

# 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响

张富仓<sup>1,2</sup> 高月<sup>1,2</sup> 焦婉如<sup>1,2</sup> 胡文慧<sup>1,2</sup>

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 通过大田滴灌施肥试验, 研究不同水肥供应对滴灌施肥马铃薯生长、产量及水肥利用效率的影响。大田试验设置3个灌水水平 W1(60%  $ET_c$ )、W2(80%  $ET_c$ )和 W3(100%  $ET_c$ )以及3个施肥水平(以氮、磷、钾施肥量计) F1(100-40-150 kg/hm<sup>2</sup>)、F2(175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>)和 F3(250-80-300 kg/hm<sup>2</sup>), 共9个处理, 分析马铃薯的生长和产量等指标对不同灌水量和不同氮、磷、钾施用量的响应规律。结果表明, 灌水量和施肥量均对马铃薯的株高、叶面积指数、干物质量、产量、水分利用效率(WUE)、肥料偏生产力(PFP)、不同块茎质量和经济效益有显著影响。马铃薯生长量、产量和肥料偏生产力均随着灌水量的增加而增加, 高水(W3)处理更有利于马铃薯的生长, 但 W3 处理水分利用效率明显低于 W1 和 W2 处理, W1 处理的平均水分利用效率比 W2 和 W3 处理高 5.83% 和 13.05%; 生长量和产量随着施肥量的增加先增大后减小, 最大产量在高水中肥(W3F2)处理获得, 为 59 394.98 kg/hm<sup>2</sup>, 且 F2 水分利用效率明显大于 F1 和 F3 处理。通过线性拟合得出在一定范围内株高、叶面积指数和干物质量对马铃薯产量的增加具有正相关性。综合分析可知, 适宜的灌水量和氮、磷、钾施用量不仅能维持马铃薯较好的生长特性, 还能获得较大的产量和经济效益。从产量和节水节肥的角度考虑, W3F2 处理(100%  $ET_c$ , 175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>)可作为基于本试验条件下较适宜的水肥组合。

**关键词:** 马铃薯; 滴灌施肥; 生长; 产量; 水分利用效率; 肥料偏生产率

中图分类号: S152.7<sup>+</sup>5; S532 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)03-0270-09

## Effects of Water and Fertilizer Supply on Growth, Water and Nutrient Use Efficiencies of Potato in Sandy Soil of Yulin Area

ZHANG Fucang<sup>1,2</sup> GAO Yue<sup>1,2</sup> JIAO Wanru<sup>1,2</sup> HU Wenhui<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Considering the low water and fertilizer use efficiencies with flood irrigation in sandy soil of Yulin, Northern Shaanxi, the effects of different water and fertilizer supplies on potato growth, yield and water and fertilizer use efficiencies were investigated through the field drip fertigation experiments. There were three water levels: W1 (60%  $ET_c$ ), W2 (80%  $ET_c$ ) and W3 (100%  $ET_c$ ), and three fertilizer levels: F1 (100-40-150 kg/hm<sup>2</sup>), F2 (175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>) and F3 (250-80-300 kg/hm<sup>2</sup>), resulting in a total of nine treatments. Based on those, key indicators (e.g., growth and yield) of potato in response to different irrigation water and N, P and K amounts were further analyzed. Results showed that different water and fertilizer amounts significantly influenced the plant height, leaf area index, dry weight, yield, water use efficiency (WUE), partial factor productivity of fertilizer (PFP), different tuber quality, yield related relations and economic benefits. The growth, yield and PFP were increased with the increase of irrigation amount, and W3 was more beneficial to growth of potato. However, the water use efficiency of W3 was significantly lower than those of W1 and W2. The average water use efficiency of W1 was 5.83% and 13.05% higher than those of W2 and W3. The impact of fertilizer on growth and yield showed an increasing and then decreasing trend, and yield reached the maximum of

收稿日期: 2016-10-18 修回日期: 2016-12-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579211)和陕西省农业领域重点产业链项目(2016KTZDNY-01-02)

作者简介: 张富仓(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

59394.98 kg/hm<sup>2</sup> at W3F2 level. The water use efficiency of F2 was significantly greater than those of F1 and F3. Linear fitting revealed a positive relationship between plant height, leaf area index, dry weight and yield of potato within a certain range. Comprehensive analysis indicated that the appropriate irrigation and N, P and K amounts can not only maintain the good growth of potato, but also can obtain great yield and economic benefits. From the point of view of obtaining high yield and saving water and fertilizer, W3F2 (100%  $ET_c$ , 175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>) can be used as an appropriate combination under the present experimental conditions.

**Key words:** potato; drip fertigation; growth; yield; water use efficiency; partial factor productivity of fertilizer

## 引言

联合国粮农组织把马铃薯列为世界第四大粮食作物,中国农业部也启动了马铃薯主粮化战略<sup>[1]</sup>。马铃薯不仅是重要的粮食作物,对于人类未来粮食危机也具有重要意义<sup>[2]</sup>。当前在马铃薯水肥管理过程中普遍存在盲目过量灌溉施肥的问题,不仅造成水资源和肥料的严重浪费,还对作物的养分吸收、产量和品质等产生了不良影响<sup>[3-4]</sup>,甚至导致土壤肥力退化和环境污染<sup>[5]</sup>。

近些年来,国内外许多学者就马铃薯作物产量和品质提高的滴灌或施肥技术进行了大量的研究,大多集中在不同种植方式<sup>[6]</sup>、不同灌溉量及灌溉方式<sup>[7-9]</sup>、施肥方式<sup>[10-11]</sup>、氮磷钾施肥水平<sup>[12]</sup>,以及滴灌施肥条件下单因素水肥耦合对马铃薯产量和养分利用效率的影响等。BADR等<sup>[13]</sup>通过马铃薯4个灌水水平和氮素水平的交互作用,确定了马铃薯适宜的水氮用量。何建勋等<sup>[14]</sup>通过马铃薯水肥耦合盆栽试验,建立了马铃薯生长量与产量的关系方程。结果表明,单因素水肥耦合对马铃薯产量和水分养分利用效率有显著的影响。但是对马铃薯水肥耦合模式下氮磷钾用量的研究不足。袁安明等<sup>[15]</sup>发现不合理的氮磷钾用量会导致地上部分薯秧徒长,地下部薯块发育不良,品质较差,增加生产成本。李勇等<sup>[16]</sup>发现合理的氮磷钾用量可以显著增加马铃薯的茎粗和分枝数,进而提高马铃薯的产量。尹梅等<sup>[17]</sup>发现在少耕覆盖模式下,合理的氮磷钾用量可以提高肥料利用效率高,增加产量效益。ABDELLAH等<sup>[18]</sup>通过观察培养基中氮磷钾用量不同的马铃薯,发现合理的氮磷钾用量可以显著提高马铃薯块茎质量。但结合滴灌和施肥技术的研究较少。

陕西榆林市地处黄土高原和毛乌素沙漠过渡地带,北部风沙滩水地区为沙壤土,是马铃薯最为理想的生长土壤,该地区是我国西北重要的马铃薯主产区,但灌溉水源不足,致使马铃薯高效节水灌溉生产水平徘徊不前,特别是在大田马铃薯生产过程中,灌

溉施肥方式仍是大水漫灌和土壤撒施肥料,水肥利用率极低。本文通过研究滴灌施肥条件下不同水肥供应对马铃薯产量及水肥利用效率的影响,探索适应该地区沙土马铃薯生长的最佳滴灌施肥方案和供水供肥模式,旨在更好地指导该地区农田马铃薯的水肥管理。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验于2015年6—10月份在西北农林科技大学榆林现代农业科技示范园区进行。供试马铃薯品种为具有生长势强、耐贮藏、抗病性强等特点的当地主栽品种紫花白。试验地区位于东经109°43′、北纬38°23′。试验站海拔高度1050 m,年平均气温8.6℃,年平均降水量371 mm。园区内试验土壤0~20 cm土层为沙质层,20~40 cm土层为淤泥层,40~60 cm土层为沙质层,60~80 cm土层为淤泥层,80~100 cm土层为沙质层。0~20 cm土壤的基本性状为:有机质质量比为5.05 g/kg,全氮质量比为0.38 g/kg,有效磷质量比为13.95 mg/kg,速效钾质量比为87 mg/kg,pH值为8.1。

### 1.2 试验设计

试验设置马铃薯滴灌水量和滴灌施肥量2个因素。灌水量设置3个水平:W1(60%  $ET_c$ )、W2(80%  $ET_c$ )和W3(100%  $ET_c$ )。示范园区内设有自动气象站,马铃薯需水量 $ET_c$ 等于参考作物需水量 $ET_0$ <sup>[19]</sup>乘以马铃薯作物系数 $K_c$ <sup>[20]</sup>,即 $ET_c = K_c ET_0$ 。(马铃薯全生育期内 $K_c$ 苗期取0.5;块茎形成期取0.8;块茎增大期取1.2;淀粉积累期取0.95;成熟期取0.75)。灌水量通过水表控制,每个小区装有独立的水表和阀门。当地传统种植方式下马铃薯氮、磷、钾施肥量为250-80-300 kg/hm<sup>2</sup>,施肥量较大且利用效率低。施肥量设置3个水平:F1(100-40-150 kg/hm<sup>2</sup>)、F2(175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>)和F3(250-80-300 kg/hm<sup>2</sup>)。肥料采用尿素(含氮质量分数为46.4%)、磷酸二铵(含氮质量分数为18%,含磷质量分数为46%)和硝酸钾(含氮质量分数为

13.5%,含钾质量分数为46%)。施肥时先将肥料溶于水,然后通过施肥罐进行滴灌施肥。试验共9个处理,每个处理重复3次,共27个小区。小区长26 m,宽1.7 m,面积44.2 m<sup>2</sup>。为了避免不同处理间的相互影响,相邻处理均间隔1 m,试验地两端设置保护行。

试验种植方式为机械起垄,垄宽0.85 m,株距20 cm,密度为58 830株/hm<sup>2</sup>,滴灌施肥系统中的管道、施肥罐(容积15 L)、水表和滴灌管(管径16 mm,滴头间距30 cm)等均为市售材料。马铃薯于2015年6月20日播种,播种深度8~10 cm,于10月2日收获。马铃薯全生育期内共灌水10次,施肥8次,灌水和施肥频率均为7 d。W1、W2和W3灌水总量分别为151.58、202.11、252.65 mm,生育期总降水量为159.4 mm,如图1所示。滴灌施肥从第2次灌水开始,每次等量施加F1(12.5-5-18.75 kg/hm<sup>2</sup>)、F2(21.875-7.5-28.125 kg/hm<sup>2</sup>)和F3(31.25-10-37.5 kg/hm<sup>2</sup>)。滴灌施肥采用肥料利用效率高的1/4-1/2-1/4模式,即前1/4时间灌清水,中间1/2时间打开施肥罐施肥,后1/4时间再灌清水冲洗,灌溉水利用系数为0.95<sup>[21]</sup>。

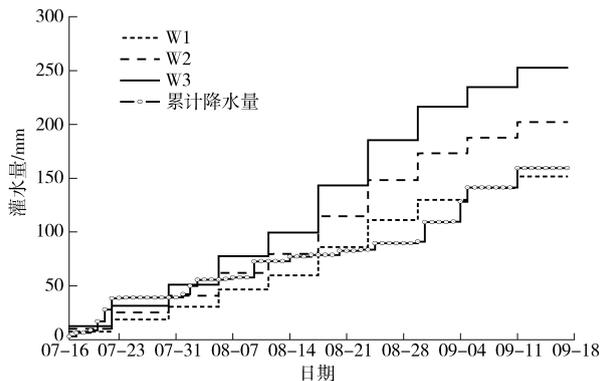


图1 全生育期内各处理累计灌水量和降水量

Fig.1 Accumulated irrigation amount and rainfall in growth period

### 1.3 测定项目与方法

#### 1.3.1 参考作物需水量确定

采用孙景生等<sup>[19]</sup>适用于风沙区参考作物需水量 $ET_0$ 的Penman-Monteith公式,即

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900u_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中  $ET_0$ ——参考作物需水量,mm/d

$R_n$ ——净辐射量,MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$G$ ——土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d)

$\Delta$ ——饱和水汽压与温度关系曲线的斜率,kPa/°C

$\gamma$ ——湿度计常数,kPa/°C

$T$ ——空气平均温度,°C

$u_2$ ——地面以上2 m 高处的风速,m/s

$e_s$ ——空气饱和水汽压,kPa

$e_a$ ——空气实际水汽压,kPa

#### 1.3.2 生长指标测定

各试验小区随机取样,分别测定马铃薯苗期、块茎形成期、块茎增大期、淀粉积累期和成熟期的株高和叶面积指数。株高用卷尺测定;叶面积用打孔法测定,叶面积指数(LAI)等于单株叶面积乘以单位土地面积总株数和单位土地面积的商。成熟期在各小区随机挖取3株完整马铃薯,测定地上部分和地下部分的干物质质量,包括叶、茎、根和块茎。在105°C条件下杀青30 min后,置于75°C条件下干燥至质量恒定,精确至0.01 g。马铃薯根系和块茎杀青前需用清水洗净,并用吸水纸吸干表面的水分。

#### 1.3.3 产量测定

各试验小区随机挖取单位面积的马铃薯称取总质量后计算产量,并称取单株马铃薯每个块茎的质量计算单株薯质量、大薯质量(单个块茎大于200 g)和商品薯质量(单个块茎大于75 g)。

水分利用效率(WUE)计算式为

$$WUE = \frac{Y}{ET} \quad (2)$$

式中  $Y$ ——作物产量,kg/hm<sup>2</sup>

$ET$ ——作物全生育期内的耗水量,mm

肥料偏生产力(PFP)计算式为

$$PFP = \frac{Y}{T} \quad (3)$$

式中  $T$ ——作物全生育期投入N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>和K<sub>2</sub>O的总量,kg/hm<sup>2</sup>

### 1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010进行数据整理,SPSS 22.0统计分析软件进行方差分析,多重比较采用Duncan法( $P < 0.05$ 为显著性水平)。运用Origin 8.0作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 水肥耦合对马铃薯株高和叶面积指数的影响

表1为水肥耦合对马铃薯株高和叶面积指数的影响,从表中可看出灌水量和施肥量对马铃薯株高和叶面积指数均有极显著影响( $P < 0.01$ )。不同水肥耦合处理条件下,马铃薯的株高随生育期的延长而增加。苗期各处理株高增加最快,且各处理之间存在显著差异,高水高肥处理(W3F3)株高明显大于其他处理,说明马铃薯苗期对水肥需求较大,增加灌溉施肥有利于植株的生长。在块茎形成期时,其

生长规律与苗期无显著差别。在块茎增大期时,高肥处理(F3)下株高增长减慢(0.61 cm/d),与中肥处理(F2)无显著性差异。在淀粉积累期和成熟期时,中肥处理(F2)下的株高明显大于高肥处理(F3),高水中肥处理(W3F2)株高达到最大值69.02 cm。马铃薯全生育内随着灌水量的增加,株高显著增加,W3处理平均株高比W2和W1高4.14%和10.09%,说明充分灌溉有助于植株株高的增长;在灌水量相同时,F2处理平均株高比F1和F3高12.21%和6.94%,说明少量施肥不利于植株株高的增长,过多施肥反而抑制植株株高的增长。

马铃薯的叶面积指数随着生育期的推进,呈现先增加后减小的趋势,在淀粉积累期叶面积指数达到最大值。叶面积指数随着灌水量的增加显著增加,在高水处理(W3)下达到最大。马铃薯叶面积指数随着施肥量的增加呈现先增大后减小的趋势。在苗期和块茎形成期时,马铃薯叶面积指数在高肥处理(F3)达到最大。在块茎增大期时,中肥(F2)与高肥处理(F3)的马铃薯叶面积指数无显著性差异。在淀粉积累期和成熟期时,马铃薯叶面积指数在中肥处理(F2)达到最大,但各处理之间无显著性差异。

表1 水肥耦合对马铃薯株高和叶面积指数的影响

Tab.1 Effects of water and fertilizer coupling on plant height and LAI of potato

生长指标	灌溉施肥处理	苗期	块茎形成期	块茎增大期	淀粉积累期	成熟期	
株高/cm	F1	W1	18.17 <sup>f</sup>	32.35 <sup>e</sup>	41.55 <sup>e</sup>	48.42 <sup>g</sup>	54.23 <sup>h</sup>
		W2	20.57 <sup>e</sup>	35.19 <sup>d</sup>	44.70 <sup>d</sup>	51.55 <sup>f</sup>	57.52 <sup>g</sup>
		W3	24.14 <sup>cd</sup>	39.77 <sup>c</sup>	47.42 <sup>c</sup>	54.47 <sup>de</sup>	60.87 <sup>c</sup>
	F2	W1	22.61 <sup>d</sup>	38.96 <sup>c</sup>	49.95 <sup>b</sup>	55.40 <sup>cd</sup>	61.39 <sup>de</sup>
		W2	24.23 <sup>cd</sup>	39.59 <sup>c</sup>	50.90 <sup>ab</sup>	59.03 <sup>b</sup>	66.23 <sup>b</sup>
		W3	26.19 <sup>b</sup>	41.35 <sup>b</sup>	52.12 <sup>a</sup>	61.75 <sup>a</sup>	69.02 <sup>a</sup>
	F3	W1	21.42 <sup>e</sup>	36.39 <sup>d</sup>	46.29 <sup>c</sup>	53.03 <sup>ef</sup>	59.08 <sup>f</sup>
		W2	25.23 <sup>bc</sup>	40.26 <sup>cd</sup>	49.43 <sup>b</sup>	56.72 <sup>c</sup>	62.57 <sup>d</sup>
		W3	28.54 <sup>a</sup>	43.92 <sup>a</sup>	52.33 <sup>a</sup>	58.48 <sup>b</sup>	64.43 <sup>c</sup>
	F	灌溉水平	134.728 <sup>**</sup>	130.896 <sup>**</sup>	78.895 <sup>**</sup>	77.248 <sup>**</sup>	137.233 <sup>**</sup>
		施肥水平	83.820 <sup>**</sup>	96.608 <sup>**</sup>	160.298 <sup>**</sup>	116.325 <sup>**</sup>	204.459 <sup>**</sup>
		灌溉×施肥	5.096 <sup>**</sup>	11.611 <sup>**</sup>	5.772 <sup>**</sup>	0.327	1.830
叶面积指数	F1	W1	0.25 <sup>f</sup>	0.61 <sup>f</sup>	2.10 <sup>c</sup>	4.45 <sup>f</sup>	3.98 <sup>c</sup>
		W2	0.29 <sup>e</sup>	0.66 <sup>e</sup>	2.21 <sup>de</sup>	4.74 <sup>ef</sup>	4.24 <sup>de</sup>
		W3	0.35 <sup>c</sup>	0.75 <sup>de</sup>	2.40 <sup>cd</sup>	5.01 <sup>de</sup>	4.48 <sup>cde</sup>
	F2	W1	0.31 <sup>d</sup>	0.73 <sup>cd</sup>	2.47 <sup>bc</sup>	5.05 <sup>ede</sup>	4.59 <sup>bed</sup>
		W2	0.34 <sup>c</sup>	0.74 <sup>bc</sup>	2.57 <sup>abc</sup>	5.45 <sup>ede</sup>	4.86 <sup>bed</sup>
		W3	0.37 <sup>b</sup>	0.78 <sup>bc</sup>	2.59 <sup>abc</sup>	5.70 <sup>bed</sup>	5.07 <sup>abcd</sup>
	F3	W1	0.31 <sup>de</sup>	0.69 <sup>bc</sup>	2.33 <sup>ab</sup>	4.85 <sup>bc</sup>	4.38 <sup>abc</sup>
		W2	0.36 <sup>bc</sup>	0.76 <sup>b</sup>	2.49 <sup>a</sup>	5.12 <sup>ab</sup>	4.65 <sup>ab</sup>
		W3	0.40 <sup>a</sup>	0.83 <sup>a</sup>	2.60 <sup>a</sup>	5.33 <sup>a</sup>	4.82 <sup>a</sup>
	F	灌溉水平	105.138 <sup>**</sup>	43.320 <sup>**</sup>	13.258 <sup>**</sup>	21.687 <sup>**</sup>	8.770 <sup>**</sup>
		施肥水平	56.119 <sup>**</sup>	30.115 <sup>**</sup>	25.303 <sup>**</sup>	30.530 <sup>**</sup>	14.352 <sup>**</sup>
		灌溉×施肥	3.101 <sup>*</sup>	2.920	1.032	0.190	0.023

注:同列数值后不同字母表示差异显著;\*表示差异显著( $P < 0.05$ ),\*\*表示差异极显著( $P < 0.01$ ),下同。

## 2.2 水肥耦合对马铃薯干物质质量的影响

水分和养分与作物干物质质量存在密切关系,图2为成熟期不同水肥组合处理下的马铃薯干物质质量。从灌水量和施肥量耦合效应看,以高水中肥处理(W3F2)干物质质量最大,平均为278.65 g/株;低水低肥处理(W1F1)干物质质量最小,平均为217.77 g/株。整体上,在同一施肥水平下,高水处理(W3)马铃薯干物质质量大于中水和低水(W2和W1)处理,W3处理平均干物质质量比W2和W1高5.20%和10.41%,说明随着灌水量的增加,马铃薯干物质质量有增加的

趋势。在同一灌水水平下,中肥处理(F2)马铃薯干物质质量大于低肥和高肥处理(F1和F3),F2处理平均干物质质量比F1和F3高12.46%和4.74%,说明过多施肥抑制了马铃薯干物质质量的积累。不同灌水水平和施肥水平对马铃薯干物质质量的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ )。

## 2.3 水肥耦合对马铃薯产量和水分利用效率的影响

由图3可以看出,高水中肥处理(W3F2)产量最大,平均为59394.98 kg/hm<sup>2</sup>,其次为中水中肥处理(W2F2),平均为57551.18 kg/hm<sup>2</sup>,低水低肥处

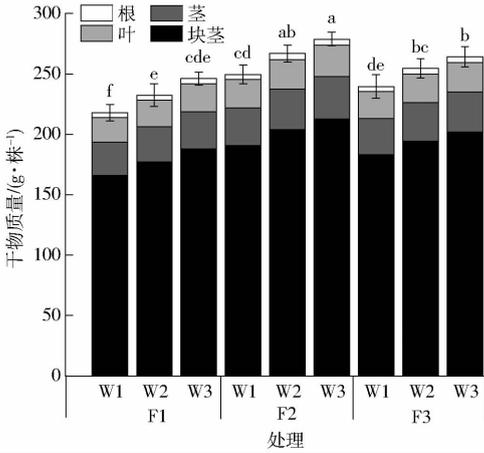
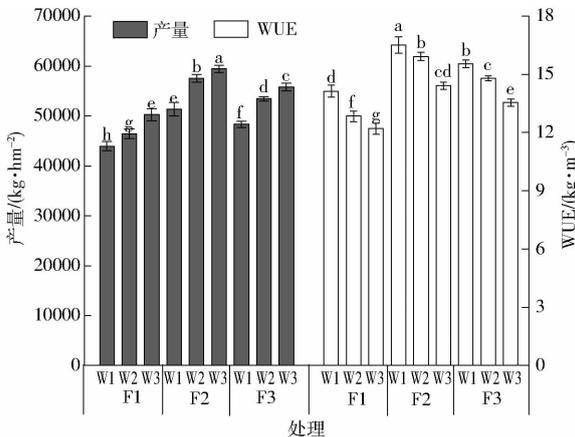


图2 水肥耦合对马铃薯干物质量的影响

Fig.2 Effects of water and fertilizer coupling on dry weight of potato

理(W1F1)产量最小,平均为43 939.05 kg/hm<sup>2</sup>。随灌水量的增加,马铃薯产量由大到小依次表现为W3、W2、W1,W3处理平均产量比W2和W1高4.98%和13.20%;随施肥量的增加,马铃薯产量由大到小依次表现为F2、F3、F1,F2处理平均产量比F3和F1高6.37%和16.37%。经方差分析可知,灌溉水平和施肥水平对马铃薯产量有极显著性影响( $P < 0.01$ ),灌溉施肥交互作用对马铃薯产量有显著性影响( $P < 0.05$ )。总体上可以看出,水分利用效率最大值出现在W1处理,而水分利用效率最小值出现在W3处理,说明随灌水量的增加,水分利用效率由大到小依次表现为W1、W2、W3,呈下降的趋势,低水处理的水分利用效率更高,W1处理的平均水分利用效率比W2和W3处理高5.83%和13.05%。各处理中,W1F2处理水分利用效率最高,平均达到16.51 kg/m<sup>3</sup>,W3F1处理的水分利用效率最低,平均仅为12.20 kg/m<sup>3</sup>,各处理之间的水分利用效率差异显著( $P < 0.05$ )。

图3 水肥耦合对马铃薯产量和水分利用效率的影响  
Fig.3 Effects of water and fertilizer coupling on yield and WUE of potato

## 2.4 水肥耦合对马铃薯肥料偏生产力的影响

肥料偏生产力(PFP)是反映土壤基础养分水平和化肥施用量综合效应的指标。由图4可知,高水低肥处理(W3F1)PFP最大,平均为173.39 kg/kg,低水高肥处理(W1F3)PFP最小,平均为76.67 kg/kg。当灌水量相同时,马铃薯PFP由大到小依次表现为F1、F2、F3;当施肥量相同时,马铃薯PFP由大到小依次表现为W3、W2、W1,各处理之间PFP差异显著( $P < 0.05$ )。

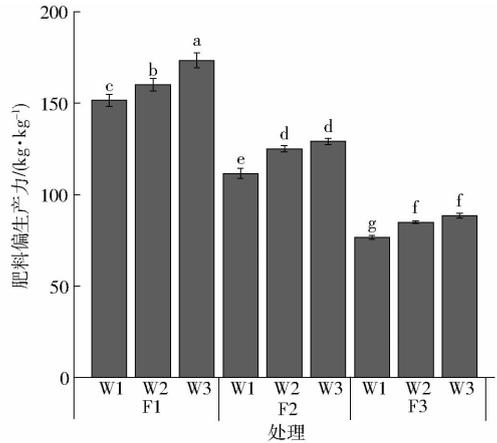


图4 水肥耦合对马铃薯肥料偏生产力的影响

Fig.4 Effects of water and fertilizer coupling on fertilizer partial productivity of potato

## 2.5 水肥耦合对马铃薯不同级别块茎质量的影响

不同水肥组合马铃薯单株块茎、大块茎和商品薯质量的多因素方差分析结果如表2所示,结果表明高水中肥处理(W3F3)的单株块茎质量、大块茎质量和商品薯质量达到最大值,平均为1 009.71、760.66、899.51 g/株。在同一施肥水平下,随着灌水量的增加,马铃薯块茎有增大的趋势。W3处理平均单株块茎质量比W2和W1高4.98%和13.19%,W3处理平均大块茎质量比W2和W1高10.30%和18.82%,W3处理平均商品薯质量比W2和W1高6.13%和12.45%,说明马铃薯块茎对水分的需求量较大。在同一灌水水平下,F2处理平均单株块茎质量比F1和F3高16.37%和6.37%,F2处理平均大块茎质量比F1和F3高43.97%和11.77%,F2处理平均商品薯质量比F1和F3高22.72%和6.93%,说明过量施肥不利于马铃薯块茎对养分的吸收。

通过多因素方差分析可以看出,滴灌灌溉水平与施肥水平对马铃薯单株块茎、大块茎和商品薯质量的影响均达到极显著水平( $P < 0.01$ );水肥交互作用对大块茎质量也呈现极显著影响( $P < 0.01$ ),对单株块茎和商品薯质量有显著影响( $P < 0.05$ )。说明适宜的灌溉施肥量能促进马铃薯块茎的生长,

提高大块茎率和商品率,对实现农民增收有着至关重要的作用。

表 2 水肥耦合对马铃薯不同级别块茎质量的影响

Tab.2 Effects of water and fertilizer coupling on

tuber weight of potato g/株

灌溉施肥处理	单株块茎	大块茎	商品薯	
F1	W1	746.96 ± 15.82 <sup>h</sup>	349.80 ± 7.41 <sup>i</sup>	607.76 ± 12.88 <sup>h</sup>
	W2	789.21 ± 16.78 <sup>e</sup>	382.36 ± 8.13 <sup>h</sup>	648.32 ± 13.79 <sup>e</sup>
	W3	854.80 ± 20.60 <sup>c</sup>	439.06 ± 10.58 <sup>e</sup>	701.31 ± 16.90 <sup>f</sup>
F2	W1	872.99 ± 22.74 <sup>c</sup>	610.90 ± 15.92 <sup>d</sup>	772.50 ± 20.13 <sup>d</sup>
	W2	978.37 ± 13.68 <sup>b</sup>	720.09 ± 10.07 <sup>b</sup>	862.04 ± 12.05 <sup>b</sup>
	W3	1009.71 ± 12.95 <sup>a</sup>	760.66 ± 9.75 <sup>a</sup>	899.51 ± 11.54 <sup>a</sup>
F3	W1	821.09 ± 10.58 <sup>f</sup>	567.72 ± 7.31 <sup>f</sup>	746.61 ± 9.62 <sup>c</sup>
	W2	908.89 ± 7.40 <sup>d</sup>	593.55 ± 4.83 <sup>c</sup>	776.43 ± 6.32 <sup>d</sup>
	W3	948.50 ± 13.46 <sup>c</sup>	679.50 ± 9.64 <sup>c</sup>	831.92 ± 11.81 <sup>c</sup>
灌溉水平	140.097 <sup>**</sup>	307.674 <sup>**</sup>	125.916 <sup>**</sup>	
F 施肥水平	222.249 <sup>**</sup>	2262.795 <sup>**</sup>	468.609 <sup>**</sup>	
灌溉 × 施肥	3.162 <sup>*</sup>	18.032 <sup>**</sup>	4.293 <sup>*</sup>	

2.6 水肥耦合条件下马铃薯产量的相关关系

马铃薯成熟期各水肥处理下产量与株高、叶面积指数和干物质累积量的相关关系见图 5。马铃薯产量与株高、叶面积指数、干物质累积量具有显著正相关关系 ( $R^2$  分别为 0.9225、0.7174 和 0.8720),说明在当前的播种密度下,株高从 52 cm 开始到 71 cm,株高每增加 1 cm 大约可以增加 1 104 kg/hm<sup>2</sup>

的马铃薯产量;叶面积指数从 3.7 开始到 5.5,叶面积指数每增加 1 大约可以增加 11 228 kg/hm<sup>2</sup> 的马铃薯产量;单株干物质累积量从 210 g 开始到 290 g,干物质累积量每增加 1 g 大约可以增加 244 kg/hm<sup>2</sup> 的马铃薯产量。线性拟合效果表现为株高 ( $R^2 = 0.9454$ ) 优于叶面积指数 ( $R^2 = 0.7174$ ) 和干物质累积量 ( $R^2 = 0.8720$ )。由以上可知,在一定范围内通过合理调控马铃薯适宜的株高、叶面积指数以及干物质累积量很有可能会获得较理想的马铃薯产量。

2.7 水肥耦合对马铃薯经济效益的影响

表 3 为不同水肥组合条件下马铃薯的经济收益。滴灌管、水表和管道等滴灌设施费每公顷共计 1 200 元;全生育期人工费每公顷共计 3 000 元。马铃薯按照市场价格 1.0 元/kg 计算,得到其经济效益。经济效益与总投入的差值为纯收益,经济效益与总投入的比值为产投比。各水肥处理下,高水中肥处理(W3F3)的经济效益最大,为 59 395 元/hm<sup>2</sup>,低水低肥处理(W1F1)的经济效益最小,为 43 939 元/hm<sup>2</sup>。相同灌水水平下,W3 处理平均纯收益比 W2 和 W1 高 8.62% 和 22.67%;相同施肥水平下,F2 处理平均纯收益比 F1 和 F3 高 27.56% 和 10.65%。且各处理之间纯收益和产投比具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。说明合理的水肥组合可以提高马铃薯的经济效益,对于促进农民的增收具有重要意义。

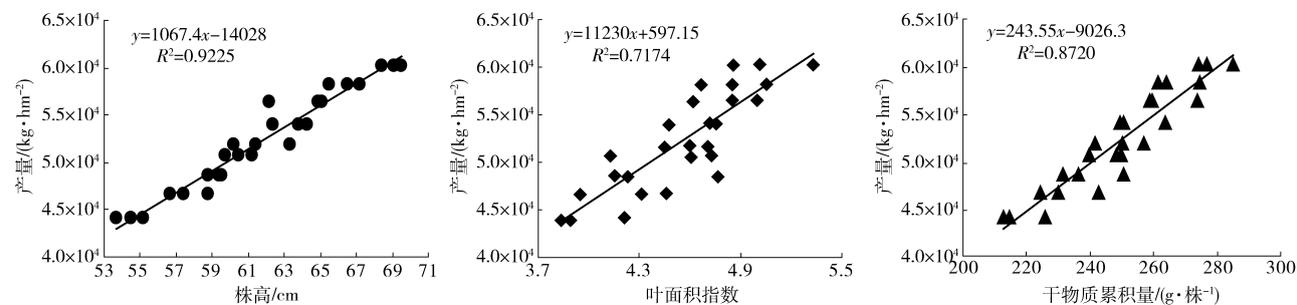


图 5 马铃薯产量与株高、叶面积指数、干物质累积量的相关关系

Fig.5 Relationships between potato yield and plant height, LAI and dry weight

表 3 水肥耦合对马铃薯经济收益影响

Tab.3 Effects of water and fertilizer coupling on income of potato

灌溉施肥处理	农资/ (元·hm <sup>-2</sup> )	设施费/ (元·hm <sup>-2</sup> )	人工费/ (元·hm <sup>-2</sup> )	总投入/ (元·hm <sup>-2</sup> )	产出/ (kg·hm <sup>-2</sup> )	经济效益/ (元·hm <sup>-2</sup> )	纯收益/ (元·hm <sup>-2</sup> )	产投比
F1	W1	5 550	12 000	3 000	20 550	43 939 <sup>h</sup>	23 384 <sup>f</sup>	2.14 <sup>e</sup>
	W2	5 550	12 000	3 000	20 550	46 424 <sup>e</sup>	25 869 <sup>e</sup>	2.26 <sup>d</sup>
	W3	5 550	12 000	3 000	20 550	50 282 <sup>c</sup>	29 727 <sup>cd</sup>	2.45 <sup>c</sup>
F2	W1	7 620	12 000	3 000	22 620	51 352 <sup>c</sup>	28 651 <sup>d</sup>	2.27 <sup>d</sup>
	W2	7 620	12 000	3 000	22 620	57 551 <sup>b</sup>	35 131 <sup>b</sup>	2.55 <sup>b</sup>
	W3	7 620	12 000	3 000	22 620	59 395 <sup>a</sup>	36 770 <sup>a</sup>	2.63 <sup>a</sup>
F3	W1	9 720	12 000	3 000	24 720	48 299 <sup>f</sup>	23 574 <sup>f</sup>	1.95 <sup>f</sup>
	W2	9 720	12 000	3 000	24 720	53 464 <sup>d</sup>	28 748 <sup>d</sup>	2.16 <sup>e</sup>
	W3	9 720	12 000	3 000	24 720	55 794 <sup>c</sup>	31 230 <sup>c</sup>	2.26 <sup>d</sup>

### 3 讨论

水和肥是农业生产中影响马铃薯生长的2个重要因素<sup>[22]</sup>,协调灌水量和氮磷钾的用量使其关系达到最优时,可实现马铃薯高产增收的目标。本文通过田间试验,采用滴灌施肥条件下的水肥耦合效应模式,研究了不同灌水量和氮磷钾用量下马铃薯生长、产量、水分利用效率和经济效益的变化情况。结果表明,不同灌水量和氮磷钾用量对马铃薯株高、叶面积指数、干物质质量、产量、水分利用效率、肥料偏生产力、不同级别块茎质量和经济效益均有不同程度的影响。本试验中,不同灌水量对马铃薯生长、产量、肥料偏生产力和不同块茎质量均有显著性影响,均随灌水量的增加而增加,由大到小依次表现为W3、W2、W1,这与前人的研究结果一致<sup>[23-24]</sup>。江俊燕等<sup>[23]</sup>研究表明,在同一灌水周期处理下,马铃薯株高的变化趋势是灌水量越大,植株越高;灌水量越大,产量越高。宋娜等<sup>[24]</sup>研究表明,土壤湿润比越大,单株块茎质量、大块茎质量和商品薯质量越大。而对于氮磷钾的用量,马铃薯生长、产量、肥料偏生产力和不同块茎质量呈现先增大后降低的趋势,在F2(175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>)处理时达到最大值,与马铃薯最佳推荐施肥量一致<sup>[25]</sup>,表明施肥过高反而对马铃薯的生长有一定的抑制作用<sup>[26]</sup>。戴树荣<sup>[25]</sup>通过建立二次肥料效应函数发现,马铃薯最佳施肥效益的推荐平均施肥量为N 219.09 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 56.77 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 267.08 kg/hm<sup>2</sup>。YANG等<sup>[26]</sup>研究表明,过量施肥对马铃薯生长和产量表现出一定的负效应。

针对水肥供应对马铃薯水分利用效率的研究较多,何华等<sup>[27]</sup>研究表明,水与氮配合下的水分利用效率,中水中肥与低水低肥有较好的效应值,高水低肥或高肥低水配合会大幅度降低WUE。王立为等<sup>[28]</sup>研究表明,在多雨年,中肥处理既能保证较高的水分利用效率,也能保证较高产量;少雨年采取低肥处理,正常年采取中低肥处理较适宜。本试验研究表明,在同一灌水水平下,水分利用效率随施肥水平的增加呈抛物线状,F1处理处于抛物线上升阶

段,F2处理的水分利用效率最大,F3处理处于抛物线下降阶段,可能是由于根区养分浓度较高,不利于作物根部吸收水分。在同一施肥水平下,水分利用效率由大到小依次表现为W1、W2、W3。因此马铃薯F2和F1处理、W1和W2处理有较好的水分利用效率,与前人研究结果一致<sup>[27-28]</sup>。

通过对马铃薯产量与株高、叶面积指数和干物质质量的线性拟合,表明合理调控马铃薯适宜的株高、叶面积指数以及干物质累积量可以提高马铃薯的产量。李勇等<sup>[29]</sup>研究表明,株高和叶面积对产量的直接通径系数为负值,这说明如果植株过高和叶面积过大,反而会降低产量。因此,产量与株高、叶面积指数和干物质累积量的线性关系存在一定的范围。经济效益是科学水肥管理模式的最终目标,李书田等<sup>[30]</sup>研究表明,不合理的施肥会降低马铃薯的经济效益,减小产投比。本试验中,F2处理的经济效益最大,可能是因为F3处理的肥料施用量增加,但养分利用率不高,造成经济效益减少,该结果与前人研究结果一致<sup>[30]</sup>。综合各水肥处理下的马铃薯产量、水分利用效率和经济效益,高水中肥(W3F2)不仅能维持马铃薯较好的生长特性,提高作物的产量和经济效益,并且能保证马铃薯的水分利用效率。

### 4 结束语

不同的水肥组合对滴灌条件下大田马铃薯有显著性影响,其产量随着灌水量的增加而增加,随着施肥量的增加先增大后减小,且最大产量在高水(W3)处理和中肥(F2)处理获得,但W3水分利用效率明显低于W1和W2处理,F2水分利用效率明显大于F1和F3处理。株高、叶面积指数和干物质质量对马铃薯产量的增加具有重要作用,且高水中肥(W3F2)处理更有利于马铃薯的生长。因此,适宜的灌水量和氮磷钾施用量不仅能维持马铃薯较好的生长特性,而且能获得较大的产量和经济效益。在产量和节水节肥条件下,W3F2处理(100%ET<sub>c</sub>, 175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>)可作为本试验条件下较合理的水肥组合。

### 参 考 文 献

- 1 陈萌山,王小虎. 中国马铃薯主食产业化发展与展望[J]. 农业经济问题,2015(12):4-11.
- 2 王静怡,陈钰颖,刘合光. 我国马铃薯供求的影响因素及未来趋势分析[J]. 广东农业科学,2015(24):189-193.  
WANG Jingyi, CHEN Yuying, LIU Huguang. Analysis on the influencing factors and future trend of potato supply and demand in China [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2015(24):189-193. (in Chinese)
- 3 张翔宇,李荫藩,李霄峰,等. 不同施肥量对马铃薯生育及产量的影响[J]. 华北农学报,2005,20(增刊):142-143.  
ZHANG Xiangyu, LI Yinpan, LI Xiaofeng, et al. Effects on growing and yield of potatoes by different quantity of fertilizer application [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2005, 20(Supp.):142-143. (in Chinese)

- 4 高虹,宋喜娥,姚满生,等. 不同施肥量对马铃薯产量的影响[J]. 山西农业大学学报,2015,35(1):416-420.  
GAO Hong, SONG Xi'e, YAO Mansheng, et al. Effects of different fertilizer application on potato yield [J]. Journal of Shanxi Agricultural University, 2015, 35(1):416-420. (in Chinese)
- 5 张西露,汤小明,刘明月,等. NPK对马铃薯生长发育、产量和品质的影响及营养动态[J]. 安徽农业科学,2010,38(18):9466-9469.  
ZHANG Xilu, TANG Xiaoming, LIU Mingyue, et al. Effects of NPK on the growth, yield and quality of potato and their nutrient dynamics[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(18):9466-9469. (in Chinese)
- 6 秦军红,陈有君,周长艳,等. 膜下滴灌灌溉频率对马铃薯生长、产量及水分利用率的影响[J]. 中国生态农业学报,2013,21(7):824-830.  
QIN Junhong, CHEN Youjun, ZHOU Changyan, et al. Effects of frequency of drip irrigation frequency under mulch on potato growth, yield and water use efficiency [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(7):824-830. (in Chinese)
- 7 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/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):143-151. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=20131023&flag=1](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20131023&flag=1). DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.023.  
ZHANG Hengjia, LI Jing. Photosynthetic physiological characteristics and water use of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10):143-151. (in Chinese)
- 8 黄仲冬,齐学斌,樊向阳,等. 根区交替地下滴灌对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(1):79-83.  
HUANG Zhongdong, QI Xuebin, FAN Xiangyang, et al. Effects of alternate partial root-zone subsurface drip irrigation on potato yield and water use efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(1):79-83. (in Chinese)
- 9 SEYED H A, MATHIAS N, ANDERSEN F P, et al. Effects of irrigation strategies and soils on field-grown potatoes: gas exchange and xylem [J]. Agricultural Water Management, 2010, 97:1468-1494.
- 10 张绪成,于显枫,王红丽,等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. 中国农业科学,2016,49(5):852-864.  
ZHANG Xucheng, YU Xianfeng, WANG Hongli, et al. Application and organic manure substitution on potato water-fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system semi-arid area [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(5):852-864. (in Chinese)
- 11 于显枫,张绪成,王红丽,等. 施肥对旱地全膜覆盖垄沟种植马铃薯耗水特征及产量的影响[J]. 应用生态学报,2016,27(3):883-890.  
YU Xianfeng, ZHANG Xucheng, WANG Hongli, et al. Effects of fertilizer application on water consumption characteristics and yield of potato cultured under ridge-furrow and whole filed plastic mulching in rain-fed area [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3):883-890. (in Chinese)
- 12 张小静,陈富,袁安明,等. 氮磷钾施肥水平对西北干旱区马铃薯生长及产量的影响[J]. 中国马铃薯,2013,27(4):222-225.  
ZHANG Xiaojing, CHEN Fu, YUAN Anming, et al. NPK fertilization rate on growth and yield of potato in northwest arid area [J]. Chinese Potato Journal, 2013, 27(4):222-225. (in Chinese)
- 13 BADR M A, TOHAMY W A, ZAGHLOUL A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region [J]. Agricultural Water Management, 2013, 110:9-15.
- 14 何建勋,王永哲,邱小琼,等. 水肥耦合条件下马铃薯生长量对产量的影响[J]. 湖北农业科学,2016,55(7):1646-1652.  
HE Jianxun, WANG Yongzhe, QIU Xiaozong, et al. Effects of potato growth on the output under water and fertilizer coupling [J]. Hubei Province Agricultural Science, 2016, 55(7):1646-1652. (in Chinese)
- 15 袁安明,张小静. 氮磷钾配比对马铃薯脱毒微型薯生长和产量的影响[J]. 中国马铃薯,2012,26(4):225-227.  
YUAN Anming, ZHANG Xiaojing. Effects of various NPK combinations on plant growth and minituber yield [J]. Chinese Potato Journal, 2012, 26(4):225-227. (in Chinese)
- 16 李勇,吕典秋,胡林双,等. 不同氮磷钾比对马铃薯农艺性状、产量和干物质含量的影响[J]. 中国马铃薯,2013,27(3):148-152.  
LI Yong, LÜ Dianqiu, HU Linsuang, et al. Influence of various NPK combinations on agronomic trait, yield and dry matter content in potato [J]. Chinese Potato Journal, 2013, 27(3):148-152. (in Chinese)
- 17 尹梅,刘自成,任齐燕,等. 少耕覆盖与不同氮磷钾比对马铃薯产量效益和养分利用的影响[J]. 西南农业学报,2016,29(3):595-598.  
YIN Mei, LIU Zicheng, REN Qiyan, et al. Effects of various NPK combinations on yield, economic benefit and nutrition of potato with mulching and reduced tillage [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(3):595-598. (in Chinese)
- 18 ABDELLAH R, FLORIAN I L. Effect of NPK media concentrations on in vitro potato tuberization of cultivars Nicola and russet Burbank [J]. Short Communication, 2015, 92:294-297.
- 19 孙景生,刘祖贵,张寄阳,等. 风沙区参考作物需水量的计算[J],灌溉排水,2002,21(2):17-20.  
SUN Jingsheng, LIU Zugui, ZHANG Jiyang, et al. Reference crop evapotranspiration calculation in windy desert area in Inner

- Mongolia [J]. *Irrigation and Drainage*, 2002, 21(2):17-20. (in Chinese)
- 20 CHEN Qiufan, DAI Xingmei, CHEN Jinsong, et al. Difference between responses of potato plant height to corrected FAO-56-recommended crop coefficient and measured crop coefficient [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(3): 551-554.
- 21 栗岩峰,李久生,饶敏杰. 滴灌系统运行方式施肥频率对番茄产量与根系分布的影响[J]. *中国农业科学*,2006,39(7): 1419-1427.
- LI Yanfeng, LI Jiusheng, RAO Minjie. Effects of drip irrigation strategies and frequencies on yield and root distribution of tomato [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(7):1419-1427. (in Chinese)
- 22 HALITLIGIL M B, ONARAN H, MUNSUZ N, et al. Drip irrigation and fertigation of potato under light-textured soils of cappadocia region [J]. *Environmental Protection Against Radioactive Pollution*, 2003, 33:219-224.
- 23 江俊燕,汪有科. 不同灌水量和灌水周期对滴灌马铃薯生长及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*,2008,26(2):121-125.
- JIANG Junyan, WANG Youke. Effect of different treatment of drip irrigation on growth of potato [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2):121-125. (in Chinese)
- 24 宋娜,王凤新,杨晨飞,等. 水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J]. *农业工程学报*,2013,29(13): 98-105.
- SONG Na, WANG Fengxin, YANG Chenfei, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch [J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(13): 98-105. (in Chinese)
- 25 戴树荣. 应用“3414”试验设计建立二次肥料效应函数寻求马铃薯氮磷钾适宜施肥量的研究[J]. *中国农学通报*,2010, 26(12):154-159.
- DAI Shurong. NPK reasonable application rate on potato by establishing fertilizer effect model of second degree polynomial using “3414” experimental design[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(12):154-159. (in Chinese)
- 26 YANG Kaijing, WANG Fengxin, CLINTON C S, et al. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 11:4448-4459.
- 27 何华,陈国良,赵世伟. 水肥配合对马铃薯水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*,1999,17(2):59-66.
- HE Hua, CHEN Guoliang, ZHAO Shiwei. Effect of different water and fertilizer conditions on water use efficiency of potato [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 1999, 17(2):59-66. (in Chinese)
- 28 王立为,潘志华,高西宁,等. 不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*,2012,17(2):54-58.
- WANG Liwei, PAN Zhihua, GAO Xining, et al. Influence of different fertility levels water use efficiency of the potato in the dry land [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2):54-58. (in Chinese)
- 29 李勇,吕典秋,胡林双,等. 不同氮磷钾配比对马铃薯原原种的产量、干物质含量和经济系数的影响[J]. *中国马铃薯*, 2013,27(5):288-292.
- LI Yong, LÜ Dianqiu, HU Linshuang, et al. Impact of different NPK combinations on pre-elite potato yield, dry matter content and economic coefficient [J]. *Chinese Potato Journal*, 2013, 27(5):288-292. (in Chinese)
- 30 李书田,段玉,陈占全,等. 西北地区马铃薯施肥效应和经济效益分析[J]. *中国土壤与肥料*,2014(4):42-46.
- LI Shutian, DUAN Yu, CHEN Zhanquan, et al. Yield response and economic benefit of fertilizer application on potato in Northwest China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(4):42-46. (in Chinese)