

DOI: 10.11686/cyxb2024501

http://cyxb.magtech.com.cn

孙诗炫, 王群森, 杨志民, 等. 自主选育苇状羊茅新品种耐热及热后恢复能力评价. 草业学报, 2025, 34(11): 184-194.

SUN Shi-xuan, WANG Qun-sen, YANG Zhi-min, *et al.* Evaluation of heat tolerance and post-heat recovery capacity of new varieties of tall fescue. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(11): 184-194.

自主选育苇状羊茅新品种耐热及热后恢复能力评价

孙诗炫¹, 王群森¹, 杨志民¹, 范宁丽¹, 郝田¹, 刘南清², 于景金^{1*}

(1. 南京农业大学草业学院, 江苏 南京 210014; 2. 江苏农林职业技术学院风景园林学院, 江苏 句容 212400)

摘要:选育能够耐受夏季高温高湿的苇状羊茅是气候过渡带地区延长牧草青绿期、满足草牧业可持续发展的重要途径之一。本研究以前期通过杂交育种自主培育的3份多分蘖牧草型苇状羊茅新品种“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”为试验材料,以生产上广泛使用的商业品种飞度(Fit)为对照,利用人工气候室开展环境因素控制试验模拟热胁迫,探究热胁迫(38 °C/33 °C, 日/夜)及热后恢复条件下各份材料的生理、生长及营养成分的变化。结果表明,热胁迫使4份材料的电解质渗漏率(EL)上升,叶片相对含水量(RWC)、叶绿素含量(Chl)、净光合速率(P_n)下降,但3个新品种相比于对照品种均显著抑制了EL的上升及RWC、Chl和 P_n 的下降,说明新品种的耐热能力优于对照品种,且同时具有较好的热后恢复能力。在产量和品质方面,3个新品种的分蘖多、叶量丰富、茎叶比低、适口性好、粗蛋白含量高、品质佳,其中“南牧2号”品质最优。综上可知,3个新品种均是耐热、分蘖多、叶量丰富的高产优质牧草,能够在江苏等气候过渡带地区种植栽培。

关键词: 苇状羊茅; 热胁迫; 生理指标; 营养成分; 生长性状

Evaluation of heat tolerance and post-heat recovery capacity of new varieties of tall fescue

SUN Shi-xuan¹, WANG Qun-sen¹, YANG Zhi-min¹, FAN Ning-li¹, HAO Tian¹, LIU Nan-qing², YU Jing-jin^{1*}

1. College of Agro-grassland Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China; 2. Department of Landscape Architecture, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, China

Abstract: Breeding tall fescue (*Festuca arundinacea*) with summer high temperature- and humidity-tolerance is one of the available strategies for extending the growing season of forage grasses and meeting requirements for the sustainable development of grassland-based animal husbandry in climate transition zones of China. In this study, three new strongly-tillering forage-type tall fescue varieties, Nanmu NO. 1, Nanmu NO. 2, and Nanmu NO. 3 independently developed through cross-breeding, were evaluated, and compared with the widely used commercial variety, Fit, as the control. Experiments were conducted in an artificial climate chamber to simulate heat stress and investigate the changes in physiological, growth and nutritional traits of each variety under environmental heat stress (38 °C/33 °C, day/night) and post-heat recovery conditions. The results indicated that heat stress led to an increase in electrolyte leakage (EL) and a decrease in relative leaf water content (RWC), chlorophyll (Chl) content, and net photosynthetic rate (P_n) for all varieties. However, compared with Fit, the three new varieties displayed significantly reduced EL and a smaller decrease in RWC, Chl, and P_n , indicating that the new varieties had superior

收稿日期: 2024-12-23; 改回日期: 2025-03-10

基金项目: 长三角地区四季常绿草新品种选育项目(ZA32303)和江苏省优良抗逆生态修复草坪草种质创新及应用[JBGS(2021)096]项目资助。

作者简介: 孙诗炫(2001-), 男, 黑龙江大兴安岭人, 在读硕士。E-mail: 1471038572@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: jingjin_yu@126.com

heat tolerance and post-heat recovery ability than Fit. The three new varieties were characterized by high tiller and leaf numbers, low stem:leaf ratio, good palatability, high crude protein content, and excellent quality. Among the tested varieties, Nanmu NO. 2 was the best. In conclusion, the three new varieties evaluated were all found to be heat-tolerant, high-yielding, high-quality forage grasses characterized by a strong tillering capacity and leaf production. They are suitable for sowing in climatic transition zones such as Jiangsu and other similar regions.

Key words: tall fescue; heat stress; physiological indicators; nutrient composition; growth trait

江苏省位于亚洲大陆东岸中纬度地带,处于亚热带和暖温带的气候过渡地带,其兼具南北方气候特征^[1]。这种南北交融的气候过渡地区既可以种植暖季型草,也可种植冷季型草,但由于冬冷夏热的特殊气候条件,冷季型草存在越夏困难、易感病的问题^[2],且在该地区缺少耐性强、产量高、品质好的冷季型牧草新品种的引种或培育工作^[3]。因此,选育耐高温高湿的冷季型牧草新品种是满足牧草产业可持续发展的关键措施之一。

苇状羊茅(*Festuca arundinacea*),曾用名高羊茅,是禾本科羊茅属多年生冷季型牧草,在全球温带地区广泛种植^[4],其在我国气候过渡带地区虽能越夏,但表现不佳^[5]。我国苇状羊茅的种质资源丰富,但育种工作起步较晚,主要以种质资源的收集、评价和引种驯化为主^[6]。1995年,我国首次开展牧草型苇状羊茅的引种试验^[7]。1998年,南京农业大学通过羊茅属与黑麦草属(*Lolium*)远缘杂交,育成了“南农1号”羊茅黑麦草,开创了我国苇状羊茅育种的先河^[8]。随后吴佳海等^[9]采用改良混合选择法,利用在贵州收集的野生苇状羊茅种质资源,育成了“黔草1号”“黔草2号”“水城”“黔草5号”4个新品种。牧草育种以高产和优质为主要目标,其中,“黔草2号”产草量比商业品种法恩(Fawn)增加了53.38%~60.21%,具有非常高的牧草生产能力。对于牧草品质主要关注其营养成分的高低^[10]。通过对南方常见饲用植物的营养成分分析发现,苇状羊茅的粗蛋白和粗脂肪含量较高^[11],具有较好的饲用价值。然而,在我国以品质为目标的苇状羊茅育种研究很少,特别是针对我国特殊的气候过渡带地区开展苇状羊茅新品种选育方面的研究更少。

本研究以课题组前期通过杂交育种获得的牧草型苇状羊茅新品种为试验材料,利用人工气候室开展环境因素控制试验模拟热胁迫,研究热胁迫及热后恢复条件下苇状羊茅新品种的生理、生长和营养品质等指标的变化,为我国气候过渡带地区牧草型苇状羊茅新品种栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试材料为前期通过杂交育种获得的综合性状表现优异的3份多分蘖牧草型苇状羊茅(“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”),并选用1份市场上广泛应用的商业品种飞度(Fit)为对照。

1.2 试验设计

“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”为自主选育的牧草型苇状羊茅新品种,2023年6月1日将3个品种和对照品种飞度播种于塑料花盆中(上口口径10.0 cm,下底径7.5 cm,高8.5 cm),花盆种植基质为沙壤土和有机质混合物(1:1)。每盆为1个生物学重复,每个处理5个重复,种子出苗前做好保湿。在材料培养阶段,每周浇透水2~3次,每隔7 d进行一次施肥并修剪至同一高度。待材料培养至均匀一致后转入人工气候室进行7 d的预适应,温度为25℃/20℃(日/夜),光周期设置为14 h,相对湿度为60%,光照强度大约800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。预适应结束后,将材料统一修剪至10 cm高,分别移至不同气候室进行不同温度处理。其中,对照温度设置为25℃/20℃(日/夜),热胁迫处理温度设置为38℃/33℃(日/夜),光周期为14 h,相对湿度为60%,处理周期为35 d。热胁迫处理结束后,将处于热胁迫条件下的材料转入对照温度的气候室,进行热后恢复处理,处理时间为9 d。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 生理指标 分别在第0、7、14、21、28、35天,采用Yu等^[12-14]等方法测定电解质渗漏率(electrolyte

leakage, EL)、叶片相对含水量(relative leaf water content, RWC)、净光合速率(net photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(stomatal conductance, G_s)、蒸腾速率(transpiration rate, T_r)、叶绿素含量(chlorophyll, Chl)等指标。

电解质渗漏率:使用雷磁 DDS-307A 电导率仪(中国)测定苇状羊茅材料的电解质渗漏率。剪取约 0.2 g 第二片完全展开叶,用吸水纸包好放入盛有 30 mL 双蒸水的 50 mL 离心管中。将离心管置于 200 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 转速的摇床中振荡 24 h,测定初始电导率(C_1)。测定结束后将样品置于 120 $^{\circ}\text{C}$ 灭菌,之后置于 25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温摇床中 200 $r \cdot \text{min}^{-1}$ 振荡 24 h,测定最终电导率(C_2)。通过下列公式计算电解质渗漏率: $\text{EL}(\%) = C_1/C_2 \times 100$ 。

叶片相对含水量:剪取约 0.35 g 叶片,立即称量鲜重(fresh weight, FW),用吸水纸包好,将叶片浸入装有蒸馏水的 50 mL 离心管中。24 h 后取出叶片轻轻擦干表面水分,称取饱和持水重(turgid weight, TW)。随后将叶片装入信封烘干 72 h,称取其干重(dry weight, DW)。叶片相对含水量的计算公式为: $\text{RWC}(\%) = (\text{FW} - \text{DW}) / (\text{TW} - \text{DW}) \times 100$ 。

气体交换参数:气体交换参数包括净光合速率 P_n 、气孔导度 G_s 和蒸腾速率 T_r ,使用 Licor-6400 光合仪(美国)测定。测定时选取完全展开的健康叶片,测量叶面积后,将叶片夹在内置红蓝光源的 6 cm^2 叶室中,光强设置为 500 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,叶温设置为处理温度。

叶绿素含量:剪取约 0.2 g 苇状羊茅叶片,放入装有 5 mL 二甲基亚砷的离心管中,置于室温黑暗处进行叶片脱色。待叶片完全脱色呈透明状时,吸取 2 mL 提取液,以二甲基亚砷为对照调零,使用紫外分光光度计(Ultrospec 2100 pro,英国)分别在 663 和 645 nm 下测定吸光度。测定完吸光度后将叶片烘干,称取干重(DW)。利用以下公式计算叶绿素含量:

$$\text{叶绿素 a 的含量}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}) = \text{叶绿素 a 的浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数} / \text{干重} \times 1/1000$$

$$\text{叶绿素 b 的含量}(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \text{ DW}) = \text{叶绿素 b 的浓度} \times \text{提取液体积} \times \text{稀释倍数} / \text{干重} \times 1/1000$$

$$\text{叶绿素含量} = \text{叶绿素 a 的含量} + \text{叶绿素 b 的含量}$$

1.3.2 生长性状 茎叶比:根据《草品种审定技术规程》GB/T30395—2013^[15],每盆材料混合取样约 2 g,将茎与叶分开,置于 65 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱烘干后,分别称量茎与叶的重量,其百分比值即为茎叶比。生物量:在热胁迫处理至第 35 天时,剪取每盆全部材料地上部分的 1/2 植株,立即测定其鲜重。该鲜重值乘以 2,即为该重复的地上生物量。未剪掉的 1/2 植株,移入对照气候室观察其热胁迫后的恢复情况。分蘖数:热胁迫处理结束后,在每个花盆内随机选取 5 株植株,统计其分蘖个数。最后取其平均值作为每个重复的分蘖数。生长速率根据平均冠层高度差计算,用直尺测量冠层顶端到株基部的垂直距离,记录每次测量的日期和高度差,通过计算株高的日均增加量衡量生长速率^[12]。

1.3.3 营养成分 每盆取鲜样(2 g),在 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干,将烘干后的样品粉碎后过 0.425 mm 筛,参照《饲料分析及饲料质量检测技术》^[16],测定样品的粗蛋白(crude protein, CP)、粗纤维(crude fiber, CF)、粗脂肪(crude fat, EE)、粗灰分(crude ash, Ash)、酸性洗涤纤维(acid detergent fiber, ADF)和中性洗涤纤维(neutral detergent fiber, NDF)等成分含量。

1.4 数据统计与分析

使用 Excel 2019 软件整理试验数据,SPSS 23.0 软件对所测数据进行统计分析,采用 ANOVA 方法分析不同品种及处理间的差异显著性($P < 0.05$)。用 Duncan 多重比较法对不同品种及处理的各参数进行多重比较,明确差异的显著性($P < 0.05$),并利用 Sigmaplot 14.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 热胁迫及热后恢复对苇状羊茅新品种生理指标的影响

2.1.1 电解质渗漏率和叶片相对含水量 对照温度下,3 个新品种和对照品种的 EL 无显著差异($P > 0.05$) (图 1a)。热胁迫处理后,4 份材料的 EL 均不断上升。热胁迫至第 14 天时,各品系的 EL 均显著高于自身对照;第 21、28 天,飞度的 EL 显著高于 3 个新品种,“南牧 1 号”“南牧 3 号”的 EL 显著高于“南牧 2 号”($P < 0.05$);第 35 天时,“南牧 1 号”“南牧 2 号”和“南牧 3 号”与飞度相比降低 28.88%、37.50%、17.70%。热后恢复至第 9 天时,“南

牧1号”的EL已恢复至对照水平,“南牧2号”和“南牧3号”的EL比对照水平分别高28.95%、34.99%,而飞度的EL比对照水平高51.12%(图1a)。

对照温度下,各份材料在试验处理期间的RWC无显著差异($P>0.05$)(图1b)。热胁迫处理下,4份材料的RWC均呈下降趋势,在热胁迫的第7天,飞度的RWC显著低于自身对照和3个新品种,而3个新品种的RWC在热胁迫14 d时才显著低于各自对照。热胁迫至35 d时,“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”的RWC均显著高于对照品种15.69%、25.38%、8.39%。3个新品种之间RWC出现差异,“南牧2号”的RWC最高,其次是“南牧1号”,“南牧3号”最低。热后恢复3 d后,4份材料的RWC迅速回升,“南牧1号”与“南牧2号”无显著差异,且二者显著高于“南牧3号”和飞度,“南牧3号”的RWC又显著高于飞度。热后恢复至第9天时,3个新品种均已完全恢复至各自的对照水平,但飞度仅恢复至对照水平的85.00%(图1b)。

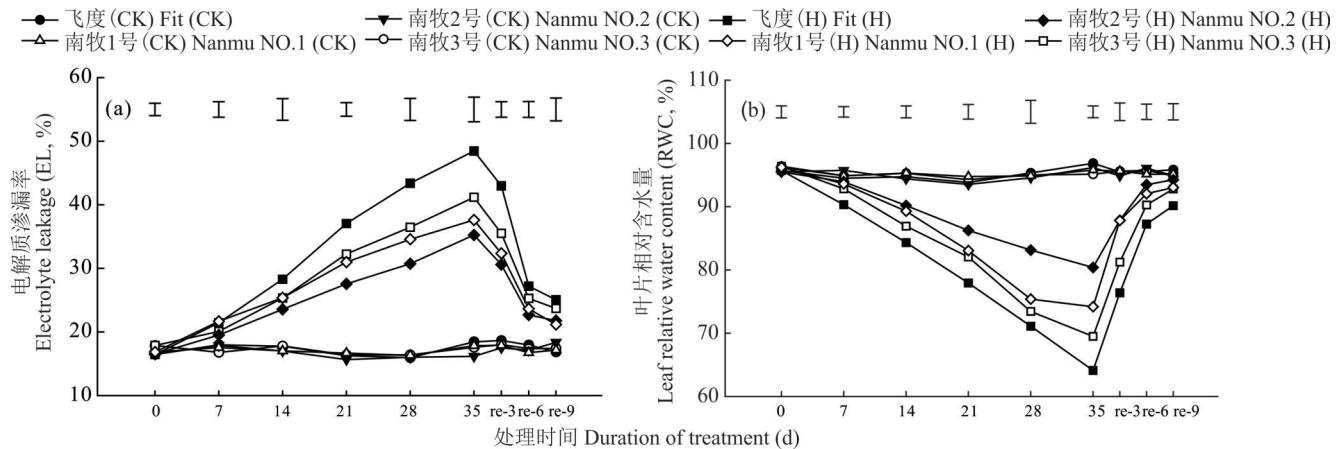


图1 热胁迫及热后恢复对苇状羊茅电解质渗漏率和相对含水量的影响

Fig. 1 Effects of heat stress and post-heat recovery on electrolyte leakage and leaf relative water content in tall fescue

飞度(CK)、南牧1号(CK)、南牧2号(CK)、南牧3号(CK)表示对照温度组(25℃/20℃),飞度(H)、南牧1号(H)、南牧2号(H)、南牧3号(H)表示热胁迫处理组(38℃/33℃),re-3、re-6、re-9表示热后恢复天数,竖线代表不同处理间的最小差异($P<0.05$),下同。Fit(CK), Nanmu NO.1(CK), Nanmu NO.2(CK), and Nanmu NO.3(CK) represent the control groups (25℃/20℃); Fit(H), Nanmu NO.1(H), Nanmu NO.2(H), and Nanmu NO.3(H) represent the treated groups (38℃/33℃); re-3, re-6 and re-9 indicate 3, 6, and 9 days of post-heat recovery, respectively. Vertical bars means the least significant difference (LSD) among treatments ($P<0.05$), the same below.

2.1.2 净光合速率、气孔导度、蒸腾速率和叶绿素含量 对照温度下4份材料的各项光合指标无显著差异($P>0.05$)。热胁迫处理下,4份材料的 P_n 均呈下降趋势(图2a)。胁迫第14~35天,对照品种的 P_n 显著低于“南牧1号”和“南牧2号”($P<0.05$),35 d时飞度的 P_n 与“南牧1号”“南牧2号”相比分别降低31.69%、56.17%，“南牧1号”和“南牧2号”之间无显著差异,“南牧2号”显著高于“南牧3号”。热后恢复至第9天时,“南牧2号”已恢复至对照水平,飞度仅恢复至对照水平的75.12%,3个新品种均显著高于飞度(图2a)。

热胁迫处理下,4份材料的 G_s 均随胁迫时间的延长呈下降趋势。热胁迫第28~35天,飞度的 G_s 显著低于“南牧2号”($P<0.05$)。热后恢复过程中,4份材料的 G_s 逐渐变大,恢复至第9天时,3个新品种均恢复至对照水平,飞度仅恢复至对照的82.56%(图2b)。

热胁迫处理下,飞度和“南牧3号”的 T_r 在胁迫21 d时显著下降,“南牧1号”的 T_r 从胁迫28 d开始下降,而“南牧2号”的 T_r 则在胁迫35 d时才显著低于对照温度;胁迫35 d时,“南牧1号”和“南牧2号”的 T_r 显著高于飞度和“南牧3号”。热后恢复至第9天时,“南牧2号”的 T_r 恢复至自身对照水平(图2c)。

热胁迫处理下,4份材料的Chl含量均降低(图2d)。热胁迫的第7、14、21、35天,飞度的Chl均显著低于3个新品种($P<0.05$),胁迫处理至第35天时,飞度的Chl含量与“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”相比分别降低73.98%、92.44%、37.04%，“南牧1号”和“南牧2号”间无显著差异,“南牧3号”的Chl含量显著低于“南牧1号”

和“南牧2号”。新品种“南牧1号”和“南牧2号”的热后恢复速度始终快于飞度,至第6天时“南牧1号”和“南牧2号”已经恢复至对照水平,而飞度仅恢复至对照水平的69.23%;恢复至第9天时,3个新品种的Chl含量均显著高于飞度($P<0.05$)(图2d)。

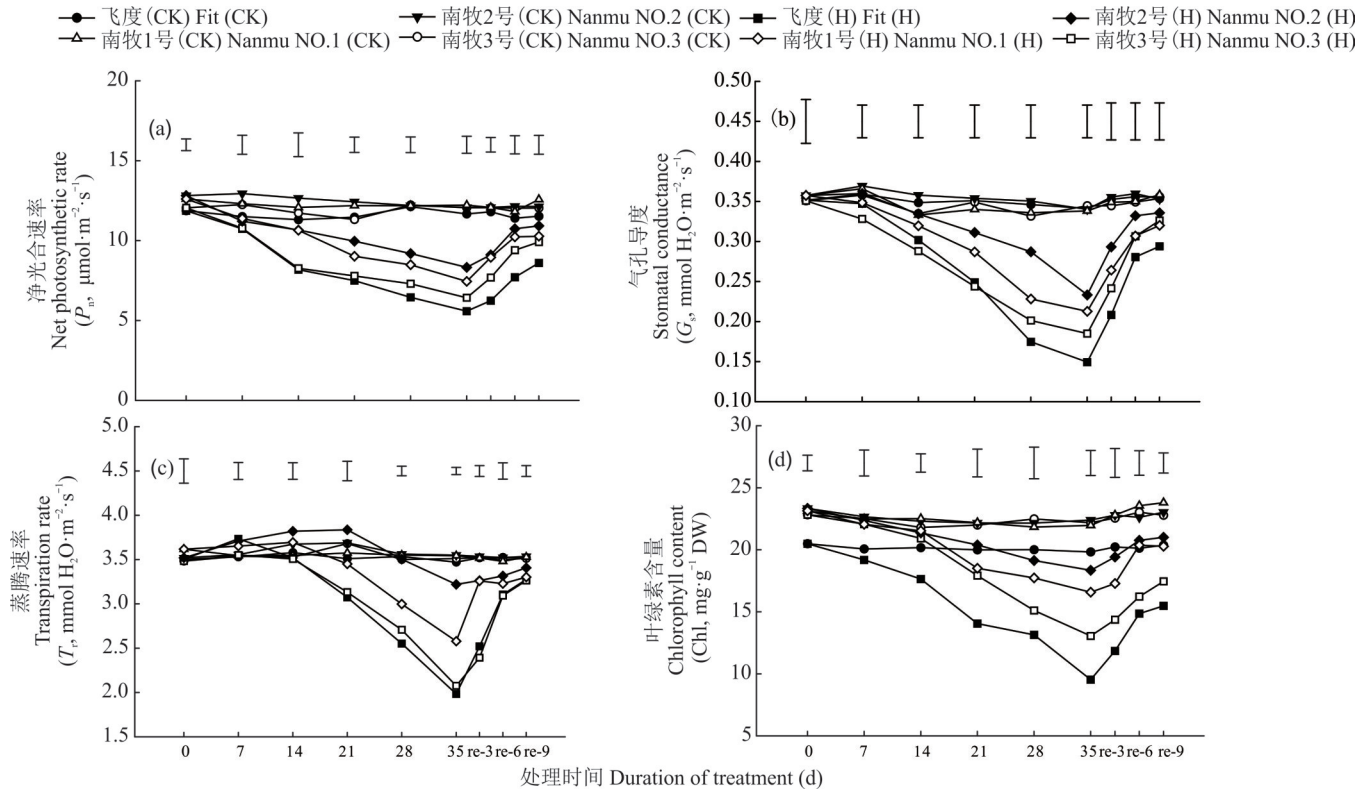


图2 热胁迫及热后恢复对茅状羊茅光合指标的影响

Fig. 2 Effects of heat stress and post-heat recovery on photosynthetic indices in tall fescue

2.2 热胁迫及热后恢复对茅状羊茅新品种生长的影响

在对照温度下,飞度的生长速率在试验处理期间均显著高于“南牧3号”,第21天时,飞度的生长速率显著高于“南牧1号”和“南牧2号”(图3a)。热胁迫使飞度的生长速率迅速下降,处理至第14天时,飞度的生长速率比自身对照下降了54.17%。热胁迫至第35天时,4份材料的生长速率均降至最低。其中,飞度的生长速率显著低于“南牧2号”($P<0.05$),与“南牧2号”相比降低86.84%,3个新品种间无显著差异。热后恢复使4份材料的生长速率迅速回升,3d后“南牧2号”和“南牧3号”的生长速率显著高于“南牧1号”和飞度。热后恢复至第9天时,新品种“南牧2号”“南牧3号”均可恢复至各自的对照水平,“南牧1号”恢复至对照的68.69%,而飞度仅恢复至对照水平的43.14%(图3a)。

对照温度下,3个新品种的地上生物量均显著高于飞度,且“南牧1号”“南牧2号”显著高于“南牧3号”($P<0.05$)(图3b)。热胁迫处理35d后,3个新品种“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”的地上生物量也显著高于对照品种($P<0.05$),分别比飞度高67.26%、84.15%、50.51%。“南牧2号”的地上生物量显著高于“南牧3号”,但与“南牧1号”之间无显著差异($P>0.05$,图3b)。

对照温度下,对照品种的茎叶比显著高于新品种“南牧1号”和“南牧2号”($P<0.05$),“南牧3号”显著高于“南牧2号”(图3c)。热胁迫处理35d后,3个新品种“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”的茎叶比均显著低于飞度($P<0.05$),与飞度相比分别降低17.12%、24.05%、6.23%,新品种之间茎叶比有显著差异,其大小排序依次为“南牧3号”“南牧1号”“南牧2号”(图3c)。

对照温度下,3个新品种的分蘖数均显著高于对照品种($P<0.05$),分别比对照高116.00%、142.37%和

61.37%。3 个新品种之间“南牧 2 号”分蘖数最多,其次是“南牧 1 号”,“南牧 3 号”分蘖数最少。热胁迫处理后,3 个新品种的分蘖数均显著高于对照品种飞度,且“南牧 2 号”>“南牧 1 号”>“南牧 3 号”,3 个新品种的分蘖数与飞度相比分别高 124.42%、95.85%、58.60%(图 3d)。

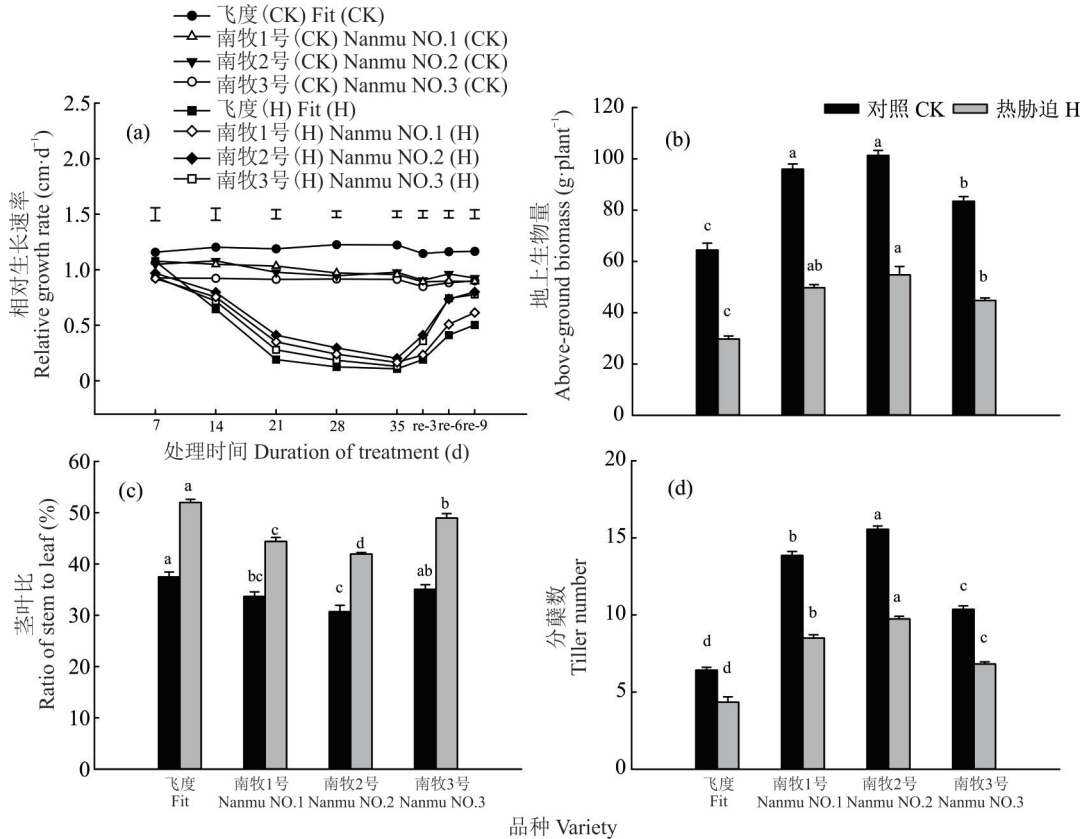


图 3 热胁迫及热后恢复对苇状羊茅生长的影响

Fig. 3 Effects of heat stress and post-heat recovery on plant growth in tall fescue

不同小写字母代表不同品种间差异显著($P < 0.05$),下同。Different lowercase letters indicate significant differences among different varieties ($P < 0.05$). The same below.

2.3 热胁迫对苇状羊茅新品种营养成分的影响

无论在对照温度还是热胁迫条件下,3 个新品种的粗蛋白含量均显著高于飞度($P < 0.05$),且 3 个新品种之间无显著差异。在正常温度下,3 个新品种的粗蛋白含量均显著高于飞度。热胁迫处理 35 d 后,新品种“南牧 1 号”“南牧 2 号”“南牧 3 号”的粗蛋白含量比飞度分别显著提高 29.50%、35.39%、21.60%(图 4a)。

如图 4b 所示,对照温度下飞度的粗纤维含量显著高于“南牧 2 号”($P < 0.05$),3 个新品种之间无显著差异。热胁迫处理 35 d 后,“南牧 1 号”和“南牧 2 号”的粗纤维含量较对照品种飞度相比分别显著降低 15.33%、19.80%。如图 4c 所示,对照温度及热胁迫下飞度和“南牧 3 号”的酸性洗涤纤维含量显著高于“南牧 1 号”和“南牧 2 号”($P < 0.05$),“南牧 1 号”和“南牧 2 号”之间没有显著差异。热胁迫处理第 35 天,“南牧 1 号”和“南牧 2 号”的酸性洗涤纤维含量与飞度相比分别降低 15.53%、21.22%,二者之间无显著差异。如图 4d 所示,对照温度下,飞度和“南牧 3 号”的中性洗涤纤维含量显著高于“南牧 2 号”($P < 0.05$),与“南牧 1 号”无显著差异。热胁迫处理第 35 天,“南牧 1 号”和“南牧 2 号”的中性洗涤纤维含量显著低于飞度和“南牧 3 号”,与飞度相比分别降低 9.40%、8.87%。

如图 4e 所示,对照温度下“南牧 2 号”和“南牧 3 号”的粗脂肪含量显著高于对照品种($P < 0.05$),3 个新品种之间无显著差异。热胁迫处理第 35 天,“南牧 3 号”的粗脂肪含量较对照品种显著提高 13.24%($P < 0.05$),但与“南

牧1号”和“南牧2号”无显著差异,“南牧1号”和“南牧2号”的粗脂肪含量与对照飞度也无显著差异。

对照温度下“南牧2号”的粗灰分含量显著低于对照品种($P<0.05$),与飞度相比降低18.50%,“南牧1号”“南牧2号”和“南牧3号”之间没有显著差异。热胁迫处理第35天,飞度的粗灰分含量与新品种“南牧1号”和“南牧2号”相比分别显著提高了13.75%、14.66%($P<0.05$),3个新品种之间无显著差异(图4f)。

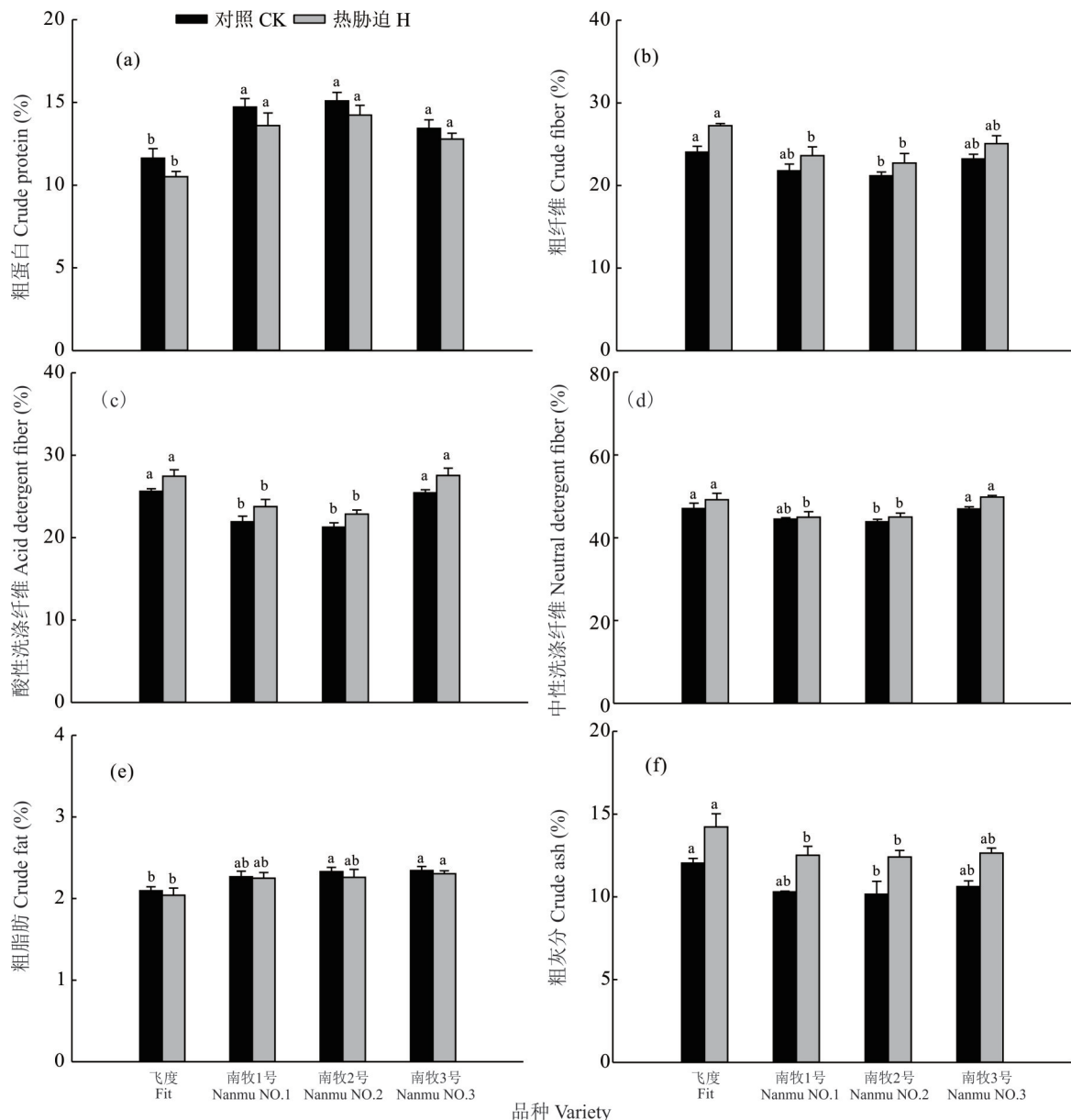


图4 热胁迫对苇状羊茅营养指标的影响

Fig. 4 Effects of heat stress on nutritional indicators in tall fescue

3 讨论

3.1 热胁迫及热后恢复对苇状羊茅新品种的生理影响

通过比较热胁迫下不同材料的EL,即可比较植物耐受热胁迫能力的强弱。热胁迫能够引起植物电解质外渗,受到胁迫的程度越重,EL也会越大^[17]。本试验中4份材料的EL在受到热胁迫后均上升,说明热胁迫破坏了4份材料的细胞膜结构,导致细胞内部分电解质外渗,这是苇状羊茅受到高温胁迫后的一般表现^[18]。然而,植物细胞膜受伤害程度一方面与植物遭受逆境胁迫强度有关,另一方面也与植物抵抗胁迫能力有关^[19]。本研究发现,新

品种在热胁迫下的EL显著低于对照飞度,说明3个新品种具有更强的维持膜系统相对稳定和膜结构完整的能力,这种现象在匍匐剪股颖(*Agrostis stolonifera*)^[20]、冬萝卜(*Raphanus sativus*)^[21]和茄子(*Solanum melongena*)^[22]中均有报道。植物叶片水分含量是植物受到胁迫时反映其保水能力的指标之一^[23],在高温胁迫下,抗热性较弱的水稻(*Oryza sativa*)品种的RWC比抗热性较强的品种下降幅度更大^[24]。本试验中高温胁迫引起飞度和3个新品种RWC显著下降,但3个新品种的RWC除第28天外均显著高于飞度。热后恢复9d后,3个新品种均可恢复至各自对照水平,但飞度仅恢复至对照水平的85.00%。以上结果说明3个新品种相比于对照品种飞度具有更强的耐热和热后恢复能力。

光合作用是植物体内最主要的能量来源,抑制光合作用的因素分为气孔和非气孔两种^[25]。气孔抑制的具体表现是植物 G_s 下降^[20],进而引起 P_n 下降;非气孔限制因素很多,包括光损伤、氧化伤害等各种非生物和生物因素引起的光反应过程减弱,光合效率下降^[26]。通常情况下,耐逆性强的材料可以通过维持较高的蒸腾保证光合作用正常进行,从而保持正常的植物生理功能^[20,27]。本试验中,胁迫初期4份苇状羊茅叶片的 G_s 均下降,因而可以推测此阶段气孔限制是引起 P_n 下降的主要原因,且该阶段的 T_r 由于高温引起的叶内外蒸汽压差增大而迅速升高^[28]。热胁迫后期,由于叶片过量失水,加之 G_s 的持续下降,其 T_r 开始迅速降低,说明热胁迫后期非气孔限制是导致 P_n 下降的主要原因。但无论是在热胁迫前期还是后期,3个新品种相比飞度均能维持较高的 G_s 。此外,由于Chl能够指征植物光合能力^[29],在本试验中4份材料的Chl含量变化与 P_n 的变化相吻合,说明3个新品种在热胁迫下的光合能力高于对照品种飞度。

3.2 热胁迫及热后恢复对苇状羊茅新品种的生长影响

单位面积的草产量可以代表该种牧草的生产能力,茎叶比代表牧草各部分所占比例,茎叶比越小,叶量越多,牧草的产量越高,品质越好,适口性也越佳^[30]。本试验中,在正常温度下“南牧1号”“南牧2号”的茎叶比显著低于对照品种飞度,生物量显著高于飞度;在热胁迫下,3个新品种的茎叶比均低于飞度,生物量仍显著高于飞度,说明无论在正常条件还是高温胁迫条件下,3个新品种均可作为高产牧草推广利用。对于苇状羊茅来说,分蘖数越多也说明其叶量越丰富,适口性越好,品质越优,由此说明3个新品种的品质优于飞度。

从相对生长速率可以看出,在正常温度下,虽然新品种的生长速率比对照飞度低,但由于其分蘖数远高于飞度,所以最终的生物量显著高于飞度。在热胁迫条件下,3个新品种生长速率大幅下降,但“南牧2号”仍显著高于自身对照,且经过9d的热后恢复,飞度只恢复到对照的43.14%,自主培育的新品种最低也恢复到了对照的68.69%“南牧1号”。由此可以看出,3个新品种的生产能力优于对照品种飞度。

3.3 热胁迫对苇状羊茅新品种营养品质的影响

逆境胁迫使牧草生长态势减弱、产量降低、品质劣化^[31]。短期高温能够灼伤叶片,长期高温则使牧草自身的蛋白质变性,影响牧草的饲用品质^[32]。本研究发现无论在正常温度还是热胁迫环境下,3个新品种的粗蛋白含量均显著高于对照品种飞度。由于Chl含量与氮含量密切相关^[33],3份新品种具有较高的Chl含量,间接说明新品种含氮量较高,而含氮量与粗蛋白直接相关^[34],这与粗蛋白测定结果吻合。

牧草纤维含量是评价牧草饲喂性能的最基础指标^[35],而较高的粗脂肪含量意味着牧草能够为动物提供更多的能量和营养^[36]。本研究发现,3个新品种中“南牧2号”的粗纤维、酸性和中性洗涤纤维均显著低于飞度,在热胁迫条件下,“南牧1号”“南牧2号”的粗纤维含量显著低于飞度,但3个新品种之间的粗纤维含量没有显著差异。在对照温度下“南牧2号”和“南牧3号”的粗脂肪含量显著高于飞度,在热胁迫条件下,“南牧3号”的粗脂肪含量依旧显著高于飞度,且无论在对照温度还是在热胁迫条件下,“南牧1号”的粗蛋白含量与“南牧2号”和“南牧3号”均无显著差异。以上结果说明3个新品种均是品质优于对照品种飞度的禾本科牧草,其中以“南牧2号”最佳。

4 结论

本研究结果表明,3个新品种“南牧1号”“南牧2号”“南牧3号”比对照品种飞度具有更好的耐热和热后恢复

能力、生产能力和营养价值,是耐热、分蘖多、叶量丰富的高产优质牧草,既能在淮河以北种植,也能够较好地适应江苏等气候过渡带地区。

参考文献 References:

- [1] Li S S, Lu J Y, Yan J P, *et al.* Spatiotemporal variability of temperature in northern and southern Qinling Mountains and its influence on climatic boundary. *Acta Geographica Sinica*, 2018, 73(1): 13–24.
李双双, 芦佳玉, 延军平, 等. 1970—2015年秦岭南北气温时空变化及其气候分界意义. *地理学报*, 2018, 73(1): 13–24.
- [2] Liu D L, Wang X P, Hu K Q, *et al.* Adaptability evaluation of cool-season turf grasses in Yangzhou. *Acta Agrestia Sinica*, 2012, 20(5): 967–971.
刘大林, 王秀萍, 胡楷崎, 等. 15种冷季型草坪草在扬州地区的适应性评价. *草地学报*, 2012, 20(5): 967–971.
- [3] Ye Z W, Ji X, Liu Y X. Temporal change of air temperature in a typical north-south transitional climatic zone—a case study in Huaihe river basin. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(3): 122–131.
叶正伟, 纪旭, 刘育秀. 典型南北气候过渡带地区气温的时间变化特征—以淮河流域为例. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(3): 122–131.
- [4] Young C A, Hume D E, Mcculley R L. Forages and pastures symposium: Fungal endophytes of tall fescue and perennial ryegrass: pasture friend or foe? *Journal of Animal Science*, 2013, 91(5): 2379–2394.
- [5] Xie X H, Ma Z J. Research on adaptability of the cool season turfgrasses in transitional climatic zone. *Grassland of China*, 2000(5): 56–59.
谢晓鸿, 马子骏. 冷季型草坪草在过渡气候带的适应性研究. *中国草地*, 2000(5): 56–59.
- [6] Wang M T, Zhao Y H, Fang J P, *et al.* Evaluation of production performance and nutritional quality of two gramineae grasses in Linzhi City, Tibet. *Feed Research*, 2022, 45(1): 113–117.
王明涛, 赵玉红, 方江平, 等. 西藏林芝2种禾草生产性能和营养品质评价. *饲料研究*, 2022, 45(1): 113–117.
- [7] Sun J X. Introduction test of nine American forage species in the eastern section of Gansu Hexi Corridor. *Journal of Gansu Agricultural University*, 1995, 30(4): 312–315.
孙吉雄. 美国九种饲草在甘肃河西走廊东段的引种试验. *甘肃农业大学学报*, 1995, 30(4): 312–315.
- [8] Li Z H, Liu Y X, Wang H S. Study on the growth characteristics and quality of hybrid progeny between multiflora ryegrass× reedy fescue. *Pratacultural Science*, 1999, 16(4): 22–24.
李志华, 刘亚雄, 王槐三. 多花黑麦草×苇状羊茅属间杂交后代生长特性及品质的研究. *草业科学*, 1999, 16(4): 22–24.
- [9] Wu J H, Mu Q, Tang C B, *et al.* Breeding of Qiancao 1, a new *Festuca arundinacea* variety. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2006, 34(4): 75–79.
吴佳海, 牟琼, 唐成斌, 等. 牧草新品种黔草1号高羊茅的选育. *贵州农业科学*, 2006, 34(4): 75–79.
- [10] Wang Y F, Li W, Han Y S, *et al.* Evaluation on nutritional value of six forages and straws. *Modern Animal Husbandry Science & Technology*, 2023, 103(12): 65–68.
王艳菲, 李伟, 韩永胜, 等. 6种禾本科牧草及秸秆的营养品质评价. *现代畜牧科技*, 2023, 103(12): 65–68.
- [11] Cao Y H, Yang F, Chen S M, *et al.* Nutritional value analysis of seven common forage plants in southern China. *China Feed*, 2020(17): 117–121.
曹艳红, 杨帆, 陈少梅, 等. 南方七种常见饲用植物营养价值分析. *中国饲料*, 2020(17): 117–121.
- [12] Yu J J, Du H M, Xu M, *et al.* Metabolic responses to heat stress under elevated atmospheric CO₂ concentration in a cool-season grass species. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 2012, 137(4): 221–228.
- [13] Yu J J, Yang Z M, Jespersen D, *et al.* Photosynthesis and protein metabolism associated with elevated CO₂ mitigation of heat stress damages in tall fescue. *Environmental and Experimental Botany*, 2014, 99: 75–85.
- [14] Yu J J, Chen L H, Xu M, *et al.* Effects of elevated CO₂ on physiological responses of tall fescue to elevated temperature, drought stress, and the combined stresses. *Crop Science*, 2012, 52(4): 1848–1858.
- [15] Yun X J, Yuan Q H, Su J K, *et al.* Code of practice for herbage variety registration: GB/T 30395-2013. Beijing: China Standard Press, 2014.
俞旭疆, 袁庆华, 苏加楷, 等. 草品种审定技术规程: GB/T 30395-2013. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [16] Zhang L Y. Feed analysis and feed quality testing technology. Beijing: China Agricultural University Press, 2007.
张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术. 北京: 中国农业大学出版社, 2007.

- [17] Liang Y L, Xiang Q H, Zhang D H. The influence of illumination intensity and temperature on tillering of *Festuca rubra* L. Pennlawn. *Journal of Grassland and Forage Science*, 1999(2): 32–34.
梁应林, 向清华, 张定红. 光照强度和温度对紫羊茅分蘖的影响. *四川草原*, 1999(2): 32–34.
- [18] Yang Y W, Liu D L, Wang L. Research progress on the effects of high temperature stress on *Festuca arundinacea*. *Journal of Grassland and Forage Science*, 2022(1): 15–22.
杨雨薇, 刘大林, 王琳. 高羊茅对高温胁迫应答机制的研究进展. *草学*, 2022(1): 15–22.
- [19] Ran M L, Song M, Song H, *et al.* Study on the identification technique system of heat tolerance for radish. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(11): 248–252.
冉茂林, 宋明, 宋华, 等. 萝卜耐热性鉴定技术体系研究. *中国农学通报*, 2006, 22(11): 248–252.
- [20] Wang Q, Wang K, Yu J J, *et al.* Effects of LBD on improving heat tolerance in creeping bentgrass. *Pratacultural Science*, 2020, 37(6): 1066–1073.
王茜, 王恺, 于景金, 等. 绿比多对匍匐剪股颖耐热性的影响. *草业科学*, 2020, 37(6): 1066–1073.
- [21] Chu M, Zhuang Z Q, Wang X F, *et al.* Physiological responses of radish seedlings with different heat tolerance to high temperature stress. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2014, 45(3): 334–339.
初敏, 庄志群, 王秀峰, 等. 不同耐热性萝卜幼苗对高温胁迫的生理响应. *山东农业大学学报*, 2014, 45(3): 334–339.
- [22] Jia K Z, Chen G L. Tolerance of different eggplant varieties at seedling stage to high temperature stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 398–401.
贾开志, 陈贵林. 高温胁迫下不同茄子品种幼苗耐热性研究. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 398–401.
- [23] Liu Q, Sun H, He D W. Plant responses to the high temperature and moisture stress. *Journal of China West Normal University (Natural Sciences Edition)*, 2005, 26(4): 364–368.
刘琴, 孙辉, 何道文. 干旱和高温对植物胁迫效应的研究进展. *西华师范大学学报(自然科学版)*, 2005, 26(4): 364–368.
- [24] Ji P, Liu J W, Wang X T, *et al.* Response of leaf physiological characteristics of different rice varieties to heat stress at seedling stage. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2024, 52(1): 36–48.
季平, 刘经威, 王欣婷, 等. 不同水稻品种苗期叶片生理特性对高温胁迫的响应. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2024, 52(1): 36–48.
- [25] Yan L, Li X T, Chao Y. Study advance on inheritance and breeding in tall fescue. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2014(11): 275–276.
颜兰, 李选统, 晁赢. 高羊茅遗传育种研究进展. *现代农业科技*, 2014(11): 275–276.
- [26] Gao G L, Feng Q, Zhang X Y, *et al.* An overview of stomatal and non-stomatal limitations to photosynthesis of plants. *Arid Zone Research*, 2018, 35(4): 929–937.
高冠龙, 冯起, 张小由, 等. 植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述. *干旱区研究*, 2018, 35(4): 929–937.
- [27] Zhao Z J, Hu L X, Hu T, *et al.* Differential metabolic responses of two tall fescue genotypes to heat stress. *Acta Prataculturæ Sinica*, 2015, 24(3): 58–69.
赵状军, 胡龙兴, 胡涛, 等. 不同品系高羊茅应答高温胁迫的初级代谢产物分析. *草业学报*, 2015, 24(3): 58–69.
- [28] Chen H Y, Ma S X, Guo P H. Research progress of high temperature stress on physiological characteristics of plants. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2021, 27(5): 11–13.
陈慧颖, 马石霞, 郭鹏辉. 热胁迫对植物生理影响的研究进展. *安徽农学通报*, 2021, 27(5): 11–13.
- [29] Lensch M, Herrmann R G, Sokolenko A. Identification and characterization of SppA, a novel light inducible chloroplast protease complex associated with thylakoid membranes. *Journal of Biological Chemistry*, 2001, 276(36): 33645–33651.
- [30] Wang X T, Liu X N, Tang J W, *et al.* Comparison of yield and nutritional quality of 4 graminaceous forages on plateau under arid environment. *Grassland and Turf*, 2022, 42(1): 57–61, 68.
王晓彤, 柳小妮, 唐俊伟, 等. 干旱环境下4种高原禾本科牧草产量及营养品质比较. *草原与草坪*, 2022, 42(1): 57–61, 68.
- [31] Chen Y, Wang Q, Chen X, *et al.* Effects of nitrogen deficiency stress on physiological characteristics of *Festuca arundinacea* at seedling stage. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(2): 9–15.
陈莹, 王茜, 陈锡, 等. 低氮胁迫对高羊茅苗期生理特性的影响. *中国草地学报*, 2022, 44(2): 9–15.
- [32] Sun X X, Peng J, Jiang Y F, *et al.* Nutritional value and molecular structure characteristics in different parts of *Festuca sinensis* from Qinghai–Tibet Plateau. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2023, 35(3): 1850–1862.
孙晓旭, 彭婧, 江雨霏, 等. 青藏高原中华羊茅不同部位的营养价值及分子结构特性研究. *动物营养学报*, 2023, 35(3):

1850—1862.

- [33] Li J Q, Wang L H, Zhan Q W, *et al.* The correlation study of SPAD value, chlorophyll content and crude protein content in two varieties of *Lolium perenne*. *Pratacultural Science*, 2010, 27(10): 39—42.
李杰勤, 王丽华, 詹秋文, 等. 2个黑麦草品种 SPAD 值和叶绿素及粗蛋白含量的相关性研究. *草业科学*, 2010, 27(10): 39—42.
- [34] Wang H L, Zhang Y K, Zhao C C, *et al.* Effects of nitrogen levels on photosynthetic physiology and feeding quality of bermudagrass. *Pratacultural Science*, 2021, 38(3): 514—522.
王宏力, 张寅坤, 赵春程, 等. 氮素水平对狗牙根光合生理及饲用品质的影响. *草业科学*, 2021, 38(3): 514—522.
- [35] Wang M T, Zhao Y H, Miao Y J, *et al.* Study on forage quality of mixed planting *Medicago sativa* L. and *Festuca elata* Keng ex E. Alexeev in Nyingchi Valley, Tibet. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(6): 1590—1596.
王明涛, 赵玉红, 苗彦军, 等. 西藏林芝河谷地带紫花苜蓿和高羊茅混播牧草品质研究. *草地学报*, 2022, 30(6): 1590—1596.
- [36] Zhang X Q, Jin Y M, Tian J C, *et al.* Seasonal changes of nutrient content and in vitro digestibility of five grass species in Tibetan alpine grassland. *Chinese Journal of Grassland*, 2022, 44(1): 71—77.
张晓庆, 金艳梅, 田峻成, 等. 西藏高寒草原5种牧草养分含量及体外消化率季节变化. *中国草地学报*, 2022, 44(1): 71—77.