第 38 卷第 1 期
2020 年 01 月
干 旱 地 区 农 业 研 究
Agricultural Research in the Arid Areas
Vol.38 No.1
Jan. 2020

文章编号:1000-7601(2020)01-0117-08
doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.01.16

干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯根系形态及生理特征的影响

王　天[1,2],张舒涵[1,2],闫士朋[1,2],张俊莲[2,3],李朝周[1,2]

(1.甘肃农业大学生命科学技术学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省作物遗传改良和种质创新重点实验室,甘肃 兰州 730070;
3.甘肃农业大学园艺学院,甘肃 兰州 730070)

摘　要:以马铃薯品种大西洋为材料,探究干旱胁迫条件下马铃薯根系生理及根系形态对磷肥不同增施量的响应,旨在确定干旱胁迫下提高马铃薯产量及抗旱性的最佳磷肥施用量。试验设 2 个干旱胁迫处理、1 个充分灌溉处理,土壤含水量分别保持在 9.5%、14.0%、32.0%左右;以及 5 个磷肥用量(以 P_2O_5 计),分别为:T1(27.3 kg · hm^{-2})、T2(54.5 kg · hm^{-2})、T3(81.8 kg · hm^{-2})、T4(109.1 kg · hm^{-2})、T5(136.3 kg · hm^{-2}),另设不施肥处理为对照(T0)。结果显示:与充分灌溉相比干旱对马铃薯造成了一系列不利影响,以轻度干旱为例,轻度干旱导致马铃薯根系含水量较充分灌溉处理组降低了 5.54%,超氧阴离子($O_2^{\cdot -}$)产生速率、丙二醛(MDA)含量分别升高了 63.33%和 180.47%,株高和匍匐茎数分别降低了 11.74%、7.66%,马铃薯根重和块茎产量分别下降了 9.85%和 6.75%;比较 5 种磷肥增施量,以每公顷增施 54.5 kg 磷肥对马铃薯抗旱性及生长发育的促进效果最佳,其中,在轻旱条件下,马铃薯根系活力提高了 36.28%,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性分别提高了29.31%、46.27%和 114.53%,马铃薯块茎产量提高了 39.75%,马铃薯总根长、根表面积、根体积分别增加了 104.20%、31.65%和 21.06%。综上所述,干旱胁迫显著抑制了马铃薯根系生长发育,而增施适量磷肥可通过提高抗氧化酶活性,增强根系活力及优化根系形态来缓解干旱胁迫下马铃薯根系脂质过氧化程度,减轻干旱对生长发育的抑制,增强植株整体抗旱性。

关键词:磷肥用量;干旱胁迫;马铃薯;根系生理;根系形态

中图分类号:S532　　**文献标志码**:A

Effects of drought stress and application amount of phosphorus fertilizer on morphological and physiological characteristics of potato roots

WANG Tian[1,2], ZHANG Shuhan[1,2], YAN Shipeng[1,2], ZHANG junlian[2,3], LI Chaozhou[1,2]

(1. *College of Life Science and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2. *Gansu Key Laboratory of Crop Genetics and Germplasm Enhancement*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
3. *College of Horticulture*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*)

Abstract: A field experiment was conducted using the potato cultivar "Atlantic" as experimental material to study the effects of different phosphorus (P) fertilizer application amounts on root physiology and development of potato seedlings under drought stress. The purpose was to determine the optimum P fertilizer application amount for increasing potato yield and drought resistance under drought stress, and to provide theoretical support for potato production under water deficit conditions. The experiment was carried out with two drought stress treatments and one full irrigation. The soil water content was maintained at 9.5%, 14.0%, and 32.0%, respectively. The amount of 6 P fertilizers application quantities (P_2O_5) were used as: T1 (27.3 kg · hm^{-2}), T2 (54.5 kg · hm^{-2}), T3 (81.8 kg · hm^{-2}), T4 (109.1 kg · hm^{-2}), T5 (136.3 kg · hm^{-2}), and no P fertilizer application as control (T0). The results showed that: (1) Compared with full irrigation treatment group, light drought caused the potato root water content decrease by 5.54% and $O_2^{\cdot -}$ production rate and malondialdehyde content increased by 63.33% and

收稿日期:2019-01-07　　**修回日期**:2019-05-14

基金项目:国家马铃薯产业技术体系(CARS-09-P14);甘肃省科技厅科技支撑项目(1604NKCA052-3)

作者简介:王天(1993-),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,研究方向为植物生态生理。E-mail:2047810371@qq.com

通信作者:李朝周(1963-),男,山东临沂人,教授,主要从事植物抗逆生理及相关领域研究。E-mail:licz@gsau.edu.cn

180.47%, respectively. Plant height and stolon number decreased by 11.74% and 7.66%, respectively. Potato root weight and tuber yield decreased by 9.85% and 6.75% respectively. (2) The best P fertilizer application amount in promoting the growth and development of potato seedlings under drought stress was 54.5 kg · hm^{-2} among all 6 treatments of P fertilizer application amounts. In the P fertilizer application amount of 54.5 kg · hm^{-2} under mild drought condition, the root activity of potato increased by 36.28%; superoxide dismutase, peroxidase, and catalase activities increased by 29.31%, 46.27%, and 114.53% respectively and the weight of potato tuber increased by 39.75%. In terms of root morphology, total root length, root surface area, and root volume of potato increased by 104.20%, 31.65%, and 21.06%, respectively. So, it is concluded that the growth of potato seedlings was inhibited significantly by drought stress, but proper amount of P fertilizer application could alleviate the degree of root lipid-peroxidation and the damage on cell membrane, thus, alleviated the inhibition on root growth and enhanced the drought resistance of the potato seedlings by increasing the anti-oxidative enzymes activities, the root vigor, and optimizing of root morphology.

Keywords: phosphorus fertilizer application amount; potato; drought stress; root physiology; root development

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是位列于水稻、小麦以及玉米之后的世界第四大粮食作物,并且因其全面的营养成分备受世界各地消费者的喜爱,成为亚洲、欧美、非洲等许多国家和地区的主要粮食作物[1]。在我国,马铃薯大部分作为蔬菜或主食,还有一部分用于淀粉加工、饲料原料等。与其他的粮食作物相比,马铃薯适应性极强,分布区域仅次于玉米,能够广泛种植,因而成为贫困地区促进粮食生产和脱贫致富的优势农作物。甘肃省的马铃薯种植面积占全国总种植面积的14%,是全国重要的马铃薯种薯和商品薯生产基地,也是重要的淀粉加工基地[2-3]。而甘肃省长期面临水资源短缺的问题,水分不足严重影响马铃薯产业的发展,为了马铃薯产业在甘肃能够持续稳定的发展,就要做好节水灌溉工作,所以高效的水分管理在马铃薯生产上势在必行[4-5]。

干旱胁迫是农业生产中的常见问题,由于自然环境的影响,绝大部分作物都经受着不同程度水分亏缺所带来的逆境胁迫[6]。受干旱胁迫后,植物体活性氧含量增加,细胞内抗氧化酶系统和渗透调节物质发生变化,水分利用效率受到影响,植物光合作用受到抑制,同化物积累量减少,最终植物个体和群体生长发育受到抑制,形态发生改变,生物量和产量受到影响[7-13]。磷在植物的生命活动中起着至关重要的作用,它能够增强细胞结构的水合作用,增加结合水含量,减少细胞水分的流失,增强原生质对局部脱水的抵御能力,促进根系发育,使根伸入较深土层吸收水分,进而增强植物的抗旱性[14]。

增施磷肥对于作物优质高产有显著的作用[15]。赵海霞等[16]研究表明,增施磷肥可以促进苦荞根系生长发育,提高抗氧化酶活性,增加渗透调节物质含量。有研究表明,磷素营养能显著改善干旱胁迫对大豆的不利影响,增加根干重、根长、根表面积,进而减少大豆产量损失[17]。合理地补施磷肥有利于提高马铃薯产量和改善薯块品质,但施磷量过高会降低马铃薯的抗旱性[18-19]。但目前,关于干旱胁迫和磷肥施用量对马铃薯根系生理、根系形态及农艺性状相互影响的研究鲜见报道,故本研究通过控制土壤含水量及磷肥施用量,对马铃薯苗期根系形态指标、抗性生理指标以及成熟期农艺性状指标进行测定,探究磷肥不同增施量对马铃薯根系形态、抗性生理和生长发育的影响,旨在确定干旱胁迫下提高马铃薯产量及抗旱性的最佳磷肥施用量,为提高水分亏缺下的马铃薯产量提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2016年4—10月在甘肃省白银市景泰县条山集团马铃薯种植基地(37°11′ N,104°03′ E)进行。基地年均降水量为193.72 mm,供试土壤属灰钙土,0~30 cm土层土壤田间持水量为42.48%,有机质含量13.06 g · kg^{-1},全氮含量0.54 g · kg^{-1}、碱解氮17.6 mg · kg^{-1}、速效磷41.34 mg · kg^{-1}、速效钾272.0 mg · kg^{-1},pH值8.03,土壤含水量为13.68%。

1.2 试验材料

供试马铃薯品种为大西洋;使用的磷肥为过磷酸钙($Ca(H_2PO_4)_2$,分析纯),天津市光复科技发展有限公司生产。

1.3　试验设计

2016 年 4 月 16 日种植，进入幼苗期 20 d 后，通过滴灌及土壤水分实时监测系统，进行自动检测、补水，将土壤水分含量严格控制在设定范围；并采用常规大田管理方法，试验区上方加盖防雨棚，避免自然降雨影响。试验设 2 个干旱胁迫处理和 1 个充分灌溉处理（对照），其中中度干旱胁迫表示为“W1”（土壤含水量保持在 9.5%左右），轻度干旱胁迫表示为“W2”（土壤含水量保持在 14.0%左右），充分灌溉表示为“W3”（土壤含水量保持在 32.0%左右），直到生长发育周期结束。所施磷肥为过磷酸钙（$Ca(H_2PO_4)_2$），用量（以 P_2O_5 计）分别为：T1（27.3 kg · hm^{-2}）、T2（54.5 kg · hm^{-2}）、T3（81.8 kg · hm^{-2}）、T4（109.1 kg · hm^{-2}）、T5（136.3 kg · hm^{-2}），另设不施肥处理为对照（T0）（见表 1）。采用区组设计，全膜覆盖单垄双行定植，种植小区面积 4 m×8 m＝32 m^2，株距 35 cm，每垄行距 40 cm，垄宽 20 cm，播种密度约为 3 750 株 · 667 m^{-2}，于 4 月 14 日覆膜，4 月 16 日种植。

于 2016 年 5 月 24 日早晨在马铃薯植株根际周围土壤均匀撒施磷肥。氮肥和钾肥已于播种前一次性施入，所用氮肥为尿素（$CO(NH_2)_2$），用量（N 含量 46%）为 210 kg · hm^{-2}，钾肥为硫酸钾（K_2SO_4），用量（K_2O 含量约 51%）为 105 kg · hm^{-2}，各处理用量一致。

表 1　土壤水分和磷肥用量的试验设计

Table 1　Experimental design of soil moisture and phosphorus fertilizer application amount

土壤水分 Soil moisture/%	磷肥用量/（kg · hm^{-2}） Phosphorus fertilizer application amount					
	T0	T1	T2	T3	T4	T5
9.5（W1）	0	27.3	54.5	81.8	109.1	136.3
14.0（W2）	0	27.3	54.5	81.8	109.1	136.3
32.0（W3）	0	27.3	54.5	81.8	109.1	136.3

1.4　测定指标及方法

1.4.1　根系含水量和根系活力　根系含水量采用称重法[20]，计算公式为：

$$RM = (W_f - W_d)/W_f \times 100\%$$

式中，RM 为根系含水量（%），W_f 为根鲜重，W_d 为根干重；根系活力采用 TTC 法[21]。

1.4.2　超氧阴离子（O_2^-）产生速率、丙二醛（MDA）含量及抗氧化酶系统　增施不同量磷肥 20 d 时于上午10：00—10：50 取马铃薯根系作为试验材料。测定以下各项生理指标：超氧阴离子产生速率、丙二醛（MDA）含量、超氧化物歧化酶（SOD）活性、过氧化物酶（POD）活性、过氧化氢酶（CAT）活性，均参考邹琦等方法[20]。

1.4.3　根系形态特征　于收获前 15 d 测定根系形态指标。使用扫描仪 Espon scanner 和 Win-RHIZO 2008a 根系图像分析软件对各处理的根系分别进行扫描和形态指标的分析[21]。

1.4.4　生长发育指标　在收获时进行以下指标测定[22]：株高、茎粗、匍匐茎数量、地上部及根干重（以单株计算）、块茎产量。

1.5　数据处理

采用 Excel 2013 软件对数据进行处理和绘图，数据用平均值±标准误表示，采用 SPSS 19.0 统计分析软件对数据进行差异显著性分析，取 P<0.05 为显著相关，各项指标测定重复 3~5 次。

2　结果与分析

2.1　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系含水量及根系活力的影响

马铃薯幼苗根系含水量在整体上呈现出随土壤含水量降低而降低的趋势（图 1A）。W2 和 W3 各组磷肥增施处理的根系含水量差异不明显，但 W1 整体水平均低于 W2 和 W3，且 W1 组中，T5 处理显著低于其他处理，可能与土壤中磷肥施用过多导致土壤溶液浓度升高，土壤水势降低而引起水分反渗透的“烧苗”现象有关。

根系活力在整体上呈现低水平磷肥增施量下随土壤含水量的升高先升后降的趋势（图 1B）。各水分含量处理下根系活力均表现为随磷肥增施量的增加而先升高后降低的变化趋势，说明在一定范围内增施磷肥有效提高了根系活力。在 W1 水分处理中，T3 处理根系活力达到最大值，比 T0 提高 57.94%；在 W2 水分处理中，T2 处理达到最大值，比 T0 提高 36.28%，T1 和 T2 处理显著高于 T0，T2 效果最佳；在磷肥增施量较低（T1，T2）时，W2 的根系活力高于 W3，可能与轻度干旱刺激根系的生理活性有关。在正常灌溉的 W3 条件下，增施较低量磷肥（T1，T2）时，根系活力较 T0 没有显著差异，随着磷肥增施量的升高，根系活力在 T4 达到峰值，且明显高于 T1、T2、T3 处理，比 T0 提高了 98.41%。

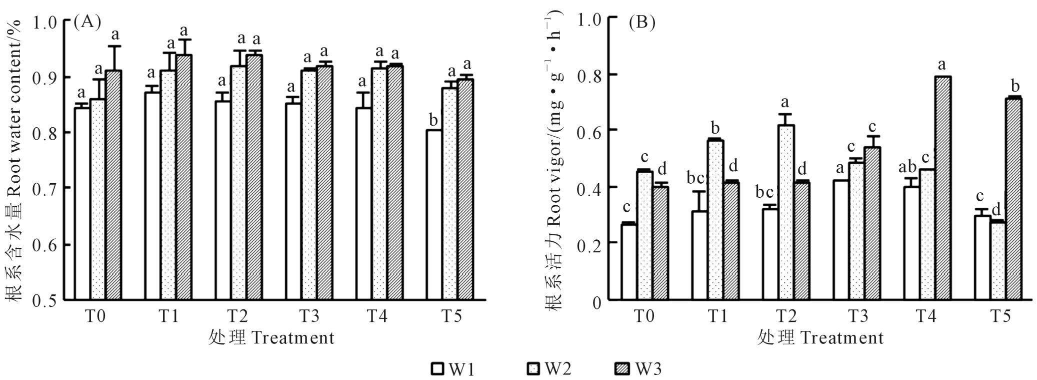
2.2　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系 O_2^- 产生速率和丙二醛（MDA）含量的影响

如图 2A 所示，在 W1 和 W2 处理下，O_2^- 产生速率总体呈现随磷肥增施量的增加先降低后升高的趋势。在 W1 水分处理下，T3 处理的马铃薯根系 O_2^- 产生速率达到最低，比 T0 降低了 44.82%；而在 W2 时，T2 比 T0 处理降低了 40.62%。而且可以看

出,W3 各组处理下的 O_2^- 产生速率整体低于 W1 和 W2,说明干旱胁迫使马铃薯根系 O_2^- 产生速率升高。如图 2B 所示,MDA 含量在整体上呈现 W1 和 W2 高于 W3 的趋势,即与对照相比,干旱胁迫使马铃薯根系 MDA 含量升高。在 W1 和 W2 处理下 MDA 含量随磷肥增施量的增加呈先降低后升高的变化趋势,MDA 含量在 W1 和 W2 时,T2 比 T0 处理分别降低了 36.19%和 32.45%。增施磷肥在一定范围内有效缓解了 O_2^- 产生和 MDA 积累,说明适宜的磷肥用量能减轻干旱胁迫下活性氧积累和膜脂过氧化伤害。

2.3 干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系抗氧化酶活性的影响

由图 3A 可知,除 T5 处理外 SOD 活性呈现 W1 和 W2 高于 W3 的趋势,即与对照相比,干旱胁迫使马铃薯根系 SOD 活性升高。在 W1 和 W2 下 SOD 活性均为随磷肥增施量的增加呈现先升高后降低的变化趋势,SOD 活性在 W2 时,T3 比 T0 处理分别高 1.78 倍和 1.29 倍,即 T3 显著高于 T0,效果最佳,说明在一定范围内增施磷肥提高了 SOD 活性。由图 3B、C 可知,POD、CAT 活性在整体上呈现出 W1 和 W2 在磷肥增施量较低时高于 W3 的趋势,即与对照相比,在一定的磷肥增施量范围内,干旱胁迫使马铃薯根系 POD、CAT 活性升高。在 W1 和 W2 下 POD 和 CAT 活性均为随磷肥增施量的增加呈先升高后降低的变化趋势,POD 活性在 W1 和 W2 时 T2 比 T0 处理分别提高了 125.50% 和 46.27%;CAT 活性在 W2 水分处理下,T2 比 T0 提高了114.53%,达显著水平,效果最佳;在一定范围内增施磷肥提高了 POD 和 CAT 活性。W3 水分处理下,SOD,POD,CAT 活性在磷肥增施量增加的情况下变化幅度均较小。T3、T4、T5 处理的 CAT 活性均为 W1、W2 低于 W3,可能是过量磷肥增施减弱了干旱下抗氧化酶活性,但对 W3 过量磷肥增施并未对抗氧化酶系统造成显著影响。



注:不同字母表示相同水分条件下各磷肥用量处理间差异显著性达 $P<0.05$ 水平。下同。

Note: Different letters indicate significant difference of phosphorus fertilizer application amount under the same water treatment at $P<0.05$ level. The same below.

图 1 干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系含水量及根系活力的影响

Fig.1 Effects of drought stress and phosphorus fertilizer application amount on potato seedling root water content and root vigor

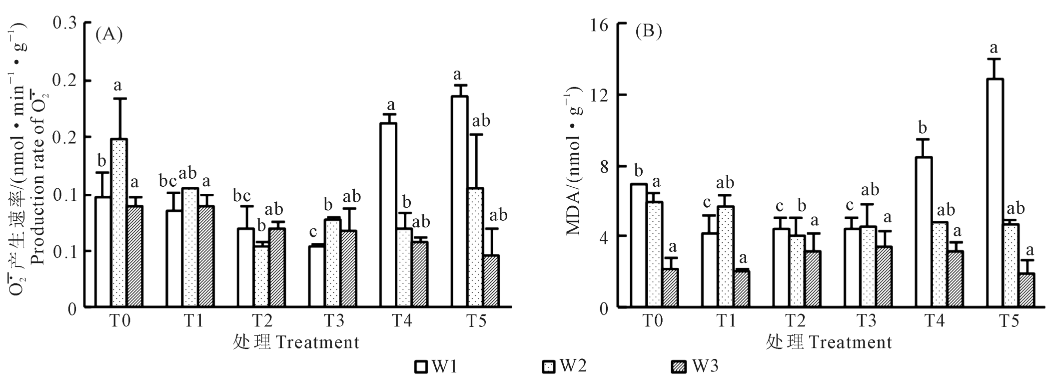


图 2 干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系 O_2^- 产生速率和丙二醛(MDA)含量的影响

Fig.2 Effects of drought stress and phosphorus fertilizer application amount on the super oxygen anion producing rate and MDA content of potato seedling root

综上所述,说明增施适宜的磷肥用量能增强干旱胁迫下马铃薯根系抗氧化酶活性,提高活性氧产生—清除平衡的能力,从而提高马铃薯幼苗的抗旱能力。

2.4　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯根系形态特征的影响

马铃薯根系总长度在整体上呈现出轻度干旱处理高于对照(图 4A),这可能是马铃薯为了响应水分亏缺信号,吸收更多的养分供地上部生长而做出的响应,从而刺激了根长的延伸,向着深层潮湿的土壤生长,有利于利用深层土壤中的水分。W2 和 W3 处理根系总长度随磷肥增施量的增加呈先升后降的趋势,W2 和 W3 处理下 T3 分别比 T0 增加了 104.20%和 94.90%。W1 根系总长度总体呈现随磷肥增施量的增加而升高趋势,T2 比 T0 处理增加了 83.54%。马铃薯根系总表面积在整体上表现为干旱处理高于对照(图 4B),在增施磷肥量较高时表现明显,结合根长变化趋势看,干旱胁迫下表面积和根长之间存在互补的关系,可能与植株根系针对逆境进行不同方向的能量投入以抵御干旱胁迫有关。根系总表面积随磷肥增施水平呈先升后降的变化,W1、W2 水分处理下的峰值分别出现在 T3 和 T2 磷肥处理。

马铃薯根系平均直径整体呈现随着水分胁迫程度的加重而变细的趋势(图 4C),说明缺水状态促进了马铃薯细根的发育,有利于根系向深层土壤延伸,并增加吸收面积。根系平均直径随磷肥增施水平呈现与根表面积一致的变化趋势,即较低的磷肥用量使根直径变粗,增加吸收面积,较高的磷肥用量使根直径变小,促进了细根的发育。W1、W2 水分处理下的峰值分出现在 T2 和 T3 磷肥处理,分别比 T0 增加了27.24%、24.28%。由图 4D 可知,马铃薯根系体积呈现出水分胁迫处理>对照,即低土壤

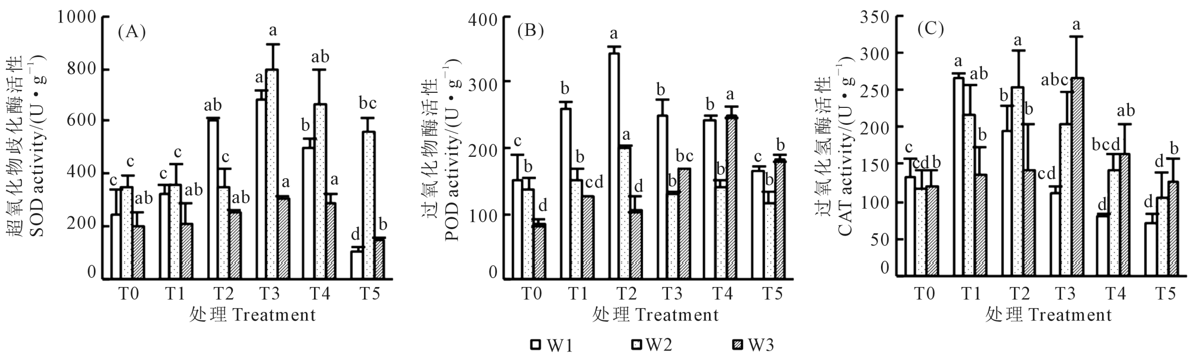


图 3　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯幼苗根系抗氧化酶活性的影响

Fig.3　Effects of drought stress and phosphorus fertilizer application amount on the antioxidant enzyme activity of potato seedling root

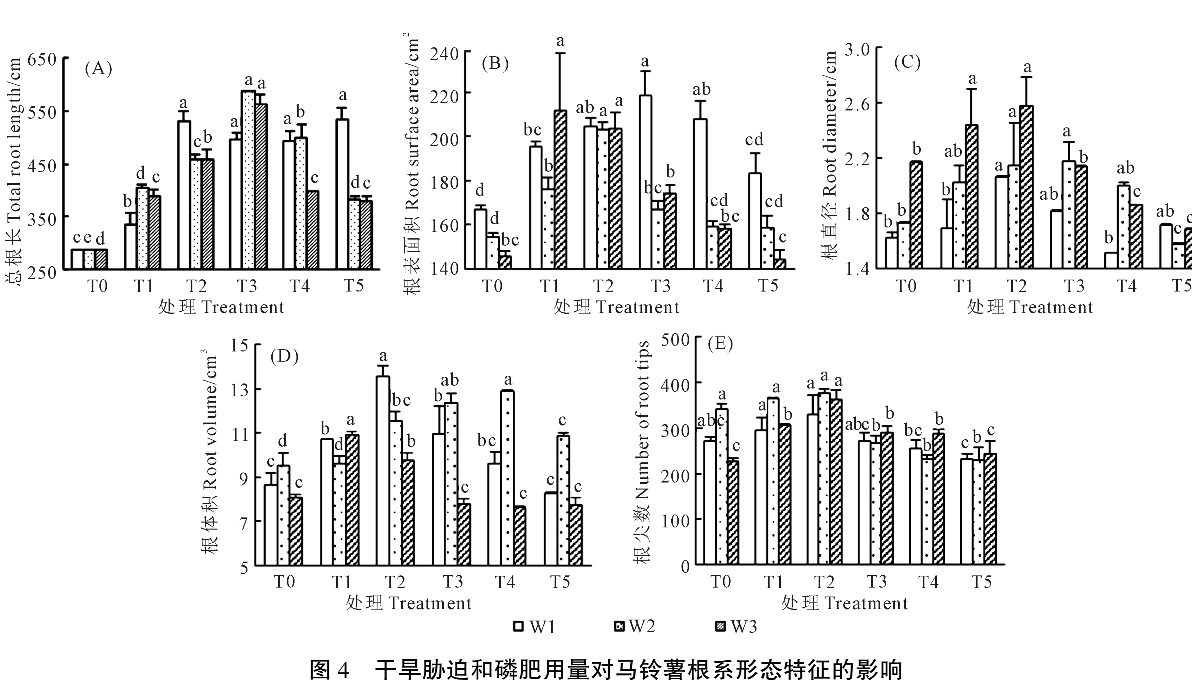


图 4　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯根系形态特征的影响

Fig.4　Effects of drought stress and phosphorus fertilizer application amount on the potato root morphology

含水量促进了根系的发育。根系总体积随磷肥增施水平呈先升后降的变化,W1、W2 处理下 T2 比 T0 增加了57.17%、21.06%,说明在一定范围内增施磷肥促进了水分胁迫下根体积的增加。

在磷肥施用量较低(T0、T1、T2)的情况下,马铃薯根尖数呈现 W2>W1 的趋势(图4E)。即轻度干旱促进了侧根分支,因而其数量相对较多,根系结构相对复杂;在中度干旱条件下根系分生能力相对较弱,侧根数量少,根系更可能主要通过侧根的伸长促进其对土壤水分的吸收,以适应干旱环境。根系总长度随磷肥增施水平呈先升后降的变化,在 T2 处理时出现根长峰值,在 W1、W2 和 W3 水分状况下比 T0 增加了 21.51%、9.94%和 59.91%。

当磷肥施用量过高表现出各指标下降趋势,可以考虑存在一定的"烧苗"现象,导致部分根系活性降低甚至衰亡。

2.5 马铃薯根系各形态指标相关性分析

由表2可知,在 W1 下,根直径与根尖数呈极显著性正相关,而总根长与根直径、根尖数呈负相关,说明中度干旱条件下根系通过改变自身构型来适应干旱环境。在 W2 下,总根长与根体积呈显著性正相关,而根尖数与根体积、根长呈负相关,轻度干旱区根系主要通过侧根数目和根体积的增加生长来适应胁迫的发生。在 W3 下,根表面积与根体积、根尖数呈现显著正相关,总根长与根体积呈现负相关,由此可见,正常灌水区根系表面积和根体积的增加,扩大了浅层根系与土壤的接触面积以促进生长。可以说明马铃薯根系形态分别对不同程度的干旱胁迫做出了响应。

2.6 干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯植株生长发育的影响

由表3可知,随土壤水分含量的减少,马铃薯株高、茎粗、匍匐茎数均有不同程度的降低,由此可认为 W1 和 W2 皆对马铃薯造成了一定程度的干旱胁迫。

增施不同量的磷肥,马铃薯株高、茎粗、匍匐茎数呈现先升高后降低的趋势。W1 水分处理下,T1 处理植株的株高达到最大值,比 T0 处理升高了 21.93%,W2 和 W3 水分处理下,均为 T2 处理的株高达到最大值,分别比 T0 处理升高了 36.08%和 27.80%;W1 和 W2 水分处理下均为 T2 处理的茎粗达到最大值,比 T0 处理升高了6.45%和 32.52%,W3 水分处理下,T3 处理的茎粗达到最大值,比 T0 处理升高了 48.73%;W1、W2 和 W3 三种水分条件下马铃薯的匍匐茎数均在 T2 处理达到最大,分别比 T0 处理升高了66.67%、69.23%和71.43%。由此可见干旱胁迫下增施适量磷肥可以对马铃薯的生长发育起到促进作用。

2.7 干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯植株生物量和产量的影响

由表4可知,不同程度的干旱胁迫均导致马铃薯薯重、根重、地上部分重下降,通过增施磷肥,上述三个指标较未增施磷肥的植株有不同程度的变化,随磷肥增施量的增加,各指标均呈先上升后下降的趋势。

W1、W2 水分处理下地上部分重均在 T2 处理达到最大,分别较 T0 处理升高了 5.43%和 28.30%,W3 水分处理下为 T3 处理下达到最大,较 T0 处理升高了27.90%;根重在 W1、W2 和 W3 水分处理下依次为 T2、T3、T4 处理达到最大,其最大值分别较 T0 处理升高了 29.34%、39.26%和 71.32%;W1、W2、W3 三种水分条件下马铃薯的块茎产量在 T2 达到最大,分别较 T0 处理升高了 25.83%、39.75%和 46.03%。说明干旱胁迫下增施适量的磷肥能改善马铃薯根系生长发育、块茎营养品质,从而增加马铃薯产量,随着干旱胁迫的加重,各指标达到最大值时所需的磷肥量逐渐增加。

表2 马铃薯根系各形态指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of indexes of potato root morphology

指标 Index	W1				W2				W3			
	根表面积 Root surface area	根直径 Root diameter	根体积 Root volume	根尖数 Number of root tips	根表面积 Root surface area	根直径 Root diameter	根体积 Root volume	根尖数 Number of root tips	根表面积 Root surface area	根直径 Root diameter	根体积 Root volume	根尖数 Number of root tips
总根长 Total root length	0.500	−0.300	0.356	−0.165	0.177	0.718	0.848*	−0.333	0.452	0.470	−0.080	0.610
根表面积 Root surface area		0.248	0.763	0.265		0.654	0.130	0.682		0.556	0.849*	0.892*
根直径 Root diameter			0.742	0.97**			0.502	0.362			0.344	0.631
根体积 Root volume				0.774				−0.541				0.601

注:*,**分别表示在0.05和0.01水平下相关性显著。

Note: *, ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively.

表 3　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯植株生长发育的影响

Table 3　Effects of drought stress and phosphorus fertilizer application amount on the growth and development of potato plants

处理 Treatment	株高 Plant height/cm			茎粗 Stem diameter/cm			匍匐茎(枝) Number of stolon		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
T0	68.41±2.62bc	76.51±6.08c	86.69±5.3b	1.55±0.02ab	1.63±0.01b	1.58±0.12c	6.02±1.41b	6.51±0.74c	7.05±1.37d
T1	83.40±4.17a	91.09±6.65b	85.20±2.55b	1.47±0.19ab	1.81±0.06ab	1.62±0.02bc	8.47±0.69ab	9.46±0.71ab	10.53±0.72ab
T2	72.29±5.09abc	104.12±1.67a	110.78±0.21a	1.65±0.07a	2.16±0.31a	1.84±0.08b	10.11±1.41a	11.03±1.43a	12.09±1.41a
T3	79.11±4.74ab	91.70±1.26b	103.56±2.76a	1.34±0.48ab	1.74±0.29ab	2.35±0.18a	8.02±1.42ab	9.51±0.70ab	9.52±0.66bc
T4	76.54±6.01abc	83.24±3.18bc	82.33±1.06b	1.08±0.03b	1.78±0.12ab	1.84±0.01b	7.53±0.71ab	8.06±1.40bc	7.51±0.70bc
T5	66.59±4.95c	65.22±3.18d	67.73±7.21c	1.26±0.07ab	1.59±0.09b	1.51±0.01c	6.04±0.02b	6.47±0.66c	6.22±0.03d

表 4　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯生物量和薯重的影响

Table 4　Effects of drought stress and phosphorus fertilizer amount application on the fresh weight of aboveground part and root weight and tuber weight

处理 Treatment	地上部分重/g Fresh weight of aboveground			根重/g Root weight			块茎重/g Tuber weight		
	W1	W2	W3	W1	W2	W3	W1	W2	W3
T0	95.81±5.94ab	100.01±4.53bc	101.95±10.39c	19.63±0.57bc	19.03±1.13a	21.11±0.85b	302.04±18.38bc	317.22±16.97c	340.17±28.28c
T1	93.72±1.27ab	108.05±7.28b	111.04±2.26bc	22.67±3.25ab	26.01±2.26a	27.05±4.17ab	359.12±12.73ab	368.15±9.92b	430.23±42.43ab
T2	101.02±4.81a	128.29±2.69a	124.65±6.43ab	25.35±1.48a	25.65±4.17a	24.03±5.19b	380.14±31.11a	443.10±24.04a	496.52±12.02a
T3	100.35±4.31a	118.78±2.83a	130.44±2.55a	21.04±0.99bc	26.45±5.73a	28.75±3.46ab	342.23±31.11ab	405.86±21.21ab	476.40±35.36a
T4	93.95±6.15ab	102.45±2.62bc	115.85±6.58abc	19.22±0.85bc	26.15±8.13a	36.15±5.59a	276.20±15.56c	373.71±16.97b	443.32±24.04ab
T5	84.00±3.39b	95.51±4.11c	106.55±11.53bc	17.93±0.71c	21.55±3.89a	25.95±2.33b	212.53±21.92d	296.11±5.66c	399.02±1.41bc

3　讨　论

3.1　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯根系生长发育的影响

生物或非生物胁迫都会影响植物细胞正常生理代谢,使细胞内活性氧(ROS)和过氧化产物含量升高,而植物体内的抗氧化酶如 SOD、CAT 和 POD 在清除 O_2^-、H_2O_2和过氧化物、阻止或减少羟基自由基形成、保持膜系统免受损伤等方面起着重要作用[23]。已有研究表明,磷在增强作物对干旱胁迫的适应性及提高恢复能力方面具有非常重要的作用,土壤磷素水平与农作物的生长密切相关[24-25]。郑亚萍等[26]研究表明,施磷可提高花生根系中 SOD、POD、CAT 活性、根系活力和可溶性蛋白含量,降低 MDA 含量。本研究结果与前人相似,干旱胁迫下增施适量磷肥不同程度降低了马铃薯根系 O_2^-产生速率和 MDA 含量,提高了抗氧化酶(SOD、POD、CAT)活性。在本试验中,较低的磷肥用量(T1、T2、T3)施用处理下的马铃薯根系 O_2^-产生速率、MDA 含量均有不同程度的降低,随磷肥施用量的进一步增加,中度干旱处理下二者又显著升高;从整体上看,随磷肥施用量的增加,抗氧化酶活性显著增强,但过量磷肥处理会明显降低 3 种酶活性。这说明在水分亏缺较重的条件下,大量施用磷肥不仅不能缓解干旱胁迫对马铃薯根系造成损伤,甚至还会引起“烧苗”,对其造成双重胁迫。王西瑶等[27]研究表明,缺磷造成的胁迫增强了马铃薯植株的耐旱能力。这可能由于缺磷造成的胁迫使得植株的生长量减小,地上部分蒸发面积下降,甚至产生了交叉抗性。

磷在土壤中流动性差,分布不匀,主要通过扩散方式迁移到植物根表面,土壤中根系的空间分布对于磷素的吸收尤为重要。而植物根系为得到充分营养资源,根系形态表现出高度的可塑性[28]。缺磷会通过改变根系数量、长度、直径等改变作物的根系形态,而改变的程度取决于养分的缺乏程度[29]。林雅茹等[30]研究指出,野生大豆可以通过优化根系空间分布来提高对土壤中磷素的吸收。也有研究指出,增施磷肥可显著增加小麦的根系活力、总根长、根体积和根表面积[31]。在本试验中,干旱胁迫降低了马铃薯根系含水量和根系活力,但随磷肥的适量施入,各处理下马铃薯的根系活力和含水量较对照均有不同程度提高。就根系形态而言,适量施磷对马铃薯根系的总根长、根表面积、根体积、根直径和根尖数均有不同程度的促进作用,但在土壤水分含量较低,即干旱胁迫的条件下,过高的磷肥用量不仅不能促进根系生长,反而使上述指标出现下降趋势,说明高磷可能对根系造成不同程度的磷胁迫,导致根系受损。由此可见,干旱条件下增施适宜磷肥,可以促进马铃薯根系生长发育,优化根系形态,减少干旱胁迫造成的损伤,增强马铃薯对逆境的抵御能力。

3.2　干旱胁迫和磷肥用量对马铃薯生长的影响

磷肥在农业生产中至关重要,增施磷肥显著提高作物产量和品质[15]。磷素供应不足会严重影响植物的生长发育,导致植株生长缓慢、个体矮小,果实和种子成熟延迟、产量和品质下降等。杨宏伟等[32]研究发现,干旱胁迫导致马铃薯植株的株高、茎粗、根长、匍匐茎数下降,增施适量磷肥后上述各

指标均有提高。王炎等[33]在对甜荞的研究中发现，甜荞产量随磷肥用量的增加而提高，当磷肥用量超过一定限度后再增施磷肥甜荞产量有所下降。本研究发现，与正常灌溉相比，马铃薯植株的株高、茎粗和匍匐茎数在干旱条件下皆有降低，而在同样条件下增施少量磷肥，上述3个指标均有不同程度的增加，与前人研究结果相似。但随干旱程度的加剧，继续增施磷肥对茎粗表现出负效应。这可能与水分供应不足，马铃薯植株光合作用减弱有关，而这种变化会直接反映在茎粗的动态变化上。适宜的磷肥处理使马铃薯的地上部分干重、根干重和块茎重较对照均有不同程度的增长，但过高的磷肥量制约了马铃薯的干物质累积，可能是因为磷肥过量，导致土壤磷素积累，影响对土壤中氮素和钾素的吸收，导致植株株型矮小，发育不好，产量下降。由此可知，干旱胁迫下，施用适量的磷肥可以促进马铃薯植株的生长发育，提高产量。

4 结 论

1）与充分灌溉相比，干旱胁迫明显抑制了马铃薯根系生长发育，并导致马铃薯薯重、根重、地上部分重明显下降。

2）比较6种磷肥施用量，以每公顷增施54.5 kg磷肥对马铃薯抗旱性及生长发育促进效果最佳。与未施磷相比，干旱条件下增施54.5 kg磷肥使马铃薯根系中超氧阴离子产生速率和丙二醛含量分别降低了46.94%和23.41%；SOD、CAT活性分别提高了129.12%、71.23%。干旱条件下增施54.5 kg磷肥可以优化马铃薯根系形态，增强根系活力及含水量，有效缓解干旱胁迫，增强植株抗旱性，在整体上促进马铃薯植株的生长发育。

参 考 文 献：

[1] 钱坤.马铃薯晚疫病强毒菌株CN152特异免疫抑制效应子的鉴定[D].北京：中国农业科学院，2016.

[2] 吴正强，岳云，赵小文，等.甘肃省马铃薯产业发展研究[J].中国农业资源与区划，2008，29(6)：67-72.

[3] 何三信，文国宏，王一航，等.甘肃省马铃薯产业现状及提升措施建议[J].中国马铃薯，2010，24(1)：54-57.

[4] 乌兰，石晓华，杨海鹰，等.苗期水分亏缺对马铃薯产量形成的影响[J].中国马铃薯，2015，29(2)：80-84.

[5] 李晶.河西绿洲马铃薯膜下滴灌调亏试验研究[D].兰州：甘肃农业大学，2013.

[6] 张瑞美，彭世彰，徐俊增，等.作物水分亏缺诊断研究进展[J].干旱地区农业研究，2006，24(2)：205-210.

[7] 张腾国，李巧丽，刁志宏，等.盐及干旱胁迫对油菜抗氧化系统和*RbohC*、*RbohF*基因表达的影响[J].应用生态学报，2019，30(3)：969-978.

[8] Asada K. Production and scavenging of reactive oxygen species in chloroplasts and their functions[J]. Plant Physiology, 2006, 141:391-396.

[9] 杨宏伟，李自龙，梁恕坤，等.间作百喜草对油橄榄根际微环境及抗旱生理的影响[J].应用与环境生物学报，2016，22(3)：455-461.

[10] Legg B J, Day W, Lawlor D W, et al. The effects of drought on barley growth: models and measurements showing the relative importance of leaf area and photosynthetic rate [J]. The Journal of Agricultural Science，1979, 92(92)：703-716.

[11] 丁雷，王学臣.干旱胁迫下ABA对气孔运动的作用机制[J].干旱地区农业研究，1993，11(2)：50-56.

[12] 李磊，贾志清，朱雅娟，等.我国干旱区植物抗旱机理研究进展[J].中国沙漠，2010，30(5)：1053-1059.

[13] 曲涛，南志标.作物和牧草对干旱胁迫的响应及机理研究进展[J].草业学报，2008，17(2)：126-135.

[14] 沈其荣.土壤肥料学通论[M].北京：高等教育出版社，2001：211.

[15] 黄建国.植物营养学[M].北京：中国林业出版社，2004.

[16] 赵海霞，裴红宾，张永清，等.施磷对干旱胁迫下苦荞生长及磷素吸收分配的影响[J].干旱区资源与环境，2019，33(3)：177-183.

[17] Shen Z B, Qi Z Y, Jin J. Effect of phosphorus application on morphological characters of root under drought stress at different reproductive stages in soybean [J]. Soybean Science, 2007,(4)：528-532.

[18] 黄凯，张俊莲，王蒂，等.陇中半干旱区施磷与补水对全膜覆盖马铃薯产量和品质的影响[J].甘肃农业大学学报，2014，49(5)：70-74.

[19] 赵海超，龚学臣，抗艳红，等.不同施磷量对马铃薯苗期抗旱性的影响[J].安徽农业科学，2012，40(6)：3314-3316.

[20] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京：中国农业出版社，2003.

[21] 陈建勋，王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州：华南理工大学出版社，2006.

[22] 单立山，李毅，段雅楠，等.红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应[J].西北植物学报，2014，34(6)：1198-1205.

[23] 丁玉梅，马龙海，周晓罡，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，2013，26(1)：106-110.

[24] 沈玉芳，曲东，王保莉，等.干旱胁迫下磷营养对不同作物苗期根系导水率的影响[J].作物学报，2005，31(2)：214-218.

[25] Suh S, Yee S. Phosphorus use-efficiency of agriculture and food system in the US [J]. Chemosphere, 2011, 84(6)：806-813.

[26] 郑亚萍，信彩云，王才斌，等.磷肥对花生根系形态、生理特性及产量的影响[J].植物生态学报，2013，37(8)：777-785.

[27] 王西瑶，朱涛，邹雪，等.缺磷胁迫增强了马铃薯植株的耐旱能力[J].作物学报，2009，35(5)：875-883.

[28] 冯琳，顾惠敏，叶祖鹏，等.不同基因型棉花根系对局部供磷的响应特征[J].植物营养与肥料学报，2018，24(5)：1303-1312.

[29] Benjamin D G, Ricardo F H, Swetlana F, et al. Plasticity of the Arabidopsis root system under nutrient deficiencies [J]. Plant physiology, 2013, 163(1)：161-79.

[30] 林雅茹，唐宏亮，申建波.野生大豆根系形态对局部磷供应的响应及其对磷吸收的贡献[J].植物营养与肥料学报，2013，19(1)：158-165.

[31] 邢军，孙敏，高志强，等.氮磷肥对旱地小麦土壤水分与根系特性的影响[J].中国农学通报，2014，30(6)：82-86.

[32] 杨宏伟，刘文瑜，冯焕琴，等.土壤含水量和磷肥对马铃薯生长发育及抗旱生理的影响[J].中国沙漠，2018，38(2)：307-314.

[33] 王炎，李振宙，黄凯丰.施磷量与耕作方式交互作用对甜荞植株形态及产量的影响[J].中国土壤与肥料，2019，6(1)：22-29.