

土壤水分调亏处理膜下滴灌马铃薯耗水特征及生长动态

李晶, 张恒嘉, 周宏

(甘肃农业大学工学院农业水利工程系, 甘肃兰州 730070)

摘要: 以青薯“168”为试验材料, 通过大田试验, 研究了膜下滴灌调亏对河西绿洲马铃薯土壤水分动态、耗水特征、生长动态及产量的影响。试验设5个水分调亏处理, 即块茎形成期和块茎膨大期分别进行轻度(55%~65%田间持水量, FC)和重度(45%~55%FC)调亏, 淀粉积累期轻度(55%~65%FC)调亏, 以全生育期充分供水(65%~75%FC)为对照。结果表明: 受水分调亏影响, 上层0~40 cm土壤水分变化较下层40~60 cm明显, 马铃薯块茎膨大期经受轻度和中度水分亏缺土壤贮水量显著($P < 0.05$)低于充分供水8.1%和18.7%, 耗水强度则显著降低60.0%和73.0%。块茎形成期进行不同程度水分调亏后复水, 其叶面积指数(LAI)、光合势(LAD)、相对生长率(RGR)均表现出补偿效应, 而块茎膨大期进行轻度和中度水分调亏以及淀粉积累期轻度水分调亏 LAI、LAD 及 RGR 均呈下降趋势, 其薯块产量与全生育期充分供水相比分别降低22.3%、26.5%、38.7%。因此, 马铃薯生长后期应注重供水以延长绿叶面积, 对作物产量的形成有利。

关键词: 水分调亏; 膜下滴灌; 马铃薯; 耗水特征; 生长动态

中图分类号: S532; S275.6 **文献标志码:** A

Water consumption characteristics and growth dynamics of potato under mulched drip irrigation with soil water deficit regulation

LI Jing, ZHANG Heng-jia, ZHOU Hong

(Department of Agricultural Water Resources Engineering, School of Engineering,
Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: An experiment was conducted to determine the effect of water deficit on soil moisture, water consumption, growth, and tuber yield of potato under mulched drip irrigation in Hexi oasis region, with “Qingshu No. 168” selected as the experimental cultivar. There were mild (55% ~ 65% of field capacity, FC) and medium water deficit (45% ~ 55% FC) at both tuber initiation and tuber bulking stages, mild water deficit at tuber starch accumulation stage, resulting in five water deficit treatments. The non-soil-water-deficit (65% ~ 75% FC) was taken as control. Results indicated that soil water content varied more in 0 ~ 40 cm than 40 ~ 60 cm soil layer. The stored soil water for the mild and medium deficit at potato tuber bulking was 8.1% and 18.7% lower than that for full irrigation ($P < 0.05$), and the daily water consumption decreased by 60.0% and 73.0% respectively. The leaf area index (LAI), leaf area duration (LAD), and relative growth rate (RGR) of potato were compensatory increased by re-watering after various water deficit at tuber initiation, while the LAI, LAD, and RGR decreased in the plants subjected to mild and medium water deficit at tuber bulking and mild deficit at starch accumulation, with tuber yield reduced by 22.3%, 26.5%, and 38.7% compared with that of full irrigation. Therefore, green leaf area should be maintained by sufficient water supply at late growth stages of potato, which is beneficial to tuber yield.

Keywords: water deficit; mulched drip irrigation; potato; water consumption; growth indexes

马铃薯在世界范围内广泛种植, 世界马铃薯中心(World Potato Center)调查结果显示, 到2020年马铃薯世界需求量将超过小麦、水稻、玉米而跃居第一

位^[1]。中国是世界上最大的马铃薯生产国, 随着加工业的发展和产业结构的调整, 马铃薯已成为西部地区高产、稳产且具有高经济收益的优势作物之

—^[2]。长期以来,对于地处我国西北干旱内陆河流域的河西绿洲灌区而言,水分始终是该区作物生产的主要限制因子^[3]。膜下滴灌技术由于其显著的节水、增温和保墒特性,可为作物生长创造适宜的土壤生长环境。已有研究表明,地膜覆盖和滴灌技术均可显著提高马铃薯产量和水分利用效率^[4-6]。侯晓燕等^[7]认为马铃薯生长前期覆膜(滴灌)可使表层土壤日平均温度提高 2℃~9℃。王凤新和康跃虎等^[8]认为滴灌灌水频率为 1 次/1d、土壤基质势为 -25 kPa 时马铃薯产量最高,块茎形成期和膨大期土壤基质势均为 -25 kPa 而淀粉积累期为 -35 kPa 时,马铃薯产量和水分利用效率均为最高。本文通过在河西内陆干旱区开展马铃薯大田试验,研究分析了水分调亏对膜下滴灌马铃薯不同生育阶段土壤水分变化、耗水特征、生长动态及产量的影响,进一步揭示马铃薯膜下滴灌的增产机理。

1 研究内容与方法

1.1 试验区概况

试验于 2012 年 4—10 月在甘肃省张掖市水务局国家重点灌溉试验站进行。该站位于张掖市西北约 20 km 处,海拔 1 482.7 m,东经 100°26′,北纬 38°56′。年均降雨 140 mm,蒸发量大于 2 000 mm,昼夜温差大,属于典型的大陆性干旱气候。试区地势平坦,地下水埋深大于 20 m,土质为中壤土,土壤肥力中等,pH 值 8.4,土壤比重 2.7,0~100 cm 土层土壤容重 1.46 g·cm⁻³,田间持水量为 22.8%(重量比),0~20 cm 耕层土壤有机质含量 1.37%,速效磷 13.4 mg·kg⁻¹,碱解氮 61.8 mg·kg⁻¹,速效钾 190.4 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

供试材料为“青薯 168”,属晚熟菜用型和淀粉加工兼用型品种。于 2012 年 4 月 20 日播种,同年 10 月 19 日收获,全生育期 182 d,降水量 140.8 mm。试验依不同水分调亏水平和调亏生育期设 5 个处理(WD1~WD5),1 个对照(CK),分别在马铃薯块茎形成期、块茎膨大期和淀粉积累期 3 个生育阶段进行水分调亏。研究计划湿润层深度为 60 cm,分别以土壤水分占田间持水量的 65%~75%为充分供水,55%~65%为轻度水分亏缺,45%~55%为重度水分亏缺(表 1),多年研究表明水分控制上下限范围与该区域实际较为吻合^[9]。

采用起垄覆膜与膜下滴灌相结合的栽培方式,单垄双行种植,垄宽 80 cm,垄高 20 cm,垄距 40 cm,株距 20 cm。垄间铺设滴灌带(φ16 mm),滴孔间距

20 cm,其上覆膜,其中滴头流量 2.5 L·h⁻¹,工作水头 6 m。试验为单因素随机区组排列,小区面积 36 m²(10 m×3.6 m)。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。鉴于该区的多年实测资料,本试验土壤湿润比取 54%。播种前试验地均匀撒施氮肥和磷二铵各 80 kg·hm⁻²作为基底肥,并在块茎形成期追施氮肥 20 kg·hm⁻²。

表 1 试验设计方案/%¹⁾

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	幼苗期 (62 d) Seedling	块茎形 成期(37d) Tuber initiation	块茎膨 大期(38d) Tuber bulking	淀粉积 累期(45d) Starch accumulation
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

注:1) 土壤含水量占田间持水量的%。

Note: 1) means soil water content in percent of field capacity.

1.3 测定项目及方法

(1) 产量:按小区单独收获计产,分别记录各小区薯块产量和商品薯产量。

(2) 土壤水分:用土钻取样烘干法测定土壤含水量。马铃薯根系主要分布在 0~40 cm 范围内^[10],因此根据试区实际情况,每个小区随机选取一垄在距滴灌带进水口 30~50 cm 和距滴灌带末尾 30~50 cm 处取土。本研究播种前(4 月 19 日)、收获后(10 月 19 日)取土深度为 1 m,分 6 个剖面梯度测定:0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。生育期内每隔 7~10 d 取土 1 次,测定深度为 60 cm,按 0~10、10~20、20~40、40~60 cm 分 4 个剖面梯度取土,灌水和降雨后加测。当土壤含水量降至表 1 控制下限时,立即进行灌水,灌水量由下式确定^[11]:

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

式中, m 为灌水量(mm); ρ_b 计划湿润层内土壤容重(g·cm⁻³); H 为计划湿润层深度(cm),本试验为 60 cm; β_i 为目标含水量(田间持水量乘以设计目标相对含水量上限); β_j 为自然含水量,即灌前土壤含水量。灌水量由水表计量,确保各处理 3 个重复灌水量一致。所得灌水量(mm) 根据关系式“灌水量(m³·hm⁻²) = [灌土层厚度(mm) × 667/1000] × 15”换算成以体积表示的灌水量(m³·hm⁻²)。降雨量(mm) 和全生育期耗水量(mm) 的换算亦如此。表 2 为马铃薯生育期内灌水量和降雨量。

表 2 马铃薯生育期内灌水量和降雨量/mm

Table 2 Irrigation quantity and precipitation during potato growth period

处理 Treatment	幼苗期 Seeding		块茎形成期 Tuber initiation		块茎膨大期 Tuber bulking		淀粉积累期 Starch accumulation	
	灌水量 Irrigation quantity	降雨量 Precipitation	灌水量 Irrigation quantity	降雨量 Precipitation	灌水量 Irrigation quantity	降雨量 Precipitation	灌水量 Irrigation quantity	降雨量 Precipitation
WD1	61.4		45.0		131.8		60.6	
WD2	59.7		98.8		27.9		59.8	
WD3	59.3		109.4		123.9		27.8	
WD4	60.1	44.1	17.0	65.3	123.7	21.9	58.8	86.0
WD5	62.5		108.7		16.9		62.2	
CK	64.0		120.4		132.1		62.6	

(3) 马铃薯耗水量:采用水量平衡法^[12]计算。

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n r_i H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K + C$$

式中, ET_{1-2} 为某生育阶段始末的作物耗水量(mm); i 为土壤层次编号; n 为土壤层次总数; r_i 为第 i 层土壤干体积重量($g \cdot cm^{-3}$); H_i 为第 i 层土壤厚度(cm); W_{i1} 、 W_{i2} 分别为第 i 层土壤在时段始末的重量含水率(%); M 、 P 分别为时段内灌水量和有效降雨量(mm), 其中降雨量以试区气象站所测数据为准; K 为时段内深层土壤水补给量(mm), 试区地下水埋深 > 20 m, 故 K 值为 0; C 为时段内排水量(为地表排水与下层排水之和, mm), 试区属绿洲干旱区, 灌水上限最大为田间持水量的 75%, 不会产生向 100 cm 土层以下的深层渗漏, 故 C 取值为 0。

(4) 作物指标测定

生育时期观测:生育期主要包括出苗期、幼苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期。各生育期以该品种 50% 达到发芽或现蕾等为标准。

株高、茎粗:选试验小区中部的植株进行测定, 在中间滴灌垄选取 5 株。用钢卷尺测其生理高度, 用游标卡尺垂直垄方向测其生理茎粗, 每 10 天测定一次。

叶面积测定:每小区取样 10 株, 采用长、宽系数法测定叶面积, 叶面积 = 叶长 \times 叶宽 $\times k$, k 为叶面积校正系数, 马铃薯叶面积校正系数取 0.76^[13]。

干物质:每小区随机取样 5 株, 带回实验室清洗干净, 按各器官分解称重装袋, 然后在干燥箱 105℃ 杀青 1 h 后, 80℃ 烘干至恒重。

(5) 群体生长指标计算方法^[14]如下:

叶面积指数: $LAI = \text{单株叶面积}(m^2) \times \text{单位土地面积株数}(\text{株}) / \text{单位土地面积}(m^2)$ 。

叶片光合势: $LAD = 1/2 \times (LA_2 + LA_1) (T_2 - T_1)$

相对生长率: $RGR = (\ln M_2 - \ln M_1) / (T_2 - T_1)$

其中, LA_1 、 LA_2 为 T_1 、 T_2 时间的叶面积, 单位为 cm^2 ; M_1 、 M_2 为 T_1 、 T_2 (d) 时间的干物质, 单位为 $g \cdot \text{株}^{-1}$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 处理试验数据并绘图, 用 SPSS17.0 进行统计分析, 并用 Duncan 的 SSR 检验法进行差异显著性多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 调亏对膜下滴灌土壤水分的影响

2.1.1 土壤剖面水分变化 图 1 为不同生育阶段灌水 3~4 d 后 0~60 cm 剖面土壤水分变化情况。全生育期内, 块茎形成期和膨大期土壤剖面水分变化平缓, 且形成期土壤水分普遍偏低, 淀粉积累期总体呈升高趋势。从不同耕层土壤含水量变化情况来看, 膜下滴灌条件下最大含水量主要集中在 0~20 cm 处, 10~40 cm 土壤含水量变化最大, 其次为 0~10 cm, 而 40~60 cm 剖面土壤含水量维持在较低水平。这是由于 10~40 cm 为马铃薯根系分布区和块茎形成生长区, 土壤含水量变化主要受作物生长特性及棵间蒸发的影响。其次, 受水分亏缺影响, 上层 0~40 cm 土层水分变化较下层 40~60 cm 剧烈, 且上层土壤含水量高于下层。幼苗期各处理充分供水, 上层 0~40 cm 土壤水分差异不明显。块茎形成期分别经受轻度、重度水分亏缺的 WD1 与 WD4 处理 0~60 cm 土壤剖面平均土壤含水量较对照 CK 降低 0.7%、5.8%。块茎膨大期充分供水处理 WD1、WD3、WD4 及 CK 0~40 cm 剖面土壤含水量开始回升, 而轻度亏缺 WD2 与中度亏缺 WD5 0~60 cm 剖面平均土壤含水量较对照 CK 降低 8.1%、18.7%。淀粉积累期各处理上层 0~40 cm 土壤含水量与下层 40~60 cm 差异较大, WD3 处理上层 0~40 cm 土壤水明显低于 CK, 但与其它处理差异不明显。

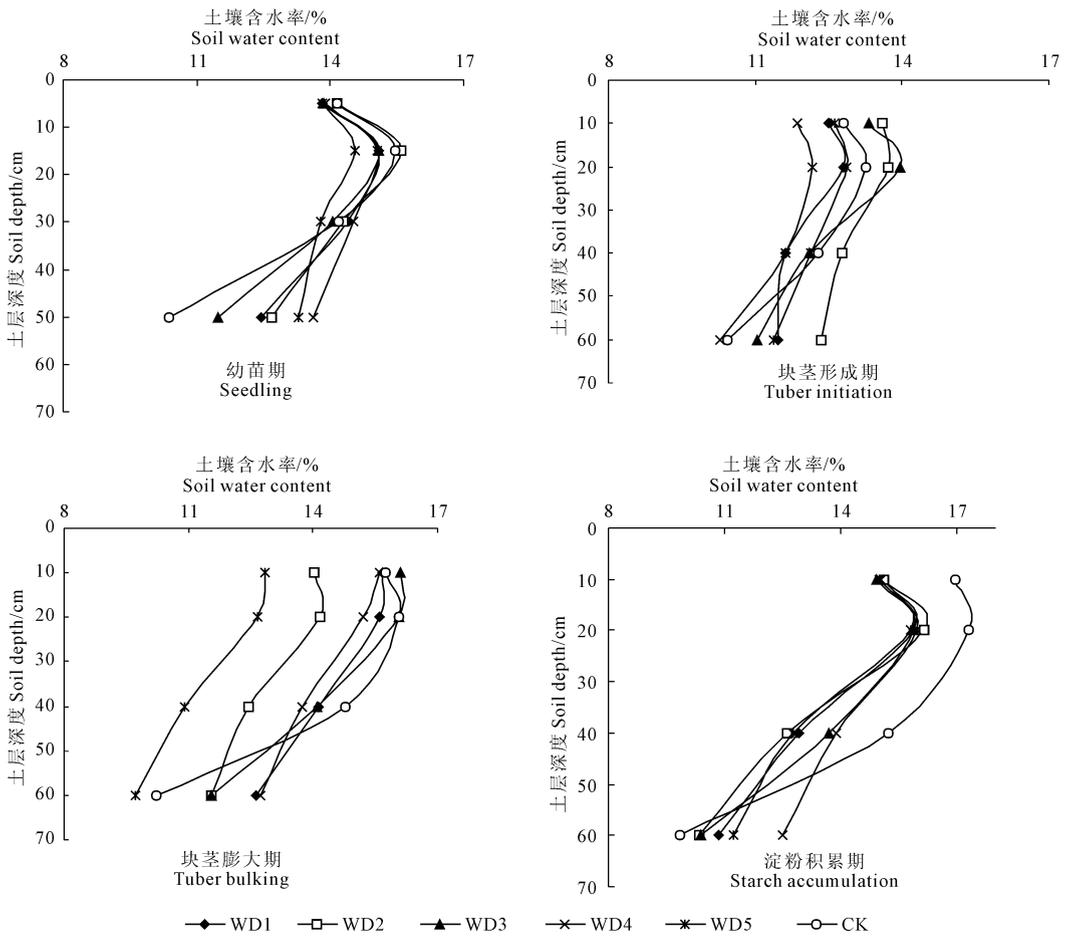


图 1 不同生育期 0~60 cm 土壤剖面水分变化

Fig.1 Profile soil water distribution in 0~60 cm layer in different growth stages

2.1.2 土壤贮水量 统计分析表明,不同生育阶段 0~60 cm 土层土壤贮水量分析发现,土壤贮水量变化趋势为淀粉积累期 > 幼苗期 > 块茎膨大期 > 块茎形成期(图 2)。幼苗期不同处理土壤贮水量介于 109.7~115.6 mm 之间,各处理间无显著差异($P > 0.05$)。块茎形成期轻度亏缺处理 WD1、中度亏缺处理 WD4 土壤贮水量与 CK 间差异均不显著,而 WD4 与 WD2、WD3 间差异达显著水平。块茎膨大期中度亏缺的 WD5 处理土壤贮水量比 CK 显著减少 18.7%,比轻度亏缺处理 WD2 也显著减少 11.5%,然而 WD2 处理与对照 CK 间土壤贮水量差异不显著,但与 WD1、WD3、WD4 间差异显著。淀粉积累期调亏处理 WD3 土壤贮水量最小,但这一时期各处理及对照间土壤贮水量差异均不显著。

2.2 调亏对马铃薯耗水特征的影响

2.2.1 日耗水强度 马铃薯生育期耗水强度近似为:块茎形成期 > 块茎膨大期 > 幼苗期、淀粉积累期(表 3),这与马铃薯生物生理特性、生长条件相关。全生育期充分供水的 CK 日耗水强度在各个生育阶

段均为最大,平均耗水强度为 $3.18 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,而各水分调亏处理在调亏生育期内日耗水强度均显著降低。幼苗期马铃薯植株小,气温低,日耗水强度在 $1.21 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,因各调亏处理均为充分供水,其日耗水强度与 CK 间无显著差异。块茎形成期和膨大期是马铃薯营养生长与生殖生长并进期和生殖生长旺盛期,分别历时 41 d 和 35 d,除本期进行水分调亏的处理外,其它处理日耗水强度分别均在 $3.83 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $3.65 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上。WD1、WD4 处理在块茎形成期分别进行轻度、中度水分调亏,日耗水强度显著低于 CK 45%、51.8%。膨大期复水后的 WD1、WD4 处理日耗水强度显著增加,与 CK 差异不显著,而该时期进行轻度和中度水分调亏处理 WD2、WD5 与 CK 差异显著,比 CK 显著减少 60% 和 73%,且中度水分调亏 WD5 比轻度调亏 WD2 日耗水强度显著减小 32.1%。进入淀粉积累期,植株叶面积指数下降,气温降低,日耗水强度也呈下降趋势。此期进行轻度水分调亏的 WD3 日耗水强度显著低于 CK 及其它处理。

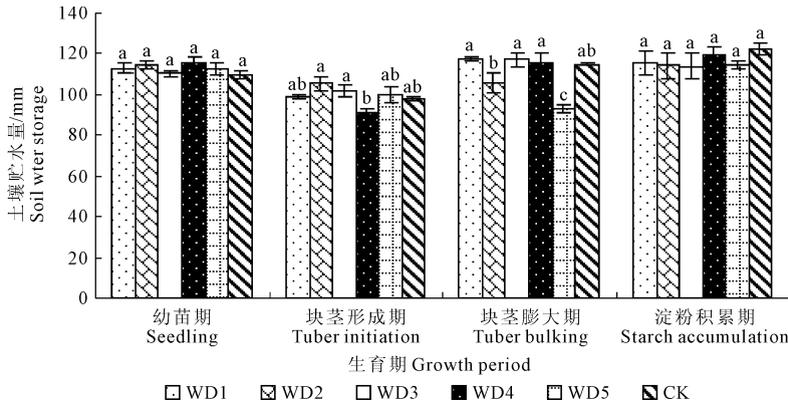


图 2 马铃薯各生育阶段 0~60 cm 土层土壤贮水量

Fig.2 Stored soil water in 0~60 cm layer during various growth stages of potato

表 3 马铃薯各生育期耗水特征

Table 3 Water consumption characteristics in different growth stages of potato

处理 Treatment	幼苗期 Seeding			块茎形成期 Tuber initiation			块茎膨大期 Tuber bulking			淀粉积累期 Starch accumulation			总耗水量 Total water consumption /mm
	耗水量 WC /mm	日耗水 强度 DWC /(mm·d ⁻¹)	耗水模 系数 WCC /%	耗水量 WC /mm	日耗水 强度 DWC /(mm·d ⁻¹)	耗水模 系数 WCC /%	耗水量 WC /mm	日耗水 强度 DWC /(mm·d ⁻¹)	耗水模 系数 WCC /%	耗水量 WC /mm	日耗水 强度 DWC /(mm·d ⁻¹)	耗水模 系数 WCC /%	
WD1	92.11	1.49a	22.48ab	105.52	2.57c	25.77d	142.00	4.06a	34.66a	70.62	1.59a	17.09a	410.25
WD2	74.96	1.21a	20.47ab	156.85	3.83b	42.83ab	59.78	1.71b	16.32d	74.63	1.70a	20.38a	366.22
WD3	90.39	1.46a	20.24ab	169.65	4.14ab	37.99bc	127.58	3.65a	28.57b	58.92	1.34b	13.19a	446.54
WD4	79.85	1.29a	21.39ab	92.13	2.25c	24.68d	131.18	3.75a	35.14a	70.12	1.59a	18.78a	373.28
WD5	93.45	1.51a	24.20a	175.70	4.29a	45.50a	40.46	1.16c	10.48e	76.51	1.74a	19.82a	386.12
CK	109.85	1.77a	20.39b	192.07	4.68a	35.66c	150.67	4.30a	27.97c	86.06	1.96a	15.98a	538.65

注:表中同列数据字母不同表示在 $P_{0.05}$ 水平上差异显著,下同。WC 为耗水量简称, DWC 为日耗水强度简称, WCC 为耗水模系数简称。

Note: Different letters indicate statistical significance at $P < 0.05$ level within the same column. The same as below. WC was the short for water consumption. DWC was the short for daily water consumption. WCC was the short for water consumption coefficient.

2.2.2 耗水模系数 统计分析表明,马铃薯各生育期耗水模系数的变化趋势与耗水强度基本一致,块茎形成期耗水模系数最高(表 3),各处理及对照平均耗水模系数为 35.41%。其次为块茎膨大期,平均耗水模系数为 25.52%。幼苗期和淀粉积累期耗水模系数较低,平均耗水模系数分别为 21.53% 和 17.54%。因不同生育阶段水分调亏程度不同,各处理阶段耗水模系数存在差异,所有调亏灌溉处理耗水模系数均低于同期对照,且水分亏缺程度越大模系数越小。处理 WD5 幼苗期耗水 93.45 mm,而总耗水量相对较小为 386.11 mm,WD5 处理此期耗水模数显著高于 CK 15.7%,与 WD1、WD2、WD3、WD4 处理耗水模系数无显著差异;在块茎形成期进行轻度和中度水分调亏的 WD1、WD4 处理间耗水模数无显著差异,但显著低于对照 CK,处理 WD5 形成期耗水模系数为该生育期最高,并显著高于 WD1、WD3、WD4 和对照 CK;进入块茎膨大期,各处理及对照 CK 耗水模系数差异也逐渐变大,WD2、WD5 处理在此

期分别进行轻度和中度水分调亏,耗水模系数也随着调亏程度的增大而显著减小,且显著低于对照 CK 41.7% 和 62.5%。复水后 WD1 与 WD4 处理此期耗水模系数显著上升,且显著高于 WD2、WD3、WD5 及对照 CK;处理 WD3 在淀粉积累期进行轻度水分调亏,但该时期处理 WD3 耗水模系数与其它处理及对照 CK 间不存在显著差异。

2.3 调亏对马铃薯生长动态的影响

2.3.1 株高和主茎茎粗 马铃薯株高和主茎茎粗生长趋势基本一致,幼苗期-块茎形成期缓慢生长,膨大期迅速生长,并达到最高峰,进入淀粉积累期又缓慢生长,生长曲线近似为单峰曲线(表 4)。不同程度的水分调亏处理间马铃薯株高在幼苗期、块茎形成期和块茎膨大期无显著差异,而块茎膨大期中度水分调亏的 WD5 处理进入淀粉积累期复水后,其株高显著(高于在淀粉积累期进行轻度水分调亏的 WD3 处理 28.1%)。不同水分调亏处理间马铃薯主茎茎粗在幼苗期、块茎形成期和淀粉积累期无显著

差异,块茎膨大期 WD5 受中度水分调亏的影响,其主茎茎粗显著低于 CK 及其它各处理,进入淀粉积

累期其主茎茎粗显著升高,表现出明显的复水补偿效应。

表 4 马铃薯不同调亏处理株高、茎粗变化动态/cm
Table 4 Plant height and stem diameter of potato subjected to limited irrigation

处理 Treatment	幼苗期 Seedling		块茎形成期 Tuber initiation		块茎膨大期 Tuber bulking		淀粉积累期 Starch accumulation	
	株高 Plant height	主茎茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	主茎茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	主茎茎粗 Stem diameter	株高 Plant height	主茎茎粗 Stem diameter
WD1	22.2a	0.76a	47.8a	1.03a	78.2a	1.32a	107.6ab	1.39a
WD2	19.9a	0.60ab	44.1a	1.13a	83.9a	1.30a	92.3ab	1.35a
WD3	21.0a	0.71a	44.3a	0.97a	75.0a	1.34a	87.17b	1.39a
WD4	20.3a	0.61ab	41.1a	1.02a	72.6a	1.37a	92.2ab	1.39a
WD5	23.6a	0.64ab	46.2a	1.00a	94.4a	1.03b	121.3a	1.27a
CK	23.3a	0.73a	45.9a	1.19a	90.6a	1.31a	106ab	1.52a

2.3.2 叶面积指数和光合势 由图 3a 可知,马铃薯叶面积指数(LAI)全生育期变化规律为幼苗期-块茎形成 LAI 缓慢上升,块茎形成期-膨大期快速上升,膨大期-淀粉积累期缓慢下降(WD1 处理除外),总体呈现单峰增长曲线。除 WD1 处理 LAI 高值出现在淀粉积累期外,其余处理及对照 CK 高值均出现在块茎膨大期,并且各处理与对照 CK 间 LAI 差异在该时期逐渐加大,进入淀粉积累期后叶片开始脱落,LAI 逐渐下降,处理间 LAI 差异达到最大。由图 3b 可知,马铃薯生育期前期各处理光合势(LAD)呈上升趋势,进入淀粉积累期 WD3 和 CK 分别下降 6.5%、8.7%,而处理 WD1、WD2、WD4 及 WD5 仍有所上升,上升幅度分别为 35.4%、3.8%、15.0%、6.6%。

马铃薯幼苗期-块茎形成期-块茎膨大期各处理及对照间 LAI 和 LAD 均有不同程度的上升,WD1 处理尽管在块茎形成期受到轻度水分调亏,但全生育期 LAD 最大(图 3(b)),呈线性增加趋势,全生育期充分供水的 CK 对照 LAD 始终处于最低水平。进入淀粉积累期,在膨大期受中度水分调亏的 WD5 处理和积累期轻度水分调亏的 WD3 处理叶片最先脱落,LAI 急剧下降,相应地 LAD 也呈缓慢下降趋势。块茎形成期分别经受轻度、中度水分调亏的 WD1 和 WD4 处理进入淀粉积累期后其 LAD 与其它处理及对照相比有明显上升趋势,表明马铃薯块茎形成期受水分亏缺影响,复水后在淀粉积累期 LAD 较其它处理及对照 CK 上升幅度大,表现出较强的复水补偿效应。

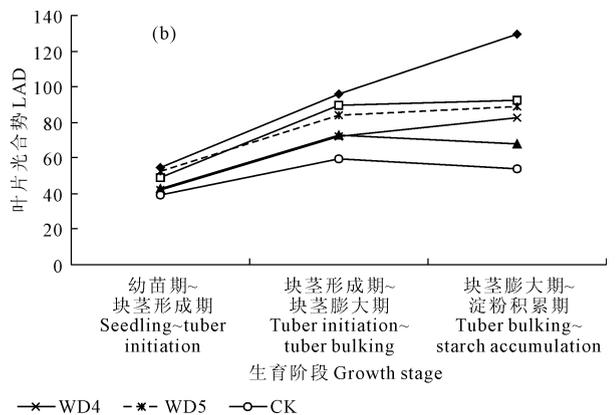
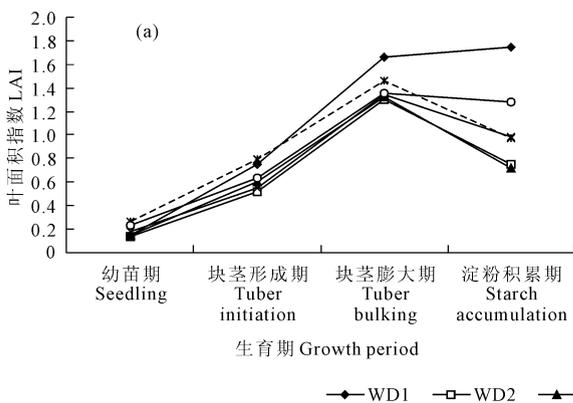


图 3 马铃薯生育阶段叶面积指数 (LAI) 和叶片光合势 (LAD) 变化动态

Fig.3 Changes of LAI and LAD at different growth stages of potato

2.3.3 干物质积累及相对生长率 由图 4a 可知,幼苗期马铃薯单株干物质与 CK 间无显著差异。块茎形成期马铃薯单株干物质较 CK 分别降低了

51.6%、19.7%、1.9%、63.0%、25.0%,其中水分亏缺处理 WD1 和 WD4 较 CK 下降幅度大,这表明块茎形成期水分亏缺严重抑制了马铃薯干物质的积累。

块茎膨大期 WD3 较 CK 单株干物质增大 1.5%，其它处理则分别降低 32.1%、21.7%、31.2%、14.6%，WD1 和 WD4 与 CK 差距变小，但仍高于该阶段受水分亏缺处理 WD2 和 WD5。淀粉积累期各处理较 CK 单株干物质降低了 15.9%、13.4%、5.4%、21.7%、37.0%。从整个生育期来看，尽管水分亏缺后复水马铃薯单株干物质有一定的补偿能力，但是补偿能力有限，最终仍然会影响光合产物的积累。

由图 4b 可知，调亏灌溉对各生育阶段相对增长率(RGR)无显著影响($P > 0.05$)。RGR 在马铃薯一生以幼苗期-块茎形成期阶段最高，其中 CK 最高为 $0.05 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，水分亏缺抑制了 WD1 和 WD4 处

理干物质增长速率。进入块茎膨大期后，增长速率逐渐减慢，复水后 WD1 和 WD4 处理其 RGR 明显有上升，RGR 高低排序为 $\text{WD4} > \text{WD1} > \text{WD5} > \text{WD3}$ 、 $\text{CK} > \text{WD2}$ 。到淀粉积累期各处理及 CK 分别为 0.03 、 0.02 、 0.002 、 0.02 、 -0.02 、 $0.01 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，WD5 首先出现负值，说明在干物质输出效率上 WD5 高于其它处理，其次为 WD3。总体而言，WD1 和 WD4 处理受块茎形成期水分亏缺的影响，后期 RGR 保持在较高水平，而幼苗期-块茎形成期、膨大期-淀粉积累期因受水分亏缺的影响，WD2、WD3 及 WD5 处理马铃薯 RGR 相对较小。

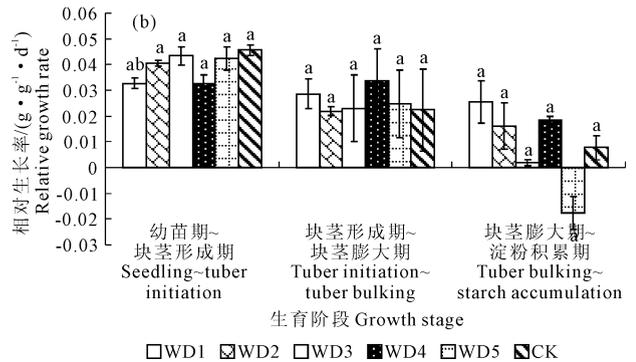
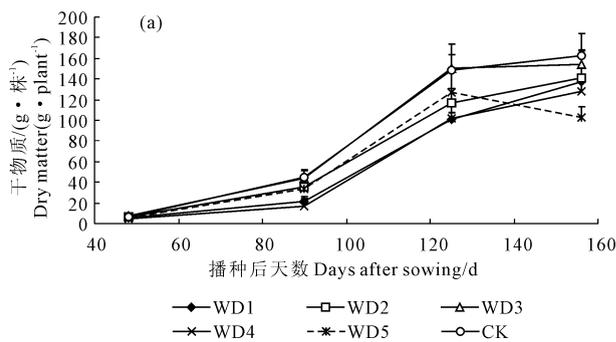


图 4 不同生育阶段马铃薯干物质(a)与相对增长率(b)变化

Fig. 4 Changes of dry matter and relative growth rate at different stages of potato

2.4 马铃薯产量

全生育期充分供水对照 CK 薯块产量最高，块茎形成期轻度亏缺处理 WD1 薯块产量与对照 CK 差异不显著(表 5)。WD2、WD3 和 WD5 处理薯块产量显著低于 CK 22.3%、26.5%、38.7%，说明马铃薯生育期后期进行水分亏缺可引起薯块产量显著下降。此外，WD1、WD2、WD3、WD4 间薯块产量无显著差异，表明块茎形成期土壤水分轻度调亏(55%~65%田间持水量)不会降低膜下滴灌马铃薯产量，而块茎形成期中度(45%~55%田间持水量)、块茎膨大期轻度和中度水分调亏则显著降低马铃薯产量。

表 5 不同水分处理马铃薯产量

Table 5 Tuber yield of Potato under different water treatments

处理 Treatment	薯块产量/(t·hm ⁻²) Tuber yield
WD1	27.28ab
WD2	23.43b
WD3	22.45b
WD4	24.09b
WD5	18.81c
CK	31.25a

3 结论与讨论

研究表明，较常规灌溉，膜下滴灌可有效减少地面蒸发，抑制深层渗漏，减少土壤养分下渗而流失，同时能够提高土壤水向作物水的转化效率，为作物生长发育提供良好的土壤水生态环境，对区域社会经济的发展和生态环境的保护具有重要意义^[15]。刘建国^[16]等研究认为膜下滴灌棉田土壤水分主要集中在 0~30 cm，且灌溉 5 d 土壤含水量高于普通灌溉，说明滴灌水分主要在表层运动，大量的有限水集中在作物根部，真正达到“作物需水”的目的。本试验结果与前人研究较为吻合，采用膜下滴灌将计划湿润层(60 cm)土壤水分控制在田间持水量的 45%~75% 范围内时，水分主要集中在 0~40 cm 土层，且土壤含水量最大值一般在 20 cm 深度处，马铃薯根系也主要集中在 0~40 cm 范围内耕作层，为根系充分吸收土壤水分提供了条件，实现提高水分利用效率的目的。

马铃薯块茎形成期土壤剖面水分动态变化及贮水量受水分调亏影响不显著，这与该时期马铃薯对土壤水分的消耗高于其它生育时期有关，阶段耗水

强度在 $2.25 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上,耗水模系数介于 24.68% ~ 45.50% 之间,因此时正值 6 月中旬—7 月下旬,受气温、蒸发等气候因子的影响,棵间蒸发增强。相关研究表明,马铃薯从分枝 ~ 花序形成期,日需水量迅速增大,花序形成 ~ 开花为需水量高峰期^[17],在不影响作物产量前提下,选择轻度水分亏缺(WD1)可进一步提高作物水分利用效率。膨大期耗水强度和耗水模数低于块茎形成期,但在该时期无论进行轻度或中度水分调亏均引起不同程度的减产,因此该期灌水对薯块产量形成有重要作用,为需水关键期。

叶片作为作物进行光合作用、输出光合产物的主要源器官,是产量形成的基础。大量研究发现,土壤干旱对作物生长发育有明显抑制作用^[18],复水后对其生长具有一定补偿效应^[19-20]。马铃薯幼苗期、块茎形成期以茎叶生长为中心,同化物主要用于光合系统的建成,块茎形成期进行轻度水分调亏的 WD1 处理与其它处理相比 LAI 明显增大,LAD 始终保持最高,而同期中度水分调亏的 WD4 处理 LAI 上升相对较缓,但生育期末 LAD 仍有上升趋势。WD1、WD4 处理在块茎膨大期 RGR 指标显著高于其它处理,且 WD4 较 WD1 更显著,直至淀粉积累期仍为最高,表明马铃薯块茎形成期水分调亏复水后有补偿效应,尤其是 WD4 处理。

本研究发现,进入淀粉积累期由于 WD3 受轻度水分调亏影响,叶片开始脱落,LAD 首先下降,WD2、WD5 处理在块茎膨大期受水分调亏影响,其二者末期的 RGR 也略有下降,WD2、WD3、WD5 最终薯块产量较对照显著减少 22.3%、26.5%、38.7%,但 WD1 处理进入淀粉积累期叶面积指数仍呈上升趋势,且薯块产量与 CK 差异不显著,表明马铃薯块茎膨大期之后水分主要用来生殖生长,但营养生长仍然与生殖生长存在水分和光合产物的竞争,产量形成与后期叶片仍有一定关系。刘克礼、张华普等^[21]认为马铃薯地上部茎叶器官的生长发育是产量形成的物质基础,马铃薯终花期叶片的生长对大薯率和最终产量影响较大^[22]。因此,在马铃薯农业生产上应重视块茎膨大期土壤水分供应以延长叶片功能期,保证薯块产量。

总体而言,土壤水分调亏对膜下滴灌马铃薯各生育阶段土壤水分、耗水规律及马铃薯群体性能均有一定影响,因此可通过不同生育阶段土壤水分调控来促进马铃薯群体生长以获得较高产量。

参考文献:

[1] Wang F X, Wu X X, Shock C C, et al. Effects of drip irrigation

regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China[J]. Fuel & Energy Abstracts, 2011,122(1):78-84.

- [2] 牛秀群,李金花,张俊莲,等.甘肃省干旱灌区连作马铃薯根际土壤中镰刀菌的变化[J].草业学报,2011,20(4):236-243.
- [3] 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.
- [4] 孙尚平,李淑珍.高寒冷凉区马铃薯地膜栽培生态效应研究[J].山西农业科学,2004,32(1):26-28.
- [5] Baghour M, Moreno D A, Hernández J, et al. Influence of root temperature on uptake and accumulation of Ni and Co in potato[J]. Plant Physiology, 2002, 159, 1113-1122.
- [6] Eldredge, Shock, Saunders. Early and late harvest potato cultivar response to drip irrigation[J]. Acta Hort, 2003, 619:233-239.
- [7] Hou X Y, Wang F X, Kang S Z, et al. Duration of plastic mulch for potato growth under drip irrigation in an arid region of Northwest China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150:115-121.
- [8] 王凤新,康跃虎.用负压计拟定滴灌马铃薯灌溉计划的方法研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(3):58-64.
- [9] 武朝宝,任 罡,李金玉.马铃薯需水量与灌溉制度试验研究[J].灌溉排水学报,2009,28(3):93-95.
- [10] 康跃虎,王凤新,刘士平,等.滴灌调控土壤水分对马铃薯生长的影响[J].农业工程学报,2004,20(2):66-72.
- [11] 韩占江,于振文,王 东,等.调亏灌溉对冬小麦耗水特征和水分利用效率的影响[J].应用生态学报,2009,20(11):2671-2677.
- [12] 陈玉民.中国主要农作物需水量与灌溉[M].北京:水利电力出版社,1995.
- [13] 万 信,李巧珍,方德彪,等.一种马铃薯叶面积校正系数的确定方法[J].资源科学,2012,34(8):1533-1537.
- [14] 秦舒浩,张俊莲,王 蒂,等.覆膜与沟垄种植模式对旱作马铃薯产量形成及水分运移的影响[J].应用生态学报,2011,22(2):389-394.
- [15] 范文波,吴普特,马枫梅.膜下滴灌技术生态-经济-可持续性分析—以新疆玛纳斯河流域棉花为例[J].生态学报,2012,32(23):7559-7567.
- [16] 刘建国,吕 新,王登伟,等.膜下滴灌对棉田生态环境及作物生长的影响[J].中国农学通报,2005,21(3):333-335.
- [17] 刘宏谊,马鹏里,杨兴国,等.甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2005,23(1):39-44.
- [18] Alexieva V, Sergiev I, Mapelli S, et al. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat [J]. Plant Cell Environment, 2001, 12:1337-1344.
- [19] Wang C Y, Isoda Akihiro, Li M S. Growth and eco-physiological performance of cotton under water stress conditions[J]. Agricultural Sciences in China, 2007,6(8):949-955.
- [20] Feng Xiaoli, Li Yuxiao, Gu Jianzhong, et al. Error thresholds for quasispecies on single peak Gaussian-distributed fitness landscapes [J]. Journal of Theoretical Biology, 2007, 246(1):28-32.
- [21] 刘克礼,高聚林,张宝林,等.马铃薯器官生长发育与产量形成的研究[J].中国马铃薯,2003,17(3):141-145.
- [22] 张华普,沈瑞清,郭成瑾,等.马铃薯生长后期叶片对产量的影响[J].安徽农业科学,2010,38(29):16182-16183.