

灌水定额和施钾量对膜下滴灌马铃薯产量及水肥利用效率的影响

李森¹ 王凤新^{1*} 赵健宇¹ 李斌² 费娜² 房祥国³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院,北京 100083;

2. 日照市岚山区农业农村局,山东 日照,276807;

3. 日照市岚山区农业技术服务中心,山东 日照,276827)

摘要 研究膜下滴灌条件下马铃薯适宜的灌溉制度及施钾方案。于2021年03—06月在山东省日照市进行灌水定额和施钾量对膜下滴灌马铃薯产量及水肥利用效率影响的试验,设置3个灌水定额W1(5 mm)、W2(10 mm)、W3(块茎膨大期前5 mm,膨大期后20 mm)和4个施钾(K₂O)水平K1(180 kg/hm²)、K2(260 kg/hm²)、K3(340 kg/hm²)、K4(420 kg/hm²),共12个处理,每个处理3个重复。结果表明:1)随着灌水定额的增大,耗水量增加,W3处理比W1和W2显著增加23.66%和16.05%。同一灌水定额下,增施钾肥有增加耗水量的趋势(除W3K2外)。2)生育期内马铃薯钾素积累量呈“S”型变化,块茎膨大期前滴灌灌水定额小于10 mm,适量增施钾肥均有利于马铃薯钾素累积。在K4施钾量下,W3处理马铃薯钾素累积最多,与W1和W2相比,钾素利用效率提高17.74%和19.48%,钾素吸收效率没有显著差异,均接近40%。3)同一灌水定额下,马铃薯产量、水分利用效率均在K3处理下获得最大值,K3处理平均产量和水分利用效率分别为32 983.2 kg/hm²和110.3 kg/(hm²·mm),比K1、K2、K4处理分别提高9.53%、5.88%、13.16%和5.91%、3.15%、15.90%。4)同一施钾量下,马铃薯产量和钾肥偏生产力均在W3处理下达到最大值(除W1K1外),W3处理下平均产量和钾肥偏生产力分别为32 294.0和118.1 kg/kg,比W1和W2处理分别提高5.84%、4.02%和8.58%、8.70%。综合考虑马铃薯产量和水肥利用效率,在本试验条件下,马铃薯较为适宜的灌水定额为块茎膨大期前5 mm,膨大期后20 mm,钾肥施用量为340 kg/hm²。

关键词 灌水定额; 施钾量; 马铃薯; 产量; 水肥利用效率

中图分类号 S532

文章编号 1007-4333(2022)10-0100-11

文献标志码 A

Effects of irrigation quota and potassium application rate on the growth, yield and water and fertilizer use efficiency of potato under drip irrigation and plastic film mulching

LI Miao¹, WANG Fengxin^{1*}, ZHAO Jianyu¹, LI Bin², FEI Na², FANG Xiangguo³

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Lanshan District, Rizhao City, Rizhao 276807, China;

3. Agricultural Technical Service Center of Lanshan District, Rizhao City, Rizhao 276827, China)

Abstract Field experiment to explore the effects of irrigation quota and potassium rate on growth, yield and water and fertilizer use efficiency of potato under drip irrigation and plastic film mulching was conducted. Three irrigation quotas, W1 (5 mm), W2 (10 mm) and W3 (5 mm before tuber bulking, 20 mm after tuber bulking), and four potassium (K₂O) rates, K1 (180 kg/hm²), K2 (260 kg/hm²), K3 (340 kg/hm²) and K4 (420 kg/hm²) were designed to further improve the use efficiency of water and potassium for drip-irrigated potato under plastic film mulching in Rizhao, Shandong from March to June in 2021. The results suggested that: Potato ET increased with the increase of the irrigation quota, and it

收稿日期: 2022-01-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579240)

第一作者: 李森, 硕士研究生, E-mail: 1303238554@qq.com

通讯作者: 王凤新, 教授, 主要从事滴灌理论及作物生长环境调控研究, E-mail: fxinwang@cau.edu.cn

was significantly increased by 23.66% and 16.05% in W3 treatment compared to those of W1 and W2 treatments. Under the same irrigation quota, increasing potassium application tended to increase ET (except in W3K2 combination). During the whole growth period, the potassium accumulation of potato showed an “S” shape. Irrigation quota less than 10 mm before tuber bulking stage and increase of potassium fertilizer application both led to more potato potassium accumulation. With the same potassium application in K4 treatment, the potato under W3 treatment accumulated the most potassium and the potassium utilization efficiency increased by 17.74% and 19.48% compared to those of W1 and W2 treatments. However, the potassium absorption efficiency showed no significant difference under K4 treatment among the three irrigation levels, all close to 40%. Under the same irrigation quota, potato yield and water use efficiency were the highest under K3 treatment. The average yield and water use efficiency of K3 treatment were 32 983.2 kg/hm² and 110.3 kg/(hm² · mm), respectively, which were 9.53%, 5.88%, 13.16% and 5.91%, 3.15% and 15.90% higher than those of K1, K2 and K4 treatments, respectively. Under the same potassium rate, potato yield and PEP_k reached the maximum under W3 treatment (except W1K1 treatment). The average tuber yield and PEP_k under W3 treatment were 32 294.0 kg/hm² and 118.1 kg/kg, respectively, which were 5.84%, 4.02% and 8.58% and 8.70% higher than those of W1 and W2 treatments, respectively. In conclusion, comprehensively considering potato yield and water and fertilizer use efficiency, the suitable irrigation quota for potato is 5 mm before tuber bulking, 20 mm after tuber bulking and the optimal potassium rate is 340 kg/hm².

Keywords irrigation quota; potassium rate; potato; yield; water and fertilizer use efficiency

马铃薯是我国的第四大粮食作物,种植面积和产量均居世界首位,但是我国马铃薯的单产水平和品质远不及欧美发达国家^[1]。水肥是影响马铃薯产量与品质的 2 个重要因素,近年来,国内外就灌溉施肥技术对马铃薯生长、产量及水肥利用效率的影响进行了大量研究^[2-4]。马铃薯根系较浅,活跃层主要集中在垄顶下方 0~40 cm 土层深度^[5],因此非常适合采用滴灌这种可以实现水肥精准控制的灌溉方式,以提高水肥利用效率并降低养分淋失到有效根区以下的风险。在灌水下限一定的条件下,灌水定额会影响土壤湿润范围。湿润范围过小会影响根系的生长,限制作物对水分和养分的吸收^[6];而湿润范围过大也会导致根系土壤缺氧,影响土壤通气性,同时引发深层渗漏,造成水分和养分的流失^[7]。灌水定额也会影响灌水频率,高频灌溉能加速土壤气体更新,有助于为根系呼吸提供足够的氧气^[8]。已有研究表明,少量多次的高频滴灌是促进马铃薯块茎生长和提高水分利用效率的一种有效手段,当滴头正下方 20 cm 处的土壤基质势达到 -25 kPa 时,可以作为马铃薯滴灌条件下的灌水控制下限,马铃薯全生育期灌水定额为 5~10 mm 时,马铃薯产量和水分利用效率均达到了极高的数值^[9]。但是,该研究中的灌水定额全生育期固定,而随着根系生长和块茎膨大,马铃薯吸水能力逐渐增强,块茎膨大期至成熟期适度增加灌水定额至 20 mm 可能有利于进一步提高马铃薯产量和水分利用效率。

马铃薯水肥管理中普遍存在着灌溉施肥过多以及重氮轻钾的问题,不仅降低了水肥利用效率,甚至引发环境污染和土壤退化等问题^[10-13]。马铃薯是喜钾型作物,合理配施钾肥能够促进其根系生长、增强根系活力,增加叶绿素含量,促进叶片光合产物的合成,从而提高产量^[14-15]。作为一种高产、高淀粉作物,马铃薯在块茎生长的较短时期内需要大量的钾素供应^[16],钾供应不足被认为是限制块茎产量和质量的重要因素^[17]。合理的施钾量能促进马铃薯在块茎形成初期干物质积累速率的提高,有利于马铃薯产量的提高,而过高的施钾量会延迟最大速率出现的时间,影响后期产量的形成^[18]。实现肥料高效利用的基本前提是清楚马铃薯的养分需求量。研究发现,每生产 1 000 kg 马铃薯块茎需要 K₂O 4.0~6.0 kg,酸性土壤下需要的 K₂O 量会有所减少^[19-20]。马铃薯对钾素的吸收具有明显的阶段性特点,随生育期的推进大多呈“S 型”变化,也有研究^[21-23]表明呈单峰曲线,吸收最多的时期为块茎膨大期。滴灌条件下,适量增施钾肥能够增加马铃薯钾素累积量^[24]。马铃薯块茎产量在一定水平的施钾量下达到峰值,并且不会随着钾供应的增加而进一步增加,但是植株钾素累积吸收量随着施钾量的增加而增加,可见马铃薯存在奢侈吸钾的特点^[25]。一般认为,钾肥很容易随着土壤水淋溶到根区以外。因此,在滴灌条件下应该采用少量多次的水肥一体化技术来提高钾肥的利用效率。但是,国内外在研究钾肥利用效率时,极

少考虑到灌水定额的变化对马铃薯根系吸钾范围及钾肥运移的影响。

本研究旨在进一步确定马铃薯适宜的高效滴灌灌溉制度及在该灌溉制度下的吸钾规律及适宜的施钾量,为进一步提高马铃薯的产量和水肥利用效率提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年03—06月在山东省日照市岚山区中国农业大学特色马铃薯优质高产试验示范基地进行。试验区位于东经 $118^{\circ}59'$,北纬 $35^{\circ}25'$,海拔高度约131 m;地处温带,是典型的暖温带湿润季风区大陆性气候,年平均气温 12.7°C ,年平均降水量874 mm,年平均日照时数2 533 h,年平均无霜期223 d。试验区土壤质地为砂壤土,0~80 cm深度土层内土壤平均容重 1.61 g/cm^3 ,平均田间持水量(体积分数)33.44%,春季地下水埋深为1.8~2.0 m。0~40 cm土层范围内土壤基本理化性质如下:铵态氮质量分数为 5.65 mg/kg ,硝态氮 8.16 mg/kg ,有效磷 22.84 mg/kg ,速效钾 54.84 mg/kg ,总钾 4.81 g/kg ,pH6.3,有机质 8.92 g/kg 。

1.2 试验设计及处理

试验在施用等量氮、磷(N: 270 kg/hm^2 , P_2O_5 : 150 kg/hm^2)基础上,设置灌水定额、施钾量2个因素。

灌水定额设置3个水平:W1(5 mm)、W2(10 mm)、W3(块茎膨大期前5 mm,膨大期开始后20 mm);施钾量设置4个水平:K1(K_2O : 180 kg/hm^2)、K2(K_2O : 260 kg/hm^2)、K3(K_2O : 340 kg/hm^2)、K4(K_2O : 420 kg/hm^2)。试验共12个处理,每个处理3次重复,共36个小区,随机布置。

试验采用机器起垄、人工种植的高垄种植模式,一垄单行,每个小区8垄,垄长6 m,垄宽为0.8 m,垄高0.3 m,小区面积为 38.4 m^2 ,株距约为25 cm,种植深度15 cm,采用黑膜覆盖,膜的宽度为0.9 m,厚度0.01 mm。

供试马铃薯品种为“荷兰十五号”,种薯质量15~20 g,2021年3月9日定植,6月26日收获。田间灌水采用膜下滴灌方式,1条滴灌带控制1行作物,滴灌带布置在垄中央,滴头流量 2.0 L/h ,滴头间距30 cm,操作压力0.1 MPa。通过表头式负压计指导灌水,选2个重复在距滴头正下方土壤深

度为20 cm处垂直埋设负压计,灌水下限设定为土壤基质势达到 -25 kPa ,苗期各处理统一灌水20 mm,块茎形成期开始,按照灌水下限指导灌水,直至收获前10 d停止灌水。灌溉试验小区的灌水量由灌水定额乘以小区面积计算并通过水表控制,每个小区装有独立的水表和阀门。供试化学肥料为尿素(含N 46%)、磷酸二铵(含 P_2O_5 46%)、硫酸钾(含 K_2O 52%)。其中30%氮肥、40%钾肥以及全部磷肥作为底肥一次性均匀施入,5月7日追施24%氮肥及30%钾肥,5月28日追施24%氮肥及30%钾肥,6月5日追施22%氮肥^[26],所有追肥均通过施肥器随灌水施入田间。

1.3 测定项目及方法

1)土壤水分测定。在马铃薯苗期、块茎形成期、块茎膨大期、和成熟期每个小区用烘干法测定滴头正下方0~80 cm土层土壤含水量,每20 cm为一层。

2)马铃薯植株养分测定。测定W2处理下4个钾肥处理和K4处理下3个灌水处理,共6个处理的植株钾素累积量。在马铃薯块茎形成期、块茎膨大期、和成熟期采集植株样品,每个小区随机选取有代表性的植株10株,洗净表面泥土,风干。将部分植株的茎叶和块茎分别称重,放入 105°C 鼓风干燥箱中杀青30 min左右, 85°C 下烘干,称重,粉碎过0.25 mm筛。样品经 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{—H}_2\text{O}_2$ 消煮,用火焰光度计测定植株全K^[27]。

3)产量的测定。收获时,每个小区取中间3垄然后测量马铃薯产量、块茎数量、单株薯重及商品薯率,其中,商品薯是指质量大于75 g的马铃薯块茎。

4)作物全生育期耗水量计算。本试验中,马铃薯生育后期出现2次大的降雨,分别在6月14日和6月15日,降雨量为137 mm,占整个生育期降雨量的55%,因此2次大的降雨导致一部分地表径流和深层渗漏,而在2次降雨前,马铃薯生育期内降水量较少,且单次降雨量较小,对马铃薯生长影响较小,马铃薯生长所需水分基本靠灌溉。2次大的降雨之前,可用水量平衡方程计算其耗水量,6月份2次大的降雨后耗水量计算用前一生育期日耗水量乘以天数进行估算,马铃薯全生育期耗水量由2部分加和得到,水量平衡方程为:

$$ET = I - \Delta W + P - D - R$$

式中:ET(Evapotranspiration)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; R 为地表径流量, mm; D 为深层渗漏量, mm。在 2 次大的降雨之前, 由于单次降水量和滴灌定额较小, R 和 D 都忽略不计。 ΔW 为 0~80 mm 土层播种前后土体蓄水量的变化, mm, 计算公式为:

$$\Delta W = 10 \sum_{i=1}^n \gamma_i H_i (W_{i,1} - W_{i,2})$$

式中: i 为土壤层数; n 为土壤总层数; γ_i 为第 i 层土壤干容重, g/m^3 ; H_i 为第 i 层土壤厚度, cm; $W_{i,1}$ 为第 i 层土壤苗期始的土壤质量含水率; $W_{i,2}$ 为第 i 层土壤成熟期末的土壤质量含水率。

5) 水分利用效率 (Water use efficiency, WUE)。计算公式为:

$$WUE = Y/ET$$

式中: WUE 为水分利用效率, $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{mm})$; Y 为单位面积薯块产量, kg/hm^2 ; ET 为全生育期实际耗水量, mm。

6) 钾肥偏生产力 (Partial factor productivity from applied K, PFP_K)。计算公式^[28]为:

$$\text{PFP}_K = Y/K$$

式中: PFP_K 为钾肥偏生产力, kg/kg ; Y 为马铃薯单位面积产量, kg/hm^2 , K 为施钾量, kg/hm^2 。

7) 钾素吸收效率 (K nutrient uptake efficiency, KUPE)。计算公式^[28]为:

$$\text{KUPE} = \text{植株总钾素吸收量} / \text{钾养分投入}$$

8) 钾素利用效率 (K nutrient use efficiency, KUE)。钾素利用效率计算公式^[28]为:

$$\text{KUE} = \text{产量} / \text{植株总钾素吸收量}$$

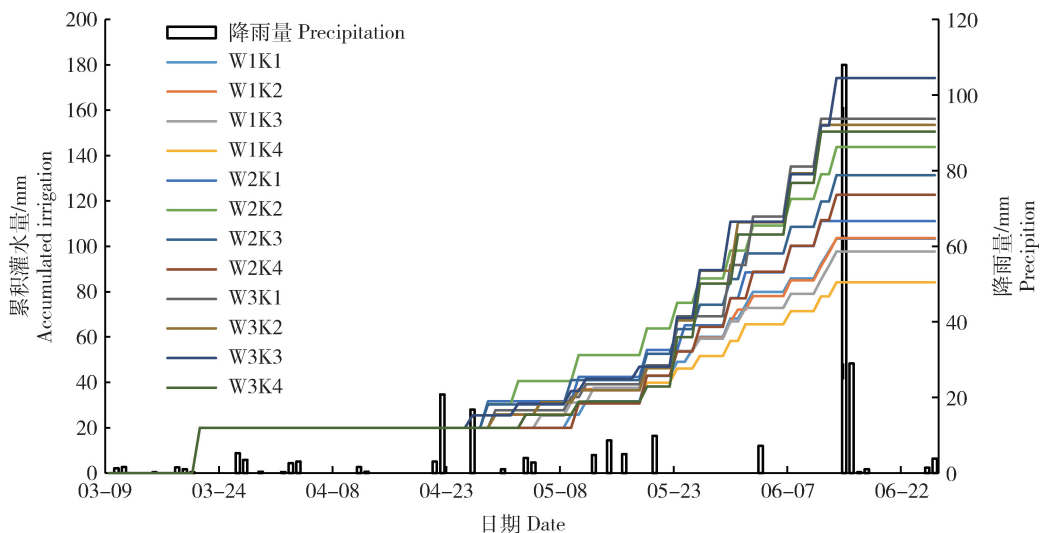
1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据整理、制图和分析, SPSS 25.0 统计分析软件进行方差分析, 多重比较采用 LSD 法 ($P < 0.05$ 为显著性水平)。

2 结果与分析

2.1 不同灌水定额和施钾量对马铃薯耗水量的影响

2021 年 03—06 月生育期内总降雨量 250.2 mm, 累积灌水量和降雨量见图 1。不同水肥模式下马铃薯耗水量及显著性分析见图 2 和表 1。增施钾肥有增加作物耗水量的趋势 (除 W3K2 外), 但施钾对耗水量的影响未达到显著水平。而从马铃薯全生育期内的耗水量看, W3 处理马铃薯耗水量显著高于 W1 和 W2 处理耗水量, 这是由于在后期的灌溉中, 单次灌水量的增加使得总灌水量变大, 导致耗水量的增加, W3 处理的耗水量最大, 平均值为 337.5 mm, 比 W1 和 W2 处理下的平均耗水量分别提高 23.66% 和 16.05%。

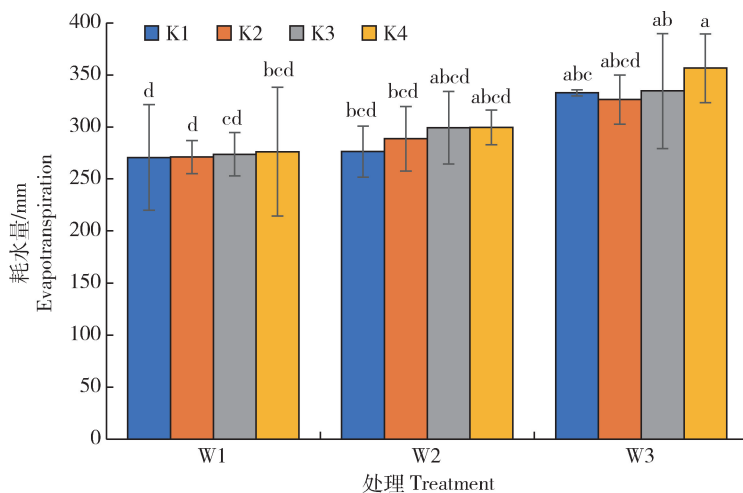


W1、W2 分别表示灌水定额为 5、10 mm, W3 表示块茎膨大期前 5 mm, 膨大期开始后 20 mm; K1、K2、K3、K4 分别表示施钾量为 180、260、340、420 kg/hm^2 。下图表同。

W1 and W2 respectively indicate that the irrigation quota is 5, 10 mm, and W3 indicate that the irrigation quota is 5 mm before tuber bulking, 20 mm after tuber bulking. K1, K2, K3 and K4 indicate that potassium rates are 180, 260, 340 and 420 kg/hm^2 , respectively. The same in the following Figures and Tables.

图 1 2021 年 03—06 月马铃薯生育期内累积灌水量和降雨量

Fig. 1 Accumulated irrigation amount and precipitation during potato growing period from March to June in 2021



竖直线表示标准偏差,不同小写字母表示处理间差异显著。下图和表同。

The vertical lines indicate the standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences between treatments. The same below.

图2 不同水肥模式下马铃薯耗水量

Fig. 2 Evapotranspiration of potato under different water and fertilizer managements

表1 灌溉和施肥对马铃薯生长及水肥利用效率的显著性分析

Table 1 Significance analysis of irrigation and fertilization on potato growth and water use efficiency

因素 Factor	耗水量 Evapotran- spiration	块茎数量 Tuber number	单株产量 Tuber of perplant	商品薯率 Commodity potato rate	产量 Yield	水分利用 效率 Water use efficiency	钾肥偏生产力 Partial factor productivity from applied K
灌溉 Irrigation	0.000**	0.933	0.196	0.042*	0.053	0.019*	0.121
施肥 Fertilizer	0.717	0.131	0.511	0.858	0.02*	0.128	0.000**
灌溉×施肥 Irrigation × Fertilizer	0.990	0.501	0.432	0.423	0.586	0.385	0.757

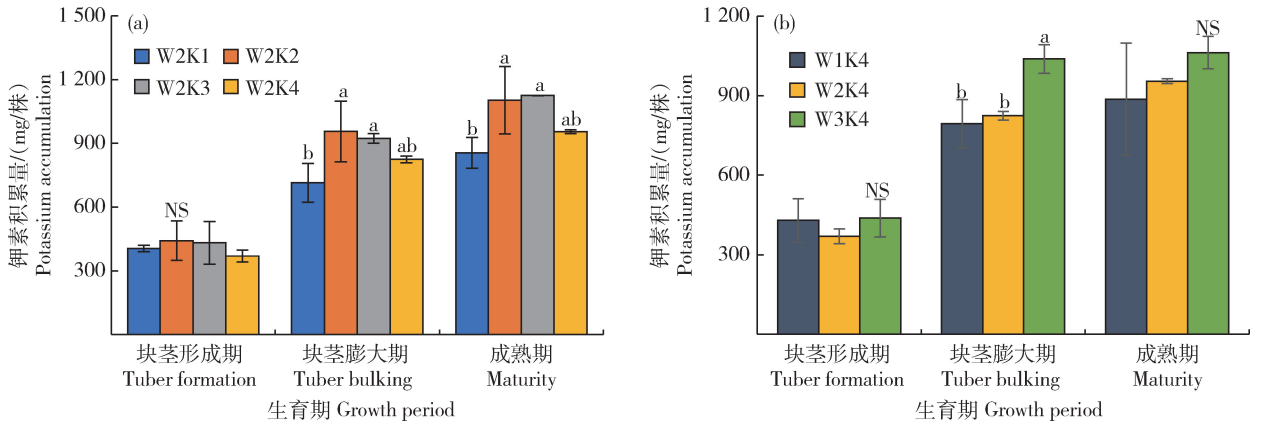
注: * 表示显著差异($P < 0.05$), ** 表示极显著差异($P < 0.01$)。下表同。

Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$). The same below.

2.2 不同灌水定额和施钾量对马铃薯钾素(全K)累积的影响

不同灌水定额和施钾量对地上部和块茎钾素累积的影响见图3和图4。在块茎形成期、块茎膨大期和成熟期,马铃薯各器官钾素累积量依次为地上>块茎,块茎>地上,块茎>地上。地上部和块茎钾素累积量均随着生育期的推进逐渐增加。成熟期时,块茎中的钾素累积量占植株钾素累积量的51.71%~65.26%,最大值为1770.0 mg/株。相同的灌水定额下,增加施钾量能够不同程度的提高地上部和块茎钾素累积量,其中地上部钾素累积量

在K2或K3处理下达到最大值,块茎钾素累积量在K4处理下达到最大值(除W2K4外)。在块茎膨大期和成熟期,W2K2和W2K3处理地上部钾素累积量显著高于W2K1处理33.72%、29.13%和29.03%、31.63%。相同的施钾量下,在块茎形成期,W1和W3处理下地上部和块茎钾素累积量均大于W2处理;在块茎膨大期和成熟期,增大灌水定额,马铃薯地上部和块茎钾素累积量逐渐增加,其中块茎膨大期时W3K4处理马铃薯地上部和块茎钾素累积量比W1K4分别提高30.75%和34.39%,达到了显著水平。



NS 表示处理间无显著差异。下图同。

NS indicates no significant difference between treatments in the figure. The same below.

图 3 灌水定额 (a) 和施钾量 (b) 对马铃薯地上部钾素积累的影响

Fig. 3 Effects of irrigation quota (a) and potassium rate (b) on potassium accumulation in stems and leaves of potato

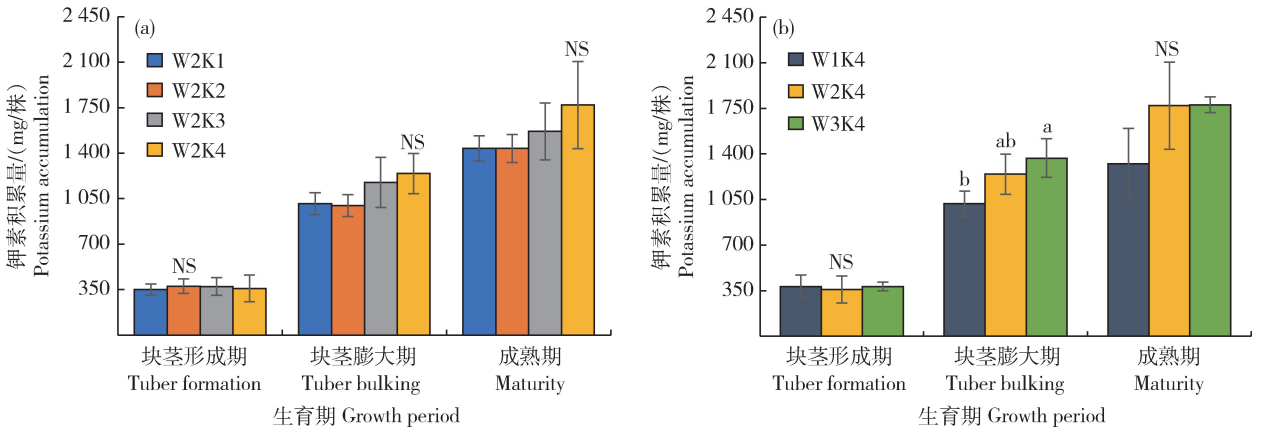


图 4 灌水定额 (a) 和施钾量 (b) 对马铃薯块茎钾素积累的影响

Fig. 4 Effects of irrigation quota (a) and potassium rate (b) on potassium accumulation in tuber of potato

2.3 不同灌水定额和施钾量对马铃薯产量及构成要素的影响

不同灌水定额和施钾量对马铃薯产量及其构成要素的影响见表 2: 灌水对马铃薯商品薯率有显著影响 ($P < 0.05$), 施钾量对马铃薯产量有显著影响 ($P < 0.05$), 其中 W3K3 处理商品薯率和产量均达到了最大值, 分别为 94.0% 和 34 910.7 kg/hm², W3K2 处理单株产量达到了最大值 791.3 g/株。

W3 处理平均商品薯率显著高于 W1 处理, 最大值为 94.0%, 比 W1 处理最大值提高 7.08%。W3 处理平均产量显著高于 W2 处理, 最大值为 34 910.7 kg/hm², 比 W2 处理最大值提高 10.42%。在 W1 处理下, K1、K2、K3 与 K4 处理之间产量差

异显著, 其中 K3 处理较 K4 处理产量显著增加 20.48%。在 W2 和 W3 处理下, 各施钾处理各项指标均无显著差异。相同的灌水定额下, 马铃薯的产量均在 K3 处理达到最大值, 3 个灌水水平下, K3 处理平均产量为 32 983.2 kg/hm², 比 K1、K2、K4 处理分别提高 9.53%、5.88%、13.06%。

K3 处理平均产量显著高于 K1 和 K4 处理, 最大值为 34 910.7 kg/hm², 比 K1 和 K4 处理最大值分别提高 11.94% 和 11.40%。K2 处理平均块茎数量显著高于 K4 处理, 最大值为 5.4 个/株, 比 K4 处理最大值提高 10.82%。在 K1、K2 处理下, 各灌水处理各项指标差异均不显著。在 K3 处理下, W3 处理商品薯率比 W1 显著提高 9.30%。在 K4 处理下, W3 处

理产量显著高于 W1 处理,增幅为 16.46%。相同的施钾量下,W1 和 W3 处理马铃薯产量均高于 W2 处理,4

个施钾水平下,W3 处理平均产量为 32 294.0 kg/hm²,比 W1、W2 处理分别提高 5.84%、8.58%。

表 2 灌水定额和施钾量对马铃薯产量及构成要素的影响

Table 2 Effects of irrigation quota and potassium rate on yield and its components of potato

灌水水平 Irrigation level	施钾水平 Potassium level	块茎数量/ (个/株) Tuber number	单株产量/(g/株) Tuber of perplant	商品薯率/% Commodity potato rate	产量/(kg/hm ²) Yield
W1	K1	5.1±1.1 ab	684.2±140.0 ab	87.7±3.3 abc	3 1187.5±2 615.1 abc
	K2	5.4±1.5 a	600.1±100.3 ab	87.3±4.1 bc	3 1530.9±2 262.1 abc
	K3	5.6±0.7 a	702.9±216.6 ab	85.8±5.5 c	3 2421.4±1 474.8 ab
	K4	4.0±0.6 b	521.8±113.1 b	87.8±7.5 abc	2 6910.9±2 361.4 d
W2	K1	4.7±0.3 ab	674.8±140.0 ab	88.1±4.7 abc	28 218.2±2 823.6 cd
	K2	5.4±0.3 a	754.4±36.5 a	90.1±2.3 abc	29 937.8±3 245.7 bcd
	K3	5.4±0.2 a	619.6±64.7 ab	87.7±2.5 abc	31 617.4±1 915.2 abc
	K4	4.8±0.7 ab	696.7±74.1 ab	92.8±2.7 ab	29 194.4±2 123.1 bcd
W3	K1	5.5±0.5 a	688.1±37.1 ab	90.0±0.9 abc	30 937.4±4 037.2 abcd
	K2	5.2±0.4 ab	791.3±96.9 a	92.9±2.5 ab	31 988.1±168.2 abc
	K3	4.9±1.0 ab	700.5±132.5 ab	94.0±0.6 a	34 910.7±2 984.5 a
	K4	4.9±0.8 ab	676.3±117.2 ab	88.9±4.9 abc	31 339.9±1 511.1 abc

2.4 不同灌水定额和施钾量对水肥利用效率的影响

不同灌水定额和施钾量对水肥利用效率的影响见表 3:马铃薯水分利用效率受灌水影响显著($P < 0.05$),钾肥偏生产力受施钾量影响极显著($P < 0.01$)。W1 处理平均水分利用效率比 W3 处理提高 17.43%,达到了显著性水平,K3 处理平均水分利用效率比 K4 处理提高 15.90%,差异显著。相同的灌水定额下,马铃薯水分利用效率均在 K3 处理达到最大值。相同的施钾量下,水分利用效率随着总灌水量的增加而减小。相同的灌水定额下,K1 处理钾肥偏生产力最大。相同的施钾量下,W2 处理钾肥偏生产力最小(除 W1K4 外)。W3 处理平均钾肥偏生产力高于 W1 和 W2 处理,并与 W2 处理有显著性差异。不同施钾处理间钾肥偏生产力差异显著,K1 处理获得最大值。在 W2 灌水定额下,钾素吸收效率随着施钾量的增加而减小,K1 处理钾素吸收效率最大,与其他处理差异显著;钾素利用效率在 K3 处理达到最大值,但与其他处理没有显著性差异,尽管比 K4 处理提高了 34.02%。在 K4 施钾量

下,W3 处理钾素利用效率最大,较 W1 和 W2 处理提高 17.74%和 19.48%,钾素吸收效率基本一致,接近 40%。

3 讨论

3.1 不同灌水定额和施钾量对马铃薯钾素积累的影响

灌水定额的大小会影响土壤湿润体的形状以及土壤水分分布情况,进而影响土壤的通气性。而通气性的时空变化也会影响根系的结构和活性^[6,29],进而影响植物的生长、光合作用、呼吸作用等过程,阻碍植物对养分的吸收和积累,影响最终产量的形成^[30-31]。缺钾或钾肥用量过多均会引起养分失衡,不利于植株对养分的吸收^[32-33]。钾素与作物的生长发育关系密切,对茎叶中碳水化合物的运输有良好的促进作用^[14]。白志强等^[34]的研究发现施钾量控制在适当范围内,对马铃薯各器官养分吸收均产生积极的影响。本试验结果表明,整个生育期内地上部和块茎钾素积累量均呈“慢—快—慢”的上升趋势,吸收最多的时期均在块茎膨大期,适量增施钾肥

表 3 灌水定额和施钾量对水肥利用效率的影响

Table 3 Effects of irrigation quota and potassium rate on the use efficiency of water and potassium

灌水水平 Irrigation level	施钾水平 Potassium level	水分利用效率/ (kg/(hm ² ·mm)) Water use efficiency	钾肥偏生产力/ (kg/kg) Partial factor productivity from applied K	钾素利用效率/ (kg/kg) K nutrient use efficiency	钾素吸收效率/ (kg/kg) K nutrient uptake efficiency
W1	K1	117.0±16.5 a	173.3±14.5 a		
	K2	117.0±13.4 a	121.3±8.7 b		
	K3	118.7±5.5 a	95.4±4.3 d		
	K4	99.6±14.2 ab	64.1±5.6 e	184.9±54.8	0.38±0.16 b
W2	K1	102.5±12.0 ab	156.8±15.7 a	209.5±13.1	0.75±0.11 a
	K2	105.4±23.0 ab	115.2±12.5 bc	217.7±26.2	0.53±0.09 b
	K3	106.8±14.7 ab	93.0±5.6 d	244.2±52.7 NS	0.39±0.09 b
	K4	97.5±6.2 ab	69.5±5.1 e	182.2±33.8	0.39±0.06 b
W3	K1	92.9±11.4 b	171.9±22.4 a		
	K2	98.4±7.4 ab	123.0±0.7 b		
	K3	105.4±11.4 ab	102.7±8.8 cd		
	K4	88.3±7.5 b	74.6±3.6 e	217.7±81.0	0.37±0.11 b

能够增加马铃薯地上部和块茎的钾素积累量,这与已有的研究结果基本一致^[18,34-35]。在块茎膨大期开始后增大灌水定额至 20 mm 更有利于马铃薯钾素积累,膨大期前把灌水定额从 5 mm 提高到 10 mm 就会降低马铃薯对钾素的吸收。这可能是因为马铃薯生长前期根系较浅,当灌水定额大于 5 mm 时,土壤湿润范围大于马铃薯根系生长范围,不仅影响根区土壤通气性,还会造成土壤养分运移到马铃薯根区以外,降低马铃薯对钾素的吸收和积累^[36]。

3.2 不同灌水定额和施钾量对马铃薯产量及水肥利用效率的影响

乔丽仿^[37]研究表明,在同一试验站的马铃薯产量为 42.7~56.9 t/hm²。本试验中马铃薯产量普遍不高,可能与本试验区与之相比土壤含氮量较低,施氮量不能满足作物生长需要有关。氮肥不足不仅会影响植株对钾的吸收,还会导致作物生长受阻,干物质质量减少,进而影响马铃薯产量^[38-40]。本试验结果表明,相同的灌水定额下,增加施钾量能够增加马铃薯产量,但钾肥施用量过多,马铃薯产量和水分利用效率又开始下降,均在 K3 处理达到最大值。说明土壤水分充足的条件下,适宜的施钾量可以促进

块茎膨大,增加马铃薯产量,施钾量不足或者过多都会导致马铃薯不同程度的减产,这与殷文等^[41]、赵欢等^[18]的结论相似。相同的施钾量下(除 W1K4 外),W1 和 W3 处理下马铃薯的产量和钾肥偏生产力均大于 W2 处理,可能是因为试验区土壤基础肥力较低,速效钾含量较少,W2 处理下块茎膨大期前灌水定额较大,植物根系较小,使得钾素运移到植物根区以外,加剧了钾素亏缺,不利于马铃薯块茎的膨大和干物质积累,进而影响马铃薯产量,表明在块茎膨大期前滴灌灌水定额应小于 10 mm,少量多次灌溉更有利于马铃薯产量的增长。相同的灌水定额下,马铃薯水分利用效率随着施钾量的增加先增加后减小,均在 K3 处理下达到最大值。相同的施钾量下,水分利用效率最大值出现在 W1 处理,最小值出现在 W3 处理,说明增大灌水定额会降低水分利用效率,W1 处理的平均水分利用效率最高,比 W3 处理显著提高 17.43%,与 W2 处理无显著差异,这与张富仓等^[42]的研究结论一致。侯翔皓等^[28]研究表明,钾素利用效率为 250~473 kg/kg,钾素吸收效率为 36%~64%。本研究中钾素吸收效率与其基本一致,但钾素利用效率偏低,这是因为马铃薯产

量偏低造成的。施钾量不超过 340 kg/hm^2 时增施钾肥、块茎膨大期开始后增大灌水定额至 20 mm 均能够提高钾素利用效率。随着施钾量的增加,钾素吸收效率显著降低,但增大灌水定额并不会显著降低钾素吸收效率,三种灌水定额下,钾素吸收效率均基本接近 40% ,可见本试验中钾肥吸收效率不高,这可能是因为在试验中氮肥施用量过少,导致氮钾配施比例失衡,氮肥施用不足影响了钾素的吸收。相同的灌水定额下,马铃薯钾肥偏生产力随着施钾量的增加而减小,适量增施钾肥虽然能够提高马铃薯的产量,但产量的增加速率低于肥料的增长速率,导致 K1 处理下的钾肥偏生产力最高,这与冯志文等^[4]、Wang 等^[43]的研究结果一致。

4 结 论

本研究通过测定马铃薯生育期内土壤水分、植株钾素含量和块茎产量等指标,分析不同灌水定额和施钾量对马铃薯耗水量、钾素积累吸收、块茎产量和水肥利用效率的影响,主要结论如下:

1) 马铃薯全生育期吸钾规律呈现出“慢—快—慢”的 S 型变化特征,在块茎膨大期钾素吸收最快、最多,占整个生育期内钾素累积量的 $42.36\% \sim 55.87\%$ 。

2) 灌水定额增加,耗水量增大,水分利用效率降低。虽然差异不显著,但增大灌溉定额的 W2 比 W1 产量有所降低。与 W2 相比,W3 能够显著提高马铃薯产量。在 K4 处理下,与 W1 和 W2 相比,W3 的钾素利用效率提高 17.74% 和 19.48% ,且钾素吸收效率基本不变。

3) 马铃薯产量、水分利用效率在施钾量为 $180 \sim 340 \text{ kg/hm}^2$ 范围内均有随施钾量增加而增大的趋势,当施钾量达到 K4 时产量和水分利用效率显著降低。在 W2 处理下,马铃薯钾素利用效率在 K3 最大,虽然差异不显著,但比其他处理提高 $12.17\% \sim 34.02\%$ 。

4) 综合考虑马铃薯的耗水、产量、钾素累积以及水肥利用效率,块茎膨大期前滴灌灌水定额应小于 10 mm ,在块茎膨大期前灌水定额为 5 mm ,膨大期开始后增大为 20 mm ,施钾量 340 kg/hm^2 可作为本试验条件下马铃薯较为适宜的灌水施肥组合。

参考文献 References

[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(3): 166-170

Sheng W M. Progress of research on potato molecular breeding for qualities [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(3): 166-170

[2] Wang X K, Guo T, Wang Y, Xing Y Y, Wang Y F, He X L. 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

[3] Jákli B, Hauer-Jákli M, Böttcher F, Meyer zur, Müdehorst J, Senbayram M, Dittert K. Leaf, canopy and agronomic water-use efficiency of field-grown sugar beet in response to potassium fertilization [J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(1): 99-110

[4] 冯志文, 康跃虎, 万书勤, 刘士平. 滴灌施肥对内蒙古沙地马铃薯生长和水肥利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(5): 242-249

Feng Z W, Kang Y H, Wan S Q, Liu S P. Effects of drip fertigation levels on potato growth and the water and fertilizer efficiency on sandy soil in Inner Mongolia [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5): 242-249 (in Chinese)

[5] Ahmadi S H, Plauborg F, Andersen M N, Sepaskhah A R, Jensen C R, Hansen S. Effects of irrigation strategies and soils on field grown potatoes: Root distribution [J]. *Agricultural Water Management*, 2011, 98(8): 1280-1290

[6] Pivonia S, Cohen R, Cohen S, Kigel J, Levita R, Katan J. Effect of irrigation regimes on disease expression in melon plants infected with *Monosporascus cannonballus* [J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2004, 110(2): 155-161

[7] 李明思, 康绍忠, 孙海燕. 点滴滴灌滴头流量与湿润体关系研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(4): 32-35

Li M S, Kang S Z, Sun H Y. Relationships between dripper discharge and soil wetting pattern for drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(4): 32-35 (in Chinese)

[8] Puértolas J, Albacete A, Dodd I C. Irrigation frequency transiently alters whole plant gas exchange, water and hormone status, but irrigation volume determines cumulative growth in two herbaceous crops [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 176: 104101

[9] 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 (in Chinese)

[10] Yan S C, Wu Y, Fan J L, Zhang F C, Qiang S C, Zheng J, Xiang Y Z, Guo J J, Zou H Y. Effects of water and fertilizer management on grain filling characteristics, grain weight and

- productivity of drip-fertigated winter wheat[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 213: 983-995
- [11] Yang K J, Wang F X, Shock C C, Kang S Z, Huo Z L, Song N, Ma D. Potato performance as influenced by the proportion of wetted soil volume and nitrogen under drip irrigation with plastic mulch[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 179: 260-270
- [12] Meyer R D, Marcum D B. Potato yield, petiole nitrogen, and soil nitrogen response to water and nitrogen[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 90(3): 420-429
- [13] 李瑞, 樊明寿, 郑海春, 郝翻身, 高娃, 王伟妮, 赵晓梅. 基于产量水平的内蒙古阴山地区马铃薯施肥评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(6): 181-188
Li R, Fan M S, Zheng H C, Gao F S, Gao W, Wang W N, Zhao X M. Evaluation of potato fertilization based on yield level in Yinshan region of Inner Mongolia [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(6): 181-188 (in Chinese)
- [14] Zörb C, Senbayram M, Peiter E. Potassium in agriculture: Status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656-669
- [15] 王立梅, 刘奕清, 阮玉娟. 植物钾素研究进展[J]. *中国园艺文摘*, 2015, 31(5): 71, 148
Wang L M, Liu Y Q, Ruan Y J. The research progress of potassium to plants[J]. *Chinese Horticulture Abstracts*, 2015, 31(5): 71, 148 (in Chinese)
- [16] Westermann D T, James D W, Tindall T A, Hurst R L. Nitrogen and potassium fertilization of potatoes: Sugars and starch[J]. *American Potato Journal*, 1994, 71(7): 433-453
- [17] Bansal S, Trehan S. Effect of potassium on yield and processing quality attributes of potato[J]. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(1): 48-54
- [18] 赵欢, 苟久兰, 何佳芳, 赵伦学, 赵平英, 肖厚军, 王正银, 李振轮. 钾肥对马铃薯干物质积累、钾素吸收及利用效率的影响[J]. *西南农业学报*, 2015, 28(2): 644-649
Zhao H, Gou J L, He J F, Zhao L X, Zhao P Y, Xiao H J, Wang Z Y, Li Z L. Effects of potassium fertilizer on dry matter accumulation, potassium absorption and utilization efficiency of potato [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2015, 28(2): 644-649 (in Chinese)
- [19] 康文钦, 石晓华, 敖孟奇, 秦永林, 樊明寿. 马铃薯的钾素需求及营养诊断[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(2): 1-4
Kang W Q, Shi X H, Ao M Q, Qin Y L, Fan M S. Potassium requirement of potato and diagnosis of potato potassium status [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(2): 1-4 (in Chinese)
- [20] 高媛, 韦艳萍, 樊明寿. 马铃薯的养分需求[J]. *中国马铃薯*, 2011, 25(3): 182-187
Gao Y, Wei Y P, Fan M S. Nutrient requirements for producing potato tubers[J]. *Chinese Potato Journal*, 2011, 25(3): 182-187 (in Chinese)
- [21] 何文寿, 马琨, 代晓华, 何进智, 马仁彪. 宁夏马铃薯氮、磷、钾养分的吸收累积特征[J]. *植物营养与肥科学报*, 2014, 20(6): 1477-1487
He W S, Ma K, Dai X H, He J Z, Ma R B. Characteristics of nitrogen phosphorus and potassium uptake and accumulation of potato in Ningxia [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(6): 1477-1487 (in Chinese)
- [22] 段玉, 张君, 李焕春, 赵沛义, 妥德宝, 姚俊卿, 安昊, 贾有余. 马铃薯氮磷钾养分吸收规律及施肥肥效的研究[J]. *土壤*, 2014, 46(2): 212-217
Duan Y, Zhang J, Li H C, Zhao P Y, Tuo D B, Yao J Q, An H, Jia Y Y. Fertilization effect and nutrition use efficiency of potato in Inner Mongolia[J]. *Soils*, 2014, 46(2): 212-217 (in Chinese)
- [23] 刘克礼, 张宝林, 高聚林, 盛晋华. 马铃薯钾素的吸收、积累和分配规律[J]. *中国马铃薯*, 2003(4): 204-208
Liu K L, Zhang B L, Gao J L, Sheng J H. The patterns of potassium absorption, accumulation and distribution in potato [J]. *Chinese Potato Journal*, 2003(4): 204-208 (in Chinese)
- [24] 王丽丽. 施钾对膜下滴灌马铃薯产质量及钾素吸收利用的影响[D]. 呼号浩特: 内蒙古农业大学, 2014
Wang L L. Effect of K application on production, quality and K uptake utilization of potato in mulched drip irrigation[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014 (in Chinese)
- [25] 贾立国, 康文钦, 苏亚拉其其格, 樊明寿. 滴灌条件下高产马铃薯植株: 土壤系统钾素平衡的研究[J]. *中国马铃薯*, 2018, 32(1): 35-40
Jia L G, Kang W Q, Su Y, Fan M S. Potassium balance of high: yielding potato in plant: Soil system under drip irrigation [J]. *Chinese Potato Journal*, 2018, 32(1): 35-40 (in Chinese)
- [26] 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 (in Chinese)
- [27] 翁定河, 李小萍, 王海勤, 姜照伟. 马铃薯钾素吸收积累与施用技术[J]. *福建农业学报*, 2010, 25(3): 319-324
Weng D H, Li X P, Wang H Q, Jiang Z W. Potassium absorption and fertilization of potatoes[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2010, 25(3): 319-324 (in Chinese)
- [28] 侯翔皓, 张富仓, 胡文慧, 王海东, 范军亮, 李志军. 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]. *植物营养与肥科学报*, 2019, 25(1): 85-96
Hou X H, Zhang F C, Hu W H, Wang H D, Fan J L, Li Z J. 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 (in Chinese)

- [29] Herkelrath W N, Miller E E, Gardner W R. Water uptake by plants: I. divided root experiments[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(6): 1033-1038
- [30] Wang H D, Wu L F, Wang X K, Zhang S H, Cheng M H, Feng H, Fan J L, Zhang F C, Xiang Y Z. Optimization of water and fertilizer management improves yield, water, nitrogen, phosphorus and potassium uptake and use efficiency of cotton under drip fertigation [J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 245: 106662
- [31] 胡明芳, 田长彦, 马英杰. 不同水肥条件下棉花苗期的生长、养分吸收与水分利用状况[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(3): 35-37
Hu M F, Tian C Y, Ma Y J. The effects of water and fertilizer on cotton growth, nutrition absorption and water utilization[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2002, 20(3): 35-37 (in Chinese)
- [32] Jenkins P D, Mahmood S. Dry matter production and partitioning in potato plants subjected to combined deficiencies of nitrogen, phosphorus and potassium[J]. *Annals of Applied Biology*, 2003, 143(2): 215-229
- [33] Pettigrew W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. *Physiologia Plantarum*, 2008, 133(4): 670-681
- [34] 白志强, 何文寿, 梁熠, 何进勤. 宁夏雨养区施钾对马铃薯氮磷钾养分积累及产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(14): 74-78
Bai Z Q, He W S, Liang Y, He J Q. Effects of potassium application on nitrogen, phosphorus and potassium nutrient accumulation and yield of potato in rainfed area of Ningxia[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(14): 74-78 (in Chinese)
- [35] 王丽丽, 张胜, 蒙美莲, 岳红丽, 范香全, 王立秋. 施钾对膜下滴灌马铃薯产量·品质及钾素利用效率的影响[J]. *安徽农业科学*, 2014, 42(3): 731-734
Wang L L, Zhang S, Meng M L, Yue H L, Fan X Q, Wang L Q. Effects of potassium application on production, quality and potassium fertilizer utilization efficiency of coated drip irrigation potato[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, 42(3): 731-734 (in Chinese)
- [36] 牛文全, 郭超. 根际土壤通透性对玉米水分和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2785-2791
Niu W Q, Guo C. Effects of rhizosphere soil permeability on water and nutrient uptake by maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2785-2791 (in Chinese)
- [37] 乔丽仿. 不同施钙量和滴灌湿润比对马铃薯生长发育的影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2019
Qiao L F. Effects of different calcium application rate and proportion of wetted soil volume of drip irrigation on potato growth[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019 (in Chinese)
- [38] 周龙, 吕玉, 朱启林, 龙光强, 汤利. 施氮与间作对玉米和马铃薯钾吸收与分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(6): 1485-1493
Zhou L, Lü Y, Zhu Q L, Long G Q, Tang L. Effects of N application on potassium absorption and distribution of maize and potato in intercropping system [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2016, 22(6): 1485-1493 (in Chinese)
- [39] Munoz F, Mylavarapu R S, Hutchinson C M. Environmentally responsible potato production systems: A review[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(8): 1287-1309
- [40] 王英珍, 张虎平, 黄小三, 王纪忠, 程瑞, 陈国栋, 张绍玲. 钾在梨树内的分配及对梨树生长和叶片光合能力的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2017, 40(1): 60-67
Wang Y Z, Zhang H P, Huang X S, Wang J Z, Cheng R, Chen G D, Zhang S L. Effect of potassium supply on plant potassium distribution and growth and leaf photosynthetic capacity of *Pyrus pyrifolia*[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2017, 40(1): 60-67 (in Chinese)
- [41] 殷文, 孙春明, 马晓燕, 徐霞, 赵万平. 钾肥不同用量对马铃薯产量及品质的效应[J]. *土壤肥料*, 2005(4): 44-47
Yin W, Sun C M, Ma X Y, Xu X, Zhao W P. Effect of K application on yield and quality of the potato[J]. *Soils and Fertilizers*, 2005(4): 44-47 (in Chinese)
- [42] 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, 48(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, 48(3): 270-278 (in Chinese)
- [43] Wang H D, Wang X K, Bi L F, Wang Y, Fan J L, Zhang F C, Hou X H, Cheng M H, Hu W H, Wu L F, Xiang Y Z. 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

责任编辑: 刘迎春