文章编号:1000-7601(2020)01-0155-11

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.21

# 水肥调控对滴灌马铃薯生长、品质 及水肥利用的影响

毕丽霏<sup>1,2</sup>,张富仓<sup>1,2</sup>,王海东<sup>1,2</sup>,王 英<sup>1,2</sup>, 吴 悠<sup>1,2</sup>,向友珍<sup>1,2</sup>,范军亮<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.西北农林科技大学旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100)

摘 要:研究生育期土壤水分下限调控和施肥对陕北榆林地区滴灌马铃薯生长、品质和水肥利用的影响,以期探寻马铃薯优质高产的水肥调控模式。以马铃薯紫花白为材料,分别在苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期、成熟期设置 3 个土壤水分调控下限水平:W1(55%、60%、65%、55%、55%)、W2(65%、70%、75%、65%、65%、65%)、W3(75%、80%、85%、75%、75%),4 个施肥水平 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O (kg·hm<sup>-2</sup>)分别为 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>)、F4(250-100-375 kg·hm<sup>-2</sup>),共 12 个处理,在生育期内对马铃薯生长、产量及品质等指标进行观测,分析马铃薯各指标对水肥的响应机制。结果表明:(1)在同一施肥水平下,W2 灌水处理的马铃薯生长、产量、品质、水肥利用效率(WUE)均显著高于 W1 和 W3 处理。W2 处理的平均产量为 43 187.15 kg·hm<sup>-2</sup>,比 W1 和 W3 分别增加了 24.59%和 5.26%,淀粉和维生素 C 含量分别增加了 15.32%和 6.37%,8.04%和 4.66%,WUE 分别增加了 15.53%和 7.54%,肥料偏生产力(PFP)分别增加了 21.65%和 4.41%。(2)在同一灌水水平下,F3 施肥处理的马铃薯生长、产量、WUE 均显著高于 F1、F2 和 F4 处理,淀粉含量和维生素 C 含量在 F2 处理最高。F3 处理的平均产量为 44 691.32 kg·hm<sup>-2</sup>,比 F1、F2 和 F4 处理分别增加了 41.79%、10.98%和 6.34%。WUE 随施肥量的增加均呈抛物线变化趋势,PFP 随施肥量增加呈减小趋势,F1 处理的 PFP 平均为 108.69 kg·kg<sup>-1</sup>,比 F2、F3 和 F4 处理分别显著增加了 17.41%、41.06%和87.50%。(3)运用主成分分析法评价马铃薯品质表明,F3W2 处理排名第一,是榆林地区马铃薯优质高产的最优水肥组合。

关键词:马铃薯;滴灌;水肥调控;产量;块茎品质;水肥利用效率

中图分类号:S532;S275.6 文献标志码:A

# Effects of regulated water and fertilizer on potato growth, quality, water and fertilizer use efficiency under drip irrigation

BI Lifei<sup>1,2</sup>, ZHANG Fucang<sup>1,2</sup>, WANG Haidong<sup>1,2</sup>, WANG Ying<sup>1,2</sup>, WU You<sup>1,2</sup>, XIANG Youzhen<sup>1,2</sup>, FAN Junliang<sup>1,2</sup>

- (1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of 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:** To better understand the effects of regulating water and fertilizer on growth, quality, water and fertilizer use of potato under drip irrigation in Yulin areas in Northern Shaanxi and in order to explore the water and fertilizer regulation mode of high quality and high yield of potato with the potato species of Zihuabai, there were total of 12 treatments combining three lower limits of soil moisture regulation including W1 (55%, 60%, 65%, 55%, and 55%), W2 (65%, 70%, 75%, 65%, and 65%), W3 (75%, 80%, 85%, 75%, and 75%) and four  $N-P_2O_5-K_2O$  (kg·hm<sup>-2</sup>) fertilization rates of F1 (100-40-150 kg·hm<sup>-2</sup>), F2 (150-60-225 kg·hm<sup>-2</sup>), F3

收稿日期:2019-02-26

修回日期:2019-06-01

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)

作者简介: 毕丽霏(1994-), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。 E-mail: bilifei9661@ 163.com

通信作者:张富仓(1962-),男,陕西武功人,博士,教授,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail; zhangfc@ nwsuaf.edu.cn

 $(200-80-300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ , F4  $(250-100-375 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$  at different growing stages (seedling stage, tuber formation stage, tuber swelling stage, starch accumulation stage, and maturity stage). Growth, yield and quality indices were measured during the growing season exploring the responses mechanism of each index of potato to irrigation and fertilizer. The results showed that: (1) At the same fertilizer rate, the growth, yield, quality, and water and fertilizer use efficiency of potato of W2 were significantly higher than that of W1 and W3. The yield of W2 was 43 187.15 kg · hm<sup>-2</sup>, 24.59% and 5.26% higher than W1 and W3, respectively. The starch content and vitamin C content of W2 was increased by 15.32% and 8.04%, 6.37% and 4.66%, respectively. Water use efficiency (WUE) of W2 increased by 15.53% and 7.54%. The partial fertilizer productivity (PFP) of W2 increased by 21.65% and 4.41%. (2) At the same irrigation level, the growth, yield, and WUE of potato with F3 were higher than those of F1, F2, and F4. The starch content and vitamin C content of F2 were the highest. The average yield of F3 was 44 691.32 kg · hm<sup>-2</sup>, which was 41.79%, 10.98%, and 6.34% higher than F1, F2, and F4, respectively. The WUE showed a parabolic trend with the increase of fertilization amount. The PFP gradually decreased with the increase in fertilizer application. The PFP of F1 was 108.69 kg · kg<sup>-1</sup>, which was 17.41%, 41.06%, and 87.50% higher than F2, F3, and F4, respectively. (3) The evaluation of potato quality by principal component analysis showed that F3W2 treatment ranked first. Comprehensively considering growth, quality, yield, and water and fertilizer use efficiency, F3W2 treatment was the best water and fertilizer combination for high quality and yield of potato in Yulin area.

**Keywords:** potato; drip irrigation; water and fertilizer regulation; yield; tuber quality; water and fertilizer use efficiency

马铃薯是世界上重要的粮食作物之一,含有丰 富的营养物质,又是重要的工业原料,具有较高的 开发利用价值[1]。我国马铃薯种植面积很大,然而 单产却比较低[2],在提高产量方面有很大的空间。 随着马铃薯加工业的发展,对马铃薯品质的研究显 得越来越重要,如何能达到马铃薯的优质高产已经 成为马铃薯生产的迫切需求。陕西省榆林市地处 黄土高原腹地,土地面积辽阔,海拔高、光照足、日 照长,土质疏松,昼夜温差大,环境污染轻,是中国 马铃薯五大优生区和高产区之一。但该地区水资 源比较缺乏,马铃薯田灌溉施肥大多采用粗放的水 肥管理模式,造成了灌溉水浪费严重,肥料淋失,水 肥利用效率低等问题。因此,研究水肥调控对陕北 榆林地区马铃薯生长、品质及水肥利用的影响,对 提高马铃薯产量,保证优质高产,改善农田的水肥 环境和缓解水资源紧张都有重要意义。

在农业生产中,水和肥是影响马铃薯生长的两个重要因素<sup>[3]</sup>。水分是影响作物生长的一个主要环境因素<sup>[4]</sup>,而肥料对于促进马铃薯生长有很大的作用,必须重视肥料的合理施用。前人就滴灌施肥对马铃薯生长、产量、品质及水肥利用进行了大量研究。Yuan等<sup>[5]</sup>发现随着灌水量的增加,马铃薯的株高、生物量和根区水量会相应增加,薯块的产量和单薯重也随之增加。Wang<sup>[6]</sup>、秦军红等<sup>[7]</sup>对相同灌水量下不同灌水频率对马铃薯生长、产量及水分

利用效率的影响进行了研究。Shock 等[8] 发现水分 不足或者水分过量均会使马铃薯产量和品质降低。 有研究表明水肥一体条件下马铃薯的产量、单株薯 重、商品薯率、淀粉含量均随着施氮量的增加呈抛 物线式变化,且小水量多次灌可以得到比大水量少 次灌更好的收益[9]。Badr等[10]通过研究发现,在 灌水量充足时,马铃薯的产量随施氮量的增加而逐 渐增加,而出现水分胁迫时,施氮量对马铃薯的产 量产生负作用。Iema等[11]研究表明高水和高比例 肥氮磷钾的施肥组合能够促进马铃薯的生长,但并不 能提高水分生产效率,施肥可以有效地提高水分生产 效率。戴树荣[12]通过建立肥料效应函数得到最高产 量的氮磷钾推荐施肥量为 N 204.24 kg · hm<sup>-2</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 68.01 kg·hm<sup>-2</sup>和 K<sub>2</sub>O 253.62 kg·hm<sup>-2</sup>。同时,合 理的水肥配合可以发挥很好的交互耦合作用,提高 马铃薯的水肥利用效率.进而可以使马铃薯 增产[13-14] (

在针对滴灌条件下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或者固定的灌水量和施肥配比来评价水分和养分对马铃薯生产的影响,根据灌水下限调控和施肥组合的研究还比较少见。本试验采用滴灌灌水下限处理结合施肥处理的灌溉技术,研究水肥调控对榆林沙土马铃薯生长、产量、水肥利用效率及品质的影响,综合分析马铃薯产量和品质对水肥的响应,以提高马铃薯水

肥利用效率为目标,从指导马铃薯生产的实际出发, 提出科学合理的灌水下限和施肥量,以期为榆林沙土 马铃薯管理提供技术指导和理论基础。

## 1 材料与方法

#### 1.1 试验区概况

试验于 2017 年 5—9 月在榆林市现代农业科技示范园西北农林科技大学马铃薯试验站进行。该区域位于东经 109°43′、北纬 38°23′,试验站海拔高 1 050 m,年平均降水量 371 mm,蒸发量 1 900 mm,年日照时数 2 900 h,年均气温 8.6°C。降水主要集中在 6—8 月。土壤为风沙土,肥力水平中等。站区内土壤 pH 值为 8.1,耕层  $(0 \sim 40 \text{ cm})$  土壤容重为  $1.72 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,田间持水量为 9.21%(质量含水率),有机质含量为  $7.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,铵态氮含量为  $7.85 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷含量为  $8.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,速效钾含量为  $8.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,。

#### 1.2 试验设计

试验设置灌水下限和施肥量 2 个因素。依据当地实际生产经验,在不同生育期(苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期、成熟期)设置 3 个土壤水分调控下限水平 W1(55%、60%、65%、55%、55%)、W2(65%、70%、75%、65%、65%、65%)、W3(75%、80%、85%、75%、75%),每个水平以控制土壤含水量占田间持水量的百分数表示。施肥量根据当地大田施肥标准和前人经验 $^{[15]}$ 设置了 4 个 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O (kg·hm<sup>-2</sup>) 施肥水平: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>)、F4(250-100-375 kg·hm<sup>-2</sup>)(表 1)。试验共 12 个处理,每个处理分 3 次重复,共 36 个小区。小区长 20 m,宽 3.6 m,小区面积为 72 m<sup>2</sup>。试验地两端均设置保护行,在相邻处理间均间隔 1 m,避免不同处理之间的相互影响。试验种植采用机械起垄种植方式,垄宽约为 90 cm,株距约为 2.5 cm,种植密度约为 45 000 株·hm<sup>-2</sup>。

大田马铃薯滴灌采用垄上滴灌。马铃薯的根 系主要分布在 0~40 cm 土层[16],故土壤含水量选 取 0~40 cm 土层的平均含水量, 当土壤含水量低于 灌水下限时则灌水至田间持水量,每个小区独立安 装水表和阀门控制灌水量。试验中使用的肥料为: 尿素(含 N 46.4%)、磷酸二铵(含 N 18%, P, O, 46%)、硝酸钾(含 N 13.5%, K, O 46%)。施肥比例 采用苗期不施肥,块茎形成期施用总施肥量的 20%,块茎膨大期占施肥总量的55%和淀粉积累期 占施肥总量的25%的比例施入[17],滴灌施肥时先将 肥料溶于水,再用施肥罐施肥,灌溉水利用系数为 0.95[18]。处理前统一灌水至田间持水量,然后开始 控制水量,各土壤含水量小于土壤下限即进行灌 溉。马铃薯生育期降水量见图 1。马铃薯于 2017 年5月13日播种,9月26日收获。各生育阶段划 分:5月13日-7月3日为苗期,7月4日-7月25 日为块茎形成期,7月26日—8月16日为块茎膨大 期,8月17日—9月10日为淀粉积累期,9月11 日一9月26日为成熟期。

表 1 不同生育期土壤水肥调控处理

Table 1 Soil water and fertilizer regulation during different growth stages

处理	施肥量 Fertilizer rate /(kg·hm <sup>-2</sup> ) (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)	土壤水分下限控制(土壤含水量占田间持水量的%) Irrigation threshold treatment(% of field capacity)					总灌水量
Treatment		苗期 Seedling stage	块茎形成期 Tuber formation stage	块茎膨大期 Tuber swelling stage	淀粉积累期 Starch accumulation stage	成熟期 Maturity stage	Total irrigation amount/mm
F1W1		55	60	65	55	55	223.14
F1W2	100-40-150	65	70	75	65	65	266.32
F1W3		75	80	85	75	75	278.35
F2W1		55	60	65	55	55	248.91
F2W2	150-60-225	65	70	75	65	65	275.87
F2W3		75	80	85	75	75	292.66
F3W1		55	60	65	55	55	273.71
F3W2	200-80-300	65	70	75	65	65	295.89
F3W3		75	80	85	75	75	308.95
F4W1		55	60	65	55	55	273.36
F4W2	250-100-375	65	70	75	65	65	298.52
F4W3		75	80	85	75	75	305.96

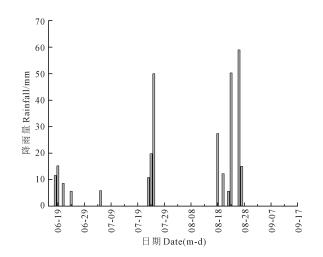


图 1 马铃薯全生育期内降雨量

Fig.1 Rainfall in the whole growing period of potato

#### 1.3 测定指标与方法

1.3.1 土壤含水量的测定及灌水量的计算 采用 取土烘干法测得土壤的含水量,在每个小区内随机 选取5个位置,在每个位置选择湿润区水平方向上 滴灌带下、两垄之间及其插值,垂直方向上每20 cm 取一层,取土深度为0~40 cm,取其平均土壤含水量 作为该处理的土壤含水量,灌水定额通过下列公式 获得:

$$M = 10 \times \gamma \times H \times (\theta_i - \theta_j) \tag{1}$$

式中,M为灌水量(mm); $\gamma$ 为土壤容重(g·cm<sup>-3</sup>);H为计划湿润层深度(cm); $\theta_i$ 为田间持水量; $\theta_j$ 为测定的土壤质量含水率。

1.3.2 株高和叶面积的测定 在各个试验小区随 机选取马铃薯植株 3 株,分别在播种后 60、80、100、120、135 d 测定其株高和叶面积指数。株高用卷尺 测量;叶面积用打孔法测量,先用打孔器打出已知面积的叶片,烘干后与植株总叶片干物质进行比较,得出系数,用已知面积乘以系数即为植株叶面积。其计算公式为:

叶面积指数(LAI)=单株叶面积

1.3.3 马铃薯干物质量的测定 在每个小区随机 挖取3株马铃薯,洗净并用滤纸吸干水分,用剪刀将 其根、茎、叶、块茎分离分别装入样品袋中,放入烘 箱在105℃下杀青30 min,然后75℃~80℃烘干至 恒重,再使用电子天平(精度为0.001 g)称重,确定 其地上、地下部分马铃薯干物质量。

1.3.4 产量测定 在每个小区随机选取 10 株马铃薯进行单株测产,统计各单株马铃薯每个块茎的重量、数量和分级,记录商品薯重量(块茎重量大于 75g)和大块茎重量(块茎重量大于 200 g)。收获时每

个小区选取中间两垄马铃薯进行测产。

1.3.5 水分利用效率和灌溉水利用效率的计算水分利用效率(WUE)和灌溉水分利用效率(IWUE)的计算:

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

$$IWUE = Y/I \tag{4}$$

式中,Y为作物产量( $kg \cdot hm^{-2}$ );I 为作物全生育期的灌水量(mm);ET 为作物全生育期累积耗水量(mm)。

作物耗水量通过水量平衡法<sup>[19]</sup> 得到, 计算如下式:

$$ET = I + P + K - R_0 - D - \Delta S \tag{5}$$

式中,I为灌水量(mm);P为有效降雨量(mm);K为地下水补给量(mm); $R_0$ 为地表径流量(mm);D为深层渗漏量(mm); $\Delta S$ 为马铃薯生育期内土壤储水量变化(mm)。由于试验区干旱少雨,且滴灌单次灌水量较少,无法形成地表径流,故 $R_0$ 取值0;考虑到试验区距地表1m以下的土壤水分变化很小,且计划湿润层深度为40cm,故不考虑地下水补给(K)和深层渗漏量(D)。有效降雨量 $P_0$ 计算如下:

$$P_0 = aP \tag{6}$$

式中,P 为某次降雨量(mm);a 为降雨有效利用系数,一般认为[20],某次降雨量小于5 mm时,a=0;当某次降雨量为6~50 mm时,a=1.0~0.8;当某次降雨量大于50 mm时,a=0.80~0.70。

1.3.6 肥料偏生产力(PFP) 计算:

$$PFP = Y/T \tag{7}$$

式中,Y为作物产量( $kg \cdot hm^{-2}$ );T为作物全生育期投入 N,P,O, 和 K,O 的总量( $kg \cdot hm^{-2}$ )。

1.3.7 品质测定 取各小区成熟期马铃薯块茎,测定马铃薯中淀粉、维生素 C 和还原性糖含量,用碘比色法测定淀粉含量,钼蓝比色法测定维生素 C 含量,3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原性糖含量[21]。

#### 1.4 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2010 进行基础整理和误差计算,主要指标的显著性分析通过 SPSS 23.0 软件中的 Duncan 比较法获得;图形通过 Origin 8.0 软件绘制。

### 2 结果与分析

#### 2.1 水肥调控对马铃薯生长的影响

2.1.1 株高和叶面积指数 株高和叶面积指数是反映马铃薯生长状况的重要指标,从表 2 中可以看出,施肥量和灌水处理均对马铃薯株高有极显著影响(P<0.01),两者的交互作用对马铃薯株高的影响

只在前期极显著(播种后 60、80 d 和 100 d)。施肥和灌水处理均对马铃薯的叶面积指数有极显著影响(P<0.01)(除播种后 60 d)。播种后 80、120 d,施肥和灌水处理的交互作用对叶面积指数有极显著影响(P<0.01)。

播种后 60 d 不同处理的株高差异不明显,同一灌水水平下,株高均随着施肥量的增加缓慢增加,到 F3 达到最大,之后随施肥量增加有所降低,说明在马铃薯生长前期,过多施肥会对马铃薯株高有所抑制;对于相同的施肥量,在 F1 水平时马铃薯株高随着灌水下限的提高而逐渐增加,在 F2、F3、F4 水平时,株高均在 W2 达到最高。播种后 80 d 其生长规律与苗期没有太大差异, F4 水平对于植株株高

的抑制更加明显。播种后 100 d 各处理差异显著,在 F1 水平下株高随着灌水下限的增加逐渐增加,W3 比 W1、W2 分别增加了 5.43%、3.16%,在 F2、F3、F4 水平下均在 W2 最高;在同一灌水下限下 F3 水平的株高最高,分别比 F1、F2 和 F4 水平增加了 28.08%、15.03%和 12.25%。在播种后 120 d 和 135 d,施肥和灌水的交互作用对株高影响不明显,同一灌水下限水平下,株高随施肥量增加先增加后减少,在同一施肥水平下 W2 的马铃薯株高表现最好。F3W2 处理达到最大株高(75.85 cm),F1W1 处理株高最低,为 56.48 cm。

从表 2 中可知, 马铃薯的叶面积指数随着生育期的推进呈先增大后减小的趋势, 最大值出现在播

表 2 水肥调控对马铃薯株高和叶面积指数的影响

Table 2 Effects of regulating water and fertilizer on plant height and LAI of potato

生长指标	施肥量	灌水量		播种后天数	女 The days afte	er seeding/d	
Growth indicator	Fertilizer rate	Irrigation amount	60	80	100	120	135
		W1	34.42f	39.46g	49.18h	54.08g	56.48g
	F1	W2	37.04e	41.05fg	50.26gh	60.86 de	63.56e
		W3	37.75de	42.52f	51.85g	58.59f	60.53f
		W1	37.00e	43.83f	54.49f	62.81d	63.12e
	F2	W2	40.67ab	52.48ed	58.18d	68.89b	70.89h
株高		W3	$39.69 \mathrm{bc}$	50.14d	55.78ef	65.61c	67.67c
Plant height/cm		W1	39.53bc	46.96e	59.22ed	65.80c	67.00c
	F3	W2	41.58a	60.71a	69.45a	73.80a	75.85a
		W3	$39.39 \mathrm{bc}$	57.94b	65.10b	70.56b	73.79a
		W1	38.75ed	43.06f	54.96f	59.82ef	62.60e
	F4	W2	39.52bc	53.74c	60.22e	68.49b	69.18b
		W3	39.11cd	51.70ed	57.45de	61.90 de	64.83d
显著性检验	(F值) Significant leve	el (F value)					
施	記形水平 Fertilization le	vel	* *	* *	* *	* *	* *
i	灌溉水平 Irrigation leve	el	* *	* *	* *	* *	* *
	×灌溉 Fertilization×irri		* *	* *	* *	NS	NS
生长指标	施肥量	灌水量		播种后天数	The days after	er seeding/d	
Growth indicator	Fertilizer rate	Irrigation amount	60	80	100	120	135
		W1	0.70f	0.98i	1.38f	0.80g	0.6f
	F1	W2	0.74ef	1.27gh	1.78e	1.55ed	0.81e
		W3	0.78def	1.06hi	1.61ef	1.19ef	0.65f
		W1	0.77def	1.38g	1.59ef	1.16f	0.78e
	F2	W2	$0.87 \mathrm{cde}$	2.24cd	2.59c	1.70ed	0.88d€
叶面积指数		W3	0.96c	2.02 de	2.10d	1.46de	0.80e
LAI		W1	0.91cd	1.84ef	2.46c	1.54cd	0.92cd
	F3	W2	0.96c	3.27a	3.38a	2.53a	1.14a
		W3	1.00c	2.59b	3.01b	2.23b	0.99bc
		W1	1.00c	1.77f	2.30ed	1.52cd	0.84 de
	F4	W2	1.15b	2.37c	2.89b	1.78c	1.02b
		W3	1.33a	2.22cd	2.55c	1.44de	0.87 de
显著性检验	E(F值) Significant leve	el (F value)					
施	NS	* *	* *	* *	* *		
ì	NS	* *	* *	* *	* *		
	×灌溉 Fertilization×irri		NS	* *	NS	* *	NS

注:\*表示差异显著(P<0.05),\*\*表示差异极显著(P<0.01),NS表示差异不显著。同一生长指标下同一列数字后的不同字母表示在P<0.05差异显著,下同。

Note: \* means significant difference (P<0.05), while \* \* means highly significant difference (P<0.01), NS means no significant difference (P<0.05). Different letters in the same column under the same growth indicator indicate significant difference in Duncan at P<0.05. The same below.

种后 100 d,之后叶面积指数逐渐降低。播种后 100 d,F3W2 处理的叶面积指数最大,F3 水平下 W2 分 别比 W1、W3 的叶面积指数高 37.4%、12.3%; W2 水 平下 F3 分别比 F1、F2 和 F4 的叶面积指数高 89.9%、30.5%和17.0%。播种后60d叶面积指数均 随着灌水量和施肥量的提高而提高,最大出现在 F4W3 处理,说明在生长前期马铃薯叶面积指数受 水肥影响较大:播种后80d,在同一施肥水平下W2 水平表现出明显的优势,叶面积指数比 W1、W3 增 加了53.4%、15.9%;而灌水水平一致时,随着施肥 量的增多,叶面积指数先增加后减少,F3 的叶面积 指数最高,比 F1、F2 和 F4 分别增加了 132.7%、 36.6%和21.0%,说明施肥量过多会对马铃薯生长 产生负作用:播种后 100 d 叶面积指数持续增大,变 化趋势与播种后 80 d 一致;播种后 120 d 和 135 d 作物的叶面积指数开始降低,这是因为到了马铃薯 生长后期,植株所吸收的养分开始向块茎中转移, 作物叶面积增长缓慢,甚至停止生长、脱落,导致其 叶面积指数下降。

2.1.2 总干物质累积量 植物的干物质量在一定程度上可以反映出植物在一段时间内的物质积累,图 2 为不同水肥处理下马铃薯随生育期推进总干物质量的变化。由图 2 可知,在全生育期施肥量和灌水处理对马铃薯干物质量均有极显著影响(P<0.01),施肥和灌水处理的交互作用对播种后 60、80、100、120 d 的干物质量有极显著影响(P<0.01),对播种后 135 d 的干物质量有显著影响(P<0.05)。

在生长前期马铃薯干物质增长缓慢,随着生育 期的推进,干物质积累加快,在生长后期干物质增 长速度趋于平缓。播种后 60 d 各处理之间差异显 著,F4W3处理下马铃薯干物质最高,为 3 221.1 kg ·hm<sup>-2</sup>。播种后 80 d 施肥水平为 F1 时,总干物质 积累表现为随着灌水下限的提高而增加,施肥水平 为 F2、F3、F4 时,在各施肥水平下总干物质量随灌 水下限变化均表现为: W2>W3>W1: 灌水水平一致 时 F3 水平的干物质量比 F1、F2 和 F4 显著增加 130.6%、32.03%和17.93%。播种后100 d各个处理 的总干物质量相对于播种后80 d增加显著,在施肥 水平一致时各灌水下限水平的总干物质量均表现 为:W2>W3>W1;在灌水下限水平相同时,各施肥水 平的总干物质量均变现为 F3>F4>F2>F1。播种后 120 d 各处理的变化规律与播种后 100 d 变化不大。 播种后 135 d 各处理的总干物质积累量达到最大, 在施肥量一致时 W2 的干物质积累量最大,平均为 10 289.92 kg·hm<sup>-2</sup>,分别比 W1、W3 高 22.2%、 13.6%;在灌水下限水平相同时 F3 的总干物质积累量最大,为11 200.43 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>,比 F1、F2 和 F4 分别高 54.81%、25.91%和 15.52%,处理 F3W2 的总干物质累积量最大,平均为 12 729.95 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>。

#### 2.2 水肥调控对马铃薯产量和水肥利用的影响

表 3 列出了不同处理下马铃薯产量和水肥利用的情况。经过方差分析可知,施肥量和灌水处理以及灌水、施肥的交互作用对马铃薯产量、灌溉水分利用效率(IWUE)、水分利用效率(WUE)和肥料偏生产力(PFP)均达到极显著水平(P<0.01)。

从表 3 中可以看出,F3W2 处理的产量最大,为 50 397. 45 kg·hm<sup>-2</sup>,F4W2 处理次之,平均为 46 517.89 kg·hm<sup>-2</sup>,F1W1 的产量最低,为 29 858.60 kg·hm<sup>-2</sup>。在同一施肥水平,W2 水平的平均产量为 43 187.15 kg·hm<sup>-2</sup>,比 W1、W3 提高了 24.59%、5.26%;在同一灌水水平下,随着施肥量的增加,马铃薯产量均表现为先增大后减小,在 F3 水平产量达到最大值。F3 水平的平均产量为 44 691.32 kg·hm<sup>-2</sup>,比 F1、F2 和 F4 高 41.79%、10.98%和 6.34%。由此看出,W2 水平的土壤水分状况使得马铃薯根区的土壤水分条件最适合马铃薯的生长,W3 水平土壤透气性可能受到影响,影响马铃薯的生长。马铃薯的产量随着施肥量的增加而增加,但施肥过量会对马铃薯生长产生一定的抑制作用。

从表3中可以看出,在同一施肥水平下,随着灌 水下限水平的提高耗水量不断增加;在相同灌水水 平下,随着施肥量的增加耗水量呈先增加后减少的 趋势,在F3水平作物耗水量最大。从总体上可以 看出, WUE 和 IWUE 最大值均出现在 F3W2 处理, 分别为 93.44、170.32 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>, F1W3 处理 的 WUE 和 IWUE 均最小,分别为 61.37、115.09 kg· mm<sup>-1</sup>⋅hm<sup>-2</sup>。在同一施肥水平下 W2 灌水处理的 WUE 值平均为 81.34 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>, 比 W1、W3 高 15.53 %、7.54 %,差异显著。F1 施肥水平下 IWUE 随灌水下限的提高逐渐降低,F2、F3、F4 施肥 水平下 IWUE 均表现为 W2>W3>W1,差异显著。在 同一灌水水平下,WUE、IWUE 随施肥量的增加均呈 先增加后减小的趋势,F3 水平的 WUE 和 IWUE 最 大,分别比 F1、F2、F4 增加了 32.56%、7.06%、3.90% 和 22.91%、3.10%、6.21%。

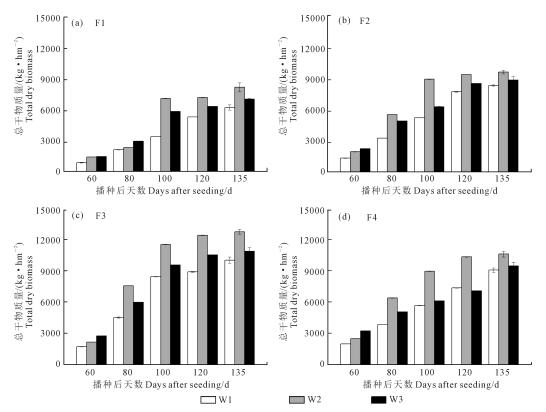
在灌水水平一致时,PFP 随着施肥量的增加逐渐降低,F1 施肥水平下最大,PFP 平均为 108.69 kg·kg<sup>-1</sup>,比 F2、F3 和 F4 分别增加了17.41%、41.06%和 87.50%;当施肥量相同时马铃薯 PFP 表现为 W2 >W3>W1,在 W2 水平下 PFP 平均为 90.73 kg·

kg<sup>-1</sup>,比W1、W3增加了21.65%、4.41%。肥料偏生 产力在处理 F1W2 处取得最大值, 为 102.96 kg· kg<sup>-1</sup>,在处理 F4W1 处取得最小值,为 49.95 kg· kg-1,各处理之间差异显著。

#### 水肥调控对马铃薯品质的影响

#### 马铃薯块茎质量分级 块茎是马铃薯的最

终产物,块茎的好坏直接影响到马铃薯产量和品 质。从表4可以看出,施肥量和灌水处理对马铃薯 单株块茎质量、商品薯质量和大块茎质量的影响均 达到极显著水平(P<0.01),灌水处理和施肥处理的 交互作用对单株块茎和商品薯的有极显著影响(P<  $0.01)_{\circ}$ 



水肥调控对马铃薯干物质量的影响

Effects of regulating water and fertilizer on dry weight of potato

水肥调控对马铃薯产量和水肥利用的影响

	Ta	ble 3 Effects of	regulating water and f	fertilizer on yield, water an	d fertilizer use efficiency of	potato	
试	<b>脸处理</b>	±6Jv ⊟.	产量	水分利用效率	灌溉水分利用效率	肥料偏生产力	
Experimental treatment		耗水量 ET/mm	Yield	WUE	IWUE	PFP	
			/(kg · hm <sup>-2</sup> )	$/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{mm}^{-1}\cdot\mathrm{hm}^{-2})$	$/(\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{hm}^{-2})$	$/(kg \cdot kg^{-1})$	
	W1	474.15	29858.60j	62.97i	133.81g	102.96c	
F1	W2	513.71	32665.81h	63.59 i	122.65h	112.64a	
	W3	522.00	32036.24i	61.37 j	115.09i	110.47b	
	W1	477.43	35302.86g	73.94 g	141.83e	81.16g	
F2	W2	533.24	43167.46c	80.95 d	156.48	99.24d	
	W3	544.18	42333.89d	77.79 f	144.65d	97.32e	
	W1	516.69	37278.67e	72.15 h	136.20f	64.27i	
F3	W2	539.36	50397.45a	93.44 a	170.32a	86.89f	
	W3	555.45	46397.86b	83.53 c	150.18c	80.00h	
	W1	499.08	36212.64f	72.56 h	132.47g	49.95k	
F4	W2	532.43	46517.89b	87.37 b	155.83b	64.16i	
	W3	542.87	43349.46c	79.85 e	141.68e	59.79j	
显著性检验(F 值) Significant level (F value)							
施	肥水平	-	* *	* *	* *	* *	
Fertiliz	Fertilization level						
灌注	既水平	-	* *	* *	* *	* *	
	tion level						
施用	E×灌溉	-	* *	* *	* *	* *	
Fertilizati	Fertilization×irrigation						

同一施肥水平下,单株块茎质量、商品薯质量、 大块茎质量均在 W2 水平下最大:其中, W2 水平单 株块茎平均质量为 900.11 g,比 W1、W3 高 24.59%、 5.26%, 商品薯平均质量为 677.68 g, 比 W1、W3 高 35.83%、16.06%; 大块茎平均质量为 447.60 g, 比 W1、W3 高 35.69%、21.64%。在同一灌水水平下, 马铃薯的单株块茎质量、商品薯质量、大块茎质量 总的趋势是随着施肥量的增加先增加后减少,在F3 水平达到最大值,随着施肥量增加单株块茎质量、 商品薯质量、大块茎质量反而下降,F3 水平的单株 块茎分别比 F1、F2 和 F4 高 41.79%、10.98% 和 6.34%, 商品薯质量分别比 F1、F2 和 F4 高 77.75%、 32.26%和16.39%,大块茎质量分别比F1、F2和F4 高 92.66%、36.27%和 14.82%。其中,处理 F3W2 的 单株块茎质量、商品薯质量、大块茎质量达到最大 值,分别为 1 050.32、858.70、574.48 g。

表 4 水肥调控对马铃薯块茎质量分级的影响 Table 4 Effects of regulating water and fertilizer on potato tuber grade

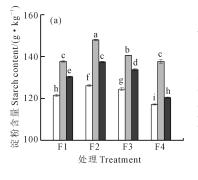
		on potato tui	oer grade				
施肥量	灌水量	块茎质量 Weight of tuber/g					
Fertilizer	Irrigation	单株块茎	大块茎	商品薯			
rate	amount	Tuber per plant	Large tuber	Commodity potato			
	W1	622.32j	227.38e	362.89j			
F1	W2	680.83h	302.29 de	461.80h			
	W3	667.70i	231.62e	421.99i			
	W1	735.79g	311.53cde	475.26g			
F2	W2	899.70c	415.33be	656.20c			
	W3	882.33d	349.52cd	544.05f			
	W1	776.97e	401.85bcd	617.63e			
F3	W2	1050.39a	574.48a	858.70a			
	W3	967.03b	490.41ab	739.68b			
	W1	754.75f	378.74cd	539.94f			
F4	W2	969.53b	498.31ab	734.03b			
	W3	903.50c	400.35 bed	629.98d			
显著性	检验(F值	1) Significant leve	el (F value)				
施肥水平 Fertilization level		* *	* *	* *			
灌溉水平		sk: sk:	* *	sk: sk			

NS

2.3.2 淀粉 淀粉是马铃薯块茎内的重要组成部 分,是马铃薯块茎中含量最多的营养物质。从图 3a 中可以看出,各处理之间差异明显,施肥量和灌水 处理及其交互作用均对马铃薯淀粉含量有极显著 影响(P<0.01)。在相同的施肥水平下, W2 处理块 茎内淀粉平均含量为 141 g·kg<sup>-1</sup>, 明显高于 W1、 W3 处理 15.32%、8.04%; 在相同的灌水水平下, 马 铃薯块茎淀粉含量随着施肥量的增加呈抛物线变 化,施肥量过高,淀粉产生负效应,其中,在F2水平 下块茎内淀粉含量达到最大,为 137.2 g·kg<sup>-1</sup>,其平 均含量比 F1、F3 和 F4 分别高 5.63%、3.20% 和 9.68%。处理 F2W2 的块茎淀粉含量最高,达到 148.0 g·kg<sup>-1</sup>,说明在该水肥条件下,马铃薯向下传 输的营养多,最有利于淀粉积累。

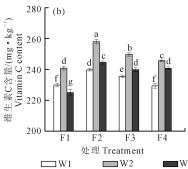
2.3.3 维生素 C 块茎内含有丰富的维生素 C,不同的水分和养分状况会对马铃薯块茎维生素 C 含量产生很大影响。由图 3b 可以看出,各处理之间差异显著,施肥量和灌水处理及其交互作用对马铃薯块茎维生素 C 含量均表现为差异极显著(P<0.01)。当施肥量水平一致时,W2 水平的维生素 C 含量最高,为 248.5 mg·kg<sup>-1</sup>,比W1、W3 高 6.37%、4.66%。对于相同的灌水水平,马铃薯块茎维生素 C 的含量随着施肥量的增加呈现先增加后减小的趋势,在 F2水平达到最大,为 247.4 mg·kg<sup>-1</sup>,分别比 F1、F3 和 F4 水平高6.69%、2.38%和 3.72%。在各个处理中 F2W2 处理马铃薯块茎内维生素 C 含量最高,为 258.0 mg·kg<sup>-1</sup>,说明该水肥条件下最有利于马铃薯维生素 C 的积累。

2.3.4 还原性糖 还原性糖是马铃薯代谢的中间产物,其含量的多少可以表明马铃薯代谢合成的强度,是评价马铃薯品质的一个重要指标。从图 3c 中可以看出,在不同施肥灌水处理下,各处理之间差异明显,施肥量和灌水处理及其交互作用对马铃薯块茎还原性糖含量均表现为极显著影响(P<0.01)。



Irrigation level 施肥×灌溉

Fertilizatio×irrigation



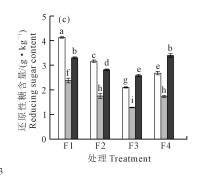


图 3 水肥调控对马铃薯块茎品质的影响

Fig.3 Effects of regulating water and fertilizer on tuber quality of potato

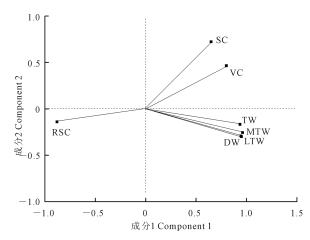
在相同施肥量水平下,W2 水平均比W1、W3 低,在F1、F2 水平下,块茎中还原性含量表现为W1>W3>W2,在F3、F4 水平下表现为W3>W1>W2,W3 水平下马铃薯块茎内还原性糖含量高是因为土壤水分含量过多,土壤透气性差。在同一灌水下限水平下,马铃薯块茎内还原性糖含量随着施肥量的增加先降低后升高,在F3 水平达到最低。其中,F3W2处理还原性糖含量最低,为1.38 g·kg<sup>-1</sup>。

#### 2.4 马铃薯品质的综合评价

只考虑单一特性或几个特性的优劣,并不能全 面反映马铃薯的品质,而应该对其进行全面系统科 学地综合评价。图 4 所示为采用主成分分析方法分 析马铃薯品质的各项指标。分析可知从单株块茎 质量、大块茎质量、商品薯质量、淀粉含量、维生素C 含量、还原性糖含量、块茎干物质质量7个成分中提 取了两个主成分,第一主成分占77.55%,第二个主 成分占14.75%,这两个主成分的累计方差贡献率达 到 92.30%, 所以可以用这两个主成分较好地代替上 述马铃薯7个品质指标来评价马铃薯品质。从图4 中可知,马铃薯各项指标主要集中在第一主成分的 0~1 范围内。对第一主成分贡献最大的是商品薯 质量和大块茎质量,负荷量为0.961、0.95,因此商品 薯质量和大块茎质量可作为第一主成分中的代表 性评价指标;对第二主成分贡献最大的是淀粉和维 生素 C,负荷量分别为 0.724、0.465,因此,淀粉和维 生素C可作为第二主成分中的代表性评价指标。 从图 5 马铃薯块茎品质主成分分析得分可以看出, 得分最高的是 F3W2 处理, F3W2 处理的各项指标 值比其他处理偏高,淀粉和维生素 C 含量相对其他 处理偏低,综合排名第一,综合排名第二的是 F4W2 处理。

# 3 讨论

本文研究了在滴灌条件下水肥调控对马铃薯生长、品质、产量及水肥利用的影响,基于产量和品质的综合评价,选出使马铃薯优质高产的水肥组合。结果表明,水肥调控对马铃薯的生长、品质、产量及水肥利用有不同程度的影响。本研究发现,在水肥调控对马铃薯生长的影响方面,不同的水肥调控水平对马铃薯生长影响显著,马铃薯株高在整个生育期中前期增速很快,而后增长速度逐渐变缓,这与前人研究一致[22]。在相同施肥水平下,马铃薯的株高、叶面积指数均随着灌水下限的提高先升高后减小,在W2水平下表现最好,这与江俊燕等[22]研究的灌水量越大,株高越大,灌水间隔越短,株高

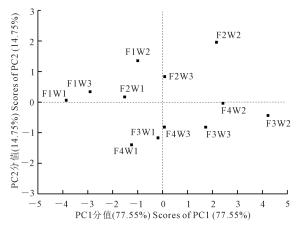


注:TW-单株块茎质量;LTW-大块茎质量;MTW-商品薯质量;SC-淀粉含量;RSC-还原糖含量;VC-维生素 C 含量;DW-块茎干物质质量

Note: TW- tuber weight; LTW- large tuber weight; MTW- marketable tuber weight; SC- starch contents; RSC- reducing sugar contents; VC- vitamin C; DW- tuber dry weight.

#### 图 4 马铃薯块茎品质主成分分析

Fig.4 Principal component analysis of potato tuber quality



#### 图 5 马铃薯块茎品质主成分分析得分

Fig.5 Principal component analysis (PCA) scores plot of a two-component PCA model of potato tuber quality

越高不尽相同,可能由于随着土壤水分调控下限的提高,灌水量也随之增加,但是马铃薯根部一直处于较高的土壤水分环境,不利于马铃薯的生长。张富仓等<sup>[15]</sup>研究表明,施肥量过少不利于马铃薯株高和叶面积的生长,而过量的施肥会对马铃薯的生长有一定的抑制作用。本研究发现灌水下限水平一致时,随着施肥量的增加马铃薯的株高、叶面积指数随着施肥水平先增加后减少,肥料施用过多会对马铃薯的生长产生负作用,这与前人的研究结果相似<sup>[15,23]</sup>。而干物质量在生长前期,相同施肥量下马铃薯干物质量受到灌水下限的影响表现为:W3>W2>W1;在生育后期,相同施肥量下马铃薯干物质量受到灌水下限的影响表现为:W2>W3>W1,这可能是

因为苗期之后,施肥量对马铃薯干物质量的影响较大<sup>[10]</sup>。而相同灌水水平下干质量随着施肥量的增加先增加后减少<sup>[15]</sup>。马铃薯干物质累积速率表现为"单峰式"变化,即生育前期干物质积累比较慢,播种后 80 d 开始,马铃薯积累速率加快,播种后 120 d 开始,增长速率又逐渐变慢,这与前人研究结果一致<sup>[24-25]</sup>。

马铃薯品质受到水分和养分供应的影响很大。 本研究发现,在同一施肥水平下,马铃薯的单株块 茎、大块茎、商品薯、淀粉含量、维生素 C 含量、还原 性糖含量在 W2 水平最高,这说明在相同肥量处理 下,适宜的灌水下限更加适合马铃薯品质的积 累[26]。宋娜和门福义等[26-27]发现在相同的水分条 件下,马铃薯的单株块茎质量、商品薯质量、块茎淀 粉含量和维生素C含量均随着施氮量的增加而逐 渐增加,但施氮量过多会使马铃薯的品质降低。本 试验中,在同一水分条件下,随着施肥量增加马铃 薯块茎单株结薯质量、商品薯质量、大块茎质量、淀 粉、维生素 C 含量均呈抛物线趋势变化,块茎还原 性糖含量先降低后升高。其中,单株块茎质量、商 品薯质量、大块茎质量在 F3W2 处理表现最优,而块 茎淀粉含量、维生素 C 含量在 F2W2 处理下表现 最优。

土壤水分状况和施肥量会直接影响作物的生 长发育和作物产量[28]。康跃虎等[29]发现,随着土 壤水势的提高,灌水量逐渐增加,产量和水分利用 效率呈现增大后减小的趋势,在土壤基质势为-25 kPa 左右最高。王立为等[30] 发现,随着施肥量的增 加,马铃薯的耗水量增加,但施肥量达到一定程度 后耗水量开始减少,过多施肥不利于水分利用效率 的提高,在多雨年中肥水平(施 N 90 kg·hm<sup>-2</sup>)可 以既能保证较高的水分利用效率也能保证较高的 产量。在本试验中,同一施肥水平下,马铃薯的产 量、水分利用效率、灌溉水分利用效率随土壤下限 水平的增加先增加后减少,W1 水平比 W2 的产量明 显下降,W3 水平下马铃薯可能由于受到根部渍水 的影响,产量也有一定程度的降低,W2 水平可以有 效地提高马铃薯的产量和水分利用效率,这与前人 研究一致[29];而灌水水平相同时,马铃薯产量随施 肥水平的增加呈先增加后减少的趋势[30-31],灌溉水 分利用效率和水分利用效率随施肥量呈现抛物线 变化趋势<sup>[30]</sup>,F3 水平可能由于影响到根区养分浓 度水平高,不利于植株吸水[14]。相同水分条件下, 肥料偏生产力随着施肥量的增加 PFP 呈现减小的 趋势[14,32];而在相同施肥水平下 PFP 值随着灌水下 限的提高先增加后减少。

在对马铃薯品质进行综合评价时,各单指标对 马铃薯品质所起的作用不尽相同,因此直接用这些 指标不能准确评价马铃薯的优劣。采用主成分分 析方法对不同处理马铃薯品质进行评价,可以在不 损失或较少损失原有指标变异信息的情况下,将多 个品质指标转换为一个或几个品质综合主成分的 评价变量,具有较好的代表性与客观性[33]。王秀康 等[34]利用主成分分析的方法,从马铃薯单株块茎重 量、大块茎重量、商品薯重量、淀粉等7项指标中提 取两个主要成分,描述了马铃薯品质的90.95%,并 通过最高得分的处理选出适合陕北地区的最佳施 肥量。侯飞娜等[35]将 11 个品质特性综合成为 3 个 主成分因子,代表了马铃薯全粉92.97%的原始数据 信息量,筛选出马铃薯全粉品质评价指标为乳化稳 定性、乳化活性、溶解度和粗纤维。在本研究中,将 单株块茎、商品薯质量、大块茎质量、淀粉、维生素 C、还原性糖、块茎干物质量7个指标放在同一水平 进行分析,提取出了两个主要成分,这两个成分可 以描述马铃薯 92.30%的数据信息量。综合评价马 铃薯品质,F3W2 处理排名第一,F1W1 处理排名最 后,可见 F3W2 处理对马铃薯品质达到了较好的水 肥耦合效应,而 F1W1 处理下限制了马铃薯品质的 积累。

# 4 结 论

不同的水肥调控对滴灌条件下马铃薯生长、品 质、产量及水肥利用效率有显著影响。同一施肥水 平下,W2 灌水处理较其他两种水分下限都更有利 于马铃薯生长、品质、产量及水肥利用效率的提高, 是适宜榆林沙地马铃薯生长发育的水分调控水平。 同一水分处理下,随施肥量的增加,马铃薯生长、品 质、产量、水分利用效率随着施肥量的增加呈现先 增加后减小的趋势,生长指标、产量及水分利用效 率在 F3 水平达到最大,淀粉和维生素 C 含量在 F2 水平最高,而肥料偏生产力随施肥量增加不断减 小,在 F1 施肥水平达到最大值。基于主成分分析 评价马铃薯品质,将7个品质特性转化为两个主成 分因子,代表了马铃薯 92.30%的原始信息量,F3W2 处理排名第一。综合考虑马铃薯产量、品质、水肥 利用效率,在本试验条件下,土壤水分为 W2 水平 (苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期、成熟 期的土壤水分下限分别为 65%、70%、75%、65%、 65%),生育期总灌水量为 296 mm,施肥量采用 F3 水平(200N-80P,O<sub>5</sub>-300K,O kg·hm<sup>-2</sup>)时,马铃薯 产量最高,为 50 397.45 kg·hm<sup>-2</sup>,灌溉水分利用效率较高为 170.32 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>-2</sup>,水分利用效率为93.44 kg·mm<sup>-1</sup>·hm<sup>2</sup>,品质较好,是榆林沙地滴灌条件下马铃薯生产中适宜的水肥组合。

#### 参考文献:

- [1] 屈冬玉,谢开云,金黎平,等.中国马铃薯产业发展与食物安全 [J].中国农业科学,2005,38(2):358-362.
- [2] 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(3):166-166.
- [3] 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.
- [4] Zhang X Y, Pei D, Chen S Y. Root growth and soil water utilization of winter wheat in the North China Plain [J]. Hydrological Processes, 2004, 18(12):2275-2287.
- [5] Yuan B Z, Nishiyama S, Kang Y H. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato [J]. Agricultural Water Management, 2003, 63(3):153-167.
- [6] 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(3);248-264.
- [7] 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.
- [8] Shock C C, Holmes Z A, Stieber T D, et al. The effect of timed water stress on quality, total solids and reducing sugar content of potatoes [J]. American Journal of Potato Research, 1993, 70(3):227-241.
- [9] 周娜娜, 张学军, 秦亚兵, 等. 不同滴灌量和施氮量对马铃薯产量和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2004, (6):11-12, 16.
- [10] Badr M A, El-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, 2012, 110:9-15.
- [11] Ierna A, Mauromicale G. Potato growth, yield and water productivity response to different irrigation and fertilization regimes [J]. Agricultural Water Management, 2018, 201:21-26.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Mohammod M J, Zuraiqi S. Enhancement of yield and nitrogen and water use efficiencies by nitrogen drip-fertigation of garlic [J]. Journal of Plant Nutrition, 2003, 26(9):1749-1766.
- [15] 张富仓, 高月, 焦婉如, 等. 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, 48(3):270-278.
- [16] Sammis T W. Comparison of sprinkler, trickle, subsurface and furrow irrigation methods furrow crops [J]. Agronomy Journal, 1980, 72 (5):701-704.
- [17] 焦婉如,张富仓,高月,等.滴灌施肥生育期比例分配对榆林市 马铃薯生长和水分利用的影响[J]. 排灌机械工程学报,2018,36 (3):257-266.
- [18] 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生长的影响[J].中国农业科学,2006,39(7):1419-1427.
- [19] Allen R G, Pereira L S, Howell T A, et al. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy [J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(6):899-920.
- [20] 汪志农. 灌溉排水工程学[M].(第2版). 北京: 中国农业出版社, 2000;39.
- [21] 张永成,田丰.马铃薯试验研究方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007:166-172.
- [22] 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.
- [23] Yang K J, Wang F X, 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.
- [24] 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,2013,24(2):423-430.
- [25] 高聚林, 刘克礼, 张宝林, 等. 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.
- [26] 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.
- [27] 门福义,毛雪飞,刘梦云,等.马铃薯不同品种淀粉积累生理基础研究-淀粉积累与磷酸化酶、蔗糖转化酶的关系[J].中国马铃薯,1997,(1):1-6.
- [28] 沈荣开,王康,张瑜芳,等.水肥耦合条件下作物产量、水分利用和根系吸氮的试验研究[J].农业工程学报,2001,17(5):35-38.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 杨开静. 滴灌条件下马铃薯田间土壤水、气交互效应与调控机理研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
- [32] 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, 29 (36):268-272.
- [33] 王峰,杜太生,邱让建.基于品质主成分分析的温室番茄亏缺灌溉制度[J].农业工程学报,2011,27(1):75-80.
- [34] 王秀康, 杜常亮, 邢金金, 等. 基于施肥量对马铃薯块茎品质影响的主成分分析[J]. 分子植物育种, 2017, 15(5);2003-2008.
- [35] 侯飞娜,木泰华,孙红男,等. 马铃薯全粉品质特性的主成分分析与综合评价[J]. 核农学报, 2015, 29(11):2130-2140.