

枸杞苜蓿间作模式下水分调控对枸杞光合特性与水分利用的影响

齐广平¹, 银敏华¹, 苏鹏海¹, 康燕霞¹, 李晓敏¹, 王金恒²

(1.甘肃农业大学水利水电工程学院,兰州 730070;2.甘肃省景泰川电力提灌管理局灌溉试验站,甘肃 景泰 730400)

摘要: 针对中国西北干旱半干旱地区枸杞种植模式单一、水分利用低下的农业生产现状,探究更为有效的田间管理措施以提高枸杞产量,并实现水土资源高效利用。基于大田试验,对比分析了 2 种植模式(枸杞单作 CK 和枸杞||苜蓿 LA)与 4 种水分条件(充分灌水 W0(75%~85%)、轻度亏水 W1(65%~75%)、中度亏水 W2(55%~65%)和重度亏水 W3(45%~55%))对枸杞耗水特征、光合特性、生长量、产量和水分利用效率的影响。结果表明:(1)枸杞||苜蓿(891~1 243 mm)的生育期耗水量高于枸杞单作(829~1 102 mm),且均随灌水亏缺程度的提高呈降低趋势。(2)枸杞单作模式下,净光合速率和蒸腾速率的双峰趋势较枸杞||苜蓿模式明显;同一种植模式下,随着水分亏缺程度的加剧,枸杞叶片净光合速率和蒸腾速率的峰值有所降低且峰值出现的时间有所提前。(3)同一种植模式下,随着水分亏缺程度的增加,枸杞地径、株高、冠幅和新梢的生长量均呈降低趋势,但降低幅度趋于减小;单作模式下,处理 CKW1 具有较高的产量(3 720 kg/hm²)和水分利用效率(3.61 kg/(hm²·mm));间作模式下,处理 LAW0 具有较高的产量(3 780 kg/hm²)和水分利用效率(3.08 kg/(hm²·mm))。综合得出,枸杞单作模式下,一定程度的水分亏缺有助于提高枸杞产量和水分利用,而枸杞||苜蓿模式下,应保证充足的土壤水分供应以获得较高的枸杞产量和水分利用。

关键词: 间作; 水分调控; 光合特性; 产量; 水分利用; 枸杞

中图分类号: S567 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2019)06-0242-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.06.034

Effects of Water Regulation on Photosynthetic Characteristics and Water Use of *Lycium Barbarum* Under the Mode of Intercropping Alfalfa and *Lycium Barbarum*

QI Guangping¹, YIN Minhua¹, SU Penghai¹, KANG Yanxia¹, LI Xiaomin¹, WANG Jinheng²

(1.College of Water Resources and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070;

2.Gansu Jingtaichuan Electric Power Irrigation Administration Bureau, Jingtai, Gansu 730400)

Abstract: In the arid and semi-arid regions of northwestern China, *Lycium barbarum* production is facing the problems of single planting pattern and low water use efficiency. The purpose of this study was to explore more effective field management measures to increase *L. barbarum* production and achieve efficient utilization of land and water resources. Based on field experiments, the effects of two planting patterns and four water conditions on water consumption characteristics, photosynthetic characteristics, growth, yield, and water use efficiency of *L. barbarum* were compared and analyzed. The two planting patterns were *L. barbarum* monoculture (CK) and intercropping of *L. barbarum* and Alfalfa (LA). The four kinds of water condition were full irrigation (W0, 75%~85%), mild water deficit (W1, 65%~75%), moderate water deficit (W2, 55%~65%), and severe water deficit (W3, 45%~55%). The results showed that: (1) The water consumption during the growth period of LA (891~1 243 mm) was higher than that of CK (829~1 102 mm), and decreased with the increasing of water deficit. (2) In CK, the double peak trends of net photosynthetic rate and transpiration rate were more obvious than those of LA. Additionally, under the same planting mode, the peaks of net photosynthetic rate and transpiration rate of *L. barbarum* leaves decreased and the

收稿日期:2019-08-08

资助项目:国家自然科学基金项目(51669002);甘肃省农业生物技术研究与应用开发项目(GNSW-2016-26);甘肃省自然科学基金项目(1606RJYA251)

第一作者:齐广平(1969—),男,教授,博士后,主要从事节水灌溉及农业生态研究。E-mail:qigp@gsau.edu.cn

通信作者:康燕霞(1981—),女,副教授,博士,主要从事水文水资源和农业水土工程研究。E-mail:yanxiakang@gsau.edu.cn

peaks appeared earlier with the aggravation of water deficit. (3) Under the same planting mode, the growth amount of *L. barbarum* ground diameter, plant height, crown width and new shoots decreased with the aggravation of water deficit, but the decreasing range tended to decrease. In the single planting mode, the treatment of CKW1 had higher yield ($3\,720\text{ kg/hm}^2$) and water use efficiency ($3.61\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$). In the intercropping mode, the treatment of LAW0 had higher yield ($3\,780\text{ kg/hm}^2$) and water use efficiency ($3.08\text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$). In conclusion, a certain degree of water deficit was helpful to improve the yield and water use efficiency of *L. barbarum* in the single planting mode, and sufficient soil water supply should be ensured to obtain higher *L. barbarum* yield and water use efficiency in the intercropping mode.

Keywords: intercropping; water regulation; photosynthetic characteristics; yield; water use; *Lycium barbarum*

林草—农复合系统是一种集约化生产模式,利用林木和牧草—农作物生长的时空互补关系,可有效减少棵间蒸发,改善田间微环境,提高水土资源利用率,因其具有重要的经济、生态和社会效益,并且已在国内外广泛应用^[1-2]。有研究^[3]表明,茶园间作高秆绿肥能有效减少茶树强光胁迫,提高茶树的光能利用率。枣树间作棉花可提高 35% 的土地利用率;与棉花单作相比,经济产值提高 41%;与枣树单作相比,经济产值提高 31%^[4]。核桃树间作绿豆有助于促进核桃苗根系特征参数的生长,从而提高水分运输和养分吸收能力^[5]。在东北风沙干旱区,仁用杏间作花生、谷子和甘薯系统均表现出良好的水分优势,其中仁用杏谷子间作系统的水分优势最为明显^[6]。以上研究均选择在高大林木下间作牧草或作物,而针对矮小型灌木间作牧草的研究较为匮乏。

枸杞耐干旱、耐贫瘠、耐盐碱,兼具药用和经济价值,是干旱区盐渍土开发利用的首选经济树种^[7]。苜蓿具有适口性好、抗逆性强、蛋白含量高和经济效益佳等特点,能利用根瘤菌固氮培肥地力、减少水土流失并改善土壤结构^[8],在优化农牧产业结构、推动农牧业供给侧结构性改革和改善生态环境等方面发挥着重要且独特的作用^[9]。枸杞间作苜蓿系统突破了枸杞或苜蓿的单一生产方式,在改善土壤性状、控制水土流失、提高土地生产力和增加生物多样性与稳定性方面可发挥巨大潜力。

甘肃引黄灌区是甘肃省重要的综合农业商品生产基地。该地区气候干旱,农业生产以传统大水漫灌为主,近年来土壤盐渍化问题越演越烈,涉及面积已逾 $1 \times 10^5\text{ hm}^2$,严重制约了当地农业生产力和生态系统的可持续发展^[10]。然而,引黄灌区光热资源丰富、昼夜温差大,使得枸杞产业迅速发展,目前已成为全国第二大枸杞产区。该地区枸杞生产中面临着种植模式单一、水分利用低下的生产现状。因此,在甘肃引黄灌区探究矮小型林木(枸杞)间作牧草(苜蓿)的节水高效栽培模式显得尤为必要。本研究以 3 年生枸杞、2 年生苜蓿为研究对象,对比研究不同种植

模式和水分条件对枸杞耗水特征、光合特性、生长量、产量和水分利用效率的影响,旨在明确间作系统中枸杞对光能的利用过程及科学高效的灌水模式,为提高林草复合系统光能和水分利用提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 4—10 月在甘肃省景泰川景电管理局灌溉试验站($37^\circ 23' \text{N}$, $104^\circ 08' \text{E}$)进行。该试验区属温带干旱大陆型气候,年日照时间 $2\,652\text{ h}$,年均辐射量 $6.18 \times 10^5\text{ J/cm}^2$,全年无霜期 191 d ,年均气温 $8.5\text{ }^\circ\text{C}$,年均降水量 185 mm ,多年平均蒸发量 $3\,028\text{ mm}$ 。土壤质地为壤土,0—100 cm 土层平均干容重 1.61 g/cm^3 ,田间持水率 24.1% (质量含水量)。试验地土壤基础养分含量为:速效氮含量 74.51 mg/kg ,速效磷含量 26.31 mg/kg ,有机质含量 1.32 g/kg ,pH 8.11。图 1 为枸杞生育期间逐旬降水与气温分布(降水总量和平均气温分别为 314 mm 和 $17.2\text{ }^\circ\text{C}$)。

1.2 试验设计

试验以 3 年生枸杞“宁杞 1 号”和 2 年生苜蓿“新疆大叶”为研究对象,设种植模式和灌水水平 2 个因素,其中种植模式为:枸杞单作(CK)和枸杞 || 苜蓿(LA);灌水水平(以田间持水量的百分比计土壤水分上下限,灌溉计划湿润层深度取 60 cm)为充分灌溉 W0(75%~85%)、轻度亏缺 W1(65%~75%)、中度亏缺 W2(55%~65%)和重度亏缺 W3(45%~55%)。试验共 8 个处理,分别为 CKW0、CKW1、CKW2、CKW3、LAW0、LAW1、LAW2、LAW3,每个处理重复 3 次,小区面积为 45 m^2 ($7.5\text{ m} \times 6.0\text{ m}$),随机区组排列。

枸杞移栽于 2017 年 4 月下旬,南北行种植,株距 150 cm ,行距 300 cm ,每个小区种植 2 行,每行 5 棵,共计 10 棵。同期在枸杞行间南北方向条播苜蓿(距枸杞树干 30 cm),行距 30 cm (图 2)。小区边缘埋有 2 m 深塑料膜以防止水分互渗,试验区四周布置 2 m 宽保护带。灌水方式采用小畦灌溉,各小区铺设灌水

管道,安装阀门水表(精度 $0.000\ 1\ \text{m}^3$)控制灌水。其他管理措施与当地枸杞种植保持一致。种植后充分

灌水以保证枸杞和苜蓿的正常生长,2018 年 4 月开始进行水分处理。

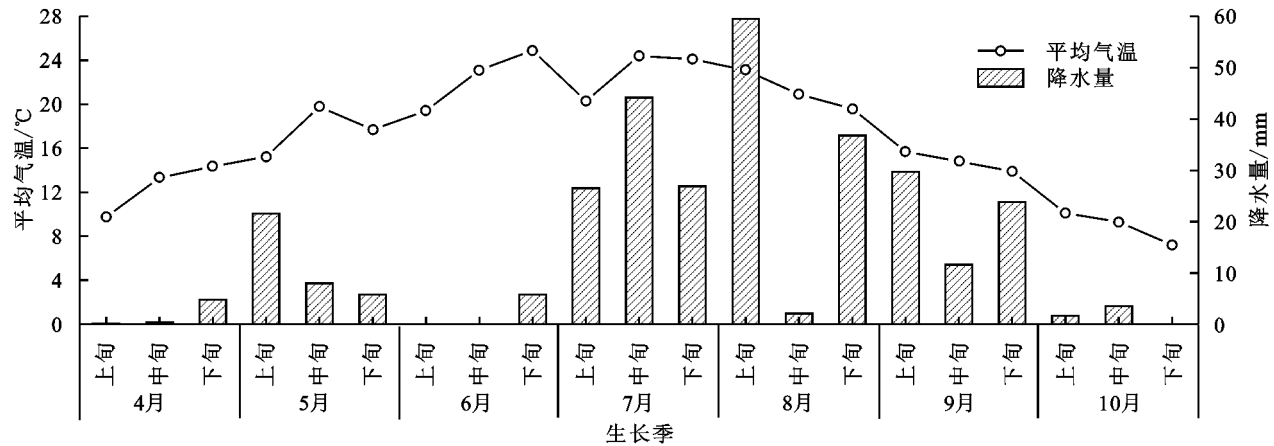


图 1 枸杞生育期间逐旬降水与气温分布

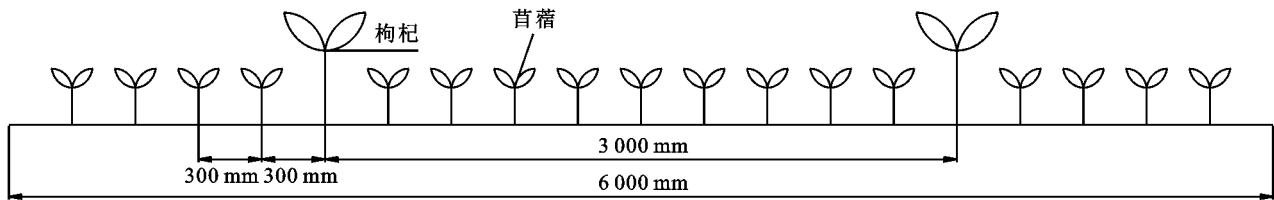


图 2 小区布置示意

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤含水量与贮水量 采用便携式水分测定仪 TDR 于整个试验期间每隔 5 天测定 1 次,测定深度为 120 cm(每隔 20 cm 记录 1 次)。测定位置为小区中央枸杞树行距和株距的中心区域,降水前后加测,并定期采用土钻取土法对测定结果进行校正。土壤贮水量计算公式为:

$$W=10HpB \tag{1}$$

式中: W 为土壤贮水量(mm); H 为土层深度(cm); ρ 为土壤干容重(g/cm^3); B 为土壤质量含水率(%)。

1.3.2 枸杞耗水量 采用水量平衡法计算,公式为:

$$ET=P+W_1-W_2+I+K-P \tag{2}$$

式中: ET 为生育期内总耗水量(mm); P 为生育期内降水量(mm); W_1 为收获后 0—120 cm 土层土壤贮水量(mm); W_2 为试验开始时 0—120 cm 土层土壤贮水量(mm); I 为灌水量(mm); K 为时段内地下水补给量(mm); R 为时段内地表径流(mm)。

由于试验地在枸杞全生育期间次降水量较小,且试验小区地势平坦,地下水埋深在 5 m 以下,可忽略径流和地下水补给。

1.3.3 光合特性 于 2018 年 7 月上旬(枸杞正值盛果期,苜蓿正值初花期),选择晴朗无云的天气,采用 Li-6400 便携式光合作用测定仪(Li-COR, Lincoln, USA)测定枸杞叶片光合特性(净光合速率 P_n 和蒸腾速率 T_r)的日变化(8:00—18:00,每隔 2 h 测定 1 次),连续测定 3 天。各小区选取 2 株长势一致

的枸杞树,在顶部、中部和底部枝条上分别随机选取 1 片叶测定。

1.3.4 枸杞生长指标 收获期结束后各处理选取长势基本相同的 3 棵枸杞树,采用卷尺和游标卡尺测定地径、株高、冠幅、新梢长度与新梢直径。

1.3.5 枸杞产量和百粒重 每个小区标记 3 株长势基本一致的枸杞树,自收获期开始(2018 年 6 月 25 日)至收获期结束(2018 年 8 月 28 日)每隔 8 天采摘 1 次成熟的枸杞鲜果,自然晒干,统计各处理枸杞单株产量并计算每公顷产量。将晒干后的枸杞用四分法取 100 粒干果计算百粒重。

1.3.6 枸杞水分利用效率 根据枸杞产量和生育期耗水量计算。

$$WUE=Y/ET \tag{3}$$

$$IUE=Y/I \tag{4}$$

式中: Y 为枸杞产量(kg/hm^2); WUE 为水分利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$); IUE 为灌水利用效率($\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$)。

1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2016 软件进行数据整理;利用 Origin 9.0 软件作图;使用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差(One-way ANOVA, $P<0.05$)分析,并用最小显著法(Duncan's)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同处理的耗水特征分析

由表 1 可知,不同处理下枸杞生育期的总耗水量

差异显著,整体表现为枸杞 || 苜蓿高于枸杞单作,且随灌水亏缺程度的提高呈降低趋势。处理间总耗水量的极差达 414 mm,其中 CKW1、CKW2 和 CKW3 处理分别较 CKW0 处理减少 72, 177, 273 mm, LAW1、LAW2 和 LAW3 处理分别较 LAW0 处理减少 113, 248, 352 mm。处理间灌水量(351~861 mm)的变化趋势与总耗水量基本一致。同一水分条件下,枸杞 || 苜蓿时灌水量占总耗水量的比例略高于

枸杞单作,前者为 42.4%~69.3%,后者为 42.3%~68.4%。不同处理下降水量占总耗水量的比例为 25.3%~37.9%,表现为枸杞单作处理高于枸杞 || 苜蓿处理。处理间土壤贮水消耗量(34~199 mm)表现为枸杞 || 苜蓿高于枸杞单作,且随灌水亏缺程度的提高呈增加趋势。不同处理下土壤贮水消耗量占总耗水量比例(3.1%~22.3%)的变化趋势与土壤贮水消耗量基本一致。

表 1 不同处理对枸杞耗水量及耗水来源比例的影响

处理	总耗水量/mm	灌水量/mm	灌水量/总耗水量/%	降水量/mm	降水量/总耗水量/%	土壤贮水消耗量/mm	土壤贮水消耗量/总耗水量/%
CKW0	1102b	754	68.4a	314	28.5e	34	3.1f
CKW1	1030c	620	60.2c	314	30.5d	96	9.3d
CKW2	925d	463	50.1d	314	33.9c	148	16.0c
CKW3	829f	351	42.3e	314	37.9a	164	19.8b
LAW0	1243a	861	69.3a	314	25.3f	68	5.5e
LAW1	1130b	702	62.1b	314	27.8e	114	10.1d
LAW2	995cd	492	49.4d	314	31.6d	189	19.0b
LAW3	891e	378	42.4e	314	35.2b	199	22.3a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 不同处理对枸杞光合特性的影响

2.2.1 净光合速率 由图 3 可知,枸杞单作模式下,4 种水分处理的枸杞叶片净光合速率为双峰曲线,呈现出明显的光合“午休”现象,而枸杞 || 苜蓿模式下,4 种水分处理的枸杞叶片光合“午休”现象趋于消失。同一种植模式下,随着水分亏缺程度的加剧,枸杞叶片净光合速率的峰值有所降低,且峰值出现的时间有所提前,其中 CKW0、CKW1、LAW0、LAW1 处理的最大净光合速率分别为 21.5, 22.6, 22.5, 20.9 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现的时间均为 12:00, CKW2、CKW3、LAW2、LAW3 处理的最大净光合速率分别为 20.1, 19.8, 18.5, 17.8 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现的时间均为 10:00。不同处理下枸杞叶片净光合速率的日平均值在枸杞单作模式下表现为 CKW0 和 CKW1>CKW2>CKW3,在枸杞 || 苜蓿模式下,表现为 LAW0>LAW1>LAW2>LAW3,且在同一水分条件下,日平均净光合速率除 LAW0 高于 CKW0 处理之外,均表现为枸杞单作显著高于枸杞 || 苜蓿($P<0.05$)。可见,单作结合轻度水分亏缺和间作结合充分灌水均有利于提高枸杞叶片的净光合速率。

2.2.2 蒸腾速率 从图 3 可以看出,不同处理下枸杞叶片日蒸腾速率变化特征与净光合速率基本一致,即枸杞单作模式的双峰趋势较枸杞 || 苜蓿模式明显,且种植模式一定时,随着水分亏缺程度的加剧,叶片蒸腾速率的峰值有所降低,峰值出现的时间有所提前。枸杞单作模式下,CKW0、CKW1、CKW2、CKW3 处理的最大蒸腾速率分别为 7.5, 7.0, 6.3, 6.1 $\text{mmol}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{s})$,枸杞 || 苜蓿模式下, LAW0、LAW1、LAW2、LAW3 处理的最大蒸腾速率分别为 7.7, 7.0, 5.9, 5.8 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,出现的时间均表现为充分灌水与轻度亏水处理为 12:00,中度与重度亏水处理为 10:00。枸杞单作与枸杞 || 苜蓿模式下枸杞叶片蒸腾速率的日平均值分别为 4.7~6.1 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 4.9~6.0 $\text{mmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,均表现为随亏水程度的增加呈降低趋势,且同一水分条件下,枸杞单作处理的日平均蒸腾速率显著高于枸杞 || 苜蓿处理($P<0.05$,充分灌水除外),说明当土壤水分不足时,苜蓿与枸杞的种间竞争加剧,不利于枸杞植株的蒸腾。

2.2.3 叶片水分利用效率 由图 3 可知,与枸杞单作相比,枸杞 || 苜蓿各处理的叶片水分利用效率日变化较为平缓。分析不同处理下枸杞叶片水分利用效率的日平均值发现,种植模式相同时,日平均叶片水分利用效率表现为先增加后降低的趋势,其中 CKW1、CKW2、CKW3 处理分别较 CKW0 处理提高 6.9%, 5.3% 和 3.3%, LAW1、LAW2、LAW3 处理分别较 LAW0 处理提高 8.7%, 5.9% 和 4.5%,且除 LAW0、CKW0 处理外,在同一水分条件下,均表现为枸杞单作高于枸杞 || 苜蓿。可见,一定程度的水分亏缺有利于叶片水分利用效率的提高,与单作相比,间作条件下获得较高的叶片水分利用效率需要更充足的土壤水分供应。

2.3 不同处理对收获时枸杞生长指标的影响

由表 2 可知,间作和水分调控均会对枸杞的各生长指标产生显著影响。总体而言,同一种植模式下,随着水分亏缺程度的增加,枸杞地径、株高、冠幅和新

梢的生长量呈降低趋势,但降低幅度趋于减小。同一水分条件下,枸杞地径、株高、冠幅和新梢生长量在 2 种种植模式间存在一定差异。单作与间作的枸杞地径(分别为 0.30~0.48,0.30~0.49 cm)、新梢长度(分别为 40.0~61.8,38.1~60.1 cm)和新梢粗度(分别为 0.24~0.33,0.22~0.33 cm)的增长量基本无差异。

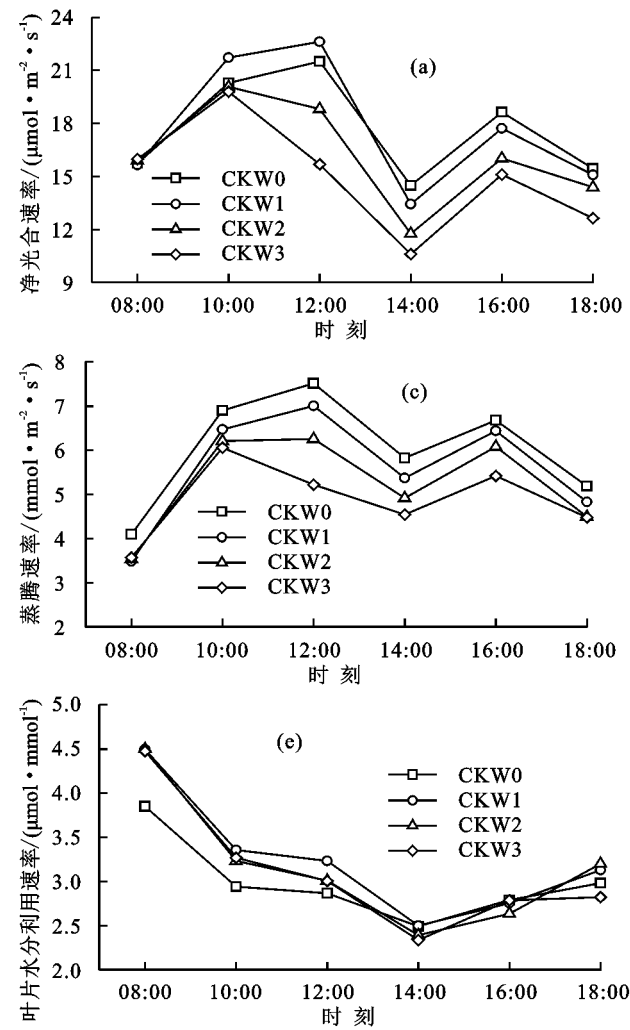


图 3 枸杞叶片光合特性日变化

表 2 不同处理对收获时枸杞生长变化量的影响

单位:cm

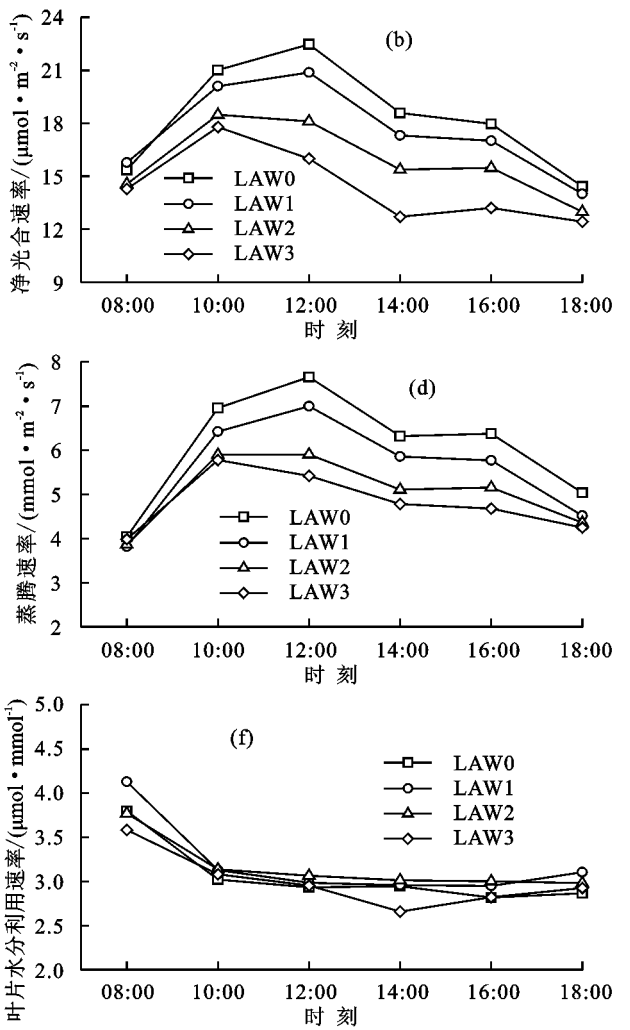
处理	地径	株高	南北冠幅	东西冠幅	新梢长度	新梢粗度
CKW0	0.48±0.04a	31.8±1.5b	45.5±2.3a	44.6±2.4a	61.8±2.3a	0.33±0.04a
CKW1	0.41±0.03b	28.4±1.9c	41.2±1.8b	40.9±1.6b	55.4±1.8b	0.32±0.04ab
CKW2	0.36±0.04c	22.6±2.1d	36.6±1.6d	37.5±1.5c	44.2±2.1c	0.27±0.04c
CKW3	0.30±0.03e	21.2±1.6e	33.3±1.9e	34.5±1.5d	40.0±2.5d	0.24±0.02d
LAW0	0.49±0.03a	35.9±1.6a	44.8±2.4a	41.8±1.8b	60.1±2.4a	0.33±0.05a
LAW1	0.41±0.05b	31.6±2.2b	39.8±1.8c	34.6±1.4d	54.6±1.8b	0.30±0.04b
LAW2	0.33±0.04d	24.5±1.8d	34.5±1.5e	30.8±1.6e	39.4±1.6d	0.23±0.02d
LAW3	0.30±0.03e	21.5±1.8e	31.0±1.4f	29.4±1.8e	38.1±1.9d	0.22±0.04d

注:表中数据为 3 个重复的平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理差异显著(P<0.05)。下同。

2.4 不同处理对枸杞产量和水分利用效率的影响

2.4.1 干果百粒重和产量 由图 4 可知,间作与水分条件显著影响枸杞的干果百粒重和产量,且对百粒重和产量的作用趋势基本一致。枸杞单作模式下,

株高增长量整体表现为间作处理(21.5~35.9 cm)高于单作处理(21.2~31.8 cm),且主要体现在充分灌水和轻度亏水处理中。南北冠幅和东西冠幅增长量均表现为单作处理(分别为 33.3~45.4,34.5~44.6 cm)高于间作处理(分别为 31.0~44.8,29.4~41.8 cm),这可能与单作模式下较好的通风条件有关。



呈先增加后降低的趋势,枸杞 || 苜蓿模式下,呈逐渐降低的趋势;在 W0 水分条件下,枸杞干果百粒重和产量表现为 LA 种植模式高于 CK 种植模式,在 W1、W2 和 W3 水分条件下,则相反。具体而言,单

作模式下,CKW1 处理具有最高的百粒重(15.4 g)和产量(3 720 kg/hm²),分别较 CKW0、CKW2、CKW3 处理提高 2.7%和 2.0%,6.8%和 34.7%,32.8%和 61.9%;间作模式下,LAW0 处理具有最高的百粒重(16.4 g)和产量(3 780 kg/hm²),分别较 LAW1、LAW2、LAW3 处理提高 4.8%和 8.6%,24.2%和 48.1%,49.1%和 86.7%。

2.4.2 水分利用效率和灌水利用效率 由图 4 还可看出,间作与水分条件显著影响枸杞的水分利用效率

和灌水利用效率,但对水分利用效率和灌水利用效率的作用效果存在差异,前者呈降低趋势,后者呈升高趋势。此外,同一水分条件下,单作较间作具有较高的水分利用效率和灌水利用效率。枸杞单作模式下,CKW1、CKW3 处理分别具有最高的水分利用效率(3.61 kg/(hm²·mm))和灌水利用效率(6.55 kg/(hm²·mm));间作模式下,LAW1、LAW3 处理分别具有最高的水分利用效率(3.08 kg/(hm²·mm))和灌水利用效率(5.36 kg/(hm²·mm))。

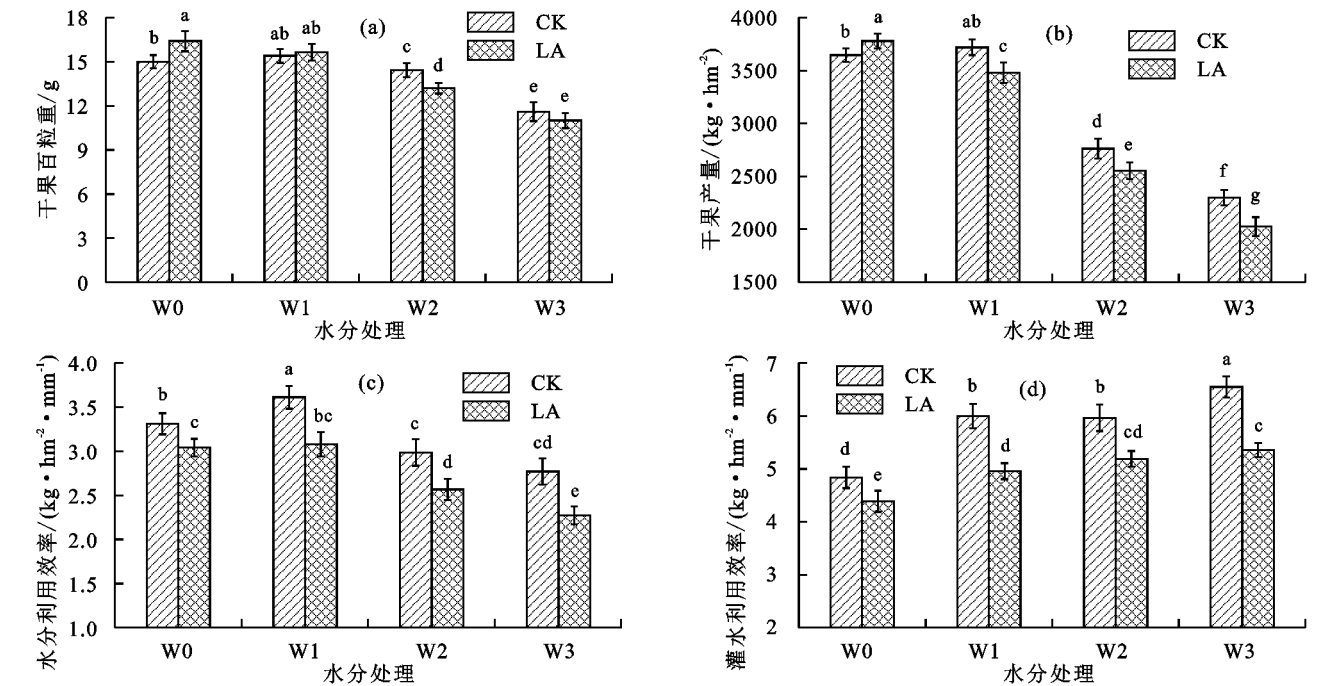


图 4 不同处理对枸杞产量和水分利用效率的影响

3 讨论

3.1 枸杞耗水特性对间作与水分调控的响应

枸杞定植后一般经过 4~5 年可进入盛果期,幼龄枸杞的冠层覆盖度小,土地利用率低,棵间蒸发量大,在枸杞行间种植作物或牧草可有效抑制杂草生长,充分利用水、土、光、热等资源,从而提高经济与生态效益^[11]。科学合理的灌溉在提高作物产量的同时,可以实现水资源的高效利用。间作与水分调控通过影响农田微环境和种间关系,进而影响枸杞的耗水特征。高路博等^[12]通过分析晋西地区苹果间作大豆的土壤水分状况表明,与大豆单作相比,间作系统在生育期间的土壤水分出现不同程度的降低,整体上均表现为负效应;张玉龙等^[13]在盐碱地枸杞间作不同作物的研究中发现,各处理 0—60 cm 土层的土壤含水率表现为间作苜蓿>间作油菜>间作碱蓬>枸杞单作,而 60—100 cm 土层的土壤含水率差异不显著,即枸杞间作种植可有效改善土壤水分状况。在本研究中,尽管没有列出各处理土壤剖面含水率的数据,但由表 1 中土壤贮水消耗量可以看出,与枸杞单作相比,枸杞 || 苜蓿一定程度上降低土壤含水

率。即间作条件下种植苜蓿的耗水量高于单作条件下土壤蒸发的消耗量。研究结果的差异可能与具体的测定时期和测定土层深度有关。周宣等^[14]在不同水分调控对晋西黄土区苹果 || 大豆的研究中得出,间作系统的耗水量随灌水量的增加呈递增趋势,且地膜覆盖条件下的耗水量显著高于秸秆覆盖,土壤贮水消耗量则正好相反。本研究结果表明,在单作和间作模式下,枸杞生育期的总耗水量均表现为随灌水亏缺程度的提高呈现降低趋势。

3.2 枸杞光合特性对间作与水分调控的响应

叶片净光合速率和蒸腾速率是反映植物光合同化能力的重要指标,二者与土壤水分状况密切相关,但对水分亏缺的敏感程度不同^[15-16]。目前关于间作与水分调控对经济林光合特性的影响已有较多研究。在枣棉间作系统中,土壤水分状况对枣树整个生育期的光合速率和蒸腾速率均有显著影响,在新梢生长期,由于枣树的需水量大于棉花,其光合速率和蒸腾速率在低灌水定额下易受到抑制,枣棉种植间距对枣树光合速率的影响主要集中在盛花期后,对蒸腾速率的影响则贯穿整个生育期^[17]。在大豆燕麦间作

系统中,与单作相比,间作可提高燕麦的叶绿素含量和净光合速率,优化叶绿素构成,从而延缓燕麦衰老,但间作对大豆的叶绿素含量及净光合速率无显著影响^[18]。本研究发现,间作模式下,枸杞叶片的光合“午休”现象趋于消失,尤其是在充分灌溉(LAW0 处理)条件下。产生这一现象可能源于两方面因素:一方面,充分灌溉时,土壤水分状况良好,枸杞根系可以通过吸收水分降低叶片温度;另一方面,间作的苜蓿有利于降低枸杞周围的环境温度,从而减少正午高温条件对叶片光合作用的负效应。在充分灌水条件下,间作处理的净光合速率和叶片水分利用效率显著高于单作处理,在其他 3 种水分亏缺条件下,则表现为单作处理高于间作处理。这可能与间作类型及间作行距等因素有关。赵建华等^[19]通过盆栽控水法试验发现,随着土壤水分胁迫的加剧,枸杞叶片净光合速率、蒸腾速率呈逐渐降低趋势,瞬时水分利用率表现为:轻度干旱>充分灌水>重度干旱>中度干旱,即轻度干旱有利于光合同化物的累积。本研究也得到了类似的结果,种植模式一定时,随着水分亏缺程度的加剧,枸杞叶片净光合速率和蒸腾速率的峰值有所降低且峰值出现的时间有所提前,此外,叶片水分利用效率表现为 3 种水分亏缺处理高于充分灌水处理。

3.3 枸杞产量和水分利用对间作与水分调控的响应

产量和水分利用效率是评价种植模式与管理措施的综合指标。间作与水分调控可影响作物生长环境,从而产生不同的产量与水分利用效应。徐利岗等^[20]研究发现,在蒸发强烈的宁夏中部干旱区,灌水量对枸杞产量和水分利用效率影响较大,高灌水定额会加剧棵间蒸发与奢侈蒸腾,适度水分亏缺在不显著影响产量的同时可大幅度提高水分利用效率,得出萌芽期灌水 $375 \text{ m}^3/\text{hm}^2$,春梢生长期土壤含水率下限 $50\%\theta_f$,始花期和盛花期 $65\%\theta_f$,盛果期 $65\%\theta_f$,秋果期 $55\%\theta_f$ (上限均为 $95\%\theta_f$),休眠期冬灌 $450 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ 是该地区合理的灌溉制度。郑国保等^[21]研究得出,当生育期灌水次数为 5 次(总耗水量为 600 mm)时,可获得最高产量($1\,965 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和水分利用效率,且具有较好的枸杞品质。然而,本研究发现,单作模式下,CKW1 处理具有最高的产量和水分利用效率;间作模式下,LAW0 处理具有最高的产量和水分利用效率。这可能与间作条件下,苜蓿较高的耗水量有关。史晓巍等^[22]在枸杞间作不同豆科牧草的研究中发现,与枸杞单作相比,枸杞||苜蓿模式和枸杞||红豆草模式能够提高共生期植被覆盖度、枸杞产量和水分利用效率,是适宜的枸杞豆科牧草间作模式。在本研究中,枸杞产量表现为充分灌水条件下,

间作高于单作,其余水分条件下,单作高于间作;水分利用效率整体表现为单作高于间作。这主要是由于耗水量是枸杞和苜蓿共同产生的,但计算水分利用效率时仅考虑枸杞产量引起的。

4 结论

(1)枸杞||苜蓿的生育期耗水量高于枸杞单作,且均随灌水亏缺程度的提高呈降低趋势。

(2)枸杞单作模式下,净光合速率和蒸腾速率的双峰趋势较枸杞||苜蓿模式明显;同一种植模式下,随着水分亏缺程度的加剧,枸杞叶片净光合速率和蒸腾速率的峰值有所降低且峰值出现的时间有所提前。

(3)同一种植模式下,随着水分亏缺程度的增加,枸杞地径、株高、冠幅和新梢的生长量呈降低趋势,但降低幅度趋于减小;单作模式下,处理 CKW1 具有较高的产量($3\,720 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和水分利用效率($3.61 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$),间作模式下,处理 LAW0 具有较高的产量($3\,780 \text{ kg}/\text{hm}^2$)和水分利用效率($3.08 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$)。

参考文献:

- [1] Xia J B, Ren J Y, Zhang S Y, et al. Forest and grass composite patterns improve the soil quality in the coastal saline-alkali land of the Yellow River Delta, China [J]. *Geoderma*, 2019, 349: 25-35.
- [2] 张雷一,张静茹,刘方,等.林草复合系统的生态效益[J]. *草业科学*, 2014, 31(9): 1789-1797.
- [3] 傅海平,周品谦,王沅江,等.茶园间作高秆绿肥“茶肥 1 号”不同刈割处理对茶树光合日变化的影响[J]. *茶叶通讯*, 2018, 45(1): 14-19.
- [4] 杨涛,段志平,石岩松,等.新疆枣棉间作下棉花光合特性及产量变化[J]. *干旱地区农业研究*, 2019, 37(1): 89-94.
- [5] 张翠萍,孟平,张劲松,等.间作绿豆对核桃苗光合特性及根系导水力的作用[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(1): 110-116.
- [6] 白伟,孙占祥,郑家明,等.风沙半干旱区仁用杏间作对作物产量和水分利用的影响[J]. *中国农业气象*, 2017, 38(9): 574-582.
- [7] Muatasim R, Ma H L, Yang X. Effect of multimode ultrasound assisted extraction on the yield of crude polysaccharides from *Lycium Barbarum* (Goji) [J]. *Food Science and Technology*, 2018, 38: 160-166.
- [8] Osterholz W R, Renz M J, Jokela W E, et al. Interseeded alfalfa reduces soil and nutrient runoff losses during and after corn silage production[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 74(1): 85-90.
- [9] Gu Y J, Han C L, Kong M, et al. Plastic film mulch promotes high alfalfa production with phosphorus-saving and low risk of soil nitrogen loss[J]. *Field Crops Research*, 2018, 229: 44-54.

- [14] 王小红,杨智杰,刘小飞,等.天然林转换成人工林对土壤团聚体稳定性及有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2014,28(6):177-182,189.
- [15] 肖华,熊康宁,张浩,等.喀斯特石漠化治理模式研究进展[J].中国人口·资源与环境,2014,24(增刊1):330-334.
- [16] 熊康宁,黎平,周忠发,等.喀斯特石漠化的遥感—GIS 典型研究:以贵州省为例[M].北京:地质出版社:2002:17-30.
- [17] 容丽,熊康宁.花江喀斯特峡谷适生植物的抗旱特征 I:顶坛花椒根系与土壤环境[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2007(4):1-7.
- [18] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J].Soil Science Society of America Journal,1980,50(3):627-633.
- [19] 姜敏,刘毅,刘闯,等.丹江口库区不同土地利用方式土壤团聚体稳定性及分形特征[J].水土保持学报,2016,30(6):265-270.
- [20] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure [J].Soil and Tillage Research,1988,11(3/4):199-238.
- [21] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.
- [22] Blanco C H, Lal R. Mechanisms of carbon sequestration in soil aggregates[J].Critical Reviews in Plant Sciences,2004,23(6):481-504.
- [23] 聂文婷.土壤团聚体稳定性及其影响因素研究进展[A].中国水土保持学会,台湾中华水土保持学会.2014 年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集[C].中国水土保持学会,台湾中华水土保持学会:中国水土保持学会,2014:5.
- [24] Oades J M, Waters A G. Aggregate hierarchy in soils[J].Australia Journal of Soil Science,1991,29(6):815-828.
- [25] Oades J M. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management[J].Plant and Soil,1984,76(1/3):319-337.
- [26] 王富华,吕盛,黄容,等.缙云山 4 种森林植被土壤团聚体有机碳分布特征[J].环境科学,2019,40(3):1504-1511.
- [27] 魏亚伟,苏以荣,陈香碧,等.人为干扰对喀斯特土壤团聚体及其有机碳稳定性的影响[J].应用生态学报,2011,22(4):971-978.
- [28] 谭秋锦,宋同清,彭晚霞,等.峡谷型喀斯特不同生态系统土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J].应用生态学报,2014,25(3):671-678.
- [29] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J].Soil Biology and Biochemistry,2000,32(14):2099-2103.
- [30] 刘满强,胡锋,陈小云.土壤有机碳稳定机制研究进展[J].生态学报,2007,27(6):2642-2650.
- [31] 罗晓虹,王子芳,陆畅,等.土地利用方式对土壤团聚体稳定性和有机碳含量的影响[J].环境科学,2019,40(8):3816-3824.
- [32] 贾重建,刘红宜,卢瑛,等.土地利用方式对土壤有机碳和团聚体组分特征的影响[J].热带地理,2014,34(5):681-689.

(上接第 248 页)

- [10] 王晓芳,夏江宝.黄河三角洲引黄灌区不同植被类型的降盐改土功能[J].水土保持学报,2012,26(3):141-144.
- [11] 张雯莉,刘玉冰,刘立超.盐胁迫对枸杞(*Lycium barbarum*) 叶片生理的影响[J].中国沙漠,2018,38(2):294-299.
- [12] 高路博,毕华兴,许华森,等.晋西幼龄苹果×大豆间作的土壤中水分、养分空间分布特征及对大豆的影响[J].中国农学通报,2013,29(24):36-42.
- [13] 张玉龙,姜同轩,杨涛,等.盐碱地枸杞间作不同作物的土壤水盐变化及盐平衡[J].水土保持通报,2019,39(3):46-50.
- [14] 周宣,王若水,李超楠,等.不同水分调控对晋西黄土区苹果×大豆间作系统细根分布与耗水特性的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):118-126.
- [15] 银敏华,李援农,杨洋,等.水分处理及覆膜历时对春玉米生理特性的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2014,42(12):199-207.
- [16] Forey O, Metay A, Wery J. Differential effect of regulated deficit irrigation on growth and photosynthesis in young peach trees intercropped with grass[J].European Journal of Agronomy,2016,81:106-116.
- [17] 李发永,劳东青,孙三民,等.滴灌对间作枣棉光合特性与水分利用的影响[J].农业机械学报,2016,47(12):119-129.
- [18] 冯晓敏,杨永,任长忠,等.豆科—燕麦间作对作物光合特性及籽粒产量的影响[J].作物学报,2015,41(9):1426-1434.
- [19] 赵建华,李浩霞,安巍,等.干旱胁迫对宁夏枸杞叶片蔗糖代谢及光合特性的影响[J].西北植物学报,2013,33(5):970-975.
- [20] 徐利岗,王怀博,鲍子云,等.基于土壤水分下限控制的宁夏枸杞滴灌灌溉制度试验研究[J].排灌机械工程学报,2019:1-10.
- [21] 郑国保,张源沛,朱金霞,等.灌水频率对枸杞品质、产量和耗水特性的影响[J].中国农学通报,2013,29(31):206-210.
- [22] 史晓巍,齐广平,汪精海,等.甘肃引黄灌区枸杞间作豆科牧草对土壤温度及枸杞产量的影响[J].甘肃农业大学学报,2018,53(6):105-113.