⁴ College of Animal Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China

† Contributed equally to this work

* Corresponding author, E-mail: baishiqie@swust.edu.cn

The Qinghai-Tibetan Plateau, functioning as the “Asian Water Tower” and a globally significant carbon sink, sustains alpine grassland ecosystems that are critical for regional ecological security and sustainable development. Over the past five decades, however, the degradation risk of alpine grasslands on the plateau has intensified, primarily manifested as decreased vegetation coverage, loss of soil carbon and nitrogen, microbial functional imbalance, and reduced productivity. Current close-to-natural restoration techniques focus on the mixed sowing of native grass species to simulate natural community composition, promoting the synergistic recovery of soil nutrients and microorganisms and thereby enhancing the stability and resilience of restored grasslands. Nevertheless, the insufficient diversity and supply of stress-tolerant grass species represents a core bottleneck in implementing these close-to-natural restoration technologies. Future research should focus on three key directions: (i) systematically collecting and precisely characterizing native grass germplasm resources, and improving forage quality and adaptability through smart breeding technologies; (ii) screening suitable species combinations and strengthening elite seed propagation; (iii) deeply investigating the ecological mechanisms of soil-plant-microbial interactions. It is recommended that the national government initiate a major scientific program for Qinghai-Tibetan Plateau grassland restoration. This initiative could establish an integrated dual-driven framework that synergizes scientific research with adaptive management practices to enhance the stability and service functions of the grassland ecosystem.

Qinghai-Tibetan Plateau, alpine degraded grassland, close-to-natural restoration, stress-tolerant grass species breeding, grass species combination and configuration, native grass breeding and cultivar development

doi: [10.1360/SSV-2025-0155](https://doi.org/10.1360/SSV-2025-0155)