

野生和栽培燕麦灌浆过程的光合特性与农艺性状研究

朱杍羽¹ 杨乔惠¹ 刘亦迅¹ 袁健² 王名花²

向达兵¹ 邹亮¹ 王俊珍³ 范昱¹

(¹成都大学食品与生物工程学院/农业农村部杂粮加工重点实验室/四川省杂粮产业化工程技术研究中心, 610106, 四川成都;

²西昌华富健生物科技有限公司, 615000, 四川西昌; ³凉山彝族自治州农业科学研究院, 615000, 四川西昌)

摘要 以野生燕麦和栽培燕麦为研究对象, 采用野生群体材料 Atl-03、Atl-05、Atl-06、Atl-08、Atl-11 和栽培群体材料 ITAO-32、ITAO-36、ITAO-38、ITAO-49、ITAO-50 进行试验, 于抽穗期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期分别测定净光合速率、气孔导度、胞间 CO₂ 浓度、蒸腾速率和叶绿素相对含量 (SPAD 值) 等光合参数, 以及株高、穗长、分蘖总数、千粒重和平均种子表面积等农艺性状。结果表明, 野生燕麦和栽培燕麦的光合特性存在显著差异, 野生燕麦的变异系数高于栽培燕麦, 但栽培燕麦的光合性能更强且更稳定。此外, 野生燕麦和栽培燕麦在农艺性状上也存在显著差异。相关性分析表明, 净光合速率、旗叶面积和 SPAD 值均与千粒重呈显著正相关。野生群体中, Atl-11 的光合特性和农艺性状最优; 栽培群体中, ITAO-36 的光合特性和农艺性状最优, 二者均可作为优良种质资源。

关键词 野生燕麦; 栽培燕麦; 光合特性; 农艺性状

燕麦 (*Avena sativa*), 又名铃铛麦或香麦, 是禾本科燕麦属的一年生草本植物, 具有较高的营养价值, 常作为粮饲兼用型作物。燕麦具备抗旱、耐寒、耐贫瘠及耐盐碱等特性, 可适应极端环境^[1-3]。燕麦富含蛋白质、多种必需氨基酸、不饱和脂肪酸、维生素、膳食纤维、皂苷素及矿物质等重要营养成分^[4], 通常被视为低成本、高营养价值的潜在蛋白质来源^[5]。其蛋白质含量一般在 10%~14%, 个别品种可达 19%, 是水稻和小麦的 1.6~2.3 倍, 在禾谷类粮食中位居首位^[6]。此外, 燕麦还富含β-葡聚糖、酚类化合物和皂苷等生物活性物质, 其中, β-葡聚糖具有调节血糖、降低血脂及预防心脑血管疾病等功效^[7-8]。综上, 燕麦具有重要的营养与功效价值。

光合作用是作物物质生产与产量形成的关键环节, 作物干物质积累中 90%~95%来源于光合作用^[9]。光合参数常被用于表征作物的光合能力及其对环境的适应能力^[10]。丁位华等^[11]研究发现, 不同品种小麦的光合能力差异会对群体干物质积累量产生显著影响; Tang 等^[12]对 12 个小麦品种的研究

表明, 净光合速率 (P_n)、蒸腾速率 (T_r) 和气孔导度 (G_s) 等光合参数存在显著差异, 且高产小麦灌浆期的 P_n 高于抽穗期; Wei 等^[13]针对 3 种类型水稻的研究表明, 高产量水稻的叶面积指数、抽穗后叶片 P_n 及叶绿素相对含量 (SPAD 值) 均高于低产量水稻; 冯国郡^[14]研究发现, 甜高粱品种的糖锤度和生物产量与灌浆期叶片 P_n 显著相关。因此, 分析作物的光合特征指标对于深入了解作物生长发育及产量形成具有重要意义。

野生作物与栽培作物在光合特性方面存在显著差异。闫洪涛等^[15]研究发现, 栽培大豆叶片的 P_n 和 SPAD 值显著高于野生大豆; 李秀秀等^[16]研究显示, 相较于野生木薯, 栽培木薯的光合色素含量更高, 对强光的耐受性和利用率更优。目前, 燕麦光合特性的研究^[17-18]主要集中于光合日变化以及不同处理方式对其光合特性的影响, 但关于野生燕麦与栽培燕麦光合特性差异的研究仍较为匮乏。野生燕麦作为栽培燕麦的近缘种, 种类多样且分布广泛, 遗传多样性丰富^[19-20]。本研究以不同基因型的野生和栽培燕麦为试验材料, 探究燕麦不同生育期

作者简介: 朱杍羽, 研究方向为燕麦种质资源筛选, E-mail: 1104384372@qq.com

范昱为通信作者, 研究方向为荞麦和燕麦关键性状形成机理, E-mail: fandavi@163.com; 王俊珍为共同通信作者, 研究方向为燕麦的栽培生理, E-mail: wangjunzhen108@163.com

基金项目: 成都大学人才引进项目 (2081923007); 西昌市 2023 年度科技计划项目 (2401258); 横向技术开发 (委托) 项目 (2402188, 2402033); 国家燕麦荞麦产业技术体系 (CARS-07-B-1); 四川麦类创新团队项目 (SCCXTD-2024-11); 国家现代农业体系四川省杂粮创新团队; 四川省杰出青年科技项目 (2024NSFJQ0058)

收稿日期: 2024-10-09; 修回日期: 2024-12-10; 网络出版日期: 2025-04-09

内旗叶多项农艺参数与光合特性的相关性,进一步分析这些特性与产量、籽粒特性等农艺性状之间的潜在关系及群体差异,旨在为燕麦的高产优质栽培与育种提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试材料为野生燕麦 Atl-3、Atl-5、Atl-6、Atl-8、Atl-11 和栽培燕麦 ITAO-32、ITAO-36、ITAO-38、ITAO-49、ITAO-50。

1.2 试验地概况

供试材料种植于四川省成都市金堂县五凤镇 (30°35' N, 104°25' E), 该地气候温和, 海拔 436 m, 年均气温 17 °C, 年均降水量 980 mm, 无霜期 286 d。土壤肥力中等, 基础理化性质为 pH 7.3、有机质 32.40 g/kg、全氮 2.32 g/kg、全磷 0.97 g/kg、全钾 15.90 g/kg。

1.3 试验设计

于 2020 年 11 月种植, 2021 年 5-6 月采收。采用随机区组设计, 设置保护行, 条播种植, 每行播种 15 粒, 行长 1.5 m, 行距 1.0 m。播种前施用 30 kg/hm² 的复合肥 (N:P:K=12:12:17) 作为基肥。田间管理主要包括抽穗前期的中耕除草, 灌水根据当地实际降水情况适当进行。3 次重复。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 农艺性状 于燕麦成熟期, 测量株高、穗长和分蘖总数, 以及千粒重、平均种子表面积、平均种子周长、平均种子长和平均种子宽。

1.4.2 光合生理指标 分别于燕麦抽穗期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期, 选择天气晴朗的上午 9:00-11:00, 选取具有代表性的大小相同、长势相

似的燕麦旗叶为测定对象, 3 次重复。使用 LI-6400 便携式光合系统分析仪 (LI-COR, 美国) 在田间测定 P_n 、 T_r 、 G_s 和旗叶胞间 CO₂ 浓度 (C_i); 使用 SPAD-502 Plus 叶绿素测定仪 (柯尼卡美能达, 日本) 测定叶绿素相对含量 (SPAD 值); 使用 WinFOLIA 多用途叶面积仪 (Regent, 加拿大) 测定旗叶面积。为保证对比分析的可靠性及测定条件的一致性, 测量时控制环境条件, 其中光源采用仪器配备的内置人工光源, 设定光照强度为 1000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 大气 CO₂ 浓度为 350 $\mu\text{mol}/\text{mol}$, 温度控制在 25 °C。

1.5 数据处理

采用 Excel 2010 软件整理数据, 对计数数据进行平方根转换; 采用 SPSS 20.0 软件进行方差分析, 运用 Duncan 法进行差异显著性检验 ($P < 0.05$), 结果以平均值±标准误表示; 使用 Origin 2024 软件进行 Pearson 相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同燕麦材料的光合特性参数

为筛选高光效的燕麦材料, 分析 10 份材料的光合特性参数 (表 1)。抽穗期 SPAD 值最大的是 ITAO-36, 为 57.14, 显著高于野生群体的 Atl-03、Atl-05 和 Atl-06, 但与其他燕麦材料无显著差异; 抽穗期 SPAD 值最小的是 Atl-03, 仅为 44.39, Atl-05 次之, 两者无显著差异。灌浆前期 T_r 最大的是 Atl-11, 为 7.80 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 与 ITAO-36 和 ITAO-49 无显著差异, 但显著高于其他燕麦材料; Atl-05、Atl-08、ITAO-32、ITAO-38 和 ITAO-50 间均无显著性差异; 灌浆前期 T_r 最小的是 Atl-06, 仅为 3.84 $\text{mmol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, ITAO-32 和 ITAO-50 次之,

表 1 不同燕麦材料光合特性参数差异分析

Table 1 Analysis of the difference of photosynthetic characteristic parameters of different oat materials

时期 Stage	材料 Material	SPAD 值 SPAD value	旗叶面积 Flag leaf area (mm ²)	T_r [mmol/(m ² ·s)]	G_s [mmol/(m ² ·s)]	P_n [$\mu\text{mol CO}_2/(\text{m}^2\cdot\text{s})$]	C_i ($\mu\text{mol}/\text{mol}$)
抽穗期 Heading	Atl-03	44.39±2.03c	21.59±0.99e	6.50±0.30de	123.18±5.63e	6.41±0.29e	284.09±12.99d
	Atl-05	47.51±1.23bc	27.82±0.72cd	5.95±0.15de	101.82±2.64e	4.56±0.12f	348.02±9.04abc
	Atl-06	47.93±1.22bc	25.93±0.66cde	5.37±0.14e	126.62±3.21e	4.96±0.13ef	397.21±10.09a
	Atl-08	55.09±0.99ab	29.06±0.52c	11.30±0.20ab	535.23±9.63a	9.63±0.10d	386.78±6.96a
	Atl-11	53.19±2.06ab	23.39±0.91de	9.05±0.35c	179.59±6.95d	10.52±0.41cd	303.15±11.74cd
	ITAO-32	55.71±1.58a	43.65±1.24a	10.38±0.30b	454.26±12.91b	16.24±0.46a	358.81±10.19ab
	ITAO-36	57.14±1.93a	43.31±1.46a	10.15±0.34bc	450.12±15.19b	14.17±0.48b	383.97±12.96a
	ITAO-38	54.52±0.94ab	44.44±0.77a	6.93±0.12de	254.19±4.39c	12.04±0.21c	354.52±6.12ab
	ITAO-49	54.99±1.85ab	41.25±1.39a	12.43±0.42ab	541.20±18.19a	15.13±0.51ab	367.60±12.36a
	ITAO-50	53.73±0.98ab	36.32±0.66b	5.35±0.10e	150.46±2.75de	10.25±0.19d	312.47±5.72bcd

续表 1 Table 1 (continued)

时期 Stage	材料 Material	SPAD 值 SPAD value	旗叶面积 Flag leaf area (mm ²)	T_r [mmol/(m ² ·s)]	G_s [mmol/(m ² ·s)]	P_n [μmol CO ₂ /(m ² ·s)]	C_i (μmol/mol)
灌浆前期 Early grain-filling	Atl-03	49.07±2.24c	36.81±1.68cd	6.19±0.28b	108.29±4.95cd	5.48±0.25c	279.32±12.77c
	Atl-05	55.13±1.43abc	33.61±0.87d	4.93±0.13c	84.61±2.20e	3.53±0.09d	330.21±8.58b
	Atl-06	50.10±1.27bc	26.74±0.68e	3.84±0.10d	123.52±3.14c	3.00±0.08d	394.99±10.03a
	Atl-08	63.04±1.13a	27.25±0.49e	5.06±0.09c	106.92±1.92cd	4.89±0.14c	280.37±5.05c
	Atl-11	58.04±2.25ab	42.76±1.66bc	7.80±0.30a	161.44±6.25b	3.62±0.19d	284.02±11.00c
	ITAO-32	59.88±1.70a	47.16±1.34ab	4.90±0.14c	101.99±2.90de	9.74±0.28a	234.48±6.66d
	ITAO-36	63.68±2.15a	48.28±1.63ab	7.50±0.25a	186.20±6.28a	9.54±0.32a	319.92±10.80bc
	ITAO-38	60.47±1.04a	50.00±0.86a	4.99±0.09c	106.08±1.83cd	7.68±0.13b	281.38±4.86c
	ITAO-49	61.31±2.06a	43.10±1.45bc	7.58±0.25a	186.18±6.26a	10.03±0.34a	302.14±10.16bc
	ITAO-50	61.58±1.13a	47.66±0.87ab	4.90±0.09c	95.42±1.75de	5.66±0.10c	299.36±5.48bc
灌浆后期 Late grain-filling	Atl-03	46.49±2.13b	40.02±0.21c	3.95±0.18bc	86.37±3.95bc	1.39±0.19de	322.28±14.74cd
	Atl-05	52.36±1.36ab	42.31±1.56c	3.20±0.08def	79.81±2.07cd	1.75±0.02cd	431.56±11.21a
	Atl-06	46.08±1.17b	33.30±0.85d	3.38±0.09cdef	68.90±1.75de	2.38±0.06bc	319.58±8.11cd
	Atl-08	60.03±1.08a	28.69±0.52d	2.94±0.05ef	70.77±1.27de	1.05±0.02e	381.85±6.87ab
	Atl-11	53.59±2.08ab	39.99±0.49c	3.42±0.13cde	92.64±3.59b	1.89±0.24cd	358.32±13.88bc
	ITAO-32	55.48±1.58a	58.87±1.67a	4.18±0.12b	79.87±2.27cd	5.71±0.16a	285.91±8.12d
	ITAO-36	57.97±1.96a	58.82±1.99a	6.57±0.22a	113.80±3.84a	5.31±0.18a	339.31±11.45bc
	ITAO-38	56.23±0.97a	64.50±1.11a	2.80±0.05f	64.58±1.11ef	2.33±0.04bc	376.19±6.49b
	ITAO-49	57.77±1.94a	51.55±1.73b	3.13±0.11def	54.08±1.82f	2.27±0.08bc	342.36±11.51bc
	ITAO-50	53.68±0.98ab	64.07±1.17a	3.66±0.07bcd	89.69±1.64bc	2.89±0.05b	390.96±7.15ab
成熟期 Maturity	Atl-03	27.78±1.27f	45.09±0.78cd	3.87±0.18a	82.43±3.77a	1.30±0.16de	350.30±16.02bcd
	Atl-05	33.78±0.88de	46.10±1.74cd	1.86±0.05ef	43.76±1.14de	1.62±0.05cde	430.29±11.18a
	Atl-06	21.96±0.56g	35.73±0.92de	1.42±0.04fg	28.16±0.72fg	2.17±0.06bc	337.32±8.56cd
	Atl-08	39.78±0.72bc	30.77±0.33e	1.32±0.02g	25.53±0.46g	0.96±0.03e	392.50±7.07ab
	Atl-11	42.93±1.66ab	42.91±0.39d	2.29±0.09de	61.01±2.36c	1.77±0.22cd	314.15±12.17cd
	ITAO-32	47.02±1.34a	65.82±3.25ab	3.23±0.09b	77.82±2.21ab	5.22±0.14a	314.13±8.92cd
	ITAO-36	36.41±1.23cd	63.19±3.15ab	3.45±0.12ab	72.78±2.46ab	5.07±0.26a	364.36±12.30bc
	ITAO-38	30.63±0.53ef	69.03±1.80a	2.04±0.04e	37.11±0.64ef	2.22±0.09bc	312.01±5.39d
	ITAO-49	48.18±1.62a	55.11±3.80bc	3.05±0.10bc	70.47±2.37bc	2.12±0.08bc	348.60±11.72bcd
	ITAO-50	25.66±0.47fg	68.64±3.60a	2.65±0.05cd	49.23±0.90d	2.76±0.08b	313.07±5.73cd

不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平差异显著，下同。

Different lowercase letters indicate significant differences at $P < 0.05$ level, the same below.

Atl-06 与 ITAO-32 和 ITAO-50 存在显著差异。灌浆前期 C_i 最大的是 Atl-06，为 394.99 μmol/mol，显著高于其他燕麦材料；Atl-03、Atl-08、Atl-11、ITAO-36、ITAO-38、ITAO-49 和 ITAO-50 间均无显著差异；灌浆前期 C_i 最小的是 ITAO-32，仅为 234.48 μmol/mol，Atl-03 次之，两者存在显著差异。灌浆后期旗叶面积最大的是 ITAO-38，为 64.50 mm²，与 ITAO-32、ITAO-36 和 ITAO-50 无显著差异，但显著高于其他燕麦材料；灌浆后期旗叶面积最小的是 Atl-08，仅为 28.69 mm²，Atl-06 次之，两者无显著差异。灌浆后期 P_n 最大的是 ITAO-32，为 5.71 μmol CO₂/(m²·s)，与 ITAO-36 无显著差异，但显著高于其他燕麦材料；灌浆后期 P_n 最小的是 Atl-08，仅为 1.05 μmol CO₂/(m²·s)，

Atl-03 次之，两者无显著差异。成熟期 G_s 最大的是 Atl-03，为 82.43 mmol/(m²·s)，与 ITAO-32 和 ITAO-36 无显著性差异，但显著高于其他燕麦材料；成熟期 G_s 最小的是 Atl-08，仅为 25.53 mmol/(m²·s)，Atl-06 次之，两者无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。综上所述，不同材料燕麦的光合特性存在较大差异。

2.2 不同燕麦群体在不同时期的光合特性

野生群体与栽培群体的光合特性差异（表 2）表明，两者在不同时期的光合特性差异明显。两者的 SPAD 值在抽穗期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期呈先上升后下降的趋势，灌浆前期达到最大，成熟期最小。旗叶面积在 4 个生育期内不断上升，抽穗期最小，成熟期最大。 T_r 、 G_s 和 P_n 在 4 个生育期

内持续下降,抽穗期最大,成熟期最小。在野生群体中, C_i 先下降后上升,成熟期最大,灌浆前期最小;栽培群体中, C_i 在抽穗期最大,灌浆前期最小。综上,野生燕麦和栽培燕麦在抽穗期的光合性能最佳,随着生长进程推进,其光合性能逐渐减弱。

野生群体与栽培群体的光合特性也存在较大差异。野生群体的 SPAD 值在抽穗期、灌浆前期和灌浆后期均显著低于栽培群体,而在成熟期无显著性差异;总体而言,野生群体的变异系数大于栽培群体。类似地,野生群体的旗叶面积在抽穗期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期均显著低于栽培群体,总体而言,野生群体的变异系数同样大于栽培群体。野生群体的 T_r 在抽穗期、灌浆前期和灌浆后期

均与栽培群体无显著差异,仅在成熟期显著低于栽培群体;野生群体在 3 个生育期(抽穗期、灌浆前期和成熟期)的变异系数大于栽培群体。野生群体的 G_s 在抽穗期显著低于栽培群体,而在灌浆前期、灌浆后期和成熟期均与栽培群体无显著性差异。野生群体的 P_n 在抽穗期、灌浆前期、灌浆后期和成熟期均显著低于栽培群体。野生群体和栽培群体的 C_i 在抽穗期、灌浆前期和灌浆后期与栽培群体无显著差异,仅在成熟期显著高于栽培群体;总体而言,野生群体的变异系数较大。综上,野生群体的 SPAD 值、旗叶面积、 T_r 和 C_i 离散程度更高,基因型遗传多样性更加丰富;而栽培燕麦的光合性能高于野生燕麦,表明其可能具有更强的光合能力,且光合特

表 2 野生群体与栽培群体的光合特性差异分析
Table 2 Analysis of differences in photosynthetic characteristics between wild and cultivated population

时期 Stage	群体 Population	指标 Index	SPAD 值 SPAD value	旗叶面积 Flag leaf area (mm ²)	T_r [mmol/(m ² ·s)]	G_s [mmol/(m ² ·s)]	P_n [μ mol CO ₂ /(m ² ·s)]	C_i (μ mol/mol)
抽穗期 Heading	野生	平均值	49.6±1.2b	25.6±0.8b	7.6±0.6a	213.3±43.6b	7.2±0.7b	343.9±12.5a
		范围	41.2~56.7	20.0~29.7	5.1~11.6	99.2~547.5	4.4~11.2	263.6~414.2
		变异系数 CV (%)	9.4	12.0	30.5	79.2	35.2	14.1
	栽培	平均值	55.2±0.7a	41.8±0.9a	9.1±0.7a	370.1±38.9a	13.6±0.6a	355.5±7.4a
		范围	51.7~61.0	35.5~46.2	5.2~13.1	147.0~571.2	10.0~16.9	305.3~409.8
		变异系数 CV (%)	4.6	8.3	29.6	40.7	17.0	8.0
灌浆前期 Early grain-filling	野生	平均值	55.1±1.5b	33.4±1.7b	5.6±0.4a	117.0±7.0a	4.1±0.3b	313.8±12.6a
		范围	45.5~64.5	25.5~45.6	3.7~8.3	82.4~172.1	2.9~6.0	259.2~411.8
		变异系数 CV (%)	10.7	19.4	25.5	23.1	24.1	15.5
	栽培	平均值	61.4±0.7a	47.2±0.8a	6.0±0.4a	135.2±11.3a	8.5±0.5a	287.5±8.4a
		范围	56.6~68.0	40.5~51.5	4.6~8.0	93.2~196.5	5.5~10.6	221.5~341.5
		变异系数 CV (%)	4.6	6.4	22.6	32.3	20.5	11.3
灌浆后期 Late grain-filling	野生	平均值	51.7±1.5b	36.9±1.4b	3.4±0.1a	79.7±2.6a	1.7±0.1b	362.7±11.9a
		范围	43.1~61.4	27.7~43.9	2.8~4.3	65.8~98.8	1.0~2.5	299.1~454.0
		变异系数 CV (%)	11.3	14.7	11.3	12.8	30.2	12.7
	栽培	平均值	56.2±0.7a	59.6±1.4a	4.1±0.4a	80.4±5.6a	3.7±0.4a	347.0±10.3a
		范围	52.4~61.9	48.4~64.9	2.7~7.0	50.8~121.5	2.1~5.9	270.1~405.1
		变异系数 CV (%)	5.0	9.0	34.3	27.0	42.1	11.5
成熟期 Maturity	野生	平均值	33.3±2.1a	40.1±1.6b	2.2±0.3b	48.2±5.8a	1.6±0.1b	364.9±11.9a
		范围	21.0~45.8	30.2~49.1	1.3~4.2	24.6~89.4	0.9~2.2	292.8~452.6
		变异系数 CV (%)	24.4	15.7	44.9	46.2	29.7	12.6
	栽培	平均值	37.6±2.4a	64.4±1.8a	2.9±0.1a	61.5±4.2a	3.5±0.4a	330.4±6.8b
		范围	25.1~50.9	48.9~75.7	2.0~3.7	35.9~80.9	2.0~5.5	296.8~388.9
		变异系数 CV (%)	24.8	11.0	18.3	26.7	41.5	8.0

性更加稳定。

2.3 不同燕麦材料的农艺性状

为筛选优良的种质资源,比较 10 份燕麦材料的农艺性状(表 3)。株高最高的是 Atl-08,达 197.2 cm,与其他燕麦材料存在显著性差异,Atl-03、Atl-11、ITAO-32、ITAO-36 和 ITAO-50 间均无

显著性差异;株高最低的是 ITAO-38,仅 97.0 cm,其次是 ITAO-49,两者之间无显著差异。穗长最长的是 ITAO-32,达 46.0 cm,穗长最短的是 ITAO-50,仅 28.0 cm,与其他燕麦材料无显著差异。分蘖总数最多的是 Atl-08 和 Atl-05,达 27.0,与 Atl-03、Atl-06 和 Atl-11 无显著性差异,但与其他燕麦

材料存在显著差异；分蘖总数最少的是 ITAO-38，仅为 9.0，其次是 ITAO-50，两者之间无显著差异，并且与 ITAO-32、ITAO-36 和 ITAO-49 均无显著差异。千粒重最大的是 ITAO-36，达 23.1 g，与其他燕麦材料存在显著差异，Atl-05、Atl-06、ITAO-38 和 ITAO-50 之间均无显著差异；千粒重最小的是 Atl-03，仅为 10.9 g，其次是 Atl-08，两者之间无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。平均种子表面积最大的是 ITAO-36，达 17.2 mm²，与 ITAO-49 和 ITAO-50 之间无显著差异，但其他燕麦材料存在显著差异；平均种子表面积最小的是 Atl-03，仅为 13.7 mm²，其次是 Atl-08，Atl-03 与 Atl-06、Atl-08 和 ITAO-38 之间均无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。平均种子周长最大的是 Atl-03，达 22.8 mm，其次是 Atl-08，两者之间无显著差异，但与其他燕麦材料存

在显著差异；平均种子周长最小的是 ITAO-38，仅为 18.0 mm，其次是 Atl-06，ITAO-38 与 Atl-06 和 Atl-11 之间无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。平均种子长最大的是 Atl-03，达 9.9 mm，其次是 Atl-08，两者之间无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异；平均种子长最小的是 ITAO-38，仅为 7.8 mm，与 Atl-06 和 Atl-11 之间无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。平均种子宽最大的是 ITAO-50，达 2.4 mm，其次是 ITAO-36，ITAO-50 与 Atl-11、ITAO-32、ITAO-36、ITAO-38 和 ITAO-49 无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著性差异；平均种子宽最小的是 Atl-08，仅为 2.1 mm，其次是 Atl-05，Atl-08 与 Atl-03、Atl-05、Atl-06 和 ITAO-38 无显著差异，但与其他燕麦材料存在显著差异。综上所述，不同燕麦材料在各性状上存在较大差异，为筛选优异种质资源提供了重要

表 3 不同燕麦材料的农艺性状
Table 3 Agronomic traits of different oat materials

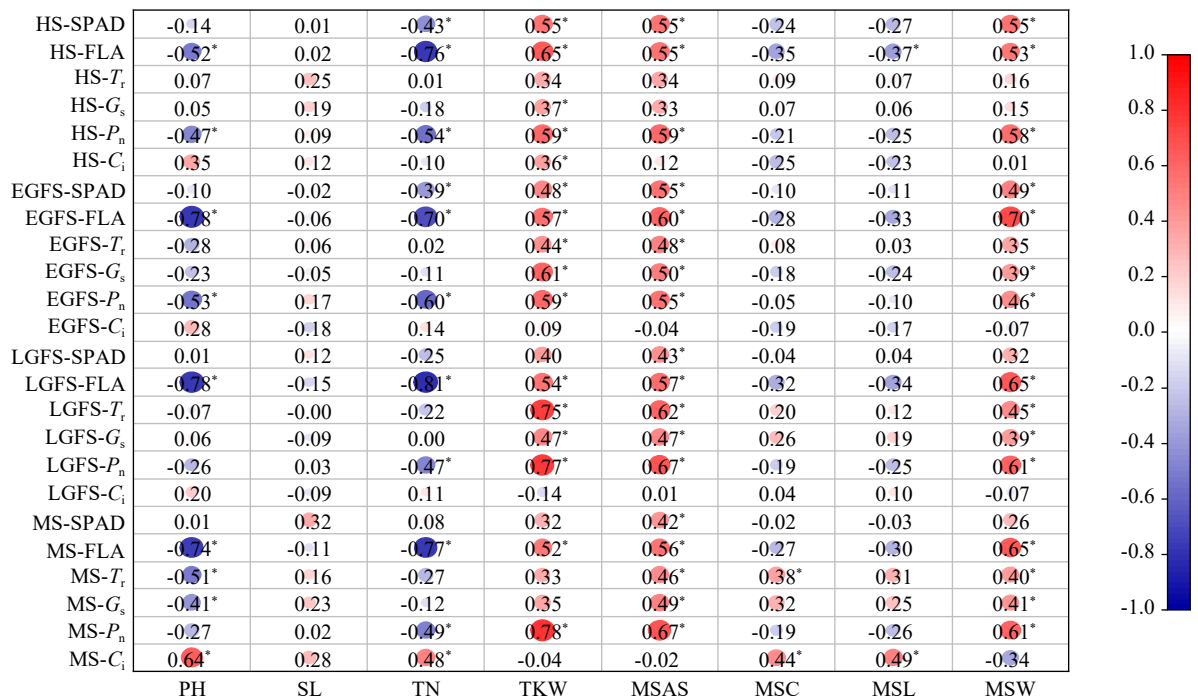
材料 Material	株高 Plant height (cm)	穗长 Panicule length (cm)	分蘖总数 Total tiller number	千粒重 1000-grain weight (g)	平均种子表面积 Mean surface area of seed (mm ²)	平均种子周长 Mean seed circumference (mm)	平均种子长 Mean seed length (mm)	平均种子宽 Mean seed width (mm)
Atl-03	133.6±5.1cd	43.9±3.9a	24.7±2.0ab	10.9±0.0e	13.7±0.0c	22.8±0.0a	9.9±0.0a	2.1±0.0cd
Atl-05	169.9±3.9b	42.5±3.4a	27.0±1.2a	15.2±0.2cd	15.3±0.2b	20.5±0.2bc	9.0±0.1bc	2.1±0.0bcd
Atl-06	164.8±0.6b	35.5±1.0a	22.3±5.2abc	14.2±0.2d	14.0±0.2c	18.8±0.2ef	8.2±0.1de	2.2±0.0bcd
Atl-08	197.2±2.1a	41.1±10.5a	27.0±1.5a	11.8±0.1e	13.9±0.3c	21.7±0.1ab	9.5±0.1ab	2.1±0.0d
Atl-11	141.1±7.9c	36.7±3.5a	26.3±1.2ab	15.5±0.3c	15.3±0.3b	19.0±0.3def	8.2±0.1de	2.3±0.0abc
ITAO-32	139.7±0.8c	46.0±0.4a	16.7±0.3bcd	17.0±0.1b	15.9±0.1b	20.0±0.1cde	8.6±0.0cd	2.3±0.0ab
ITAO-36	135.9±2.4c	37.0±1.3a	14.0±2.0cd	23.1±0.1a	17.2±0.1a	20.3±0.1cd	8.7±0.1cd	2.4±0.0ab
ITAO-38	97.0±0.8e	39.2±4.0a	9.0±0.6d	15.2±0.4cd	14.1±0.3c	18.0±0.4f	7.8±0.2e	2.2±0.1abcd
ITAO-49	113.4±5.5de	39.8±4.2a	16.3±0.7bcd	16.7±0.3b	16.2±0.3ab	19.8±0.3cde	8.6±0.2cd	2.3±0.0abc
ITAO-50	120.7±6.8cd	28.0±3.0a	11.3±0.9d	14.6±0.2cd	16.2±0.3ab	20.5±0.3bc	8.9±0.2c	2.4±0.0a

参考。

2.4 燕麦光合特性与农艺性状的相关性

燕麦光合特性与农艺性状的相关性分析（图 1）表明，株高与旗叶面积呈显著负相关，且在灌浆期相关性最大，抽穗期相关性最小。株高与成熟期 T_r 和 G_s 呈显著负相关，与成熟期 C_i 呈显著正相关。分蘖总数与旗叶面积呈显著负相关，在灌浆后期相关性最大，灌浆前期相关性最小。分蘖总数与 P_n 呈显著负相关，在灌浆前期相关性最大，灌浆后期相关性最小。除成熟期外，千粒重与 SPAD 值和旗叶面积呈显著正相关，在抽穗期相关性最大，灌浆后期相关性最小。千粒重与灌浆期 T_r 和 G_s 呈显著正相关。千粒重与 P_n 呈显著正相关，在成熟期

相关性最大，抽穗期和灌浆前期相关性最小。平均种子表面积与 SPAD 值呈显著正相关，在抽穗期和灌浆前期相关性最大；在成熟期时相关性最小。平均种子表面积与旗叶面积呈显著正相关，在灌浆前期相关性最大，抽穗期相关性最小。平均种子表面积与 P_n 呈显著正相关，在灌浆后期和成熟期相关性最大，灌浆前期相关性最小。除抽穗期外，平均种子表面积与其他 3 个生育期的 T_r 和 G_s 呈显著正相关。平均种子周长和平均种子长与成熟期 C_i 呈显著正相关。平均种子宽与抽穗期和灌浆前期 SPAD 值呈显著正相关。平均种子宽与旗叶面积呈显著正相关，在灌浆前期相关性最大，抽穗期相关性最小。平均种子宽与 P_n 呈显著正相关，在灌浆后期



HS: 抽穗期; EGFS: 灌浆前期; LGFS: 灌浆后期; MS: 成熟期; PH: 株高; PL: 穗长; TTN: 分蘖总数; TKW: 千粒重; MSAS: 平均种子表面积; MSC: 平均种子周长; MSL: 平均种子长; MSW: 平均种子宽。“*”表示在 $P < 0.05$ 水平显著相关。

HS: heading stage; EGFS: early grain-filling stage; LGFS: late grain-filling stage; MS: maturity stage; PH: plant height; PL: panicle length; TTN: total tiller number; TKW: 1000-grain weight; MSAS: mean surface area of seed; MSC: mean seed circumference; MSL: mean seed length; MSW: mean seed width. “*” indicates significant correlations at $P < 0.05$ level.

图1 燕麦光合特性与农艺性状的相关性分析

Fig.1 Correlation analysis between photosynthetic characteristics and agronomic traits of oat

和成熟期相关性最大, 灌浆前期相关性最小。

3 讨论

光合作用为植物生长发育提供主要的能量和营养物质, 不同植物或同种植物的不同品种在光合性能上可能存在显著差异, 这些差异一方面由作物的遗传特性决定, 另一方面则受到环境因素和栽培管理措施的多重影响^[21]。杨学乐等^[22]测定 32 个绿豆品种在花荚期的光合指标, 发现不同品种在 P_n 、 G_s 、 T_r 、 C_i 和水分利用效率等光合参数上均存在显著差异, 且各参数之间的变异程度不同。罗海玲等^[23]研究了野生和栽培苦瓜的光合特性, 发现野生苦瓜的 P_n 高于栽培品种, 二者的光合特性存在差异。本试验对野生燕麦和栽培燕麦的光合参数进行测定与分析, 结果显示栽培燕麦的光合性能优于野生燕麦。这种差异可能是由于在不同生育期内, 栽培燕麦的旗叶面积始终大于野生燕麦。旗叶作为穗下第一片叶, 是进行光合作用并为籽粒提供干物质的主要器官。随着燕麦旗叶面积的增加, 光合有效表面积扩大, 叶绿素含量增加, 进而提高了旗叶对 CO_2 的同化能力, 使燕麦

的 P_n 上升。这一发现与黄琴等^[24]的研究结果一致, 即增大旗叶面积可提高小麦的 P_n 。因此, 实际生产中优先选择旗叶面积较大的燕麦品种, 有助于提高光能利用率, 进而增加产量。变异系数反映离散程度, 数值越大则离散程度越高^[25-26]。野生燕麦的光合参数变异系数普遍高于栽培燕麦, 表明其基因型多样性较高, 遗传信息更加丰富, 为优良种质筛选提供了有利条件。相比之下, 栽培燕麦的光合特性在品种间差异较小, 表现出相对稳定性。

P_n 能够反映植物在单位时间内积累的干物质量。抽穗期作为植物生长发育的重要阶段, 是产量形成的关键时期, 也是植物由营养生长转向生殖生长的标志^[27]。本试验结果显示, 野生燕麦和栽培燕麦的 P_n 在抽穗期、灌浆前期、灌浆后期及成熟期逐渐递减, 在抽穗期达到最高值, 表明抽穗期光合作用可能为籽粒灌浆提供了充足的光合产物。但杨迎月^[28]研究发现燕麦在灌浆期的 P_n 最高, 与本研究结果存在差异, 可能是由于燕麦品种或环境因素差异所致。由于 T_r 和 G_s 在 4 个生育期内与 P_n 的变化趋势一致, 因此它们可能是影

响 P_n 的主要因素。蒸腾作用不仅促进根系吸收的营养物质运输到植物各部位，也是光合作用的水分来源。 G_s 反映了作物叶片表面气孔的开放程度，是植物与环境进行气体交换和水分吸收的主要通道。项超等^[29]发现在 43 个小麦品种中，旗叶 P_n 与 T_r 在 3 个生育期内均呈正相关。赵姝丽等^[30]研究发现，粳稻杂交后代的剑叶 G_s 与 P_n 之间呈显著正相关，表明在 4 个生育期内，抽穗期 P_n 最高可能是由于燕麦较高的 T_r 和 G_s 。

植物的农艺性状与光合特性密切相关。千粒重是影响燕麦产量形成的关键因素之一^[31]。本试验结果显示，千粒重在抽穗期、灌浆期和成熟期均与 P_n 、旗叶面积、SPAD 值呈显著正相关，其中与成熟期 P_n 的相关性最强。表明 P_n 、旗叶面积和 SPAD 值均显著影响燕麦的千粒重，且成熟期 P_n 对千粒重的影响最为显著。因此，在实际生产中，提高成熟期的 P_n 对提升燕麦的粒重和产量具有重要意义。这一结果与汤军^[32]在水稻中的研究结果不一致，可能是由于品种、试验条件和栽培措施等差异所致。株高与旗叶面积呈显著负相关，且在灌浆期的相关性最强，表明株高显著影响旗叶面积，株高越矮，旗叶面积越大。这一发现与刘筱颖等^[33]和严俊等^[34]的研究结果一致。

4 结论

野生燕麦和栽培燕麦在光合特性和农艺性状上存在显著差异，野生燕麦的变异系数高于栽培燕麦，表明其基因型具有更高的多样性，相比之下，栽培燕麦的光合性能更强且更稳定。 P_n 、SPAD 值和旗叶面积与千粒重、平均种子表面积呈显著正相关。野生群体中，Atl-11 的光合特性和农艺性状最优；栽培群体中，ITAO-36 的光合特性和农艺性状最优，二者均可作为优良种质资源。

参考文献

- [1] 张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选. 作物学报, 2023, 49(6): 1551-1561.
- [2] 齐安银, 曾庆晨, 李颜秘, 等. 饲用燕麦栽培技术研究进展. 成都大学学报, 2022, 41(3): 250-256, 294.
- [3] 任长忠, 胡跃高. 中国燕麦学. 北京: 中国农业出版社, 2013.
- [4] 折维俊. 鄂尔多斯地区燕麦品种筛选与饲用价值评价. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [5] 吴志. 饲用燕麦的营养价值及利用探析. 现代农业科技, 2020(12): 223, 225.
- [6] 汤晓洁. 燕麦栽培及饲料化利用技术. 养殖与饲料, 2022, 21(1): 54-56.
- [7] 任长忠, 闫金婷, 董锐, 等. 燕麦营养成分、功能特性及其产品的研究进展. 食品工业科技, 2022, 43(12): 438-446.
- [8] Martínez-Villaluenga C, Peñas E. Health benefits of oat: current evidence and molecular mechanisms. Current Opinion in Food Science, 2017, 14: 26-31.
- [9] 彭先琴. 川西北地区六个燕麦品种光合特性与物质积累的评价. 西宁: 青海大学, 2018.
- [10] 许祎珂, 李爽, 刘长乐, 等. 不同产地半夏农艺性状及光合生理特性研究. 中国农业科技导报, 2024, 26(5): 77-89.
- [11] 丁位华, 冯素伟, 姜小琴, 等. 黄淮麦区不同小麦品种生育前期光合生理特性及物质积累变化研究. 华北农学报, 2016, 31(2): 120-124.
- [12] Tang X P, Liu H J, Zhang W J. Physiological characteristics, crop growth and grain yield of twelve wheat varieties cultivated in the North China Plain. Agronomy, 2023, 13(12): 3041.
- [13] Wei H H, Ge J L, Zhang X B, et al. Agronomic and physicochemical properties facilitating the synchronization of grain yield and the overall palatability of Japonica rice in East China. Agriculture, 2022, 12(7): 969.
- [14] 冯国郡. 甜高粱种质资源的遗传多样性与高光效种质生理机制的研究. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
- [15] 闫洪涛, 刘格, 杜文晴, 等. 不同进化类型大豆品种光合碳代谢关键酶活性研究. 大豆科学, 2024, 43(5): 616-623.
- [16] 李秀秀, 冉令之, 马琳, 等. 栽培型木薯 Ku50 的高光效生理特性分析. 热带作物学报, 2023, 44(7): 1418-1425.
- [17] 梁国玲. I-D 品系燕麦生态适应性及其遗传学特性研究. 西宁: 青海大学, 2017.
- [18] 段连学, 马祥, 琚泽亮, 等. 减氮配施有机肥对‘青海甜燕麦’光合特性和产量的影响. 草地学报, 2022, 30(2): 471-478.
- [19] 张新军, 周海涛, 李天亮, 等. 燕麦野生资源的收集评价与利用. 河北农业科学, 2011, 15(1): 6-7, 10.
- [20] 范昱, 赖弟利, 王佳俊, 等. 以色列野生燕麦物候及农艺性状与起源生态地理因素的相关性. 麦类作物学报, 2019, 39(1): 56-63.
- [21] 吴婧, 张新, 张淑琴, 等. 氮肥和钾离子对燕麦光合生理和农艺性状的影响. 草学, 2024(1): 23-29, 35.
- [22] 杨学乐, 王素华, 张璐, 等. 不同绿豆品种(系)的光合特性及综合评价. 云南农业大学学报, 2024, 39(1): 18-25.
- [23] 罗海玲, 蒋义平, 黄玉辉, 等. 野生苦瓜与栽培苦瓜的生物学性状和光合特性比较. 南方农业学报, 2012, 43(12): 2009-2014.
- [24] 黄琴, 王红光, 李东晓, 等. 大丽轮枝孢激活蛋白对小麦旗叶面积及其光合特性和籽粒产量的影响. 麦类作物学报, 2020, 40(9): 1097-1103.
- [25] 张媛媛, 于咏梅, 王蕾. 基于熵权-变异系数组合权重的金银花质量评价模型构建. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(10): 4303-4308.
- [26] 雷雄, 游明鸿, 白史且, 等. 川西北高原 50 份燕麦种质农艺性状遗传多样性分析及综合评价. 草业学报, 2020, 29(7): 131-142.
- [27] Shi C N, Zhao L, Zhang X F, et al. Gene regulatory network and abundant genetic variation play critical roles in heading stage of polyploidy wheat. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 6.
- [28] 杨迎月. 施肥对碱化土壤燕麦生长及种子产量的影响. 银川: 宁夏大学, 2022.
- [29] 项超, 徐智斌, 冯波, 等. 四川小麦品种的旗叶光合特性. 应用与环境生物学报, 2013, 19(1): 84-89.

- [30] 赵姝丽, 李睿, 徐正进. 籼粳交 RILs 剑叶气孔与光合特性的初步研究. 华北农学报, 2010, 25(6): 194-197.
- [31] 罗健科, 张克厚, 王泽宇, 等. 18 个燕麦品种(系)在白银市沿黄河灌区的生产性能研究. 作物杂志, 2025(2): 93-100.
- [32] 汤军. 紫云英和稻草联合还田下氮钾肥减量施用对双季水稻和土壤性状的影响. 南昌: 江西农业大学, 2015.
- [33] 刘筱颖, 李晓华, 郑兴卫, 等. 山西小麦育成品种农艺性状演变趋势及关联分析. 中国农业科技导报, 2020, 22(3): 14-23.
- [34] 严俊, 胡明亮, 张玲玲, 等. 不同生态条件下大麦品种的适应性研究. 大麦与谷类科学, 2011(1): 7-12.

Photosynthetic Characteristics and Agronomic Traits of Wild and Cultivated Oats during Filling Process

Zhu Lingyu¹, Yang Qiaohui¹, Liu Yixun¹, Yuan Jian², Wang Minghua²,
Xiang Dabing¹, Zou Liang¹, Wang Junzhen³, Fan Yu¹

(¹College of Food and Biological Engineering, Chengdu University/Key Laboratory of Coarse Cereal Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Sichuan Engineering & Technology Research Center of Coarse Cereal Industrialization, Chengdu 610106, Sichuan, China; ²Xichang Huafujian Biotechnology Co., Ltd., Xichang 615000, Sichuan, China; ³Liangshan Yi Autonomous Prefecture Agricultural Science Research Institute, Xichang 615000, Sichuan, China)

Abstract Using wild oats and cultivated oats as research subjects, an experiment was conducted using wild population materials (Atl-03, Atl-05, Atl-06, Atl-08, Atl-11) and cultivated population materials (ITAO-32, ITAO-36, ITAO-38, ITAO-49, ITAO-50). Photosynthetic parameters including net photosynthetic rate, stomatal conductance, intercellular CO₂ concentration, transpiration rate, and relative chlorophyll content (SPAD value), as well as agronomic traits such as plant height, panicle length, total tiller number, 1000-grain weight, and mean surface area of seed, were measured at heading stage, early grain-filling stage, late grain-filling stage, and maturity, respectively. The results showed there were significant differences in photosynthetic characteristics between wild oats and cultivated oats. The coefficients of variation of wild oats were higher than those of cultivated oats, but cultivated oats exhibited stronger and more stable photosynthetic performance. Furthermore, significant differences were also observed in agronomic traits between wild oats and cultivated oats. Correlation analysis indicated that net photosynthetic rate, flag leaf area, and SPAD value were all significantly positively correlated with 1000-grain weight. Among the wild populations, Atl-11 exhibited the optimal photosynthetic characteristics and agronomic traits; among the cultivated populations, ITAO-36 showed the optimal photosynthetic characteristics and agronomic traits, and both can serve as excellent germplasm resources.

Key words Wild oat; Cultivated oat; Photosynthetic characteristics; Agronomic traits