

陈小杰, 彭飞, 薛娟, 黄翠华, 尤全刚, 吴思渊, 潘晶, 刘斐耀, 郭平林, 史尧方. 石羊河流域典型农作物高水分利用效率和单位水收益的灌水定额 [J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28 (6): 1460-1468

Chen XJ, Peng F, Xue X, Huang CH, You QG, Wu SY, Pan J, Liu FY, Guo PL, Shi YF. Irrigation quotas for high water use efficiency and economic water productivity of typical crops in Shiyang River Basin [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2022, 28 (6): 1460-1468

石羊河流域典型农作物高水分利用效率和单位水收益的灌水定额

陈小杰^{1,2} 彭飞^{1✉} 薛娟¹ 黄翠华¹ 尤全刚¹ 吴思渊³ 潘晶¹ 刘斐耀^{1,2} 郭平林^{1,2} 史尧方^{1,2}

¹中国科学院西北生态环境资源研究院, 沙漠与沙漠化重点实验室, 干旱区盐渍化研究站 兰州 730000

²中国科学院大学 北京 100049

³民勤县水务局中渠灌区水利站 民勤 733306

摘 要 农业用水是我国西北内陆绿洲的主要水耗途径. 研究农业节水灌溉对于缓解农业和生态用水矛盾以及当地农民生计都有重要的意义. 基于民勤县传统农耕习惯(漫灌和灌水定额), 以干旱区5种典型农作物(玉米、棉花、辣椒、向日葵、小麦)为研究对象, 在保持当地灌溉频率下, 揭示5个灌水定额(1 800, 1 440, 1 080, 720, 360 m³/hm²)对5种作物的产量、生物量、灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, IWUE)以及单位水收益(economic water productivity, EWP)的影响, 明确不同作物获得高水分生产效率和单位水收益的最适灌溉制度, 以指导当地灌溉实践. 结果显示: (1) 玉米5个灌水定额下IWUE均高于其余4种作物, 最高为12.27 kg/m³; (2) 棉花平均EWP均高于其余4种作物, 两年平均8.0元/m³, 棉花水资源投入经济产出最优; (3) 综合考虑产量、IWUE、EWP以及生物量, 玉米优于其余4种作物; (4) 1 080 m³/hm²可以作为向日葵实际生产灌水定额, 720 m³/hm²为适合玉米、辣椒、小麦、棉花的灌水定额. 本研究表明在石羊河流域减少灌水定额能够有效提高当地水分利用效率以及单位水收益. (图5 表1 参38 附表2)

关键词 石羊河; 农作物; 灌溉量; 产量; 水分利用效率; 单位水收益

Irrigation quotas for high water use efficiency and economic water productivity of typical crops in Shiyang River Basin

CHEN Xiaojie^{1,2}, PENG Fei^{1✉}, XUE Xian¹, HUANG Cuihua¹, YOU Quangang¹, WU Siyuan³, PAN Jing¹, LIU Feiyao^{1,2}, GUO Pinglin^{1,2} & SHI Yaofang^{1,2}

¹Drylands Salinization Research Station, Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Zhongqu Irrigation District Water Conservancy Station, Minqin County Water Affairs Bureau, Minqin 733306, China

Abstract Water consumption in agricultural activities is the main water use in inland oases in Northwest China. Research on water conservation in agriculture is of great significance to alleviate the conflict between the use of agricultural and ecological water and is of great importance to local farmers' livelihoods. This study, based on traditional irrigation practices (flood irrigation and fixed irrigation frequency) of Minqin County in Shiyang River Basin, was designed to reveal the impacts of five irrigation quotas (1 800, 1 440, 1 080, 720, and 360 m³/hm²) on crop yield, biomass, irrigation water use efficiency (IWUE), and economic water productivity (EWP) to determine the optimal irrigation for five crops and guide local irrigation practices. The results showed that: (1) Under the five irrigation quotas, IWUE of corn, with the highest of 12.27 kg/m³, was higher than the other four crops; (2) The average EWP of cotton with a 2-year-average of 8.0 yuan/m³ was higher than the other four crops. Thus, the economic output of cotton is the best under the same irrigation quota; (3) Considering the yield, IWUE, EWP, and biomass, corn was better than the other four typical crops; and (4) 1 080 m³/hm² was the optimal irrigation quota for sunflower in local planting practices. In addition, 720 m³/hm² was suitable for corn, pepper, wheat, and cotton as their irrigation quota. This study shows that reducing the amount of irrigation quota in the Shiyang River Basin can effectively improve local IWUE and EWP.

Keywords Shiyang River Basin; crops; irrigation water; yield; water use efficiency; economic water productivity

收稿日期 Received: 2021-05-19 接受日期 Accepted: 2021-11-08

国家重点研发计划项目“应对石羊河流域干旱与荒漠化风险的自然基解决方案”(2017YFE0119100)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFE0119100)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: pengfei@lzb.ac.cn)

包括甘肃省在内的9个省(自治区、直辖市)是我国脆弱生态区自然保护和生态修复的重点及难点区域^[1]。绿洲是西北干旱区生态屏障的关键地带,也是干旱区农业生产集中区域^[2]。在干旱区,生态用水与农业用水矛盾突出。以甘肃省民勤县为例,绿洲占全县总面积3.5%,林地占全县总面积8.5%^[2-3],是石羊河流域重要的农业和生态屏障。2018年民勤县国民经济和社会发展公报显示,全县60%的水资源用于作物灌溉,而生态用水仅占全县总用水量的35.7%。农业用水远高于生态用水,在水资源分配过程中生态用水需求得不到满足^[4]。张振龙等人利用非期望产出模型计算出甘肃、宁夏等地水资源利用效率仍处于低水平^[5]。由于水资源利用效率低以及农业用水量大,当地过度开采地下水以增加农业灌溉,导致沙漠化面积扩大、淡水资源减少等一系列生态环境问题^[6-7],农业用水与生态用水矛盾加剧。因此在水资源匮乏的干旱区,保证农业生产生活与生态安全屏障建设,需要结合当地农作物种植和灌溉方式对水资源进行高效分配与合理利用。

农业水资源利用效率与效益问题是农业生产实践与用水决策关注的焦点,特别是在干旱半干旱地区,作物高效用水与作物高产协同是农业用水决策的重点。水分利用效率(water use efficiency, WUE)是表示作物水分吸收利用效率的指标^[8-11]。段爱旺将WUE划分为农业总供水利用效率、田间水分利用效率、灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, IWUE)和降水利用效率^[8]。在干旱区,灌溉水是农业生产用水的主要来源,因此相比较于其他形式的WUE, IWUE是该区域水资源分配决策的主要参考指标。干旱区作物WUE的研究颇丰,主要为棉花^[12]、小麦^[13]、玉米^[14-15]等干旱区典型作物在不同干旱胁迫下的WUE。前人结果表明,在作物生长季进行适当地水分胁迫能够提高作物的WUE^[16-17]。以往这些试验灌溉方式为膜下滴灌、垄膜沟灌等节水技术,能够有效降低水资源浪费,提高WUE。但民勤仍有超过一半的耕地采用传统的漫灌技术^[18]。以漫灌为主的灌溉方式在过高的灌水定额下会导致地表形成大量积水^[19],其中一部分积水会通过蒸发进入大气或者在土壤饱和后发生渗漏,造成水资源浪费。目前鲜见在漫灌方式下,不同灌水定额对于干旱区典型农作物IWUE的影响研究。干旱区水资源紧缺,在农业生产生活中灌溉支出与产量收益是农民以及决策者关注的重点^[11]。由于IWUE缺乏对灌溉支出与产量收入的考虑,有学者采用单位水收益(crops per drop, 也有学者将其定义为经济水资源生产力economic water productivity, EWP)。Kadigi^[20]和Fernandez^[9]等人研究农业生产过程中水资源投入产出比,并以此来指导农业用水实践。EWP的提出在生态经济学上解决了灌溉用水与收支效益的问题。研究漫灌方式下不同灌水定额对于干旱区农作物IWUE以及EWP的影响具有重要的现实意义。

国外学者认为“自然基解决方案”(nature-based solutions, NBS)^[21-22]通过认识和利用自然规律能够应对人类面临的包括农业在内的各种挑战。研究农业节水灌溉需要进一步结合当地农田的灌溉需求^[23],根据灌溉习惯结合IWUE和EWP对作物生长季灌水定额作出判定。当地农户的经验表明根据作物生产模型实时精准调整灌溉时间以及灌水定额,在实际农业生产过程中可操作性以及可控性较差,因此针对上述研究目标和调研结果,我们结合NBS试验设计理念,在尊重当地的灌溉习惯以及灌溉频率前提下,通过田间试验研究5种灌水定额下5种典型作物的生长季生物量、产量、收获系数、IWUE和EWP,揭示符合民勤县实际农业生产的最优灌水定额和最佳作物,以辅助绿洲农业节水灌溉政策的制定,实现节水与高产的统一。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在中国科学院西北生态环境资源研究院干旱区盐渍化研究站进行,该站位于甘肃省武威市民勤县西渠镇(39°02'38"N, 103°36'36"E)。民勤县平均海拔1 305 m,多年平均气温7.5℃,多年平均降水量117.5 mm,其中2019年降水量127 mm,2020年降水量为80.5 mm。降水主要集中在7-9月,气象站20 cm蒸发皿的水面蒸发数据为2 644 mm,年日照时数2 877 h,年平均风速2.3 m/s,气候干旱,降水稀少,日照充足^[18]。图1为2019年和2020年生长季降水量。

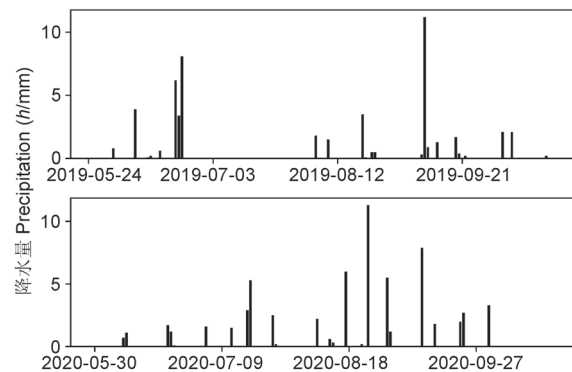


图1 2019年与2020年作物生长季降水量。

Fig. 1 Precipitation of crop growing season in 2019 and 2020.

根据《甘肃省2018年统计年鉴》,民勤县粮食作物主要为玉米、小麦,经济作物主要为向日葵与蔬菜。耕地灌溉水源为红崖山水库以及地下水。《甘肃省行业用水定额(2017版)》规定,河西地区春小麦灌水定额为1 050 m³/hm²,灌溉定额为5 700 m³/hm²;玉米灌水定额为1 380 m³/hm²,灌溉定额为6 900 m³/hm²;棉花灌水定额为750 m³/hm²,灌溉定额为4 800 m³/hm²。根据对西渠镇水盛村(距研究站200 m)农户的调查,当地小麦田实际灌水量为1 200 m³/hm²,高于规定灌水定额;玉米等其他作物灌水定额为900 m³/hm²,低于规定灌水定额。

当地农户畦田平均面积为1亩(0.667 hm²),每个畦田内有1个入水口。在每次灌溉时,根据政府给水流量大小,会同时开放3-6个入水口对不同畦田进行灌溉。灌溉水源有河水和井水,当河水不能及时供给,农户会采用井水对作物进行灌溉,每块畦田入水口河水流量为150 m³/h,井水流量为60 m³/h。

1.2 试验田概况

试验田大小为50 m × 50 m,土壤类型为壤土。土壤黏粒:粉粒:砂粒为24.8:46.7:28.5。试验田0-20 cm土层平均pH值为7.7;20-40 cm为7.8;40-80 cm为7.5。该地1 m深度土壤平均容重为1.45 ± 0.07 g/cm³,田间持水量为0.18 (V/V, %),凋萎系数0.05。试验用地前茬是苜蓿和玉米。

1.3 试验设计

种植5种作物,设置5个灌溉梯度以及3组重复试验。试验田划分为75块5 m × 5 m试验样方,每块样方之间铺设深度1 m的不透水膜以防止样方之间水分的横向移动。试验地表铺设PC管道用于作物灌溉,总开关处设有电子流量控制器,精确度为0.001 m³。试验中每个样方设置一个入水口,每个入水口流量为6 m³/h。于2019年和2020年生长季进行了田间试验。

根据试验田田间持水量、饱和含水量、植物根系分布特征以及当地灌水量,设置5个灌溉梯度(T1:灌水定额为1 800 m³/hm²;T2:灌水定额为1 440 m³/hm²;T3:灌水定额为

1 080 m³/hm²; T4: 灌水定额为720 m³/hm²; T5: 灌水定额为360 m³/hm²). 每个灌溉梯度下5种作物灌水量相同. 试验灌水日期和灌水次数与当地灌水时间、次数一致. 具体的灌溉日期, 作物播种和收获日期见附表1.

采用随机区组设计. 根据NBS核心理念, 作物种植以及灌溉时间、方式均与当地保持一致. 种植小麦、辣椒、玉米、棉花、向日葵5种干旱区典型作物. 小麦品种为永良4号, 辣椒品种为美国红, 玉米品种为甘鑫281, 棉花品种为新陆早7号, 葵花子品种为HT363, 5种作物品种与当地种植品种一致. 根据当地种植习惯, 除小麦外, 玉米、棉花、辣椒、向日葵在地表铺设地膜. 小麦行间距为20 cm, 株间距为10 cm, 辣椒、棉花行间距为40 cm, 株间距为20 cm; 玉米种植密度为12万株/hm², 向日葵种植密度为9万株/hm². 根据当地耕种经验, 为促进作物生长, 辣椒、棉花在其发芽1个月后除去多余植株, 辣椒每丛保留2-4株, 棉花每丛保留2株.

化肥使用量按照民勤县当地施作习惯. 除棉花外, 4种作物第1次灌溉时施肥, 施肥量为: 安徽六国化工生产的铔腐酸磷酸二铵(N-有效P₂O₅-K₂O为18-46-0, 总养分≥ 64.0%, 以下简称二铵) 375 kg/hm², 新疆中能万源化工生产的尿素(总氮≥ 46.4%, 以下简称尿素) 150 kg/hm², 六国化工生产速溶调碱复合肥料(N-有效P₂O₅-K₂O为13-44-0, 总养分≥ 57%, 以下简称复合肥) 150 kg/hm². 棉花第1次灌溉施肥量为二铵330 kg/hm², 尿素150 kg/hm², 复合肥150 kg/hm². 第2次灌溉时, 5种作物施肥量均为二铵225 kg/hm², 尿素150 kg/hm², 复合肥150 kg/hm². 第3次灌溉时, 仅玉米、向日葵和辣椒施肥, 施肥量与第2次灌溉时施肥量一致.

根据当地耕种习惯, 部分农户会在棉花成熟前13-15 d 会喷洒乙烯利以促进棉花开花. 于2020年9月25日对棉花喷洒国光牌乙烯利(有效成分40%), 在2019年试验中, 不对棉花进行乙烯利喷洒. 辣椒与棉花均为一次性采摘, 棉花未成熟部分作为生物量计算, 记为棉铃, 不计入产量.

1.4 样品采集与测定

5种作物收获时间见附表1. 收获方式为: 5种作物均在样方中心选取1 m × 1 m样点, 贴近地表取地上部分并包裹防止样品脱落. 样点中作物长势与取样周围作物长势均一. 收获完运回实验室后将地上部分按照各器官分别装入9号信封进行烘干、称重. 烘干过程先用105 °C对样品杀青30 min, 然后在75 °C条件下烘干至恒重. 本文中作物产量指可作为商品在市场上流通的部分: 小麦去除颖壳烘干后记录干物质作为产量; 玉米取烘干后玉米粒的重量作为产量; 向日葵则取烘干后的葵花籽作为产量; 棉花产量为烘干后的籽棉重量; 辣椒产量为烘干后的辣椒果重量. 除去产量部分, 剩余作物地上部分记为生物量, 地上部总生物量包括生物量和产量.

2019年小麦和向日葵的籽粒在保存过程中发生虫害和鼠害, 其产量数据受到影响, 因此在结果分析中未包括2019年这两种作物.

1.5 灌溉水利用效率、水资源生产力和收获指数计算方法

灌溉水利用效率(irrigation water use efficiency, IWUE; kg/m³)^[9]为产量(kg/hm²)与灌水量(m³/hm²)的比值(公式1), 用来衡量灌溉水的投入产出比.

单位水收益(economic water productivity, EWP; 元/m³)是作为可以流通的产量的收益扣除投入后的净收益(元/hm²)与灌水量(m³/hm²)的比值, 用来衡量灌溉水的净收益(公式2).

$$IWUE = \frac{\text{作物产量}}{\text{生长季总灌水量}} \quad (1)$$

$$EWP = \frac{\text{农作物收入} - \text{作物生长季总支出}}{\text{生长季总灌水量}} \quad (2)$$

公式(2)中, 农作物收入为农作物产量乘以农作物单价, 作物生长季总支出包括耕种、播种、收获等人工成本, 种子价格以及灌溉支出等费用, 5种作物生长季总支出详见附表2. 其中作物价格按照当地2017-2019年平均市场价格计算: 玉米平均价格为1.6元/kg, 小麦平均价格为3元/kg, 棉花平均价格为6.5元/kg, 干辣椒价格为5元/kg, 向日葵价格为2.6元/kg; 灌溉用水单位价格为0.26元/m³.

收获指数(harvest index, HI)^[9]是指作物经济产量(kg/hm²)与地上部总生物量(kg/hm²)之比(公式3).

$$HI = \frac{\text{作物经济产量}}{\text{地上部生物量}} \quad (3)$$

1.6 统计分析

进行单因素方差分析之前, 对所有的数据进行正态和方差齐性检验, 满足条件后采用单因素方差分析和LSD多重比较分析不同灌水定额对5种作物的生物量、收获指数、产量、IWUE和EWP的影响. 试验数据分析软件为SPSS 18.0.0; 文中所有图均由Python 3.9.6和Matplotlib 3.4.2绘制.

2 结果

2.1 不同灌溉梯度对作物生理成熟期生物量的影响

5种作物中, 向日葵T1-T5灌水定额下的生物量均高于其余4种作物同等灌水定额下生物量(图2). 2020年向日葵T1-T5下的生物量为37.56、38.00、34.85、30.07、22.73 t/hm², 平均生物量为32.64 t/hm². 玉米生物量仅次于向日葵, 2019年与2020年平均生物量分别为20.74 t/hm²与22.18 t/hm². 2年生物量数据均表明在同等灌水定额下, 辣椒生物量最低.

两年的试验结果表明棉花、向日葵和小麦的生物量均随着灌水定额的减少而降低, 玉米生物量在5个灌水定额下无显著性差异, 辣椒生物量T1-T4显著高于T5. 2020年试验中, 辣椒生物量在T4达到最大值, 为8.83 t/hm², T5灌水定额下生物量比T4显著降低19%. T1和T2灌水定额下向日葵生物量显著高于T3-T5, 且5个灌溉梯度中, T2梯度下向日葵生物量最大, 为38.00 t/hm², T5灌水定额下生物量最低, 为22.73 t/hm². 与向日葵相似, 棉花在T2灌水定额下生物量最大, 最低值出现在T5, 棉花在T5灌水定额下两年生物量仅为11.2 t/hm²与7.14 t/hm²; T3、T4生物量无显著差异. 棉铃生物量两年试验中T1-T3处理均显著高于T5. 小麦生物量随着灌水定额减少, 分别在T2与T5出现两次显著降低. T1灌水定额下小麦生物量最大, 为12.70 t/hm², T5生物量最低, 不足T1生物量的50%, 仅为6.10 t/hm². 小麦在T5灌水定额下生物量显著低于T2-T4灌溉梯度, 仅为T2-T4平均生物量的61.8%.

2.2 不同灌溉梯度对收获指数的影响

5个灌水定额下, 玉米和向日葵在T2-T4灌溉梯度下收获指数均无显著性差异(表1). 棉花收获指数随着灌水量减少呈现先降低后增加的趋势. 在两年试验中, 辣椒的收获指数在T2与T3灌溉梯度下均无显著差异. 与棉花变化趋势相同, 小麦收获指数随着灌水量减少而呈现先降低后升高的趋势. 小麦T4收获指数为0.4, 显著低于T5灌溉梯度, T1-T3灌溉梯度下收获指数无显著性差异.

2.3 不同灌溉梯度对产量的影响

两年试验中, 玉米平均产量最高, 两年T1-T5平均产量分别为24.9、26.9、23.8、22.5和17.5 t/hm², 均高于同等灌水定

额下其余4种作物产量(图3)。棉花平均产量最低,两年所有灌水定额平均产量仅为6.77 t/hm²。

除棉花与辣椒外,其他3种作物产量总体表现出随着灌水定额减少而降低的趋势。玉米在T1、T2间无显著性差异;当灌水定额低于T3时产量显著降低,玉米两年试验中T3产量分别为21.90和25.74 t/hm²,T5两年的平均产量为12.95和22.07 t/hm²,显著低于T1、T2。小麦T1灌水定额下产量为9.84

t/hm²,显著高于T2、T4、T5;T3灌水定额下小麦产量为8.61 t/hm²,该产量与其余4个灌水定额下小麦产量均无显著性差异。向日葵在T2灌水定额下产量达到17.73 t/hm²,灌水定额高于T2时,产量无显著降低;相反,当灌水定额降低至T4,向日葵产量显著降低,产量为8.63 t/hm²。2019年试验中,棉花籽棉在T1-T4显著高于T5,但是2020年产量在T1-T5之间均无显著性差异。辣椒产量在T2-T4间无显著性差异,T5籽棉产量较T4

表1 2019和2020年5种作物收获指数

Table 1 Harvest indices of the 5 crops in 2019 and 2020

年份 Year	灌水定额 Irrigation quota	玉米 Corn	棉花 Cotton	辣椒 Pepper	向日葵 Sunflower	小麦 Wheat
2019	T1	0.52 ± 0.03ab	0.26 ± 0.08c	0.55 ± 0.08a		
	T2	0.56 ± 0.01a	0.32 ± 0.08b	0.52 ± 0.08a		
	T3	0.54 ± 0.00a	0.31 ± 0.08b	0.53 ± 0.08a		
	T4	0.55 ± 0.06a	0.41 ± 0.08a	0.51 ± 0.08ab		
	T5	0.47 ± 0.00b	0.38 ± 0.08b	0.44 ± 0.08b		
2020	T1	0.55 ± 0.01a	0.37 ± 0.03ab	0.54 ± 0.01a	0.27 ± 0.03a	0.44 ± 0.02ab
	T2	0.54 ± 0.02a	0.31 ± 0.02b	0.59 ± 0.02a	0.32 ± 0.08a	0.42 ± 0.02ab
	T3	0.52 ± 0.03a	0.34 ± 0.05b	0.58 ± 0.01a	0.25 ± 0.07a	0.45 ± 0.02ab
	T4	0.53 ± 0.01a	0.38 ± 0.10ab	0.54 ± 0.02b	0.22 ± 0.02a	0.40 ± 0.03b
	T5	0.51 ± 0.02a	0.45 ± 0.04a	0.51 ± 0.02b	0.23 ± 0.04a	0.47 ± 0.02a

不同字母表示具有显著性差异 ($P < 0.05$)。

T1, 1 800 m³/hm²; T2, 1 440 m³/hm²; T3, 1 080 m³/hm²; T4, 720 m³/hm²; T5, 360 m³/hm². Different letters indicate significant differences in harvest index among different irrigation quotas ($P < 0.05$).

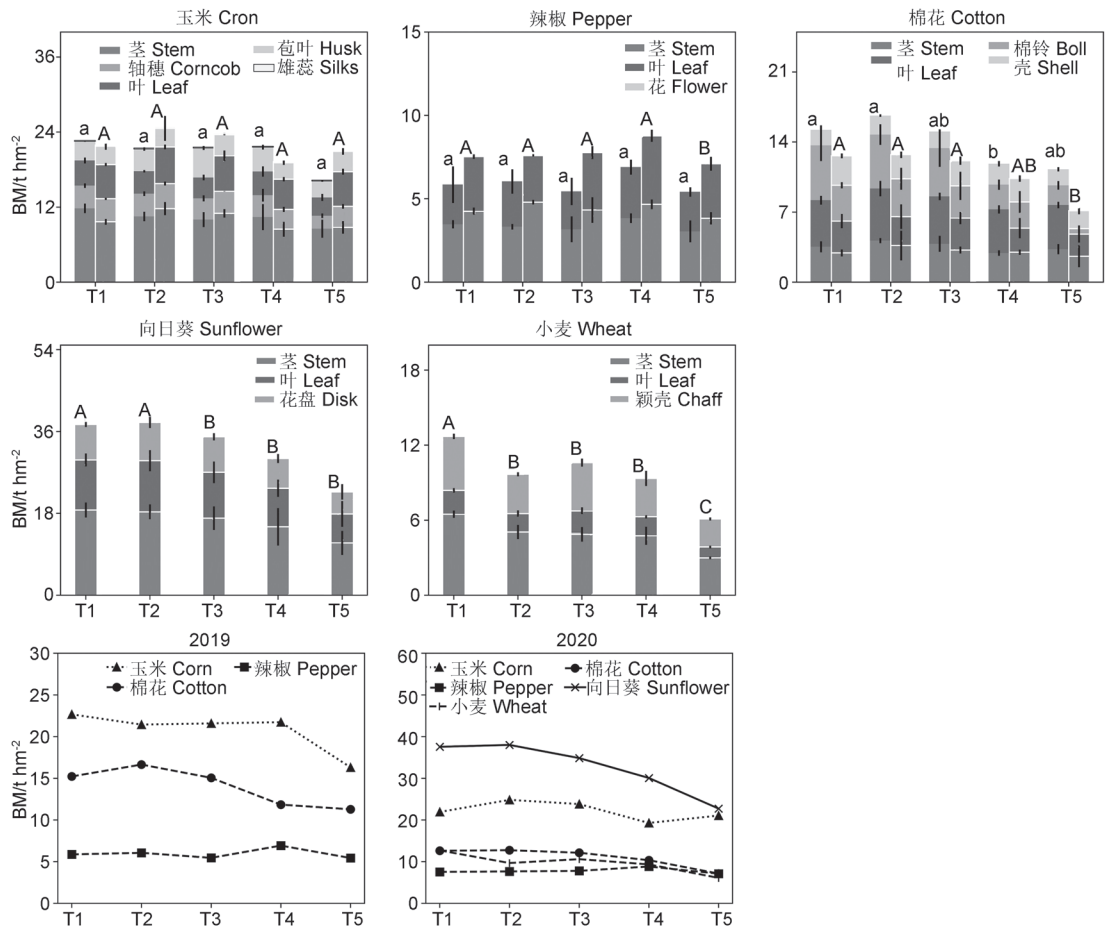


图2 不同灌水定额下玉米、辣椒、棉花、向日葵和小麦不同器官2019年和2020年(填充的柱图)生物量以及2019年、2020年5种作物的生物量(线图)。灌水定额: T1, 1 800 m³/hm²; T2, 1 440 m³/hm²; T3, 1 080 m³/hm²; T4, 720 m³/hm²; T5, 360 m³/hm²。不同小写字母表示不同灌水定额之间2019年生物量有显著性差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同灌水定额之间2020年生物量有显著差异。BM: 生物量。

Fig. 2 The biomass of different aboveground organ of corn, pepper, cotton, sunflower, and wheat under five irrigation quotas in 2019 and 2020 (filled columns), and total biomass of five crops in 2019 and 2020 (line charts). Irrigation quotas: T1, 1 800 m³/hm²; T2, 1 440 m³/hm²; T3, 1 080 m³/hm²; T4, 720 m³/hm²; T5, 360 m³/hm². Different lowercase letters indicate significant differences of biomass in 2019 ($P < 0.05$) and different uppercase letters indicate significant difference of biomass in 2020. BM: biomass.

显著降低10%。

2.4 不同灌溉梯度对IWUE的影响

5种作物IWUE均表现出从T1到T5逐渐增加的趋势(图

4)。2019年玉米、辣椒、棉花平均IWUE分别为2.30、5.87、2.92 kg/m³。2020年玉米、辣椒、棉花、向日葵、小麦平均IWUE分别为6.06、2.3、1.93、3.03、1.69 kg/m³，其中玉米平

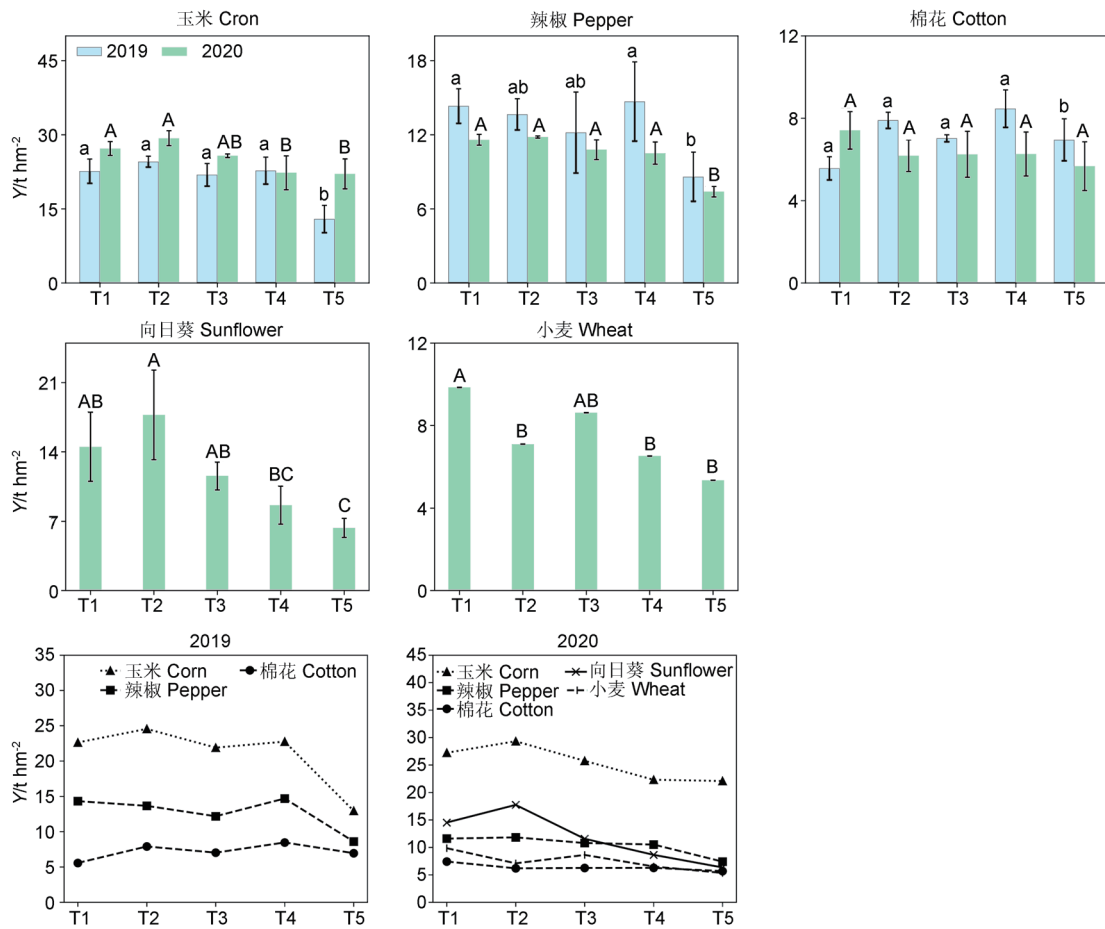


图3 5个灌水定额(T1-T5)下玉米、辣椒、棉花、向日葵、小麦2019年和2020年的产量(Y)变化。不同小写字母表示不同灌水定额间2019年产量有显著性差异($P < 0.05$)，不同大写字母表示不同灌水定额间2020年产量有显著性差异。

Fig. 3 Yield (Y) of corn, pepper, cotton, sunflower, and wheat under five irrigation quotas (T1-T5) in 2019 and 2020. Different lowercase letters indicate significant differences of yield among irrigation quotas in 2019 ($P < 0.05$) and different uppercase letters indicate significant differences of yield among irrigation quotas in 2020 ($P < 0.05$).

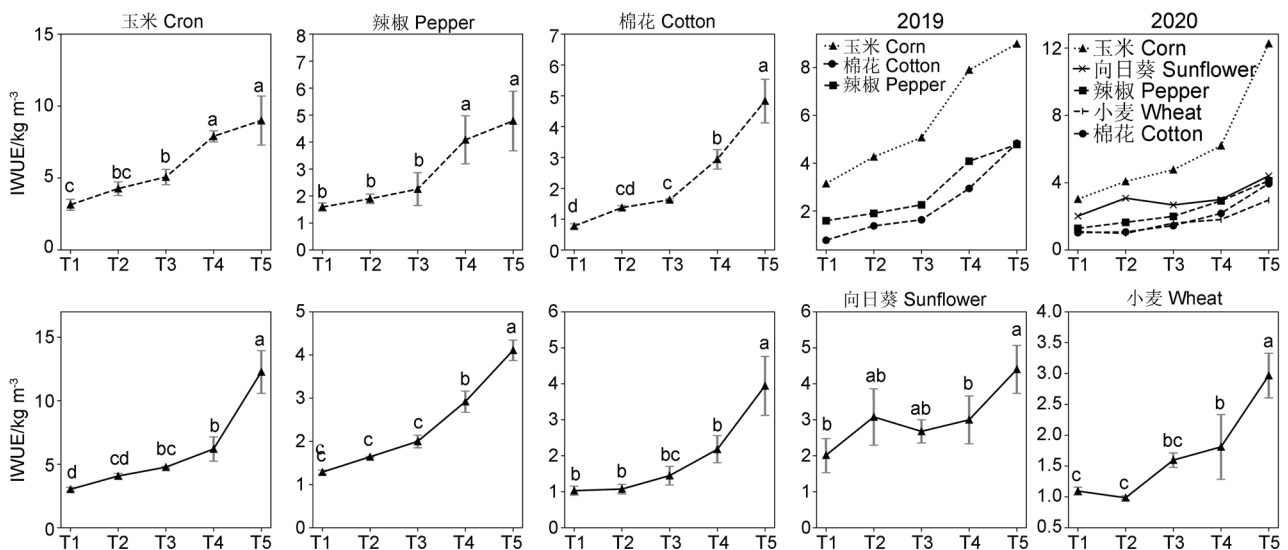


图4 2019年(虚线)和2020年(实线)玉米、辣椒、棉花、向日葵和小麦不同灌水定额(T1-T5)下的水分利用效率(IWUE)。不同小写字母表示不同灌水定额间IWUE有显著差异($P < 0.05$)。

Fig. 4 The irrigation water use efficiency (IWUE) of corn, pepper, cotton, sunflower, and wheat under five irrigation quotas (T1-T5) in 2019 (dashed line) and 2020 (solid line). Different letters indicate significant differences of IWUE among five irrigation quotas ($P < 0.05$).

均IWUE最高,小麦最低. 5个灌水定额下,玉米IWUE均高于其他4种作物,2020年玉米T1-T5 IWUE依次为3.02、4.07、4.76、6.20、12.27 kg/m³. 小麦5个灌水定额下IWUE仅介于0.99-2.97 kg/m³之间.

5种作物在T5灌水定额下IWUE均达到最大值,但IWUE随灌水定额变化趋势在5种作物间不同. 除向日葵外,其他4种作物在T5灌水定额下IWUE显著高于其他处理. 2020年试验中,向日葵IWUE在T1-T4灌溉梯度间无显著差异, T1-T4的平均IWUE为2.69 kg/m³. 玉米、棉花IWUE在灌水定额低于T3时开始显著增加. 2020年辣椒T1下IWUE为0.84 kg/m³,当灌水定额减少至T2时,辣椒IWUE呈现显著增加, T2灌溉条件下IWUE为1.64 kg/m³,当灌水定额降低至T5时,辣椒IWUE达到最大,为4.11 kg/m³. 小麦T1灌水定额下IWUE为1.09 kg/m³,其IWUE在T1-T3间无显著变化, IWUE从T4开始呈现显著增加趋势并且在T5灌水定额下达到最大,为2.97 kg/m³.

2.5 不同灌溉梯度对EWP的影响

5种作物中,棉花平均EWP最大,两年平均值分别为9.19和6.75元/m³,玉米、辣椒次之. 2020年玉米和辣椒的EWP分别为6.84、5.74元/m³,向日葵平均EWP为3.38元/m³,小麦EWP最低,仅为2.49元/m³(图5). 在T1灌水定额下,2020年5种作物EWP差异较小,玉米、棉花、辣椒、向日葵和小麦EWP分别为3.55、4.11、1.61、3.23、2.12元/m³. 随着灌水定额逐渐降低,5种作物的EWP表现出不同的增加趋势. 当灌水定额减少至T5时,棉花EWP最大,为12.97元/m³;玉米与辣椒两年平均EWP分别为5.75和7.28元/m³;小麦最低,仅为2.49元/m³. 在T5灌水定额下玉米、棉花、辣椒、小麦EWP均显著高于T1-T4;向日葵则表现为T2显著高于T4、T5, T1, T2, 无显著性差异.

5种作物中,棉花EWP变化趋势最明显,两年最大值(T5)与最小值(T2)相差分别为9.2与16.29元/m³,小麦变化最小,仅为1.8元/m³. 在5个灌水定额下,棉花EWP受灌水定额影响最明显,辣椒、玉米次之,向日葵、小麦EWP受灌水定额影响较小.

3 讨论

3.1 不同灌溉处理对生物量、产量、收获指数的影响

不同灌水定额下,玉米产量差异显著^[24-27]. 玉米两年生物量均在不同灌水定额间无显著性差异,但是产量在T5显著低于T1-T3. 吕宁等人研究结果表明,玉米不同器官干物质累积表现为籽粒>茎秆>叶片,随着灌水定额减少,玉米籽粒干物质累积量低于茎秆和叶片^[27],这与本研究中T5产量显著低于其他处理一致. 吕宁等人研究中未提及试验地土壤田间持水量等相关数据,仅提供了玉米生长季滴灌灌溉定额,当灌溉定额为5 200 m³/hm²(对应试验中T3梯度),生物量最高,甚至高于6 000 m³/hm²(对应试验中介于T3与T2梯度之间). 本研究中玉米在T3-T5生物量、产量等与吕宁等结果一致,但是T1-T3之间的变化趋势与吕宁等人研究结果有所不同. 吕宁等人利用滴灌方式对玉米进行灌溉,而本研究中采用漫灌的方式,在漫灌的过程中会在土壤表面形成大量的积水,民勤当地蒸散发强度大,导致在T1-T3灌水定额下存在无效水资源灌溉.

2019年棉花产量与2020年表现出较大差异: 2020年5个灌水定额下,棉花产量均无显著差异,但是2019年棉花产量在T1-T4灌水定额下显著高于T5. 主要原因为2020年在棉花生理成熟期前15 d喷洒了乙烯利,导致未开棉铃提前成熟. 但是如图2和图3所示,2019年与2020年T1-T3灌水定额下棉花的籽棉和未开棉铃总质量均显著高于T5,说明过度水分亏缺会降低棉花产量和棉铃重^[12].

有研究表明,辣椒属于浅根性作物,过度灌溉会影响其产量^[28-30]. 在本研究中,辣椒在T1条件下,产量、生物量低于T2和T3,但是均未达到显著性水平. 前人灌溉方式多为节水设备灌溉或控制土壤水负压的方式对辣椒进行灌溉,但是在本研究中辣椒灌溉方式为漫灌,灌水定额高的试验样方地表积滞大量水分,由于民勤县当地蒸散量大,灌溉水量一部分以蒸散发的形式离开地表,导致T1与T2、T3生物量没有显著差异. 另一方面,不同灌溉梯度对辣椒收获指数的影响与其对产量的影响一致, T1-T3灌水定额下显著高于T5^[29].

向日葵生物量在T1和T2灌水定额下显著高于T3-T5,但是T1-T3灌水定额下产量没有表现出显著性差异,说明当灌水定

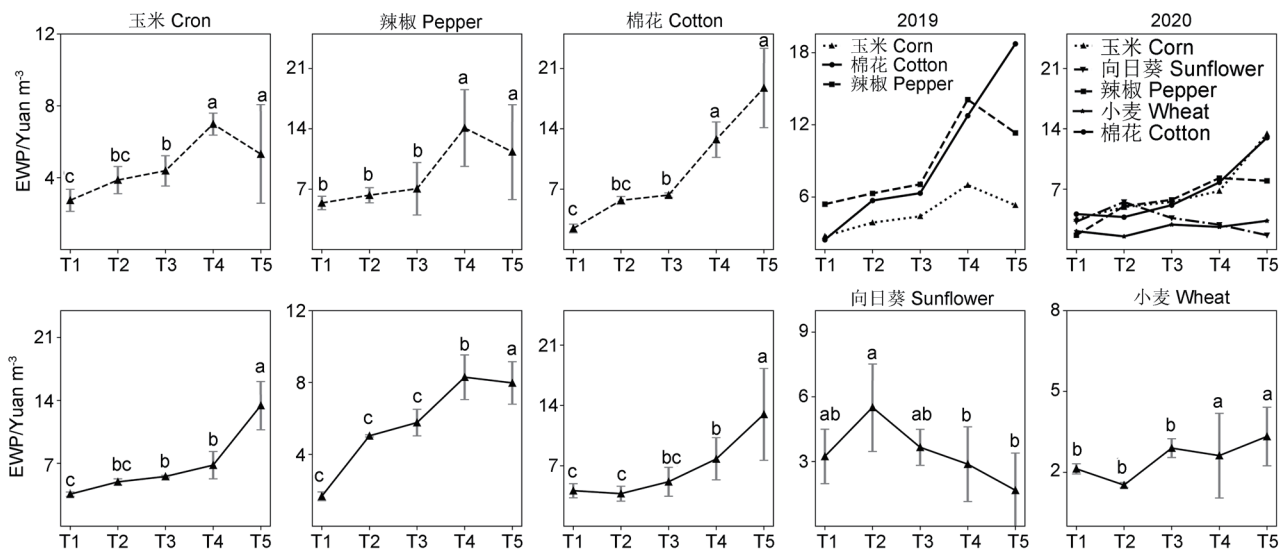


图5 2019年(虚线)和2020年(实线)玉米、辣椒、棉花、向日葵和小麦5个灌水定额(T1-T5)下的单位水收益(EWP). 不同小写字母表示不同灌溉梯度之间EWP有显著性差异($P < 0.05$).

Fig. 5 The economic water productivity (EWP) of corn, pepper, cotton, sunflower and wheat under five irrigation quotas (T1-T5) in 2019 (dashed line) and 2020 (solid line). Different letters indicate significant differences in EWP among different irrigation quotas ($P < 0.05$).

额高于 $1\ 080\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 时,向日葵将更多水分用于茎、叶等器官的干物质积累,因此高于 $1\ 080\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 的灌水为多余灌溉。向日葵收获系数在5个灌水定额间无显著差异,与Howell等人研究结果^[31]接近,在0.22-0.32之间。

前人研究表明,土壤相对含水量低于60%时会降低小麦地上部累积量^[32-33],但在本研究中,T3与T2和T4灌水定额下生物量无显著性差异。当地漫灌时间为1-2 d,由于较高的蒸散量,过高的灌水定额会出现水分流失,未被作物利用。本研究中T5灌水定额下小麦的地上部生物量显著低于其他4个灌溉梯度,该结果与王晨阳的研究结果^[33]一致,这也可说明在民勤当地,灌水定额会显著改变小麦生物量和产量,但是过高的灌水定额会导致大量水分流失,浪费水资源。

3.2 不同灌溉处理对IWUE和EWP的影响

IWUE高值一般不是在供水充足、产量最高时获得^[34]。本研究中,5种作物IWUE均随着灌水定额减少而逐渐增加(图4)。5种作物相邻梯度间产量变化随灌水定额减少1%-34.8%,部分梯度间出现产量增长,但是5个灌水定额梯度之间灌水量减少20%-50%,产量降低速率比灌水定额降低速率小,因此5种作物表现出IWUE随灌水定额的减少而增加。

IWUE可以反映不同作物对灌溉水资源的利用程度^[35]。5个灌水定额下玉米IWUE均高于向日葵、辣椒、棉花和小麦,且伴随着灌水定额减少,作物间IWUE差异越大(图4)。研究表明,在产量水平上,C3作物的IWUE明显小于C4植物^[35-36]。玉米和向日葵为C4植物,其他3种作物为C3植物,C4植物 CO_2 同化效率高^[37-38],并且植物受到干旱胁迫时,植物部分关闭气孔以防止水分流失,这导致植物叶肉细胞间 CO_2 浓度升高,C4植物可以维持较高的 CO_2 同化能力,这可能是玉米IWUE高于其他作物的主要原因。

EWP不仅与粮食产量、灌水定额相关,粮食价格和单位水价也直接影响EWP值。5种作物的EWP随着灌水定额减少而呈现递增趋势(图5)。这是由于灌水定额以20%的速率递减,不同作物T2-T5灌水量减少率为20%-50%,但是5种作物净收益(公式(2)分子部分)降低速率仅为9.6%-24.3%,因此导致EWP随着灌水定额降低而升高。5个灌溉梯度下棉花平均EWP最高,为 $7.97\ \text{元}/\text{m}^3$,其次为辣椒($7.28\ \text{元}/\text{m}^3$)、玉米($5.75\ \text{元}/\text{m}^3$)、向日葵($3.38\ \text{元}/\text{m}^3$)和小麦($2.49\ \text{元}/\text{m}^3$)。玉米IWUE高于其余4种作物,但是由于玉米价格($1.6\ \text{元}/\text{kg}$)低于其他作物,且玉米、辣椒、小麦生长季灌溉次数比向日葵、棉花多1次(附表1和附表2),导致玉米相同灌溉梯度下,每公顷玉米需要比棉花多支付水价 $93.6\text{--}468\ \text{元}$,最终导致玉米平均EWP低于棉花辣椒等作物。

从IWUE与EWP变化可以看出,玉米作为民勤县典型作

物,其IWUE最高,棉花在干旱胁迫下平均EWP最高,种植玉米和棉花有助于提高民勤县当地的IWUE和EWP。

3.3 试验局限性与结果可行性

由于当地灌水定额和灌溉方式适合灌溉水资源流量,在当前畦田出水口流量下,减少灌水定额面临无法对畦田完整灌溉的风险。通过提高每块畦田中入水口流量能够在合适灌水定额下,对农户畦田完整灌溉。本研究中,试验田样方大小为 $25\ \text{m}^2$,当地农户畦田规格为 $666.7\ \text{m}^2$,实际畦田规格是试验样方的26.67倍。试验样方入水口流量为 $6\ \text{m}^3/\text{h}$,然而当地由于灌溉水资源流量较大,因此在农业灌溉过程中会同时打开多个畦田入水口,河水每块畦田入水口流量约为 $150\ \text{m}^3/\text{h}$,井水每块畦田入水口流量约为 $60\ \text{m}^3/\text{h}$ 。河水灌溉时,畦田入水口流量是样方入水口流量的25倍;井水灌溉时,畦田入水口流量是样方入水口的10倍。通过减少灌溉时同时开放的入水口数量,提高畦田入水口流量,可以抵消由于试验样方与农户畦田大小差距导致无法完全灌溉畦田的情况。

4 结论

玉米产量与IWUE在5种供试作物中最高,因此从作物产量和田间灌溉的角度考虑,种植玉米能更有效利用水资源。棉花EWP最高,辣椒与玉米略低于棉花。因此在当地种植棉花、辣椒、玉米可以实现水资源的有效经济产出。综合考虑产量、IWUE、EWP和生物量,玉米种植在水资源有效利用与经济产出方面相对棉花、辣椒、向日葵、小麦更为有效。

结合产量、IWUE、EWP和生物量结果, $1\ 080\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 灌溉梯度适合作为向日葵生长季的灌水定额; $720\ \text{m}^3/\text{hm}^2$ 适合作为玉米、棉花、辣椒、小麦4种作物生长季灌水定额。两个灌水定额低于当前民勤县实际灌水定额。因此减少民勤县农业用地灌水定额,既可以减少农田过度灌溉,也可以提高农作物水分利用效率。

提高产量和单位水收益是农业生产的主要目的。本研究从产量、生物量、IWUE和EWP研究5种作物的最佳灌水定额,但是仅从产量角度上难以充分揭示作物对不同灌水定额的响应机理,因此探究不同作物的最佳灌水定额需要进一步结合观测土壤水分和作物生长季生理数据,如光合速率、叶面积指数、蒸散量、生长季不同器官含水量等指标。另外,农作物模型能够模拟作物生长季产量、蒸散量、土壤水分等数据,因此基于田间试验获得的数据,结合模型模拟能够指导农作物灌溉。在减少灌水定额后,土壤盐分淋溶作用以及盐分积累的风险也需要进一步研究、验证。

参考文献 [References]

- 于贵瑞,何洪林,王秋凤,何念鹏.加强生态站网络对北方生态屏障的科技支撑[J].人与生物圈,2021(1):12-15 [Yu GR, He HL, Wang QF, He NP. Strengthen the scientific and technological support of the ecological station network to the northern ecological barrier [J]. *Man Biosph*, 2021 (1): 12-15]
- 张世昌.干旱区绿洲农业现代化质量空间分异[D].兰州:兰州大学,2016 [Zhang SC. A research on the spatial distribution and types of the development level of agricultural modernization within arid oasis-taken Minqin for example [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016]
- 卢雪梅.民勤县林地资源保护利用现状及对策建议[J].绿色科技,2019(23):232-233 [Lu XM. The protection and utilization status of forest land resources in Minqin county and countermeasures [J]. *J Green Sci Technol*, 2019 (23): 232-233]
- 季丽,杨兵来.干旱缺水民勤县水资源持续高效利用策略研究[J].乡村科技,2019(27):113-114 [Ji L, Yang BL. Research on the strategy of sustainable and high-efficiency utilization of water resources in Minqin county [J]. *Rural Technol*, 2019 (27): 113-114]
- 张振龙,孙慧,苏洋,何昭丽.中国西北干旱地区水资源利用效率及其影响因素[J].生态与农村环境学报,2017,33(11):961-967 [Zhang ZL, Sun H, Su Yang, He ZL. Water use efficiency and its

- influencing factors in arid areas of Northwest China [J]. *J Ecol Rural Environ*, 2017, **33** (11): 961-967]
- 6 杨怀德, 冯起, 黄珊, 李勇进. 民勤绿洲水资源调度的生态环境效应[J]. 干旱区资源与环境, 2017, **31** (7): 68-73 [Yang HD, Feng Q, Huang S, Li YJ. Environmental effects of surface water reallocation in Minqin County [J]. *J Arid Land Res Environ*, 2017, **31** (7): 68-73.]
 - 7 Zhu Q, Li Y. Environmental restoration in the Shiyang River Basin, China: conservation, reallocation and more efficient use of water [J]. *Aquat Proc*, 2014, **2**: 24-34
 - 8 段爱旺. 水分利用效率的内涵及使用中需要注意的问题[J]. 灌溉排水学报, 2005, **24** (1): 8-11 [Duan AW. Connection of water use efficiency and its application in water-saving practice [J]. *J Irrig Drain*. 2005, **24** (1): 8-11]
 - 9 Fernandez JE, Alcon F, Diaz-Espejo A, Hernandez-Santana V, Guevas MV. Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: a case study of a super high density olive tree orchard [J]. *Agric Water Manag*, 2020, **237**: 1-13
 - 10 Igbadun HE. Crop water productivity of an irrigated maize crop in Mkoji sub- catchment of the Great Ruaha River Basin, Tanzania [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2006, **85** (1-2): 141-150
 - 11 Gonalo C. Rodrigues, Luis S. Pereira. Assessing economic impacts of deficit irrigation as related to water productivity and water costs [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2009, **103** (4): 536-551
 - 12 杨北方, 杨国正, 冯璐, 韩迎春, 雷亚平, 范正义, 王占彪, 李亚兵. 亏缺灌溉对棉花生长和水分利用效率的影响研究进展[J]. 应用生态学报, 2021, **32** (3): 1112-1118 [Yang BF, Yang GZ, Feng L, Han YC, Lei YP, Fan ZY, Wang ZB, Li YB. Effect of deficit irrigation on cotton growth and water use efficiency: a review [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2021, **32** (3): 1112-1118]
 - 13 潘晓莹, 武继承, 张森森, 杨永辉, 王越, 李敏杰, 高翠民, 何方. 分期施肥补灌对小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, **18** (4): 63-69 [Pan XY, Wu JC, Zhang SS, Yang YH, Wang Y, Li MJ, Gao CM, He F. Effects of staged fertilization and supplementary irrigation on wheat yield and water use [J]. *J Wat Res Arch Eng*, 2020, **18** (4): 63-69]
 - 14 康绍忠, 史文娟, 胡笑涛, 梁银丽. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 1998, **14** (4): 82-87 [Kang SZ, Shi WJ, Hu XT, Liang YL. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 1998, **14** (4): 82-87]
 - 15 王佳, 李阳, 贾倩民, 常生华, Shahzad A, 张程, 刘永杰, 侯扶江. 种植密度与施氮对河西灌区青贮玉米产量与品质及水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2021, **30** (1): 60-73 [Wang J, Li Y, Jia QM, Chang SH, Shahzad A, Zhang C, Liu YJ, Hou FJ. Effects of planting density and nitrogen application on yield, quality and water use efficiency of silage maize in Hexi Irrigation Region [J]. *Acta Agr Bor Occ Sin*, 2021, **30** (1): 60-73]
 - 16 付国占, 李潮海, 王俊忠, 王振林, 曹鸿鸣, 焦念元, 陈明灿. 残茬覆盖与耕作方式对土壤性状及夏玉米水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2005, **21** (1): 52-56 [Fu GZ, Li CH, Wang JZ, Wang ZL, Cao HM, Jiao NY, Chen MC. Effects of stubble mulch and tillage managements on soil physical proper ties and water use efficiency of summer maize [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2005, **21** (1): 52- 56]
 - 17 姜艳, 王鹏, 徐飞, 刘东洋. 种植模式对机采棉生长及棉田水分利用效率的影响[J]. 西北农业学报, 2021, **30** (1): 93-101 [Jiang Y, Wang P, Xu Fi, Liu DY. Effects of planting modes on machine-picked cotton growth and water use efficiency [J]. *Acta Agr Bor Occ Sin*, 2021, **30** (1): 93-101]
 - 18 王文生. 甘肃年鉴[M]. 兰州: 甘肃民族出版社. 2018 [Wang WS. Gansu Yearbook [M]. Lanzhou: Gansu Nation Publish House, 2018]
 - 19 王祺, 王继和, 徐延双, 崔宏明. 干旱荒漠绿洲紫花苜蓿的节水灌溉及水效益分析——以民勤县为例[J]. 中国沙漠, 2004, **3**: 89-94 [Wang Q, Wang JH, Xu YS, Cui HM. Analysis on water irrigation and water effectiveness of *Medicago sativa* in arid desert oasis--an example of Minqin County [J]. *J Des Res*, 2004, **3**: 89-94]
 - 20 Kadigi RMJ, Kashaigili JJ, Mdoe NS. The economics of irrigated paddy in Usangu Basin in Tanzania: water utilization, productivity, income and livelihood implications [J]. *Phys Chem Earth*, 2004, **29** (15-18): 1091-1100
 - 21 Nesshover C, Assmuth T, Irvine K N, Rusch GM, Waylen KA, Delbaere B, Haase D, Jones WL, Keune H, Kovacs E, Krauze K, Kulvik M, Rey F, Van DJ, Vistad OI, Wilkinson ME, Wittmer H. The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective [J]. *Sci Total Env*, 2017, **579**: 1215-1227
 - 22 Gomez ME, Manez CM, Egerer S, Schneider UA. Assessing the long-term effectiveness of nature-based solutions under different climate change scenarios [J]. *Sci Total Envir*, 2021, **794**: 1-12
 - 23 杨全斌. 民勤县农田水利灌溉节水工作成效与经验分析[J]. 南方农业, 2020, **14** (26): 214-215 [Yang QB. Achievements and experience analysis of water conservancy irrigation and water saving work in Minqin County [J]. *S Agric Chin*, 2020, **14** (26): 214-215]
 - 24 曹庆军, 崔金虎, 王洪预, 温海娇, 高亚男, 罗利红, 韩海飞. 玉米拔节期后不同水分处理对植株性状和水分利用效率的影响[J]. 玉米科学, 2011, **19** (3): 105-109 [Cao QJ, Cui JH, Wang HY, Wen HJ, Gao YN, Luo LH, Han HF. Effect of water treatments after jointing stage on plant characters and water use efficiency of maize [J]. *J Maize Sci*, 2011, **19** (3): 105-109]
 - 25 刘春光, 高洪军, 李强, 赵化春, 尚东辉, 朱平. 吉林省西部半干旱区玉米需水规律及生长发育动态探讨[J]. 吉林农业科学, 2009, **34** (6): 16-19 [Liu CG, Gao HJ, Li Q, Zhao HC, Shang DH, Zhu P. The regularities of water requirement and growing dynamics of maize in semiarid region of western Jilin Province [J]. *J Jilin Agr Sci*, 2009, **34** (6): 16-19]
 - 26 Leahey ADB, Uribelarrea M, Ainsworth EA, Naidu SL, Rogers A, Ort DR, Long SP. Photosynthesis, productivity, and yield of maize are not affected by open-air elevation of CO₂ concentration in the absence of drought [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2006, **140** (2): 779-790
 - 27 吕宁, 石磊, 王国栋, 梁飞. 不同滴灌定额对玉米生长及土壤盐分运移的影响[J]. 新疆农垦科技, 2019, **42** (9): 3-8 [Lü N, Shi L, Wang GD, Liang F. Effects of different drip irrigation quotas on corn growth and soil salt transport [J]. *Xinjiang Farm Res Sci Technol*, 2019, **42** (9): 3-8]
 - 28 李焯, 张恒嘉, 李福强. 辣椒调亏灌溉研究现状综述[J]. 中国水运, 2017, **17** (11): 185-186 [Li X, Zhang HJ, Li FQ. Summary of research status of pepper regulated deficit irrigation [J]. *Chin Water Transp*, 2017, **17** (11): 185-186]
 - 29 向艳艳, 黄运湘, 龙怀玉, 龙泉, 张杨珠. 不同给水负压对辣椒生长及水分利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2019, **40** (1): 161-168 [Xiang YY, Huang YX, Long HY, Long Q, Zhang YZ. Effects of different negative pressures on the growth and water use efficiency of pepper plants [J]. *Res Agric Mod*, 2019, **40** (1): 161-168]
 - 30 郭文忠, 陈青云, 高丽红, 曲梅, 徐新福. 设施蔬菜生产节水灌溉制度研究现状及发展趋势[J]. 农业工程学报, 2005, **21** (14): 24-27 [Guo WZ, Chen QY, Gao LH, Qu M, Xu XF. Present situation and developmental tendency on system of water-saving irrigation of vegetable production in protective cultivation [J]. *Trans Chin Soc*

- Agric Eng*, 2005, **21** (14): 24-27]
- 31 Howell TA, Evett SR, Tolck JA, Copeland KS, Marek TH. Evapotranspiration, water productivity and crop coefficients for irrigated sunflower in the US Southern High Plains [J]. *Agric Water Manag*, 2015, **162**: 33-46.
 - 32 Zhang BC, Li FM, Huang GB, Cheng ZY, Zhang YH. Yield performance of spring wheat improved by regulated deficit irrigation in an and area [J]. *Agric Water Man*, 2006, **79** (1): 28-42
 - 33 王晨阳. 土壤水分胁迫对小麦形态及生理影响的研究[J]. 河南农业大学学报, 1992, **26** (1): 89-98 [Wang CY. The effects of soil water stress on morphological and physiological of wheat [J]. *Acta Agric Uni Henan*, 1992, **26** (1): 89-98]
 - 34 山仑. 植物水分利用效率和半干旱地区农业用水 [J]. 植物生理学通讯, 1994 (1): 61-66 [Shan K. Plant water use efficiency and agricultural water use in semi-arid areas [J]. *Plant Physiol Comm*, 1994 (1): 61-66]
 - 35 任鸿瑞, 罗毅. 鲁西北平原冬小麦和夏玉米耗水量的实验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, **23** (4): 37-39 [Ren HR, Luo Y. The experimental research on the water-consumption of winter wheat and summer maize in the northwest plain of shandong province [J]. *J Irr Drain*, 2004, **23** (4): 37-39]
 - 36 叶子飘, 杨小龙, 康华靖. C₃和C₄植物光能利用效率和水分利用效率的比较研究[J]. 浙江农业学报, 2016, **28** (11): 1867-1873 [Ye ZP, Yang XL, Kang HJ. Comparison of light-use and water-use efficiency for C₃ and C₄ species [J]. *Acta Agric Zhejiang*, 2016, **28** (11): 1867-1873]
 - 37 严巧娣, 苏培玺, 高松. 干旱程度对C₃植物红砂和C₄植物珍珠光合生理参数的影响[J]. 中国沙漠, 2012, **32** (2): 364-371 [Yan QD, Su PX, Gao S. Response of photosynthetic characteristics of C₃ desert plant *Reaumuria soongorica* and C₄ desert plant *Salsola passerina* to different drought degrees [J]. *J Des Res*, 2012, **32** (2): 364-371]
 - 38 Percy RW, Ehleringer J. Comparative ecophysiology of C-3 and C-4 plants [J]. *Plant Cell Environ*, 1984, **7** (1): 1-13

附表1 2019年和2020年5种作物播种、灌溉、收获时间(月-日)

Table S1 Sowing date, irrigation date, and harvest date (month-day) of the 5 crops in 2019 and 2020

年份 Year	作物名称 Species	播种时间 Sowing date	第一次灌溉 1 st irrigation	第二次灌溉 2 nd irrigation	第三次灌溉 3 rd irrigation	第四次灌溉 4 th irrigation	第五次灌溉 5 th irrigation	收获时间 Harvest date
2019	玉米 Corn	04-05	06-08	06-29	07-19	08-07	08-20	09-07
	棉花 Cotton	04-23	06-08	06-29	07-27	08-07		10-19
	辣椒 Pepper	04-14	06-08	06-29	07-19	08-07	08-29	09-26
2020	玉米 Corn	04-07	06-13	06-29	07-17	08-02	08-18	09-06
	棉花 Cotton	04-25	06-13	06-29	07-23	08-11		10-11
	辣椒 Pepper	04-10	06-13	06-29	07-17	08-02	08-18	09-16
	向日葵 Sunflower	04-07	06-13	06-29	07-17	08-02		08-21
	小麦 Wheat	03-24	05-03	05-17	05-30	06-13	06-29	07-22

附表2 5种作物生长季总支出

Table S2 Total output of the 5 crops during growing season

作物 Crop	灌溉定额 Irrigation quotas	种子价格 (SO/ Yuan hm ⁻²)	耕地支出 (AO/ Yuan hm ⁻²)	播种、收获支出 (SEHO/ Yuan hm ⁻²)	化肥支出 (FO/ Yuan hm ⁻²)	农药支出 (PO/ Yuan hm ⁻²)	地膜支出 (MO/ Yuan hm ⁻²)	灌溉支出 (IO/ Yuan hm ⁻²)	总支出 (TO/ Yuan hm ⁻²)
小麦 Wheat	T1	937.5	525	600	3375			2340	7777.5
	T2	937.5	525	600	3375		675	1872	7309.5
	T3	937.5	525	600	3375		675	1404	6841.5
	T4	937.5	525	600	3375		675	936	6373.5
	T5	937.5	525	600	3375		675	468	5905.5
辣椒 Pepper	T1	9000	525	300	4837.5		675	2340	17677.5
	T2	9000	525	300	4837.5		675	1872	17209.5
	T3	9000	525	300	4837.5		675	1404	16741.5
	T4	9000	525	300	4837.5		675	936	16273.5
	T5	9000	525	300	4837.5		675	468	15805.5
棉花 Cotton	T1	525	525	300	2452.5	1050	675	1872	7399.5
	T2	525	525	300	2452.5	1050	675	1497.6	7025.1
	T3	525	525	300	2452.5	1050	675	1123.2	6650.7
	T4	525	525	300	2452.5	1050	675	748.8	6276.3
	T5	525	525	300	2452.5	1050	675	374.4	5901.9
向日葵 Sunflower	T1	2400	525	720	4837.5	330	675	1872	11359.5
	T2	2400	525	720	4837.5	330	675	1497.6	10985.1
	T3	2400	525	720	4837.5	330	675	1123.2	10610.7
	T4	2400	525	720	4837.5	330	675	748.8	10236.3
	T5	2400	525	720	4837.5	330	675	374.4	9861.9
玉米 Corn	T1	270	525	257.1	4837.5		675	2340	8904.6
	T2	270	525	257.1	4837.5		675	1872	8436.6
	T3	270	525	257.1	4837.5		675	1404	7968.6
	T4	270	525	257.1	4837.5		675	936	7500.6
	T5	270	525	257.1	4837.5		675	468	7032.6

SO: Seed price; AO: Cultivation expenditures; SEHO: Seeding and harvesting expenditures; FO: Fertilizer expenditures; PO: Pesticide expenditures; MO: Plastic film expenditures; IO: Irrigation expenditures; TO: Total expenditures.