

调亏灌溉对荒漠绿洲膜下滴灌马铃薯生长、产量及水分利用的影响

薛道信¹,张恒嘉¹,巴玉春²,王玉才¹,王世杰¹

(1. 甘肃农业大学水利水电工程学院,甘肃 兰州 730070; 2. 民乐县洪水河管理处,甘肃 民乐 734503)

摘 要:以马铃薯品种青薯 168 为研究材料,研究了膜下滴灌条件下不同生育期土壤水分亏缺对马铃薯生长、薯块产量与水分利用等指标的影响。在不同生育阶段设置了 8 个水分亏缺处理(RD1~RD8)和 1 个充分灌水处理(CK)。结果表明:膜下滴灌调亏灌溉马铃薯产量、收获指数、水分利用效率、灌溉水利用效率等指标受水分亏缺影响显著,块茎形成期轻度水分亏缺 RD1 效果最佳,产量略有下降,但其水分利用效率、灌溉水利用效率与收获指数分别较其他处理及对照高 8.10%~41.57%、3.57%~42.62%、10.16%~34.38%;水分亏缺影响马铃薯各生育阶段耗水量,且亏缺程度越大,生育阶段消耗的水量减少越明显;全生育期马铃薯光合势和叶面积指数变化趋势基本一致,即生育前期缓慢上升,中期快速上升,后期缓慢下降,总体呈现单峰曲线。因此,适度水分亏缺有利于提高膜下滴灌马铃薯产量、水分利用效率、灌溉水利用效率,促进马铃薯生长并改善其水分利用状况。

关键词:马铃薯;产量;膜下滴灌;调亏灌溉;水分利用效率

中图分类号:S275.6;S532 **文献标志码:**A

Effects of regulated deficit irrigation on growth, yield and water use of potato under mulched drip irrigation in desert oasis region

XUE Dao-xin¹,ZHANG Heng-jia¹,BA Yu-chun²,WANG Yu-cai¹,WANG Shi-jie¹

(1. School of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;
2. Administration of Hongshui River, Minle, Gansu 734503, China)

Abstract: In this field experiment, Qingshu 168 was used as material, and eight water deficit treatments (RD1–RD8) and one full irrigation control group (CK) were performed in desert oasis region northwest China. The effects of soil water deficit on potato growth, yield and water use were studied under different drip conditions. The results showed that the yield, harvest index, water use efficiency and irrigation water use efficiency of potato under mulched drip irrigation were significantly affected by water deficit. The slight water deficit during tuber formation showed the best effect, of which the yield was slightly decreased, but the water use efficiency, irrigation water use efficiency and harvest index were significantly higher than those of other water deficit treatments and CK control group. The degree of water deficit seriously affect the amount of water consumed at different growth stages, and the degree of water deficit positively correlated with the water consumption. Leaf area duration and leaf area index changed in the similar trend, with the leaf area index showing a single peak curve. In conclusion, muchled drip irrigation can improve the yield, water use efficiency of the potato in desert oasis region.

Key words: potato; yield; mulched drip irrigation; regulated deficit irrigation; WUE

马铃薯是世界第三大重要粮食作物,其种植面积居世界第一位^[1]。中国是世界第一大马铃薯生产国,目前全世界马铃薯种植面积约 2 000 万公顷,

总产量约为 3.5 亿吨,我国马铃薯种植面积为 48.8 万公顷,种植面积和总产量均居世界第一位,均约为全世界的四分之一^[1]。甘肃省是我国重要的马

收稿日期:2017-04-01 修回日期:2017-09-01

项目基金:国家自然科学基金项目(51669001);甘肃省高等学校基本科研业务费项目(2012)

作者简介:薛道信(1990—),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。

通讯作者:张恒嘉(1974—),男,甘肃天水人,博士,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn

铃薯生产区,种植面积和产量均居全国前列,马铃薯种植业是西北地区最具发展潜力产业之一。在河西荒漠绿洲地区,马铃薯已成继小麦与大麦之后的第三大特色作物,随着我国马铃薯加工业的逐步兴起,马铃薯需求量迅猛增长,种植面积快速扩大^[2],然而河西荒漠绿洲灌区水资源严重短缺,降水稀少,蒸发强度大,灌溉水利用效率极低,河西荒漠绿洲地区马铃薯单产水平与世界先进相比仍有较大差距,马铃薯种植业亟需科学的理论指导和技术支持。

膜下滴灌栽培技术可将地膜覆盖增温、保墒与滴灌节水、增产等优点充分结合^[3]。国内外大量试验研究表明,亏缺灌溉对马铃薯生育期内的土壤水分时空分布和需耗水规律影响显著^[4],且在提高马铃薯薯块产量和改善块茎品质上也有着较为明显的作用^[5]。甘肃河西绿洲灌区,地处西北干旱内陆河流域,水资源短缺成为该区作物生长的主要限制因素^[6],而推广应用膜下滴灌技术能在一定程度上改善这一现状。因此,本试验是在前人研究的基础上^[7-10],将起垄覆膜、膜下滴灌和亏缺灌溉节水技术措施相结合,重点研究膜下滴灌亏缺灌溉技术条件下马铃薯全生育期的需水耗水规律、水分利用效率等指标,以达到节水、增产、高效和优质的目的。

膜下滴灌节水灌溉综合技术的发展目标是提高灌溉水利用效率、作物产量等。本文以马铃薯为供试作物,采用普通塑料地膜覆盖与膜下滴灌的灌溉方法,将计划湿润层的深度设为常数且不随生育时期推进而变化,通过比较分析不同生育时期水分亏缺处理马铃薯的植株生长动态、果实产量及水分利用效率等指标,以期对绿洲马铃薯高产高效栽培和农业水土资源高效利用提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

马铃薯膜下调亏滴灌大田试验于 2016 年 4-10 月在甘肃省民乐县洪水河管理处进行,试验站地理坐标东经 100°43′,北纬 38°39′,属于洪水河灌区。该试验区属典型的半干旱荒漠气候区,大陆性荒漠绿洲草原气候,多年平均降水量为 183~285 mm,该区降水稀少且分布极不均匀,蒸发强度大,干旱频繁,供需矛盾日益突出,但具有丰富的光热资源和昼夜温差大等特点,为各类作物进行光合作用和有机物质积累等创造了良好的环境条件。试验区平均海拔约 1 970 m,年平均气温为 6.0℃,≥0℃有效积温 3 500℃,≥10℃有效积温 2 985℃,极端最高温度 37.8℃,极端最低温度-33.3℃,无霜期 109~174

d,年日照总时数 3 000 h 左右。试验地为中壤土,土地平整,土层深厚,土壤肥沃,耕层田间最大持水量为 24%,土壤容重 $1.48\times10^3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,pH 值 7.22,地下水位较低且无盐碱化影响。试验区为以种植马铃薯、小麦、玉米等为主的一年一熟作物种植区。

益民灌溉试验站有试验地约 1.5 hm²,全自动气象观测场 1 个,具备观测基本气象资料,测定土壤含水率、土壤容重、蒸发量等的仪器和设备条件。

1.2 试验设计及方法

试验根据亏缺水平和亏缺生育阶段不同共设 8 个亏水处理(RD1~RD8)和 1 个充分灌水处理(CK),分别在幼苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期分别进行不同程度水分亏缺处理,试验设计方案见表 1。

试验材料为马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)“青薯 168”,由青海省农业科学院作物研究所选育,属晚熟菜用型和淀粉加工兼用型品种。该品种具有幼苗直立,枝叶繁茂,生长势强,淀粉含量高和耐贮藏运输等特点。按照《灌溉试验规范》^[11]中作物生长发育阶段的划分标准,结合本区域马铃薯实际生育进程,划分为以下 4 个阶段:幼苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期。马铃薯于 2016 年 4 月 8 日播种,9 月 26 日收获,全生育期历时 172 d。采用膜下滴灌单垄双行栽培模式,土垄宽 0.8 m,垄高 0.2 m,无覆盖沟宽 0.4 m,行株距 40 cm×20 cm。每条土垄中间铺设一条薄壁式滴灌带,滴灌带内径 16 mm,滴头间距 0.2 m,具有输水效果好、抗堵塞能力强等特点。该试验采用单因素随机区组设计,南北走向种植,每个处理 3 次重复,试验小区面积 33.6 m²(7 m×4.8 m),试验田总占地面积 907.2 m²。每个小区为一个滴灌支管控制单位,支管单元入口安装有闸阀和水表。聚乙烯普通塑料薄膜厚 0.008 mm,宽为 1.2 m。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤容重 土壤容重是指单位容积内烘干土的质量。通过环刀法测定试验田土壤不同深度剖面土壤容重,重复 3 次,在 105℃±2℃恒温干燥箱中烘至恒重,干土质量和环刀体积比即为该土壤容重。计算公式如下:

$$\rho_b = \frac{m_2 - m_1}{v_1}$$

式中, ρ_b 为土壤容重($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$); m_1 为环刀的质量(g); m_2 为环刀+烘干土粒质量(g); v_1 为环刀容积(cm^3)。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

处理 Treatments	亏缺水平 Regulated deficit level	0~60 cm 土层土壤相对含水量 Relative water content of 0~60 cm soil/%			
		幼苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation
RD1	轻度 Slight	65~75	55~65	65~75	65~75
RD2	轻度 Slight	65~75	65~75	55~65	65~75
RD3	轻度 Slight	65~75	65~75	65~75	55~65
RD4	中度 Medium	65~75	45~55	65~75	65~75
RD5	中度 Medium	65~75	65~75	45~55	65~75
RD6	中度 Medium	45~55	65~75	65~75	65~75
RD7	轻度 Slight	55~65	65~75	65~75	65~75
RD8	中度 Medium	65~75	65~75	65~75	45~55
CK	常规 Conventional	65~75	65~75	65~75	65~75

1.3.2 土壤含水率 采用土钻取土烘干称重法,每个小区随机选取一条垄进行人工取土。在马铃薯播种前及收获后取土,取土深度为 100 cm,分别为 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80 和 80~100 cm。生育期内每隔 7~10 d 取土 1 次,取土深度为 60 cm,每 10 cm 分层,分 6 个梯度土壤剖面取土,并且在灌水前后与降水后适时各加测一次。

$$\beta_j = \frac{m_{j2} - m_{j1}}{m_{j1}} \times 100\%$$

式中, β_j 为 j 层土壤质量含水率(%); m_{j2} 为 j 层田间自然湿土重(g); m_{j1} 为 j 层烘干干土粒重(g)。

当土壤含水量下降至处理亏缺控制下限时,应立即进行灌水,当达到亏缺控制上限时立即停止。

1.3.3 土壤温度 土壤温度计布置在每个处理的第 2 个重复,位于土垄中间,分为 5 个剖面层次(5、10、15、20 cm 及 25 cm)分别测定土壤温度。在全生育期内每天 8:00、14:00、20:00 分三次进行观测,灌水后第二日从 8:00 到 20:00 每整点观测记录一次。

1.3.4 灌水量 采用干、支管管道输水与膜下滴灌带滴灌方式灌水,灌水量由水表严格控制,记录每次灌水时间和灌水量。灌水量由灌水定额^[12]计算公式确定:

$$M = 10\rho_b H(\beta_i - \beta_j)$$

式中, M 为灌水量(mm); ρ_b 为计划湿润层土壤容重,为 1.48 g·cm⁻³; H 为计划湿润层深度,为 60 cm; β_i 为目标土壤含水量上限; β_j 为灌水前土壤实际含水量,灌水量应通过水表进行精确计量。

所得灌水量换算公式为:

$$IR = 15(667M/1000) = 10.0M$$

式中, IR 为单位面积灌水量(m³·hm⁻²); M 为灌水层厚度(mm)。

另外,降雨量换算公式为:

$$P = 15(667P_0/1000) = 10.0P_0$$

式中, P 为单位面积降雨量(m³·hm⁻²); P_0 为降雨量(mm)。

1.3.5 耗水量 本试验采用水量平衡法计算马铃薯全生育期内实际蒸发蒸腾量。根据《灌溉试验规范》^[11],利用土壤含水率来测定作物腾发量时,腾发量可按以下公式计算:

$$ET = 10 \sum_{i=1}^n r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K - C$$

式中, ET 为作物阶段耗水量(mm); i 为土层编号; n 为土壤层次总数; r_i 为第 i 层土壤干容密度(g·cm⁻³); H_i 为第 i 层土层厚度(cm); W_{i1} 、 W_{i2} 为第 i 层土壤该时段始、末质量含水率(%); M 为该时段内灌水量(mm); P 为该时段内有效降雨量(mm); K 为该时段内深层地下水补给量(mm); C 为该时段内深层渗漏量(mm)。试区地下水埋深 > 20 m,故 $K = C = 0$ 。

1.3.6 生长指标与产量 马铃薯每个生育期末,在每个试验小区随机选取 5 株用钢卷尺测定植株高度;叶面积用叶面积系数法测定,马铃薯叶面积修正系数为 0.76^[13];采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺测定植株主茎茎粗。用烘干称重法测定干物质含量,马铃薯植株鲜、干重均用精度为 0.01 g 的电子天平测定,收获时每个试验小区随机选取 5 株进行人工收获,按小区单独考种并计算产量。

1.3.7 光合势 光合势是反映作物光合作用效率的指标,指单位耕地面积上作物群体叶面积日增长速率,能够反映出作物光合作用的强弱。光合势 LAD 越大,光合作用效果越好,产量也就越高^[10]。

$$LAD = \frac{LA_2 + LA_1}{2(T_2 - T_1)}$$

式中, LA_1 、 LA_2 为 T_1 、 T_2 时间的叶面积。

1.3.8 作物水分利用状况 作物水分利用效率(WUE):

$$WUE = \frac{Y}{ET_a}$$

式中, WUE 为水分利用效率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y 为单位面积薯块产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_a 为全生育期实际单位面积耗水量(有效降水与灌水之和)($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

灌溉水利用效率($IWUE$):

$$IWUE = \frac{Y}{IR}$$

表 2 试验年度马铃薯生长季月平均气温及其他气象要素

月份 Month	气温 Temperature/℃			日照时数	蒸发	风速	湿度	地表温度
	最高 Max	平均 Mean	最低 Min	Sunshine hours /(h·M ⁻¹)	Evaporation /(mm·d ⁻¹)	Wind speed /(m·s ⁻¹)	Moisture /(%)	Soil surface temperature/℃
4	14.00	7.60	2.30	261.20	6.87	2.10	41.00	12.90
5	17.10	10.60	4.90	239.60	6.85	2.20	46.00	17.00
6	22.50	16.70	10.60	292.60	8.53	2.20	44.00	23.90
7	25.10	18.90	13.50	285.10	7.30	2.20	55.00	25.60
8	22.70	17.20	13.10	153.60	5.45	2.00	82.00	21.40
9	20.00	13.10	8.20	250.30	5.01	2.00	52.00	15.80
平均 Average	20.59	14.54	9.29	247.07	6.73	2.15	50.06	20.53

注:数据在民乐县气象局益民灌溉试验站气象场测定。
Note: The data from the meteorological field of Yimin Irrigation Experiment Station of Minle County Meteorological Bureau.

1.4 数据处理及分析

采用 Microsoft Office Excel 2007 处理试验数据;用 SPSS 19.0 进行统计分析,用 LSD 和 Duncan(D) 检验法进行差异显著性多重比较分析(显著水平 0.05),并用 Person 简单秩距相关系数进行相关性分析;并用 Origin Pro 8.5 软件作图。

2 结果与分析

2.1 调亏灌溉对马铃薯生长的影响

2.1.1 叶面积 表 3 表明,膜下滴灌调亏灌溉马铃薯单株叶面积(LA)发展动态呈现单峰规律,块茎形成期块茎膨大期迅速生长且达到高峰,进入淀粉积累期后叶片逐渐衰老、脱落,叶面积 LA 减少较快。从幼苗期到块茎形成期主要是营养生长,各处理叶面积生长速度均较快,块茎形成期到块茎膨大期叶面积增长较快,持续时间较长,有利于马铃薯群体干物质的形成与积累。全生育期充分灌水处理(CK)叶面积始终保持较高的水平。不同灌溉处理间马铃薯 LA 及 LAI 在块茎形成期无显著性差异($P>0.05$),而在幼苗期、块茎膨大期和淀粉积累期 LA 差异显著($P<0.05$)。幼苗期亏水处理 RD6、RD7 单株叶面积较对照 CK 显著低 45.72%、17.19%;块茎膨大期中度亏缺 RD5 单株叶面积较 CK 显著低 10.25%;淀粉积累期由于叶片衰老、脱落等只有 CK 和 RD1 处于较高水平,其他处理间差异不显著。因此,可通过适度水分亏缺以调节马铃薯群体叶面积

式中, $IWUE$ 为灌溉水利用效率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y 为单位面积薯块产量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); IR 为全生育期单位面积灌水量($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.3.9 气象资料 通过试验站自动气象场观测记载降水、湿度、蒸发、温度、日照时数和风速等。马铃薯全生育期气象资料见表 2。

发展趋势。

马铃薯幼苗期水分亏缺处理 RD6、RD7 叶面积指数(LAI)较对照 CK 分别降低 46.64%、17.13%($P<0.05$),其他亏缺处理及对照间差异均不显著($P>0.05$,表 4)。块茎形成期 LAI 差异不显著。块茎膨大期中度水分亏缺 RD5 处理 LAI 较 CK 降低 10.25%,达显著水平,其他处理间均无显著性差异。在淀粉积累期,RD1、CK 叶面积指数显著高于其他处理。

2.1.2 光合势 光合势(LAD)是反映作物光合作用效率的重要指标。一般情况下,光合势愈大,则光合作用效果越好,产量也就愈高^[10]。由表 4 和表 5 可知,膜下滴灌亏缺灌溉马铃薯全生育期叶面积指数与光合势的变化趋势基本一致,均呈现生育前期植株矮小,缓慢增长,中期快速上升,生育后期略有下降趋势。在播种~幼苗期亏缺处理 RD6、RD7 光合势较对照 CK($P<0.05$)降低 45.76%、17.25%,差异显著,而其他处理及对照间差异不显著($P>0.05$);幼苗期~块茎形成期处理 RD6、RD7 光合势显著较低,其他处理及对照间差异不显著;块茎形成期~块茎膨大期处理 RD5 光合势较对照 CK 显著低 9.74%;块茎膨大期~淀粉积累期,亏缺处理 RD1 和 CK 的 LAD 较其他水处理显著提高,其他处理间光合势差异不显著。表明在马铃薯生长发育关键阶段,保持土壤水分满足作物正常需水要求对提升作物 LAI 和 LAD 具有显著效果。

表 3 调亏灌溉下马铃薯单株叶面积变化/(cm² · 株⁻¹)

Table 3 Changes of leaf area of per potato plant with regulated deficit irrigation/(cm² · plant⁻¹)

处理 Treatments	幼苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation
RD1	753.60a	1483.73a	3184.00ab	1147.20a
RD2	730.67a	1436.27a	2985.07ab	706.13b
RD3	749.87a	1378.13a	3005.87ab	881.60b
RD4	731.73a	1476.80a	3058.13ab	722.13b
RD5	727.47a	1404.80a	2886.93b	776.00b
RD6	405.87c	1436.27a	3181.33ab	701.87b
RD7	619.20b	1418.67a	3030.40ab	727.47b
RD8	758.40a	1446.40a	3021.33ab	919.47b
CK	747.73a	1538.67a	3216.53a	1209.60a

注:表中数值为每个处理 3 次重复的平均值;同列字母不同表示处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。
Note: Values are means of three replicates for each treatment. Data within one column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$. The same below.

表 4 调亏灌溉对马铃薯叶面积指数的影响

Table 4 Effects of regulated deficit irrigation on potato leaf area index

处理 Treatments	叶面积指数 Leaf area index			
	幼苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation
RD1	0.471a	0.927a	1.990ab	0.717a
RD2	0.457a	0.898a	1.866ab	0.441b
RD3	0.467a	0.861a	1.879ab	0.551b
RD4	0.457a	0.923a	1.911ab	0.451b
RD5	0.455a	0.878a	1.804b	0.485b
RD6	0.254c	0.898a	1.988ab	0.439b
RD7	0.387b	0.887a	1.894ab	0.455b
RD8	0.474a	0.904a	1.888ab	0.575b
CK	0.467a	0.962a	2.010a	0.756a

表 5 调亏灌溉下马铃薯光合势变化动态

Table 5 Dynamics of potato leaf area duration under regulated deficit irrigation

处理 Treatments	光合势 Leaf area duration/(10 ⁴ m ² · d ⁻¹ · hm ⁻²)			
	播种~幼苗期 Sowing to seedling	幼苗期~块茎形成期 Seedling to tuber formation	块茎形成期~块茎膨大期 Tuber formation to tuber bulking	块茎膨大期~淀粉积累期 Tuber bulking to starch accumulation
RD1	10.92a	55.93a	145.87ab	139.72a
RD2	10.59a	54.17ab	138.17abc	119.07b
RD3	10.87a	53.20ab	137.00bc	125.40b
RD4	10.60a	55.21a	141.72abc	121.94b
RD5	10.54a	53.31ab	134.12c	118.16b
RD6	5.88c	46.05c	144.30abc	125.26b
RD7	8.97b	50.95b	139.03abc	121.22b
RD8	10.99a	55.12a	139.62abc	127.12b
CK	10.84a	57.16a	148.60a	142.78a

2.2 调亏灌溉对马铃薯耗水的影响

2.2.1 阶段耗水特征 由表 6 可知,马铃薯各水分亏缺处理在生育期内受亏水作用影响其耗水量均显著($P<0.05$) 低于对照处理。在幼苗期水分亏缺处理 RD6、RD7 与 CK 间耗水量差异显著,较 CK 低 49.69%、44.99%,其他处理及对照间差异均不显著($P>0.05$)。在块茎形成,复水后的 RD6、RD7 处理耗水量仅次于 CK 与 RD3 处理,且差异不显著,亏缺处理 RD1、RD4 与 CK 间耗水量差异显著,分别较

CK 减少 41.81%和 52.89%;在块茎膨大期,亏缺处理 RD2、RD5 与对照 CK 间耗水量差异均达显著水平,分别比对照 CK 减少 20.95%和 64.30%。在淀粉积累期,复水后 RD2 与 RD5 处理耗水量明显增加,而此生育时期经受轻度亏缺 RD3、RD8 耗水量分别低于 CK 对照 48.98%、49.49%,呈现出前期消耗少,中期增大,后期降低的单峰规律。因此,亏缺程度严重影响马铃薯各生育阶段耗水量,且随亏缺程度增大,则此生育阶段耗水量减少越明显。

所有亏缺处理(RD1~RD8)马铃薯全生育期耗水量低于CK 11.62%~34.48%;RD4 全生育期消耗水量最少,较CK 低 34.48%,且低于其他亏缺处理 5.70%~21.34%;水分亏缺处理 RD1、RD4 与 RD5

间、RD2 与 RD3 间全生育期消耗水量差异不显著($P>0.05$);在水分亏缺处理中,全生育期消耗水量以 RD7 处理最多,高于其它亏缺处理 3.6%~21.34%。随着亏缺程度的加深消耗水量有所降低。

表 6 调亏灌溉对马铃薯阶段耗水量的影响/mm

Table 6 Effects of regulated deficit irrigation on water consumption at different potato growth stages

处理 Treatments	幼苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation	全生育期 Whole growth period
RD1	90.291a	130.572c	155.794a	73.510c	450.167d
RD2	82.237a	197.252b	120.989b	99.998a	500.428c
RD3	92.606a	219.884a	148.119a	51.906d	512.515bc
RD4	78.822a	105.709d	152.102a	87.872b	424.504d
RD5	85.112a	214.692a	64.643c	86.499b	450.945d
RD6	66.134c	220.415a	149.249a	86.795b	522.594bc
RD7	72.320b	221.161a	155.461a	90.705b	539.647b
RD8	84.509a	216.454a	161.844a	51.386d	514.192bc
CK	131.465a	224.378a	153.046a	101.728a	610.616a

2.2.2 日耗水特征 马铃薯日耗水强度由高到低依次为:块茎形成期>块茎膨大期>淀粉积累期>幼苗期(表 7),与马铃薯作物全生育期生育进程、生理特性、所处环境条件等密切相关。由表 7 可看出,幼苗期马铃薯植株矮小,且大气温度较低,日耗水强度较低,该时段日耗水强度低于之后其他生育时期;水分亏缺处理 RD6 和 RD7 日耗水强度显著低于CK 及其他未亏水处理($P<0.05$)。进入块茎形成期,日耗水强度达到最大,复水后的 RD6、RD7 处理日耗水强度增加但不显著($P>0.05$);马铃薯植株生长较快,薯块逐渐形成,且伴随着大气温度的不断

上升,日蒸发量逐渐增大,轻度水分亏缺处理(RD1)和中度水分亏缺处理(RD4)日耗水强度显著低于其他处理。块茎膨大期日耗水强度较大,轻、中度水分亏缺处理 RD2、RD5 较对照 CK 日耗水强度分别显著降低 41.86%和 57.77%。进入淀粉积累期后,马铃薯植株逐渐衰老,生理活动强度降低,且此阶段大气温度降低,日耗水强度较块茎膨大期呈下降趋势;轻度水分亏缺处理 RD3 和中度水分亏缺处理 RD8 日耗水强度均显著低于充分灌水 CK 及其他水分亏缺处理。

表 7 不同生育阶段马铃薯日耗水强度及耗水模数

Table 7 Potato daily water consumption intensity and modulus of water consumption at different growth stages

处理 Treatments	幼苗期(69d) Seedling		块茎形成期(40d) Tuber formation		块茎膨大期(32d) Tuber bulking		淀粉积累期(31d) Starch accumulation	
	日耗水强度 Daily water consumption intensity / (mm · d ⁻¹)	耗水模数 Modulus of water consumption / (%)	日耗水强度 Daily water consumption intensity / (mm · d ⁻¹)	耗水模数 Modulus of water consumption / %	日耗水强度 Daily water consumption intensity / (mm · d ⁻¹)	耗水模数 Modulus of water consumption / %	日耗水强度 Daily water consumption intensity / (mm · d ⁻¹)	耗水模数 Modulus of water consumption / %
RD1	1.309bc	20.05ab	3.264c	29.00c	4.869a	34.61a	2.371c	16.33c
RD2	1.192bcd	16.48de	4.931b	39.48b	3.781c	24.00d	3.226a	20.03ab
RD3	1.342b	18.07bc	5.497a	42.90a	4.629a	28.90c	1.674d	10.13d
RD4	1.142bcd	18.54abc	2.643d	24.90d	4.753a	35.80a	2.835b	20.71a
RD5	1.234bcd	18.88abc	5.367a	47.61a	2.020d	14.33e	2.790b	19.18b
RD6	0.958d	12.66e	5.510a	42.17ab	4.664a	28.56c	2.800b	16.61c
RD7	1.048cd	13.40de	5.529a	40.99ab	4.858a	28.81c	2.926b	16.81c
RD8	1.225bcd	16.44de	5.411a	42.10ba	5.058a	31.48b	1.658d	9.99d
CK	1.905a	21.52a	5.609a	36.75b	4.783a	25.06d	3.282a	16.66c

注:表中数值为每个处理 3 次重复的平均值;同列字母不同表示处理在 $P<0.05$ 水平上差异显著。
Note: Values are means of three replicates for each treatment. Data within one column followed by different letters are significantly different at $P<0.05$.

2.3 调亏灌溉对马铃薯水分利用的影响

2.3.1 水分利用效率 水分利用效率(WUE)常被用来衡量水资源利用水平的高低,WUE 值愈大,说明作物对水分利用率越高。在干旱半干旱气候环境条件下膜下滴灌亏缺可显著提高马铃薯水分利用效率($P<0.05$,图 1)。幼苗期水分亏缺处理 RD6、RD7 水分利用效率均显著低于块茎形成期轻度亏缺 RD1,同时高于 CK 对照($P<0.05$),幼苗期亏缺可提高 WUE,而 RD6、RD7 差异不显著($P>0.05$);块茎形成期轻度水分亏缺处理 RD1 水分利用效率最高,同期中度亏缺处理 RD4 次之,分别较对照 CK 提高 29.04%、18.59%;块茎膨大期亏缺 RD3、RD5 处理水分利用效率均较低,亏缺处理 RD5 较 RD1、对照 CK 低 41.57%、24.60%;对照 CK 显著低于亏缺处理 RD4、RD6 和 RD7。各亏缺处理及对照间差异均显著。全生育期充分灌水处理(CK)虽然产量最高,但 WUE 显著低于亏水处理 RD1、RD4,块茎形成期为水分亏缺最佳时期;RD5 产量和 WUE 最低,显著低于 CK 和其他亏水处理,且块茎膨大期水分亏缺敏感程度最高。

2.3.2 灌溉水利用效率 灌溉水利用效率(IWUE)是指作物产量与灌溉水量的比值。块茎膨大期中度水分亏缺 RD5 处理 IWUE 最低,较块茎形成期轻度水分亏缺处理 RD1 降低 42.62%,较对照 CK 及亏

缺处理 RD6 显著降低 10.89%、31.60% ($P<0.05$,图 1);充分灌水(CK)较亏水处理 RD1、RD4 和 RD6 低 35.61%、33.22%和 23.20%;亏缺处理 RD1 与 RD4 及 RD2 与 CK 间 IWUE 差异不显著($P>0.05$)。幼苗期与块茎形成期水分亏缺可显著提高 IWUE 和 WUE,块茎形成期水分亏缺效果更佳;而块茎膨大期和淀粉积累期中度水分亏缺亦可显著降低 WUE 和 IWUE;块茎形成期轻度亏缺 RD1 处理 IWUE 最高。

2.4 调亏灌溉对马铃薯产量的影响

2.4.1 马铃薯产量 显著性分析发现,干旱环境条件下,亏缺灌溉对马铃薯块茎产量影响显著。全生育期充分灌水(CK)块茎产量最高,块茎膨大期中度水分亏缺 RD5 处理产量最低,较 CK 低 44.32% ($P<0.05$,表 8)。幼苗期水分亏缺 RD6、RD7 处理与对照 CK 间薯块产量差异不显著($P>0.05$),其它水分亏缺处理薯块产量均显著低于 CK。块茎形成期轻度亏缺处理 RD1 薯块产量比同期中度水分亏缺 RD4 和淀粉积累期轻度水分亏缺 RD3 处理提高 15.41%、32.65%,而块茎膨大期中度亏缺的 RD5 薯块产量减产幅度最大,与同期轻度水分亏缺的 RD2 相比减产 22.34%。在膜下滴灌条件下块茎形成期以后水分亏缺对马铃薯最终块茎产量形成影响显著。

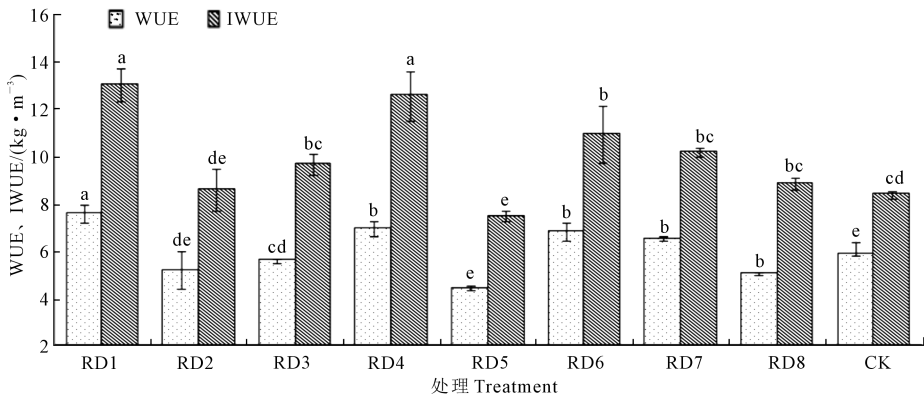


图 1 调亏灌溉下马铃薯水分利用状况
Fig. 1 Water use status of potato under regulated deficit irrigation

表 8 膜下水分亏缺滴灌马铃薯产量、生物量及收获指数
Table 8 Yield, biomass and harvest index of potato tubers under regulated deficit irrigation

处理 Treatments	薯块产量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Tuber yield	生物量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Biomass	块茎干重/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) Dry tuber yield	收获指数 Harvest index
RD1	34276.71b	20188.96b	7744.47a	0.384a
RD2	25839.44d	18649.79c	5379.56d	0.289cd
RD3	28784.62c	20056.67b	6504.66bc	0.324bc
RD4	29701.00c	20264.17b	6578.28b	0.324bc
RD5	20066.11e	16733.13d	4217.14e	0.252d
RD6	35834.08a	21837.71a	7581.96a	0.348ab
RD7	35271.74ab	21770.63a	7538.02a	0.347ab
RD8	25975.15d	19834.38b	5576.03cd	0.281cd
CK	36037.23a	22225.83a	7654.44a	0.345ab

2.4.2 马铃薯茎干重 方差分析发现,块茎形成期轻度水分亏缺 RD1 块茎干重产量最高,块茎膨大期中度水分亏缺 RD5 处理最低,较 RD1 降低 45.55% ($P<0.05$,表 8),而同时期轻度水分亏缺 RD2 处理较 RD1 降低 30.54%。RD3、RD4 和 RD8 分别比 RD1 低 16.01%、15.06%和 28.00% ($P<0.05$)。RD1、RD6、RD7 处理和 CK 的生物量差异不显著 ($P>0.05$)。因此,适时适当的水分亏缺并不会显著影响块茎干物质的积累,且有利于提高作物水分利用效率。

2.4.3 马铃薯收获指数 分析发现,RD1 处理收获指数最高,较充分灌水 (CK) 高 11.30%;RD5 处理收获指数最低,较对照 CK 低 34.38% ($P<0.05$);RD1 比 RD5 提高 52.34%;RD3 比 RD1 低 15.63% ($P<0.05$);RD2 和 RD8 处理分别比 RD1 低 24.74%、26.82% ($P<0.05$)。RD6、RD7 处理和 CK 及 RD2、RD8 处理间未发现显著性差异 ($P>0.05$)。干旱气候条件下亏缺灌溉马铃薯收获指数 (HI) 随薯块产量的增加而增加,随生物量的增加而递减。

3 结论与讨论

马铃薯作为我国西北干旱区一种低投入、高产出的粮食兼经济作物,采用地面常规灌溉方式,需水量大,采用膜下滴灌,节水效果非常显著^[14]。本文研究了膜下滴灌马铃薯生长指标、产量、水分利用效率、耗水规律等,并根据马铃薯栽培特点提出了适宜民乐荒漠绿洲灌溉条件的膜下滴灌马铃薯节水增产栽培与灌溉模式,相关结论如下:

1) 幼苗期和块茎形成期马铃薯主要以根、茎和叶生长为中心,幼苗期亏缺 RD6、RD7 处理 LA 和 LAI 显著低于其他处理;块茎形成期轻度水分亏缺 RD1,其 LAI 与其他水处理相比明显上升,LAD 始终保持较高水平。块茎形成期中度水分亏缺对该时期 LAI 与 LAD 的变化没有影响或影响不显著;块茎膨大期与淀粉积累期受水分亏缺影响,LAI 及 LAD 均有不同程度的下降。淀粉积累期为需水关键期,此时段水分亏缺会引起马铃薯植株光合作用效率下降,进而造成马铃薯产量下降。

2) 膜下滴灌马铃薯不同生育阶段耗水量及日耗水强度依次为:块茎形成期>块茎膨大期>幼苗期>淀粉积累期。水分生态特征受外界环境和作物品种影响较大,本试验研究中,供试马铃薯为晚熟品种,块茎形成期正值 6 月中旬至 7 月下旬,此时马铃薯植株繁茂、生长旺盛、大气温度较高且蒸发强度大;块茎膨大期大气温度和光照强度趋于下降趋

势,马铃薯植株蒸腾和棵间蒸发量减少,耗水量也相应减小。马铃薯各生育阶段耗水量受水分亏缺影响较大,亏缺程度越高,其阶段耗水量降低的越显著,与李晶等研究相一致^[3,15]。马铃薯块茎膨大期水分亏缺影响深远,而在幼苗期、块茎形成期和淀粉积累期进行轻度水分亏缺有利于提高作物水分利用效率,降低日耗水强度和耗水模数,同时又能达到节水与增产的双重目的。

3) 膜下滴灌亏缺可显著提高荒漠绿洲灌区马铃薯作物水分利用效率、灌溉水利用效率、薯块产量与生物产量等。本研究发现,块茎形成期轻度水分亏缺 RD1 效果较好,较全生育期充分灌水产量略有下降并不显著,而水分利用效率和灌溉水利用效率均较充分灌水 CK 高,而块茎膨大期水分亏缺会导致马铃薯产量、水分利用效率和灌溉水利用效率显著下降 ($P<0.05$),表明在块茎形成期进行水分亏缺更有利于提升马铃薯水分利用效率和灌溉水利用效率。在块茎形成期进行轻度水分亏缺灌溉,可实现高效节水增产的双重目的。受严重干旱胁迫影响作物收获指数下降显著 ($P<0.05$),只有在适时适度的水分亏缺条件下可提高马铃薯收获指数,收获指数、生物产量、块茎产量的表现则说明,提高马铃薯的生物产量和收获指数是获得作物高产的重要方面。收获指数和生物产量虽然互为基础,但相关性不显著,与前人^[16-18]研究相一致。提高作物产量主要有以下两种途径:在生物产量一定的情况下提高收获指数;在收获指数一定的情况下提高生物产量。

参考文献:

- [1] 林叶春,胡跃高,曾昭海.不同节水措施对马铃薯生长及水分利用的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(1):54-60.
- [2] 罗其友,刘洋,高明杰,等.中国马铃薯产业现状与前景[J].农业展望,2015,11(3):35-40.
- [3] 张恒嘉,李晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
- [4] 王凤新,康跃虎,刘士平.滴灌条件下马铃薯耗水规律及需水量的研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):9-15.
- [5] Van Loon C D. The effect of water stress on potato growth, development and yield[J]. American Journal of Potato Research, 1981, 58(1):51-59.
- [6] 李广,侯扶江.河西地区农业气候资源与植被的空间分布格局[J].草业学报,2002,11(3):80-84.
- [7] 庄健元,成自勇,韩辉生,等.麦草覆盖免耕栽培马铃薯调亏灌溉技术试验研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(6):7-11.