

# 滴灌与施肥对河西灌区紫花苜蓿光合生理特性和干物质质量的影响

马琦, SHAHZAD Ali, 贾倩民, 常生华, 张程, 侯扶江

(兰州大学草种创新与草地农业生态系统国家重点实验室, 兰州大学农业农村部草牧业创新重点实验室, 兰州大学草地农业教育部工程研究中心, 兰州大学草地农业科技学院, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**为探明不同滴灌量下施肥模式对紫花苜蓿光合特性和干物质质量的影响,本研究设置3种滴灌量(I3:160 mm;I2:80 mm;I1:0 mm)和6种施肥模式(F1:磷120 kg/hm<sup>2</sup>+氮75 kg/hm<sup>2</sup>;F2:磷60 kg/hm<sup>2</sup>+氮75 kg/hm<sup>2</sup>;F3:不施磷+氮75 kg/hm<sup>2</sup>;F4:磷120 kg/hm<sup>2</sup>+不施氮;F5:磷60 kg/hm<sup>2</sup>+不施氮;F6:不施氮磷),于2020年在河西灌区开展田间试验。结果表明:1)I3处理下各茬次紫花苜蓿的株高显著高于I1,较I1分别提高了23.02%、28.69%和19.63%,F1的各茬次紫花苜蓿单株总干物质质量显著高于F6,分别是F6的4.27、3.44和4.96倍。2)I3处理下紫花苜蓿的叶绿素a、b含量、类胡萝卜素含量和叶绿素总含量高于I2和I1,施肥处理下,F2的平均叶绿素含量最高。3)I3F1的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度显著高于I1F6,所有处理中,I3F1的紫花苜蓿单株根、茎、叶及总干物质质量均获得最大值。综上,I3F1是提升紫花苜蓿光合性能和干物质质量的适宜栽培模式。

**关键词:**紫花苜蓿;滴灌;施肥模式;光合生理特性;干物质质量

**中图分类号:**S541+.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2022)04-0072-11

**DOI:**10.13817/j.cnki.cyycp.2022.04.010



紫花苜蓿(*Medicago sativa*)是世界上种植最广泛的豆科牧草,具有适应性强、高产优质、生态功能齐全等特点,其产业发展在农牧业生产和生态环境建设中发挥着重要作用<sup>[1-3]</sup>。甘肃河西灌区由于地势平坦、日照充足、灌溉条件良好等特点,已发展成为全国紫花苜蓿生产的核心优势区域,但该区农业灌溉方式以大水漫灌为主,随着我国畜牧业的发展和对优质畜产品需求的增加,紫花苜蓿的种植面积迅速扩大,致使该种植区水资源的短缺问题日益严峻<sup>[4-5]</sup>。滴灌是干

旱缺水地区有效的节水灌溉方式之一,能够减少地表无效蒸发,同时与施肥相结合可显著改善作物的生产性能并提高肥料利用率<sup>[6-7]</sup>,探索种植紫花苜蓿适宜灌溉条件和施肥模式,对维护区域内生态平衡和我国畜牧业的发展有着重要战略意义。

光合作用是作物生命代谢的重要组成部分,受部分矿质元素的调节,影响作物的干物质积累和产量<sup>[8]</sup>。氮磷等矿质元素能通过参与光能传递和转化来调控作物的光合作用,其中,氮是参与光和电子传递的重要元素,增加氮素可提高作物叶绿素含量,满足作物碳氮代谢对能量的需求,进而提高作物的光能利用率和生产性能<sup>[8-10]</sup>。磷直接参与光合磷酸化和碳同化过程<sup>[8]</sup>,增施磷肥有利于作物叶片光合产物的运输与积累,促进作物的代谢活动,提高抗逆性<sup>[11-12]</sup>,但不合理施肥会造成肥料养分流失,污染环境,还会影响植物的光合作用,进而影响植物的产量及品质,而水分和养分的定量关系是合理制定灌溉施肥方案的重要依据<sup>[13-14]</sup>。基于此,本试验在不同滴灌量和施肥模式下

**收稿日期:**2021-06-18; **修回日期:**2021-07-08

**基金项目:**国家自然科学基金(31901389);兰州大学“双一流”引导专项-队伍建设经费-科研启动费(561119204);2018年度甘肃省科技重大专项计划项目(18ZD2FA009)

**作者简介:**马琦(1997-),女,甘肃庆阳人,硕士研究生。

E-mail: maq20@lzu.edu.cn

贾倩民为通信作者。E-mail: guqm@lzu.edu.cn

分析紫花苜蓿的光合特性及干物质积累,揭示滴灌和施肥影响紫花苜蓿干物质质量的光合生理机制,以期为河西灌区紫花苜蓿节水增产栽培、优化施肥制度及农业可持续发展提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于甘肃省临泽县兰州大学草地农业试验站,地处N 39°15',E 100°02',海拔1 390 m,属于温带大陆性干旱气候,年均温7.16℃,年平均降水量121.5 mm,降水主要集中在7~9月,占全年降水量的60%以上,年均潜在蒸发量2 337.6 mm。土壤类型为盐渍化草甸土,0~30 cm土壤有机质含量8.3 g/kg,碱解氮含量30.2 mg/kg,有效磷含量21.5 mg/kg,速效钾含量126.6 mg/kg。pH值8.65,容重1.33 g/cm。

### 1.2 试验设计和田间管理

试验采用裂区试验设计,主区为0(I1)、80(I2)和160 mm(I3)3个滴灌量,副区为6种施肥模式,分别为磷120 kg/hm<sup>2</sup>+氮75 kg/hm<sup>2</sup>(F1)、磷60 kg/hm<sup>2</sup>+氮75 kg/hm<sup>2</sup>(F2)、不施磷+氮75 kg/hm<sup>2</sup>(F3)、磷120 kg/hm<sup>2</sup>+不施氮(F4)、磷60 kg/hm<sup>2</sup>+不施氮(F5)、不施氮磷(F6)。试验共18个处理,每个处理重复3次,小区面积为36 m<sup>2</sup>(9 m×4 m),各小区之间设1 m保护行。磷肥为重过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 46%),在播种前作为基肥一次性施入,氮肥为尿素(含氮量46%),在播种前和紫花苜蓿分枝期施氮处理各小区分别施入总氮量的50%。供试紫花苜蓿选用中苜一号品种,来源于中国农业科学院畜牧研究所。2020年4月22日使用点播机点播,每点播种3~5粒种子,播种深度为1~2 cm,株距为12 cm,行距为20 cm。试验地采用地面滴灌方式进行灌水,用水表控制灌水量。各小区除施肥模式和滴灌量不同外,其他田间管理措施全部相同。分别于6月9日、7月23日和10月3日对紫花苜蓿进行刈割。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶片光合指标的测定 在紫花苜蓿初花期(6月5日、7月21日和9月30日)选择晴朗天气,各小区随机选取3个植株测定光合指标。选取完全展开的健康完整叶片于上午9:00—11:00采用便携式光合仪(LI-6400,LI-COR公司,美国)测定净光合速率(photo-

tosynthetic rate,  $P_n$ )、气孔导度(stomatal conductance,  $G_s$ )、蒸腾速率(transpiration rate,  $T_r$ )和细胞间CO<sub>2</sub>浓度(intercellular CO<sub>2</sub> concentration,  $C_i$ )。

1.3.2 叶绿素含量的测定 以95%的乙醇与80%的丙酮1:1混合浸泡新鲜叶片为提取液,采用分光光度法<sup>[15]</sup>测定叶绿素含量(Chlorophyll content)。

1.3.3 株高的测定 于紫花苜蓿初花期各小区随机选取3个植株测定最底部到花序顶端的绝对距离,取平均值作为株高。

1.3.4 单株叶干重和茎干重的测定 各小区随机选取3株紫花苜蓿的一级分枝,将茎叶分离,于65℃烘箱烘至恒重后取出分别称重,取平均值作为单株叶干重和茎干重。

1.3.5 根干重的测定 分别于2020年7月4日、8月27日和10月11日以紫花苜蓿主根系为中心选取25 cm×25 cm的样方,刈割植株地上部分后,每10 cm分层取土壤和根系,深度为90 cm。每层土壤和根系装入网袋,用水流冲洗后,用镊子挑出杂质后再用清水冲洗根系,洗净后于65℃烘至恒重后称重。

### 1.4 数据处理与统计方法

采用Excel 2016软件进行数据统计,采用SPSS 20.0软件进行方差分析(Duncan法)及相关性分析,并使用Origin 2020绘制相关图形。

## 2 结果与分析

### 2.1 净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度

在各滴灌水平下,F1、F2、F3、F4和F5处理的各茬次紫花苜蓿 $P_n$ 和 $T_r$ 均显著高于F6( $P<0.05$ ),所有处理中,I3F1处理的 $P_n$ 和 $T_r$ 最高。因素水平的平均值显示,I3处理的各茬次紫花苜蓿 $P_n$ 和 $T_r$ 均显著高于I1( $P<0.05$ ),其中第1、2、3茬的 $P_n$ 较I1分别增加了27.44%、32.24%和30.96%, $T_r$ 较I1分别增加了110.98%、18.33%和149.21%。F1处理的 $P_n$ 和 $T_r$ 显著高于F2、F3、F5和F6( $P<0.05$ ),与F4差异不显著。

各滴灌水平下,F1、F2、F3和F4处理的各茬次紫花苜蓿 $G_s$ 和 $C_i$ 均显著高于F6( $P<0.05$ )(表2)。因素水平的平均值显示,I3处理的第1茬和第3茬 $G_s$ 、 $C_i$ 均显著高于I1( $P<0.05$ ),而第2茬 $G_s$ 和 $C_i$ 在3个滴灌水平下无明显差异;F1处理下各茬次 $G_s$ 显著高于F2、

F3、F5和F6( $P<0.05$ ),与F4处理差异不显著;F1处理下各茬次  $C_i$ 显著高于F6( $P<0.05$ )。所有处理中, I3F1处理的  $G_s$ 和  $C_i$ 最高,其次是I2F1,二者差异不显著。

表1 不同处理下紫花苜蓿叶片的净光合速率和蒸腾速率

Table 1 Net photosynthetic rate ( $P_n$ ) and transpiration rate ( $T_r$ ) of alfalfa leaves under different treatments

滴灌水平	施肥模式	净光合速率/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-2})$			蒸腾速率/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$		
		第1茬	第2茬	第3茬	第1茬	第2茬	第3茬
I3	F1	33.50±8.95 <sup>a</sup>	27.70±7.25 <sup>a</sup>	18.50±4.56 <sup>ab</sup>	6.66±0.38 <sup>a</sup>	8.45±0.49 <sup>a</sup>	6.53±0.38 <sup>a</sup>
	F2	29.80±1.72 <sup>abc</sup>	24.70±6.37 <sup>abcd</sup>	14.70±3.45 <sup>de</sup>	5.96±0.34 <sup>ab</sup>	7.91±0.46 <sup>ab</sup>	5.66±0.33 <sup>bc</sup>
	F3	27.60±1.59 <sup>bc</sup>	23.20±5.93 <sup>bcde</sup>	12.30±2.75 <sup>f</sup>	5.88±0.34 <sup>ab</sup>	7.70±0.44 <sup>abc</sup>	5.55±0.32 <sup>c</sup>
	F4	31.90±1.84 <sup>ab</sup>	26.70±6.96 <sup>ab</sup>	15.80±3.77 <sup>c</sup>	6.67±0.39 <sup>cde</sup>	6.42±0.37 <sup>a</sup>	6.19±0.36 <sup>a</sup>
	F5	26.70±6.96 <sup>c</sup>	22.50±5.73 <sup>cde</sup>	9.40±1.90 <sup>g</sup>	5.25±0.30 <sup>bc</sup>	5.94±0.34 <sup>de</sup>	2.98±0.17 <sup>e</sup>
	F6	21.00±5.29 <sup>de</sup>	18.40±4.53 <sup>gh</sup>	6.70±1.11 <sup>hi</sup>	3.23±0.19 <sup>d</sup>	3.20±0.18 <sup>f</sup>	1.66±0.10 <sup>fg</sup>
I2	F1	30.00±7.92 <sup>abc</sup>	26.40±6.87 <sup>abc</sup>	20.40±5.11 <sup>a</sup>	4.77±0.28 <sup>c</sup>	6.50±0.38 <sup>de</sup>	3.45±0.20 <sup>e</sup>
	F2	27.20±7.10 <sup>bc</sup>	23.50±6.02 <sup>bcd</sup>	16.30±3.92 <sup>cd</sup>	3.05±0.18 <sup>d</sup>	6.31±0.36 <sup>de</sup>	2.97±0.17 <sup>e</sup>
	F3	25.50±6.61 <sup>cd</sup>	18.30±4.50 <sup>gh</sup>	9.00±1.78 <sup>gh</sup>	1.86±0.11 <sup>e</sup>	4.18±0.24 <sup>f</sup>	1.08±0.06 <sup>gh</sup>
	F4	29.00±7.63 <sup>abc</sup>	21.30±5.38 <sup>def</sup>	13.00±2.95 <sup>ef</sup>	3.06±0.18 <sup>d</sup>	6.78±0.39 <sup>bc</sup>	1.72±0.10 <sup>fg</sup>
	F5	25.00±6.46 <sup>cd</sup>	19.40±4.82 <sup>efg</sup>	9.00±1.78 <sup>gh</sup>	1.84±0.11 <sup>e</sup>	6.01±0.35 <sup>de</sup>	1.40±0.08 <sup>g</sup>
	F6	19.30±4.79 <sup>ef</sup>	15.30±3.62 <sup>hi</sup>	5.00±0.62 <sup>ij</sup>	1.23±0.07 <sup>f</sup>	3.96±0.23 <sup>f</sup>	0.81±0.05 <sup>h</sup>
I1	F1	27.00±7.04 <sup>bc</sup>	22.20±5.64 <sup>def</sup>	17.20±4.18 <sup>bc</sup>	6.23±0.36 <sup>a</sup>	6.95±0.40 <sup>bc</sup>	5.31±0.31 <sup>c</sup>
	F2	25.80±6.69 <sup>c</sup>	20.90±5.26 <sup>def</sup>	12.90±2.92 <sup>ef</sup>	4.91±0.28 <sup>c</sup>	6.80±0.39 <sup>bc</sup>	4.59±0.27 <sup>d</sup>
	F3	20.00±5.00 <sup>ef</sup>	16.70±4.03 <sup>ghi</sup>	7.01±1.20 <sup>hi</sup>	2.23±0.13 <sup>e</sup>	6.04±0.35 <sup>de</sup>	1.32±0.08 <sup>gh</sup>
	F4	26.00±6.75 <sup>c</sup>	18.20±4.47 <sup>gh</sup>	11.00±2.37 <sup>fg</sup>	3.23±0.19 <sup>d</sup>	6.64±0.38 <sup>cde</sup>	2.19±0.13 <sup>f</sup>
	F5	19.00±4.70 <sup>e</sup>	16.60±4.00 <sup>gh</sup>	7.00±1.20 <sup>hi</sup>	1.85±0.11 <sup>e</sup>	5.57±0.32 <sup>e</sup>	1.47±0.08 <sup>g</sup>
	F6	16.00±3.83 <sup>f</sup>	13.70±3.16 <sup>i</sup>	4.00±0.34 <sup>j</sup>	1.26±0.07 <sup>f</sup>	3.94±0.23 <sup>f</sup>	0.91±0.05 <sup>h</sup>
平均	I3	28.42±1.14 <sup>A</sup>	23.87±0.96 <sup>A</sup>	12.90±1.27 <sup>A</sup>	5.57±0.43 <sup>A</sup>	6.65±0.45 <sup>A</sup>	4.76±0.45 <sup>A</sup>
	I2	26.00±1.10 <sup>A</sup>	20.70±0.88 <sup>B</sup>	12.12±1.08 <sup>A</sup>	3.29±0.30 <sup>B</sup>	5.99±0.30 <sup>A</sup>	2.63±0.42 <sup>B</sup>
	I1	22.30±0.99 <sup>B</sup>	18.05±0.78 <sup>C</sup>	9.85±1.00 <sup>B</sup>	2.64±0.29 <sup>B</sup>	5.62±0.28 <sup>B</sup>	1.91±0.24 <sup>B</sup>
	F1	30.17±1.35 <sup>A</sup>	25.43±1.40 <sup>A</sup>	18.70±0.82 <sup>A</sup>	5.89±0.65 <sup>A</sup>	7.30±0.54 <sup>A</sup>	5.10±0.73 <sup>A</sup>
	F2	27.60±1.28 <sup>BC</sup>	22.07±1.11 <sup>C</sup>	13.27±0.71 <sup>C</sup>	4.24±0.56 <sup>BCD</sup>	6.70±0.31 <sup>B</sup>	3.37±0.47 <sup>C</sup>
	F3	23.57±0.99 <sup>C</sup>	19.40±0.87 <sup>C</sup>	8.47±0.45 <sup>C</sup>	2.98±0.34 <sup>CD</sup>	5.84±0.18 <sup>B</sup>	1.95±0.26 <sup>CD</sup>
因素显著性	I	**	**	**	**	**	**
	F	**	**	**	*	**	**
	I×F	ns	ns	ns	**	**	**

注:不同小写字母代表处理间差异显著( $P<0.05$ ),不同大写字母代表平均值间差异显著( $P<0.05$ );I、F和I×F分别代表滴灌水平、施肥模式和交互作用;\*代表差异显著( $P<0.05$ );\*\*代表差异极显著( $P<0.01$ );ns代表差异不显著。下同

## 2.2 叶绿素 a、b 含量、类胡萝卜素含量和叶绿素总含量

各滴灌水平下,F2处理的第2茬紫花苜蓿叶绿素 a 含量高于F6(图 1-A)。所有处理中,第1茬紫花苜蓿叶绿素 a 含量在I3F2处理下最高,第2茬叶绿素 a 含量在I3F5出现最大值,第3茬叶绿素 a 含量在I1F2处理达到最大值。平均值显示,I3处理的第2茬和第3茬叶绿素 a 含量显著高于I1( $P<0.05$ ),较I1分别增加了13.43%和9.52%,而I2与I3处理的叶绿素 a 含量差

异不显著(图 1-B);F2的各茬次紫花苜蓿叶绿素 a 含量高于其他施肥处理(图 1-C)。

I2水平下,F5处理的第1茬叶绿素 b 含量显著高于其他处理( $P<0.05$ ),F2处理的第2茬叶绿素 b 含量显著高于其他处理( $P<0.05$ )(图 2-A)。所有处理中,I1F2处理的第3茬叶绿素 b 含量显著高于其他处理( $P<0.05$ )。平均值显示,I3处理的第1茬和第3茬紫花苜蓿叶绿素 b 含量显著高于I1( $P<0.05$ ),较I1分别增加了10.94%和43.48%,I2和I3差异不显著(图 2-

表2 不同处理下紫花苜蓿叶片的气孔导度和胞间CO<sub>2</sub>浓度  
Table 2 Stomatal conductance ( $G_s$ ) and intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) of alfalfa leaves under different treatments

滴灌水平	施肥模式	气孔导度/(mmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-2</sup> )			胞间CO <sub>2</sub> 浓度/(μmol·mol <sup>-1</sup> )		
		第1茬	第2茬	第3茬	第1茬	第2茬	第3茬
I3	F1	0.81±0.05 <sup>a</sup>	0.61±0.04 <sup>a</sup>	0.47±0.03 <sup>a</sup>	323.00±18.65 <sup>a</sup>	313.00±18.07 <sup>a</sup>	298.00±17.21 <sup>a</sup>
	F2	0.71±0.04 <sup>abc</sup>	0.52±0.03 <sup>bcd</sup>	0.35±0.02 <sup>c</sup>	303.00±17.49 <sup>a</sup>	286.00±16.51 <sup>abc</sup>	277.00±15.90 <sup>abc</sup>
	F3	0.67±0.04 <sup>bc</sup>	0.48±0.03 <sup>cd</sup>	0.22±0.01 <sup>e</sup>	294.00±16.97 <sup>a</sup>	272.00±15.70 <sup>bcd</sup>	265.00±15.30 <sup>abc</sup>
	F4	0.75±0.04 <sup>ab</sup>	0.58±0.03 <sup>ab</sup>	0.40±0.02 <sup>b</sup>	315.00±18.26 <sup>a</sup>	302.00±17.44 <sup>ab</sup>	289.00±16.21 <sup>a</sup>
	F5	0.50±0.03 <sup>d</sup>	0.37±0.02 <sup>gh</sup>	0.13±0.01 <sup>f</sup>	293.00±16.92 <sup>a</sup>	264.00±15.24 <sup>bcd</sup>	250.00±14.43 <sup>bcd</sup>
	F6	0.25±0.01 <sup>e</sup>	0.20±0.01 <sup>i</sup>	0.08±0.00 <sup>g</sup>	233.00±13.45 <sup>b</sup>	222.00±12.82 <sup>def</sup>	210.00±12.12 <sup>de</sup>
I2	F1	0.74±0.04 <sup>ab</sup>	0.54±0.03 <sup>abc</sup>	0.44±0.02 <sup>ab</sup>	316.00±18.28 <sup>a</sup>	310.00±17.90 <sup>ab</sup>	295.00±16.98 <sup>ab</sup>
	F2	0.64±0.04 <sup>bc</sup>	0.45±0.03 <sup>def</sup>	0.28±0.02 <sup>d</sup>	299.00±17.22 <sup>a</sup>	282.00±16.28 <sup>abc</sup>	272.00±15.70 <sup>abc</sup>
	F3	0.63±0.04 <sup>c</sup>	0.44±0.03 <sup>def</sup>	0.18±0.01 <sup>e</sup>	291.00±16.80 <sup>a</sup>	268.00±15.47 <sup>bcd</sup>	261.00±15.07 <sup>abc</sup>
	F4	0.71±0.04 <sup>bc</sup>	0.54±0.03 <sup>abc</sup>	0.36±0.02 <sup>bc</sup>	313.00±18.07 <sup>a</sup>	298.00±17.21 <sup>ab</sup>	294.00±16.97 <sup>ab</sup>
	F5	0.47±0.03 <sup>d</sup>	0.34±0.02 <sup>gh</sup>	0.10±0.01 <sup>fg</sup>	286.00±16.51 <sup>a</sup>	257.00±14.84 <sup>bcd</sup>	243.00±14.03 <sup>bcd</sup>
	F6	0.22±0.01 <sup>e</sup>	0.17±0.01 <sup>i</sup>	0.05±0.00 <sup>gh</sup>	226.00±13.05 <sup>b</sup>	215.00±12.41 <sup>ef</sup>	203.00±11.72 <sup>de</sup>
I1	F1	0.66±0.04 <sup>bc</sup>	0.49±0.03 <sup>cd</sup>	0.18±0.01 <sup>e</sup>	311.00±17.96 <sup>a</sup>	294.00±16.97 <sup>ab</sup>	290.00±16.74 <sup>ab</sup>
	F2	0.53±0.03 <sup>d</sup>	0.40±0.02 <sup>efg</sup>	0.08±0.00 <sup>gh</sup>	294.00±16.97 <sup>a</sup>	279.00±16.11 <sup>abc</sup>	278.00±16.05 <sup>abc</sup>
	F3	0.47±0.03 <sup>d</sup>	0.38±0.02 <sup>gh</sup>	0.07±0.00 <sup>gh</sup>	287.00±16.57 <sup>a</sup>	271.00±15.65 <sup>bcd</sup>	270.00±15.59 <sup>abc</sup>
	F4	0.65±0.04 <sup>bc</sup>	0.47±0.03 <sup>cde</sup>	0.14±0.01 <sup>f</sup>	306.00±17.67 <sup>a</sup>	292.00±16.86 <sup>ab</sup>	284.00±16.40 <sup>ab</sup>
	F5	0.12±0.01 <sup>f</sup>	0.31±0.02 <sup>h</sup>	0.06±0.00 <sup>gh</sup>	194.00±11.20 <sup>bc</sup>	234.00±13.51 <sup>cdef</sup>	229.00±13.22 <sup>cde</sup>
	F6	0.07±0.00 <sup>f</sup>	0.16±0.01 <sup>i</sup>	0.04±0.00 <sup>h</sup>	150.00±8.66 <sup>c</sup>	203.00±11.72 <sup>f</sup>	190.00±10.97 <sup>e</sup>
平均	I3	0.62±0.06 <sup>A</sup>	0.46±0.03 <sup>A</sup>	0.28±0.04 <sup>A</sup>	293.83±15.90 <sup>A</sup>	276.50±9.58 <sup>A</sup>	266.33±10.09 <sup>A</sup>
	I2	0.57±0.05 <sup>A</sup>	0.41±0.03 <sup>A</sup>	0.23±0.03 <sup>A</sup>	288.83±9.35 <sup>AB</sup>	271.67±9.24 <sup>A</sup>	261.00±9.23 <sup>A</sup>
	I1	0.42±0.04 <sup>B</sup>	0.37±0.03 <sup>A</sup>	0.09±0.01 <sup>B</sup>	257.00±9.21 <sup>B</sup>	262.17±9.03 <sup>A</sup>	256.83±9.09 <sup>B</sup>
	F1	0.74±0.06 <sup>A</sup>	0.55±0.02 <sup>A</sup>	0.35±0.05 <sup>A</sup>	317.67±17.65 <sup>A</sup>	305.67±9.31 <sup>A</sup>	293.67±8.68 <sup>A</sup>
	F2	0.63±0.03 <sup>B</sup>	0.45±0.02 <sup>B</sup>	0.24±0.04 <sup>BC</sup>	298.33±9.34 <sup>A</sup>	282.33±8.57 <sup>AB</sup>	275.67±8.01 <sup>AB</sup>
	F3	0.36±0.03 <sup>C</sup>	0.34±0.01 <sup>C</sup>	0.10±0.01 <sup>D</sup>	257.67±8.71 <sup>B</sup>	251.67±7.83 <sup>C</sup>	240.67±7.61 <sup>C</sup>
	F4	0.70±0.04 <sup>AB</sup>	0.53±0.02 <sup>A</sup>	0.30±0.04 <sup>AB</sup>	312.00±14.56 <sup>A</sup>	297.33±8.71 <sup>A</sup>	292.00±8.56 <sup>A</sup>
	F5	0.59±0.03 <sup>B</sup>	0.43±0.02 <sup>B</sup>	0.16±0.02 <sup>CD</sup>	290.67±9.15 <sup>AB</sup>	270.33±8.21 <sup>BC</sup>	265.33±7.77 <sup>B</sup>
F6	0.18±0.02 <sup>D</sup>	0.18±0.01 <sup>D</sup>	0.06±0.01 <sup>D</sup>	203.00±8.45 <sup>C</sup>	213.33±6.76 <sup>D</sup>	201.00±6.50 <sup>D</sup>	
因素显著性	I	**	**	**	**	ns	ns
	F	**	**	**	**	**	**
	I×F	ns	ns	ns	ns	ns	ns

B); F2处理的第2茬和第3茬叶绿素b含量显著高于F6( $P<0.05$ ), 较F6分别增加了29.82%和60.0%, 而第1茬叶绿素b含量与F6处理差异不显著(图2-C)。

第1茬紫花苜蓿类胡萝卜素含量在I2F1处理下最高, 第2茬在I3F5处理最高, 第3茬在I2F6处理下最高。平均值显示(图3-A), I3的第2茬和第3茬类胡萝卜素含量显著高于I1( $P<0.05$ ), 较I1分别增加了40.0%和14.29%, 3个滴灌水平下的第1茬类胡萝卜素含量差异不显著(图3-B); F2处理的第1茬紫花苜

蓿类胡萝卜素含量显著高于F4( $P<0.05$ ), 与其他处理差异不显著(图3-C)。

第1茬紫花苜蓿叶绿素总含量在I3F2和I1F2处理下最高, 第2茬在I2F2处理最高, 第3茬在I1F2处理下最高(图4-A)。因素水平的平均值显示, I3处理的第2茬和第3茬叶绿素总含量显著高于I1( $P<0.05$ ), 较I1分别增加了13.0%和13.01%, 但与I2相比, 各茬次叶绿素总含量差异不显著(图4-B); F2处理的各茬次叶绿素总含量显著高于F1和F3( $P<0.05$ ), 与F4、F5和F6差异不显著(图4-C)。

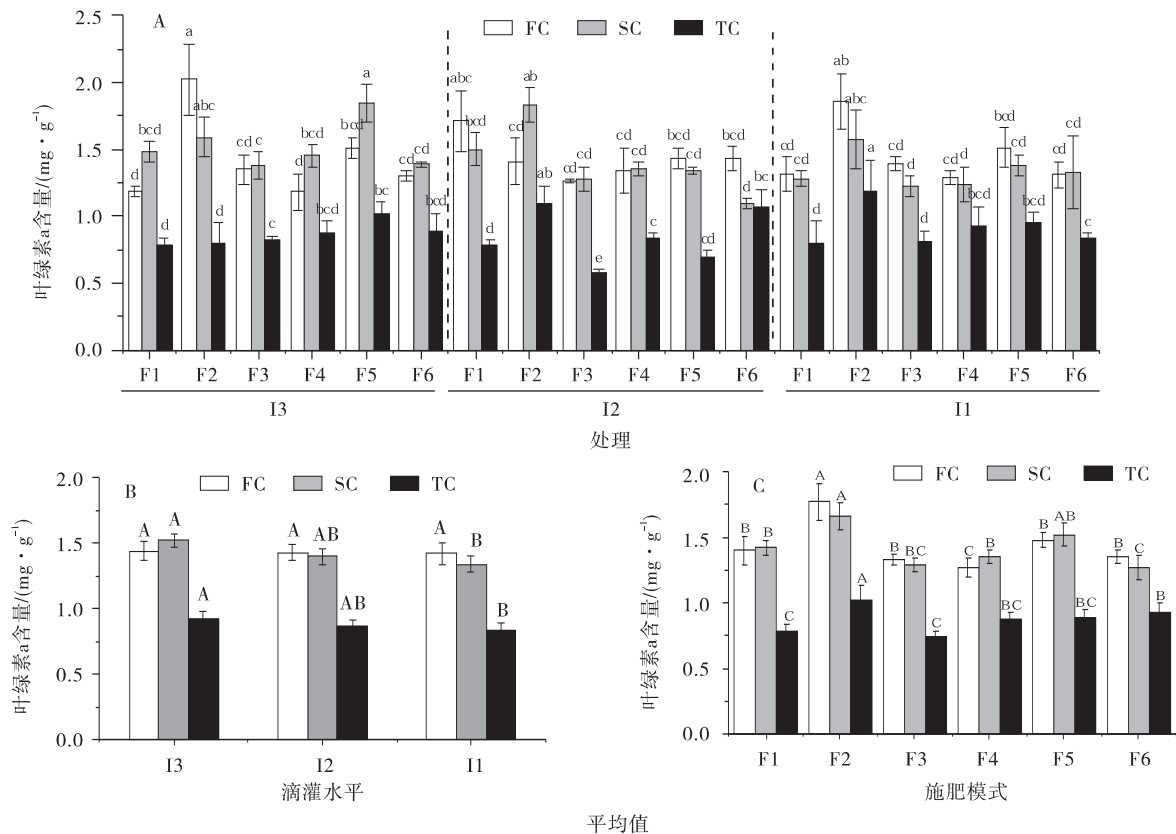


图1 不同处理下紫花苜蓿叶绿素a的含量

Fig. 1 Chlorophyll a content of alfalfa under different treatments

注:FC、SC、TC分别代表第1茬、第2茬、第3茬,不同小写字母代表处理间差异达到 $P<0.05$ 显著水平,不同大写字母代表因素水平间的差异达到 $P<0.05$ 显著水平。下同

### 2.3 株高

同一滴灌水平下,紫花苜蓿的株高均随刈割茬数的增加而降低,所有处理中,各茬次紫花苜蓿的株高均表现为I3F1高于I1F6(图5-A)。平均值显示,I3处理的各茬次紫花苜蓿株高均显著高于I1( $P<0.05$ ),较I1分别增加了23.02%、28.69%和19.63%(图5-B);施肥处理下,各茬次紫花苜蓿株高均表现为F1处理显著高于F3和F6( $P<0.05$ ),但F3和F6差异不显著(图5-C)。

### 2.4 干物质质量

所有处理中,各茬次紫花苜蓿的单株茎、叶、根干重及总干重均在I3F1处理出现最大值( $P<0.05$ ),最小值出现在I1F6处理(表3)。平均值显示,I3和I2处理下3茬紫花苜蓿单株茎、叶、根干重和总干重均显著高于I1( $P<0.05$ ),说明不灌溉情况下紫花苜蓿根、茎、叶干重和总干重显著降低;F1处理的3茬根、茎、叶干重和总干重均显著高于其他处理( $P<0.05$ ),说明紫花苜蓿单株根、茎、叶干重和总干重随施肥量的增加而增加。

表3 不同处理下紫花苜蓿各营养器官及总干物质质量

Table 3 The quantity of dry matter of the vegetative organs and total of alfalfa under different treatments

滴灌水平	氮磷 配施	根干重/g			茎干重/g			叶干重/g			总干重/g		
		第1茬	第2茬	第3茬	第1茬	第2茬	第3茬	第1茬	第2茬	第3茬	第1茬	第2茬	第3茬
I3	F1	4.40±0.25 <sup>a</sup>	4.85±0.28 <sup>a</sup>	8.36±0.48 <sup>a</sup>	11.17±0.64 <sup>a</sup>	5.20±0.30 <sup>a</sup>	11.66±0.67 <sup>a</sup>	5.26±0.30 <sup>a</sup>	4.22±0.24 <sup>a</sup>	8.20±0.47 <sup>a</sup>	20.83±1.20 <sup>a</sup>	14.27±0.82 <sup>a</sup>	28.22±1.63 <sup>a</sup>
	F2	2.14±0.12 <sup>c</sup>	3.06±0.18 <sup>c</sup>	4.90±0.28 <sup>d</sup>	6.93±0.40 <sup>d</sup>	3.30±0.19 <sup>cd</sup>	6.23±0.36 <sup>c</sup>	3.00±0.17 <sup>d</sup>	2.61±0.15 <sup>cd</sup>	5.11±0.30 <sup>c</sup>	12.07±0.70 <sup>d</sup>	8.97±0.52 <sup>cd</sup>	16.24±0.94 <sup>c</sup>

续表3

滴灌水平	氮磷配施	根干重/g			茎干重/g			叶干重/g			总干重/g		
		第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬	第 1 茬	第 2 茬	第 3 茬
I2	F3	1.33±0.08 <sup>efg</sup>	1.54±0.09 <sup>ghi</sup>	2.25±0.13 <sup>gh</sup>	4.09±0.24 <sup>f</sup>	1.97±0.11 <sup>hi</sup>	2.29±0.13 <sup>fg</sup>	2.33±0.13 <sup>fg</sup>	1.80±0.10 <sup>h</sup>	1.62±0.09 <sup>k</sup>	7.75±0.45 <sup>gh</sup>	5.31±0.31 <sup>gh</sup>	6.16±0.36 <sup>bij</sup>
	F4	2.38±0.14 <sup>c</sup>	3.40±0.20 <sup>c</sup>	6.46±0.37 <sup>b</sup>	7.99±0.46 <sup>c</sup>	3.93±0.23 <sup>b</sup>	7.76±0.45 <sup>b</sup>	3.48±0.20 <sup>c</sup>	2.79±0.16 <sup>c</sup>	5.71±0.33 <sup>b</sup>	13.85±0.80 <sup>c</sup>	10.12±0.58 <sup>c</sup>	19.93±1.15 <sup>b</sup>
	F5	1.64±0.09 <sup>de</sup>	1.96±0.11 <sup>ef</sup>	2.13±0.12 <sup>gh</sup>	4.68±0.27 <sup>f</sup>	2.88±0.17 <sup>de</sup>	3.26±0.19 <sup>e</sup>	2.62±0.15 <sup>ef</sup>	2.52±0.15 <sup>cde</sup>	2.64±0.15 <sup>e</sup>	8.94±0.52 <sup>fg</sup>	7.36±0.42 <sup>ef</sup>	8.03±0.46 <sup>fg</sup>
	F6	0.78±0.05 <sup>ij</sup>	1.17±0.07 <sup>ijk</sup>	1.62±0.09 <sup>hi</sup>	2.57±0.15 <sup>ghi</sup>	1.83±0.11 <sup>i</sup>	2.13±0.12 <sup>gh</sup>	1.31±0.08 <sup>jk</sup>	1.76±0.10 <sup>hi</sup>	1.07±0.06 <sup>lm</sup>	4.66±0.27 <sup>ijk</sup>	4.76±0.27 <sup>h</sup>	4.82±0.28 <sup>kl</sup>
	F1	3.29±0.19 <sup>b</sup>	4.39±0.25 <sup>b</sup>	5.60±0.32 <sup>c</sup>	10.18±0.59 <sup>b</sup>	4.32±0.25 <sup>b</sup>	5.51±0.32 <sup>c</sup>	4.28±0.25 <sup>b</sup>	3.66±0.21 <sup>b</sup>	3.53±0.20 <sup>d</sup>	17.75±1.02 <sup>b</sup>	12.37±0.71 <sup>b</sup>	14.64±0.85 <sup>c</sup>
	F2	1.69±0.10 <sup>d</sup>	1.79±0.10 <sup>fg</sup>	3.07±0.18 <sup>f</sup>	4.64±0.27 <sup>f</sup>	2.55±0.15 <sup>ef</sup>	3.31±0.19 <sup>e</sup>	2.53±0.15 <sup>ef</sup>	1.89±0.11 <sup>fg</sup>	2.84±0.16 <sup>fg</sup>	8.86±0.51 <sup>fg</sup>	6.23±0.36 <sup>fg</sup>	9.22±0.53 <sup>ef</sup>
I1	F3	0.95±0.05 <sup>hij</sup>	1.28±0.07 <sup>ij</sup>	1.35±0.08 <sup>j</sup>	2.74±0.16 <sup>gh</sup>	1.90±0.11 <sup>hi</sup>	2.25±0.13 <sup>fg</sup>	1.47±0.08 <sup>ij</sup>	1.25±0.07 <sup>jk</sup>	1.88±0.11 <sup>jk</sup>	5.16±0.30 <sup>ij</sup>	4.43±0.26 <sup>hi</sup>	5.48±0.32 <sup>ijk</sup>
	F4	2.35±0.14 <sup>c</sup>	2.53±0.15 <sup>d</sup>	3.91±0.23 <sup>e</sup>	6.55±0.38 <sup>de</sup>	3.45±0.20 <sup>c</sup>	4.33±0.25 <sup>d</sup>	2.78±0.16 <sup>ef</sup>	2.19±0.13 <sup>ef</sup>	3.14±0.18 <sup>ef</sup>	11.68±0.67 <sup>de</sup>	8.17±0.47 <sup>de</sup>	11.38±0.66 <sup>d</sup>
	F5	1.22±0.07 <sup>fgh</sup>	1.53±0.09 <sup>ghi</sup>	2.59±0.15 <sup>fg</sup>	4.13±0.24 <sup>f</sup>	2.11±0.12 <sup>fgh</sup>	2.55±0.15 <sup>ef</sup>	1.75±0.10 <sup>hi</sup>	1.45±0.08 <sup>ij</sup>	2.37±0.14 <sup>gh</sup>	7.10±0.41 <sup>gh</sup>	5.09±0.29 <sup>gh</sup>	7.51±0.43 <sup>gh</sup>
	F6	0.66±0.04 <sup>jk</sup>	0.76±0.04 <sup>kl</sup>	0.84±0.05 <sup>jk</sup>	1.77±0.10 <sup>hi</sup>	1.48±0.09 <sup>i</sup>	1.71±0.10 <sup>gh</sup>	1.30±0.08 <sup>jk</sup>	1.17±0.07 <sup>jk</sup>	1.27±0.07 <sup>l</sup>	3.73±0.22 <sup>jk</sup>	3.41±0.20 <sup>ij</sup>	3.82±0.22 <sup>lm</sup>
	F1	1.47±0.08 <sup>def</sup>	2.28±0.13 <sup>de</sup>	2.60±0.15 <sup>fg</sup>	5.83±0.34 <sup>e</sup>	2.47±0.14 <sup>efg</sup>	4.37±0.25 <sup>d</sup>	2.83±0.16 <sup>de</sup>	2.26±0.13 <sup>def</sup>	3.36±0.19 <sup>de</sup>	10.13±0.58 <sup>ef</sup>	7.01±0.40 <sup>ef</sup>	10.33±0.60 <sup>de</sup>
	F2	1.06±0.06 <sup>ghi</sup>	1.31±0.08 <sup>hij</sup>	1.68±0.10 <sup>hi</sup>	2.97±0.17 <sup>g</sup>	1.63±0.09 <sup>hi</sup>	1.98±0.11 <sup>gh</sup>	2.01±0.12 <sup>gh</sup>	1.25±0.07 <sup>jk</sup>	1.60±0.09 <sup>kl</sup>	6.04±0.35 <sup>hi</sup>	4.19±0.24 <sup>hi</sup>	5.26±0.30 <sup>kl</sup>
平均	F3	0.63±0.04 <sup>jk</sup>	0.81±0.05 <sup>kl</sup>	0.94±0.05 <sup>jk</sup>	2.28±0.13 <sup>ghi</sup>	0.64±0.04 <sup>j</sup>	1.36±0.08 <sup>hi</sup>	1.16±0.07 <sup>jk</sup>	0.68±0.04 <sup>l</sup>	1.00±0.06 <sup>lm</sup>	4.07±0.23 <sup>jk</sup>	2.13±0.12 <sup>k</sup>	3.30±0.19 <sup>lm</sup>
	F4	1.39±0.08 <sup>efg</sup>	1.72±0.10 <sup>fgh</sup>	2.22±0.13 <sup>gh</sup>	4.26±0.25 <sup>f</sup>	2.01±0.12 <sup>gh</sup>	2.34±0.14 <sup>fg</sup>	2.38±0.14 <sup>fg</sup>	1.39±0.08 <sup>ij</sup>	2.11±0.12 <sup>ij</sup>	8.03±0.46 <sup>g</sup>	5.12±0.30 <sup>gh</sup>	6.67±0.39 <sup>hi</sup>
	F5	0.92±0.05 <sup>hij</sup>	0.96±0.06 <sup>jk</sup>	1.42±0.08 <sup>ij</sup>	2.69±0.16 <sup>gh</sup>	0.89±0.05 <sup>j</sup>	1.56±0.09 <sup>hi</sup>	1.63±0.09 <sup>ij</sup>	0.90±0.05 <sup>l</sup>	1.30±0.08 <sup>kl</sup>	5.24±0.30 <sup>ij</sup>	2.75±0.16 <sup>jk</sup>	4.28±0.25 <sup>kl</sup>
	F6	0.41±0.02 <sup>k</sup>	0.48±0.02 <sup>l</sup>	0.65±0.03 <sup>k</sup>	1.64±0.09 <sup>i</sup>	0.53±0.03 <sup>j</sup>	0.78±0.05 <sup>i</sup>	0.95±0.05 <sup>k</sup>	0.61±0.04 <sup>l</sup>	0.66±0.04 <sup>m</sup>	3.00±0.17 <sup>k</sup>	1.60±0.09 <sup>k</sup>	2.06±0.12 <sup>m</sup>
	I3	2.11±0.28 <sup>A</sup>	2.66±0.31 <sup>A</sup>	4.29±0.62 <sup>A</sup>	6.24±0.70 <sup>A</sup>	3.19±0.29 <sup>A</sup>	5.56±0.84 <sup>A</sup>	3.00±0.30 <sup>A</sup>	2.62±0.21 <sup>A</sup>	4.06±0.62 <sup>A</sup>	11.35±1.28 <sup>A</sup>	8.47±0.80 <sup>A</sup>	13.9±2.06 <sup>A</sup>
	I2	1.69±0.22 <sup>A</sup>	2.05±0.29 <sup>A</sup>	2.89±0.39 <sup>B</sup>	5.00±0.68 <sup>A</sup>	2.64±0.24 <sup>A</sup>	3.28±0.32 <sup>B</sup>	2.35±0.25 <sup>AB</sup>	1.94±0.21 <sup>B</sup>	2.51±0.19 <sup>B</sup>	9.05±1.15 <sup>AB</sup>	6.62±0.74 <sup>A</sup>	8.68±0.90 <sup>B</sup>
因素显著性	I1	0.98±0.09 <sup>B</sup>	1.26±0.15 <sup>B</sup>	1.59±0.17 <sup>C</sup>	3.28±0.34 <sup>B</sup>	1.36±0.18 <sup>B</sup>	2.07±0.28 <sup>B</sup>	1.83±0.16 <sup>B</sup>	1.18±0.14 <sup>C</sup>	1.67±0.22 <sup>B</sup>	6.09±0.60 <sup>B</sup>	3.80±0.46 <sup>B</sup>	5.32±0.66 <sup>C</sup>
	F1	3.05±0.44 <sup>A</sup>	3.84±0.41 <sup>A</sup>	5.52±0.85 <sup>A</sup>	9.06±0.86 <sup>A</sup>	4.00±0.42 <sup>A</sup>	7.18±1.15 <sup>A</sup>	4.12±0.37 <sup>A</sup>	3.38±0.31 <sup>A</sup>	5.03±0.81 <sup>A</sup>	16.24±1.66 <sup>A</sup>	11.22±1.14 <sup>A</sup>	17.73±2.75 <sup>A</sup>
	F2	1.63±0.16 <sup>BC</sup>	2.05±0.27 <sup>BC</sup>	3.22±0.48 <sup>BC</sup>	4.85±0.59 <sup>BC</sup>	2.49±0.25 <sup>BC</sup>	3.84±0.64 <sup>BC</sup>	2.51±0.16 <sup>BC</sup>	1.92±0.20 <sup>B</sup>	3.18±0.52 <sup>BC</sup>	8.99±0.91 <sup>BC</sup>	6.46±0.72 <sup>BC</sup>	10.24±1.64 <sup>BC</sup>
	F3	0.97±0.11 <sup>DE</sup>	1.21±0.11 <sup>D</sup>	1.51±0.20 <sup>D</sup>	3.04±0.29 <sup>DE</sup>	1.50±0.22 <sup>D</sup>	1.97±0.16 <sup>CD</sup>	1.65±0.18 <sup>DE</sup>	1.24±0.17 <sup>C</sup>	1.50±0.14 <sup>D</sup>	5.66±0.57 <sup>DE</sup>	3.96±0.49 <sup>D</sup>	4.98±0.46 <sup>D</sup>
	F4	2.04±0.17 <sup>B</sup>	2.55±0.25 <sup>B</sup>	4.20±0.63 <sup>B</sup>	6.27±0.57 <sup>B</sup>	3.13±0.30 <sup>B</sup>	4.81±0.81 <sup>B</sup>	2.88±0.18 <sup>B</sup>	2.12±0.21 <sup>B</sup>	3.65±0.55 <sup>B</sup>	11.19±0.91 <sup>B</sup>	7.80±0.76 <sup>B</sup>	12.66±1.98 <sup>B</sup>
	F5	1.26±0.11 <sup>CD</sup>	1.48±0.15 <sup>CD</sup>	2.05±0.18 <sup>CD</sup>	3.83±0.32 <sup>CD</sup>	1.96±0.30 <sup>CD</sup>	2.46±0.26 <sup>CD</sup>	2.00±0.17 <sup>CD</sup>	1.62±0.24 <sup>BC</sup>	2.10±0.21 <sup>CD</sup>	7.09±0.57 <sup>CD</sup>	5.07±0.68 <sup>CD</sup>	6.61±0.62 <sup>CD</sup>
F6	0.62±0.06 <sup>E</sup>	0.80±0.10 <sup>D</sup>	1.04±0.15 <sup>D</sup>	1.99±0.16 <sup>E</sup>	1.28±0.20 <sup>D</sup>	1.54±0.20 <sup>D</sup>	1.19±0.07 <sup>E</sup>	1.18±0.17 <sup>C</sup>	1.00±0.09 <sup>D</sup>	3.80±0.26 <sup>E</sup>	3.26±0.47 <sup>D</sup>	3.57±0.42 <sup>D</sup>	
I	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
F	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	
I×F	**	**	**	**	**	**	**	*	**	**	**	**	

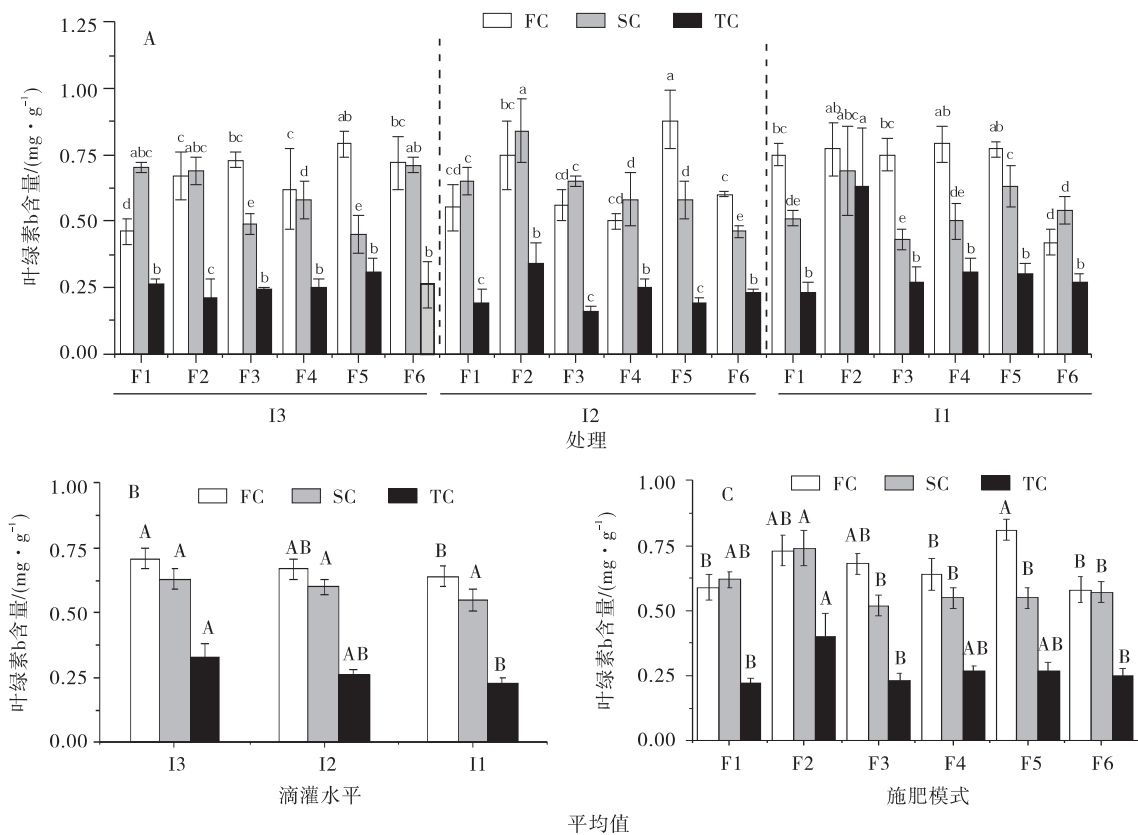


图2 不同处理下紫花苜蓿叶绿素b的含量

Fig. 2 Chlorophyll b content of alfalfa under different treatments

### 2.5 光合指标与株高、干物质量的 Pearson 相关性分析

紫花苜蓿  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  与株高、茎干重之间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 根干重、叶干重和总干重与  $T_r$ 、 $G_s$  和  $C_i$  间均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与  $P_n$  呈显著正相关关系 ( $P < 0.05$ ) (表4)。

## 3 讨论

紫花苜蓿 90% 的生物量来源于光合作用<sup>[16]</sup>。水分和养分改变时, 作物调节自身光合特性以适应外界变化<sup>[17]</sup>。本研究发现, 同一施肥模式下, I3 处理的净光合速率 ( $P_n$ )、气孔导度 ( $G_s$ )、蒸腾速率 ( $T_r$ ) 和胞间  $CO_2$  浓度 ( $C_i$ ) 高于 I2 和 I1。这是因为不灌溉或灌溉不充分时, 作物光合作用减弱, 叶片气孔的张开程度减小, 进而净光合速率减小; 另外, 蒸腾作用使作物本身水分损耗严重, 导致在进行光合作用时叶细胞羧化效率降低, 消耗了较多的  $CO_2$ , 从而使  $C_i$  降低<sup>[18-19]</sup>。这与刘军等<sup>[20]</sup>的研究结果相似。本研究中, 同一滴灌水平下, F1 处理的各茬次紫花苜蓿  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$  显著高于

F4 和 F5, 且 F1、F2 与 F3 处理的叶绿素含量和类胡萝卜素含量显著高于 F4、F5 和 F6, 说明氮磷配施改变光合参数的效果相比氮磷单施更显著, 这是由于合理的氮磷配施能提高紫花苜蓿的光饱和点, 从而增加叶绿素含量和群体叶面积指数<sup>[21]</sup>。田寿乐等<sup>[22]</sup>在板栗 (*Castanea mollissima*) 光合作用的研究中也发现类似规律。本研究中, 氮磷配施的  $C_i$  高于氮磷单施, 且不施肥处理的紫花苜蓿  $C_i$  最低; 这一结果与氮磷配施后西北羊茅 (*Festuca kryloviana*) 的  $C_i$  减小且随施磷量的增加而降低的研究结果不同<sup>[23]</sup>, 可能与不同物种间的光合响应机制差异有关<sup>[24]</sup>。另外, 本研究还发现, 在施氮  $75 \text{ kg/hm}^2$  条件下增施磷肥, 紫花苜蓿的类胡萝卜素含量、叶绿素 a、b 含量和总含量随施磷量的增加呈先升后降趋势, 一定比例的氮磷配施有利于促进叶绿素的合成, 并且提高作物的光合速率<sup>[25-26]</sup>。

肥料配施比例和灌溉量是影响作物株高和地上生物量的重要因素<sup>[27]</sup>。本研究中, 氮磷配施处理下, 各茬次紫花苜蓿的株高均表现为 F1 显著高于 F5 和 F6 ( $P < 0.05$ ), 但 F5 和 F6 差异不显著 ( $P > 0.05$ ); 可

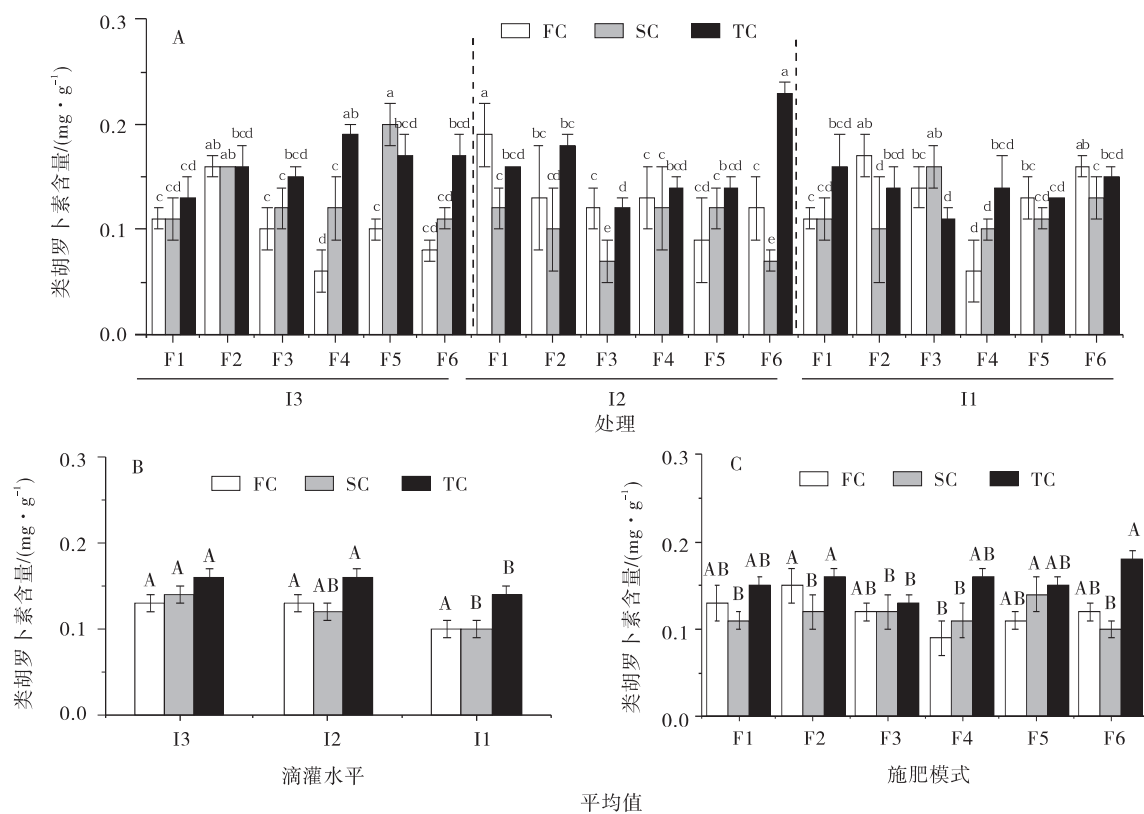


图 3 不同处理下紫花苜蓿类胡萝卜素的含量

Fig. 3 The carotenoid content of alfalfa under different treatments

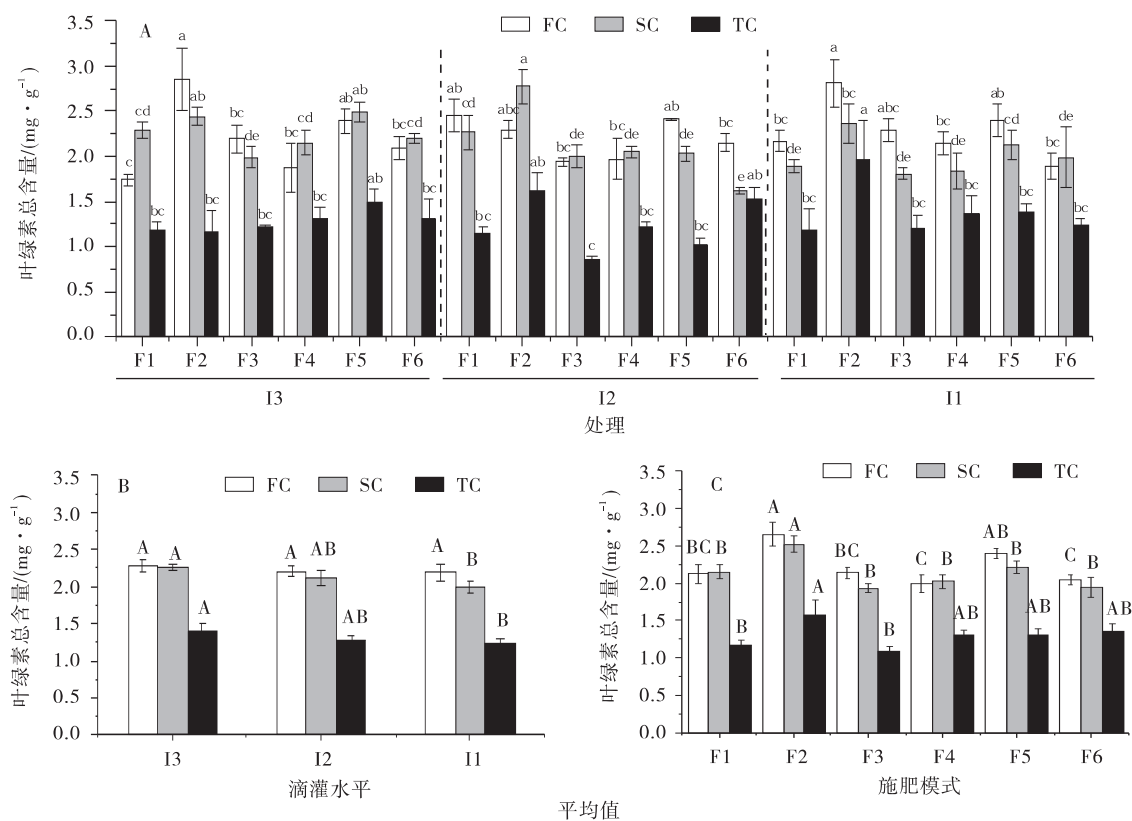


图 4 不同处理下紫花苜蓿叶绿素总含量

Fig. 4 The total chlorophyll content of alfalfa under different treatments



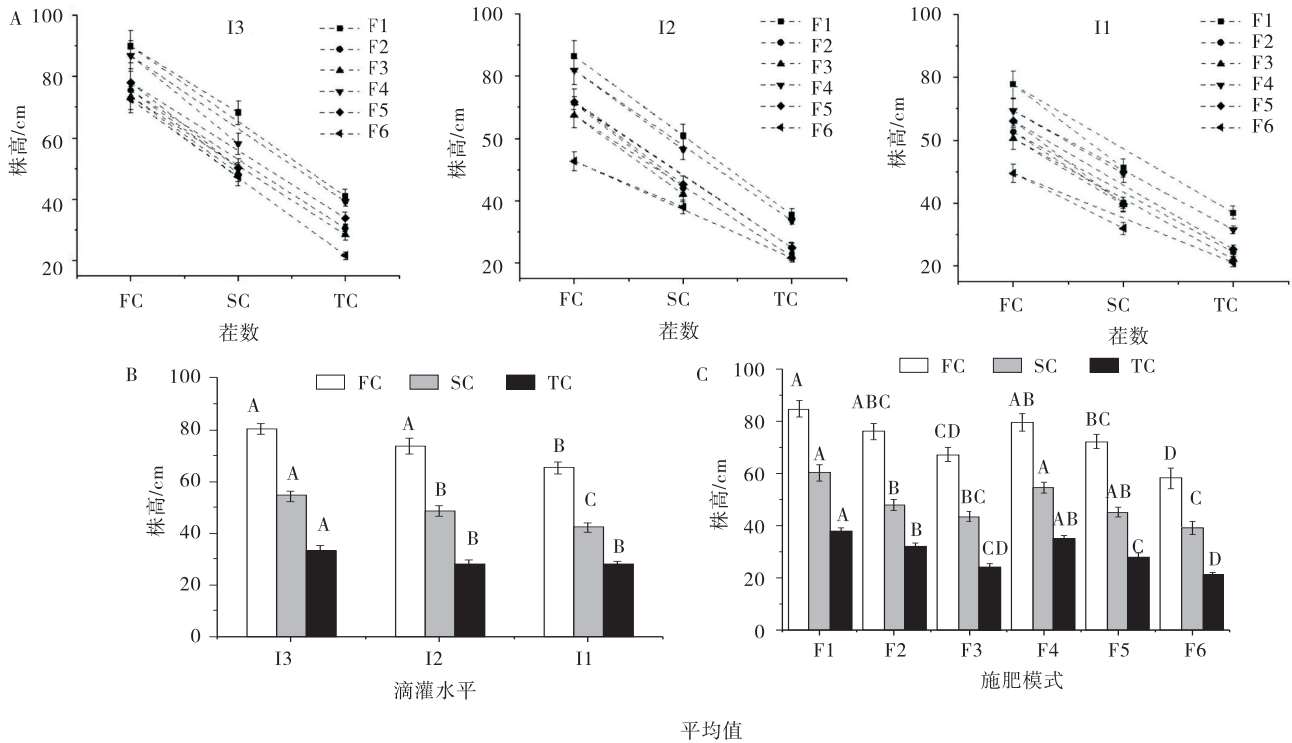


图5 不同处理下紫花苜蓿的株高

Fig. 5 Plant height of alfalfa under different treatments

表4 紫花苜蓿光合指标与株高、干物质质量的 Pearson 相关性分析

Table 4 The Pearson correlation analysis of photosynthetic index, plant height and amount of dry matter of alfalfa

	$P_n$	$T_r$	$G_s$	$C_i$
株高	0.927**	0.364**	0.833**	0.544**
根干重	0.198*	0.419**	0.321*	0.490*
茎干重	0.559**	0.359**	0.645**	0.596**
叶干重	0.373*	0.426**	0.466**	0.557**
总干重	0.430*	0.416**	0.534**	0.587**

注: \*和\*\*分别表示两变量在0.05和0.01水平显著相关

能原因有氮肥主要作用于作物的地上部分,添加适宜氮肥能促进作物茎和叶的生长,而磷肥主要对作物初期的根系起作用,对作物地上部生物量的影响不显著<sup>[28-29]</sup>;薛垠鑫等<sup>[28]</sup>在氮磷肥配施对玉米株高的影响研究中也表明,滴灌条件下氮肥显著影响株高,而磷肥影响较小。水分直接影响细胞分裂和伸长,进而影响作物的生长发育;本研究发现,同一施肥措施下,I3和I2处理的紫花苜蓿株高显著高于I1,这是由于灌水充分时紫花苜蓿茎、叶的生长加快,从而株高增加;这与刘纯等<sup>[30]</sup>的研究结果类似。本研究还发现,株高与 $P_n$ 、 $T_r$ 及 $G_s$ 之间呈极显著正相关关系,水分缺失时紫

花苜蓿叶片缩小,导致气孔张开程度减小,光合作用产物的运输速率下降,从而株高生长速度降低<sup>[31]</sup>。本研究中,I1F6处理下紫花苜蓿的根、茎、叶干重和总干重最低;土壤养分和水分不足是导致作物茎叶生长缓慢、根系发育减缓,最终干物质质量显著降低的主要原因<sup>[32-34]</sup>。本研究目前只进行了一年试验,其结果具有一定的局限性,今后将开展不同灌水施肥条件下根系分布等试验,以探索不同水肥管理下紫花苜蓿的增产效应。

## 4 结论

随滴灌水平的增加,紫花苜蓿的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均显著提高。施肥处理中,F1较F6显著提高了各茬次紫花苜蓿的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 $CO_2$ 浓度。所有处理中,各茬次紫花苜蓿的株高、单株茎叶根干重及总干物质质量均在I3F1处理(滴灌160 mm+磷120 kg/hm<sup>2</sup>+氮75 kg/hm<sup>2</sup>)下达到最高,该处理三茬总干物质质量达到63.37 g,该措施是河西地区提高紫花苜蓿光合特性和干物质质量的适宜栽培模式。

## 参考文献:

- [1] XIAO Y, ZHANG J, JIA T T, *et al.* Effects of alternate furrow irrigation on the biomass and quality of alfalfa (*Medicago sativa*) [J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 161: 147–154.
- [2] 李玉帅, 赵晓登, 陈腾达. 紫花苜蓿抗逆性最新研究进展 [J]. *农村科学实验*, 2020(5): 73–74.
- [3] 郭丰辉, 丁勇, 马文静, 等. 紫花苜蓿个体性状对土壤磷等供给能力的响应 [J]. *草原与草坪*, 2021, 41(1): 18–25.
- [4] 郭正刚, 张自和, 侯扶江. 河西走廊草地退化现状及其可控因素和分类综合治理 [J]. *中国草地*, 2002, 24(4): 54–59.
- [5] 李晓婧, 白艳萍, 李萌, 等. 河西走廊水资源变化与生态环境时空关联分析 [J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2): 275–280.
- [6] 王成业. 滴灌水肥一体化技术在农业灌溉中的应用 [J]. *乡村科技*, 2020, 11(33): 116–117.
- [7] 徐文婷, 苏德荣, 刘自学, 等. 地下滴灌条件下水钾耦合对紫花苜蓿的影响 [J]. *中国草地学报*, 2014, 36(3): 52–56.
- [8] 张其德. 矿质元素与植物光合作用 [J]. *植物杂志*, 1989(1): 34–36.
- [9] Lychuk T E, Moulin A P, Lemke R L, *et al.* Modelling the effects of climate change, agricultural inputs, cropping diversity, and environment on soil nitrogen and phosphorus: A case study in Saskatchewan, Canada [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 252: 106850 [2021–04–19] <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106580>.
- [10] 于飞, 周健民, 王火焰, 等. 不同形态氮肥对磷肥生物有效性的影响 [J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 371–374.
- [11] 王田涛. 灌溉与施氮对石羊河流域紫花苜蓿草产量、品质及氮素利用的影响 [D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2010.
- [12] 马宁, 李亚娇, 苏生, 等. 氮磷钾配施对北林 202 紫花苜蓿产量和品质的影响 [J]. *草原与草坪*, 2018, 38(6): 48–54.
- [13] 何永梅, 袁立华. 农业生产中的不合理施肥现象 [J]. *科学种养*, 2013(10): 36–36.
- [14] 王仰仁. 考虑水分和养分胁迫的 SPAC 水热动态与作物生长模拟研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- [15] 袁方, 李鑫, 余君萍, 等. 分光光度法测定叶绿素含量及其比值问题的探讨 [J]. *植物生理学通讯*, 2009, 45(1): 63–66.
- [16] 孙东宝, 王庆锁. 水分对苜蓿叶片光合特性的影响 [J]. *植物生态学报*, 2012, 36(1): 72–80.
- [17] BAI Y, GAO J H. Research on high photosynthetic efficient cultivation with drip irrigation under different mulch of maize [J]. *Water Supply*, 2020, 20(8): 3172–3182.
- [18] YU Q, ZHANG Y Q, LIU Y F, *et al.* Simulation of the stomatal conductance of winter wheat in response to light, temperature and CO<sub>2</sub> changes [J]. *Annals of Botany*, 2004, 93(4): 435–441.
- [19] Farquhar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33(33): 317–345.
- [20] 刘军, 齐广平, 康燕霞, 等. 现蕾期水分胁迫对紫花苜蓿光合特性的影响 [J]. *生态科学*, 2019, 38(3): 195–200.
- [21] 童长春, 刘晓静, 蔺芳, 等. 基于平衡施肥的紫花苜蓿光合特性及光合因子的产量效应研究 [J]. *草业学报*, 2020, 29(8): 70–80.
- [22] 田寿乐, 孙晓莉, 沈广宁, 等. 尿素与磷酸二氢钾配施对板栗光合特性及生长结实的影响 [J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 747–754.
- [23] 石正海, 刘文辉, 张永超, 等. 氮磷肥配施对西北羊茅开花期叶片光合特性日变化的影响 [J]. *草业学报*, 2019, 28(11): 75–85.
- [24] LIU Y L, LE Y, WANG C X, *et al.* Photosynthetic response mechanisms in typical C3 and C4 plants upon La<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle exposure [J]. *Environmental Science—Nano*, 2020, 7(1): 81–92.
- [25] ZHANG Z, ZHANG Y, SHI Y, *et al.* Optimized split nitrogen fertilizer increase photosynthesis, grain yield, nitrogen use efficiency and water use efficiency under water-saving irrigation [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 20310.
- [26] 刘军, 齐广平, 康燕霞, 等. 不同灌溉处理下紫花苜蓿光合特性、叶绿素荧光参数及生物量的变化 [J]. *草地学报*, 2019, 27(6): 1569–1576.
- [27] 武文莉, 王薇, 李艺妆. 交替灌溉下水磷耦合对紫花苜蓿植株性状的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(3): 155–157.
- [28] 薛垠鑫, 刘根红, 王晓钰. 滴灌条件下氮磷钾肥配施对玉米株高、光合速率及产量的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2020, 55(6): 77–85.
- [29] 霍海丽, 王琦, 张恩和, 等. 灌溉和施磷对紫花苜蓿土壤水分动态及根重的影响 [J]. *水土保持通报*, 2013, 33

- (4): 159–165.
- [30] 刘纯,王亚东,崔鹏飞,等. 西北旱区不同灌水下限对紫花苜蓿生长与光合特征的影响[J]. 中国草地学报, 2021,43(4): 1–12.
- [31] 沙栢平. 滴灌条件下水肥耦合对紫花苜蓿生产性能及土壤质量的影响[D]. 银川: 宁夏大学, 2020.
- [32] Nicodemus M A, Salifu F K, Jacobs D F. Growth, nutrition, and photosynthetic response of black walnut to varying nitrogen sources and rates[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(11): 1917–1936.
- [33] 丁晓青,樊子菡,沈益新. 紫花苜蓿苗期根系生长的水分胁迫损伤及氮磷的修复生长作用[J]. 草业学报, 2017, 26(5): 92–99.
- [34] 乔子楣,刘敏国,杨惠敏. 高寒地区灌溉对建植当年紫花苜蓿产量、水分和光能利用率的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 86–93.

## Effects of drip irrigation and fertilization on photosynthetic physiological characteristics and the amount of dry matter of alfalfa in Hexi Irrigation Area

MA Qi, SHAHZAD Ali, JIA Qian-min, CHANG Sheng-hua, ZHANG Cheng, HOU Fu-jiang

(State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Engineering Research Center of Grassland Industry, Ministry of Education, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

**Abstract:** In order to explore the effects of fertilization patterns on photosynthetic characteristics and dry matter mass of alfalfa (*Medicago sativa*) under different drip irrigation rates, the field study was carried out in Hexi Irrigation Area in 2020. In the field study tree drip irrigation levels (I3: 160 mm; I2: 80 mm; I1: 0 mm) and six kinds of fertilization mode (F1: phosphorus application 120 kg/hm<sup>2</sup> and nitrogen application 75 kg/hm<sup>2</sup>; F2: phosphorus application 60 kg/hm<sup>2</sup> and nitrogen application 75 kg/hm<sup>2</sup>; F3: no phosphorus and 75 kg/hm<sup>2</sup> nitrogen; F4: 120 kg/hm<sup>2</sup> phosphorus and no nitrogen; F5: 60 kg/hm<sup>2</sup> phosphorus and no nitrogen; F6: no Apply nitrogen and phosphorus) were set. The study showed that: 1) The plant height of alfalfa under I3 was significantly higher than that of I1, which was increased by 23.02%, 28.69% and 19.63%, respectively. The total dry matter weight per plant of alfalfa under F1 was significantly higher than that of F6, which was 4.27, 3.44 and 4.96 times of F6, respectively. 2) The chlorophyll a, b content, carotenoid content and total chlorophyll content of alfalfa under I3 treatment were higher than those under I2 and I1. The average chlorophyll content of F2 was the highest under fertilization treatment. 3) The net photosynthetic rate ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), stomatal conductance ( $G_s$ ) and intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ) of I3F1 are significantly higher than that of I1F6. In all treatments, the individual roots, stems, leaves and the amount of dry matter of alfalfa achieved the maximum value in I3F1. To summarize, I3F1 is a suitable cultivation model to improve the photosynthetic performance and dry matter quality of alfalfa.

**Key words:** *Medicago sativa*; drip irrigation; fertilization mode; photosynthetic physiological characteristics; the quantity of dry matter