

基于熵权法和 TOPSIS 法优化马铃薯钾肥种类和滴灌量组合

孙鑫¹, 张富仓^{1*}, 杨玲¹, 张少辉¹, 王海东¹, 强生才^{1,2}, 郭金金¹

(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/西北农林科技大学旱区节水农业研究院, 陕西杨凌 712100; 2 山西农业大学城乡建设学院, 山西太谷 030800)

摘要:【目的】探寻滴灌施肥条件下实现沙土马铃薯高产优质和水肥高效的管理方式, 为陕北马铃薯滴灌水钾管理提供科学依据。【方法】以‘青薯 9 号’为试验材料, 于 2020 年马铃薯生长期, 在陕北榆林风沙区设置 W1 (60% ET_c, 198.4 mm, ET_c 为作物需水量)、W2 (80% ET_c, 246.2 mm) 和 W3 (100% ET_c, 294 mm) 3 个灌水水平及不施钾肥 (K0)、KCl、K₂SO₄ 和 KNO₃ 4 种钾肥处理, 调查了马铃薯的生长状况、产量、品质, 计算了水分利用效率 (WUE) 和肥料偏生产力 (PFP)。【结果】钾肥种类与滴灌量及其交互作用对马铃薯产量及其构成要素、WUE 和 PFP 有显著影响。相同钾肥处理下, W3 灌溉水平的马铃薯块茎产量、淀粉含量、净收益平均分别比 W1 水平提高了 19.8%、3.8%、33.9%, 分别比 W2 水平提高了 8.1%、1.6%、15.8%。不同灌水量下, 不同钾肥的增产效果不同。W1 水平下, KCl 处理的马铃薯干物质累积量、产量显著低于 K₂SO₄ 和 KNO₃ 处理; W2 和 W3 水平下, KNO₃ 处理的马铃薯干物质累积量、产量、商品薯重和净收益显著高于 KCl 和 K₂SO₄ 处理, 而 K₂SO₄ 和 KCl 处理之间无显著差异。就水钾交互而言, W3+KNO₃ 处理的产量显著高于其他处理 9.2%~55.0%; W3+K₂SO₄ 处理的淀粉含量最高, 还原糖含量最低; W3+KCl 处理的产投比最大, W1+KNO₃ 处理的 WUE 最大。基于熵权法和 TOPSIS 分析得出各处理优劣顺序为 W3+KNO₃>W3+KCl>W2+KNO₃>W3+K₂SO₄>W2+K₂SO₄>W3K0>W2+KCl>W1+KNO₃>W1+K₂SO₄>W1+KCl>W2K0>W1K0。【结论】基于熵权法和 TOPSIS 分析, 在陕北沙土马铃薯种植系统中兼顾高产、优质和水肥高效的组合为硝酸钾肥配合 100% 作物需水量。

关键词: 马铃薯; 滴灌量; 钾肥种类; 产量; 品质; 经济效益

Optimal combination of potassium fertilizer and drip irrigation for potato production based on entropy weight method and TOPSIS analysis

SUN Xin¹, ZHANG Fu-cang^{1*}, YANG Ling¹, ZHANG Shao-hui¹, WANG Hai-dong¹, QIANG Sheng-cai^{1,2}, GUO Jin-jin¹
(1 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; 2 College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030800, China)

Abstract: 【Objective】To explore the combination of water and potassium for optimized yield, quality, and production efficiency of potato under drip fertigation conditions in northern Shaanxi Province. 【Methods】Field experiments were conducted to study the responses of potato growth, yield and quality to different types of potassium fertilizer and irrigation amount in Yulin, northern Shaanxi. ‘Qingshu No. 9’ was used as the test material. The three irrigation levels were 60%, 80%, and 100% of the crop water requirement (W1, 60% ET_c, 198.4 mm; W2, 80% ET_c, 246.2 mm; W3, 100% ET_c, 294 mm). The four K fertilizer treatments were - no K fertilizer control (K0), KCl, K₂SO₄ and KNO₃. The water use efficiency (WUE) and partial fertilizer productivity (PFP) were calculated. 【Results】The K fertilizer type, irrigation level and their interaction significantly affected potato yield and qualities, WUE and PFP. Under the same K fertilizer, the yield, starch content and net

收稿日期: 2021-07-12 接受日期: 2021-09-17

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); 教育部高等学校创新引智计划 (B12007)。

联系方式: 孙鑫 E-mail: sunxin970701@163.com; * 通信作者 张富仓 E-mail: zhangfc@nwsuaf.edu.cn

income of W3 treatment were 19.8%, 3.8%, 33.9% higher than W1, and 8.1%, 1.6% and 15.8% higher than W2 treatment, respectively. K fertilizer had different yield increasing effect under different irrigation amount. At W1, the dry matter accumulation and yield of KCl were significantly lower than those of K_2SO_4 and KNO_3 . At W2 and W3, the dry matter accumulation, total and marketable yield, and net income of KNO_3 were significantly higher than those of KCl and K_2SO_4 , while the latter two had no significant difference. Considering the irrigation $\times$ fertilizer interaction, the yield of W3+ KNO_3 was 9.2%–55.0% higher than other treatment combination. W3+ K_2SO_4 had the highest starch and the lowest reducing sugar content. W3+KCl elicited the largest production to investment ratio, while W1+ KNO_3 had the highest WUE. Based on entropy weight method and TOPSIS analysis, the comprehensive effect was in order of W3+ KNO_3 >W3+KCl>W2+ KNO_3 >W3+ K_2SO_4 >W2+ K_2SO_4 >W3K0>W2+KCl>W1+ KNO_3 >W1+ K_2SO_4 >W1+KCl>W2K0>W1K0. 【Conclusions】 According to entropy weight method and TOPSIS, the optimum combination for high yield, quality and efficiency of potato in sandy soil is KNO_3 with 100% of potato water requirement in northern Shaanxi Province.

Key words: potato; irrigation amount; potassium fertilizer type; yield; quality; economic benefits

马铃薯是世界第四大粮食作物, 其对提高人们生活水平和保证粮食安全具有重要作用。中国马铃薯种植面积和总产量居世界第一位, 但与发达国家相比, 在单产和品质方面仍有很大的进步空间^[1]。陕北地区具有适合马铃薯生长的土质、气温和光热条件, 是中国马铃薯主产区之一, 在中国马铃薯生产格局中占有举足轻重的地位^[2]。而陕北地区水资源短缺, 存在灌溉与施肥技术落后、地面灌溉、肥料资源浪费等问题, 严重制约陕北马铃薯的发展^[3-4]。因此, 如何在充分利用水资源的条件下同步提高马铃薯的产量和品质, 是陕北马铃薯发展的关键。

马铃薯是喜钾作物, 钾肥可以明显促进马铃薯生长, 提高产量和水分利用效率, 改善品质, 增强销售竞争能力^[5-6]。大多以往研究仅侧重最佳供钾水平^[7-10], 对不同钾肥种类的效果重视不够, 不同钾肥的研究结果也存在争议^[11-15]。有研究表明作物施用硫酸钾可有效提高作物的产量和品质, 获得高收益^[11-12]。也有研究表明氯化钾的增产和提高淀粉含量的效果优于硫酸钾^[13-14]。硝酸钾肥料同时含有氮和钾, 水溶性强, 易于植物吸收, 施用之后无残留, 在粮食、果蔬和烟草等各类作物施用均取得了良好的增产提质效果^[15-19], 但在马铃薯上较少施用。滴灌施肥可以根据土壤的水分养分状况以及作物水肥需求规律, 适时、适量对作物进行灌溉施肥, 可以满足作物生育期对水肥的需求, 提高作物根区水肥分布的均匀度, 显著提高作物产量和水肥利用效率^[20-22]。马铃薯是对水分非常敏感的作物, 前人就滴灌施肥技术在马铃薯作物进行了大量研究, 主要集中在氮水耦合、灌溉频率和施肥比例等方面。张富仓等^[23]通过

3个灌水水平和3个施肥水平的交互作用, 确定了陕北马铃薯适宜的水肥用量。焦婉如等^[4]从产量和节水的角度确定了滴灌施肥条件下适宜的肥料分配比例。

目前, 陕北地区马铃薯施钾不足的农户高达96.9%^[24], 影响了该地区马铃薯的产量。滴灌施肥是目前推广的节水节肥的农业技术措施。我们研究了滴灌施肥条件下, 有利于马铃薯生长、产量、品质、水肥利用效率和经济效益的钾肥种类与滴灌量组合, 并运用熵权法-理想点法(TOPSIS)对马铃薯经济效益、品质、农学效益的综合效益进行评价分析, 以期获得沙土马铃薯生产最佳水钾管理模式, 为陕北榆林马铃薯的优质、高产、高效施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2020年5—10月份在陕西省榆林市“西北农林科技大学马铃薯试验示范站”进行(东经109°43', 北纬38°23', 海拔1050 m)。试验站属于干旱半干旱大陆性季风气候。年均气温8.6℃, 多年平均降水量371 mm, 主要集中在6—9月, 年蒸发量1900 mm左右, 年日照时数2900 h, 年总辐射是 606.7×10^7 J/m², 无霜期167天。试验地土壤0—40 cm土层为砂壤土, 40—100 cm土层为沙土。耕层(0—40 cm)土壤容重为1.73 g/cm³, 铵态氮含量为6.35 mg/kg、硝态氮11.45 mg/kg、速效磷4.43 mg/kg、速效钾107 mg/kg、pH为8.1、土壤有机质含量为4.31 g/kg。2020年马铃薯生育期的降水量为234.90 mm。

1.2 试验设计

试验以当地主栽品种‘青薯9号’为材料,在大田滴灌施肥条件下,控制相同的施钾量,设置3个灌水水平分别为198.4 mm (60% ET_c , W_1)、246.2 mm (80% ET_c , W_2)、294 mm (100% ET_c , W_3)和4个钾肥种类分别为 K_0 (不施钾肥)、 KCl 、 K_2SO_4 、 KNO_3 ,共12个处理,各处理重复3次。供试肥料为尿素(含N 46.0%)、磷酸二铵(含N 18%,含 P_2O_5 46%)、硫酸钾(含 K_2O 50%,含S 16%)、氯化钾(含 K_2O 60%)和硝酸钾(含 K_2O 46%,含N 13.5%)。根据前期水钾耦合试验确定施肥量为N 200 kg/hm²、 P_2O_5 80 kg/hm²、 K_2O 270 kg/hm²(硝酸钾中的氮肥折算到总的施氮量)。灌水量通过FAO56-彭曼公式及马铃薯不同生育期作物系数计算得到。

作物蒸发蒸腾量(ET_0)计算公式^[25]:

$$ET_0 = \frac{0.480 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900(e_s - e_a)u_2}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (2)$$

式中, R_n 为净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量[MJ/(m²·d)]; T 为日平均温度(°C); u_2 为地面以上2 m高处的风速(m/s); e_s 为空气饱和水汽压(kPa); e_a 为空气实际水汽压(kPa); Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率(kPa/°C); ET_c 为作物需水量; K_c 为作物系数,马铃薯全生育期内作物系数取值为苗期0.5,块茎形成期0.8,块茎膨大期1.2,淀粉积累期0.95,成熟期0.75^[26]。

每个处理设置3个重复,共计36个小区。小区

长12 m,宽3.6 m,小区面积为43.2 m²。马铃薯于2020年5月8日播种,9月26日收获。采用机械起垄、人工种植的方式,行距0.9 m,株距约25 cm,播种深度8—10 cm,出苗后用机械进行覆土,覆土后垄高40 cm。大田马铃薯的灌溉采用垄上滴灌方式,在每行垄上布设一条16 mm的薄壁迷宫式滴灌带,滴头流量为2 L/h,间距为30 cm。用水表严格控制每个小区的灌水量,灌溉施肥采用1/4-1/2-1/4模式,即前1/4水量灌清水,中间1/2打开施肥罐施肥,后1/4再灌清水冲洗。滴灌施肥采用容量压差式施肥方式,灌水前一天将肥料溶解在15 L的小型施肥灌中,在灌水中期肥料随水滴施。除出苗水外,每8天进行一次灌水施肥,当灌溉时发生降雨,则推迟灌水,并从灌溉水量中减去此灌水周期内有效降水量。如果有效降水量大于灌溉量,则只灌水20 mm进行施肥。试验共进行12次灌水,8次施肥,苗期和块茎形成期肥料施用量为全生育期的20%,块茎膨大期55%,淀粉积累期25%^[4],整个生育季的灌溉和施肥过程如图1所示。

1.3 测定指标与方法

1.3.1 叶面积指数(LAI)测定 马铃薯播种后50、70、90、110、125和140天,在每个小区选取具有代表性的3株植株,用打孔法测定单株叶面积^[27],并计算叶面积指数^[28]:

叶面积指数=单株叶面积×单位土地面积植株数/单位土地面积

1.3.2 成熟期干物质量的测定 在马铃薯成熟期,每个小区挖取3株具有代表性的马铃薯植株,用剪刀将根、茎、叶、块茎分离,清水洗净用滤纸吸干

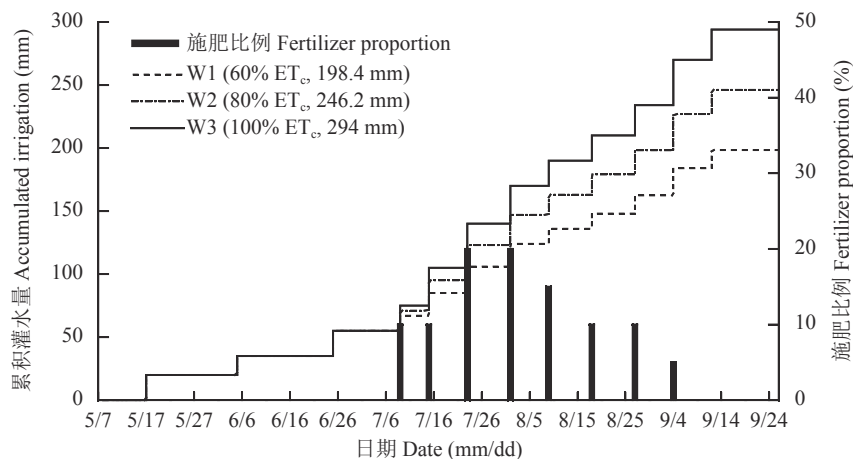


图1 马铃薯生育期灌水和施肥管理

Fig. 1 Management of irrigation and fertilizer application during the potato growing season

表面水分, 分别装入档案袋中, 放入烘箱在 105℃ 下杀青 30 min, 调至 75℃ 烘干至恒重, 使用电子天平测定各部分重量。

1.3.3 产量及其构成的测定 马铃薯成熟后, 每个小区随机挖取具有代表性的 6 株马铃薯, 统计单株马铃薯每个块茎的重量、块茎数量和分级, 记录单株块茎重、商品薯重 (单个块茎大于 75 g) 和大块茎重 (单个块茎大于 150 g)。最后随机选择 2 垄马铃薯, 平行挖取 2 m 距离, 测定面积为 3.6 m², 每个小区重复 3 次, 测定马铃薯单位面积产量。

1.3.4 水分利用效率 (WUE) 和肥料偏生产力 (PFP) 的计算^[29-30]:

$$WUE = Y/ET \quad (3)$$

$$PFP = Y/T \quad (4)$$

式中, Y 为马铃薯产量 (kg/hm²); T 为马铃薯全生育期投入 N、P₂O₅ 和 K₂O 的总量 (kg/hm²); ET 为马铃薯生育期的耗水量 (mm), 用水量平衡法计算^[31]:

$$ET = P + U + I - D - R - \Delta W \quad (5)$$

式中, P 为降雨量 (mm); U 为地下水补给量 (mm); I 为灌水量 (mm); R 为径流量 (mm); D 为深层渗漏量 (mm), ΔW 为试验初期和末期土壤水分变化量 (mm)。由于试验区地下水埋藏较深, 地势平坦, 且滴灌湿润深度较浅, U 、 D 和 R 均忽略不计。故上式简化为:

$$ET = P + I - \Delta W \quad (6)$$

1.3.5 品质测定 取各小区成熟期马铃薯块茎, 测定马铃薯淀粉和还原性糖含量, 用碘比色法测定淀粉含量, 3,5-二硝基水杨酸比色法测定还原性糖含量^[32]。

1.3.6 基于熵权法和 TOPSIS 的多目标评价 熵权法是根据各指标的变化程度, 利用信息熵计算各指标的熵权, 再通过熵权对各指标的权重进行修正, 从而得到更客观的指标权重^[33]。TOPSIS (order preference by similarity to ideal solution) 技术是一种根据评价对象与理想目标的接近程度进行排序的方法, 用来评价现有对象的相对优势和劣势^[34]。

1) 建立综合性能评价指标体系

以小区试验 12 个处理 (n) 为可行性方案, 以单位面积产量 (X_1)、商品薯 (X_2) 淀粉含量 (X_3)、还原性糖含量的倒数 (X_4)、WUE (X_5)、PFP (X_6) 和净收益 (X_7) 7 个指标为目标变量构建原始矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$ 。

2) 应用熵权法确定各指标权重值

熵权法是利用信息熵, 根据各指标的变化程度计算各指标的熵权, 然后通过熵权对各指标的权重进行修正, 从而得到更客观的指标权重。对原矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$ 进行无量纲处理, 得到矩阵 Y , 然后确定各

指标的熵权 W_j 。

$$y_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_j)}{\max(r_j) - \min(r_j)}, j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$p_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (8)$$

$$E_j = -\ln(n)^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (9)$$

$$W_j = \frac{1 - E_j}{m - \sum E_j} \quad (10)$$

式中: p_{ij} 是第 i 个评估对象在第 j 个指标下的比重; E_j 是第 j 个指标的熵值。

3) 理想点法 (TOPSIS) 效益评价及水钾供应模式筛选

理想点法 (TOPSIS) 的基本思想是通过定义决策问题的理想解与负理想解, 然后在可行方案集中找到一个方案, 使其既距理想解的距离最近又离负理想解的距离最远, 然后对可行方案进行筛选。首先对原始矩阵 $R=[r_{ij}]_{n \times m}$, 进行归一化处理, 得到矩阵 $B=[b_{ij}]_{n \times m}$, 再乘以熵权, 得到加权矩阵 Z , 然后计算各目标值与理想点之间的欧氏距离 S_i^+ 和 S_i^- , 以及各目标的相对贴近度 C_i^* , 再根据方案的相对贴近度对方案进行排序, 形成决策依据。

$$b_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n r_{ij}^2}}, j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

$$z_{ij} = W_j b_{ij} \quad (12)$$

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^*)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (z_{ij} - z_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (15)$$

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2019 进行数据整理, 采用 SPSS 23.0 统计分析软件进行方差分析, Duncan 新复极差法分析显著性。图形通过 Origin 9.0 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 钾肥种类和滴灌量对叶面积指数的影响

图 2 所示, 随生育期的推进, 马铃薯生育期叶

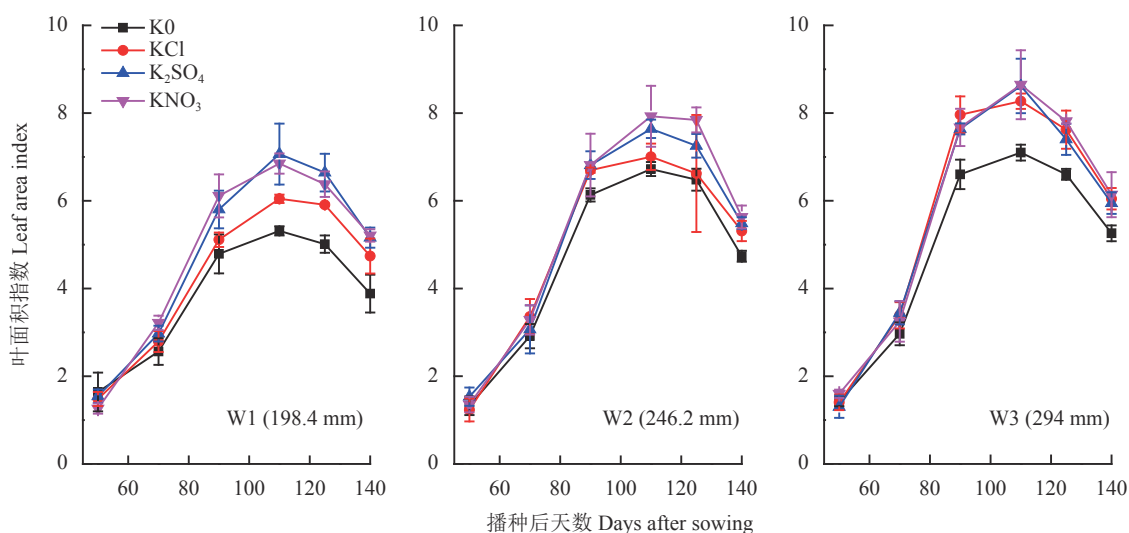


图 2 不同钾肥种类和滴灌量组合下马铃薯生育期叶面积指数

Fig. 2 Leaf area index of potato under different combination of potassium fertilizer type and drip irrigation amount

面积指数 (LAI) 呈现先增加后减小的趋势, 各处理在播种后 110 天 (淀粉积累期) 达到最大值。马铃薯播种 90 天以后, 灌溉量和钾肥种类对马铃薯的 LAI 影响极其显著 ($P < 0.01$), 交互作用对 LAI 无明显影响 ($P > 0.05$)。整体来看, 同一钾肥处理下, LAI 随灌水量的增加而增大, W2、W3 水平的 LAI 在播种 70 天后增长速度高于 W1 水平, 说明较高的水分提高了肥料的有效性; 在相同灌水量下, 施钾显著增大 LAI, W1 和 W2 水平时, KCl 处理的 LAI 低于 K_2SO_4 和 KNO_3

处理, W3 水平时, 3 种钾肥处理的 LAI 无明显差异。马铃薯 LAI 在播种 110 天后开始下降, 这已是在生育后期, 营养物质主要被转移至块茎, 叶片变黄而凋萎。

2.2 钾肥种类和滴灌量对成熟期干物质累积的影响

图 3 显示, 灌水量和钾肥种类对成熟期干物质累积影响极其显著 ($P < 0.01$), 而交互作用对成熟期干物质累积无明显影响 ($P > 0.05$)。各器官干物质累积表现为块茎 > 茎 > 叶 > 根, W3 + KNO_3 处理干物质累积量

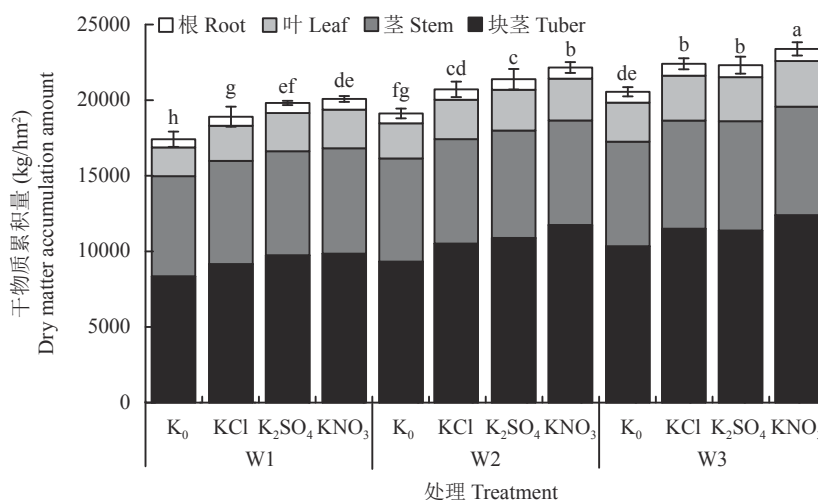


图 3 不同钾肥种类和滴灌量下马铃薯干物质累积量

Fig. 3 Dry matter accumulation of potatoes under different combination of potassium fertilizer type and drip irrigation amount

注: K0—不施钾肥; W1—灌水量 198.4 mm; W2—灌水量 246.2 mm; W3—灌水量 294 mm。柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: K0—No potassium fertilization; W1—Irrigation amount 198.4 mm; W2—Irrigation amount 246.2 mm; W3—Irrigation amount 294 mm. Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

显著高于其他处理，为 23389 kg/hm²，高于其他处理 4.4%~34.3%。相同钾肥处理下，成熟期干物质累积随灌水量的增大而增大，施用硝酸钾时，W3 灌溉水平比 W1、W2 水平分别高 16.5%、5.6%。相同灌水量下，施钾处理的干物质累积显著高于不施钾处理 11.6%，W1 水平时，K₂SO₄、KNO₃ 处理分别显著高于 KCl 处理 4.8%、6.2%，增大灌水量，KCl 和 K₂SO₄ 的干物质累积量无明显差异，而 KNO₃ 处理显著高于 KCl 和 K₂SO₄ 处理。

2.3 钾肥种类和滴灌量对马铃薯产量及其构成的影响

表 1 表明，滴灌量和钾肥种类对马铃薯单位面积产量、单株块茎重、商品薯重、大块茎重的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)，灌水和钾肥种类互作对产量和单株块茎重影响极显著 ($P<0.01$)，对商品薯重和大块茎重影响显著 ($P<0.05$)。W3+KNO₃ 处理下产量、块茎重、商品薯重和大块茎重均显著高于其他

处理，其中产量显著高于其他处理 9.2%~55.0%。相同钾肥处理时，马铃薯块茎重随灌水量的增加而增加，W3 水平的产量、块茎重、商品薯重、大块茎重分别比 W1 和 W2 灌水水平平均高 19.8%、31.9%、47.7%、51.1% 和 8.1%、11.9%、15.1%、20.1%。在 W1 灌水水平时，KNO₃ 和 K₂SO₄ 处理块茎质量显著高于 KCl 处理和 K0 处理，增大灌水量，KNO₃ 处理产量和商品薯重均高于 KCl 和 K₂SO₄ 处理，而 KCl 和 K₂SO₄ 处理无明显差异，在 W2 和 W3 灌水水平，KCl 处理的大块茎分别比 K₂SO₄ 高 6.0% 和 6.6%，说明在适宜的水分条件下，KCl 较 K₂SO₄ 更有利于块茎的膨大。

2.4 钾肥种类和滴灌量对 WUE 和 PFP 的影响

图 4 显示，钾肥种类、灌水及其交互作用对马铃薯 WUE 和 PFP 的影响均达到极显著水平 ($P<0.01$)。W1+KNO₃ 处理 WUE 高于其他处理 2.2%~21.6%，为 12.24 kg/m³；W3K0 处理的 PFP 最大，为 7.06

表 1 不同钾肥种类和滴灌量组合下马铃薯产量及其构成
Table 1 Potato yield and its components under different combination of potassium fertilizer type and drip irrigation amount

灌溉水平 Irrigation level	钾肥 K fertilizer type	产量 Yield (t/hm ²)	单株块茎重 Tuber weight (g/plant)	商品薯重 Commodity potato weight (g/plant)	大块茎重 Large tuber weight (g/plant)
W1 (198.4 mm)	K0	39.85 f	874.98 h	632.04 g	395.58 j
	KCl	45.68 e	1025.90 g	804.95 f	480.10 i
	K ₂ SO ₄	47.57 d	1173.16 e	932.28 de	559.51 gh
	KNO ₃	49.31 d	1207.80 e	966.98 d	604.06 fg
W2 (246.2 mm)	K0	45.35 e	1081.32 f	882.10 e	529.80 hi
	KCl	49.32 d	1286.32 d	1102.81 c	675.22 de
	K ₂ SO ₄	51.89 c	1323.44 cd	1094.97 c	636.73 ef
	KNO ₃	55.44 b	1358.17 c	1204.18 b	722.69 cd
W3 (294 mm)	K0	51.57 c	1299.68 d	1075.17 c	665.02 e
	KCl	56.56 b	1410.81 b	1252.02 b	787.40 b
	K ₂ SO ₄	54.99 b	1412.44 b	1234.24 b	738.41 bc
	KNO ₃	61.76 a	1526.60 a	1367.56 a	889.60 a
显著性检验 Significance test					
灌溉水平 Irrigation level (W)		**	**	**	**
钾肥种类 K fertilizer type (K)		**	**	**	**
W×K		**	**	*	*

注：商品薯和大块茎分别为大于75和150 g的薯。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。*— $P<0.05$; **— $P<0.01$ 。
Note: Commodity potato and large tuber are those >75 g and 150 g potato. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$). *— $P<0.05$; **— $P<0.01$.

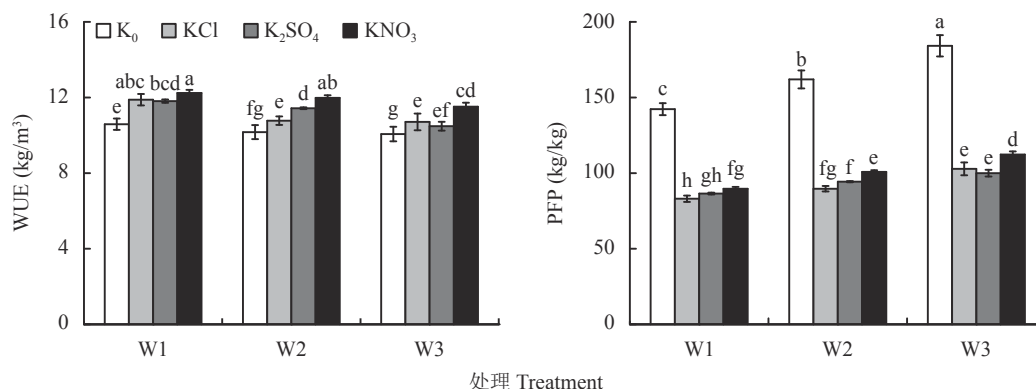


图 4 不同钾肥种类和滴灌量组合下马铃薯的水分利用效率 (WUE) 和肥料偏生产力 (PFP)

Fig. 4 WUE and PFP of potato under different combination of potassium fertilizer type and drip irrigation amount

注: W1—灌水量 198.4 mm; W2—灌水量 246.2 mm; W3—灌水量 294 mm。柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: W1—Irrigation amount 198.4 mm; W2—Irrigation amount 246.2 mm; W3—Irrigation amount 294 mm. Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

kg/kg。相同钾肥处理时, WUE 随灌水量增加而降低, W1 水平的 WUE 比 W2、W3 分别高 4.9%、8.8%, 而 PFP 随灌水量增加而增加。灌水量相同时, 施用钾肥显著增加了 WUE, 却降低了 PFP, 就钾肥处理而言, 硝酸钾处理的 WUE 和 PFP 高于硫酸钾和氯化钾处理。

2.5 钾肥种类和滴灌量对马铃薯品质的影响

图 5 所示, 灌水量和钾肥种类对淀粉和还原糖含量影响达到极显著水平 ($P < 0.01$), 交互作用对淀粉和还原糖含量无显著影响 ($P > 0.05$)。W3+K₂SO₄ 处理淀粉含量最高, 占块茎比重的 17.86%, 还原糖含量最低, 占块茎含量的 0.30%, 比其余处理低 1.8%~30.9%。相同钾肥处理时, 块茎淀粉含量随灌水量的增加显著增加, W3 水平比 W1、W2 水平分别高

3.8%、1.6%; 还原糖含量随灌水量的增加而降低。W1 水平时, KCl 处理的淀粉含量显著低于 K₂SO₄ 和 KNO₃ 处理, 灌水量增加到 W2 和 W3 水平时, 3 种钾肥处理间无显著差异, 变化趋势为 K₂SO₄ > KCl > KNO₃; W1 和 W2 水平时, KCl 处理的还原糖含量显著高于 K₂SO₄ 和 KNO₃ 处理, 灌水量增加到 W3 水平时, 3 种钾肥处理间无显著差异, 变化趋势为 K₂SO₄ < KNO₃ < KCl。

2.6 钾肥种类和滴灌量对马铃薯经济效益的影响

钾肥种类和滴灌量对马铃薯经济效益的影响见表 2。W3+KNO₃ 的总投入、净收益均达到最大值, 分别为 16904、44860 元/hm²; W1K₀ 处理总投入、总收益和净收益均低于其他处理。产投比在 W3+KCl 处理达到最大值, 为 3.66, W1K₀ 产投比最小, 为

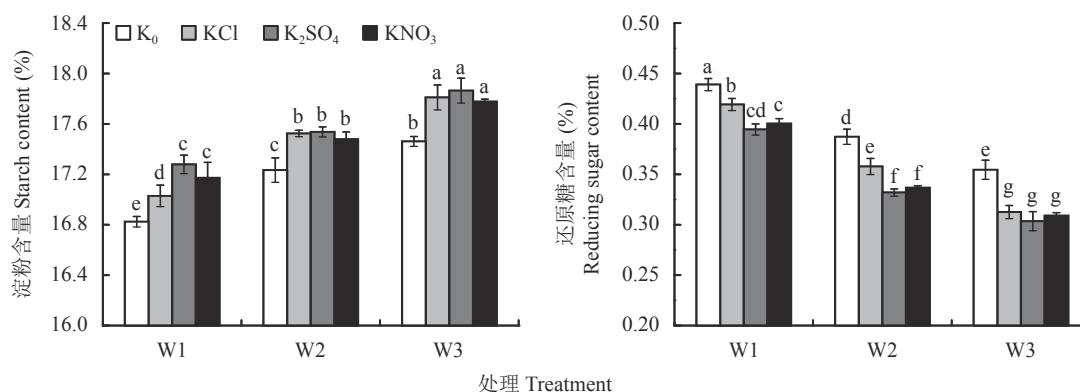


图 5 不同钾肥种类和滴灌量下马铃薯的品质

Fig. 5 Tuber quality of potato under different combination of potassium fertilizer type and drip irrigation amount

注: W1—灌水量 198.4 mm; W2—灌水量 246.2 mm; W3—灌水量 294 mm。柱上不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: W1—Irrigation amount 198.4 mm; W2—Irrigation amount 246.2 mm; W3—Irrigation amount 294 mm. Different letters above the bars indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表 2 不同钾肥和滴灌量组合下马铃薯的经济效益

Table 2 Economic benefits of potato under different potassium fertilizers and drip irrigation amount

灌溉水平 Irrigation level	钾肥 Potassium fertilizer	投入 Input (yuan/hm ²)			总收益 Income (yuan/hm ²)	净收益 Net income (yuan/hm ²)	产投比 Input/ output
		水费 Water fee	化肥投入 Fertilizer input	总投入 Total input			
W1 (198.4 mm)	K0	793.6	1255	14049	39847 f	25798 i	2.84 f
	KCl	793.6	2290	15084	45681 e	30597 h	3.03 e
	K ₂ SO ₄	793.6	3145	15939	47569 d	31631 gh	2.98 e
	KNO ₃	793.6	3728	16522	49319 d	32798 fg	2.99 e
W2 (246.2 mm)	K0	984.8	1255	14240	45347 e	31107 gh	3.18 d
	KCl	984.8	2290	15275	49319 d	34044 ef	3.23 cd
	K ₂ SO ₄	984.8	3145	16130	51889 c	35759 de	3.22 cd
	KNO ₃	984.8	3728	16713	55444 b	38732 c	3.32 bc
W3 (294 mm)	K0	1176	1255	14431	51569 c	37138 cd	3.57 a
	KCl	1176	2290	15466	56556 b	41089 b	3.66 a
	K ₂ SO ₄	1176	3145	16321	54986 b	38665 c	3.37 b
	KNO ₃	1176	3728	16904	61764 a	44860 a	3.65 a

注：总投入包括人工设施费用(包括农药、种子、人工、滴灌设备等，共计 12000 元/hm²)、水费和化肥投入，水肥费用按照当地价格计算，马铃薯按照市场价格 1.0 元/kg 计算，净收益=总收益-总投入。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: The total input includes labor costs (including pesticides, seeds, labor and drip irrigation equipment, amounts to 12000 yuan/hm²), water fee and fertilizer input. Water and fertilizer costs are calculated according to local prices. The potato is calculated according to the market price of 1.0 yuan/kg. Net revenue = total revenue – total input. Values followed by different letters in a column indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

2.84，显著低于其他处理。在相同钾肥处理时，净收益和产投比均随灌水量的增加而增加，W3 处理平均净收益比 W1、W2 分别高 33.9%、15.8%。同一水分处理时，施钾显著提高净收益，W3 水平时，KNO₃ 处理的净收益分别显著高于 KCl 和 K₂SO₄ 处理 9.2% 和 16.0%。

2.7 基于熵权法和 TOPSIS 的水钾管理优化

作物高产和经济效益是农民追求的目标，品质是顾客的需求，提高 WUE 是干旱农业水资源高效利用的核心。马铃薯的还原糖含量与贮藏时间密切相关，马铃薯还原糖含量越低越容易存储。由于试验施肥量相同，不考虑 PFP。故本研究以小区试验 12 个处理为可行方案，以单位面积产量 (X_1)、商品薯 (X_2) 淀粉含量 (X_3)、还原性糖含量的倒数 (X_4)、WUE (X_5) 和净收益 (X_6) 6 个指标构建原始矩阵，进行归一化处理，通过熵权法得到各个指标的权重，最后通过 TOPSIS 计算得到各处理优劣顺序为 W3+KNO₃>W3+KCl>W2+KNO₃>W3+K₂SO₄>W2+K₂SO₄>W3K0>W2+KCl>W1+KNO₃>W1+K₂SO₄>W1+KCl>

W2K0>W1K0 (表 3)，当灌水量为 W3 水平，施用硝酸钾时各目标最佳。

3 讨论

叶面积直接影响植物光合产物的合成与积累，进而影响作物干物质的积累和产量^[4]。生育期内任何时期的水分胁迫都会明显减少马铃薯的群体叶面积和产量，且随着胁迫时间的延长影响效应加重^[35]。本试验不同灌水量对马铃薯叶面积指数、干物质累积、产量有显著影响 ($P < 0.01$)，各指标均随灌水量的增加而增加，说明充足的灌水有助于植株生长，这与前人研究^[23]一致。施用钾肥能够促进茎叶的生长，适当推迟生长中心和营养中心转移，显著提高块茎的膨大速率而达到增产^[5-6]。研究表明，不同钾肥对作物产量均有一定的增加作用，而不同试验条件下钾肥增产效果不尽相同^[11-15]。有研究表明施用硫酸钾作物增产效果优于氯化钾^[11-12]和硝酸钾^[36]。也有研究表明，氯化钾在一定范围内可以替代硫酸钾，更有利于钾素的吸收^[37-38]，但是硝酸钾增产效果最好^[24]。

表 3 各目标值与理想点之间的欧氏距离 S_i^* 和 S_i^- 以及相对距离 C_i^*

Table 3 The euclidean distances S_i^* and S_i^- between each target value and the ideal point and the relative closeness C_i^* of each target

灌溉水平 Irrigation level	钾肥 K fertilizer type	S_i^*	S_i^-	C_i^*	排名 Ranking
W1 (198.4 mm)	K0	0.045	0.003	0.065	12
	KCl	0.035	0.015	0.297	10
	K ₂ SO ₄	0.030	0.018	0.385	9
	KNO ₃	0.028	0.022	0.434	8
W2 (246.2 mm)	K0	0.033	0.013	0.287	11
	KCl	0.023	0.024	0.507	7
	K ₂ SO ₄	0.018	0.028	0.610	5
	KNO ₃	0.013	0.034	0.728	3
W3 (294 mm)	K0	0.023	0.025	0.525	6
	KCl	0.012	0.037	0.756	2
	K ₂ SO ₄	0.015	0.036	0.709	4
	KNO ₃	0.005	0.045	0.907	1

施用钾肥促进了马铃薯植株生长, 增加成熟期干物质累积和产量。本研究表明, 不同钾肥在不同灌水条件下有所差异, 在 W1 水平时, 氯化钾处理的干物质累积和产量显著低于硫酸钾和硝酸钾处理 ($P<0.05$), 随着灌水量的增大, 氯化钾处理和硫酸钾无明显差异。这可能是由于低水量时根区氯化钾浓度过高, 根区保护酶系统防御功能减弱, 进而影响作物根系的生长发育^[38]。本试验 W3+KNO₃ 处理的成熟期干物质累积和产量显著高于其他处理, 成熟期干物质累积和产量分别高于其他处理 4.4%~34.3% 和 9.2%~55.0%。这说明高水与硝酸钾组合水钾的耦合效应更好, 通过促进作物生长增大了薯块, 硝酸钾处理显著优于其他两种钾肥, 一方面可能是本试验土质为沙土, 保水保肥性较差, 滴灌施肥周期为 8 天的土壤湿润深度 0—40 cm 与马铃薯根系集中层吻合, 分次施肥满足作物不同生育期对水肥的需要^[34]。另一方面硝酸钾中的硝酸根能够为作物提供易被植物吸收的硝态氮, 作为信号因子的硝酸根能够促进细胞分裂素的产生, 进而促进细胞膨大和碳水化合物的积累^[39]。此外, 硝酸钾处理土壤中同时存在尿素和硝态氮两种氮素形态, 可能更有利于作物生长^[40]。

品质是决定马铃薯经济效益的直接因素。植物需要钾来进行糖的转运和淀粉的合成, 而马铃薯块茎富含淀粉, 对钾有较高的需求。适量的钾肥可降

低还原糖含量^[41], 增加马铃薯蛋白质、维生素 C 和淀粉含量^[5-6]。本试验在相同钾肥处理下, 马铃薯的淀粉含量随灌水量增大而增加, 还原糖随灌水量增大而减小, 说明充足的灌水更适宜提高马铃薯品质, 与王英等^[42]研究结果一致, 这可能是因为沙土保水能力较差。不同钾肥均可以改善马铃薯品质, 其改善效果略有差异, W3+K₂SO₄ 处理的淀粉含量最高, 还原糖含量最低, 与谷贺贺等^[43]研究硫酸钾对作物品质的改善效果整体上优于氯化钾一致。但是, 与王小英等^[24]研究硝酸钾降低了马铃薯淀粉含量不同, 可能是水分设置和马铃薯品种不同造成。因此, 不同钾肥对马铃薯品质的作用机制有待进一步研究。

提高水肥利用效率是半干旱区水资源短缺情况下作物增产的主要研究方向。水分影响土壤养分的有效性, 土壤养分则通过作物的生长发育影响土壤水分的吸收、利用。合理的水肥调控可以达到以肥调水, 以水促肥的目的, 进而提高水肥利用效率^[20-22]。本试验与前人研究^[23]一致, 灌溉和施肥对 WUE 有交互作用, 灌水降低了 WUE。PFP 随灌水量的增加而增加, 这表明钾可以通过渗透调节和气孔调节来提高对水分的吸收利用^[38], 较多的土壤水分利于肥料作用的发挥。就钾肥作用而言, 不施钾处理的 PFP 显著高于施钾处理, 3 种钾肥较不施钾处理均显著降低了 PFP, 硝酸钾处理的 PFP 总体高于硫酸钾和氯化钾处理, 这是硝酸钾处理产量较高的原因。

单一处理往往难以兼顾高产优质的多种目标, TOPSIS 方法已广泛应用于各领域进行多目标优化^[44-45]。而在 TOPSIS 计算过程中, 重要的是确定各指标的权重。Wang 等^[34]和 Rasool 等^[45]设置各指标权重相等。熵权法是一种典型的基于多样性的加权方法, 根据方案之间数据属性的多样性计算权值属性, 采用熵权法可以构造权重矩阵, 确定各指标的权重。本研究将熵权法与理想点法相结合, 对马铃薯经济效益、品质、WUE 以及 PFP 进行了综合评价分析, 得出 W3+KNO₃ (100% ETc, 硝酸钾) 为陕北马铃薯高产优质的最佳水钾滴灌施肥模式, 本研究结果可为陕北马铃薯水肥管理研究提供科学依据。

4 结论

不同水钾组合对滴灌条件下马铃薯生长、产量和经济效益等有显著影响。在同一钾肥处理下, 马铃薯成熟期干物质累积、产量、商品薯、淀粉含量、PFP 和经济效益均随灌水量增加而显著增加, 还原

糖和 WUE 随灌水增加而减小。在低水量时, 氯化钾处理的产量显著低于硫酸钾和硝酸钾处理; 增加灌水量, 硫酸钾和氯化钾产量无显著差异, 硝酸钾处理的马铃薯产量及其构成要素高于氯化钾和硫酸钾处理, 其通过促进马铃薯块茎膨大来增加产量。综合考虑马铃薯生长、产量、经济效益、水肥利用率和品质等因素, 本研究基于熵权法和 TOPSIS 分析得出各处理优劣顺序为: $W3+KNO_3 > W3+KCl > W2+KNO_3 > W3+K_2SO_4 > W2+K_2SO_4 > W3K0 > W2+KCl > W1+KNO_3 > W1+K_2SO_4 > W1+KCl > W2K0 > W1K0$, 即 $W3+KNO_3$ 处理 (施用硝酸钾, 灌水量为 100% ETc) 可在较高的经济投入下, 获得高产优质的马铃薯, 且水肥利用效率较高。

参考文献:

- [1] 罗善军, 何英彬, 罗其友, 等. 中国马铃薯生产区域比较优势及其影响因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(5): 137–144.
Luo S J, He Y B, Luo Q Y, *et al.* The regional comparative advantages of potato production in China and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(5): 137–144.
- [2] 关佳晨, 蔡海龙. 我国马铃薯生产格局变化特征及原因分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 92–100.
Guan J C, Cai H L. Analysis on the changes and reasons of potato production pattern in China[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2019, 40(3): 92–100.
- [3] 侯翔皓, 张富仓, 胡文慧, 等. 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[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(1): 85–96.
Hou X H, Zhang F C, Hu W H, *et al.* Effects of irrigation frequency and fertilizer rate on growth, tuber yield and nutrient uptake of drip-irrigated potato[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2019, 25(1): 85–96.
- [4] 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.
Jiao W R, Zhang F C, Gao Y, *et al.* Effects of fertilizer application rate of drip irrigation fertilization in various growing stages on growth and water use efficiency of potato in Yulin City[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2018, 36(3): 257–266.
- [5] 方晨成. 钾肥对马铃薯生长发育影响及钾相关基因的表达分析[D]. 四川成都: 四川农业大学硕士学位论文, 2018.
Fang C C. Effects of potash fertilizer on potato growth and expression analysis of potassium related genes[D]. Chengdu, Sichuan: MS Thesis of Sichuan Agricultural University, 2018.
- [6] 汤立阳. 钾素对马铃薯生长、产量及品质的影响[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2018.
Tang L Y. Effect of potassium application on growth, yield and quality of potato[D]. Harbin, Heilongjiang: MS Thesis of Northeast Agricultural University, 2018.
- [7] Abbas M S, Gaber E I, Zied S T A, *et al.* Evaluation of potassium sources, rates and pattern on the yield and quality traits of fertigated wheat grown in sandy soil[J]. Pakistan Journal of Biological Sciences, 2020, 23(3): 213–222.
- [8] Kang W Q, Fan M S, Ma Z, *et al.* Luxury absorption of potassium by potato plants[J]. American Journal of Potato Research, 2014, 91(5): 573–578.
- [9] 尹梅, 曾庆凤, 张琼, 等. 减量分施钾肥对旱地马铃薯产量和钾肥利用率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(2): 1–7, 36.
Yin M, Zeng Q F, Zhang Q, *et al.* Effect of reduced K amount and split application on yield and nutrient utilization of potato on upland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(2): 1–7, 36.
- [10] Grzebisz W, Szczepaniak W, Bocianowski J. Potassium fertilization as a driver of sustainable management of nitrogen in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. Field Crops Research, 2020, 254: 107824.
- [11] 龚成文, 冯守疆, 赵欣楠, 等. 不同钾肥品种对甘肃中部地区马铃薯产量及品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 112–117.
Gong C W, Feng S J, Zhao X N, *et al.* Effects of different potassium fertilizers on yield and quality of potato in central Gansu Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3): 112–117.
- [12] 李倩, 李丽杰, 王斌, 张志勇. 不同类型钾肥对花生叶片生理生化特性及产量的影响[J]. 山东农业科学, 2019, 51(9): 172–176.
Li Q, Li L J, Wang B, Zhang Z Y. Effects of different kinds of potassium fertilizers on leaf physiological and biochemical characteristics and yield of peanut[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2019, 51(9): 172–176.
- [13] 刘汝亮, 李友宏, 王芳, 等. 两种钾源对马铃薯养分累积和产量的影响[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]. Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(1): 143–146.
- [14] Hütsch B W, Keipp K, Glaser A K, Schubert S. Potato plants (*Solanum tuberosum* L.) are chloride-sensitive: Is this dogma valid? [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(8): 3161–3168.
- [15] 王千, 张淑香, 依艳丽. 硝酸钾和硫酸钾对番茄幼苗生长、根系形态及钾素吸收和生理利用效率的影响[J]. 核农学报, 2012, 26(2): 391–395, 402.
Wang Q, Zhang S X, Yi Y L. Effect of potassium nitrate and sulphate on growth, root morphological traits, potassium uptake and utilization efficiency of tomato seedlings[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(2): 391–395, 402.
- [16] 熊增华, 王兴富, 王石军, 薛红魁. 我国硝酸钾产业发展现状与展望[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(5): 49–53.
Xiong Z H, Wang X F, Wang S J, Xue H K. Current status and prospect of potassium nitrate development in China[J]. Industrial Minerals & Processing, 2021, 50(5): 49–53.
- [17] 何志强. 浅议我国钾肥生产技术现状及未来展望[J]. 盐科学与化工, 2018, 47(8): 1–5.

- He Z Q. The status and development direction of production technology of potassium fertilizer in China[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2018, 47(8): 1–5.
- [18] Wei S W, Wang S M, Dong X C, *et al.* The effect of different potassium fertilizers on fruit flavor quality of ‘Xinliqihao’ pear[J]. *Agricultural Biotechnology*, 2019, 8(5): 79–85.
- [19] 薛如君, 高天, 蒋彬虎, 等. 不同硝酸钾滴灌追肥用量对烤烟产质量的影响[J]. *节水灌溉*, 2019, (11): 10–14, 21.
- Xue R J, Gao T, Jiang B H, *et al.* Effects of different amount of KNO₃ drip-fertigation on yield and quality of flue-cured tobacco[J]. *Water Saving Irrigation*, 2019, (11): 10–14, 21.
- [20] 张富仓, 严富来, 范兴科, 等. 滴灌施肥水平对宁夏春玉米产量和水肥利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(22): 111–120.
- Zhang F C, Yan F L, Fan X K, *et al.* Effects of irrigation and fertilization levels on grain yield and water-fertilizer use efficiency of drip-fertigation spring maize in Ningxia[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(22): 111–120.
- [21] 岳文俊, 陈喜靖, 王维汉, 张富仓. 不同氮处理对温室膜下滴灌甜瓜产量和品质的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(3): 461–469.
- Yue W J, Chen X J, Wang W H, Zhang F C. Effects of different nitrogen treatments on yield and quality of greenhouse muskmelon under mulched drip irrigation condition[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(3): 461–469.
- [22] Zou H Y, Fan J L, Zhang F C, *et al.* Optimization of drip irrigation and fertilization regimes for high grain yield, crop water productivity and economic benefits of spring maize in Northwest China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 230: 105986.
- [23] 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.
- Zhang F C, Gao Y, Jiao W R, *et al.* 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, 48(3): 270–278.
- [24] 王小英, 方玉川, 高青青, 等. 不同钾肥品种对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J]. *陕西农业科学*, 2019, 65(11): 27–31.
- Wang X Y, Fang Y C, Gao Q Q, *et al.* Effects of different potassium fertilizer varieties on agronomic characters, yield and quality of potato[J]. *Shaanxi Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 65(11): 27–31.
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 56[J]. Roma, 1998, 300(9): D05109.
- [26] Kassem M A. Effect of drip irrigation frequency on soil moisture distribution and water use efficiency for spring potato planted under drip irrigation in a sandy soil[J]. *Irrigation and Drainage*, 2008, 25(4): 1256–1278.
- [27] 乔富廉. 植物生理学实验分析测定技术[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2002.
- Qiao F L. Plant physiology experimental analysis and determination technology[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2002.
- [28] Watson D J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I: variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years[J]. *Annals of Botany*, 1947, 11(41): 41–76.
- [29] Cassman K G, Gines G C, Dizon M A, *et al.* Nitrogen-use efficiency in tropical lowland rice systems: Contributions from indigenous and applied nitrogen[J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(1): 1–12.
- [30] 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.
- [31] Oweis T Y, Farahani H J, Hachum A Y. Evapotranspiration and water use of full and deficit irrigated cotton in the Mediterranean environment in northern Syria[J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1239–1248.
- [32] 张永成, 田丰. 马铃薯实验研究方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2007.
- Zhang Y C, Tian F. Potato experiment research method[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [33] Cheng M H, Wang H D, Fan J L, *et al.* Effects of soil water deficit at different growth stages on maize growth, yield, and water use efficiency under Alternate Partial root-zone irrigation[J]. *Water*, 2021, 13(2): 148–167.
- [34] Wang H D, Wang X K, Bi L F, *et al.* Multi-objective optimization of water and fertilizer management for potato production in sandy areas of northern China based on TOPSIS[J]. *Field Crops Research*, 2019, 240: 55–68.
- [35] 胡萌萌, 张继宗, 张立峰, 等. 水分胁迫及复水对马铃薯生长发育及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(2): 95–101, 121.
- Hu M M, Zhang J Z, Zhang L F, *et al.* Effects of water stress and rewetting on potato growth and yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(2): 95–101, 121.
- [36] 邓兰生, 林翠兰, 龚林, 等. 滴施不同钾肥对马铃薯生长及产量的影响[J]. *华南农业大学学报*, 2010, 31(2): 12–14, 27.
- Deng L S, Lin C L, Gong L, *et al.* Effect of different potassium fertilizers on growth and production of potato under fertigation[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2010, 31(2): 12–14, 27.
- [37] 陈焕丽, 郭竞, 张晓静, 等. 不同形态钾肥对马铃薯产量及品质的影响[J]. *中国瓜菜*, 2021, 34(4): 79–82.
- Chen H L, Guo J, Zhang X J, *et al.* Effects of different forms of potassium fertilizer on potato yield and quality[J]. *China Cucurbits and Vegetables*, 2021, 34(4): 79–82.
- [38] 张舒涵, 张俊莲, 王文, 李朝周. 氯化钾对干旱胁迫下马铃薯根系生理及形态的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018, (5): 77–84.
- Zhang S H, Zhang J L, Wang W, Li C Z. Influence of potassium chloride on the root physiology and morphology of potato under drought stress[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2018, (5): 77–84.
- [39] 周鹏, 彭福田, 魏绍冲, 彭勇. 氮素形态对平邑甜茶细胞分裂素水平和叶片生长的影响[J]. *园艺学报*, 2007, (2): 269–274.
- Zhou P, Peng F T, Wei S C, Peng Y. Effects of rhizosphere nitrate

- and ammonium on the level of cytokinins and leaf growth of *Malus hupehensis* Rehd[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, (2): 269–274.
- [40] Souza E F C, Soratto R P, Sandana P, *et al.* Split application of stabilized ammonium nitrate improved potato yield and nitrogen-use efficiency with reduced application rate in tropical sandy soils[J]. *Field Crops Research*, 2020, 254: 107847.
- [41] Yakimenko V N, Naumov N B. Potato tuber yield and quality under different potassium application rates and forms in west siberia[J]. *Agriculture*, 2018, 64(3): 128–136.
- [42] 王英, 张富仓, 王海东, 等. 滴灌频率和灌水量对榆林沙土马铃薯产量、品质和水分利用效率的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(12): 4159–4168.
- Wang Y, Zhang F C, Wang H D, *et al.* Effects of the frequency and amount of drip irrigation on yield, tuber quality and water use efficiency of potato in sandy soil of Yulin, northern Shaanxi, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(12): 4159–4168.
- [43] 谷贺贺, 李静, 张洋洋, 等. 钾肥与我国主要作物品质关系的整合分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(10): 1749–1757.
- Gu H H, Li J, Zhang Y Y, *et al.* Meta-analysis of the relationship between potassium fertilizer and the quality of main crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(10): 1749–1757.
- [44] 王煜, 俞双恩, 丁继辉, 等. 基于熵权TOPSIS模型评价不同施氮水平下水稻灌排模式[J]. *排灌机械工程学报*, 2020, 38(7): 720–725.
- Wang Y, Yu S E, Ding J H, *et al.* Entropy weight TOPSIS model-based evaluation of rice irrigation and drainage modes at different nitrogen application levels[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2020, 38(7): 720–725.
- [45] Rasool G, Guo X P, Wang Z C, *et al.* Coupling fertigation and buried straw layer improves fertilizer use efficiency, fruit yield, and quality of greenhouse tomato[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 239: 106239.