

DOI:10.11686/cyxb2025057

http://cyxb.magtech.com.cn

傅俊士, 南丽丽, 张泽龙, 等. 21份猫尾草种质不同生育时期光合特性综合评价. 草业学报, 2026, 35(1): 93—106.

FU Jun-shi, NAN Li-li, ZHANG Ze-long, et al. Multivariate evaluation of the photosynthetic characteristics of 21 timothy germplasm lines at different growth stages. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(1): 93—106.

## 21份猫尾草种质不同生育时期光合特性综合评价

傅俊士, 南丽丽\*, 张泽龙, 吴世文

(甘肃农业大学草业学院, 草业生态系统教育部重点实验室, 农业农村部饲草种质创新与新品种选育重点实验室, 甘肃兰州730070)

**摘要:**为探究不同猫尾草种质资源的光合能力及筛选高光效猫尾草种质,本研究对21份猫尾草种质分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期4个生育时期的叶绿素体色素含量、光合及叶绿素荧光参数进行了对比研究。结果表明,供试猫尾草16项光合指标中,叶绿素a、叶绿素b、类胡萝卜素、总叶绿素、蒸腾速率、气孔导度、净光合速率、胞间二氧化碳浓度、PS II最大光合效率、PS II潜在光化学效率、光化学淬灭系数、表观电子传递效率、PS II光化学量子产量均呈先升后降趋势,并在抽穗期达最大值。基于4个生育时期各指标的均值进行主成分分析,将16项指标经降维提取出5个综合因子,累积贡献率为78.76%;利用逐步回归分析筛选出PS II潜在光化学效率、PS II光化学量子产量、总叶绿素、净光合速率、类胡萝卜素、气孔限制值、表观电子传递效率和非光化学淬灭系数8项可作为高光效猫尾草种质筛选的关键指标。21份猫尾草可聚为4类,其中材料9451、10676和9657均属第I类,综合评价值较高,可作为猫尾草高光效新品种选育和改良的优异亲本材料。

**关键词:**猫尾草;光合特性;叶绿素荧光;高光效筛选

## Multivariate evaluation of the photosynthetic characteristics of 21 timothy germplasm lines at different growth stages

FU Jun-shi, NAN Li-li\*, ZHANG Ze-long, WU Shi-wen

College of Pratacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Key Laboratory of Forage Germplasm Innovation and New Variety Breeding of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou 730070, China

**Abstract:** Timothy (*Phleum pratense*) is widely cultivated globally because of its numerous superior traits such as good herbage quality and abundant natural oils and fats. This grass is beneficial for maintaining racehorse body shape, improving their respiratory system, and enhancing their endurance. It also stimulates rumination in cows, thereby prolonging the peak milk production period. However, the germplasm resources of timothy in China are relatively scarce, with only two species introduced so far. To investigate the photosynthetic capacity of timothy germplasm and screen for varieties with highly efficient photosynthesis, we conducted a comparative analysis of 21 timothy germplasm lines across four growth stages (tillering stage, culm elongation stage, heading stage, and reproductive maturity stage). We determined their chlorophyll pigment contents, photosynthetic parameters, and chlorophyll fluorescence parameters. Among the 16 photosynthetic traits of the tested timothy germplasm lines, 13 showed an initial increase, followed by a decrease, and then an increase to reach maximum values at the heading stage. These 13 traits were chlorophyll a content, chlorophyll b content, carotenoid content, total chlorophyll

收稿日期:2025-02-26;改回日期:2025-04-03

基金项目:甘肃省重大专项(25ZDNA005)和国家现代农业产业技术体系(CARS-34)资助。

作者简介:傅俊士(1999—),男,甘肃武威人,在读硕士。E-mail: 2533132674@qq.com

\*通信作者 Corresponding author. E-mail: nanll@gsau.edu.cn

content, transpiration rate, stomatal conductance, net photosynthetic rate, intercellular carbon dioxide concentration, maximum photosynthetic efficiency of photosystem II (PS II), potential photochemical efficiency of PS II, photochemical quenching coefficient, apparent electron transfer efficiency, and PS II photochemical quantum yield. A principal component analysis was conducted using the mean values of various traits from four growth stages. It was found on principal component analysis that these 16 traits yielded 5 principal components with eigenvalues greater than 1 and cumulatively explaining 78.76% of data variance. These five principal components were weighted according to their eigenvalues and added to obtain a discriminant score (D) for each germplasm line. A stepwise regression analysis identified eight traits that could be used to identify germplasm lines with a high D score, assumed by the authors to indicate high light-use efficiency. These eight traits were potential photochemical efficiency of PS II, photochemical quantum yield of PS II, total chlorophyll content, net photosynthetic rate, carotenoid content, stomatal limiting value, apparent electron transfer efficiency, and non-photochemical quenching coefficient. Using cluster analysis, the tested timothy germplasm lines were classified into four groups on the basis of their overall D scores. Germplasm lines designated 9451, 10676, and 9657 belonged to group I with high multivariate scores. These lines have potential uses as excellent parental materials for breeding new timothy varieties with high light-use efficiency and improved photosynthetic traits.

**Key words:** timothy; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence; high light-use efficiency screening

猫尾草(*Phleum pratense*)是禾本科梯牧草属多年生疏丛型草本植物<sup>[1]</sup>,生活年限一般为6~7年,第2~5年为产草高峰期,是世界上被广泛栽培种植利用的牧草之一<sup>[2]</sup>。作为优良牧草,猫尾草具有产草量高而稳定、纤维长、适口性好等特点,其茎纤维含量高于叶片,基于这一特性,其茎秆常被加工成宠物磨牙棒,而叶片则更适宜用来配制青贮饲料、制作青干草和草粉等多种草产品<sup>[3]</sup>。同时,猫尾草富含天然油脂及丰富的粗蛋白和粗纤维<sup>[4]</sup>,用其饲喂赛马有利于保持赛马的体型,改善呼吸系统,提高赛马耐力<sup>[5]</sup>;饲喂奶牛可刺激其瘤胃的反刍功能,延长奶牛的产奶高峰期和饲养年限<sup>[6]</sup>,近年来在国内外市场需求量与日俱增。此外,猫尾草因其根系极其发达,有涵养水源、防止水土流失、维持生物多样性等作用<sup>[7]</sup>。

在光合作用过程中,作物个体和群体捕获光能的能力有限,电子传递时也会造成能量损失,而且光抑制、光呼吸作用等也会消耗能量,这些因素最终导致作物光能利用效率较低<sup>[8]</sup>。目前,C<sub>3</sub>和C<sub>4</sub>作物在田间实际最大光能转化效率分别只有2.4%和3.7%,在生育期内平均光能转化效率仅为0.5%,还存在很大的提升空间<sup>[9]</sup>。所以,运用传统遗传育种或现代生物技术等方法来提高作物光合作用效率,进而培育优良品种,也就是高光效育种,被视作未来大幅提升作物产量潜力的关键且有效的途径<sup>[10]</sup>,而高光效种质筛选就是挖掘具有光合增产潜力种质及高光效育种的基础和前提<sup>[11]</sup>。

王嘉雯等<sup>[12]</sup>选用7个羊草(*Leymus chinensis*)新品种(品系)为试验材料,通过测定羊草抽穗期营养枝叶片的光合生理特性,筛选出2个新品系,与其他羊草相比在光合特性方面均占有明显优势,具有培育潜力,可作为重点选育对象进行下一步试验。胡莎莎<sup>[13]</sup>针对15个紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种不同月份的光合特性进行研究比较,筛选出6个适合南京地区季节性种植的紫花苜蓿品种,为进一步在南方引种紫花苜蓿提供了理论依据。吴芳<sup>[14]</sup>测定61份俄罗斯百脉根(*Lotus corniculatus*)种质的分枝期叶片光合特性并进行比较,最终筛选出单叶光合性能较优的12份材料,表明这些材料在河西走廊地区有较高的推广利用价值,为我国西北绿洲地区百脉根科学栽培管理及优质育种提供了一定的理论基础。

然而,我国猫尾草种质资源比较匮乏,到目前为止,通过全国草品种审定委员会审定登记的猫尾草品种仅有2个,分别为‘岷山’猫尾草(*P. pratense* ‘Minshan’, MS)和‘川西’猫尾草(*P. pratense* ‘Chuanxi’, CX),对其研究主要集中在草产量及适应性<sup>[15]</sup>、种子产量及适应性<sup>[16]</sup>、抗旱性<sup>[3]</sup>、生产性能及营养价值评价<sup>[6]</sup>等方面,有关猫尾草种质光合特性评价及筛选高光效猫尾草种质的研究较少。因此,本研究以21份猫尾草种质为对象,对其不同生育时期的叶绿素体色素含量、光合和叶绿素荧光参数进行测定,以期筛选出高光效猫尾草种质,探明猫尾草种质

在不同生育时期的光合特性变化规律,为高光效新品种选育研究提供理论依据和种质资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料共21份,其中2547、4190、7019、7122、7259、7629、8050、8334、8383、8460、8735、9038、9451、9657、10067、10101、10227、10676和13688由农业农村部全国畜牧兽医总站牧草种质资源搜集保护项目协作组(中国农业科学院北京畜牧兽医研究所)从俄罗斯瓦维洛夫植物基因库引进,‘岷山’猫尾草由定西市农业科学研究院提供,‘川西’猫尾草由四川省草原科学研究院提供,具体来源及信息参考傅俊士等<sup>[2]</sup>。

### 1.2 试验设计

本试验于2022年6月在甘肃农业大学兰州牧草试验站进行(36°05′25″N, 103°41′48″E),该站地处黄土高原西端,海拔1517.30 m,春季温暖,夏季高温多雨,光照充足,昼夜温差大,年均气温9.8℃,年均降水量350 mm,年均蒸发量1664 mm,年均日照时数2770 h,全年无霜期210 d。每盆装经暴晒消毒后的土壤25.0 kg(花盆口径、底径、高分别为34.5、23.0、44.5 cm),供试种子经75%无水乙醇消毒后撒播在花盆中并覆沙(121℃,高温灭菌30 min)1.5 cm,每盆播量为0.07 g,每隔7 d浇水1.5 L,待出苗后间苗,每盆留苗20株,每份材料种植2盆,共计42盆。采样时间及当日天气状况如图1所示。

### 1.3 测定指标及方法

**1.3.1 光合参数测定** 于晴天09:00—11:00,采用LI-6400便携式光合仪(LI-COR,美国)测定光合参数。测定条件:空气CO<sub>2</sub>浓度(concentration of atmospheric carbon dioxide, C<sub>a</sub>)为400 μmol·mol<sup>-1</sup>,光合有效辐射强度为1200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。各材料均选取从顶端往下数第1片叶片作为测定叶片,测定其净光合速率(net photosynthetic rate, P<sub>n</sub>)、蒸腾速率(transpiration rate, T<sub>r</sub>)、气孔导度(stomatal conductance, G<sub>s</sub>)和胞间CO<sub>2</sub>浓度(intercellular CO<sub>2</sub> concentration, C<sub>i</sub>)。并按如下公式计算水分利用效率(water use efficiency, WUE)和气孔限制值(stomatal limitation value, L<sub>s</sub>),每个处理3次重复。

$$WUE = P_n / T_r$$

$$L_s = 1 - C_i / C_a$$

**1.3.2 叶绿素荧光测定** 于晴天9:00—11:00,采用便携式叶绿素荧光仪(PAM-2100,美国)对测定光合指标的叶片进行荧光参数测定,经20 min黑暗处理,饱和脉冲为8000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,记录初始荧光(minimal fluorescence, F<sub>0</sub>)、最大暗适应态荧光产量(maximal fluorescence yield of the dark-adapted state, F<sub>m</sub>)、可变荧光(variable fluorescence, F<sub>v</sub>)、最大光适应态荧光产量(maximal fluorescence yield of the light-adapted state, F<sub>m</sub>')和稳态荧光产量(steady state fluorescence yield, F<sub>s</sub>)等参数。采用Sun等<sup>[18]</sup>的方法计算PS II最大光合效率(PS II maximum photosynthetic efficiency, F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)、PS II潜在光化学效率(PS II potential photochemical efficiency, F<sub>v</sub>/F<sub>0</sub>)、表观电子传递效率(apparent electron transfer efficiency, ETR)、光化学淬灭系数(photochemical quenching coefficient, qP)、非光化学淬灭系数(non-photochemical quenching coefficient, qN)、PS II光化学量子产量(PS II photochemical quantum yield, Yield),每个处理3次重复。

**1.3.3 叶绿素体色素含量测定** 称取0.5 g已测光合、荧光指标的叶片,放入装有2.5 mL无水乙醇和2.5 mL丙酮离心管中,4℃培养箱中避光保存24 h并测定叶绿素a(chlorophyll a, Chl a)、叶绿素b(chlorophyll b, Chl b)、

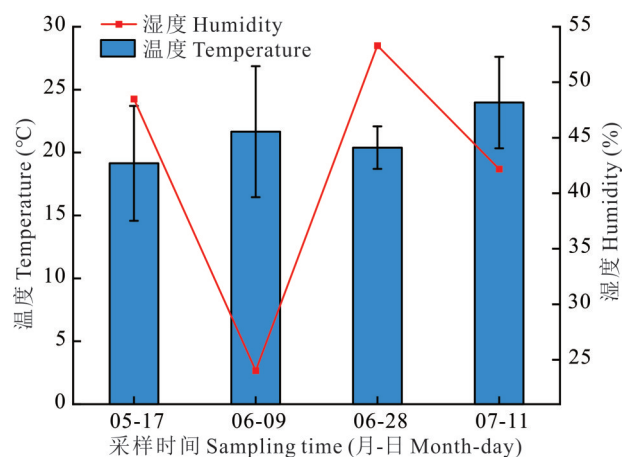


图1 采样时间及当日天气状况

Fig. 1 Sampling time and weather conditions of the day

05-17为分蘖期,06-09为拔节期,06-28为抽穗期,07-11为成熟期。05-17 is the tillering stage, 06-09 is the jointing stage, 06-28 is the heading stage, and 07-11 is the maturity stage.

类胡萝卜素(carotenoid, Car)和总叶绿素(total chlorophyll, TChl)含量<sup>[17]</sup>(以上4种色素含量均以鲜样为基础进行测定)。

**1.3.4 地上生物量测定** 于抽穗期手动分离地上部和地下部后,留茬5 cm刈割并取10株植株于70℃烘干至恒重,分别测定其地上生物量(aboveground biomass, AGB)后取均值。

#### 1.4 数据统计分析

用Excel 2019处理数据,用SPSS 26.0软件进行方差分析、相关性分析、主成分分析、聚类分析和回归分析,用Origin 2021软件制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶绿素体色素含量对比分析

在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,供试猫尾草Chl a、Chl b、Car及TChl含量分别为1.07~1.64、1.16~1.68、1.20~1.73和0.96~1.53 mg·g<sup>-1</sup>; 0.42~0.78、0.46~0.83、0.49~0.88和0.37~0.69 mg·g<sup>-1</sup>; 0.14~0.28、0.15~0.29、0.15~0.33和0.12~0.24 mg·g<sup>-1</sup>; 1.50~2.42、1.67~2.49、1.75~2.59和1.33~2.22 mg·g<sup>-1</sup>。随生育进程推进,4种色素含量均呈先升后降趋势,并在抽穗期达峰值,表现为抽穗期>拔节期>分蘖期>成熟期,其中材料9451的Chl a含量在抽穗期最高,为1.73 mg·g<sup>-1</sup>;材料10676的Chl b、Car和TChl含量在抽穗期最高,分别为0.88、0.33和2.59 mg·g<sup>-1</sup>。不同材料间,材料9451的Chl a和TChl含量在4个生育时期中均值最大,分别为1.64和2.43 mg·g<sup>-1</sup>;材料10676的Chl b和Car含量均值最大,分别为0.79和0.28 mg·g<sup>-1</sup>(图2)。

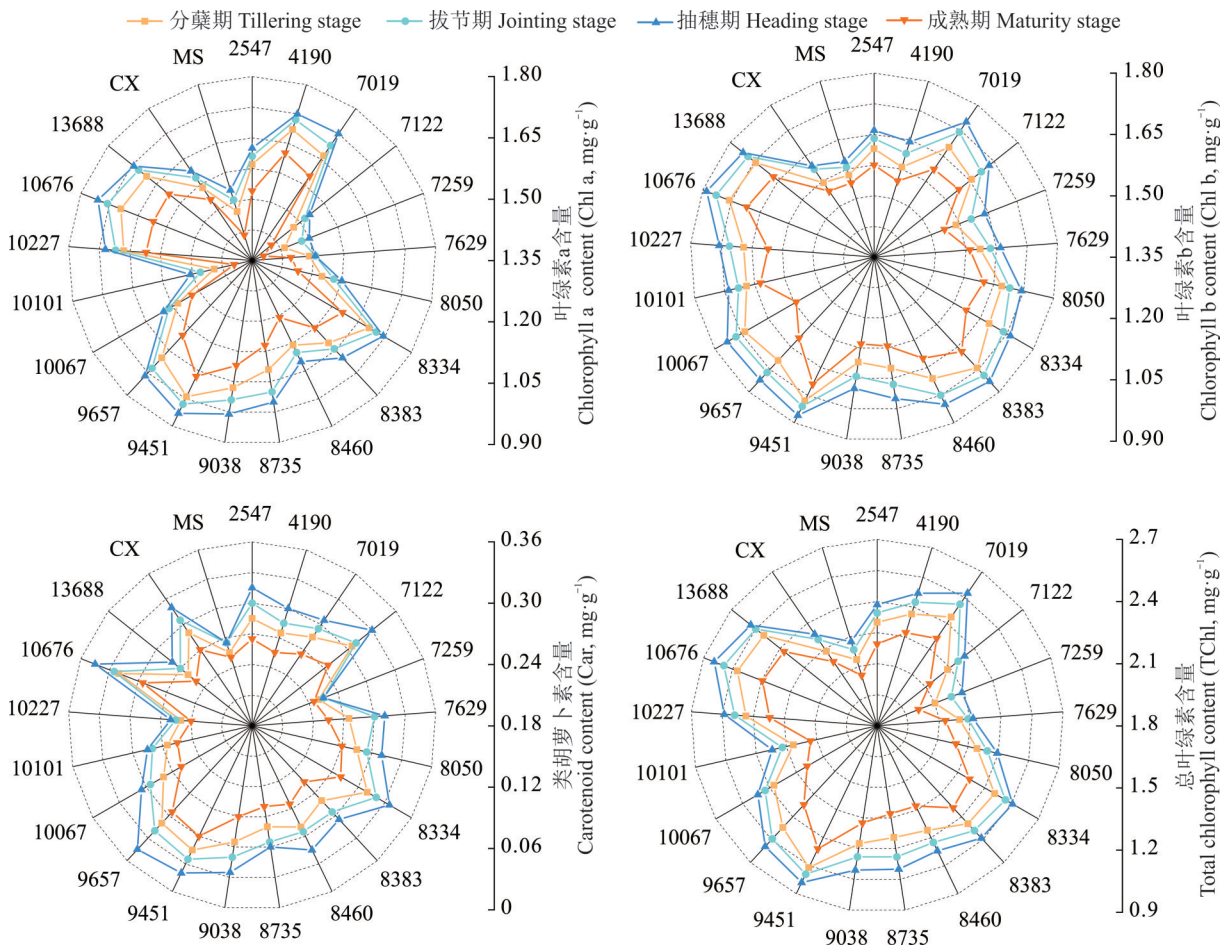


图2 猫尾草种质叶绿素体色素含量

Fig. 2 Chloroplast pigment content in timothy germplasm

CX: '川西'猫尾草 *P. pratense* 'Chuanxi'; MS: '岷山'猫尾草 *P. pratense* 'Minshan'. 下同 The same below.

### 2.2 光合参数比较分析

在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期,供试猫尾草  $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$ 、 $C_i$ 、 $L_s$  和 WUE 分别为 1.93~6.52、2.08~8.01、2.16~8.25 和 1.78~5.21  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 54.21~207.12、60.21~225.36、61.55~239.40 和 48.32~190.54  $\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 3.12~14.87、3.82~16.35、3.96~17.14 和 2.98~12.80  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 218.47~344.56、239.54~357.85、251.20~387.00 和 221.54~327.56  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 19.97%~46.37%、19.02%~46.35%、18.53%~46.38% 和 20.98%~48.56%; 1.41~2.73、1.29~2.51、1.26~2.53 和 1.59~2.72  $\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$ 。在不同生育时期,随生长天数增加, $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$  和  $C_i$  均呈先升后降趋势,并在抽穗期达峰值,表现为抽穗期>拔节期>分蘖期>成熟期,其

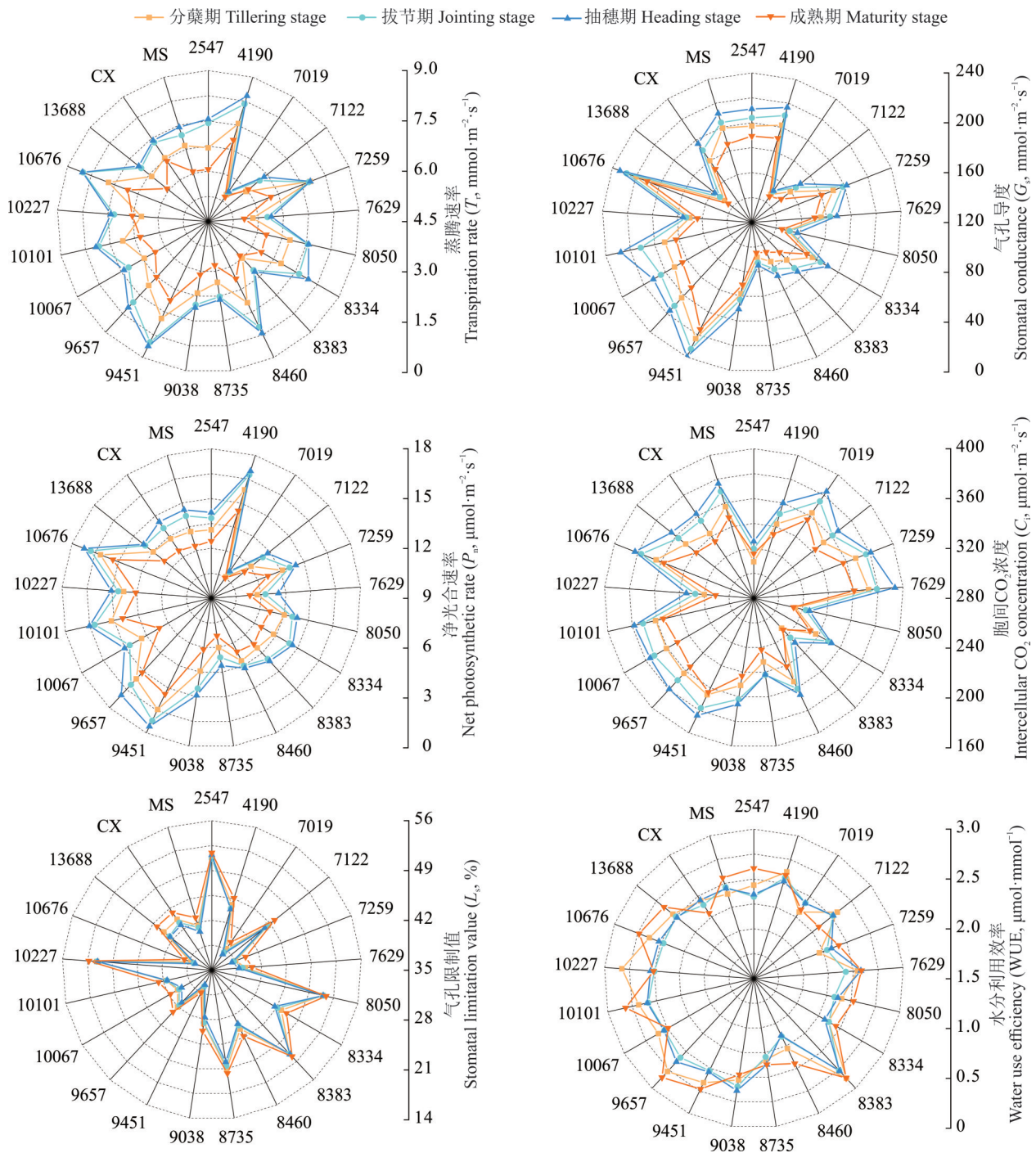


图 3 猫尾草种质光合参数

Fig. 3 Photosynthetic parameters of timothy germplasm

中材料 9451 的  $T_r$ 、 $G_s$  和  $P_n$  在抽穗期达最大, 分别为  $8.25 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $239.47 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $17.14 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 材料 7629 的  $C_i$  在抽穗期最大, 为  $387.00 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $L_s$  呈先降后升趋势, 在抽穗期最小、成熟期最大, 材料 9451 的  $L_s$  在抽穗期最小, 仅为 18.53%。不同材料间, 材料 9451 的  $T_r$ 、 $G_s$  和  $P_n$  在 4 个生育时期中均值最大, 分别为  $6.96 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $215.62 \text{ mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $15.29 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 材料 7629 的  $C_i$  均值较大, 为  $352.74 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 材料 8383 和 9657 的 WUE 均值较高, 分别为 2.62 和  $2.42 \text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{mmol}^{-1}$  (图 3)。

### 2.3 叶绿素荧光参数差异对比

在分蘖期、拔节期、抽穗期和成熟期, 供试猫尾草  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $qN$ 、 $qP$ 、ETR 和 Yield 分别为 2.14~2.82、2.18~2.89、2.21~2.99 和 2.07~2.73; 0.60~0.67、0.64~0.70、0.69~0.75 和 0.55~0.64; 0.35~0.48、0.32~

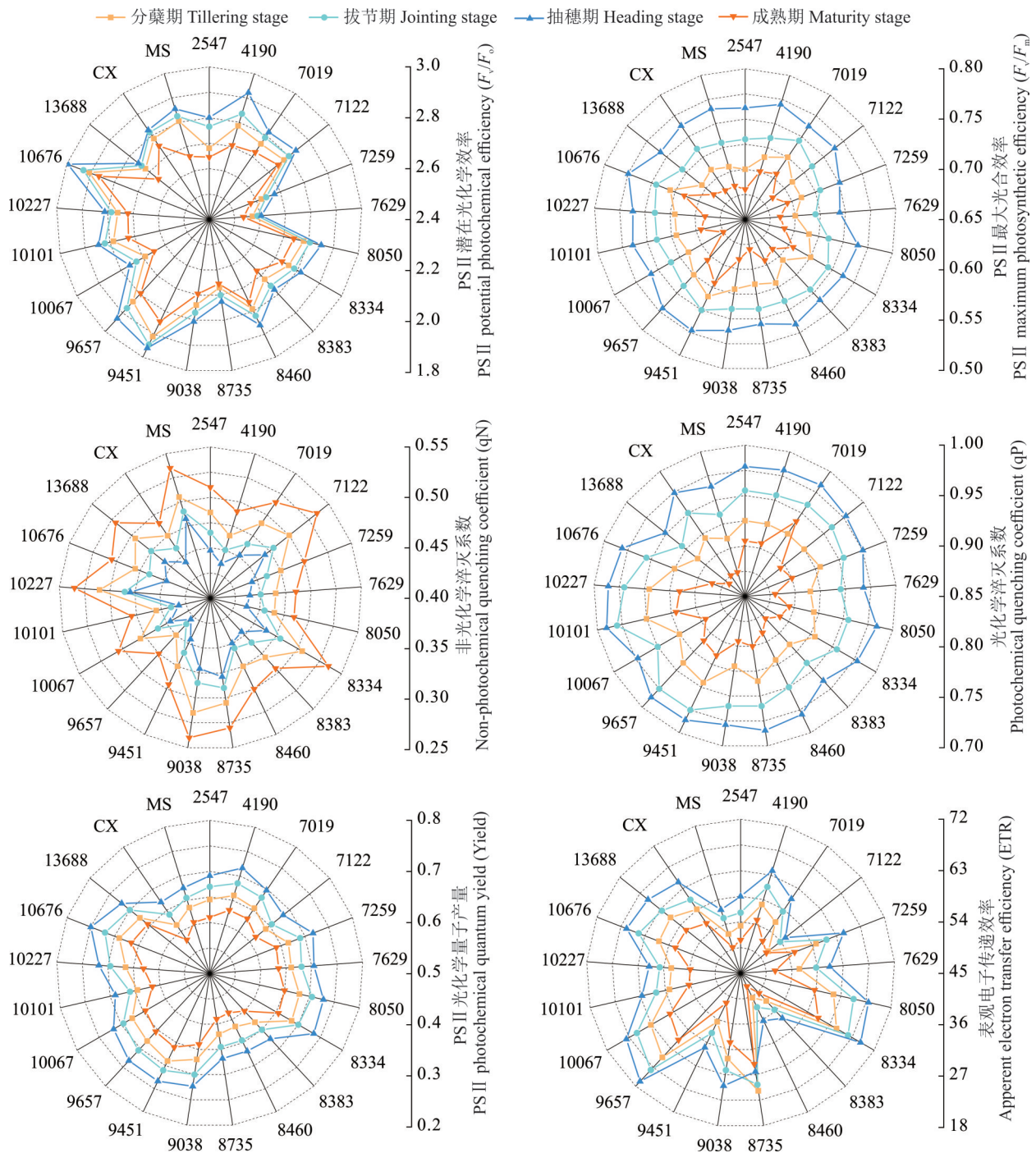


图 4 猫尾草种质叶绿素荧光参数

Fig. 4 Chlorophyll fluorescence parameters of timothy germplasm

0.43、0.31~0.41 和 0.40~0.53; 0.82~0.90、0.86~0.96、0.90~0.98 和 0.74~0.88; 27.54~59.67、31.21~64.21、36.50~69.70 和 23.12~50.16; 0.43~0.58、0.48~0.64、0.54~0.70 和 0.36~0.53。随生育进程推进,除  $qN$  外,其余指标均呈先升后降趋势,在抽穗期达最大值,呈现为抽穗期>拔节期>分蘖期>成熟期,其中材料 10676 的  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$  和 Yield 在抽穗期达峰值,分别为 2.99、0.75 和 0.70,材料 9657 的 ETR 在抽穗期最大,为 69.70; $qN$  呈先降后升趋势,在抽穗期最小、成熟期最大,材料 9657 的  $qN$  在抽穗期最小,为 0.31。不同材料间,材料 10676 的  $F_v/F_o$  和 Yield 在 4 个生育时期中均值最大,分别为 2.85 和 0.61;材料 10676 和 9451 的  $F_v/F_m$  均值最大,分别为 0.68 和 0.69;材料 9657 的  $qN$  最小、ETR 最大,分别为 0.34 和 60.50(图 4)。

### 2.4 猫尾草种质抽穗期地上生物量差异对比

供试猫尾草种质在抽穗期的地上生物量为 3.82~7.69  $g \cdot \text{株}^{-1}$ ,其均值为 5.37  $g \cdot \text{株}^{-1}$ ,其中材料 10676 的地上生物量最大,明显高于其他材料,是均值的 1.43 倍;材料 4190 的最小,是均值的 0.71 倍,最大与最小之间相差 3.87  $g \cdot \text{株}^{-1}$ (图 5)。

### 2.5 猫尾草种质光合特性相关性分析

以 21 份猫尾草种质 4 个生育时期的各项指标均值为基础进行相关性分析可知(图 6),Chl a、Chl b、Car 和 TChl 两两间呈极显著或显著正相关( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ); $P_n$  与  $T_r$ 、 $G_s$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 WUE 和 Yield 呈显著正相关( $P < 0.05$ ); $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  与 Chl a、Chl b、Car、TChl、 $T_r$  和  $P_n$  均呈极显著或显著正相关( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ); $L_s$  与  $G_s$  和  $C_i$  呈极显著或显著负相关( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ )。

### 2.6 猫尾草种质光合特性主成分分析

以 21 份猫尾草种质 4 个生育时期的各项指标均值为基础进行主成分分析,结果表明,16 项指标被划分为 5 个主成分,累计贡献率达 78.76%,前 5 主成分的特征值分别为 5.726、2.676、1.658、1.338 和 1.203,贡献率分别为 35.78%、16.72%、10.36%、8.36%、7.52%,其主要特征向量分别为  $F_v/F_m$ 、 $P_n$  和  $F_v/F_o$ ;  $C_i$ 、 $L_s$  和  $G_s$ ;  $L_s$ 、 $C_i$  和  $T_r$ ; ETR、Yield 和  $F_v/F_m$ ; WUE、ETR 和 Chl b(表 1)。

由猫尾草种质指标标准化后的数值与系数特征向量可以得出 5 个主成分的得分表达式: $PC_1=0.658X_1+0.610X_2+0.617X_3+\dots+0.462X_{14}+0.344X_{15}+0.637X_{16}$ ,  $PC_2=0.567X_1+0.435X_2+0.142X_3+\dots+0.013X_{14}+0.029X_{15}-0.069X_{16}$ ,  $PC_3=-0.173X_1-0.216X_2-0.224X_3+\dots+0.192X_{14}-0.123X_{15}-0.260X_{16}$ ,  $PC_4=0.099X_1-0.021X_2-0.234X_3+\dots-0.210X_{14}+0.719X_{15}+0.553X_{16}$  和  $PC_5=0.077X_1-0.389X_2+0.001X_3+\dots+0.292X_{14}+0.399X_{15}+0.084X_{16}$ 。

主成分对应的贡献率为权重,可得出不同猫尾草种质综合评价得分(discriminant score,  $D_n$ )表达式: $D_n=0.073PC_1+0.034PC_2+0.021PC_3+0.017PC_4+0.015PC_5$ ,从综合性状来看,综合评价得分  $D_n$  越高,光合能力越强。不同猫尾草种质  $D_n$  显示(表 2),材料 9451、10676 和 9657 综合得分较高,材料 7259、MS 和 7629 综合得分较低。

### 2.7 猫尾草种质光合特性聚类分析

采用欧氏距离及系统聚类法对  $D_n$  值进行系统聚类分析(图 7),以欧氏距离 10 为临界值,可将 21 份猫尾草种质划分为 4 大类群,第 I 类综合得分最高,光合能力较强,包括材料 9451、10676 和 9657;第 II 类次之,包括材料 4190、10227 和 8334;第 III 类综合得分一般,光合能力适中,包括材料 2547、8460、8735、7019、CX、7122、10101、8383、10067、13688、9038 和 8050;第 IV 类综合得分最低,光合能力较差,包括材料 7259、MS 和 7629。

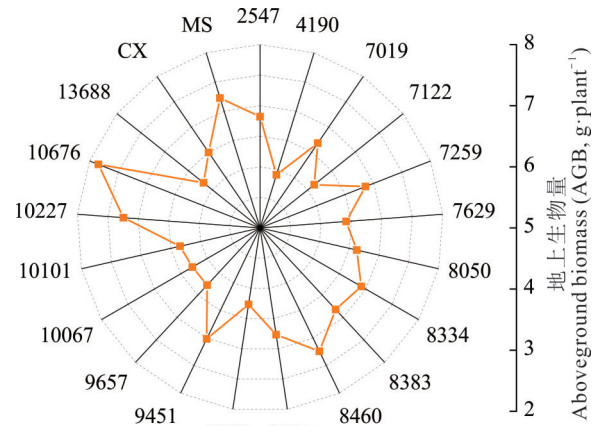


图 5 猫尾草种质抽穗期地上生物量

Fig. 5 Aboveground biomass of timothy germplasm at heading stage

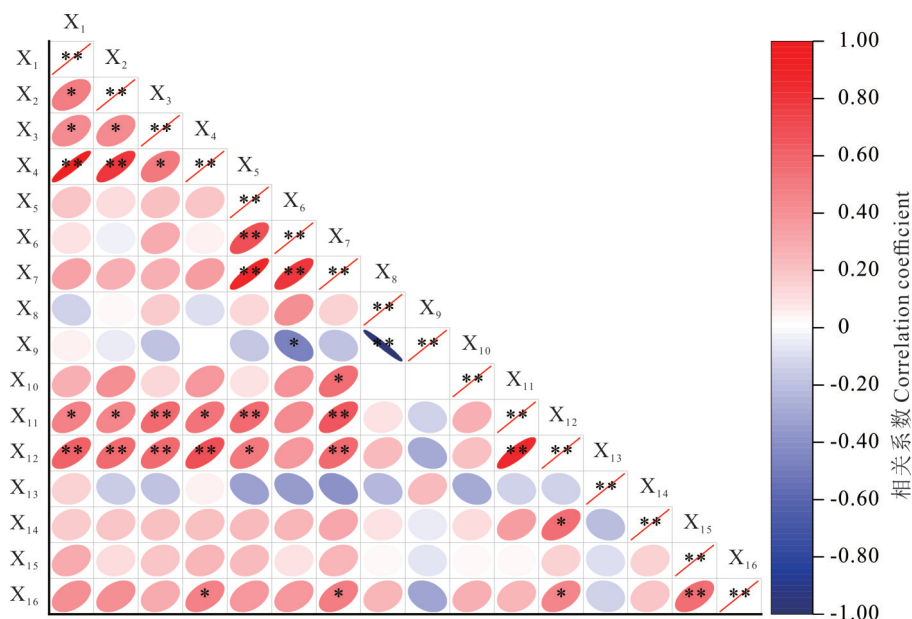


图6 猫尾草种质光合特性各指标间相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis among indicators of photosynthetic properties of timothy germplasm

\*\*;  $P < 0.01$ ; \*;  $P < 0.05$ .  $X_1$ : 叶绿素 a 含量 Chl a content;  $X_2$ : 叶绿素 b 含量 Chl b content;  $X_3$ : 类胡萝卜素含量 Car content;  $X_4$ : 总叶绿素含量 TChl content;  $X_5$ : 蒸腾速率  $T_r$ ;  $X_6$ : 气孔导度  $G_s$ ;  $X_7$ : 净光合速率  $P_n$ ;  $X_8$ : 胞间二氧化碳浓度  $C_i$ ;  $X_9$ : 气孔限制值  $L_s$ ;  $X_{10}$ : 水分利用效率 WUE;  $X_{11}$ : PS II 最大光合效率  $F_v/F_m$ ;  $X_{12}$ : PS II 潜在光化学效率  $F_v/F_0$ ;  $X_{13}$ : 非光化学淬灭系数  $q_N$ ;  $X_{14}$ : 光化学淬灭系数  $q_P$ ;  $X_{15}$ : 表观电子传递效率 ETR;  $X_{16}$ : PS II 光化学量子产量 Yield. 下同 The same below.

表1 基于主成分分析的各指标特征值及贡献率

Table 1 Eigenvalue and contribution rate from principal component analysis of photosynthetic traits

指标 Index	主成分 Principal component				
	1	2	3	4	5
$X_1$	0.658	0.567	-0.173	0.099	0.077
$X_2$	0.610	0.435	-0.216	-0.021	-0.389
$X_3$	0.617	0.142	-0.224	-0.234	0.001
$X_4$	0.735	0.586	-0.218	0.062	-0.113
$X_5$	0.656	-0.372	0.431	0.032	0.294
$X_6$	0.602	-0.625	0.222	0.005	-0.018
$X_7$	0.809	-0.315	0.424	0.124	-0.041
$X_8$	0.251	-0.695	-0.628	-0.132	-0.077
$X_9$	-0.308	0.676	0.640	0.107	0.032
$X_{10}$	0.466	0.018	0.234	0.217	-0.706
$X_{11}$	0.799	0.083	0.153	-0.417	0.094
$X_{12}$	0.849	0.205	-0.054	-0.361	0.212
$X_{13}$	-0.282	0.422	-0.254	-0.081	0.364
$X_{14}$	0.462	0.013	0.192	-0.210	0.292
$X_{15}$	0.344	0.029	-0.123	0.719	0.399
$X_{16}$	0.637	-0.069	-0.260	0.553	0.084
特征值 Eigenvalue	5.726	2.676	1.658	1.338	1.203
贡献率 Rate of contribution (%)	35.78	16.72	10.36	8.36	7.52
累计贡献率 Cumulative contribution rate (%)	35.78	52.51	62.87	71.24	78.76

表 2 猫尾草种质主成分得分及综合评价

Table 2 Principal component scores and comprehensive evaluation of timothy germplasm

材料 Material	主成分得分 Principal component score					综合评价得分 Discriminant score	排名 Ranking
	1	2	3	4	5		
10067	4.366	0.020	-0.366	0.693	0.190	0.325	10
7259	2.687	-1.110	-0.074	0.470	0.693	0.175	19
4190	5.109	0.139	0.587	0.377	0.440	0.402	5
9451	7.826	0.178	-0.294	-0.191	0.180	0.568	1
9038	4.372	0.807	-0.405	0.402	0.553	0.352	7
7019	3.817	1.128	-1.154	-0.231	0.340	0.293	13
8050	3.708	1.203	0.573	0.637	0.522	0.341	8
13688	3.918	1.260	-0.547	0.829	0.044	0.331	9
10101	4.580	-0.663	0.502	0.024	0.054	0.322	11
7122	2.833	0.682	-0.170	-0.372	0.194	0.222	18
8334	5.055	1.308	-0.276	0.536	0.838	0.428	4
8383	3.491	1.820	0.565	0.141	-0.596	0.321	12
2547	3.049	0.913	0.826	0.153	0.385	0.279	14
8460	3.570	0.698	-0.006	-0.614	0.328	0.278	15
9657	6.880	0.247	-0.063	0.543	0.161	0.519	3
7629	2.233	-0.540	-0.578	0.420	-0.160	0.137	21
10227	4.046	1.728	0.629	0.442	0.476	0.381	6
CX	3.227	0.112	0.245	-0.036	0.498	0.251	17
10676	7.535	0.230	-0.447	0.260	0.289	0.555	2
8735	2.664	1.609	0.017	0.272	0.799	0.266	16
MS	2.295	-0.481	0.093	-0.146	0.423	0.156	20

CX: ‘川西’猫尾草 *P. pratense* ‘Chuanxi’; MS: ‘岷山’猫尾草 *P. pratense* ‘Minshan’.

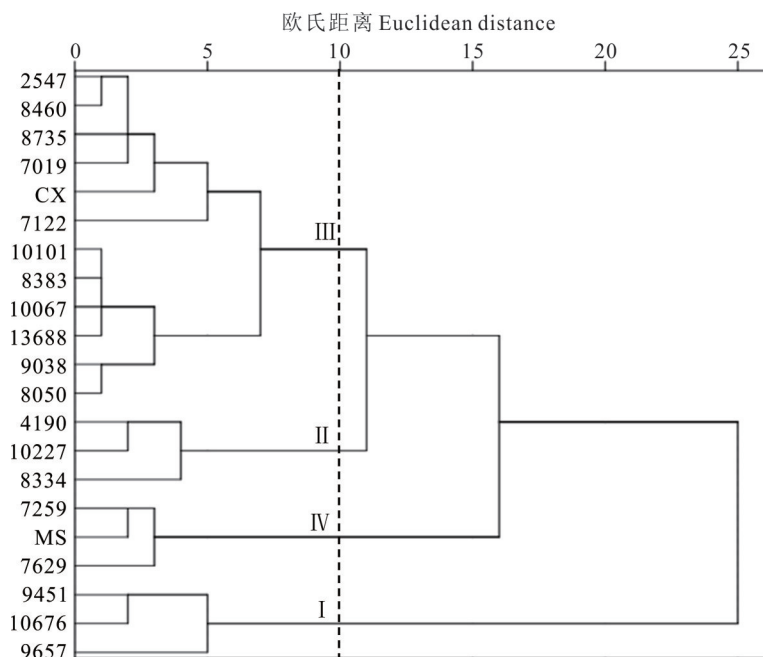


图 7 猫尾草种质系统聚类分析

Fig. 7 Clustering analysis of timothy germplasm systems

## 2.8 猫尾草种质光合特性指标回归分析

为进一步筛选高光效猫尾草种质评价指标,以  $D_n$  值为因变量,各项指标平均值为自变量,进行回归分析,得到最优回归方程:  $Y = -1.866 + 2.170X_1 + 0.357X_2 + 0.175X_3 + 0.013X_4 + 0.322X_5 + 0.001X_6 + 0.001X_7 - 0.166X_8$  ( $R^2 = 0.996$ ),式中:  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$  和  $X_8$  分别代表  $F_v/F_m$ 、 $Yeild$ 、 $TChl$ 、 $P_n$ 、 $Car$ 、 $L_s$ 、 $ETR$  和  $qN$ ,可见 16 项指标中这 8 项指标对猫尾草高光效种质的筛选具有重要指导作用。

## 3 讨论

### 3.1 猫尾草种质叶绿素体色素含量差异分析

叶绿素作为植物光合作用的基础之一,其含量变化不仅能直观反映植株在不同生育时期的生长状态,还能反映出不同材料间的差异<sup>[19]</sup>。本研究中,供试猫尾草随生育进程推进,Chl a、Chl b、Car 和 TChl 含量均呈先升后降趋势,在抽穗期达最大,呈抽穗期>拔节期>分蘖期>成熟期的规律,这与洪自强等<sup>[20]</sup>在玉米(*Zea mays*)光合特性研究中所得出结论一致。这可能是因为植株生育前期,叶片刚开始分化、生长,叶绿体发育不完善,导致叶绿素含量较低<sup>[21]</sup>,而随着植株的生长发育,叶片生长旺盛、叶面积逐渐增大,光合作用需求日益增加,需要更多的光合色素来捕获和利用光能,因此叶绿素含量逐渐增加<sup>[22]</sup>;在抽穗期,因叶片发育成熟、植株生长旺盛,对能量需求大、光能利用效率要求高,叶绿素含量达到最高值<sup>[23]</sup>;到成熟期,植株生长重心从营养生长和光合作用转向种子的发育和成熟等过程,叶片开始衰老,叶绿素降解酶的活性逐渐升高,使得叶绿素含量下降<sup>[24]</sup>。Chl a 作为中心色素能够转化光能,TChl 作为叶绿素的总和,两者含量的高低能直接反映植物光合作用的能力与潜力<sup>[25]</sup>。本研究中材料 9451 的 Chl a 和 TChl 含量在 4 个生育时期均值中表现最高,表明该材料在光能吸收和转化方面有较强能力,有利于干物质积累,能够为其生长发育提供更充足的能量<sup>[26]</sup>。Car 为天然水溶性自由基清除剂,在植物吸收光能、保护叶绿素、猝灭活性氧方面具有重要作用,Chl b 通过拓宽光谱吸收、高效传能和维持光合膜结构,能够显著提升植株的光能利用效率<sup>[27]</sup>。本研究中,材料 10676 的 Car 和 Chl b 含量在 4 个生育时期均值中表现最高,表明该材料具有更强的光能捕获与利用能力,光合系统稳定性高,植株抗逆性更强,不易受外界因素影响,这与吕川根等<sup>[28]</sup>在水稻(*Oryza sativa*)中所得结论相同。

### 3.2 猫尾草种质光合参数对比分析

光合作用作为植物能量代谢与产量形成的物质基础,其光合参数是评价植物光合效能高低的核心指标<sup>[25]</sup>。本研究中,供试猫尾草随生育进程推进, $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$  和  $C_i$  均呈先升后降趋势,在抽穗期达最大值,呈抽穗期>拔节期>分蘖期>成熟期的规律,而  $L_s$  呈先降后升趋势,在抽穗期为最小值,均呈成熟期>分蘖期>拔节期>抽穗期的规律。这可能是因为随植株生长发育,叶片数量增多、面积增大,使植株对水分、 $CO_2$  等需求增加,为获取更多的外界物质用于光合作用, $G_s$  和  $C_i$  逐渐增大, $L_s$  逐渐变小,外界物质更容易进入叶片,从而使得  $T_r$  增大, $P_n$  也随之升高<sup>[29]</sup>。在抽穗期,植株的营养生长和生殖生长都达到相对旺盛的阶段,需要大量的能量和物质来支撑植株的发育和种子的形成,此时光合作用最强,对  $CO_2$  的吸收和水分的利用都达到峰值,故  $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$  和  $C_i$  均达到最大值, $L_s$  降到最小值<sup>[30]</sup>。抽穗期之后,由于植株生殖器官发育逐渐成熟,对营养物质的需求相对减少,光合作用相对减弱, $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$  和  $C_i$  开始减小, $L_s$  增大<sup>[31]</sup>。本研究中材料 9451 的  $T_r$ 、 $G_s$  和  $P_n$  在 4 个生育时期均值中表现最高, $L_s$  表现最低,表明该种质具有优异的光能捕获与转化效率,以及高效的气体交换与水分利用特性,其较强的光环境适应能力和光呼吸代谢优势使其表现出良好的抗光抑制特性,展现出广泛的生态适应性,适合在多种气候区域推广种植<sup>[32]</sup>。WUE 可反映植物有关水分代谢功能的重要信息,其值也可作为评价植物耗水性和抗旱性的重要指标<sup>[33]</sup>。本研究中,材料 8383 和 9657 的 WUE 在 4 个生育时期均值中表现较高,表明这 2 份材料与其他材料相比在相同水分消耗条件下能够产生更高的生物量积累,节水性更强,在抗旱和抗瘠薄方面表现更优<sup>[34]</sup>。

### 3.3 猫尾草种质荧光参数差异分析

叶绿素荧光具有快速、灵敏且能无损伤研究光合生理的特性,其荧光参数能够精确分析植物对光能的吸收、利用和转化过程,还能体现植物体 PS II 活性以及对外界胁迫的应对策略<sup>[35]</sup>。本研究中,供试猫尾草随生育进程推进, $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、 $qP$ 、 $ETR$  和  $Yield$  均呈先升后降趋势,在抽穗期达最大值; $qN$  呈先降后升趋势,在抽穗期为最

小值。这可能是因为随植株生育进程推进,叶片逐渐发育成熟,PS II 的结构和功能不断完善,对光能的吸收和利用效率提高,将吸收的光能更多地用于光合电子传递和同化产物的合成,使  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、qP、ETR 和 Yield 逐渐升高,qN 逐渐降低,这与陶怡等<sup>[36]</sup>在水稻叶片衰老转色相关研究中所得结论一致。抽穗期时,植株叶片光合色素含量、光合酶活性等都处于较高水平,PS II 的功能也最为高效,对光能的吸收、转换和利用效率最高, $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、qP、ETR 和 Yield 均达到峰值<sup>[37]</sup>。抽穗期后,植株处于生育后期,叶片开始衰老,光合色素发生降解,PS II 受到损伤,电子传递效率降低,非光化学猝灭过程增强,更多的光能以热的形式散失,导致  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、qP、ETR 和 Yield 降低,qN 升高<sup>[38]</sup>。本研究中材料 9451 的  $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$  和 Yield 在 4 个生育时期均值中表现最高,表明该材料具有更为稳定的光系统结构、更高效的光能转换能力,同时反映出其光化学反应中心具有更强的潜在活性与抗光抑制特性,这与卫先伟等<sup>[39]</sup>在紫花苜蓿荧光特性相关研究中所得结论一致。qN 是指植物将过剩的光能耗散为热能的能力,ETR 反映了 PS II 实际的电子传递情况<sup>[40]</sup>。本研究中材料 9657 的 qN 在 4 个生育时期均值中表现最低,ETR 表现最高,表明该材料的 PS II 反应中心在光能转化为化学能的过程中效率更高,能够更有效地将吸收的光能用于光合作用(而非以热或荧光形式耗散),从而可能具有更强的光合产能能力<sup>[41]</sup>。

#### 3.4 综合分析

相关性分析表明, $P_n$  与  $T_r$ 、 $G_s$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),与 WUE 和 Yield 呈显著正相关( $P < 0.05$ ),表明植物叶片通过增加蒸腾作用和气孔导度,以促进叶片的水分运输和  $CO_2$  吸收,以满足 PS II 最大效率和提高其潜在活性,进而增强光合速率,促进光合产物的增加及干物质的积累,这与蔡金桓等<sup>[42]</sup>在高山植物光合生理特性研究中所得结论相同; $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  与 Chl a、Chl b、Car、TChl 均呈极显著或显著正相关( $P < 0.01$  或  $P < 0.05$ ),表明植物叶绿素含量越高,PS II 潜在活性和最大效率越高,能够最大限度捕获、接收和利用光能,提高光合速率,促进植物生长发育,这与何永涛等<sup>[43]</sup>在披碱草属(*Elymus*)相关研究中所得结论一致。16 项光合特性指标利用主成分分析可提取 5 个综合因子,累积贡献率为 78.76%,通过聚类分析发现,材料 9451、10676 和 9657 同属第 I 类,综合评分最高。结合抽穗期地上生物量发现,材料 10676 的地上生物量在抽穗期处于最大值,明显高于其他材料,其各项光合特性指标在差异分析中也均具有较大的优势,可进一步作为猫尾草筛选的重点材料。而国内品种 CX 和 MS 与 10676 相比在 TChl、 $P_n$ 、 $F_v/F_m$  和  $F_v/F_o$  等重要光合指标方面均具有较大差距,后期研究中应加强国外优良种质的引进与利用,通过杂交育种结合分子标记辅助选择技术,重点改良叶绿素合成与光合作用关键性状,同时配套研发高效栽培技术体系,通过整合传统育种与现代生物技术手段,全面提升国内材料的光合性能。

#### 4 结论

本研究对 21 份猫尾草种质在 4 个不同生育时期的叶绿素体色素、光合及荧光特性进行了对比。结果表明,随生育进程推进,Chl a、Chl b、Car、TChl、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $P_n$ 、 $C_i$ 、 $F_v/F_o$ 、 $F_v/F_m$ 、qP、ETR、Yield 均呈先升后降趋势,并在抽穗期达最大值; $L_s$  和 qN 均呈先降后升趋势,在抽穗期为最小值。结合主成分分析和聚类分析发现材料 10676 属第 I 类,光合能力最强,综合评分最高,且地上生物量最大,可进一步作为高光效猫尾草培育的重点材料;共筛选出  $F_v/F_o$ 、Yield、T、Chl、 $P_n$ 、Car、 $L_s$ 、ETR 和 qN 8 项指标作为高光效猫尾草筛选关键指标。

#### 参考文献 References:

- [1] Yuan H, Zhang X H, Han X Q, et al. Effects of salt and alkali stresses on biomass and physiological characteristics of four *Phleum pratense* at seedling stage. *Acta Agrestia Sinica*, 2024, 32(4): 1184—1193.  
袁惠, 张鲜花, 韩禧卿, 等. 盐、碱胁迫对 4 份梯牧草苗期生物量及生理特性的影响. *草地学报*, 2024, 32(4): 1184—1193.
- [2] Fu J S, Nan L L, Zhang Z L, et al. Evaluation of morphological characteristics and SSR genetic diversity of 21 accessions of timothy seeds. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(9): 23—33.  
傅俊士, 南丽丽, 张泽龙, 等. 21 份猫尾草种子形态特征及 SSR 遗传多样性评价. *中国草地学报*, 2024, 46(9): 23—33.
- [3] Shi S L, Cao W X, Chen Y, et al. Analysis of current situation and prospect of characteristic forage industry of timothy in China. *Grassland and Turf*, 2020, 40(5): 1—7.

- 师尚礼, 曹文侠, 陈耀, 等. 猫尾草产业发展现状与前景分析. 草原与草坪, 2020, 40(5): 1—7.
- [4] Chu H L, Ma W X, Tian X H, *et al.* Study on drought resistance of a new strain of timothy. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(11): 52—59.  
褚红丽, 马文馨, 田新会, 等. 猫尾草新品系的抗旱性研究. 中国草地学报, 2021, 43(11): 52—59.
- [5] Zhang W X, Li R Z, Tian X H, *et al.* Effects of sowing method and nitrogen fertilizing rate on production performance of timothy genotypes in alpine and humid regions of Gansu. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2024, 33(5): 910—921.  
张文轩, 李瑞珍, 田新会, 等. 甘肃高寒阴湿区播种方式和氮肥施用量对猫尾草种质生产性能的影响. 西北农业学报, 2024, 33(5): 910—921.
- [6] Yang P N, An X Z, Ma W X, *et al.* The study on the production performance and nutritional value of a new line of *Phleum pratense* in central Gansu Province. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(9): 44—51.  
杨鹏年, 安学忠, 马文馨, 等. 猫尾草新品系在甘肃省中部地区的生产性能和营养价值研究. 中国草地学报, 2021, 43(9): 44—51.
- [7] Zhang W X, Li R Z, Tian X H, *et al.* Effects of sowing method on the production performance and nutrient composition of timothy grass genotypes in alpine and shaded areas of Gansu. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(7): 15—22.  
张文轩, 李瑞珍, 田新会, 等. 甘肃高寒阴湿区播种方式对猫尾草种质生产性能和营养成分的影响. 中国草地学报, 2023, 45(7): 15—22.
- [8] Xue W, Lindner S, Nay-Htoon B, *et al.* Nutritional and developmental influences on components of rice crop light use efficiency. Agricultural & Forest Meteorology, 2016, 223: 1—16.
- [9] Zhu X G, Long P S, Ort R D. Improving photosynthetic efficiency for greater yield. Annual Review of Plant Biology, 2010, 61(1): 235—261.
- [10] Ort D R, Merchant S S, Alric J, *et al.* Redesigning photosynthesis to sustainably meet global food and bioenergy demand. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(28): 8529—8536.
- [11] Zhang Y W, Zhao X G, Guan Z B, *et al.* Difficulties and solutions to rape high photosynthetic efficiency breeding. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2018, 27(1): 1—9.  
张耀文, 赵小光, 关周博, 等. 油菜高光效育种的难点及解决策略. 西北农业学报, 2018, 27(1): 1—9.
- [12] Wang J W, Wang J L, Liu J L, *et al.* Study on photosynthetic physiological characteristics of 7 new varieties (strains) of *Leymus chinensis*. Heilongjiang Animal Science and Veterinary Medicine, 2021(8): 110—113, 118.  
王嘉雯, 王建丽, 刘杰淋, 等. 7个羊草新品种(品系)光合特性研究. 黑龙江畜牧兽医, 2021(8): 110—113, 118.
- [13] Hu S S. Compared study on photosynthesis and production performance of 15 alfalfa (*Medicago sativa*) cultivars in Nanjing. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010: 21—22.  
胡莎莎. 15个紫花苜蓿(*Medicago sativa*)品种在南京地区光合及生产性能比较. 南京: 南京农业大学, 2010: 21—22.
- [14] Wu F. The study on feeding performance and photosynthetic characteristics of 61 *Lotus corniculatus* germplasm materials from Russia. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2018: 45—46.  
吴芳. 61份俄罗斯百脉根种质材料饲用性能及光合特性研究. 兰州: 甘肃农业大学, 2018: 45—46.
- [15] Du W H, Tian X H, Cao Z Z. Hay yield and adaptability of different *Phleum pratense* varieties. Acta Prataculturae Sinica, 2004, 13(2): 56—60.  
杜文华, 田新会, 曹致中. 猫尾草不同品种的草产量和适应性评价. 草业学报, 2004, 13(2): 56—60.
- [16] Zhang R Z, Shao L H, Ma T, *et al.* Study on the regional adaptability of new variety of “Chuanxi” timothy grass. Journal of Southwest Minzu University (Natural Science Edition), 2020, 46(3): 221—228.  
张瑞珍, 邵麟惠, 马涛, 等. “川西”猫尾草新品种区域适应性研究. 西南民族大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 221—228.
- [17] Zou Q. Experimental guidance of plant physiology. Beijing: China Agricultural Publishing House, 2003: 110—174.  
邹琦. 植物生理学实验指导. 北京: 中国农业出版社, 2003: 110—174.
- [18] Sun Z R, Zhu N N, Cheng L L, *et al.* Comparison of photosynthesis and fluorescent parameters between *Dendrobium officinale* and *Dendrobium loddigesii*. International Journal of Clinical and Experimental Medicine, 2015, 8(8): 13163—13170.
- [19] Yang Z F, Tian J C, Feng K P, *et al.* Application of a hyperspectral imaging system to quantify leaf-scale chlorophyll, nitrogen and chlorophyll fluorescence parameters in grapevine. Plant Physiology and Biochemistry, 2021(1): 723—737.
- [20] Hong Z Q, Zhang Z Z, Zhou T, *et al.* Optimal potassium dosage for high fluorescence parameters and target yield of spring maize under drip fertigation. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(8): 1461—1476.

- 洪自强, 张正珍, 周甜, 等. 水肥一体化下钾肥用量对春玉米光合荧光参数的影响. 植物营养与肥料学报, 2024, 30(8): 1461–1476.
- [21] Liao H Q, Xie W G. Advanced in the mechanism of forage grass responding to low temperature stress. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(12): 99–111.  
廖浩钦, 谢文刚. 牧草应对低温胁迫机制研究进展. 中国草地学报, 2023, 45(12): 99–111.
- [22] Jiang J H, Gao P F, Ding N N, *et al.* Physio-ecological response strategies of the endangered medicinal plant *Sinopodophyllum hexandrum* (Royle) Ying to altitudes. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(20): 9342–9353.  
江金花, 高鹏斐, 丁娜娜, 等. 濒危药用植物桃儿七对海拔的生理生态响应策略. 生态学报, 2024, 44(20): 9342–9353.
- [23] Zhao F Y, Cao H X, Ma L N, *et al.* Effects of supplementary irrigation on growth, yield, and water use efficiency of millet in the Loess Plateau. Agricultural Research in the Arid Areas, 2024, 42(5): 44–53, 84.  
赵方洋, 曹红霞, 马丽娜, 等. 补充灌溉对黄土高原谷子生长、产量及水分利用效率的影响. 干旱地区农业研究, 2024, 42(5): 44–53, 84.
- [24] Yang X T, Cai J W, Ren Y J, *et al.* Physiological and metabolic stage-specific characteristics of coloration in the autumn leaves of *Acer mono* Maxim. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(11): 47–55.  
杨晓童, 蔡静雯, 任艳君, 等. 五角枫秋季叶片呈色生理及代谢阶段性特征. 东北林业大学学报, 2024, 52(11): 47–55.
- [25] Sukenik A, Beardall J, Kromkamp J C, *et al.* Photosynthetic performance of outdoor *Nannochloropsis* mass cultures under a wide range of environmental conditions. Aquatic Microbial Ecology, 2009, 56(2): 297–308.
- [26] Ren M F, Mao G L, Liu S Z, *et al.* Research progress on the effects of light quality on plant growth and development, photosynthesis, and carbon and nitrogen metabolism. Plant Physiology Journal, 2023, 59(7): 1211–1228.  
任毛飞, 毛桂玲, 刘善振, 等. 光质对植物生长发育、光合作用和碳氮代谢的影响研究进展. 植物生理学报, 2023, 59(7): 1211–1228.
- [27] Alexei S, Konstantin N. Carotenogenic response in photosynthetic organisms: a colorful story. Photosynthesis Research, 2017, 133(1/3): 31–47.
- [28] Lv C G, Li X, Zong S Y, *et al.* Analysis of the eurytopicity of super hybrid rice Liangyoupeijiu. Chinese Journal of Rice Science, 2019, 33(3): 191–205.  
吕川根, 李霞, 宗寿余, 等. 超级杂交稻两优培九的广适性分析. 中国水稻科学, 2019, 33(3): 191–205.
- [29] Zhang H, Hu H Y, Li H X, *et al.* Physiological response and transcriptome analysis of the desert steppe dominant plant *Lespedeza potaninii* to drought stress. Acta Prataculturae Sinica, 2023, 32(7): 188–205.  
张浩, 胡海英, 李惠霞, 等. 荒漠草原优势植物牛枝子对干旱胁迫的生理响应与转录组分析. 草业学报, 2023, 32(7): 188–205.
- [30] Yu H R, Guo Y, Zhu A M, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer level on non-structural carbon and nitrogen metabolite levels in oats grown in sandy desert soil. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(5): 61–72.  
于华荣, 郭园, 朱爱民, 等. 氮素水平对沙地燕麦叶片非结构性碳氮代谢的影响. 草业学报, 2018, 27(5): 61–72.
- [31] Meng S Y, Wang Q, Wei Y, *et al.* Effects of salt stress on the growth and photosynthetic production of *Euonymus hamiltonianus*. Journal of Shandong University (Natural Science), 2019, 54(7): 26–34.  
孟诗原, 王倩, 韦业, 等. 盐胁迫对西南卫矛生长及光合特性的影响. 山东大学学报(理学版), 2019, 54(7): 26–34.
- [32] Zhao P T, Gao S X, Zhao X G, *et al.* Comparison of photosynthetic characteristics of different wheat evolution materials at late growth stage and their response to environmental factors. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39(3): 299–307.  
赵鹏涛, 苟升学, 赵小光, 等. 不同小麦进化材料生育后期的光合特性及其对环境因子响应的比较. 麦类作物学报, 2019, 39(3): 299–307.
- [33] Peng Y Y, Yan H H, Guo L C, *et al.* Evaluation and selection on drought-resistance of germplasm resources of *Avena* species with different types of ploidy. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(9): 2478–2491.  
彭远英, 颜红海, 郭来春, 等. 燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选. 生态学报, 2011, 31(9): 2478–2491.
- [34] Wang W, Zhao H, Huang X, *et al.* Relationship between leaf hydraulic and economic traits and biomass of poplar clones. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(10): 89–98.  
王薇, 赵涵, 黄欣, 等. 白杨无性系叶片水力及经济性状与生物量的关系. 林业科学, 2023, 59(10): 89–98.
- [35] Kalaji H M, Jajoo A, Ouakroum A, *et al.* Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. Acta Physiologiae Plantarum, 2016, 38(4): 1–11.
- [36] Tao Y, Xu Y N, Ye C, *et al.* Research progress on correlation of rice leaf senescence and discoloration with nitrogen reuse and

volatilization. Chinese Journal of Rice Science, 2023, 37(6): 553—562.

陶怡, 徐亚楠, 叶昌, 等. 水稻叶片衰老转色与氮循环利用及挥发关系的研究进展. 中国水稻科学, 2023, 37(6): 553—562.

- [37] Wei X D, Zhang Y D, Song X M, *et al.* Photosynthetic physiological characteristics of high yield super rice variety Nanjing 5718. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(11): 2879—2890.  
魏晓东, 张亚东, 宋雪梅, 等. 超级稻品种南粳5718高产的光合生理特性研究. 作物学报, 2022, 48(11): 2879—2890.
- [38] Yang W Q, Lin R C, Duanmu D Q, *et al.* Multiple of important progress on photosynthesis in the last 10 years. Plant Physiology Journal, 2024, 60(2): 211—247.  
杨文强, 林荣呈, 端木德强, 等. 近10年光合作用领域若干重要研究进展. 植物生理学报, 2024, 60(2): 211—247.
- [39] Wei X W, Pan X Y, Wang P F, *et al.* Responses of chlorophyll fluorescence of alfalfa with various phosphorus utilization efficiencies to phosphorus deficiency. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(4): 690—703.  
卫先伟, 潘新雅, 王鹏飞, 等. 不同磷效率紫花苜蓿叶绿素荧光参数对低磷胁迫的响应. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(4): 690—703.
- [40] Li Y Y, Zhang Z W, Huang W, *et al.* Leaf structure and chlorophyll fluorescence of *Lantana camara*. Journal of Biology, 2022, 39(2): 29—33.  
李焰焰, 张紫薇, 黄薇, 等. 马缨丹光合色素及叶绿素荧光参数分析. 生物学杂志, 2022, 39(2): 29—33.
- [41] Hong K, Li M, Xu S S, *et al.* Effect of elevated CO<sub>2</sub> on growth, photosynthetic characteristics and nutrient concentration of *Cunninghamia lanceolata* seedlings. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2020, 40(6): 1011—1021.  
洪凯, 李茂, 许珊珊, 等. CO<sub>2</sub>浓度升高对杉木幼苗生长及其光合特性和养分含量的影响. 西北植物学报, 2020, 40(6): 1011—1021.
- [42] Cai J H, Xue L. Advances on photosynthesis characteristics of alpine plants. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(1): 245—254.  
蔡金桓, 薛立. 高山植物的光合生理特性研究进展. 生态学杂志, 2018, 37(1): 245—254.
- [43] He Y T, Hu Y, Duan H R, *et al.* Comprehensive evaluation of drought resistance of four *Elymus* varieties at seedling stage. Chinese Journal of Grassland, 2023, 45(1): 77—87.  
何永涛, 胡宇, 段慧荣, 等. 披碱草属4个牧草品种苗期抗旱性综合评价. 中国草地学报, 2023, 45(1): 77—87.