文章编号:1000-7601(2022)01-0104-09

doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2022.01.12

## $CO_2$ 浓度与温度升高对谷子各生育期

## 土壤微生物生物量的影响

焦健宇1,郑粉莉1,2,王 婧1,王雪松1,魏晗梅1

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西杨凌 712100)

摘 要:为探究 CO,浓度升高、增温以及二者交互作用对谷子各生育期土壤微生物生物量的影响,采用盆栽试 验,通过人工气候室控制环境 CO2浓度和温度,设置对照(400 μmol·mol<sup>-1</sup> CO2浓度和 22℃环境温度,CK)、CO2浓度 升高(700 µmol·mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度和 22℃环境温度,EC)、CO<sub>2</sub>浓度升高和增温 4℃(700 µmol·mol<sup>-1</sup> CO,浓度,26℃环 境温度,EC+T)3种气候条件,且每个气候条件均设置充分供水(70.0%田间持水量)和轻度干旱(50.0%田间持水量) 两种水分处理,分析 CO,浓度升高、增温 4℃以及二者交互作用对谷子各生育期(开花期、开花后 10 d、灌浆期、成熟 期)土壤微生物生物量碳(MBC)、土壤微生物生物量氮(MBN)、土壤微生物生物量磷(MBP)的影响。结果表明:在 充分供水条件下,CO,浓度升高使土壤 MBC、MBN、MBP 含量分别增加了 27.01%~102.52%、27.02%~54.60%、74.05% ~161.42%(P<0.05),但其影响程度随着谷子生长而逐渐减弱;与 EC 相比, EC+T处理使各生育期土壤 MBC、MBN、 MBP 含量分别降低了 19.77%~28.22% \ 8.56%~20.24% \ 29.54%~39.70% (P<0.05)。在轻度干旱条件下,谷子各生 育期的土壤 MBC 和 MBN 含量在 3 种气候情景(CK、EC、EC+T)间无显著差异,各生育期土壤 MBP 含量无明显变化 规律。在3种气候条件下,与充分供水相比,轻度干旱使开花期、开花后10d、灌浆期土壤 MBC 和 MBN 含量分别降 低了 14.70%~38.53%和 37.06%~78.10%(P<0.05),但其对土壤 MBP 含量影响不显著。在充分供水的条件下,CO2 浓度升高和增温的交互作用显著增加了谷子开花期和开花后 10 d 的土壤 MBC 和 MBN 含量,二者在开花期增幅分 别为 44.37%和 16.15%(P<0.05),在开花后 10 d 增幅分别为 45.38%和 27.18%(P<0.05);CO,浓度升高和生育期的 交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量有显著影响;但增温和生育期的交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量均无显 著影响。对于谷子地下生物量而言,在充分供水条件下,CO2浓度升高使开花期和开花后10d谷子地下生物量增加 了 85.71% 和27.38% (P<0.05), 但对灌浆期和成熟期的地下生物量的影响不显著; 与 EC 相比, EC+T 处理使开花期和 开花后10d的地下生物量降低了15.12%和12.44%(P<0.05),但对灌浆期和成熟期地下生物量的影响不显著。在 轻度干旱条件下.3种气候情景间的谷子地下生物量总体上无显著差异。

关键词:CO<sub>2</sub>浓度升高;温度升高;谷子;地下生物量;土壤微生物生物量;轻度干旱 中图分类号:S154.3;S515 文献标志码:A

## Effects of CO<sub>2</sub> concentration and temperature elevation on soil microbial biomass at different millet growth stages

JIAO Jianyu<sup>1</sup>, ZHENG Fenli<sup>1,2</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, WANG Xuesong<sup>1</sup>, WEI Hanmei<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil

and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract**: This study aimed at quantifying the effects of elevated  $CO_2$  concentration and temperature raising, and their interactions on soil microbial biomass at different growth stages of millet. A pot experiment was conducted within artificial climate chambers. Six treatments were designed with three climate scenarios under two water supply

通信作者:郑粉莉(1960-),女,陕西蓝田人,研究员,研究方向为土壤侵蚀与水土保持、气候变化与生态水文。E-mail: flzh@ms.iswc.ac.cn

收稿日期:2021-03-06 修回日期:2021-04-17

基金项目:中国科学院国际合作局对外合作重点项目"气候变化对中国黄河中游和塞尔维亚萨瓦河流域农业水土环境影响评估及适应对 策"(161461KYSB20170013)

作者简介:焦健宇(1997-),男,陕西榆林人,硕士研究生,研究方向为气候变化与土壤微生物。E-mail:2019051382@ Nwafu.edu.cn

conditions. The three climate scenarios included one control experiment (400  $\mu mol$   $\cdot$  mol  $^{-1}$  CO  $_2$  concentration and 22°C temperature, CK), CO<sub>2</sub> concentration elevation and temperature keeping the same as CK (700  $\mu$ mol  $\cdot$  mol<sup>-1</sup> CO2 concentration and 22°C temperature, EC), and both CO2 concentration and temperature elevation (700 µmol • mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> concentration and 26 °C temperature, EC+T). Meanwhile, two water conditions (adequate water supply of 70% field capacity; mild drought of 50% field capacity) were design under each climate scenario. The microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and microbial biomass phosphorus (MBP) contents were measured at four millet growth stages, i.e., anthesis, 10 d after anthesis, filling stage, maturity. The results indicated that under adequate water condition, the elevation of CO<sub>2</sub> concentration increased contents of soil MBC, MBN and MBP by 27.01% ~ 102.52%, 27.02% ~ 54.60% and 74.05% ~ 161.42% (P<0.05), respectively; but the effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration on soil microbial biomass showed decreasing trends with millet growth. Compared with the EC treatment, EC+T treatment reduced contents of soil MBC, MBN and MBP by 19.77% ~ 28.22%,  $8.56\% \sim 20.24\%$  and  $29.54\% \sim 39.70\%$  (P < 0.05), respectively. Under the mild drought condition, there were no significant differences in soil MBC and MBN contents at four millet growth stages among three climate scenarios, and the content of soil MBP did not have an obvious changing trend. Compared with adequate water supply condition, mild drought condition decreased contents of soil MBC and MBN by 14.70% ~ 38.53% and 37.06% ~ 78.10% (P<0.05), respectively, during the stages of anthesis, 10 d after anthesis and filling stage, but it had no significantly impacted on soil MBP.Under the adequate water condition, the interaction of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rising significantly increased contents of soil MBC and MBN during the stages of anthesis and 10 d after anthesis, MBC and MBN contents increased 44.37% and 16.15% at anthesis, and 45.38% and 27.18% (P < 0.05) at 10 d after anthesis, while the interaction of CO<sub>2</sub> concentration and growth stage had significant impacts on soil microbial biomass. In addition, the interaction of temperature increasing and millet growth stage had no significant influences on the contents of soil MBC, MBN and MBP. For millet belowground biomass, under adequate water condition, an elevation of CO<sub>2</sub> concentration increased belowground biomass by 85.71% and 27.38% (P < 0.05) during the stages of anthesis and 10 d after anthesis, but there were no significant influences in the belowground biomass during filling stage and maturity. Compared with the EC treatment, EC+T treatment reduced the belowground biomass by 15.12% and 12.44% (P < 0.05) during the stages of anthesis and 10 d after anthesis, but it had no significant effects on the belowground biomass during the stages of falling stage and maturity. Under the mild drought condition, there were no significant differences in the belowground biomass at four millet growth stages among three climate scenarios.

**Keywords**: elevated CO<sub>2</sub> concentration; warming; millet; belowground biomass; soil microbial biomass; mild drought

自工业革命以来,由于化石燃料的大量使用以 及土地的不合理利用,全球气候发生显著变化,并 对全球生态系统产生广泛影响,其中农业生态系统 最易受到影响<sup>[1-2]</sup>。Mooney 等<sup>[3]</sup>认为气候变化对 全球农业生态系统的影响总体呈消极的趋势,而土 壤为农作物的生长提供养分和水分,具有重要的研 究价值。土壤微生物生物量(Microbial biomass, MB)虽然只占土壤相应元素的 1%~6%,但在生态 系统中发挥着重要作用,参与土壤养分(碳、氮、磷 等)和土壤有机质的形成、转化、分解,且土壤微生 物生物量对外界环境变化响应十分灵敏,故可作为 生态功能变化的重要指标<sup>[4]</sup>。

目前,气候变化对土壤微生物生物量影响方面

的研究成果较多,且涵盖各种环境条件和生态系统<sup>[5-6]</sup>。多数研究表明,CO<sub>2</sub>浓度升高增加了土壤微 生物生物量<sup>[6-8]</sup>,但部分研究发现在养分贫瘠的生 态系统中,CO<sub>2</sub>浓度升高对土壤微生物生物量并无 显著影响<sup>[9-10]</sup>。同时,Sun等<sup>[11]</sup>研究发现由于土壤 微生物具有自我适应性能力,长期高 CO<sub>2</sub>浓度可能 使土壤微生物生物量无显著变化。有研究表明不 同生态系统类型差异(林地、草地、农田)也会导致 土壤微生物生物量对 CO<sub>2</sub>浓度升高的响应不一 致<sup>[12]</sup>。此外,Bhattacharyya 等<sup>[8]</sup>和 Fang 等<sup>[13]</sup>研究 发现,在水稻和小麦的不同生育期,CO<sub>2</sub>浓度升高对 土壤微生物生物量的影响不尽相同。由于受环境 条件(海拔高度、温度、土壤水分有效性)<sup>[14]</sup>、增温 幅度(<2℃、>2℃)<sup>[5]</sup>、增温时长(<3 a、>3 a)<sup>[15]</sup>、增 温时段(夜间增温、昼间增温、全天增温)<sup>[16]</sup>等因素 的影响,土壤微生物生物量变化对增温的响应也存 在较大争议。与单因素气候因子相比,多种气候因 子交互作用对土壤微生物生物量的相关研究较少, 且研究结果也不尽相同,如国内在青藏高原和沿海 平原的研究结果截然相反<sup>[17-19]</sup>。目前,相关研究鲜 有涉及旱地农业生态系统以及作物不同生育期土 壤微生物生物量对多种气候因子交互作用的响应。 因此,本研究以干旱半干旱地区典型作物谷子(*Setariaitalica*)为研究对象,基于人工气候室情景模拟 和盆栽试验,分析土壤微生物生物量对 CO<sub>2</sub>浓度升 高、增温和谷子生育期及其交互作用的响应特征, 以期为缓解气候变化对旱地农作物的不利影响提 供理论支持。

## 1 材料与方法

#### 1.1 试验材料

#### 表 1 供试土壤基本性质

Table 1 Basic properties of the tested soil

土壤性质 Soil properties	分析方法 Analysis method	分析结果 Analyzed results
有机质 Organic matter	重铬酸钾外加热法 Potassium dichromate method	$31.03/(g \cdot kg^{-1})$
全氮 Total nitrogen	凯氏定氮法 Kjeldahl determination	$1.51/(g \cdot kg^{-1})$
全磷 Total phosphorus	钼锑钪比色法 Molybdenum antimony scandium colorimetry	$0.97/(g \cdot kg^{-1})$
速效磷 Available phosphorus	钼锑钪比色法 Molybdenum antimony scandium colorimetry	26.59/(mg · kg <sup>-1</sup> )
pH 值 pH value	pH 计(水土比 2.5:1.0) pH meter (water soil ratio 2.5:1.0)	8.30
容重 Bulk density	环刀法 Cutting ring method	$1.26/(g \cdot cm^{-3})$

#### 1.2 试验设计

试验设置 CO<sub>2</sub>浓度(400 µmol・mol<sup>-1</sup>和 700 µmol・mol<sup>-1</sup>)、温度(当前环境温度和增温 4℃)、土 壤水分(充分供水和轻度干旱)3 种环境,其中 CO<sub>2</sub> 浓度和温度的设置分别代表当前环境条件和本世

纪末的环境条件。当前环境 CO<sub>2</sub>浓度(400 µmol·mol<sup>-1</sup>)的设计是根据 Mauna Loa 气象台(https://www.CO<sub>2</sub>.earth)对于1981—2010年全球年均 CO<sub>2</sub>浓度的监测数据,本世纪末的 CO<sub>2</sub>浓度(700 µmol·mol<sup>-1</sup>)设计来自于政府间气候变化专门委员 会(Intergovernmental panel on climate change, IPCC) 第五次报告的预测<sup>[1]</sup>。当前环境温度的设计依据 为国家气象科学数据中心(武功站)1981—2010年 6—9月的多年日平均气温(日均温 22℃),增温 4℃ 的依据为 IPPC 对于本世纪末增温幅度的预测(日均 温 26℃)<sup>[1]</sup>。依据前人研究设计充分供水和轻度干 旱两种水分梯度,分别为70.0%田间持水量(18.0%质 量含水量)和 50.0% 田间持水量(13.0% 质量含水 量)<sup>[20]</sup>。

根据 CO<sub>2</sub>浓度和温度设置,试验共设计 3 种气 候条件(表 2),包括对照(400 μmol · mol<sup>-1</sup> CO,浓 度,22℃的环境温度,CK)、CO2浓度升高而温度保 持不变(700 μmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度,22℃环境温度, EC)、CO,浓度升高和增温 4℃ (700 µmol · mol<sup>-1</sup> CO,浓度,26 ℃环境温度, EC+T),且在每个气候条 件下均设计充分供水和轻度干旱两种水分处理。 此外,在谷子开花期、开花后10d、灌浆期、成熟期4 个生育期采集各试验处理的根系和土壤样品,分析 土壤微生物生物量碳 (Microbial biomass carbon, MBC)、微生物生物量氮(Microbial biomass nitrogen, MBN)和微生物生物量磷(Microbial biomass phosphorus, MBP),定量研究 CO,浓度和温度升高对谷 子各生育期土壤微生物生物量的影响。据此,本试 验共有6种试验处理,每个处理设置4个重复,共计 盆栽数为96盆。

#### 1.3 试验步骤

谷子从播种(2019年4月19日)至拔节期 (2019年6月5日)均在室外生长,并在三叶期后每 盆定苗3株,且此期间通过称重法维持各盆栽土壤 含水量为60%田间持水量(15.6%质量含水量)。 拔节期后将所有盆栽随机放入3个气候室,并依据 试验处理(表2)分别将3个气候室的气候条件设置 为对照(400 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度,22℃环境温度, CK)、CO<sub>2</sub>浓度升高(700 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度,22℃ 环境温度,EC)、CO<sub>2</sub>浓度升高和温度上升4℃(700 μmol·mol<sup>-1</sup>CO<sub>2</sub>浓度,26℃环境温度,EC+T),并将 每个气候室的盆栽谷子随机分成两组,分别控制土 壤含水量为50.0%FC(13.0%质量含水量)和70.0% FC(18.0%质量含水量)。根据谷子农田环境条件,

1	07	
н	()/	
	07	

Table 2 Experimental design						
试验处理	土壤含水量/%	$CO_2$ 浓度/( $\mu$ mol·mol <sup>-1</sup> )	温度/℃	生育期		
Experimental treatments	Soil moisture content	$\rm CO_2$ concentration	Temperature	Growth stage		
	13.0(50.0% FC)	400	22(当前环境温度)			
Control(CK)	18.0(70.0% FC)	400	(Ambient temperature)			
CO2浓度升高	13.0(50.0% FC)	700	22(当前环境温度)	开花期、开花后 10 d、灌浆		
Elevated $CO_2$ concentration (EC)	18.0(70.0% FC)	700	(Ambient temperature)	· 別、成熟期		
CO2浓度升高和增温	13.0(50.0% FC)		26(   緧泪 4℃ )	filling stage, maturity		
Elevated $CO_2$ concentration+ temperature elevation (EC+T)	18.0(70.0% FC)	700	(Temperature rising 4°C)			

表 2 试验设计 Fable 2 Experimental design

注:FC—田间持水量。 Note: FC—Field capacity.

#### 表 3 人工气候室温度设置

Table 3 Temperature setting of artificial climate chambers

生育阶段	当前环境 Ambient ter	温度/℃ mperature	增温 4℃/℃ Temperature increased 4℃		
Growth stage	$T_{\rm max}/T_{\rm min}$	$T_{\mathrm{mean}}$	$T_{\rm max}/T_{\rm min}$	$T_{\rm mean}$	
拔节期 Jointing stage	26/16	20	30/20	24	
开花期 Anthesis	28/18	22	32/22	26	
灌浆期 Filling stage	28/18	22	32/22	26	
成熟期 Maturity	28/18	22	32/22	26	

注:  $T_{max}$ —日最高温( $\mathcal{C}$ ),  $T_{min}$ —日最低温( $\mathcal{C}$ ),  $T_{mean}$ —日均 温( $\mathcal{C}$ )。

Note:  $T_{\max}$ —highest daily temperature (°C),  $T_{\min}$ —lowest daily temperature (°C),  $T_{mean}$ —mean daily temperature (°C).

设置光周期为 12 h/12 h,光照时间为8:00— 20:00,最大光强为600 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,空气相对 湿度设置为60%。此外,在整个谷子生长过程中, 基于大气温度日变化对3个气候室的温度进行动态 设置(表3),每日最高温在12:00—14:00,最低温 在0:00和24:00。在整个谷子生长过程中,所有 盆栽随机排列,每7d调换一次位置,减少由于气候 室内各部位光照、温度和空气湿度的差异造成的影 响,直至2019年9月19日后所有谷子全部收获。

### 1.4 样品采集和测定方法

分别在谷子开花期、开花后 10 d、灌浆期和成熟 期采集各试验处理的根系和土壤样品,但由于不同 气候情景和不同供水条件的差异,导致谷子生长发 育之间存在差异,所以对谷子同一生育期不同处理 间根系和土壤样品的采集时间不相同。具体为: (1)分别在播种后 92、81、79 d 采集开花期 CK、EC、 EC+T 3 种气候情景中的根系和土壤样品;(2)分别 在播种后 102、92、91 d 采集开花后 10 d 3 个气候情 景中的根系和土壤样品;(3)分别在播种后 112、103 d 和 101 d 采集灌浆期 3 个气候情景中的根系和土 壤样品;(4)分别在播种后 153、145、144 d 采集成熟 期 3 个气候情景中的根系和土壤样品。每次采样时 对于各试验处理随机选择4盆进行破坏性采样。采 样结束后,将根系样品在105℃进行杀青,然后在 60℃烘至恒重,并称其质量。所有土样过2mm 筛后 保存于4℃冰箱,土壤 MBC和 MBN 含量的测量采用 氯仿熏蒸法-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液浸提-multi N/C3100分析仪 测定,MBP 的测定采用氯仿熏蒸法-NaHCO<sub>3</sub>溶液浸 提-UV-2600 型紫外分光光度计比色测定<sup>[21]</sup>。

#### 1.5 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2010 进行分析及 相关图表制作,采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析。 采用重复测量(Repeated analysis)和最小显著性差异 法(LSD)分别进行方差分析和显著性检验(α=0.05)。 利用 CANOCO5.0 软件对土壤 MBC、MBN、MBP 与各影 响因子的关系进行主成分(PCA)分析。图中数据为平 均值±标准误,表中数据为平均值±标准差。

## 2 结果与分析

## 2.1 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温对不同水分条件下谷子各 生育期土壤微生物生物量的影响

2.1.1 土壤微生物生物量碳(MBC) 图 1 表明,与 CK 处理(400 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度,22℃的环境温 度)相比,在充分供水(土壤含水量为70% FC)条件 下,CO<sub>2</sub>浓度升高(700 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度,22℃ 环境温度,EC)对成熟期土壤 MBC 含量的影响不显 著(P>0.05),但其使开花期、开花后 10 d、灌浆期谷 子土壤 MBC 含量分别增加了 28.94%、102.52%、 27.01%(P<0.05)。与仅 CO<sub>2</sub>浓度升高(EC)的处理 相比,充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高和增温 4℃交 互作用(700 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度,26℃环境温度, EC+T)对开花期土壤 MBC 含量无显著影响(P> 0.05),但其使开花后 10 d、灌浆期、成熟期土壤 MBC 含量分别降低了 28.22%、22.32%、19.77%(P< 0.05)。与 CK 相比,在充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升 高和增温 4℃的交互作用(EC+T)使开花期和开花 后 10 d 的土壤 MBC 含量分别增加了 44.37% 和 45.38%(P<0.05)。轻度干旱条件下(土壤含水量为 50% FC),3 种气候情景(CK、EC、EC+T)之间的土 壤 MBC 含量在谷子各生育期总体上无显著差异(P>0.05)。此外,与充分供水条件相比,在 3 个气候情 景下,轻度干旱使开花期、开花后 10 d、灌浆期谷子 土壤 MBC 含量降低了 14.70% ~ 38.53%(P<0.05), 但其对成熟期土壤 MBC 的影响不显著(P>0.05)。

2.1.2 土壤微生物生物量氮(MBN) 由图 2 可以 看出,与 CK 相比,在充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高 (EC)处理使谷子开花期和开花后 10 d 的土壤 MBN 含量分别增加了 27.02%和54.60%(P<0.05),但其 对灌浆期和成熟期土壤 MBN 含量的影响不显著(P >0.05)。与 CO<sub>2</sub>浓度升高(EC)处理相比,在充分供 水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高和增温4℃的交互作用(EC +T)使开花期、开花后 10 d、灌浆期、成熟期的土壤 MBN 含量分别降低了 8.56%、17.73%、13.36%、 20.24%(P<0.05)。与 CK 相比,在充分供水条件 下,CO<sub>2</sub>浓度升高和增温4℃的交互作用使开花期和 开花后 10 d 的土壤 MBN 含量分别增加了 16.15% 和27.18%(P<0.05)。轻度干旱的条件下,3 种气候 情景(CK、EC、EC+T)之间的土壤 MBN 含量在谷子 各生育期总体上无显著差异(P>0.05)。此外,与充 分供水相比,在 3 种气候情景下,轻度干旱使开花 期、开花后 10 d、灌浆期土壤 MBN 含量降低了 37.06%~78.10%(P<0.05)。





Note: CK—400  $\mu$ mol  $\cdot$  mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> and ambient temperature, EC—700  $\mu$ mol  $\cdot$  mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> and ambient temperature, EC+T—700  $\mu$ mol  $\cdot$  mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub> and temperature rising 4°C; Different lowercase letters indicate significant differences among treatments in the same growth stage at *P*<0.05 level. The same below.

图 1 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温对谷子各生育期土壤微生物生物量碳(MBC)的影响

Fig.1 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rising on soil microbial biomass carbon (MBC) at different millet growth stages



图 2 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温对谷子各生育期土壤微生物生物量氮(MBN)的影响

Fig.2 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rising on soil microbial biomass nitrogen (MBN) at different millet growth stages

土壤微生物生物量磷(MBP) 2.1.3 由图3可知, 与对照(CK)处理相比,在充分供水条件下,CO,浓度 升高(EC)处理使谷子开花期和开花后 10 d 的土壤 MBP 含量分别增加了 74.05% 和 161.42% (P<0.05), 但其对灌浆期和成熟期土壤 MBP 含量的影响不显著 (P>0.05)。与仅 CO,浓度升高(EC)处理相比,在充 分供水条件下, CO,浓度升高和增温4℃的交互作用 (EC+T)使开花期、开花后 10 d、灌浆期、成熟期的土 壤 MBP 含量分别降低了 39.70%、29.54%、34.61%、 30.35%(P<0.05)。与CK相比,在充分供水的条件 下,CO<sub>2</sub>浓度升高和增温4℃的交互作用(EC+T)对 开花期的土壤 MBP 无显著影响(P>0.05),但其使开 花后 10 d 的土壤 MBP 含量增加了 84.20%(P<0.05)。 在轻度干旱条件下,3种气候情景(CK、EC、EC+T)间 土壤 MBP 含量在谷子各生育期无显著变化规律。与 充分供水条件相比,在3种气候情景下,轻度干旱对各 生育期土壤 MBP 含量总体上无显著影响(P>0.05)。

## 2.2 CO<sub>2</sub>浓度升高、增温、生育期及其交互作用对土 壤微生物生物量的影响

由表4可知,在充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度由 400 µmol·mol<sup>-1</sup>升高到700 µmol·mol<sup>-1</sup>对土壤 MBC、MBN、MBP含量有显著影响(P < 0.05);同时 在700 µmol·mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度下,增温4℃对土壤 MBC、MBN、MBP含量也有显著影响(P < 0.05);CO<sub>2</sub> 浓度升高和增温的交互作用对土壤 MBC含量亦有 显著影响,但对土壤 MBN和MBP含量无显著影响 (P > 0.05), CO<sub>2</sub>浓度升高与生育期交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP有显著影响(P < 0.05);增温与生 育期交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP均未造成显 著影响(P > 0.05), 而CO<sub>2</sub>浓度升高、增温、生育期的 交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 有显著影响(P< 0.05)。在轻度干旱条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高和增温二 者均未对土壤 MBC、MBN、MBP 含量产生显著影响 (P>0.05);CO<sub>2</sub>浓度升高和增温的交互作用对土壤 MBC 含量有显著影响(P<0.05),但其对土壤 MBN 和 MBP 含量无显著影响(P>0.05);CO<sub>2</sub>浓度升高与 生育期交互作用对土壤 MBP 含量造成显著影响(P <0.05),但对土壤 MBC 和 MBN 含量无显著影响(P >0.05);增温和生育期交互作用对土壤 MBC、MBN、 MBP 含量均有显著影响(P<0.05);CO<sub>2</sub>浓度升高、 增温、生育期的交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含 量均有显著影响(P<0.05)。

## 2.3 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温对不同水分条件下谷子各 生育期地下生物量的影响

由表5可知,与对照(CK)相比,在充分供水条 件下,CO2浓度升高(EC)处理使谷子开花期和开花 后 10 d 的地下生物量增加了 85.71%和 27.38% (P< 0.05),但其对灌浆期和成熟期的地下生物量的影响 不显著(P>0.05)。与 CO,浓度升高(EC)处理相 比,在充分供水条件下,CO,浓度升高和增温4℃的 交互作用(EC+T)使开花期和开花后 10 d 的地下生 物量降低了 15.12% 和 12.44% (P<0.05), 但其对灌 浆期和成熟期的地下生物量影响不显著(P>0.05)。 与CK相比,在充分供水的条件下,CO2浓度升高和 增温4℃的交互作用(EC+T)对各生育期地下生物 量影响不显著(P>0.05)。在充分供水条件下,3种 气候情景(CK、EC、EC+T)下的地下生物量均随谷 子生长发育逐渐累积。在轻度干旱条件下,3种气 候情景间的地下生物量总体上无显著差异(P> 0.05),且其随谷子生长发育无显著变化(P>0.05)。



#### 图 3 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温对谷子各生育期土壤微生物生物量磷(MBP)的影响

Fig.3 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rising on soil microbial biomass phosphorus (MBP) at different millet growth stages

供水条件/%	因子	Μ	IBC	М	BN	М	BP
Water supply condition	Factor	F	Р	F	Р	F	Р
	$CO_2$	22.792	0.041 *	29.845	0.032 *	28.78	0.033 *
	Т	25.162	0.038 *	388.334	0.003 * *	350.554	0.003 * *
18.0	$CO_2 \times T$	36.561	0.026 *	0.254	0.665	0.296	0.641
(70.0% FC)	$CO_2 \times GS$	10.046	0.009 * *	66.743	0.010 *	61.48	0.000 * *
	T×GS	14.150	0.059	1.994	0.216	3.383	0.095
	$CO_2 \times T \times GS$	36.561	0.026 *	21.525	0.001 * *	15.867	0.048 *
	CO <sub>2</sub>	0.319	0.612	7.055	0.077	10.342	0.085
13.0 (50.0% FC)	Т	1.020	0.387	7.569	0.111	2.477	0.256
	$CO_2 \times T$	68.273	0.004 * *	1.801	0.312	5.229	0.15
	$CO_2 \times GS$	1.705	0.235	6.373	0.079	79.655	0.008 * *
	T×GS	8.972	0.005 * *	18.726	0.040 *	49.289	0.009 * *
	CO <sub>2</sub> ×T×GS	4.745	0.030*	46.038	0.012*	141.067	0.001 * *

表4 CO<sub>2</sub>浓度升高、增温、生育期及其交互作用对土壤微生物生物量的影响 Table 4 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration, temperature rising, growth stage and their interaction on soil microbial biomass

注:T-温度,GS-生育期;\* P<0.05,\*\* P<0.01。

Note: T-temperature, GS-growth stage; \* P<0.05, \* \* P<0.01.

#### 表 5 CO,浓度升高和增温对谷子各生育期地下生物量的影响

Table 5 Effects of elevated CO<sub>2</sub> concentration and temperature rising on belowground biomass at different millet growth stages

供水条件/% Water supply condition	气候情景 – Climate scenario	地下生物量 Belowground biomass/g				
		开花期 Anthesis	开花后 10 d 10 d after anthesis	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity	
13.0 (50.0% FC)	СК	2.53±0.32Ba	3.46±0.11Aa	3.19±0.34Aa	3.95±0.31Aa	
	EC	$1.75 \pm 0.19 \mathrm{Bc}$	3.33±0.35Aa	3.05±0.74Aa	3.44±0.84Aa	
	EC+T	2.23±0.18Ba	3.96±0.24Aa	3.39±0.26Aa	3.56±0.55Aa	
18.0 (70.0% FC)	СК	$2.03 \pm 0.19 Bb$	$4.42\pm0.24$ Ab	4.10±0.01Aa	4.75±0.61Aa	
	EC	3.77±0.60Ca	5.63±0.45Aa	4.08±0.34Ba	4.28±0.55Ba	
	EC+T	$3.20 \pm 0.72 \text{Cb}$	$5.08{\pm}0.58{\rm Ab}$	4.31±0.71Ba	4.30±0.31Ba	

注:同一行不同大写字母表示在相同气候情景下不同生育期之间的差异显著(P<0.05);同一列不同小写字母表示相同含水量下同一生育期不同气候情景之间的差异显著(P<0.05)。

Note: Different capital letters in the same row represented significant differences between different growth stages under the same climate scenario at P < 0.05 level; Different lowercase letters in the same column represented significant differences between different climate scenarios in the same growth period under the same water content at P < 0.05 level.

## 3 讨 论

# 3.1 充分供水条件下土壤微生物生物量对 CO<sub>2</sub> 浓度升高和增温的响应

在充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高显著增加谷 子生育期前期土壤 MBC、MBN、MBP含量,这与李奕 罪等<sup>[22]</sup>和 Bhattacharyya 等<sup>[8]</sup>对稻田土壤以及 Jin 等<sup>[23]</sup>对小麦土壤的研究结果相似。本研究中 CO<sub>2</sub> 浓度升高导致谷子开花期和开花后 10 d 的地下生 物量增加,且有研究表明地下生物量增加使作物向 地下分配更多光合产物,增强土壤有机质,为土壤 微生物的分解提供了更多底物<sup>[6,23]</sup>,进而增加土壤 微生物生物量。此外,CO<sub>2</sub>浓度升高会抑制植物的 蒸腾,改善土壤水分状况,提高土壤微生物对有机 质的利用<sup>[24]</sup>;且良好的土壤水分状况会提高磷在土 壤中的扩散率,增加土壤微生物对磷的吸收 利用[25]。

相关研究表明,增温显著降低土壤 MBC、MBN、 MBP 含量<sup>[26-28]</sup>。而本研究中,在土壤充分供水条 件下,增温也显著降低谷子各生育期土壤微生物生 物量,有研究认为这主要是因为增温加快土壤水分 蒸发从而抑制土壤微生物<sup>[5]</sup>,但本研究的土壤含水 量因受人为控制始终处于较为恒定状态,故上述解 释并不适用。对本研究而言,高 CO<sub>2</sub>浓度下作物和 土壤间的养分周转速率加快,作物和土壤微生物对 养分的竞争加剧<sup>[6]</sup>;而已有研究表明增温会直接对 土壤微生物产生生理胁迫,导致土壤微生物对活性 养分的利用效率降低<sup>[18]</sup>,故在高 CO<sub>2</sub>浓度下,增温 导致土壤微生物生物量降低。

3.2 轻度干旱条件下土壤微生物生物量对 CO<sub>2</sub>浓 度升高和增温的响应

与 CO,浓度升高和增温相比,本研究中轻度干

早在轴 1(横坐标轴)和轴 2(纵坐标轴)的贡献率更 高(图 4),这表明轻度干旱对土壤微生物生物量的 影响显著高于 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温,这是由于土壤 水分和土壤微生物的联系十分紧密,如部分获取 C 源的微生物需依靠水分进行活动和底物扩散<sup>[29]</sup>。 此外,干旱导致部分土壤微生物改变自身资源分 配,并产生"休眠现象"来降低自身的代谢和繁殖活 动<sup>[30]</sup>。因此,相较于气候因子(CO<sub>2</sub>和温度)通过作 物途径间接影响土壤微生物生物量,干旱对微生物 的直接胁迫更易对土壤微生物生物量产生影响。

与充分供水相比,轻度干旱显著降低了谷子地下生物量(表5),导致作物向下输送的养分减少,造成土壤微生物可利用基质减少<sup>[31-32]</sup>,故本研究中轻度干旱下土壤微生物生物量对 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温的响应总体上无显著变化,这与 Thakur 等<sup>[18]</sup>和 Li 等<sup>[33]</sup>的研究结果相似。此外,Andresen 等<sup>[34]</sup>认为干旱胁迫环境能激发生态系统的缓冲机制,从而减弱了土壤微生物对气候变化的响应。但目前也存在与本研究相反的结论<sup>[17]</sup>,这可能与植物的物种有关,Xue 等<sup>[10]</sup>发现 CO<sub>2</sub>浓度升高可以缓解干旱对白羊草土壤 MBC 和 MBN 的抑制作用,但对紫花苜蓿无显著影响。



Fig.4 Principal component analysis between soil microbial biomass and environmental factors

## 3.3 CO<sub>2</sub>浓度升高、增温、生育期交互作用对土壤微 生物生物量的影响

在土壤充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高和生育 期的交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量有显著 影响,具体表现为 CO<sub>2</sub>浓度升高对土壤 MBC、MBN、 MBP 的促进作用随谷子生育期呈逐渐降低的趋势, 这可能是因为 CO<sub>2</sub>浓度升高对作物的促进作用会随 作物生育期逐渐减弱<sup>[35]</sup>。Seneweera 等<sup>[36]</sup>和沙霖 楠等<sup>[37]</sup>研究表明, CO<sub>2</sub>浓度升高能够抑制作物叶片 光呼吸从而提高净光合速率,导致根系活力的提 升,但此现象会随着生育期推移而逐渐减弱,这与 本试验的研究结果一致。在土壤充分供水条件下, 增温和生育期的交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量无显著影响,这表明本实验中增温对土壤 MBC、MBN、MBP 含量的影响未随谷子生长发育而 改变。

在充分供水条件下,增温和 CO<sub>2</sub>浓度升高的交 互作用显著增加了谷子开花期和开花后 10 d 土壤 微生物生物量,这表明 CO<sub>2</sub>浓度升高可以显著缓解 生育早期增温对土壤微生物生物量的抑制作用。 这与 Liu 等<sup>[17]</sup>和 Bhattacharyya 等<sup>[8]</sup>对小麦和水稻 的研究成果相似,且他们认为产生这种现象的原因 可能是增温和 CO<sub>2</sub>浓度升高的结合作用导致根系沉 积物、根系分泌物、土壤活性养分的增加。

## 4 结 论

本研究采用盆栽试验,利用人工气候室控制 CO<sub>2</sub>浓度和环境温度,设置了对照(400 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度、22℃环境温度)、CO<sub>2</sub>浓度升高(700 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度、22℃环境温度)、CO<sub>2</sub>浓度升高和 增温(700 µmol · mol<sup>-1</sup> CO<sub>2</sub>浓度、26℃环境温度)3 种气候条件,且每种气候条件均有 2 种土壤水分处 理(充分供水和轻度干旱),分析了 CO<sub>2</sub>浓度升高、 增温及其交互作用对谷子不同生育期土壤微生物 生物量的影响。主要结论如下:

1) 在充分供水条件下, CO<sub>2</sub>浓度升高使土壤 MBC、MBN 和 MBP 含量分别增加了 27.01%~ 102.52%、27.02%~54.60%、74.05%~161.42%(P< 0.05),但其影响程度随着谷子生长而逐渐减弱;高 CO<sub>2</sub>浓度下,增温使各生育期土壤 MBC、MBN、MBP 含量分别降低了 19.77%~28.22%、8.56%~20.24%、 29.54%~39.70%(P<0.05)。

2) 在充分供水的条件下, CO<sub>2</sub>浓度升高和生育期 的交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量有显著影 响; 但增温和生育期的交互作用对土壤 MBC、MBN、 MBP 含量无显著影响; CO<sub>2</sub>浓度升高、增温、生育期的 交互作用对土壤 MBC、MBN、MBP 含量有显著影响, 其表现为 CO<sub>2</sub>浓度升高和增温的交互作用显著增加 了谷子开花期和开花后 10 d 的土壤 MBC 和 MBN 含 量, 二者在开花期的增幅分别为 44.37% 和16.15% (*P*< 0.05),在开花后 10 d 的增幅分别为 45.38% 和 27.18% (P<0.05)。

3) 在轻度干旱条件下, 谷子各生育期的土壤 MBC 和 MBN 含量在 3 种气候情景之间无显著差 异, 而各生育期土壤 MBP 含量无明显变化规律。

4)在3种气候条件下,与充分供水相比,轻度 干旱使开花期、开花后10d、灌浆期土壤MBC和 MBN含量分别降低了14.70%~38.53%和37.06%~ 78.10%(P<0.05),但对土壤MBP含量影响不显著。

5)在充分供水条件下,CO<sub>2</sub>浓度升高使开花期 和开花后 10 d 谷子地下生物量增加了 85.71% 和 27.38%(P<0.05),但对灌浆期和成熟期的地下生物 量影响不显著;与 EC 相比,EC+T 处理使开花期和 开花后 10 d 的地下生物量降低了 15.12% 和 12.44% (P<0.05),但对灌浆期和成熟期的地下生物量影响 不显著。在轻度干旱条件下,3 种气候情景间的地 下生物量总体上无显著差异。

#### 参考文献:

- 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.
- [2] 刘立涛,刘晓洁,伦飞,等.全球气候变化下的中国粮食安全问题研究[J].自然资源学报,2018,33(6):927-939.
  Liu L T, Liu X J, Lun F, et al. Research on China's food security under global climate change background [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(6): 927-939.
- [3] Mooney H, Larigauderie A, Cesario M, et al. Biodiversity, climate change, and ecosystem services [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2009, 1(1): 46-54.
- [4] 许森平,任成杰,张伟,等.土壤微生物生物量碳氮磷与土壤酶化学 计量对气候变化的响应机制[J].应用生态学报,2018,29(7): 2445-2454.

Xu M P, Ren C J, Zhang W, et al. Responses mechanism of CNP stoichiometry of soil microbial biomass and soil enzymes to climate change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(7): 2445-2454.

- [5] Xu W F, Yuan W P. Responses of microbial biomass carbon and nitrogen to experimental warming: a meta-analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 115: 265-274.
- [6] Kuzyakov Y, Horwath W R, Dorodnikov M, et al. Review and synthesis of the effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on soil processes: no changes in pools, but increased fluxes and accelerated cycles [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 128: 66-78.
- [7] An S R, Niu X J, Chen W Y, et al. Mechanism of matrix-bound phosphine production in response to atmospheric elevated CO<sub>2</sub> in paddy soils[J]. Environmental Pollution, 2018, 239: 253-260.
- [8] Bhattacharyya P, Roy K S, Dash P K, et al. Effect of elevated carbon dioxide and temperature on phosphorus uptake in tropical flooded rice (*Oryza sativa* L.) [J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 28-37.
- [9] Niklaus P A, Körner C. Responses of soil microbiota of a late succes-

sional alpine grassland to long term  $CO_2$  enrichment [J]. Plant and Soil, 1996, 184(2): 219-229.

- [10] XUE S, YANG X M, LIU G B, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and drought on the microbial biomass and enzymatic activities in the rhizospheres of two grass species in Chinese loess soil [J]. Geoderma, 2017, 286; 25-34.
- [11] Sun J F, Dai W W, Peng B, et al. Does the accelerated soil N cycling sustain N demand of Quercus mongolica after decade-long elevated CO<sub>2</sub> treatment? [J]. Biogeochemistry, 2018, 139: 197-213.
- [12] Freeman C, Fenner N, Ostle N J, et al. Export of dissolved organic carbon from peatlands under elevated carbon dioxide levels [J]. Nature, 2004, 430(6996): 195-198.
- [13] Fang R, Shi Y, Lu C Y, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> and N fertilization on amount of soil microbial biomass carbon in spring wheat growing season[J]. Procedia Environmental Sciences, 2011, 8: 34-39.
- [14] 李洪杰,刘军伟,杨林,等.海拔梯度模拟气候变暖对高山森林土壤 微生物生物量碳氮磷的影响[J].应用与环境生物学报,2016,22
   (4):599-605.

Li H J, Liu J W, Yang L, et al. Effects of simulated climate warming on soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus of alpine forest [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2016, 22(4): 599-605.

- [15] Fu G, Shen Z X, Zhang X Z, et al. Response of soil microbial biomass to short-term experimental warming in alpine meadow on the Tibetan Plateau[J].Applied Soil Ecology,2012, 61: 158-160.
- [16] Chen J, Luo Y Q, Xia J Y, et al. Stronger warming effects on microbial abundances in colder regions [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 18032.
- [17] Liu Y, Liu X Y, Cheng K, et al. Responses of methanogenic and methanotrophic communities to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature in a paddy field[J]. Frontiers in Microbiology, 2016, 7: 1895.
- [18] Thakur M P, Del real I M, CESARZ S, et al. Soil microbial, nematode, and enzymatic responses to elevated CO<sub>2</sub>, N fertilization, warming, and reduced precipitation [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2019, 135: 184-193.
- [19] Liu F R, Zhang Y M, Luo J X. The effects of experimental warming and CO<sub>2</sub>concentration doubling on soil organic carbon fractions of a montane coniferous forest on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau[J]. European Journal of Forest Research, 2018, 137(2): 211-221.
- [20] 邓振镛,王强,张强,等.中国北方气候暖干化对粮食作物的影响及应对措施[J].生态学报,2010,30(22):6278-6288.
   Deng Z Y, Wang Q, Zhang Q, et al. Impact of climate warming and drying on food crops in northern China and the countermeasures[J].
   Acta EcologicaSinica, 2010, 30(22): 6278-6288.
- [21] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M].北京:气象出版社,2006.
   Wu J S, Lin Q M, Huang QY, et al.Soil microbial biomass measurement method and its application [M].Beijing: China Meteorological-Press, 2006.
- [22] 李奕霏,肖谋良,袁红朝,等-CO<sub>2</sub>倍增对稻田土壤碳氮水解酶活性的影响[J].中国环境科学,2018,38(9):3474-3480.
  Li Y F, Xiao M L, Yuan H C, et al. Effects of doubled concentration of CO<sub>2</sub>on soil hydrolase activities related to turnover of soil C and N in a rice-cropping system[J]. China Environmental Science, 2018,

38(9): 3474-3480.