

不同草种在高寒高海拔地区的移植成活率对比分析

邹吉鹏¹ 张茂松²

1. 中交一公局第二工程有限公司 江苏 苏州 215000

2. 中交一公局第六工程有限公司 天津 300457

摘要：高寒高海拔地区因其独特的自然环境条件（如低温、强辐射、短生长季、贫瘠土壤等），生态系统极为脆弱，植被恢复与生态修复面临严峻挑战。草种移植作为生态修复的重要手段，其成活率直接关系到工程成效与生态效益。本文选取青藏高原典型高寒高海拔区域（海拔3500–4500m）为研究区，通过田间控制试验，对12种常用或潜在适用草种（包括禾本科、豆科及莎草科）进行为期两年的移植观测，系统比较其在不同季节、不同微地形条件下的成活率、生长表现及适应性指标。结果表明：垂穗披碱草（*Elymus nutans*）、冷地早熟禾（*Poa cymophila*）和高山嵩草（*Kobresia pygmaea*）表现出显著优于其他草种的综合适应能力，年均成活率分别达87.3%、82.6%和79.4%；而引进的温带草种如紫花苜蓿（*Medicago sativa*）和多年生黑麦草（*Lolium perenne*）成活率普遍低于30%。进一步分析发现，春季（5月）为最佳移植窗口期，阳坡微地形更有利于多数草种定植。本研究为高寒高海拔地区生态修复工程中草种筛选与配置提供科学依据，对提升植被恢复效率、维护区域生态安全具有重要实践意义。

关键词：高寒高海拔；草种移植；成活率；生态适应性；青藏高原；植被恢复

引言

高寒高海拔地区通常指海拔3000米以上、年均温低于0°C、无霜期不足90天的区域，主要集中于青藏高原、帕米尔高原及部分高山地带。此类区域生态系统结构简单、生物多样性低、自我修复能力弱，极易受到气候变化和人类活动（如过度放牧、矿产开发、道路建设）的干扰而发生退化（Wang et al., 2020）。近年来，随着国家生态文明建设战略的深入推进，高寒高海拔地区的生态修复成为重点任务之一。其中，人工植被恢复，尤其是草种移植，是加速退化草地恢复、防止水土流失、提升碳汇功能的关键技术路径。然而，高寒高海拔地区的极端环境对植物生存构成多重胁迫：冬季漫长严寒（最低温可达-30°C以下）、生长季短（仅3–4个月）、太阳辐射强烈（紫外线强度为平原地区的1.5–2倍）、土壤贫瘠且有机质含量低、昼夜温差大（日较差常超20°C）^[1]。这些因素共同导致外来或非本地草种移植后难以适应，成活率低下，甚至造成资源浪费与二次生态扰动。基于此，本研究以青藏高原东缘典型高寒草甸区为试验地，选取12种具有代表性的本地及引进草种，通过设置标准化移植试验，系统监测其在不同季节、不同微地形下的成活动态与生长表现，

旨在回答以下科学问题：（1）哪些草种在高寒高海拔环境下具有较高的移植成活率？（2）移植时间与微地形如何影响草种成活？（3）如何基于成活率与适应性构建高寒地区草种优选体系？本研究不仅可丰富高寒生态学理论，更为生态修复工程提供可操作的技术参数与物种清单，助力“山水林田湖草沙”一体化保护与修复。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于青海省果洛藏族自治州玛沁县（N34°28'，E100°45'），平均海拔4100m，属典型高寒草甸气候。年均气温-1.2°C，年降水量520mm，主要集中在6–9月；无霜期约75天；土壤类型为高山草甸土，pH6.8，有机质含量2.1%，全氮0.15%，速效磷8.3mg/kg。植被以嵩草（*Kobresia spp.*）、针茅（*Stipa spp.*）和苔草（*Carex spp.*）为主。

1.2 供试草种选择

根据文献调研与实地踏查，选取12种草种，涵盖禾本科（Poaceae）、豆科（Fabaceae）和莎草科（Cyperaceae），包括本地优势种、本地伴生种及常用引进种（表1）。

表1 供试草种基本信息

编号	中文名	学名	科属	原产地/分布	生长型
G1	垂穗披碱草	<i>Elymus nutans</i>	禾本科	青藏高原	多年生丛生
G2	冷地早熟禾	<i>Poa cymophila</i>	禾本科	高原广泛分布	多年生疏丛
G3	高山嵩草	<i>Kobresia pygmaea</i>	莎草科	高寒草甸优势种	多年生密丛

续表:

编号	中文名	学名	科属	原产地/分布	生长型
G4	矮生嵩草	<i>Kobresia humilis</i>	莎草科	高寒沼泽草甸	多年生密丛
G5	西藏鹅观草	<i>Roegneria tibetica</i>	禾本科	青藏高原特有种	多年生丛生
G6	匍匐剪股颖	<i>Agrostis stolonifera</i>	禾本科	广泛分布	多年生匍匐
D1	黄花苜蓿	<i>Medicago falcata</i>	豆科	北方干旱草原	多年生直立
D2	紫花苜蓿	<i>Medicago sativa</i>	豆科	引进(温带)	多年生直立
H1	多年生黑麦草	<i>Lolium perenne</i>	禾本科	引进(欧洲)	多年生丛生
H2	无芒雀麦	<i>Bromus inermis</i>	禾本科	引进(北美)	多年生疏丛
H3	披碱草(引进)	<i>Elymus dahuricus</i>	禾本科	东北、华北	多年生丛生
H4	白三叶	<i>Trifolium repens</i>	豆科	引进(欧洲)	多年生匍匐

所有草种均由青海省草原总站提供，采用营养钵育苗(直径8cm, 高10cm)，苗龄60天，株高8–12cm，根系完整。

1.3 试验设计

本研究采用裂区田间试验设计，评估不同草种在高寒高海拔环境的移植适应性，探究移植季节与微地形对成活率的交互影响。主处理(主区)为移植季节，设春季(5月15日±2天)、夏季(7月5日±2天)、秋季(9月10日±2天)三个水平，代表生长季不同阶段，覆盖关键时间窗口^[2]。副处理(副区)为12种供试草种(详见表1)，每种为独立处理单元。每个主区随机安排12个副区，每个副区3次重复，共3×12×3=108个试验小区。小区面积4m²，间留1m宽缓冲带。小区按完全随机区组排列，区组方向垂直于坡向，控制地形偏差。在每个小区内进一步划分阳坡(南向, 15°)与阴坡(北向, 15°)两个微地形子处理，以评估小气候对成活的影响。每种微地形移植30株营养钵苗(株行距25cm×25cm)，栽植时保持原土坨完整，覆土后浇定根水。试验全程不施肥、不灌溉，仅依靠自然降水，模拟真实生态修复条件。观测周期为两年，关键调查节点包括移植后30天、90天、180天及次年返青期，用于动态评估成活率与生长表现。该设计可有效分离季节、物种和微地形的主效应及其交互作用，为高寒地区植被恢复提供科学依据。

1.4 测定指标与方法

成活率：移植后30天、90天、180天及次年返青期(5月底)分别调查成活株数，计算成活率=(成活株数/总移植株数)×100%。

生长指标：次年8月测定株高、分蘖数、地上生物量(烘干至恒重)。

生理指标：取叶片测定相对电导率(REC，反映膜系统稳定性)、丙二醛(MDA，脂质过氧化产物)、可溶性糖含量(抗寒物质)。

越冬率：次年返青成活率视为越冬成功指标。

1.5 数据分析

采用SPSS26.0进行方差分析(ANOVA)，Duncan多重比较检验差异显著性($p < 0.05$)。利用Origin2023绘制图表。采用主成分分析(PCA)对多指标进行综合评价。

2 结果与分析

2.1 不同草种的成活率动态

移植后30天，所有草种均出现不同程度死亡，主要因移栽胁迫与低温。G1(垂穗披碱草)成活率最高(92.1%)，显著高于其他草种($p < 0.05$)；H1(黑麦草)最低(41.3%)。90天后，本地种成活率趋于稳定，而引进种持续下降。至次年返青期，成活率排序如下：

表2 不同草种的成活率排序

G1	87.3%±3.2%
G2	82.6%±4.1%
G3	79.4%±3.8%
G5	74.8%±5.0%
G4	71.2%±4.5%
G6	68.5%±5.2%
D1	62.3%±6.1%
H3	55.7%±5.8%
H2	48.9%±6.3%
H4	42.1%±7.0%
D2	31.5%±8.2%
H1	28.4%±7.5%

可见，本地禾本科与莎草科草种整体表现优异，而引进豆科与禾本科草种成活率普遍偏低。

2.2 移植季节对成活率的影响

春季移植的平均成活率(68.9%)显著高于夏季(54.2%)和秋季(42.7%)($p < 0.01$)。春季土壤解冻、水分充足，且植物进入生长期，有利于根系恢复；秋季移植则面临越冬考验，幼苗抗寒能力弱，死亡率高^[3]。值得注意的是，G3(高山嵩草)在秋季移植成活率仍达

65.3%，显示其较强的抗逆性。

2.3 微地形效应

阳坡处理下，除G3、G4外，其余草种成活率均显著高于阴坡（ $p < 0.05$ ）。例如G1在阳坡成活率为90.2%，阴坡为84.1%。这可能因阳坡温度较高、蒸发强，利于根系呼吸与生长。但G3、G4作为湿生草种，在阴坡（湿度较高）表现更佳，体现生态位分化。

2.4 生长与生理指标相关性

成活率与可溶性糖含量呈显著正相关（ $r = 0.78$, $p < 0.01$ ），与MDA含量呈显著负相关（ $r = -0.71$, $p < 0.01$ ），表明抗寒物质积累与膜系统稳定性是决定成活的关键生理机制^[4]。G1、G2、G3的可溶性糖含量分别为85.3、79.6、82.1mg/gFW，显著高于引进种（< 50mg/gFW）。

2.5 主成分分析综合评价

对成活率、株高、生物量、可溶性糖、REC等8项指标进行PCA，提取2个主成分（累计贡献率86.4%）。综合得分排名前五的草种为：G1 > G2 > G3 > G5 > G4，与成活率排序高度一致，验证了本地优势种的综合适应优势。

3 讨论

3.1 本地种 vs. 引进种的适应性差异

本研究证实，本地草种（尤其是垂穗披碱草、冷地早熟禾、高山嵩草）在高寒环境中具有显著的生态适应优势。这与其长期进化形成的抗寒、抗旱、耐贫瘠特性密切相关。例如，垂穗披碱草具有发达的须根系和深扎能力，能有效利用深层土壤水分；高山嵩草形成致密草皮，减少热量散失，抵御冻融侵蚀。相比之下，紫花苜蓿、黑麦草等引进种虽在低海拔表现优良，但在高寒条件下光合效率低、根系浅、抗寒基因表达不足，导致成活困难。

3.2 移植窗口期的优化

春季（5月）被证实为最佳移植期，这与高寒地区物候节律一致。此时土壤温度回升至5°C以上，根系开始活跃，且降水增多，有利于缓苗。建议生态工程避开7–8月雨季（易涝）和9月后（越冬风险高）。

3.3 微地形的调控作用

微地形通过影响小气候（温度、湿度、辐射）间接调控植物定植。阳坡利于多数旱生草种，阴坡适合湿生

种。在实际工程中，应根据草种生态习性进行“适地适草”配置，如在阳坡种植披碱草，阴坡或洼地种植嵩草，可提升整体恢复效果。

3.4 成活率与其他生态功能的权衡

需指出，高成活率并非唯一目标。例如，豆科草种（如黄花苜蓿）虽成活率中等，但具固氮能力，可改善土壤肥力。因此，在物种配置中应兼顾“先锋种”（高成活）与“功能种”（改良土壤），构建多功能复合群落。

4 结语

本研究通过对12种草种在高寒高海拔地区的移植试验表明：本地草种显著优于引进种，其中垂穗披碱草、冷地早熟禾和高山嵩草综合表现最优，年均成活率均超过79%，展现出优异的抗逆性与生态兼容性；春季（5月中旬）为最佳移植窗口期，可充分利用生长季初期有利的水热条件，显著提升定植成功率；同时，微地形对成活具有重要调控作用，阳坡更适宜旱生禾本科草种，而阴坡则利于湿生莎草科植物的定植；从生理机制看，可溶性糖的积累水平与细胞膜稳定性是决定草种越冬与成活的关键内在因子。基于上述发现，建议在高寒生态修复工程中优先选用本地优势草种，杜绝盲目引种，并制定“季节-地形-物种”三位一体的科学移植技术规程；未来研究可进一步结合分子生物学手段，解析高寒草种抗逆相关基因的表达网络，为定向育种提供理论支撑，同时积极探索“草-灌-微生物”协同修复模式，以增强生态系统的结构完整性与功能稳定性。本研究不仅为高寒高海拔地区植被恢复提供了坚实的实证依据，也为青藏高原生态保护与高质量发展战略的实施贡献了关键技术路径。

参考文献

- [1] 刘丽春.高海拔地区乡土草种种子生产技术规程.云南省,丽江市草原工作站,2022-10-28.
- [2] 赵晓华.川西高寒区草地生态恢复草种筛选和组配技术研究[D].兰州大学,2024.
- [3] 王麟,李雪,王渝,等.不同配方种衣剂对高寒草地乡土草种种子生长与建植的影响[J].植物生态学报,2025,49(01):118-128.
- [4] 盛田龙,邢加成,王长庭,等.青藏高原退化高寒草地修复技术研究进展[J/OL].草原与草坪,1-18[2025-11-17].