

doi : 10. 16473/j. cnki. xblykx1972. 2018. 06. 004

# 根际高温对德钦苜蓿形态特征及水分状况的影响\*

李孟南<sup>1</sup>, 张誉稳<sup>1</sup>, 毕玉芬<sup>2</sup>, 赵雁<sup>1</sup>

(1. 云南农业大学园林园艺学院, 云南 昆明 650201; 2. 云南农业大学动物科学与技术学院, 云南 昆明 650201)

**摘要:** 为探明德钦苜蓿对根际高温胁迫的响应, 采用二因素随机区组设计, 恒温 and 变温各设 5 个温度和 5 个取样时间, 分析根际温度对云南地方品种德钦苜蓿形态特征和水分状况的影响。结果表明: 根际高温影响德钦苜蓿的外观质量。根际温度高于 25℃ 时德钦苜蓿的株高、总叶数和叶宽的累计增长率减小, 地上部分生长受到抑制; 25–30℃ 时根系的长度及根毛新生显著增加, 两者的增幅分别介于 13.93%–40.69% 和 2 283.31%–4 868.58% 之间; 40± 胁迫 72h 后, 植株上部叶片失水萎靡、反卷, 下部叶片完全黄化、焦枯、脱落, 地下部分变细、变软, 停止新生根产生, 40℃ 为德钦苜蓿生长的上限温度。叶片和根系的相对含水量随胁迫温度的升高和胁迫时间的延长而下降, 但根系相对含水量降幅较叶片小; 此时叶片和根系的相对电导率升高。

**关键词:** 根际温度; 高温胁迫; 德钦苜蓿; 二因素随机区组设计; 形态特征; 水分状况

**中图分类号:** S 541<sup>+</sup>.1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672–8246 (2018) 06–0022–08

## Effects of High Rhizosphere Temperature Stress on Morphological Characteristics and Water Status of ‘Deqin’ *Medicago sativa* L.

LI Meng-nan<sup>1</sup>, ZHANG Yu-wen<sup>1</sup>, BI Yu-fen<sup>2</sup>, ZHAO Yan<sup>1</sup>

(1. College of Horticulture and Landscape, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201, P. R. China;

2. College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming Yunnan 650201, P. R. China)

**Abstract:** To reveal the response of *Medicago sativa* L. under high rhizosphere temperature stress, by using two factors randomized block design, 5 temperatures and 5 sampling time under constant and variable temperature, this study analyzed the morphological characteristics and water status of *Medicago sativa* L. ‘Deqin’ under different rhizosphere temperature. The results showed that visual quality of alfalfa was influenced by high rhizosphere temperature. The accumulative growth rate of plant height, total number of leaves and leaf width of alfalfa decreased while the rhizosphere temperature was higher than 25℃, and the growth of aboveground part would be inhibited. However, the root length and roots regeneration significantly increased at 25–30℃, with ranging 13.93%–40.69% and 2 283.31%–4 868.58%, respectively. Leaves were dehydration and revolute at top of plant but etiolation, defoliation and scorch at bottom, furthermore, roots were thinner and softer than before and no new roots growth anymore at 40℃ after 72h treatment, and the ceiling temperature was 40℃ for alfalfa growth. The relative water content of leaves and roots decreased with the increasing of stress temperature and the prolongation of stress time, but the decrease rate of roots was a little bit slighter than that of leaves, meanwhile the electrolytic leakage of leaves and roots were increased.

**Key words:** rhizosphere temperature; high temperature stress; ‘Deqin’ *Medicago sativa* L.; two factors randomized block design; morphological characteristics; water status

\* 收稿日期: 2018–05–21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31660683), 云南省教育厅科研基金项目 (2016YJS060)。

第一作者简介: 李孟南 (1993–), 女, 研究生, 主要从事园林植物资源利用与创新研究。E-mail: 956352262@qq.com

通讯作者简介: 赵雁 (1974–), 女, 副教授, 博士, 主要从事园林植物和草种质资源与育种研究。E-mail: zhaoyan@ynau.edu.cn

土壤温度影响植物根系物理、化学及生物过程，是土壤呼吸最重要的驱动因子<sup>[1-2]</sup>。气温和土温存在较强的相关性<sup>[3]</sup>，0-20cm 土层温度易受大气温度的影响<sup>[4]</sup>，5cm 深的土温与 1m、7m 和 38m 高处的气温呈正相关 ( $R^2 = 0.96-0.97$ )<sup>[5-6]</sup>。0-25cm 土层的根际温度<sup>[7]</sup>超过  $25\pm$ 时，将影响植株的生长<sup>[8]</sup>。研究表明，与地上部分相比，根系对温度变化更敏感<sup>[9]</sup>，根际高温比空气高温对植物的影响更大<sup>[10]</sup>。根际高温影响小麦 (*Triticum aestivum*)、黄瓜 (*Cucumis sativus*)、苹果 (*Malus pumila*)、匍匐剪股颖 (*Agrostis stolonifera*) 等多种植物的生长发育<sup>[11]</sup>、光合作用<sup>[12]</sup>、呼吸作用<sup>[13]</sup>、离子吸收<sup>[14]</sup>、抗氧化酶活性<sup>[15]</sup>和激素水平<sup>[16]</sup>。

紫花苜蓿 (*Medicago sativa* L.) 是优质的豆科 (Leguminosae) 牧草<sup>[17]</sup>，具有抗性强、花期长、低养护和根系发达的优点，在南方四季常绿，观赏价值较高，是理想的园林景观地被植物和生态护坡植物<sup>[18-19]</sup>，但南方高温天气制约了紫花苜蓿的推广和应用。由于紫花苜蓿约 78% 的侧根发生于 0-20cm 的土层<sup>[20]</sup>，60%-90% 的根系生物量分布于 0-30cm 的土层<sup>[21]</sup>，其根系的生长发育受气温影响较大。前人对空气高温影响紫花苜蓿地上部分生长发育进行了探索<sup>[22-25]</sup>，但鲜见根际高温影响紫花苜蓿生长的研究报道。本研究以云南地方品种德钦苜蓿 ('Deqin') 为材料，分析不同根际温度对其形态特征和水分状况的影响，为德钦苜蓿进一步推广利用以及开展紫花苜蓿耐热性评价和育种工作提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

材料为德钦苜蓿。

### 1.2 幼苗培养和试验设计

采用纸培法将消毒的德钦苜蓿种子浸种萌芽后，移栽至花盆，栽培基质为灭菌泥炭土，置于人工气候箱中，在温度为 25/20℃ (昼温/夜温)、光周期为 16h/8h (白天/黑夜)、相对湿度为 65%、光照强度为  $400\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$  的条件下栽培 12 周，每 2d 浇霍格兰营养液 200mL，上下左右移动花盆位置。将健康、长势一致的植株移入根际温度为 18/16℃ (CK) 的 20 孔水培箱，箱外用锡箔纸和聚乙烯气泡垫包裹，箱内安置增氧泵 24h 运作。适应 7d 后，水培箱底放置加热棒进行胁迫处理。

采用二因素随机区组设计，用恒温和变温 2 种方式对德钦苜蓿进行根际高温胁迫，各设 5 个温度梯度，恒温为 18/18℃ (昼温/夜温，对照，CK1)、25/25℃、30/30℃、35/35℃、40/40℃，变温为 18/16℃ (对照，CK2)、25/22℃、30/27℃、35/32℃、40/37℃。其余生长条件不变。取样时间设 5 个水平，胁迫 0h、12h、24h、48h、72h 后取样测定相关指标。所有处理均重复 3 次，每次取样不少于 3 株苗。

### 1.3 测定方法

#### 1.3.1 形态指标

根据处理时间进行观察，记录样株的生长状况，分别测定叶宽<sup>[26]</sup>、叶片与主茎夹角<sup>[27]</sup>、总叶数<sup>[28]</sup>、株高<sup>[26]</sup>、根系长度及根毛新生数<sup>[29]</sup>。

#### 1.3.2 生理指标

相对含水量 (RWC) 和相对电导率 (EL) 的测定参照赵雁等<sup>[30]</sup>的方法。

#### 1.3.3 高温胁迫指标

高温胁迫期间被测指标的相对增长率 = (测量值 - 对照值) / 对照值  $\times 100\%$ ，正值表示增加，负值表示下降<sup>[22]</sup>。

### 1.4 数据分析

所有试验数据采用 Excel 2012 进行初步统计和 SPSS 18.0 进行多重比较和方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 根际高温对德钦苜蓿植株形态的影响

根际高温影响德钦苜蓿植株形态，但恒温和变温两种处理的影响并无明显差异。处理 72h 后，在恒温 25/25℃ 和变温 25/22℃ 处理条件下，德钦苜蓿植株外形无明显变化；温度升至恒温 30/30℃ 和变温 30/27℃ 时，部分植株的下部叶片开始出现叶尖黄化、叶缘焦枯的现象；在恒温 35/35℃ 和变温 35/32℃ 胁迫下，多数植株叶片褪绿黄化、叶缘焦枯；植株在恒温 40/40℃ 和变温 40/37℃ 胁迫下受害严重，上部叶片失水萎靡、反卷，下部叶片完全黄化、焦枯，叶片开始脱落，根系变软且呈现暗褐色。

### 2.2 根际高温对德钦苜蓿地上部分生长的影响

在恒温和变温条件下，温度因子显著影响德钦苜蓿株高、总叶数、叶宽、叶片与主茎夹角 ( $P < 0.01$ )。时间因子对株高、总叶数、叶宽无影响，对叶片与主茎夹角影响显著 ( $P < 0.01$ )。仅恒温下

温度与时间因子对叶片与主茎夹角存在交互 ( $P < 0.01$ ), 其余温度与时间之间无交互作用 (表1)。

株高在恒温 25/25℃ 和变温 25/22℃ 时, 显著低于对照 (表2); 在恒温 40/40℃ 和变温 40/37℃ 时, 株高累计增长率最低, 分别为对照的 2.89% 和 4.84%。总叶数在恒温 25/25℃ 和变温 30/27℃ 时显著降低, 但在变温 25/22℃ 时有小幅上升。温度继续升高, 恒温处理的德钦苜蓿出现不同程度落

叶, 恒温 40/40℃ 时总叶数为负。叶宽在恒温 30/30℃ 和变温 30/27℃ 时显著降低, 仅分别为对照的 19.84% 和 18.99%, 在恒温 40/40℃ 和变温 40/37℃ 时降到最低, 累计增长率分别为 -10.86% 和 -9.84%。叶片与主茎夹角在变温 30/27℃ 时夹角显著增加, 40/37℃ 时累计增长率最大, 达 62.98%; 在恒温 40/40℃ 时叶片与主茎夹角累计增长率最大, 达 73.52%。

表1 根际高温胁迫下德钦苜蓿形态指标和生理指标方差分析

Tab. 1 Variance analysis of high rhizosphere temperature stress on morphological and physiological index of 'Deqin' *Medicago sativa* L.

指标	恒温			变温		
	根际温度	胁迫时间	根际温度×胁迫时间	根际温度	胁迫时间	根际温度×胁迫时间
株高	29.64**	0.02	0.01	22.99**	0.03	0.01
总叶数	12.51**	0.09	0.02	17.42**	0.09	0.01
叶宽	27.19**	0.01	0.07	97.91**	0.01	0.15
叶片与主茎夹角	78.46**	31.04**	4.37**	49.16**	7.87**	1.16
根长	27.97**	0.09	0.02	52.80**	0.32	0.10
根毛新生	85.22**	96.00**	9.88**	85.75**	94.16**	11.62**
叶相对电导率	61.39**	52.47**	5.68**	44.10**	42.44**	4.32**
根相对电导率	151.49**	89.48**	7.17**	86.49**	30.69**	2.91**
叶相对含水量	11.63**	18.32**	3.12**	9.35**	12.38**	2.04*
根相对含水量	6.04**	15.16**	0.84	6.73**	14.53**	0.54

注: \*\*表示差异极显著 ( $P < 0.01$ ), \*表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表2 根际高温胁迫下德钦苜蓿地上部分形态指标增长率的变化

Tab. 2 High rhizosphere temperature stress on growth rate changing of 'Deqin' *Medicago sativa* L. above-ground morphological index

形态指标	根际温度 /℃	根际温度胁迫处理时间/h					累计增长率 /%
		0h	12h	24h	48h	72h	
株高	18/18	0.00±0.00	0.35±0.23	1.33±0.32	2.04±0.56	3.21±0.63	6.93±0.43 c
	25/25	0.00±0.00	0.24±0.15	0.78±0.32	1.23±0.13	1.92±0.19	4.17±0.63 b
	30/30	0.00±0.00	0.00±0.00	0.21±0.16	0.53±0.20	0.86±0.14	1.60±0.23 a
	35/35	0.00±0.00	0.00±0.00	0.14±0.12	0.21±0.04	0.20±0.15	0.55±0.08 a
	40/40	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.10±0.08	0.10±0.08	0.20±0.12 a
		0.00±0.00 A	0.59±0.00 A	2.46±0.00 AB	4.11±0.00 B	6.29±0.00 C	
	18/16	0.00±0.00	0.34±0.12	1.16±0.55	1.92±0.74	3.19±1.06	6.61±1.52 d
	25/22	0.00±0.00	0.32±0.17	0.61±0.16	1.25±0.01	2.17±0.18	4.35±0.31 c
	30/27	0.00±0.00	0.00±0.00	0.34±0.11	0.72±0.49	1.08±0.24	2.14±0.76 b
	35/32	0.00±0.00	0.00±0.00	0.12±0.09	0.24±0.13	0.31±0.15	0.67±0.37 ab
总叶数	40/37	0.00±0.00	0.00±0.00	0.12±0.07	0.10±0.06	0.10±0.06	0.32±0.16 a
		0.00±0.00 A	0.66±0.00 A	2.35±0.00 B	4.23±0.00 B	6.85±0.00 C	
	18/18	0.00±0.00	0.93±0.67	4.24±0.56	7.51±0.52	12.86±2.09	25.54±1.26 d
	25/25	0.00±0.00	0.92±0.82	3.03±1.05	5.32±1.07	8.34±0.50	17.61±2.79 c
	30/30	0.00±0.00	0.35±0.11	1.54±0.97	2.87±0.93	4.82±0.76	9.58±1.50 bc
	35/35	0.00±0.00	0.00±0.00	0.66±0.54	1.21±0.89	2.20±1.76	4.07±2.31 b
	40/40	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-0.52±0.27	-0.52±0.27 a
		0.00±0.00 A	2.20±0.00 A	9.47±0.00 B	16.91±0.00 B	27.70±0.00 C	
	18/16	0.00±0.00	1.02±0.67	4.23±0.51	7.76±0.43	13.22±2.33	26.23±1.80 c
	25/22	0.00±0.00	1.77±1.01	5.13±0.52	9.81±1.06	15.70±2.22	32.41±3.85 c
30/27	0.00±0.00	0.44±0.34	1.75±0.73	3.48±0.68	5.62±1.37	11.29±2.17 b	
35/32	0.00±0.00	0.21±0.18	0.83±0.59	1.40±0.48	2.32±0.25	4.76±0.91 ab	
40/37	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.84±0.81	0.84±0.81 a	
	0.00±0.00 A	3.44±0.00 AB	11.94±0.00 B	22.45±0.00 C	37.70±0.00 D		

续表2

形态指标	根际温度 / $^{\circ}\text{C}$	根际温度胁迫处理时间/h					累计增长率 /%
		0h	12h	24h	48h	72h	
叶宽	18/18	0.00±0.00	1.42±0.96	2.70±1.38	3.97±0.32	4.71±1.18	12.80±1.40 c
	25/25	0.00±0.00	1.26±0.40	1.82±0.65	3.50±0.18	4.15±0.79	10.73±1.89 c
	30/30	0.00±0.00	0.22±0.20	0.34±0.24	0.95±0.22	1.03±0.31	2.54±0.30 b
	35/35	0.00±0.00	0.11±0.08	0.00±0.00	-0.43±0.19	-0.72±0.21	-1.04±0.58 b
	40/40	0.00±0.00	-0.64±0.31	-1.53±0.43	-3.83±1.29	-4.86±0.37	-10.86±1.18 a
		0.00±0.00 A	2.37±0.00 B	3.33±0.00 B	4.61±0.00 C	4.31±0.00 C	
	18/16	0.00±0.00	1.45±0.87	2.72±0.73	3.81±1.21	4.55±0.54	12.53±0.93 c
	25/22	0.00±0.00	1.21±0.23	1.77±0.63	3.17±1.42	3.91±1.17	10.06±1.16 c
	30/27	0.00±0.00	0.13±0.02	0.52±0.23	0.82±0.44	0.91±0.22	2.38±0.16 b
	35/32	0.00±0.00	0.10±0.06	0.00±0.00	-0.42±0.24	-0.64±0.37	-0.96±0.25 b
叶片与主茎夹角	40/37	0.00±0.00	-0.71±0.54	-1.66±0.11	-3.02±0.49	-4.45±0.70	-9.84±1.21 a
		0.00±0.00 A	2.18±0.00 B	3.35±0.00 C	4.36±0.00 D	4.28±0.00 D	
	18/18	0.00±0.00	0.00±0.00	4.01±1.15	4.34±2.17	4.63±1.94	12.98±3.23 a
	25/25	0.00±0.00	2.05±1.06	4.16±2.08	6.13±0.07	6.82±3.46	19.16±4.34 a
	30/30	0.00±0.00	3.61±1.82	6.04±2.84	9.08±1.03	12.56±1.64	31.29±3.52 a
	35/35	0.00±0.00	3.63±1.80	6.62±1.09	9.64±0.89	13.29±1.82	33.18±1.57 a
	40/40	0.00±0.00	5.16±2.86	10.30±2.57	23.22±2.64	34.84±2.96	73.52±4.12 b
		0.00±0.00 A	14.45±1.43 B	31.13±2.01 C	52.41±1.87 D	72.14±2.54 E	
	18/16	0.00±0.00	0.00±0.00	4.10±1.10	4.12±2.40	4.81±1.15	13.03±1.18 a
	25/22	0.00±0.00	1.43±0.13	3.55±1.19	4.23±1.17	4.90±1.25	14.11±1.21 a
30/27	0.00±0.00	1.32±0.19	3.24±1.07	6.57±1.25	8.46±3.07	19.59±2.69 b	
35/32	0.00±0.00	2.44±0.81	6.74±2.36	7.90±1.01	10.35±0.98	27.43±1.87 b	
40/37	0.00±0.00	4.76±0.98	11.77±3.08	20.03±3.69	26.42±2.39	62.98±1.85 c	
	0.00±0.00 A	9.95±0.69	19.40±2.31 C	42.85±1.58 D	54.94±1.96 E		

注：小写字母表示横向差异显著 ( $P<0.05$ )；大写字母表示纵向差异显著 ( $P<0.05$ )，下同。

德钦苜蓿株高分别在恒温处理48h以及变温处理24h时显著上升。总叶数在处理24h后显著增加。在恒温和变温胁迫下，12h后叶宽、叶片与主茎夹角显著变化。

### 2.3 根际高温对德钦苜蓿地下部分生长的影响

在恒温和变温条件下，温度和时间因子均显著影响根毛新生 ( $P<0.01$ )，温度与时间存在互作 ( $P<0.01$ )。温度因子对根长影响显著 ( $P<0.01$ )，时间因子对根长无影响，温度与时间无交互作用 (表3)。

随根际温度的升高，根长和新生根毛量的变化趋势为先上升后下降 (表3)。根长和新生根毛量在恒温30/30 $^{\circ}\text{C}$ 和变温30/27 $^{\circ}\text{C}$ 时显著高于其余根际温度 ( $P<0.05$ )。此后，温度升高抑制根的伸长生长和新根产生，在恒温40/40 $^{\circ}\text{C}$ 和变温40/37 $^{\circ}\text{C}$ 时降至最低 ( $P<0.05$ )，根长累计增长率仅分别为-0.8%和-0.1%，并且没有新生根毛。在恒温和变温胁迫下，12h后根毛新生数显著上升；24h后

根长显著增加 ( $P<0.05$ )。

### 2.4 根际高温对德钦苜蓿相对含水量 (RWC) 的影响

在恒温和变温条件下，温度和时间均显著影响叶片和根系的RWC ( $P<0.01$ )，仅叶片RWC在温度与时间因子间存在互作 ( $P<0.01$ ) (表1)。德钦苜蓿叶片和根系在同一温度下，随着时间的延长，其RWC均呈下降趋势，而随温度的上升，下降幅度增大。相比根系，叶片RWC下降幅度更大。在恒温和变温胁迫下，12h后叶片和根系的RWC均显著降低 ( $P<0.05$ )；72h后RWC均降至最低。在恒温25/25 $^{\circ}\text{C}$ 和变温25/22 $^{\circ}\text{C}$ 处理72h时，叶片RWC分别比对照下降了7.06%和5.63%，根系RWC降幅仅为4.16%和3.00% (图1, A、B、C、D)。在恒温40/40 $^{\circ}\text{C}$ 和变温40/37 $^{\circ}\text{C}$ 胁迫72h后，叶片RWC降到最低，降幅分别为11.57%和9.45%；此时根系RWC也降到最低，降幅分别为8.01%和6.76% (图1, A、B、C、D)。

表3 根际高温胁迫下德钦苜蓿地下部分形态指标增长率

Tab. 3 High rhizosphere temperature stress on growth rate changing of 'Deqin' *Medicago sativa* L. under-ground morphological index

形态指标	根际温度/℃	根际温度胁迫处理时间/h					累计增长率/%
		0h	12h	24h	48h	72h	
根长	18/18	0.00±0.00	0.00±0.00	0.82±0.40	1.91±0.39	3.25±1.16	5.98±1.75 b
	25/25	0.00±0.00	0.74±0.24	2.93±0.46	4.46±2.04	5.80±1.95	13.93±3.23 c
	30/30	0.00±0.00	2.23±0.73	6.03±0.57	9.05±1.69	11.31±2.07	28.62±3.96 d
	35/35	0.00±0.00	0.60±0.21	1.22±0.35	2.44±0.72	3.73±0.69	7.99±0.54 b
	40/40	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-0.41±0.04	-0.43±0.27	-0.84±0.46 a
		0.00±0.00 A	3.75±0.00 A	11.00±0.00 B	17.45±0.00 B	23.66±0.00 C	
	18/16	0.00±0.00	0.00±0.00	1.24±0.41	2.07±0.40	3.60±0.71	6.91±1.29 b
	25/22	0.00±0.00	0.87±0.10	2.61±0.12	4.40±0.65	6.22±0.58	14.10±1.63 c
	30/27	0.00±0.00	3.93±0.68	8.95±0.98	11.41±0.71	16.40±1.39	40.69±2.09 d
	35/32	0.00±0.00	0.72±0.04	1.55±0.30	3.03±0.69	3.84±0.55	9.14±0.46 bc
40/37	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	-0.10±0.26	-0.10±0.26 a	
	0.00±0.00 A	5.52±0.00 A	14.35±0.00 B	20.91±0.00 C	29.96±0.00 D		
根毛新生	18/18	0.00±0.00	72.30±4.77	154.11±25.27	287.20±23.42	389.09±16.76	902.70±43.54 b
	25/25	0.00±0.00	153.31±11.63	450.00±39.34	680.00±25.05	1000.00±20.18	2283.31±108.22 c
	30/30	0.00±0.00	247.13±49.81	621.26±32.73	1030.00±109.02	1465.00±208.14	3363.39±246.62 d
	35/35	0.00±0.00	75.21±6.27	150.00±8.87	215.23±34.08	300.00±6.67	740.44±35.15 b
	40/40	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00 a
		0.00±0.00 A	547.95±23.74 B	1375.37±51.27 C	2212.10±89.77 D	3154.09±147.01 E	
	18/16	0.00±0.00	76.42±5.80	166.13±28.24	300.00±22.01	400.00±19.36	942.55±31.55 ab
	25/22	0.00±0.00	284.14±8.41	669.27±9.46	1053.12±51.44	1538.31±54.87	3544.84±96.33 b
	30/27	0.00±0.00	438.28±8.38	869.07±1.70	1538.20±50.00	2023.03±11.10	4868.58±48.93 c
	35/32	0.00±0.00	117.61±7.85	291.25±7.32	421.06±26.41	552.29±75.06	1382.21±92.20 ab
40/37	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00 a	
	0.00±0.00 A	916.45±33.68 B	1995.72±26.73 C	3312.38±45.59 D	4513.63±76.53 E		

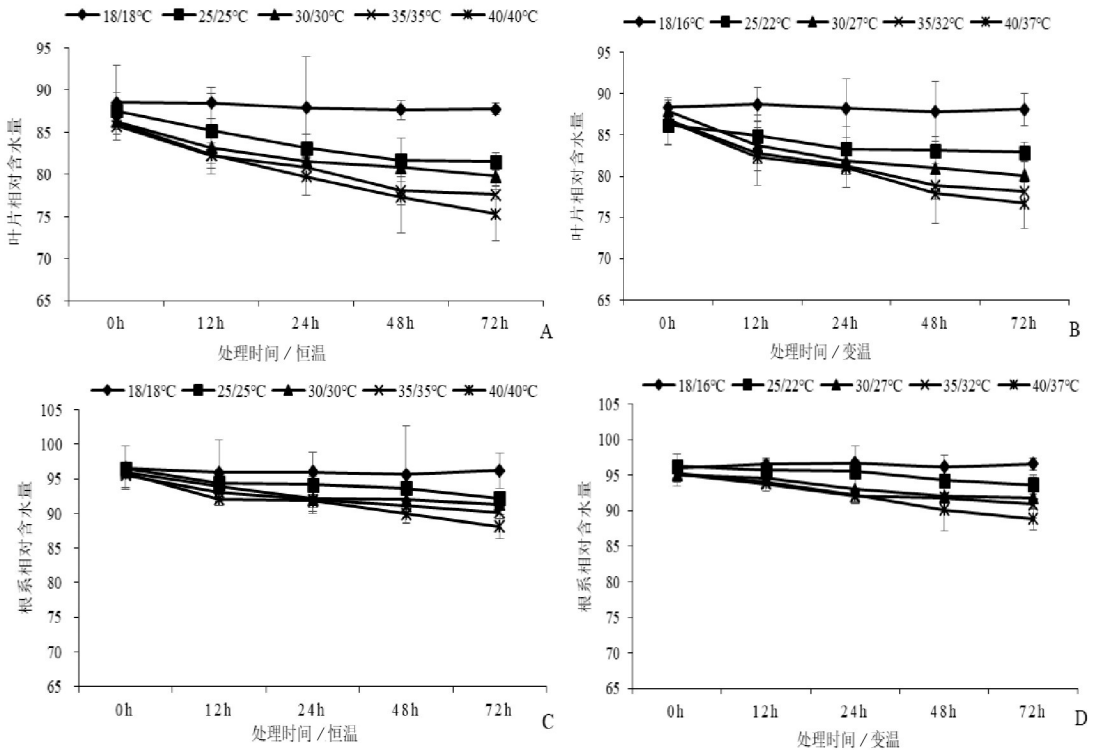


图1 根际高温对德钦苜蓿叶片和根系相对含水量的影响

注: A 为恒温处理下叶片 RWC; B 为变温处理下叶片 RWC; C 为恒温处理下根系 RWC; D 为变温处理下根系 RWC

Fig. 1 High rhizosphere temperature stress on leaf and root of 'Deqin' *Medicago sativa* L. relative water content

## 2.5 根际高温对德钦苜蓿相对电导率 (EL) 的影响

在恒温和变温条件下, 温度和时间均显著影响叶片和根毛的 EL 值 ( $P < 0.01$ ), 且因子间存在互作 ( $P < 0.01$ ) (表 1)。叶片和根系的 EL 都随着根际温度的上升及胁迫时间的延长而升高。在恒温和变温胁迫下, 12h 后叶片和根系的 EL 均显著升高 ( $P < 0.05$ ); 72h 后 EL 值升至最高。与对照相比, 在恒

温 25/25°C 和变温 25/22°C 胁迫 72h 后, 叶片 EL 分别增加了 81.94%、77.61%; 在恒温 40/40°C 和变温 40/37°C 处理下增幅达 115.06%、97.32% (图 2, A、B)。根系 EL 在恒温 30/30°C 和变温 30/27°C 胁迫下分别比对照增加了 120.89% 和 92.86%; 在恒温 40/40°C 和变温 40/37°C 处理 72h 后增幅最大, 达 196.73%、185.58% (图 2, C、D)。

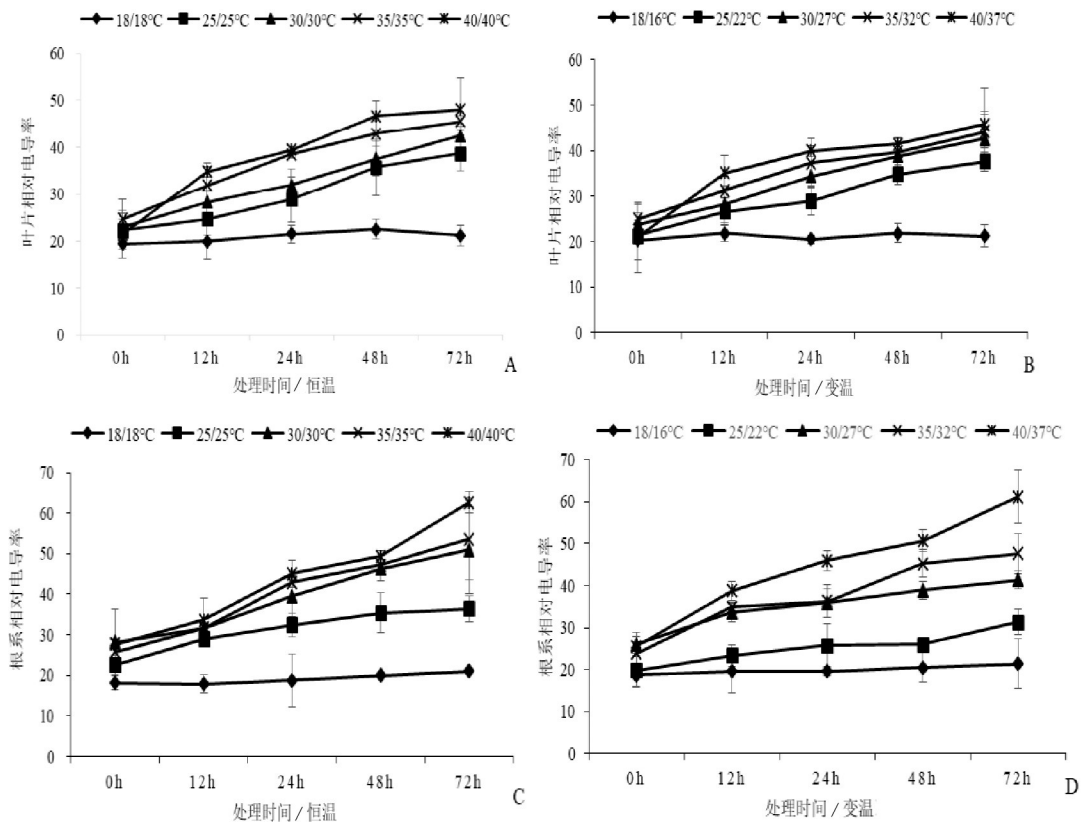


图 2 根际高温对德钦苜蓿叶片和根系相对电导率的影响

注: A 为恒温处理下叶片 EL; B 为变温处理下叶片 EL; C 为恒温处理下根系 EL; D 为变温处理下根系 EL

Fig. 2 High rhizosphere temperature stress on conductivity of 'Deqin' *Medicago sativa* L. leaf and root

## 3 结论与讨论

### 3.1 根际高温对德钦苜蓿植株外形和生长的影响

形态变化是植物对高温胁迫最直接的反应<sup>[31]</sup>, 根际高温对植株形态以及地上/地下部分的生长具有显著的影响<sup>[32]</sup>。德钦苜蓿在高于 25°C 根际高温条件下, 地上部分生长受抑制, 出现叶片发黄、卷曲、焦边、茎叶下垂等症状, 叶宽、总叶数和株高增长急剧下降, 这与生菜 (*Lactuca sativa*)<sup>[33]</sup>、辣椒 (*Capsicum annuum*)<sup>[34]</sup>、冬小麦<sup>[35]</sup> 等多数植物的研究结果一致。此外根际温度高于 25°C, 则匍匐翦股颖的根和新生根毛停止生长<sup>[36]</sup>, 一品红

(*Euphorbia pulcherrima*) 根系停止活动<sup>[37]</sup>, 番茄 (*Lycopersicon esculentum*) 根系的长度、表面积和体积均显著降低<sup>[38]</sup>。但德钦苜蓿在白昼根际温度为 25–30°C 时, 根系的长度及新生根毛数却显著增加, 这一现象在向日葵 (*Helianthus annuus*)<sup>[39]</sup>、棉花 (*Gossypium hirsutum*)<sup>[40]</sup>、大豆 (*Glycine max*)<sup>[41]</sup> 上有报道, 根系并不是被动地受根际温度的影响, 而是通过反馈调节系统, 进行功能补偿作用对不良根际高温做出适应性反应, 以减少伤害<sup>[42]</sup>, 但德钦苜蓿的具体调节机制尚不清楚。在 40°C 的根际温度下, 德钦苜蓿株高、总叶数、叶宽、根长和根毛新生几乎停止增长, 这与郭传友等<sup>[43]</sup> 对彩椒 (*Color pepper*)、冯玉龙等对番茄<sup>[44]</sup>

和苋菜 (*Amaranthus tricolor*) 的根际高温研究结果一致, 40℃是德钦苜蓿生长的上限温度。

### 3.2 根际高温对德钦苜蓿植株水分状况的影响

根际高温加速根木质化, 降低吸水面积和速率, 影响植物水分吸收和体内水分运输<sup>[41]</sup>, 进而影响细胞膜的稳定性导致细胞内电解质的渗漏<sup>[45]</sup>, 这在番茄<sup>[46]</sup>、生菜<sup>[33,47]</sup>和黄瓜<sup>[10,48]</sup>等植物上已得到证实。根际高温处理后, 德钦苜蓿的叶片与根系 RWC 均呈现下降趋势, 同时 EL 增大, 但叶片的 RWC 降幅大于根系, 这可能是由于叶片蒸腾面积与根系吸水面积之比增大<sup>[10]</sup>或是因为根际高温改变根系细胞膜的生理生化代谢, 影响根细胞的热稳定性, 从而降低吸收水分的能力<sup>[49]</sup>。根际高温影响德钦苜蓿植株的水分状况。

### 参考文献:

[1] 唐庆兰, 任世奇, 项东云, 等. 尾巨桉萌芽林土壤呼吸变化及其与土壤温度和土壤含水率的关系[J]. 西部林业科学, 2015, 44(2): 69-73.

[2] 刘斌, 鲁绍伟, 高东, 等. 物理性环境因素对淮北区杨树人工林土壤呼吸的影响[J]. 西部林业科学, 2014, 43(6): 148-153.

[3] 陈超, 周广胜. 1961-2010年阿拉善左旗气温和地温的变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 91-103.

[4] 张俊鹏, 冯棣, 曹彩云, 等. 覆膜棉田土壤温度变化特征与地表温度估算[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(12): 12-18.

[5] 梁颖颖. 毛竹林土壤碳素周转特性及其影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[6] 侯建花, 李桥, 徐小军, 等. 利用气温进行统计回归预测土温[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(5): 55-59.

[7] 宋敏丽, 温祥珍, 李亚灵. 根际高温对植物生长和代谢的影响综述[J]. 生态学杂志, 2010, 29(11): 2258-2264.

[8] 连兆煌. 无土栽培原理与技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.

[9] 尹金迁, 赵垦田, 邹林红. 基质和温度对巨柏移植苗木根系生长发育的影响[J]. 西部林业科学, 2017, 46(5): 87-92.

[10] Moon J H, Kang Y G, Suh H D. Effect of root-zone cooling on the growth and yield of cucumber at supraoptimal air temperature[J]. Acta Horticulturae, 2006, 761(761): 271-274.

[11] 任志雨. 根区温度对日光温室黄瓜生长发育和生理生化代谢的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2002.

[12] 冯玉龙, 刘恩举. 根系温度对番茄的影响(II) - 根系温度对番茄光合作用和水分代谢的影响[J]. 植物研究, 1996, 16(2): 214-218.

[13] Rachmilevitch S, Huang B, Lambers H. Assimilation and allocation of carbon and nitrogen of thermal and nonthermal

Agrostis species in response to high soil temperature[J]. New Phytologist, 2006, 170(3): 479-490.

[14] Gur A, Bravdo B, Mizrahi Y. Physiological responses of apple trees to supraoptimal root temperature[J]. Physiologia Plantarum, 1972, 27(2): 130-138.

[15] 裴红英, 张永清, 上官铁梁. 根区温度胁迫对小麦抗氧化酶活性及根苗生长的影响[J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2006, 20(2): 78-81.

[16] Du Y C, Tachibana S. Effect of supraoptimal root temperature on ABA levels in cucumber plants and its control by ABA applied to roots[J]. Acta Horticulturae, 1995(394): 227-234.

[17] 春亮, 闫志坚, 路艳峰. 中国苜蓿植物资源概述[J]. 中国野生植物资源, 2009, 28(5): 6-9.

[18] 樊海燕. 植物明星-紫花苜蓿最新管理种植技术[J]. 科技创业月刊, 2000(1): 29.

[19] 杜毅. 缀花草地在高速公路绿化中的应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.

[20] 万素梅, 胡守林, 黄勤慧, 等. 不同紫花苜蓿品种根系发育能力的研究[J]. 西北植物学报, 2004, 24(11): 2048-2052.

[21] 马树升, 刘明香. 紫花苜蓿根系对提高土壤抗冲性能的研究[J]. 山东水利专科学校学报, 1998(4): 181-185.

[22] 王荟, 赵雁, 邵辰光, 等. 高温胁迫对德钦紫花苜蓿形态指标和生理特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学版), 2013, 28(6): 765-768.

[23] 刘大林, 张华, 曹喜春, 等. 夏季高温胁迫对紫花苜蓿部分生理生化指标的影响[J]. 草地学报, 2013, 21(5): 933-937.

[24] 李德锋, 李朴芳, 马保罗, 等. 温控条件下高温胁迫对紫花苜蓿地上部分生长的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 758-762.

[25] 韩瑞宏, 赵大华, 陈晶晶, 等. 不同苜蓿种质资源苗期耐热性综合评价[J]. 中国草地学报, 2015, 37(3): 48-54.

[26] 李荣, 王玉佳, 何承刚, 等. 干热胁迫对紫花苜蓿形态特征及光合色素含量的影响[J]. 草原与草坪, 2015(1): 37-43.

[27] 丰光, 景希强, 李妍妍, 等. 玉米穗上叶与主茎夹角性状的数量遗传研究[J]. 玉米科学, 2012, 20(1): 53-66.

[28] 常会宁, 王文换. 羊茅黑麦草和无芒雀麦叶片生长动态规律研究[J]. 中国草地学报, 2002, 24(1): 18-21.

[29] 弋良朋, 马健, 李彦. 3种荒漠盐生植物根系及根毛形态特征的比较研究[J]. 植物研究, 2007, 27(2): 204-211.

[30] 赵雁, 车伟光, 毕玉芬. “德钦”紫花苜蓿苗期耐热性综合评价[J]. 北方园艺, 2015(20): 69-73.

[31] 傅杨, 杨柳青, 吴红强, 等. 高温胁迫下大苞景天的形态特征及生理响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(4): 56-59.

[32] 池浩. 三种外源物质对根际高温胁迫下黄瓜幼苗生理特性的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2015.

[33]高丽红,李式军. 适宜根际温度缓解生菜地上部高温伤害的机理[J]. 南京农业大学学报,1996,19(2):34-39.

[34]Dodd I C, He J, Turnbull C G, *et al.* The influence of supra-optimal root-zone temperatures on growth and stomatal conductance in *Capsicum annuum* L. [J]. Journal of Experimental Botany, 2000, 51(343):239.

[35]刘炜,杨君林,许安民,等. 不同根区温度对冬小麦生长发育及养分吸收的影响[J]. 干旱地区农业研究,2010,28(4):197-201.

[36]Huang B, Liu X, Fry J D. Effects of high temperature and poor soil aeration on root growth and viability of creeping bentgrass[J]. Crop Science, 1998, 38(6):1618-1622.

[37]麦德恩. 一品红常见温度障碍及改善方法[J]. 中国花卉园艺,2004(20):42-46.

[38]李胜利,师晓丹,夏亚真,等. 水冷式苗床根际降温效果及其对番茄幼苗生长的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(7):212-218.

[39]Szaniawski R K. Adaptation and functional balance between shoot and root activity of sunflower plants grown at different root temperatures. [J]. Annals of Botany, 1983, 51(4):453-459.

[40]Reddy V R, Reddy K R, Wang Z. Temperature and aldicarb effects on cotton root growth and development [J]. Biotronics Reports of Biotron Institute Kyushu University, 1997, 26:1-11.

[41]Zonetti P D C, Suzuki L S, Bonini E A, *et al.* High

temperatures on root growth and lignification of transgenic glyphosate-resistant soybean [J]. Agrociencia, 2012, 46(6):557-565.

[42]冯玉龙,刘恩举,孙国斌. 根系温度对植物的影响(I)-根温对植物生长及光合作用的影响[J]. 东北林业大学学报,1995,23(3):63-69.

[43]郭传友,于芬. 根温对彩椒苗期生长的影响[J]. 江西农业大学学报,2003,25(1):30-32.

[44]冯玉龙,姜淑梅,邵侠. 根系温度对苋菜生长及光合特性的影响[J]. 植物研究,2000,20(2):180-185.

[45]赵昕,李玉霖. 高温胁迫下冷地型草坪草几项生理指标的变化特征[J]. 草业学报,2001,10(4):85-91.

[46]Falah M A F, Wajima T, Yasutake D, *et al.* Responses of root uptake to high temperature of tomato plants (*Lycopersicon esculentum* Mill.) in soil-less culture [J]. International Journal of Agricultural Technology, 2010, 12:36-41.

[47]李润儒,朱月林,高垣美智子,等. 根区温度对水培生菜生长和矿质元素含量的影响[J]. 上海农业学报,2015(3):48-52.

[48]郝婷,丁小涛,余纪柱,等. 根际温度对黄瓜幼苗生长及生理生化指标的影响[J]. 西北植物学报,2014,34(6):1245-1251.

[49]Ingram D L. Modeling high temperature and exposure time interactions on *Pittosporum tobira* root cell membrane thermostability [J]. Journal of the American Society for Horticultural Science, 1985, 111:270-272.

(编辑: 李甜江)

[上接第14页]

[25]Azuma H, Toyota M, Asakawa Y, *et al.* Chemical divergence in floral scents of Magnolia and allied genera (Magnoliaceae) [J]. Plant Species Biology, 1997, 12:69-83.

[26]Azuma H, Thien LB, Kawano S. Molecular phylogeny of *Magnolia* (Magnoliaceae) inferred from cpDNA sequences and evolutionary divergence of the floral scents [J]. Journal of Plant Research, 1999, 112:291-306.

[27]Azuma H, Thien L B, Kawano S. Molecular phylogeny of *Magnolia* based on chloroplast DNA sequence data (*trnK* intron, *psbA-trnH* and *atpB-rbcL* intergenic spacer regions) and floral scent chemistry [A]. In: Liu Y-H, Fan H-M, Chen Z-Y, *et al.* Proceeding of the international symposium on the family Magnoliaceae [M]. Beijing: Science Press, 2000:219-227.

[28]Azuma H, Rico-Gray V, Garcia-Franco JG, *et al.* Close relationship between Mexican and Chinese *Magnolia* (subtropical disjunct of Magnoliaceae) inferred from molecular and floral scent analyses [J]. Acta Phytotaxonomica et Geobotanica, 2004, 55(3):167-180.

[29]傅大立,赵东欣,孙金花,等. 10种国产玉兰属植物

挥发油成分及系统学意义[J]. 林业科学,2005,41(3):68-74.

[30]李石生,谭宁华,周俊,等. 木兰科植物鹅掌楸和合果木的化学成分及其分类学意义[J]. 云南植物研究,2001,23(1):115-120.

[31]Fujita Y. Classification and phylogeny of the genus *Asarum* viewed from the constituents of essential oils [J]. Botanical Magazine (Tokyo), 1966, 79(940-941):783-790.

[32]Bramley PM. Isoprenoid metabolism [A]. In: Dey PM, Harborne JB. Plant biochemistry [M]. London: Academic Press, 1997:417-437.

[33]刘玉壶. 木兰科分类系统的初步研究[J]. 植物分类学报,1984,22(2):89-109.

[34]李捷. 木兰科的分支分析[J]. 云南植物研究,1997,19(4):342-356.

[35]Li J, Conran J G. Phylogenetic relationships in Magnoliaceae subfam. Magnolioideae: a morphological cladistic analysis [J]. Plant Systematics and Evolution, 2003, 242:33-44.

(编辑: 成伶俐)