

# 河北坝上地区不同降水年型下马铃薯耗水特征

唐建昭<sup>1</sup>,肖登攀<sup>1</sup>,郭馨泽<sup>2</sup>

(1.河北省科学院地理科学研究所 河北省地理信息开发应用工程技术研究中心,河北 石家庄 050011;2.张北县气象局,河北 张北 076450)

**摘要:**基于2010–2017年连续8年的马铃薯生育期和产量数据、以及生育期内气象和土壤数据,利用作物–土壤水分平衡公式的方法,揭示坝上地区马铃薯在不同降水年型下不同生育阶段的耗水特征。结果表明:研究区马铃薯生育期内降水量在260~449 mm之间,其中25%的试验年份为干旱年份;不同生育阶段的耗水量在25~182 mm之间,其中播种~出苗阶段和薯块形成~薯块膨大阶段在湿润年型下耗水量最大,出苗~薯块形成阶段在干旱年型下耗水最多,薯块膨大~成熟阶段在正常年型下耗水最多;薯块形成~薯块膨大阶段的日耗水量显著高于其他阶段,干旱、正常和湿润年型下该阶段的日耗水量分别为3.6、3.9 mm和4.7 mm。2010–2017年马铃薯产量8 250~24 500 kg·hm<sup>-2</sup>,水分利用效率32~135 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>,其中干旱年型下马铃薯水分利用效率最高,显著高于其他年型;另外薯块膨大~成熟阶段耗水量的增加对马铃薯产量具有显著的正效应。坝上地区在马铃薯薯块膨大~成熟阶段增加灌溉并且在其他阶段进行适当的干旱胁迫对提升该地区的马铃薯产量具有重要的意义。

**关键词:**马铃薯;产量;蒸散量;水分利用效率;坝上地区;降水年型

**中图分类号:**S532 **文献标志码:**A

## Water consumption characteristics of potato under different precipitation years in Bashang area in Hebei province

TANG Jian-zhao<sup>1</sup>, XIAO Deng-pan<sup>1</sup>, GUO Xin-ze<sup>2</sup>

(1. Center of Geographic Information Development, Application and Engineering Technology Research of Hebei, Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang, Hebei 050011, China;

2. Zhangbei Meteorological Bureau, Zhangbei, Hebei 076450, China)

**Abstract:** The water consumption characteristics of potato under different precipitation years was analyzed based on the experiment data, soil water data, and climate data during the potato growing periods from 2010 to 2017. Results showed that total precipitation during potato growing period ranged from 260 to 449 mm, and 25% of the experimental years were dry years. The amount of water consumption of potato ranged from 25 to 182 mm during different growing periods, the water consumption was maximum for the period of planting-emergency and tuberization-tuber bulking under wet years compared with other years. Water consumption during the period of emergency-tuberization was more under dry years compared with other year types. The water consumption of potato during the period of tuber bulking to maturity was more under normal years compared with dry years and wet years. Enhance the water consumption of potato during the period of tuber bulking to maturity had positive effects on potato yield. The daily water consumption of potato was highest during the period of tuberization-tuber bulking compared with other stages under all year types and the values of which were 3.6, 3.9 mm, and 4.7 mm, respectively under dry, normal, and wet years. Potato yields generally increased from 8,250 to 24,500 kg·hm<sup>-2</sup>. Water use efficiency (WUE) of potato generally increased from 32 to 135 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup> under experimental years and the WUE was the highest under dry years. Enhancing the irrigation amount during the period of tuber bulking to maturity and medium drought exercise made under other growing periods had significance impacts on increasing potato yield in Bas-

hang area.

**Keywords:** potato; yield; evapotranspiration; water use efficiency; Bashang area; precipitation year types

马铃薯是世界第四大口粮作物,仅次于小麦、玉米和水稻<sup>[1]</sup>。我国马铃薯生产面积和总产均居世界首位<sup>[2]</sup>。河北坝上地区气候凉爽,光照条件充足,昼夜温差大,适宜马铃薯种植;并且雨季和马铃薯生长季匹配度高,有利于马铃薯高产的形成<sup>[3]</sup>,因此坝上地区是我国马铃薯生产的主产区之一<sup>[4]</sup>。当前该地区马铃薯种植面积占河北省马铃薯播种面积的四分之一左右<sup>[3]</sup>,马铃薯生产对保障坝上地区乃至整个河北地区粮食安全具有重要意义。

坝上地区马铃薯生产主要在雨养条件下进行,提高该地区雨养马铃薯产量的措施主要包括优良品种的选育、播期的调整、密度的调整以及起垄覆膜等措施<sup>[5-8]</sup>。另外,坝上地区的降水量少且年际间变异大<sup>[6]</sup>,而马铃薯生育期需水量在 400~800 mm 之间<sup>[6,9]</sup>,通常情况下,降雨无法保证该地区马铃薯高产和稳产。因此,通过灌溉提升马铃薯产量也是必须的措施。然而长期灌溉造成了坝上地区水资源危机日趋严峻,主要表现为地下水的严重下降。已有的研究表明,河北坝上地区从 20 世纪 90 年代到 2005 年,地下水静水位由 3~15 m 下降为 17~50 m<sup>[10]</sup>。因此通过大量灌溉使马铃薯增产在坝上地区是不可持续的,通过优化灌溉方式达到节水和增产的目的对当地马铃薯生产的可持续发展意义重大。优化灌溉方式和提升作物产量的研究主要集中在最佳灌溉时期和灌溉量的确定<sup>[11-13]</sup>,及以增产和节水为目的的灌溉方式的调整<sup>[14-15]</sup>。雨养马铃薯生产中坝上地区土壤水分活跃层约为 80 cm<sup>[16]</sup>,降水可以对土壤水分进行补充,同时,又会对地下水进行补充<sup>[17]</sup>。然而,不同降水年型下对土壤水和地下水的补充也会产生差异;同时,不同降水年型下马铃薯的水分利用也会有很大差异,但这些实际问题和科学问题在河北坝上地区马铃薯生产中还鲜有研究。因此,本文基于马铃薯长期定位试验揭示河北坝上地区马铃薯在不同降水年型下的耗水特征和产量特征以及马铃薯耗水和产量的

关系,为提高该地区马铃薯产量和优化灌溉方案,进而促进该地区马铃薯生产的可持续性提供科学指导和理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

试验于 2010 年 4 月至 2017 年 9 月,在张北县张北镇龙王庙村(41°09'N,114°42'E,海拔 1 393.3 m)进行。马铃薯生长季降水量在 226~512 mm 之间,占全年降水量的 80%,生长季平均气温在 12~15℃之间,生长季总辐射在 3 300~3 900 MJ·m<sup>-2</sup>之间,无霜期 105 d 左右。土壤类型为砂壤土(根据国际制分类),0~50 cm 土层土壤容重、凋萎含水量、田间持水量及饱和含水量分别为 1.41~1.55 g·cm<sup>-3</sup>、3.1%~4.6%、20.6%~25.9%和 35.0%~36.0%,其中土壤含水量均为体积含水量,具体土壤性质见表 1。

### 1.2 试验设计

2010-2017 年试验中马铃薯均在雨养条件下进行种植。供试马铃薯均为中熟品种,生育期 130 d 左右。总试验小区面积为 1 000 m<sup>2</sup>,马铃薯播种密度为 40 000 株·hm<sup>-2</sup>,播种深度为 15 cm。播前在试验小区内一次性施入农家肥 2 500 kg,其他时期不再进行追肥。记录的马铃薯生育期包括播种、出苗、薯块形成、薯块膨大和成熟。生育期内采用烘干法测定 0~50 cm 土层土壤水分。马铃薯成熟时对小区内所有的植株进行测产,测定项目包括总产、单株薯块重以及收获指数。对试验田进行多次中耕以保证无杂草和病虫害影响。

### 1.3 研究方法

1.3.1 1981-2017 年张北地区降雨年型的划分 根据不同等级的降水保证率将研究区 1981-2017 年划分为湿润年、正常年和干旱年<sup>[6]</sup>。将降水保证率低于 25% 的年份定义为湿润年份,降水保证率在 26%~75% 的年份定义为正常年份,降水保证率在 76%

表 1 试验地区土壤物理性质

Table 1 The physical properties of soil in the experimental site

土层深度/cm Depth	土壤容重/(g·cm <sup>-3</sup> ) Bulk density	凋萎含水量/% Wilting water content	田间持水量/% Field capacity	饱和含水量/% Saturated water content
0~10	1.55	3.8	20.6	35
10~20	1.52	3.1	23.6	35
20~30	1.50	3.7	25.9	36
20~40	1.43	4.6	25.0	36
40~50	1.41	3.5	24.7	36

~100%的年份定义为干旱年份。具体降水量范围和降水年型如表2所示。2010—2017年试验年份具体年型划分如表3所示。

试验年份中2011、2015年为干旱年份,马铃薯生长季降水量分别为281、260 mm;2012—2014年和2017年为正常年份,生长季降水量在318~372 mm之间;2010年和2016年为湿润年份,生长季降水量分别为449 mm和393 mm。

1.3.2 作物耗水量(ET)计算 作物田间耗水量是衡量与评价农作物农田水分供需关系的重要指标,是计算作物水分利用效率的关键参数,也是各种农艺措施对农田水分调控的主要对象。对雨养农业而言,降水是水分的唯一来源,马铃薯耗水量主要来自播前土壤贮水量和生育期间的降水。作物田间耗水量由作物蒸腾量和土壤蒸发量组成,应用田间水量平衡公式进行估算:

$$\Delta W = P + I + G - ET - R - D \quad (1)$$

其中, $\Delta W$ 为土壤水分在某时段内的变化值; $P$ 为降水量(mm); $I$ 为灌溉量(mm); $G$ 为毛管上升水量(mm); $ET$ 为作物耗水量或农田蒸散量(mm); $R$ 为径流量(mm); $D$ 为渗漏量(mm)。坝上地区以旱地为主,土层较浅,且地下水埋深均在15 m以下,因此计算时可以忽略毛管上升水量 $G$ 和渗漏量 $D$ 。试验区强降水次数少,且每次降水过程降水量不大,降水基本上都保留在土壤中,因此本研究中也可忽略径流量 $R$ 。基于以上理论假设,坝上地区马铃薯不同生育阶段或整个生育期的耗水量计算公式为:

$$ET = P - \Delta W \quad (2)$$

式中, $\Delta W$ 为马铃薯整个生育期或某一生育阶段土壤贮水变化量,即作物生育期末(某生育阶段末)土壤贮水量与生育期初(某生育阶段初)土壤贮水量之差。

表2 1981—2017年张北地区降水年型划分

Table 2 The classification of year types based on precipitation in study site from 1981 to 2017

年型 Year types	降水量/mm Precipitation	保证率/% Guarantee rate
干旱年 Dry year	226~302	76~100
正常年 Normal year	303~372	26~75
湿润年 Wet year	373~507	0~25

表3 试验年份的降水年型

Table 3 The year types for the experimental years

年型 Year types	年份 Year
干旱年 Dry year	2011, 2015
正常年 Normal year	2012, 2013, 2014, 2017
湿润年 Wet year	2010, 2016

1.3.3 马铃薯水分利用效率的计算 马铃薯水分利用效率(Water use efficiency, WUE,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{mm}^{-1}$ )计算公式如下:

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

其中, $Y$ 为马铃薯产量(鲜重,  $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),  $ET$ 为马铃薯耗水量(mm)。

## 1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2016进行数据整理、回归分析和作图。

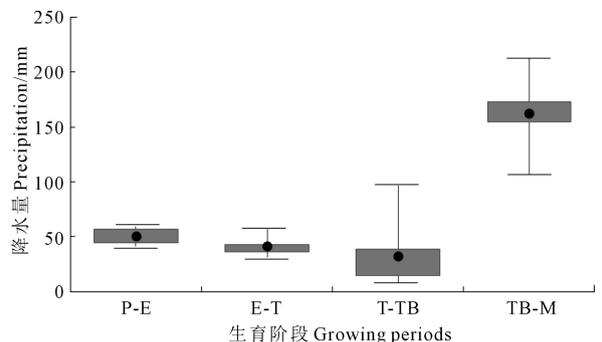
## 2 结果与分析

### 2.1 2010—2017年河北坝上地区马铃薯不同生育阶段降水分布

2010—2017年马铃薯播种~出苗、出苗~薯块形成、薯块形成~薯块膨大和薯块膨大~成熟阶段的降水量分别在41~59、30~57、8.1~97 mm和107~213 mm之间(图1)。且不同生育阶段降水在年际间差异较大,播种~出苗阶段降水变异最小,其变异系数为13.7%,薯块形成~薯块膨大阶段降水变异系数最高,达到90.5%。

### 2.2 2010—2017年不同降水年型下马铃薯耗水特征

图2显示了不同降水年型下马铃薯不同生育阶段的耗水特征。播种~出苗阶段,三种年型下马铃薯耗水量在38~60 mm之间,其中湿润年型下马铃



注:P-E、E-T、T-TB和TB-M分别代表播种~出苗、出苗~薯块形成、薯块形成~薯块膨大和薯块膨大~薯块成熟,下同。图中横线分别代表最大值和最小值;“●”代表平均值;矩形的上边缘和下边缘分别代表75%和25%顺序的值

Note: P-E, E-T, T-TB, and TB-M represent the periods of planting to emergence, emergence to tuberization, tuberization to tuber bulking, and tuber bulking to maturity. The same below. The horizontal lines show the maximum and minimum values; the “●” shows the average value; the upper and lower edges of boxes show 75% and 25%.

图1 试验年份(2010—2017年)马铃薯不同生育阶段降水分布

Fig.1 The distribution of precipitation during different growing periods of potato in experimental years from 2010 to 2017

薯耗水量最多;出苗~薯块形成阶段,马铃薯耗水量在 27~44 mm 之间,其中干旱年型下马铃薯耗水量最多,而湿润年型下耗水量最少;薯块形成~薯块膨大阶段,不同降水年型下马铃薯的耗水量在 25~48 mm 之间,湿润年型下马铃薯耗水量最多;薯块膨大~成熟阶段,不同降水年型下马铃薯耗水量在 126~182 mm 之间,其中正常年型下马铃薯耗水量最多。马铃薯薯块膨大~成熟阶段耗水量显著高于其他生育阶段。

图 3 显示了不同降水年型下马铃薯不同生育阶段日耗水量的变化趋势,试验年份马铃薯生育期日耗水量变化在 0.11~8.1 mm · d<sup>-1</sup>之间,生育期内呈单峰曲线变化趋势。其中薯块形成~薯块膨大阶段马铃薯日耗水量显著高于其他生育阶段,干旱年型、正常年型和湿润年型下该阶段的日耗水量分别为 3.6、3.9 mm 和 4.7 mm。

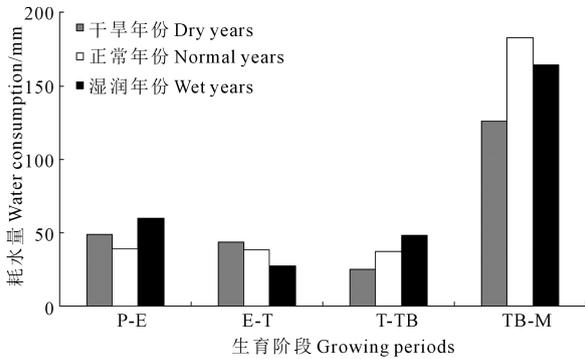


图 2 试验年份 (2010~2017 年) 不同降水年型下马铃薯不同生育阶段耗水特征

Fig.2 The water consumption of potato during different growing periods under different year types

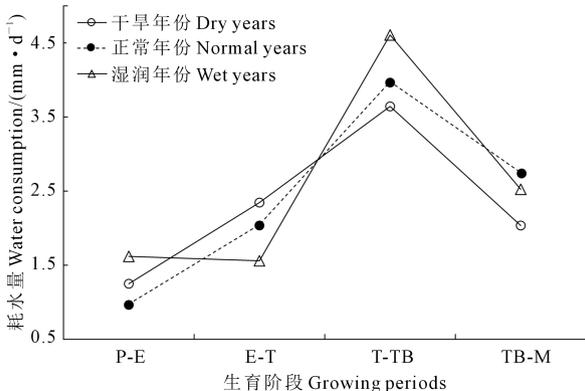


图 3 2010~2017 年不同降水年型下马铃薯不同生育阶段平均日耗水量变化

Fig.3 The daily water consumption of potato during different growing periods under different year types

### 2.3 不同降水年型下马铃薯水分利用效率

2010~2017 年马铃薯的产量在 8 250~24 500 kg · hm<sup>-2</sup>之间,生育期实际蒸散量在 179~343 mm 之间,水分利用效率 (WUE) 在 32~135 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>之间,且年际间马铃薯产量和 WUE 变化趋势相同,其中 2011 年马铃薯产量最高,2015 年 WUE 最高,而 2010 年马铃薯产量和 WUE 均最低 (图 4)。图 5 比较了不同降水年型下马铃薯 WUE 的差异,随着马铃薯生育期内降水量的增加 WUE 呈下降的趋势,干旱年份下马铃薯 WUE 最高,为 107.6 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>,湿润年型下最低,为 49.3 kg · hm<sup>-2</sup> · mm<sup>-1</sup>。

### 2.4 马铃薯产量和不同生长阶段耗水量的关系

图 6 显示了马铃薯不同生育阶段耗水量和马铃薯产量的关系,播种~出苗和薯块形成~薯块膨大两个阶段的耗水量和马铃薯产量呈现负相关的关系,但不显著 ( $P>0.05$ )。出苗~薯块形成和薯块膨大~成熟阶段的耗水量与马铃薯产量呈现正相关的关系,只有薯块膨大~成熟阶段的耗水量与产量的相关性达到显著水平 ( $R^2 = 0.28, P<0.05$ )。结合图 2 可知,薯块膨大~成熟阶段也是马铃薯生育期内耗水量最大的阶段,因此在该阶段提高马铃薯的供水量,对提高马铃薯产量具有重要意义。

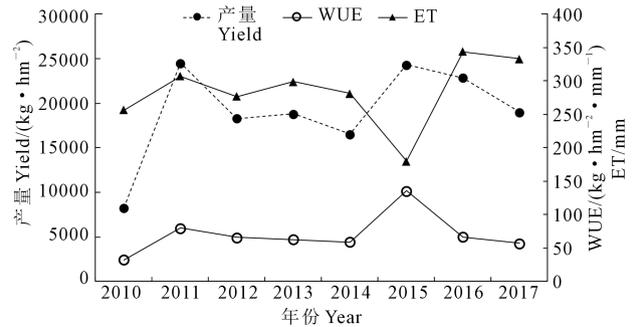


图 4 2010~2017 年马铃薯产量、蒸散量和水分利用效率 (WUE) Fig.4 Yield, ET, and water use efficiency (WUE) of potato in experimental years of 2010 to 2017

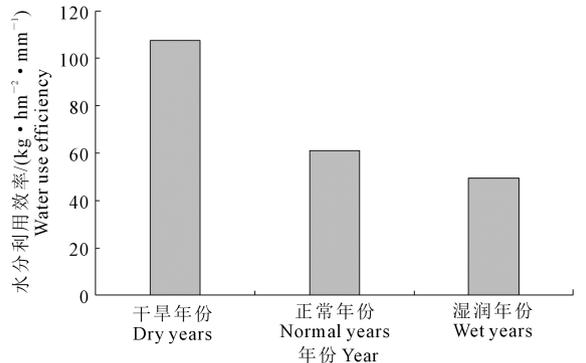
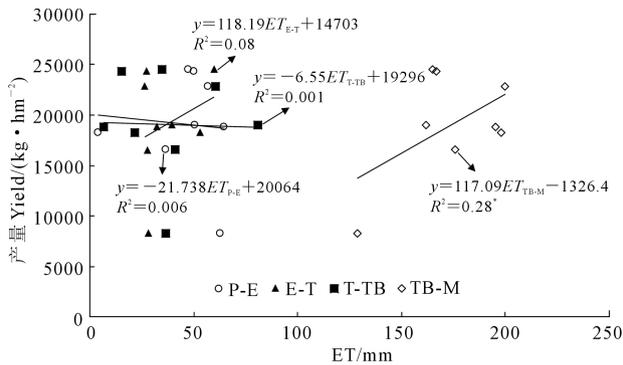


图 5 2010~2017 年不同年型下马铃薯水分利用效率 Fig.5 The water use efficiency of potato under different year types from 2010 to 2017



注:图中的直线代表马铃薯产量和不同阶段耗水量拟合的趋势线;“\*”代表达到0.05显著水平。

Note: The solid line represents the linear trend for water consumption during different periods; single asterisks indicate statistical significance at the 0.05 level.

图6 2010—2017年马铃薯不同生长阶段耗水量和马铃薯产量的关系

Fig.6 The relationship between potato yield and water consumption during different growing periods

### 3 讨论

坝上地区属于典型的农牧交错区,降水量少且年际间变异大<sup>[6]</sup>。2010—2017年共8年大田试验中,有两年属于干旱年份,生长季降水量分别为261 mm和280 mm,远低于马铃薯的生育期需水量<sup>[6]</sup>。即使在一些正常年份下,降水量也会低于马铃薯的需水量<sup>[9]</sup>,说明该地区大部分年限下马铃薯处于水分胁迫状态。马铃薯不同生育阶段内降水量具有很大的差异,其中60%的降水集中在薯块膨大~成熟阶段,主要是因为该生育阶段较长,并且雨季也主要发生在该生育阶段。而薯块形成~薯块膨大阶段降水量最少,但是不同年份间变异很大,主要是因为该阶段时间较短,同时该生育阶段在雨季开始阶段,大降水事件发生的可能较高,单次大降水事件就会造成该阶段降水年际间很大的差异。播种~出苗和出苗~薯块形成两个阶段降水量少且变异较小,主要是因为这两个阶段在雨季开始之前,降水量少且主要以小降水事件为主。

降水是坝上地区雨养农业区水分的唯一来源<sup>[16]</sup>,降水除了供作物利用还有一部分贮存在土壤中。马铃薯生育期内耗水主要来自生育期降水和播前土壤贮水,不同降水年型下马铃薯不同生育阶段耗水量在27~188 mm之间,播种~出苗和薯块形成~薯块膨大两个阶段马铃薯在湿润年型下耗水量最多,而薯块膨大~成熟阶段马铃薯在正常年型下耗水量最多,主要是因为湿润年型下虽然生长季降水总量高于干旱年份和正常年份,而马铃薯生育

期内降水量却低于其他年份。马铃薯不同生长阶段的生长速率差异很大,因此不同阶段的日耗水量也会有一定差异,本研究结果表明马铃薯薯块形成~薯块膨大阶段的日耗水量显著高于其他阶段,因此该阶段是马铃薯水分需求旺盛期,这和前人研究结果一致<sup>[18-21]</sup>。

2010—2017年马铃薯的产量在8 250~24 500 kg·hm<sup>-2</sup>之间,水分利用效率(WUE)在32~135 kg·hm<sup>-2</sup>·mm<sup>-1</sup>之间,干旱年份下马铃薯的WUE显著高于正常年份和湿润年份。主要是因为干旱年份下,马铃薯受到的干旱胁迫更为严重,马铃薯气孔关闭避免蒸腾失水<sup>[22]</sup>,可以使更多的水分保持在植株体内利用,因此水分利用效率更高。雨养条件下,马铃薯产量会随着降水量的增加而增加<sup>[23-25]</sup>,而在研究区试验年份中马铃薯产量并没有随着降水量的增加呈现增加的趋势,主要是因为马铃薯生育期内耗水包括作物蒸腾和土壤蒸发两部分<sup>[1]</sup>,作物产量会随着蒸腾量的增加而增加,有研究表明在湿润年型下会增加土壤的蒸发量而降低作物蒸腾量,尤其是小降水事件较多的年份又会导致降水的有效性降低<sup>[6]</sup>。另一方面,虽然生长季内降水总量高,但是和马铃薯生育期内需水的匹配度低,大量的降水发生在生长后期,此时降水量增加对马铃薯产量提升作用不大,因此应该从提高降水的有效性和降水与马铃薯生长需水的匹配度两个方面提升马铃薯的产量。

当前,对马铃薯耗水特征的研究主要集中在需水量和需水关键期的研究<sup>[6,18-21]</sup>,然而对不同阶段马铃薯耗水量的差异对产量的影响研究较少。薯块形成~薯块膨大决定了薯块形成的个数,该阶段耗水增加,增加了马铃薯薯块个数的形成,有利于增产;然而,薯块形成~薯块膨大阶段薯块形成个数较多,薯块膨大~成熟阶段的供水量无法满足马铃薯生长需求,又会造成马铃薯的减产。本研究分析了不同降水年型下马铃薯不同生育阶段耗水量和产量的关系,表明在薯块形成~薯块膨大阶段进行适度的干旱胁迫,减少马铃薯形成个数,使单个薯块的质量增加,进而使马铃薯增产。

### 4 结论

2010—2017年有25%的年份为干旱年份,马铃薯不同生育阶段内降水差异较大,其中薯块膨大~成熟阶段降水量最大。同一生长阶段不同年份间具有很高的变异性,其中薯块形成~薯块膨大阶段的降水量年际间变异最高。不同降水年型下马铃

薯不同生育阶段耗水量具有一定的差异性,播种~出苗和薯块形成~薯块膨大阶段在湿润年型下耗水量最高,出苗~薯块形成期在干旱年型下耗水量最高,薯块膨大~成熟期在正常年型下耗水量最大。所有年型下马铃薯薯块形成~薯块膨大阶段的日耗水量均显著高于其他阶段。试验年份中,干旱年型下马铃薯水分利用效率最高,显著高于其他年型。根据坝上地区马铃薯的耗水特征,在薯块膨大~成熟阶段增加灌溉对马铃薯产量具有显著的正效应。

#### 参 考 文 献:

- [1] Tang J Z, Wang J, Fang Q X, et al. Optimizing planting date and supplemental irrigation for potato across the agro-pastoral ecotone in North China [J]. *European Journal of Agronomy*, 2018, 98:82-94.
- [2] 唐建昭. 北方农牧交错带马铃薯基于缩差和增效的种植管理模式研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [3] 马福婷. 张家口市马铃薯产业化现状与发展对策[J]. *河北北方学报(自然科学版)*, 2010, 26(3): 66-70.
- [4] 孙东升, 刘合光. 我国马铃薯产业发展现状及前景分析[J]. *农业展望*, 2009, 03: 25-28.
- [5] 巴图, 支中生, 李倩. 坝上地区马铃薯品种比较试验[J]. *中国马铃薯*, 2010, 24(1): 6-10.
- [6] Tang J Z, Wang J, Wang E L, et al. Identifying key meteorological factors to yield variation of potato and optimal planting date in the agro-pastoral ecotone in North China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256-257: 283-291.
- [7] 田再民, 龚学臣, 冯琰, 等. 张北地区 2 种马铃薯品种干物质积累与分配特征比较[J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(5): 95-98.
- [8] 张君君. 起垄与覆膜对马铃薯产量和品质的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2014.
- [9] Haverkort A J, Van de Waart M, Bodlaeader K B A. The effects of early drought stress on numbers of tuber and stolons of potato in controlled and filed conditions [J]. *Potato Research*, 1990, 33(1): 89-96.
- [10] Fabeiro C, de Santa, de Juan, et al. Yield and size of deficit irrigated potatoes [J]. *Agricultural Water Management*, 2001, 48: 255-266.
- [11] Liu F L, Shahnazari A, Andersen M. Effects of deficit irrigation and partial root drying on gas exchange, biomass partitioning and water use efficiency in potato [J]. *Scientia Horticulturae*, 2006, 109: 113-117.
- [12] 张朝巍, 董博, 郭天文, 等. 补充灌溉对半干旱区马铃薯产量和水分利用效率的影响[J]. *水土保持通报*, 2011, 31(5): 49-53.
- [13] 谢开云, 王晓雪, 张若芳, 等. 隔沟交替灌溉对我国半干旱地区马铃薯水分利用的影响[J]. *中国马铃薯*, 2012, 26(1): 5-10.
- [14] Qin S H, Li L L, Wang D, et al. Effects of limited supplemental irrigation with catchment rainfall on rain-fed potato in semi-arid areas on the West Loess Plateau China [J]. *American Journal of Potato Research*, 2013, 90: 33-42.
- [15] 韩晓宇. 张家口坝上地区水资源现状及对策研究[J]. *河北北方学院学报(自然科学版)*, 2011, 27(4): 54-56.
- [16] 王殿武, 王立秋, 牛瑞明. 高寒半干旱区农牧增产技术[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- [17] 郭如侠. 浅析张家口地区降水与地下水的相关性[J]. *地下水*, 2014, 36(4): 8-9.
- [18] 王凤新, 康跃虎, 刘士平. 滴灌条件下马铃薯耗水规律及需水量的研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(1): 9-15.
- [19] 李晶, 张恒嘉, 周宏. 土壤水分亏亏处理膜下滴灌马铃薯耗水特征及生长动态[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(3): 80-87.
- [20] 秦军红, 庞保平, 蒙美莲, 等. 马铃薯膜下滴灌耗水规律的研究[J]. *灌溉排水学报*, 2013, 32(1): 47-50.
- [21] 于显枫, 张绪成, 王红丽, 等. 施肥对旱地全膜覆盖垄沟种植马铃薯耗水特征及产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(3): 883-890.
- [22] 黄明霞, 王靖, 唐建昭, 等. 气孔导度模型在北方农牧交错带的适用性评价—以马铃薯和油菜为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(11): 3585-3592.
- [23] 宋学锋, 侯琼. 气候条件对马铃薯产量的影响[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(2): 35-38.
- [24] 侯琼, 苗百岭, 张晓雯. 基于气象因子驱动的阴山地区马铃薯产量预测模型[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(6): 247-253.
- [25] Onder S, Caliskan M E, Onder D. Different irrigation methods and water stress effects on potato yield and yield components [J]. *Agricultural and Water Management*, 2005, 73: 73-86.
- [26] Jefferies R A. Use of a simulation-model to assess possible strategies of drought tolerance in potato [J]. *Agricultural Systems*, 1993, 41(1): 93-104.
- [27] Lynch D R, Foroud N, Kozub G C. The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties [J]. *American Potato Journal*, 1995, 72(6): 375-386.