文章编号:1000-7601(2019)03-0041-11 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2019.03.05

灌溉量对马铃薯生理特性及块茎产量品质的影响

闫士朋[1,2], 焦润安[1,2], 张俊莲[1,3], 李 健[4], 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; 4.甘肃条山农业科学研究所, 甘肃 白银 730400)

摘 要:以“大西洋”马铃薯品种为试验材料,在甘肃省中部沿黄高扬程灌区的白银市景泰县条山农场马铃薯种植基地设置小区试验,在各发育阶段分别设置 5 个水分梯度(原灌溉量的 50%、75%、100%、125%和 150%,其中原灌溉量,即 100%灌溉量,为当地常用的、维持试验地 25.8%左右土壤含水率的灌溉量),探讨马铃薯各发育阶段灌溉量对其生理特性及块茎产量、品质的影响。结果表明,在马铃薯的各发育阶段,随着灌溉量的增加马铃薯叶片净光合速率 (P_n)和蒸腾速率(T_r)分别先增加到最大值 30.19 μmol · m^{-2} · s^{-1}、12.50 mmol · m^{-2} · s^{-1},而后减小。当灌溉量为 50%和 150%时叶片 P_n 较 100%灌溉量分别降低 35.06%和 19.59%。在不同发育阶段马铃薯叶片的生理活性对灌溉量表现出敏感响应。幼苗期 75%灌溉量马铃薯叶片叶绿素含量、P_n 和水分利用效率(WUE)分别为 0.86 mg · g^{-1}、21.88 μmol · m^{-2} · s^{-1}、2.29 μmol · mmol^{-1},较 100%灌溉量分别提高了 14.15%、0.31%、3.80%,而 MDA 含量、SOD 活性及 CAT 活性最低,较 100%灌溉量分别降低了 8.40%、11.69%、8.23%;发棵期 100%灌溉量处理下 P_n 和 WUE 最高,较 50%灌溉量处理分别提高了 53.99%、24.85%,此时脯氨酸含量、可溶性糖含量、POD 活性最低,分别为 89.06 μg · g^{-1}、143.45 μmol · g^{-1}、438.14 U · g^{-1},同时超氧阴离子产生速率较 50%灌溉量也降低了 26.07%;结薯期 125%灌溉量处理的 P_n 和 WUE 最高,较 100%灌溉量分别提高了 19.16%、6.76%,而 SOD、POD 活性较 100%灌溉量分别降低了 0.93%、6.23%;成熟期 75%灌溉量马铃薯叶片 P_n 最高,较其余各灌溉量处理的 P_n 分别提高了 38.64%、13.81%、14.16%、21.27%,而 MDA 含量、超氧阴离子产生速率分别为 21.107 μmol · g^{-1}、6.07 nmol · min^{-1} · g^{-1},较 100%灌溉量分别降低了 19.35%、2.26%。同一生育期低灌溉量(50%灌溉量)块茎中淀粉含量较低。在幼苗期 75%灌溉量处理使得块茎的可溶性蛋白含量较 100%灌溉量处理提高 6.20%。发棵期 100%灌溉量块茎中淀粉含量达到最高(15.14%),而结薯期 125%灌溉量处理的块茎可溶性蛋白含量处于最高水平,较 100%灌溉量下提高 4.61%。成熟期 75%灌溉量块茎淀粉含量处于最高水平,较 100%灌溉量提高 12.77%。结合块茎的总鲜重、商品薯率、淀粉含量、维生素 C 含量、可溶性蛋白含量、还原糖含量等指标,可知在幼苗期、发棵期、结薯期、成熟期灌溉量分别为原灌溉量的 75%、100%、125%、75%时马铃薯块茎品质最优而且产量最高,分别为 654.30、650.60、773.00、703.53 g · 株$^{-1}$。

关键词:马铃薯;灌溉量;发育时期;生理特性;块茎产量;块茎品质

中图分类号:S532;S274.1 **文献标志码**:A

Influence of irrigation amount on potato physiological characteristics and tuber yield and quality

YAN Shi-peng[1,2], JIAO Run-an[1,2], ZHANG Jun-lian[1,3], LI Jian[4], LI Chao-zhou[1,2]

(1.*College of Life Science and Technology*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
2.*Gansu Key Laboratory of Crop Genetics & Germplasm Enhancement*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
3.*College of Horticulture*, *Gansu Agricultural University*, *Lanzhou*, *Gansu* 730070, *China*;
4.*Gansu Tiaoshan Institute of Agricultural and Forestry Sciences*, *Baiyin*, *Gansu* 730400, *China*)

Abstract: A plot experiment was carried out in the potato planting base of Tiaoshan farm, Jingtai county, the high-lift irrigation area along the Yellow River in central Gansu Province. “Atlantic” variety of potato was used as

收稿日期:2018-04-08 **修回日期**:2019-04-23
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(1604NKCAa052-3)
作者简介:闫士朋(1989-),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为植物逆境生理。E-mail:976626844@qq.com
通信作者:李朝周(1963-),男,山东苍山人,教授,主要从事植物逆境生理研究。E-mail: Licz@gsau.edu.cn

the test material. Five different irrigation amount were set up at each potato development stage (50%, 75%, 100%, 125% and 150% of the original irrigation amount. The original irrigation amount (100%) is the irrigation amount commonly used locally to maintain the soil moisture content of 25.8% in the test site). The effects of different irrigation amount on physiological mechanism, potato tubers yield and quality at different developmental stages were studied. The results showed that with the increase of irrigation amount, the net photosynthetic rate (P_n) and transpiration rate (T_r) of potato leaves increased to the maximum value of 30.19 μmol · m^{-2} · s^{-1} and 12.50 mmol · m^{-2} · s^{-1}, respectively, and then decreased. When the irrigation amount was 50% and 150%, the P_n of potato leaves decreased by 35.06% and 19.59%, respectively, compared with the 100% irrigation amount treatment. The activities of potato leaves at different developmental stages were sensitive to the irrigation amount.In seedling stage, when the irrigation amount was 75%, the chlorophyll content, P_n and *WUE* of potato leaves were 0.86 mg · g^{-1}, 21.88 μmol · m^{-2} · s^{-1} and 2.29 μmol · $mmol^{-1}$, and compared with 100% irrigation amount, it increased by 14.15%, 0.31% and 3.80%, respectively, while the MDA content, the activities of SOD and CAT were the lowest, compared with 100% irrigation amount, it decreased by 8.40%, 11.69% and 8.23%, respectively. In tillering stage, when the irrigation amount was 100%, P_n and *WUE* were the highest, compared with 50% irrigation amount, the improvement was 53.99% and 24.85%, respectively, while the proline content, soluble sugar content and POD activitiy were the lowest, were 89.06 μg · g^{-1}, 143.45 μmol · g^{-1} and 438.14 U · g^{-1}, respectively. Meanwhile, the superoxide anion generation rate also decreased by 26.07% compared with 50% irrigation amount. In tuber period, when the irrigation amount was 125%, the P_n and *WUE* were the highest, compared with 100% irrigation amount, it increased by 19.16%, 6.76%, respectively, and the activities of SOD and POD decreased by 0.93% and 6.23%, respectively. In maturity stage, when the irrigation amount was 75%, P_n was the highest, compared with the other irrigation amount, P_n of the potato leaves increased by 38.64%, 13.81%, 14.16% and 21.27%, respectively, while the MDA content and superoxide anion generation rate were 21.107 μmol · g^{-1} and 6.07 nmol · min^{-1} · g^{-1}, respectively, compared with 100% irrigation, 19.35% and 2.26% were decreased respectively. The starch content in tubers with low irrigation amount (50%) was lower in the same growth stage. The soluble protein content of tubers treated with 75% irrigation amount at the seedling stage was significantly increased by 6.2% compared with the 100% irrigation amount treatment. The starch content in tubers with 100% irrigation amount was the highest (15.14%) at tillering stage, while the soluble protein content in tubers was at the highest level under 125% irrigation amount, 4.61% higher than the 100% irrigation amount treatment. At maturity stage, the starch content of tuber was at the highest level with 75% irrigation amount, which was significantly increased by 12.77% compared with that 100% irrigation amount treatment. In terms of the overall consideration of the total fresh weight, marketing tuber rate, starch content, vitamin C content, soluble protein content and reducing sugar content of tubers, 75%, 100%, 125% and 75% of the original irrigation amount showed the highest yield and best quality of the potato tubers under seedling stage, tillering stage, tuber period and maturity stage, respectively, which were 654.30, 650.60, 773.00, 703.53 g per plant.

Keywords: potato; irrigation amount; development stage; physiological characteristics; tuber yield; tuber quality

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)适应能力强、产量高,是全球第三大重要粮食作物,2014 年我国马铃薯种植面积 565 万 hm^2,产量达 9 552 万 t,均居世界首位[1-2]。中国大部分的马铃薯种植区分布在干旱、半干旱地区,这些种植区是优质马铃薯产区[3]。尽管马铃薯是一个相对耐旱的作物,但我国西北地区马铃薯的种植仍会面临干旱问题。马铃薯生长对土壤水分变化十分敏感[4]。水分胁迫不仅会影响马铃薯生长发育,还会进一步影响马铃薯的产量和品质。因此,在我国西北地区马铃薯抗旱节水栽培已成为研究方向之一。

目前,关于植物的光合参数、抗逆性及产量品质对水分胁迫的响应前人已经做了大量工作。张红萍等[5]研究表明,水分胁迫对豌豆叶片叶绿素含

量的影响显著。赵湘江等[6]研究发现随着土壤含水量由高到低,清香木叶片的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)均为先增大后减小的趋势,土壤水分含量过高和极度干旱时非气孔因素导致清香木叶片光合作用降低。卢福顺[7]通过盆栽方式研究不同时期水分胁迫对马铃薯各项生理指标的影响,发现不同时期水分胁迫下,马铃薯叶片生理指标中的脯氨酸、可溶性糖、丙二醛含量呈现上升趋势;且不同胁迫时期下,各个生理指标的变化幅度不同,生理指标的变化存在生育期间的显著差异。朱俊岭等[8]研究表明随着生育期的推进,不同水分处理下油莎豆叶片的超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化物酶(POD)活性都呈现先增加后降低的趋势;收获后品质指标也表现出随灌溉量的增加先升高后降低的趋势。颜淑云等[9]研究发现随着干旱胁迫程度的加剧,紫穗槐幼苗的 SOD 活性、POD 活性、可溶性糖和游离脯氨酸含量显著上升,反映出幼苗对干旱环境的适应性变化,是其抵御逆境的一种积极调节机制。高桐梅等[10]研究表明芝麻苗期受到水分胁迫导致保护酶活性下降,其中干旱胁迫下 SOD 和过氧化氢酶(CAT)活性降到最低值后,随水分胁迫时间的延长,与正常供水处理差异逐渐减小;而涝害胁迫下,保护酶活性则呈逐渐下降趋势。马铃薯产量和营养品质对水分胁迫的响应及其抗性生理有大量的研究,但对于大田条件下不同时期灌溉水平对马铃薯主要抗性生理指标及产量和营养品质影响的综合性评价却少有报道。

本研究在探讨各生育期内不同灌水条件对马铃薯叶片生理指标及产量影响的同时,进一步研究了灌溉量对马铃薯块茎品质的影响,深入了解马铃薯对干旱响应的生理机制,为甘肃省中部沿黄灌区马铃薯的高效节水生产提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试马铃薯品种为大西洋(由甘肃省景泰县条山农场提供)。

1.2　试验地概况

试验在甘肃省中部沿黄灌区的白银市景泰县条山农场马铃薯种植基地(37°12′N,104°02′E)进行,基地海拔 1 675 m,属温带大陆性干旱气候,年均降水量为 193.72 mm,年平均日照时数 2 713 h,日照百分率 62%,采用地膜覆盖智能滴灌的栽培方式自动化控制土壤水分状况。试验地土壤类型属于灰钙土质,质地属于砂壤土,其基本理化性质为:土壤有机质含量 9.1 g · kg^{-1}、全氮 0.54 g · kg^{-1}、碱解氮 17.6 mg · kg^{-1}、速效磷 32.6 mg · kg^{-1}、速效钾 272.0 mg · kg^{-1}、pH 8.56。

1.3　试验设计

于 2017 年 4 月 15 日种植种薯,采用垄播方式,设 30 垄,进行插牌标识,每垄种 2 行马铃薯,垄宽 50 cm,垄高 25 cm,垄距 30 cm,试验小区面积 24 m× 15 m,试验田总占地面积 1 100 m^2。通过智能滴灌设施,本着节水增产的原则,参照该试验地以往灌溉实践经验,以土壤含水率控制在 15.8%左右的灌溉量作为原灌溉量(即各生育期的 100%灌溉量),其它灌溉量(原灌溉量的 50%、75%、125% 和 150%)参照该灌溉量调节,因 100%灌水为大田常规灌溉量,是否为足量灌水有待试验进行验证,故在试验设计中设置了 125%和 150%的处理;将保护行(垄)的土壤含水率也控制在 15.8%左右。具体试验设计和布置如图 1 所示:

第 1~2 垄、第 8~9 垄、第 15~16 垄、第 22~23 垄、第 29~30 垄为保护行;

第 3~7 垄:在幼苗期(播种后 30~45 d)分别按原灌溉量的 50%、75%、100%、125%和 150%进行灌溉,其它发育阶段皆按原灌溉量的 100%进行;

第 10~14 垄:在发棵期(播种后 46~66 d)分别按原灌溉量的 50%、75%、100%、125%和 150%进行灌溉,其它发育阶段皆按原灌溉量的 100%进行;

第 17~21 垄:在结薯期(播种后 67~80 d)分别按原灌溉量的 50%、75%、100%、125%和 150%进行灌溉,其它发育阶段皆按原灌溉量的 100%进行;

第 24~28 垄:在成熟期(播种后 81~95 d)分别按原灌溉量的 50%、75%、100%、125%和 150%进行灌溉,其它发育阶段皆按原灌溉量的 100%进行。

1.4　测定项目及方法

取材:幼苗期选取区组 1 第 3~7 垄、区组 2 第 10~14 垄、区组 3 第 17~21 垄马铃薯植株,于种植后第 43 d 取叶片;发棵期选取区组 1 第 10~14 垄、区组 2 第 17~21 垄、区组 3 第 24~28 垄植株,于种植后第 63 d 取叶片;结薯期选取区组 1 第 17~21 垄、区组 2 第 24~28 垄、区组 3 第 3~7 垄植株,于种植后第 78 d 取叶片;成熟期选取区组 1 第 24~28 垄、

<table>
<tr><td>垄数
Ridge number</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td></tr>
<tr><td>区组 1
Group 1</td><td></td><td></td><td colspan="5">幼苗期灌水
Irrigation amount
in seedling stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">发棵期灌水
Irrigation amount
in tillering stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">结薯期灌水
Irrigation amount
in tuber period</td><td></td><td></td><td colspan="5">成熟期灌水
Irrigation amount
in maturity stage</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>区组 2
Group 2</td><td></td><td></td><td colspan="5">成熟期灌水
Irrigation amount
in maturity stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">幼苗期灌水
Irrigation amount
in seedling stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">发棵期灌水
Irrigation amount
in tillering stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">结薯期灌水
Irrigation amount
in tuber period</td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>区组 3
Group 3</td><td></td><td></td><td colspan="5">结薯期灌水
Irrigation amount
in tuber period</td><td></td><td></td><td colspan="5">成熟期灌水
Irrigation amount
in maturity stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">幼苗期灌水
Irrigation amount
in seedling stage</td><td></td><td></td><td colspan="5">发棵期灌水
Irrigation amount
in tillering stage</td><td></td><td></td></tr>
</table>

图 1 试验布置图

Fig.1 Arrangement diagram of experiment

区组 2 第 3~7 垄、区组 3 第 10~14 垄植株,于种植后第 93 d 取叶片。各材料均取自马铃薯植株基部第 3~4 片复叶,测定新鲜叶片的各项指标。

1.4.1 叶片光合参数测定 叶片光合色素含量采用乙醇提取法[10];气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)、净光合速率(P_n)指标利用便携式光合测定系统(LI-6400,LI-Cor, USA),在上午 10∶30-11∶30 测定,使用内置光源,测定时光强控制在 800 μmol·m^{-2}·s^{-1},温度控制在(25±1)℃,相对湿度为 60%。计算叶片水分利用效率($WUE=P_n/T_r$)。

1.4.2 抗性生理指标测定 相对电导率参照邹琦[11]的方法用电导率仪测定;超氧阴离子自由基(O_2^-)产生速率测定方法采用羟胺氧化法[12];丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法[13];脯氨酸含量测定采用茚三酮显色法[11];可溶性糖含量测定采用蒽酮显色法[11];可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定[11];超氧化物歧化(SOD)活性使用分光光度法[13-14]测定;POD 活性采用 Shi 等[15]的方法测定;CAT 活性采用 Abassi 等[16]的方法测定。

1.4.3 块茎单株产量(鲜重)及块茎品质的测定 (1)单株产量的测定:收获时每垄选取 6 株大小一致的植株,用电子天平称取每株的薯重,分别统计总薯块的重量、个数、商品薯(≥75 g)的个数和总重,取 6 株植株各指标的平均值作为单株的产量指标,其中,成薯率=单株薯块数/匍匐茎数。(2)块茎品质的测定:淀粉含量采用碘比色法[17];还原糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸比色法[18];维生素 C 含量采用碘化钾萃取分光光度法[19];可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法[11]。

1.5 数据及统计分析

本文采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行处理分析并绘图,采用 SPSS 17.0 统计分析软件对数据进行差异显著性检验(取 $P<0.05$ 为差异显著水平)。

2 结果与分析

2.1 灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片光合特性的影响

2.1.1 发育阶段及灌溉量对马铃薯叶片光合色素含量的影响 由表 1 可知,幼苗期 75%灌溉量处理的叶绿素 a 含量和 100%、125%灌溉量无显著差异,均显著高于 50%灌溉量;叶绿素 b 含量在各灌溉量间未表现出显著差异;75%灌溉量的总叶绿素含量、类胡萝卜素含量均显著高于其余各灌水处理,Chla/Chlb 与 100%、150%灌溉量间无显著差异且显著高于 50%处理。发棵期的叶绿素 a 含量在各灌溉量间未表现出显著差异;叶绿素 b 含量和总叶绿素含量均表现为 50%灌溉量显著高于 125%灌溉量,100%灌溉量与其余各处理间未表现出显著差异;类胡萝卜素含量表现为 100%灌溉量显著高于 125%处理,与 50%、75%和 150%无显著差异;Chla/Chlb 表现为 75%灌溉量显著高于 50%和 150%,75%、100%和 125%灌溉量间无显著差异。在结薯期时叶绿素 a 和总叶绿素含量以 125%灌溉量最高,且显著高于 50%灌溉量,与 75%、100%和 150%灌溉量无显著差异;叶绿素 b 以 125%灌溉量为最高,且显著高于 50%和 100%灌溉量;类胡萝卜素含量在各灌溉量间未表现出显著差异,Chla/Chlb 以 125%灌溉量为最高,且显著高于其它灌溉量。在成熟期时的叶绿素 a 含量和 Chla/Chlb 在各灌溉量间未表现出显著差异;叶绿素 b 以 75%灌溉量为最高,且显著高于 150%,与 50%、100%和 125%灌溉量无显著差异;总叶绿素含量和类胡萝卜素含量均以 75%的灌溉量为最高,均显著高于 100%灌溉量。

表1 发育阶段及灌溉量对马铃薯叶片光合色素含量的影响

Table 1 Effects of development stage and irrigation on photosynthetic pigment content in potato leaves

生育时期 Growth stage	灌溉量/% Irrigation amount	叶绿素a含量 Chl. a/(mg·g^{-1})	叶绿素b含量 Chl. b/(mg·g^{-1})	Chl. a/Chl. b	类胡萝卜素 Carotenoids/(mg·g^{-1})	叶绿素总量 Chlorophyll/(mg·g^{-1})
幼苗期 Seedling stage	50	0.635±0.037c	0.425±0.076a	1.527±0.359c	0.121±0.011d	1.060±0.038c
	75	0.863±0.056b	0.385±0.086a	2.284±0.365b	0.326±0.011a	1.337±0.014b
	100	0.756±0.033b	0.292±0.019a	2.591±0.056ab	0.193±0.019c	1.048±0.052c
	125	0.866±0.004b	0.290±0.002a	2.987±0.011a	0.226±0.00d	1.156±0.007c
	150	1.154±0.063a	0.401±0.019a	2.88±0.024ab	0.321±0.012a	1.554±0.082a
发棵期 Tillering stage	50	1.175±0.090a	0.369±0.046a	3.195±0.169b	0.315±0.012ab	1.544±0.136a
	75	1.096±0.238a	0.276±0.059ab	4.010±0.581a	0.297±0.079ab	1.372±0.284ab
	100	1.186±0.157a	0.316±0.066ab	3.802±0.372ab	0.387±0.045a	1.501±0.219ab
	125	0.885±0.152a	0.252±0.036b	3.508±0.169ab	0.251±0.048b	1.137±0.187b
	150	1.079±0.067a	0.349±0.058ab	3.132±0.361b	0.313±0.019ab	1.428±0.126ab
结薯期 Tuber period	50	0.234±0.104b	0.073±0.029b	3.687±0.019b	0.112±0.032a	0.307±0.133b
	75	0.601±0.275ab	0.156±0.073ab	3.855±0.029b	0.272±0.286a	0.757±0.348ab
	100	0.498±0.101ab	0.091±0.031b	3.198±0.141b	0.188±0.020a	0.589±0.132ab
	125	1.028±0.231a	0.279±0.064a	5.636±0.813a	0.33±0.039a	1.306±0.295a
	150	0.542±0.327ab	0.157±0.074ab	3.344±0.518b	0.154±0.148a	0.699±0.401ab
成熟期 Maturity stage	50	0.905±0.44a	0.305±0.182ab	3.087±0.397a	0.190±0.063ab	1.210±0.622a
	75	1.164±0.389a	0.451±0.061a	2.548±0.519a	0.246±0.069a	1.615±0.450a
	100	0.644±0.011a	0.319±0.044ab	2.809±0.032a	0.149±0.011b	0.873±0.017b
	125	0.838±0.136a	0.304±0.004ab	2.641±0.404a	0.208±0.032ab	1.157±0.160ab
	150	0.936±0.095a	0.229±0.006b	3.079±0.269a	0.196±0.005ab	1.240±0.100ab

注:数值为平均值±标准误,不同小写字母表示同一生育时期不同灌溉量各生理指标间差异显著(P<0.05),下同。

Note: The value is mean ± standard error, different lowercase letters indicate significant difference of the indexes among diffrent irrigation amount in the same development stage (P<0.05), the same below.

2.1.2 *灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片光合参数的影响* 从图2(A)可知灌溉量对马铃薯叶片蒸腾速率(T_r)的影响有差异,在幼苗期和发棵期,正常灌水(100%灌溉量)T_r 最高,50%灌水处理最低,分别比正常灌水降低了27.14%、27.79%;结薯期除150%灌水处理外,其它各处理的 T_r 随着灌溉量的增加而升高,125%灌水比正常灌水处理高出11.69%,50%灌水比正常灌水处理降低了15.17%,差异显著;到成熟期 T_r 开始下降,75%灌水处理显著高于其它处理,比50%灌水处理高出了31.95%。

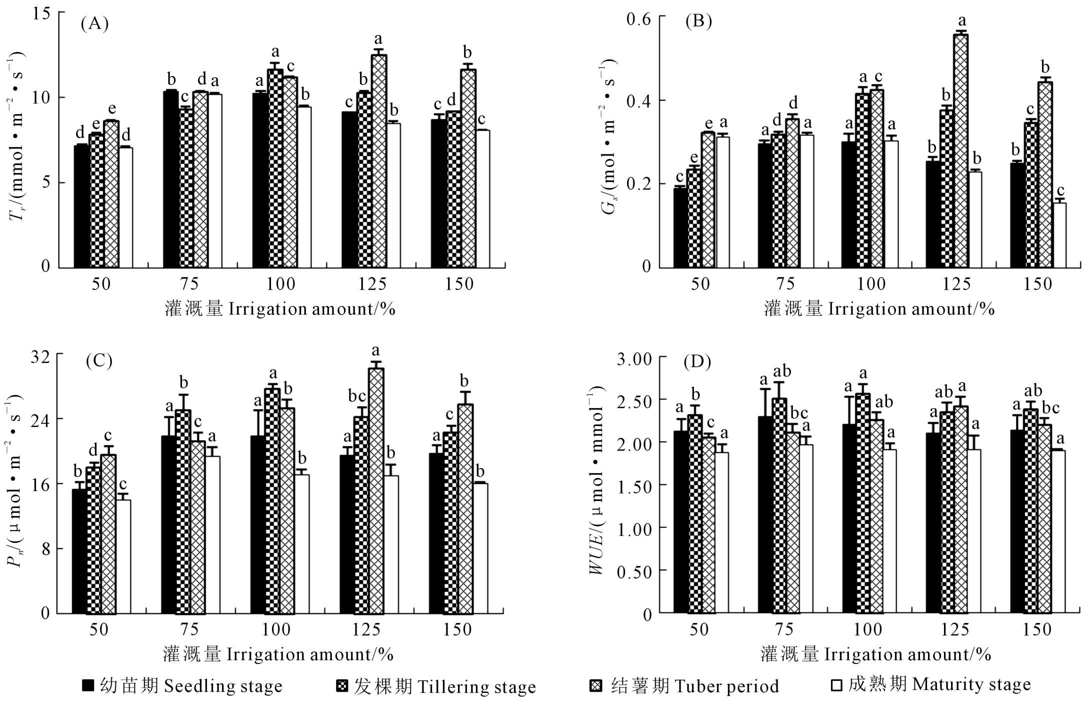
幼苗期75%和100%灌溉量处理之间气孔导度(G_s)无显著性差异,皆显著高于其它处理,正常灌水比50%灌水处理高出58.42%;发棵期各灌溉量处理间 G_s 差异显著,50%灌水处理比正常灌水下降了43.65%;结薯期125%灌水处理 G_s 最大,比正常灌水和50%灌水分别提高了14.45%、72.21%,各灌水处理之间差异显著;与结薯期相比,到成熟期 G_s 整体呈现下降趋势,75%灌水和正常灌水无显著差异(图2(B))。

由图2(C)可知,幼苗期50%灌溉量的叶片净光合速率(P_n)显著低于其它各处理,75%、100%、125%和150%灌溉量的叶片 P_n 之间无显著差异;发棵期叶片 P_n 以50%灌溉量最低,以100%灌溉量为最高,且显著高于其它各处理,比50%灌溉量高53.99%;结薯期叶片 P_n 以125%灌溉量为最高,比50%灌溉量高54.35%,且结薯期125%灌溉量的叶片 P_n 在整个生育期各灌溉量的叶片 P_n 中最高;成熟期 P_n 以75%灌溉量为最高,100%、125%和150%灌溉量的叶片 P_n 之间无显著差异,且该时期 P_n 低于其它各时期,说明光合能力在成熟期下降。

幼苗期和成熟期时不同灌水处理水分利用效率一表现略有不同,但差异不显著;发棵期75%灌溉量比50%灌溉量的水分利用效率提高8.4%,与正常灌水相比有一定的节水效果;结薯期灌水125%时水分利用效率比正常灌水提高了6.8%,显著高于其它灌溉量处理(图2(D))。

2.2 灌溉量对不同发育阶段马铃薯抗性生理指标的影响

2.2.1 *灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片丙二醛含量和相对电导率的影响* 由图3(A)可知幼苗期MDA含量以75%灌溉量处理较低;发棵期正常灌水与125%灌水处理MDA含量差异不显著,但显著低于50%、75%、150%灌溉量MDA含量;结薯期125%灌溉量MDA含量显著低于其它灌溉量;成熟期75%灌溉量的MDA含量较50%灌溉量稍有降低,但差异不显著,二者显著低于其它处理。



注:不同小写字母表示同一生育时期不同灌溉量各生理指标间差异显著(P<0.05),下同。

Notes: Different lowercase letters mean significant difference of the physiological indexes among different irrigation amounts in the same growth stage (P<0.05) level, the same below.

图2 灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片光合参数的影响

Fig.2 Effects of irrigation amount on photosynthetic parameters of potato leaves at different growth stages

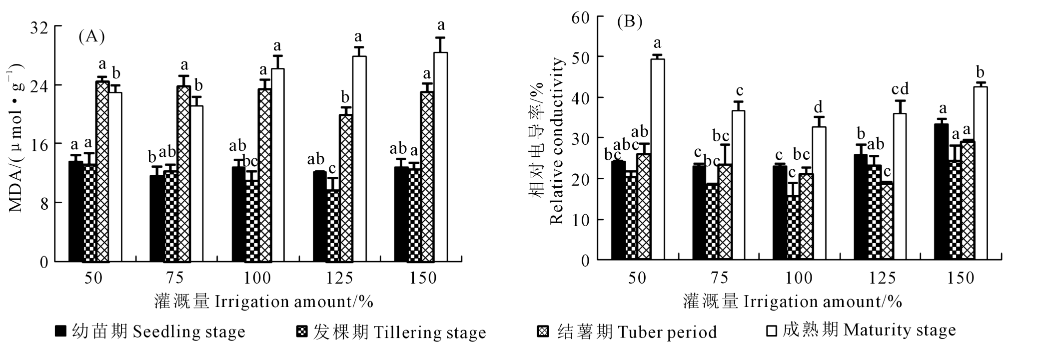


图3 灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片丙二醛含量和相对电导率的影响

Fig.3 Effects of irrigation amount on MDA content and relative conductivity of potato leaves at different growth stages

如图3(B)所示,不同灌水条件下,随着生育时期的推进,马铃薯叶片相对电导率呈现先降后升趋势,苗期时相对电导率相对较大,苗期至结薯期,150%灌溉量的相对电导率值最大,到成熟期,该处理相对电导率较50%灌溉量降低了13.75%,但仍然高于其它灌水处理。在马铃薯的整个生育时期中,75%灌溉量和125%灌溉量的相对电导率与正常供水处理始终最为接近。成熟期时,75%和125%灌溉量的相对电导率较正常灌水分别只高出12.41%、10.55%,而50%和150%灌溉量的相对电导率急剧增大,较正常灌水分别高出了50.99%、30.23%,可能是活性氧自由基积累过多引起膜脂过氧化,破坏了细胞膜的通透性。

2.2.2 灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片渗透调节物质含量的影响 由图4(A)可见,苗期各处理间脯氨酸含量无显著差异;随生育时期的推进,到发棵期时叶片中脯氨酸含量在各灌水条件下变化较平缓;结薯期各灌溉量下的脯氨酸含量迅速上升,50%灌溉量上升速率最高;成熟期时,50%、75%、125%、150%灌溉量条件下马铃薯脯氨酸含量较对照分别显著增加45.85%、40.03%、47.99%、70.41%。

由图4(B)看出,随着灌溉量的变化,在幼苗期和结薯期叶片可溶性糖含量均呈逐渐降低趋势,50%灌溉量的可溶性糖含量最高,分别比100%灌溉量升高31.13%、25.70%;发棵期表现为升高趋势,

50%灌溉量较 100%灌溉量降低了 20.31%;成熟期时随着灌溉量的变化可溶性糖含量表现为先降后升,50%和 100%灌溉量分别比 100%灌溉量升高 30.96%、42.35%。可见不同时期同一灌溉量下叶片的可溶性糖累积能力不同,且成熟期随灌溉量的变化反应最为敏感。

图 4(C)表明马铃薯叶片的可溶性蛋白质含量在幼苗期随灌溉量的变化呈现降低的趋势,50%灌溉量比 100%灌溉量增加了 31.31%;发棵期时各灌溉量间的可溶性蛋白含量无显著差异;结薯期可溶性蛋白含量表现为先升后降,50%灌溉量处理可能是灌溉量过低,已超过马铃薯的耐受极限, 蛋白酶活性迅速提高, 加快了蛋白质水解;在 150%灌溉量时,水分胁迫使 RNA 转录和翻译受到抑制, 造成蛋白质的合成量减少;成熟期随着灌溉量升高,可溶性蛋白的含量增加。轻度胁迫下的土壤环境相对较适合植株生长,中度胁迫次之。

2.2.3　灌溉量对不同生育阶段马铃薯叶片抗氧化酶活性和超氧阴离子产生速率的影响　随着生育期的推进,马铃薯叶片 SOD、POD 和 CAT 活性均表现为先升后降趋势,SOD、POD 活性于结薯期迅速增加至最大值,而 CAT 活性在发棵期达峰值;生育后期,缺水或水分供应过多都影响酶的活性,使其清除过氧化物的能力减弱(图 5)。

图 5(A)显示,在幼苗期,50%和 150%灌溉量马铃薯 SOD 活性值均处于较高水平,较 100%灌溉量分别显著提高 35.96%、17.86%,而 75%灌溉量的 SOD 活性值最低,较 100%灌溉量显著降低 11.69%,125%与 100%灌溉量无显著差异;到发棵期时 100%灌溉量 SOD 活性值最低,其它灌溉量之间 SOD 活性值无显著差异;结薯期 50%灌溉量造成干旱胁迫,导致其 SOD 活性值升高,150%、125%灌溉量与 100%灌溉量无显著差异,可能结薯期是需水高峰期;成熟期时各灌溉量处理 SOD 活性均下降,其中 50%灌溉量的降低值最大,降低了 31.90%,在生育期内,灌溉量对其影响较小,可能是植株的逐渐衰老,植物体内产生了过多的活性氧,代谢失调。

由图 5(B)可知,幼苗期 75%灌溉量的 POD 活性值最低,随着灌水减少和增加,POD 活性值逐渐增大,以清除产生的大量过氧化物;在发棵期 100%灌溉量 POD 活性值最低,其它处理间相差不多,但随着增加和减少灌溉量,POD 活性略呈升高趋势;结薯期时 125%灌溉量的 POD 活性值最低,较 50%和 150%灌溉量,分别降低了 24.44%、20.46%;成熟期 75%灌溉量的 POD 活性值显著高于 50%和 150%灌溉量,且与其它处理无显著差异,可见不同生育期马铃薯的水分状况不同,POD 活性也不同。

由图 5(C)可知,幼苗期,50%和 150%灌溉量的植株叶片 CAT 活性值较大,75%灌溉量的活性值最低;发棵期,100%灌溉量处理 CAT 活性值最低,75%灌溉量和 125%灌溉量处理 CAT 活性值较高,150%和 50%灌溉量的 CAT 活性值最高;结薯期,125%灌溉量叶片的 CAT 活性值最低,比对照和 50%灌溉量处理分别降低了 1.4%、10.52%;成熟期时 50%和 150%灌溉量处理的 CAT 活性值显著低于其它处理。

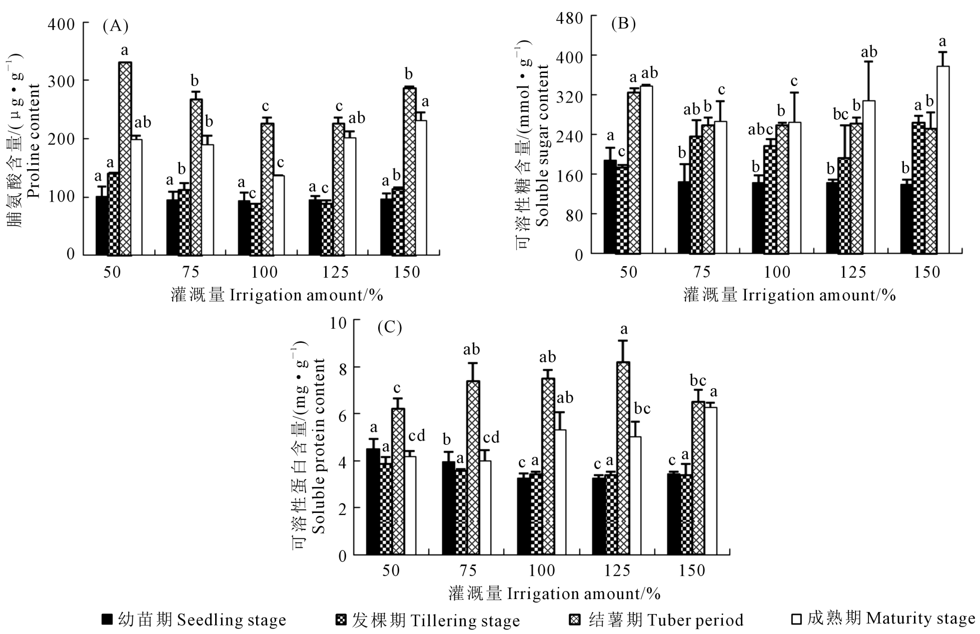


图 4　灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片渗透调节物质含量的影响

Fig.4　Effects of irrigation amount on osmotic regulation substance content of potato leaves at different growth stages

由图 5(D)可知,在幼苗期和发棵期,叶片 O_2^{-} 产生速率随着灌溉量的增加呈现先降后升的变化,且均为 50%灌溉量的产生速率最快,分别比对照提高了 34.85%、31.41%;结薯期灌溉量的变化对 O_2^{-} 产生速率的影响不明显;成熟期时 150%灌溉量的 O_2^{-} 产生速率最快,显著高于其它处理。

2.3 发育阶段及灌溉量对马铃薯块茎产量及品质的影响

2.3.1 发育阶段及灌溉量对马铃薯块茎产量指标的影响 发育阶段及灌溉量对马铃薯单株块茎指标变化如表 2 所示,幼苗期块茎的总鲜重、商品薯重、商品薯率及成薯率指标以 75%灌溉量最优;发棵

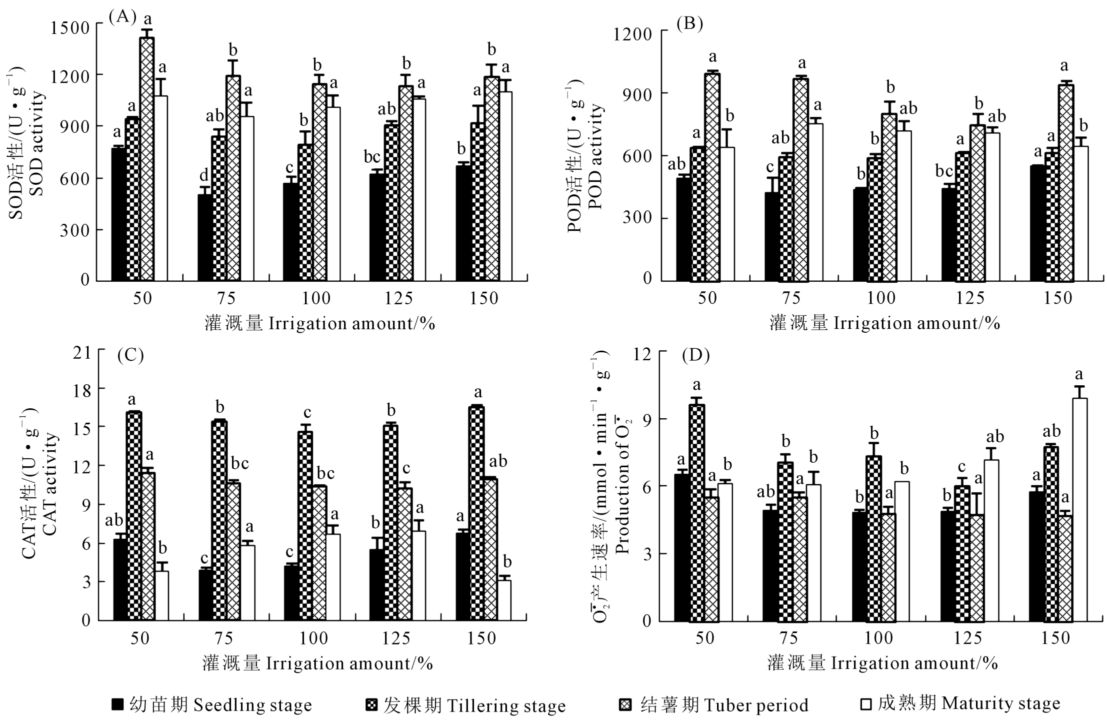


图 5 灌溉量对不同发育阶段马铃薯叶片抗氧化酶活性和超氧阴离子产生速率的影响

Fig.5 Effects of irrigation amount on antioxidant enzyme activity and superoxide anion production rate of potato leaves at different growth stages

表 2 发育阶段及灌溉量对马铃薯单株产量指标的影响

Table 2 Yield indexes of single potato tuber under different irrigation amount at different growth stages

生育时期 Growth stage	灌溉量 Irrigation amount /%	块茎总鲜重 Tuber yield /g	商品薯重 Commodity potato weight /g	商品薯数 Number of commodity potato	平均商品薯块重 Average product potato weight /g	商品薯率 Marketing tuber rate /%	匍匐茎数 Stolon number	总薯块数 Total potato blocks	成薯率 Ripe potato /%
幼苗期 Seedling stage	50	602.60bc	520.99a	3.33a	156.31ab	86.46a	10.67c	5.33c	50.00c
	75	654.30a	569.63a	4.00a	142.41b	87.06a	11.67a	6.67a	57.15a
	100	637.63ab	547.40a	3.00a	182.47a	85.85ab	11.33ab	6.00abc	52.94b
	125	590.53bc	490.53a	3.33a	147.17b	83.07b	12.00a	6.33ab	52.78b
	150	536.37c	437.91a	3.67a	119.42c	81.64b	11.33ab	5.67bc	50.00c
发棵期 Tillering stage	50	565.27b	454.83bc	3.00b	151.61ab	80.46c	12.67a	5.33c	42.10bc
	75	611.17a	494.30b	3.33ab	148.30b	80.88bc	12.67a	6.33b	50.00a
	100	650.60a	551.40a	3.67a	150.37ab	84.75a	13.33a	7.00a	52.50a
	125	544.70b	446.36c	2.67bc	167.36a	81.95b	12.67a	5.67c	44.74b
	150	494.83c	392.54d	2.33c	168.25a	79.33c	11.00b	4.33d	39.39c
结薯期 Tuber period	50	574.30d	485.60d	4.00a	121.40c	84.56c	12.33a	6.00cd	48.65c
	75	604.33cd	514.61c	3.00b	171.54a	85.15bc	10.33b	5.33d	51.61bc
	100	639.63bc	551.46b	3.67b	150.38b	86.21b	11.67a	6.33bc	54.29b
	125	773.00a	684.11a	4.00a	171.03a	88.50a	12.00a	7.33a	61.11a
	150	675.20b	588.60d	4.00a	147.15b	87.17ab	12.33a	7.00ab	56.76b
成熟期 Maturity stage	50	658.83b	554.88b	3.00ab	184.96a	84.22b	12.00ab	6.00b	50.00a
	75	703.53a	601.22a	3.33a	180.38a	85.46a	12.67a	7.00a	55.26a
	100	652.27bc	543.77bc	3.00ab	181.26a	83.37b	12.00ab	6.33ab	52.78a
	125	621.57c	507.55c	2.67b	190.31a	81.66c	11.67b	5.67b	48.57ab
	150	563.87d	455.71d	2.67b	170.87b	80.82d	10.33c	4.67c	45.16b

期块茎的总鲜重、商品薯重、商品薯率及匍匐茎数指标为 100%灌溉量最优;结薯期块茎的总鲜重、商品薯重、商品薯率及总薯块数指标为 125%灌溉量最优;成熟期,块茎的总鲜重、商品薯重、匍匐茎数及成薯率为 75%灌溉量最优。

2.3.2　不同发育阶段及灌溉量对马铃薯块茎品质的影响　从图 6(A)可知,不同生育期同一灌溉量下块茎的淀粉含量不同,同一生育期时,低灌溉量(50%)处理,块茎中的淀粉含量较低,幼苗期 75%和 100%灌溉量之间的淀粉含量无显著差异,均显著高于其它灌溉量;发棵期 100%灌溉量块茎中的淀粉含量最高;结薯期 125%和 100%灌溉量块茎中淀粉含量间无差异,50%和 150%灌溉量块茎中淀粉含量分别比对照降低了 8.9%、4.3%;成熟期 75%灌溉量块茎淀粉含量处于最高水平,较对照显著提高 12.77%。

由图 6(B)可知,不同时期灌溉量对马铃薯块茎维生素 C 含量的影响显著,幼苗期、发棵期、结薯期和成熟期马铃薯块茎维生素 C 含量分别以 75%、100%、125%和 75%的灌溉量为最高,结薯期 125%灌溉量的 Vc 含量最高,幼苗期和结薯期的 Vc 含量均以 50%的灌溉量为最低,发棵期和成熟期的 Vc 含量均以 150%的灌溉量为最低;幼苗期和结薯期的 Vc 含量最高值分别比 50%灌溉量的 Vc 含量高 14.43%和 26.42%,发棵期和成熟期的 Vc 含量最高值分别比 150%灌溉量的 Vc 含量高 10.40%和 23.91%。整体来看,灌溉量在结薯期和成熟期对马铃薯块茎 Vc 含量影响较大。

幼苗期、发棵期、结薯期和成熟期马铃薯块茎可溶性蛋白含量分别以 75%、100%、125%和 75%灌溉量的为最高(图 6(C))。在幼苗期,75%灌溉量处理较对照显著提高 6.20%,而 125%和 150%灌溉量处理分别较对照显著降低 2.60%、3.90%;在发棵期,75%灌溉量块茎可溶性蛋白含量较对照降低 1.6%,未达显著差异水平,而 50%、125%、150%灌溉量处理分别较对照显著降低 10.18%、9.11%、12.60%;在结薯期,不同灌溉量下块茎可溶性蛋白含量表现出与发棵期不同的变化趋势,125%灌溉量下可溶性蛋白含量处于最高水平,较对照提高 4.6%,但二者差异不显著。幼苗期、发棵期和成熟期可溶性蛋白含量均以 150%灌溉量为最低,结薯期则以 75%灌溉量为最低;幼苗期、发棵期和成熟期的可溶性蛋白含量最高值分别比 150%灌溉量的可溶性蛋白含量高 10.51% 、14.42%和 25.48%;成熟期时 75%灌溉量的可溶性蛋白含量最高,其次为 50%灌溉量处理,较对照分别显著提高 19.03%、9.25%,整体来看结薯期和成熟期灌水对可溶性蛋白含量的影响较大。

幼苗期、发棵期、结薯期、成熟期还原糖含量变化的极差分别是 0.085、0.097、0.167、0.098(图 6(D)),可见结薯期灌水对块茎的还原糖含量的变化比较敏感,在成熟期 125%灌溉量还原糖含量最高,比对照和 50%灌溉量分别提高了 5.30%、14.98%。

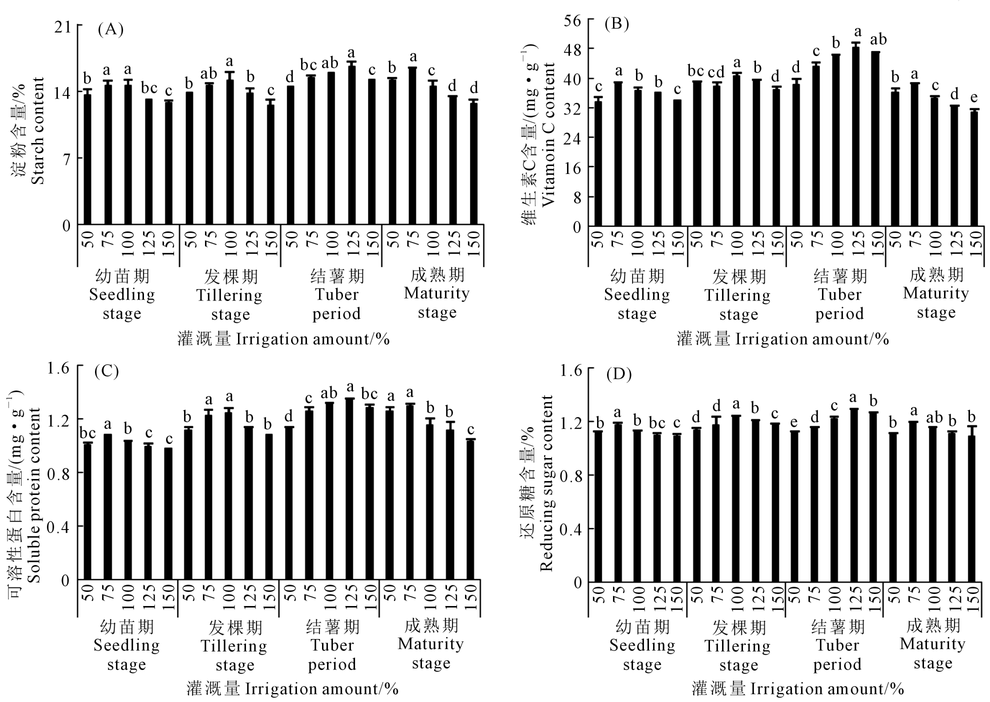


图 6　发育阶段及灌溉量对马铃薯块茎品质的影响

Fig.6　Effects of development stage and irrigation on potato tuber quality

3 讨 论

叶片含水率的变化直接影响叶片光合作用[20]。不同水分条件下，若功能叶片叶绿素含量保持在较高水平，则表明植株光合器官功能和结构相对完好[21-22]。于美芳等[23]研究发现寒地粳稻在分蘖期功能叶片叶绿素总含量、叶绿素 a/b 值均随干旱胁迫程度增加而下降，但类胡萝卜素含量的变化却呈相反趋势。周玉乾等[24]研究表明不同品种玉米的 P_n、T_r、C_s 及叶绿素含量随品种抗旱性减弱呈降低的趋势。田琳等[25]研究发现干旱和水涝均会降低夏玉米的叶片绿色度值(SPAD)、P_n、T_r 和 C_s。此外有研究发现春小麦叶片水分利用效率随着土壤水分下限的增加呈先增加后减小的变化趋势[26]。本研究幼苗期 75%灌溉量的总叶绿素含量最高，其 Chla/Chlb 与 100%、150%灌溉量间无显著差异且显著高于 50%处理。在发棵期时总叶绿素含量表现为 50%灌溉量显著高于 125%灌溉量；Chla/Chlb 表现为 75%灌溉量显著高于 50%和 150%灌溉量。在结薯期总叶绿素含量和 Chla/Chlb 均以 125%灌溉量为最高。在成熟期时各灌溉量间 Chla/Chlb 未表现出显著差异。综合分析可知叶片的总叶绿素含量和 Chla/Chlb 值对于不同时期不同灌溉量敏感程度不同。在结薯期，125%灌溉量处理的叶片叶绿素总量最大，可能是由于结薯期要充分满足马铃薯对水分的需要，才能使其迅速旺盛生长；在成熟期，75%灌溉量处理马铃薯叶绿素总量最高，表明在该生育期内 75%灌溉量处理的光能利用率高、抗旱性强[27-28]。在幼苗期 75%灌溉量显著提高了马铃薯叶片气孔导度、净光合速率；在发棵期 100%灌溉量使叶片 T_r、C_s、P_n 和水分利用效率达到最大；结薯期 125%灌溉量显著增加了 T_r、C_s、P_n 和水分利用效率；成熟期 75%灌溉量显著提高了叶片的 T_r 和 P_n。灌溉量不同导致马铃薯叶片整体 P_n、T_r 和 C_s 下降，灌水过多或过少均造成了水分胁迫，水分胁迫后的叶片 P_n、T_r 和 C_s 为适应干旱缺水均较对照显著下降，从而提高了水分利用效率。

灌溉量不同会对植物造成水分胁迫，叶片相对含水量会迅速降低，体内活性氧产生与清除机制失衡，造成细胞中活性氧迅速积累，膜脂中的不饱和键被过氧化，最终形成损害膜系统的 MDA[29]，大多数植物会通过主动积累游离脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等渗透调节物质来降低植物体内渗透势，以利于植物在逆境下维持正常生长所需水分，进而提高植物的抗逆性[30]。卢福顺[7]研究表明不同时期水分胁迫下，马铃薯脯氨酸、可溶性糖和 MDA 含量呈现上升趋势，且不同胁迫时期下，各个生理指标的变化幅度不同，生理指标的变化存在生理时期间的显著差异。赵晖等[31]研究发现玉米生育前中期水分胁迫使叶片 SOD、CAT、POD 活性大幅度增加，随干旱持续和强度加剧，SOD、CAT、POD 活性降低，叶片 MDA 含量增加。本试验综合分析各抗性指标，幼苗期 75%灌溉量叶片 MDA 含量、SOD、CAT、POD 活性均最低；发棵期 100%灌溉量的叶片脯氨酸含量和超氧阴离子产生速率较低，SOD、POD 活性降到最低；结薯期 125%灌溉量叶片脯氨酸、可溶性糖含量和 SOD、CAT、POD 活性值均比较低；成熟期 75%灌溉量叶片的 MDA 含量最低，脯氨酸和可溶性糖的含量、超氧阴离子产生速率、抗氧化酶系统的活性值也较低。因此幼苗期、发棵期、结薯期、成熟期分别在 75%、100%、125%、75%灌溉量时马铃薯叶片遭受逆境程度最低，从而保证光合作用基础的灌溉量。

有研究发现保证番茄果实生长初期、品质形成期和快速膨大期的灌水，减少苗期灌水，适当控制始花结果期灌水可有效提高番茄产量[32]。抗艳红等[33]研究发现不同生育时期干旱胁迫均能增加马铃薯串薯比例，影响马铃薯的品质，且土壤水分过于充足会降低马铃薯产量及品质，在发棵期干旱胁迫对马铃薯块茎形成、产量影响最大。吴晓伟[34]研究表明田间持水量 55%~85%范围内马铃薯块茎产量、块茎淀粉含量和土壤水分含量呈显著或极显著正相关关系，块茎还原糖含量在田间持水量 55%~85%范围内和土壤水分呈极显著负相关关系，土壤水分过多时块茎还原糖含量也显著提高。郭海涛等[35]进行了番茄调亏灌溉试验研究，发现在开花坐果期田间持水量 55%~65%提高了番茄的总产量，而果实膨大期田间持水量 65%~75%降低总产量，但 2 个处理的果实品质明显改善，可溶性总糖、Vc 和有机酸含量均与对照差异显著。本研究发现，在不同生育期，灌溉量显著影响马铃薯块茎产量和品质，综合马铃薯的单株产量、商品薯重、成薯率及块茎营养等指标，可知在幼苗期、发棵期、结薯期、成熟期灌溉量分别为原灌溉量的 75%、100%、125%、75%时马铃薯块茎产量和品质达到最优。

4 结 论

马铃薯是水分敏感型作物，需要土壤通气性高，灌溉量过高或过低都会导致马铃薯叶片光合作用下降，不利于其高产。适当的水分供给能够降低

膜脂过氧化产物丙二醛的积累,膜结构和功能的破坏程度减弱,保持较高的叶绿素含量,达到维持活性氧代谢平衡和增强光合作用的效果。随生育时期调节灌溉量对马铃薯产量有显著影响,结薯期是需水量最高的时期,充分满足该时期对水的需求是提高产量和品质的关键。综合马铃薯叶片的各项生理指标、块茎产量及品质的变化规律,幼苗期、发棵期、结薯期、成熟期分别以 75%、100%、125%、75%灌溉量为最佳。

参 考 文 献:

[1] Boutrif E. Institutions involved in food safety: food and agriculture organization of the United Nations (FAO) [J]. Encyclopedia of Food Safety, 2014, 118(3077): 354-358.

[2] 葛一洪. 马铃薯茎叶厌氧消化特性与工艺优化研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2017.

[3] 余斌, 杨宏羽, 王丽,等. 引进马铃薯种质资源在干旱半干旱区的表型性状遗传多样性分析及综合评价[J]. 作物学报, 2018, 44(1):63.

[4] Schapendonk A H C M, 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.

[5] 张红萍, 李明达. 水分胁迫后复水对豌豆叶片叶绿素含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(2): 177-181.

[6] 赵湘江, 王妍, 田昆. 清香木叶片光合荧光特性对土壤水分胁迫的响应[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 83-88.

[7] 卢福顺. 水分胁迫对马铃薯生理指标和叶片结构的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.

[8] 朱俊岭, 师茜, 王小红,等. 不同水分处理条件对油莎豆叶片生理指标及块茎品质的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(6): 1276-1280.

[9] 颜淑云, 周志宇, 邹丽娜,等. 干旱胁迫对紫穗槐幼苗生理生化特性的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(1): 139-145.

[10] 高桐梅, 吴寅, 李丰,等. 苗期水分胁迫对芝麻生长和生理特性的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(11): 2229-2235.

[11] 邹琦. 植物生理生化实验指导[M]. 北京:中国农业出版社, 1995: 110-161.

[12] 张志良.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社, 2009:223.

[13] Guo F X, Zhang M X, Chen Y, et al. Relation of several antioxidant enzymes to rapid freezing resistance in suspension cultured cells from alpine Chorisporabungeana [J]. Cryobiology, 2006, 52(2):241-250.

[14] Giannopolitis C N, Ries S K. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants[J]. Plant Physiology, 1977, 59(2):309.

[15] Shi J, Fu X Z, Peng T, et al. Spermine pretreatment confers dehydration tolerance of citrus in vitro plants via modulation of antioxidative capacity and stomatal response [J]. Tree Physiology, 2010, 30(7):914.

[16] Abassi N A, Kushad M M, Endress A G. Active oxygen-scavenging enzymes activities in developing apple flowers and fruits [J]. Scientia Horticulturae, 1998,3(74):183-184.

[17] 郝再彬. 植物生理实验[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2006:71-78.

[18] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术.第 2 版.[M].北京:高等教育出版社, 2006:172-173.

[19] 张永成, 田丰. 马铃薯试验研究方法[M]. 北京:中国农业科学技术出版社, 2007:171.

[20] 王秋玲, 周广胜, 麻雪艳. 夏玉米叶片含水率及光合特性对不同强度持续干旱的响应[J]. 生态学杂志, 2015, 34(11): 3111-3117.

[21] Acreche M M, Briceño-Félix G, Sánchez J A M, et al. Radiation interception and use efficiency as affected by breeding in Mediterranean wheat [J]. Field Crops Research, 2009, 110(2):91-97.

[22] Fotovat R, Valizadeh M, Toorchi M. Association between water-use efficiency components and total chlorophyll content (SPAD) in wheat (*Triticum aestivum* L.) under well-watered and drought stress conditions [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2007, 5(3): 225-227.

[23] 于美芳, 王新鹏, 段云轩,等. 分蘖期干旱胁迫对寒地粳稻光合特性及产量形成的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(9): 1794-1802.

[24] 周玉乾, 寇思荣, 连晓荣. 甘肃敦煌绿洲区干旱胁迫下玉米抗旱性与灌浆期光合特性[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4): 112-117.

[25] 田琳, 谢晓金, 包云轩,等. 不同生育期水分胁迫对夏玉米叶片光合生理特性的影响[J]. 中国农业气象, 2013, 34(6): 655-660.

[26] 张雨新, 张富仓, 邹海洋,等. 生育期水分调控对河西地区滴灌春小麦生长和水分利用的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 171-177.

[27] Talebi R. Evaluation of chlorophyll content and canopy temperature as indicators for drought tolerance in durum wheat (*Triticum durum* Desf.)[J]. Australian Journal of Basic & Applied Sciences, 2011, 5(11):1457-1462.

[28] Zhang F J, Zhang K K, Du C Z, et al. Effect of drought stress on anatomical structure and chloroplast altrastructure in leaves of sugarcane [J]. Sugar Tech, 2015,17(1):41-48.

[29] 王齐, 孙吉雄, 安渊. 水分胁迫对结缕草种群特征和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2009, 18(2): 33-38.

[30] 邱真静, 李毅, 种培芳. PEG 胁迫对不同地理种源沙拐枣生理特性的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(3): 108-114.

[31] 赵晖, 李尚中. 水分胁迫对全膜双垄沟播玉米光合等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(5): 85-89.

[32] 崔毅, 陈思, 柴瑞育,等. 番茄产量对各生育阶段土壤水分的响应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 14-21.

[33] 抗艳红, 赵海超, 龚学臣,等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16820-16822.

[34] 吴晓伟. 生育初期不同土壤水分对免耕稻草覆盖马铃薯产量及品质的影响[D]. 南宁:广西大学, 2007.

[35] 郭海涛, 邹志荣, 杨兴娟,等. 调亏灌溉对番茄生理指标、产量品质及水分生产效率的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(3): 133-137.