

CO₂浓度升高与增温对马铃薯产量 及品质的复合影响

张秀云^{1,2},姚玉璧^{1,3},雷俊²,牛海洋²,赵鸿¹

(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开放实验室,甘肃兰州730020;

2.甘肃省定西市气象局,甘肃定西743000;3.兰州资源环境职业技术学院,甘肃兰州730021)

摘要:于2016—2017年在黄土高原半干旱区,利用新型开顶式气室(OTC),开展CO₂浓度升高与大气增温对马铃薯产量及品质的影响试验,研究CO₂浓度增加和温度升高对马铃薯发育过程、产量及品质的复合影响。结果表明:增温+CO₂浓度升高复合处理的叶片净光合速率比增温处理高36.3%,较对照高34.7%;马铃薯叶片的水分利用率表现为增温+CO₂浓度升高复合处理高于对照47.4%,高于单独增温处理43.4%;马铃薯实际产量和块茎蛋白质含量表现为CO₂浓度上升+增温处理高于对照12.9%、37.0%,高于单独增温处理59.7%、6.3%。在增温的同时增加CO₂浓度,使得马铃薯叶片净光合速率增加,水分利用率增大,有机物积累增多,经济产量提高。

关键词:马铃薯产量;品质;气候变化;CO₂浓度升高;大气增温;协同影响

中图分类号:S532;S162.5 **文献标志码:**A

Collaborative impact of elevated CO₂ concentration and temperature on potato yield and quality

ZHANG Xiu-yun^{1,2}, YAO Yu-bi^{1,3}, LEI Jun², Niu Hai-yang², ZHAO Hong¹

(1. Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, China Meteorological Administration, Lanzhou Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China;

2. Meteorological Bureau of Dingxi of Gansu Province, Dingxi, Gansu 743000, China;

3. Lanzhou Resources and Environment Vocational and Technical College, Lanzhou, Gansu 730021, China)

Abstract: In the semi-arid regions of Loess Plateau, OTC (open-top chamber) was used to study the collaborative impact of increased CO₂ concentration and atmospheric warming on potato growth, yield, and quality from 2016 to 2017. The result showed that the net photosynthesis rate of leaves treated with elevated temperature and increased CO₂ concentration was 36.3% higher than that of the leaves treated only with elevated temperature only, and 34.7% higher than that of the control group from the inflorescence forming stage to the early stage of stem tuber enlargement. The water use efficiency of leaves treated with warming and increased CO₂ concentration was 47.4% distinctly higher than the control group and 43.4% higher leaves treated with only elevated temperature. The actual yield and stem tuber protein content of potatoes treated with elevated temperature and CO₂ concentration were 12.9% and 37.0%, significantly higher than that of the control group and 59.7% and 6.3% higher than that of the potatoes treated with only elevated temperature. The elevated temperature and CO₂ concentration did improve the potato net photosynthesis rate, water use efficiency, organic substance accumulation, and the yield.

Keywords: potato yield; quality; climatic change; elevated CO₂ concentration; elevated temperature; collaborative influence

收稿日期:2018-09-15

修回日期:2018-10-24

基金项目:国家自然科学基金(41575149,41505099);公益性行业(气象)科研专项(重大专项)(GYHY201506001-6);国家自然科学基金重点基金(41630426)

作者简介:张秀云(1963-),女,甘肃定西人,高级工程师,从事农业气象研究。E-mail: yaoyubi@163.com

通信作者:姚玉璧(1962-)男,甘肃通渭人,研究员级高级工程师,从事气候变化对农业与生态的影响研究。E-mail: yaoyubi_099@sina.com

全球约 157 个国家种植马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.), 马铃薯种植面积 1 920.5 万 hm², 总产量达 3.85 亿吨 (2014 年); 中国马铃薯种植达 681.7 万 hm², 产量 1.27 亿吨, 占全球产量的 25.9%。马铃薯是水稻、小麦和玉米之后的第四大主粮作物, 是最有发展前景的高产作物之一^[1]。利用气候和作物模型估计, 在温度增加 2.1~3.2℃ 时, 马铃薯产量将下降 18%~32%。通过使用晚熟品种、改变种植区域、调整种植季节等适应气候变化手段, 可能会适当减轻增温对马铃薯产量造成的影响^[2-3]; 如果适应策略不可行, 则局部地区小幅增温 (1~2℃), 也可能对产量产生强烈的负面影响^[4]。气温增高导致产量下降, 水分利用效率降低^[5-6]。Hancock 等提出^[7], 随着气候变暖, 马铃薯产量将在温带地区出现正变化, 热带和亚热带地区出现负变化, 其变化差异与基因型对高温的敏感性相关。较高的温度会降低光合作用, 主要是通过降低光系统 II 的效率^[8]和降低气孔导度^[9-10]。相反, 在良好的灌溉环境中, 适度的高温胁迫 (30℃/20℃ 昼/夜) 会增加气孔导度, 从而提高净碳同化速率^[7]。

增加农田 CO₂ 浓度对马铃薯干物质积累有正效应, 在提高 CO₂ 浓度的试验中, 马铃薯生物量增加、产量提高、水分利用效率也上升^[11-13], 当控制试验中设定 CO₂ 浓度高于对照 370~740 μmol·mol⁻¹ 时, 马铃薯产量提高了 27%~49%^[14]; 然而, 在控制试验中也观测到 CO₂ 浓度升高产量较对照下降的结果^[15]; 提高 CO₂ 浓度会加速叶片衰老速度, 加快作物开花期进程^[16]。当环境 CO₂ 浓度高于对照时, 马铃薯光合作用加快, 叶片的蒸腾速率减少, 作物水分利用效率增加^[10], 采用开顶气室试验表明, 环境 CO₂ 浓度增加 350~700 μmol·mol⁻¹, 马铃薯冠层光合作用提高 80%, 但在作物不同的生长季进行处理的结果各不相同^[11]。与对照处理比较, 在马铃薯生长季提高 CO₂ 浓度, 叶片净光合速率均表现为增加的特征^[12]。

自工业革命以来, 由于人类活动影响, 大气中的 CO₂ 浓度不断增加。按照 IPCC 第五次评估报告中典型浓度目标中低排放情景 (RCP4.5), 设定至 2100 年后辐射强迫稳定在 4.5 W·m⁻², 大气 CO₂ 浓度稳定在约 650 μmol·mol⁻¹。预估到 2035 年全球平均地表温度仍将升高 0.3~0.7℃, 2100 年增温 ≤ 2.0℃^[17]。

马铃薯属喜冷凉农作物, 具有耐旱和耐贫瘠的特性, 适宜在中纬度半干旱区栽培。随着全球气候变暖, 预计未来几十年马铃薯种植区域将大面积受

到高温的影响^[18]。但是, 大气增温和 CO₂ 浓度倍增对半干旱区马铃薯生理生态的复合影响研究尚有待深入, 为此, 进行增加 CO₂ 浓度与增加温度对马铃薯生长过程、产量形成与品质的交互影响试验, 分析 CO₂ 浓度升高与大气增温对马铃薯生长发育形态特征、光合特性、生理生态特征、产量形成、营养成分及微量元素含量的协同影响, 为马铃薯产业发展应对气候变化提供科学基础。

1 试验设计与方法

1.1 试验区概况

试验设在中国气象局兰州干旱气象研究所定西干旱与生态环境试验基地, 于 2016—2017 年开展试验。

按照 1981—2010 年 30 a 统计气候平均值, 试验区平均气温 7.2℃, 平均最高气温 14.2~19.2℃, 平均最低气温 1.7℃。平均年降水量 377.0 mm。马铃薯生长季 (5—10 月) 平均降水量 328.5 mm, 占全年平均降水量的 87.1%。平均日照时数 2 437.7 h。年平均连续无霜期为 145 d。

1.2 试验设计

试验采用新型开顶式气室 OTC (Open-top chamber), 其结构为八面柱状开顶结构, 周围镶透光玻璃, 底面积 18 m², 高 3 m。因其控制 CO₂ 浓度的效果优于 FACE (Free-Air CO₂ Enrichment), 已成为国内外相关领域普遍认可并使用的 CO₂ 浓度倍增模拟设施。

根据政府间气候变化专门委员会第五次评估报告, RCP 4.5 典型浓度路径情景, 即假设人类努力减少温室气体排放, 遵循用最低代价达到辐射强迫目标的途径, 辐射强迫稳定在 4.5 W·m⁻², 2100 年后 CO₂ 当量浓度稳定在 650 μmol·mol⁻¹, 预计全球地表温度升高不超过 2.0℃^[17]。

试验设计处理之一是升高温度处理 (IT), 应用温度监测仪, 试验处理控制升高环境温度在 2.0℃±0.5℃; 处理之二是增温 (IT)+CO₂ 浓度升高 (IC) 复合处理 (IT+IC), 采用 CO₂ 浓度监测控制装置, 将环境 CO₂ 浓度控制在 650±20 μmol·mol⁻¹; 另外, 设置大田对照 (CK), 研究区域控制区外自然空气 CO₂ 浓度约 370 μmol·mol⁻¹。每个处理设置 3 个重复。

试验马铃薯品种为“新大坪”, 是研究区域大面积栽培品种。试验马铃薯 2016 年播种时间为 4 月 29 日, 收获期为 10 月 15 日, 栽培行距 40 cm、株距 45 cm; 2017 年播种期为 4 月 29 日, 收获期为 10 月 11 日, 栽培行距 45 cm、株距 50 cm。

升高 CO_2 浓度处理在马铃薯出苗~收获期进行 CO_2 补供, 气室由 CO_2 浓度监测控制装置控制 CO_2 浓度水平, 补充熏气时间为每天 07:00—19:00。

试验处理及对照小区中土壤水分、施肥量均匀一致, 作物无病虫害及杂草等其它影响因素。

1.3 观测项目与方法

在马铃薯主要发育期测定叶片光合特征参数, 每次观测时段设为: 晴天, 09:30—11:30, 采用美国 LI-COR 公司设备, 用 Li-6400XT 标准叶室, 测定马铃薯净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间 CO_2 浓度 (C_i) 和蒸腾速率 (T_r)。其中, 进气速率为 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。马铃薯发育期、植株高度、密度、生物量、叶面积和产量的观测按照《农业气象观测规范》^[19]。

1.4 数据分析

应用 Excel 2003 软件进行数据处理; 采用 SPSS 统计分析软件中的 ANOVA 作方差分析及相关性分析, 试验处理样本间差异显著性检验使用最小显著差数法 (LSD) 进行分析, 显著性水平 $P \leq 0.05$; 曲线图绘制应用 Excel 2003 进行。

2 结果与分析

2.1 CO_2 浓度升高和大气增温对马铃薯株高的影响

由图 1 可以看出, 在分枝期, 增温 (IT) 处理马铃薯植株显著高于增温 (IT)+ CO_2 浓度升高 (IC) 处理和 CK ($P < 0.01$), 花序形成和开花期, 增温 (IT) 处理、增温 (IT)+ CO_2 浓度升高 (IC) 显著高于 CK, 由此表明, 随着生育进程的推进, CO_2 的施肥效应越明显。在收获期, 马铃薯植株高度表现为 $\text{IT} > \text{IT} + \text{IC} > \text{CK}$, 通过显著性检验 ($P \leq 0.05$)。三者之间差异显著。可见, 增温使植株显著增高。

2.2 CO_2 浓度升高和大气增温对马铃薯植株叶片叶绿素含量的影响

不同处理叶绿素含量的变化如图 2 所示。随着

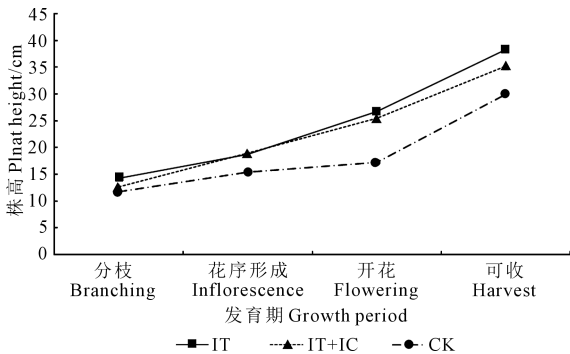


图 1 不同处理马铃薯株高变化特征

Fig.1 Variation characteristics of potato plant height under different treatments

生育进程的推进, 叶绿素的含量逐渐增大, 在生育初期, 叶绿素的含量表现为 $\text{CK} > \text{IT} + \text{IC} > \text{IT}$, 7 月 1 日 IT+IC 处理叶绿素含量最低, 此后 IT+IC 处理叶绿素含量逐渐升高, 在 7 月 31 日达到最大值, 不同处理叶绿素含量表现为 $\text{IT} + \text{IC} > \text{CK} > \text{IT}$; 之后, 随着马铃薯叶片功能衰退, 逐步老化, 叶绿素含量呈下降趋势, 从 8 月 21 日开始至收获期结束, 对照区域叶片功能衰退较快, 叶绿素含量下降速度快; 而增温区域叶片功能衰退较慢, 叶绿素含量下降速度慢; 叶绿素含量表现为一致的 $\text{IT} > \text{IT} + \text{IC} > \text{CK}$ 。可见, 在作物生育后期, 增温处理的叶绿素含量大于其他处理及对照。

2.3 CO_2 浓度升高与大气增温对马铃薯植株叶片光合特性的影响

2.3.1 净光合速率的变化 在马铃薯花序形成期~成熟期观测植株叶片净光合速率, 结果表明, 在马铃薯发育花序形成期~块茎膨大前期, 叶片净光合速率表现为 $\text{IT} + \text{IC} > \text{IT} > \text{CK}$, 增温+ CO_2 浓度升高复合处理叶片净光合速率在 $18.6 \sim 23.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间变化, 单独增温处理净光合速率为 $9.1 \sim 16 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 对照净光合速率为 $3.7 \sim 13.4 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 增温+ CO_2 浓度升高复合处理马铃薯叶片净光合速率较对照升高 1~5 倍, 平均升高了 2.1 倍, 单独增温处理较对照提高 22%~140%, 平均提高 85%, 均通过显著性检验 ($P < 0.01$) (图 3)。表明在花序形成期~块茎膨大前期, 试验区域环境温度尚未达到作物生长发育的气温阈值, 增高温度提高了植物叶片的光合速率, 增温+ CO_2 浓度升高, 叶片进行光合作用的原料增加, 净光合速率更进一步提高。故 IT+IC 处理的净光合速率远大于 IT 处理和 CK。

马铃薯花序形成期~块茎膨大前期的增温+ CO_2 浓度升高复合处理导致马铃薯前期地上部分生

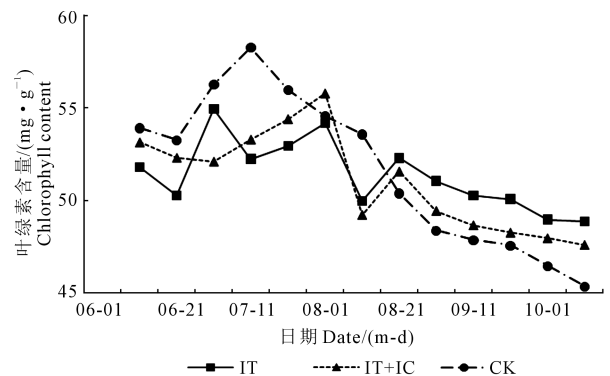


图 2 不同处理马铃薯叶片叶绿素含量变化特征

Fig.2 Variation characteristics of chlorophyll content in potato leaves under different treatments

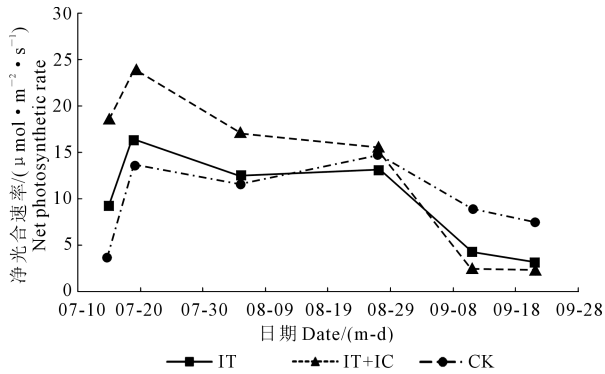


图3 不同处理马铃薯叶片净光合速率变化特征

Fig.3 Variation characteristics of net photosynthetic rate of potato leaves under different treatments

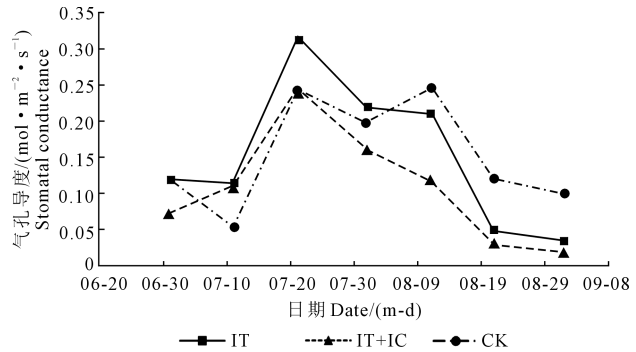


图4 不同处理马铃薯叶片气孔导度变化特征

Fig.4 Variation characteristics of stomatal conductance of potato leaves under different treatments

长旺盛,但到了地下块茎膨大后期,马铃薯叶片衰老加速,净光合速率表现为CK>IT>IT+IC处理,差异显著或极显著,增温+CO₂浓度升高复合处理较对照降低2.1~2.6倍,平均降低70%,单独增温处理较对照降低1.1~1.13倍,平均降低55.0%。

可见,在马铃薯花序形成期~块茎膨大前期,增温+CO₂浓度升高复合处理使马铃薯叶片净光合速率大于单独增温处理,也大于对照;增温+CO₂浓度升高复合处理导致马铃薯前期地上部分生长旺盛,到块茎膨大后期,马铃薯叶片衰老加速,净光合速率下降更为迅速。就全生育期平均而言,增温+CO₂浓度升高复合处理的叶片净光合速率大于增温处理36.3%,且大于对照34.7%。

2.3.2 气孔导度(G_s)的变化 马铃薯叶片气孔导度的变化曲线为“先升后降型”(图4)。升高CO₂浓度+增高气温复合处理,马铃薯叶片气孔导度较对照低4.8%~49.0%,平均降低43.4%。在花序形成期~开花期,IT+IC处理气孔导度接近对照,在块茎膨大期,IT+IC处理气孔导度低于对照,且后期两者差异加大。在花序形成期~开花期单独增温处理的叶片气孔导度高于对照17.4%~46.3%,而在块茎膨大期,单独增温处理的叶片气孔导度却比对照降低8.8%~63.1%,平均降低为32%。试验表明,在花序形成期~开花期马铃薯叶片气孔导度表现为IT>CK>IT+IC处理,而在块茎膨大期,气孔导度为CK>IT>IT+IC处理,CK、IT处理与IT+IC处理间存在显著或极显著差异。由此可知,由于试验控制环境CO₂浓度升高,马铃薯植株叶片气孔导度会偏小,故升高环境温度+升高环境CO₂浓度复合控制试验处理下,气孔导度低于对照。

2.3.3 蒸腾速率和水分利用效率的变化 图5给出了花序形成期~成熟期各阶段马铃薯叶片蒸腾速

率变化曲线,随着环境温度升高,马铃薯叶片蒸腾速率增加,IT处理叶片蒸腾速率较大;在花序形成期~开花期,IT处理叶片蒸腾速率较CK提高1.1%~12.1%,而IT+IC处理叶片蒸腾速率也高于CK。在块茎膨大后期,IT+IC处理和IT处理叶片蒸腾速率下降速度快,在成熟期之前IT+IC处理叶片蒸腾速率最小,IT+IC处理较CK低4.3%~27.2%。

叶片水平水分利用率是指植物同化CO₂过程中所蒸腾消耗的水分,可用净光合速率与蒸腾速率之比来计算植物叶片的水分利用率。花序形成期~开花期,随着CO₂浓度升高,马铃薯叶片水分利用率明显提高(图6)。IT+IC处理水分利用率显著大于IT处理和对照,IT+IC处理水分利用率较CK高76.8%。块茎膨大期,水分利用率为IT+IC>CK>IT,但差异幅度变小;接近收获期,则表现为CK>IT>IT+IC。可见,提高CO₂浓度,马铃薯叶片的水分利用率相应增加。其原因是当升高环境CO₂浓度,光合作用所需的原料增加,光合作用加快,作物叶片净光合速率也加快,而马铃薯叶片气孔导度有所下降,叶片蒸腾速率有所降低,这样提高了叶片水分利用率。

就全生育期平均而言,增温+CO₂浓度升高复合处理的叶片水分利用效率大于增温处理43.4%,大于对照47.3%。

2.3.4 胞间CO₂浓度的变化 试验显示,CO₂浓度升高+增温复合处理中叶片胞间CO₂浓度显著高于单独增温处理和对照($P<0.01$),CO₂浓度升高+增温复合处理较单独增温处理高31.3%~82.2%,平均升高67.5%,叶片胞间CO₂浓度在CO₂浓度升高+增温协同试验处理表现为较对照高40.3%~79.3%,平均升高70.0%。单独增温试验处理其胞间CO₂浓度表现为略高于对照(图7)。

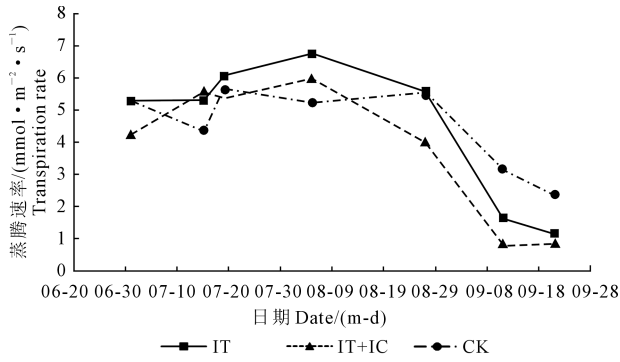


图 5 不同处理马铃薯叶片蒸腾速率变化特征
Fig.5 Variation characteristics of transpiration rate of potato leaves under different treatments

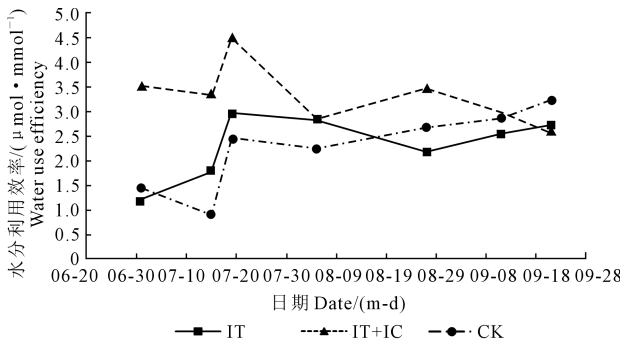


图 6 不同处理马铃薯叶片水分利用率变化特征
Fig.6 Variation characteristics of water use efficiency of potato leaves under different treatments

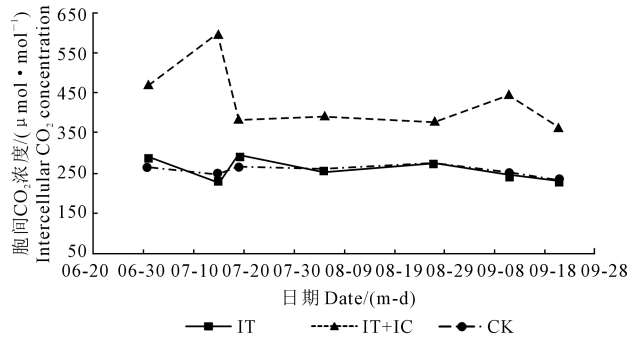


图 7 不同处理马铃薯叶片胞间 CO₂ 浓度变化特征
Fig.7 Variation characteristics of intercellular CO₂ concentration of potato leaves under different treatments

2.4 CO₂ 浓度升高与大气增温对马铃薯产量的影响
不同试验处理下,马铃薯产量结构状况见表 1。

表 1 不同处理下马铃薯产量结构状况
Table 1 The potato yield structure of different treatments

处理 Treatment	株薯块重/(g · 株 ⁻¹) Potato tube weight /(g · plant ⁻¹)	薯薯率 Chip rate/%	鲜茎重 Fresh stem weight /(g · m ⁻²)	薯块与茎比 Potato tube and stem ratio	理论产量 Theoretical yield /(g · m ⁻²)	实际产量 Actual production /(kg · hm ⁻²)
IT	81.7c	1b	786.89b	0.84c	653.69c	5529.07c
IT+IC	207.2a	7a	926.09a	1.16b	1168.03a	8830.21a
CK	133.8b	1b	658.51c	2.32a	978.09b	7820.08b

注:不同字母表示不同处理间差异显著性 ($P \leq 0.05$), 下同。

Note: Different letters mean significant difference between different treatments ($P \leq 0.05$), the same below.

可见, 增温+CO₂ 浓度升高, 会在马铃薯生长发育的主要阶段叶片净光合速率提高, 水分利用率增加, 鲜茎重和株块茎重提高, 地下生物量积累增加, 实际产量提高。

2.5 CO₂ 浓度升高与大气增温对马铃薯块茎营养物质含量的影响

表 2 给出了不同试验处理下马铃薯块茎营养物

单独升高温度试验处理下, 株薯块重低于对照, 下降 39%, 在 CO₂ 浓度升高+增温复合处理下, 马铃薯株薯块重较对照提高, 提高幅度为 54.9%。鲜茎重也表现为 CO₂ 浓度升高+增温复合处理高于单独增温处理且高于对照, IT+IC 处理较 CK 增幅为 40.6%, IT 处理较 CK 增幅为 19.5%。IT+IC 处理实际产量为 8 830.21 kg · hm⁻², 对照实际产量 7 820.08 kg · hm⁻², IT 处理实际产量 5 529.07 kg · hm⁻², 实际产量变化表现为 IT+IC>CK>IT, IT 处理产量最低, 其原因是马铃薯属喜凉作物, 随着环境温度上升, 影响作物光合酶的活性, 使得马铃薯净光合速率在块茎膨大后期显著降低, 有机物积累减少, 不利于块茎膨大生长, 气温过高还会导致块茎生长停止。但 CO₂ 浓度升高+增温复合处理马铃薯屑薯率明显提高, 高于单独增温和对照。

质含量状况, 增温+CO₂ 浓度升高的复合处理 (IT+IC) 和对照 (CK) 的块茎水分含量略高于单独增温处理 (IT); IT+IC 处理块茎蛋白质略高于 IT 处理, 而 IT+IC 处理块茎蛋白质高于对照 37%, 块茎蛋白质含量 IT+IC>IT>CK。块茎淀粉含量和维生素 C 含量均表现为 IT>CK>IT+IC。而还原糖、脂肪、纤维等含量差异不明显, 基本接近。

2.6 CO₂浓度升高与大气增温对马铃薯块茎微量元素含量的影响

不同试验处理下,马铃薯块茎微量元素含量状况见表3,增温+CO₂浓度升高的复合处理(IT+IC)和对照(CK)的块茎镉含量高于单独增温处理(IT);块茎铁含量CK>IT+IC>IT;块茎锌含量IT+IC处理和IT处理大于CK;块茎铜含量基本接近。

表2 不同处理下马铃薯块茎营养物质含量

Table 2 Potato tuber nutrient content change under different treatments

营养物质 Nutrient	处理 Treatment		
	IT	IT+IC	CK
水分 Moisture/(g·100g ⁻¹)	75.6a	78.6a	78.4a
蛋白质 Protein/(g·100g ⁻¹)	2.37a	2.52a	1.84b
粗淀粉 Crude starch/%	17.32a	12.89c	14.63b
维生素 Vitamin/(mg·100g ⁻¹)	15.2a	8.71c	13.9b
还原糖 Reducing sugar/(g·100g ⁻¹)	0.10a	0.10a	0.10a
粗脂肪 Crude fat/%	0.04a	0.04a	0.05a
粗纤维 Crude fiber/%	0.5a	0.6a	0.5a

表3 不同处理下马铃薯块茎微量元素含量

Table 3 The potato tuber trace element content under different treatments

元素 Element	处理 Treatment		
	IT	IT+IC	CK
镉 Cadmium/(mg·kg ⁻¹)	0.0014c	0.0034a	0.0023b
铁 Iron/(mg·kg ⁻¹)	18.1c	22.7b	25.6a
锌 Zinc/(mg·kg ⁻¹)	5.0ab	5.4a	4.0b
铜 Copper/(mg·kg ⁻¹)	2.1a	2.0a	2.1a

3 讨论

随着全球气候变暖,气温增加、水分减少、CO₂浓度升高、光照等的任何变化都会直接影响植物的生长发育和生物量积累。由于作物品种类型、基因型、气候环境、地理位置等的差异,气温、水分、CO₂浓度和光照等气候环境条件对植物生育和生理活动的影响差异很大^[20]。在温凉半干旱区域,增温处理对马铃薯株高变化影响显著,增温处理的株高及株高增长率均大于对照,在开花期株高差异最大。当其它环境条件一致时,马铃薯株高增速与生育期气温呈显著正相关,增温使叶面积指数增加,植株高度也显著增高^[21]。

净光合速率是反映植物有机物积累能力的重要指标,净光合速率对气候环境条件变化的响应十分敏感。升高环境温度+升高CO₂浓度复合试验处理下,首先升高了胞间CO₂浓度,植物光合作用所需原料增加;其次,由于研究区域在马铃薯花序形成~

开花期气温仍较低,增温处理提高了马铃薯发育进程,两者共同作用,使得马铃薯净光合速率较大提高^[22-23]。净光合速率的提高使得马铃薯水分利用率也提高^[24]。

马铃薯属喜凉作物,在地下块茎膨大期,环境温度超过块茎膨大适宜阈值,会造成块茎发育受阻,形成畸形薯,屑薯率也增加,如果在升高环境温度的同时升高环境CO₂浓度,马铃薯叶片净光合速率总体加快,水分利用率总体提高,马铃薯生物量积累加快,鲜茎重和株块茎重均大于单独增温和对照,实际产量也大于单独增温和对照,其块茎蛋白质含量亦大于单独升高环境温度处理,也大于对照。生物量积累增加,经济产量提高^[25-30]。

气温增加、水分减少和CO₂浓度升高是全球气候变化对农作物影响的直接因子。本文介绍了增温与升高CO₂浓度两因子耦合对马铃薯产量与品质影响的主要试验结论,但有关气温、水分和CO₂浓度多因子协同作用下作物生理生态和生物量积累如何响应,相互间如何反馈和适应等科学问题有待进一步深入研究^[31-33]。

4 结论

升高环境温度+升高环境CO₂浓度复合处理下,叶片净光合速率大于单独升温处理,大于对照;而进入铃薯块茎膨大期,增温+CO₂浓度升高复合处理净光合速率递减率更快。马铃薯叶片的水分利用率和胞间CO₂浓度也表现为增温+CO₂浓度升高复合处理显著高于对照和单独增温处理。

在升高环境温度的同时增加环境CO₂浓度,增加胞间CO₂浓度使叶片净光合速率加快,水分利用率提高,马铃薯有机物积累增多,经济产量提高。增温+CO₂浓度升高复合处理马铃薯实际产量显著高于对照和单独增温处理,单独增温处理实际产量最低。

增温+CO₂浓度升高复合处理块茎蛋白质含量高于对照,而还原糖、脂肪、纤维含量与对照无显著差异;块茎镉、锌含量高于对照,块茎铁含量低于对照,块茎铜含量无显著差异。

参考文献:

- [1] 李子涵,杨晓晶. 世界及中国马铃薯产业发展分析[J]. 中国食物与营养, 2016, 22(5): 5-9.
- [2] 姚玉璧,雷俊,牛海洋,等. 气候变暖对半干旱区马铃薯产量的影响. 生态环境学报, 2016, 25(8): 1264-1270.
- [3] 姚玉璧,杨金虎,肖国举,等. 气候变暖对马铃薯生长发育及产量

影响研究进展与展望[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 538-546.

- [4] Hijmans R. The effect of climate change on global potato production [J]. *Am. J. Potato Res.*, 2003, 80(4): 271-280.
- [5] Xiao G J, Zhang F J, Qiu Z J, et al. Response to climate change for potato water use efficiency in semi-arid areas of China [J]. *Agricultural Water Management.* 2013, 127(8): 119-123.
- [6] 姚玉璧, 王润元, 刘鹏泉, 等. 气候暖干化对半干旱区马铃薯水分利用效率的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(2): 30-38.
- [7] Hancock R D, Morris W L, Ducreux L J M, et al. Physiological, biochemical and molecular responses of the potato (*Solanum tuberosum* L.) plant to moderately elevated temperature [J]. *Plant Cell Environ.* 2014, 37(2): 439-450.
- [8] Prange R K, McRae K B, Midmore D J, et al. Reduction in potato growth that high temperature. Role of photosynthesis and dark respiration [J]. *Am. Potato J.*, 1990, 67(6): 357-370.
- [9] Dwelle R B, Kleinkopf G E, Pavek J J. Stomatal conductance and gross photosynthesis of potato (*Solanum tuberosum* L.) as influenced by irradiance, temperature and growth stage [J]. *Potato Resour.* 1981, 24(1): 49-59.
- [10] Ku G, Edwards E, Tanner C B. Effects of light, carbon dioxide and temperature on photosynthesis, oxygen inhibition of photosynthesis and transpiration in *Solanum tuberosum* [J]. *Plant Physiol.* 1977, 59(5): 868-872.
- [11] Schapendonk H C M, van Oijen M, Dijkstra P, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on photosynthetic acclimation and productivity of two potato cultivars grown in open-top chambers [J]. *Austral. J. Plant Phys.*, 2000, 27(12): 1119-1130.
- [12] Sicher R C, Bunce J A. Photosynthetic enhancement and conductance to water vapor of field-grown *Solanum tuberosum* (L.) in response to CO₂ enrichment [J]. *Photosynth. Res.* 1999, 62(2): 155-163.
- [13] Wheeler R M, Mackowiak C L, Yorio N C, et al. Effects of CO₂ on stomatal conductance: do stomata open at very high CO₂ concentrations [J]. *Ann. Bot.* 1999, 83(5): 243-251.
- [14] Wheeler R M, Tibbitts T W, Fitzpatrick A H, et al. Carbon dioxide effects on potato growth under different photoperiods and irradiance [J]. *Crop Sci.* 1991, 31(5): 1209-1213.
- [15] Goudriaan J, De Ruiter H E. Plant growth in response to CO₂ enrichment, at two levels of nitrogen and phosphorous supply. I. Dry matter, leaf area and development [J]. *Neth. J. Agric. Sci.* 1983, 31: 157-169.
- [16] Lawson T, Craigan J, Tulloch A M, et al. Photosynthetic responses to elevated CO₂ and O₃ in field-grown potato (*Solanum tuberosum*) [J]. *J. Plant Phys.* 2001. 158(3): 309-323.
- [17] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.
- [18] Monneveux P, Ramirez D A, Awais Khan M, et al. Drought and heat tolerance evaluation in potato (*Solanum tuberosum* L.) [J]. *Potato Res.* 2014, 57: 225-247.
- [19] 国家气象局. 农业气象观测规范(上卷)[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 1-59.
- [20] 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.
- [21] 赵鸿, 王润元, 王鹤龄, 等. 半干旱雨养区苗期土壤温湿度增加对马铃薯生物量积累的影响 [J]. *干旱气象*, 2013, 31(2): 290-297.
- [22] 陈根云, 陈娟, 许大全. 关于净光合速率和胞间 CO₂ 浓度关系的思考[J]. *植物生理学通讯*, 2010, 46(1): 64-66.
- [23] Fleisher D H, Timlin D J, Reddy V R, et al. Interactive effects of CO₂ and water stress on potato canopy growth and development [J]. *Agron. J.* 2008, 100(3): 711-719.
- [24] Carolina LX, Avila A, Tolaba A, et al. Field responses of potato to increased temperature during tuber bulking: Projection for climate change scenarios, at high-yield environments of Southern Chile [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 239: 192-201.
- [25] Miglietta F, Magliago B, Bindi M, et al. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development, growth and yield [J]. *Global Change Biol.* 1998, 4(2): 163-172.
- [26] 姚玉璧, 雷俊, 牛海洋, 等. CO₂ 浓度升高与增温对半干旱区马铃薯光合特性的协同影响[J]. *生态环境学报*, 2018, 27(5): 793-801.
- [27] 张强, 王润元, 邓振镛. 中国西北干旱气候变化对农业预生态影响及对策[M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [28] 肖国举, 仇正跻, 张峰举, 等. 增温对西北半干旱区马铃薯产量和品质的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(3): 830-836.
- [29] 赵年武, 郭连云, 赵恒和. 高寒半干旱地区马铃薯生育期气候因子变化规律及其影响[J]. *干旱气象*, 2015, 33(6): 1024-1030.
- [30] 闫小红, 尹建华, 段世华, 等. 四种水稻品种的光合光响应曲线及其模型拟合[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 604-610.
- [31] 姚玉璧, 杨金虎, 肖国举, 等. 气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 2170-2179.
- [32] 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.
- [33] 叶子飘. 光合作用对光和 CO₂ 响应模型的研究进展 [J]. *植物生态学报*, 2010, 34(6): 727-740.