保水剂与钾肥对旱地马铃薯产量和叶绿素荧光动力学参数的影响*

高天鹏[1**] 郭 睿[1] 王 东[4] 高海宁[2] 常国华[1,3] 张 鸣[1,3] 孙海丽[1]

([1]兰州城市学院城市生态与环境生物技术中心, 兰州 730070; [2]河西学院生命科学学院, 甘肃张掖 734000; [3]兰州城市学院化学与环境科学学院, 兰州 730070; [4]兰州大学生命科学学院, 兰州 730000)

摘 要 以"陇薯3号"为材料,设C_1(0.5%保水剂+钾肥60 g·hm^{-2})、C_2(钾肥60 g·hm^{-2})、C_3(0.5%保水剂)、CK(对照)4个试验组,测定叶绿素荧光参数、块茎产量、商薯率等产量指标,从光合效能的角度探讨了保水剂、钾肥对旱地马铃薯叶绿素荧光参数和块茎产量的影响。结果表明:C_1处理的出苗率较对照组显著提高9.4%;所有处理的冠幅、茎粗等指标不同程度地高于对照;除C_3组中的*NPQ*值低于对照之外,其余处理的叶绿素荧光参数F_v/F_m、$(F_m'-F_o')/F_m'$、*qP*、*ETR*日均值较CK均有不同程度提高,$(F_m'-F_t)/F_m'$日变化成"V"型;C_1组商薯产量最高;保水剂和钾肥直接影响马铃薯叶绿素荧光动力学参数,增强其光合效能,从而提高旱地马铃薯商品薯产量。

关键词 半干旱地区; 光合效能; 产量指数

中图分类号 Q948 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2013)5-1221-06

Effects of applying super absorbent polymer and potassium fertilizer on the yield index and chlorophyll fluorescence parameters of dry land potato.

GAO Tian-peng[1**], GUO Rui[1], WANG Dong[4], GAO Hai-ning[2], CHANG Guo-hua[1,3], ZHANG Ming[1,3], SUN Hai-li[1] ([1]*Centre of Urban Ecology and Environmental Biotechnology*, *Lanzhou City University*, *Lanzhou* 730070, *China*; [2]*School of Life Sciences*; *Hexi University*, *Zhangye* 734000, *Gansu*, *China*; [3]*School of Chemistry and Environmental Sciences*; *Lanzhou City University*, *Lanzhou* 730070, *China*; [4]*School of Life Sciences*, *Lanzhou University*, *Lanzhou* 730000, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, **32**(5): 1221-1226.

Abstract: Taking the potato cultivar Longshu-3 as the object, this paper studied the tuber yield and chlorophyll fluorescence parameters under effects of different applications of super absorbent polymer and potassium fertilizer, aimed to approach the effects of applying super absorbent polymer and potassium fertilizer on the yield index and chlorophyll fluorescence parameters of dry land potato from the viewpoint of photosynthetic efficiency. Four treatments were installed, *i.e.*, 0.5% of super absorbent polymer + 60 g·hm^{-2} of potassium fertilizer (C_1), 60 g·hm^{-2} of potassium fertilizer (C_2), 0.5% of absorbent polymer (C_3), and no super absorbent polymer + no potassium fertilizer (CK). As compared with CK, the emergence percentage in treatment C_1 increased significantly by 9.4%. The crown and stem diameter in treatments C_1, C_2, and C_3 were all higher than those in CK, and, except the *NPQ* in treatment C_3 being lower than that in CK, the mean diurnal F_v/F_m, $(F_m'-F_o')/F_m'$, *qP*, and *ETR* in treatments C_1, C_2, and C_3 were also increased to some extent. The yield index was the highest in C_1. All the results indicated that super absorbent polymer and potassium fertilizer had direct effects on the potato plant chlorophyll fluorescence parameters, manifesting in the increase of photosynthetic efficiency, and thus, improved the tuber yield of upland potato.

Key words: semiarid region; photosynthetic efficiency; yield index.

*国家自然科学基金项目(30960060、31160118)、甘肃省科技支撑计划项目(2009GS03453)和兰州市科技发展计划项目(2010-2-126)资助。

**通讯作者 E-mail: zkgtp@163.com

收稿日期: 2012-11-21 接受日期: 2013-02-06

干旱和土壤贫瘠是制约甘肃省马铃薯产量的主要因素(Belanger *et al.*,2001)。大量研究表明,保水剂或肥料的施用可以提高马铃薯的产量(刘效瑞等,2001;刘殿红等,2008;陈光荣等,2009)。叶绿素a荧光动力学参数自1931年德国Kautsky和Hirsch发现后,于20世纪80年代开始在评价作物耐旱、耐寒、耐盐等抗逆性及营养胁迫等方面的应用越来越多(Jeremy *et al.*,1989;Samala *et al.*,1998;Maxwell & Johnson,2000;汪宝根等,2009;杜尧东等,2012)。许多学者通过对玉米、小麦、菊芋、黄瓜等叶绿素荧光动力学参数的变化来研究这些植物的光合效能(车永梅等,2009;李红等,2009;孙艳等,2009;李永秀等,2012;孙晓娥等,2012;Qiu *et al.*,2013)。也有学者用大豆、葡萄等做了胁迫后恢复过程的荧光动力学变化研究(王磊等,2007)。本研究采用有机、无机缓释肥料型保水剂和钾肥进行正交试验,在自然条件基础上处理土壤,改善水肥条件,测定马铃薯形态指标和叶片荧光动力学参数的变化,以揭示水肥互作与光合效能以及生物量和商品产量变化的关系,探索材料干预后水肥条件与生物量和产量的变化规律,旨在研究保水剂和钾肥对马铃薯叶绿素a荧光动力学参数日变化的影响,阐释保水剂和钾肥处理后叶绿素荧光参数和产量指标的变化规律,为干旱半干旱地区马铃薯的生产提供理论和实践基础。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

设在甘肃省榆中县中连川乡上沟社沟滩地,104°22′53″E、36°02′43″N,海拔2320 m,灰钙土土壤类型,有机质9.50 g·kg^{-1},全氮0.76 g·kg^{-1},全磷0.67 g·kg^{-1},全钾18.35 g·kg^{-1}。试验期年均降水量同多年平均值(300 mm左右),无霜期105 d;在前茬作物豌豆收获后结合耕翻施入尿素60 g·m^{-2},过磷酸钙60 g·m^{-2}。

1.2 试验设计与方法

试验品种选用陇薯3号,保水剂(PAM-atta)由中国科学院兰州化学物理研究所生态材料研发中心提供。供试品种于2011年4月23日播种。

试验设置4个处理组分别为,C_1(保水剂0.5%+硫酸钾60 g·m^{-2})、C_2(保水剂0.5%)、C_3(硫酸钾60 g·m^{-2})、CK(不做处理)。4组处理分12个小区,顺序排列,每小区种植4行,每行8株,株行距均为50 cm,小区间距50 cm,重复间距100 cm,小区面积8 m^2(2 m×4 m)。采用开沟点种,保水剂、钾肥按小区称量均匀撒入播种沟内,深度为15 cm。每个处理3个小区,各试验指标都由3个重复平均获得。

1.3 测定项目与指标

1.3.1 出苗率的测定 在苗期6月5日,统计每个处理小区的出苗情况。

1.3.2 土壤含水量测定 于团棵期(6月17日)和块茎膨大期(9月15日)两次用土壤水分速测仪测定15 cm深度的土壤含水量。

1.3.3 地上生长指标的测定 在薯盛期(9月25日)主要测定了冠幅(以冠幅最大直径计)和茎高(以地表至最大高度计)与茎粗(以主干茎中点处直径计)。

1.3.4 叶绿素荧光动力学日均参数的测定 在薯盛期(9月25日)于田间晴天自光下选顶端叶片下数第3片新鲜叶,用PAM-2100便携式调制叶绿素荧光仪(德国WALZ公司)测定;测定选用内置模式1,调节F_o介于200~400,脉冲时间0.8 s,暗室适应时间15 min,光状态下打开F_o',测定内容包括光合系统PSⅡ最大原初光能捕获效率(F_v/F_m),PSⅡ有效光化学量子产量($(F_m'-F_o')/F_m'$),光化学淬灭(qP)与非光化学淬灭(NPQ),相对光合电子传递速率(ETR),并计算日均值;选择9:00、11:00、13:00、15:00、17:00五个时间点测定PSⅡ实际光能转换效率($\Phi_{PS\,II}$)并绘制日变化曲线;各值均随机于小区内抽样测定三次平均获得。

1.3.5 产量结果测定 收获期挖取单株块茎称量计重,并将同一小区的单株重量累加计算作为小区总产量,将小区产量换算为公顷产量,并将其作为各处理之间产量差异比较的指标;同时,以同样的方法比较处理间商薯率及亩产经济收入等指标的差异。

1.4 数据处理

试验结果用ANOVA进行分析,选择LSD显著性差异检验。

2 结果与分析

2.1 保水剂与钾肥对土壤持水量、出苗率与地上生理指标的影响

在团棵期与块茎膨大期,各处理组间土壤含水量无明显差异;和对照相比,C_1组出苗率显著提高($P<0.05$),增幅9.4%,C_2、C_3组出苗率无显著差异;成株期各处理组的地上生长指标中,C_1组的南北冠幅、C_2组的株高均较其他两组和空白组显著增高($P<0.05$),C_1、C_2、C_3组茎粗均不同程度增加,各处理组与CK相比差异均不显著(表1)。

表 1 不同时期的土壤持水量、出苗率和地上生长指标

Table 1 Soil water content in different stages, emergence ratio and some growth indexes

处理	6 月 17 日含水量 (%)	9 月 15 日含水量 (%)	出苗率 (%)	东西冠幅 (cm)	南北冠幅 (cm)	株高 (cm)	茎粗 (cm)
C_1	4.88±0.04 aA	7.81±0.13 aA	96.9±2.10 aA	55.3±1.63 aA	58.4±3.66 aA	48.7±1.55 bA	1.10±0.02 aA
C_2	4.83±0.02 aA	7.93±0.04 aA	87.5±3.56 bA	54.6±1.30 aA	55.2±2.78 bA	49.5±2.87 aA	1.10±0.00 aA
C_3	4.92±0.04 aA	7.91±0.07 aA	87.5±1.81 bA	53.8±1.57 aA	56.7±3.47 bA	48.1±1.34 bA	1.11±0.02 aA
CK	4.84±0.05 aA	7.88±0.06 aA	87.5±1.45 bA	54.5±0.85 aA	55.2±3.68 bA	48.7±2.17 bA	1.09±0.02 aA

2.2 保水剂与钾肥对马铃薯叶绿素 a 荧光动力学参数日变化影响

2.2.1 保水剂与钾肥对 F_v/F_m 和 $(F_m'-F_o')/F_m'$ 日均值的影响 叶绿素荧光动力学参数值的高低直接影响和决定着光合效能。日均值可从微观层面反映叶片在同样环境条件下的光合效能。F_v/F_m 反映 PSⅡ反应中心最大原初光能捕获效率,F_v/F_m 越大,则表示 PSⅡ的最大光能转换效率越大。各处理组 C_1、C_2、C_3 与 CK 相比 F_v/F_m 值都呈显著性($P<0.01$)提高(图 1),较 CK 分别提高 2.5%、2.4%、2.2%。$(F_m'-F_o')/F_m'$ 为 PSⅡ有效光化学量子产量,反映 PSⅡ有效原初光能捕获效率,$(F_m'-F_o')/F_m'$ 越大,则 PSⅡ的有效光能转换效率越大。图 2 反映 PSⅡ有效光化学量子日均产量,C_1、C_2、C_3 三种处理方式使 $(F_m'-F_o')/F_m'$ 值较 CK 都不同程度的提高;并且,C_3 组提高最大,C_1 组次之,C_2 组最小,其比对照分别提高 23.0%、18.5% 和 12.0%。可见,保水剂和钾肥提高 PSⅡ反应中心最大原初光能捕获效率的同时,有效光能捕获效率也有所提高。

2.2.2 保水剂与钾肥对 *qP* 和 *NPQ* 及 *ETR* 日均值的影响 *qP*代表光系统吸收光子获得的能量中以荧光形式散耗的那部分能量。日均最高光化学淬灭为 C_1 组,比 CK 提高 11.4%,具有显著性差异($P<0.01$);C_2、C_3 分别增长 11.2% 和 10.1%($P<0.01$,图 3),与对照组呈显著性提高($P<0.01$)。尤其是正午时段的 *qP* 急剧增大,说明试验处理后光合系统多余光能荧光散耗能力增强。

NPQ 主要反映光合系统中由于天线色素的热

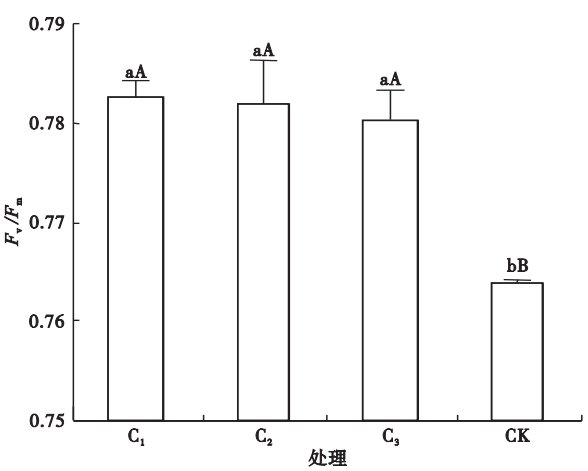


图 1 日均 PSⅡ最大光能捕获效率

Fig. 1 Daily mean of maximal quantum yield of PSⅡ photochemistry

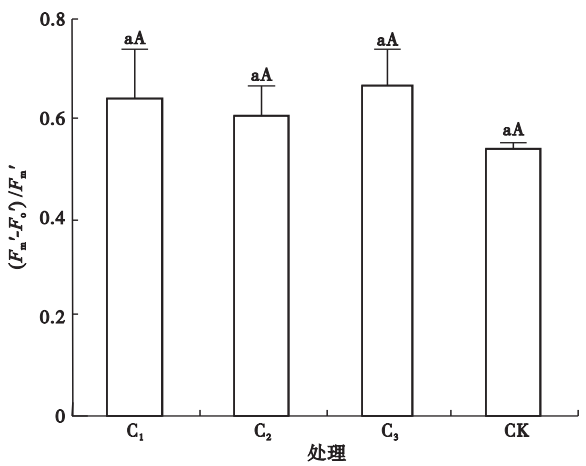


图 2 日均 PSⅡ有效光化学量子产量

Fig. 2 Daily mean of effective quantum yield of PSⅡ photochemistry

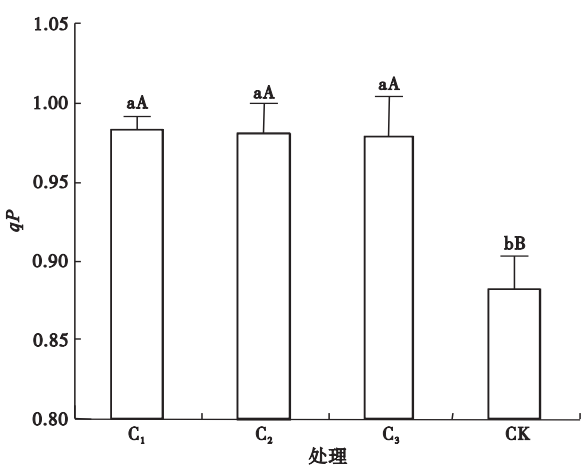


图 3 日均 PSⅡ光化学淬灭

Fig. 3 Daily mean of photochemical quenching of PSⅡ

散耗引起的能量淬灭,是光能过量的有效探针,是植物在受强光胁迫时的另一条有效保护机制。试验中,C_3组 *NPQ* 较 CK 稍有降低(图4),C_1增加显著($P<0.01$),增幅为18.9%,*NPQ* 与 *qP* 反映的本质是一致的,表明在干旱胁迫下,钾肥与保水剂互作更有利于植株自我调节,增强抗逆性,保持较高的光合效能。

ETR 反映光能通过电子传递链的潜在能力。由图5可知,在同一自然条件下,处理组的日均 *ETR* 较 CK 均有显著性增高($P<0.05$)。实际光能转化效率的提高是直接影响光合下游获得足够能量的主要因素。

2.2.3 保水剂与钾肥对 PSⅡ实际光能转换效率 $\Phi_{PS\,II}$ 的日变化 $(F_m'-F_t)/F_m'$为叶绿素光合系统PSⅡ实际光能转换效率,在一天当中选择不同的时间测定特定光环境下的$(F_m'-F_t)/F_m'$绘制成曲线(图6),可以反映 PSⅡ实际光能转换效能的日变化。经测定,$(F_m'-F_t)/F_m'$日变化总体呈现"V"字型,这是由于上文所述 *qP* 和 *NPQ* 的存在所致。在12:00前,两次测定处理组$(F_m'-F_t)/F_m'$均高于CK,9:00C_3组最大增幅39.7%、11:00最大增幅55.1%,整体表现11:00$(F_m'-F_t)/F_m'$值低于9:00$(F_m'-F_t)/F_m'$值,同一时间的$(F_m'-F_t)/F_m'$值顺序为C_3、C_1、C_2。其中,9:00和11:00的C_1、C_3组较CK的增加呈显著相关($P<0.05$),11:00C_1组$(F_m'-F_t)/F_m'$相对CK组的增大,呈极显著性相关($P<0.01$);13:00为$(F_m'-F_t)/F_m'$值最低,C_3组与CK组几乎相等并大于C_1、C_2组,此时C_3较CK增大2.8%;15:00$(F_m'-F_t)/F_m'$值较13:00开始不同程度回升,C_1、C_2、C_3组较CK组分别高出20.7%、7.0%和21.7%,C_1、C_3的增长相对CK组显著($P<0.05$);17:00$(F_m'-F_t)/F_m'$值继续回升至接近9:00大小,$(F_m'-F_t)/F_m'$值较CK均增大,最大增幅C_1达到14.9%,$\Phi_{PS\,II}$值顺序表现为C_1、C_2、C_3、CK,C_1组的增加较CK呈显著相关($P<0.05$)。

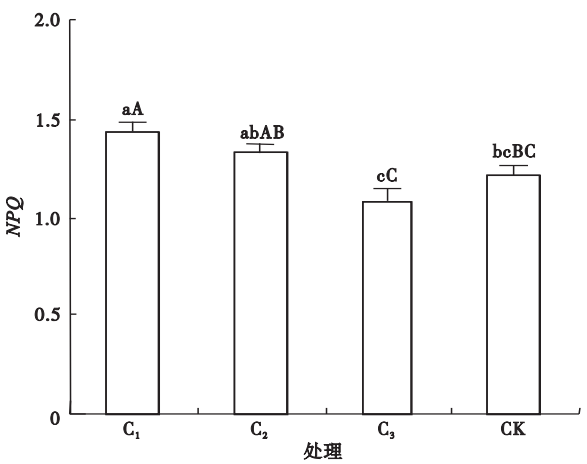


图4 日均 PSⅡ非光化学淬灭

Fig. 4 Daily mean non-photochemical quenching of PSⅡ

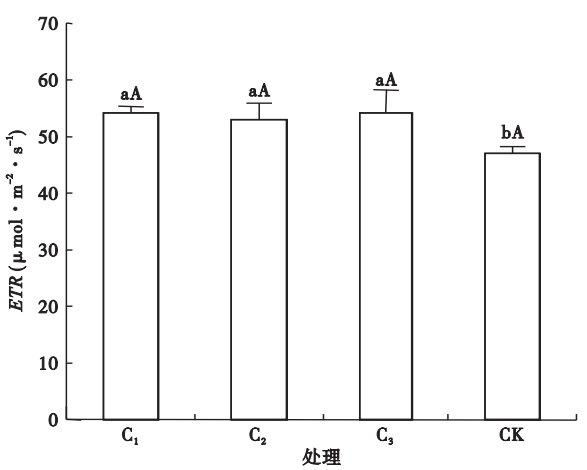


图5 日均相对光合电子传递速率

Fig. 5 Daily mean photosynthetic electron transportation rate

2.2.4 保水剂与钾肥对马铃薯产量指标的影响

保水剂与钾肥对马铃薯的产量指标统计如表2。C_1组单株结薯个数相对C_2、C_3分别增加37.8%和54.0%,与CK相比增加39.0%,并呈显著差异($P<0.05$)。数量商薯率及重量商薯率3个处理都表现为C_3组最大,C_2组次之,C_1组最小。其中,C_1组数量商薯率及重量商薯率分别低于CK组14.5%和7.2%,C_3组数量商薯率及重量商薯率分别增高为26.7%和9.9%,C_2组的重量商薯率较其他两组和

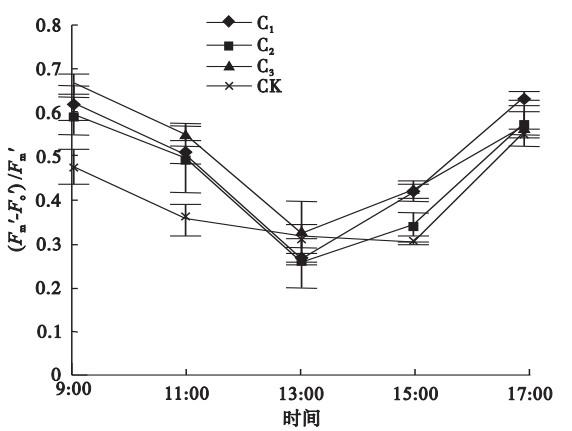


图6 PSⅡ实际的光能转换效率日变化

Fig. 6 Diurnal variation of practical conversion efficiency of light energy

表 2 马铃薯块茎产量指标
Table 2 Yield index of potato tuber

处理	块茎（个）	数量商薯率（%）	重量商薯率（%）	折合产量（t·hm^{-2}）	折合收入（元·hm^{-2}）
C_1	5.7±1.5 aA	29.4±4.2 aA	61.5±4.2 aA	23.2±4.1 aA	11869.5±209.6 aA
C_2	4.3±1.9 bA	38.5±5.6 aA	66.5±7.44 bA	16.9±5.1 bA	8971.1±354.9 bB
C_3	3.7±0.6 bA	43.6±22.3 aA	72.9±17.6 aA	15.4±3.3 bA	8794.5±285.8 bB
CK	4.1±0.1 bA	34.4±6.5 aA	66.3±6.2 aA	15.4±3.0 bA	8436.0±154.1 bB

空白组增加显著($P<0.05$)。小区折合单产结果表明:保水剂配合施用钾肥的 C_1 组最优,块茎产量较 CK 显著($P<0.05$)增产 50.61%,单产商薯收入较 CK 显著($P<0.05$)提高 40.7%。

3 讨 论

3.1 保水剂与钾肥互作显著提高了马铃薯出苗率

光合作用受诸多因素的影响。保水剂和钾肥都有促进土壤团粒结构形成的作用,特别是 0.5 ~ 5 mm 粒径的团粒增加显著,0.5% 的保水剂有助于提高旱地马铃薯的光合作用并提高产量(杨红善等,2005;刘瑞凤等,2006;高天鹏等,2009)。在此基础上,用 C_1、C_2、C_3 三种施用方式重点研究叶绿素荧光动力学参数的日变化与商薯产量的关系,证实了保水剂与钾肥对荧光参数日变化及马铃薯总产量、商薯率的影响。结果同时也显示,保水剂和钾肥联用显著提高了冠幅和茎粗,显著提高出苗率。

3.2 保水剂与钾肥互作显著提高了马铃薯产量

土壤含水量、出苗率及地上生物量等各个测定指标差异表现内在一致性。在出苗率及地上生物量上,保水剂与钾肥互作试验的 C_1 组出苗率与其他组及对照相比,高出约 10%,直接决定了 C_1 组最终的产量优势;CK 组地上各生理指标的提高幅度虽然并不像出苗率那么大,但大的冠幅和较大的茎粗能够增加单株单位时间的有效光合面积,提高无机有机养分的运输,是影响地上生物量和块茎马铃薯产量积累的又一重要因素。这与叶绿素荧光动力学参数变化结果相一致。因此,这些宏观条件都决定了 C_1 组的多项产量指标显著增大的原因。

3.3 保水剂与钾肥互作显著提高了马铃薯光合效率

叶绿素荧光动力学参数日均值可作为反映光合效能高低并可作为马铃薯生理状态反映和产量预测的重要依据之一。从日均 PSⅡ最大及有效光量子产量可知,保水剂和钾肥都能单独发挥作用,而联合施用效果更优;F_v/F_m 和 $(F_m'-F_o')/F_m'$ 结果使叶绿体具备了提升实际光合效能的潜质,是 C_1 组 *ETR* 和 $(F_m'-F_t)/F_m'$ 较对照都显著提高的前提;$(F_m'-F_t)/F_m'$ 日变化总体成“V”型(图 6)。说明保水剂和钾肥对马铃薯荧光参数 $(F_m'-F_t)/F_m'$ 影响的变化主要在 11:00 之前和 15:00 之后,而中午实际光化学量子产量的影响与对照几乎相当,一方面,可能是由于中午光强超过马铃薯自身所能调节的能力之外所致;另一方面,中午光太强,达到光饱和点后,抑制了光合作用(Richard *et al.*, 1988)。郭天才等(2005)、张峰等(2008)研究小麦及幼苗上的荧光参数值的变化趋势与本研究结果一致。保水剂和钾肥提高实际光合效能,使植物能够更多的利用无机物制造养分,是马铃薯块茎产量提高的直接因素,是增产的微观原因。

3.4 保水剂与钾肥互作显著增强了马铃薯抗逆性

qP 和 *NPQ* 表示天线色素捕获的光量子中以光能和热能形式散失的那部分能量。尤其在高光强下,*qP* 和 *NPQ* 是植物自我保护能力的体现,能有效避免过多能量造成自身的氧化损伤(张锋等,2008)。图 3、图 4 显示,C_1 组 *qP* 和 *NPQ* 均不同程度增大且均为最高值,提高了 C_1 组抗胁迫的能力,与李红等(2009)研究所得规律一致。与对照相比,在超出叶片所需最适光强后,由于淬灭能力增大导致 PSⅡ在中午高强光状态下 $(F_m'-F_t)/F_m'$ 随中午临近而减小,过中午后随傍晚临近而增大。因此,*qP* 和 *NPQ* 的提高增强了抗逆性,是光合效能提高的又一原因,与增产结果也相一致。

在产量上,C_1 组结薯个数较多,尽管 C_2、C_3 组数量和重量商薯率相对较 C_1 组高,但仍不能弥补单株结薯个数少、相对产量低的缺陷。所以,最终 C_1 组的亩产最高、经济效益最好,这和数量与重量商薯率不是最高并不矛盾。

总之,保水剂和钾肥施于土壤后,增加了旱地马铃薯出苗率,增强了抗逆性,提高了光合效能,最终达到了增产目的,提高了马铃薯商薯率。

在旱地马铃薯种植中,0.5% 保水剂与 60 $g \cdot m^{-2}$的钾肥联合施用,相对于分别单独施用效果最好。它能够显著提高出苗率,提高抗干旱胁迫能力,有效改善地上植株生理状况,提高旱地马铃薯叶片叶绿素 PSⅡ光合系统的实际光能转化效率,提高光合效能,最终促进马铃薯块茎数量和总产量及经济效益的提高。这一方法可以在干旱半干旱地区的马铃薯生产中应用推广。

参考文献

车永梅, 唐 静, 陈 康, 等. 2009. 一氧化氮对盐胁迫下玉米幼苗叶绿素荧光参数和光合特性的影响. 玉米科学, **17**(3): 91-94.

陈光荣, 高世铭, 张晓艳. 2009. 补水时期和施钾量对陇中半干旱区旱地马铃薯产量和水分利用率的影响. 中国土壤与肥料, (1): 23-26.

杜尧东, 李键陵, 王 华, 等. 2012. 高温胁迫对水稻剑叶光合和叶绿素荧光特征的影响. 生态学杂志, **31**(10): 2541 - 2548.

高天鹏, 王 东, 高海宁, 等. 2009. 保水剂对旱地马铃薯产量及叶片叶绿素荧光动力学参数的影响. 兰州大学学报(自然科学版), **45**(3): 67-72.

郭天才, 方保停, 王晨阳, 等. 2005. 水分调控对小麦旗叶叶绿素荧光动力学参数及其产量的影响. 干旱地区农业研究, **23**(2): 7-12.

李 红, 冯永忠, 杨改河, 等. 2009. 铜胁迫对芥菜光合特性及叶绿素荧光参数的影响. 农业环境科学学报, **28**(8): 1630-1635.

李永秀, 申双和, 李 丽, 等. 2012. 土壤水分对冬小麦生育后期叶片气体交换及叶绿素荧光参数的影响. 生态学杂志, **31**(1): 74-80.

刘殿红, 黄占斌, 蔡连捷, 等. 2008. 保水剂用法和用量对马铃薯产量和效益的影响. 西北农业学报, **17**(1): 266-270.

刘瑞凤, 杨红善, 李 安, 等. 2006. PAM-atta 复合保水剂对土壤物理性质的影响. 土壤通报, **37**(2): 231-237.

刘效瑞, 郸擎东, 刘树雄. 2001. 半干旱地区马铃薯施用钾肥的应用效果试验. 中国马铃薯, **15**(5): 286-287.

孙 艳, 王益权, 仝瑞强. 2009. 土壤紧实胁迫对黄瓜叶片光合作用及叶绿素荧光参数的影响. 植物营养与肥料学报, **15**(3): 638-642.

孙晓娥, 刘兆普, 隆小华. 2012. 不同供镁水平对两菊芋品种幼苗生物量、光合和叶绿素荧光特性的影响. 生态学杂志, **31**(4): 823-829.

汪宝根, 刘永华, 吴晓花. 2009. 干旱胁迫下长豇豆叶绿素荧光参数与品种耐旱性的关系. 浙江农业学报, **21**(3): 246-249.

王 磊, 胡 楠, 张 彤, 等. 2007. 干旱和复水对大豆(*Glycine max*)叶片光合及叶绿素荧光的影响. 生态学报, **27**(9): 3630-3636.

杨红善, 刘瑞凤, 张俊平, 等. 2005. PAAM-atta 复合保水剂对土壤持水性及其物理性能的影响. 水土保持学报, **19**(3): 38-41.

张 锋, 孔祥生, 张妙霞. 2008. 水分胁迫对牡丹光合和荧光特性的影响. 安徽农业科学, **36**(18): 7543-7545.

Belanger G, Walsh JR, Richards JE, *et al*. 2001. Tuber growth and biomass partitioning of two potato cultivars grown under different N fertilization rates with and without irrigation. *American Journal of Potato Research*, **78**: 109-117.

Jeremy H, Bernard G, Neil RB. 1989. Relationship between the quantum efficiencies of photosystems Ⅰ and Ⅱ in pea leaves. *Plant Physiology*, **90**: 1029-1034.

Maxwell K, Johnson GN. 2000. Chlorophyll fluorescence: A practical guide. *Journal of Experimental Botany*, **51**: 659-668.

Qiu ZY, Wang LH, Zhou Q. 2013. Effects of bisphenol A on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in a-bove-ground organs of soybean seedlings. *Chemosphere*, **90**: 1274-1280.

Richard BP, Mirta NS, David AW. 1988. Relationship between steady-state fluorescence yield and photosynthetic efficiency in spinach leaf tissue. *Plant Physiology*, **88**: 158-163.

Samala S, Yan J, Baird WV. 1998. Changes in polar lipid fatty acid composition during cold acclimation in 'Midiron' and 'U3' Bermudagrass. *Crop Science*, **38**: 188-195.

作者简介 高天鹏,男,1964 年生,博士,教授,主要从事环境生物学教学与研究工作。E-mail: zkgtp@163.com

责任编辑 李凤芹