

绿洲膜下滴灌调亏马铃薯水分生产函数及灌溉制度优化

杜 嘉¹, 张恒嘉¹, 张 明², 巴玉春², 杨晓婷¹, 何鹏杰¹, 李炫臻¹

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 民乐县洪水河管理处, 甘肃 民乐 734500)

摘 要: 通过田间试验研究了绿洲膜下滴灌调亏马铃薯各生育期耗水规律及其影响因素, 建立了以 Jensen 模型为基础的水分生产函数并对马铃薯灌溉制度进行了优化。结果表明: 块茎膨大期马铃薯水分敏感指数最大, 块茎形成期次之, 苗期和淀粉积累期较小; 块茎形成期轻度调亏对马铃薯产量无显著影响 ($P > 0.05$), 而块茎形成期中度调亏、块茎膨大期轻度和中度调亏对其产量均有显著影响 ($P < 0.05$); 块茎形成期轻度调亏的水分利用效率比块茎形成期中度调亏、块茎膨大期轻度调亏和全生育期充分灌水分别提高了 6.2%、8.3% 和 6.7%; 膜下滴灌调亏马铃薯产量随耗水量增加而增加, 水分利用效率随之降低, 全生育期充分灌水比块茎膨大期中度水分调亏耗水量增加 22.4%, 产量增加 20.4%, 水分利用效率降低 14.0%。采用遗传算法并结合水分生产函数进行灌溉制度优化, 结果表明: 河西绿洲区膜下滴灌马铃薯全生育期灌溉定额为 225 mm 时, 产量最高, 为 $43.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 灌溉水利用效率为 $19.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 灌溉制度为苗期灌水 20~30 mm, 块茎形成期灌水 70~75 mm, 块茎膨大期灌水 100~115 mm, 淀粉积累期灌水 20~25 mm, 灌水间隔为 7 d。因此, 膜下滴灌调亏在降低马铃薯耗水量的同时, 提高了水分利用效率, 在块茎形成期轻度水分调亏不影响产量, 可达到节水增产的目的。

关键词: 绿洲马铃薯; 膜下滴灌; 水分调亏; 灌溉制度优化; 产量; 水分利用效率

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A

Water production function and optimization in irrigation schedule of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region

DU Jia¹, ZHANG Heng-jia¹, ZHANG Ming², BA Yu-chun², YANG Xiao-ting¹, HE Peng-jie¹, LI Xuan-zhen¹

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Flood River Management Office of Minle County, Minle, Gansu 734500, China)

Abstract: A field experiment was conducted to test the potato periodic evapotranspiration and its influencing factors with mulched drip irrigation under water deficit regulation (WDR) in oasis irrigation region. Crop water production function based on Jensen model was established, and the optimal irrigation schedule for potato was determined. The results showed that the sensitive index was found the largest at the tuber bulking stage, followed by the tuber initiation stage and relatively small at the establishment and potato starch accumulation stages. Potato yield was not decreased by low WDR plots during tuber initiation ($P > 0.05$), but was significantly decreased in the medium WDR plots during tuber initiation and low and medium WDR plots during tuber bulking ($P < 0.05$). The water use efficiency (WUE) was maintained in low WDR potato during tuber initiation, significantly improved by 6.2%, 8.3% and 6.7% from that in medium WDR plots during tuber initiation, low WDR plots during tuber bulking and full irrigation plots (CK), respectively. With the increase of crop evapotranspiration, the potato bulb yield became increased, while the water use efficiency was decreased. Crop evapotranspiration was increased by 22.4%, the potato bulb yield was increased by 20.4% and the WUE went decreased by 15.7%. The optimal irrigation system established by genetic algorithm with crop water production function showed that the highest potato bulb yield ($43.86 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) could be achieved when the irrigation depth was

收稿日期: 2016-01-08

基金项目: 甘肃省高等学校基本科研业务费项目(2012)

作者简介: 杜 嘉(1993—), 男, 甘肃白银人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉技术方面的研究。

通信作者: 张恒嘉(1974—), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程与农业生态的研究。E-mail: zhanghj@gsau.edu.cn.

up to 225 mm in the Hexi oasis, and irrigation WUE was $19.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. The recommended amount of irrigation is 30 ~ 40, 130 ~ 140, 170 ~ 190 mm and 25 mm at the stages of establishment, tuber initiation, tuber bulking and potato starch accumulation, respectively, and the irrigation intervals are 7 days. Therefore, when WDR under mulched drip irrigation reduces potato water consumption, the water use efficiency can be enhanced. Low WDR does not affect the potato yield during tuber initiation, reaching water-saving purposes.

Keywords: oasis potato; mulched drip irrigation; water deficit; optimal irrigation schedule; yield; water use efficiency

马铃薯是我国主要的粮食作物和经济作物,并在世界范围内广泛种植。据调查,已有 150 多个国家将马铃薯作为重要农作物种植生产,总面积达到 2 155 万 hm^2 ^[1]。国内外大量试验研究表明,调亏灌溉对马铃薯生育期内的耗水规律和水量时空分布有着显著影响^[2],同时,在提高商品薯产量和品质上也有着较为明显的作用^[3]。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^[4],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,在马铃薯种植过程中采用合理的灌溉制度和先进的灌溉技术,不仅对该地区马铃薯种植有着深远影响,而且对节约水资源和地区可持续发展具有重要的意义。

建立水分生产函数及优化灌溉制度是农业水资源合理优化分配的首要工作,国内外学者针对不同作物,对水分生产函数的确定和灌溉制度的优化进行了大量的研究。Imtiyaz 等研究了番茄、洋葱等 6 种蔬菜作物的水分生产函数和灌溉制度,发现在不同累计蒸发量条件下,各作物的产量和水分利用效率也不相同^[5]。霍军军等基于 Jensen 模型进行了冬小麦灌溉制度优化,研究表明抽穗期是冬小麦的关键生长期,最优灌溉制度下的田间腾发量和产量随灌水量的增加而增加^[6]。张兵等采用遗传算法对玉米与小麦联合种植的优化灌溉制度问题进行求解,发现在非充分灌溉条件下,作物缺水敏感指数大的生育期灌水比例也大^[7]。李晓玲等研究了蚕豆在地面灌溉条件下的水分生产函数,并采用线性规划方法确定了最优灌溉制度方案,结果表明蚕豆在拔节~开花、开花~结荚两个生育期对缺水最为敏感^[8],但针对马铃薯各生育期的耗水规律、水分生产函数及灌溉制度优化的研究并不多见。本文通过马铃薯田间膜下滴灌调亏试验,开展马铃薯生育期水分生产函数的研究,并以节水增产为目标,进行灌溉制度优化,以期为该地区马铃薯的节水灌溉提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

田间试验于 2015 年 4—9 月在甘肃省张掖市民

乐县益民灌溉试验站(38°39'N,100°43'E,海拔 1 970 m)进行。该地区处于祁连山北麓,河西走廊中段,属半干旱区、大陆性荒漠草原气候。该地区年平均降雨量为 215 mm,降水少且集中,年平均日照时数 3 000 h,年平均气温 6.0℃,大于 0℃ 的积温为 3 500℃,平均无霜期 125 d。试验区昼夜温差大,丰富的光热资源和较长的日照时间适宜马铃薯的生长发育。试验地土壤为轻壤土,0 ~ 60 cm 耕层土壤容重为 $1.4 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水率为 24%,地下水水位较低。

1.2 试验设计

试验材料为“青薯 168”,该品种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,株丛繁茂,生长势强,耐贮藏等特点,淀粉含量为 16.8%左右。马铃薯整个生育期主要可划分为苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期。马铃薯于 2015 年 4 月 15 日播种,9 月 23 日收获,全生育期历时 161 d。灌溉方式为膜下滴灌,当各处理的计划湿润层土壤含水率达到控制下限时即予以灌水,使土壤含水率达到目标控制上限。

根据不同水分调亏水平和调亏生育期,本研究共设计 5 个调亏处理(WD1 ~ WD5)和 1 个充分灌溉对照(CK),在块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期这 3 个生育阶段进行不同程度的水分调亏(表 1)。本试验实行单垄双行种植,垄宽 80 cm,垄高 20 cm,垄距 40 cm,垄中间铺设滴灌带,株距 20 cm。周围设与沟灌马铃薯相同品种保护行,试验小区有效面积为 28 m^2 (7 m × 4 m),共设置 6 个处理,各处理均设 3 次重复。每个小区为一个滴灌支管控制单位,且在支管单元入口处安装闸阀,在每个田垄上安装一条薄壁式滴灌带,并覆盖一层薄膜(宽 140 cm)。试验地土壤疏松、肥力适中,播种前灌安种水,机械深翻 20 ~ 25 cm,播种时撒施磷酸二铵、尿素、粒状过磷酸钙、碳酸氢铵均匀混合施肥 150 kg ($2\ 976.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),生育中期不再追肥。

表 1 试验设计方案
Table 1 Experimental design

处理 Treatment	土壤相对含水量 Relative soil water content/%			
	苗期 Seedling 56d	块茎形成期 Tuber initiation 32d	块茎膨大期 Tuber bulking 36d	淀粉积累期 Starch accumulation 37d
WD1	65 ~ 75	55 ~ 65	65 ~ 75	65 ~ 75
WD2	65 ~ 75	65 ~ 75	55 ~ 65	65 ~ 75
WD3	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75	55 ~ 65
WD4	65 ~ 75	45 ~ 55	65 ~ 75	65 ~ 75
WD5	65 ~ 75	65 ~ 75	45 ~ 55	65 ~ 75
CK	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75	65 ~ 75

1.3 耗水量、水分生产函数和水分利用效率的确定

在马铃薯全生育期内土壤含水率用取土烘干法测定,每 10 天测定一次,分 10、20、40、60 cm 四层取土。

马铃薯膜下滴灌条件下的实际耗水量用水量平衡法计算

$$ET_a = M + P_e - D \pm \Delta S \tag{1}$$

式中, ET_a 为作物实际耗水量 (mm); M 为灌水量 (mm); P_e 为有效降雨量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm); ΔS 为土层储水量的变化量 (mm)。

产量是以各处理马铃薯总质量的平均值再按面积折算确定的。

水分生产函数采用 Jensen 模型计算

$$Y_a/Y_m = \prod_{i=1}^n (ET_{ai}/ET_{mi})^{\lambda_i} \tag{2}$$

式中, Y_a 、 Y_m 分别为各处理实际产量和最高产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); ET_{ai} 、 ET_{mi} 分别为实际产量和最高产量对应的第 i 生育期的耗水量 (mm); λ_i 为第 i 生育期的水分敏感系数。

水分利用效率用下式计算

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

式中, WUE 为作物水分利用效率 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); Y 为作物产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)。

1.4 灌溉制度优化模型

1.4.1 模型的建立

(1) 阶段变量

阶段变量 m 为马铃薯各生育期的顺序编号, $m = 1, 2, 3, 4$ 分别代表苗期、块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期。

(2) 决策变量

决策变量为各生育期的灌水量 n_i , $i = 1, 2, 3, 4$ 。

(3) 状态变量

状态变量为各生育期初可用于分配的总灌溉水

量 (Q_i) 和作物可利用的计划湿润层的土壤水量 (W_i), 其中 W_i 与土壤含水率的函数表达式为:

$$W_i = 10\gamma H(\theta - \theta_w) \tag{4}$$

式中, W_i 为作物可利用的计划湿润层的总有效水量 (mm); γ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); H 为计划湿润层深度 (m); θ 为计划湿润层土壤平均含水率 (占干土质量的百分数); θ_w 为土壤含水率下限 (占干土质量的百分数)。

(4) 系统方程

系统方程是描述状态转移过程的变量之间的关系, 因此, 两个状态变量对应两个系统方程:

① 水量平衡方程

$$Q_{i+1} = Q_i - n_i \tag{5}$$

式中, Q_i , Q_{i+1} 分别表示第 i 和 $i + 1$ 生育期初, 可用于分配的水量 (换算成单位面积水深, mm)。

② 计划湿润层的水量平衡方程

$$(ET_a)_i + D_i + W_{i+1} = W_i + n_i + P_i + K_i \tag{6}$$

式中, $(ET_a)_i$ 为第 i 生育期作物实际耗水量 (mm); D_i 为第 i 生育期的深层渗漏量 (mm); P_i 为第 i 生育期的有效降雨量 (mm); K_i 为第 i 生育期的地下水补给量 (mm)。由于灌水方式为滴灌, 且每次灌水量较小, 地下水情况据当地资料显示水位较低, 因此深层渗漏量和地下水补给量忽略不计, 即 $D_i = 0$, $K_i = 0$ 。

(5) 目标函数

以获得单位面积相对产量最大为目标, 水分生产函数应用 Jensen 模型, 函数表达式为:

$$F = \max(Y_a/Y_m) = \max \prod_{i=1}^m (ET_{ai}/ET_{mi})^{\lambda_i} \tag{7}$$

式中符号意义同上。

(6) 约束条件

$$0 \leq n_i \leq Q_i \tag{8}$$

$$\sum_{i=1}^m n_i = Q \tag{9}$$

$$(ET_{\min})_i \leq (ET_a)_i \leq (ET_{\max})_i \tag{10}$$

$$\theta_w \leq \theta \leq \theta_f \tag{11}$$

式中, Q 为全生育期单位面积上可供作物分配的总灌溉水量 (mm); $(ET_{\max})_i$ 和 $(ET_{\min})_i$ 分别为第 i 生育期的最大耗水量和最小耗水量 (mm); θ_f 为田间持水率 (占干土质量百分数)。

(7) 初始条件

$$\theta_1 = \theta_0 \tag{12}$$

$$Q_1 = Q \tag{13}$$

式中, θ_0 为计划湿润层土壤初始平均含水率 (占干土质量百分数)。

1.4.2 模型的求解 采用保留最佳个体的遗传算法求解上述优化模型,流程如下:

- (1) 设定灌溉定额(Q)和各生育期灌水量(n_i)范围;
- (2) 计算该灌溉定额下多个灌溉制度对应的相对产量值(Y_a/Y_m),依次比较前后两个的计算结果并保留最优解,直至得出最佳相对产量值(F);
- (3) 判断是否满足约束条件,若满足,则终止计算,得出结果;否则重复第 2 步,继续计算。

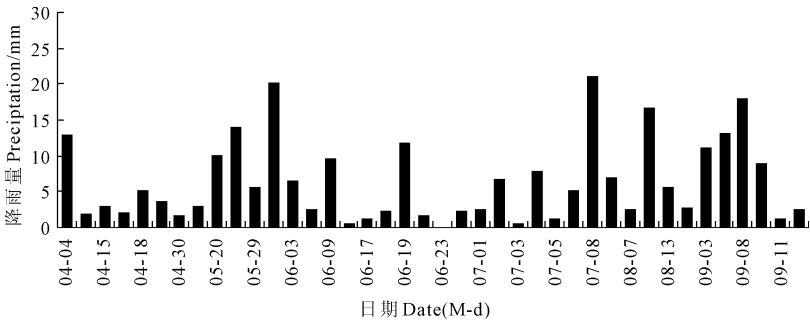


图 1 马铃薯全生育期降雨量变化
Fig.1 Changes of precipitation during potato growth period

耕层 0~60 cm 土壤容重为 $1.4\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,田间持水率为 24%,土壤初始含水率为 18.6%,占田间持水量的 77.5%,土壤含水率下限为 14.4%,计划湿润层深度为 0.6 m。

1.5 数据处理

运用 SPSS 22.0(SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 软件进行数据统计与相关分析,采用新复极差法(Duncan)分析处理间的差异显著性,设置差异显著性概率为 0.05。

2 结果与分析

2.1 土壤水分动态

通过在马铃薯不同生育期进行不同程度的水分调亏处理,0~60 cm 土层土壤含水率呈现出随生育期变化逐步下降的规律(图 2)。各处理的土壤含水率在块茎形成、膨大期和淀粉积累期都存在明显差异。播种前试验田土壤水分分布不均衡导致各处理差异较大,经过灌水调整使土壤含水率保持在设计水平。在苗期不进行水分调亏处理,各处理的土壤水分差异不明显,6 月 2 日(播种后 48 d)降雨 20 mm,各处理土壤含水率均有所上升;作物需水量在块茎形成期开始增大,各处理土壤含水率均呈明显下降趋势,灌水后仍较低;需水量在块茎膨大期达到顶峰,较块茎形成期各处理土层土壤含水率下降幅度均增大,WD2 和 WD5 的土壤含水率在该时期出

根据上述模型及解法,采用 MATLAB 语言编程计算,同时利用 MATLAB 软件(MATLAB R2014a, Math Works Inc., USA)进行优化分析。

1.4.3 模型求解中所需的资料 通过记录并分析作物生长期气象资料,马铃薯全生育期降雨量变化见图 1。统计可知,全生育期总降雨量为 219.8 mm,其中有效降雨量为 197.1 mm,各生育期有效降雨量分别为苗期 65.6 mm、块茎形成期 52.1 mm、块茎膨大期 28.8 mm、淀粉积累期 50.6 mm。

现最低值;进入淀粉积累期后,需水量减小,土壤含水率下降趋势减缓,灌水后出现明显上升。

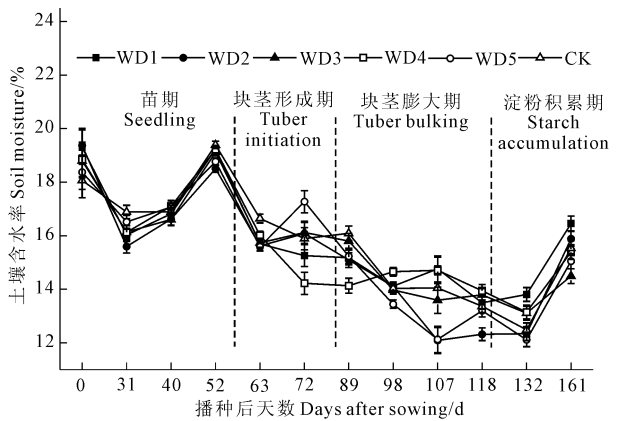


图 2 马铃薯全生育期不同水分调亏处理土壤含水率变化
Fig.2 Soil moisture variations in potato field under different water deficit regulations

通过比较不同处理全生育期的土壤含水率,WD1 处理全生育期平均土壤含水率比 WD2、WD3、WD4、WD5、CK 分别高 4.65%、3.16%、3.04%、4.58%、1.77%。因此,在块茎形成期进行轻度水分调亏可以提高作物 0~60 cm 生长土层的土壤含水率。

2.2 滴灌条件下马铃薯耗水量、产量和水分利用率动态分析

马铃薯全生育期耗水量为 338.8~414.8 mm,

块茎膨大期耗水量最大,其次是苗期和块茎形成期,淀粉积累期最小,呈现出前期耗水小,中期逐渐变大,后期减小的变化特点(表 2)。由于在苗期未进行调亏处理,各处理及对照组间耗水量无显著性差异($P>0.05$)。块茎形成期,WD4 处理耗水量较 CK 低 20.3%,差异显著($P<0.05$)。块茎膨大期,WD2 和 WD5 与 CK 耗水量间差异达显著水平,分别比 CK

减少 39.3%和 64.0%。淀粉积累期,WD3 耗水量显著低于 CK 22.5%。马铃薯产量随着耗水量的增加而增大,CK 全生育期耗水量比 WD1、WD2、WD3、WD4、WD5 分别高 2.5%、8.7%、1.0%、7.9%、22.4%,CK 产量分别较其他处理高 6.4%、12.2%、11.1%、17.2%、20.4%,WD2、WD3、WD4、WD5 和 CK 产量存在显著性差异,而 WD1 与 CK 间差异不显著。

表 2 膜下滴灌条件下马铃薯耗水量、产量和水分利用效率

耗水量 Water consumption/mm						产量 Yield /(t·hm ⁻²)	水分利用效率 Water use efficiency /(kg·m ⁻²)
处理 Treatment	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber initiation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation	全生育期 Total water consumption		
WD1	91.5a	81.2b	163.4a	68.2ab	404.3ab	37.94ab	10.39ab
WD2	95.6a	91.5a	123.3b	71.2a	381.6ab	35.98b	9.59b
WD3	91.1a	87.8ab	173.5a	58.3b	410.7a	36.33b	10.45ab
WD4	89.7a	71.3c	152.5ab	70.9a	384.3ab	34.45b	9.78b
WD5	84.0a	82.0ab	104.7c	68.2ab	338.8b	33.55b	11.10a
CK	85.8a	85.9ab	171.7a	71.4a	414.8a	40.38a	9.74b

注:表中同列数据上标字母不同表示差异显著($P<0.05$)。
Note: The data with different letters within the same column are significantly different($P<0.05$).

水分利用效率随着耗水量的增加有下降的趋势(表 2)。WD5 耗水量为 338.8 mm,水分利用效率最高,但产量显著低于 CK($P<0.05$);WD2 耗水量为 381.6 mm,水分利用效率最低,且 WD2、WD4、CK 和 WD5 之间存在显著性差异。WD1 水分利用效率比 WD2、WD4 和 CK 分别提高了 6.2%、8.3%和 6.7%,比 WD3 和 WD5 分别降低了 0.6%和 6.8%。可见,WD1 提升水分利用效率的效应较为明显。综合分析产量和水分利用效率,块茎形成期和淀粉积累期轻度调亏的 WD1 和 WD3 为较优的灌水方案,这两种方案在提高产量的同时,水分利用效率也保持在较高水平。

2.3 水分生产函数

利用最小二乘法将 Jensen 模型转换为求解线性方程组,采用线性回归的方法同时结合 MATLAB 软件,求出各生育阶段的水分敏感指数(表 3),得出 Jensen 模型下马铃薯的水分生产函数。具体表达式为:

$$\frac{Y_a}{Y_m} = \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_1^{0.1379} \times \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_2^{0.2518} \times \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_3^{0.4214} \times \left(\frac{ET_a}{ET_m}\right)_4^{0.0595} \quad (14)$$

结果显示,马铃薯的水分敏感指数在块茎膨大期最大,苗期和块茎形成期次之,淀粉积累期较小(表 3),说明马铃薯在块茎膨大期对水分亏缺最为

敏感,该时期缺水会严重减产,而在苗期、块茎形成期轻度的水分亏缺和在淀粉积累期一定程度的水分亏缺,对产量的影响较小。

表 3 马铃薯灌溉制度优化参数

Table 3 Optimal irrigation regimes for potato production			
生育阶段 Growth stage	阶段最大 耗水量 The maximum water consumption /mm	敏感指 数 λ Sensitive index	有效降雨量 P Effective rainfall /mm
苗期 Seedling	95.6	0.1379	65.6
块茎形成期 Tuber initiation	91.5	0.2518	52.1
块茎膨大期 Tuber bulking	173.5	0.4214	28.8
淀粉积累期 Starch accumulation	71.4	0.0595	50.6

2.4 灌溉制度优化

利用优化参数(表 3),以相对产量(Y_a/Y_m)最大为目标,设置初始土壤含水率分别为 55%、65%和 75%,并选取 55、95、135、225 mm 为灌溉定额,以水分生产函数为基础,对每个初始含水率条件下的 4 种灌溉定额采用 MATLAB 软件编程结合遗传算法分析计算,得出最大相对产量对应的各阶段最优灌水量,即为灌溉制度优化结果(表 4)。可见,马铃薯的产量随着灌水量的增加而增加。在不同的灌溉定

额下,灌水主要集中在块茎形成期和块茎膨大期,苗期和淀粉积累期的灌水量较小。在相同的灌溉定额下,马铃薯产量随初始土壤含水率的增加而增加。由于初始土壤含水率的不同,导致土壤中作物可利用的水量不同,初始土壤含水率越高,可利用水量越大,越有利于作物生长发育。而在灌溉定额有限时,应优先保证马铃薯对水分最为敏感的块茎膨大期的需水量,以期获得理想的产量。

灌溉制度优化结果表明,在 3 种初始土壤含水

率条件下,当灌溉定额达到 225 mm 时,计算产量均略高于试验实测最高产量,最大为 43.86 t·hm⁻²,提高了 8.6%,灌溉水利用效率为 19.5 kg·m⁻³,较实测高出 3.7%。其相应的优化灌溉制度为苗期灌水量 20~30 mm,块茎形成期灌水量 70~75 mm,块茎膨大期灌水量 100~115 mm,淀粉积累期灌水量 20~25 mm,灌水间隔为 7 d。块茎膨大期敏感指数大,此阶段灌水量比例也最大,说明该结果在一定灌水范围内考虑了作物缺水敏感指数的影响。

表 4 马铃薯膜下滴灌优化灌溉制度

Table 4 Optimal irrigation regimes for potato with drip irrigation and plastic mulching

(θ_0/θ_f) /%	灌溉定额 Irrigation quota/mm	阶段灌水量 Irrigation amount/mm				Y_a/Y_m
		苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber initiation	块茎膨大期 Tuber bulking	淀粉积累期 Starch accumulation	
55	55	5	15	35	0	0.6677
	95	10	20	60	5	0.7757
	135	15	35	75	10	0.8809
	225	30	70	100	25	1.0274
65	55	5	10	40	0	0.6697
	95	10	30	50	5	0.7953
	135	15	40	65	15	0.9031
	225	20	75	110	20	1.0432
75	55	5	20	30	0	0.6707
	95	10	35	45	5	0.7997
	135	20	40	60	15	0.9158
	225	20	70	115	20	1.0862

注: θ_0 为初始土壤含水率, θ_f 为土壤田间持水率, Y_m 为实测的最高产量 40.38 t·hm⁻²。

Note: The initial soil moisture is θ_0 , soil water content at field is θ_f , and the highest yield is Y_m (40.38 t·hm⁻²).

3 讨 论

水资源缺乏、降雨量不足和地面蒸发量过大,是限制西北地区马铃薯生产的主要因素^[9]。国内外大量研究表明,水分调亏结合膜下滴灌技术可有效提高马铃薯产量和水分利用效率^[10-16]。因此,探究膜下滴灌水分调亏对马铃薯水分利用效率的影响及其节水增产机理已成为当前研究的热点问题。本研究表明,块茎膨大期是马铃薯耗水量最大的生育阶段,其次是苗期和块茎形成期,淀粉积累期最小,这与王俊国^[17]、刘战东^[18]等研究认为前期耗水小,中期逐渐变大,后期减小的类似抛物线的结果一致。早期适度的水分调亏有利于作物增产^[19-22],马铃薯根系在块茎形成期扩散生长,在该时期进行轻度水分调亏(田间持水量的 55%~65%)可以改变光合产物在根与冠之间的分配比例,根系得到更多光合产物,生长相对有利,而冠的生长则受到抑制,叶

面积也相应减少,在一定程度上降低了作物的蒸腾耗水量,进而引起作物需水量的下降^[23-24]。因此,可在块茎形成期进行轻度水分调亏,在满足该时期作物需水量的情况下,产量不会受到影响。本研究还发现,马铃薯块茎生长主要集中在块茎膨大期,在该时期充足灌水可以增加单株产量,但调亏周期的延长和调亏程度的增加(田间持水量的 45%~55%),将导致马铃薯根系、匍匐茎及匍匐茎分枝数均减少^[25],株高、茎粗、叶面积和干物质积累也将随之降低^[26-27],进而引起产量显著降低。因此,块茎形成期和块茎膨大期是马铃薯的需水关键期和需水高峰期^[28]。块茎形成期对马铃薯块茎发育和最终产量影响最大,而块茎膨大期块茎加速生长,耗水量也大幅增加,块茎生长得越好,产量越高。

本研究发现,块茎形成期轻度水分调亏较全生育期充分灌水产量降低了 6.4%,差异不显著。而在块茎形成期中度水分调亏(田间持水量的 45%~

55%)、块茎膨大期轻度和中度水分调亏会导致产量显著下降,较全生育期充分灌水分别降低 12.2%、17.2%、20.4%,这与已有研究结果一致^[29]。块茎膨大期中度调亏马铃薯水分利用效率最高,但产量显著降低,而块茎形成期轻度和中度调亏水分利用效率与其无显著性差异,且与块茎膨大期轻度调亏和全生育期充分灌水相比分别提高 8.3%、6.7%和 2%、0.4%,表明在块茎形成期进行水分调亏更有利于提升马铃薯水分利用效率。因此,马铃薯块茎膨大期土壤相对含水率(占田间持水量的百分数)保持在 45%~55%虽有较高的水分利用效率但减产显著,在块茎膨大期保持在 55%~65%或块茎形成期保持在 45%~55%既降低水分利用效率又在一定程度上减产,而在块茎形成期保持在 55%~65%可以同步提升水分利用效率和产量。马铃薯膜下滴灌应在块茎形成期进行轻度水分调亏灌溉,以期实现高效节水增产的目的。

灌溉制度优化是基于作物水分需求与产量的关系建立模型,将有限的水资源进行优化配置,以便获取更大效益的一种研究方法^[30]。本文研究表明,马铃薯产量随灌溉定额的增加而增大。灌溉定额为 225 mm 时,计算产量分别比 135、95、55 mm 提高 18.6%、35.8%、62%。张兵等研究发现在非充分灌溉条件下,作物产量与净收益随着灌水量的增加而增加^[7],郑建华等认为西北旱区洋葱膜下滴灌在优化灌溉制度下其产量随灌水量的增加而增大^[31],这与本文研究结果一致。可见,采用科学合理的灌溉制度,对提高作物产量和水资源利用效率有着不可忽视的作用。

4 结 论

本文研究了马铃薯各生育期耗水量、水分利用效率和产量之间的关系,根据试验所得的马铃薯产量和不同生育阶段的耗水量,建立以 Jensen 为基础的马铃薯水分生产函数,以相对产量最大为目标制定河西绿洲马铃薯膜下滴灌条件下的优化灌溉制度,相关结论如下:

1) 马铃薯的产量随耗水量的增加而增大,各生育期耗水量呈现出前期小、中期大、后期小的特点,块茎膨大期的耗水量最大。块茎形成期轻度水分调亏对其产量无显著影响,而在块茎形成期中度水分调亏、块茎膨大期轻度和中度水分调亏可导致马铃薯显著减产。

2) 马铃薯生育期水分敏感指数为块茎膨大期>块茎形成期>苗期>淀粉积累期,块茎膨大期在

马铃薯的生育期内有着决定性的作用,而在块茎形成期和淀粉积累期进行轻度水分调亏有利于提高水分利用效率,同时又能达到节水增产的目的。

3) 膜下滴灌条件下,河西绿洲马铃薯全生育期灌水量达到 225 mm 时的产量较高,与其对应的优化灌溉制度为苗期灌水 20~30 mm,块茎形成期灌水 70~75 mm,块茎膨大期灌水 100~115 mm,淀粉积累期灌水 20~25 mm,灌水间隔为 7 d。

参 考 文 献:

- [1] 王青蓝,毕宏波,蔡红岩,等.我国马铃薯加工业现状及对策[J].吉林农业科学,2008,33(6):97-99.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Intiyaz M, Mgadla N P, Chepete B, et al. Response of six vegetable crops to irrigation schedules [J]. Agricultural Water Management, 2000,45(3):331-342.
- [6] 霍军军,尚松浩.基于模拟技术及遗传算法的作物灌溉制度优化方法[J].农业工程学报,2007,23(4):23-28.
- [7] 张 兵,袁寿其,李 红,等.基于最优保留策略遗传算法的玉米小麦优化灌溉模型研究[J].农业工程学报,2005,21(7):25-29.
- [8] 李晓玲,张 芮,丁 林.地面灌溉条件下蚕豆的水分生产函数与灌溉定额的确定[J].甘肃农业大学学报,2006,41(4):91-94.
- [9] 林叶春,张 丹,肖银梅.西北地区马铃薯节水种植制度的发展[J].中国农学通报,2010,26(4):99-103.
- [10] Steyn J M, Plessis H F, Fourie P, et al. Yield response of potato genotypes to different soil water regimes in contrasting seasons of a subtropical climate[J]. Potato Research, 1998,41(3):239-254.
- [11] 张修宇,潘建波,李 斌.调亏灌溉节水增产效应影响因素的研究进展[J].华北水利水电学院学报,2006,27(4):45-48.
- [12] Lynch D R, Foroud N, Kozub G C, et al. The effect of moisture stress at three growth stage on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties[J]. American Journal of Potato Research, 1995,72(6):375-385.
- [13] 秦军红,蒙美莲,陈有君,等.马铃薯膜下滴灌增产效应的研究[J].中国农学通报,2011,27(18):204-208.
- [14] Ali E, Hamid R K, Ahmad N, et al. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013,59(6):889-897.
- [15] 王振映.膜下滴灌技术对马铃薯种植的节水机理研究[J].农田水利,2015,(7):70-71.
- [16] Luisa C, Vedove G, Gianquinto G, et al. Yield, water use efficiency and nitrogen uptake in potato: influence of drought stress[J]. Potato Research, 1997,40(1):19-34.

and seasonal variations of trunk sap flow and its growth in *Calligonum arborescens*[J]. *Journal of Arid Land*, 2013,5(2):233-243.

[2] 吴立峰.不同灌水和施氮对河西地区春小麦生长和水分利用的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2011.

[3] Wang Z M, Zhang B, Li X Y, et al. Using CropSyst to simulate spring wheat growth in black soil zone of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2006,16(3):354-361.

[4] 杨建仓.我国小麦生产发展及其科技支撑研究[D].北京:中国农业科学院,2008.

[5] 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等.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):88-93.

[6] Yohannes F, Tadesse T. Effect of drip and furrow irrigation and plant spacing on yield of tomato at Dire Dawa, Ethiopia[J]. *Agricultural Water Management*, 1998,35(3):201-207.

[7] El Tilib A M A, El Mahi Y E, Magid H M A, et al. Response of wheat to irrigation frequency and manuring in a salt-affected semi-arid environment[J]. *Journal of Arid Environments*, 1995,31(1):115-125.

[8] 褚鹏飞,王 东,张永丽,等.灌水时期和灌水量对小麦耗水特性、籽粒产量及蛋白质组含量的影响[J].*中国农业科学*,2009,42(4):1306-1315.

[9] Du T, Kang S, Sun J, et al. An improved water use efficiency of cereals under temporal and spatial deficit irrigation in north China[J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97(1):66-74.

[10] 蒋桂英,魏建军,刘 萍,等.滴灌春小麦生长发育与水分利用效率的研究[J].*干旱地区农业研究*,2012,30(6):50-54,73.

[11] 党根友,魏亦勤,刘旺清,等.灌水模式对春小麦光合性能和干物质生产的影响[J].*麦类作物学报*,2015,35(2):198-206.

[12] 管建慧,张永平,蒋阿宁.不同灌水处理对春小麦耗水特性及产量的影响[J].*中国农学通报*,2009,25(8):272-276.

[13] 王红光,于振文,张永丽,等.测墒补灌对小麦光合特性和干物质积累与分配的影响[J].*应用生态学报*,2011,22(10):2495-2503.

[14] 王国栋,曾胜和,周建伟,等.基于控墒补灌的春小麦滴灌制度研究[J].*干旱地区农业研究*,2014,32(6):19-25.

[15] 王振华,郑旭荣,姜国军.不同灌水量对滴灌春小麦生长和生理指标的影响[J].*核农学报*,2015,29(3):538-548.

[16] 王冀川,徐翠莲,韩秀锋,等.不同土壤水分对滴灌春小麦生长、产量及水分利用效率的影响[J].*农业现代化研究*,2011,32(1):115-119.

[17] 杨晓亚,于振文,许振柱.灌水量和灌水时期对小麦耗水特性和氮素积累分配的影响[J].*生态学报*,2009,29(2):846-853.

[18] 郑成岩,于振文,马兴华,等.高产小麦耗水特性及干物质的积累与分配[J].*作物学报*,2008,34(8):1450-1458.

[19] 刘克礼,高聚林,张永平,等.早作春小麦干物质积累规律的研究[J].*麦类作物学报*,2003,23(4):75-78.

[20] 董 剑,赵万春,高 翔,等.水氮调控对小麦植株干物质积累、分配与转运的影响[J].*华北农学报*,2012,27(3):196-202.

[21] 刘 培.土壤水分胁迫对作物的生长发育、生理特征及其产量影响的研究[D].杨凌:西北农林科技大学,2010.

[22] 韩占江,于振文,王 东,等.测墒补灌对冬小麦干物质积累与分配及水分利用效率的影响[J].*作物学报*,2010,36(3):457-465.

[23] 徐翠莲,王冀川,高 山,等.土壤水分调控对滴灌春小麦产量及水分利用的影响[J].*华北农学报*,2013,28(3):127-132.

[24] 刘小刚,张富仓,田育丰,等.限量灌溉对石羊河流域春小麦根区水氮迁移和利用的影响[J].*干旱地区农业研究*,2008,26(6):57-62.

[25] 张忠学,于贵瑞.不同灌水处理对冬小麦生长及水分利用效率的影响[J].*灌溉排水学报*,2003,21(2):1-4.

[26] Panda R K, Behera S K, Kashyap P S. Effective management of irrigation water for wheat under stressed conditions[J]. *Agricultural water management*, 2003,63(1):37-56.

(上接第 164 页)

[17] 王俊国.建薯 1 号马铃薯生育期适宜土壤水分指标研究[J].*安徽农业科学*,2010,38(32):18119-18120,18154.

[18] 刘战东,肖俊夫,于秀琴.不同土壤水分处理对马铃薯形态指标、耗水量及产量的影响[J].*中国农村水利水电*,2010,(8):1-3,7.

[19] Turner N C. *Plant Water Relations and Irrigation Management*[J]. *Agri Water Manag*, 1990,(17):59-75.

[20] 蔡焕杰,邵光成,张振华.不同水分处理对膜下滴灌棉花生理指标及产量的影响[J].*西北农林科技大学学报(自然科学版)*,2002,30(4):29-32.

[21] Shock C C, Zalewski J C, Stieber T D, et al. Impact of early - season water deficits on russet bur bank plant development, tuber yield and quality[J]. *Am Potato J*, 1992,69(12):793-803.

[22] Shock C C, Feibert E B G, Saunders L D. Potato yield and quality response to deficit irrigation[J]. *Hort Science*, 1998,33(4):655-659.

[23] Anne M, Boland. The effect of regulated deficit irrigation on tree water use and growth of peach[J]. *Journal of Hort - I cultural Science*, 1993,68(2):261-264.

[24] Blackman P G, Davies W J. Root to shoot communication in maize plants of the effects of soil drying[J]. *J Exp Bot*, 1985,(36):39-48.

[25] 赵海超,抗艳红,龚学臣,等.干旱胁迫对不同品种马铃薯生长指标的影响[J].*安徽农业科学*,2008,36(28):12102-12104.

[26] 高占旺,庞万福,宋伯符.水分胁迫对马铃薯的生理反应[J].*马铃薯杂志*,1995,9(1):1-6.

[27] 王 婷,海梅荣,罗海琴,等.水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J].*云南农业大学学报*,2010,25(5):737-743.

[28] Fabeiro C, Martin de Sa nta Olalla F, Juan J A. Yield and size of deficit irrigated potatoes[J]. *Agricultural Water Management*, 2001,48(3):255-266.

[29] 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.

[30] 何春燕,张 忠,何新林,等.作物水分生产函数及灌溉制度优化的研究进展[J].*水资源与水工程学报*,2007,18(3):42-45.

[31] 郑建华,黄冠华,黄权中,等.干旱区膜下滴灌条件下洋葱水分生产函数与优化灌溉制度[J].*农业工程学报*,2011,27(8):25-30.