

幼龄期压砂地枸杞产量和品质多指标 耦合灌溉制度优化

马波^{1,2,3}, 黄勇¹, 田军仓^{1,2,3}

(1.宁夏大学土木与水利工程学院,宁夏银川750021;2.宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心,宁夏银川750021;
3.教育部旱区现代农业水资源高效利用工程研究中心,宁夏银川750021)

摘要:为提高宁夏中部干旱带幼龄期压砂地枸杞灌水效率,保障枸杞产量和品质,进行了3水平灌水定额(300、225 m³·hm⁻²和150 m³·hm⁻²)的田间对比试验,采用综合指标增量最优方法对灌溉制度进行了优化。研究发现:枸杞5月上旬萌芽期耗水以土壤蒸发为主,日耗水量0.6~1.2 mm,6月中旬进入夏果花期耗水量增大,日耗水量2.5~3.7 mm,7月中旬枸杞夏果期耗水量继续增大,达2.4~4.3 mm,7月下旬日耗水量最大,为3.2~4.7 mm,8月中旬耗水量下降,日耗水量3.0~4.2 mm。灌水定额对枸杞产量影响显著($P<0.05$),灌水定额300 m³·hm⁻²时产量最高,为1402.65 kg·hm⁻²;灌水定额225 m³·hm⁻²时枸杞多糖、 β -胡萝卜素和黄酮较高,含量分别为4.56%、0.15%和0.41%;灌水定额150 m³·hm⁻²时枸杞甜菜碱含量较高,为0.77%。进一步通过综合指标增量最优方法进行优化,结果表明 β -胡萝卜素含量最高时得到综合指标增量最大,为-5.4%,总耗水量为450 mm。枸杞夏果花期进入需水关键期,阶段耗水量达70 mm以上,进入6月中旬枸杞需水量增大,旬耗水量达29 mm以上。可见,幼龄期压砂地枸杞产量及品质指标均达到最优的耗水量较难获得,但是在 β -胡萝卜素含量最高时可以获得产量和品质多指标耦合的最优耗水量,据此进行灌溉制度优化,可以一定程度上实现幼龄期压砂地枸杞优质高产。

关键词:枸杞;幼龄期;压砂地;耗水量;灌水定额;灌溉制度优化;产量;品质

中图分类号:S274.1 文献标志码:A

Optimization of irrigation scheduling based on yield-quality multi-index coupling at juvenile stage of *Lycium barbarum* L. in gravel-mulched field

MA Bo^{1,2,3}, HUANG Yong¹, TIAN Juncang^{1,2,3}

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

2. Ningxia Research Center of Technology on Water-saving Irrigation and Water Resource Regulation, Yinchuan, Ningxia 750021, China;

3. Efficient Use of Water Resources in Arid Modern Agriculture Ministry of Educational Engineering

Research Center, Yinchuan, Ningxia 750021, China)

Abstract: In order to improve irrigation efficiency and guarantee the yield and quality of juvenile stage *Lycium barbarum* L. planted in gravel-mulched field in the central arid region of Ningxia, Northwestern China, this study carried out an open field experiment with designed 3 levels of irrigating water quota including 300 m³·hm⁻² as HIW, 225 m³·hm⁻² as MIW, and 150 m³·hm⁻² as LIW in 2017, and optimized irrigation scheduling based on 'optimal aggregative indicator increment' method. The results showed that the main water consumption was soil evaporation in the first-ten days of May at the germination stage and daily water consumption was by 0.6~1.2 mm. The daily water consumption increased significantly in the middle ten days of June in the blossom stage due to temperature and leaf area index increases, the daily water consumption by 2.5~3.7 mm. The daily water consumption increased continuously in the second ten days of July for summer fruit stage, the range was 2.4~4.3 mm. The maximum daily water consumption occurred in the last ten days of July in the summer fruit middle stage by 3.2~4.7 mm.

收稿日期:2019-03-01

修回日期:2019-06-02

基金项目:宁夏自然科学基金项目(NZ13007);宁夏高等学校一流学科建设(水利工程学科)资助项目(NXYLXK2017A03);宁夏重点研发计划项目(2019BEH03010);国家自然科学基金(51569024)

作者简介:马波(1981-),男,宁夏彭阳人,博士,副教授,研究方向为旱区节水灌溉理论与技术。E-mail:slxboma-34@163.com

通信作者:田军仓,教授,主要从事旱区节水灌溉理论与技术研究。E-mail:slxtjc@163.com

Daily water consumption reduced in middle ten days of August in the fall fruit blossom stage by 3.0~4.2 mm. The irrigating water quota had significant effect on yield ($P<0.05$). The maximum yield was 1 402.65 kg · hm⁻² of irrigating water quota with 300 m³ · hm⁻². The percent of polysaccharide, β -carotene, and flavone of irrigating water quota with 225 m³ · hm⁻² were higher than other treatments, and by 4.56%, 0.15%, and 0.41%, respectively. The glycine betaine of irrigating water quota with 150 m³ · hm⁻² was the highest, and the percentage was 0.77%. The aggregative indicator increment was optimal with percent of -5.4% under β -carotene content maximum with 450mm water consumption in whole growth season. According to this result, we got optimal irrigation scheduling, from begin of full-bloom stage, the lowest irrigation amount was 70 mm of whole stage, or lowest irrigation amount was 29 mm from middle ten days of June beginning. It was also showed that the key periods of water require of juvenile stage *Lycium barbarum* L planted in gravel-mulched field were summer fruit blossom period and summer fruit stage. Therefore, it is difficult to obtain the optimal water consumption of both yield and quality indexes of juvenile stage *Lycium barbarum* L planted in gravel-mulched field. However, the optimal water consumption of multiple indexes coupled with yield and quality can be obtained when the content of β -carotene is the highest, so optimization of irrigation system can achieve high quality and high yield of juvenile stage *Lycium barbarum* L.

Keywords: *Lycium barbarum* L.; juvenile stage; gravel-mulched field; water consumption; optimization of irrigation scheduling; yield; quality

枸杞子由于具有良好的抗氧化、抗癌及保护神经和肾脏的功能,同时对维持健康的血糖水平、提高视力和免疫力也有作用^[1-3],越来越被人们广泛食用。至 2016 年,中国枸杞种植面积达到 13.3 万 hm²^[4],种植区域遍布 13 个省(市)自治区^[5],宁夏枸杞种植历史由来已久,且品质得到广泛认可。宁夏中部干旱带压砂地由于光照充足、昼夜温差较大,有利于提高枸杞品质,枸杞种植面积呈逐年增加趋势,但水资源严重紧缺制约压砂地枸杞的发展,而优化灌溉制度是解决水资源紧缺的一个重要措施,且灌溉制度也影响枸杞品质^[6-9]。

灌溉制度优化方法众多,应用较多的有线性规划、非线性规划、动态规划^[10-11]及各种计算模型。早期研究方案主要是基于水量平衡方程所进行的动态规划^[12-14],吴鑫森等^[15]基于农田水量平衡模拟模型和作物产量计算模型并考虑随机降雨的影响,建立了对灌溉日期和灌溉水量进行优化的多目标优化模型。毛晓敏等^[16]在农田土壤水分平衡模型与作物水分生产函数模型的基础上,建立作物非充分灌溉制度优化的 0-1 规划模型。Jensen 模型和 Blank 模型是以产量最大的单一优化目标灌溉制度优化方法^[16-18];雷彩秀等^[19]引入 Jensen 模型提出基于随机降雨的水稻灌溉制度制定的方法。于芷婧等^[20]基于农田水量动态模拟模型和作物水分生产函数,构建了两种作物产量最大为目标的轮作农田灌溉制度多目标优化模型。张志宇等^[21]以水分生产函数为基础建立冬小麦-夏玉米全周期灌溉制度多目标优化模型。以产量为目标的灌溉制度优

化模型除了水分生产函数外还有一些其他的模型,如 AquaCrop 模型是利用蒸腾量与归一化水分生产效率计算地上生物量,通过收获指数控制最终产量^[10]。RZWQM 模型能够准确模拟农田水分和养分循环,较准确地预测不同灌水处理下作物产量差异及土壤含水率状况^[22-24]。ORYZA2000 模型^[25]能够比较准确地模拟旱稻的生物量、叶面积动态变化过程及最终产量和根层土壤水分动态,尤其是在模拟穗生物量方面具有较高的准确性^[26-27]。

已有灌溉制度优化方法均是针对一定效益的水量分配,而同时考虑产量和品质的模型较少,未见有关枸杞产量、品质灌溉制度优化的研究。本研究在已有研究基础上提出基于产量、品质的“综合指标增量”概念,通过回归方程计算某一单一指标最优时其他各指标增量,获取“综合指标增量”,进而确定最优总耗水量,根据上年降水水平年、作物系数(生育阶段或旬)进行灌溉制度优化,以期兼顾产量、品质的灌溉制度优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验点位于宁夏回族自治区中卫市沙坡头区香山镇红圈子村尹东自然队“宁夏大学压砂地持续利用研究示范基地”,属宁夏中部干旱带环山地区,地理位置为 37°34'N, 105°10'E,海拔为 1 740 m,年平均气温 6.8 °C。年平均降水量 180 mm,多集中于 7—9 月,全年无霜期 155 d。年均蒸发量在 2 100~2 400 mm 之间,地下水位埋深 120 m,全年日均照

2 600 ~ 2 700 h, 0 ~ 40 cm 埋深土壤容重 $1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 田间持水率为 22.7% (质量百分数), 最大冻土层深 1.0 m。土壤初始理化性质为: pH 值 8.66, 全盐量 $0.53 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有机质 $10.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $11.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $0.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $141.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料

以树龄 2 a 的宁杞 5 号为研究对象, 施用肥料包括复合肥 (红牛国际化工集团有限控股公司, 总养分 $\geq 51\%$, N、 P_2O_5 、 K_2O 含量分别为 17%、17%、17%), 多肽有机肥 (临沂市瑞福来肥业有限公司, N + P_2O_5 + $\text{K}_2\text{O} \geq 5\%$, 有机质 $\geq 45\%$), 微量元素肥 (徐州亿农丰农化有限公司, $\text{Cu} + \text{Fe} + \text{Mn} + \text{Zn} \geq 10\%$), 磷酸二铵 (北京中农国控化肥贸易有限公司, N + $\text{P}_2\text{O}_5 \geq 64.0\%$)。采用淡化的井水灌溉, 井水矿化度处理前为 $4.26 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 淡化后为 $0.35 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

1.3 试验设计与实施

试验为单因素 3 水平对比方案设计, 单因素为灌水定额。根据已有试验结果和树龄 (2 a 树龄), 灌水定额 3 个水平依次为: $300 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (HIW)、 $225 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (MIW) 和 $150 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ (LIW), 每个处理选 10 棵枸杞树 (枸杞树行距 2 m, 株距 1.3 m) 为一个小区, 小区面积 26 m^2 , 3 次重复。采用小管出流灌水技术, 毛管管径 16 mm, 灌水器间距 130 cm, 灌水器流量 $10 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$ 。全年生长季共灌水 11 次: 萌芽期 1 次、开花期 1 次、盛花期 2 次、初次果实膨大期 2 次、盛果期 3 次、秋果期 1 次、落叶期 1 次, 用水表计量, 每次总灌水量为 5.26 m^3 。于 5 月 5 日、6 月 3 日、6 月 20 日和 7 月 20 日施肥, 每次施肥量 $1154 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。肥料品种及比例 (质量百分数): 有机肥 28%, 磷酸二铵 28%, 复合肥 28%, 微量元素肥 16%。

1.4 观测指标及方法

1.4.1 土壤体积含水率 在距离树干底部 20 cm 处埋设 1 m 深 TDR 探管, 灌水前、后观测土壤体积含水率, 测量深度依次为 0 ~ 20、20 ~ 40、40 ~ 60 cm 和 60 ~ 80 cm。如遇降雨, 测量雨后土壤含水率。

1.4.2 枸杞产量 每个处理选取 3 棵生长势较一致的样树观测, 将采集的鲜果自然晾干, 称重计算产量。

1.4.3 品质指标 枸杞多糖和甜菜碱的测定方法分别为蒽酮-硫酸法和高效液相色谱法^[28]。 β -胡萝卜素具有良好的抗氧化作用, 能够抗癌、预防心血管疾病和白内障; 黄酮是一种抗氧化剂, 可有效清除体内的氧自由基, 阻止细胞的退化、衰老, 也可阻止癌症的发生, 这两个指标对于枸杞品质评价具有

非常重要的作用, 所以本研究对其进行测定, 均采用分光光度法测定^[29]。

1.4.4 气象资料 气象资料从距试验点直线 5 km 处的兴仁气象站获取, 包括降水量、最高气温、最低气温、平均气温、日照时数、平均相对湿度。

1.5 数据处理及绘图

采用 DPS 进行方差分析和回归分析, 用 Excel 绘图。

1.6 压砂地枸杞灌溉制度优化方法

1.6.1 建立产量、品质指标-耗水量模型 利用农田水量平衡方程^[30]计算 2 次土壤水分观测阶段枸杞耗水量, 然后根据时间节点计算出各生育期和各旬耗水量, 进而计算全生育期耗水量。分别用各生育期和各旬耗水量除以其对应的天数可得生育期和旬日耗水量。将总耗水量作为自变量, 产量、枸杞多糖、 β -胡萝卜素、黄酮、甜菜碱作为因变量, 进行回归分析, 得到一元二次多项式回归方程。

1.6.2 综合指标增量最优耗水量确定 利用得到的回归方程计算某一指标最优条件时其他指标与各自最优时相比的增量, 用增加量百分比表示, 将计算得到的每个指标的增量相加, 可以得到某一指标最优时所有指标增量之和, 也即综合指标增量, 以此确定的耗水量作为灌溉制度优化最优耗水量。

1.6.3 灌溉制度优化 灌溉制度优化也即在获取最优综合指标基础上进行灌水分配, 灌水分配受到土壤初始含水率和降水的影响, 尤其压砂地土壤水分明显受到上年降水的影响, 在结合作物系数的基础上本研究灌溉制度优化水量分配用式 (1) 计算:

$$M_{ij} = \left[(M - W_j) \times \frac{k_i}{K} \right] - P_{0(i-1)} \quad (1)$$

式中, M_{ij} 为上年降水水平 j 条件下第 i 阶段计划灌水定额 (mm); M 为最优目标总耗水量 (mm); W_j 为上年降水水平 j 条件下土壤初始储水量 (mm); k_i 为阶段作物系数; K 为作物系数总和; $P_{0(i-1)}$ 为 $i-1$ 阶段有效降水 (mm); i 为计算阶段; j 为上年降水年份, $j=1$ 为丰水年, $j=2$ 为平水年, $j=3$ 为干旱年。

作物系数按照公式 (2) 计算^[31]:

$$k_i = \frac{ET_{ai}}{ET_{0i}} \quad (2)$$

式中, k_i 为 i 阶段作物系数; ET_{0i} 为 i 阶段参考作物潜在蒸散量 (mm); ET_{ai} 为 i 阶段或某一句作物实际蒸散量 (mm)。

枸杞实际蒸散量按照农田水量平衡方程计算^[30], 潜在蒸散量按照改进后的 Penman-Monteith 公式计算^[32]。

2 结果与分析

2.1 枸杞生育期降水分布及灌水定额对土壤水分的影响

灌溉和降水对土壤水分具有直接的影响,不同灌水技术、灌水定额、降水强度和降水量均有不同的影响效果,绘制降雨量、灌水定额和土壤体积含水率如图 1 所示。

从图 1a 看出,枸杞生育期降水较少,5 mm 以上的有效降水 10 次,远远低于灌水定额,7 月 27 日降水量超过最低灌水定额,为 17.7 mm。灌溉水主要集中在夏果花期和夏果期,秋果期由于枸杞生长减缓加之气温降低,灌水频率减小,8 月 20 日灌水后一直到枸杞秋果结束再没有灌水,落叶期进行了冬灌。

从图 1b、1c、1d 看出,各处理 0~20 cm 埋深土壤体积含水率相对稳定,且相对较低,5 月 5 日第一次灌水开始以后,该层土壤体积含水率接近 13%。20~40 cm 和 40~60 cm 土壤体积含水率较高,保持在 15% 以上,最高时达到 23% 以上。60~80 cm 埋深土壤体积含水率受灌水和降水的影响小,枸杞发育初期耗水量小,土壤体积含水率较高,随枸杞发

育该层土壤体积含水率呈下降趋势,从 15% 下降到近似 11%。整个生育期 HIW、MIW 处理 20~40 cm 和 40~60 cm 土壤体积含水率在 15% 以上,LIW 处理体积含水率低于 15%。

2.2 枸杞不同灌水定额旬耗水和生育阶段耗水分析

2.2.1 旬耗水 从图 2a、2b 看出,压砂地枸杞 5 月上旬耗水量较低,HLW 为 11.7 mm,MLW 为 11.2 mm,而 LIW 仅为 5.7 mm,该时期日耗水量在 0.5~1.0 mm 之间。5 月中旬,随着气温的升高和枸杞叶片逐渐展开,枸杞耗水量明显增加,旬总耗水量为 13.6~20.6 mm,旬日耗水量为 1.4~2.1 mm,至 5 月下旬,枸杞旬耗水量进入第一个高峰期,然后开始趋于平缓。6 月上旬至 7 月上旬,枸杞旬耗水量稳定,灌水量和耗水量达到一定程度上的平衡。7 月中旬开始,枸杞耗水量明显增加,到 7 月下旬,HIW、MIW 和 LIW 处理旬耗水量依次为 51.5、42.4 mm 和 35.6 mm,日耗水量最大,达到 3.2~4.7 mm。8 月中旬耗水量开始下降,8 月下旬到 9 月上旬日耗水量趋于稳定,HIW、MIW 和 LIW 处理日耗水量依次为 3.9、3.2 mm 和 2.4 mm。

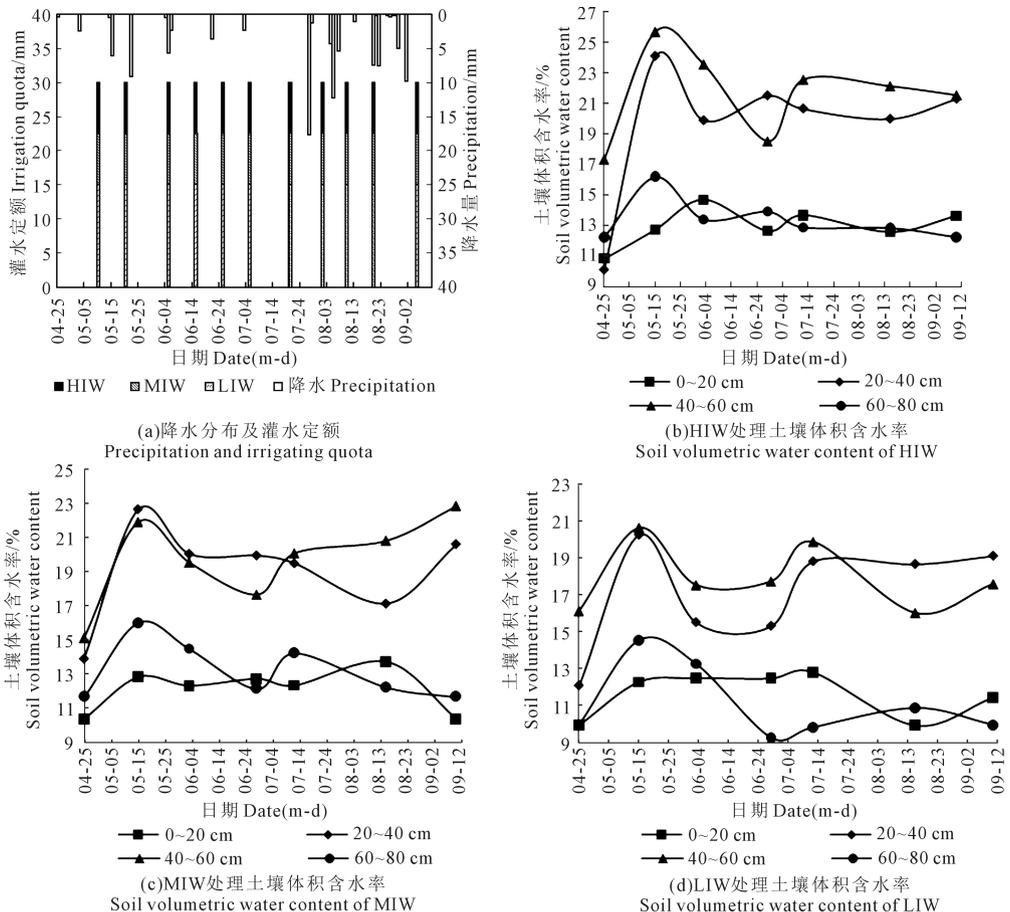


图 1 枸杞生育期降水分布、灌水定额及土壤体积含水率

Fig.1 Precipitation, irrigation quota, and soil volumetric water content during the growth period of *Lycium barbarum* L.

2.2.2 生育阶段耗水 从图 3a、3b 看出,枸杞萌芽期以蒸发为主,日耗水量仅为 0.6~1.2 mm,夏果花期和夏果期较大,夏果花期 HIW、MIW、LIW 总耗水量依次为:134.1、106.6 mm 和 82.3 mm,日耗水量为 2.4~3.8 mm;夏果期总耗水量依次为:167.7、137.5 mm 和 114.3 mm,日耗水量依次为 4.7、3.8 mm 和 3.2 mm。秋果期耗水量明显降低,HIW、MIW、LIW 处理阶段总耗水量依次为:102.6、83.0 mm 和 62.2 mm,日耗水量较夏果期降低 0.6~0.8 mm。

2.3 灌水定额对枸杞产量和品质的影响

从表 1 看出,枸杞产量随着灌水定额的增加而增加,灌水定额对枸杞产量影响显著 ($P < 0.01$),说明该试验条件下还可以通过增加灌水定额提高枸杞产量。HIW 处理产量分别较 MIW 处理和 LIW 处理高 3.51% 和 34.57%,随着灌水定额的增加,枸杞产量增加趋势减弱,虽然增大灌水定额产量有可能提高,但产量提高量有限。

枸杞多糖含量 MIW 处理最高,LIW 处理最低,说明过多或者过少灌水都会造成枸杞多糖含量的

降低。方差分析表明,MIW 处理和 LIW 处理多糖含量差异显著 ($P < 0.01$),而 MIW 处理和 HIW 处理多糖含量差异显著 ($P < 0.01$)。MIW 处理枸杞 β -胡萝卜素含量最高,为 0.15%,LIW 处理最低,为 0.097%,方差分析表明各处理间枸杞 β -胡萝卜素含量差异显著 ($P < 0.01$)。可见枸杞 β -胡萝卜素随着灌水定额的增加呈先增加后降低的趋势。MIW 处理枸杞黄酮含量最高,LIW 处理最低。方差分析表明各处理间差异显著 ($P < 0.01$),可见灌水定额较大不利于总黄酮积累^[9]。LIW 处理枸杞甜菜碱含量最高,其次是 MIW 处理,HIW 最低,LIW 处理枸杞甜菜碱含量比 MIW 处理和 HIW 处理分别高 20.78% 和 14.28%。甜菜碱作为渗透调节物质对植物应对干旱、盐碱等胁迫有重要作用。水量充足时甜菜碱合成较少。

枸杞产量和品质指标同时达到最优是一种理想的状态,亏缺灌溉条件下,枸杞产量随灌水定额的增大而增加,由于品质指标较多,随灌水定额变化品质指标很难形成一致的趋势,这是因为各指标

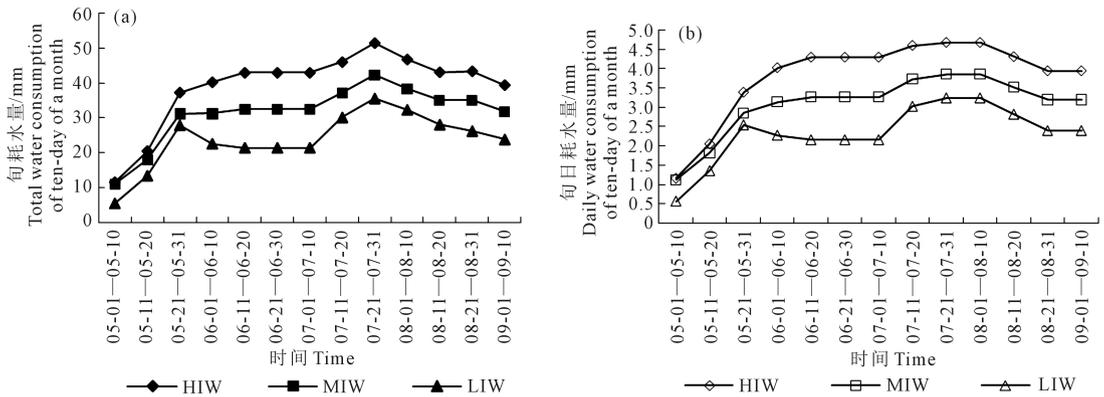


图 2 枸杞旬总耗水量和旬日耗水量

Fig.2 The total and daily water consumption of ten-day of a month of *Lycium barbarum* L.

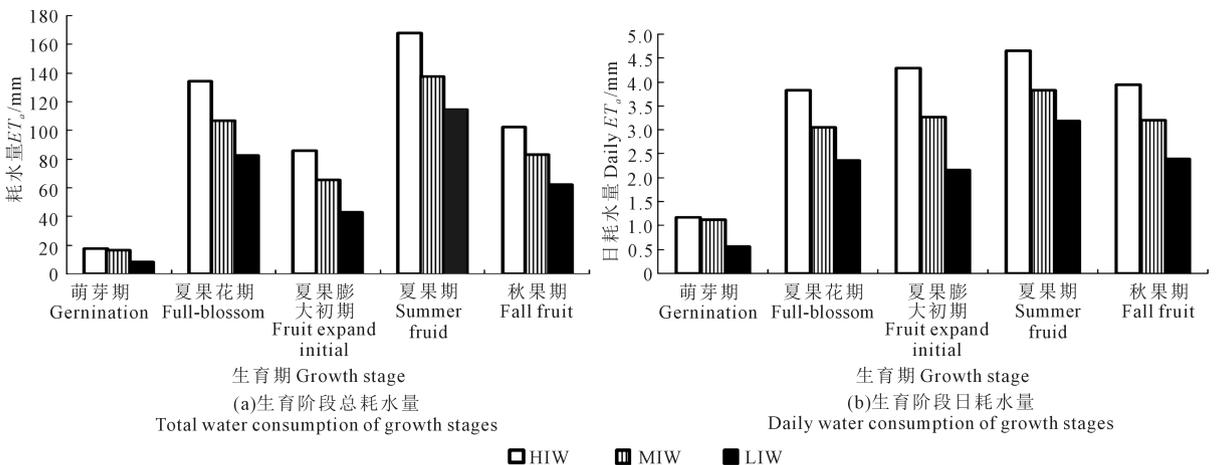


图 3 枸杞各生育阶段总耗水量及阶段日耗水量

Fig.3 Total and daily water consumption of *Lycium barbarum* L.

对水分的响应有各自的特征。干旱胁迫有助于枸杞糖类合成,但会明显降低枸杞产量。灌溉定额高时枸杞产量、总糖、甜菜碱、胡萝卜素含量不是最高^[7],研究发现灌溉定额接近于345 mm时可获得较为理想的多糖和甜菜碱^[8]。一定灌溉定额时增加灌溉次数枸杞多糖含量显著增加,但产量减少,土壤水分亏缺可促进枸杞果实糖分的积累,增加总糖含量。水分亏缺可以提高品质指标,但会影响枸杞产量^[9]。

2.4 压砂地枸杞灌溉制度优化

以耗水量为自变量、各指标为因变量建立一元二次回归模型,结果如表2所示。

判断式(3)~式(7)极值并求其获得极值时的耗水量 x_i 和最优指标值 y_i ,当 $x_1 = 471.9$ mm、 $x_2 = 405.7$ mm、 $x_3 = 450.0$ mm、 $x_4 = 525.0$ mm时枸杞产量、多糖、 β -胡萝卜素和黄酮可以获得极大值,值依次为 $y_1 = 1\,426.0$ kg·hm⁻²、 $y_2 = 3.91\%$ 、 $y_3 = 0.201\%$ 、 $y_4 = 0.903\%$,当 $x_5 = 543.0$ mm时甜菜碱获得极小值, $y_5 = 0.60\%$ 。

农作物产量、品质均达到最优具有一定的难度,本文提出“综合指标增量”的概念,分别计算某一指标达到最优时其他指标的增量,将各指标增量

表1 不同处理下枸杞产量及品质指标

Table 1 Yield and qualities index under different treatment

处理 Treatment	产量 Yield (kg·hm ⁻²)	多糖 Polysaccharide /%	β -胡萝卜素 β -carotene /%	黄酮/% Flavone	甜菜碱 Glycine betaine/%
HIW	1402.65aA	4.16bB	0.12bB	0.34bB	0.61cC
MIW	1353.45bB	4.56aA	0.15aA	0.41aA	0.66bB
LIW	917.76cC	3.66cC	0.10cC	0.24cC	0.77aA

注:不同小写字母表示处理间具有显著差异($P < 0.05$),不同大写字母表示处理间具有极显著差异($P < 0.01$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different treatments at $P < 0.05$ level; different capital letters indicate significant difference at $P < 0.01$ level.

之和最大作为可选最佳方案,计算发现 β -胡萝卜素最大时“综合指标增量”最大,为-5.4%,总耗水量为450 mm。

压砂地与露地相比较,土壤水分受到上年降水的影响,也即作物发育初始含水率与上年降水量有关,所以灌溉制度优化要考虑上年水文年。观测发现上年水文年分别为丰水年、平水年和干旱年时,0~80 cm埋深土壤初始储水量对应为55.9、49.3、42.7 mm^[33]。根据式(1)、生育阶段耗水量、旬耗水量和作物系数进行生育阶段和旬灌溉制度优化,结果见表3和表4。

从表3、表4看出,优化后夏果花期灌水量明显增加,夏果期灌水量达到相对较大,平水年与干旱年份该值均超过100 mm。秋果期由于持续时间较长,所以总需水量比较大,然而由于秋果期处于当地降水比例较大时段,在有效降水条件下灌水定额相对较小。从时间上来看,6月中旬开始枸杞需水量明显增大,8月上旬达到最大,在46 mm以上,到

表2 枸杞产量和品质指标最优耗水量计算回归方程

Table 2 Regression equation of optimal water consumption of yield and quality index of *Lycium barbarum* L.

指标 Index	回归方程 Regression equation	公式编号 Formula serial number
产量 Yield/(kg·hm ⁻²)	$y_1 = -0.0197x_1^2 + 18.591x_1 - 2960.1$, $R^2 = 1$	(3)
多糖 Polysaccharide/%	$y_2 = -7 \times 10^{-5}x_2^2 + 0.0568x_2 - 7.6127$, $R^2 = 1$	(4)
β -胡萝卜卡素 β -carotene/%	$y_3 = -4 \times 10^{-6}x_3^2 + 0.0036x_3 - 0.6087$, $R^2 = 1$	(5)
黄酮 Flavone/%	$y_4 = -1 \times 10^{-5}x_4^2 + 0.0105x_4 - 1.8532$, $R^2 = 1$	(6)
甜菜碱 Glycine betaine/%	$y_5 = 3 \times 10^{-6}x_5^2 - 0.0033x_5 + 1.5047$, $R^2 = 1$	(7)

表3 枸杞生育阶段灌溉制度优化

Table 3 Optimization of irrigation scheduling for growing season of *Lycium barbarum* L.

上年水文年 Hydrologic year of last year	灌溉水量 Irrigation amount/mm				
	萌芽期 Germination stage	夏果花期 Summer fruit blossom stage	夏果坐果期 Summer fruit flushing period	夏果期 Summer fruit period	秋果期 Fall fruit period
丰水年 High flow year	29.2	74.3	85.5	99.2	105.3
平水年 Median water year	29.7	75.6	87.0	100.9	107.0
干旱年 Drought year	30.2	76.8	88.4	102.5	108.8

表 4 枸杞旬灌溉制度优化

Table 4 Optimization of irrigation scheduling for a period of ten days of *Lycium barbarum* L

上年水文年 Hydrologic year of last year	灌溉水量 Irrigation amount/mm												
	5月 May			6月 June			7月 July			8月 August			9月 September
	FTD	MTD	LTD	FTD	MTD	LTD	FTD	MTD	LTD	FTD	MTD	LTD	FTD
丰水年 High flow year	11.4	16.9	22.6	27.4	30.9	30.4	30.7	28.5	32.9	46.6	37.0	37.1	41.8
平水年 Median water year	11.6	17.2	23.0	27.8	31.4	30.9	31.2	29.0	33.4	47.4	37.6	37.7	42.5
干旱年 Drought year	11.8	17.5	23.4	28.3	31.9	31.4	31.7	29.5	34.0	48.2	38.2	38.3	43.2

注:FTD,MTD 和 LTD 分别代表各月的上旬、中旬和下旬。

Note: FTD, MTD, and LTD are the first-ten-day, middle-ten-day and last ten-day period of a month, respectively.

8月中旬开始需水量有所下降,9月上旬由于秋果开始采摘,枸杞需水量有所增大,所以灌溉定额需要增加。已有灌溉制度侧重于一定产量目标的灌溉制度,而本文是对产量、品质指标耦合状况下所优化的灌溉制度,在各生育阶段或时期耗水量一致的情况下,灌水定额和灌水次数是可动态调节的。

3 讨论与结论

土壤水分对枸杞产量和品质均有一定程度的影响,但对各指标的影响趋势不尽一致,要获取理想的产量和优良的品质,就要合理调节灌溉制度。获得较高的产量势必影响枸杞品质,要想获得优良的品质,那么枸杞产量就不能得到保障,所以用“综合指标增量”最优来调节灌溉制度对宁夏中部干旱带压砂地枸杞优质高产具有一定的参考。

幼龄期压砂地枸杞5月上旬处于枸杞萌芽期,叶片还没有完全展开,耗水以土壤蒸发为主,耗水量随灌水定额而有所差异,5月中旬,随着气温的升高和枸杞叶片逐渐展开,耗水量明显增加,至5月下旬,枸杞旬耗水量达到一个高峰期,然后开始趋于平缓。在6月上旬至7月上旬,枸杞旬耗水量保持在一个稳定状态。7月中旬枸杞开始进入夏果期,耗水量明显增加,到7月下旬最高旬耗水量达到51.5 mm,该时期日耗水量也是整个生育期日耗水量最大时期,达到3.2~4.7 mm,这种状况一直持续到8月上旬结束。8月中旬开始,耗水量开始下降,8月下旬到9月上旬,旬日耗水量趋于稳定,介于2.4~3.9 mm之间。幼龄期压砂地枸杞耗水量最大时期为夏果花期和夏果期,进入秋果期后压砂地枸杞耗水量明显降低。

灌水定额对枸杞产量影响显著,HIW处理产量分别较MIW处理和LIW处理高3.51%和34.57%。灌水对枸杞多糖、 β -胡萝卜素和黄酮具有明显的影响,灌水定额为225 m³·hm⁻²时可获得较高的枸杞多糖、 β -胡萝卜素和黄酮,含量分别为4.56%、

0.15%和0.41%,当灌水定额减少或增加时都会降低枸杞多糖、 β -胡萝卜素和黄酮,也可说明单次灌水量较大不利于枸杞总黄酮的积累^[9]。而枸杞甜菜碱随灌水定额的增加而减少,本研究条件下灌水定额为150 m³·hm⁻²时枸杞甜菜碱含量比225 m³·hm⁻²和300 m³·hm⁻²分别高20.78%和14.28%,可见,过多的灌水不利于枸杞甜菜碱合成,这与其他文献^[6]研究结果相一致。

计算发现在不同指标最优时的综合指标增量在-112.2%~-5.4%之间。当 β -胡萝卜素含量最高时的综合指标增量最大,总耗水量占本研究计算的最大耗水量的88.4%,按照该耗水量和上年水文年进行灌溉制度优化,优化结果显示,夏果花期开始要明显增加灌水量,整个生育阶段灌水量达70 mm以上,6月中旬开始需要增大枸杞灌水量,每旬的灌水量在29 mm以上。

参考文献:

- [1] Zhou R W, Zhou R S, Feng Y, et al. Removal of organophosphorus pesticide residues from *Lycium barbarum* by gas phase surface discharge plasma [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 342: 401-409.
- [2] Bo R N, Zheng S, Xing J, et al. The immunological activity of *Lycium barbarum* polysaccharides liposome in vitro and adjuvant activity against PCV2 in vivo [J]. International Journal Biological Macromolecules, 2016, 85: 294-301.
- [3] Chung R S, Chen C C, Ng L T. Nitrogen fertilization affects the growth performance, betaine and polysaccharide concentrations of *Lycium barbarum* [J]. Industrial Crops and Products, 2010, 32: 650-655.
- [4] 张秀萍, 刘娟. 凝聚资源优势推进中宁枸杞产业整合[J]. 宁夏林业, 2018, (2): 40-42.
- [5] 戴国礼, 张波, 何昕霏, 等. 宁夏枸杞篱壁栽培技术发展趋势探讨[J]. 宁夏农林科技, 2018, 59(3): 16-20.
- [6] 尹志荣, 雷金银, 桂林国, 等. 不同滴灌量对不同品种枸杞生长、产量和品质的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 28-34.
- [7] 郑艳军, 尹娟, 尹亮, 等. 不同灌水处理对枸杞产量和品质的影响[J]. 节水灌溉, 2017, (9): 28-32.
- [8] 李金泽, 杜历, 唐瑞, 等. 不同灌溉定额对枸杞产量和品质的影响[J]. 黑龙江水利, 2017, 3(11): 1-5.
- [9] 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.
- [10] 宋健,李江,杨奇鹤,等.基于 AquaCrop 和 NSGA-II 的灌溉制度多目标优化及其应用[J].水利学报,2018,49(10):1284-1295.
- [11] Singh A. An overview of the optimization modelling applications[J]. Journal of Hydrology, 2012, 466(5):167-182.
- [12] 孙晋锴,冯跃华,张子敬,等.基于多年降水的豫东地区夏玉米灌溉制度优化[J].节水灌溉,2017,(11):38-41.
- [13] 操信春,杨陈玉,何鑫,等.中国灌溉水资源利用效率的空间差异分析[J].中国农村水利水电,2016,(8):128-132.
- [14] 崔远来,袁宏源,李远华.考虑随机降雨时稻田高效节水灌溉制度[J].水利学报,1999,30(7):40-45.
- [15] 吴鑫淼,王晶,郗志红.基于多年降雨资料的作物灌溉制度多目标优化[J].农业机械学报,2013,44(4):108-112.
- [16] 毛晓敏,尚松浩.作物非充分灌溉制度优化的 0-1 规划模型及其应用[J].农业机械学报,2014,45(17):153-158.
- [17] Jensen M E. Water consumption by agricultural plants [C] // Kozlowski T T Plant Water Consumption & Response. New York: Academic Press INC, 1968.
- [18] 王颖辉,汤鹏程,李曙光,等.内蒙古东部干旱年份玉米需水规律及灌溉制度优化[J].干旱地区农业研究, 2018,36(1):108-114.
- [19] 雷彩秀,熊卫红,姜忠,等.基于随机降雨的水稻优化灌溉制度[J].灌溉排水学报,2017,36(5):66-72.
- [20] 于芷婧,尚松浩.华北轮作农田灌溉制度多目标优化模型及应用[J].水利学报,2016,47(9):1188-1196.
- [21] 张志宇,郗志红,吴鑫淼.冬小麦-夏玉米轮作体系灌溉制度多目标优化模型[J].农业工程学报,2013,29(16):102-111.
- [22] 周始威,胡笑涛,王文娥,等.基于 RZWQM 模型的石羊河流域春小麦灌溉制度优化[J].农业工程学报,2016,32(6):121-129.
- [23] Hanson J D, Ahuja L R, Shaffer M D, et al. RZWQM simulating the effects of management on water quality and crop production [J]. Agricultural Systems, 1998, 57(2):161-195.
- [24] 张芊,任理.应用根系层水质模型分析冬小麦-夏玉米轮作体系的农田水氮利用效率 I:模型参数的灵敏度分析与标定[J].水利学报,2012,43(1):84-90.
- [25] Bouman B A M, Kropff M J, Tuong T P, et al. ORYZA2000: Modeling Lowland Rice [M]. Los Baños, Philippines: International Rice Research Institute, 2001.
- [26] 薛昌颖,杨晓光, Bouman B A M, 等. ORYZA2000 模型模拟北京地区旱稻的适应性初探[J].作物学报, 2005, 31(12):1567-1571.
- [27] 薛昌颖,杨晓光,邓伟,等.应用 ORYZA2000 模型制定北京地区旱稻优化灌溉制度[J].农业工程学报, 2008, 24(4):76-82.
- [28] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2015.
- [29] 刘元林,龙鸣,田晓静,等.枸杞总黄酮提取工艺优化及不同年份枸杞总黄酮含量测定[J].西北民族大学学报(自然科学版), 2019, 40(115):70-75.
- [30] 郭元裕.农田水力学[M].北京:中国水利水电出版社,1997:39.
- [31] 薛勤,刘通.灌溉管理手册[M].北京:水利电力出版社,1994:371-388.
- [32] 罗金耀.节水灌溉理论与技术[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [33] 马波,田军仓.基于 Jensen 模型的压砂地西瓜灌溉制度优化研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(6):123-129,155.

(上接第 132 页)

- [11] 曹慧明,史作民,周晓波,等.植物对低温环境的响应及其抗寒性研究综述[J].中国农业气象, 2010, 31(2):310-314.
- [12] Minami A, Nagao M, Ikegami K, et al. Cold acclimation in bryophytes: Low-temperature-induced freezing tolerance in Physcomitrella patens is associated with increases in expression levels of stress-related genes but not with increase in level of endogenous abscisic acid [J]. Planta (Berlin), 2005, 220(3):414-423.
- [13] 王芳,李永生,彭允,等.外源一氧化氮对玉米幼苗抗低温胁迫的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):270-275.
- [14] 陈思思,李春燕,杨景,等.拔节期低温冻害对扬麦 16 光合特性及产量形成的影响[J].扬州大学学报(农业与生命科学版), 2014, 35(3):59-64.
- [15] 王瑞霞,闫长生,张秀英,等.春季低温对小麦产量和光合特性的影响[J].作物学报, 2018, 44(2):288-296.
- [16] 关雅楠,黄正来,张文静,等.低温胁迫对不同基因型小麦品种光合性能的影响[J].应用生态学报, 2013, 24(7):1895-1899.
- [17] 巨伟,杨彩凤,张树华,等.冬小麦低温处理叶片细胞膜透性的 QTL 定位[J].作物学报, 2012, 38(7):1247-1252.
- [18] 程西永,呼晓贤,李海霞,等.低温胁迫下小麦幼穗中差异表达蛋白质的鉴定[J].麦类作物学报, 2016, 36(10):1342-1349.
- [19] 王树刚,王振林,王平,等.不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J].生态学报, 2011, 31(4):1064-1072.
- [20] 徐海成,尹燕桦,蔡铁,等.冬小麦拔节期不同茎蘖对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J].应用生态学报, 2013, 24(8):2197-2204.
- [21] 孙苗苗,王志强,高翔,等.河南主推小麦品种对低温胁迫的生理响应及耐寒性分析[J].麦类作物学报, 2016, 36(3):316-324.
- [22] 李春燕,徐雯,刘立伟,等.低温条件下拔节期小麦叶片内源激素含量和抗氧化酶活性的变化[J].应用生态学报, 2015, 26(7):2015-2022.
- [23] 席吉龙,杨娜,郝佳丽,等.播期和密度对晋麦 84 号旗叶光合特性及产量的影响[J].山西农业科学, 2017, 45(8):1253-1257.
- [24] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].第 2 版,北京:高等教育出版社, 2006:167-173, 280-283.
- [25] 姜丽娜,张黛静,宋飞,等.不同品种小麦叶片对拔节期低温的生理响应及抗寒性评价[J].生态学报, 2014, 34(15):4251-4261.
- [26] 潘瑞炽.植物生理学[M].第 6 版,北京:高等教育出版社, 2008:284-303.
- [27] 李春燕,陈思思,徐雯,等.苗期低温胁迫对扬麦 16 叶片抗氧化酶和渗透调节物质的影响[J].作物学报, 2011, 37(12):2293-2298.
- [28] 王晓楠,付连双,李卓夫,等.低温驯化及封冻后不同抗寒性小麦品种的形态建成及生理基础分析[J].作物学报, 2009, 35(7):1313-1319.
- [29] Whaley J M, Kirby E J M, Spink J H, et al. Frost damage to winter wheat in the UK: The effect of plant population density[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(1):105-115.
- [30] Ji H T, Xiao L J, Xia Y M, et al. Effects of jointing and booting low temperature stresses on grain yield and yield components in wheat [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 243:33-42.
- [31] 胡新,任德超,倪永静,等.冬小麦籽粒产量及其构成要素随晚霜冻害变化规律研究[J].中国农业气象, 2014, 35(5):575-580.
- [32] 曹文昕,万映秀,张琪琪,等.黄淮海区主要推广小麦品种抗寒性的演变规律[J].麦类作物学报, 2015, 35(1):57-63.