

CO₂ 浓度增加对半干旱区马铃薯 生长动态及产量、品质的影响

张 凯^{1,2,3}, 王润元¹, 王鹤龄¹, 赵 鸿¹, 赵福年¹,
齐 月¹, 陈 斐¹, 杨 阳¹, 雷 俊⁴

(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.西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070;
3.中国气象局定西干旱气象与生态环境野外科学试验基地,甘肃 定西 743000;4.甘肃省定西市气象局,甘肃 定西 743000)

摘 要:为了解 CO₂ 浓度升高条件下马铃薯生长动态及其产量、品质的变化特征,在典型半干旱区(甘肃定西)利用开顶式气室(OTC)试验平台,以马铃薯‘新大坪’为供试品种,设对照(390 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)和 590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 共 2 个 CO₂ 浓度梯度,开展 CO₂ 浓度增加模拟试验。结果表明:CO₂ 浓度增加至 590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 时,马铃薯发育加快,生育期提前,全生育期天数缩短 3 d;CO₂ 浓度升高对马铃薯株高、叶面积指数、叶绿素含量和叶片水势有明显促进作用。随着生育进程的推移,马铃薯地上部干物质生产对 CO₂ 浓度的响应值呈现先变大再变小的趋势。CO₂ 浓度增加促进了马铃薯块茎产量的提高,单株结薯数和单株薯块质量也有所增加。与对照相比,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ CO₂ 处理马铃薯块茎水分、蛋白质、维生素 C 含量以及铁、锌、铜元素含量分别下降 3.43%、11.78%、13.09%、25.58%、31.94% 和 9.76%,而粗淀粉、粗脂肪、粗纤维和还原糖含量分别增加 10.56%、240.00%、14.28%、106.38%。

关键词:CO₂ 浓度增加;马铃薯;生长动态;产量;品质;半干旱区

中图分类号:S532;S162.5 **文献标志码:**A

Effects of elevated CO₂ concentration on growth dynamics, yield and quality of potato in semi-arid area

ZHANG Kai^{1,2,3}, WANG Runyuan¹, WANG Heling¹, ZHAO Hong¹, ZHAO Funian¹,
QI Yue¹, CHEN Fei¹, YANG Yang¹, LEI Jun⁴

(1. Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction in Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climatic Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Dingxi Arid Meteorology and Ecological Environment Field Experimental Station, China Meteorological Administration, Dingxi, Gansu 743000, China; 4. Meteorological Bureau of Dingxi City, Dingxi, Gansu 743000, China)

Abstract: In the present study, the effects of elevated CO₂ concentration on growth dynamics, yield and quality of potato ‘Xindaping’ were investigated based on the Open-Top Chamber (OTC) experiment platform in Dingxi, a typical semi-arid area. Two different CO₂ concentrations experiments (390 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ and 590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$) were conducted. The results showed that under the elevated CO₂ concentration (590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$), the growth and development of potato were accelerated, and the whole growth period was shortened by 3 days. The elevated CO₂ concentration obviously promoted the increase of plant height, leaf area index, chlorophyll content, and leaf water potential of potato. During the plant growth, the response value of aboveground dry matter production of

收稿日期:2022-07-08

修回日期:2022-09-02

基金项目:甘肃省自然科学基金(20JR5RA117);甘肃省气象局气象科研项目-人才专项(2122rczx-十人计划-02);国家自然科学基金面上项目(41975151)

作者简介:张凯(1976-),男,甘肃甘谷人,研究员,主要从事干旱气候变化对农业影响及适应技术研究。E-mail:lanzhouzhk@163.com

通信作者:雷俊(1985-),男,甘肃通渭人,高级工程师,主要从事农业气象试验研究。E-mail:75267630@163.com

potato to CO₂ concentration showed a trend from small to large, and then from large to small. The elevated CO₂ concentration promoted potato tuber yield in semi-arid area, accompanied by the increase of the number of tubers per plant and the weight of tubers per plan. Under the elevated CO₂ concentration (590 μmol · mol⁻¹), the nutrients in potato tubers, such as moisture, protein, vitamin C, as well as trace elements such as iron, zinc and copper decreased by 3.43%, 11.78%, 13.09%, 25.58%, 31.94% and 9.76% respectively. However, the nutrients such as crude starch, crude fat, crude fiber and reducing sugar increased by 10.56%, 240.00%, 14.28% and 106.38% respectively.

Keywords: elevated CO₂ concentration; potato; growth dynamics; yield; quality; semi-arid area

由于煤炭、石油等化石燃料的过度使用以及人类对植被生态系统的不合理利用,全球大气环境CO₂浓度显著升高,这已成为世界范围内重要的环境问题^[1]。政府间气候变化专门委员会(IPCC)在第5次评估报告中指出,大气CO₂浓度已经从1960年西方工业革命开始时的310 μmol · mol⁻¹升高至当前的400 μmol · mol⁻¹^[2],且以每年约2 μmol · mol⁻¹的速度在增加,预计21世纪末大气CO₂浓度将达到800 μmol · mol⁻¹^[3]。CO₂是绿色植物光合作用的反应底物,也是影响植物生长、发育、繁殖和分布的重要环境因子,大气CO₂浓度升高势必对生态系统产生深刻影响^[4],因此,大气中CO₂浓度的升高及其影响一直是近年来全球关注的焦点,也是国内外生态和农业领域的研究热点^[5]。CO₂浓度升高对作物生产影响的研究基本上都是通过模拟试验开展的。试验装置最常见的有开顶式气室(Open-Top Chamber, OTC)、开放式空气CO₂浓度增高系统(Free-Air CO₂ Enrichment, FACE)、人工气候室和同化箱等^[6-7]。其中,OTC被广泛应用于牧草和小麦、水稻、玉米等作物的研究中。

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)为粮、饲、菜兼用型作物,营养丰富,是新世纪我国最有发展前景的高产粮食作物之一,同时也是十大热门营养健康食品之一;全世界有2/3以上的国家种植马铃薯,总产量达30亿t左右,仅次于小麦、玉米、水稻,居第四位^[8]。马铃薯具有营养丰富、用途广泛、加工链长等特点,在促进农民增收、保障粮食安全方面发挥着重要作用。近年来,随着“马铃薯主粮化战略”的提出,我国马铃薯的种植面积迅速增加,年种植面积达533万hm²,年产量8000万t,均居世界前列^[9]。马铃薯耐旱、耐贫瘠,是中纬度半干旱区适宜种植的特色优势高产作物^[10-11];其生长不仅受自身遗传物质的控制,同时也受诸多环境因子的影响,其中包括大气中CO₂浓度增加。自20世纪80年代以来,国内外学者已经在马铃薯对大气CO₂浓

度升高的响应方面做过相关研究。国外起步较早,有学者采用OTC研究了北美洲、印度等不同地区不同品种马铃薯生长发育、块茎产量和块茎品质对大气CO₂浓度升高的响应^[12-14],结果表明,增加CO₂浓度对马铃薯总生物量和产量有积极作用,在CO₂浓度升高的情况下,马铃薯总生物量、产量和水分利用效率(WUE)等指标均有所提高^[15-16];当CO₂浓度为700 μmol · mol⁻¹时,供试早熟和晚熟马铃薯品种的块茎干物质质量平均增加了27%和49%^[17]。还有研究表明,随着CO₂浓度的升高,马铃薯植株分配给茎和叶的生物量减少,而分配给块茎的生物量增加;植物能够调节其器官的发育以应对大气CO₂浓度的升高,在块茎形成和膨大阶段,高浓度CO₂环境下块茎刺激细胞增殖的能力有助于干物质向其分配^[18]。CO₂浓度升高对块茎中的养分(N、P、K)浓度没有显著影响^[13]。国内关于CO₂升高对马铃薯影响的研究起步较晚。在生长发育及产量方面,李晓静等^[19]研究表明增施CO₂能显著增加播种后130d时低氮(48 kg · hm⁻²)、中氮(96 kg · hm⁻²)处理全株干物质积累量;赵竞宇等^[20]研究表明,增施CO₂增加了马铃薯单株结薯数、单薯质量和单株产量,其增幅随CO₂量的增加而增加;杨小华等^[21]研究结果表明,随着CO₂浓度的增加,马铃薯块茎产量显著提高。在块茎品质方面,杨小华等^[21]研究表明随着CO₂浓度的增加,淀粉含量有所提高;秦跃龙^[22]则主要研究了不同浓度CO₂对采后贮藏期间马铃薯生理品质的影响。

定西位于陇中黄土高原半干旱区,其特有的气候特征、地理环境以及丰富的耕地资源为马铃薯的生长发育创造了有利条件,该地区马铃薯常年种植面积达20万hm²以上,总产量达500万t左右^[23],被称为“中国马铃薯之乡”。马铃薯生长发育及其产量形成受气候变化的影响十分突出,目前,CO₂浓度增加对马铃薯生长动态和产量品质的影响尚缺乏试验基础和深入、系统的研究。因此,本文采用

国际通用的 OTC 试验平台,分析 CO₂ 浓度升高条件下西北半干旱区马铃薯的生长动态和产量品质变化特征及其影响机理,为深入探索马铃薯生长过程对全球 CO₂ 升高的反应效应提供参考,为气候变化下马铃薯适宜栽培方式的研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验于 2018 年在中国气象局兰州干旱气象研究所定西半干旱气象与生态环境试验基地(104°37'E,35°35'N,海拔高度 1 896.7 m)进行。该基地位于甘肃省中部(图 1),属典型黄土高原半干旱气候区,年平均气温 6.7℃;年降雨量 386.6 mm,且分布不均匀,主要集中在 6—8 月;年太阳总辐射为 5 923.8 MJ·m⁻²,年日照时数 2 433.0 h,无霜期平均为 140 d(1981—2021 年统计数据)。试验地土壤为黄绵土,碱性,肥力中等,其中土壤 pH 值 7.8,有机质含量 110.7 g·kg⁻¹,有效氮、总氮含量分别为 51.1 mg·kg⁻¹和 0.84 g·kg⁻¹,有效磷、总磷含量分别为 14.12 mg·kg⁻¹和 1.24 g·kg⁻¹[24]。

1.2 试验设计

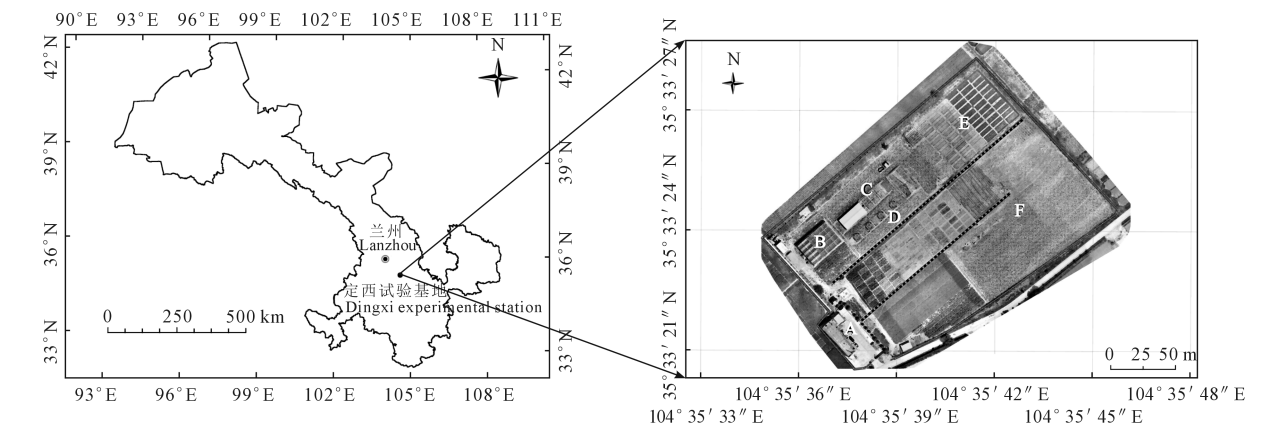
供试马铃薯品种为‘新大坪’,是当地主栽品种。播种期为 4 月 29 日,收获期为 10 月 11 日和 14 日。栽培行距为 45 cm,株距为 50 cm。马铃薯生产管理按照当地高产栽培技术规程进行,试验过程中水肥条件适宜且一致,无病虫害及杂草等限制因素。

试验装置采用 OTC 系统试验平台(图 2),主要由 CO₂ 气体供应装置、控制系统、释放系统 3 大部分

组成。试验有 4 个开顶式气室(边长 2.15 m,高 2.40 m,玻璃室壁,正八边形),包括 2 个试验气室(重复)和 2 个对照气室(重复)。室内对应由 8 根不锈钢管围成八边形,不锈钢管面向室内一面每隔 100 mm 有孔径约 0.5 mm 的小孔,用以释放纯 CO₂ 气体。室内装有 1 个 CO₂ 气体监测器(GMP343,Visala 公司,芬兰),用于采集 CO₂ 气样,供控制系统分析圈内 CO₂ 浓度分布。在马铃薯出苗~可收期全生育期进行 CO₂ 浓度处理,释放 CO₂ 时间为 7:00—19:00。根据对未来 CO₂ 升高预测结果以及前人采用的 CO₂ 浓度,所设处理浓度为在对照大气 CO₂ 浓度(自然条件下该试验地 CO₂ 平均浓度为 390 μmol·mol⁻¹)的基础上增加 200 μmol·mol⁻¹,即 OTC1 和 OTC3 为对照气室,其 CO₂ 浓度均为 390 μmol·mol⁻¹;OTC2 和 OTC4 为试验气室,其 CO₂ 浓度均为 590 μmol·mol⁻¹。从试验情况来看,各 OTC 内的 CO₂ 浓度基本能达到设计水平,马铃薯全生育期对照气室和试验气室内实测 CO₂ 浓度日平均值分别为 388 μmol·mol⁻¹和 579 μmol·mol⁻¹(图 3)。

1.3 观测项目与方法

按照《农业气象观测规范》[25],观测不同 CO₂ 浓度处理下马铃薯的生育时期,主要分为播种期、出苗期、分枝期、花序形成期、开花期、可收期共 6 个时期(表 1);株高、叶面积指数(LAI)、叶片叶绿素含量、叶片水势等生长指标,在马铃薯不同生育时期选取 10 株(定株)进行测量。其中,株高采用田间直接测量法,叶面积指数采用 LAI-2000 仪器测定,



注:A:综合试验楼;B:自动化日光温室;C:水分控制试验场;D:开顶式气室;E:集雨试验场;F:陆面过程观测场。
Note:A:Comprehensive experimental building;B:Automatic solar greenhouse;C:Water controlling experimental field;D: Open-Top Chamber (OTC);E:Rainwater harvesting experimental field;F:Land surface processes observation site.

图 1 研究区和试验点
Fig.1 Study area and observation site

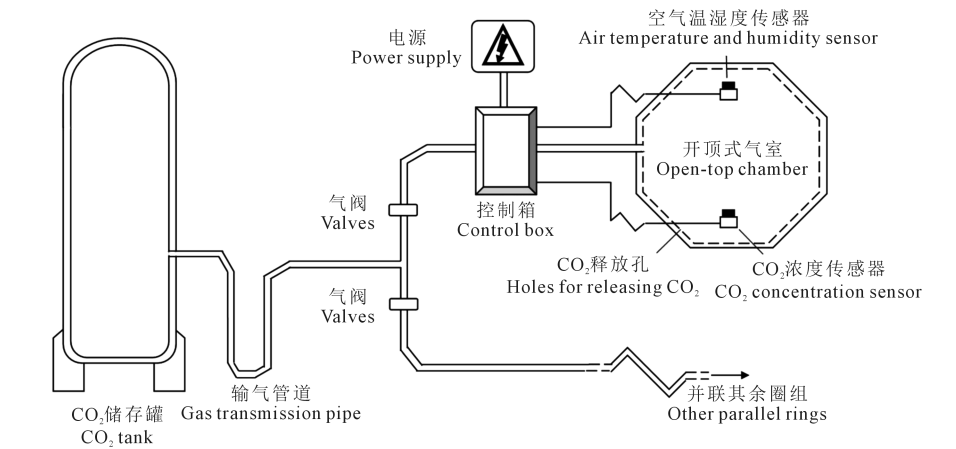


图 2 定西 OTC 田间试验平台主要结构

Fig.2 Main structures of Dingxi cropland OTC experimental platform

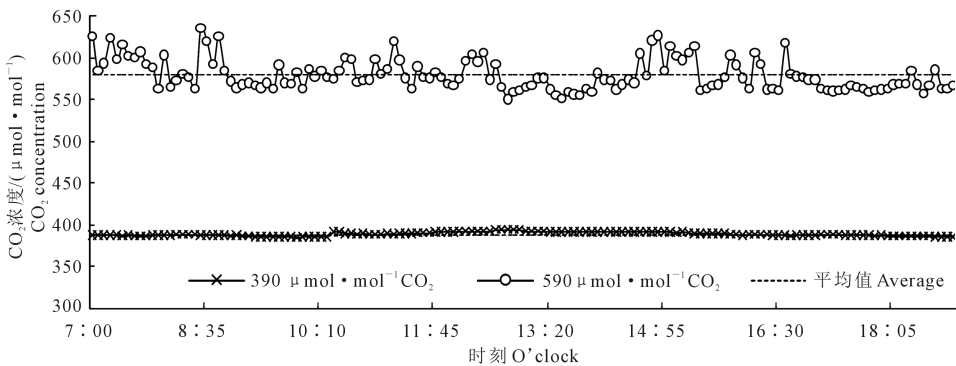


图 3 不同 OTC 内整个生育期日平均 CO₂ 浓度

Fig.3 Daily average CO₂ concentration during different growth periods in different OTC

叶绿素含量采用 SPAD-502 型叶绿素计测定(以 SPAD 值表示),叶片水势采用 WP4 水势仪测定。在马铃薯每个生育时期,各 OTC 内分别选取代表性植株 3 株,连根挖出,将植株的叶、茎、根和块茎分离,称鲜质量后,把装有叶、茎、根的纸袋先置于 105℃ 的烘箱中杀青 30 min,然后 80℃ 烘干至恒重,冷却后在精度 0.01 g 以上的天平上称干物质量,其中地上部干物质量为叶和茎干物质量之和;马铃薯成熟后,测定其产量构成以及单位面积实际产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)和理论产量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)。其中实际产量采用称重法测定,理论产量=单株薯块质量 $\times 1 \text{ m}^2$ 株数。

对于块茎品质,水分含量采用直接干燥法测定,蛋白质含量采用凯氏定氮法测定,粗淀粉含量采用旋光法测定,粗脂肪含量采用残余法测定,粗纤维含量采用酸碱洗涤法测定,维生素 C 含量采用荧光法测定,还原糖含量采用直接滴定法测定,铁、锌和铜含量采用火焰原子吸收光谱法测定。

1.4 数据处理

采用 Excel 2013 软件对数据进行统计分析,利用 SPSS 18.0 软件的独立样本 T 检验法 (Independent-

samples T Test)进行方差分析和差异显著性检验($\alpha = 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 CO₂ 浓度增加对马铃薯生育进程的影响

表 1 为不同 CO₂ 浓度下马铃薯的生育时期变化情况,由表 1 可知,CO₂ 浓度增高,马铃薯发育进程加快,生育时期相应提前,全生育期天数缩短。对照处理(CO₂ 浓度为 $390 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)下,马铃薯的生育期天数为 168 d;CO₂ 浓度增加至 $590 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 后,马铃薯的生育期天数为 165 d,比对照处理缩短 3 d。与对照相比, $590 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 浓度处理分枝期、花序形成期、开花期、可收期开始日期分别提前 1、2、2、3 d,可见 CO₂ 浓度增加对马铃薯生育后期影响更大。

2.2 CO₂ 浓度增加对马铃薯生长指标的影响

由图 4 可以看出,马铃薯植株高度随生育进程推进呈增加趋势。CO₂ 浓度升高影响植物的同化作用及生长速度,促进了马铃薯株高的增加,但在不同观测日期株高的增加幅度不同,与对照相比, 590

$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ 处理各观测日期马铃薯株高平均增加了 4.98%。株高增加扩大了植株的见光面积,有利于其吸收外界营养。除个别观测日期外,大部分观测日期两处理间差异不显著($P>0.05$)。

由图 5 可以看出,马铃薯生育期 *LAI* 呈单峰型变化趋势,表现为开口向下的抛物线形式。生长前期叶面积呈逐渐增加趋势,在生长最旺盛期,即 9 月上旬(9 月 11 日),叶面积达到最大值,马铃薯生长后期地上器官逐渐衰老,植株叶面积呈下降趋势。 CO_2 浓度升高促进了马铃薯 *LAI* 的增加,在各观测日期其增加幅度不同;与对照相比,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 浓度处理下各观测日期马铃薯 *LAI* 平均增加了 60.10%,其中在 9 月下旬(9 月 30 日)增幅最大,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ 处理和对照之间的差异显著($P<0.05$)。

由图 6 可以看出, CO_2 浓度对马铃薯叶片叶绿素含量同样具有明显的调节作用, CO_2 浓度升高促进马铃薯叶绿素含量的增加,在不同生育时期增幅

有所不同。与对照相比,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ 处理下的马铃薯叶绿素含量在各观测日期平均增加了 6.56%,其中在 9 月下旬(9 月 30 日)增加更为显著,增加了 13.23%($P<0.05$)。说明在高 CO_2 浓度条件下,马铃薯衰老过程中旗叶叶绿素含量的降低速度有所减缓,使得旗叶功能期延长,对提高马铃薯产量具有积极作用。

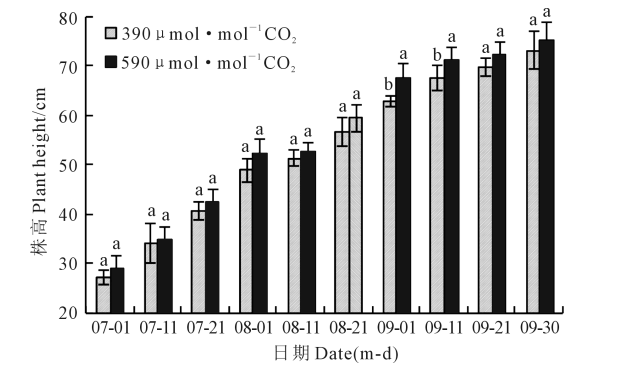
图 7 为不同 CO_2 浓度条件下马铃薯叶片水势的变化情况,可以看出, CO_2 浓度升高促进了马铃薯叶片水势的增加,在不同观测日期增幅不一样。与对照相比,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ 处理下的马铃薯叶片水势平均增加了 19.06%,各观测日期处理和对照处理之间均差异显著($P<0.05$)。可见, CO_2 浓度的增加导致叶片开度降低,蒸腾失水减少,叶片水势增加,从而增强了植株对干旱胁迫的抵御能力,同样对提高马铃薯产量具有积极作用。

2.3 CO_2 浓度增加对马铃薯干物质积累、产量及其构成要素的影响

2.3.1 对地上部干物质积累的影响 图 8 表明,各处理马铃薯地上部干物质积累随着生育时期的推移总体呈慢-快-慢的变化趋势。随着生育进程的推移,马铃薯地上部干物质生产对 CO_2 浓度的响应值呈现由小变大、再由大变小的趋势,其中在 9 月中旬(9 月 16 日)响应值最大,说明不同 CO_2 浓度条件下马铃薯成熟期生物产量的增加主要与生育中期物质生产能力明显增强有关。与对照相比,590 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$ 处理各观测日期地上部干物质积累平均增加了 23.22%,但由于 OTC 面积和试验植株有限,取样较少,因此,除个别观测日期外,其余各观测日期两个浓度处理之间的差异不显著($P>0.05$)。

表 1 半干旱区不同 CO_2 浓度下马铃薯的生育期
Table 1 Growth period of potato under different CO_2 concentrations in semi-arid area

生育时期 Growth period	开始日期(m-d) Start date		播后天数/d Days after sowing	
	390	590	390	590
	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$	$\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$
播种期 Sowing date	04-29	04-29	0	0
出苗期 Emergence stage	06-04	06-04	36	36
分枝期 Branching stage	06-15	06-14	47	46
花序形成期 Inflorescence formation stage	07-04	07-02	66	64
开花期 Flowering stage	07-16	07-14	78	76
可收期 Harvest stage	10-14	10-11	168	165



注:不同字母表示同一天的两处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters indicate significant difference between the two treatments on the same day ($P<0.05$). The same as below.

图 4 CO_2 浓度增加对马铃薯株高的影响
Fig.4 Effects of elevated CO_2 concentration on plant height of potato

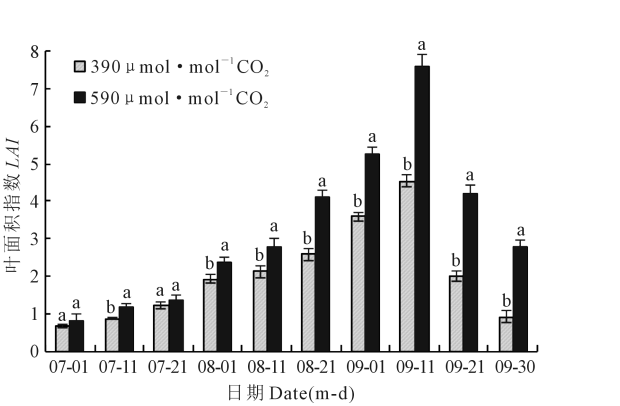


图 5 CO_2 浓度增加对马铃薯叶面积指数的影响
Fig.5 Effects of elevated CO_2 concentration on leaf area index of potato

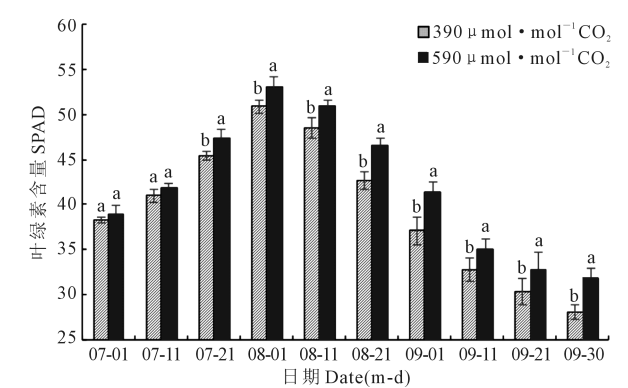


图 6 CO₂ 浓度增加对马铃薯叶片叶绿素含量的影响

Fig.6 Effects of elevated CO₂ concentration on leaf chlorophyll content of potato

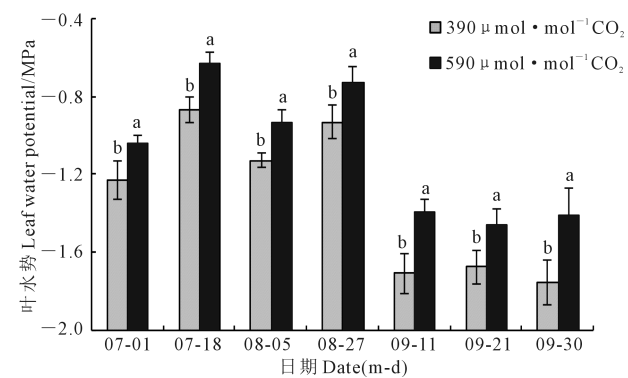


图 7 CO₂ 浓度增加对马铃薯叶片水势的影响

Fig.7 Effects of elevated CO₂ concentration on leaf water potential of potato

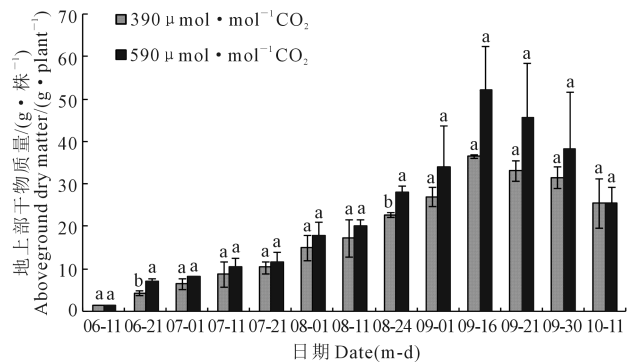


图 8 CO₂ 浓度增加对马铃薯地上部干物质积累的影响

Fig.8 Effects of elevated CO₂ concentration on aboveground dry matter accumulation of potato

2.3.2 对产量及其构成要素的影响 由表 2 可知,随着 CO₂ 浓度的升高,马铃薯单株茎秆质量、结薯总数、单株薯块质量、最大薯块质量、鲜茎质量、薯茎比、理论产量及实际产量均呈增加趋势;单株主茎数变化不大,基本为 1~2 个,且以 2 个居多;而屑薯率呈下降趋势。与对照相比,590 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}\text{CO}_2$ 处理下的马铃薯单株茎秆质量、结薯总数、单株薯

块质量、最大薯块质量、鲜茎质量、薯茎比、理论产量及实际产量分别增加了 12.24% ($P>0.05$)、22.22% ($P>0.05$)、80.68% ($P<0.05$)、28.63% ($P<0.05$)、26.27% ($P>0.05$)、50.14% ($P>0.05$)、103.27% ($P>0.05$) 和 14.66% ($P<0.05$),屑薯率下降了 48.35% ($P>0.05$)。

2.4 CO₂ 浓度增加对马铃薯块茎品质的影响

通过分析 CO₂ 浓度升高条件下马铃薯各品质构成要素(表 3)发现,随着 CO₂ 浓度的增加,马铃薯块茎水分、蛋白质、维生素 C 含量以及铁、锌、铜微量元素含量均呈下降趋势,分别下降了 3.43%、11.78%、13.09%、25.58%、31.94% 和 9.76%;而粗淀粉、粗脂肪、粗纤维和还原糖含量呈增加趋势,分别增加了 10.56%、240.00%、14.28%、106.38%。其中水分、蛋白质、粗淀粉、粗脂肪、维生素 C 以及铁、锌含量两浓度处理之间差异显著,而粗纤维、还原糖和铜含量两浓度处理之间差异不显著。CO₂ 浓度升高造成马铃薯营养物质以及微量元素含量下降的原因可能是,随着大气 CO₂ 浓度增加,叶片的气孔导度(G_s)下降,导致蒸腾拉力下降,土壤中营养物质向作物体内的转运效率下降^[26]。CO₂ 浓度升高导致马铃薯营养物质以及微量元素含量下降,不利于改善人体内维生素和矿物质缺乏的状况^[27]。

3 讨 论

3.1 CO₂ 浓度增加对马铃薯生长发育的影响

物候期是农作物生产管理的重要依据,其变化可以直接或间接地反映气候变化,是气候变化研究中较为关键的指标^[28]。大气变暖对农作物生长最直接影响便是导致了其物候期的改变。在 CO₂ 浓度增加条件下,小麦^[5]、水稻^[29]、大豆^[30] 等作物开花都会提前数天到 2 周左右不等。Miglietta 等^[31] 研究发现,CO₂ 浓度升高使马铃薯开花期提前;Bindi 等^[32] 表明,增加 CO₂ 浓度对马铃薯的发育速度影响不甚明显,但是其花期会有所提前。本研究发现,在大气 CO₂ 浓度由 390 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增至 590 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 时,马铃薯全生育期天数提前 3 d,与上述研究基本一致。

株高是影响作物产量的重要因素^[33]。作物株高既受遗传基因的影响,也受环境因素的影响,后者对株高的影响较大。有研究者认为在马铃薯整个生育期,增加 CO₂ 浓度显著影响植物的同化作用及生长速度,可促进植株生长;且随着 CO₂ 浓度的增加,株高呈递增趋势^[20-21,32]。本研究也表明,CO₂ 浓

表 2 CO₂ 浓度增加对马铃薯产量及其构成要素的影响

Table 2 Effects of elevated CO₂ concentration on yield and composition factors of potato

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	单株茎秆质量 Stem weight/g	单株主茎数 Number of main stems per plant	结薯总数 Total number of tubers	单株薯块质量 Tuber weight per plant/g	最大薯块质量 Maximum potato weight/g
390	110.52±91.40a	1.9±0.70a	3.6±1.02a	107.51±36.24b	181.60±44.37b
590	124.05±88.44a	1.9±0.30a	4.4±1.69a	194.25±70.10a	233.60±38.17a
CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	薯薯率 Rate of small potato/%	鲜茎质量 Fresh stem weight /(g·m ⁻²)	薯茎比 Ratio of potato to stem	理论产量 Theoretical yield /(g·m ⁻²)	实际产量 Actual yield /(g·m ⁻²)
390	1.45±0.02a	884.19±731.18a	1.06±0.54a	860.05±559.99a	773.12±22.40b
590	0.75±0.01a	1116.45±795.93a	1.60±0.79a	1748.21±1491.26a	886.42±6.44a

注:同列不同字母表示 CO₂ 浓度处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different letters in the same column indicate significant difference between different CO₂ concentration treatments ($P<0.05$). The same below.

表 3 CO₂ 浓度增加对马铃薯品质的影响

Table 3 Effects of elevated CO₂ concentration on quality of potato

CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration /(μmol·mol ⁻¹)	水分 Moisture /(g·100g ⁻¹)	蛋白质 Protein /(g·100g ⁻¹)	粗淀粉 Crude starch/%	粗脂肪 Crude fat/%	粗纤维 Crude fiber/%	维生素 C Vitamin C /(mg·100g ⁻¹)	还原糖 Reducing sugar /(g·100g ⁻¹)	铁 Iron /(mg·kg ⁻¹)	锌 Zinc /(mg·kg ⁻¹)	铜 Coppe /(mg·kg ⁻¹)
390	79.6±1.34a	2.26±0.30a	14.78±0.65b	0.03±0.01b	0.47±0.05a	11.97±0.58a	0.16±0.03a	11.47±0.09a	2.40±0.14a	1.37±0.05a
590	76.9±0.24b	2.00±0.30b	16.34±0.21a	0.11±0.02a	0.53±0.05a	10.4±0.28b	0.32±0.10a	8.53±0.74b	1.63±0.21b	1.23±0.26a

度升高(590 μmol·mol⁻¹)促进了马铃薯株高的增加。还有研究认为升高 CO₂ 浓度对马铃薯植株高度无显著影响^[31,34-35],甚至会降低其株高,并将这种降低归因于 CO₂ 浓度增加导致植物的活跃生长期提前结束^[36-37]。

叶面积在很大程度上决定了作物冠层对光的利用能力和生长速率,从而影响作物生物量和产量^[38]。叶面积也同样受遗传基因和环境因素的共同影响。有研究认为,生长期内增加 CO₂ 浓度后,马铃薯叶面积显著高于正常 CO₂ 处理^[21,39];本研究也发现 590 μmol·mol⁻¹ CO₂ 处理马铃薯叶面积指数(LAI)增加显著,且在生长后期增幅更大。Lawson 等^[35]和 Donnelly 等^[36]研究认为,增施 CO₂ 对马铃薯生长早期叶面积指数(LAI)的增加影响较为显著;有些学者则发现随着 CO₂ 浓度增加,不论生长早期还是整个冠层发育期间,马铃薯叶面积指数(LAI)无任何变化^[15,31,34],甚至在 CO₂ 浓度升高的情况下,LAI 在生长季结束时下降更快^[31]。

3.2 CO₂ 浓度增加对马铃薯生物量及产量的影响

大部分研究表明,CO₂ 浓度升高能够增加作物生物量和干物质积累,具有施肥效应。Bindi 等^[32]认为,在马铃薯整个生育期内,CO₂ 浓度升高对地上生物量的影响总体较小且表现不一致,其可促进植株生育早期地上生物量增加;到成熟期,CO₂ 浓度升高导致马铃薯活跃的生长期提前结束,植株衰老加速,其地上生物量低于对照。杨小华等^[21]研究表

明,随着 CO₂ 浓度的增加,马铃薯地上部分鲜重呈显著增长趋势,而 Miglietta 等^[31]通过 FACE 试验研究发现,CO₂ 浓度升高不会增加马铃薯植株地上部干物质量。本研究表明,马铃薯地上部干物质量随 CO₂ 浓度的增加而增加,尤其是在生育中期地上部干物质生产对 CO₂ 浓度的响应值最大,而在生育早期和末期响应值较小。这与上述研究结果有一定差异,可能与品种、农艺和生长条件不同有关。

在室内受控环境以及野外进行的研究均表明,CO₂ 浓度升高影响了马铃薯不同部位的生物量分配模式,促进了干物质向块茎分配,增加了块茎产量。Miglietta 等^[31]研究认为,马铃薯块茎产量增加对 CO₂ 浓度升高的响应基本上是线性的,即 CO₂ 每增加 100 μmol·mol⁻¹,块茎产量便增加 10%;Sicher 等^[40]也发现,提高 CO₂ 浓度促进了马铃薯块茎产量的增加;Craigon 等^[41]研究发现 CO₂ 浓度升高到 680 μmol·mol⁻¹时,可销售的块茎干质量增加了约 17%。不同试验平台(如 OTC、FACE 等)条件下,产量对 CO₂ 浓度升高的响应幅度变化不大^[15,17,34,36];但响应幅度在不同品种和研究地区之间差异较为显著,如 Schapendonk 等^[15]通过 OTC 试验研究表明,马铃薯晚熟品种块茎产量对 CO₂ 浓度升高的响应幅度高于早熟品种,温带地区高于其他地区。还有研究表明,块茎产量的提高伴随着块茎数量的增加,因为 CO₂ 浓度升高会增强马铃薯块茎化过程,扩大其库容,从而提高单株结薯数^[34]。除此之外,CO₂ 浓度升高,块茎也会生

长得更快,单株薯块质量也会增加^[36]。本研究表明,当 CO₂ 浓度增加为 590 μmol · mol⁻¹ 时,半干旱区马铃薯块茎产量提高,单株结薯数和单株薯块质量也有所增加,这与上述研究结果一致。

3.3 CO₂ 浓度增加对马铃薯块茎品质的影响

马铃薯不仅在保障粮食安全方面具有重要作用,其块茎还含有大量的碳水化合物、蛋白质和维生素 C,营养丰富,为保证人类营养做出了重大贡献,如欧洲人每天所需能量的 5% 以及大量营养都来自于马铃薯^[32]。CO₂ 浓度增加对马铃薯块茎不同品质指标的影响有所不同。Kumar 等^[13] 研究表明,CO₂ 浓度增加对马铃薯块茎中氮、磷、钾等养分浓度没有显著影响。杨小华等^[21] 研究发现,增施 CO₂ 可以提高马铃薯淀粉含量,但与正常 CO₂ 浓度处理之间差异不显著。Donnelly 等^[36] 通过 OTC 试验也表明,大气 CO₂ 浓度升高(680 μmol · mol⁻¹) 有助于马铃薯块茎淀粉含量和维生素 C 浓度增加,但会降低块茎氮含量。本研究发现,随着 CO₂ 浓度升高(590 μmol · mol⁻¹),马铃薯块茎的淀粉含量增加,但维生素 C 含量却降低。

4 结 论

与对照相比,CO₂ 浓度增加至 590 μmol · mol⁻¹ 后,马铃薯全生育期天数缩短了 3 d,株高、叶面积指数(LAI)、叶绿素含量和叶片水势分别平均增加了 4.98%、60.10%、6.56% 和 19.06%;马铃薯单株茎秆质量、结薯总数、单株薯块质量、最大薯块质量、鲜茎质量、薯茎比、理论产量及实际产量分别增加了 12.24%、22.22%、80.68%、28.63%、26.27%、50.14%、103.27% 和 14.66%,屑薯率下降了 48.35%;马铃薯块茎水分、蛋白质、维生素 C 含量以及铁、锌、铜元素含量分别下降了 3.43%、11.78%、13.09%、25.58%、31.94% 和 9.76%,而粗淀粉、粗脂肪、粗纤维和还原糖含量分别增加了 10.56%、240.00%、14.28%、106.38%。

参 考 文 献:

[1] 司福艳,郭乔周,董宝娣,等. CO₂ 浓度升高对不同水分养分条件下小麦幼苗生长的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(1): 54-59.
SI F Y, QIAO Y Z, DONG B D, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on the growth of wheat seedlings under different water potential and nutrition concentrations[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(1): 54-59.

[2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 225-248.

[3] YASUOR H, TAMIR G, STEIN A, et al. Does water salinity affect pepper plant response to nitrogen fertigation? [J]. Agricultural Water Management, 2017, 191: 57-66.

[4] 孟凡超,郭军,周莉,等. 气温、CO₂ 浓度和降水交互作用对作物生长和产量的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(12): 4117-4126.
MENG F C, GUO J, ZHOU L, et al. Interactive effects of temperature, CO₂ concentration and precipitation on growth and yield of crops [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(12): 4117-4126.

[5] 张凯,王润元,王鹤龄,等. CO₂ 浓度升高对半干旱区春小麦生长发育及产量影响的试验研究[J]. 干旱气象, 2017, 35(2): 306-312.
ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effects of elevated CO₂ concentration on growth and yield of spring wheat based on observational experiment in semi-arid area[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(2): 306-312.

[6] 房世波,沈斌,谭凯炎,等. 大气[CO₂]和温度升高对农作物生理及生产的影响[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(5): 1116-1124.
FANG S B, SHEN B, TAN K Y, et al. Effect of elevated CO₂ concentration and increased temperature on physiology and production of crops [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2010, 18(5): 1116-1124.

[7] 刘超,胡正华,陈健,等. 不同 CO₂ 浓度升高水平对水稻光合特性的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(2): 246-254.
LIU C, HU Z H, CHEN J, et al. Effects of elevated CO₂ concentration levels on photosynthetic characteristics of rice [J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27(2): 246-254.

[8] 班文慧,王星强,柳强娟,等. 施氮对块茎形成期高温胁迫后马铃薯块茎产量、淀粉含量和相关酶代谢活性的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(2): 422-434.
BAN W H, WANG X Q, LIU Q J, et al. Effects of nitrogen application rate on potato yield, starch content and related enzyme metabolic during tuber formation after high temperature stress [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(2): 422-434.

[9] 冯朋博,王月宁,慕宇,等. 马铃薯块茎形成期增温对其淀粉含量、淀粉酶活性及产量的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(6): 1253-1258.
FENG P B, WANG Y N, MU Y, et al. Effect of high temperature on potato starch content, amylase activity and yield [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(6): 1253-1258.

[10] 张强,王润元,邓振镭,等. 中国西北干旱气候变化对农业与生态影响及对策[M]. 北京: 气象出版社, 2012: 148-152.
ZHANG Q, WANG R Y, DENG Z Y, et al. Impact of arid climate change on agriculture and ecology in Northwest China and its countermeasures [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 148-152.

[11] 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.
ZHAO H, WANG R Y, WANG H L, et al. Effect of soil temperature and moisture increase during seedling period on biomass accumulation of potato in semi-arid region [J]. Journal of Arid Meteorology, 2013, 31(2): 290-297.

[12] CONN J S, COCHRAN V L. Response of potato (*Solanum tuberosum* L.) to elevated atmospheric CO₂ in the North American subarctic [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2006, 112(1): 49-57.

[13] KUMAR P, MINHAS J S, SHARMA J, et al. Impact of elevated CO₂ level on growth, tuber yield and mineral content of Indian potato cultivars [J]. Potato Journal, 2018, 45(2): 123-130.

[14] AIEN A, PAL M, KHETARPAL S, et al. Impact of elevated atmospheric CO₂ concentration on the growth, and yield in two potato cultivars [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16: 1661-1670.

[15] SCHAPENDONK A 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]. *Australian Journal of Plant Physiology*, 2000, 27 (12): 1119-1130.

[16] 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]. *Annals of Botany*, 1999, 83(3): 243-251.

[17] WHEELER R M, TIBBITTS T W, FITZPATRICK A H. Carbon dioxide effects on potato growth under different photoperiods and irradiance[J]. *Crop Science*, 1991, 31(5): 1209-1213.

[18] CHEN C T, SETTER T L. Response of potato dry matter assimilation and partitioning to elevated CO₂ at various stages of tuber initiation and growth[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2012, 80: 27-34.

[19] 李晓静, 樊明寿. 增施 CO₂ 对设施马铃薯生长及氮素积累的影响[J]. *华北农学报*, 2011, 26(4): 174-177.

LI X J, FAN M S. Effect of elevated CO₂ on nitrate and nitrogen accumulation of potato at different nitrogen level[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2011, 26(4): 174-177.

[20] 赵竞宇, 刘广品, 崔世茂, 等. 增施 CO₂ 对马铃薯植株光合特性及产量的影响[J]. *作物杂志*, 2016, (3): 79-83.

ZHAO J Y, LIU G J, CUI S M, et al. Effects of CO₂ supplements on photosynthesis of potato plants and micro tuber yield [J]. *Crops*, 2016, (3): 79-83.

[21] 杨小华, 吴静, 徐宝连, 等. 增施 CO₂ 马铃薯生长发育动态变化研究[J]. *安徽农业科学*, 2020, 48(21): 162-164.

YANG X H, WU J, XU B L, et al. Study on growth and development dynamics of potato under increasing CO₂ application[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2020, 48(21): 162-164.

[22] 秦跃龙. CO₂ 对马铃薯块茎采后品质的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.

QIN Y L. Study of CO₂ on the quality of potato tuber postharvest[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.

[23] 王友生, 王多尧. 不同覆盖种植模式对马铃薯土壤温度、水分及产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(6): 59-64.

WANG Y S, WANG D Y. Effects of mulching patterns on soil temperature, soil moisture and yield of potato[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(6): 59-64.

[24] 张凯, 王润元, 王鹤龄, 等. 增温对半干旱区春小麦田间水分特征的影响[J]. *干旱气象*, 2015, 33(1): 52-58.

ZHANG K, WANG R Y, WANG H L, et al. Effect of warming on field water characteristics of spring wheat in semi-arid area [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2015, 33(1): 52-58.

[25] 国家气象局. 农业气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1993: 7-11.

China Meteorological Administration. China agricultural meteorological observation guidelines [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 7-11.

[26] 宋练, 蔡创, 朱春梧. [CO₂] 升高对粮食作物影响的研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(4): 786-796.

SONG L, CAI C, ZHU C W. Review on crop responses to rising atmospheric [CO₂] [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 786-796.

[27] ZHU C W, KOBAYASHI K, LOLADZE I, et al. Carbon dioxide (CO₂) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries[J]. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaaq1012.

[28] 杨敏慎, 刘晓雨, 郭辉. 气候变暖和 CO₂ 浓度升高对农作物的影响[J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(1): 246-258.

YANG M S, LIU X Y, GUO H. Effects of climate warming and elevated CO₂ concentration on crops[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 37(1): 246-258.

[29] 黄建晔, 杨连新, 杨洪建, 等. 开放式空气 CO₂ 浓度增加对水稻生育期的影响及其原因分析[J]. *作物学报*, 2005, 31(7): 882-887.

HUANG J Y, YANG L X, YANG H J, et al. Effects of free-air CO₂ enrichment (FACE) on growth duration of rice (*Oryza sativa* L.) and its cause[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2005, 31(7): 882-887.

[30] 郭建平, 高素华, 白月明, 等. CO₂ 浓度倍增对大豆影响的试验研究[J]. *大气科学*, 1996, 20(2): 243-249.

GUO J P, GAO S H, BAI Y M, et al. An experiment study of the impacts of CO₂ concentration doubling on soybean growth [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1996, 20(2): 243-249.

[31] MIGLIETTA F, MAGLIULO V, BINDI M, et al. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.): development, growth and yield[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(2): 163-172.

[32] BINDI M, FIBBI L, FRABOTTA A, et al. Free air CO₂ enrichment of potato (*Solanum tuberosum* L.). In: annual report for changing climate and potential impacts on potato yield and quality (CHIP), Contract ENV4-CT97-0489 [M]. Brussels, Belgium: Commission of the European Union, 1998: 133-163.

[33] PENG T, ZHONG B Q, LING Y H, et al. Developmental genetics analysis for plant height in indica hybrid rice across environments[J]. *Rice Science*, 2009, 16(2): 111-118.

[34] FINNAN J M, DONNELLY A, BURKE J I, et al. The effects of elevated concentrations of carbon dioxide and ozone on potato (*Solanum tuberosum* L.) yield [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2002, 88(1): 11-22.

[35] LAWSON T, CRAIGON J, BLACK C R, et al. Effects of elevated carbon dioxide and ozone on the growth and yield of potatoes (*Solanum tuberosum*) grown in open-top chambers[J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111(3): 479-491.

[36] DONNELLY A, CRAIGON J, BLACK C R, et al. Does elevated CO₂ ameliorate the impact of O₃ on chlorophyll content and photosynthesis in potato (*Solanum tuberosum*)? [J]. *Physiologia Plantarum*, 2001, 111(4): 501-511.

[37] DE TEMMERMAN L, HACOUR A, GUNS M. Changing climate and potential impacts on potato yield and quality ‘CHIP’: introduction, aims and methodology[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17(4): 233-242.

[38] VAN DELDEN A, KROPFF M J, HAVERKORT A J. Modeling temperature- and radiation-driven leaf area expansion in the contrasting crops potato and wheat[J]. *Field Crops Research*, 2001, 72(2): 119-141.

[39] CAO W, TIBBITTS T W, WHEELER R M. Carbon dioxide interactions with irradiance and temperature in potatoes [J]. *Advances in Space Research*, 1994, 14(11): 243-250.

[40] 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]. *Photosynthesis Research*, 1999, 62(2): 155-163.

[41] CRAIGON J, FANGMEIER A, JONES M, et al. Growth and marketable-yield responses of potato to increased CO₂ and ozone[J]. *European Journal of Agronomy*, 2002, 17(4): 273-289.