



水肥调控对马铃薯块茎品质及水肥利用效率的影响

张腾^{1,2}, 邢英英^{1,2}, 谢奎^{1,2}, 密菲瑶^{1,2}, 李卓远^{1,2}, 王秀康^{1,2}

(1. 延安大学 黄土高原应用生态陕西省高等学校重点实验室, 陕西延安 716000;

2. 延安大学 生命科学学院, 陕西延安 716000)

摘要 以陕北地区普遍种植的马铃薯品种‘希森6号’为供试材料, 设置3个灌水量为W1(100%ET_c)、W2(80%ET_c)、W3(60%ET_c), 3个施肥水平N-P₂O₅-K₂O分别为F1(240-120-300 kg·hm⁻²)、F2(180-90-225 kg·hm⁻²)、F3(120-60-150 kg·hm⁻²), 以60%ET_c和不施肥处理为对照, 共10个处理。结果表明, 水肥调控对马铃薯块茎产量、品质及水肥利用效率有显著的影响。马铃薯产量和水分利用效率随着施肥量的增加而增加, F1处理更有利于马铃薯生长, 但F1处理肥料偏生产力明显低于F2和F3处理, F1处理的平均肥料偏生产力比F2和F3处理低23.51%和26.72%; 淀粉含量随着灌水量的增加而先减后增; 维生素C含量随着施肥量的增加而增加, 随着灌水量的增多而减少; 可溶性糖含量随着灌水量或施肥量的增加均呈抛物线趋势。运用隶属函数法评价马铃薯品质及水肥利用效率表明, 处理W1F2排名第一, 因此推荐灌水量为100%ET_c, 施肥量为180-90-225(N-P₂O₅-K₂O)kg·hm⁻²是陕北地区马铃薯优质高产的最佳灌水施肥组合。

关键词 马铃薯; 水肥调控; 块茎品质; 水肥利用效率

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)属茄科茄属一年生草本植物, 是全球第四大重要的粮食作物^[1], 具有极耐旱^[2]、适应性强^[3]和产业链长的特点, 其块茎富含淀粉、蛋白质、氨基酸、多种维生素以及矿物质, 营养价值高^[4], 对保障粮食安全具有重要意义。中国马铃薯种植面积逐年增加, 已成为世界马铃薯生产第一大国^[5], 播种面积和产量均居世界首位^[6], 但单产比较低, 仍有很大的提高空间^[7]。

灌水、肥料和覆盖大量应用于农业^[3,8-10], 以保障粮食安全, 但由于盲目粗放的灌溉施肥管理, 水肥资源过量施入, 导致水和肥料资源的严重浪费, 增加了投入成本, 但产量和品质却未同步提高, 甚至由于过量施氮导致土壤酸化^[11], 带来环境污染。因此, 国内外学者就马铃薯作物节水减氮、高产优质的灌溉、施肥技术进行了大量研究。杜常亮等^[9]研究表明, 适宜的灌水施肥可以提高马铃薯叶片叶绿素含量, 从而提高产量。张富仓等^[10]研究发现马铃薯产量随着灌水的增加而增

加, 随着施肥量的增加表现为先增加后减小。Milriy等^[12]发现当灌水量充足时, 马铃薯产量随着施氮量的增加而增加, 但当干旱胁迫时, 施氮量则对马铃薯的产量产生负面影响。宋娜等^[13]发现在同一水分条件下, 马铃薯块茎品质随着施氮量的增加而逐渐增加, 但施氮量过多会导致马铃薯品质下降。综上所述, 合理管理灌水和施肥是马铃薯提质增产的重要手段。随着人们生活水平的提高以及马铃薯加工业的快速发展, 马铃薯品质的研究将会越来越重要。

膜下滴灌是一项将作物覆膜种植技术和滴灌节水技术结合的高效灌溉技术^[14]。地膜覆盖能降低土壤水分蒸发, 提高地温, 起到明显的增温保墒作用^[15]; 滴灌技术将肥料随水滴入土壤, 使得水分和养分直达作物根系^[16-17]; 膜下滴灌技术将其二者结合, 具有节水节肥^[18], 提质增产^[19]等优点。

陕北地区土壤通气性良好, 再加上其光照时间长, 昼夜温差大等自然条件优势^[20], 是马铃薯

收稿日期: 2022-09-28 修回日期: 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金(201010153); 延安大学研究生教育创新计划(YCX2021074); 延安大学大学生创新计划(D2021095); 陕西省大学生创新计划(S202210719103, S202210719010)。

第一作者: 张腾, 男, 硕士研究生, 研究方向为水肥耦合。E-mail: 1598964678@qq.com

通信作者: 王秀康, 男, 硕士生导师, 研究方向为农业生态学。E-mail: wangxiukang@126.com

理想的生长环境,适宜生产优质马铃薯。但该地区灌溉制度不健全,在马铃薯生产中,主要为大水漫灌^[10],水肥利用不合理且效率低下。鉴于此,本试验采用膜下滴灌的技术,将灌水量与施肥量结合,研究水肥调控对马铃薯块茎品质及水肥利用效率的影响,以期为陕北地区马铃薯农田水肥调控节水提质增产模式提供技术指导和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年 4 月至 8 月在陕西省延安市延安大学生命科学学院试验基地进行。试验站位于东经 109°09',北纬 36°41',海拔 1 192 m,为典型的大陆季风气候,夏季多雨,秋、冬干燥,年日照时间 2 415.5 h,总辐射量 480.1 kJ·cm⁻²,无霜期 160~200 d,平均气温 9.1 °C,年均降雨量 473 mm,降水分布不均匀,主要集中在 6 月至 9 月,占全年降雨量的 60%左右。试验土壤为粉质壤土。土壤体积质量为 1.33 g·cm⁻³,土壤硝态氮含量为 13.42 mg·kg⁻¹,土壤铵态氮含量为 6.51 mg·kg⁻¹,有机质含量为 7.76 g·kg⁻¹,pH 为 8.2,速效磷含量为 12.88 mg·kg⁻¹,速效钾含量为 94.43 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计及方法

供试作物为高产马铃薯品种‘希森 6 号’。试验所用氮肥为尿素(N 含量 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅ 含量 12%),钾肥为硫酸钾(K₂O 含量 52%)。试验田的长宽分别为 20 m 和 8 m。试验采取随机区组排列,共设置 10 个小区,小区长约 3.5 m、宽度约 3.3 m,小区间均用厚约 6 mm 的隔水板埋深 60 cm 作防渗和分隔。试验开始前,对全部试验田进行深 40 cm 的深翻(两次)工作。试验小区采用起垄膜下滴灌种植模式,垄面高约 35 cm、宽约 70 cm,垄面间隔 30 cm,滴灌管沿垄中线置于膜下,地膜厚度为 0.006 mm,宽度为 120 cm,各小区定植 30 株,株距 30 cm。

试验以当地 100% ET_c 标准(W1)和当地推荐施肥量 F1(N-P₂O₅-K₂O 为 240-120-300 kg·hm⁻²)为依据,设置灌水量及施肥量二因素三水平试验,灌水量处理分别为 W1(100%ET_c),W2(80%ET_c)和 W3(60%ET_c);施肥量分别为 F1,F2(75% F1)和 F3(50% F1),以 60%ET_c 灌水水平和不施肥处理为对照组(CK),共 10 个处

理,见表 1。马铃薯于 2021 年 3 月 24 日播种,7 月 16 日收获。

表 1 试验方案

Table 1 Experimental design

处理 Treatment	灌水量 (ET _c)/% Irrigation level	氮肥/ (kg·hm ⁻²) N	磷肥/ (kg·hm ⁻²) P ₂ O ₅	钾肥/ (kg·hm ⁻²) K ₂ O
CK	60	0	0	0
W1F1	100	240	120	300
W1F2	100	180	90	225
W1F3	100	120	60	150
W2F1	80	240	120	300
W2F2	80	180	90	225
W2F3	80	120	60	150
W3F1	60	240	120	300
W3F2	60	180	90	225
W3F3	60	120	60	150

播种时灌水 40 mm,处理开始后平均每 7 d 灌 1 次水,7d 的每日蒸发蒸腾量由 HOBO 气象站采集,作物需水量 ET_c 计算如下:

$$ET_c = K_c \times ET_0$$

采用马铃薯作物系数 K_c,其中,苗期、块茎形成期、块茎膨大期、淀粉积累期分别取 0.50、0.65、1.15 和 0.75^[21]。参考作物蒸发蒸腾量 ET₀ 采用彭曼-蒙蒂斯(Penman-Monteith)公式进行计算,计算公式如下^[22]:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900U_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

其中,Δ 为饱和水气压与温度关系曲线在 T 处的切线斜率(kPa·°C⁻¹),R_n 是地表净辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹),G 是土壤热通量(MJ·m⁻²·d⁻¹),γ 是温度计常数(kPa·°C⁻¹),U₂ 是 2 m 高处风速(m·s⁻¹),e_s 是空气饱和水气压(kPa),e_a 是空气实际水汽压(kPa)。

肥料分 5 次施入,幼苗期 1 次、块茎形成期 2 次、块茎增长期 1 次和淀粉积累期 1 次,施肥比例为 1:2:3:2:2;施肥时将肥料溶于水中,通过水表和加压水泵控制每个小区灌水量和施肥量。仅灌水时用水表控制每个处理的水量。全生育期各水平灌水量见图 1。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 产量测定 马铃薯成熟后,统一收获测定各小区产量。随机选取 3 株马铃薯块茎置于密封袋中,带回实验室保存,用于品质测定。

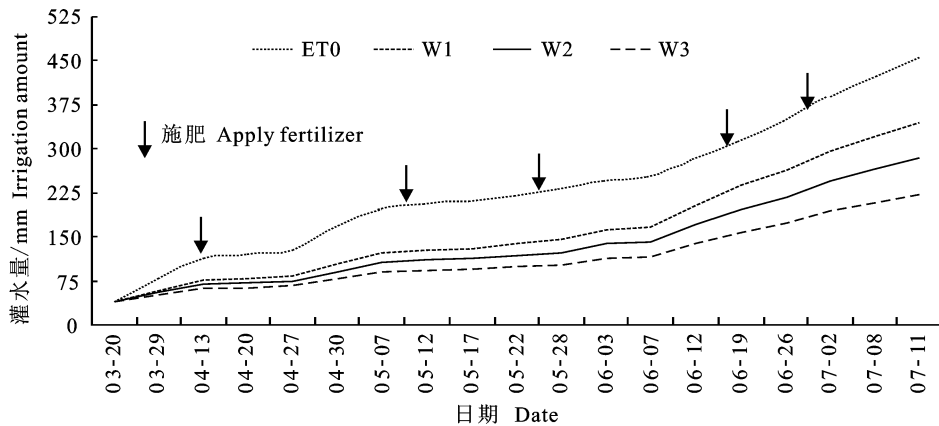


图 1 马铃薯全生育期灌水施肥方案

Fig. 1 Irrigation and fertilization scheme at whole growth stages of potato

水分利用效率(WUE)计算式为:

$$WUE = Y/ET$$

式中 Y:作物产量, $kg \cdot hm^{-2}$; ET:作物全生育期耗水量, mm。

肥料偏生产力(PFP)计算式为:

$$PFP = Y/T$$

式中 T:作物全生育期施入肥料总量, $kg \cdot hm^{-2}$ 。

1.3.2 品质测定 淀粉含量采用碘比色法测定;可溶性糖采用硫酸-蒽酮比色法测定;粗蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定;维生素 C 含量采用钼蓝比色法测定;还原性糖含量采用 3,5 二硝基水杨酸比色法测定;褐变强度采用分光光度计测定^[23]。

1.4 数据处理与分析

采用 SPSS 25 软件进行方差分析及多重比较(Duncan 法), Excel 软件绘图。利用隶属函数法对各指标进行综合评价,计算方法如下^[24]:

计算所测定指标在各处理下的具体隶属值:

$$U(X) = (X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})$$

式中 U(X)为隶属值, X 为某一指标的测定值, X_{max} 为某一指标测定值的最大值, X_{min} 为某一指标测定值的最小值。

还原糖与褐变强度为逆向指标,运用反隶属函数计算其隶属函数值。

$$U(X) = 1 - [(X - X_{min}) / (X_{max} - X_{min})]$$

2 结果与分析

2.1 水肥调控对马铃薯产量的影响

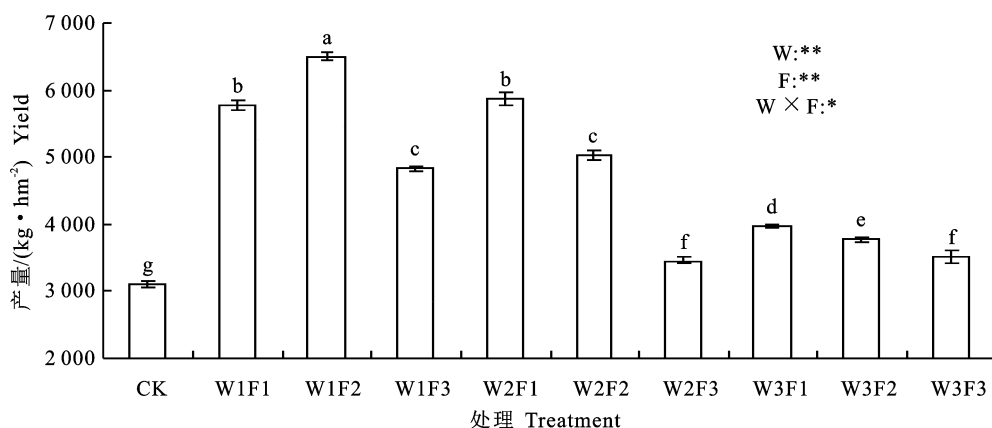
水肥调控对马铃薯产量的影响如图 2 所示,各处理马铃薯产量均高于 CK,灌水量和施肥量

对马铃薯产量有极显著影响,其交互作用对产量有显著影响。W1F2 处理马铃薯产量最高,为 $6\ 514.21\ kg \cdot hm^{-2}$,显著高于其他处理,相比 CK($3\ 095.48\ kg \cdot hm^{-2}$)增产 110.44%;W2F3 处理产量最低,相比 CK 增产 11.53%。在同一施肥水平下,马铃薯产量均随着灌水量的增加而增加。在同一灌水量下,随着施肥量的增加,马铃薯产量表现出不同的趋势;在 W2、W3 水平下,马铃薯产量随着施肥量的增加而增加;在 W1 水平下,随着施肥量的增加,马铃薯产量呈现先增后减的趋势。说明,合理的水肥投入才能获得更高的产量,施肥过多或过少均不利于马铃薯的增产。

2.2 水肥调控对马铃薯水分利用效率及肥料偏生产力的影响

水分利用效率(WUE)和肥料偏生产力(PFP)是反应灌溉水量和化肥施用量综合效应的指标。由图 3-a 可知,施肥量及灌水量和施肥量的交互作用对马铃薯 WUE 有极显著影响,灌水量、施肥量及其交互作用均对马铃薯 PFP 有极显著影响。W2F1 处理 WUE 最高,为 $20.65\ kg \cdot m^{-3}$,显著高于其他各处理,较 CK 提高 49.01%;W1F3 处理 WUE 最低,与 W2F3、CK 相比无显著性差异。在 W1 及 W2 水平下,WUE 随着施肥量的增加而增加;在 W3 水平下,各施肥量间无统计学意义。水肥调控对马铃薯肥料偏生产力的影响如图 3-b 所示,从总体上可以看出,在施肥量一致时,PFP 随着灌水量的增加而逐渐升高;W1 灌水水平下最大,平均为 $121.99\ kg \cdot kg^{-1}$,比 W2、W3 分别增加了 40.46%、50.69%。在 W1 及 W3 水平下,随着施肥量的减少,PFP 逐渐增加;在 W2 水平下,PFP 呈现先增

后减的趋势。PFP 在 W1F3 处理下获得最大值, 在 W3F1 处理下最小,各处理间差异显著。



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$); ** 表示极显著差异, * 表示显著差异, ns 表示无显著性差异,下同

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$); ** indicates a remarkably significant difference ($P < 0.01$), * indicates a significant difference ($P < 0.05$), and ns indicates no significant difference ($P > 0.05$), the same below

图 2 不同水肥调控下的马铃薯产量

Fig. 2 Potato tuber yield under different water and fertilizer supply

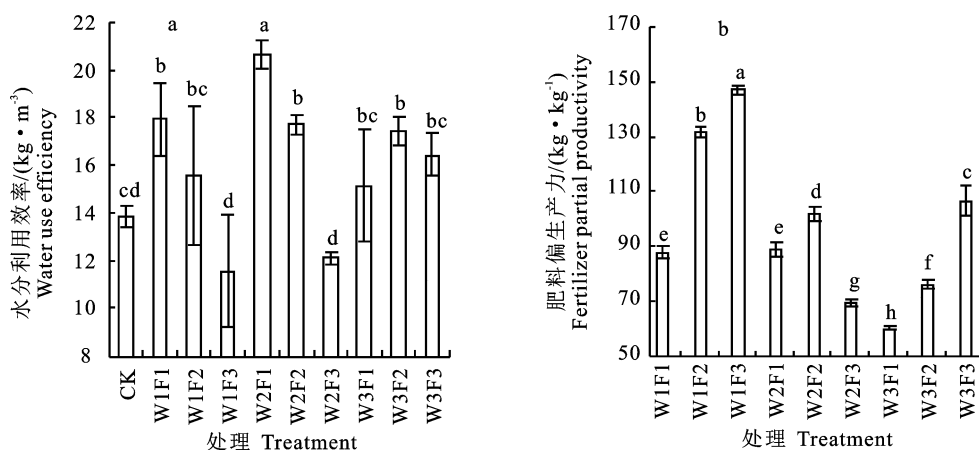


图 3 不同水肥调控下的马铃薯水分利用效率及肥料偏生产力

Fig. 3 Water use efficiency and fertilizer partial productivity under different water and fertilizer supplies

2.3 水肥调控对马铃薯品质的影响

2.3.1 淀粉 淀粉是马铃薯块茎中含量最多的营养物质^[25]。从图 4-a 中可以看出,各水肥调控处理间差异显著。在 W2、W3 水平下,随着施肥量的减少,马铃薯块茎淀粉含量逐渐增加, W1 水平与之相反。在同一施肥量下,马铃薯块茎淀粉含量随着灌水量的减少,总体呈现先降低后升高的趋势;在 W3 水平下达到最大值。处理 W3F3 的淀粉含量最高,为 9.21%, 相比 CK 高 23.46%,说明在该水肥调控处理下,最有利于马铃薯块茎淀粉积累。

2.3.2 维生素 C 维生素 C 是维持生命活动的

重要物质,马铃薯块茎中含有大量的维生素 C。各水肥调控处理间马铃薯块茎维生素 C 含量如图 4-b 所示。在同一灌水水平下,马铃薯块茎维生素 C 含量随着施肥量的减少而减少;在同一施肥水平下,总体上随着灌水量的增加而减少;各处理间鲜有显著性差异。处理 W2F3 含量最低,为 16.04 mg·hg⁻¹,显著低于其他各处理。

2.3.3 可溶性糖 从图 4-c 中可知,在不同灌水施肥调控下,各处理间差异显著,灌水量、施肥量及其交互作用均对马铃薯块茎可溶性糖含量产生极显著影响。在同一灌水量下,随着施肥量的增加,马铃薯块茎可溶性糖含量呈现先增多后减少

的趋势;各灌水量下,可溶性糖含量均在 F2 处理下达到最大值。在同一施肥水平下,马铃薯块茎可溶性糖含量随着灌水的增加呈现抛物线趋势,

整体而言, $W2 > W1 > W3$ 。处理 W2F2 含量最高(17.49%),相比 CK(9.06%)增加 93.05%;在 W3 水平下,各施肥处理含量均低于 CK。

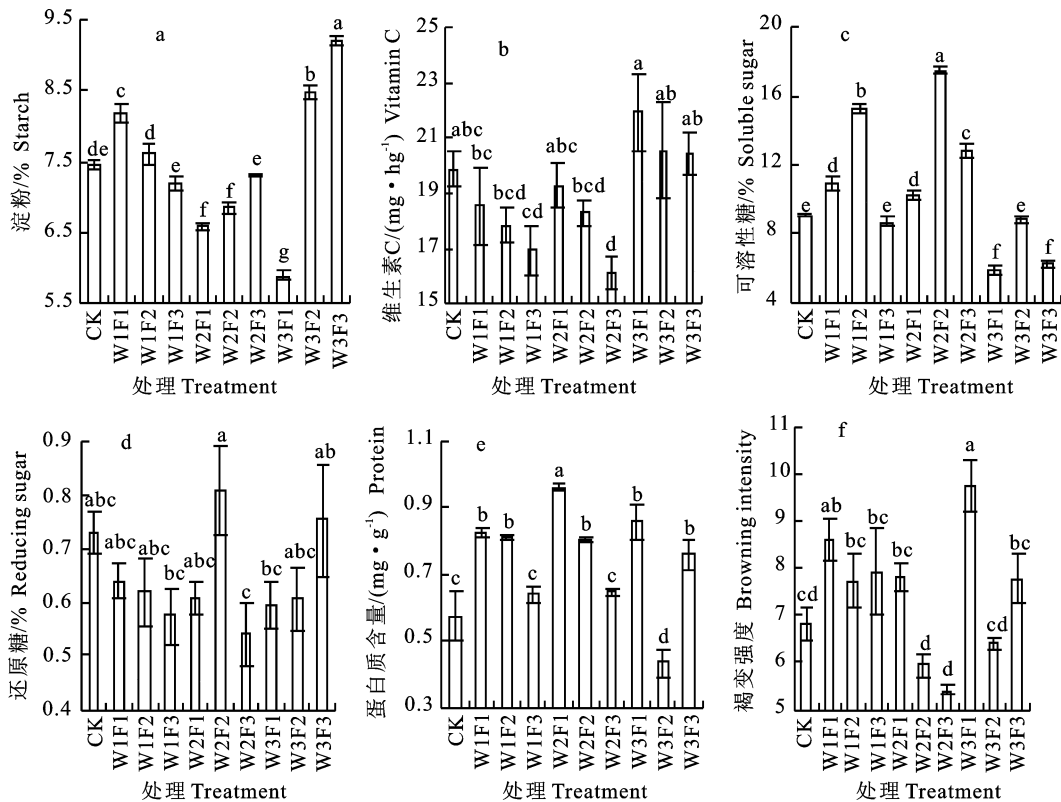


图 4 不同水肥调控下的马铃薯块茎品质

Fig. 4 Potato tuber quality under different water and fertilizer supplies

2.3.4 还原糖 还原糖含量不仅影响马铃薯的口感和营养价值^[26],也会与游离氨基酸发生美拉德反应产生致癌物质^[27],严重影响马铃薯的品质。由图 4-d 可知,各灌水施肥调控下马铃薯块茎还原糖含量均与 CK 无显著性差异。除处理 W2F2、W3F3 外,其他处理下还原糖含量均低于 CK,说明灌水和施肥的投入利于马铃薯生长,减少块茎还原糖合成,提高品质。

2.3.5 蛋白质 水肥调控对马铃薯块茎蛋白质含量的影响如图 4-e 所示。灌水量、施肥量及其交互作用均对马铃薯块茎蛋白质含量产生极显著影响。在 W1、W2 水平下,随着施肥量的增加,马铃薯块茎蛋白质含量逐渐增加,在 W3 水平下,呈现先减后增的趋势。处理 W2F1 含量为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,显著高于其他各处理,相比 CK($0.57 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$)增加 68.42%。

2.3.6 褐变强度 褐变现象在马铃薯的储藏和加工过程中时常发生,影响鲜切马铃薯品质和营

养价值^[28]。由图 4-f 可知,灌水量和施肥量对马铃薯块茎褐变强度影响显著。处理 W2F3 褐变强度最低,相比 CK 降低 12.75%,相比褐变强度最高处理(W3F1)降低 44.83%。总体而言,在同一施肥量下,马铃薯块茎褐变强度随着灌水量的增加而呈现先减后增的趋势,中水处理的褐变强度较低,W2 处理的平均值比 W1 和 W3 处理低 21.01%和 20.03%。说明灌水量过多或过少均会使马铃薯块茎易发生褐变。

2.4 综合评价

大众对于马铃薯品质的要求日益提升,但马铃薯块茎单一品质的最优水肥调控量不尽相同,因此不能依赖单个指标评价马铃薯的品质,需要对试验所得结果进行系统科学的综合评价;运用隶属函数法,以 9 个指标隶属度的平均值对各灌水施肥处理马铃薯产量和品质进行综合评价。结果如表 2 所示,处理 W1F2 平均隶属度得分最高,为 0.64,其次是 W2F1。处理 W3F1 最低,且低于 CK。

表 2 不同水肥调控处理下马铃薯产量和品质的综合评价

Table 2 Comprehensive evaluation of potato yield and quality under different water and fertilizer supplies

处理 Treatment	U(1)	U(2)	U(3)	U(4)	U(5)	U(6)	U(7)	U(8)	U(9)	均值 Mean value	排名 Ranking
CK	0.00	0.25		0.47	0.65	0.28	0.29	0.26	0.68	0.36	9
W1F1	0.79	0.70	0.32	0.70	0.42	0.43	0.62	0.74	0.27	0.55	3
W1F2	1.00	0.44	0.82	0.52	0.31	0.81	0.71	0.71	0.47	0.64	1
W1F3	0.51	0.00	1.00	0.39	0.15	0.24	0.88	0.39	0.42	0.44	7
W2F1	0.81	1.00	0.33	0.21	0.55	0.37	0.75	1.00	0.44	0.61	2
W2F2	0.57	0.68	0.48	0.29	0.38	1.00	0.00	0.70	0.87	0.55	4
W2F3	0.10	0.06	0.11	0.43	0.00	0.60	1.00	0.40	1.00	0.41	8
W3F1	0.26	0.39	0.00	0.00	1.00	0.00	0.79	0.80	0.00	0.36	10
W3F2	0.20	0.65	0.18	0.78	0.76	0.26	0.75	0.00	0.77	0.48	5
W3F3	0.12	0.53	0.54	1.00	0.74	0.03	0.21	0.62	0.45	0.47	6

注:U(1).产量;U(2).水分利用效率;U(3).肥料偏生产力;U(4).淀粉;U(5).维生素C;U(6).可溶性糖;U(7).还原糖;U(8).蛋白质;U(9).褐变强度。

Note:U(1).Yield ;U(2).Water use efficiency;U(3).Partial fertilizer productivity ;U(4).Starch ;U(5).Vitamin C;U(6).Soluble sugar ;U(7).Reducing sugar ;U(8).Protein ;U(9).Browning intensity.

3 讨论

灌水量、施肥量及灌溉方式是影响作物产量及水肥利用效率的主要因素,滴灌施肥将肥料溶于水随灌水到达作物根系,充分发挥水肥耦合效应同时减少水肥淋失,可以显著提高作物产量,已被大量应用于农业。本文通过大棚试验,在膜下滴灌条件下,研究了水肥调控对马铃薯块茎产量、品质及水肥利用效率的影响,通过隶属函数法对试验结果进行综合评价,选出使马铃薯提质增产并且节水节肥的水肥调控组合。结果表明,水肥调控对马铃薯块茎产量、品质及水肥利用效率有显著的影响。本研究发现,增加灌水量和施肥量均能使马铃薯增产,这与前人的研究结果一致^[29]。但灌水量或施肥量过多时,马铃薯增产效果与肥料投入的增加不匹配^[30],导致水肥利用效率下降,在本试验条件下,W1F2处理产量最高,W1F3处理肥料偏生产力最高,W2F1处理产量位于第二,但水分利用效率最高;说明过多灌水施肥不利于获得更高的水肥利用效率^[31],因此在农业生产中应控制合适的灌水量、施肥量,避免水肥资源过量投入导致资源浪费、污染环境及降低经济效益。

随着人们生活水平的提高,马铃薯块茎品质已成为评价田间管理的必要指标^[32]。水和肥是田间管理的重要手段,也是调控马铃薯品质的重要因素。本研究发现,灌水和施肥单因素及其交互作用均对马铃薯块茎淀粉含量、可溶性糖含量和蛋白质含量有极显著影响。总体而言,马铃薯

块茎淀粉含量随着灌水量和施肥量的增加而逐步降低,水肥调控下处理W3F3的淀粉含量最高,这与杜常亮等^[9]和Xing等^[32]的研究结果相似,表明合理的灌水施肥利于马铃薯块茎积累淀粉。商美新等^[33]研究认为马铃薯块茎维生素C含量和可溶性糖含量随着施氮量的增加呈现先增后降的趋势,即施氮量过多会导致马铃薯品质降低;在本研究中,在同一灌水量下,马铃薯块茎维生素C含量随着施肥量的增加而逐步增加,造成不同的原因可能是本试验土壤中基础氮素含量过低或者磷肥与钾肥的投入促进了作物生长,使得作物需要更多的氮素投入。于国红等^[34]研究发现干旱胁迫下马铃薯可溶性糖含量呈增加趋势,可加强马铃薯的渗透调节,减少缺水引起的应激损伤,但在本研究中,随着灌水量的降低,马铃薯块茎可溶性糖含量逐渐减少,说明在膜下滴灌条件下,W3处理仍能满足马铃薯生长对水分的需求。Xing等^[32]认为马铃薯块茎蛋白质含量由各品种固有的遗传特性决定,生态条件对其没有显著影响,但本研究发现马铃薯块茎蛋白质含量随着施肥量的增加总体呈增加趋势,这与臧文静等^[29]的研究结果一致。马铃薯块茎还原糖含量与褐变强度均会影响加工工艺及产品品质,因此需要通过田间管理手段降低其含量,本研究发现施肥对还原糖含量无明显影响,这与胡明举等^[35]的研究结果一致;同时,本研究发现合适的灌水施肥量可以减弱其褐变强度,从而提高品质。

不同指标对马铃薯品质的影响具有一定的差异,利用单一指标去评价马铃薯块茎产量及品质

具有局限性,不能准确评价其优劣,因此本试验利用隶属函数法对产量、WUE、PFP、淀粉、维生素C、可溶性糖、还原糖、蛋白质和褐变强度9项指标进行综合评价与分析。结果表明,W1F2处理隶属值最高,达到了较好的水肥耦合效应。

4 结论

水肥调控对马铃薯块茎产量、品质及水肥利用效率有显著的影响。在同一灌水水平下,随着施肥量的增加,马铃薯产量逐步增加,水分利用效率逐步降低,可溶性糖呈抛物线趋势,维生素C含量逐步增加,F1施肥处理较其他两种施肥处理更有利于马铃薯产量、品质的提高,是适宜马铃薯生长及品质积累的施肥调控水平。在同一施肥水平下,随着灌水量的增加,马铃薯产量逐步增加,维生素C含量逐步减少,可溶性糖呈抛物线趋势。基于隶属函数法评价马铃薯产量、品质及水肥利用效率,处理W1F2隶属值最高,因此推荐灌水量为100%ET_c,施肥量为180-90-225(N-P₂O₅-K₂O)kg·hm⁻²是陕北地区马铃薯种植的最佳灌水施肥组合。

参考文献 Reference:

- [1] 李 珺,刘双全,仇少君,等.典型黑土不同施氮量对马铃薯产量和氮素利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(5):850-857.
LI J,LIU SH Q, QIU SH J, et al. Effects of different nitrogen rates on potato yield and nitrogen use efficiency in a typical black soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(5): 850-857.
- [2] 李含悦,张润清,王 哲.我国马铃薯全要素生产率比较及空间集聚研究[J].中国农业资源与区划,2021,42(7):9-18.
LI H Y,ZHANG R Q,WANG ZH. Study on regional comparison and spatial agglomeration of potato's total factor productivity in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(7): 9-18.
- [3] 王凯博,陈怡平,郑太波,等.施肥、起垄和品种对黄土高原新造耕地马铃薯氮磷钾吸收与分配的影响[J].干旱地区农业研究,2022,40(2):144-152.
WANG K B,CHEN Y P,ZHENG T B, et al. Effects of fertilization, ridging and variety on absorption and allocation of nitrogen, phosphorus, and potassium in newly cultivated potato on the Loess Plateau[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(2): 144-152.
- [4] 杨亚东,杜娅婷,杜歆仪,等.中国马铃薯农户种植意愿及其空间差异[J].中国农业资源与区划,2022,43(2):220-230.
YANG Y D,DU Y T,DU X Y, et al. Potato farmers' willingness to plant and its spatial difference in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2022, 43(2): 220-230.
- [5] 谢 奎,张 腾,李卓远,等.榆林沙土区马铃薯根层土壤因子、微生物数量及酶活性特征[J].干旱地区农业研究,2022,40(4):192-205.
XIE K,ZHANG T,LI ZH Y, et al. Characteristics of soil factors, microbial quantity and enzyme activity in potato root layer in Yulin sandy soil area[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(4): 192-205.
- [6] 罗其友,高明杰,张 烁,等.中国马铃薯产业国际比较分析[J].中国农业资源与区划,2021,42(7):1-8.
LUO Q Y,GAO M J,ZHANG SH, et al. Comparative analysis on potato industry between China and other countries[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2021, 42(7): 1-8.
- [7] 王贺东,杨海波,万夫伟,等.硅钙钾镁土壤调理剂对内蒙古马铃薯产量及经济效益的影响[J].中国土壤与肥料,2022(7):126-131.
WANG H D,YANG H B,WAN F W, et al. Effect of Si-Ca-K-Mg soil conditioner on potato yield and economic benefits in Inner Mongolia[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(7): 126-131.
- [8] WANG X K, FAN J L, XING Y Y, et al. The effects of mulch and nitrogen fertilizer on the soil environment of crop plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2019, 153: 121-173.
- [9] 杜常亮,王秀康,王 宁,等.水肥互作效应对陕北温室马铃薯生长及品质的影响[J].分子植物育种,2020,18(5):1702-1709.
DU CH L,WANG X K,WANG N, et al. Effects of irrigation levels and fertilization amounts on potato growth and quality in greenhouse in northern Shaanxi[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(5): 1702-1709.
- [10] 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.
- [11] SAJJAD R, MIAO N, PEIZHOU W, et al. Dramatic loss of inorganic carbon by nitrogen-induced soil acidification in Chinese croplands[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(6): 3738-3751.
- [12] MILRIY S P, WANG P, SADRAS V O. Defining upper limits of nitrogen uptake and nitrogen use efficiency of potato in response to crop N supply[J]. *Field Crops Research*, 2019, 239: 38-46.
- [13] 宋 娜,王凤新,杨晨飞,等.水氮耦合对膜下滴灌马铃薯产量、品质及水分利用的影响[J].农业工程学报,2013,29(13):98-105.
SONG N, WANG F X, YANG CH F, et al. Coupling effects of water and nitrogen on yield, quality and water use of potato with drip irrigation under plastic film mulch[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(13): 98-105.
- [14] 张恒嘉,李 晶.绿洲膜下滴灌调亏马铃薯光合生理特性与水分利用[J].农业机械学报,2013,44(10):143-151.
ZHANG H J,LI J. Photosynthetic physiological characteristics and water use of potato with mulched drip irrigation under water deficit in oasis region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(10): 143-151.
- [15] LI J. Research progress and application prospects of mulc-

- hing technology[J]. *Agricultural Biotechnology*, 2018, 7(4):142-146.
- [16] DANG J, LIANG W, WANG G, *et al.* A preliminary study of the effects of plastic film-mulched raised beds on soil temperature and crop performance of early-sown short-season spring maize (*Zea mays* L.) in the North China Plain[J]. *The Crop Journal*, 2016, 4(4): 331-337.
- [17] 陈江鲁, 丁变红, 张小伟, 等. 新疆无膜浅埋滴灌对玉米产量及经济效益的影响[J]. *河南农业科学*, 2022, 51(4): 22-29.
- CHAN J L, DING B H, ZHANG X W, *et al.* Effects of shallow-buried drip irrigation without film on maize yield and economic benefit in northern Xinjiang[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2022, 51(4): 22-29.
- [18] 罗双龙, 马忠明, 薛 亮, 等. 有机肥与氮肥配施对膜下滴灌西瓜生长、产量和品质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(1): 136-142.
- LUO SH L, MA ZH M, XUE L, *et al.* Influence of the combination application of organic manure and nitrogen fertilizer to watermelon growth, yield and quality under mulched drip-irrigation condition [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2021, 39(1): 136-142.
- [19] SUI J, WANG J, GONG S, *et al.* Assessment of maize yield-increasing potential and optimum N level under mulched drip irrigation in the Northeast of China [J]. *Field Crops Research*, 2018, 215: 132-139.
- [20] 郭 涛, 刘婉如, 方玉川, 等. 水肥供应对马铃薯根层养分及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(4): 143-151.
- GUO T, LIU W R, FANG Y CH, *et al.* Effect of water and fertilizer supply on potato root layers soil nutrient and tuber yield[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(4): 143-151.
- [21] WANG X K, GUO T, WANG Y, *et al.* Exploring the optimization of water and fertilizer management practices for potato production in the sandy loam soils of Northwest China based on PCA [J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 237: 106180.
- [22] 张寄阳, 孙景生, 段爱旺, 等. 风沙区参考作物需水量计算模式的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 25-30.
- ZHANG J Y, SUN J SH, DUAN A W, *et al.* Study of the model to compute crop water requirements in windy and sandy regions[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 25-30.
- [23] 田 丰, 张永成. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- TIAN F, ZHANG Y CH. *Research Methods of Potato Experiment* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2007.
- [24] 杨 然, 张渊博, 梁 祎, 等. 不同钠钾配比对番茄幼苗生长及生理代谢的影响[J]. *西北农业学报*, 2021, 30(10): 1473-1483.
- YANG R, ZHANG Y B, LIANG W, *et al.* Effects of different sodium and potassium proportions on tomato seedling growth and physiological metabolism [J]. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica*, 2021, 30(10): 1473-1483.
- [25] 毕丽霏, 张富仓, 王海东, 等. 水肥调控对滴灌马铃薯生长、品质及水肥利用的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(1): 155-165.
- BI L F, ZHANG F C, WANG H D, *et al.* Effects of regulated water and fertilizer on potato growth, quality, water and fertilizer use efficiency under drip irrigation [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(1): 155-165.
- [26] 胡朋成, 尹 娟, 魏小东, 等. 不同水氮处理对马铃薯品质及土壤脲酶活性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(6): 87-92.
- HU P CH, YI J, WEI X D, *et al.* Effects of different water-nitrogen treatments on potato quality and soil urease activity[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(6): 87-92.
- [27] LAROQUE D, INISAN C, BERGER C, *et al.* Kinetic study on the maillard reaction consideration of sugar reactivity[J]. *Food Chemistry*, 2008, 111(4): 1032-1042.
- [28] JIANG H, WANG B, MA L, *et al.* Benzo-(1,2,3)-thiadiazole-7-carbothioic acid s-methyl ester (BTH) promotes tuber wound healing of potato by elevation of phenylpropanoid metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 153: 125-132.
- [29] 臧文静, 李晶晶, 裴沙沙, 等. 不同喷灌水氮组合对马铃薯耗水、产量和品质的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(8): 773-778.
- ZANG W J, LI J J, PEI SH SH, *et al.* Effects of different water-nitrogen combinations on potato water consumption, yield and quality under sprinkler irrigation[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(8): 773-778.
- [30] 李书田, 段 玉, 陈占全, 等. 西北地区马铃薯施肥效应和经济效益分析[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(4): 42-47.
- LI SH T, DUAN Y, CHEN ZH Q, *et al.* Yield response and economic benefit of fertilizer application on potato in Northwest China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2014(4): 42-47.
- [31] 王立为, 潘志华, 高西宁, 等. 不同施肥水平对旱地马铃薯水分利用效率的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(2): 54-58.
- WANG L W, PAN ZH H, GAO X N, *et al.* Influence of different fertility levels water use efficiency of the potato in dry land[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(2): 54-58.
- [32] XING Y, ZHANG T, JIANG W T, *et al.* Effects of irrigation and fertilization on different potato varieties growth, yield and resources use efficiency in the Northwest China [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 261: 107351.
- [33] 商美新, 房增国, 梁 斌, 等. 不同水氮处理对膜下滴灌马铃薯产量、品质及土壤硝态氮运移的影响[J]. *华北农学报*, 2019, 34(6): 118-125.
- SHANG M X, FANG Z G, LIANG B, *et al.* Effects of different water and nitrogen treatments on potato yield, quality and soil nitrate nitrogen transport under drip irrigation [J]. *Acta Agricultrae Boreali-Sinica*, 2019, 34(6): 118-125.
- [34] 于国红, 刘朋程, 李 磊, 等. 不同基因型马铃薯对干旱胁迫的生理响应[J]. *生物技术通报*, 2022, 38(5): 56-63.
- YU G H, LIU P CH, LI L, *et al.* Physiological responses of potato in different genotypes to drought stress[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2022, 38(5): 56-63.
- [35] 胡明举, 董光美, 鲁晓健, 等. 云南高产优质冬作马铃薯种质的筛选及其养分利用特性分析[J]. *云南农业大学学报(自然科学)*, 2022, 37(3): 390-396.
- HU M J, DONG G M, LU X J, *et al.* High yield and good

quality germplasm selection of potato in Yunnan winter
planting and analysis of nutrient utilization characteristics

[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University(Natural
Science)*, 2022, 37(3): 390-396.

Effect of Water and Fertilizer Regulation on Potato Tuber Quality, Water and Fertilizer Use Efficiency

ZHANG Teng^{1,2}, XING Yingying^{1,2}, XIE Kui^{1,2}, MI Feiyao^{1,2},
LI Zhuoyuan^{1,2} and WANG Xiukang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Applied Ecology of Loess Plateau, Shaanxi Province, Yan'an Shaanxi 716000, China;

2. College of Life Sciences, Yan'an University, Yan'an Shaanxi 716000, China)

Abstract Irrigation and fertilization are the main field management techniques used to regulate crop growth. The object of this study was to explore the mechanism of water and fertilizer coupling in influencing potato growth and tuber quality, with the aim of providing theoretical basis for rational water and fertilizer management. In this experiment, 'Xisen No. 6', widely planted in Northern Shaanxi Province, was used as the experimental material. Three irrigation levels were established: W1 (100% ETc), W2 (80% ETc), and W3 (60% ETc). Additionally, three fertilization levels, represented as N-P₂O₅-K₂O (kg · hm⁻²): F1 (240-120-300 kg · hm⁻²), F2 (180-90-225 kg · hm⁻²), and F3 (120-60-150 kg · hm⁻²). The control group (CK) consisted of the 60% ETc irrigation level with no fertilization. In total, ten treatment combinations were designed for the study. The results showed that water and fertilizer regulation had significant effects on the potato tuber quality, water and fertilizer use efficiency of potato; potato yield and water use efficiency increased with the increase of fertilizer application rate; F1 treatment was more conducive to potato growth, but the partial fertilizer productivity of F1 treatment was significantly lower than that of F2 and F3 treatments, and the average partial fertilizer productivity of F1 treatment was 23.51% and 26.72% lower than that of F2 and F3 treatments. Starch content decreased first and then increased with the increase of irrigation amount; the content of vitamin C increased with the increase of fertilizer amount, but decreased with the increase of irrigation amount; the soluble sugar content showed a parabolic trend with the increase of irrigation amount or fertilizer application rate. Membership function method showed that the membership value of W1F2 treatment was the highest, therefore, a combination of 60% ETc irrigation levels and a fertilizer application rate of 180-90-225 (N-P₂O₅-K₂O) kg · hm⁻² is recommended for achieving high quality and high yield potato in Northern Shaanxi.

Key words Potato; Water and fertilizer regulation; Tuber quality; Water and fertilizer use efficiency

Received 2022-09-28

Returned 2023-02-13

Foundation item The National Natural Science Foundation of China (No. 201010153); The Education Innovation Project for Postgraduates of Yan'an University (No. YCX2021074); Innovation Program for Students of Yan'an University (No. D2021095); Innovation Program for Students of Shaanxi Province (No. S202210719103, No. S202210719010).

First author ZHANG Teng, male, master student. Research area: water and fertilizer coupling. E-mail: 1598964678@qq.com

Corresponding author WANG Xiukang, male, master supervisor. Research area: agricultural ecology. E-mail: wangxiukang@126.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)