DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.03.007
文献引用：党昕，沙晓蓉，靳磊．干旱胁迫对兰州百合农艺性状及其鳞茎品质的影响[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46(3)：41-52.
DANG X，SHA X R，JIN L. Effects of drought stress on agronomic traits and bulb quality of in *Lilium davidii* var. *unicolor* [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)，2025，46(3)：41-52.

干旱胁迫对兰州百合农艺性状及其鳞茎品质的影响*

党　昕[1]，沙晓蓉[2]，靳　磊[3**]

（1. 宁夏大学葡萄酒与园艺学院，宁夏 银川　750021；2. 宁夏大学农学院，宁夏 银川　750021；3. 宁夏大学林业与草业学院，宁夏 银川　750021）

摘要：为研究干旱胁迫对植物农艺性状及其鳞茎品质的影响，本文以兰州百合（*Lilium davidii* var. *unicolor*）为研究对象，对比分析不同干旱胁迫条件下兰州百合的生长特性。在兰州百合的幼苗期、现蕾期和开花期开始胁迫实验，分别设置无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组，各组土壤相对含水量分别为70.00%~75.00%、50.00%~55.00%、40.00%~45.00%和30.00%~35.00%，在胁迫第10、20、30天及采收期分别测定兰州百合的农艺性状和活性物质含量，探究干旱胁迫对不同时期兰州百合农艺性状及其鳞茎品质的影响。结果表明干旱胁迫始于幼苗期时，兰州百合生长指标影响较大。与无胁迫组相比，重度胁迫组在开花期兰州百合的株高、茎粗和叶片数分别降低了19.93%、14.17%和9.38%（t=−6.77、−1.01和−15.00，P<0.05），中度胁迫组在开花期兰州百合的基生根数和茎生根数分别增加了15.34%、15.52%（t=1.46、6.00，P<0.05）；重度胁迫组在幼苗期、现蕾期和开花期兰州百合的叶绿素质量分数分别降低了29.87%、7.36%和9.36%（t=−7.37、−2.00和−2.66，P<0.05）；轻度胁迫组在开花期兰州百合的鳞茎中总黄酮、皂甙、可溶性糖和可溶性蛋白的含量分别增长了22.22%、26.43%、16.96%和13.43%（t=0.09、51.39、0.01和0.21，P<0.05），轻度胁迫组在现蕾期的兰州百合采收期鳞茎中多糖质量分数增长了10.12%（t=60.68，P<0.05）。因此在开花期轻度干旱胁迫最有利于兰州百合生长发育、提升兰州百合品质。

关键词：兰州百合；干旱胁迫；农艺性状；品质
中图分类号：S682.29；Q493　　**文献标志码**：A

Effects of drought stress on agronomic traits and bulb quality of in *Lilium davidii* var. *unicolor**

DANG Xin[1]，SHA Xiaorong[2]，JIN Lei[3**]

（1. School of Enology and Horticulture，Ningxia University，Yinchuan Ningxia　750021；2. School of Agriculture，Ningxia University，Yinchuan Ningxia　750021；3. School of Forestry and Prataculture，Ningxia University，Yinchuan Ningxia　750021）

Abstract：In order to study the effects of drought stress on the agronomic traits of plants and the quality of the bulb，this paper takes the *Lilium davidii* var. *unicolor* as the research object and compares and

收稿日期：2023-02-24
*宁夏回族自治区重点研发项目（2021BBF02025）
**通信作者：jinlei2013@nxuedu.cn

analyses the growth status of *Lilium davidii* var. *unicolor* under different drought stress conditions, including no stress group, mild stress group, moderate stress group and severe stress group, the relative soil moisture content of each group was 70.00% to 75.00%, 50.00% to 55.00%, 40.00% to 45.00% and 30.00% to 35.00%, respectively, and the agronomic traits and active substance contents of *Lilium davidii* var. *unicolor* were measured at 10, 20 and 30 d of stress and at the harvesting stage. The effects of drought stress on the agronomic traits and bulb quality of *Lilium davidii* var. *unicolor* were investigated. The results showed that compared with the no stress group, the height, stem thickness and number of leaves of *Lilium davidii* var. *unicolor* decreased by 19.93%, 14.17% and 9.38% (t=−6.77, −1.01 and −15.00, P< 0.05) at flowering stage in the severe stress group, while the number of basal roots and stem roots of *Lilium davidii* var. *unicolor* increased by 15.34% and 15.52% (t=1.46 and 6.00, P<0.05) at flowering stage in the mederate stress group. The chlorophyll content of *Lilium davidii* var. *unicolor* at the seedling stage, bud stage and flower stage decreased by 29.87%, 7.36% and 9.36%(t=−7.37, −2.00 and −2.66, P< 0.05) in the severe stress group. The total flavonoids, saponins, soluble sugars and soluble proteins in the bulb of *Lilium davidii* var. *unicolor* at flowering stage increased by 22.22%, 26.43%, 16.96% and 13.43%, respectively (t=0.09, 51.39, 0.01 and 0.21, P<0.05) and the polysaccharide content in the bulbs of *Lilium davidii* var. *unicolor* at harvesting stage at bud stage increased by 10.12% in the mild stress group (t= 60.68, P<0.05). Therefore, mild-drought stress during flowering is most beneficial to the growth and development of *Lilium davidii* var. *unicolor* and enhances the quality of *Lilium davidii* var. *unicolor*.

Keywords: *Lilium davidii* var. *unicolor*; drought stress; agronomic traits; quality

CLC: S682.29; Q493 **DC**: A

0 引 言

兰州百合(*Lilium davidii* var. *unicolor*)是百合科百合属多年生鳞茎草本植物[1],是我国主要的可食用甜百合之一,味甜细腻,备受人们喜爱[2]。兰州百合鳞茎富含多种营养成分如多糖、蛋白质和果胶等,可食用和药用[3]。兰州百合的种植区域主要位于干旱、半干旱地区,干旱已逐渐成为制约兰州百合生产的潜在因素之一,从而导致经济损失。当面临干旱时,兰州百合会产生一系列生理生化反应来应对干旱环境[4],因此探究干旱胁迫对兰州百合的影响对兰州百合的栽培和百合产业的发展具有重要意义。

干旱是影响百合生产的潜在限制因素,同时也是限制植物生长、发育和生产力的关键环境因子[5],随着干旱胁迫程度的增加,百合的农艺性状和生理生化状况均会发生不同的变化[6]。前人研究表明,随着干旱胁迫程度的增加,兰州百合株高和叶长的增长速度明显下降,株高与茎粗比随着干旱胁迫程度的加重而上升[7],相对电导率增高,叶绿素含量降低[8],根系和花蕾的生长发育也受到严重影响,且百合的生长发育程度受干旱程度的直接影响。通过植物体内的可溶性糖含量,可以在一定程度上判断植物体内代谢活动的强弱。在面临干旱胁迫时,不同品种百合可溶性糖含量随干旱胁迫程度的不同呈现不同的变化趋势[9],非生物胁迫植物中的脯氨酸积累通常被认为有利于其抗逆性。随着干旱胁迫程度的增加,百合鳞茎的脯氨酸和丙二醛含量上升,可溶性糖、多糖和果糖的含量均降低[10-11],但重度干旱胁迫会导致兰州百合鳞茎的脯氨酸和葡萄糖含量增加[12]。灌溉量的增加会使百合叶片的淀粉含量升高,百合鳞茎中的淀粉含量、过氧化物酶活性、超氧化物歧化酶活性等指标均呈现先上升后下降的变化趋势[13-14]。

目前许多学者已开始探究干旱胁迫下农作物生长发育和品质的变化,但针对兰州百合在干旱胁迫下农艺性状及其鳞茎品质的变化规律研究相对较少。因此本研究以兰州百合为研究对象,通过盆栽控水实验,设置不同水分梯度,探究不同时期干旱胁迫下兰州百合生长发育和鳞茎品质的变化,筛选最佳灌溉量,以期为兰州百合的优质栽培和合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 主要试剂和材料

91.70%芦丁对照品、分析纯CH_3OH、5.00%

$NaNO_2$溶液、10.00%$AlCl_3$溶液、5.00%苯酚溶液、分析纯NaOH、分析纯蒽酮乙酸乙酯、10.00%香草醛乙醇溶液、98.00%齐墩果酸对照品、分析纯98.00%浓硫酸、98.00%无水葡萄糖对照品、98.00%无水蔗糖对照品、100 mg/L牛血清白蛋白等均购自赛乐欣(宁夏)生物技术有限公司;蒽酮试剂盒、考马斯亮蓝G-250均购自北京索莱宝科技有限公司。实验用水均为二次蒸馏水。

兰州百合鳞茎购自甘肃省兰州市菁叶农业发展有限公司,要求无病虫害、外观状况健康良好,鳞茎周径控制在9~12 cm;鸡粪有机肥(纯氮+P_2O_5+K_2O≥5.00%,有机质≥45.00%)购自中卫市禾丰生物肥有限公司。

1.2　主要仪器

使用上海越平科学仪器有限公司生产的FA2014B型电子天平称量物品质量;使用上海万柏生物科技有限公司生产的Wonbio-E型全自动快速样品研磨仪研磨样品;使用深圳福洋科技集团有限公司生产的F-060SD型超声波清洗机提取百合鳞茎,超声功率为100 Hz;使用上海卢湘仪离心机仪器有限公司生产的TGL-16MS型台式高速冷冻离心机离心样品溶液;使用上海一恒科学仪器有限公司生产的DHG-9620A型电热鼓风干燥箱烘干百合鳞茎;使用山东三体仪器有限公司生产的ST-S型土壤水分速测仪测量土壤含水量;使用上海尤尼柯仪器有限公司生产的UV-4803型紫外-可见分光光度计测定吸光值;使用北京海天有诚科技有限公司生产的SPAD-502plus型便携式叶绿素计测定叶绿素质量分数。

1.3　实验设计

实验地点位于宁夏大学农科实训基地,位于38°30′16″N,106°7′38″E,百合栽培于玻璃温室中,春夏季节室内最高温度26 ℃、最低温度22 ℃,室内平均温度24 ℃,每天自然光照时间≥10 h,夏季提供降温措施如遮阳网、风扇等。

实验使用20 cm×20 cm的塑料花盆,栽种时盆中装3 kg土壤;每盆在深度约10 cm处定植1个鳞茎。栽种时每盆施入100 g鸡粪作为基肥,后期不再追肥。

实验前所有植物的土壤含水量一致。采用盆栽控水法设置4个水分梯度进行分组实验,命名为无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组,对应土壤相对含水量为70.00%~75.00%、50.00%~55.00%、40.00%~45.00%和30.00%~35.00%,分别在幼苗期(定植后50 d)、现蕾期(定植后65 d)和开花期(定植后75 d)3个时期进行干旱胁迫。每个时期每组胁迫时间为30 d,每组28盆,整个实验为连续实验,实验周期为4~11月。每天18:00使用土壤水分速测仪测定土壤含水量,并补充当天所消耗的水分,维持土壤相对含水量,使其在设定范围内。分别在不同时期干旱胁迫的第10、20和30天与采收期(半枯期)选取兰州百合完整植株离土,冲洗鳞茎与根系,待植株自然晾干至各器官表面无水珠、6 h内质量变化≤50 mg,测定生长指标及鳞茎品质指标含量。实验重复3次。

1.4　生长指标测定

分析的生长指标包括株高、茎粗、叶片数、鳞茎周径、根数和叶绿素含量:(1)株高。测量范围为植株基部至顶端,使用卷尺测量。(2)茎粗。用游标卡尺测植株中部的茎杆直径。(3)叶片数。计算自鳞茎基部至上有效的叶片数。(4)鳞茎周径。使用卷尺测量,取鳞茎外围一周的值。(5)根数。采样时记录基生根、茎生根的数量。(6)叶绿素质量分数。取植株中段叶片,将叶片两端夹在叶绿素计的测量头中,按下测量头,读取叶绿素质量分数,注:要求叶片生长状况良好。

1.5　鳞茎品质的测定

1.5.1　样品前处理

将采收的兰州百合鳞茎清洗干净,置于烘箱中,在80 ℃下烘干后研磨成粉末。称取1 g粉末置于20 mL离心管中,加入10 mL CH_3OH,在50 ℃超声提取40 min,将提取液离心,离心速度为12 000 r/min、离心半径8 cm、离心10 min,收集上清液置于离心管中,得到百合鳞茎提取液,4 ℃避光保存备用。

1.5.2　标准曲线绘制

称量20 mg芦丁对照品溶于100 mL H_2O中得到0.20 g/L芦丁溶液,取一定体积上述溶液加H_2O稀释,分别得到质量浓度为0、0.05、0.10、0.20、0.40和0.80 g/L的标准溶液;称量90 mg齐墩果酸对照品溶于100 mL H_2O中得到0.90 g/L齐墩果酸溶液,取一定体积上述溶液加H_2O稀释,分别得到质量浓度为0.25、0.50、0.75、1.00、1.25和1.50 mg/L的标准溶液;称量20 mg无水葡萄糖对照品溶于100 mL H_2O中得到0.20 g/L葡萄糖溶液,取一定体积上述溶液加H_2O稀释,分别得到质量浓度为0、0.10、0.20、0.30、0.40和0.50 mg/L的标准溶液;称量10 mg无水蔗糖对照品溶于100 mL H_2O中得到0.10 g/L蔗糖

溶液,取一定体积上述溶液加H_2O稀释,分别得到质量浓度为0.20、0.40、0.60、0.80和1.00 mg/L的标准溶液;分别取一定体积的0.10 g/L蛋白质溶液,加H_2O稀释,分别得到质量浓度为0.20、0.40、0.60、0.80和1.00 mg/L的标准溶液。

依次取10 μL上述标准溶液分别在其最大吸收波长下测量吸光度。芦丁、齐墩果酸、葡萄糖、蔗糖和蛋白质标准溶液的最大吸收波长分别为510、595、490、630和595 nm。并对吸光度(A)和质量浓度(ρ)进行线性拟合,相关系数用R^2表示。

1.5.3 鳞茎品质的测定

鳞茎品质指标包括总黄酮、皂甙、多糖、可溶性糖和可溶性蛋白含量。

(1)总黄酮含量。采用$NaNO_2$-$AlCl_3$法测定[15],分别取500 μL百合鳞茎提取液和CH_3OH溶液置于试管中,加入4 mL H_2O和300 μL 5.00% $NaNO_2$混匀反应5 min,加入300 μL 10.00% $AlCl_3$溶液静置5 min,加入4 mL 1 mol/L NaOH和2 400 μL H_2O。测量溶液吸光度,计算芦丁质量浓度,实验重复3次。总黄酮含量以每100 g百合鳞茎中含有的芦丁质量表示,单位为mg/g。

(2)皂甙含量。采用香草醛-冰醋酸法测定[16],取100 μL百合鳞茎提取液加入具塞试管中,60 ℃恒温水浴挥干,加入200 μL 10.00%香草醛乙醇溶液摇匀,冰浴下滴加5 mL浓H_2SO_4摇匀,恒温水浴加热反应20 min,冰水浴冷却10 min后结束反应。测量溶液吸光度,计算齐墩果酸质量浓度,实验重复3次。皂甙含量以每100 g百合鳞茎中含有的齐墩果酸质量表示,单位为mg/g。

(3)多糖含量。采用硫酸苯酚显色法测定[17],分别取20 μL百合鳞茎提取液、1 980 μL CH_3OH和1 mL 5.00%苯酚置于试管中,摇匀后迅速加入5 mL浓H_2SO_4,振摇2 min后置于沸水浴中反应15 min,取出再立即冷水浴冷却,加2 mL水摇匀。测量溶液吸光度,计算葡萄糖质量浓度,实验重复3次。多糖含量以每100 g百合鳞茎中含有的葡萄糖质量表示,单位为mg/g。

(4)可溶性糖含量。采用蒽酮比色法测定[18],分别取500 μL百合鳞茎提取液、1 500 μL水置于试管中,再加入500 μL蒽酮乙酸乙酯溶液和5 mL浓H_2SO_4,充分振荡后,沸水浴中反应1 min,取出后自然冷却至室温。测量溶液吸光度,计算可溶性糖含量,实验重复3次。可溶性糖含量以百合鳞茎中可溶性糖所占的质量百分数表示,单位为%。

(5)可溶性蛋白含量。采用考马斯亮蓝法测定[19],取100 μL百合鳞茎提取液置于试管中,加入5 mL考马斯亮蓝试剂后充分混匀,放置10 min。测量溶液吸光度,计算蛋白质质量浓度,实验重复3次。可溶性蛋白含量以每100 g百合鳞茎中含有的蛋白质质量表示,单位为mg/g。

1.6 数据处理与分析

数据以$\bar{x}\pm s$表示。用Excel 2010和SPSS 19.0软件处理数据,用Origin 2019软件作图。采用最小显著差异法(least-significant difference,LSD)进行组间数据差异比较。$P<0.05$为差异有统计学意义。

2 实验结果

2.1 干旱胁迫对兰州百合农艺性状的影响

2.1.1 株高

不同时期干旱胁迫兰州百合的株高如表1所示。可知,在同一干旱胁迫期,干旱胁迫程度越大,兰州百合株高越低;随着生育进程的递进,兰州百合株高逐渐增加,且随干旱程度的增加而降低,干旱胁迫的时间越长,其株高越低。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的株高分别为(30.18±0.50)、(28.58±0.26)、(27.48±0.20)和(25.85±0.40)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的株高分别降低了5.31%和8.95%但结果差异无统计学意义($P>0.05$),重度胁迫组采收期的株高显著降低了14.35%($t=-4.33$,$P<0.05$)。干旱胁迫始于现蕾期时,不同组在采收期的株高分别为(35.43±0.07)、(34.50±0.10)、(34.43±0.12)和(31.20±0.69)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的株高分别降低了2.62%和2.82%但结果差异无统计学意义($P>0.05$),重度胁迫组采收期的株高显著降低了11.94%($t=-4.23$,$P<0.05$)。干旱胁迫始于开花期时,不同组在采收期的株高分别为(33.97±0.19)、(31.78±0.69)、(29.43±0.14)和(27.20±0.21)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的株高分别降低了6.45%和13.36%但结果差异无统计学意义($P>0.05$),重度胁迫组采收期的株高显著降低了19.93%($t=-6.77$,$P<0.05$)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合株高由高到低排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

2.1.2 茎粗

不同时期干旱胁迫兰州百合的茎粗如表1所

表1　不同时期干旱胁迫兰州百合的株高和茎粗变化　单位:cm

胁迫时期	组名	株高				茎粗			
		第10天	第20天	第30天	采收期	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	17.20±0.60	21.87±0.30	23.97±0.27	30.18±0.50	6.02±0.12	6.11±0.20	6.26±0.17	7.01±0.08
	轻度胁迫组	15.00±0.38	20.93±0.20	22.63±0.50	28.58±0.26	5.71±0.04	6.15±0.14	6.45±0.07	6.59±0.09
	中度胁迫组	15.03±0.18	21.10±0.95	21.57±0.48	27.48±0.20	4.85±0.06	5.44±0.06	6.08±0.05	6.44±0.14
	重度胁迫组	12.60±0.30	17.17±0.42	18.88±0.30	25.85±0.40[a]	4.07±0.30	4.75±0.07	4.81±0.14	5.12±0.02[b]
现蕾期	无胁迫组	30.93±0.61	34.37±0.19	34.83±0.19	35.43±0.07	5.98±0.07	6.04±0.08	7.35±0.03	8.02±0.04
	轻度胁迫组	29.53±0.16	31.47±0.76	31.63±0.40	34.50±0.10	5.47±0.30	5.78±0.05	6.65±0.04	7.17±0.04
	中度胁迫组	29.53±0.09	30.35±0.25	30.70±0.33	34.43±0.12	5.63±0.22	6.44±0.23	6.94±0.06	7.37±0.03
	重度胁迫组	27.83±0.49	28.10±0.45	29.60±0.58	31.20±0.69[a]	5.30±0.04	6.06±0.04	6.33±0.08	6.41±0.10[b]
开花期	无胁迫组	28.93±0.17	30.70±0.24	32.80±0.21	33.97±0.19	6.24±0.14	7.00±0.12	7.17±0.05	7.13±0.15
	轻度胁迫组	27.80±0.15	30.33±0.17	30.73±0.47	31.78±0.69	5.69±0.24	6.11±0.15	6.75±0.04	6.68±0.03
	中度胁迫组	26.30±0.55	26.87±0.50	28.67±0.36	29.43±0.14	5.61±0.22	6.05±0.09	6.25±0.15	6.32±0.15
	重度胁迫组	25.50±0.55	26.07±0.38	26.75±0.56	27.20±0.21[a]	5.00±0.04	5.58±0.02	6.17±0.03	6.12±0.02[b]

注:与无胁迫组相比,[a]t=−4.33、−4.23、−6.77,P<0.05;[b]t=−1.90、−1.60、−1.01,P<0.05。

示。在同一干旱胁迫期,干旱胁迫程度越高,兰州百合茎粗越细,且随着干旱胁迫时间的延长兰州百合茎粗增加缓慢。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的茎粗分别为(7.01±0.08)、(6.59±0.09)、(6.44±0.14)和(5.12±0.02)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的茎粗分别降低了5.99%和8.13%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的茎粗显著降低了26.96%(t=−1.90,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,不同组在采收期的茎粗分别为(8.02±0.04)、(7.17±0.04)、(7.37±0.03)和(6.41±0.10)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的茎粗分别降低了10.60%和8.11%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的茎粗显著降低了20.07%(t=−1.60,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,不同组在采收期的茎粗分别为(7.13±0.15)、(6.68±0.03)、(6.32±0.15)和(6.12±0.02)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的茎粗分别降低了6.31%和11.36%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的茎粗显著降低了14.17%(t=−1.01,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合茎粗由粗到细排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

2.1.3　叶片数

不同时期干旱胁迫兰州百合鳞茎的叶片数如表2所示。在同一干旱胁迫时期,干旱胁迫程度越高,兰州百合叶片数越少。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶片数分别为(193.67±1.89)、(152.00±3.38)、(174.33±1.73)和(164.00±1.82)片;与无胁迫组相比,中度胁迫组采收期的叶片数降低了9.99%但结果差异无统计学意义(P>0.05),轻度和重度胁迫组采收期的叶片数分别显著降低了21.52%和15.32%(t=−18.30和−29.00,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶片数分别为(204.00±2.18)、(175.33±1.89)、(170.33±2.55)和(188.67±2.33)片;与无胁迫组相比,重度胁迫组采收期的叶片数降低了7.51%但结果差异无统计学意义(P>0.05),轻度和中度胁迫组采收期的叶片数分别显著降低了14.05%和16.50%(t=−13.82和14.61,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶片数分别为(160.00±5.00)、(146.67±1.20)、(146.00±1.45)和(145.00±1.85)片;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的叶片数分别降低了8.33%和8.75%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的叶片数显著降低了9.38%(t=−15.00,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合叶片数由多到少排序为现蕾期、幼苗期和开花期。

2.1.4　鳞茎周径

不同时期干旱胁迫兰州百合鳞茎的周径如表2所示。在同一干旱胁迫时期,干旱胁迫程度越高,兰州百合鳞茎周径越低。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的鳞茎周径分别为(13.27±0.05)、

表2 不同时期干旱胁迫兰州百合的叶片数和鳞茎周径变化

胁迫时期	组名	叶片数/片				鳞茎周径/cm			
		第10天	第20天	第30天	采收期	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	153.33±4.82	166.00±3.06	210.67±1.89	193.67±1.89	10.43±0.18	10.68±0.19	12.50±0.16	13.27±0.05
	轻度胁迫组	131.67±2.57	160.33±1.42	173.33±1.53	152.00±3.38[a]	9.70±0.20	10.68±0.13	11.50±0.18	12.33±0.08
	中度胁迫组	161.67±3.82	163.00±2.19	180.67±2.89	174.33±1.73	9.77±0.13	10.57±0.13	11.10±0.13	11.93±0.17
	重度胁迫组	149.00±0.48	152.33±1.02	170.67±2.33	164.00±1.82[a]	9.46±0.15	10.03±0.05	10.63±0.14	11.37±0.12[b]
现蕾期	无胁迫组	174.67±2.54	200.00±0.33	222.00±1.79	204.00±2.18	11.27±0.03	11.37±0.19	11.95±0.30	13.77±0.26
	轻度胁迫组	176.00±1.67	192.67±1.61	211.67±1.33	175.33±1.89[a]	11.10±0.14	11.47±0.03	12.17±0.05	12.97±0.26
	中度胁迫组	157.00±1.59	195.67±2.33	213.33±2.51	170.33±2.55[a]	10.13±0.05	10.27±0.15	11.90±0.06	13.43±0.04
	重度胁迫组	168.33±2.74	178.00±2.82	190.33±2.17	188.67±2.33	10.30±0.09	10.90±0.10	10.87±0.09	11.20±0.10[b]
开花期	无胁迫组	170.33±1.84	187.67±2.50	210.00±2.05	160.00±5.00	10.60±0.17	10.95±0.02	12.43±0.17	12.80±0.12
	轻度胁迫组	163.67±1.96	164.33±1.50	192.67±1.66	146.67±1.20	10.10±0.17	11.43±0.18	12.03±0.15	13.10±0.15
	中度胁迫组	170.67±1.84	173.33±1.45	186.33±1.97	146.00±1.45	10.50±0.02	11.03±0.16	11.07±0.12	12.10±0.03
	重度胁迫组	157.67±3.71	168.00±1.67	180.00±2.00	145.00±1.85[a]	9.53±0.06	10.70±0.14	11.13±0.20	11.37±0.14[b]

注:与无胁迫组相比,[a]t=−18.30、−29.00、−13.82、−14.61、−15.00,P<0.05;[b]t=−1.90、−2.55、−1.43,P<0.05。

(12.33±0.08)、(11.93±0.17)和(11.37±0.12)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的鳞茎周径分别降低了7.08%和10.10%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的鳞茎周径显著降低了14.32%(t=−1.90,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的鳞茎周径分别为(13.77±0.26)、(12.97±0.26)、(13.43±0.04)和(11.20±0.10) cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的鳞茎周径降低了5.81%和2.47%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的鳞茎周径显著降低了18.66%(t=−2.55,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的鳞茎周径分别为(12.80±0.12)、(13.10±0.15)、(12.10±0.03)和(11.37±0.14)cm;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的鳞茎周径分别升高了2.34%和降低了5.47%但结果均差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的鳞茎周径显著降低了11.17%(t=−1.43,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合鳞茎周径由高到低排序为现蕾期、幼苗期和开花期。

2.1.5 基生根数

不同时期干旱胁迫兰州百合的基生根数变化如表3所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的基生根数对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的基生根数分别为(9.00±0.14)、(9.33±0.15)、(8.00±0.41)和(7.67±0.25)根;与无胁迫组相比,中度胁迫组采收期的基生根数降低了11.11%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的基生根数显著降低了14.78%(t=−2.00,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的基生根数分别为(10.00±0.15)、(8.67±0.10)、(7.33±0.15)和(7.33±0.10)根;与无胁迫组相比,轻度胁迫组采收期的基生根数降低了13.30%但结果差异无统计学意义(P>0.05),中度和重度胁迫组采收期的基生根数均显著降低了26.70%(t=−3.00,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的基生根数分别为(8.67±0.48)、(9.33±0.25)、(10.00±0.41)和(8.00±0.41)根;与无胁迫组相比,轻度胁采收期的基生根数增加了7.61%但结果差异无统计学意义(P>0.05),中度胁迫组采收期的基生根数显著增加了15.34%(t=1.46,P<0.05)。在采收期,不同干旱胁迫起始期兰州百合基生根数由多到少排序为开花期、幼苗期和现蕾期。

2.1.6 茎生根数

不同时期干旱胁迫兰州百合的茎生根数变化如表3所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的茎生根数对不同程度的干旱胁迫表现不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的茎生根数分别为(30.00±1.06)、(35.33±0.82)、(32.00±0.82)和(32.33±0.82)根;与无胁迫组相比,

表3　不同时期干旱胁迫兰州百合的基生根数和茎生根数变化　单位:根

胁迫时期	组名	基生根数				茎生根数			
		第10天	第20天	第30天	采收期	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	2.00±0.33	4.33±0.07	5.33±0.33	9.00±0.14	14.67±0.67	15.67±0.20	22.33±0.48	30.00±1.06
	轻度胁迫组	4.67±0.19	5.67±0.17	6.00±0.09	9.33±0.15	5.33±0.58	19.67±0.58	32.33±0.81	35.33±0.82[b]
	中度胁迫组	3.67±0.07	5.67±0.10	9.33±0.15	8.00±0.41	12.00±0.88	16.33±0.21	21.67±0.03	32.00±0.82
	重度胁迫组	2.33±0.07	5.00±0.15	5.00±0.07	7.67±0.25[a]	10.67±0.33	11.67±0.58	27.00±0.03	32.33±0.82
现蕾期	无胁迫组	6.33±0.06	7.33±0.10	8.67±0.07	10.00±0.15	21.33±1.76	22.00±1.53	27.67±1.11	41.33±1.76
	轻度胁迫组	5.00±0.09	6.00±0.06	7.67±0.05	8.67±0.10	13.00±1.53	21.33±0.65	29.67±1.76	44.67±1.33
	中度胁迫组	5.67±0.33	6.67±0.07	7.67±0.15	7.33±0.15[a]	25.67±0.88	28.67±1.65	30.00±1.00	36.33±1.00
	重度胁迫组	6.00±0.19	6.00±0.13	8.00±0.03	7.33±0.10[a]	18.00±1.47	27.00±1.20	28.00±0.84	52.00±0.88[b]
开花期	无胁迫组	4.33±0.13	5.00±0.06	8.33±0.41	8.67±0.48	23.33±0.36	24.00±0.58	27.00±0.43	38.67±0.80
	轻度胁迫组	3.33±0.67	4.67±0.09	10.00±0.09	9.33±0.25	11.33±0.68	16.00±0.88	19.67±1.00	28.00±0.04[b]
	中度胁迫组	5.67±0.20	6.67±0.05	8.67±0.33	10.00±0.41[a]	24.00±0.58	33.33±0.08	34.00±1.20	44.67±0.65[b]
	重度胁迫组	3.00±0.21	4.33±0.33	7.67±0.33	8.00±0.41	10.67±1.00	16.33±0.33	23.67±0.67	24.00±0.55[b]

注:与无胁迫组相比,[a]t=−2.00、−3.00、−3.00、1.46,P<0.05;[b]t=5.00、11.00、−7.00、6.00、−9.00,P<0.05。

中度和重度胁迫组采收期的茎生根数分别增加了6.67%和7.77%但结果差异无统计学意义(P>0.05),轻度胁迫组采收期的茎生根数显著增加了17.77%(t=5.00,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的茎生根数分别为(41.33±1.76)、(44.67±1.33)、(36.33±1.00)和(52.00±0.88)根;与无胁迫组相比,中度胁迫组采收期的茎生根数降低了12.10%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的茎生根数显著增加了25.81%(t=11.00,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的茎生根数分别为(38.67±0.80)、(28.00±0.04)、(44.67±0.65)和(24.00±0.55)根;与无胁迫组相比,轻度和重度胁迫组采收期的茎生根数分别显著降低了27.59%和37.94%(t=−7.00和−9.00,P<0.05),中度胁迫组采收期的茎生根数显著增加了15.52%(t=6.00,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合茎根数由多到少排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

2.1.7　叶绿素质量分数

不同时期干旱胁迫兰州百合叶绿素质量分数变化如表4所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的叶绿素质量分数对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶绿素质量分数分别为(24.67±0.15)、(27.10±0.26)、(25.77±0.12)和(17.30±0.15)mg/g;与无胁迫组相比,轻度胁迫组采收期的叶绿素质量分数增加了9.85%(t=2.43,P<0.05),中度胁迫组对应增加了4.46%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的叶绿素质量分数显著降低了29.87%(t=−7.37,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶绿素质量分数分别为(27.17±0.26)、(29.13±0.23)、(30.03±0.26)和(25.17±0.18)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的叶绿素质量分数分别显著增加了7.21%和10.53%(t=1.96和2.86,P<0.05),重度胁迫组采收期的叶绿素质量分数显著降低了7.36%(t=−2.00,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的叶绿素质量分数分别为(28.43±0.15)、(26.43±0.20)、(27.07±0.27)和(25.77±0.45)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和重度胁迫组采收期的叶绿素质量分数分别显著降低了7.03%和9.36%(t=−2.00、−2.66,P<0.05),中度胁迫组对应降低了4.78%但结果差异无统计学意义(P>0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合叶绿素含量由高到低排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

2.2　干旱胁迫对兰州百合鳞茎品质的影响

2.2.1　总黄酮

不同质量浓度芦丁标准溶液与吸光度的线性方程为A=0.105 4ρ−0.002,R^2=0.993 0。经计算不同时期干旱胁迫对兰州百合总黄酮积累的影响如表5所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的总黄酮含量对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。

干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的总黄酮含量分别为(0.29±0.03)、(0.33±0.01)、(0.44±0)和(0.26±0.03)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的总黄酮含量分别显著增加了13.79%和51.72%(t=0.04和0.16,P<0.05),重度胁迫组采收期的总黄酮含量降低了10.34%但结果差异无统计学意义(P>0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的总黄酮含量分别为(0.38±0.03)、(0.42±0.06)、(0.31±0.04)和(0.30±0.04)mg/g;与无胁迫组相比,中度和重度胁迫组采收期的总黄酮含量分别显著降低了18.42%和21.05%(t=−0.08和−0.12,P<0.05),轻度胁迫组采收期的总黄酮含量显著增加了10.53%(t=0.05,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的总黄酮含量分别为(0.45±0.05)、(0.55±0.02)、(0.23±0.02)和(0.13±0.01)mg/g;与无胁迫组相比,中度和重度胁迫组采收期的总黄酮含量显著降低了48.89%和71.11%(t=−1.24、−1.69,P<0.05),轻度胁迫组采收期的总黄酮含量显著增加了22.22%(t=0.09,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合总黄酮含量由高到低排序为开花期、现蕾期和幼苗期。

2.2.2 皂甙

不同质量浓度齐墩果酸标准溶液与吸光度的线性方程为A=7.565 7ρ−0.046,R^2=0.996 3。经计算不同时期干旱胁迫对兰州百合皂甙积累的影响如表6所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的皂甙含量对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响

表4 不同时期干旱胁迫兰州百合的叶绿素质量分数变化 单位:mg/g

胁迫时期	组名	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	26.03±0.25	27.10±0.06	29.10±0.15	24.67±0.15
	轻度胁迫组	31.03±0.64	30.13±0.12	28.50±0.18	27.10±0.26
	中度胁迫组	30.03±0.23	29.23±0.48	27.30±0.22	25.77±0.12
	重度胁迫组	25.67±0.23	23.00±0.38	20.33±0.81	17.30±0.15[a]
现蕾期	无胁迫组	32.77±0.24	31.20±0.15	30.70±0.21	27.17±0.26
	轻度胁迫组	33.80±0.12	32.40±0.15	30.20±0.19	29.13±0.23[a]
	中度胁迫组	35.40±0.35	36.00±0.09	33.77±0.22	30.03±0.26[a]
	重度胁迫组	30.83±0.15	29.33±0.26	28.47±0.27	25.17±0.18[a]
开花期	无胁迫组	31.33±0.15	30.83±0.15	32.33±0.15	28.43±0.15
	轻度胁迫组	33.13±0.23	32.40±0.15	31.13±0.23	26.43±0.20[a]
	中度胁迫组	35.67±0.39	34.93±0.09	33.67±0.39	27.07±0.27
	重度胁迫组	30.20±0.15	29.27±0.15	28.27±0.15	25.77±0.45[a]

注:与无胁迫组相比,[a] t=−7.37、1.96、2.86、−2.00、−2.00、−2.66,P<0.05。

表5 不同时期干旱胁迫兰州百合的总黄酮含量变化 单位:mg/g

胁迫时期	组名	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	0.10±0.01	0.21±0.03	0.25±0.02	0.29±0.03
	轻度胁迫组	0.10±0.01	0.24±0.03	0.20±0.02	0.33±0.01[a]
	中度胁迫组	0.12±0.04	0.19±0.03	0.17±0.01	0.44±0[a]
	重度胁迫组	0.11±0.01	0.17±0.05	0.10±0.01	0.26±0.03
现蕾期	无胁迫组	0.46±0.04	0.41±0.02	0.34±0.02	0.38±0.03
	轻度胁迫组	0.16±0.02	0.60±0.12	0.64±0.01	0.42±0.06[a]
	中度胁迫组	0.48±0.03	0.47±0.03	0.26±0.05	0.31±0.04[a]
	重度胁迫组	0.19±0.03	0.38±0.03	0.58±0.06	0.30±0.04[a]
开花期	无胁迫组	0.22±0.02	0.38±0.03	0.18±0.06	0.45±0.05
	轻度胁迫组	0.34±0.05	0.45±0.04	0.22±0.03	0.55±0.02[a]
	中度胁迫组	0.44±0.01	0.24±0.02	0.28±0.04	0.23±0.02[a]
	重度胁迫组	0.28±0	0.31±0.04	0.31±0.01	0.13±0.01[a]

注:与无胁迫组相比,[a] t=0.04、0.16、0.05、−0.08、−0.12、0.09、−1.24、−1.69,P<0.05。

应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的皂甙含量分别为(129.36±19.25)、(170.47±0.45)、(206.72±6.40)和(154.23±4.87)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的皂甙含量分别显著增加了31.78%和59.81%(t=41.11和77.72,P<0.05),重度胁迫组采收期的皂甙含量增加了19.23%但结果差异无统计学意义(P>0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的皂甙含量分别为(97.00±2.65)、(147.37±6.69)、(107.72±3.58)和(111.62±5.69)mg/g;与无胁迫组相比,中度和重度胁迫组采收期的皂甙含量分别增加了11.05%和15.07%但结果差异无统计学意义(P>0.05),轻度胁迫组采收期的皂甙含量显著增加了51.93%(t=50.37,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的皂甙含量分别为(194.42±5.93)、(245.81±11.31)、(206.91±4.48)和(112.87±11.91)mg/g;与无胁迫组相比,轻度胁迫组采收期的皂甙含量增加了26.43%(t=51.39,P<0.05),中度胁迫组对应增加了6.42%但结果差异无统计学意义(P>0.05),重度胁迫组采收期的皂甙含量显著降低了41.95%(t=−81.55,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合皂甙含量由高到低排序为开花期、现蕾期和幼苗期。

2.2.3　多糖

不同质量浓度葡萄糖标准溶液与吸光度的线性方程为A=0.019 7ρ−0.000 4,R^2=0.997 8。经计算不同时期干旱胁迫对兰州百合多糖积累的影响如表6所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的多糖含量对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的多糖含量分别为(285.03±7.78)、(286.03±13.36)、(340.55±18.28)和(247.75±28.07)mg/g;与无胁迫组相比,轻度胁迫组采收期的多糖含量增加了0.35%但结果差异无统计学意义(P>0.05),中度胁迫组显著增加了19.48%(t=24.68,P<0.05),重度胁迫组显著降低13.08%(t=−12.11,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的多糖含量分别为(501.39±27.21)、(562.06±14.41)、(368.53±49.97)和(551.60±22.29)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和重度胁迫组采收期的多糖含量分别显著增加了12.11%和10.01%(t=60.67、50.21,P<0.05),中度胁迫组采收期的多糖含量显著降低了26.50%(t=−132.86,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的多糖含量分别为(470.42±35.10)、(394.74±27.61)、(476.89±29.41)和(370.06±9.47)mg/g;与无胁迫组相比,轻度和重度胁迫组采收期的多糖含量分别显著降低了16.09%和21.33%(t=−75.68和−100.36,P<0.05),中度胁迫组采收期的多糖含量降低了1.38%但结果差异无统计学意义(P>0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合多糖含量由高到低排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

2.2.4　可溶性糖

不同质量浓度可溶性糖标准溶液与吸光度的

表6　不同时期干旱胁迫兰州百合的皂甙和多糖含量变化　单位:mg/g

胁迫时期	组名	皂甙				多糖			
		第10天	第20天	第30天	采收期	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	176.94±21.01	106.77±2.08	145.63±9.86	129.36±19.25	301.06±1.94	433.80±13.26	150.42±27.09	285.03±7.78
	轻度胁迫组	106.55±13.06	138.06±3.68	102.36±1.38	170.47±0.45[a]	316.64±9.10	395.87±33.85	250.18±23.27	286.03±13.36
	中度胁迫组	132.11±14.40	104.83±3.06	90.82±3.67	206.72±6.40[a]	258.13±6.24	508.13±10.73	169.16±3.62	340.55±18.28[b]
	重度胁迫组	195.15±7.11	119.26±6.91	104.63±1.42	154.23±4.87	264.64±19.76	459.16±18.95	237.02±5.89	247.75±28.07[b]
现蕾期	无胁迫组	101.62±4.37	66.15±9.23	82.65±10.13	97.00±2.65	207.96±4.39	307.85±36.03	240.88±10.28	501.39±27.21
	轻度胁迫组	132.28±4.14	109.57±9.59	127.08±3.61	147.37±6.69[a]	442.48±27.71	497.49±47.72	217.13±21.17	562.06±14.41[b]
	中度胁迫组	138.09±6.11	137.47±9.70	118.28±9.59	107.72±3.58	324.78±59.05	395.00±42.71	330.49±15.93	368.53±49.97[b]
	重度胁迫组	79.20±4.77	35.49±2.68	114.33±9.88	111.62±5.69	309.01±24.62	388.60±26.33	306.09±9.77	551.60±22.29[b]
开花期	无胁迫组	134.48±5.75	110.39±6.62	151.32±11.26	194.42±5.93	369.84±6.26	401.27±4.20	420.94±33.58	470.42±35.10
	轻度胁迫组	217.08±3.54	89.80±5.13	131.05±15.07	245.81±11.31[a]	410.41±25.49	462.76±25.97	474.08±9.53	394.74±27.61[b]
	中度胁迫组	170.08±7.79	84.72±1.23	88.68±25.50	206.91±4.48	431.20±4.98	392.48±6.93	376.75±8.74	476.89±29.41
	重度胁迫组	214.47±11.78	81.17±6.92.	88.15±40.89	112.87±11.91[a]	263.66±2.80	318.91±5.46	210.89±10.95	370.06±9.47[b]

注:与无胁迫组相比,[a]t=41.11、77.72、50.37、51.39、−81.55,P<0.05;[b]t=24.68、−12.11、60.67、−132.86、50.21、−75.68、−100.36,P<0.05。

线性方程为A=0.006 58ρ+0.020 39,R^2=0.997 8。经计算不同时期干旱胁迫对兰州百合可溶性糖积累的影响如表7所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的可溶性糖含量对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性糖含量分别为(10.90±0.10)、(14.60±0.30)、(17.20±0.10)和(15.00±0.60)μg/g;与无胁迫组相比,轻度、中度和重度胁迫组采收期的可溶性糖含量分别显著增加了33.94%、57.80%和37.61%(t=0.02、0.06和0.04,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性糖含量分别为(16.30±0.10)、(18.00±0.20)、(17.10±0.30)和(13.20±0.80)μg/g;与无胁迫组相比,轻度和中度胁迫组采收期的可溶性糖含量分别显著增加了10.43%和4.91%(t=0.01、0.01,P<0.05),重度胁迫组采收期的可溶性糖含量显著降低了19.02%(t=−0.03,P>0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性糖含量分别为(17.10±0.60)、(20.00±0.50)、(13.60±0.10)和(14.40±0.81)μg/g;与无胁迫组相比,中度和重度胁迫组采收期的可溶性糖含量分别显著降低了20.47%和15.79%(t=−0.02和−0.01,P<0.05),轻度胁迫组采收期的可溶性糖含量显著增加了16.96%(t=0.01,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合可溶性糖含量由高到低排序为开花期、现蕾期和幼苗期。

2.2.5 可溶性蛋白

不同质量浓度蛋白质标准溶液与吸光度的线性方程为A=0.005 3ρ+0.006 7,R^2=0.998 6。经计算不同时期干旱胁迫对兰州百合可溶性蛋白含量的影响如表7所示。在同一干旱胁迫时期,兰州百合的可溶性蛋白含量对不同程度的干旱胁迫表现出不同程度的响应。干旱胁迫始于幼苗期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性蛋白含量分别为(1.20±0.11)%、(1.28±0.04)%、(1.40±0.03)%和(1.38±0.03)%;与无胁迫组相比,轻度胁迫组采收期的可溶性蛋白含量分别增加了6.67%但结果差异无统计学意义(P>0.05),中度和重度胁迫组采收期的可溶性蛋白含量分别显著增加了16.67%和15.00%(t=0.20和0.18,P<0.05)。干旱胁迫始于现蕾期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性蛋白含量分别为(1.46±0.08)%、(1.45±0.02)%、(1.61±0.03)%和(1.41±0.10)%;与无胁迫组相比,轻度和重度胁迫组采收期的可溶性蛋白含量分别降低了0.68%和3.42%但结果均差异无统计学意义(P>0.05),中度胁迫组采收期的可溶性蛋白含量显著增加了10.27%(t=0.02,P<0.05)。干旱胁迫始于开花期时,无胁迫组、轻度胁迫组、中度胁迫组和重度胁迫组在采收期兰州百合的可溶性蛋白含量分别为(1.34±0.07)%、(1.52±0.04)%、(1.34±0.02)%和(1.42±0.01)%;与无胁迫组相比,重度胁迫组采收期的可溶性蛋白含量增加了5.97%但结果差异无统计学意义(P>0.05),轻度胁迫组采收

表7 不同时期干旱胁迫兰州百合的可溶性糖含量和可溶性蛋白含量变化

胁迫时期	组名	可溶性糖含量/(μg·g^{-1})				可溶性蛋白含量/%			
		第10天	第20天	第30天	采收期	第10天	第20天	第30天	采收期
幼苗期	无胁迫组	11.70±0.10	15.50±0.10	5.40±0.10	10.90±0.10	1.21±0.08	1.45±0.09	1.03±0.06	1.20±0.11
	轻度胁迫组	12.80±0.40	15.20±0.20	8.40±0.20	14.60±0.30[a]	1.07±0.02	1.36±0.01	1.05±0.02	1.28±0.04
	中度胁迫组	12.10±0.30	18.80±0.30	9.00±0.10	17.20±0.10[a]	1.18±0.05	1.32±0.06	1.05±0.04	1.40±0.03[b]
	重度胁迫组	10.10±0.10	12.50±0.14	7.10±0.70	15.00±0.60[a]	1.07±0.06	1.38±0.11	1.07±0.02	1.38±0.03[b]
现蕾期	无胁迫组	5.00±0.20	12.00±0.10	15.60±0.70	16.30±0.10	1.02±0.05	0.94±0.03	1.32±0.09	1.46±0.08
	轻度胁迫组	6.80±0.10	12.60±0.10	8.90±0.70	18.00±0.20[a]	0.66±0.13	1.06±0.03	1.30±0.08	1.45±0.02
	中度胁迫组	9.20±0.30	7.80±0.20	10.00±0.10	17.10±0.30[a]	1.08±0.03	1.07±0.05	1.20±0.05	1.61±0.03[b]
	重度胁迫组	5.80±0.10	8.20±0.50	13.70±0.70	13.20±0.80[a]	1.05±0.01	0.99±0.04	1.40±0.06	1.41±0.10
开花期	无胁迫组	11.20±0.30	12.80±0.10	5.60±0.70	17.10±0.60	1.05±0.06	1.18±0.03	1.29±0.12	1.34±0.07
	轻度胁迫组	13.10±0.20	12.40±0.10	7.00±0.40	20.00±0.50[a]	1.04±0.01	1.03±0.00	1.31±0.05	1.52±0.04[b]
	中度胁迫组	14.80±0.20	11.40±0.40	6.30±1.10	13.60±0.10[a]	1.04±0.01	1.07±0.02	1.28±0.04	1.34±0.02
	重度胁迫组	10.20±0.30	10.90±0.10	11.10±0.10	14.40±0.80[a]	1.04±0.05	1.16±0.04	1.24±0.03	1.42±0.01

注:与无胁迫组相比,[a]t=0.02、0.06、0.04、0.01、0.01、−0.03、0.01、−0.02、−0.01,P<0.05;[b]t=0.20、0.18、0.02、0.21,P<0.05。

期的可溶性蛋白含量显著增加了13.43%(t=0.21,P<0.05)。在采收期,不同时期干旱胁迫兰州百合可溶性蛋白含量由高到低排序为现蕾期、开花期和幼苗期。

3　讨　论

本实验研究了干旱胁迫对兰州百合农艺性状及其鳞茎品质的影响。在农艺性状研究中,遭受不同程度干旱胁迫的兰州百合株高、茎粗、叶片数和鳞茎周径均低于无胁迫组,这与宗建伟等[20]研究干旱胁迫对"黄美人(L. *longiflorum* × L. *Asiatic*)"百合盆栽影响的结果一致;鳞茎是百合养分的主要提供者,是储藏物质的主要场所,百合鳞茎的大小反映了其体内淀粉的含量水平[21],本研究结果中兰州百合鳞茎周径的降低说明干旱也会降低兰州百合淀粉的含量;在开花期中度干旱胁迫最有利于兰州百合根数的增加,有利于兰州百合吸收和积累营养物质,从而促进其生长发育。轻度干旱时植物的生长速度会下降或停止生长[22],一般来说,相对于生殖生长,植物营养生长期需要更多的水分[23],现蕾期干旱胁迫会导致植物的生殖发育受损[24],由研究结果可知,与在幼苗期进行干旱胁迫相比,在现蕾期的干旱胁迫对兰州百合株高、茎粗的影响更显著。叶绿素是植物叶片进行光合作用和同化物质的必需物质,叶绿素质量分数反映了兰州百合植株的生长发育状况[25],本研究中,兰州百合叶绿素质量分数从现蕾期到开花期的增长较大,可能是因为兰州百合生长发育前期以营养生长为主,后期营养物质回流,植株茎秆开始萎蔫,兰州百合植株生长变缓。说明在幼苗期和现蕾期进行轻度和中度干旱胁迫均能促进兰州百合叶绿素质量分数的增加,即促进兰州百合植株的生长发育,在开花期进行干旱胁迫会抑制兰州百合植株的生长发育。

在鳞茎品质研究中,不同生育时期对兰州百合进行适度干旱胁迫,可溶性糖含量均增大,可能是由于植物体内的水解酶活力受干旱环境影响而升高,促进了淀粉分解,从而促进可溶性糖的产生[26]。干旱时植株常常积累大量的可溶性糖来进行渗透调节,淀粉等碳水化合物分解和光合产物的积累也会产生可溶性糖[27]。兰州百合多糖具有多种功能,如抗氧化[28]、抗肿瘤、降血糖以及免疫[29]等,是重要活性成分,在不同生育时期对兰州百合进行不同程度干旱胁迫,鳞茎的多糖含量表现出不同的响应,幼苗期进行的干旱胁迫对多糖含量的影响较小,而现蕾期重度干旱胁迫和开花期轻度干旱胁迫时多糖含量显著降低。在干旱胁迫时,兰州百合的总黄酮含量也会发生变化,如在现蕾期和开花期进行干旱胁迫时总黄酮含量随胁迫时间的延长呈现出先高后低的趋势,在现蕾期轻度干旱胁迫30 d时总黄酮含量达到峰值,但采收期总黄酮含量小于在开花期的轻度干旱胁迫。在开花期进行轻度干旱胁迫时,兰州百合鳞茎可溶性糖、总黄酮、皂甙和可溶性蛋白的含量均升高,在现蕾期进行轻度干旱胁迫有利于兰州百合鳞茎中多糖的积累。

因此,综合考虑兰州百合的生长发育规律和鳞茎品质的变化规律,在不影响兰州百合生长发育的条件下,在开花期轻度干旱胁迫(灌溉量即土壤相对含水量为50.00%~55.00%)最有利于提升兰州百合鳞茎品质。

4　结束语

在干旱、半干旱地区,干旱胁迫是植物生长的主要限制因子。本文基于干旱胁迫对兰州百合农艺性状及其鳞茎品质的影响进行研究,结果表明在兰州百合开花期进行轻度干旱胁迫有利于兰州百合生长发育、提升兰州百合品质,这对兰州百合的优质栽培和水分的高效利用具有一定的参考价值,通过分析兰州百合在遭受干旱胁迫时产生的一系列生长发育变化和鳞茎中次生代谢物的积累规律也可对其他鳞茎类植物的抗干旱研究提供一定的参考。本文的后续研究方向是分析兰州百合遭受干旱胁迫后不同代谢物之间的相关性,筛选出能象征兰州百合干旱程度的最适代谢物。

参 考 文 献

[1] 巨秀婷,梁银娟,唐楠,等.基于正交设计优化兰州百合鳞片埋培环境条件[J].南方农业学报,2020,51(6):1392-1399.

[2] 王艳,尹计成,陈利文,等.不同埋藏深度对兰州百合鳞茎越冬储藏的影响[J].青海大学学报,2022,40(6):36-40.

[3] 张进忠.百合鳞茎离体发育及淀粉合成相关酶研究[D].广州:华南农业大学,2018.

[4] 李琦.钾肥与有机肥配施对食用百合土壤酶活性、土壤养分及产量的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2018.

[5] 刘芳,郭晓红,廉华,等.细叶百合鳞茎冷藏过程中核酸及蛋白质的变化[J].黑龙江八一农垦大学学报,2015,27(2):19-22.

[6] 王美美.干旱胁迫对细叶百合生长及观赏价值的影响[D].雅安:四川农业大学,2019.
[7] 徐岩.兰州百合引种及其栽培措施对生长特性和品质的影响[D].长春:吉林农业大学,2013.
[8] 张嘉新,姚爱兵,卫乐,等.亚洲百合不同生长时期对干旱胁迫响应程度的研究[J].宁夏农林科技,2021,62(9):11-14+21.
[9] WEI C, CUI Q, ZHANG X Q, et al. Three P5CS genes including a novel one from *Lilium regale* play distinct roles in osmotic, drought and salt stress tolerance[J]. Journal of Plant Biology, 2016, 59(5): 456-466.
[10] 魏贵玉,方泽涛,李伏生.不同氮肥种类和亏缺灌溉对切花百合品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):244-253.
[11] HONG Z. Removal of feed back inhon of alpyrroling-5-carboxylate synthase results in increased proline accunmlation and protection of plants from osmotics[J]. Physiol, 2000, 122: 11-1136.
[12] CHANG C C, YANG M H, WEN H M, et al. Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods[J]. Joural of Good and Drug Analysis, 2002, 10: 178-182.
[13] 胡昕.干旱和遮荫对2种百合生长及生理特性的影响[D].长春:吉林农业大学,2012.
[14] 李文美,王亚军,谢忠奎,等.不同灌溉量对兰州百合生长发育及产量的影响[J].北方园艺,2020,458(11):54-63.
[15] 胡小京,刘玉彩,裴芸,等.水分胁迫对野百合幼苗生理特性的影响[J].河南农业科学,2020,49(1):111-117.
[16] ZHANG X X, SHI Q Q, JI D, et al. Determination of the phenolic content, profile, and antioxidant activity of seeds from nine tree peony (*Paeonia* section Moutan DC.) species nativeto China [J]. Food Research International, 2017, 97: 141-148.
[17] 李国明,张丽萍,戴余波,等.苯酚-硫酸比色法测定瑞丽白芨多糖含量[J].热带农业科学,2018,38(10):62-67.
[18] 中国科学院上海植物生理研究所/上海市植物生理学会.现代植物生理学实验指南[M].北京:科学出版社,1999.
[19] 陈立红.未变性乳清蛋白的测定及其对产品特性的影响[D].天津:天津科技大学,2015.
[20] 宗建伟,黄培璐,杨雨华,等.亚低温与干旱胁迫对百合生长及叶片解剖结构的影响[J].西南林业大学学报(自然科学),2022,42(5):30-38.
[21] 王波.兰州百合生长过程中生理变化及其母鳞茎中差异代谢物分析[D].兰州:甘肃农业大学,2020.
[22] 王万里.植物对水分胁迫的响应[J].植物生理学通讯,1981(5):59-64.
[23] 赵丽英,邓西平,山仑.水分亏缺下作物补偿效应类型及机制研究概述[J].应用生态学报,2004(3):523-526.
[24] 杨晓康,柴沙沙,李艳红,等.不同生育时期干旱对花生根系生理特性及产量的影响[J].花生学报,2012,41(2):20-23.
[25] 孙鸿强.连作对兰州百合生理特性及土壤环境效应的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2017.
[26] 从也黎,黄绵佳,杨意伯.干旱胁迫对红掌离体叶片生理指标的影响[J].广西农业科学,2007,38(6):669-672.
[27] YOU X, XIE C, LIU K, et al. Isolation of non-starch polysaccharides from bulb of tiger lily (*Lilium lancifolium* Thunb.) with fermentation of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 81(1): 35-40.
[28] 肖遐,吴雄,何纯莲.百合多糖对I型糖尿病大鼠的降血糖作用[J].食品科学,2014,35(1):209-213.
[29] 杨颖,李汾.百合中性多糖对5-FU增效减毒作用及其对体外对肿瘤细胞的抑制作用[J].延安大学学报(医学科学版),2013,11(2):8-11.

(责任编辑:王 媛)