

赵 鸿,任丽雯,赵福年,等. 马铃薯对土壤水分胁迫响应的研究进展[J]. 干旱气象, 2018, 36(4): 537-543, [ZHAO Hong, REN Liwen, ZHAO Funian, et al. The Progress on Response of Potato to Soil Water Stress[J]. Journal of Arid Meteorology, 2018, 36(4): 537-543], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0537

马铃薯对土壤水分胁迫响应的研究进展

赵 鸿^{1,2}, 任丽雯³, 赵福年^{1,2}, 齐 月^{1,2}, 蔡迪花^{1,2},
王春玲⁴, 陈 斐^{1,2}, 雷 俊⁵, 王润元^{1,2}, 王鹤龄^{1,2},
张 凯^{1,2}, 姚玉璧^{1,5}, 王 兴⁶

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,
中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

2. 中国气象局定西干旱气象与生态环境野外试验基地, 甘肃 定西 743000;

3. 甘肃省武威市气象局, 甘肃 武威 733000; 4. 北京市气象服务中心, 北京 100089;

5. 甘肃省定西市气象局, 甘肃 定西 743000; 6. 西北区域气候中心, 甘肃 兰州 730020)

摘 要:干旱是马铃薯生产的主要限制因子。本文综述了近年来马铃薯生长发育、生理生态特征、产量形成等对水分亏缺响应的研究进展。干旱胁迫可引起播种后的种薯延迟或者不能发芽, 出苗后的植株生长缓慢、叶片光合能力降低, 最终导致块茎产量和收获指数下降。同时, 随着水分胁迫时间的延长和胁迫强度的增加, 干旱的抑制作用也逐渐增大。马铃薯叶片扩张速率的土壤有效水(PAW)为0.73(低敏感性品种)~1.00(高敏感性品种), 植株相对生长速率、光合速率、蒸腾速率的PAW阈值分别为0.87、0.60、0.60。目前马铃薯生产中基于土壤和植株两个方面监测作物水分状况的监测指标和要素包括基于土壤的土壤水分、潜在蒸发、蒸发皿蒸发等以及基于植物的气孔导度、复水后的光合恢复、叶片/茎秆水势、叶绿素、叶片扩张、叶片相对含水量、作物水分胁迫指数、冠层温度等。在此基础上, 提出了未来干旱对马铃薯生产影响研究中应着重加强的关键科学问题, 为防旱减灾奠定一定的理论基础。

关键词:马铃薯; 水分亏缺; 生长发育; 生理生态; 阈值; 监测指标

文章编号:1006-7639(2018)04-0537-07 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-04-0537

中图分类号:S161

文献标志码:A

引 言

马铃薯是继水稻、小麦、玉米之后的第四大主粮, 年产量约 $3.2 \times 10^8 \text{ t}^{[1]}$, 全世界的种植面积达 $1900 \times 10^4 \text{ hm}^2^{[2]}$ 。也是粮、饲、菜兼用型作物, 有“地下苹果”、“第二面包”等美誉。自20世纪90年代以来, 我国已成为世界最大的马铃薯生产国, 现年种植面积约 $4.67 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 总产 $6500 \times 10^4 \text{ t}^{[3]}$ 。马铃薯是需水较多的农作物, 其茎叶含水量约占90%, 块茎含水量也达80%左右, 在马铃薯生长过

程中, 必须有足够的水分才能获得较高产量^[4]。

干旱是马铃薯生产中的主要限制因子^[5-8], 我国马铃薯种植区主要分布在干旱和半干旱丘陵山区, 大部分缺乏灌溉条件, 即使在有灌溉的种植区, 也会因为不充分的水利设施或水源短缺, 常常出现短期干旱, 影响马铃薯的正常生长。如1999年的干旱使马铃薯单产骤降20%, 尽管种植面积增加9%, 总产仍下降13%^[9]; 2010年马铃薯主产区甘肃定西重旱面积几乎占播种面积的一半以上, 减产幅度达40%, 损失巨大。目前, 尽管垄沟地膜覆盖^[10-12]、起

收稿日期: 2018-05-18; 改回日期: 2018-08-13

基金项目: 国家自然科学基金(41505099、41575149)、公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-2)、中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放基金(CAMF-201801)和甘肃省气象局面上项目(GSMAZd2017-14)共同资助

作者简介: 赵鸿(1977—), 女, 甘肃临洮人, 副研究员, 博士, 主要从事干旱气候变化的农业生态响应及干旱监测研究. E-mail: zhaohongt@126.com。

通信作者: 蔡迪花(1974—), 女, 副研究员, 主要从事应用气象研究. E-mail: caidh05@163.com。

垄栽培^[13]、滴灌^[14]等技术在生产中应用并产生了明显的经济效益,但一些地方推广应用率较低,传统的种植方式仍占较大比例^[9]。近年来,受气候暖干化影响,干旱不断扩张,发生频繁^[15-19],马铃薯种植始终会遭受不同程度干旱的影响^[19-20],造成块茎质量下降,产量降低^[21-25]。

本文就国内外近年来马铃薯生长发育、生理特征、产量形成等对水分亏缺的响应及其土壤水分阈值,以及马铃薯植株干旱的监测指标等进行了回顾和进展追述,为防旱减灾奠定一定的理论基础。

1 马铃薯的需水特性

马铃薯生长期一般需要 130 d 左右,根据其茎叶生长和产量形成的关系,将马铃薯的生长发育过程划分为芽条生长期、幼苗期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期、成熟收获期 6 个生育时期^[4]。马铃薯是需水较多的作物,其蒸腾系数为 400 ~ 600,即每形成 1 kg 干物质,需消耗 400 ~ 600 kg 水分,具体因气候、土壤、品种、施肥量而有所不同,而且不同生育期需水量明显不同。根据蒸腾量的计算,每生产 1 kg 鲜块茎约需耗水 100 ~ 150 kg^[4,26]。在发芽期,芽条仅凭借种薯块内的水分便能正常生

长,待根系发生,从土壤中吸收水分后才能正常出苗,苗期需水量约占全生育期的 10%,块茎形成期需水量约占全生育期的 30%,块茎增长期需水量约占全生育期的 50%,是全生育期中需水量最多的时期,在淀粉积累期则不需要过多的水分,其需水量约占全生育期的 10% 左右^[26]。马铃薯全生育期的耗水规律,总体上呈前期耗水强度小、中期逐渐变大、后期又减小的近似抛物线的趋势^[27]。在幼苗期、块茎形成期、块茎增长期、淀粉积累期不同生育期的耗水量分别占全生育期总耗水量的 10% ~ 15%、23% ~ 28%、45% ~ 50%、10%^[28-29],可见马铃薯的耗水量和需水量略有差异(表 1)。据研究发现,马铃薯丰产的有利水分条件是整个生育期田间持水量前期保持在 60% ~ 70%,后期保持在 70% ~ 80%,不同生育期的适宜土壤水分各有差异,在芽条生长期、幼苗期、块茎形成期、块茎增长期不同生育期的适宜土壤水分分别为 40% ~ 50%、60% ~ 80%、80% ~ 85%、80% ~ 85%^[30]。如果遇到土壤水分亏缺,马铃薯则受到不同程度的影响,有研究指出,马铃薯在不同生育期生长的最佳土壤水分下限指标分别为,幼苗期 65%、块茎形成期 75%、块茎增长期 80%、淀粉积累期 60% ~ 65%^[27-29]。当土壤水分低于这个下限指标时作物生长会受到不同程度的限制。

表 1 马铃薯不同生育期的需水特性

Tab. 1 The characteristics of water requirements in different growth duration of potato

生育期	生育期持续时间/d	需水量占全生育期总需水量的百分比/%	各生育期耗水量占全生育期总耗水量的百分比	适宜土壤水分		
				(田间最大持水量的百分比)	适宜土壤相对湿度	最佳土壤水分下限
芽条生长期	15 ~ 30	—	—	—	40% ~ 50%	—
幼苗期	15 ~ 25	10	10% ~ 15%	60% ~ 70%	60% ~ 80%	65%
块茎形成期	20 ~ 30	30	23% ~ 28%	75% ~ 80%	80% ~ 85%	75%
块茎膨大期	15 ~ 22	50	45% ~ 50%	80% ~ 85%	80% ~ 85%	80%
淀粉积累期	15 ~ 25	10	10%	50% ~ 60%	—	60% ~ 65%
成熟收获期	20 ~ 25	—	—	—	—	—

2 马铃薯生理特性对土壤干旱的响应与土壤水分阈值

水分是光合作用的重要原料之一,也是植株体内基本生理过程和生理生化代谢的直接参与者,水分对植株叶片光合作用的强弱起着决定性的作用。土壤水分胁迫首先影响作物的生理生化过程,进而影响其形态塑形与生长,最终对作物的产量产生重

要影响,而且不同生育时期、不同品种下水分胁迫对作物的影响部位和影响程度也不尽相同^[31-33]。

光合生理特性是农作物对逆境生理过程响应敏感的重要指标,通过研究光合参数对土壤水分的响应,有助于阐明作物在干旱环境变化中的生理适应性^[34-35]。土壤水分是影响农作物生理过程的重要因子之一,直接影响农作物的光合作用、水分利用效率及其生物量积累等^[36]。马铃薯叶片光合作用过

程对土壤水分亏缺非常敏感^[37],土壤水分胁迫可引起马铃薯叶片光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降^[38-39],其下降程度随水分亏缺程度的增大而增大^[38]。不同生育期的马铃薯遇到土壤水分胁迫时糖分浓度增加^[38]、渗透势和水势上升^[40]。马铃薯在受到土壤水分胁迫时,植株会启动自身的保护系统,通过降低自身细胞的渗透势来适应外界环境,植株体内的脯氨酸(Pro)和丙二醛(MDA)含量增加^[32,41-43],而超氧化物歧化酶(SOD)活性下降^[42],花期干旱胁迫对马铃薯的生理生化指标影响最大。抗旱性强的品种MDA、Pro含量增加的幅度较小,SOD的活力较高,而抗旱性弱的品种则相反^[42]。不同品种马铃薯Pro含量升高1.01~5.40倍,MDA含量升高1.10~1.91倍。马铃薯叶片游离Pro含量相对值、MDA含量相对值和相应品种的根系拉力系数、产量系数均呈显著或极显著正相关,游离Pro相对值、MDA含量相对值可以作为马铃薯植株生长早期评价品种耐旱性的生理生化指标^[31]。马铃薯叶绿素含量(SPAD)值对水分亏缺也非常敏感^[37],亏缺程度越重,其叶绿素含量值降低得越快^[38]。即使具备灌溉条件的种植区,由于正午蒸腾速率较高,也可能发生短期水分胁迫,引起叶片气孔关闭^[44],植物生长调节剂脱落酸(ABA)通过调节气孔导度参与植株的耐旱过程^[44]。

根据生态学的限制因子法则,植物生理过程对土壤水分的需求存在不同水平的临界值(阈值),水分过多或过少都会影响植物的光合生理过程^[45-46]。当小于此临界值时,作物对干旱产生适应性变化,生

理过程不会受到明显影响,恢复供水后出现超补偿效应,作物不减产;当干旱程度超过该临界值时,作物受到永久性伤害,即便恢复供水,一些生理指标也不能恢复,导致产量显著减小,这一临界状况即为土壤干旱阈值,它是作物调亏灌溉的依据^[47-49]。不同作物的生理参数对土壤水分亏缺的敏感性不同^[45,48,50],而对特定的作物,在不同品种或基因型下,各生理生态参数对水分胁迫的阈值响应也是有差异的^[45]。不同基因型马铃薯大田叶片扩张速率的植物土壤有效水(PAW)的阈值范围是0.73(低敏感性品种)~1.00(高敏感性品种)。马铃薯植株相对生长速率、叶片光合速率、相对蒸腾速率的PAW阈值分别为0.87、0.60、0.60^[45]。

3 马铃薯生长发育对土壤干旱的响应

在土壤水分胁迫条件下,马铃薯的长势(表2)和形态特征(表3)都会发生一系列变化,且每个发育阶段影响不同,影响程度取决于出苗后干旱胁迫的程度和胁迫持续时间,其中在块茎膨大期受影响最为严重^[23]。土壤水分与马铃薯出苗率有非常密切的关系,适宜的土壤水分条件有利于马铃薯种薯的生理活动,可以缩短出苗时间,而且出苗率高、幼苗生长健壮^[11]。播种后的水分胁迫可导致种薯延迟或者不能发芽^[11,25],有时即使发芽也不易破土而出^[4]。匍匐茎生长初期植株根系对水分胁迫最敏感,可引起叶片扩展率减小^[51],较小叶片开始枯萎掉落^[52]、叶面积指数降低^[11]。在出苗到块茎形成

表2 水分亏缺对马铃薯不同生育阶段生长特征的影响^[2,4,11,23,25,33,51-52]

Tab. 2 Impact of water deficit on different growth stages of potato

芽条生长期	幼苗期	块茎形成期	块茎膨大期	淀粉积累期	成熟收获期
出苗推迟、根的形成受阻、芽条生长受限、幼茎量减少或干死	植株个体较小、匍匐茎形成和数量减少、结薯数减少、根生长受阻、营养吸收降低	花和植株生长缓慢,块茎数量减少、块茎生长发育受阻	促进根茎叶中水分和营养物质的降解以供应块茎生长、薯块膨大受阻、刺激块茎变形、老化加快	淀粉积累受到抑制	薯块相对重量的增加减少、块茎成熟受阻

表3 水分亏缺对马铃薯形态特征的影响^[2,11,33,37,53-54]

Tab. 3 Impact of water deficit on morphological traits of potato

植株	茎秆	叶片	根	块茎
植株干物重减少、含水量降低、株高减小、冠层覆盖度减小	茎秆数量减少、茎秆变细	叶片数量减少、叶干重和叶面积指数降低、叶片生长量和扩展率减小、绿叶数量减少	根长、根粗、根干重均减少、根冠比降低	块茎干物重和数量减少、收获指数降低、产量下降

期,土壤水分亏缺会使马铃薯株高、叶面积及干物质积累均有不同程度的降低^[37,53],从而使得植株冠层减小,单株块茎数量和重量降低^[54],而且随着水分胁迫时间的延长和胁迫强度的增加,其抑制作用也逐渐增大^[33]。

4 马铃薯产量形成对土壤干旱的响应

水分胁迫期间,土壤条件、胁迫持续的时间、植株发育状况等都会对薯块产量产生一定的影响。不同干旱胁迫程度对马铃薯产量形成的影响程度不同,如轻度水分亏缺下胁迫 6 d 时对马铃薯地上部鲜重没有显著影响,到胁迫 12 d 时才会使地上部鲜重受到影响^[55]。在块茎形成初期,遇到干旱直接影响马铃薯块茎的形成,增加灌溉有利于块茎形成和后期膨大,进而增加产量^[56]。水分胁迫能够减少块茎形成期的结薯数量、薯块大小,造成产量下降。在出苗—块茎形成期以前遭遇干旱,则大薯的数量显著减少、单株薯块重量降低,干旱通过使单株匍匐茎的数量减少而导致单株结薯数减少^[10,57-58]。在开花期或者块茎形成期以后遭遇干旱,则对结薯的数量影响不太大^[59-60]。如果在块茎膨大后期遭受干旱,则植株从马铃薯块茎中吸收水分,使得块茎干物质含量增加,从而导致产量下降^[61]。不同生育期遭受干旱胁迫时对马铃薯产量的影响大小为块茎形成期 > 苗期 > 块茎膨大期,表明在块茎形成期遭受水分胁迫对产量影响较大,即使后期恢复供水对产量的补偿效果也不佳^[32]。这些不同程度的胁迫,最终导致块茎产量、干物重和收获指数下降^[11,25,51,62]。

5 马铃薯植株干旱的监测指标

在马铃薯的干旱监测中,如何反映马铃薯土壤—植物系统的水分状况,可从基于土壤和基于植株两个方面来监测植物水分状况的亏缺。基于土壤水分的监测,它是目前最简单、也是使用最广泛的一种方法,这种方法包括基于土壤水分的传感器,如电容传感器、中子传感器、重量传感器等,基于电压的传感器,如 GMS、张力计等^[63-64]。该方法有助于决策者提高干旱监测或者管理水平^[64]。另外,还可利用潜在蒸发、蒸发皿蒸发等来监测水分状况^[65-66]。基于植株的监测,有几种定义生理生态参数阈值的方法作为衡量马铃薯植株水分亏缺的状况,如气孔导度(G_s)^[33,67]、复水后的光合恢复^[34,68]、叶片/茎秆水势^[32,69]、叶绿素^[70]、叶片扩张^[45]、叶片相对含水量^[33]、作物水分胁迫指数^[71]、冠层温度^[19,72]、块茎中碳同位素鉴别^[34]等。与基于土壤的植物水分状

况的监测方法相比而言,基于植株的监测被认为是更加方便、适时的方法^[34]。

最大光饱和气孔导度($G_s - \max$)作为气孔导度的代表值,既对干旱引起的外部植物因子[土壤水分有效性、饱和水气压差(VPD)]响应,也对内部植物因子(ABA、木质部传导率、叶片水分状况等)响应^[34,67],表明它是一个比叶水势和叶片相对含水量更加能描述干旱影响的监测指标^[67-68]。当 $G_s - \max$ 的值为 $0.10 \sim 0.15 \text{ mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,被认为是一个最适宜的作物需要灌溉的临界值^[33,68]。当马铃薯的叶片扩张速率为 $0.73 \sim 1.00$,光合速率为 0.6 时作为植物土壤有效水分(PAW)的阈值^[44,73]。在马铃薯的灌溉决策管理中,多变的生理特征被用于监测植物水分状况^[70,73-76],将最大光饱和气孔导度($G_s - \max$)作为确定灌溉时间的指标,这仍然是一个还未解决的问题^[34],有待进一步的细致研究和追踪探讨。

6 存在的问题和研究展望

通过以上的文献回顾和进展追述,可以看出由于受到水分亏缺造成干旱影响时,马铃薯的生理特性发生一系列的变化,使得生长发育受阻,形态塑形异常、水分利用效率降低,从而造成产量下降。而且随着水分胁迫时间的延长和胁迫强度的增加,其抑制作用也逐渐增大。当土壤中的水分减少时,马铃薯的生理生态指标受到一定的抑制,当这种抑制达到一个阈值范围时,产量形成指标开始降低。在这一受旱致害的过程中,已有研究也发现了一些有效的、快捷的监测指标,将其用于马铃薯的干旱监测中,为防旱减灾起到了一定的作用。但是由于作物生长环境复杂,涉及的因素较多、相互作用及其过程较复杂,因而也存在着一些急需解决的问题,这里就马铃薯干旱致灾的研究发展提出一些展望:

(1)关于土壤水分短缺对马铃薯的影响及其相关阈值研究,发现马铃薯受干旱胁迫的影响主要集中在某个时期一些生理生化特性,但对系列土壤水分梯度下马铃薯的生理生态参数响应过程、光合生产力、水分利用效率以及持续水分胁迫过程中马铃薯光合高效生产的适宜水分条件及其受旱阈值还不是十分清楚。有待于更进一步的试验研究和剖析。

(2)开展马铃薯干旱胁迫致灾机理及其相关研究时,需重视作物受胁迫程度、时期、历时与作物自身生理生化过程的关系,系统认识不同生育期马铃薯受害致灾过程中光合、蒸腾等生理生态参数,株高株型等形态塑形指标、以及生化指标等持续变化的

特征及其发生突变的动态轨迹,并对其进行定量描述,了解致灾的生理机制和关键影响因子,是科学制定适应对策的前提。

(3)尽管垄沟地膜、补充灌溉、亏缺灌溉、部分根区干旱、施肥等技术在一定程度上减缓了马铃薯干旱缺水的状况,提高了马铃薯产量和块茎品质,但是合理准确地评估马铃薯是否遭遇水分胁迫,何时遭遇胁迫,何时受旱致灾?这仍然是干旱监测中还没有解决的关键问题之一,尤其是半干旱地区的马铃薯生产及其干旱监测。

(4)在干旱缺水对马铃薯的影响研究中,测试的各种响应指标和阈值都是在特定的区域、土壤类型、土壤肥力、气候、作物品种等因素下进行的,因而其影响的代表性在一定程度上被削弱了。所以,迫切需要研究马铃薯在不同气候区对水分(降水)减少等逆境胁迫的响应,以期找出同一种作物对逆境响应的异同以及对逆境响应出现最大值或最小值反应的指标及其临界点,以利于马铃薯干旱应对技术和策略的制定以及防旱减灾工作的顺利进行。

参考文献:

- [1] FAOSTAT: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Statistics Division [EB/OL] (2017-01-12). <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [2] OBIDIEGWU J E, BRYAN G J, JONES H G, et al. Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement[J]. *Front Plant Sci*, 2015, 6:542.
- [3] 杨丽华. 中国马铃薯产业的发展对策[J]. *西部大开发(经济研究)*, 2013(2):11.
- [4] 门福义,刘梦云. 马铃薯栽培生理[M]. 北京:中国农业出版社, 1995, 45:308-323.
- [5] VAN-LOON C D. The effect of water stress on potato growth, development, and yield[J]. *American Journal of Potato Research*, 1981, 58:51-69.
- [6] LAHLOU O, OUATTAR S, LEDENT J F. The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato[J]. *Agronomie*, 2003, 23(3):257-268.
- [7] RODR GUEZ P L, SANJUANELO C D, STEZ L CE, et al. Growth and phenology of three Andean potato varieties under water stress[J]. *Agronomía Colombiana*, 2016, 34:141.
- [8] WEISZ R, KAMINSKI J, SMILOWITZ Z. Water deficit effects on potato leaf growth and transpiration: utilizing fraction extractable soil water for comparison with other crops[J]. *American Journal of Potato Research*, 1994, 71(12):829-840.
- [9] 魏延安. 中国马铃薯产业发展现状初步研究与探讨[EB/OL]. (2009-11-14). <http://www.docin.com/p-1223804172.html>.
- [10] ZHAO H, XIONG Y C, LI F M, et al. Plastic film mulch for half growing-season maximized WUE and yield of potato via moisture temperature improvement in a semi-arid agroecosystem[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 104:68-78.
- [11] ZHAO H, WANG R Y, MA B L, et al. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161:137-148.
- [12] 雷俊,张凯,姚玉璧,等. 半干旱区黑膜覆盖对马铃薯光合特性及产量影响[J]. *干旱气象*, 2017, 35(6):1036-1041.
- [13] TIAN Y, SU D, LI F M, et al. Effect of rainwater harvesting with ridge and furrow on yield of potato in semiarid areas[J]. *Field Crops Research*, 2003, 84:385-391.
- [14] WANG F X, WU X X, CLINTON C S, et al. Effects of drip irrigation regimes on potato tuber yield and quality under plastic mulch in arid Northwestern China[J]. *Field Crops Research*, 2011, 122(1):78-84.
- [15] HUANG J, YU H, GUAN X, et al. Accelerated dryland expansion under climate change[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2):166-172.
- [16] RAYMUNDO R, ASSENG S, CAMMARANO D, et al. Potato, sweet potato, and yam models for climate change: a review[J]. *Field Crops Research*, 2014, 166:173-185.
- [17] SINGH B P, DUA V K, GOVINDAKRISHNAN P M, et al. Climate-resilient horticulture: adaptation and mitigation strategies: impact of climate change on potato[M]. India: Springer, 2013: 125-135.
- [18] 王鹤龄,王润元,张强,等. 甘肃马铃薯种植布局对区域气候变化的响应[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(5):1111-1116.
- [19] MONNEVEUX P, RAM REZ D A, PINO M T. Drought tolerance in potato (*S. tuberosum* L.); can we learn from drought tolerance research in cereals[J]. *Plant Science*, 2013, (205/206):76-86.
- [20] 王春玲,李宏宇,曾剑,等. 黄土高原半干旱区马铃薯气候适宜度模拟及其时空变化特征[J]. *干旱气象*, 2017, 35(5):751-760.
- [21] ERDEM T, ERDEM Y, ORTA H, et al. Water-yield relationships of potato under different irrigation methods and regimens[J]. *SCI Agric*, 2006, 63(3):226-231.
- [22] TOURNEUX C, DEVAUX A, CAMACHO M R, et al. Effect of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (II): water relations, physiological parameters[J]. *Agronomie*, 2003, 23(2):181-190.
- [23] TOURNEUX C, DEVAUX A, CAMACHO M R, et al. Effects of water shortage on six potato genotypes in the highlands of Bolivia (I): morphological parameters, growth and yield[J]. *Agronomie*, 2003, 23(2):169-179.
- [24] VASQUEZ-ROBINET C, MANE S P, ULANOV A V, et al. Physiological and molecular adaptations to drought in Andean potato genotypes[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2008, 59:2109-2123.
- [25] 赵鸿. 黄土高原(定西)旱作农田垄沟覆膜对马铃薯产量和水分利用效率影响[D]. 兰州:兰州大学, 2012.
- [26] 马铃薯需水规律和节水灌溉技术要点[EB/OL]. (2016-02-23). <http://www.tstyc.com/Item/Show.asp?d=4070&m=>

- 1&wwhybs = 2lc9m1.
- [27] 田英,黄志刚,于秀芹,等. 马铃薯需水规律试验研究[J]. 现代农业科技,2011(8):91-94.
- [28] 王俊国. 建薯I号马铃薯生育期适宜土壤水分指标研究[J]. 安徽农业科学,2010,38(32):18119-18120,18154.
- [29] 韦冬萍,韦剑锋,吴炫柯,等. 马铃薯水分需求特性研究进展[J]. 贵州农业科学,2012,40(4):66-70.
- [30] 杨霏云,郑秋红,罗蒋梅,等. 实用农业气象指标[M]. 北京:气象出版社,2015.
- [31] 丁玉梅,马龙海,周晓晔,等. 干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸、丙二醛含量变化及与耐旱性的相关性分析[J]. 西南农业学报,2013,1(1):106-110.
- [32] 刘素军. 马铃薯对不同生育时期水分胁迫及复水的生理和分子响应机制[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2017.
- [33] 高占旺,庞万福,宋伯符. 水分胁迫对马铃薯的生理反应[J]. 马铃薯杂志,1995,9(1):1-5.
- [34] RAMIREZ D A, YACTAYO W, RENS L R, et al. Defining biological thresholds associated to plant water status for monitoring water restriction effects: stomatal conductance and photosynthesis recovery as key indicators in potato[J]. *Agricultural Water Management*, 2016,177:369-378.
- [35] FLEXAS J, GALL A, GALM S J, et al. Plant responses to drought stress: from morphological to molecular features - the response of photosynthesis to soil water stress [M]. Heidelberg: Springer, 2012:129-144.
- [36] 赵鸿,李凤民,熊友才,等. 土壤干旱对作物生长发育过程及产量的影响[J]. 干旱气象,2008,26(3):67-71.
- [37] SCHAPENDONK A, SPITTERS C J T, GROOT P J. Effects of water stress on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of five potato cultivars[J]. *Potato Research*, 1989,32(1):17-32.
- [38] 王婷,海梅荣,罗海琴,等. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响[J]. 云南农业大学学报,2010,25(5):737-742.
- [39] BASU P S, SHARMA A, GARG I D, et al. Tuber sink modifies photosynthetic response in potato under water stress[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999,42:25-39.
- [40] SCHAFLEITNER R, ROSALES R O G, GAUDIN A, et al. Capturing candidate drought tolerance traits in two native Andean potato clones by transcription profiling of field grown plants under water stress[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2007,45(9):673-690.
- [41] 李建武,王蒂,司怀军,等. 水分胁迫下马铃薯试管苗的生理响应[J]. 甘肃农业大学学报,2005,40(3):319-323.
- [42] 抗艳红,龚学臣,赵海超,等. 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响[J]. 中国农学通报,2011,27(15):97-101.
- [43] 武新娟,魏峭碟,石瑛,等. 马铃薯在不同水分胁迫下的生理反应[C]//中国(长沙)马铃薯大会论文集. 黑龙江:哈尔滨工程大学出版社,2007:148-152.
- [44] LIU F, JENSEN C R, SHAHANZARI A, et al. ABA regulated stomatal control and photosynthetic water use efficiency of potato (*Solanum tuberosum* L.) during progressive soil drying[J]. *Plant Science*, 2005,168(3):831-836.
- [45] SADRAS V O, MILROY S P. Soil - water thresholds for the responses of leaf expansion and gas exchange: a review [J]. *Field Crops Research*, 1996,47:253-266.
- [46] 夏江宝,张淑勇,赵自国,等. 贝壳堤岛旱柳光合效率的土壤水分临界效应及其阈值分级[J]. 植物生态学报,2013,37(9):851-860.
- [47] 山仑,陈国良. 黄土高原旱地农业的理论与实践[M]. 北京:科学出版社,1993.
- [48] 陈家宙,王石,张丽丽,等. 玉米对持续干旱的反应及红壤干旱阈值[J]. 中国农业科学,2007,40(3):532-539.
- [49] 赵鸿,王润元,尚艳,等. 粮食作物对高温干旱胁迫的响应及其阈值研究进展与展望[J]. 干旱气象,2016,34(1):1-12.
- [50] 张喜英,裴冬,由懋正. 几种作物的生理指标对土壤水分变动的阈值反应[J]. 植物生态学报,2000,24(3):280-283.
- [51] MINHAS J S, BANSAL K C. Tuber yield in relation to water stress at different stages of growth in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Journal of Indian Potato Association*, 1991,18:1-8.
- [52] DEBLONDE P M K, LEDENT J F. Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars [J]. *European Journal of Agronomy*, 2001,14(1):31-41.
- [53] 张怡. 不同生长期的水分胁迫对马铃薯产量以及非结构性碳水化合物总量、硝酸还原酶活性的影响[J]. 世界热带农业信息,2001,5:18.
- [54] CLINTON C S, JAMES C Z, TIMOTHY D S, et al. Impact of early - season water deficits on Russet Burbank plant development, tuber yield and quality [J]. *American Potato Journal*, 1992,69(12):793-803.
- [55] 焦志丽,李勇,吕典秋,等. 不同程度干旱胁迫对马铃薯幼苗生长和生理特性的影响[J]. 中国马铃薯,2011,25(6):329-333.
- [56] SHOCK C C, FEIBERT E B G, SAUNDERS L D. Potato yield and quality response to deficit irrigation[J]. *Hort Science*, 1998,33(4):655-659.
- [57] HAVERKORT A J, WAART M V D, BODLAENDER K B A. The effect of early drought stress on numbers of tubers and stolons of potato in controlled and field conditions[J]. *Potato Research*, 1990,33(1):89-96.
- [58] WALWORTH J L, CARILING D E. Tuber initiation and development in irrigated and non - irrigated potatoes[J]. *American Journal of Potato Research*, 2002,79(6):387-395.
- [59] MZCKERRON D K L, JEFFERIES R A. The influence of early soil moisture stress on tuber numbers in potato [J]. *Potato Research*, 1986,29(3):299-312.
- [60] DEIGADO E, SULAIMAN M I, PAWELZIK E. Importance of chlorogenic acid on the oxidative potential of potato tubers of two German cultivars[J]. *Potato Research*, 2001,44(2):207-218.
- [61] 杜社妮,白岗栓,赵世伟,等. 沃特和PAM保水剂对土壤水分及马铃薯生长的影响研究[J]. 农业工程学报,2007,23(8):72-79.
- [62] LAHLOU O, OUATTAR S, LEDENT J F. The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato [J]. *Agronomie*, 2003,23(3):257-268.
- [63] PAIGE G B, KEEFER T O. Comparison of field performance of

- multiple soil moisture sensors in a semi – arid rangeland[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2008,44:121 – 135.
- [64] PETERS R T. Practical use of soil moisture sensors for irrigation scheduling[D]. Washington: Washington State University, 2013.
- [65] KASHYAP P S, PANDA R K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop – coefficients for potato crop in a sub – humid region[J]. Agricultural Water Management, 2001,50:9 – 25.
- [66] YUAN B Z, NISHIYAMA S, KANG Y. Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip – irrigated potato[J]. Agricultural Water Management, 2003,63:153 – 167.
- [67] MEDRANO H, ESCALONA J M, BOTA J, et al. Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: stomatal conductance as a reference parameter[J]. Annals of Botany, 2002,89:895 – 905.
- [68] FLEXAS J, BOTA J, CIFRE J, et al. Understanding down – regulation of photosynthesis under water stress: future prospects and searching for physiological tools for irrigation management[J]. Annals of Applied Biology, 2004,144:273 – 283.
- [69] K KSAL ES, ST N H, ADEM. Threshold values of leaf water potential and crop water stress index as an indicator of irrigation time for dwarf green beans[J]. Journal of Agricultural Faculty of Uludag University, 2010,36:25 – 36.
- [70] ROLANDO J L, RAM REZ D A, YACTAYO W, et al. Leaf greenness as a drought tolerance related trait in potato (Solanum tuberosum L.) [J]. Environmental and Experimental Botany, 2015,110:27 – 35.
- [71] RUD R, COHEN Y, ALCHANATIS V, et al. Crop water stress index derived from multi – year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status [J]. Precision Agriculture, 2014,15:273 – 289.
- [72] STARK J C, LOVE S L, KING B A, et al. Potato cultivar response to seasonal drought patterns[J]. American Journal of Potato Research, 2013,90:207 – 216.
- [73] JEFFERIES R A. Responses of potato genotypes to drought. I. Expansion of individual leaves and osmotic adjustment[J]. Annals of Applied Biology, 1993,122:93 – 104.
- [74] ZAKALUK R, RANJAN R S. Artificial neural network modeling of leaf water potential for potatoes using RGB digital images: a greenhouse study[J]. Potato Research, 2006,49:255 – 272.
- [75] ZAKALUK R, RANJAN R S. Predicting the leaf water potential of potato plants using RGB reflectance[J]. Can Biosyst Eng, 2008, 50:1 – 7.
- [76] BYRD S A, ROWLAND D L, JERRY B, et al. Reductions in a commercial potato irrigation schedule during tuber bulking in Florida: physiological, yield, and quality effects[J]. Journal of Crop Improvement, 2014,28(5):660 – 679.

The Progress on Response of Potato to Soil Water Stress

ZHAO Hong^{1,2}, REN Liwen³, ZHAO Funian^{1,2}, QI Yue^{1,2},

CAI Dihua^{1,2}, WANG Chunling⁴, CHEN Fei^{1,2}, LEI Jun⁵, WANG Runyuan^{1,2},

WANG Heling^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, YAO Yubi^{1,5}, WANG Xing⁶

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic

Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and

Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China;

2. Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Field Experimental Station,

China Meteorological Administration, Dingxi 743000, Gansu, China;

3. Wuwei Meteorological Bureau of Gansu Province, Wuwei 733000, Gansu, China;

4. Beijing Meteorological Service Center, Beijing 100089, China;5. Dingxi Meteorological Bureau

of Gansu Province, Dingxi 743000, Gansu, China; 6. Northwest Regional Climate Center, Lanzhou 730020, China)

Abstract: The drought stress is the main limiting factor in potato production. The effect of water stress on development, physiological ecology characteristics and yield formation of potato were reviewed. The most studies showed that the water stress has delayed the emergence of potato seed, slowed growing development, declined photosynthetic capacity, and consequently lowered the yield and harvest index due to the water stress. The inhibition will increase with the increasing of duration and intensity of stress. The leaf expansion of potato was reflected in a range of plant available soil water (PAW) from 0.73 to 1.00. The relative growth rate, photosynthetic rate and transpiration rate of PAW was 0.87, 0.60 and 0.60, respectively. In the present, some indicators based on the soil and plants has been discussed, which can indicate the water status of soil – plant system, such as the measurements of soil water content, pan evaporation, potential evapotranspiration and so on. In addition to, plants – based measurements including stomatal conductance, photosynthesis recovery after rewatering, leaf/stem water potential, leaf greenness, leaf expansion, leaf relative water content, crop water stress index, canopy temperature etc. Based on these, some key scientific problems were proposed in the future study, which can supply a theoretical basis for the drought control and disaster mitigation.

Key words: potato; water stress; growth development; physiological ecology; threshold; indicators