

干旱胁迫对不同根型苜蓿 内源激素含量的影响

汪 堃,南丽丽,李景峰,梁鹏飞,陈 洁,魏少萍,刘 鑫

(甘肃农业大学草业学院,草业生态系统教育部重点实验室,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为探究不同根型苜蓿在不同生长年限的抗旱性与内源激素间的关系,采用高效液相色谱法测定根茎型、直根型、根蘖型苜蓿播种当年及生长第 2 年在干旱胁迫后地上与地下部内源激素吲哚乙酸(IAA)、赤霉素(GA₃)、玉米素(ZT)和脱落酸(ABA)含量。结果表明,随干旱胁迫加剧,播种当年及生长第 2 年,根茎型、直根型和根蘖型苜蓿地上、地下部 IAA 和 ZT 含量显著降低,相比 CK,IAA 的年均降幅分别为 50.09%、36.52%、49.15%和 58.17%、53.42%、56.62%,ZT 的年均降幅分别为 38.11%、52.57%、36.18%和 43.86%、63.94%、54.17%。ABA 含量显著升高,随生长年限延长增幅降低,种植当年及生长第 2 年的增幅分别处于 62.50%~358.82%和 19.70%~85.19%之间;而 GA₃含量在播种当年显著下降,生长第 2 年中、重度胁迫下达到峰值。相比 CK,播种当年地上、地下部 GA₃/ABA、IAA/ABA、(IAA+GA₃+ZT)/ABA 比值及干质量随胁迫加剧呈下降趋势;生长第 2 年地上、地下部 IAA/ABA 比值显著降低,降幅分别为 68.63%~70.69%和 76.77%~88.65%;GA₃/ABA 和 (IAA+GA₃+ZT)/ABA 比值先升高后降低;同一干旱胁迫下,地上、地下部 GA₃、IAA 和 IAA+GA₃+ZT 3 组激素与 ABA 的比值基本表现为根茎型苜蓿最低、直根型苜蓿最高。地上部干质量与叶茎 GA₃、IAA 和 ZT 含量呈正相关,与 ABA 含量呈负相关;地下部干质量与根系 GA₃、IAA 和 ZT 含量呈正相关,与 ABA 含量呈负相关。可知,根茎型和根蘖型苜蓿在应对干旱胁迫时有较好的适应能力。

关键词:干旱胁迫;苜蓿;根型;内源激素;生物量

中图分类号:S551⁺.7;Q945.78 **文献标志码:**A

Effects of drought stress on endogenous hormone contents of different root-type alfalfa

WANG Kun, NAN Lili, LI Jingfeng, LIANG Pengfei, CHEN Jie, WEI Shaoping, LIU Xin

(College of Pruatacultural Science, Gansu Agricultural University, Key Laboratory of Grassland Ecosystem, Ministry of Education, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The indole acetic acid (IAA), gibberellin A₃(GA₃), zeatin (ZT) and abscisic acid (ABA) contents in rhizomatous rooted, tap rooted, and creeping rooted alfalfa on the aboveground and underground after drought stress were determined by the method of high-performance liquid chromatography (HPLC) in the current and following years. The relationship between these endogenous hormones and drought resistance of different root-type alfalfa was studied. The results showed that with the intensification of drought stress, the aboveground and underground IAA and ZT contents of rhizomatous rooted, tap rooted and creeping rooted alfalfa decreased significantly during the sowing year and the following growth year. Compared with CK, the annual average decrease of IAA was 50.09%, 36.52%, 49.15% and 58.17%, 53.42%, 56.62% respectively, and the decrease of ZT was 38.11%, 52.57%, 36.18% and 43.86%, 63.94%, 54.17% respectively. The content of ABA increased significantly, but the rate of increase was gradually declined with the extension of growth years. The increase rates in the sowing year and the following year were 62.50%~358.82% and 19.70%~85.19% respectively. However, GA₃ contents remarkably decreased during the sowing year, whereas GA₃ contents reached the highest level under the moderate and severe

stress during the following year. The GA_3/ABA , IAA/ABA , $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$, and aboveground and underground dry mass decreased under drought conditions during the sowing year. The aboveground and underground IAA/ABA significantly decreased by 68.63% ~ 70.69% and 76.77% ~ 88.65% respectively, and GA_3/ABA and $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ increased first and then decreased during the following next year. The GA_3/ABA , IAA/ABA , and $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ were lowest in rhizomatous rooted alfalfa and were highest in tap rooted alfalfa under the same drought stress. There were positive correlations between dry weight of aboveground part and GA_3 , IAA , and ZT contents in leaves and stems as well as between dry weight of underground part and GA_3 , IAA , and ZT contents in roots while ABA content in leaves and stems and in roots was negatively correlated with dry weight of aboveground part and underground part, respectively. Therefore, rhizomatous rooted and creeping rooted alfalfa had better adaptability to drought stress.

Keywords: drought stress; alfalfa; root type; endogenous hormone; biomass

干旱是制约植物生产力的主要因素之一,对植物生长、发育和农艺产量均有不利影响^[1]。植物内源激素在调节植物对生物及非生物胁迫响应中具有重要作用,主要包括脱落酸(ABA)、玉米素(ZT)、生长素(IAA)、赤霉素(GA_3)等。干旱胁迫下,植株各部位 ABA 含量均会增加,影响植物对于干旱胁迫的抗性^[2]; ZT 能够促进植物细胞的分裂,阻止叶绿素和蛋白质的降解,延缓植株衰老,减慢植株呼吸作用,保持细胞活力; IAA 可以促进细胞生长及侧根和不定根的发生^[3-4]; GA_3 主要促进植物茎节的伸长生长和花芽分化,并参与根系发育^[5]。植物对逆境的响应不是由单一激素的绝对含量决定,而是与各种植物激素的综合调控有关^[6]。同一激素在植物不同部位,其含量及作用不同;并且在植物的相同部位,激素含量不同,其发挥的作用也不同^[7]。因此,研究植物体不同部位在干旱胁迫下的内源激素变化将有助于深入了解植物激素的作用机制及植物的耐旱机理。

苜蓿(*Medicago sativa*)是畜牧业生产中不可或缺的植物蛋白资源,也是我国当前草地农业和生态建设工程中应用最为广泛的草种^[8]。然而,日益加剧的干旱对苜蓿的种植面积和产量构成了严重威胁。苜蓿的根系类型可划分为直根型、侧根型、根蘖型和根茎型4类^[9]。直根型苜蓿基因源主要来自于紫花苜蓿,根茎型、侧根型和根蘖型苜蓿不同程度地具有野生黄花苜蓿的基因,其对干旱、严寒的抵抗力较强^[10]。目前对不同根型苜蓿的根颈变化特征^[11]、根系发育能力^[12]、根系与产量的关系^[13]、抗逆性^[14-15]进行了较为丰富的研究,干旱胁迫下各根型苜蓿内源激素变化却鲜见报道。本研究对播种当年和生长第2年各根型苜蓿进行不同梯度干旱胁迫处理,测定地上、地下部各根型苜蓿 IAA 、 GA_3 、 ZT 和 ABA 等4种主要内源激素含量的

变化,旨在进一步理解各根型苜蓿的耐旱机理,为不同根型苜蓿生产管理提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试苜蓿有:根茎型‘清水’紫花苜蓿(Rhizomatous rooted *M. sativa* cv. ‘Qingshui’, QS),系野生栽培驯化品种,兼具突出的生态地被和优质饲用价值;直根型‘陇东’紫花苜蓿(Tap rooted *M. sativa* cv. ‘Longdong’, LD),系地方品种,耐旱性较强;根蘖型“公农4号”杂花苜蓿(Creeping rooted *M. varia* cv. Martin ‘Gongnong No.4’, GN),其根系强大,扩展性强。GN的种子由吉林省农科院提供,其余均由甘肃农业大学草业学院提供。

1.2 试验设计

试验于2020—2021年在甘肃农业大学草业学院植物生长室进行。采用沙培盆栽试验,选用40 cm(高)×20 cm(盆底直径)塑料盆为试验用盆,取13 kg沙子用去离子水洗净,置于105℃恒温干燥箱烘48 h后装入盆中,播种饱满、均匀、无病虫害的苜蓿种子,播种后每2 d浇灌500 mL Hoagland 营养液,待长出两片真叶时出苗。试验采用二因素完全随机设计,因素A为3个不同根型苜蓿品种,因素B为不同水分处理,分别为对照(CK)、中度(M)和重度(S)水分胁迫,通过称重法每天补充水分使每桶含水量分别在河沙最大持水量的65%~75%、45%~55%和25%~35%胁迫范围内,每个处理重复4次。在播种当年和生长第2年中待各根型苜蓿生长至分枝期(株高45 cm左右)时分别进行干旱胁迫处理,处理20 d后采集各根型苜蓿的叶、茎和根系,用蒸馏水冲洗干净,叶和茎、根系分别剪碎混匀,装入锡箔纸袋,液氮速冻后于-80℃超低温冰箱保存,用于各项指标测定。

1.3 测定方法

采用烘干法测定 10 株苜蓿的地上、地下部干物质量并取平均值。将冷冻的地上、地下部样品在液氮中快速研磨成粉末,用 10 mL 80% 色谱甲醇(超纯水配制)分 3 次洗入 15 mL 离心管中,在 4℃ 冰箱中浸提 24 h,用高速冷冻离心机(4℃,10 000 r·min⁻¹)离心 15 min。吸取上清液用旋转蒸发仪在 40℃ 下浓缩除去甲醇,得到约 2 mL 的浓缩液,用 50% 的甲醇冲洗蒸发瓶瓶壁,最后定容至 10 mL,用一次性针管吸取 2 mL 过 0.22 μm 有机膜,装入 1.5 mL 离心管于四元梯度超快速液相色谱仪 Waters Arc-2998 PDA Waters(沃特世公司,美国)进样测定 IAA、ABA、GA₃、ZT 含量^[16-17]。

1.4 数据分析

用 Excel 2007 进行试验数据处理并作图,用 SPSS 16.0 统计软件进行方差分析和相关分析,不同处理之间的差异采用 Duncan’s 方法进行比较。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对不同根型苜蓿地上、地下部内源激素含量的影响

由表 1 可知,在播种当年及生长第 2 年,随干旱

胁迫程度加剧,QS、LD、GN 地上、地下部 IAA 和 ZT 含量均显著降低($P<0.05$),在重度胁迫下,播种当年 LD 地上、地下部 IAA、ZT 含量均高于 GN 和 QS,而生长第 2 年 QS 地上、地下部 IAA 含量均大于 LD 和 GN,ZT 含量在各根型苜蓿间差异不明显,IAA、ZT 的下降幅度地下部均大于地上部。播种当年 QS、LD、GN 地上、地下部 GA₃ 含量随胁迫程度加剧显著下降($P<0.05$),且 GN 地上部 GA₃ 含量显著大于 QS($P<0.05$),重度胁迫下 LD 地下部 GA₃ 含量显著大于 QS 和 GN($P<0.05$);生长第 2 年 QS 和 GN 在中度胁迫下 GA₃ 含量达到最高,且 QS 的地上、地下部 GA₃ 含量在重度胁迫下均显著大于 GN($P<0.05$);LD 在重度胁迫下 GA₃ 含量达到峰值,其值显著大于 QS 和 GN($P<0.05$);GA₃ 在播种当年的下降幅度和生长第 2 年的增加幅度均表现为地下部大于地上部。QS、LD、GN 地上、地下部 ABA 含量随胁迫程度加剧显著上升($P<0.05$),播种当年各根型苜蓿在重度胁迫下最高,且 QS 地上、地下部 ABA 含量显著高于 GN 和 LD($P<0.05$);生长第 2 年 QS 和 GN 在中度胁迫下最高,且 QS 地上、地下部 ABA 含量显著高于 GN($P<0.05$),LD 在重度胁迫下 ABA 含量最大,其地上、地下部 ABA 含量均显著小于 QS 但大于 GN($P<0.05$)。

表 1 干旱胁迫对不同根型苜蓿地上、地下部内源激素含量的影响/(ng·g⁻¹)
Table 1 Effects of drought stress on endogenous hormone contents in aboveground and underground of different root-type alfalfa

植物组织 Plant tissue	处理 Treatment	GA ₃		IAA		ABA		ZT	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
地上部 Aboveground	QS-CK	21.16±2.72bcA	14.11±0.67dA	3.95±0.14bB	5.76±0.10bB	0.26±0.10eA	0.83±0.10bA	0.33±0.02bcB	0.013±0.00bB
	QS-M	13.83±1.57deA	44.34±5.55aA	2.98±0.21cdB	4.21±0.16cB	0.55±0.07cA	1.18±0.05aA	0.23±0.03dA	0.012±0.00bA
	QS-S	12.63±0.64eA	26.72±2.54cA	2.41±0.29dA	2.24±0.69eA	0.87±0.11aA	1.08±0.06aA	0.18±0.01dA	0.009±0.00cB
	LD-CK	22.63±1.77bA	15.13±0.76dA	2.85±0.24cdB	6.36±0.27aB	0.14±0.01fA	0.66±0.13cA	0.45±0.02aB	0.023±0.00aB
	LD-M	19.20±2.42cA	31.42±3.33bcA	2.74±0.08dB	3.22±0.52dA	0.20±0.01eA	0.67±0.12cA	0.35±0.05bB	0.010±0.00cA
	LD-S	15.36±2.09deA	34.31±3.84bA	2.70±0.26dB	2.05±0.13eA	0.23±0.01eA	0.79±0.11bA	0.29±0.04cB	0.007±0.00cA
	GN-CK	30.52±1.74aA	14.52±0.70dA	4.50±0.68aA	3.13±0.05dB	0.27±0.03eA	0.27±0.19eA	0.34±0.02bB	0.015±0.00bB
	GN-M	28.68±0.30aA	38.80±4.60bA	3.33±0.23cdB	1.96±0.14eB	0.42±0.03dA	0.58±0.14cdA	0.28±0.02cB	0.013±0.00bA
	GN-S	15.93±0.55dA	17.94±1.13dA	2.65±0.23dB	1.34±0.35fA	0.68±0.08bA	0.50±0.15dA	0.23±0.01dA	0.009±0.00cA
地下部 Underground	QS-CK	8.50±0.19cB	4.46±0.40fB	5.45±0.08aA	7.41±0.31bA	0.17±0.01cdB	0.44±0.01bB	0.57±0.03cA	0.019±0.00bA
	QS-M	5.00±0.09efB	14.30±1.26aB	4.54±0.09bA	5.28±0.46cA	0.19±0.01cB	0.61±0.06aB	0.30±0.00eA	0.015±0.00bA
	QS-S	4.40±0.01fB	8.59±1.08dB	2.67±0.28dA	2.57±0.17eA	0.78±0.03aB	0.56±0.09abB	0.25±0.01eA	0.013±0.00cA
	LD-CK	10.12±0.22bB	4.78±0.48fB	5.62±0.14aA	9.83±0.57aA	0.16±0.01dA	0.35±0.05cB	0.95±0.06aA	0.031±0.00aA
	LD-M	7.98±0.39cB	10.10±1.52cB	4.61±0.20bA	3.62±0.18dA	0.21±0.01cA	0.36±0.02cB	0.78±0.09bA	0.012±0.00bcA
	LD-S	5.56±0.38deB	11.10±0.98bB	4.31±0.05bA	1.62±0.27fB	0.26±0.01bA	0.42±0.07bB	0.44±0.02dA	0.008±0.00cA
	GN-CK	13.54±1.16aB	4.60±1.10fB	5.40±0.56aA	6.73±0.14bA	0.10±0.00eB	0.16±0.03dB	0.72±0.05bA	0.018±0.00bA
	GN-M	6.38±0.51dB	12.50±0.70bB	5.03±0.23abA	2.31±0.04eA	0.15±0.00dB	0.31±0.00cB	0.42±0.01dA	0.015±0.00bA
	GN-S	4.41±0.21fB	5.71±0.42eB	3.81±0.21cA	1.09±0.09fA	0.25±0.02bB	0.27±0.03cdB	0.26±0.02eA	0.010±0.00cA

注:QS、LD、GN 分别为‘清水’紫花苜蓿、‘陇东’紫花苜蓿、‘公农 4 号’杂花苜蓿;CK、M、S 分别为对照、中度胁迫、重度胁迫;数据为平均值±标准差($n=4$),同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示不同器官间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: QS, LD and GN are *M. sativa* cv. ‘Qingshui’, *M. sativa* cv. ‘Longdong’ and *M. varia* Martin.cv. ‘Gongnong No.4’, respectively. CK, M and S were control, medium stress, and severe stress, respectively. Values were means ± standard deviation ($n=4$). Different lowercase letters in a column among different treatments were significantly different at $P<0.05$ level. Different capital letters in a column among different organs were significantly different at $P<0.05$ level; The same below.

2.2 干旱胁迫对不同根型苜蓿地上、地下部内源激素比例的影响

由表 2 可知, QS、LD、GN 播种当年及生长第 2 年的 IAA/ABA 比值表现为地下部大于地上部, 而不同部位间的 GA₃/ABA 和 (IAA+GA₃+ZT)/ABA 比值无明显规律。随胁迫程度加剧, 播种当年 IAA/ABA、GA₃/ABA、(IAA+GA₃+ZT)/ABA 比值显著降低 ($P<0.05$), 生长第 2 年 IAA/ABA 比值显著降低 ($P<0.05$)、GA₃/ABA 比值先增加后降低 ($P<0.05$)、(IAA+GA₃+ZT)/ABA 比值除地下部 LD 和 GN 外, 亦表现为先增加后降低。同一干旱处理下, 不同品种间, 地上、地下部 IAA/ABA、GA₃/ABA、(IAA+GA₃+ZT)/ABA 的比值基本表现为 QS<GN<LD。

2.3 干旱胁迫对不同根型苜蓿地上、地下部生物量的影响

由图 1 可知, 在播种当年及生长第 2 年, 随干旱胁迫程度增加, 各根型苜蓿地上部干质量受到不同程度影响, 与 CK 相比, 重度胁迫下干质量下降, 播种当年 QS、LD、GN 的地上部干质量较 CK 分别降低了 28.55%、15.57% 和 31.99%, 生长第 2 年较 CK 分别减少了 49.25%、37.36% 和 20.25%; 重度胁迫下, 各根型苜蓿地下部干质量较 CK 变化趋势有所差异, 播种当年及生长第 2 年中, QS 较 CK 分别下降了 23.80%、23.63%, LD 较 CK 分别增加了 4.54%、28.65%, GN 播种当年较 CK 降低了 43.04%、生长第 2 年较 CK 上升了 41.43%。

2.4 各根型苜蓿内源激素含量的相关性分析

由表 3 可知, 播种当年和生长第 2 年中, 各根型苜蓿地上、地下部 ABA 含量与 IAA、GA₃ (生长第 2 年与 GA₃ 呈负相关但不显著)、ZT、地上部干质量、地下部干质量呈显著或极显著负相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 地上部 IAA 含量与 GA₃、播种当年地上部干质量呈极显著或显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 地下部 IAA 含量与播种当年 GA₃、ZT、地下部干质量呈极显著或显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 地上、地下部 GA₃ 含量与 ZT、地上部干质量、地下部干质量呈极显著或显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$); 地上、地下部 ZT 含量与地上部干质量、播种当年地下部干质量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关。

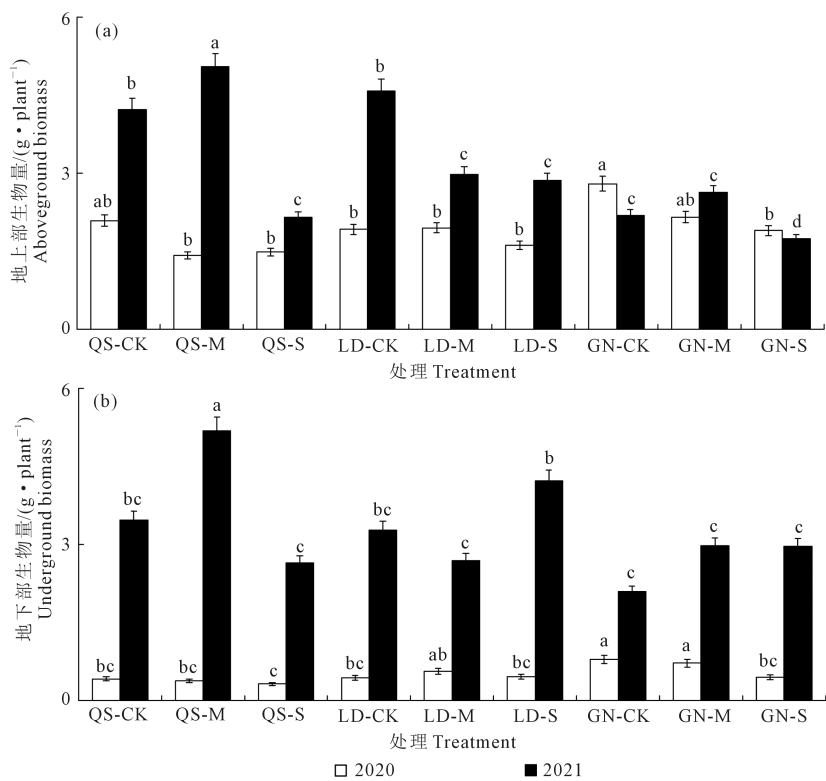
3 讨 论

3.1 干旱胁迫对各根型苜蓿内源激素含量的影响及其与地上、地下部干物质积累的关系

植物内源激素是一类重要的生长调节物质。IAA、GA₃ 和 ZT 是生长促进激素, 干旱胁迫可使其含量降低, 减缓植株生长速率, 以缓解水分不足对植株正常生理活动的压力; 品种抗旱性越强, 自身调节能力越大, 干旱胁迫下其含量合成越少^[18]。ABA 是抑制生长的激素, 干旱胁迫下 ABA 含量增加, 促进气孔关闭以降低蒸腾失水, 同时促进根系吸水, 增强植株的抗旱能力^[19]; ABA 参与干旱胁迫下植物根系发育, 是干旱条件下维持根系生长的必需激素^[20]; ABA 还可促进同化物向库的运输^[21]。

表 2 干旱胁迫下不同根型苜蓿地上、地下部内源激素比值的变化

Table 2 Changing ratio of endogenous hormones contents in aboveground and underground of different root-type alfalfa under drought stress							
植物组织 Plant tissue	处理 Treatment	IAA/ABA		GA ₃ /ABA		(IAA+ GA ₃ +ZT) /ABA	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021
地上部 Aboveground	QS-CK	15.27±4.78bB	6.96±1.00cB	81.84±28.89cdA	17.07±2.93eA	98.40±33.51dA	24.04±3.91cA
	QS-M	5.42±1.11cB	3.45±0.22eB	25.16±1.12eA	36.45±6.18cA	31.00±1.97fB	41.11±6.28bcA
	QS-S	2.78±0.66dB	2.04±0.54fB	14.59±2.40fA	24.72±3.88dA	17.59±2.96gA	26.78±3.38cA
	LD-CK	20.44±2.83aB	9.18±1.19aB	162.45±4.51aA	38.69±4.88cA	186.14±3.71aA	47.08±5.95bB
	LD-M	13.52±0.77bB	4.77±0.21dB	94.82±14.23cA	71.40±29.02aA	110.07±14.80cA	74.95±30.21aA
	LD-S	11.54±1.06bcB	2.88±1.14fB	65.76±6.87dA	44.61±11.9bB	78.53±6.25eA	47.26±12.14bA
	GN-CK	16.48±3.42bB	8.35±1.19bB	111.77±18.60bB	21.84±3.41dA	129.51±21.69bB	31.06±4.60cB
	GN-M	7.99±0.14cB	3.52±0.94eB	68.85±6.03dA	48.25±15.06bA	77.52±6.20eA	53.04±13.08bA
	GN-S	3.89±0.69dB	2.64±0.52fB	23.40±1.99eA	39.48±17.46cB	27.63±2.63fB	42.39±18.6bcA
地下部 Underground	QS-CK	32.01±3.01bA	16.70±1.04cA	49.92±3.62cB	18.17±2.93dA	85.26±6.95cB	26.81±1.84dA
	QS-M	23.57±1.85cA	7.26±0.26eA	25.94±2.26dA	37.55±6.18bcA	51.07±4.19eA	32.17±3.11cdB
	QS-S	3.42±0.39eA	3.88±0.18fA	5.63±0.25fB	25.82±3.88cA	9.38±0.54gB	19.89±1.37eB
	LD-CK	33.28±3.68bA	40.60±6.98aA	59.91±5.63bB	39.49±4.88bcA	98.84±9.70bB	69.32±17.27aA
	LD-M	22.13±2.41cA	9.95±0.89dA	38.30±4.08cdB	73.40±29.02aA	64.15±6.98dB	46.78±2.17bB
	LD-S	16.32±1.33dA	4.61±0.75fA	21.09±2.90dB	49.13±15.06bA	39.07±4.34fB	30.90±5.01cdB
	GN-CK	56.13±9.66aA	27.60±2.84bA	140.83±21.95aA	23.24±3.41cA	204.46±31.54aA	41.36±5.46bcA
	GN-M	32.78±2.21bA	8.60±0.27deA	41.55±4.88cB	41.28±13.60bcB	77.08±5.62cA	37.87±4.90cB
	GN-S	15.05±1.61dA	3.97±0.25fA	17.44±2.11eB	44.93±11.09bA	33.54±3.68fA	24.82±3.55dB



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P<0.05$).

图 1 干旱胁迫对苜蓿地上、地下部干质量的影响

Fig.1 Effects of aboveground and underground dry mass of different root type alfalfa under drought stress

表 3 干旱胁迫下苜蓿内源激素含量相关性

Table 3 Correlation on endogenous hormones contents of alfalfa under drought stress

植物组织 Plant tissue	指标 Index	ABA		IAA		GA ₃		ZT	
		2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
地上部 Aboveground	IAA	-0.391 *	-0.415 *	1.000	1.000				
	GA ₃	-0.498 **	-0.297	0.711 * *	0.517 *	1.000	1.000		
	ZT	-0.851 **	-0.785 **	0.323	0.445	0.532 **	0.633 **	1.000	1.000
	干质量 Dry mass	-0.382 *	-0.836 **	0.572 * *	0.267	0.785 **	0.512 *	0.498 **	0.532 **
地下部 Underground	IAA	-0.858 **	-0.475 *	1.000	1.000				
	GA ₃	-0.528 **	-0.341	0.736 * *	0.474	1.000	1.000		
	ZT	-0.486 **	-0.624 **	0.699 * *	0.537 *	0.798 **	0.513 *	1.000	1.000
	干质量 Dry mass	-0.520 **	-0.427 *	0.526 * *	0.577 *	0.608 **	0.670 **	0.374 *	0.308

注: * 和 * * 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。
Note: * and * * indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$ level, respectively.

本研究中,地上部干质量与叶茎 GA₃、IAA 和 ZT 含量呈显著或极显著正相关(种植当年地上部干质量与 IAA 呈正相关但不显著),说明干旱胁迫条件下,叶茎 IAA 和 ZT 含量下降导致叶茎生长减弱,光合作用下降,干物质积累降低;与叶茎 ABA 含量呈显著负相关,说明干旱条件下 ABA 含量增加使细胞代谢变缓,茎叶生长缓慢,干物质积累降低,进而减少水分过度消耗,是抵御干旱胁迫的应激反应。

地下部干质量与根系 GA₃、IAA 和 ZT 含量呈显著或极显著正相关(种植当年地下部干质量与 ZT 呈正相关但不显著),说明 IAA 含量降低限制了光合产物向根系运输,ZT 含量下降影响同化物向库器官运输;与根系 ABA 含量呈显著负相关,说明干旱胁迫下,ABA 作为一种信号物质,由根系迅速感知胁迫信号,以 ABA 的形式将干旱信息传递到地上部,使植株代谢活动减弱,进而在形态和生理等方面发生

与胁迫相适应的变化,以提高自身的抗旱力,而中、重度胁迫下,QS、GN 地下部 ABA 含量小于地上部,表明根茎型、根蘖型苜蓿有助于减缓植株衰老。

播种当年,干旱胁迫使各根型苜蓿地上、地下部 GA_3 、IAA 和 ZT 含量显著降低,这与张海燕等^[22]对甘薯的研究结果一致;生长第 2 年干旱胁迫使各根型苜蓿地上、地下部 IAA 和 ZT 含量显著下降,而 GA_3 含量显著升高,这与刘长海等^[23]对苹果砧木、王霞等^[24]对柽柳及满达等^[25]对差巴嘎蒿的研究结果相一致。JACKSON 等^[26]认为在逆境胁迫下, GA_3 可作为植物生长的负调控信号,减缓植物生长,苜蓿为了更好地适应干旱胁迫,使得 GA_3 含量增加。同一干旱条件下,各根型苜蓿地下部 GA_3 、IAA、ZT 的变化幅度大于地上部,因根系是植物最先感知土壤环境变化的器官,亦是多种植物激素的主要生物合成器官,说明这 3 种内源激素含量在根系中的变化规律较叶片更具代表性。

3.2 干旱胁迫对各根型苜蓿内源激素比值的影响

植物受到干旱胁迫时,其体内的激素之间存在着对抗、协同等特性,激素的比值反映了激素对植物的综合调控能力^[27]。IAA/ABA 的比值变化影响植物器官生长与脱落, GA_3 /ABA 影响种子萌发、性别分化及植物休眠等生理活动, $(ZT+IAA+GA_3)/ABA$ 可反映几种激素的平衡状态^[9]。本研究中,播种当年各根型苜蓿地上、地下部 IAA/ABA、 GA_3 /ABA 和 $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ 随干旱胁迫加剧呈降低趋势,表明各根型苜蓿各部位对干旱胁迫表现出一致的抵抗和耐受;生长第 2 年各根型苜蓿地上、地下部 IAA/ABA 随干旱胁迫程度增加呈下降趋势,而 GA_3 /ABA 和 $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ 基本呈先增加后降低趋势,表明干旱胁迫在各根型苜蓿内部建立新的激素间平衡,适应干旱胁迫并继续使其生长发育^[28];播种当年及生长第 2 年,同一干旱胁迫下,不同品种间 GA_3 、IAA 和 $IAA+GA_3+ZT$ 这 3 组激素与 ABA 的比值地上、地下部基本表现为 $QS < GN < LD$,表明根茎型和根蘖型苜蓿抗旱能力强于直根型苜蓿。

4 结 论

干旱影响内源激素的合成,抑制各根型苜蓿的生长。随干旱胁迫程度增加,播种当年及生长第 2 年中,根茎型、直根型、根蘖型苜蓿地上、地下部 ABA 含量均显著增加,IAA 和 ZT 含量均显著降低; GA_3 含量播种当年显著下降而生长第 2 年显著增加。播种当年,随干旱胁迫加剧,地上、地下部 IAA/

ABA、 GA_3 /ABA 和 $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ 比值及干质量均显著下降;生长第 2 年地上、地下部 IAA/ABA 比值显著降低, GA_3 /ABA 和 $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ 比值基本呈先升高后降低趋势。ABA 与 GA_3 、IAA、ZT、地上、地下部干质量基本呈显著或极显著负相关。同一干旱胁迫下,地上、地下部 IAA/ABA、 GA_3 /ABA 和 $(IAA+GA_3+ZT)/ABA$ 比值基本表现为根茎型苜蓿最低,直根型最高,综合表明直根型苜蓿较根茎型和根蘖型苜蓿在应对干旱胁迫时适应能力较差。

参 考 文 献:

- [1] RAPPARINI F, PEÑUELAS J. Mycorrhizal fungi to alleviate drought stress on plant growth [M]. New York: Springer New York, 2014: 21-42.
- [2] 郭宾会,戴毅,宋丽.干旱下植物激素影响作物根系发育的研究进展 [J]. 生物技术通报, 2018, 34(7): 48-56.
GUO B H, DAI Y, SONG L. Research progress on the effects of phytohormones on crop root system development under drought condition [J]. Biotechnology Bulletin, 2018, 34(7): 48-56.
- [3] 武维华. 植物生理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 266-277.
WU W H. Plant physiology textbooks [M]. Beijing: Science Press, 2003: 266-277.
- [4] SHI H T, CHEN L, YE T T, et al. Modulation of auxin content in *Arabidopsis* confers improved drought stress resistance [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2014, 82: 209-217.
- [5] 周芳,刘恩世,赵平娟,等.干旱胁迫对苗期木薯内源激素含量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(5): 238-244.
ZHOU F, LIU E S, ZHAO P J, et al. Impacts of drought stress on content of endogenous phytohormones at seedling stage of cassava [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(5): 238-244.
- [6] SKIRYCZ A, INZÉ D. More from less: Plant growth under limited water [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2010, 21(2): 197-203.
- [7] 李海洋,李爱学,王成,等.盐胁迫对苗期向日葵内源激素含量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(6): 92-97.
LI H Y, LI A X, WANG C, et al. Effects of salt stress on endogenous hormone contents in sunflower seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(6): 92-97.
- [8] 南丽丽,师尚礼,郭全恩,等.甘肃荒漠灌区播量和行距对紫花苜蓿营养价值的影响 [J]. 草业学报, 2019, 28(1): 108-119.
NAN L L, SHI S L, GUO Q E, et al. Effects of seeding rate and row spacing on nutritional value of alfalfa in the arid oasis region of Gansu Province [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(1): 108-119.
- [9] 刘志鹏,杨青川,呼天明.侧根型紫花苜蓿遗传基础及其育种研究进展 [J]. 中国草地, 2003, 25(3): 66-71.
LIU Z P, YANG Q C, HU T M. Research advance of genetic basic and breeding for branch-rooted alfalfa [J]. Chinese Journal of Grassland, 2003, 25(3): 66-71.
- [10] 李冰月,南丽丽,温素军,等.刈割强度对不同根型苜蓿主要非结构性碳水化合物含量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(2): 172-177, 210.
LI B Y, NAN L L, WEN S J, et al. Effects of different cutting inten-

sities on main non-structural carbohydrate content of different root-type alfalfa[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2021, 39(2): 172-177, 210.

[11] 南丽丽,师尚礼,郭全恩,等.不同根型苜蓿根颈变化特征分析[J].中国生态农业学报,2012,20(7):914-920.

NAN L L, SHI S L, GUO Q E, et al. Analysis of dynamic variations in crown characteristics of different root-type alfalfa plants [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2012, 20(7): 914-920.

[12] 南丽丽,师尚礼,张建华.不同根型苜蓿根系发育能力研究[J].草业学报,2014,23(2):117-124.

NAN L L, SHI S L, ZHANG J H. Study on root system development ability of different root-type alfalfa [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2014, 23(2): 117-124.

[13] 南丽丽,师尚礼,郭全恩,等.根茎型清水苜蓿鲜草产量及营养价值评价[J].中国草地学报,2012,34(5):63-68.

NAN L L, SHI S L, GUO Q E, et al. Assess on fresh forage yield and nutritive value of rhizomatous *Medicago sativa* L.cv.Qingshui[J]. Chinese Journal of Grassland, 2012, 34(5): 63-68.

[14] 南丽丽,师尚礼,朱新强,等.不同根型苜蓿苗期对干旱胁迫的生理耐受性分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(5):106-110.

NAN L L, SHI S L, ZHU X Q, et al. Physiological change of different root types of alfalfa under drought stress at seedling stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(5): 106-110.

[15] 南丽丽,师尚礼,陈建纲,等.不同根型苜蓿根系对低温胁迫的响应及其抗寒性评价[J].中国生态农业学报,2011,19(3):619-625.

NAN L L, SHI S L, CHEN J G, et al. Field evaluation of the response and resistance to low temperature of alfalfa root with different root types during over-wintering [J]. Chinese Journal of Eco-agriculture, 2011, 19(3): 619-625.

[16] 王杏,周小倩,刘超,等.高效液相色谱法同时测定果蔬中 6 种植物激素的残留[J].食品安全质量检测学报,2018,9(20):5376-5380.

WANG X, ZHOU X Q, LIU C, et al. Determination of 6 kinds of plant hormones residues in fruits and vegetables by high performance liquid chromatography [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2018, 9(20): 5376-5380.

[17] 马宗桓,毛娟,魏居灿,等.施氮时期对葡萄叶片光合生理及内源激素水平的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(5):86-93.

MA Z H, MAO J, WEI J C, et al. Effects of Nitrogen application timing on photosynthetic physiology and endogenous hormones in grape leaves [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 86-93.

[18] 张明生,谢波,谈锋.水分胁迫下甘薯内源激素的变化与品种抗旱性的关系[J].中国农业科学,2002,35(5):498-501.

ZHANG M S, XIE B, TAN F. Relationship between changes on endogenous hormone of sweetpotato under water stress and drought resistance [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(5): 498-501.

[19] VERSLUES P E, ZHU J K. Before and beyond ABA: upstream sensing and internal signals that determine ABA accumulation and response under abiotic stress [J]. Biochemical Society Transactions, 2005, 33(Pt 2): 375-379.

[20] IKEGAMI K, OKAMOTO M, SEO M, et al. Activation of abscisic acid biosynthesis in the leaves of *Arabidopsis thaliana* in response to water deficit [J]. Journal of Plant Research, 2009, 122(2): 235-243.

[21] SCHUSSLER J R, BRENNER M L, BRUN W A. Relationship of endogenous abscisic Acid to sucrose level and seed growth rate of soybeans [J]. Plant Physiology, 1991, 96(4): 1308-1313.

[22] 张海燕,段文学,解备涛,等.不同时期干旱胁迫对甘薯内源激素的影响及其与块根产量的关系[J].作物学报,2018,44(1):126-136.

ZHANG H Y, DUAN W X, JIE B T, et al. Effects of drought stress at different growth stages on endogenous hormones and its relationship with storage root yield in sweetpotato [J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(1): 126-136.

[23] 刘长海,周莎莎,邹养军,等.干旱胁迫条件下不同抗旱性苹果砧木内源激素含量的变化[J].干旱地区农业研究,2012,35(5):94-98.

LIU C H, ZHOU S S, ZOU Y J, et al. Changes of endogenous hormones contents of two different drought-tolerant *Malus* rootstocks in response to drought stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 35(5): 94-98.

[24] 王霞,侯平,尹林克,等.土壤缓慢水分胁迫下柽柳植物内源激素的变化[J].新疆农业大学学报,2000,23(4):41-43.

WANG X, HOU P, YIN L K. Change of hormone of tamarix under slow soil-water stress [J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2000, 23(4): 41-43.

[25] 满达,宛涛,蔡萍,等.干旱胁迫对差巴嘎蒿苗期内源激素含量的影响[J].中国草地学报,2017,39(3):44-48, 120.

MAN D, WAN T, CAI P, et al. Effects of drought stress on content of endogenous phytohormones of artemisia halodendron at seedling stage [J]. Chinese Journal of Grassland, 2017, 39(3): 44-48, 120.

[26] JACKSON M B. Hormones and development change in plants subjected to submergence or soil water logging [J]. Aquatic Botany, 1990,38(1):49-72.

[27] 王晓娇,蒙美莲,曹春梅,等.水分胁迫对马铃薯出苗期根系生理特性及内源激素 IAA,ABA 含量的影响[J].东北师大学报(自然科学版),2018,50(2):103-109.

WANG X J, MENG M L, CAO C M, et al. Effects of water stress on physiological characteristics and endogenous hormone IAA and ABA contents in seedling root of potato [J]. Journal of Northeast Normal University(Natural Science Edition), 2018, 50(2): 103-109.

[28] 苏亚拉其其格,樊明寿,贾沙沙,等.干旱胁迫对马铃薯移栽组培苗内源激素含量的影响[J].干旱地区农业研究,2019,37(1):227-232.

Su Ya La Qi Qi Ge, FAN M S, JIA S S, et al. Effects of drought stress on endogenous hormone content in transplanted tissue culture potato seedlings [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(1): 227-232.