

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.07.015

引用格式:袁玉涛,吴莉,陈晨,等.川西北高寒区皮燕麦结实率的关键影响性状与通径分析[J].草地学报,2026,34(7):2503–2514

YUAN Yu-tao, WU Li, CHEN Chen, et al. Key Influencing Traits and Path Analysis of Seed Setting Rate of Hulled Oats in the Northwestern Sichuan Alpine Region[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(7):2503–2514

川西北高寒区皮燕麦结实率的关键影响性状与通径分析

袁玉涛^{1,2,3}, 吴莉², 陈晨³, 赵梓含³, 丁忠阳³, 刘文辉¹, 白玛⁴, 周青平^{1,3*}, 陈有军^{3*}

(1. 青海大学畜牧兽医科学院, 青海 西宁 810016; 2. 培黎职业学院, 甘肃 张掖 734000; 3. 西南民族大学草地资源学院, 四川 成都 610041; 4. 西藏自治区昌都市丁青县协雄乡农牧综合服务中心, 西藏 昌都 855714)

摘要:为探究川西北高寒生境下影响皮燕麦(*Avena sativa* L.)结实率的关键性状及其调控途径,本研究以27份皮燕麦为材料,对其生育期、农艺性状、光合特性及穗部与籽粒性状进行测定,通过方差分析、相关分析、多元线性回归及通径分析进行多性状关联解析。结果表明:熟性是调控结实率的关键因素,供试资源生育期为118~178 d,结实率介于32.47%~84.72%,且早熟资源平均结实率(66.93%)显著高于晚熟资源(56.51%, $P<0.05$),中熟资源变异系数最高,存在高结实潜力的特异种质;穗数、芒长与分蘖数等性状变异较大($CV>30\%$),具有丰富的遗传多样性;结实率与株高、旗叶长等6个性状均呈极显著负相关($P<0.01$),通径分析表明,株高、有效分蘖数和穗长是直接调控川西北皮燕麦结实率的关键因子,主要通过株高的直接抑制和有效分蘖的直接促进进行调控。因此,该地区宜选用株高适中、有效分蘖多的早中熟品种。

关键词:皮燕麦;高寒生境;熟性;结实率;性状关联;通径分析

中图分类号:S544

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)07-2503-12

Key Influencing Traits and Path Analysis of Seed Setting Rate of Hulled Oats in the Northwestern Sichuan Alpine Region

YUAN Yu-tao^{1,2,3}, WU Li², CHEN Chen³, ZHAO Zi-han³, DING Zhong-yang³, LIU Wen-hui¹, BAI Ma⁴, ZHOU Qing-ping^{1,3*}, CHEN You-jun^{3*}

(1. Academy of Animal Science and Veterinary Medicine of Qinghai University, Xining, Qinghai Province 810016, China;

2. BaiLie Vocational College, Zhangye, Gansu Province 734100, China; 3. Grassland Resources College, Southwest Minzu University, Chengdu, Sichuan Province 610041, China; 4. Xiexiong Township Agriculture and Animal Husbandry Comprehensive Service Center, Chamdo, Xizang 855714, China)

Abstract: To investigate the key traits influencing the seed setting rate of hulled oats (*Avena sativa* L.) and their regulatory pathways in the alpine habitat of northwestern Sichuan, this study utilized 27 hulled oat accessions as experimental materials. Measurements were taken for growth period, agronomic traits, photosynthetic characteristics, as well as panicle and grain traits. Multi-trait association analysis was conducted using variance analysis, correlation analysis, multiple linear regression, and path analysis. The results indicated that maturity is a key factor regulating the seed setting rate. The growth period of the tested accessions ranged from 118 to 178 d, with seed setting rates varying between 32.47% and 84.72%. The average seed setting rate of early-maturing accessions (66.93%) was significantly higher than that of late-maturing ones (56.51%, $P<0.05$). Mid-maturing accessions showed the highest coefficient of variation, suggesting the existence of specific germ-

收稿日期:2025-12-12;修回日期:2026-03-04

基金项目:张掖市市级科技计划项目(ZY2025KY07);培黎职业学院2025年校级科研项目(Plkky-01)资助

作者简介:袁玉涛(1995-),男,汉族,甘肃张掖人,博士研究生,讲师,研究方向为牧草种质资源利用研究, E-mail: yyt4027@163.com;

*通信作者 Author for correspondence, E-mail: qingzh@aliyun.com; chenyoujun2005@163.com

plasms with high seed-setting potential. Traits such as panicle number, awn length, and tiller number exhibited considerable variation ($CV>30\%$), indicating rich genetic diversity. The seed setting rate showed a highly significant negative correlation ($P<0.01$) with six traits, including plant height and flag leaf length. Path analysis revealed that plant height, effective tiller number, and panicle length are key direct factors regulating the seed setting rate of hulled oats in northwestern Sichuan, primarily through the direct inhibitory effect of plant height and the direct promoting effect of effective tillers. Therefore, for this region, it is advisable to select medium-early maturing varieties with moderate plant height and a high number of effective tillers.

Key words: Hulled oat; Alpine habitat; Maturity type; Seed setting rate; Trait association; Path analysis

川西北地区地处青藏高原东缘,作为中国五大牧区之一及关键生态功能区,在畜牧业发展与生态安全维护中占据重要地位^[1]。然而,该区域受制于高海拔、强辐射、干旱寒冷等极端环境条件,牧草产量偏低且季节性生长特征突出,冬春季节饲草供给缺口显著,难以满足牲畜养殖需求^[2-3],这一问题已成为制约当地畜牧业可持续发展的瓶颈,因此缓解饲草供需矛盾具有迫切的现实意义^[4]。

燕麦(*Avena sativa* L.)作为一年生禾本科粮饲兼用型作物,具备抗旱、耐寒、耐贫瘠及高产等优良特性^[5-6],可良好适应川西北高寒生境,已成为该区域构建优质高产人工草地的首选牧草品种^[7-8]。结实率作为评估作物产量潜力与品质优劣的重要指标,直接关系到区域农牧业经济效益的高低^[9]。已有研究证实,结实率受遗传背景与环境因子的协同调控:以水稻(*Oryza sativa* L.)为例,其结实率对温度变化极为敏感,温度每升高 1°C 便可能造成产量降低 $6\%\sim 7\%$,同时导致籽粒垩白度增加^[10],低温胁迫下,水稻PW1N1基因的突变会显著降低花粉活力及结实率,而该基因的过表达则可有效提升植株耐寒性与产量水平^[11];熟性作为作物关键遗传性状,不仅决定了其对光温资源的利用效率,亦是高寒地区作物能否顺利完成生育周期的主要要素^[12]。此外,农艺性状与生理性状可通过调控光合产物的积累与转运过程间接影响结实率,如铜胁迫可通过改变油菜根系脯氨酸含量及抗氧化酶活性影响籽粒产量^[13],而干旱与高温复合胁迫则会破坏叶片含水量稳态、膜系统稳定性、光合作用效率及活性氧代谢平衡,进而干扰产量形成过程^[14]。针对燕麦的研究显示,周青平等^[15]发现寒冷生态区不同熟性燕麦品种的生产性能与结实率存在显著差异,魏露萍等^[16]则明确了穗部结构及轮层数对燕麦结实过程的重要调控作用。然而,当前关于燕麦结实率的研究多集中于单一类型性状的解析,缺乏在熟性分化背景下,从农艺、生理及籽粒等多维度系统阐释性状协同调控机制的研究,尤其在川西北高寒这一特殊生境下,相关调控机制仍不明确。

鉴于此,本研究选取27份皮燕麦资源为研究材料,系统测定其生育期、农艺性状、光合特性、穗部结构及籽粒性状,通过多性状关联分析解析影响结实率的调控因子,旨在为川西北高寒区高产皮燕麦品种的选育提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料及试验地概况

本研究中所使用的皮燕麦种质材料由西南民族大学草地资源学院提供,包括27份在育种过程中通过田间观察筛选出的不同成熟期的皮燕麦种质资源。具体资源编号、名称及种质类型详见表1。

试验地点设在四川省阿坝藏族羌族自治州红原县的四川若尔盖高寒湿地生态系统国家野外科学观测研究站内的温室大棚,该地地理位置为 $31^{\circ}51'\sim 33^{\circ}33'\text{N}$, $101^{\circ}51'\sim 103^{\circ}22'\text{E}$,海拔3470 m,属于典型的大陆性高原寒温带季风气候区。试验期间(2022年5月至10月),温室大棚内的环境数据显示,日平均气温介于 $6^{\circ}\text{C}\sim 16^{\circ}\text{C}$ 之间,其中8月的最高气温约为 27°C ,而5月的最低气温则可降至 -9°C (图1)。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计,播种前精细整地,皮燕麦于2022年5月7日采用条播方式进行播种,每个材料种植3个小区,每个小区的播种面积为 0.36 m^2 ($1.8\text{ m}\times 0.2\text{ m}$),行距为20 cm,播量为 $225\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$,以‘青燕1号’(Y8,早熟品种)作为对照品种,试验地周围1 m种植‘青海444’作为保护行。需要说明的是,试验小区面积小于《规程》标准,主要因研究聚焦个体水平性状评价,不涉及产量指标,边际效应影响较小,同时在有限土地资源内纳入更多种质材料,适当缩小面积。植株生长至拔节期追施有机肥(有机质含量 $23.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机碳 $13.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $179.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 $9.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。试验期间人工除草,定期灌水,统一管理。

表 1 27 份皮燕麦种质资源信息
Table 1 Information on 27 hulled oat germplasm accessions

编号 Number	资源名称 Accession name	种质类型 Germplasm type	编号 Number	资源名称 Accession name	种质类型 Germplasm type
Y1	青永久 003 Qingyongjiu003	育种资源 Breeding resources	Y15	青永久 223 Qingyongjiu223	育种资源 Breeding resources
Y2	青永久 009 Qingyongjiu009	育种资源 Breeding resources	Y16	青永久 225 Qingyongjiu225	育种资源 Breeding resources
Y3	青永久 029 Qingyongjiu029	育种资源 Breeding resources	Y17	青永久 228 Qingyongjiu228	育种资源 Breeding resources
Y4	青永久 037 Qingyongjiu037	育种资源 Breeding resources	Y18	青永久 240 Qingyongjiu240	育种资源 Breeding resources
Y5	青永久 050 Qingyongjiu050	育种资源 Breeding resources	Y19	青永久 264 Qingyongjiu264	育种资源 Breeding resources
Y6	青永久 080 Qingyongjiu080	育种资源 Breeding resources	Y20	青永久 337 Qingyongjiu337	育种资源 Breeding resources
Y7	青永久 333 Qingyongjiu333	育种资源 Breeding resources	Y21	青永久 112 Qingyongjiu112	育种资源 Breeding resources
Y8	青燕 1 号 QingyanNo.1	育成品种 Bred variety	Y22	青永久 125 Qingyongjiu125	育种资源 Breeding resources
Y9	青永久 022 Qingyongjiu022	育种资源 Breeding resources	Y23	青永久 150 Qingyongjiu150	育种资源 Breeding resources
Y10	青永久 068 Qingyongjiu068	育种资源 Breeding resources	Y24	青永久 189 Qingyongjiu189	育种资源 Breeding resources
Y11	青永久 099 Qingyongjiu099	育种资源 Breeding resources	Y25	青永久 200 Qingyongjiu200	育种资源 Breeding resources
Y12	青永久 100 Qingyongjiu100	育种资源 Breeding resources	Y26	青永久 248 Qingyongjiu248	育种资源 Breeding resources
Y13	青永久 196 Qingyongjiu196	育种资源 Breeding resources	Y27	青永久 346 Qingyongjiu346	育种资源 Breeding resources
Y14	青永久 202 Qingyongjiu202	育种资源 Breeding resources	/	/	/

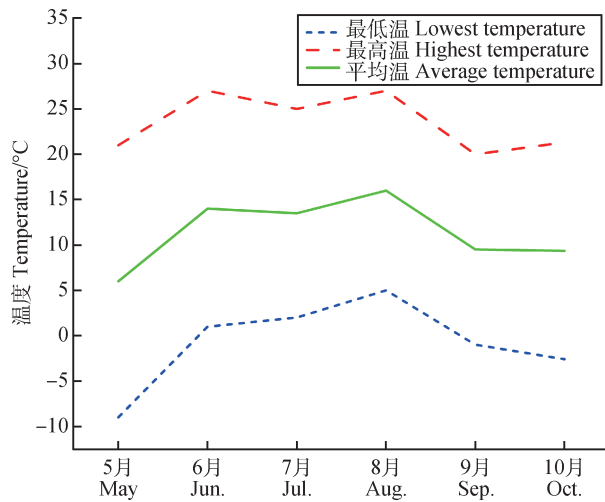


图 1 2022 年 5 月至 10 月温室内温度变化

Fig. 1 Temperature changes in the greenhouse from May to October 2022

1.3 测定指标与方法

1.3.1 生育期记录 参照《NYT 2127—2012 牧草种质资源田间评价技术规程》^[17],系统记录每份皮燕麦种质资源的播种期、出苗期、拔节期、抽穗期、开花期、乳熟期和完熟期等关键生育期。统计播种期至完熟期的天数为全生育天数,熟性分组依据全生育期天数,以对照品种(Y8)为基准进行划分:早熟型为生育期不长于对照的资源;中熟型为生育期较对照延长 1 至 15 天的资源;晚熟型为生育期较对照延长超过 15 天的资源。

1.3.2 农艺性状测定 在开花期至乳熟期,测量株高、茎粗、旗叶长度与宽度、有效分蘖数及无效分蘖数,每个小区每份资源随机取样 5 株生长一致的

植株进行测定,共 15 株,以平均值表示。具体方法如下^[17]:

株高:选择主生殖枝用卷尺测量自地面到植株最高点的高度;

茎粗:选择主生殖枝用游标卡尺测量主茎第四节间直径;

旗叶长度和宽度:选取主生殖枝的旗叶,用直尺测量自叶鞘与叶片连接处至叶尖的直线长度为旗叶长,测量叶片最宽处的直线宽度为旗叶宽;

有效分蘖数:对单株燕麦进行调查,统计能形成正常穗部、具有生殖结实能力的分蘖数量为有效分蘖数,未形成穗部、或穗部发育异常无结实能力的为无效分蘖数。

1.3.3 光合生理指标测定 在开花期选择晴朗天气上午 9:00—11:00 时段,使用便携式光合作用测量系统(LI-6800, USA)测定生长良好植株的旗叶中部,测定指标包括净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和胞间 CO₂ 浓度,每片旗叶重复记录 7 次稳定读数,每份资源测定 3 株作为生物学重复。

1.3.4 穗部结构与籽粒性状测定 在完熟期对穗部特征进行测定。随机选取 15 株,测量穗长、小穗数、芒长与轮层数,以平均值表示。穗长:取主生殖枝的完整穗部,用直尺测量自穗基部至穗顶端的直线长度;小穗数:调查主生殖枝穗部着生的有效小穗数量;轮层数:统计主生殖枝穗部的轮生节层数量。

籽粒性状:取完整小穗脱粒后,使用体视显微镜(Leica S9i)拍摄籽粒图像,并通过 Image J 软件分析种子周长、面积;采用游标卡尺测量种子长、宽、高。

千粒重:使用万分之一分析天平,参照《规程》千粒重测定方法进行。

1.3.5 结实率统计 在完熟期,每份资源随机选取 15 株典型植株,参照《规程》统计每穗小花总数(N1)与正常发育的颖果数(N2),按以下公式计算结实率:

$$\text{结实率}(\%) = N2/N1 \times 100$$

1.4 数据统计与分析

采用 Excel 2019 进行试验数据的初步整理与汇总。所有统计分析在 SPSS 27.0 软件中完成,其中不同组别间性状差异通过单因素方差分析(One-way ANOVA)进行检验,并利用 Duncan 多重比较法判定组间差异显著性,利用 Origin 2024 软件完成所有图表的绘制。

2 结果与分析

2.1 皮燕麦生育期差异分析

27 份皮燕麦种质资源各生育期差异显著,由表 2 可知,27 份皮燕麦种质资源生育期介于 118~178 d,对照品种‘青燕 1 号’(Y8)生育期为 130 d,根据 Y8 生育特性将 27 份皮燕麦资源分为早熟型(8 份)、中熟型(12 份)和晚熟型(7 份),早熟型资源介于 118~130 d,中熟型资源介于 134~144 d,晚熟型资源介于 148~178 d,晚熟型资源生育期最长,显著高于中熟型资源和早熟型资源 18.46% 和 33.93%($P<0.05$),中熟型资源生育期次之,显著高于早熟型资源 13.06%($P<0.05$)。除了播种期、出苗期外,到达其它各时期所需时长:中熟型资源显著高于早熟型资源,显著低于晚熟型资源($P<0.05$,图 2)。

表 2 不同熟性皮燕麦资源生育期统计

Table 2 Growth period statistics of hulled oat accessions of different maturity types

编号 Number	出苗期 Seeding stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	开花期 Flowering stage	灌浆期 Filling stage	完熟期 Ripe stage	生育期 Growth duration	成熟度 Grade of maturity
Y1	5月21日	6月20日	7月13日	7月24日	7月29日	9月7日	124	早熟
Y2	5月25日	6月20日	7月14日	7月24日	8月1日	9月5日	122	早熟
Y3	5月21日	6月20日	7月12日	7月23日	7月31日	9月1日	118	早熟
Y4	5月21日	6月10日	7月13日	7月23日	7月3日	9月8日	125	早熟
Y5	5月21日	6月20日	7月12日	7月22日	7月29日	9月3日	120	早熟
Y6	5月21日	6月19日	7月11日	7月23日	7月31日	9月3日	120	早熟
Y7	5月21日	6月15日	7月10日	7月24日	8月2日	9月1日	118	早熟
Y8	5月20日	6月18日	7月22日	8月4日	8月11日	9月13日	130	早熟
Y9	5月21日	6月20日	7月18日	7月31日	8月7日	9月18日	135	中熟
Y10	5月25日	6月22日	7月28日	8月10日	8月18日	9月21日	138	中熟
Y11	5月21日	6月23日	7月18日	7月29日	8月1日	9月17日	134	中熟
Y12	5月21日	6月23日	7月28日	8月10日	8月17日	9月27日	144	中熟
Y13	5月21日	6月16日	7月28日	8月7日	8月15日	9月21日	138	中熟
Y14	5月21日	6月23日	7月25日	8月7日	8月14日	9月23日	140	中熟
Y15	5月21日	6月17日	7月25日	8月7日	8月15日	9月20日	137	中熟
Y16	5月21日	6月20日	7月23日	8月10日	8月16日	9月21日	138	中熟
Y17	5月21日	6月25日	7月20日	7月30日	8月7日	9月18日	135	中熟
Y18	5月25日	6月19日	7月20日	8月5日	8月12日	9月19日	136	中熟
Y19	5月21日	6月23日	7月23日	8月9日	8月17日	9月25日	142	中熟
Y20	5月21日	6月22日	7月25日	8月10日	8月18日	9月23日	140	中熟
Y21	5月25日	7月9日	8月4日	8月27日	9月3日	10月12日	160	晚熟
Y22	5月21日	7月6日	8月3日	8月24日	9月1日	10月11日	159	晚熟
Y23	5月25日	7月1日	8月8日	8月26日	9月3日	10月13日	161	晚熟
Y24	5月21日	7月8日	8月2日	9月12日	9月20日	10月28日	178	晚熟
Y25	5月21日	7月8日	8月5日	8月12日	8月20日	10月28日	178	晚熟
Y26	5月21日	7月5日	7月31日	8月10日	8月18日	9月30日	148	晚熟
Y27	5月21日	7月6日	8月1日	8月25日	9月1日	10月13日	161	晚熟

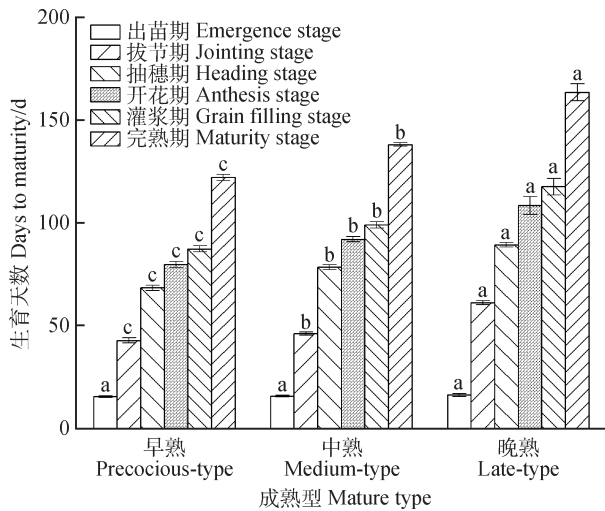


图 2 不同熟性皮燕麦资源生育期差异

Fig. 2 Differences in growth period among hulled oat accessions with different maturity types

注:不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Note: different lower case letters mean significant difference ($P < 0.05$). The same as below

2.2 皮燕麦资源结实率比较分析

由图 3(左)可知,供试的 27 份皮燕麦资源间结

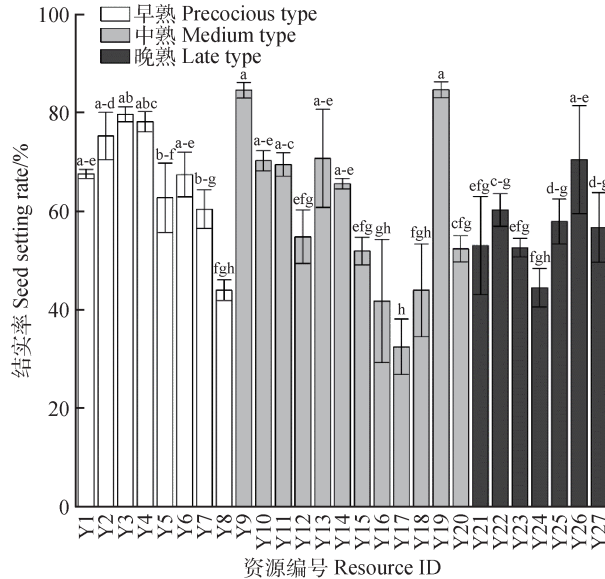


图 3 皮燕麦种质资源结实率变异分析(左)与基于熟性的分组比较(右)

Fig. 3 Analysis of seed setting rate variation among hulled oat germplasm resources (left) and comparison based on maturity groups (right)

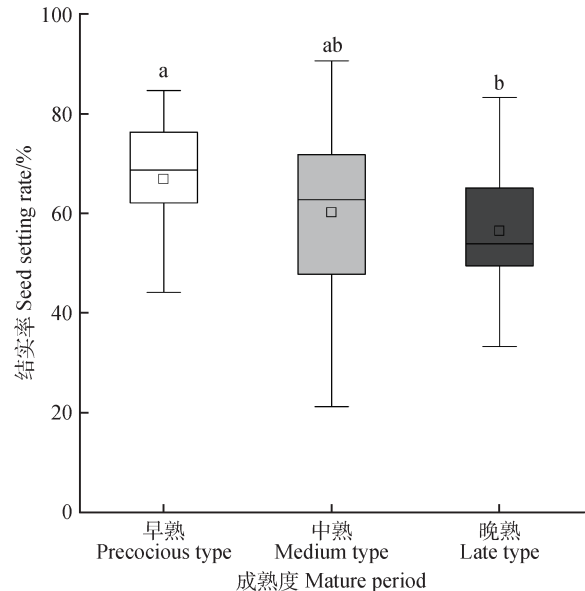
该群体在穗部结构与分蘖特性上展现出极丰富的多样性,穗数($CV=68.77\%$)与芒长($CV=68.30\%$)为变异最大的性状,属高度变异范畴,其在资源间存在极端分化;无效分蘖($CV=42.10\%$)与有效分蘖($CV=41.05\%$)也表现出高度变异,反映资源间在分蘖能力和成穗效率上存在显著差异;

实率存在显著差异,变异范围达 32.47% (Y17)至 84.72% (Y19),平均变异系数为 25.63% ,说明群体内存在丰富的遗传多样性。从分布结构来看,大部分资源(13 份,占比 48.15%)的结实率集中在 60% 至 80% 之间,而结实率高于 80% 的种质(Y9, Y19)仅占总数的 7.41% ,表现出筛选高结实率种质的潜力。

基于确定的熟性分组进一步分析表明,熟性是调控结实率的关键因子(图 3(右))。早熟组资源平均结实率最高(66.93%),较晚熟组(56.51%)显著提高了 18.44% ($P < 0.05$);中熟组平均结实率为 60.24% ,与早、晚熟组无统计学差异。

2.3 皮燕麦多性状变异分析

为全面评估该群体的表型多样性,对 27 份川西北皮燕麦资源的 20 个性状进行描述统计。由表 3 可知,供试资源间所有性状均存在广泛变异,依据变异系数(CV)将性状变异程度划分为三个等级:高度变异($CV \geq 30\%$)、中度变异($15\% \leq CV < 30\%$)和低度变异($CV < 15\%$)。



此外,穗长($CV=36.41\%$)、气孔导度($CV=37.76\%$)和蒸腾速率($CV=33.69\%$)也呈高度变异;营养器官中的旗叶宽($CV=28.12\%$)、旗叶长($CV=24.55\%$)及轮层数($CV=25.03\%$),和生理指标中的净光合速率($CV=24.31\%$)表现为中度变异,表明这些性状具有可筛选潜力;种子面积

(CV=21.42%)、株高(CV=19.30%)、茎粗(CV=18.34%)等基础农艺性状同样维持中等程度变异。而籽粒性状中种子长(CV=12.16%)、种子宽(CV=

10.71%)、种子高(CV=12.65%)、生育期(CV=11.91%)及千粒重(CV=13.21%),均表现为低度变异,说明其在籽粒基本形态上的遗传保守性。

表 3 27 份皮燕麦资源多性状的描述统计

Table 3 Descriptive statistics of multiple traits in 27 hulled oat accessions

性状 Trait	平均值±标准差 Mean±standard deviation	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	变异系数 Coefficient Variation/%
生育期 Growth period/d	139.96±16.67	178	118	11.91
株高 Plant height/cm	108.67±20.97	152.24	60.71	19.30
茎粗 Stem diameter/mm	3.13±0.57	5.42	1.93	18.34
旗叶长 Flag leaf length/cm	29.63±7.28	46.11	15.35	24.55
旗叶宽 Flag leaf width/cm	1.53±0.43	2.85	0.53	28.12
有效分蘖 Effective tillers	2.14±0.88	5	1	41.05
无效分蘖 Ineffective tillers	2.62±1.10	6	1	42.10
穗长 Panicle length/cm	23.88±8.69	45.15	12.68	36.41
穗数 Panicle number	31.28±21.52	110	6	68.77
轮层数 Whorl number	4.15±1.04	7	2	25.03
种子面积 Seed area/mm ²	28.48±6.10	39.36	17.59	21.42
种子周长 Seed perimeter/mm	33.76±5.54	45.74	24.58	16.42
种子长 Seed length/mm	17.74±2.16	22.21	12.81	12.16
种子宽 Seed width/mm	2.82±0.30	3.57	2.25	10.71
种子高 Seed height/mm	2.21±0.28	2.97	1.65	12.65
芒长 Awn length/mm	2.06±1.40	3.86	0	68.30
千粒重 Thousand grain weight/g	2.96±0.39	3.96	2.18	13.21
蒸腾速率 Transpiration rate/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹ H ₂ O)	3.04±1.02	5.64	0.93	33.69
净光合速率 Net photosynthetic rate/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ CO ₂)	10.88±2.65	16.57	3.07	24.31
胞间二氧化碳浓度 Intercellular CO ₂ concentration/(μmol·mol ⁻¹ CO ₂)	211.79±33.44	274.88	101.35	15.79
气孔导度 Stomatal conductance/(mol·m ⁻² ·s ⁻¹ H ₂ O)	0.11±0.04	0.25	0.03	37.76

2.4 基于熟性分组的性状均值比较与方差分析

为明确不同熟性组别燕麦资源的表型差异,对早熟、中熟及晚熟组资源的农艺性状、穗部结构、籽粒特性及光合生理等 20 个性状进行比较及方差分析(表 4),熟性组间共有 9 个性状存在显著差异($P<0.05$),其中株高、旗叶长、旗叶宽、穗长及种子面积 5 个性状达极显著差异水平($P<0.01$)。上述显著差异性状的 F 值均显著大于 1,说明组间变异显著高于组内随机变异,熟性分化是导致这些性状产生差异的主要因素。

具体而言,营养生长相关性状表现出随熟期推迟而增强的规律,晚熟型资源株高均值为 126.10 cm,显著高于早熟及中熟资源 19.6%~28.3% ($P<0.05$);晚熟资源的旗叶长(33.94 cm)和旗叶宽(1.81 cm)亦显著大于早熟组资源($P<0.05$),表明晚熟资源更易形成高大的植株冠层结构。穗部及籽粒性状方面,晚熟资源穗长均值为 30.05 cm,较早熟、中熟资源显著增加 30.60%~52.00% ($P<0.05$);同时晚熟资源的无效分蘖数显著高于早熟

资源($P<0.05$),说明其可能存在较高的生殖生长冗余;晚熟与中熟资源的种子面积积极显著大于早熟资源($P<0.01$),晚熟资源的芒长亦显著高于早熟资源($P<0.05$)。晚熟资源的净光合速率和气孔导度均显著高于早熟资源($P<0.05$),表明晚熟资源在开花期具有更强的碳同化能力,为其较长生育期内的生物量累积提供了生理保障。综合来看,晚熟型燕麦资源在多数营养生长性状、穗部性状及光合生理特性上表现更优。

2.5 表型性状相关性分析

为系统解析表型性状间的内在调控关联,对生育期等 21 个关键性状进行 Pearson 相关性分析(图 4),川西北皮燕麦表型性状构建了以生育期(GP)和结实率(SSR)为主要调控节点的复杂互作网络。生育期(GP)作为表型分化的核心因子,与植株形态建成及穗部发育存在广泛正向关联:与株高(PH)、旗叶宽(FLW)、穗长(PL)、穗数(PN)等 7 个性状呈极显著正相关($P<0.01$),揭示了晚熟资源倾向于形

表 4 基于熟性分组的性状特征比较

Table 4 Comparison of trait characteristics grouped by maturity type

性状/成熟度 Trait/Mature Period	早熟 Precocious type	中熟 Medium type	晚熟 Late type	F 值 F-value	P 值 P-value
GP/d	122.13±3.90 ^c	138.08±2.91 ^b	163.57±10.29 ^a	274.647	0.00
PH/cm	98.29±21.12 ^b	105.42±15.36 ^b	126.10±19.13 ^a	14.104	0.000
SD/mm	3.31±0.74 ^a	2.97±0.43 ^b	3.20±0.52 ^{ab}	2.856	0.064
FLL/cm	29.94±8.49 ^{ab}	26.9±5.71 ^b	33.94±6.22 ^a	7.211	0.001
FLW/cm	1.38±0.49 ^b	1.46±0.32 ^b	1.81±0.41 ^a	7.585	0.001
ET	2.25±0.99 ^a	1.97±0.88 ^a	2.29±0.72 ^a	1.141	0.325
IT	2.25±0.68 ^b	2.58±1.11 ^{ab}	3.10±1.34 ^a	3.537	0.034
PL/cm	19.77±5.61 ^b	23.01±7.99 ^b	30.05±9.64 ^a	9.972	0.000
PN	24.67±15.26 ^b	31.28±24.47 ^{ab}	38.86±20.57 ^a	2.529	0.086
WN	4.00±0.78 ^a	4.08±1.16 ^a	4.43±1.08 ^a	1.083	0.344
SA/mm ²	25.09±4.97 ^b	29.28±5.42 ^a	30.97±6.89 ^a	6.585	0.002
SP/mm	31.99±5.64 ^a	34.12±4.75 ^a	35.17±6.39 ^a	2.026	0.139
SL/mm	17.97±2.09 ^a	17.51±1.81 ^a	17.86±2.77 ^a	0.372	0.691
SW/mm	2.80±0.34 ^a	2.79±0.29 ^a	2.89±0.28 ^a	0.795	0.455
SH/mm	2.11±0.26 ^b	2.23±0.29 ^{ab}	2.28±0.26 ^a	2.381	0.099
AL/mm	1.69±1.43 ^b	1.93±1.41 ^b	2.70±1.20 ^a	3.324	0.041
TGW/g	2.88±0.29 ^a	2.93±0.42 ^a	3.10±0.42 ^a	1.873	0.161
Tr/(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹ H ₂ O)	2.74±1.08 ^b	3.00±1.00 ^{ab}	3.44±0.91 ^a	2.786	0.068
Pn/(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹ CO ₂)	9.96±3.33 ^b	10.78±2.18 ^{ab}	12.12±2.06 ^a	4.084	0.021
Ci/(μmol·mol ⁻¹ CO ₂)	205.10±41.09 ^a	210.10±27.81 ^a	222.32±31.66 ^a	1.592	0.210
Gs/(mol·m ⁻² ·s ⁻¹ H ₂ O)	0.10±0.05 ^b	0.11±0.03 ^b	0.13±0.04 ^a	4.022	0.022

注:GP表示生育期,PH表示株高,SD表示茎粗,FLL表示旗叶长,FLW表示旗叶宽,ET表示有效分蘖,IT表示无效分蘖,PL表示穗长,PN表示穗数,WN表示轮层数,SA表示种子面积,SP表示种子周长,SL表示种子长,SW表示种子宽,SH表示种子高,AL表示芒长,TGW表示千粒重,Tr表示蒸腾速率,Pn表示净光合速率,Ci表示胞间二氧化碳浓度,Gs表示气孔导度。同行不同小写字母表示不同处理间有显著差异($P<0.05$),下同

Note: GP indicates Growth period, PH indicates Plant height, SD indicates Stem diameter, FLL indicates Flag leaf length, FLW indicates Flag leaf width, ET indicates Effective tillers, IT indicates Ineffective tillers, PL indicates Panicle length, PN indicates Panicle number, WN indicates Whorl number, SA indicates Seed area, SP indicates Seed perimeter, SL indicates Seed length, SW indicates Seed width, SH indicates Seed height, AL indicates Awn length, TGW indicates Thousand grain weight, Tr indicates Transpiration rate, Pn indicates Net photosynthetic rate, Ci indicates Intercellular CO₂ concentration, Gs indicates Stomatal conductance. The significant difference between different treatments of the same trait is denoted as different lowercase letters in the same line ($P<0.05$), the same as below

成高大植株冠层及复杂穗部结构的内在关联机制。而结实率(SSR)与株高(PH)、旗叶长(FLL)、旗叶宽(FLW)、穗长(PL)、穗数(PN)及轮层数(WN)均呈极显著负相关($P<0.01$),表明营养生长及穗部发育过度会加剧与生殖生长的资源竞争,进而抑制结实效率,这与前文晚熟资源营养及穗部性状优势显著但结实率最低的表型特征相对应。营养生长中,株高(PH)、茎粗(SD)及旗叶形态(FLL、FLW)间均呈极显著正相关($P<0.01$);穗部结构内,穗长(PL)、穗数(PN)与轮层数(WN)紧密关联,且前二者均与蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)呈显著正相关($P<0.05$);蒸腾速率(Tr)、净光合速率(Pn)、胞间CO₂浓度(Ci)、气孔导度(Gs)及籽粒性状模块内部亦呈稳定协同性,其中千粒重(TGW)与净光合速率(Pn)极显著正相关($P<0.01$),说明光合产物供应影响籽粒充实。籽粒形态建成中,种子长(SL)与种子宽

(SW)、种子高(SH)、千粒重(TGW)呈显著负相关($P<0.05$);值得注意的是,多数营养生长性状与结实率呈普遍负相关,而有效分蘖(ET)对结实率存在正向效应。相关性网络分析表明川西北皮燕麦性状紧密关联、协同与权衡并存,生育期主导多性状连锁分化,结实率则集中体现性状间的权衡关系。

2.6 影响结实率的关键性状多元线性回归分析

为进一步定量解析调控川西北皮燕麦结实率的关键性状,基于相关性分析结果,将与结实率关联密切的9个重要性状纳入多元线性回归模型,明确各性状对结实率的直接效应及贡献权重。模型整体检验结果显示,回归模型达极显著水平($F=5.52, P<0.001$),调整后决定系数为0.337,表明9个性状共同解释了结实率33.7%的表型变异,模型拟合效果良好。

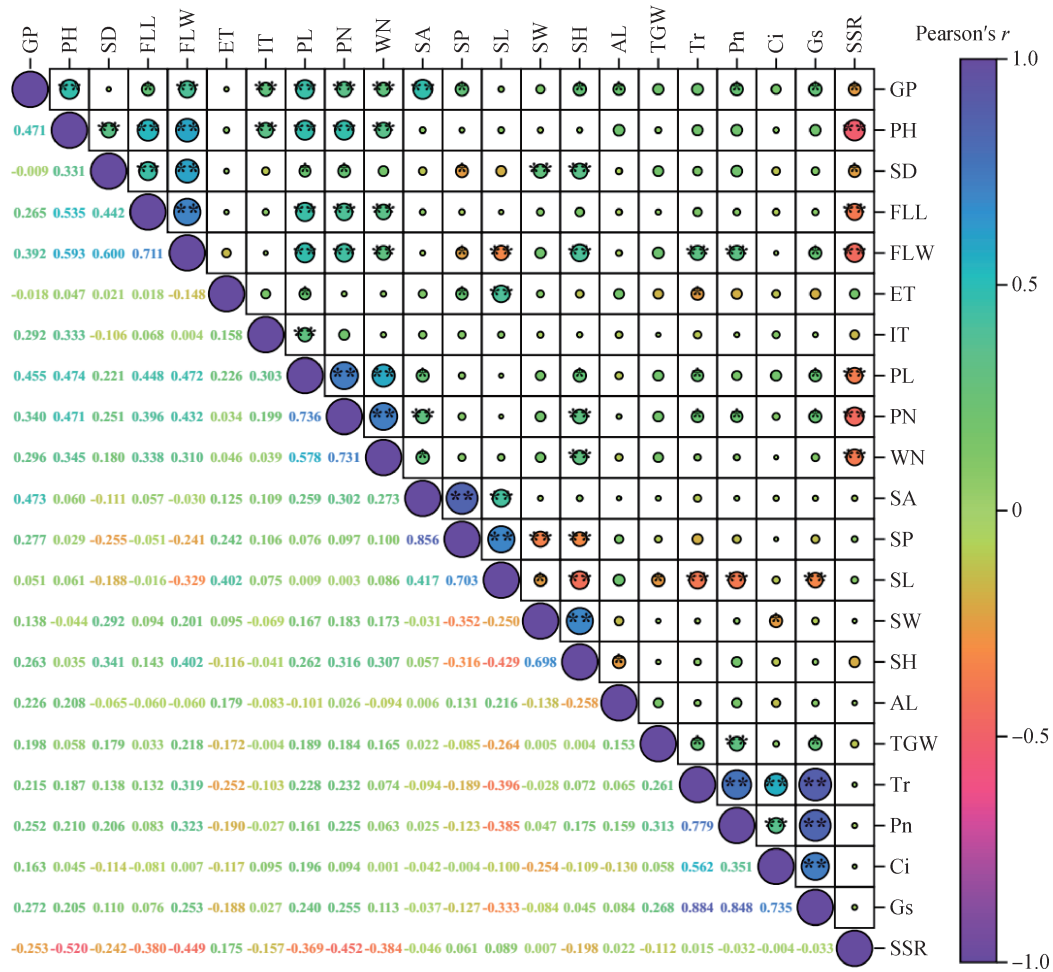


图4 皮燕麦表型性状相关性热图

Fig. 4 Correlation heatmap of phenotypic traits in hulled oat

注:图中展示了各变量两两之间的Pearson相关系数 r 。右侧颜色条表示相关系数的取值范围,从-1(强负相关,红色)到+1(强正相关,蓝色),中间值对应 $r=0$ (无相关)。圆点的大小与相关系数的绝对值成正比,绝对值越大,圆点越大。* $P<0.05$,** $P<0.01$ 。SSR表示结实率。下同

Note: The Fig. displays pairwise Pearson correlation coefficients (r) between the variables. The color scale to the right indicates the range of correlation coefficients, from (-1) (strong negative correlation, red) to (+1) (strong positive correlation, blue), with intermediate colors corresponding to ($r=0$) (no correlation). Dot sizes are proportional to the absolute values of the correlation coefficients, with larger dots representing stronger correlations. Significance levels are denoted as follows: ($P<0.05$) (*) and ($P<0.01$) (**). SSR indicates Seed Setting Rate. The same as below

基于标准化回归系数构建的结实率预测模型为:

$$Y = 89.81 - 0.28X_1 + 5.21X_2 - 0.46X_3 + 4.68X_4 - 0.04X_5 - 4.55X_6 + 0.09X_7 - 1.25X_8 - 0.26X_9。$$

式中 Y 表示结实率(SSR), $X_1 \sim X_9$ 依次表示株高(PH)、有效分蘖数(ET)、穗长(PL)、蒸腾速率(Tr)、旗叶长(FLL)、旗叶宽(FLW)、种子面积(SA)、千粒重(TGW)和净光合速率(Pn)。

回归分析表明(表5),各性状对结实率的调控效应存在显著差异。其中,株高表现出最强的负向调控因子($\beta = -0.378$, $P = 0.002$),说明植株过高

时,营养生长与生殖生长形成竞争,抑制结实率提升;有效分蘖数是最稳定的正向调控因子($\beta = 0.291$, $P = 0.006$),模型预测显示其每增加一个单位,结实率可平均提高5.21%,说明有效分蘖数是决定成穗效率与结实潜力的重要性状;穗长呈现显著负向效应($\beta = -0.254$, $P = 0.045$),表明过大的穗部结构可能导致“源”供应能力无法匹配“库”容量需求,进而引发源库失衡并降低结实率。蒸腾速率表现为边缘显著的正向贡献($\beta = 0.305$, $P = 0.055$),说明水分蒸腾过程与结实形成存在潜在的协同关联,可能通过影响养分运输效率间接调控结

实率。净光合速率(Pn)、旗叶形态(FLL、FLW)及籽粒性状(SA、TGW)等指标未检测到显著直接效应,些性状可能通过调控有效分蘖、穗部发育等中间变量对结实率产生间接影响。模型共线性检验结果显示,所有变量的方差膨胀因子(VIF)均小于

5,表明变量间无严重共线性干扰。多元线性回归分析明确株高(PH)、有效分蘖数(ET)和穗长(PL)是调控川西北皮燕麦结实率的关键直接因子,其中株高与穗长的负向效应揭示了产量形成过程中营养生长与生殖生长、源与库间的内在权衡机制。

表 5 结实率与关键性状的多元线性回归分析

Table 5 Multiple linear regression analysis of seed setting rate with key traits

变量 Variable	未标准化系数 Unstandardized coefficient	标准化系数 Standardization coefficient (Beta)	t 值 t-value	P 值 P-value
常量	89.81	/	5.53	0
PH	-0.28	-0.378	-3.14	0.002
ET	5.21	0.291	2.81	0.006
PL	-0.46	-0.254	-2.04	0.045
Tr	4.68	0.305	1.96	0.055
FLL	-0.04	-0.019	-0.133	0.894
FLW	-4.55	-0.124	-0.791	0.431
SA	0.086	0.033	0.337	0.737
TGW	-1.25	-0.031	-0.311	0.757
Pn	-0.26	-0.044	-0.282	0.779

2.7 通径分析

通径分析结果揭示了各性状影响结实率的复杂作用机制(表 2)。株高是首要限制因子,其与结实率的负向总效应(-0.520)主要来源于强大的直接抑制作用(直接通径系数=-0.378),占总效应的 72.7%,表明株高对结实率的负面影响主要是通过直接竞争资源实现,而非通过影响其他测量性状的间接路径。有效分蘖是最稳定的正向驱动因子,直接通径系数为 0.291,与回归分析结果一致,但其总效应受到负向间接路径的削

弱,决策系数为 0.017,表明在培育高分蘖能力材料时,需兼顾性状间协同性。穗长呈现双重调控模式,其直接通径系数为-0.254,通过其他性状产生显著正向间接效应(0.235),决策系数为-0.252。蒸腾速率的调控尤为特殊,其直接通径系数达 0.305,却因强烈的负向间接效应(-0.290)而表现为微弱表型相关(0.015),这是典型的多重共线性所导致,这也解释了其在回归分析中呈边缘显著。川西北皮燕麦结实率主要受株高的直接抑制和有效分蘖的直接促进作用调控,穗长与蒸腾速率则通过直接和间接效应参与调控。

表 6 影响结实率关键因子的通径分析

Table 6 Path analysis of key determinants affecting seed setting rate

自变量 Independent variable	与 Y 的简单相关系数 The simple correlation coefficient with Y	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient				决策系数 Determination coefficient
			株育 PH	有效分 ET	穗长 PL	腾速率 Tr	
PH	-0.520**	0.378**	—	0.018	0.179**	0.071*	-0.535
ET	0.175	0.291**	0.014	—	0.066*	-0.073*	0.017
PL	-0.369**	0.254*	0.120**	0.057*	—	0.058*	-0.252
Tr	0.015	0.305	0.057*	-0.077*	0.070*	—	-0.084

3 讨论

川西北地区作为典型大陆性高原寒温带季风气候区,具有年均气温低、有效积温不足、昼夜温差大等显著特点^[18]。高寒生境下,作物熟性与种子产量的形成机制尤为复杂^[19-20],本研究对 27 份皮燕麦资源分析发现,其生育期存在显著分化(118~178 d),据此划分为早熟(118~130 d)、中熟(134~144 d)和

晚熟(148~178 d)三类,这一特征是皮燕麦对区域光热资源时空分布的生态适应策略。早熟资源表现出最高的平均结实率(66.93%),显著优于晚熟资源($P<0.05$),这一结果与棉花(*Gossypium hirsutum* L.)和小麦(*Triticum aestivum* L.)中的研究结论一致^[21-22],然而,有研究表明,早熟品种常因缩短成熟期而牺牲种子大小和胁迫耐受性^[23],导致产量降低,但对于川西北的高寒生境条件,早熟资源能

更好适应生长季限制;中熟资源在供试群体中占比最高,且其结实率的变异最丰富,这一特征表明,中熟资源群体内蕴含着较大的遗传变异与选择潜力,是挖掘和创制高结实率优异种质的重点筛选对象^[24],为培育适应性强、产量稳定的品种提供了重要保障^[25];晚熟资源通过延长成熟期提高株高、旗叶面积和穗长等性状以进行养分储备,但可能面临环境风险而减产,导致结实率下降^[23,26],这与“定燕2号”在川西北地区难以完成完整生育周期的结果一致^[27],在川西北高寒生境下,中早熟资源能够规避胁迫,进而实现稳产。

川西北皮燕麦 20 个表型性状的变异分析显示,穗部结构、分蘖特性及部分光合生理性状存在高度遗传变异($CV>30\%$),表现出高度遗传变异,这为高产育种提供了丰富的遗传改良基础。李晶等^[28]研究表明燕麦穗粒重变异系数达 31.21%,为变异最大的性状;冯长松等^[29]对黄河滩区秋播饲用燕麦的评价也发现,籽粒产量相关性状变异幅度达 21.93%~33.18%,与本研究高变异性状的分布特征一致,进一步说明了燕麦穗部及光合相关性状的遗传改良潜力。Pearson 相关性分析构建以生育期(GP)和结实率(SSR)为主要调控节点的复杂的相关性互作网络:生育期(GP)作为物候核心节点,与株高(PH)、穗长(PL)等 7 个性状呈极显著正相关($P<0.01$),表明延长生育期可系统性促进植株冠层发育与穗部结构复杂化,这可能与光合效率相关基因的富集表达调控冠层形态及穗部发育有关^[30-32]。而结实率(SSR)作为产量核心节点,与株高(PH)、旗叶长(FLL)等 6 个关键农艺性状呈极显著负相关($P<0.01$),揭示营养生长过度投入会导致生殖生长资源分配不足,最终抑制结实,该营养生长与生殖生长的权衡关系具有物种普遍性,已在榧树(*Torreya grandis* Fort. ex Lindl.)、拟南芥(*Arabidopsis thaliana* L.)、甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)及蚕豆(*Vicia faba* L.)等作物中得到证实^[33-35],为研究结果提供了跨物种的机制佐证。

多元线性回归与通径分析进一步量化了表型关联背后的直接/间接调控效应,明确了结实率调控的因子。株高被证实为结实率最强的负向直接调控因子(直接通径系数 $=-0.378$, $P=0.002$),结合川西北高寒多风的生境特征,株高过高不仅增加倒伏风险,更会通过直接加剧营养生长与生殖生长的资源竞争,减少向籽粒的光合产物分配。该结论

与魏孔涛等^[36]对环青海湖燕麦的研究结果一致,即株高和干草产量对种子产量的贡献较小,影响较弱。有效分蘖数是结实率最稳定的正向驱动因子(直接通径系数 $=0.291$, $P=0.006$),其通过直接提升单位面积成穗数优化群体产量构成,这与燕麦、水稻、大麦(*Hordeum vulgare* L.)等禾本科作物中“分蘖数是籽粒产量重要决定因子”的共识相符^[32,37-38]。穗长呈现出直接负效应和间接正效应的双重调控,过长穗部虽扩大“库”容量,但加剧籽粒间光合同化物竞争,导致直接负效应抵消部分间接增益,这一结果为穗部性状改良提供理论依据。

4 结论

本研究系统解析了川西北高寒生境下皮燕麦结实率的形成机制,明确了熟性分化是影响结实率的系统性因素,供试资源生育期介于 118 d~178 d,结实率介于 32.47%~84.72%,早熟型资源表现出最高的结实率,显著高于晚熟型资源($P<0.05$);结实率(SSR)与株高(PH)、旗叶长(FLL)等 6 个指标均呈极显著负相关($P<0.01$),结实率通过株高的直接抑制和有效分蘖的直接促进进行调控,同时受穗长和蒸腾速率的间接效应共同影响。在川西北高寒生境下引种或育种中,应优选株高适中、有效分蘖多的中早熟资源,本研究为当地高产燕麦育种提供理论依据。

参考文献

- [1] 程明军,王福增,唐玮琦,等. 川西北地区青贮玉米种植气候区划[J]. 玉米科学,2023,31(6):82-89
CHENG M J, WANG F Z, TANG W Q, et al. Climatic division of silage maize planting in northwest Sichuan[J]. Journal of Maize Sciences, 2023, 31(6): 82-89
- [2] 徐新妍,袁淑杰,刘芷含,等. 川西北生态示范区及周边地区极端气温指数时空变化分布特征[J]. 高原气象,2025,44(5): 1301-1315
XU X Y, YUAN S J, LIU Z H, et al. Characteristics of temporal and spatial distribution of extreme temperature indices in the ecological demonstration area and surrounding areas of northwest Sichuan Province[J]. Plateau Meteorology, 2025, 44(5): 1301-1315
- [3] XIN Y F, CHEN C, ZHONG Y H, et al. Effect of storage time on the silage quality and microbial community of mixed maize and faba bean in the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 13: 1090401
- [4] 文兴金,杨继芝,肖启银,等. 川西北高原全株玉米和大豆混

- 贮比例对青贮品质的影响[J]. 中国草地学报, 2022, 44(8): 115-120
- WEN X J, YANG J Z, XIAO Q Y, et al. Effect of mixed silage ratio of whole plant corn and Soybean on silage quality in north-west Sichuan Plateau[J]. Chinese Journal of Grassland, 2022, 44(8): 115-120
- [5] 张波, 任长忠. 燕麦基因组学与分子育种研究进展[J]. 植物学报, 2022, 57(6): 785-791
- ZHANG B, REN C Z. Advances in oat genomic research and molecular breeding [J]. Bulletin of Botany, 2022, 57(6): 785-791
- [6] 牛浴林, 全宗永, 陈鹏伟, 等. 土壤改良剂对柴达木盐碱地燕麦生产性能的影响[J]. 草地学报, 2026, 34(4): 1483-1491
- NIU Y L, TONG Z Y, CHEN P W, et al. Effects of Soil Amendments on Production Performance of Oat in Chaidamu Saline-alkali Soils[J/OL]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4): 1483-1491
- [7] 王明涛, 方江平, 包赛很那, 等. 藏北燕麦草地持续利用与撂荒对高寒草甸土壤特征的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1801-1808
- WANG M T, FANG J P, BAO S, et al. Effects of continuous utilization and abandonment of oat grassland on soil characteristics of Alpine grassland in northern Tibet [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(8): 1801-1808
- [8] 李文, 魏廷虎, 阿保地, 等. 化肥减施配合有机肥对高寒区燕麦营养品质和土壤养分的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(12): 2878-2886
- LI W, WEI T H, A B D, et al. Effects of reduction of chemical fertilizer and organic manure supplement on oat nutrient quality and soil nutrient in Alpine cold region [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12): 2878-2886
- [9] 王介繁, 董笛, 张然, 等. 不同区域 100 份羊草种质结实性状的综合评价[J]. 中国草地学报, 2025, 47(10): 11-21
- WANG J F, DONG D, ZHANG R, et al. Comprehensive evaluation of seed setting traits in 100 *Leymus chinensis* germplasms from different regions [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(10): 11-21
- [10] SU Q, ROHILA J S, RANGANATHAN S, et al. Rice yield and quality in response to daytime and nighttime temperature increase - A meta-analysis perspective [J]. Science of the Total Environment, 2023, 898: 165256
- [11] WANG Y L, GONG C Y, LIU L T, et al. The invertase gene *PWIN1* confers chilling tolerance of rice at the booting stage *via* mediating pollen development [J]. Plant, Cell & Environment, 2024, 47(12): 4651-4663
- [12] 冯璐, 董合忠. 棉花熟性及其评价指标和方法[J]. 棉花学报, 2022, 34(5): 458-470
- FENG L, DONG H Z. A review: cotton crop maturity and its predictors [J]. Cotton Science, 2022, 34(5): 458-470
- [13] LUO T, SHENG Z W, CHEN M, et al. Phytoremediation of copper-contaminated soils by rapeseed (*Brassica napus* L.) and underlying molecular mechanisms for copper absorption and sequestration [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 273: 116123
- [14] BHARDWAJ A, DEVI P, CHAUDHARY S, et al. 'Omics' approaches in developing combined drought and heat tolerance in food crops [J]. Plant Cell Reports, 2022, 41(3): 699-739
- [15] 周青平, 苟小林, 田莉华, 等. 寒冷区早晚熟燕麦品种的生产性能分析[J]. 科学通报, 2018, 63(17): 1722-1730
- ZHOU Q P, GOU X L, TIAN L H, et al. Performances of early and late maturing oat varieties in cold regions [J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(17): 1722-1730
- [16] 魏露萍, 周青平, 刘芳, 等. 遮穗和去颖下燕麦穗部特征变化和穗部光合贡献率估算[J]. 草业学报, 2023, 32(2): 110-118
- WEI L P, ZHOU Q P, LIU F, et al. Variation in ear characteristics and estimation of photosynthetic contributions to oat ear development using techniques of ear shading and glume removal [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(2): 110-118
- [17] 中华人民共和国农业部. 牧草种质资源田间评价技术规程: NY/T 2127—2012[S]. 北京: 中国农业出版社, 2012: 14-15
- [18] 王伟. 川西北不同类型草地生态系统碳储量特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2024: 15-20
- WANG W. Carbon storage characteristics of different types of grassland ecosystems in northwest sichuan [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2024: 15-20
- [19] HU P C, CHAPMAN S C, SUKUMARAN S, et al. Phenological optimization of late reproductive phase for raising wheat yield potential in irrigated mega-environments [J]. Journal of Experimental Botany, 2022, 73(12): 4236-4249
- [20] CARRERA C S, SAVIN R, SLAFER G A. Critical period for yield determination across grain crops [J]. Trends in Plant Science, 2024, 29(3): 329-342
- [21] 史鑫蕊, 韩百书, 王紫芊, 等. 基于 APSIM 模型模拟分析气候变化对不同熟性北方冬小麦生长和产量的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(19): 3772-3787
- SHI X R, HAN B S, WANG Z Q, et al. Investigation on the effects of climate change on the growth and yield of different maturity winter wheat varieties in northern China based on the APSIM model [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(19): 3772-3787
- [22] 李佩, 谢章书, 何玉玺, 等. 播期和种植密度对不同熟性棉花生理特性及产量的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(3): 260-267
- LI K, XIE Z S, HE Y X, et al. Effects of sowing date and planting density on physiological characteristics and yield of cotton with different maturity properties [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(3): 260-267
- [23] ZHAO H, HUANG X Z, YANG Z E, et al. Synergistic optimization of crops by combining early maturation with other agronomic traits [J]. Trends in Plant Science, 2023, 28(10): 1178-1191
- [24] 张知, 邹璨阳, 梁秀芝, 等. 102 份燕麦种质资源遗传多样性及农艺性状综合评价[J]. 麦类作物学报, 2025, 45(6): 847-856
- ZHANG Z, ZOU C Y, LIANG X Z, et al. Genetic diversity

- analysis and comprehensive evaluation of 102 oat germplasm resources based on main agronomic traits [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2025, 45(6): 847-856
- [25] 史振声, 张世煌, 李凤海, 等. 辽宁中熟、中晚熟与晚熟玉米品种的产量性能比较与分析 [J]. *玉米科学*, 2008, 16(6): 6-10
SHI Z S, ZHANG S H, LI F H, et al. Comparison and analysis on maize yield performance of mid-maturing, mid-late-maturing and late-maturing varieties in Liaoning areas [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, 16(6): 6-10
- [26] 刘刚, 李达旭, 游明鸿, 等. 几个饲用燕麦品种比较试验研究 [J]. *草业与畜牧*, 2009(9): 3-4, 42
LIU G, LI D X, YOU M H, et al. Comparative experimental study on several forage oat varieties [J]. *Prataculture & Animal Husbandry*, 2009(9): 3-4, 42
- [27] 彭先琴, 周青平, 刘文辉, 等. 川西北高寒地区 6 个燕麦品种生长特性的比较分析 [J]. *草业科学*, 2018, 35(5): 1208-1217
PENG X Q, ZHOU Q P, LIU W H, et al. A comparative analysis of growth characteristics of six oat cultivars in the north-western Sichuan Alpine region [J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(5): 1208-1217
- [28] 李晶, 南铭, 刘彦明, 等. 不同燕麦品种产量和品质及饲喂性能综合评价 [J]. *草地学报*, 2023, 31(4): 1089-1098
LI J, NAN M, LIU Y M, et al. Comprehensive evaluation of the yield, quality and feeding performance on different oat varieties [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(4): 1089-1098
- [29] 冯长松, 梁志妍, 杜红旗, 等. 黄河滩区秋播不同饲用燕麦种质主要农艺及产量性状评价 [J]. *分子植物育种*, 2026, 24(3): 858-868
FENG C S, LIANG Z Y, DU H Q, et al. Evaluation of yield and main agronomic traits of the autumn-sown forage oats germplasm in the Yellow River beach area [J]. *Molecular Plant Breeding*, 2026, 24(3): 858-868
- [30] NAN J S, LING Y, AN J H, et al. Genome resequencing reveals independent domestication and breeding improvement of naked oat [J]. *GigaScience*, 2022, 12: giad061
- [31] ZHANG M Y, LIU S C, WANG G D, et al. Precision water recharge facilitates spikelet development and seed growth in *Carex schmidtii*: implications for near-natural restoration of degraded semi-arid wetlands [J]. *Journal of Environmental Management*, 2025, 375: 124338
- [32] 张琦, 魏臻武, 闫天芳. 江淮地区燕麦籽粒产量与农艺性状的相关性及通径分析 [J]. *作物杂志*, 2021(5): 146-152
ZHANG Q, WEI Z W, YAN T F. Correlation and path analysis of oat seed yield with agronomic characters in Jiang-Huai area [J]. *Crops*, 2021(5): 146-152
- [33] WANG L, JIANG W, JIN H B, et al. Nutrient competition between female cones and young seeds in spring affects the physiological dropping and nut-setting rate in *Torreya grandis* [J]. *Physiologia Plantarum*, 2024, 176(5): e14525
- [34] WALKER C H, WHEELDON C D, BENNETT T. Integrated dominance mechanisms regulate reproductive architecture in *Arabidopsis thaliana* and *Brassica napus* [J]. *Plant Physiology*, 2021, 186(4): 1985-2002
- [35] MANSON J B, DENTON M D, LAKE L, et al. Linking pod-set and seed yield of faba bean across organ, phytomer, plant and population scales [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2025, 76(16): 4472-4489
- [36] 魏孔涛, 曹铨, 张正社, 等. 不同燕麦品种的干草产量和种子产量相关特性及影响因素研究 [J]. *草地学报*, 2026, 34(2): 531-542
WEI K T, CAO Q, ZHANG Z S, et al. Study on the yield-related traits and influencing factors of hay and seed yield in different oat (*Avena sativa* L.) varieties [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2026, 34(2): 531-542
- [37] TAKAI T. Potential of rice tillering for sustainable food production [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2024, 75(3): 708-720
- [38] ZHANG Z Z, HU Z J, XIE S G, et al. Natural variation in NIN-LIKE PROTEIN 4 associated with spike-response to nitrogen in barley [J]. *Plant, Cell & Environment*, 2025, 48(7): 5120-5132

(责任编辑 彭露茜)