

# 灌水频率和施肥量对滴灌马铃薯生长、产量和养分吸收的影响

侯翔皓, 张富仓\*, 胡文慧, 王海东, 范军亮, 李志军

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室/西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 【目的】针对陕北榆林风沙土马铃薯灌水施肥不合理及水肥利用效率低的问题, 通过研究滴灌施肥条件下不同的灌水频率和施肥量对马铃薯生长、产量及养分吸收利用的影响, 以期科学地对马铃薯进行水肥调控, 为实际生产提供参考依据。【方法】试验于 2016 年 5—10 月在陕西省榆林市农业科技示范园区内进行, 试验设置了 3 个灌水频率 D1 (4 d)、D2 (8 d)、D3 (10 d) 和 3 个施肥量 (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O) 水平, 即 F1 (100、40、150 kg/hm<sup>2</sup>)、F2 (150、60、225 kg/hm<sup>2</sup>)、F3 (200、80、300 kg/hm<sup>2</sup>) 组合, 共 9 个处理。在生育期对马铃薯生长指标进行观测, 收获时统计产量及产量构成因素。【结果】1) 同一灌水频率下, F3 处理的株高、茎粗、叶面积和产量显著高于 F1 和 F2 处理, 肥料偏生产力在 F1 处理下最高, 而水分利用效率受施肥量的影响不显著, 养分利用效率随着施肥量的增加而减小。F3 处理的产量达 41518 kg/hm<sup>2</sup>, 比 F1 和 F2 处理分别提高 11.75% 和 8.52%, F1 处理下肥料偏生产力为 128.12 kg/kg, 比 F2 和 F3 处理的高出 45.67% 和 78.99%。2) 在同一施肥量下, 马铃薯的生长指标、产量和肥料偏生产力均在 D2 处理达到最大值, D2 处理下的产量和肥料偏生产力分别为 42932 kg/hm<sup>2</sup> 和 105.88 kg/kg, 而 D1 处理下水肥利用效率最高, 但 D1 和 D2 之间水分利用效率差异不显著。从水肥交互作用来看, D2F3 的产量和水分利用效率最高, 分别为 44870 kg/hm<sup>2</sup>, 107.39 kg/(mm·hm<sup>2</sup>), D2F1 的肥料偏生产力最高, 为 142.02 kg/kg。【结论】合理的灌水频率与施肥量不仅能维持马铃薯较好的生长特性, 而且能获得较大的经济效益。综合产量与节水节肥因素, D2F3 处理 (8 d, N 200 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 80 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 300 kg/hm<sup>2</sup>) 可作为基于本试验条件下较适宜的灌水施肥组合。

**关键词:** 灌水频率; 施肥量; 马铃薯; 生长; 产量; 养分吸收

## Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on growth, tuber yield and nutrient uptake of drip-irrigated potato

HOU Xiang-hao, ZHANG Fu-cang\*, HU Wen-hui, WANG Hai-dong, FAN Jun-liang, LI Zhi-jun  
(Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education,  
Northwest A & F University/Institute of Water-saving Agriculture in Arid Areas of China,  
Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** 【Objectives】In view of inappropriate irrigation and fertilization as well as low water and fertilizer use efficiency in potato planted in sand soil in Yulin area of northern Shaanxi province, field experiment was conducted to examine the effects of irrigation frequency and fertilizer rate on growth, yield and nutrient use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) under fertigation in order to scientifically regulate water and fertilizer use and provide scientific reference for potato production. 【Methods】Field experiment was carried out in Agricultural Science and Technology Demonstration Areas of Yulin city, Shaanxi province from May to October in 2016. There were total of 9 treatments combining three irrigation frequency levels, i.e. D1 (4 d), D2 (8 d) and D3 (10 d), and three fertilization levels based on different ratios of N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, i.e. F1 (100, 40, 150 kg/hm<sup>2</sup>), F2 (150, 60, 225 kg/hm<sup>2</sup>) and F3 (200, 80, 300 kg/hm<sup>2</sup>). Growth indices were measured during the growing season,

收稿日期: 2018-01-09 接受日期: 2018-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51579211); 陕西省农业领域重点产业创新链项目 (2016KTZDNY-01-02) 资助。

联系方式: 侯翔皓 E-mail: 741757646@qq.com; \* 通信作者 张富仓 E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

tuber yield and its components were measured at harvest. **【 Results 】** At the same irrigation frequency, there was a positive correlation between growing indices and the fertilizer rates, and the tuber yield increased with increase of fertilizer rates, but the partial fertilizer productivity (PFP) and the nutrient use efficiency decreased. There was no significant correlation between water use efficiency (WUE) and fertilizer rate, and the average tuber yield of F3 was 41518 kg/hm<sup>2</sup>, 11.75% and 8.52% higher than F1 and F2. The PFP of F1 was 128.12 kg/kg, 45.67% and 78.99% higher than F2 and F3. At the same fertilizer rate, there was a quadratic correlation between yield, PFP and irrigation frequency. D2 had the greatest tuber yield of 42932 kg/hm<sup>2</sup> and highest PFP of 105.88 kg/kg, and D1 resulted in the highest WUE and nutrient use efficiency, but had no difference with D2. As for interaction between irrigation frequency and fertilizer rate, the highest tuber yield and WUE were attributed to D2F3 with 44870 kg/hm<sup>2</sup> tuber yield and 107.39 kg/(mm·hm<sup>2</sup>), respectively. D2F1 had the highest PFP of 142.02 kg/kg. **【 Conclusions 】** Reasonable irrigation frequency and fertilizer rate not only sustained good growth characteristics of potato, but also resulted in the maximum economic benefit. In comprehensive consideration of yield, water and fertilizer saving, the treatment of D2F3(8 d, N 200 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 80 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 300 kg/hm<sup>2</sup>) was appropriate water and fertilizer combination under the experimental conditions.

**Key words:** irrigation frequency; fertilizer rate; potato; growth; yield; nutrient uptake

马铃薯是世界上继水稻、小麦、玉米之后的第四大粮食作物，也是中国的第四大粮食作物。农业部数据显示，2014年，我国马铃薯种植面积达557万公顷，鲜薯产量9500多万吨，种植面积和产量均占世界的四分之一左右。但是中国的马铃薯单产远不及荷兰、英国、美国等欧美发达国家的生产水平，品质也不高<sup>[1]</sup>。陕西省是我国马铃薯的主产区之一，特别是陕北榆林地区土光热资源丰富，昼夜温差大，年降水量400~600 mm，拥有极其深厚、适宜种植的沙质黄土，是陕西省马铃薯的优势生产区。干旱缺水及水肥利用效率低是制约榆林马铃薯等作物高效生产的主要障碍。此外，陕北榆林马铃薯存在栽培管理粗放、灌溉与施肥技术落后、大水漫灌、肥料资源浪费、产业发展滞后等诸多问题，严重制约着马铃薯产业的健康发展。据当地调查，同样亩产3 t马铃薯的条件下，大水漫灌需水400 m<sup>3</sup>，移动式喷灌需水270 m<sup>3</sup>，滴灌仅需水135 m<sup>3</sup>，利用滴灌水肥一体化技术，肥料的施用量可减少42%，节水节肥效果显著。因此，研究马铃薯高效灌溉施肥技术，对实现该地区马铃薯节水节肥高效生产和保护土壤生态环境等具有重要理论与实际意义。

近些年来，国内外许多学者就马铃薯灌溉施肥技术对马铃薯生长、产量和水肥利用效率的影响进行了大量研究<sup>[2-9]</sup>。康跃虎等<sup>[2]</sup>和王凤新等<sup>[3-4]</sup>最早研究了滴灌调控土壤水分对马铃薯耗水规律和生长的影响；江俊燕等<sup>[5]</sup>研究了灌水量和灌水频率对滴灌马铃薯生长的影响，在灌水量相同的条件下，滴灌马铃薯的生长和产量随着灌水频率的增加而增加；Wang等<sup>[6]</sup>

研究了滴灌频率和根区土壤基质势对马铃薯产量的影响，表明随着灌水频率的增加，块茎产量有增加的趋势，但差异不显著；Badr等<sup>[7]</sup>通过研究发现，在充足的灌水量条件下，马铃薯的产量随着施氮量的增加而增加，但在水分亏缺的条件下，施氮量的增加则对产量产生消极影响；宋娜等<sup>[8]</sup>研究了水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响，结果表明，70%的土壤湿润比水平和N 180 kg/hm<sup>2</sup>施氮量，是西北旱区滴灌马铃薯生产中节水节肥的水氮组合；张富仓等<sup>[9]</sup>研究了水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响，从产量和节水节肥的角度考虑，100%ETc，N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 175-60-225 kg/hm<sup>2</sup>是适宜的水肥组合。较多的学者研究表明，马铃薯的产量会随着施肥量的增加先增加后减小<sup>[10-12]</sup>，氮肥是影响马铃薯产量和品质的最主要的营养元素<sup>[13-14]</sup>。氮、磷、钾的施用对马铃薯干物质的积累和块茎的形成有着促进作用，其中钾肥对块茎的促进作用最为明显<sup>[15-16]</sup>；增加施氮量可以延迟马铃薯的生育进程，通过追肥可以增加马铃薯块茎增长期各个器官中的干物质积累量<sup>[17]</sup>。

在针对马铃薯水肥管理展开的众多研究中，多以灌水量和施肥量作为单一因子来评价不同灌水量及施肥量对马铃薯生产的影响，而有关水肥一体化条件下的研究报道较少。本文针对陕北榆林风沙地区的特定气候和土壤环境条件，以当地主栽马铃薯品种‘紫花白’为研究对象，研究在滴灌施肥条件下，不同灌水频率和施肥量对马铃薯生长、产量和水肥利用效率的影响，以期对滴灌马铃薯水肥进行

科学的调控, 为当地马铃薯高产优质生产提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于陕西省榆林市榆阳区牛家梁镇农业科技示范园区。榆林市地处陕西最北部, 东经  $107^{\circ}28' \sim 111^{\circ}15'$ , 北纬  $36^{\circ}57' \sim 39^{\circ}35'$ , 属于温带半干旱大陆性气候, 昼夜温差大, 年平均气温为  $10^{\circ}\text{C}$ , 年降水量为  $400\text{ mm}$ , 降雨主要集中在 6、7、8 三个月份, 无霜期约为  $150\text{ d}$ , 气候适宜马铃薯的生长。试验地土壤为风沙土, 质地为砂壤土。耕层 (0—40 cm) 土壤容重为  $1.72\text{ g/cm}^3$ 、田间持水量为  $9.21\%$ 、有机质含量为  $4.31\text{ g/kg}$ 、全氮含量为  $0.30\text{ g/kg}$ 、有效磷为  $10.80\text{ mg/kg}$ 、速效钾为  $60.0\text{ mg/kg}$ 、土壤 pH 值为  $8.10$ 。

### 1.2 试验设计

试验以脱毒马铃薯种薯‘紫花白’为试验材料, 在大田滴灌条件下, 设置了 3 个灌水频率 D1 (4 d 一灌)、D2 (8 d 一灌)、D3 (10 d 一灌)。依据当地的施肥经验以及前人的试验结果<sup>[9]</sup>, 设置 3 个施肥量 (N、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ ) 水平: F1 ( $100$ 、 $40$ 、 $150\text{ kg/hm}^2$ ), F2 ( $150$ 、 $60$ 、 $225\text{ kg/hm}^2$ ), F3 ( $200$ 、 $80$ 、 $300\text{ kg/hm}^2$ )。共 9 个处理, 分别为 D1F1、D1F2、D1F3、D2F1、D2F2、D2F3、D3F1、D3F2、D3F3, 每个处理设 3 次重复, 共计 27 个小区, 小区长  $27\text{ m}$ 、宽  $1.8\text{ m}$ , 小区面积为  $48.6\text{ m}^2$ 。试验采用机器起垄、人工种植的高垄种植模式, 垄宽为  $0.9\text{ m}$ , 株距约为  $2\text{ cm}$ , 种植密度约为  $45000\text{ 株/hm}^2$ 。

大田马铃薯的灌溉采用垄上滴灌方式, 为研究不同灌水频率对马铃薯生长的影响, 不同处理下的灌溉定额相同, 为  $100\% \text{ ET}_c$ ,  $\text{ET}_c$  为马铃薯的蒸腾蒸发量, 利用试验地的气象资料, 通过彭曼修正公式计算获得  $\text{ET}_0$ , 再根据马铃薯的作物系数  $K_c$  计算获得  $\text{ET}_c$ <sup>[18]</sup>, 全生育期共灌水  $218\text{ mm}$ , 试验期间累积降雨量为  $213.8\text{ mm}$ 。试验所用肥料为尿素、磷酸二铵和硝酸钾, D1 和 D2 分 6 次施入, D3 分 5 次施入, 除了出苗灌水外, D2 和 D3 肥料均随每次灌水施入, D1 施肥日期与 D2 相同。施肥使用的是容量为  $15\text{ L}$  小型压差式施肥罐, 每次施肥前, 先灌清水  $1\text{ h}$  左右, 然后将施肥球阀关闭一半并倒入肥料,  $3 \sim 4\text{ h}$  可完全施入, 然后继续灌清水至当次灌水定额。每个施肥罐控制 1 个处理。生育期的降雨量、灌水日期和灌水定额见图 1。

### 1.3 数据的测定

在马铃薯的各个生育阶段, 选取有代表性的植物样进行测定, 具体的观测指标如下:

1.3.1 株高和茎粗的测定 在马铃薯的各个生育期, 在每个小区内随机选取能够代表小区马铃薯整体长势的植株 3 株, 用米尺来测定其株高。使用游标卡尺精确测量植株茎粗。

1.3.2 叶面积的测定 使用打孔器打孔的方法测定选取的马铃薯的叶面积。先用打孔器打出已知面积的叶片, 烘干后, 把已知面积的叶片与植株总叶片干物质进行比较, 得出系数, 使用已知面积乘以系数即为植株叶面积。

$\text{LAI}$  (叶面积指数) = 单株叶面积  $\times$  单位土地面积株数/单位土地面积

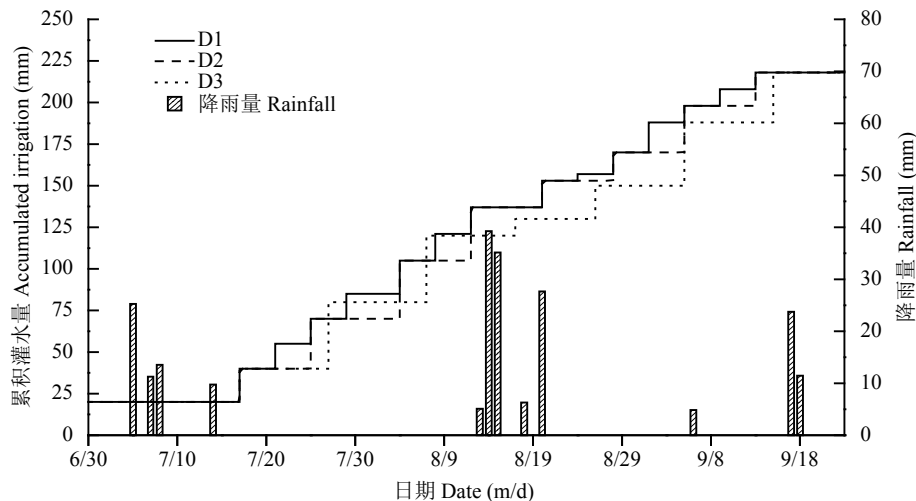


图 1 马铃薯全生育期内各处理累积灌水量和降雨量

Fig. 1 Accumulated irrigation amount and rainfall in the whole growing period of potato

1.3.3 马铃薯干物质累积量的测定 每个小区内随机选取具有代表性的马铃薯植株 3 株, 放入保鲜袋中带回实验室, 洗净, 用滤纸吸干, 分别将植株的根、茎、叶和块茎分开装入档案袋中, 放入 105℃ 烘箱中杀青 30 分钟, 然后在 75℃~80℃ 烘干至恒重, 冷却后使用电子天平称重, 测定干物质含量。

1.3.4 产量的测定 收获时, 每个小区内选取马铃薯长势相当区域, 选择 2 垄马铃薯, 平行的挖取 1 m 的距离, 测定面积为 1.8 m<sup>2</sup>, 每个小区选取 3 个区域, 然后测量马铃薯产量、单株薯重及商品薯重, 其中, 商品薯是指质量大于 75 g 的马铃薯块茎。

1.3.5 植株养分的测定 将马铃薯各个生育期的干样充分研磨后, 过 1 mm 筛, 经浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮, 消煮液用于养分的测定<sup>[19]</sup>。利用流动分析仪测定植株各个器官中的全氮和全磷含量, 利用火焰分光光度计测定全钾含量。

1.3.6 作物全生育期耗水量<sup>[20]</sup>计算

$$ETc = P + I + \Delta S - R - D$$

式中: ETc 为作物腾发量即耗水量 (mm); P 为降雨量 (mm); I 为全生育期灌水量 (mm);  $\Delta S$  为 0—100 mm 土层播种前后土体贮水量的变化 (mm); R 为地表径流量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm)。在本试验中, 滴灌条件下不会形成地表径流, 而且灌水定额较低, 不会形成深层渗漏, 因此 R 和 D 忽略不计。相关指标计算如下<sup>[21]</sup>:

水分利用效率 (WUE) [kg/hm<sup>2</sup>·mm] = 产量/作物全生育期耗水量;

各器官氮 (磷、钾) 吸收量 (kg/hm<sup>2</sup>) = 各器官全氮 (磷、钾) 含量 × 干物质质量 × 种植密度;

氮 (磷、钾) 素利用效率 (NUE, kg/kg) = 产量/植株总氮 (磷、钾) 吸收量;

氮 (磷、钾) 素吸收效率 (UPE, kg/kg) = 植株总氮 (磷、钾) 吸收量/氮 (磷、钾) 养分投入;

肥料偏生产力 (PFP, kg/kg) = 产量/施肥量总和。

## 1.4 统计分析

采用 SPSS19.0 统计分析软件分析实验数据; Duncan's 新复极差法分析显著性; 采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理; Origin8.0 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水频率和施肥量对马铃薯株高、茎粗和叶面积指数的影响

由表 1 可知, 在马铃薯全生育期内, 灌水频率

和施肥量对马铃薯的株高都有极其显著的影响 ( $P < 0.01$ )。在相同的灌水频率下, 各个施肥量下的马铃薯株高差异显著 ( $P < 0.05$ ), 株高随施肥量的增加而增加; 在相同的施肥量条件下, 各个灌水频率处理下的株高差异显著 ( $P < 0.05$ ), 在马铃薯的苗期和块茎形成期, 株高随着灌水频率的增加而增加, 在块茎增长期、淀粉积累期和成熟期, 株高随着灌水频率的增加先增加后减小, 说明在马铃薯生育的前期, 适当增加灌水频率有利于马铃薯株高的增加。

在苗期时, 施肥量对马铃薯的茎粗没有显著影响 ( $P > 0.05$ ), 但施肥量对其他生育期的茎粗有极其显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 在相同的灌水频率下, 茎粗随着施肥量的增加而增加; 在整个生长过程中, 灌水频率对马铃薯的茎粗都有着极其显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 相同的施肥量条件下, 茎粗随着马铃薯灌水频率的增加先增加后减小。

在马铃薯的苗期和块茎形成期, 灌水频率和施肥量对株高的交互作用不显著 ( $P > 0.05$ ); 在块茎增长期, 对株高有着显著的交互作用 ( $P < 0.05$ )。在淀粉积累期和成熟期, 灌水频率和施肥量对株高有着极其显著的交互作用 ( $P < 0.01$ )。在马铃薯的苗期, 灌水频率和施肥量对茎粗有着极其显著的交互作用 ( $P < 0.01$ ); 在块茎形成期, 对茎粗有着显著的交互作用 ( $P < 0.05$ ); 在块茎增长期和淀粉积累期, 对茎粗的交互作用不明显 ( $P > 0.05$ ); 在成熟期, 对茎粗有着极其显著的交互作用 ( $P < 0.01$ )。

不同处理下马铃薯叶面积指数随生育期的变化如图 2 所示。在马铃薯的整个生育过程中, 不同处理下马铃薯的叶面积指数 (LAI) 的增长均呈现抛物线变化。相同的灌水频率下, 施肥量为 F2、F3 时, LAI 在淀粉积累期时达到最大值, 施肥量为 F1 时, LAI 在块茎增长期时达到最大, 说明增加施肥量在一定程度上可以延缓马铃薯叶片的生长进程, 有利于马铃薯叶面积的增加。在马铃薯的各个生育期内, 灌水频率和施肥量对马铃薯的 LAI 都有着极其显著的影响 ( $P < 0.01$ ), LAI 随着施肥量的增加而增加, 在马铃薯的苗期和块茎形成期, LAI 随着灌水频率的增加而增加, 说明前期增加灌水频率有利于马铃薯叶片的生长, 在块茎增长期、淀粉积累期和成熟期, 马铃薯的 LAI 随着灌水频率的增加先增加后减小。在马铃薯的全生育期内, 灌水频率和施肥量对 LAI 的交互作用不明显 ( $P > 0.05$ )。

总体来看, 马铃薯的株高、茎粗和 LAI 都是随着施肥量的增加而增加, 说明适当增加施肥量可以

表 1 灌水频率和施肥量对马铃薯株高和茎粗的影响

Table 1 Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on plant height and stem diameter

生长指标 Growth indicator	灌水频率 Irrigation frequency	施肥量 Fertilizer rate	生育期及出苗天数 Growth period and the days after emergence				
			苗期 Seedling stage	块茎形成期 Tuber formation stage	块茎增长期 Tuber growth stage	淀粉积累期 Starch accumulation stage	成熟期 Maturity stage
			20 d	35 d	55 d	75 d	93 d
株高 (cm) Plant height	D1	F1	35.1 bc	47.90 cde	56.67 e	61.73 e	61.83 e
		F2	36.85 ab	51.27 b	61.10 d	65.33 d	65.67 d
		F3	38.05 a	54.30 a	65.60 c	71.10 c	72.07 c
	D2	F1	32.95 def	46.13 de	62.40 d	66.70 d	66.80 d
		F2	34.65 cd	48.03 cde	69.37 b	75.07 b	75.80 b
		F3	35.10 bc	50.30 bc	76.80 a	80.93 a	81.57 a
	D3	F1	31.90 f	42.03 f	51.67 f	56.40 g	57.02 f
		F2	32.60 ef	45.20 e	53.43 f	59.27 f	60.20 e
		F3	34.30 cde	49.20 bcd	60.83 d	65.43 d	65.77 d
显著性检验 Significance test							
灌水频率 Irrigation frequency (IL)			**	**	**	**	**
施肥量 Fertilizer rate (FL)			**	**	**	**	**
IL × FL			NS	NS	*	**	**
茎粗 (mm) Stem diameter	D1	F1	8.95 ab	10.66 c	12.94 cd	14.03 c	14.23 c
		F2	9.07 a	11.33 b	13.53 b	14.56 b	14.74 b
		F3	9.05 a	12.02 a	13.92 a	15.04 a	15.42 a
	D2	F1	8.84 bc	10.44 bc	12.13 f	13.21 e	13.57 e
		F2	8.74 bcd	10.72 c	12.71 de	13.54 d	13.67 e
		F3	8.80 bc	11.19 b	13.61 b	14.39 b	14.48 c
	D3	F1	8.51 d	9.83 e	12.04 f	13.02 e	13.12 f
		F2	8.64 cd	10.25 d	12.55 e	13.64 d	13.95 d
		F3	8.72 bcd	11.11 b	13.07 c	14.01 c	14.21 c
显著性检验 Significance test							
灌水频率 Irrigation frequency (IL)			**	**	**	**	**
施肥量 Fertilizer rate (FL)			NS	**	**	**	**
IL × FL			**	*	NS	NS	**

注 (Note): \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ ; NS—差异不显著 No significant difference ( $P > 0.05$ ). 同一生长指标下同列数字后不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed with different letters in the same column indicate significant difference in Duncan test at  $P < 0.05$  under the same growth indicator.

促进马铃薯植株的生长; 在马铃薯的生育后期, 株高、茎粗和 LAI 都随着灌水频率的增加先增加后减小, 说明在马铃薯生长的后期, 灌水在一定程度上会抑制马铃薯植株的生长, 适当减小灌水频率有利于马铃薯的生长。

## 2.2 灌水频率和施肥量对马铃薯干物质质量的影响

如图 3 所示, 马铃薯的总干物质质量随着生育期推进呈现出“慢-快-慢”的增长趋势, 在块茎增长期之前增长缓慢, 在块茎增长期之后近乎线性增长, 在淀粉积累期之后增长速度趋于平缓。苗期

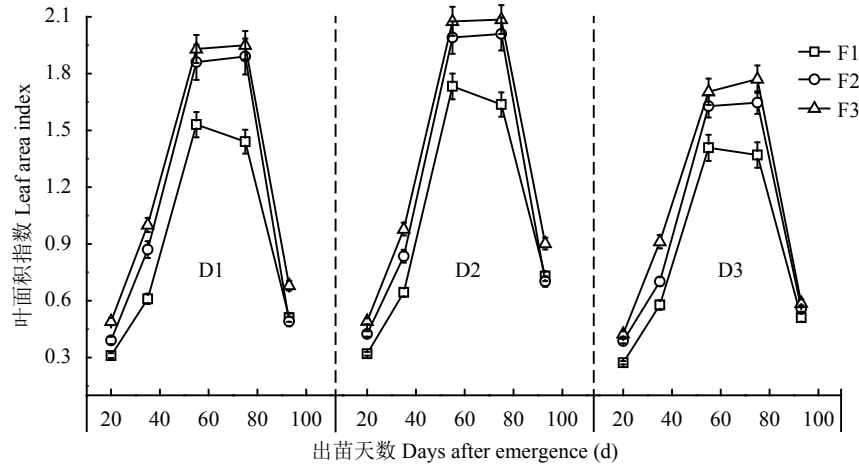


图 2 灌水频率和施肥量对马铃薯叶面积指数的影响

Fig. 2 Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on leaf area index (LAI) of potato

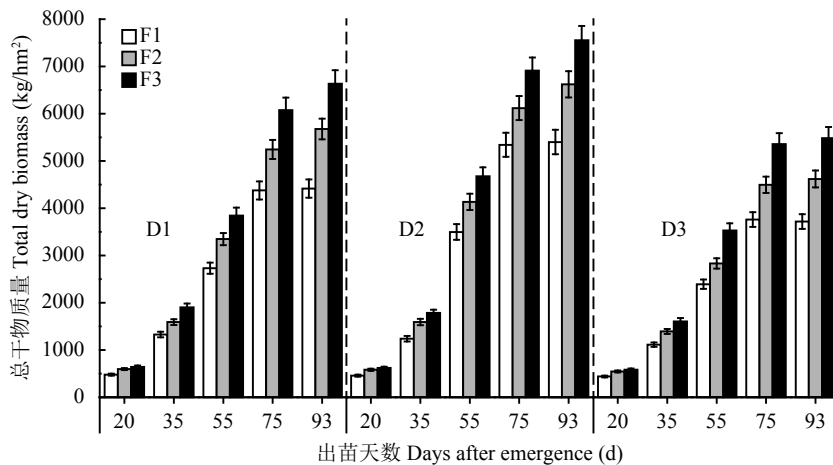


图 3 灌水频率和施肥量对马铃薯干物质累积的影响

Fig. 3 Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on dry biomass of potato

时, 各个灌水频率之间差异不显著, 块茎增长期开始, 各个灌水频率之间差异显著, 且在苗期及块茎增长期时, D1 灌水频率下的总干物质质量最高, 其值分别为 479.3~644.4 kg/hm<sup>2</sup> 和 1327~1902 kg/hm<sup>2</sup>, 块茎增长期之后, 马铃薯在 D2 灌水频率下的总干物质质量最高, 成熟期平均值达到 6526 kg/hm<sup>2</sup>, 比 D1 和 D3 灌水频率下成熟期的总干物质质量分别高出 17.07% 和 41.68%。马铃薯的总干物质质量受施肥量的影响显著, 总干物质质量与施肥量呈正相关关系, 在各个灌水频率下, 成熟期时 F3 处理下平均的总干物质质量为 6557 kg/hm<sup>2</sup>, 比 F1 和 F2 处理下的总干物质质量分别高出了 45.33% 和 16.28%, 在马铃薯成熟期时, D2F3 处理下的总干物质质量达到最高, 为 7556 kg/hm<sup>2</sup>。由此可以看出, 适当增加施肥量可以有效增加马铃薯成熟期的总干物质质量, 而灌水在一定程度上可能会降低成熟期马铃薯的总干物质质量。

### 2.3 灌水频率和施肥量对马铃薯产量和水分利用的影响

由表 2 可以看出, 灌水频率和施肥量及二者的交互作用对马铃薯的单株块茎重、商品薯重和产量都有着极显著的影响 ( $P < 0.01$ )。其中, D2F3 的单株产量、商品薯重及产量均达到了最高值, 分别为 1068.7 g/株、1016.8 g/株、44870 kg/hm<sup>2</sup>。

由表 2 可知, D2 处理的产量明显高于 D1 和 D3 处理的产量, D2 处理的产量最高为 44870.37 kg/hm<sup>2</sup>, 比 D1 和 D3 处理的最大值分别高出了 5.90% 和 20.25%。在高灌水频率时 (D1), F1 和 F2 之间产量、单株产量和商品薯重差异不显著 ( $P > 0.05$ ), F3 与 F1 处理之间产量和单株产量差异显著 ( $P < 0.05$ ), 商品薯重差异不显著 ( $P > 0.05$ ), F3 的产量比 F1 和 F2 分别高出 5.29% 和 2.79%; 在中等灌水频率下 (D2), F1、F2 和 F3 之间产量和单株产量差异显著 ( $P < 0.05$ ),

表 2 灌水频率和施肥量对马铃薯产量及水分利用的影响

Table 2 Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on yield, water use efficiency of potato

灌水频率 Irrigation frequency	施肥量 Fertilizer rate	单株块茎 Tuber/of perplant (g/plant)	商品薯 Commodity potato (g/plant)	产量 Yield (kg/hm <sup>2</sup> )	灌水量 Irrigation (mm)	耗水量 ET (mm)	水分利用效率 WUE [ kg/(mm·hm <sup>2</sup> ) ]
D1	F1	864.5 d	818.7 d	40241 d	218	392.0	102.66 bc
	F2	895.8 d	846.0 cd	41222 cd	218	404.9	101.81 bc
	F3	948.4 bc	891.1 bc	42370 bc	218	407.8	103.90 bc
D2	F1	907.7 cd	855.5 cd	41185 cd	218	426.0	69.69 bc
	F2	986.1 b	940.0 bc	42741 b	218	425.9	100.36 bc
	F3	1068.7 a	1016.8 a	44870 a	218	417.8	107.39 a
D3	F1	666.4 f	584.5 f	30037 f	218	445.0	67.51 d
	F2	721.9 e	684.7 e	30815 f	218	438.5	70.27 d
	F3	891.5 d	814.4 d	37315 e	218	427.9	87.21 cd
显著性检验 Significance test							
灌水频率 Irrigation frequency (IL)		**	**	**			**
施肥量 Fertilizer rate (FL)		**	**	**			NS
IL × FL		**	**	**			NS

注 (Note): \*\*— $P < 0.01$ ; NS—差异不显著 No significant difference ( $P > 0.05$ ); 同一生长指标下同列数字后的不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column indicate significant difference in Duncan test at  $P < 0.05$  under the same growth indicator.

而 F1 和 F2 之间的商品薯重差异不显著 ( $P > 0.05$ ), F3 的产量比 F1 和 F2 分别高出 8.95% 和 4.98%; 在低灌水频率下 (D3), F1 和 F2 产量之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), F3 产量和 F1、F2 之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), F1、F2 和 F3 处理的单株块茎产量和商品薯重之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), F3 的产量比 F1 和 F2 高出 24.23% 和 21.09%。3 个灌水频率下, F3 处理平均产量为 41518 kg/hm<sup>2</sup>, 比 F1 和 F2 处理分别提高 11.75% 和 8.52%。可以看出, 在低灌水频率下 (D3), 施肥量对产量的影响更大。

在低施肥量下 (F1), D1 和 D2 处理产量、单株块茎产量和商品薯重之间差异不显著 ( $P > 0.05$ ), D3 与 D1、D2 产量、单株块茎产量和商品薯重之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), D1 和 D2 处理的产量分别比 D3 高出 33.97% 和 37.11%; 在中等施肥量下 (F2), D1、D2 和 D3 处理的产量和单株块茎产量之间差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但 D1 和 D2 处理之间商品薯重差异不显著 ( $P > 0.05$ ), D2 处理产量比 D1 和 D3 分别高 3.68% 和 38.70%; 在高施肥量下 (F3), D1、D2、D3 处理产量、单株块茎产量和商品薯重之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。D2 处理的产量比 D1 和 D3 分别高出 5.90% 和 20.25%。3 个施肥量下, D2 处理平均产量为 42932 kg/hm<sup>2</sup>。可以看出, 当施肥量较低时, 马铃薯

薯产量受灌水频率的影响更为显著。

表 2 表明, 马铃薯的水分利用效率受灌水频率的显著影响, 而施肥量对水分利用效率的影响不显著。在相同的灌水频率下, 水分利用效率随着施肥量增加而增加, 但施肥量对水分利用效率的影响并没有达到显著的程度, 说明增加施肥量不能显著提高水分利用效率。当施肥量一定时, D3 处理的水分利用效率明显低于 D1 和 D2 处理下的水分利用效率, 而且从马铃薯全生育期的耗水量角度来看, 马铃薯的耗水量随着灌水频率的减小而增加, 这是由于灌水频率的减小使得马铃薯植株会受到一定程度的干旱胁迫, 促使马铃薯根系从土壤中吸收更多的水分来满足生长需求, 从而导致 D3 处理的耗水量最高, 平均值达到 437.1 mm, 比 D1 和 D2 灌水频率下的平均耗水量分别高出 8.85% 和 3.28%, 但是各个灌水频率之间产量差别较大, 因此使得灌水频率对水分利用效率产生显著影响。

## 2.4 不同灌水频率和施肥量对马铃薯养分吸收和分配的影响

马铃薯成熟期各个器官中的氮、磷、钾累积量随着施肥量的增加而增加, 随着灌水频率的增加先增加后减小 (图 4)。D2F3 处理下成熟期马铃薯氮、磷、

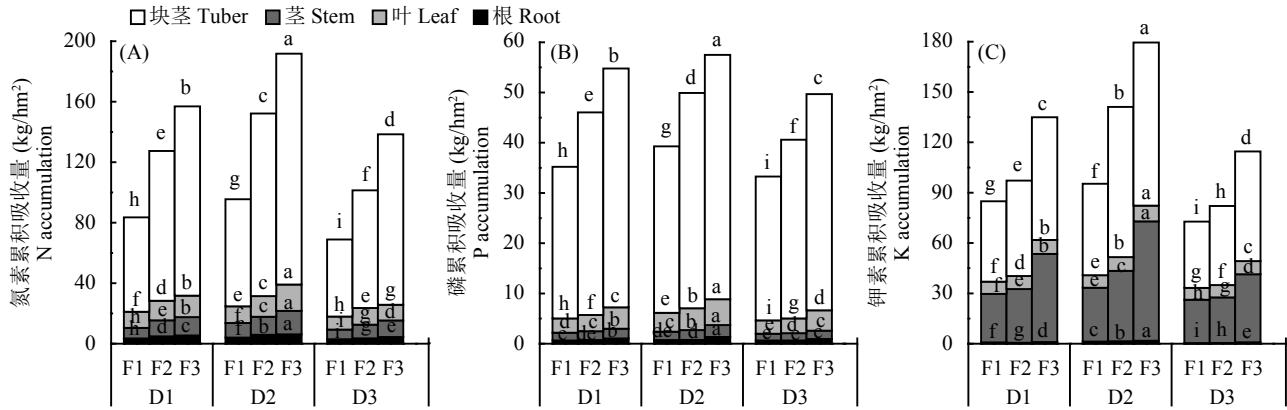


图 4 灌水频率和施肥量对马铃薯成熟期各器官氮、磷、钾累积及分配的影响

Fig. 4 Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on N, P, K accumulation and distribution in mature potato organs

[注 (Note): 方柱上不同字母表示不同处理间在 5% 水平差异显著

Different letters above the bars indicate significantly different at the 5% level.]

钾累积量最高, 分别为 191.79、57.50、179.48 kg/hm<sup>2</sup>。

从图 4(A) 可以看出, 各个器官中的氮累积量块茎 > 叶片 > 茎 > 根, 块茎中的氮累积量为最高, 最大值达到 152.65 kg/hm<sup>2</sup>, 占成熟期植株氮素总累积量的 73.90%~81.47%, 而根仅占到 3.19%~4.33%。氮素累积量随着施肥量的增加而增加, 随着灌水频率的增加先增加后减小, 且 F1、F2 和 F3 处理下马铃薯成熟期的全株平均氮素累积量满足 1:1.5:2, 这与 F1、F2 和 F3 下的施氮量比例基本相同, 说明施肥量的增加不能显著提高氮肥的吸收效率, D2 处理下全株平均氮素累积量为 146.50 kg/hm<sup>2</sup>, 比 D1 和 D3 处理分别高出 19.47% 和 42.37%。

从图 4(B) 可以看出, 各个器官中的磷素累积和分配规律与氮素类似, 为块茎 > 叶片 > 茎 > 根, 块茎中的磷素累积量最大值出现在 D2F3 处理下, 为 48.64 kg/hm<sup>2</sup>, 占全株磷素总累积量的 84.40%~87.74%。在相同的灌水频率下, 磷素在各个器官中的累积量随着施肥量的增加而增加, F3 处理达到最大值, 平均值为 53.99 kg/hm<sup>2</sup>, 比 F1 和 F2 分别高出 50.31% 和 18.61%; 在相同的施肥量下, 磷素累积量随着灌水频率的增加先增加后减小, 在 D2 处达到最大值, 平均值为 48.90 kg/hm<sup>2</sup>, 比 D1 和 D3 分别高出 7.85% 和 18.72%, 可以看出, 相较于灌水频率, 施肥量对磷素累积量的影响更显著。

从图 4(C) 可以看出, 钾素在各个器官中的累积分配与氮素和磷素不同, 为块茎 > 茎 > 叶片 > 根, 块茎中的钾素累积量最高, 最大值出现在 D2F3 处理, 为 97.23 kg/hm<sup>2</sup>, 占成熟期植株总的钾素累积量的 54.19%~58.50%, 茎的钾素累积量占植株总的钾

素累积量的 29.74%~39.65%。在相同的灌水频率下, 钾素在各个器官中的累积量随着施肥量的增加而增加, F3 处理下总的钾素累积量为 143.01 kg/hm<sup>2</sup>, 比 F1 和 F2 处理分别高出 69.58% 和 33.92%; 在相同的施肥量下, 钾素累积量随着灌水频率的增加先增加后减小, D2 处理植株总的钾素累积量平均值为 138.62 kg/hm<sup>2</sup>, 比 D1 和 D3 处理高出 31.16% 和 54.33%。

## 2.5 灌水频率和施肥量对马铃薯养分吸收利用的影响

灌水频率和施肥量对氮磷钾利用效率和肥料偏生产力都有着极其显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 灌水频率对磷素的吸收效率有显著影响 ( $P < 0.05$ ), 对氮素和钾素的吸收效率有着极其显著的影响 ( $P < 0.01$ ), 施肥量对磷素的吸收效率有着极其显著影响 ( $P < 0.01$ ), 但对氮素和钾素的吸收效率没有显著影响 ( $P > 0.05$ ), 灌水频率和施肥量的交互作用对各元素的利用效率及肥料偏生产力都有着极其显著影响 ( $P < 0.01$ ), 对各元素的吸收效率没有显著影响 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。

从表 3 可以看出, 在同一灌水频率下, 马铃薯肥料的利用效率随着施肥量的增加而减小, F1 处理氮磷钾素的利用效率均达到最大值, 平均值分别为 449.6 kg/kg、1031.42 kg/kg 和 439.62 kg/kg、比 F2 和 F3 分别高出 48.50% 和 74.36%, 23.34% 和 34.25%, 19.63% 和 48.25%; 在相同的施肥量下, 磷素的利用效率随着灌水频率的增加而增加, 而氮素和钾素则随着灌水频率的增加先减小后增加, 因此, 综合看来, 灌水频率和施肥量都对各元素的利用效率有着显著影响, D1F1 处理下各个元素的利用效率最高。



表 3 灌水频率和施肥量对马铃薯养分吸收利用的影响 (kg/kg)

Table 3 Effect of irrigation frequency and fertilizer rate on nutrient uptake and use of potato

灌水频率 Irrigation frequency	施肥量 Fertilizer rate	N		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		K <sub>2</sub> O		肥料偏生产力 PFP (kg/kg)
		利用效率 NUE	吸收效率 UPE	利用效率 NUE	吸收效率 UPE	利用效率 NUE	吸收效率 UPE	
D1	F1	481.58 a	0.84 abc	1143.20 a	0.88 ab	473.98 a	0.57 ab	138.76 b
	F2	323.54 d	0.85 abc	893.42 d	0.77 bcd	424.10 c	0.43 ab	94.76 e
	F3	270.06 g	0.78 bc	773.61 g	0.68 cd	313.92 g	0.45 ab	73.05 g
D2	F1	431.26 c	0.96 ab	1048.50 b	0.98 a	432.16 b	0.64 b	142.02 a
	F2	280.78 f	1.01 a	856.36 e	0.83 abc	302.95 h	0.63 ab	98.25 d
	F3	233.96 h	0.96 ab	780.35 f	0.72 bcd	250.00 i	0.60 ab	77.36 f
D3	F1	435.95 d	0.69 c	902.56 c	0.83 abc	412.71 d	0.36 a	103.58 c
	F2	303.98 e	0.68 c	758.99 h	0.68 cd	375.38 e	0.36 a	70.84 h
	F3	269.54 g	0.69 c	750.95 i	0.62 d	325.67 f	0.38 ab	64.34 i
显著性检验 Significance test								
灌水频率 Irrigation frequency (IL)		**	**	**	*	**	**	**
施肥量 Fertilizer rate (FL)		**	NS	**	**	**	NS	**
IL × FL		**	NS	**	NS	**	NS	**

注 (Note): NUE—Nutrient use efficiency; UPE—Nutrient uptake efficiency; PFP—Partial factor productivity; \*— $P < 0.05$ ; \*\*— $P < 0.01$ ; NS—差异不显著 No significant difference ( $P > 0.05$ ); 同一指标下同列数字后的不同字母表示差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters in the same column indicate significant difference in Duncan test at  $P \leq 0.05$  under the same indicator.

在同一灌水频率下, 施肥量对氮素和钾素的吸收效率没有显著影响, 但对磷素的吸收效率有着极其显著的影响, 磷素的吸收效率随着施肥量的增加而减小; 在相同的施肥量下, 各元素的吸收效率随着灌水频率的增加先增加后减小, 氮磷钾素的吸收效率均值在 D2 灌水频率下达到最大值, 平均值分别为 0.98 kg/kg、0.84 kg/kg 和 0.62 kg/kg, 比 D1 和 D3 处理的吸收效率分别高 19.51% 和 42.03%, 7.69% 和 18.31%, 29.17% 和 67.57%。

在同一灌水频率下, F1 处理下的马铃薯肥料偏生产力最高, 平均值为 128.12 kg/kg, 比 F2 和 F3 处理的平均值高出 45.67% 和 78.99%, 由于产量随着施肥量的增加而增加, 但产量增加的速率要低于施肥量的增加速率, 从而导致低施肥量下的肥料偏生产力最高; 在相同的施肥量下, D2 处理下的肥料偏生产力明显高于灌水频率为 D1 和 D3 的处理, 平均值达到 105.88 kg/kg, 比灌水频率为 D1 和 D3 处理的平均值高出 3.61% 和 33.03%, 由此可见, 当马铃薯的灌水频率过低时, 会使马铃薯大幅度减产, 从而导致肥料偏生产力的急剧下降。而且与灌水频率相比, 肥料偏生产力受施肥量的影响更加显著。

### 3 讨论

本文研究结果表明, 灌水频率和施肥量对马铃薯的生长指标、产量、水肥利用以及品质都有显著的影响。在有关灌水量和灌水频率对马铃薯生长的影响方面, 前人研究发现, 当马铃薯灌水量越大, 周期越短时, 株高越高, 但茎粗不会随着灌水周期的减小而增大<sup>[5]</sup>, 当灌溉定额相同时, 灌溉周期为 8 d 的处理马铃薯的生长状况最好<sup>[22]</sup>。而对于施肥量来说, 马铃薯的生长指标会因施肥量过大出现减小的现象<sup>[23]</sup>。本试验中, 马铃薯生育的前期, 株高、茎粗和叶面积会随着灌水频率的增加而增加, 在生育后期, 灌水频率以 D2 处理生长指标最好, 这与前人研究结果相似, 在灌水条件相同的条件下, 马铃薯的生长指标随着施肥量的增加而增加, 这可能与土壤初始养分不足以及施肥量不足有关。

灌水频率和施肥量对马铃薯干物质累积有着显著影响, 前人通过对马铃薯干物质的研究发现干物质的积累速率呈现单峰曲线变化, 且峰值出现在块茎增长期。随着马铃薯生育期的推进, 干物质积累的中心由叶片逐渐转向了块茎<sup>[24]</sup>。马铃薯总干物质在整个生育过程中呈现“S”型增长, 而根茎叶的干

物质积累量在全生育期内呈单峰曲线变化, 峰值出现在块茎增长期末期, 块茎增长后期后, 马铃薯各个器官干物质所占全株干物质的比例大小为块茎 > 叶 > 茎 > 根<sup>[16]</sup>, 而且干物质在苗期之后受到施肥量的影响较大<sup>[7]</sup>。本试验结果显示, 马铃薯干物质含量在整个生育过程中呈“S”型曲线变化, 且根茎叶的干物质含量呈单峰曲线变化, 峰值出现在淀粉积累期的前期, 结果与前人研究相似。而且在成熟期, 马铃薯各个器官的干物质积累量都随着灌水频率的增加先增加后减小, 随着施肥量的增加而增加, D2F3 处理的干物质积累量最高。

滴灌施肥对马铃薯的产量及水肥利用有着显著的影响。一些研究发现, 在相同的条件下高频灌溉可以提高马铃薯产量及水分利用效率<sup>[2, 5, 25-27]</sup>。当灌水条件相同时, 马铃薯的产量会随着施肥量的增加先增加后减小<sup>[8, 11, 28]</sup>, 但也有研究发现, 增加施肥量可以在一定程度上缓解水分胁迫对马铃薯生长的影响, 调节马铃薯的生理生长过程, 从而提高产量和水分利用效率<sup>[29-30]</sup>, 对于肥料偏生产力, 有研究表明, 随着施肥量的增加, 作物的肥料偏生产力呈减小的趋势<sup>[31-32]</sup>。本试验中, 马铃薯在相同的灌水条件下, 产量及水分利用效率会随着施肥量的增加而增加, 而肥料偏生产力则随着施肥量的增加而减小, 这与前人研究结果相同; 当施肥量相同时, 产量会随着灌水频率的增加先增加后减小, D2 处理下的马铃薯产量最高, 即灌水周期为 8 天, 这与秦军红等<sup>[22]</sup>的研究结果相同, 但水分利用效率在 D1 与 D2 灌水频率下差异不显著, D3 水分利用效率明显低于 D1 和 D2 处理。

前人对滴灌条件下的马铃薯养分吸收及运移有大量的研究。有研究表明, 马铃薯对钾素的需求量最大, 对磷素的需求量最少<sup>[33-35]</sup>, 而且马铃薯对养分的吸收速率会直接影响到生物量的累积<sup>[36]</sup>。Badr 等发现水分亏缺越严重, 马铃薯的养分吸收量就越低, 当灌水量充足时, 养分吸收量随着施肥量的增加而增加, 同时水分亏缺时会导致马铃薯的产量降低, 从而降低养分利用效率<sup>[7]</sup>; 当施肥量较低时, 会迫使植株根系从土壤中吸收更多的养分来满足生长需求, 从而增加马铃薯的养分利用效率<sup>[28, 37]</sup>。本研究中, 在灌水量充足的情况下, 马铃薯的养分利用效率随着施肥量的增加而逐渐减小, 随着灌水频率的增加而增加。马铃薯对氮素的吸收效率受施肥量的影响不显著, 但是吸收量随着施肥量的增加而增加, 这与前人的研究结果相同, 但是在相同的施肥

量下, 各个营养元素的吸收效率对不同灌水频率的响应没有明显的规律, 灌水频率对养分吸收效率的影响有待进一步的研究。综合各水肥处理下的马铃薯产量和水分利用效率, 中度灌水频率和高施肥量不仅能维持马铃薯较好的生长特性, 提高马铃薯的水分利用效率, 并且能保证马铃薯的产量。

## 4 结论

不同的灌水频率和施肥量对滴灌施肥条件下马铃薯的生长、产量和养分吸收效率都有着显著影响。无论是从马铃薯的生长指标、产量和品质, 还是从水肥利用效率来看, 8 d 的灌水频率相较于其他两种灌水频率对马铃薯的生长和产量的增加具有重要作用, 是适宜该地区的灌水频率。马铃薯的生长状况和产量都随着施肥量的增加而增加, 生长指标、干物质和产量均在 F3 施肥量处理达到最大值, 但水分利用效率受施肥量的影响不显著, 且肥料偏生产力随着施肥量的增加而减小, 施肥量 F1 处理肥料偏生产力及养分利用效率均达到最大值。在产量与节水节肥的综合考虑下, D2F3 处理 (8 d, N 200 kg/hm<sup>2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 80 kg/hm<sup>2</sup>、K<sub>2</sub>O 300 kg/hm<sup>2</sup>) 可作为基于本试验条件下较适宜的灌水施肥组合。

## 参 考 文 献:

- [1] 盛万民. 中国马铃薯品质现状及改良对策[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 166-170.  
Sheng W M. Progress of research on potato molecular breeding for qualities[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 166-170.
- [2] 康跃虎, 王凤新, 刘士平, 孙红红. 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.  
Kang Y H, Wang F X, Liu S P, Sun H H. Effects of water regulation under drip irrigation on potato growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(2): 66-72.
- [3] 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, (1): 9-15.  
Wang F X, Kang Y H, Liu S P. Patterns of water consumption and requirements of potato under dropping irrigation[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, (1): 9-15.
- [4] Wang F X, Kang Y H, Liu S P. Effects of drip irrigation frequency on soil wetting pattern and potato growth in North China Plain[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 79: 248-264.
- [5] 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 J Y, Wang Y K. Effect of different treatment of drip irrigation on growth of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(2): 121-125.
- [6] Wang F X, Wua X X, Shockb C C, *et al.* Effects of drip irrigation

- regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122: 78–84.
- [7] Badr M A, El-Tohamy W A, Zaghoul A M. Yield and water use efficiency of potato grown under different irrigation and nitrogen levels in an arid region[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 110(3): 9–15.
- [8] 宋娜, 王凤新, 杨晨飞, 杨开静. 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 N, Wang F X, Yang C F, Yang K J. 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 98–105.
- [9] 张富仓, 高月, 焦婉如, 胡文慧. 水肥供应对榆林沙土马铃薯生长和水肥利用效率的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, (3): 270–278.  
Zhang F C, Gao Y, Jiao W R, Hu W H. Effects of water and fertilizer supply on growth, water and nutrient use efficiencies of potato in sandy soil of Yulin area[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, (3): 270–278.
- [10] Waddell J T, Gupta S C, Moncrief J F, *et al.* Irrigation and nitrogen management effects on potato yield, tuber quality, and nitrogen uptake[J]. *Agronomy Journal*, 1999, 91(6): 991–997.
- [11] Ferreira T C, Gonçalves D A. Crop-yield/water-use production functions of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) grown under differential nitrogen and irrigation treatments in a hot, dry climate[J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 90(1): 45–55.
- [12] 马心灵, 朱启林, 耿川雄, 等. 不同氮水平下作物养分吸收与利用对玉米马铃薯间作产量优势的贡献[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1265–1273.  
Ma X L, Zhu Q L, Geng C X, *et al.* Contribution of nutrient uptake and utilization on yield advantage in maize and potato intercropping under different nitrogen application rates[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1265–1273.
- [13] 李文婷, 王仕稳, 邓西平, 李红兵. 不同水氮水平对马铃薯产量和水氮利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, (6): 191–196.  
Li W T, Wang S W, Deng X P, Li H B. Effects of different water and nitrogen levels on tuber yield, water and nitrogen use efficiency of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, (6): 191–196.
- [14] 王娟, 谭伟军, 何小谦, 等. 半干旱区氮肥施用时期及比例对马铃薯产量的影响[J]. *中国马铃薯*, 2016, 30(5): 289–295.  
Wang J, Tan W J, He X Q, *et al.* Effect of nitrogen application time and ratio on yield of potato in semiarid area[J]. *Chinese Potato Journal*, 2016, 30(5): 289–295.
- [15] 张小静, 陈富, 袁安明, 马海涛. 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 X J, Chen F, Yuan A M, Ma H T. NPK fertilization rate on growth and yield of potato in Northwest arid area[J]. *Chinese Potato Journal*, 2013, 27(4): 222–225.
- [16] 卢建武, 邱慧珍, 张文明, 等. 半干旱雨养农业区马铃薯干物质和钾素积累与分配特性[J]. *应用生态学报*, 2013, (2): 423–430.  
Lu J W, Qiu H Z, Zhang W M, *et al.* Characteristics of dry matter and potassium accumulation and distribution in potato plant in semi-arid rainfed areas[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, (2): 423–430.
- [17] Camargo D C, Montoya F, Córcoles J I, Ortega J F. Modeling the impacts of irrigation treatments on potato growth and development[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 150: 119–128.
- [18] Allen R G. Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements[Z]. Rome: FAO Irrigation & Drainage Paper, 1998.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.  
Lu R K. Methods of analysis of soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, Jensen M E. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(6): 899–920.
- [21] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 915–924.  
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, *et al.* Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [22] 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 J H, Chen Y J, Zhou C Y, *et al.* Effects 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.
- [23] 杨德桦. 不同施肥量和不同施肥方式对襄阳地区马铃薯产量、养分积累规律和品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学硕士学位论文, 2012.  
Yang D H. Effects of different fertilizer rates and fertilization methods on yield, nutrients accumulation and tuber quality of potato in Xiangyang[D]. Wuhan: MS Thesis of Huazhong Agricultural University, 2012.
- [24] 高聚林, 刘克礼, 张宝林, 任有志. 马铃薯干物质积累与分配规律的研究[J]. *中国马铃薯*, 2003, 17(4): 209–212.  
Gao J L, Liu K L, Zhang B L, Ren Y Z. Accumulation and distribution of dry matter in potato[J]. *Chinese Potato*, 2003, 17(4): 209–212.
- [25] Radin J W, Reaves L L, Mauney J R, French O F. Yield enhancement in cotton by frequent irrigations during fruiting[J]. *Agronomy Journal*, 1992, 84(4): 551–557.
- [26] Radin J W, Mauney J R, Kerridge P C. Water uptake by cotton roots during fruit filling in relation to irrigation frequency[J]. *Crop Science*, 1989, 29(4): 1000–1005.
- [27] Eran S, Alon B G, Shani U. Root water uptake efficiency under ultra-high irrigation frequency[J]. *Plant and Soil*, 2006, 282(1/2): 333–341.
- [28] Zotarelli L, Dukes M D, Scholberg J M, *et al.* Nitrogen and water use efficiency of zucchini squash for a plastic mulch bed system on a sandy soil[J]. *Scientia Horticulturae*, 2008, 116(1): 8–16.
- [29] 李世清, 李东方, 李凤民, 等. 半干旱农田生态系统地膜覆盖的土壤生态效应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(5): 21–29.

- Li S Q, Li D F, Li F M, *et al.* Soil ecological effects of plastic film mulching in semiarid agro-ecological system[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2003, 31(5): 21–29.
- [30] 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(2): 208–214.  
Wang C R, Tian X H, Li S X, *et al.* Effects of plastic sheet-mulching on ridge for rainwater-harvesting cultivation on WUE and yield of winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(2): 208–214.
- [31] 张志伟, 梁斌, 李俊良, 等. 不同灌溉施肥方式对马铃薯产量和养分吸收的影响[J]. *中国农学通报*, 2013, (36): 268–272.  
Zhang Z W, Liang B, Li J L, *et al.* Effects of different fertigation methods on yield and nutrient uptake of potato[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, (36): 268–272.
- [32] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 膜下滴灌水肥耦合促进番茄养分吸收及生长[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(21): 70–80.  
Xing Y Y, Zhang F C, Zhang Y, *et al.* Irrigation and fertilization coupling of drip irrigation under plastic film promotes tomato's nutrient uptake and growth[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(21): 70–80.
- [33] 陈光荣, 高世铭, 张晓艳, 等. 补水时期和施钾量对旱作马铃薯产量和水分利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(5): 41–46.
- Cheng G R, Gao S M, Zhang X Y, *et al.* The effect of potassium application and water supplement in different stages on potato yield and WUE in semiarid area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(5): 41–46.
- [34] 邓兰生, 涂攀峰, 齐庆振, 等. 滴施液体肥对马铃薯产量、养分吸收积累的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2011, 30(6): 65–68.  
Deng L S, Tu P F, Qin Q Z, *et al.* Effects of drip fertigation on yield and plant nutrient accumulation of potato[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(6): 65–68.
- [35] 张西露, 刘明月, 伍壮生, 等. 马铃薯对氮、磷、钾的吸收及分配规律研究进展[J]. *中国马铃薯*, 2010, 24(4): 237–241.  
Zhang X L, Liu M Y, Wu Z S, *et al.* Absorption and distribution of NPK in potatoes[J]. *Chinese Potato*, 2010, 24(4): 237–241.
- [36] 刘汝亮, 李友宏, 王芳, 等. 两种钾源对马铃薯养分积累和产量的影响[J]. *西北农业学报*, 2009, 18(1): 143–146.  
Liu R L, Li Y H, Wang F, *et al.* Effect of different style potassium fertilizer on potato nutrient elements accumulation and yield[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2009, 18(1): 143–146.
- [37] Cabello M J, Castellanos M T, Romojaro F, *et al.* Yield and quality of melon grown under different irrigation and nitrogen rates[J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 96(5): 866–874.